

Известия высших учебных заведений

ЭЛЕКТРОНИКА 5'2006



Научно-технический журнал

Издается с 1996 г.

Выходит 6 раз в год

СОДЕРЖАНИЕ

Вернер В.Д. Журналу «Известия высших учебных заведений. Электроника» — 10 лет..... 3

Фундаментальные исследования

Горбачевич А.А., Широков А.Е. Метод эффективной массы и поверхностные состояния 7

Технология микроэлектроники

Грибов Б.Г., Лысак Л.В., Мартемьянов В.С. Новый метод очистки кремниевых пластин 15

Тимошенко В.П. Состояние и перспективы развития технологии кремниевых гетеропереходных биполярных транзисторов для СВЧ применений 19

Апрелов С.А., Герасименко Н.Н., Рыбачек Е.Н., Сенков В.М., Пиришин И.В., Турьянский А.Г., Цехош В.И. Двухволновая рентгеновская рефлектометрия пленок металлов и их силицидов на кремнии 27

Микроэлектронные приборы и системы

Орликовский А.А. Кремниевая транзисторная наноэлектроника..... 35

Коркишко Ю.Н., Федоров В.А., Кострицкий С.М., Алкаев А.Н., Прилуцкий В.Е., Пономарев В.Г., Морев И.В., Марчук В.Г., Падерин Е.М. Интерферометрические волоконно-оптические гироскопы с замкнутым контуром обратной связи 45

Зайцев Д.Л., Дудкин П.В., Агафонов В.М. Вихревые флуктуирующие потоки и их вклад в шумы молекулярно-электронных преобразователей 61

Бобрешов А.М., Дыбой А.В., Китаев Ю.И., Нестеренко Ю.Н., Усков Г.К., Обрезан О.И. Исследование обратимых отказов GaAs ПТШ при импульсных перегрузках 69

Учредители:

Министерство
образования и науки
Российской Федерации

Московский
государственный институт
электронной техники
(технический университет)

Главный редактор
В.Д.Вернер

Редакционная коллегия:

Бархоткин В.А.
Быков Д.В.
Грибов Б.Г.
Казённов Г.Г.
Коноплёв Б.Г.
Копяев Ю.В.
Коркишко Ю.Н.
Королёв М.А.
Кубарев Ю.В.
Неволин В.К.
Неволин В.Н.
Петросьянц К.О.
Преснухин Л.Н.
Руденко А.А.
Таиров Ю.М.
Телец В.А.
Тихонов А.Н.
Усанов Д.А.
Чаплыгин Ю.А. (зам. главного редактора)

Адрес редакции: 124498,
Москва, Зеленоград,
проезд 4806, д. 5, МИЭТ
Тел. (495) 534-6205
Факс (495) 530-5429
E-mail: magazine@rnd.miee.ru
<http://www.miet.ru>

Горлов М.И., Смирнов Д.Ю., Ануфриев Д.Л.
Классификация надежности интегральных схем с использованием показателя формы спектра γ 78

Нанотехнология

Максимов С.К. Механизм наноструктурирования нестехиометрических фторидов $Ba_{1-x}La_xF_{2+2x}$ и $Ca_{1-x}La_xF_{2+2x}$ с решеткой на основе CaF_2 83

Белов А.Н., Гаврилов С.А., Путьря М.Г., Шевяков В.И.
Нанотехнологии на основе анодных оксидных материалов..... 93

Схемотехника и проектирование

Стемковский А.Л., Гаврилов С.В., Глебов А.Л.
Статистический подход к временному анализу цифровых схем 99

Петросянец К.О., Торговников Р.А. Сравнительный анализ схемотехнических моделей SiGe гетеропереходного биполярного транзистора 107

Проблемы высшего образования

Усанов Д.А. Школа А.Ф.Иоффе как пример единства науки, образования и производства..... 118

Юбилей

Неустроеву Степану Архиповичу – 80 лет 124

Носову Юрию Романовичу – 75 лет..... 125

Кубареву Юрию Васильевичу – 70 лет 126

Конференции, выставки

Всероссийский конкурс инновационных проектов аспирантов и студентов «Индустрия наносистем и материалы» 2 стр. обложки

Открытие совместной образовательной программы МИЭТ и компании Suporsys 2 стр. обложки

I специализированная выставка научных работ студенческой лаборатории «Фотоника II - VI» 82

Contents 127

Abstracts 128

К сведению авторов 131

Заведующая редакцией
С.Г.Зверева

Редактор
А.В.Тихонова

Научный редактор
С.Г.Зверева

Художественный редактор
А.В.Тихонова

Корректор
Л.Ф.Летунова

Технический редактор
Л.Г.Лосякова

Компьютерный дизайн, верстка
Е.А.Каменская
А.А.Григорашвили
С.Ю.Рыжков

Подписано в печать 18.10.06
Формат бумаги 60x84 1/8.
Печать офсетная
Объем 15,35 усл.печ.л.,
13,8 уч.-изд.л.
Заказ № 193.

Отпечатано
в типографии ИПК МИЭТ
124498, Москва, Зеленоград,
проезд 4806, д. 5, МИЭТ

Свидетельство о регистрации
№ 014134
выдано Комитетом РФ по печати
12.10.95.

Включен в Перечень периодических научных изданий, рекомендуемых для публикации научных работ, отражающих основное научное содержание докторских диссертаций:

Бюллетень ВАК Министерства образования РФ, 2002, № 1.

Журналу "Известия высших учебных заведений. Электроника" — 10 лет

Прошло 10 лет с момента выхода в свет первого номера журнала «Известия высших учебных заведений. Электроника». Для человека 10 лет — пик детства, первый этап становления личности. Для организации или издания 10 лет — зрелый возраст. Определены основные концепции, стиль и направления деятельности и можно говорить о сложившихся традициях.

Широкий спектр научных направлений, объединенных общим термином «электроника», их высочайший темп развития и инновационная направленность определили междисциплинарность содержания номеров нашего журнала. В них нашли свое отражение результаты фундаментальных исследований и конкретных разработок, концептуальных основ и практики организации исследований и образования в области электроники.

В составе редколлегии журнала — ведущие специалисты высшей школы в области электроники члены-корреспонденты РАН Грибов Б.Г., Копаев Ю.В., Преснухин Л.Н., Чаплыгин Ю.А. и другие видные ученые широкого спектра специализации в этой области. Оперативная реакция редколлегии на научную ситуацию в электронике позволяет обсуждать на страницах журнала ряд новых проблем: нанoeлектроника, квантовые компьютеры, микросистемная техника и др.

Авторы статей в журнале — известные ученые, ставшие гордостью российской науки, академики РАН и доктора наук, а также начинающие исследователи, аспиранты и студенты.



Главный редактор
доктор технических наук, профессор
Вернер В.Д.



Заседание редакционной коллегии журнала



Заместитель главного редактора,
чл.-корр. РАН, ректор МИЭТ
Чаплыгин Ю.А.

Стремясь ознакомить наших читателей с многообразием научных идей и исследований в электронике, мы публиковали обзорные статьи по отдельным актуальным проблемам и общему состоянию мировой и российской электроники в данное время.

Особо следует отметить номера журналов, статьи в которых были подготовлены авторами из одного вуза или научной организации. Редколлегия считала, что они служат своеобразным портретом научного коллектива и позволяют судить на их примере об уровне исследований по проблемам электроники в российских вузах и НИИ. Высокие научные достижения по отдельным направлениям были бы невозможны без вклада выдающихся ученых и организаторов, работающих в научных коллективах. Поэтому практически в каждом номере журнала публикуются персоналии, связанные с юбилеями наших знаменитых коллег.

Большое значение редколлегия придает тематическим разделам журнала. С одной стороны, их стабильность определяет лицо журнала, делает его узнаваемым для читателя. Но меняется сама электроника и, следовательно, должна меняться и рубрикация. И только после всестороннего обсуждения редколлегия меняет название разделов. В 1996 году было 8 рубрик. С 1997 года появились новые рубрики: биомедицинская электроника (1997 г.); технология микроэлектроники, микросистемная техника (2000 г.); информационные технологии (2002 г.); инновационная деятельность вузов (2003 г.); нанотехнология (2005 г.). Заменены рубрики «Аппаратура и измерительная техника» на «Методы и техника измерений» (1997 г.); «Микроэлектроника и полупроводниковые приборы» на «Микроэлектронные приборы и системы» (2006 г.).

Немного статистики. За 10 лет подготовлено и опубликовано 13 специальных выпусков и тематических номеров, 11 обзоров, свыше 60 информационных материалов с конференций и выставок, 22 статьи по проблемам высшего образования.



Начальник издательско-полиграфического
комплекса МИЭТ Руденко А.А.
и заведующая редакцией Зверева С.Г.



Младший редактор Плюснина А.Л. (слева)
и ведущий инженер Бенедиктова А.З.



Ведущий редактор
Тихонова А.В.



Технический редактор
Лосякова Л.Г.



Корректор Летунова Л.Ф.

Наш журнал распространяется практически во всех регионах России, в странах СНГ и ближнего зарубежья. Около 30 профильных вузов получают наш журнал. Журнал получил высокую оценку специалистов, работающих в промышленности. С целью обеспечения большей доступности к статьям подготовлена электронная версия журнала.

Я сознательно не указал имена конкретных авторов, организаций и структур, благодаря которым наш журнал состоялся. Именно коллективная, дружная профессиональная работа авторов, рецензентов, редколлегии, редакции и издательства обеспечила его востребованность читателем.



Отдел компьютерной верстки
и дизайна (слева направо):
начальник отдела Рыжков С.Ю.,
Рыжков А.Ю., Каменская Е.А.



Сотрудники типографии МИЭТ:
начальник типографии Грачёв К.Н., Абрамкин Р.А.,
Михальская А.Я. (внизу слева направо); Перстнёва С.Л.,
Куликовская И.Б., Тимофеев Н.Б., Блинова Л.И.
(вверху слева направо)

Поздравляем наших читателей и всех кто причастен к созданию и деятельности журнала с его юбилеем.

Желаем Вам, дорогие друзья, крепкого здоровья, творческих успехов и удачи в Вашем труде!

Главный редактор

В.Вернер



Метод эффективной массы и поверхностные состояния

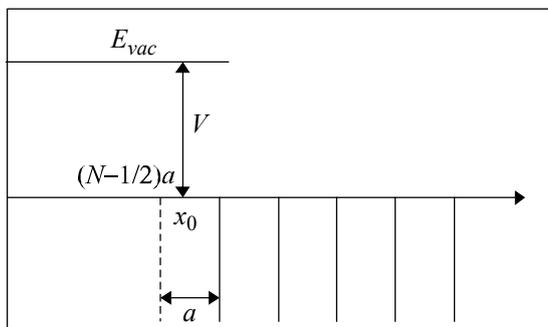
А.А.Горбацевич, А.Е.Широков

**Московский государственный институт электронной техники
(технический университет)**

Рассмотрена проблема описания поверхностных состояний в континуальном приближении. С помощью процедуры экстракции параметров граничного условия из данных рассеяния установлен вид граничных условий для огибающей на поверхности. Полученное граничное условие описывает возможность обращения на границе с бесконечно высоким барьером в нуль не самой огибающей, а ее производной. Показано, что для описания поверхностных состояний необходим выход за рамки однозонного приближения.

Традиционная интерпретация связывает существование таммовских поверхностных состояний (ПС) [1] с наличием разрыва периодического кристаллического потенциала на границе, т.е. предполагает, что для описания ПС необходим учет дискретной атомной структуры. В методе эффективной массы (МЭМ), или методе огибающей, кристаллический потенциал заменяется эффективной непрерывной (континуальной) средой. Таким образом, можно ожидать, что традиционный МЭМ не описывает ПС. Между тем еще в ранней работе Шокли указывалось [2], что рассмотренная Таммом ситуация с разрывом потенциала в модели Кронига–Пенни и специальным выбором положения границы предполагает наличие на границе кристалла потенциальной ямы. В случае, если интерпретация Шокли верна, такая модель должна допускать существование ПС и в континуальном (МЭМ) пределе. Однако в стандартном МЭМ, предполагающем обращение огибающей волновой функции на границе с вакуумом в нуль, ПС отсутствуют. Другая проблема стандартного МЭМ связана с тем, что, как показывает точное решение для квантовой ямы с бесконечно высокими стенками [3], огибающая волновая функция вовсе не обязательно обращается в нуль на границе с вакуумом, представляющей собой бесконечно высокий потенциальный барьер (при этом истинная микроскопическая волновая функция обращается на границе в нуль всегда).

В последнее время МЭМ широко используется в многочисленных приложениях физики полупроводниковых структур в микро- и наноэлектронике и оптоэлектронике. Однако результаты работы [3] ставят под сомнение универсальность концепции огибающей и справедливость МЭМ в целом при описании гетероструктур. В настоящей работе предложено решение данных проблем МЭМ путем применения к описанию поверхности обобщенных граничных условий (ГУ), которые допускают наличие на



Поверхность кристалла в модели Кронига–Пенни

поверхности возмущения, имеющего вид потенциальной ямы, и не обязательно требуют обращения в нуль на поверхности производной огибающей. Для строгого вывода ГУ использована недавно предложенная процедура экстракции параметров ГУ для огибающей из данных рассеяния [4, 5]. Данная процедура впервые применена к анализу поверхности. Показано, что ГУ для огибающей могут значительно отличаться от стандартного вида и огибающая не обязательно обращается в нуль. При этом ПС,

возникающие в модели Тамма, не сводятся к картине локализованных состояний, образующихся в асимметричной потенциальной яме (в которой вакуум играет роль наиболее высокого потенциального барьера), как это утверждалось в работе [2]. Таким образом, в рамках единой схемы впервые удалось согласовать результаты точного микроскопического и огрубленного континуального (МЭМ) подходов.

Рассмотрим полуограниченный кристалл, описываемый одномерной моделью Кронига–Пенни [1]. Гамильтониан модели имеет вид

$$\hat{H} = \frac{p^2}{2m_0} + U(x), \quad (1)$$

$$U(x) = \begin{cases} \varepsilon \sum_{n=0}^{\infty} \delta[x - (Na + a/2) + na], & x \geq x_0, \quad n = 0, 1, 2, 3, \dots \\ V, & x < x_0. \end{cases}$$

Здесь ε – мощность δ -барьеров; a – постоянная решетки кристалла; $x_0 = \left(N - \frac{1}{2}\right)a + \Delta \cdot a$; m_0 – масса свободного электрона; x_0 – математическая граница интерфейса; Na – середина последней ячейки кристалла, граничащей с поверхностью (рисунок).

Данная модель была рассмотрена Таммом в предположении, что граница расположена точно на месте, где в объеме был бы расположен δ -барьер, т.е. при $\Delta = a/2$. В объеме материала решение уравнения Шредингера с гамильтонианом (1) имеет вид

$$\Psi_{qn}(x) = e^{iqna} \left(a_q e^{ik(x-na)} \pm b_q e^{-ik(x-na)} \right), \quad (2)$$

$$a_q = T(q)b_q, \quad T(q) = \frac{e^{i(q+k)a} - 1}{e^{ika} - e^{iqa}},$$

где q – квазиимпульс; $k = \sqrt{\frac{2m_0 E}{\hbar^2}}$; n – номер ячейки кристалла. Знак « \pm » соответствует $qa = 0$ и $qa = \pi$. Энергетические уровни описываются дисперсионным уравнением:

$$\cos(qa) = \cos(ka) + \frac{Q}{ka} \sin(ka), \quad Q = \frac{m_0 \varepsilon a}{\hbar^2}.$$

Структура спектра модели Кронига–Пенни хорошо известна. Спектр представляет собой совокупность разрешенных и запрещенных зон, при этом по мере роста номера

зоны запрещенные зоны суживаются, а разрешенные приближаются друг к другу. Например, при $qa = 0$ края зон E_n располагаются в следующих точках: $ka = 2\pi n$ (максимумы энергии) и $ka = \eta$, где η – решение уравнения $\tan\left(\frac{\eta}{2}\right) = -\frac{\eta}{Qa}$ (минимумы энергии).

Поверхностные состояния описываются экспоненциально затухающими по обе стороны от поверхности функциями: $\Psi_{\text{в}}(x) \propto e^{-\text{в}na}$ – справа от поверхности, $\Psi(x) \propto e^{\kappa x}$ – слева. Здесь

$$\text{в} = \sqrt{\frac{2m^*(E_n - E)}{\hbar^2}}, \quad \kappa = \sqrt{\frac{2m_0(V - E)}{\hbar^2}},$$

где m^* – эффективная масса у дна зоны E_n . Истинная волновая функция, являющаяся решением уравнения Шредингера с гамильтонианом (1), должна удовлетворять стандартным ГУ (СГУ), требующим непрерывности волновой функции и ее производной на границе. СГУ автоматически обеспечивают непрерывность тока на гетеропереходе (масса электрона по обе стороны поверхности равна массе свободного электрона). Применив СГУ к волновой функции (2), получим уравнение для определения уровней энергии поверхностных состояний:

$$\xi \text{ctg}(\xi) = \frac{U^2}{2Q} \left(\cos(\xi\Delta) - \frac{\sqrt{U^2 - \xi^2}}{\xi} \sin(\xi\Delta) \right)^{-2} - \frac{\sqrt{U^2 - \xi^2} \cos(\xi\Delta) + \xi \sin(\xi\Delta)}{\cos(\xi\Delta) - \sqrt{U^2 - \xi^2} \sin(\xi\Delta)}, \quad (3)$$

$$\xi = ka, \quad U = a\sqrt{2m_0V} / \hbar^2.$$

Если считать, что граница кристалла с вакуумом расположена, как в [1], в точке $N - a/2$, то $\Delta = 0$ и дисперсионное уравнение принимает вид [1]

$$\xi \text{ctg}(\xi) = \frac{U^2}{2Q} - \sqrt{U^2 - \xi^2}. \quad (4)$$

Как следует из (4), поверхностные состояния для первой запрещенной зоны существуют только при не очень больших значениях U , что послужило основой интерпретации ПС, полученных Таммом, как возникающих в случае, если поверхность играет роль слабого возмущения [2]. Для более высоких запрещенных зон, чем первая, в силу того, что левая часть (4) обращается в бесконечность в точках $\xi = n\pi$, ПС в модели Тамма возникают при любом сколь угодно высоком барьере. Шокли обратил внимание, что если выбирать границу кристалла не по границе элементарной ячейки, которая в модели Кронига–Пенни естественно проходит посередине между δ -функционными потенциалами, то такой выбор в континуальном приближении соответствует появлению потенциальной ямы на границе. Появляющиеся при этом поверхностные состояния следует трактовать как локализованные состояния, возникающие в асимметричной квантовой яме [6], а не как состояния, связанные с нарушением трансляционной инвариантности кристаллической решетки, которая в континуальном пределе уже не фигурирует явно. Вопрос о соответствии микроскопического и континуального (на языке огибающей) описаний достаточно нетривиален даже на примере простейшей модели Кронига–Пенни. Авторы [3] рассмотрели квантовую яму в модели (1) с бесконечно

высокими стенками $V \rightarrow \infty$ и показали, что поведение огибающей микроскопического решения в целом соответствует ожидаемому обращению волновой функции в нуль на границе с бесконечно высоким барьером. Но для некоторых выделенных значений координаты границы характер поведения огибающей резко меняется, и в нуль обращается не значение самой огибающей, а значение ее производной.

Для выяснения взаимосвязи задач описания поверхности в дискретной и континуальной (МЭМ) моделях кристалла воспользуемся процедурой экстракции параметров граничного условия из данных микроскопической модели, предложенной для определения параметров обобщенного ГУ в полупроводниковых гетероструктурах из данных микроскопической модели в работах [4, 5]. Процедура основана на сравнении коэффициентов разложений в ряд по волновому вектору выражений для данных рассеяния (коэффициентов отражения r и прохождения t) на гетеропереходе, вычисленных в микроскопической и континуальной моделях.

В континуальном приближении (МЭМ) ГУ общего вида в однозонном приближении записываются как

$$\begin{pmatrix} \varphi \\ \nabla\varphi \end{pmatrix}_+ = \hat{T} \begin{pmatrix} \varphi \\ \nabla\varphi \end{pmatrix}_- = \begin{pmatrix} T_{11} & T_{12} \\ T_{21} & T_{22} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \varphi \\ \nabla\varphi \end{pmatrix}_-. \quad (5)$$

Здесь недиагональный параметр T_{21} можно интерпретировать как эффект, связанный с наличием δ -функционального потенциала на границе [7]. Стандартные ГУ описываются диагональной матрицей переноса.

Рассмотрим область энергий в кристалле вблизи края зоны $qa = 0$ или $qa = \pi$, соответствующую приближению МЭМ. При этом граница с вакуумом представляет собой потенциальный барьер высотой $V = E_{vac} - E_{c,v}$, где E_{vac} – энергия электрона в вакууме; $E_{c,v}$ – край зоны проводимости или валентной зоны. В отличие от обычной ситуации в полупроводниковых гетероструктурах, где характерный волновой вектор состояний также должен удовлетворять условию применимости МЭМ, в рассматриваемой ситуации высота барьера может превышать как ширину энергетической зоны, так и расстояние до других зон, а параметр k может быть не мал даже по сравнению с размером зоны Бриллюэна в кристалле. Поэтому вопрос о возможности использования ГУ вида (5) в случае, когда слева от границы имеется огибающая, а справа – точная волновая функция, не очевиден. Однако в однозонном приближении точный (квадратичный) вид закона дисперсии электрона в вакууме совпадает с видом закона дисперсии для носителей, описываемых на языке огибающей, отличаясь лишь величиной массы (фактически в силу того, что постоянная решетки в вакууме $a = 0$, условие применимости МЭМ $ka \ll 1$ выполняется для всех энергий). Таким образом, структура гамильтониана не изменяется при переходе через границу и вывод ГУ (5), основанный на условии эрмитовости гамильтониана [7], применим и для рассматриваемой модели. Параметры ГУ при этом в силу условия эрмитовости задачи [7, 8] не зависят от энергии носителей вблизи края зоны, но зависят от положения и типа края зоны. В случае полупроводниковых гетероструктур при анализе данных рассеяния имеется большое число степеней свободы. Для электронов, падающих на гетеропереход вблизи основания потенциального барьера, вблизи его вершины, а также для электронов, падающих на барьер справа или слева, имеем разную структуру выражений, описывающих разложения данных рассеяния в ряд по степеням волнового вектора и, соответственно, получаем различные

независимые уравнения для определения параметров ГУ. В результате удастся определить не только элементы матрицы переноса, но и в отдельных случаях само положение гетероперехода в элементарной ячейке. В случае поверхности применимость данной процедуры ограничена тем, что в задаче имеется только один малый параметр $q/\kappa \ll 1$, где q – волновой вектор электронов вблизи дна зоны, κ – показатель затухания волновой функции в вакууме. Кроме того, коэффициент прохождения равен нулю и существует единственная постановка задачи рассеяния – для волны, падающей справа. Тем не менее и в этой задаче процедура экстракции позволяет определить некоторые элементы матрицы переноса. Знания этих элементов достаточно, в частности, для исследования вопроса о природе поверхностных состояний.

Рассмотрим в континуальной модели волну, падающую на границу справа

$$\Psi = \begin{cases} e^{-iq(x-\varphi_1)} + r e^{iq(x-\varphi_1)}, \\ A e^{\kappa(x-\varphi_2)}. \end{cases}$$

Сшивая решения справа и слева от гетероперехода с помощью обобщенного ГУ (5), получим для коэффициента отражения следующее выражение:

$$r = e^{-2iq(x_0-\varphi)} \frac{qT_{11} - i\kappa T_{22} - iT_{21} + q\kappa T_{12}}{qT_{11} + i\kappa T_{22} + iT_{21} + q\kappa T_{12}}. \quad (6)$$

Здесь φ – фазовый сдвиг огибающей волновой функции справа от гетероперехода. Необходимость рассмотрения разложения данных рассеяния в ряд по степеням волнового вектора диктуется тем, что аналогичное (6) выражение для данных рассеяния получается не точно, а в результате отбрасывания квадратичных и более высокой степени по волновому вектору членов. При этом линейные и перекрестные по волновым векторам члены q и κ оказываются определены неоднозначно. Неоднозначность снимается при переходе к разложению в ряд по степеням волнового вектора. В рассматриваемом случае малым можно считать только волновой вектор электрона в кристалле q и, как уже отмечалось, число уравнений для определения параметров ГУ уменьшается. Но так как волновой вектор электрона в вакууме κ входит в микроскопические выражения точно, неоднозначность в выражениях, содержащих вектор κ , отсутствует. Соответственно параметры, входящие в конструкции, содержащие только κ (но не q), можно определить прямым сравнением выражений в микроскопической и континуальной моделях.

Разложение коэффициента отражения в континуальной модели в ряд по степеням q записывается следующим образом:

$$r \approx - \left[1 + 2iq \frac{T_{11} + (x_0 - \varphi_1)T_{21} + \kappa(T_{12} + (x_0 - \varphi_1)T_{22})}{T_{21} + \kappa T_{22}} + \dots \right]. \quad (7)$$

Пусть соответствующее выражение в микроскопической модели имеет вид

$$r \approx - \left[1 + 2iq \frac{A + \kappa B}{C + \kappa D} + \dots \right], \quad (8)$$

где A, B, C и D – коэффициенты, выраженные через параметры микроскопической модели. Из сравнения (7) и (8) получаем

$$T_{21} \propto C \text{ и } T_{22} \propto D. \quad (9)$$

Остальные параметры ГУ в общем случае остаются неопределенными. Знак пропорциональности в (9) означает, что данная процедура позволяет определить элементы матрицы переноса T_{21} и T_{22} с точностью до общего множителя, на который можно одновременно умножить числитель и знаменатель выражения (8). Однако полученной информации достаточно для анализа некоторых задач, например задачи о ПС.

Рассмотрим задачу рассеяния в микроскопической модели (1). Волновая функция, описывающая плоскую волну, падающую на поверхность, будет иметь вид

$$\Psi(x) = \begin{cases} \Psi_{-q}(x) + r\Psi_{+q}(x), & x \geq x_0, \\ tAe^{\kappa(x-x_0)}, & x < x_0. \end{cases}$$

С помощью СГУ для коэффициента отражения r , используя (2), можно получить

$$r = e^{-2iq(N-1/2)a} \frac{-2i \sin\left(\frac{\xi}{2}\right) \sin\left(\xi\left(\Delta - \frac{1}{2}\right)\right) + 2i \frac{\kappa}{k} \sin\left(\frac{\xi}{2}\right) \cos\left(\xi\left(\Delta - \frac{1}{2}\right)\right) - qa \cos(k\Delta) + \frac{q\kappa a}{k} \sin(k\Delta)}{2i \sin\left(\frac{\xi}{2}\right) \sin\left(\xi\left(\Delta - \frac{1}{2}\right)\right) - 2i \frac{\kappa}{k} \sin\left(\frac{\xi}{2}\right) \cos\left(\xi\left(\Delta - \frac{1}{2}\right)\right) - qa \cos(k\Delta) + \frac{q\kappa a}{k} \sin(k\Delta)}. \quad (10)$$

Это выражение справедливо для состояний вблизи дна зоны при $qa = 0$ (см. (2)). Тогда из (10) для коэффициентов разложения в (8) получим следующие выражения:

$$\begin{aligned} C &\propto \sin(\xi/2) \sin(\xi(\Delta - 1/2)) \propto T_{21}, \\ D &\propto -\sin(\xi/2) \frac{1}{\xi} \cos(\xi(\Delta - 1/2)) \propto T_{22}. \end{aligned} \quad (11)$$

Заметим, что при $\Delta = 1/2$ недиагональный элемент матрицы переноса T_{21} тождественно обращается в нуль и именно такое положение границы выбрано Шокли в [2].

В работе [7] получено условие существования ПС на потенциальном барьере, описываемом в рамках МЭМ с обобщенными ГУ (6):

$$-\frac{T_{21}}{T_{22}} > \kappa. \quad (12)$$

Такие ПС соответствуют случаю $T_{21} < 0$, т.е. наличию на границе δ -функционной ямы, при этом они возникают вблизи края запрещенной зоны. Нетрудно, однако, убедиться, что для малых q , соответствующих условию применимости однозонного МЭМ для описания кристалла, условие разрешимости (3) в общем случае не совпадает с условием существования ПС в континуальной модели с обобщенным ГУ (12), если в качестве параметров ГУ использовать полученные из процедуры экстракции выражения (11). Действительно, как показывает анализ, вблизи края запрещенной зоны (3) спектр энергий ПС описывается следующим уравнением:

$$\begin{aligned} \text{sh}(\mu) &= -\frac{Q}{\xi} \sin(\xi) - \frac{(\kappa/k) \cos(\xi\Delta) + \sin(\xi\Delta)}{\cos(\xi\Delta) - (\kappa/k) \sin(\xi\Delta)} \sin(\xi), \\ \mu &= -iqa. \end{aligned} \quad (13)$$

Поскольку вблизи края зоны $\xi \propto \mu^2$ (МЭМ), то условие разрешимости уравнения (13) требует, чтобы знаменатель во втором члене в правой части (13) был мал

($\infty \mu$). В общем случае условие обращения в нуль знаменателя в (13) не совпадает с условием (12), (11). Следовательно, однозонное приближение (5) неприменимо к описанию ПС. Действительно, наряду с состояниями минимума разрешенной зоны (условно – зоны проводимости) с положительной эффективной массы следует также учитывать состояния нижней зоны (условно – валентной зоны) с отрицательной массой. Отдельно рассмотренная валентная зона образует с вакуумным потенциальным барьером так называемый инверсный контакт, на котором изменяется знак массы [10]. Как известно, на инверсном контакте всегда имеются локализованные состояния, расположенные в глубине запрещенной зоны. Эти состояния неизбежно будут взаимодействовать с локализованными состояниями зоны проводимости, что и приводит к принципиальной невозможности описать ПС в однозонном приближении.

Необходимость учета взаимодействия зон при описании ПС не нарушает применимости однозонного МЭМ (5) для описания состояний вблизи края зоны внутри зоны. Рассмотрим случай бесконечно высокого барьера на границе [3]. Традиционное поведение огибающей, связанное с обращением на границе в нуль, соответствует коэффициенту отражения $r = -1$ (в системе координат, связанной с поверхностью). Однако, как отмечено в [4] и как следует из (7), в случае бесконечно высокого барьера ($\kappa \rightarrow \infty$) при равенстве нулю диагонального элемента матрицы переноса T_{22} коэффициент отражения $r = +1$. На границе при этом обращается в нуль не волновая функция, а ее производная, что и получили авторы работы [3]. Именно такая ситуация имеет место в модели Кронига–Пенни (1) при $\cos(\xi(\Delta - 1/2)) = 0$ (в случае дна зоны, расположенного при $qa = \pi$, $T_{22} = 0$ при $\sin(\xi(\Delta - 1/2)) = 0$). Таким образом, модель с обобщенными ГУ дает объяснение аномальному поведению огибающей на границе с бесконечно высоким барьером.

В заключение отметим, что в настоящей работе впервые применена процедура экстракции параметров ГУ в МЭМ из данных рассеяния, рассчитанных в микроскопической модели для описания поверхности. Этот подход позволил установить взаимосвязь положения физической границы кристалла в микроскопической модели и параметров ГУ. Показано, что практически во всех случаях, за исключением выделенных дискретных значений, положения границы ГУ в однозонном приближении содержат недиагональный член, перепутывающий значения огибающей и ее производной на границе. Такие члены, как известно [7, 8], описывают локализованный на границе потенциал, имеющий вид потенциальной ямы или потенциального барьера. Если потенциальная яма достаточно глубока, то она может приводить к появлению локализованных состояний. Однако наряду с состоянием, отщепляющимся от зоны проводимости, необходимо также учитывать состояния, сформированные на инверсном контакте, образованном валентной зоной и вакуумным потенциальным барьером, которые, по определению, находятся глубоко в запрещенной зоне и взаимодействуют с состояниями зоны проводимости. Поэтому задача о ПС в континуальном приближении представляет собой принципиально многозонную задачу и не может быть сведена к простой картине локализованного состояния, возникающего в асимметричной квантовой яме.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ.

Литература

1. **Tamm I.E.** Über eine mögliche art der electronenbindung an kristalloberflächen // Phys. Zs. Sowjetunion. – 1932. – Vol. 1, N 6. – S. 733–746.
2. **Schokely W.** On the surface states associated with a periodic potential // Phys. Rev. – 1939 – Vol. 56. – P. 317–323.
3. **Pedersen F.B., Hemmer P.S.** Sensitivity of wave-function envelopes upon interface position: Semiconductor-insulator boundary // Phys.Rev.B. – 1994. – Vol. 50, N 11. – P. 7724–7732.
4. **Gorbatsevich A.A.** Microscopic structure of heterointerface and envelope function boundary conditions / Proc. of 11-th Int. Symp. Nanostructures: Physics and Technology (St. Petersburg, Russia, June 23-28-2003). – 2003. – P. 81, 82.
5. **Горбацевич А.А., Жабицкий О.В.** Микроскопическая теория симметричных гетеропереходов // Изв. вузов. Электроника. – 2005. – № 2. – С. 3–11.
6. **Галицкий В.М., Карнаков Б.М., Козан В.И.** Задачи по квантовой механике. – М.: УРСС, 2001. – Ч. 1. – 304 с.
7. **Zhu Q.-G., Kroemer H.** Interface connection rules for effective-mass wave function at an abrupt heterojunction between two different semiconductors // Phys. Rev. B. – 1983. – Vol. 27, N 6. – P. 3519–3527.
8. **Tokatly I.V., Tsibizov A.G., Gorbatsevich A.A.** Interface electronic states and boundary conditions for envelope functions // Phys. Rev. B. – 2002. – Vol. 65, N 16. – P. 165328 (1-10).
9. **Rodina A. V., Alekseev A. Yu., Efros et al.** General boundary conditions for the envelope function in the multiband k \cdot p-model // Phys. Rev. B. – 2002. – Vol. 65, N 12. – P. 125302 (1-12).
10. **Волков Б.А., Панкратов О.А.** Безмассовые двумерные электроны в инверсионном контакте // Письма в ЖЭТФ. – 1985. – Т. 42. – № 4. – С. 145–147.

Горбацевич Александр Алексеевич – доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой квантовой физики и наноэлектроники МИЭТ. *Область научных интересов:* физика твердого тела, наноэлектроника.

Широков Александр Евгеньевич – аспирант, ассистент кафедры квантовой физики и наноэлектроники МИЭТ. *Область научных интересов:* теория твердого тела, теория конденсированного состояния, математическая физика.

Новый метод очистки кремниевых пластин

Б.Г.Грибов

ФГУП ГНИИ особоочистых материалов (г. Москва)

Л.В.Лысак, В.С.Мартемьянов

ОАО «Ангстрем» (г. Москва)

Разработан новый экологически безопасный состав для очистки поверхности материалов, применяемых в электронной промышленности. Показана эффективность и экономичность его применения в производстве интегральных схем.

В производстве интегральных схем определяющее значение имеет чистота применяемых реактивов и поверхности кремниевых пластин. Требования к чистоте используемых материалов резко возрастают при переходе к субмикронным размерам элементов и находятся на уровне $1 \cdot 10^{-6} - 1 \cdot 10^{-9}$ ат.% по микропримесям.

В процессе изготовления интегральных схем кремниевые пластины претерпевают многочисленные технологические операции, при проведении которых возможно загрязнение поверхности пластин. Основными источниками загрязнения являются применяемые реактивы, окружающая среда и диффузия микропримесей из кремния к поверхности при высокотемпературных процессах. Для устранения возможной диффузии микропримесей к поверхности используется монокристаллический кремний высокой чистоты и создается внутренний и внешний геттер. Основной проблемой в очистке поверхности кремниевых пластин является удаление загрязнений после каждой технологической операции.

Существуют многочисленные методы очистки полупроводниковых кремниевых пластин. Наиболее распространен химический способ с применением смеси Каро (смесь концентрированной серной кислоты и пероксида водорода). Основным недостатком этой технологии является экологическая и техническая опасность работы с концентрированными сильными кислотами, необходимость нейтрализации большого количества кислотных стоков.

Механизм очистки поверхности с использованием окислительно-кислотных реагентов заключается в окислении и растворении загрязнений, находящихся на поверхности. В результате устанавливается равновесие между растворенными примесями и примесями, адсорбированными на поверхности. Чтобы сдвинуть установившееся равновесие и удалить примеси с поверхности, необходимо большое количество обычно применяемых растворов, например смеси Каро. Поскольку после растворения основные загрязнения поверхности пластин представляют собой адсорбированные ионы металлов, сдвиг в сторону жидкой фазы без увеличения ее объема можно осуществить путем связывания ионов металлов в прочные комплексы с помощью растворенного в жидкой фазе комплексообразователя. Для эффективного удаления ионов металлов с поверхности энергия связи ион-комплексообразователь должна быть как минимум на порядок выше энергии адсорбции

иона на поверхности пластины. Такой энергией обладают хелатные комплексы металлов, в которых металл связан не только валентной, но и донорно-акцепторной связью.

Поэтому для эффективной очистки поверхности полупроводниковых пластин целесообразно синтезировать такое вещество, в котором сочетаются функции минеральной кислоты, переводящей металлсодержащие загрязнения в катионо-растворимое состояние, и функции комплексообразователя. Возможность варьирования концентрацией и температурой позволяет оптимизировать условия применения этого реагента в качестве универсального средства для очистки полупроводниковых пластин.

Для исследования выбраны непредельные дикарбоновые кислоты и их ангидриды. Эти кислоты являются наиболее перспективными с точки зрения синтеза потенциальных очистителей, так как помимо наличия кислотных свойств обладают способностью образовывать комплексы и хелаты. В качестве дикарбоновых кислот использованы малеиновая и фумаровая кислоты, а также ангидрид малеиновой кислоты. Введение в органические кислоты сульфогруппы увеличивает силу кислот, что позволяет легче растворить соли и окислы различных металлов и путем образования комплексов (хелатов) с ионами металлов необратимо удалить металлсодержащие загрязнения с поверхности кремниевых пластин.

Наилучшие результаты получены при использовании в качестве исходного вещества малеинового ангидрида. Синтез сульфомалеинового ангидрида осуществлялся следующим образом [1, 2]. В реактор, снабженный механической мешалкой, обратным холодильником, термометром и системой улавливания паров серного ангидрида, загружают малеиновый ангидрид и постепенно при перемешивании и охлаждении вводят 60%-ный раствор олеума. Затем реакционную массу при перемешивании нагревают до 60–70 °С, выдерживают при этой температуре в течение 10–12 ч, после чего охлаждают до комнатной температуры и сливают в чистые сухие бутылки. Полученный таким образом органо-минеральный очиститель (ОМО) представляет собой слегка окрашенную жидкость без запаха 4-го класса токсичности. Разработаны технические условия продукта, отвечающие требованиям чистоты для микроэлектронной технологии (ТУ 2332-001-11478118-00).

При химической отмывке пластин по сравнению с смесью Каро ОМО расходуется меньше, поскольку эффективно работает в растворах 2–4%-ной концентрации и может быть многократно использован в рецикле с фильтрацией.

На предприятиях электронной промышленности проведена массовая апробация эффективности 2%-го раствора ОМО в технологической операции химической обработки пластин в сравнении со штатным для этой операции средством – смесью Каро – на изделиях общего применения и двойного назначения. В табл.1 приведены результаты сравнительных испытаний раствора ОМО и смеси Каро при химической обработке пластин. Как видно из табл.1, на двух партиях преимущество за стандартной технологией, а на двух

Таблица 1

Результаты сравнительных испытаний раствора ОМО и смеси Каро при химической обработке пластин

Параметр	Партия 1		Партия 2		Партия 3		Партия 4	
	ОМО	Смесь Каро						
Количество годных кристаллов	3396	2810	3842	3213	2907	3316	2799	2135
Количество пластин	24	22	23	20	21	22	18	13
Средний съём n	141,5	127,7	167	160,6	138,4	150,7	155,5	164,2
$\Delta = n_{\text{ОМО}} - n_{\text{Каро}}$	13,8		6,4		-12,3		-8,7	
Сигма	±30,3	±30,1	±26,8	±20,9	±30,0	±26,4	±18,9	±26,0

других – за экспериментальной. В то же время разница среднего съема Δ между стандартной (смесь Каро) и испытуемой (ОМО) технологиями для всех партий лежит в пределах среднеквадратичной ошибки определения съема, т.е. не является статистически значимой. Среднеарифметическое значение Δ , рассчитанное усреднением съема по всем 4 партиям, равняется 1,5 кристалла на пластину. При этом среднеквадратичное отклонение в 17 раз превышает разницу между средними съемами с пластин Δ , прошедших разные процессы химической отмывки. Это означает, что статистически значимой разницы между двумя технологическими процессами нет.

Анализ выхода годных пластин по замерам электрофизических параметров показывает, что не удовлетворяют требованиям 11 пластин, прошедших обработку в смеси Каро, и одна пластина, обработанная в ОМО (табл.2). При этом 9 пластин партии 4, обработанных в смеси Каро, имеют отклонение по пороговому напряжению паразитного транзистора, что может быть связано с отклонением в технологии процесса химической обработки. Две пластины, обработанные в смеси Каро, и одна пластина, обработанная в ОМО, имеют отклонение в сопротивлении контакта, что никак не связано с процессом химической обработки. Других значимых различий в электрофизических параметрах между двумя группами пластин нет.

Таблица 2

Выход годных пластин по замерам электрофизических параметров

Параметр	Годные пластины		Процент годных пластин	
	ОМО	Смесь Каро	ОМО	Смесь Каро
V_{tp} , В	87	87	100	100
$I_d O_p$, мкА	87	87	100	100
V_{bp} , В	87	87	100	100
V_{tn} , В	87	87	100	100
$I_d O_n$, мкА	87	87	100	100
V_{bn} , В	87	87	100	100
$V_{pp Al}$, В	87	78	100	89
$V_{bpp Al}$, В	87	87	100	100
$V_{tn Si}$, В	87	87	100	100
$V_{bn Si}$, В	87	87	100	100
$R_{s Si_n}$, Ом/□	87	87	100	100
$R_{s n+}$, Ом/□	87	87	100	100
$R_{s p+}$, Ом/□	87	87	100	100
R_{s-Well} , Ом/□	87	87	100	100
R_{Al-n+} , Ом/ контакт	86	85	98	97
R_{Al-p+} , Ом/ контакт	87	87	100	100
R_{Al-Si_n} , Ом/ контакт	87	87	100	100

Примечание. V_t – пороговое напряжение; V_b – пробивное напряжение; $I_d O$ – сила тока «сток–исток»; p – параметр p -канального транзистора; n – параметр n -канального транзистора; + – сильно легированный участок; R – сопротивление контакта; R_s – поверхностное сопротивление; R_{s-Well} – поверхностное сопротивление кармана.

Последующие испытания опытных кристаллов в составе микросхемы на безотказность показали полное соответствие требованиям стандарта на данные испытания.

Таким образом, при практически одинаковом съеме и сохранении электрофизических параметров изделия заменой смеси Каро на 2%-ный раствор ОМО в процессе химической обработки кремниевых пластин достигается существенное снижение затрат на закупку реагентов и оплату электроэнергии, а также улучшение условий труда и снижение объема экологически вредных отходов.

Исследование эффективности ОМО в качестве реагента химической обработки поверхности было проведено также в процессе подготовки кварцевого сырья, которое в дальнейшем используется для изготовления кварцевой оснастки, применяемой в полупроводниковом производстве, в частности в микроэлектронике. Исследование показало, что использование 10%-ного раствора ОМО в сравнении с традиционно применяемой смесью плавиковой и соляной кислот дает практически те же результаты по чистоте обработанной поверхности, но при этом отсутствуют потери кварцевого сырья, весьма существенные при использовании фтористоводородной кислоты, не говоря уже о преимуществе ОМО в экологической безопасности.

Кроме того, водный раствор ОМО был использован с положительным эффектом для химической очистки установок для выращивания монокристаллического кремния, а также для отмывки теплоэнергетического оборудования [3, 4].

Литература

1. Пат. №2115701 от 20.07.1998. Способ приготовления моющего состава / **Б.Г.Грибов, Р.А.Родионов, Е.А.Трунов, К.Е.Трунов, Л.Н.Шевякова**.
2. Пат. №21855426 от 20.07.2002. Способ приготовления моющего состава / **Б.Г.Грибов, В.И.Григос, В.В.Пасков, В.В.Печенко, Л.Н.Шевякова**.
3. **Пасков В.В.** Применение водных растворов технического моющего средства на основе сульфомалеинового ангидрида для защиты внутренних поверхностей нагрева котлов // Теплоэнергетика – 2002. – № 7. – С. 71–74.
4. **Пасков В.В., Шафигуллин Ф.Ш., Григос В.И., Каракеян В.И.** Исследование технологических параметров химической очистки водогрейного оборудования // Теплоэнергетика. – 2002. – № 6. – С. 31–36.

Грибов Борис Георгиевич – доктор химических наук, профессор, член-корреспондент РАН, директор ФГУП «ГНИИОСЧМ» (г. Москва). *Область научных интересов:* электронное материаловедение.

Мартемьянов Владимир Семенович – доктор химических наук, профессор, главный специалист ОАО «Ангстрем» (г. Москва). *Область научных интересов:* физико-химические исследования материалов для радиоэлектроники.

Лысак Леонид Владимирович – главный технолог ОАО «Ангстрем» (г. Москва). *Область научных интересов:* разработка интегральных схем.

Состояние и перспективы развития технологии кремниевых гетеропереходных биполярных транзисторов для СВЧ применений

В.П.Тимошенко

Московский государственный институт электронной техники
(технический университет)

Рассмотрены технологические возможности изготовления кремниевых гетеропереходных биполярных транзисторов с SiGe-базой, варианты изготовления транзисторов с первого по четвертое поколение. Показаны возможности улучшения СВЧ-характеристик элементной базы, что позволит создавать устройства, работающие на частотах до 70–80 ГГц.

Развитие науки и техники приводит к промышленному освоению передачи данных со скоростями более 1 Гб/с. В связи с этим перспективными областями являются оптическая связь (оптический кабель и электроника, обеспечивающая формирование и передачу оптического сигнала), а также радиосвязь. Радиопередача имеет определенные преимущества, заключающиеся в микроминиатюризации, удобстве использования и перспективно невысокой цене.

Резкий скачок в области разработки высокочастотных систем обещает развитие технологии интеграции на одной подложке активных СВЧ-устройств на основе гетеропереходных биполярных и полевых транзисторов.

Технология гетеропереходных биполярных транзисторов (ГБТ) для систем связи и микропроцессоров с повышенной тактовой частотой бурно развивается компаниями «IBM», «Intel», «Jazz», «Motorola» (США), «TSMC» (Тайвань), «Hitachi» (Япония), «INP», «Philips» (Европа). Использование ГБТ и КМОП-транзисторов в едином процессе позволяет достичь высоких параметров по критерию цена/качество. Это объясняется возможностями наиболее плотной упаковки компонентов для КМОП-схем и высокими частотными и усилительными характеристиками гетеропереходных транзисторов. На рис.1 показана зависимость верхней граничной частоты ГБТ и МОП-транзисторов как функция относительной цены при одинаковой площади кристалла [1]. Из рисунка видно, что при одинаковых промышленно освоенных технологических нормах 0,13 мкм, верхняя граничная частота ГБТ в 2,2 раза выше, чем у МОП-транзисторов. Частоте 220 ГГц соответствует МОП-транзистор с минимальной длиной затвора 65 нм. Процессы с такими длинами затворов находятся в экспериментальной разработке [2] и в два раза дороже.

Особенности гетеропереходного биполярного транзистора по сравнению с традиционным биполярным. Достоинства ГБТ по сравнению с интегральными биполярными транзисторами проявляются как в усилительных, так и в частотных характеристиках [3, 4] и достигаются благодаря введению в базовую область тонкого гетеропереходного SiGe-слоя.

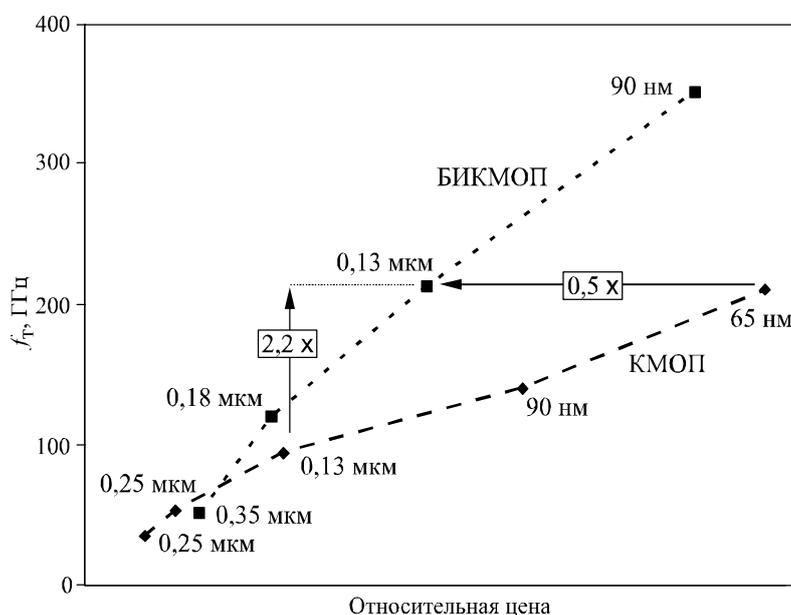


Рис. 1. Зависимость верхней граничной частоты от стоимости кристалла

Так, при расчете коэффициента усиления по постоянному току электронная и дырочная составляющая токов в база-эмиттерном переходе имеют вид

$$I_{\text{Эн}} = qn_{\text{иБ}}^2 A_E \left(\frac{D_{\text{нБ}}}{N_{\text{Б}}W_{\text{Б}}} \right) \left[\exp\left(\frac{V_{\text{БЭ}}}{m\phi_T}\right) - 1 \right];$$

$$I_{\text{Эр}} = qn_{\text{иЭ}}^2 A_E \left(\frac{D_{\text{рЭ}}}{N_{\text{Э}}W_{\text{Э}}} \right) \left[\exp\left(\frac{V_{\text{БЭ}}}{m\phi_T}\right) - 1 \right],$$

где $D_{\text{нБ}}, D_{\text{рЭ}}$ – коэффициенты диффузии неосновных носителей в базе и эмиттере; $W_{\text{Б}}, W_{\text{Э}}$ – эффективные толщины базы и эмиттера; $N_{\text{Б}}, N_{\text{Э}}$ – концентрации примеси в базе и эмиттере; $n_{\text{иБ}}, n_{\text{иЭ}}$ – собственная концентрация носителей заряда в базе и эмиттере; ϕ_T – термодинамический потенциал; A_E – площадь эмиттера.

При одинаковых значениях плотностей квантовых состояний в валентной зоне и в зоне проводимости можно записать:

$$\frac{n_{\text{иЭ}}^2}{n_{\text{иБ}}^2} = \exp\left(-\frac{\Delta E_g}{kT}\right),$$

где ΔE_g – разница ширины запрещенной зоны в эмиттере и базе; k – постоянная Больцмана; T – абсолютная температура.

Для эффективности эмиттера можно получить следующее выражение:

$$\gamma_{\text{Э}} = \left(1 + \frac{I_{\text{Эр}}}{I_{\text{Эн}}}\right)^{-1} = \left[1 + \frac{N_{\text{Б}}W_{\text{Б}}}{D_{\text{нБ}}} \cdot \frac{D_{\text{рЭ}}}{N_{\text{Э}}W_{\text{Э}}} \cdot \exp\left(-\frac{\Delta E_g}{kT}\right)\right]^{-1}.$$

Тогда коэффициент усиления по току составит:

$$\beta \cong \frac{D_{\text{нБ}}N_{\text{Э}}W_{\text{Э}}}{D_{\text{рЭ}}N_{\text{Б}}W_{\text{Б}}} \cdot \exp\left(\frac{\Delta E_g}{kT}\right), \text{ если } \alpha \cong \gamma_{\text{Э}}. \tag{1}$$

Из выражения (1) видно, что коэффициент усиления по току существенно зависит от разницы в ширинах запрещенной зоны эмиттера и базы. Для гетеропереходных транзисторов по сравнению с интегральными биполярными транзисторами это приводит к значительному увеличению коэффициента усиления при прочих равных условиях. Кроме того, в ГБТ в значительно меньшей степени проявляется эффект Эрли. Высокая концентрация примеси в базе ($N_{Ge} \cong 8 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$) приводит к тому, что основные части области пространственного заряда коллекторного и эмиттерного переходов расположены соответственно в области коллектора и эмиттера, и следовательно, толщина базы будет слабо зависеть от напряжений коллектор–база и эмиттер–база. В этом случае напряжение Эрли для транзисторов может достигать более 100 В. Для обычных биполярных транзисторов с высоким коэффициентом усиления напряжение Эрли не превышает 10–15 В. Следствием высокого напряжения Эрли является возможность дополнительного повышения коэффициента усиления при сохранении высокого напряжения прокола базы.

Другим преимуществом ГБТ являются значительно лучшие частотные свойства. Оценить собственные частотные свойства транзистора можно используя упрощенное соотношение для верхней граничной частоты транзистора в схеме с общей базой:

$$f_T = \frac{1}{2\pi\tau}, \text{ где } \tau = \tau_{\text{Э}} + \tau_{\text{Б}} + \tau_{\text{К}}, \quad \tau_{\text{Э}} = r_{\text{Б}} C_{\text{БЭ}} = \frac{\Phi_{\text{т}}}{I_{\text{Б}}} C_{\text{БЭ}} - \text{ постоянные времени эмиттера};$$

$$\tau_{\text{Б}} = \frac{W_{\text{Б}}^2}{2D_{\text{нБ}}} - \text{ время пролета через базу}; \quad \tau_{\text{К}} = \frac{X_{\text{дБК}}}{2\vartheta_s} - \text{ время пролета через область}$$

пространственного заряда коллекторного перехода размером X_d (ϑ_s – скорость насыщения носителей).

Так как гетеропереходный транзистор имеет более высокую концентрацию примеси в базе, толщина баз $W_{\text{Б}}$ может быть значительно меньше; в результате время пролета через базу $\tau_{\text{Б}}$ меньше, чем у обычного интегрального биполярного транзистора. Кроме того, высокая степень легирования базы позволяет снизить сопротивление базы $r_{\text{Б}}$, малая степень легирования эмиттера приводит к увеличению ширины эмиттерного перехода, и следовательно, к снижению емкости база–эмиттер $C_{\text{БЭ}}$. Это в совокупности значительно снижает постоянную времени эмиттера $\tau_{\text{Э}}$.

Таким образом, быстродействие гетеропереходных биполярных транзисторов существенно выше обычного интегрального транзистора.

Перспективы масштабирования гетеропереходных транзисторов. За последние 20 лет произошло 30-кратное увеличение верхней граничной частоты f_T биполярных транзисторов [5]. Это результат не только качественного улучшения транзисторов (переход от транзисторов с ионно-имплантированной базой [6] к транзисторам с эпитаксиально выращенной базой [7] и гетеропереходным транзисторам с базой легированной SiGe и SiGeC [8]). За последние четыре года произошло удвоение f_T до 300 ГГц в результате перехода от технологических норм 0,5 мкм (ГБТ первого поколения) к технологическим нормам 0,13 мкм (ГБТ четвертого поколения). Зависимость верхней граничной частоты транзистора от плотности коллекторного тока для четырех поколений гетеропереходных транзисторов приведена на рис.2 [9].

Следует отметить, что значительное улучшение частотных, усилительных и шумовых параметров транзисторов в первую очередь достигнуто за счет качественного улучшения биполярных транзисторов (гетеропереходная база). Кроме того, фактор

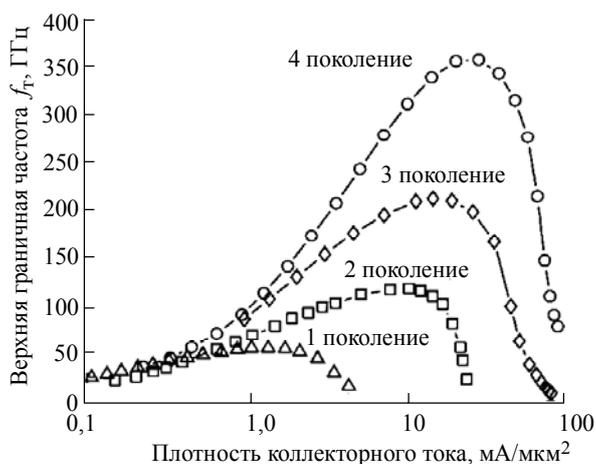


Рис. 2. Зависимость верхней граничной частоты транзистора от плотности коллекторного тока

характеристиками (средний коэффициент усиления по току более 200). Данный процесс также позволяет реализовывать МОП *p*- и *n*-канальные транзисторы с длинами затвора 0,18 мкм, с токами насыщения 600 мкА/мкм и 255 мкА/мкм соответственно. В рамках данных технологий можно изготавливать два типа резисторов: поликремниевые ($\rho_s = 310 \text{ Ом}/\square$) и тонкопленочные металлические ($\rho_s = 25 \text{ Ом}/\square$).

Хорошие возможности существуют при создании конденсаторов типа металл-диэлектрик-металл (МДМ) с удельной емкостью, составляющей 1 фФ/мкм² и интегральных индуктивностей. Индуктивности представляют собой прямоугольную или октоугольную спираль, выполненную на основе шестого слоя металлизации с толщиной около 3 мкм.

Возможности технологического процесса. Значения параметров активных и пассивных компонентов, промышленно освоенных процессов, представлены в табл. 1–3.

Таблица 1

Гетеропереходные *n-p-n*-биполярные транзисторы

Параметр	Значение	
	«Jazz»	«IBM»
Размер эмиттера, ширина/длина, мкм	0,2/0,76–10,16	0,15/0,8–10
Коэффициент усиления по току, отн.ед.	290	250
Напряжение пробоя перехода эмиттер–база, В	2,4	2,35
Напряжение пробоя коллектор–база, В	6	6,5
Напряжение пробоя коллектор–эмиттер (схема ОЭ, управление током базы), В	2	1,8
Граничная частота передачи эмиттерного тока, ГГц	163	120
Максимальная частота передачи по мощности, ГГц	148	100

Таблица 2

***n*- и *p*-канальные полевые транзисторы**

Параметр	Низковольтные		Высоковольтные	
	<i>n</i> -канальные «Jazz»/«IBM»	<i>p</i> -канальные «Jazz»/«IBM»	<i>n</i> -канальные «Jazz»/«IBM»	<i>p</i> -канальные «Jazz»/«IBM»
Максимальное пробивное напряжение тонкого диэлектрика, В	1,8/5,2	1,8/5,2	3,3/5,2	3,3/5,2
Пороговое напряжение, В	0,52/0,35	-0,44/-0,4	0,62/0,52	-0,76/-0,53
Эффективная длина затвора, мкм	0,15/0,18	0,14/0,18	0,27/-	0,26/-
Удельный ток насыщения, мкА/мкм	600/600	255/260	600/500	245/210

Таблица 3

Пассивные элементы

Параметр	Значение
Удельное сопротивление поликремниевого резистора, Ом/□	310/270
Удельная емкость конденсатора металл–диэлектрик–металл (МІМ), фФ/мкм ²	1/1
Удельное сопротивление металлического резистора, Ом/□	25/140
Емкость варактора (на основе <i>p-n</i> -перехода при нулевом смещении), фФ/мкм ²	0,86/0,69

Технология изготовления гетеропереходных транзисторов первого и второго поколения. Гетеропереходные биполярные транзисторы первого и второго поколения имеют длину эмиттера от 0,5 мкм до 0,35 мкм. Толщина базы составляет от 100 до 80 нм [5].

Конструкция гетеропереходного транзистора второго поколения, созданная специалистами компании «Philips» [15], показана на рис.3. Пример конструкции транзистора второго поколения с изоляцией с помощью *p-n*-переходов, несамосовмещенным эмиттером, размером 0,35 мкм [1] (IBM 5HP процесс) приведен на рис.4.

Технологическая структура ГБТ третьего поколения и технология изготовления активных и пассивных компонентов. Технологический процесс изготовления ИМС начинается с создания n^+ заглубленного слоя, а также формирования глубокой диэлектрической изоляции (Shallow Trench Isolation – STI). Глубокая изоляция представляет собой канавку 7 мкм, заполненную поликремнием, которая используется для уменьшения емкости коллектора на подложку. Значение емкости коллектора на подложку для транзистора минимального размера (площадь эмиттера 0,15 мкм²) составляет не более 4 фФ и существенно ниже, чем для *n-p-n*-транзистора такого же размера, но без глубокой изоляции.

После завершения создания глубокой изоляции формируются *n*-карманы для *p*-канальных транзисторов и их области стока и истока. Затворы полевых транзисторов создаются по самосовмещенной технологии. После завершения изготовления полевых

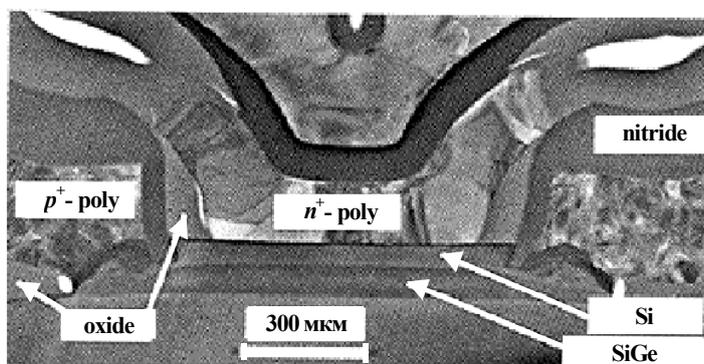


Рис.3. Микрофотография ГБТ, созданного компанией «Philips»

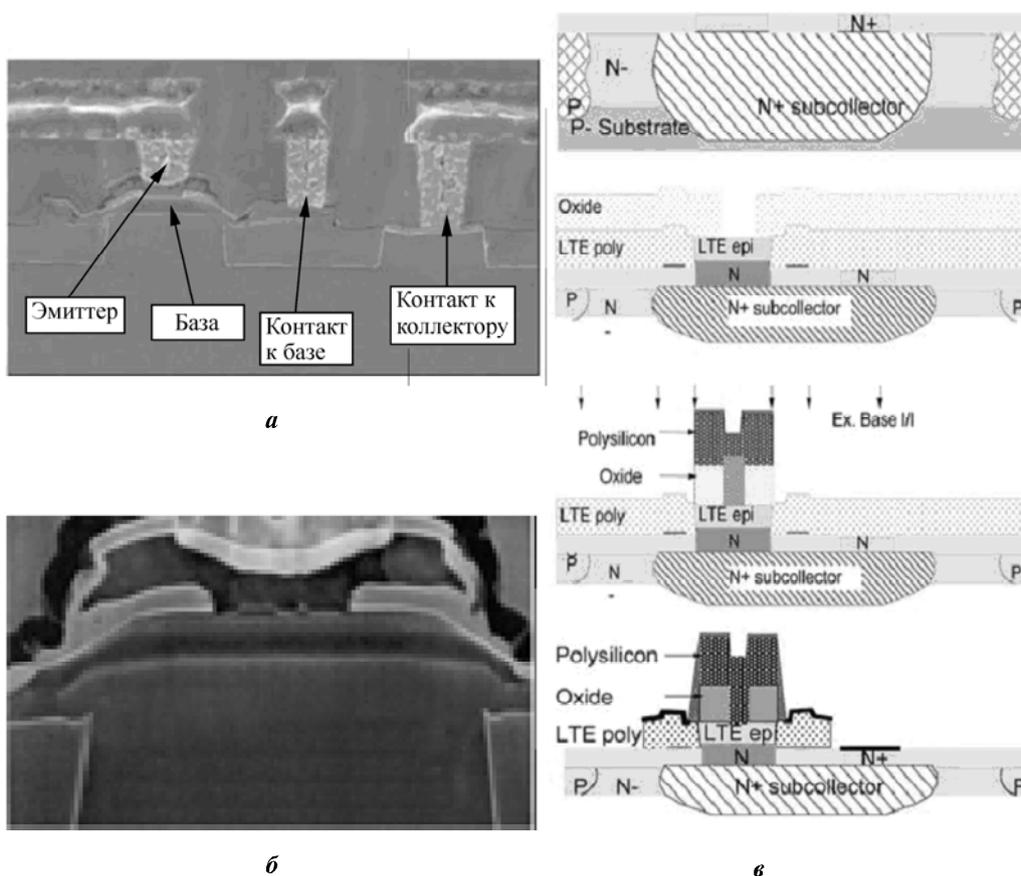


Рис.4. Гетеропереходная структура транзистора с глубокой щелевой изоляцией (IBM 5HP процесс):
 а – микрофотография транзистора; б – область базы (увеличено); в – процесс изготовления ГБТ

транзисторов проводится дополнительное легирование коллекторных областей $n-p-n$ -транзисторов, что позволяет корректировать пробивные напряжения.

Основным процессом создания гетеропереходных биполярных транзисторов является молекулярно-лучевая эпитаксия тонкой базы с заданной концентрацией Ge для создания широкой зонной диаграммы в базе. Далее на эпитаксиально выращенную базу наносят слой SiGe (поликремний–германий), разгонка которого позволяет сформировать контакт к базе. Эмиттерная область формируется с использованием самосовмещенной технологии, оптимизированной с целью уменьшения собственного сопротивления базы. Дополнительное легирование мышьяком As создает омический контакт к эмиттеру. Данный процесс позволяет создать ширину эмиттера до 0,2 мкм.

В дальнейшем над МОП-транзисторами удаляется SiGe-слой, вскрываются области стока и истока для обеспечения омического контакта к ним. В процессе используется 6 уровней разводки, разделенных диэлектриком на основе SiO₂. После завершения формирования трех слоев разводки с толщиной приблизительно 0,5 мкм (удельное сопротивление слоя $\rho_s = 82$ мОм/□) изготавливается тонкопленочный резистор на основе силицида кобальта. Конденсатор типа металл–диэлектрик–металл создается после завершения формирования четвертого слоя металлизации. В конденсаторе используются диэлектрик на основе Si₃N₄ толщиной 60 нм и нитрид титана в качестве верхней обкладки. Металл пятого слоя накладывается на верхнюю обкладку конденсатора для улучшения добротности последнего. Два последних слоя металлизации формируются с использованием меди, которая создает высокочастотные интегральные индуктивности, а также обеспечивает высокую плотность тока в межсоединениях. Разрез самосовмещенной структуры биполярного транзистора показан на рис.5 [13, 14].

В ближайшее время улучшение параметров гетеропереходных биполярных транзисторов возможно путем уменьшения как горизонтальных размеров (минимальный размер эмиттера), так и вертикальных размеров (толщина базы). Это позволит достичь верхних граничных частота $f_T = 300$ ГГц, при этом задержка на вентиль может составлять не более 10 пс [17].

Другой перспективный путь улучшения параметров заключается в интеграции ГБТ в процесс изготовления ИМС с полной диэлектрической изоляцией [18]. В результате все паразитные емкости компонентов снижаются, ожидается также увеличение пробивных напряжений.

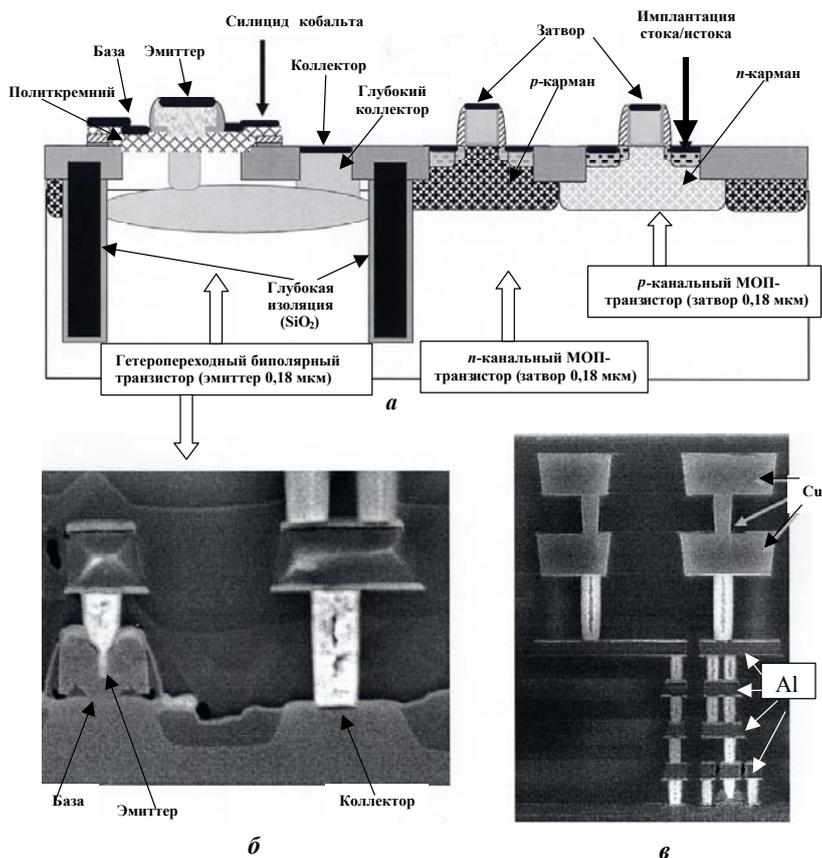


Рис.5. Активные и пассивные компоненты БИКМОП Jazz процесса (третье поколение): а – разрез ГБТ и *n*- и *p*-канальных транзисторов; б – микрофотография *n-p-n*-ГБТ; в – шестислойная структура металлизации

Гетеропереходные биполярные транзисторы на кремниевой основе обладают отличными частотными, усилительными и шумовыми характеристиками в широком температурном диапазоне. Это обеспечивает им лидирующие позиции при создании СВЧ-устройств, работающих в системах радио- и оптической связи. Совместная технология изготовления гетеропереходных биполярных и КМОП-транзисторов с большим набором пассивных компонентов позволяет реализовывать как цифровые, так и аналоговые устройства, работающие до частот порядка 70–80 ГГц. Использование КМОП-транзисторов улучшает функциональные возможности, существенно увеличивает степень интеграции и снижает стоимость изделия.

Литература

1. Status and Direction of Communication Technology – SiGe BiCMOS and RFCMOS / **J.Joseph, D.L.Harame, B.Jagannathan at al.** // Proc. of the IEEE. – 2005. – Vol. 93, N 9. – P. 1539–1558.
2. Scaling beyond the 65 nm node with FinFET DG-CMOS / **E.J.Nowak, T.Ludwing, I.Aller at al.** // Proc. IEEE Custom Integrated Circuits Conf. – 2003. – P. 339–342.
3. Si/SiGe Epitaxial-Base Transistors-Part1: Materials, Physics, and circuits / **D.Harame et al.** // IEEE Transactions on Electron Devices 42. – 1995. N 3. – P. 455–468.
4. Si/SiGe Epitaxial-Base Transistors-Part2: Process Integration and Analog Applications / **D.Harame et al.** // IEEE Transactions on Electron Devices 42. – 1995. – N 3. – P. 469–482.
5. **Rieh J.S., Greenberg D., Stricker A., Freeman G.** Scaling of SiGe Heterojunction Bipolar Transistors // Proc. of the IEEE. – 2005. – Vol. 93, N 9. – P. 1522–1538.
6. 12 ps implanted base silicon bipolar technology / **J.Bock, H. Knapp, K.Aufinger, at al.** // Tech. Dig. Int. Electron Device Meeting. – 1999. – P. 553–556.
7. **Crabbe E.F., Meyerson B.S., Stock J.M.C., Harame D.L.** Vertical profile optimization of very high frequency epitaxial Si and SiGe bipolar transistor // Tech. Dig.Int. Electron Device Meeting. – 1993. – P. 83–86.
8. 5.3 ps ESL and 71 GHz static frequency divider in self-aligned SEG SiGe HBT / **E.Ohue, R.Hayami, K.Oda at al** // Proc. Bipolar/BiCMOS Circuits and Technology Meeting. – 2001. – P. 26–29.
9. **Cressler J.D.** On the Potential of the SiGe HBTs for Extreme Enviroment Electronics // Proc. of the IEEE. – 2005. – Vol. 93, N 9. – P. 1559–1582
10. **Rieh J.S., Greenberg D., Stricker A., Freeman G.** Scaling of SiGe Heterojunction Bipolar Transistors // Proc. of the IEEE. – 2005. – Vol. 93, N 9. – P. 1522–1538.
11. A SiGe HBT BiSmos Technology for Mixed-Signal RF Applications / **D.C.Ahlgren, G.Freeman, S.Subbanna at al** // Proc. of the IEEE Bpolar/BiCMOS Circuits and technology Meeting (BCTM). – 1997. – P. 195–197.
12. A 0.18 μm BiCMOS Technology Featuring 120/100 GHz (f_T / f_{MAX}) HBT and ASIC Compatible CMOS using Copper Interconnect / **A.Joseph, D.Coolbaugh, M.Zierak, at al.** // Proc. of the IEEE Bipolar/BiCMOS Circuits and technology Meeting (BCTM). – 2001. – P. 143–146.
13. **Kempf P.** Silicon germanium bicmos technology // Inter. conf. on Silicon Epitaxy and Heterostructure (Santa Fe, March, 2003). – 2003.
14. **Racanelli M., Kempf P.** SiGe BiCMOS Technology for Communication Systems // Inter. conf. on Solid State Devices and Materials (Naqoja. September, 2002). – 2003.
15. CMOS technologies and silicon bipolar transistors // http://www.wtec.org/loyola/wireless/05_02.htm.
16. Philips announces a silicon-based BiCMOS technology for emerging microwave applications // http://www.semiconductors.philips.com/news/content/file_1192.html.
17. SiGe HBT technology with $f_{\text{MAX}}/f_T = 350/300$ GHz and gate delay below 3.3 ps / **M.Khater, J.-S.Rieh, T.Adam at al.** // Dig. Int. Electron Devices Meeting. – 2004. – P. 247–250.
18. Integration of high-performance SiGe:C HBTs with thin-film SOI CMOS / **H.Rucker, B.Heinemann, R.Barth at al.** // Dig. Int. Electron Devices Meeting. – 2004. – P. 239–242.

Тимошенко Валерий Петрович – кандидат технических наук, докторант кафедры интегральной электроники и микросистем МИЭТ. *Область научных интересов:* проектирование СВЧ интегральных ИМС, телекоммуникация, СВЧ-радиосвязь.

Двухволновая рентгеновская рефлектометрия пленок металлов и силицидов на кремнии

С.А.Апрелов, Н.Н.Герасименко, Е.Н.Рыбачек

Московский государственный институт электронной техники
(технический университет)

В.М.Сенков

Институт общей физики им. А.М.Прохорова РАН (г. Москва)

И.В.Пиршин, А.Г.Турьянский, В.И.Цехош

Физический институт им. П.Н.Лебедева РАН (г. Москва)

Методом двухволновой рентгеновской рефлектометрии исследованы пленки Ni, NiSi и NiSi₂, полученные магнетронным распылением и последующим отжигом. Показано, что двухволновая рентгеновская рефлектометрия применима для контроля технологических параметров тонких пленок (толщины, шероховатости, ширины границы раздела) на различных технологических этапах и позволяет увеличить точность расчета параметров структуры, существенно сократить время расчета.

В полупроводниковой технологии силицид никеля используется при изготовлении КМОП-устройств, в качестве материала для создания контактов и межсоединений [1] и является перспективным материалом для применения в устройствах нанометрового масштаба. Однако свойства этих пленок до конца не изучены. В первую очередь это относится к формированию границы раздела пленка–подложка в процессе термической обработки.

Цель работы – исследование реальных технологических структур, используемых в микроэлектронном производстве (сверхтонких пленок металлов и силицидов на различных подложках), и разработка экспресс-метода контроля параметров таких структур (толщин и плотностей слоев, их однородности и шероховатости границ). В качестве экспериментальных образцов выбраны тонкие пленки Ni, NiSi и NiSi₂ на кремниевой подложке, а также Ni на SiO_x. Структуры исследовались с помощью рентгеновской рефлектометрии и рефрактометрии. Эти методы диагностики сверхгладких поверхностей и тонких слоев с толщинами нанометрового порядка, полученных путем молекулярно-лучевой эпитаксии и магнетронного напыления, наиболее чувствительны. Метод рентгеновской рефлектометрии заключается в измерении зависимости коэффициента отражения рентгеновских лучей от угла скольжения в области полного внешнего отражения и смежной области до $10\Theta_c$ (Θ_c – критический угол полного внешнего отражения). Полученные данные дают возможность определить толщину пленки, шероховатость поверхности и границы раздела пленка–подложка [2]. Метод рентгеновской рефрактометрии состоит в изучении рентгеновского излучения, преломленного образцом, вблизи области полного внешнего отражения и дает возможность определить плотность слоев нанометрового диапазона [3].

В настоящей работе измерения осуществлялись одновременно на двух длинах волн рентгеновского излучения – CuK_α и CuK_β с длинами волн 0,154 и 0,139 нм соответственно. Это позволило рассчитать параметры структур, используя отношение интенсивностей отраженного сигнала $R_\alpha(\Theta)/R_\beta(\Theta)$ для рассматриваемых длин волн (Θ – угол скольжения рентгеновского луча). В свою очередь применение отношения позволяет избежать ошибок и сократить время расчета. Рентгенооптические схемы этих методик приведены в работах [2, 3].

Исследования проводились на рентгеновском многоволновом рефлектометре X-Ray MiniLab фирмы «UNISANTIS». Прибор позволяет измерять интенсивность исследуемого рентгеновского излучения на нескольких длинах волн одновременно за одно сканирование. Угловое разрешение прибора составляло $0,7''$. Угловая ширина рентгеновского луча в плоскости падения $\Delta\Theta_b$ может изменяться путем коллимации в пределах от $10''$ до $0,5^\circ$. Рефлектометрические измерения проводились по схеме $\Theta - 2\Theta$ при $\Delta\Theta_b = 1'$. При рефрактометрических измерениях образец облучается через боковой торец в направлении к внешней поверхности при постоянном угле скольжения, а детектор вращается вокруг оси на угол до 2Θ . В качестве источника использовалась рентгеновская трубка БСВ-21 мощностью 300 Вт с медным анодом и видимой проекцией фокусного пятна на аноде $0,02 \times 8$ мм. Охлаждение источника излучения осуществлялось системой замкнутого водяного охлаждения. В качестве детекторов использовались сцинтилляционные детекторы с люминофором NaI:Tl. Толщина сцинтиллятора оптимизировалась под характеристическое излучение меди. Уровень темного шума детекторов составлял 0,05 импульс/с. Полупрозрачными монохроматорами из пиролитического графита из спектра отраженного излучения выделялись одновременно спектральные линии CuK_α , CuK_β .

При рефлектометрических исследованиях для решения обратной задачи для определения параметров пленок применялся генетический алгоритм [4, 5], который основан на методе случайного поиска и использует методы, открытые в биологии при изучении эволюции. Генетический алгоритм позволяет существенно ускорить поиск оптимальных значений параметров структуры (толщины, плотности, шероховатости). Основой компьютерного моделирования отражения рентгеновского луча от многослойной структуры в настоящей работе является рекуррентное соотношение, предложенное Пэрреттом [6]. Учет диффузионного размытия границ раздела проводился по методу, предложенному в работе [7]. При расчетах использовались табличные значения рентгенооптических констант для никеля и кремния [8].

Разработанная методика измерения толщины не учитывает флуктуации плотности пленки (что может привести к возникновению эффекта малоуглового рассеяния), поскольку однородность пленки по толщине зафиксирована независимым измерением.

Образцы получены путем магнетронного распыления никеля на кремниевые подложки. Для получения силицида никеля образцы отжигались в атмосфере азота при 450°C в течение 30 мин. Если температуру отжига повысить до 650°C и выше, то поверхностное сопротивление слоя силицида будет постепенно повышаться, а переход фазы силицида никеля в дисилицид произойдет при температуре 750°C [1, 9]. При создании образца Ni на SiO_x в качестве подложки использовался термически окисленный кремний состава SiO_x . Толщина слоя оксида материала составляла 600–700 нм.

Сложность изучения рассматриваемых структур обусловлена неоднородностью образцов по глубине, вызванной взаимной диффузией никеля и кремния в процессе отжига. В результате термообработки полупроводниковых структур возможно образование

слоев различных фаз силицида с непредсказуемым рельефом границ раздела. При охлаждении образцов до комнатной температуры после отжига никель может образовывать до шести устойчивых фаз силицида [1, 10], а в некоторых случаях – кластеры различных фаз [11].

Эксперимент. На рис.1 показаны зависимости коэффициентов отражения R_α и R_β рентгеновского излучения с длинами волн 0,154 нм (CuK_α) и 0,139 нм (CuK_β) от 2Θ для пленки никеля на окисленном кремнии. На угловой зависимости коэффициента отражения при углах скольжения больше критического наблюдаются интерференционные осцилляции, расстояния между которыми определяются толщиной пленки. Пик вблизи нулевого угла обусловлен прохождением прямого пучка над поверхностью образца. На рис.2 для этой же пленки представлены экспериментальная и расчетная зависимость отношения коэффициентов отражения R_α/R_β от 2Θ . Параметры исследованной пленки, определенные при решении обратной задачи рентгеновской рефлектометрии при помощи генетического алгоритма, приведены в табл.1. Для данного образца шероховатость поверхности подложки $R_a = 0,38$ нм, а критический угол $\Theta_c = 0,3795^\circ$.

По технологическим данным о времени напыления и величине поверхностного сопротивления толщина d слоя Ni ожидалась равной ~25–30 нм. Однако по данным рентгеновской рефлектометрии она оказалась ~75 нм. Такое расхождение может быть связано с непостоянной скоростью напыления и с различным удельным электрическим сопротивлением в пленке и объемном материале. Известно, что при использовании кварцевых ультразвуковых весов неточность в определении толщины пленок обусловлена различием плотности пленки и объемного материала. Это подтверждает необходимость дополнительных средств контроля в современном производстве.

В работе [2] отмечается, что использование отношения коэффициентов отражения при решении обратной задачи рефлектометрии позволяет освободиться от ограничений, которые налагают геометрический фактор (форма, размер образца), флуктуации интенсивностей источника, изменения ширины коллимационных щелей и др.

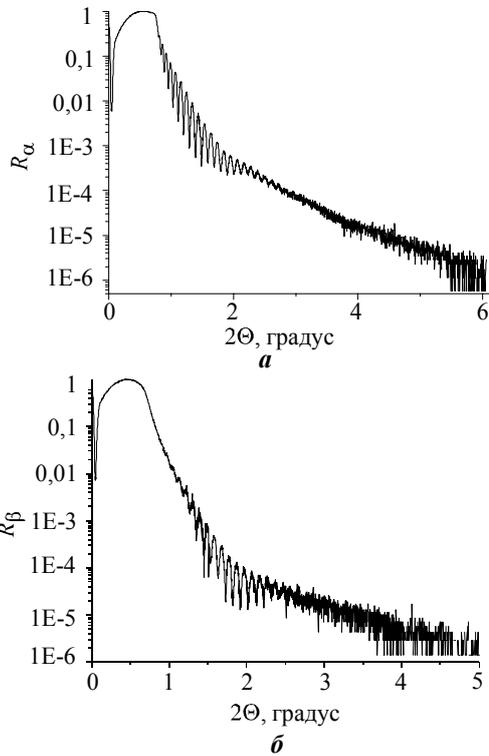


Рис.1. Зависимость коэффициентов отражения R_α и R_β от угла 2Θ для пленки Ni на SiO_x (эксперимент): а – R_α ; б – R_β

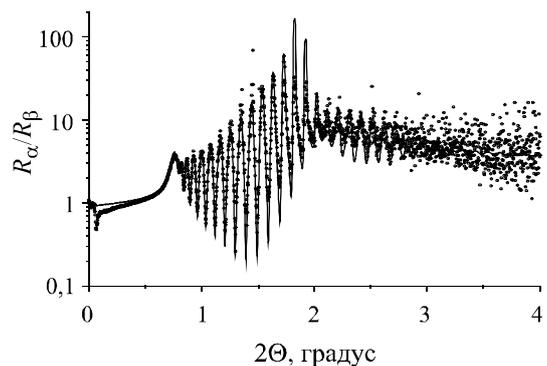


Рис.2. Зависимость отношения $R_\alpha(\Theta)/R_\beta(\Theta)$ от угла 2Θ для пленки Ni на SiO_x : точки – эксперимент; сплошная кривая – расчет

Таблица 1

Параметры структуры Ni на SiO_x, полученные с помощью генетического алгоритма

Материал	Толщина слоя d , нм	Шероховатость R_a , нм	Плотность ρ , г/см ³
Ni	75	1,27	8,91
Подложка SiO _x	∞	0,38	2,2

Обработка экспериментальных данных при помощи генетического алгоритма показывает, что выявление реальных параметров структуры, опираясь на данные только лишь одной длины волны, может привести к ошибке, так как полученные параметры не дают удовлетворительного совпадения для другой длины волны. Это может быть обусловлено попаданием алгоритма в один из локальных минимумов выбранного функционала невязки. Напротив, использование при расчете данных отношения $R_\alpha(\Theta)/R_\beta(\Theta)$ для двух длин волн позволяет с максимальной точностью выявить параметры исследуемой структуры и существенно ускорить время расчета, так как в данные этого отношения свой вклад дают обе длины волны, что позволяет учитывать особенности каждой из них одновременно.

Отметим, что при больших углах погрешность измерений для длины волны $\lambda = 0,139$ нм будет существенно выше, чем для $\lambda = 0,154$ нм, и при вычислении отношения $R_\alpha(\Theta)/R_\beta(\Theta)$ следует выбирать угловой диапазон, принимая во внимание значения интенсивности для длины волны $\lambda = 0,139$ нм. Диапазон углов с низкой интенсивностью и высокой долей шума в расчете не используется.

Рефлектометрические исследования пленки Ni на Si (рис.3) показали, что на ее поверхности присутствует окисная пленка. Параметры пленки вычислялись для отношения $R_\alpha(\Theta)/R_\beta(\Theta)$ (табл.2).

Таблица 2

Параметры модельной структуры Ni на Si

Материал	Толщина слоя d , нм	Шероховатость R_a , нм	Плотность ρ , г/см ³
NiO	1,8	0,42	6,67
Ni	21,6	0,7	8,91
Si	∞	0,9	2,33

Параметры структуры, полученные в процессе анализа отношения $R_\alpha(\Theta)/R_\beta(\Theta)$, при расчете для отдельных длин волн совпадают.

На рис.4 представлена экспериментальная зависимость коэффициента отражения рентгеновского излучения на длине волны 0,154 нм для слоя силицида кремния NiSi на кремниевой подложке. Видно, что при углах, близких к критическому, наблюдается сложная структура интерференционных максимумов – второй пик расщепляется, а третий экстремум деформируется. Это может свидетельствовать о наличии распределения по оптической плотности в глубь образца. А отсутствие таких же максимумов на больших углах обусловлено большим размытием границ раздела. Это дает возможность утверждать, что на образце присутствуют как минимум 2 слоя с различной оптической плотностью, а на поверхности образца образовался слой естественного оксида, предположительно оксида никеля.

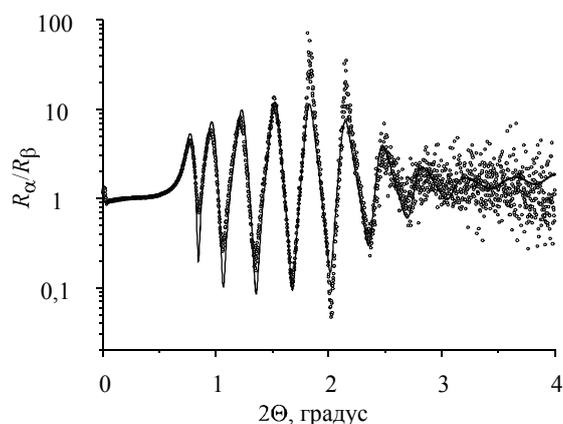


Рис.3. Зависимость отношения $R_{\alpha}(\Theta)/R_{\beta}(\Theta)$ от угла 2Θ для пленки Ni на Si: точки – эксперимент; сплошная кривая – расчет

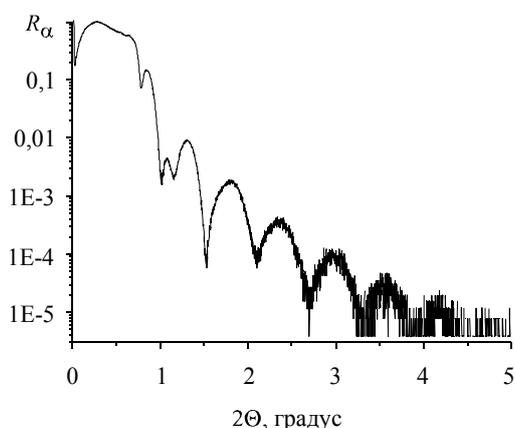


Рис.4. Экспериментальная зависимость коэффициента отражения R_{α} от угла 2Θ для пленки NiSi на Si

Для выявления фазового состава и распределения фаз по глубине рассматриваемая пленка силицида никеля изучалась с помощью электронной спектроскопии для химического анализа (ЭСХА) на спектрометре PHI 5500 ESCA фирмы «Physical Electronics». Перед началом травления были получены данные по составу исходной поверхности. Затем послойное травление со съемками обзорных спектров чередовалось с измерениями спектров высокого разрешения (ВР).

Полученные в результате обработки обзорных спектров концентрации приведены в табл.3, а графики послойного анализа показаны на рис.5.

Таблица 3

Концентрации элементов, ат. %

Время травления, мин	C	O	Ni	Si
0 (после очистки поверхности)	7,77	10,61	81,63	–
20	–	2,88	64,64	32,56
34	2,62	1,16	33,13	63,10
44	1,15	0,82	27,14	70,89

Примечание. Относительная погрешность в рамках использованного метода составляет 1–2%.

Анализ спектров ВР Ni2p (рис.6) показывает, что на исходной поверхности после ее очистки от адсорбированных газов методом «обдува» металлический никель (пик Ni2p³ E_{св} = 852,7 эВ чистого никеля), как и ожидалось, частично окислен (наплыв слева помечен на рисунке OXI). После 20 мин положение (852,7 эВ) и форма спектра Ni2p (с плазмонным пиком P) характерны для металлического никеля. Спектры после 34 и 44 мин отличаются от предыдущих смещением максимума в область более высоких энергий (E_{св} = 853,1 эВ), уменьшением его интенсивности и потерей плазмонного пика. Увеличение энергии связи Ni2p свидетельствует об образовании химической связи Ni–Si. Однако обратного эффекта – уменьшения энергии связи Si2p – не наблюдается. Спектры Si2p локализованы на E_{св} = 99,5 эВ, что соответствует несвязанному кремнию. Полученные данные свидетельствуют о наличии смеси Si и NiSi.

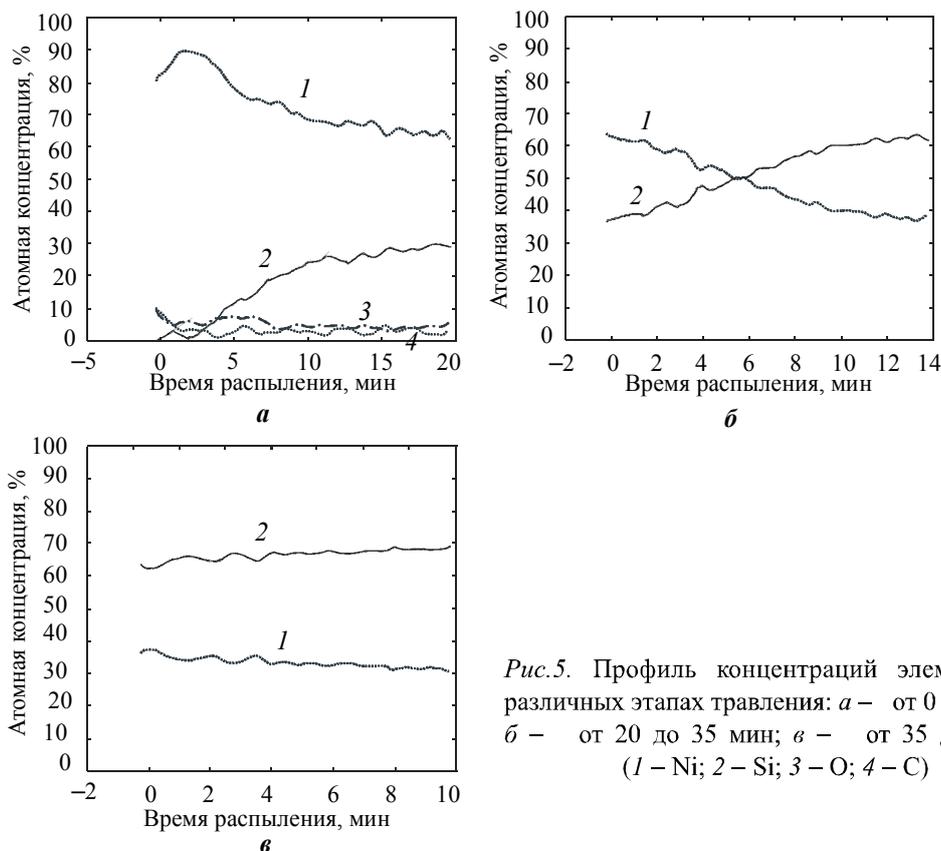


Рис.5. Профиль концентраций элементов на различных этапах травления: а – от 0 до 20 мин; б – от 20 до 35 мин; в – от 35 до 45 мин (1 – Ni; 2 – Si; 3 – O; 4 – C)

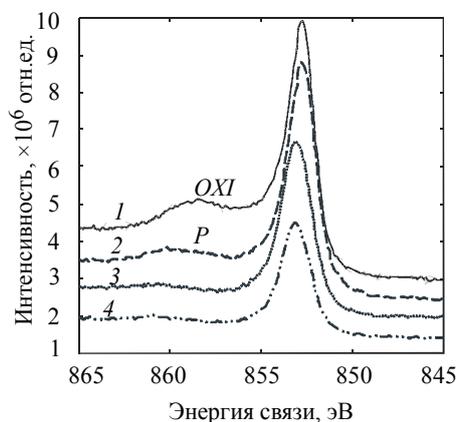


Рис.6. Спектры Ni2p3: 1 – после «обдуба», без травления; 2 – после 20 мин травления; 3 – после 34 мин травления; 4 – после 44 мин травления

Пленка силицида никеля неоднородна по толщине и состоит из двух основных слоев: твердого раствора Ni–Si; фазы NiSi. Эти данные подтверждают результат, полученный с помощью рентгеновской рефлектометрии. Как видно из рис.4, произошла взаимная диффузия, и никель проник в слой кремния, образовав фазу силицида никеля. Учитывая данные, полученные с помощью ЭСХА, смоделирована структура, состоящая из 4 слоев. Сумма толщин всех слоев составляет 25 нм. Ориентировочные результаты подбора параметров обработки рефлектометрических данных при помощи генетического алгоритма представлены в табл.4.

К сожалению, этот результат не удовлетворяет условию полного совпадения и позволяет лишь оценить толщины, что может быть обусловлено сложным фазовым составом и большой шириной границ раздела. Этот фактор сыграл еще большую роль в процессе измерения параметров образца дисилицида никеля.

Полное размытие границы пленка–подложка произошло в пленке дисилицида кремния на кремниевой подложке (NiSi₂ на Si) – на угловой зависимости коэффициента отражения на обеих спектральных линиях интерференционных максимумов не наблюдается.

Таблица 4

Параметры модельной структуры NiSi

Материал, ат.%	Толщина слоя d , нм	Плотность ρ , г/см ³
NiO (0,82:0,18)	6,882	6,67
NiSi (0,64:0,34)	6,919	7,2
NiSi (0,33:0,67)	7,759	6,26
NiSi (0,27:0,73)	3,926	6,59
Si	∞	2,33

Примечание. По данным расчета количественное значение шероховатости точно выявить не удалось.

Однако расчет позволил выявить среднюю плотность образовавшейся неоднородной структуры, равную 3,69 г/см³. Критический угол для этого образца составил 0,28°. Для проверки предположения о размытии границы пленка–подложка проведены рефрактометрические исследования. Значения оптических констант, усредненные для всего слоя, представлены в табл.5.

Таблица 5

Параметры модельной структуры NiSi₂ по данным рентгеновской рефрактомерии

Материал	δ_α	δ_β
Неоднородная пленка NiSi ₂	$1,1 \cdot 10^{-5}$	$0,9 - 1 \cdot 10^{-5}$
Подложка Si	$7,4 \cdot 10^{-6}$	$5,8 \cdot 10^{-6}$

Рассчитанная средняя плотность пленки составила 3,9 г/см³, что удовлетворительно согласуется с данными, полученными методом рентгеновской рефлектометрии.

Таким образом, с помощью рентгеновской рефлектометрии можно получить информацию о структурах не только однородных по своему составу, но и неоднородных (неоднородность может возникнуть во время технологических обработок). Для расчета параметров структуры отношение интенсивностей отраженного сигнала является важным условием точного их определения, а результаты такого расчета согласуются с экспериментом независимо от выбранной длины волны. Вычисление параметров тонких пленок из отношения интенсивностей существенно сокращает время, затрачиваемое на вычисления, и увеличивает точность расчета параметров структуры, позволяет не учитывать влияние геометрических факторов, приборных эффектов и т.п. [12], сокращает набор переменных до одного фиксированного значения, которое как наиболее точное дает удовлетворительные результаты при выявлении расчетного значения и сравнения его с экспериментом.

Следует отметить что, если для случая однородных структур представленный метод дает полное представление об исследуемом образце по структурным параметрам, то для неоднородных систем (силицидов и различных сплавов твердых материалов) требуются дополнительные методы исследования, которые подтверждают и дополняют получаемые с помощью рефлектометрии данные. Исследования неоднородных систем с распределенной оптической плотностью являются актуальными и требуют продолжения.

Литература

1. Lavoie C., d'Heurle F.M., Detavernier C., Cabral C. Towards implementation of a nickel silicide process for CMOS technologies // Microelectronic Engineering. – 2003. – Vol. 70. – P. 144–157.
2. Tur'yanskii A.G., Vinogradov A.V., Pirshin I.V. A Two-Wave X-ray Reflectometer // Instrumentation and Experimental Techniques. – 1999. – Vol. 41. – N 5. – P. 94.
3. Турьянский А.Г., Пиршин И.В. Рентгеновский рефрактометр // ПТЭ. – 2001. – № 2. – С. 109–117.

4. **Wormington M., Panaccione C., Matney K.M., Bowen D.K.** Characterization of structures from X-ray scattering data using genetic algorithms // *Phil. Trans. R. Soc. Lond.* – 1999. – Vol. 357. – P. 2827–2848.
5. **Ulyanekov A., Sobolewski S.** Extended genetic algorithm: application to x-ray analysis // *J. Phys. D: Appl. Phys.* – 2005. – Vol. 38. – P. A235–A238.
6. **Parratt L.G.** Surface Studies of Solids by Total Reflection of X-Rays // *Phys. Rev.* – 1954. – Vol. 95. – P. 359–369.
7. **Nevoit, Croce P.** Caracterisation des surfaces par reflexion rasante de rayons X. Application a l'etude du polissage de quelques verres silicates // *Revue Physique. Appliquee.* – 1980. – Vol. 15. – P. 761–779.
8. **Henke B.L., Gullikson E.M., Davis J.C.** X-Ray Interactions: Photoabsorption, Scattering, Transmission, and Reflection at $E = 50\text{--}30,000$ eV, $Z = 1\text{--}92$ // *Atomic Data and Nuclear Data Tables.* – 1993. – Vol. 54 (Issue 2). – P. 181–342.
9. Thermally Robust Nickel Silicide Process for Nano-Scale CMOS Technology / **Soon-Young Oh et al.** // *IEICE Trans. Electron.* – 2005. – Vol. E88-C, N.4. – P.651–655.
10. **Shi-Li Zhan, Mikael Ostling.** Metal Silicides in CMOS Technology: Past, Present, and Future Trends // *Critical Reviews in Solid State and Materials Sciences.* – 2003. – Vol. 28. – N 1. – P. 1–129.
11. Reinvestigation of the Ni/Si interface: Spectromicroscopic evidence for multiple silicide phases / **L. Gregoratti, S. Günther, J. Kovac et al.** // *Phys. Rev.* – 1998. – Vol. B 57. – N 12. – P. R6799–R6802.
12. Определение параметров многослойных наноструктур с помощью двухволновой рентгеновской рефлектометрии / **Н.Л.Попов, Ю.А.Успенский, А.Г.Турьянский и др.** // *ФТП.* – 2003. – Т. 37, вып. 6.

Апрелов Сергей Аркадьевич – аспирант лаборатории радиационных методов технологии и анализа МИЭТ. *Область научных интересов:* компьютерный анализ имплантированных систем, многослойных наноструктур и поверхностных слоев.

Герасименко Николай Николаевич – доктор физико-математических наук, профессор, начальник лаборатории радиационных методов технологии и анализа МИЭТ. *Область научных интересов:* ионная имплантация в полупроводники, процессы формирования структур (самоорганизация) в твердых телах при облучении.

Рыбачек Елена Николаевна – кандидат технических наук, старший научный сотрудник НПК «Технологический центр» МИЭТ. *Область научных интересов:* технологии производства ИС.

Сенков Вячеслав Маркович – кандидат физико-математических наук, доцент, старший научный сотрудник Института общей физики им. А.М. Прохорова РАН. *Область научных интересов:* физика твердого тела и рентгеновских лучей.

Пиришин Игорь Владимирович – кандидат технических наук, научный сотрудник рентгеновской группы Отделения физики твердого тела физического института им. П.Н.Лебедева РАН. *Область научных интересов:* многослойные наноструктуры и поверхностные слои, диагностика наноструктур рентгенооптическими методами, рефракционная рентгеновская оптика, призмная рентгеновская спектрометрия, координатно-чувствительные приемники излучения, локальный рентгено-флуоресцентный анализ, томография и проекционная рентгеновская микроскопия.

Турьянский Александр Георгиевич – кандидат физико-математических наук, главный специалист, руководитель рентгеновской группы Отделения физики твердого тела Физического института им. П.Н.Лебедева РАН. *Область научных интересов:* многослойные наноструктуры и поверхностные слои, диагностика наноструктур рентгенооптическими методами, рефракционная рентгеновская оптика, призмная рентгеновская спектрометрия, координатно-чувствительные приемники излучения, локальный рентгено-флуоресцентный анализ, томография и проекционная рентгеновская микроскопия.

Цехош Владимир Игоревич – ведущий специалист, ведущий инженер-технолог Отделения физики твердого тела Физического института им. П.Н. Лебедева РАН. *Область научных интересов:* физика полупроводников, гетероструктуры, квантово-размерные структуры, наноструктуры, молекулярно-лучевая эпитаксия, дифракция рентгеновского излучения и дифракция электронов.

МИКРОЭЛЕКТРОННЫЕ ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ

УДК 621.382.049.77-022.532

Кремниевая транзисторная наноэлектроника

А.А. Орликовский

Физико-технологический институт РАН (г. Москва)

Проведен анализ кремниевой микроэлектроники как наиболее важной нанотехнологии в мире. Рассмотрены основные тенденции развития литографии при переходе к наноразмерным нормам. Проанализирована эволюция элементов конструкции МДПТ и влияния квантовых эффектов на их функционирование при длинах канала порядка 10 нм. Обсуждается роль квантовых эффектов при переходе в область приборов с суб-1 нм размерами.

Электронная промышленность на основе производства кремниевых интегральных схем (ИС) развивается с 1959 г. после их изобретения Джеком Килби (ныне лауреатом Нобелевской премии) и Робертом Нойсом. В 2000 г. передовые компании перешли рубеж 100 нм для минимального размера элементов транзистора и тем самым преодолели рубеж между микроэлектроникой и наноэлектроникой. Это событие сравнивают с «большим взрывом». Образ «большого взрыва» заимствован из космологии («большой взрыв», в результате которого родилась наша Вселенная). В результате «большого взрыва» микроэлектроники накопление огромного технологического опыта привело к рождению целого ряда новых направлений развития электроники: наноэлектроники, микро- и наноэлектромеханики, молекулярной электроники, магнитонаноэлектроники, оптонаноэлектроники, бионаносенсорики, полимерной наноэлектроники и других. В то время как многие из предложенных нанотехнологий лишь обещают оказать сильное влияние на развитие мирового сообщества, кремниевая микроэлектроника уже стала наиболее важной нанотехнологией в мире. Объем продаж изделий микроэлектроники к 1998 г. составил 1 трлн USD, а к 2010 г. он утроится, что примерно 10% мирового валового продукта [1].

Стремительное развитие микроэлектроники подчинялось закону Мура (экспоненциальное со временем увеличение числа транзисторов на кристалле). Это приводило к уменьшению стоимости на функцию электронной цепи. Например, стоимость памяти на бит уменьшалась вдвое каждые два года. Уменьшается также время переключения на функцию. С 1959 г. быстродействие интегральных схем улучшилось на 4 порядка. По мере уменьшения размеров уменьшались потребляемая мощность и энергия на каждую операцию переключения. Энергия на переключение с 1959 г. уменьшилась на 6 порядков. Число транзисторов на чип увеличилось в 10^8 раз.

Основную долю рынка (до 90% в настоящее время) интегральных схем, начиная с 1980 года, составляют ИС на МДП-транзисторах в конфигурации КМДП (комплементарные МДП, т.е. взаимодополняющие *p*-МДП и *n*-МДП-транзисторы, включенные последовательно в цепи «источник питания – точка с нулевым потенциалом»). Главное

преимущество таких схем заключается в том, что в любом из двух статических состояний («0» или «1») один из транзисторов закрыт, и ток в упомянутой выше цепи определяется током транзистора в выключенном состоянии $I_{\text{выкл}}$. Это означает, что, если $I_{\text{выкл}}$ пренебрежимо мал, ток от источника питания потребляется только в режиме переключения, а потребляемая мощность пропорциональна частоте переключения и может быть оценена простым соотношением:

$$P_{\Sigma} \approx C_{\Sigma} f U^2, \quad (1)$$

где C_{Σ} – суммарная емкость нагрузки на выходе логического элемента, f – частота переключения, U – напряжение питания. Практически вся потребляемая мощность выделяется в виде джоулева тепла, которое должно быть отведено от кристалла. При современных средствах отвода тепла можно достичь приблизительно 200 Вт на квадратный сантиметр площади кристалла. Если мы хотим оценить достижимую частоту в кристаллах сложностью N логических элементов, то из (1) $f \approx P_{\text{макс}} / C_{\Sigma} N U^2$. Для $N = 10^{11}$ (для длин канала порядка 10 нм), $P_{\text{макс}} = 1$ кВт, $U = 0,5$ В и $C_{\Sigma} = 1$ фФ $f = 40$ ГГц. Это значительно меньше собственной предельной частоты транзистора с длиной канала 10 нм (порядка 1 ТГц), но это достаточно много, чтобы создать суперкомпьютеры с очень высокой производительностью (более 10 петафлопс).

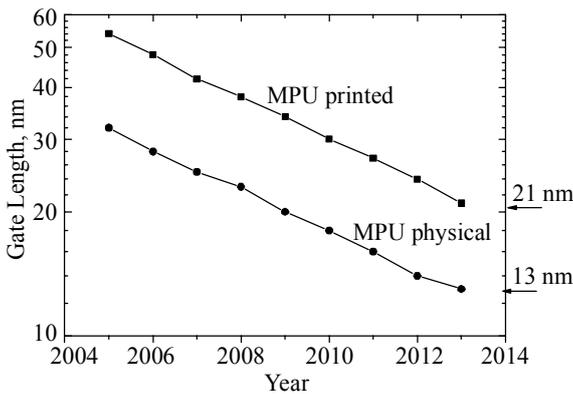


Рис. 1. Прогноз уменьшения длины затвора МДП-транзистора (ITRS 2005)

Критическими размерами в ИС являются минимальный размер (MP), воспроизводимый в фоторезисте методом фотолитографии, и длина канала МДП-транзистора L_k . Обычно L_k удается сделать равным приблизительно 0,55 MP. На рис. 1 изображены зависимости изменения этих размеров по годам в соответствии с ITRS 2005 (International Technology Roadmap for Semiconductor – ежегодно обновляемый ведущими экспертами международный прогноз развития техники ИС). Видно, что MP, равный 22 нм, будет достигнут в производстве к 2013 г., при этом L_k составит 12 нм. Если

L_k равно 12 нм, то на кристалле можно разместить 10^{12} транзисторов. Долгосрочный прогноз предсказывает возможность создания гигантских интегральных схем на транзисторах с длиной канала до 6 нм, но этот диапазон (6–12 нм) требует отдельного обсуждения.

Литография. В настоящее время передовыми компаниями уже освоено производство с MP 65 нм, при этом L_k равна 35 нм. Столь малые MP достигаются методом оптической литографии [2]. Хотя стоимость оптических литографических машин с 1965 г. увеличилась от 10 тыс. долл. до 35 млн долл., а стоимость высокопроизводительного производства возросла до 2–3 млрд долл. США к настоящему времени, стоимость транзистора за это же время уменьшилась на семь порядков величины. Таким образом, главным стимулом развития микроэлектроники является экономика.

В современных производствах доминируют высокопроизводительные (100 пластин/ч) проекционные (с уменьшением 4:1) степперы-сканеры (пошаговое экспонирование изображения на чип со сканированием светового пятна в пределах одного чипа) с эксимерными лазерами в области глубокого ультрафиолета в качестве источников све-

та. Это в настоящее время лазеры на K₂F (248 нм) и на ArF (193 нм). Первый отечественный степпер с источником света на длине волны 248 нм был создан в конце 80-х годов минским предприятием «Планар» под научно-методическим руководством Физико-технологического института РАН и лично академика РАН К.А.Валиева. К сожалению, литограф не был инсталлирован в каком-либо из отечественных производств, что связано с проблемами, возникшими в связи с перестройкой.

Разрешение процесса литографии (достижимый МР) определяется из известной формулы Релея

$$R = k_1 \lambda / NA, \quad (2)$$

в которой k_1 – коэффициент Релея, λ – длина волны, NA – числовая апертура объектива.

Коэффициент Релея ограничивается несовершенством систем изображения, в том числе дифракционными эффектами, и несовершенством регистрирующей среды. Постоянное совершенствование объективов, чувствительности и контрастности фоторезистов, процесса экспонирования и проявления позволило в современных степперах достичь $k_1 = 0,35 - 0,25$, $NA = 0,85 - 0,95$. Для предельного расчета и $\lambda = 193$ нм получим $R = 50$ нм, т.е. почти в 4 раза меньше длины волны. Постоянное улучшение разрешения [3] достигается оптимальной коррекцией шаблонов, применением фазовых шаблонов, оптимальным выбором резистов (многослойных, с высокими коэффициентами преломления n , с химическим усилением и т.д.), применением внеосевых источников освещения, линз из материалов с высокими n (линзы из кварца с $n = 1,56$ могут быть заменены объективами из алюмо-лютециевого граната (LuAG) с $n = 2,1$) и, наконец, использованием поляризованного света.

Радикальное увеличение NA дает применение иммерсии. В зазор между объективом и пластиной постоянно подается и отбирается жидкость. Поскольку числовая апертура пропорциональна коэффициенту преломления среды n между объективом и пластиной, NA увеличивается в n раз. При использовании воды ($n = 1,436$ на длине волны 193 нм) $NA = 1,2 - 1,35$. Возможно применение жидкостей с $n = 1,6; 1,8$ (жидкие полимеры, добавки наночастиц, солей, кислот к воде и т.д.). В этих случаях возможно достижение так называемых гипер-NA, равных 1,4–1,75, и разрешения 32 нм, а это означает шестикратное улучшение разрешения по отношению к длине волны. Нужно помнить при этом, что с увеличением NA катастрофически уменьшается доступная глубина фокуса

$$DOF = k_2 \lambda / NA^2. \quad (3)$$

Так, для разрешения $R = 45$ нм доступная глубина фокуса составляет 150 нм, а для $R = 32$ нм всего лишь 100 нм.

В иммерсионных степперах-сканерах возникают также новые источники дефектов, такие как пузырьки, капли и др. Требования к жидкостям для применения в литографических машинах являются чрезвычайно жесткими. Процесс подачи и отбора жидкости в зазоре между линзой и пластиной должен создавать исключительно ламинарное течение, жидкость должна обладать высокой прозрачностью на длине волны 193 нм ($\geq 90\%/мм$), высокой термической и химической стабильностью, низкой вязкостью, не допускается возможность химического взаимодействия с материалом линзы, резистом и другими материалами системы. Хотя все это создает большие проблемы разработчикам жидкостей для иммерсионных литографов, продвижение в создании новых жидких материалов значительно. Обозначены рубежи для такого продвижения, в частности, жидкие материалы 2-го ($n \geq 1,6$) и третьего ($n \geq 1,8$) поколений, которыми должна быть заменена вода [4].

Определенные надежды возлагались на применение эксимерных лазеров на F_2 в качестве источников света на длине волны 157 нм. На этой длине волны кварц является не прозрачным, и в качестве материалов линз необходимо применение CaF_2 . На фоне интенсивного развития иммерсионной литографии на 193 нм у литографии-157 остаются проблемы, а именно, качество фторида кальция (достижение высокой оптической однородности) и выбор резиста. Применение иммерсии в литографах на такой длине волны остается проблематичным. Хотя в развитие литографии-157 вложены большие средства, будущее ее применения не определено и, возможно, является бесперспективным.

Компания Интел, которая славится тем, что развивает свои производства в ритме закона Мура для сложнейших изделий микроэлектроники – микропроцессоров, намерена продлить жизнь иммерсионной литографии-193 в производстве вплоть до 16 нм. Можно с уверенностью утверждать, что на производствах ИС с МР 32 нм будут использоваться иммерсионные литографы на 193 нм. Это подтверждается и работами по технологии литографии фирмы IBM.

Дальнейшее уменьшение МР возможно применением оптической литографии на длине волны 13,5 нм (мягкий рентген или экстремальный ультрафиолет, ЭУФ). На этой длине волны света невозможно использовать преломляющую оптику из-за интенсивного поглощения такого света всеми материалами. Поэтому в таких системах используют отражающую оптику на рентгеновских зеркалах. При использовании современных методов нанесения многослойных покрытий с чередующимися слоями Mo-Si удастся получить коэффициент отражения до 70%, что позволяет строить объективы с 4–6 зеркалами. Шаблоны также становятся отражающими. Потери излучения требуют создания источника излучения на длине волны 13,5 нм с оптической мощностью свыше 115 Вт.

Главными аргументами развития ЭУФ-литографии (ЭУФЛ) являются следующие. Во-первых, ЭУФЛ является проекционной оптической и использует стеклянные заготовки для шаблонов. В отличие от ионной, электронной (в том числе многолучевой) или импринт ЭУФЛ не требует создания новой инфраструктуры и обеспечивает высокую производительность. Эксперты фирмы Интел называют импринт-литографию «разрушающей» из-за необходимости в случае ее применения резкого изменения инфраструктуры производства шаблонов и всей технологии литографии. Главная цель – продвинуть оптическую литографию как можно дальше, не используя более дорогие альтернативы без абсолютной необходимости. Во-вторых, ЭУФЛ может быть использована для нескольких поколений ИС (для $k = 0,4$ и $NA = 0,25$ $R = 22$ нм, а для предельного расчета с $NA=0,45$ достижимо $R = 10–12$ нм), в частности, для диапазона минимальных размеров 32–12 нм. И, в-третьих, работоспособность ЭУФЛ уже продемонстрирована на прототипах литографов. Внедрению ЭУФЛ будут предшествовать работы по достижению нужной оптической мощности источника (необходимо 115 Вт, пока достигнуто 20–30 Вт), разработка ультраплоских подложек для масок с очень низкой плотностью дефектов, разработка транспортной системы масок, разработка резистов, отвечающих требованиям по разрешению, чувствительности и ширине шероховатости края. Проблематичным кажется возможность применения фазовых шаблонов, так как ошибка в изменении рельефа шаблона на величину 0,11 нм дает сдвиг фазы на 6 градусов. Эта оценка дает представление о необходимой точности воспроизведения рельефа фазового шаблона. Промышленный ЭУФ-литограф планируется создать в 2007–2009 гг. (ASML). Его стоимость не сильно превысит стоимость иммерсионного литографа и составит 25–30 млн долл. Следует отметить, что и в России сделаны крупные научно-практические заделы по ЭУФЛ в ИФМ РАН, ФТИ им. А.Ф.Иоффе и др., что обеспечивает возможность создания отечественного оборудования столь высокого уровня и позволит «успеть вскочить на подножку столь

столь высокого уровня и позволит «успеть вскочить на подножку столь быстро идущего поезда мировой электронной промышленности», не только закупая иностранное оборудование, но используя и свои разработки, развивая тем самым и отечественное электронное машиностроение.

Эволюция МДП-транзистора. Законы масштабирования МДПТ (рис.2) требуют, чтобы при уменьшении его размеров в плоскости кристалла должны быть уменьшены его размеры по глубине. Это относится, прежде всего, к толщине подзатворного диэлектрика и к глубине залегания p - n -переходов. Уже при MP , равных 65 нм, толщина окисла должна быть равной 1 нм, что недопустимо из-за неприемлемо высоких токов туннелирования через тонкий диэлектрик. Эта проблема решается применением диэлектриков с высоким ϵ (исследуются возможности применения HfO_2 , ZrO_2 , $ZrSiO_4$, $HfSiO_4$, Si_3N_4 , Al_2O_3 и др.). Например, для HfO_2 $\epsilon = 25$, тогда необходимая толщина диэлектрика $d_{HfO_2} = d_{э\text{кв}} \cdot \epsilon_{HfO_2} / \epsilon_{SiO_2} \approx 6$ нм (для обсуждаемого примера), что обеспечивает ничтожно малые туннельные токи через диэлектрик. Критерии выбора подзатворного диэлектрика многообразны. Это достаточно большая величина ϵ , высокая термическая стабильность, возможность наращивания сплошных и однородных слоев толщиной несколько нанометров, удовлетворительное взаимное расположение запрещенных зон диэлектрика и кремния (высота барьеров для электронов и дырок не менее 1 эВ, например для HfO_2 и $HfSiO_4$ 1,5 и 3,4 эВ соответственно), отсутствие реакции с кремнием, удовлетворительная граница раздела с кремнием (дефекты, встроенный заряд и т.п.) [5].

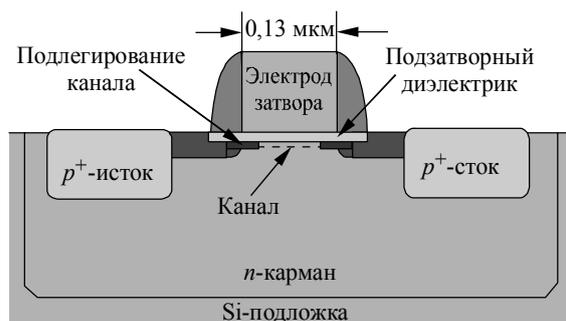


Рис.2. Структура МДП-транзистора

Нужно также учитывать, что в режиме инверсии подзатворный диэлектрический слой как бы утолщается, во-первых, из-за того, что максимум плотности подвижных носителей в канале отстоит от границы кремний-диэлектрик на величину около 0,3 нм (такую оценку дает совместное решение уравнений Шредингера и Пуассона), и, во-вторых, из-за образования области обеднения (> 1 нм) в легированном поликремниевом затворе на границе с диэлектриком. Кроме того, из-за отсутствия возможности в нужной степени легировать поликремниевый затвор не удастся получить малые сопротивления затвора. В n -МДПТ поликремниевый затвор легируется бором, атомы которого способны диффундировать через подзатворный диэлектрик в канал. По этим причинам разрабатываются технологии замены поликремниевых затворов на металлические. Требования к материалам металлических затворов достаточно сложны. Кроме высокой проводимости и термической стабильности, высокой адгезии и низкой реактивности (недопустимо окисление) металлический электрод должен обладать необходимой работой выхода электронов. Поскольку в КМОП-схемах совмещены транзисторы двух типов (n и p), и их необходимо симметризовать, нужны два типа электродов с разными

работами выхода 4,1 – 4,4 эВ и 4,8 – 5,1 эВ [6]. Например, в работе [7] использованы Ta (с работой выхода 4,3 эВ на HfSiO_4) для n -МДПТ и TiN (4,9 эВ) для p -МДПТ.

Привлекательно использование силицидов металлов, что расширяет спектр возможностей для технологов. Например, силицид никеля NiSi имеет низкую температуру образования (450 °С), низкое сопротивление (15 мкОм/см), не реагирует с двуокисями кремния и гафния. Этот силицид является метастабильной фазой из числа соединений никеля с кремнием и при относительно невысоких температурах (> 700 °С) переходит в стабильную фазу дисилицида никеля NiSi_2 , имеющего существенно большее сопротивление. Поэтому при использовании силицида никеля необходимо ограничение температурного бюджета каких либо последующих технологических процессов производства ИС. Необходимы интенсивные исследования МДПТ с металлическими затворами.

Глубина залегания p - n -переходов стока и истока должна быть равной примерно $0,5 L_k$. Это достигается имплантацией ионов примеси при малых ускоряющих напряжениях (0,1–1 кВ). При таких напряжениях ток ионов в традиционных имплантерах с системами сепарации ионов падает до 10^{-6} – 10^{-5} А/см², что катастрофически увеличивает время набора дозы, т.е. ухудшает производительность. Проблема может быть решена применением плазменно-иммерсионных ионных имплантеров (ПИИИ) [8] на основе широкоапертурных источников плотной плазмы (с плотностью до 10^{12} см⁻³). В этом случае плотность тока может быть увеличена до 10 мА/см² по порядку величины, а

время набора дозы снижено до долей минуты. Принцип работы такого имплантера прост (рис.3). На подложку подается импульсное смещение, амплитуда которого равна ускоряющему напряжению. Вокруг пластины формируется область пространственного заряда. Давление в камере избирается таким образом, чтобы ионы преодолевали область пространственного заряда без столкновений. Тогда ионы внедряются в приповерхностный слой кремния с энергией, ограниченной созданным смещением. Впервые в отечественной практике плазменно-иммерсионный ионный имплантер создан в Физико-технологическом институ-

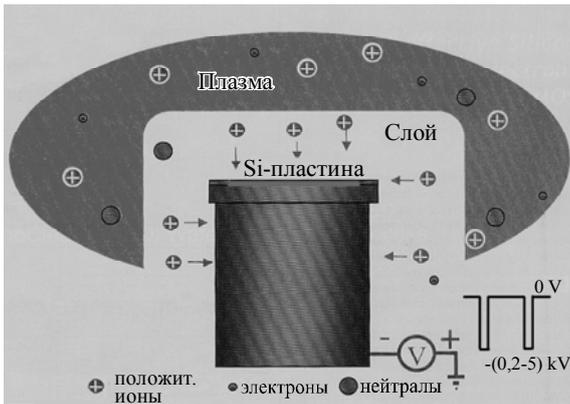


Рис.3. Плазменно-иммерсионная ионная имплантация. Иллюстрация принципов

те РАН (ФТИАН), на котором получены высокая равномерность и производительность процесса легирования мелко залегающих p - n -переходов [9].

Плазменные процессы играют большую роль в полупроводниковых производствах. Если процессы литографии повторяются в производстве ИС приблизительно 25 раз, то после каждой из литографий следует один или более плазменный процесс. Это изотропное или анизотропное травление кремния и кремнийсодержащих диэлектриков, процессы осаждения диэлектрических или полупроводниковых тонких слоев с заданными свойствами, процессы очистки поверхности пластины от органических загрязнений и атомов тяжелых металлов, стабилизации и снятия резиста, частичной планаризации рельефа пластины и, наконец, имплантации [10]. Автоматизированные установки для реализации этих процессов созданы во ФТИАН. Это, как и в случае с ЭУФ-литографом, позволит при создании новых отечественных производств избежать закупок этого класса оборудования в иных странах.

Правила масштабирования МДПТ требуют увеличения степени легирования канала, что предотвращает смыкание областей пространственного заряда стока и истока, но приводит к снижению подвижности носителей в канале из-за рассеяния электронов и дырок на атомах примеси и, следовательно, к снижению тока транзистора в открытом состоянии $I_{\text{вкл}}$. Увеличить ток возможно, используя тонкие слои напряженного кремния [11]. В производствах с МР 90 и 65 нм для транзисторов на объемной подложке используются локальные напряжения, например, локальное сжатие кремния в области канала p -МДПТ селективным эпитаксиальным зарастиванием «кремний-германием» вытравленных предварительно областей стока и истока. При содержании Ge около 17% $I_{\text{вкл}}$ p -МДПТ увеличивается на 30%. При этом для n -МДПТ необходимо достичь одноосного растяжения решетки кремния в канале по линии тока. Это обеспечивается, например, нанесением сильно напряженной пленки нитрида кремния над n -канальным транзистором, что увеличивает ток $I_{\text{вкл}}$ на 10%. Поскольку любой из процессов вносит тот или иной уровень напряжений в приповерхностные слои кремния, оптимизация технологического процесса становится сложной задачей, и без того сложный процесс производства интегральных схем дополнительно усложняется.

Радикальное улучшение свойств обоих типов транзисторов дает биаксиальное растяжение в плоскости кристалла. Это объясняется тем, что в условиях биаксиального растяжения зонная структура кремния изменяется, в частности, это приводит к подъему четырехкратно вырожденных эллипсоидов с высокой эффективной массой электронов и к снижению двухкратно вырожденных эллипсоидов с низкой эффективной массой. В результате большинство электронов удерживается в долинах с низкой эффективной массой при более низких энергиях, а междолинное рассеяние уменьшается. В валентной зоне биаксиальное растяжение увеличивает вырождение «тяжелые дырки/легкие дырки» в точке Г, что приводит к уменьшению эффективной массы дырок для транспорта в плоскости кристалла и уменьшению междолинного рассеяния. При этом подвижность электронов увеличивается более чем вдвое, а дырок – почти на 50%.

Предложен ряд технологических маршрутов получения напряженных кремниевых слоев, основанных на эпитаксиальном росте кремния на релаксированных слоях Ge–Si. Результирующие структуры относятся к технологии КНИ (кремний на изоляторе), переход к которым вероятнее всего неизбежен для МР < 45 нм.

В таблице отражены вероятные изменения технологии и материалов в структуре МДП по мере уменьшения МР.

Изменение технологии и материалов (прогноз)

Поколение ИС	65 нм	45 нм	32 нм	22 нм
Технология	Объемная подложка. Одноосные напряжения	Напряженный КНИ. Биаксиальные напряжения	Напряженный КНИ. Сверхтонкий КНИ	Сверхтонкий КНИ
Затвор	Поликремний	Поликремний	Металлы, силициды	Металлы, силициды
Подзатворный диэлектрик	SiON	SiON/ HfO ₂ и др.	HfO ₂ или др.	HfO ₂ или др.

Применение тонких слоев КНИ [12] позволяет существенно снизить уровень токов утечки, исключить влияние короткоканальных эффектов, уменьшить паразитные емкости и при длинах канала порядка 10 нм вообще отказаться от легирования канала. При таких длинах канала реализуется баллистический перенос носителей через область канала. Заметим, что в баллистических транзисторах с малой длиной канала понятие подвижности

теряет смысл, так как электрон пролетает канал без столкновений. Тем не менее выигрыш от применения напряженного кремния может быть значительным благодаря уменьшению эффективной массы электронов. Кинетическое моделирование [13] показывает, что ток увеличивается втрое при изменении эффективной массы от значения $m = 0,98m_0$ до $m = 0,18m_0$. Влияние эффективной массы на ток обусловлено тем, что более легкие электроны быстрее пролетают канал. Кроме того, от эффективной массы также зависит функция распределения электронов и уровень Ферми в контакте, следовательно, изменение эффективной массы приводит к изменению распределения инжектируемых частиц по скоростям.

Квантовые эффекты в МДПТ в тонком КНИ. При длинах канала порядка 10 нм МДПТ становится квантовым [14]. Электрон преодолевает канал *баллистически* как волна Де Бройля. Если бы граница «канал–сток» была резкой, необходимо было бы учесть *продольное квантование*, возникающее из-за отражения волны на этой границе и интерференции падающей и отраженной волн.

Использование тонких слоев кремния в качестве канала обязывает учесть *эффекты поперечного квантования*. Энергия поперечного квантования электрона в тонком слое КНИ вносит вклад в величину порогового напряжения. Величина поправки может быть оценена как энергия наинизшего состояния поперечного квантования в канале

$$E_0 = (\hbar\pi)^2/2m(d_{Si})^2. \quad (4)$$

Для тонких слоев (порядка 10 нм и меньше) и $m = 0,33m_0$ эта поправка невелика по сравнению с типичными пороговыми напряжениями (0,5 В) и составляет 10 мэВ. Это сдвиг не только порогового напряжения, но и напряжения выключения МДПТ, что может вызвать существенное изменение подпорогового тока. Поперечное квантование может играть существенную роль при учете *поверхностного рассеяния*. Квантовый расчет дает исключительно высокие степени зависимости интенсивности рассеяния от d_{Si} вплоть до d_{Si}^{-6} в зависимости от характера шероховатости. Поверхностное рассеяние может существенно уменьшить токи КНИ-нанотранзисторов. Чтобы избежать этого нужны весьма совершенные атомно-слоевые технологии. Впрочем не только для получения тонких слоев кремния, но и подзатворных диэлектриков.

Наиболее существенным является возможность *прямого туннелирования электронов между стоком и истоком*, когда транзистор выключен. Величина этого тока может быть оценена из выражения

$$I_T \sim \exp\{-2(2mU_b/\hbar W^2)^{1/2}\}, \quad (5)$$

в котором U_b – высота барьера над уровнем Ферми в контактах, W – ширина барьера. Термоэмиссионный ток I_{TE} в закрытом состоянии транзистора, когда уровень Ферми в контактах ниже высоты потенциального барьера оценим с помощью выражения

$$I_{TE} \sim \exp\{-(U_b/kT)\}. \quad (6)$$

Условие преобладания I_T над I_{TE} легко получить из (5) и (6):

$$W < (\hbar^2 U_b / 8mkT)^{1/2}. \quad (7)$$

Для $I_{TE}(I_{\text{выкл}}) = 10^{-9}$ А/мкм, $U_b/kT = 20$ ширина барьера или длина канала $W (L_K) < 12$ нм. Заметим, что наблюдавшаяся в эксперименте величина $I_{\text{выкл}}$ при длине канала 5 нм составила 10^{-6} А/мкм [15].

Частота и потребляемая мощность КМОП ИС. Полученный результат обязывает уточнить формулу (1), а именно, учесть токи утечки и ток прямого туннелирования

$$P_{\Sigma} \approx C_{\Sigma} f(U)^2 + (I_{\text{ут}} + I_{\text{выкл}})U, \quad (8)$$

где $I_{\text{ут}}$ – токи утечки, включая ток прямого туннелирования, $I_{\text{выкл}} \sim \exp(-eV_{\text{пор}}/kT)$ – ток транзистора в выключенном состоянии (подпороговый участок ВАХ МДПТ).

В соответствии с прогнозом ITRS 2001 предполагалось, что напряжение питания при МР 22 нм можно будет снизить до 0,4 В, но в прогнозе ITRS 2003 предполагаемая цифра увеличена до 0,8 В из-за больших флуктуаций пороговых напряжений. Пороговые напряжения существенно снижать нельзя из-за экспоненциального роста $I_{\text{выкл}}$. Давайте выполним две оценки для схем на МДПТ с длинами канала 12 и 5 нм. Ширину каналов изберем равными 50 и 20 нм соответственно. Предположим в этих случаях, что число транзисторов станет равным 10^{11} и $5 \cdot 10^{11}$ соответственно. Простой расчет статической мощности (второй член в выражении (8)) дает для первого случая 4 Вт, а для второго – 8 кВт(!). Видно, что последнее совершенно не допустимо.

Если принять $P_{\text{ст}} \leq 0,1P_{\Sigma}$, площадь кристалла 4 см², МР = 22 нм (длина канала 13 нм), число логических элементов 10^{10} , $P_{\Sigma} = 800$ Вт, то максимальная частота $f_{\text{макс}} \leq 100$ ГГц. Это так называемые «high performance integrated circuits (НРИС)», т.е. интегральные схемы с предельно высокими характеристиками, в которых благодаря эффективному отводу тепла (струи жидкого газа с его последующей регенерацией) достигается максимальная частота. Для воздушного охлаждения целесообразно принять $P_{\Sigma} = 80$ Вт, тогда $f_{\text{макс}} \leq 10$ ГГц. Поэтому продвижение в область все меньших длин канала в суб-10 нм диапазон неизбежно приводит к потерям в стремлении достичь предельно высоких характеристик. В последнем ITRS 2005 есть прогнозные оценки для схем на транзисторах с длиной канала 6 нм (но не меньше), но в суб-10 нм диапазоне уже не идет речи о НРИС.

Суб-10 нм диапазон минимальных размеров. Таким образом, транзистор с длиной канала меньше 10 нм становится туннельным, током которого можно управлять, меняя высоту барьера напряжением на затворе. Критическим вопросом для туннельных приборов всегда была воспроизводимость тока во включенном состоянии. Окажется ли приемлемым для применений в ультрабольших ИС туннельный МДПТ при новых технологических возможностях?

Область суб-10 нм размеров (область мезоскопических приборов) требует поиска новых приборов и новых методов литографии, способных претендовать в будущем на устойчивость к массовому производству. Нанотрубки и квантовые нити (например, кремниевые) пока не могут быть использованы в транзисторных интегральных схемах из-за отсутствия технологии их размещения на кристалле в заданных местах и с необходимой точностью ($\pm 10\%$). Одноэлектронные транзисторные схемы требуют литографических методов, позволяющих создавать проводящие островки размерами 1–3 нм с той же точностью воспроизведения их размеров ($\pm 10\%$). Можно предположить, что молекулы, обладающие высокой идентичностью размеров (например, ДНК – 2,5 нм), являются наиболее предпочтительными элементами будущих молекулярных устройств обработки информации, но архитектура этих устройств не должна повторять архитектуру транзисторных схем. На этом пути уже видны ограничения (например, туннельные токи).

В области суб-1нм размеров наступает эра квантовых приборов, например одноатомных транзисторов, и кубитов (квантовых битов) – элементов квантовых компьютеров [16].

Упомянутый выше закон Мура заключается в экспоненциальном уменьшении объема вещества на один бит информации. Пределом закона Мура, по всей видимости, является отдельный атом, если он выполняет функцию отдельного бита. В отличие от мезоструктурных приборов, в том числе транзисторов с каналом порядка 10 нм, в которых квантовые явления играют существенную роль, но которые остаются объектами классическими (макроскопическими), атом является объектом квантовым, а для кодирования логической операции или операции памяти используются такие степени свободы атома (квантовые переменные), как энергия, координаты, заряд или магнитный момент. Для создания кубитов нужны технологии атомного масштаба (0,5–0,1 нм). Экстраполяция тенденции уменьшения размеров приборов (обсуждавшийся выше закон Мура) показывает, что одноатомные размеры будут достигнуты в производстве в 2030 гг. Этот период станет эрой производства квантовых микросхем, работающих на квантовых принципах.

Литература

1. *Vasileska D., Khan H.R., Ahmed S.S.* // Int. J. of Nanoscience. – 2005. – 4, 305.
2. *Валиев К.А.* Физика субмикронной литографии. – М.: Наука, 1990. – 528 с.
3. *Валиев К.А., Ивин В.В., Кудря В.П., Махвиладзе Т.М.* В кн.: Квантовые компьютеры, микро- и наноэлектроника // Тр. ФТИАН. / *Ред. А.А.Орликовский.* – М.: Наука, 2005. – 18, 219.
4. *Sh.Peng, R.H.French, W.Qiu et al.* // Proc.SPIE. – Vol. 5754 (SPIE. Bellingham, WA, 2005). – 2005.
5. *Лебединский Ю.Ю., Пушкин М.А., Баранцев Н.С., Неволин В.Н.* Вопросы термической стабильности сверхтонких слоев оксидов металлов с высоким ϵ (*high- κ dielectrics*) в контакте с Si. // Всероссийский семинар «Перспективные технологии и устройства микро- и наноэлектроники». ФТИАН. 2006.
6. *Лебединский Ю.Ю., Зенкевич А.В., Баранцев Н.С., Неволин В.Н.* Поиск материалов для металлических затворов в перспективных КМОП-приборах // Всероссийский семинар «Перспективные технологии и устройства микро- и наноэлектроники». – ФТИАН. – 2006.
7. *K.Takahashi et al.* // Jap.J.Appl.Phys. – 2003. – 44, 2210.
8. Handbook of plasma immersion ion implantation / *Ed. A.Andersen.* – N.Y.: Wiley, 2000. – 736 p.
9. Квантовые компьютеры, микро- и наноэлектроника / *С.Н.Аверкин и др.* / Тр. ФТИАН. / *Ред. А.А.Орликовский.* – М.: Наука, 2005. – 18, 121.
10. *Орликовский А.А.* Плазма в субмикронной технологии микроэлектроники. В кн.: Энциклопедия низкотемпературной плазмы / *Ред. В.Е.Фортков.* – М.: Наука, 2000. – Т. IV. – С. 370.
11. *Wong H.-S.Ph.* // Solid-State Electronics. – 2005. – 49, 755.
12. *Celler G.K., Cristoloveanu S.* // J. Appl. Phys. – 2003. – 93, 4955.
13. *Вьюрков В.В., Орликовский А.А., Сидоров А.А.* // Микроэлектроника. – 2003. – 32, 283.
14. *Сидоров А.А., Вьюрков В.В., Орликовский А.А.* В кн.: Квантовые компьютеры, микро- и наноэлектроника // Тр. ФТИАН. М.: Наука / *Ред. А.А.Орликовский.* – 2005. – 18, 327.
15. *J.Lolivier et al.* // Intern.SOI Conf.Proc. Hawaii. IEEE. – 2005. – P. 26
16. *Валиев К.А.* Квантовые компьютеры и квантовые вычисления // УФН. – 2005. – Т. 175, № 1. – С. 3.

Орликовский Александр Александрович – академик РАН, доктор технических наук, профессор, директор Физико-технологического института РАН. *Область научных интересов:* технология и приборы микро- и наноэлектроники.

Интерферометрические волоконно-оптические гироскопы с замкнутым контуром обратной связи

*Ю.Н.Коркишко, В.А.Федоров, С.М.Кострицкий, А.Н.Алкаев,
В.Е.Прилуцкий, В.Г.Пономарев, И.В.Морев, В.Г.Марчук, Е.М.Падерин*

**Московский государственный институт электронной техники
(технический университет)**

ООО НПК «Оптолинк» (г. Москва)

Рассмотрены вопросы проектирования, технологии и постановки на промышленное производство волоконно-оптических гироскопов (ВОГ) высокой точности с замкнутым контуром обратной связи, пригодных для использования в инерциальных навигационных системах, в том числе системах космической навигации. Представлен общий подход к компоновке оптического тракта одноосных и трехосных ВОГ замкнутого типа с элементами интегральной оптики, описаны особенности структурных схем и электронных средств обработки сигналов, обсуждаются результаты испытаний приборов.

Интерферометрический волоконно-оптический гироскоп (ВОГ) является достаточно распространенным высокоточным датчиком угловой скорости объекта [1]. ВОГ – логическое продолжение кольцевого лазерного гироскопа (КЛГ), выпускаемого в настоящее время также и в России. В КЛГ чувствительным контуром является кольцевой самовозбуждающийся резонатор с активной газовой средой и отражающими зеркалами, а в ВОГ пассивный многовитковый диэлектрический световодный контур возбуждается внешним источником света. Среди преимуществ ВОГ перед КЛГ следует отметить отсутствие необходимости высоковольтного питания и принятия мер по устранению так называемого захвата лучей, возможность более легкого достижения малых уровней квантования по углу и др.

Согласно прогнозам зарубежных экспертов к 2010 г. именно волоконно-оптические измерители угловой скорости с замкнутым контуром обратной связи займут практически весь рынок высокоточных гироскопов. Возможность промышленного выпуска прецизионных ВОГ в значительной степени определяется уровнем технологической базы производства его основных компонентов и в первую очередь специальных волоконных световодов и элементов интегральной оптики.

В ВОГ с замкнутым контуром обратной связи с помощью интегрально-оптических фазовых модуляторов (ФМ), установленных на концах волоконного контура (ВК), наряду с динамическим смещением разности фаз встречных световых волн на $\pi/2$ рад осуществляется компенсация фазового сдвига Саньяка. В этом случае мерой угловой

скорости может служить один из параметров сигнала управления ФМ. Известно, что при таком подходе выходная характеристика ВОГ линейризуется, а масштабный коэффициент (МК) становится независимым от параметров большинства структурных составляющих прибора [1].

Остаточные погрешности измерения угловой скорости могут быть уменьшены с помощью алгоритмической компенсации уходов нулевого сигнала или изменений МК (это возможно даже для ВОГ «открытого типа» [2]). Однако ясно, что в этом случае следует говорить о компенсации только таких составляющих погрешности, для которых известна их зависимость от заданных параметров (температуры, времени и т.п.), т.е. детерминированных.

В данной работе представлены результаты разработок одноосных и трехосных волоконно-оптических гироскопов с замкнутым контуром обратной связи.

Одноосные волоконно-оптические гироскопы. Конфигурация. Разработанные ВОГ имеют так называемую минимальную конфигурацию (рис.1), которая обеспечивает взаимность оптических путей для двух световых волн, распространяющихся навстречу друг другу в волоконном контуре [3, 4]. ВОГ состоит из одного источника света – суперлюминесцентного диода (СЛД), одного фотодетектора, одного 1:1 волоконного делителя света, одного кольцевого интерферометра, чувствительного к угловой скорости, и блока электроники, осуществляющего энергоснабжение элементов ВОГ, обработку сигналов с фотодетектора и управление фазовыми модуляторами.

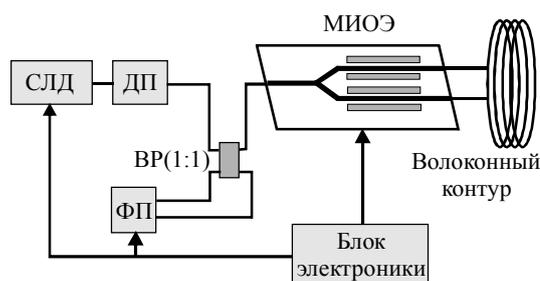


Рис.1. Минимальная конфигурация одноосного гироскопа (СЛД–суперлюминесцентный диод; ДП – деполяризатор; ВР – волоконный разветвитель; ФП – фотоприемник; МИОЭ – многофункциональный интегрально-оптический элемент; ВК – волоконный контур)

Кольцевой интерферометр состоит из многофункционального интегрально-оптического элемента (МИОЭ) и сохраняющего состояние поляризации света волоконного контура. МИОЭ выполняет три функции: поляризация проходящего света с целью уменьшения нестабильности смещения нуля вследствие поляризационной невязимости; расщепление световых волн на распространяющиеся по и против часовой стрелки в ВК с равными мощностями с последующей рекомбинацией на Y-разветвителе; внесение фазового сдвига между встречными волнами с помощью электрооптического фазового модулятора. Применение волокна, сохраняющего состояние поляризации, обусловлено как необходимостью уменьшения дрейфа, вызываемого перекрестной поляризационной связью, так и дрейфа, вызываемого внешними магнитными полями вследствие эффекта Фарадея.

В настоящей работе используется так называемая серродинная схема замкнутого типа. Компенсация разности фаз Саньяка

$$\Delta\varphi_c = \frac{2\pi DL}{\lambda c} \Omega \quad (1)$$

(здесь D – диаметр волоконного контура (среднее значение); L – длина волоконного контура; Ω – угловая скорость вращения; λ – центральная длина волны излучения СЛД;

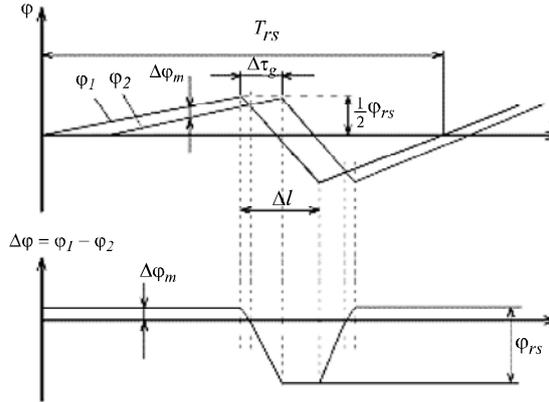


Рис.2. Временная диаграмма пилообразной фазовой модуляции световых волн φ_1 и φ_2 и в серродинной схеме компенсации разности фаз Саньяка

c – скорость света) осуществляется фазовым сдвигом $\Delta\varphi_m$, вносимым пилообразной (на линейном участке) фазовой модуляцией световой волны (рис.2):

$$\Delta\varphi_m = \frac{\varphi_{rs} f \Delta\tau_g}{1 - \Delta t f},$$

где $\Delta\tau_g = \frac{Ln}{c}$ – разность времен групповой задержки встречных световых волн;

$f = \frac{1}{T_{rs}}$ – частота пилообразного сигнала; φ_{rs} – удвоенная амплитуда «пилы»; L – длина ВК; n – показатель преломления сердцевины волокна; Δt – время спада «пилы».

Следящая система обеспечивает равенство величин $\Delta\varphi_m$ и $\Delta\varphi_c$ с противоположными знаками, что приводит к следующему выражению для измеренной угловой скорости $\Omega_{изм}$ (с точностью до знака):

$$\Omega_{изм} = \frac{\lambda n}{2\pi D(1 - \Delta t f)} (\varphi_{rs} f). \quad (2)$$

Нелинейная зависимость $\Omega_{изм}$ от частоты из-за наличия в выражении (1) случайной величины Δt приводит к нестабильности и нелинейности МК. Это дает основную погрешность измерения угловой скорости. Использование быстродействующей электронной элементной базы позволяет уменьшать Δt до некоторого предельно малого, но все же конечного значения, обеспечивая приемлемую для многих применений погрешность МК. Действительно, при $\Delta t \rightarrow 0$ функция (1) линеаризуется относительно f :

$$\Omega_{изм} = \frac{\lambda n}{2\pi D} (\varphi_{rs} f). \quad (3)$$

Однако кардинальное решение этой проблемы получается, если величину Δt не уменьшать, а специально поддерживать равной половине периода пилообразного сигнала $\Delta t = T_{rs}/2$ для любого значения частоты f . В этом случае серродинный сигнал

превращается в сигнал треугольной формы, а задача непрерывной компенсации фазы Саньяка решается с помощью его периодического инвертирования на входе ФМ с той же частотой. Тогда формула (2) принимает вид

$$\Omega_{\text{изм}} = \frac{\lambda n}{\pi D} (\varphi_{rs} f). \quad (4)$$

В выражении (4) в отличие от (3) f – это частота треугольного сигнала. Возникающее ухудшение (в два раза) дискретности преобразования компенсируется известной простотой получения симметричного переменного напряжения треугольной формы с заданной амплитудой и с частотой, определяемой сигналом рассогласования основной следящей системы. При подсчете положительных и отрицательных пиков этого напряжения соотношение (4) становится эквивалентным формуле (3). Именно такой подход реализован в разработанном ВОГ.

Таким образом, при постоянных λ , n и D мерой угловой скорости является произведение $\varphi_{rs} f$. Однако непосредственно измерить фазовую амплитуду φ_{rs} пилообразной модуляции световой волны в отличие от частоты f невозможно. Оценить же ее величину можно по значению напряжения, подаваемого на ФМ, но в этом случае нужны точные сведения о его передаточной характеристике, которая сама по себе нестабильна. Этот подход заслуживает внимания, но еще недостаточно изучен. Поэтому рассмотрим стандартный вариант стабилизации фазовой амплитуды пилообразной модуляции при $\varphi_{rs} = 2\pi$ рад с помощью дополнительной следящей системы в схеме обработки сигнала. В этом случае получаем

$$f = \frac{D}{\lambda n} \Omega,$$

где Ω – измеряемая угловая скорость.

Частота следования спадов «пилы» является, таким образом, цифровой мерой скорости вращения, причем появление каждого спада соответствует приращению угла поворота ВОГ на $\frac{n\lambda}{D}$ рад.

Поскольку флуктуации величин D и n имеют в основном термодинамический характер, то для их стабилизации волоконный контур изготавливается путем намотки волокна на теплоизолированный каркас с симметричной порядовой укладкой со стабильным натяжением.

Известно, что наибольшая эффективность классического динамического смещения разности фаз встречных световых волн в ВК с одновременным подавлением паразитных амплитудной и поляризационной модуляций получается при прямоугольной форме так называемой вспомогательной модуляции с амплитудой $\pi/2$ рад и с частотой

$$F = \frac{1}{2\Delta\tau_g}. \text{ Это соответствует работе на собственной частоте ВК.}$$

Надежное выполнение условия $2F\Delta\tau_g = 1$ обеспечивается тем, что напряжение для вспомогательной модуляции формируется из опорного периодического сигнала, частота которого стабилизируется кварцевым резонатором. Значение частоты для заданной длины ВК, обеспечивающей требуемую точность измерения угловой скорости, выбирается согласно условию (для кварцевых волокон) $FL \approx 10^8$ (Гц · м).

Для поддержания амплитуды вспомогательной фазовой модуляции на уровне $\pi/2$ реализована следящая система, поддерживающая значение разности фаз встречных световых волн у заданного значения. Сигналом рассогласования для такой системы может служить отклик гироскопа на тарированное периодическое воздействие в виде импульса напряжения, прикладываемого к широкополосным фазовым модуляторам, расположенным на обоих плечах МИОЭ.

Реализован следующий алгоритм построения системы автоматического регулирования амплитуды вспомогательной фазовой модуляции:

- с помощью стабильного опорного напряжения формируется амплитуда напряжения вспомогательной модуляции $U_{\text{ВМ}}$, соответствующая фазовой амплитуде $\pi/2$ рад – напряжение выставляется по максимуму выходного сигнала ВОГ при заданной угловой скорости с разомкнутой петлей обратной связи основного контура;
- с помощью прецизионного усилителя формируется аналогичное напряжение модуляции с амплитудой, равной $3U_{\text{ВМ}}$;
- периодически в заданные моменты времени на модулятор вместо напряжения $U_{\text{ВМ}}$ подается напряжение $3U_{\text{ВМ}}$ с частотой, значительно меньшей F , и на время, достаточное для измерения отклика на это возмущение с помощью устройства выборки и хранения.

При постоянстве параметров системы ее реакция на такое воздействие будет отсутствовать – сигнал рассогласования равен нулю. Но если, например, возрастет эффективность ФМ, то и фазовые амплитуды от обоих воздействий возрастут пропорционально, но фототок от основной модуляции $U_{\text{ВМ}}$ уменьшится, а от возмущающей – увеличится. Эта разность фототоков будет представлять сигнал рассогласования, используя который следящая система уменьшает $U_{\text{ВМ}}$ до тех пор, пока не обратит эту разность в нуль. При уменьшении эффективности ФМ процесс регулирования идет в обратном направлении.

На рис.3 показан график, поясняющий работу системы стабилизации фазовой амплитуды вспомогательной модуляции.

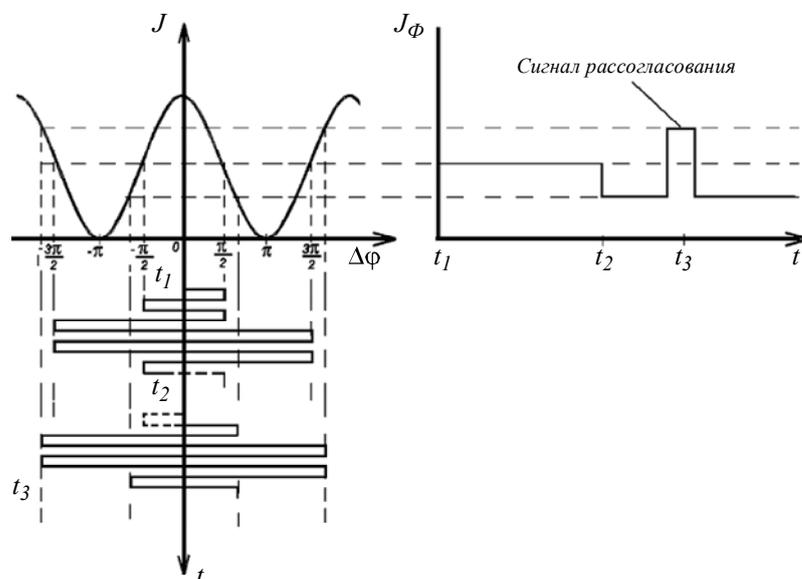


Рис.3.Стабилизация фазовой амплитуды вспомогательной модуляции. Переходные состояния («усы») не показаны

Значение фазовой амплитуды компенсирующей модуляции, равное 2π рад, легко формировать из опорного напряжения, используемого для формирования сигнала калибровки вспомогательной модуляции. Достаточно преобразовать его в опорный сигнал для пилообразного напряжения с коэффициентом $4/3$. Тем самым система стабилизации фазовой амплитуды вспомогательной модуляции автоматически будет являться и стабилизатором фазовой амплитуды «пилы». При этом очень важно, чтобы возмущения, вызываемые сбросом «пилы», не давали сбоев в работе контура стабилизации амплитуды и наоборот, возмущения, вызываемые импульсами калибровки, не давали сбоев в работе контура компенсации фазы Саньяка.

Решение этой задачи усложняется тем, что частота сбросов пилообразного напряжения определяется угловой скоростью и, следовательно, является случайной величиной. Необходимо различать два режима работы: режим малых и режим больших угловых скоростей. В первом случае частота импульсов калибровки не должна быть привязана к частоте «пилы», так как последняя может быть практически равной нулю, а это грозит потерей информации. Во втором случае моменты съема информации о фазовой амплитуде необходимо увязать с частотой «пилы» и выбрать их так, чтобы избежать взаимодействия двух контуров стабилизации. Один из вариантов построения такого алгоритма работы ВОГ реализован в разработанном приборе.

Оптический блок одноосных ВОГ. Точность ВОГ сильно зависит от параметров оптического блока. Шум прибора тем меньше, чем больше выходная мощность СЛД и чем меньше потери оптических элементов, включая волокно типа PANDA, сохраняющее состояние поляризации. Минимальная измеряемая скорость вращения зависит от коэффициента перекрестной поляризационной связи (h -параметра) и длины поляризационных биений L_p волокна следующим образом [5]:

$$\Omega_{\min} \sim \frac{\sqrt{hL_p}}{DL}.$$

Поэтому при разработке ВОГ основные усилия были направлены на уменьшение оптических потерь в каждом из элементов и на уменьшение величин h и L_p в волокне типа PANDA. Приведем параметры изготавливаемых в Научно-производственной компании «Оптолинк» волоконных световодов, сохраняющих состояние поляризации света:

Рабочая длина волны, нм	1550
Диаметр модового поля, мкм	6,5
Диаметр волокна, мкм	80
Диаметр покрытия, мкм	120÷160
Числовая апертура,	0,13
h -параметр, m^{-1}	$<10^{-5}$
Потери, дБ/км	< 2
Длина волны отсечки, нм	1250–1450
Длина биений, мм	< 3
Тип волокна	PANDA

Разработаны четыре модификации одноосных ВОГ, имеющие ВК с длинами 200 м (ОИУС-200), 500 м (ОИУС -500), 1000 м (ОИУС -1000), 2000 м (ОИУС -2000). Намотка катушек ведется по квадрупольной технологии, начиная от середины длины отрезка волокна в направлении наружу к его концам путем поочередного сматывания с двух вспомогательных шпулек и формированием геометрически симметричной структуры. В действительности волокно является и эластичным и очень хрупким. Эластичность требует

поддерживать постоянным натяжение волокна в течение всего процесса намотки. Хрупкость требует контроля не только натяжения волокна, но и его изгибов или искривлений, а также поверхностных контактов. Катушка с волокном располагается на теплоизолированной плате с диаметром от 80 до 230 мм в зависимости от типа ВОГ.

Станки для намотки волоконного контура были специально разработаны на базе стандартных проволочных намоточных станков. Изотропные волоконные разветвители изготавливаются методом сплавления-вытяжки и имеют следующие типовые значения параметров: коэффициент деления $50 \pm 1\%$; избыточные потери 0,1 дБ.

За основу конструкторского решения при разработке деполяризатора взята конструкция, известная как волоконный деполяризатор Лайота. Технология изготовления этого элемента обеспечивает достижение следующих параметров: потери оптической мощности $< 0,5$ дБ; степень остаточной поляризации излучения при ширине спектральной линии 15 нм составляет $< 0,1\%$.

МИОЭ изготавливаются на кристаллах LiNbO_3 методом высокотемпературного протонного обмена [6, 7]. Этот метод дает возможность достижения следующих значений основных параметров МИОЭ: полуволновое напряжение $V_\pi < 3$ В ($\lambda = 1,55$ мкм); коэффициент экстинкции поляризатора менее -50 дБ; амплитудная модуляция менее 0,1%; вносимые оптические потери менее 4 дБ.

Интегрирование МИОЭ в оптический блок (ОБ) проводится путем непосредственных стыковок его волноводов с концами ВК и с одним из концов входного изотропного разветвителя, имеющего длину, достаточную для пространственной фильтрации излучения.

В качестве источника света в разработанном ВОГ используется суперлюминесцентный диод, размещенный в стандартном герметичном корпусе с электрическими гермовводами и встроенным одномодовым волоконным световодом. Корпус совмещен с микроохладителем на базе элементов Пельтье для поддержания температуры кристалла в заданном диапазоне при совместной работе с устройством терморегулирования.

Фотоприемное устройство производства НПП «Телам» на основе InGaAs/InP pin-фотодиода используется в качестве приемного модуля и для формирования сигнала управления в стабилизаторе мощности света (СТМС). Конструктивно фотодиод выполнен в герметичном корпусе со встроенным многомодовым волоконным световодом. Внешний вид прибора ОИУС-1000 представлен на рис.4.



Рис.4. Одноосный ВОГ ОИУС-1000

Параметры одноосных ВОГ. Сглаженная реализация с помощью фильтра 1-го порядка с постоянной времени 100 с приведена на рис.5.

СКО сглаженной реализации угловой скорости, приведенной на рис.5, составляет 0,0083 °/ч.

Нестабильность смещения нуля в одном пуске составляет 0,007–0,008 °/ч, а нестабильность смещения нуля от пуска к пуску составляет 0,07185 °/ч. Стабильность смещения нулевого сигнала достигается благодаря применению волокна, поддерживающего поляризацию излучения, и МИОЭ с указанными выше параметрами, а также принятию мер по существенному снижению потерь в местах сварок волокон. С целью минимизации уходов нуля ВОГ, вызываемых смещениями в электрических цепях, обработка информации ведется на переменном сигнале (или цифровым способом) во всех каскадах, кроме одного – интегратора главной следящей системы. Этот каскад выполнен на прецизионной микро-

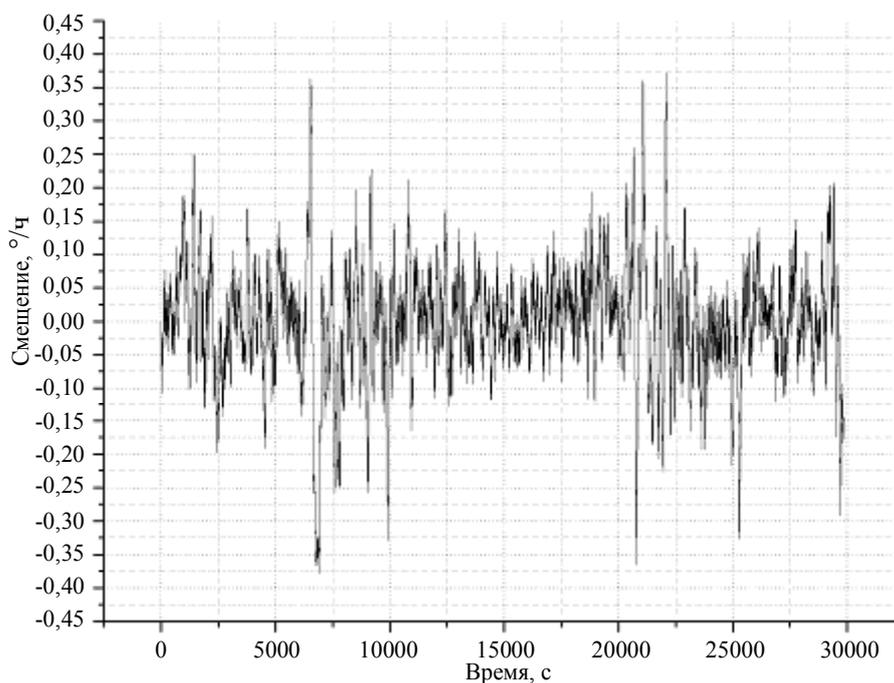


Рис.5. Графики сглаженной угловой скорости (°/ч)

схеме, у которой смещения нуля во всем температурном диапазоне могут приводить к уходам выходного сигнала не более 0,002 °/ч. Параметры одноосных ВОГ представлены в таблице.

Значения параметров одноосных ВОГ

Параметр	ОИУС-2000	ОИУС-1000	ОИУС-500	ОИУС-200
Диапазон измеряемых угловых скоростей, °/с	±40	±90	±180	±300
Случайная составляющая дрейфа нуля при фиксированной температуре, °/ч	<0,005	<0,01	<0,1	<3
Смещение нуля в рабочем диапазоне температур от 20 до +50 °С, °/ч	<0,05	<0,1	<0,5	<10
Погрешность масштабного коэффициента, %	<0,01	<0,05	<0,1	<0,3
Полоса пропускания, Гц	>50	>50	>100	>300
Спектральная плотность шума, $\%/\sqrt{\text{ч}}$	<0,0005	<0,001	<0,004	0,01
Питание, В	18–36	18–36	18–36	18–36
Потребляемая мощность, Вт	<7	<7	<7	<7
Длина волоконного контура, м	2000	1000	500	3x200
Масса прибора (нетто), кг	1,7	1,0	0,9	0,3
Габаритные размеры, мм	Ø250×45	Ø150×45	Ø150×45	Ø150×45
Выходной сигнал*	Цифровой/ дискретный	Цифровой/ дискретный	Цифровой/ дискретный	Цифровой

* Цифровой – RS232/RS485/RS422, дискретный – унитарный код (частотный)

Трехосный ВОГ с последовательной работой каналов. Конфигурация. Трехосный ВОГ с последовательной работой каналов ТИУС-500 также имеет минимальную конфигурацию (рис.6), которая обеспечивает взаимность оптических путей для двух световых волн, распространяющихся навстречу друг другу в волоконном контуре. В состав прибора входит один источник света – суперлюминесцентный диод с центральной длиной волны излучения 830 нм, один фотоприемник, два разветвителя (1:1 и 1:2) для деления света на три части, три интерферометра, чувствительных к трем ортогональным угловым скоростям, и блок электроники. Каждый из трех кольцевых интерферометров состоит из МИОЭ и из сохраняющего состояние поляризации света волоконного контура длиной 500 м [5, 8].

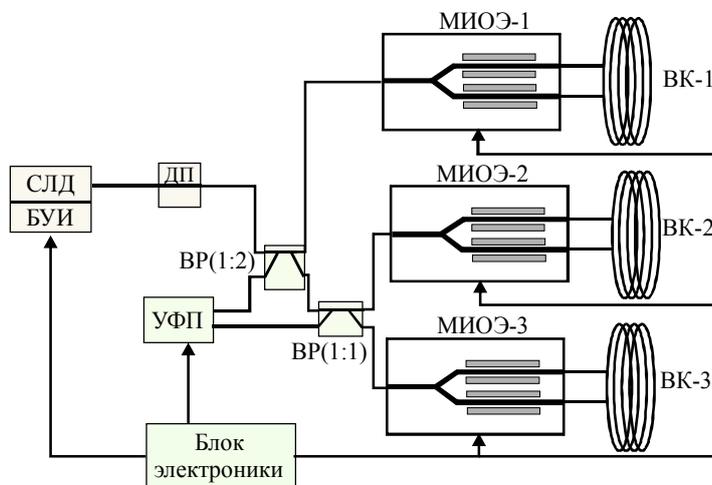


Рис.6. Конфигурация трехосного ВОГ ТИУС-500 (БУИ – блок управления излучателем; УФП – устройство фотоприемное)

В ТИУС-500 реализован способ поочередного переключения модуляции каналов (осей) с частотой 1 кГц. Каждый из трех каналов выдает выходную информацию только в том случае, если на модулятор подан электрический сигнал вспомогательной модуляции. Поэтому простым подключением электрических сигналов к соответствующему модулятору в работу включается сначала одна из осей на время ≈ 333 мкс, затем другая, потом третья. Далее все циклически повторяется с частотой 1 кГц. При этом все три канала работают идентично и независимо друг от друга, как одноосные схемы с замкнутым контуром обратной связи.

Блок электроники вырабатывает три напряжения U_1 , U_2 , и U_3 для формирования пилообразной фазовой модуляции света с целью компенсации разности фаз Саньяка, а также для внесения постоянного фазового сдвига между световыми волнами на $\pi/2$ рад. В этом случае измеренная угловая скорость определяется соотношением

$$\Omega = \frac{\lambda n}{\pi D} \varphi_{rs} f ,$$

где φ_{rs} и f – амплитуда и частота «пилы» соответственно.

Частота «пилы» стабилизируется кварцевым резонатором, так что $f = \text{const}$. Следовательно, мерой угловой скорости становится амплитуда пилообразной модуляции

$\varphi_{rs} = \frac{\pi D}{\lambda n f} \Omega$. Эта величина определяется напряжением, прикладываемым к фазовому модулятору. При этом

$$\varphi_{rs} = K_{\text{ФМ}} U,$$

где $K_{\text{ФМ}} = \frac{\pi}{V_{\pi}}$ – эффективность фазового модулятора; V_{π} – полуволновое напряжение фазового модулятора. Таким образом

$$U = \frac{V_{\pi} D}{\lambda n f} \Omega.$$

Так как величина V_{π} пропорциональна длине волны λ , то масштабный коэффициент ВОГ становится независимым от λ , что улучшает температурную стабильность параметров прибора.

В блоке АЦП аналоговые выходные сигналы A_1, A_2 и A_3 преобразуются в цифровые D_1, D_2 и D_3 в виде последовательного интерфейса RS485.

Внешний вид прибора показан на рис.7. Параметры трехосного ВОГ ТИУС-500 следующие:

Диапазон измеряемой угловой скорости, °/с.....	±300
Дрейф смещения нулевого сигнала при постоянной температуре, °/ч	<10,0
Погрешность масштабного коэффициента, %.....	≤0,5
Полоса пропускания, Гц	от 100 до 500
Спектральная плотность шума, ° /√ч	≤0,05
Вес, кг	1,1
Размеры, мм	110×110×90
Потребляемая мощность, Вт.....	<6
Выход	аналоговый и цифровой RS485



Рис.7. Трехосный ВОГ ТИУС-500

Для подтверждения возможности использования трехосного волоконно-оптического измерителя угловой скорости ТИУС-500 в контуре управления спуском системы управления движением космического корабля проведена предварительная летная отработка прибора ТИУС в экспериментальном телеметрическом режиме на корабле «Союз ТМА-5». Прибор был установлен в контейнере полезного груза спускаемого аппарата (СА) на кронштейне так, что его оси чувствительности X, Y, Z были ориентированы параллельно соответствующим осям штатного трехосного электромеханического гироскопа БДУС-II с точностью не хуже $\pm 2^\circ$.

Из прибора ТИУС-500 в систему записи информации (СЗИ) выдавались сигналы «ТИУС 1», «ТИУС 2», «ТИУС 3», пропорциональные проекциям угловой скорости на оси X, Y, Z прибора соответственно, с крутизной $(0,150 \pm 007)$ В·с/° и диапазоном линейной зоны измерения ± 20 °/с. Включение ТИУС-500 проводилось с пульта космонавтов перед разделением отсеков спускаемого аппарата и приборно-агрегатного отсека.

Оценка работоспособности прибора ТИУС проведена по записанным на СЗИ телеметрическим сигналам, пропорциональным проекциям угловой скорости на оси X, Y, Z штатного прибора БДУС-II, и по показаниям телеметрических датчиков угловой скорости ТИУС-500 (X, Y, Z). В качестве примера на рис.8 приведены записи соответствующих сигналов относительно оси X .

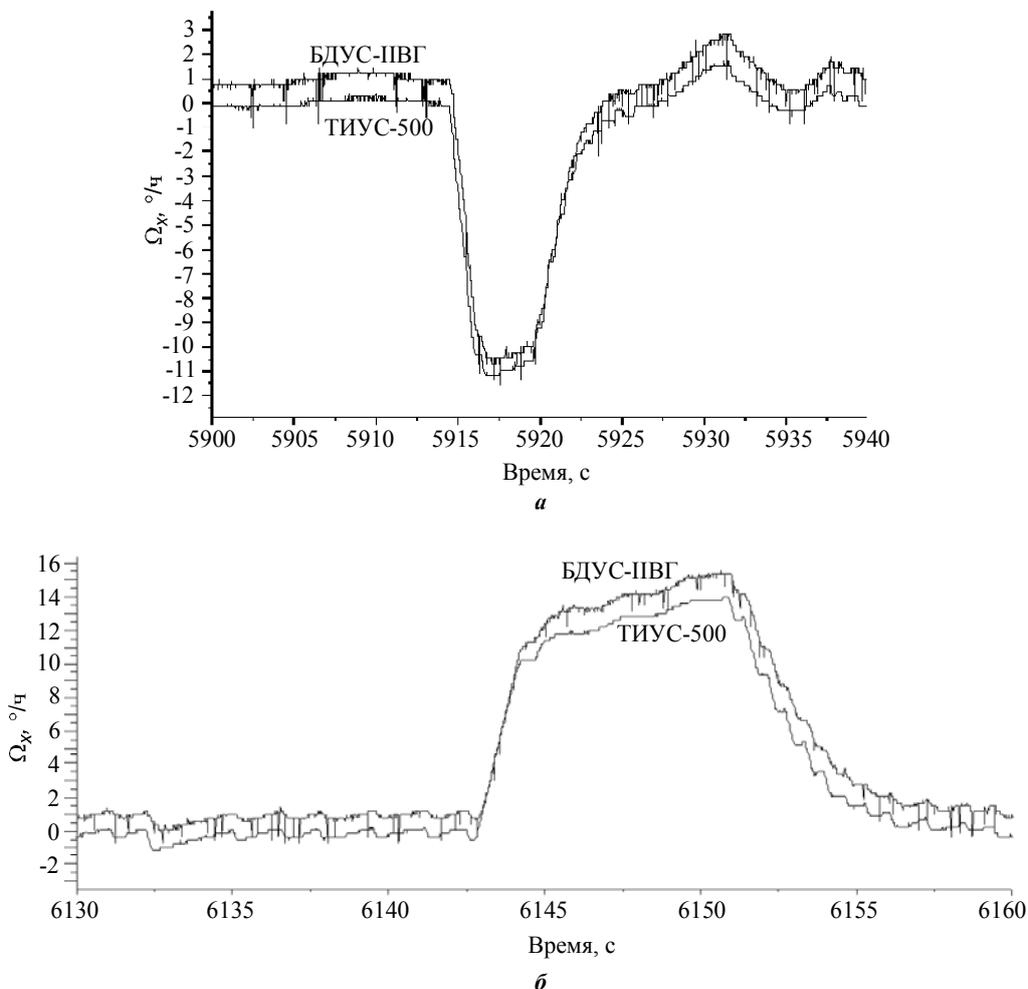


Рис.8. Выходные сигналы каналов X приборов ТИУС-500 и БДУС-II:
 а – большие угловые скорости отрицательного знака; б – положительного

При действии угловых скоростей в пределах диапазона измерения показания ТИУС соответствовали показаниям прибора БДУС-II в пределах заданных допусков. После пребывания в течение шести месяцев в спускаемом аппарате при летных испытаниях в составе космического корабля «Союз ТМА-5» прибор был работоспособен на всех контролируемых участках спуска [8].

После успешных летных испытаний начиная с октября 2005 г. начато использование приборов ТИУС-500 в штатном режиме в системе управления спуском кораблей «Союз ТМА-7» и последующих моделей.

Трехосный ВОГ с параллельной работой каналов. На базе прибора ТИУС-500 разработан модифицированный трехосный волоконно-оптический гироскоп ТИУС-500М, основные отличия которого от прибора ТИУС-500 следующие [8]:

- длина волны оптического излучения $\lambda = 1,55$ мкм;
- независимая параллельная работа всех трех каналов;
- цифровая обработка сигналов (ЦОС).

Структурная схема ТИУС-500М с ЦОС представлена на рис.9.

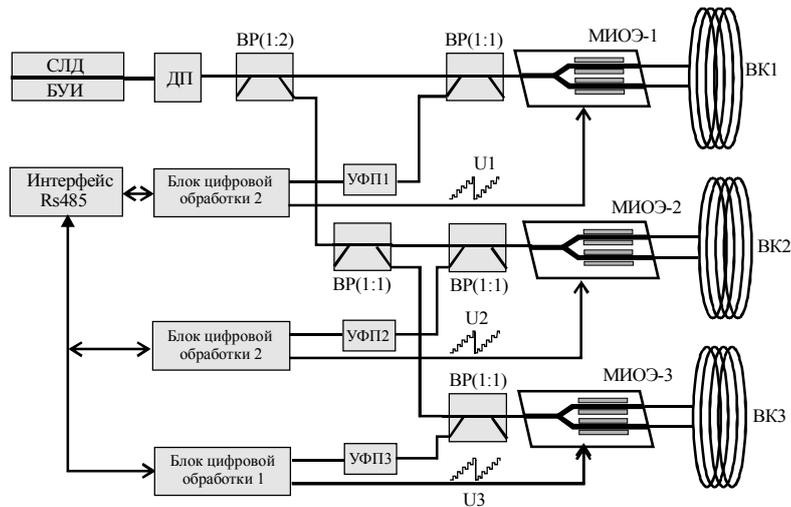


Рис.9. Структурная схема ТИУС-500М (RS-485 – последовательный интерфейс RS-485)

В ТИУС-500М также используется один излучатель на три канала. Использование трех фотоприемников позволяет вести обработку сигналов одновременно с трех каналов независимыми блоками цифровой обработки (БЦО). Каждый из БЦО формирует напряжения для получения пилообразной (ступенчатой) компенсирующей модуляции света для компенсации разности фаз Саньяка и для внесения постоянного фазового сдвига между встречными световыми волнами на $\pi/2$ рад с помощью вспомогательной модуляции (ВМ). Тем самым обеспечивается непрерывная работа каждого из каналов в режиме замкнутого контура. Структурная схема БЦО представлена на рис.10.

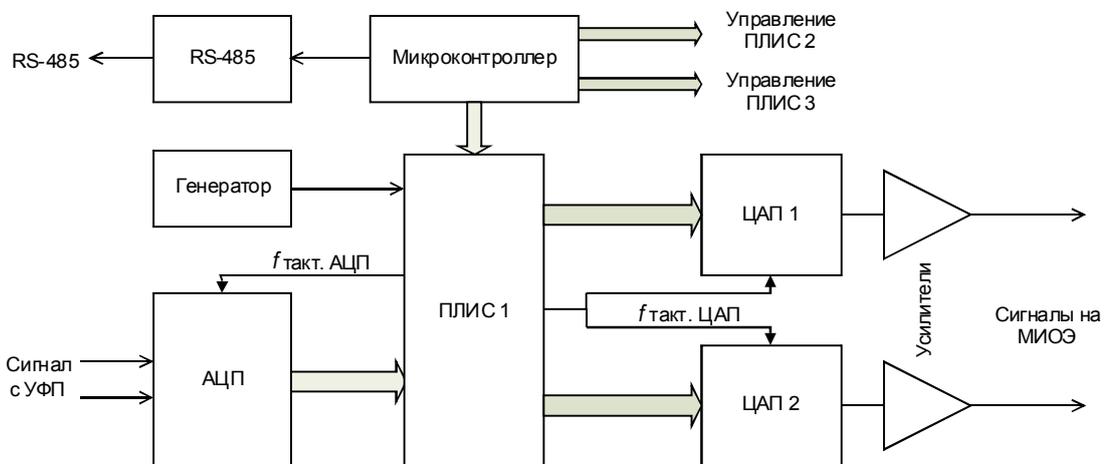


Рис.10. Структурная схема блока цифровой обработки (АЦП – аналогово-цифровой преобразователь; ЦАП – цифро-аналоговый преобразователь; ПЛИС – программируемая логическая интегральная схема)

Аналоговый сигнал о наличии угловой скорости (сигнал рассогласования) после предварительного усиления поступает с УФП на АЦП. Высокоскоростной АЦП управляется цифровым автоматом, реализованным на ПЛИС. АЦП преобразует аналоговый сигнал в цифровую форму и передает его в ПЛИС, где осуществляется демодуляция этого цифрового сигнала. Полученный код со знаком, соответствующим знаку сигнала

рассогласования, поступает на цифровой интегратор. Код с интегратора используется для получения наклона фазовой «пилы», соответствующего скорости вращения. Преобразованный в ЦАП сигнал в виде ступенчатого пилообразного напряжения поступает на МИОЭ. Контур обратной связи замыкается с помощью пилообразной модуляции с фазовой амплитудой при $\varphi = 2\pi$ рад, поддерживаемой автоматически. В этом случае, как известно, разность фаз Саньяка компенсируется пилообразным сигналом с частотой f , определяемой соотношением

$$f = \frac{D}{\lambda n} \Omega,$$

где Ω – скорость вращения; n – эффективный показатель преломления моды в волокне; λ – длина волны излучения в вакууме.

В приборе используются два способа определения скорости вращения. В первом способе происходит непосредственное измерение частоты следования спадов «пилы». При этом появление каждого спада соответствует приращению угла поворота канала прибора вокруг оси, перпендикулярной ВК на $\lambda n / D$ рад. Для увеличения разрешающей способности прибора применяется способ измерения скорости вращения по наклону фазовой «пилы».

Каждый из трех БЦО представляет собой схему, построенную на ПЛИС фирмы «ALTERA». К этой схеме подключен высокоскоростной АЦП и два быстродействующих ЦАП фирмы «Analog Devices». Тактовые синхроимпульсы для ЦАП и АЦП вырабатываются ПЛИС. Работа ПЛИС тактируется внешним термостабилизированным генератором.

На одном из БЦО установлен микроконтроллер фирмы «Atmel», который является загрузчиком для ПЛИС. Контроллер обеспечивает обмен по интерфейсу RS-485 с внешними устройствами. На нем реализован монитор для настройки прибора. Кроме загрузки ПЛИС, контроллер по последовательному каналу считывает с ПЛИС данные измерений. Функциональная схема цифрового автомата, реализованного на ПЛИС, представлена на рис. 11.

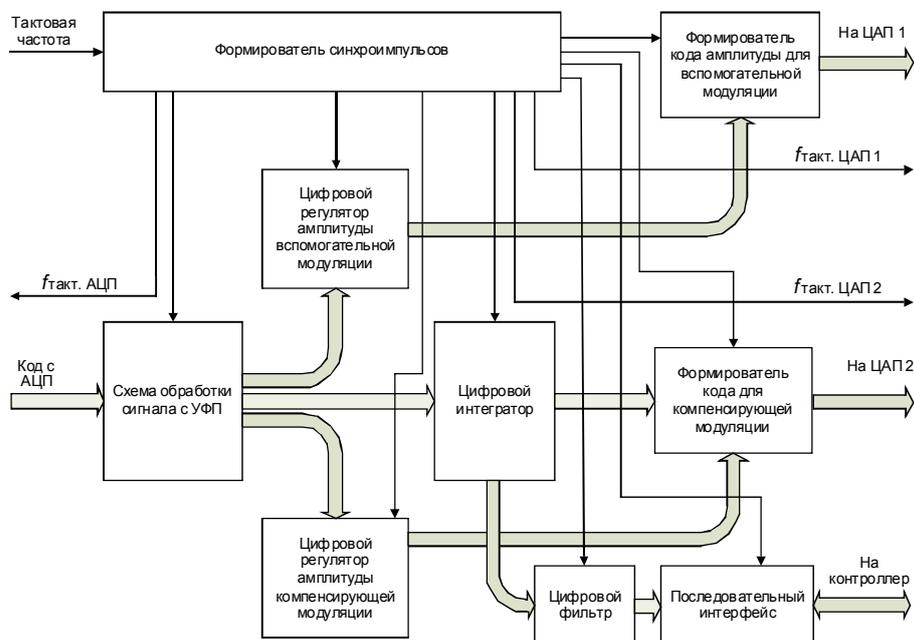


Рис. 11. Функциональная схема цифрового автомата

Формирователь синхроимпульсов преобразует тактовую частоту в набор импульсов для синхронного управления работой всех устройств и узлов. Диаграмма работы формирователя синхроимпульсов представлена на рис.12. Тактовая частота $f_{\text{такт}}$ выбирается кратной частоте вспомогательной модуляции $f_{\text{ВМ}}$. Тактовые импульсы для ЦАП формируются по фронтам ВМ. Тактовые импульсы для АЦП формируются так, чтобы исключить измерения на фронтах сигнала с УФП.

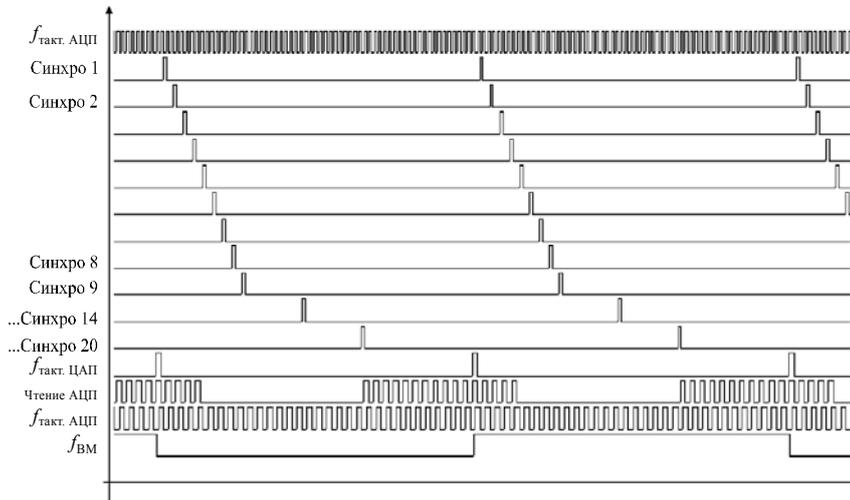


Рис.12. Диаграмма работы формирователя синхроимпульсов

Схема обработки сигнала с УФП состоит из сумматора, буфера для хранения измеренного значения, схемы вычитания. На сумматоре накапливается сумма значений сигнала рассогласования, измеренных на текущей фазе ВМ. На буфере хранится сумма значений, измеренных на предыдущей фазе ВМ. По окончании измерения числа с сумматора и с буфера поступают на схему вычитания. В зависимости от текущей фазы ВМ одно число подается как вычитаемое, другое – как вычитатель. Таким образом, выделяется амплитуда переменного сигнала с учетом знака.

Код со знаком, соответствующим знаку сигналу рассогласования, поступает на цифровой интегратор, который состоит из умножителя и сумматора со схемой ограничения. С помощью умножителя задается постоянная времени цифрового интегратора. Сумматор используется в качестве интегратора. Код с интегратора поступает на формирователь кода для компенсирующей модуляции и через цифровой фильтр на последовательный интерфейс связи с контроллером.

Формирователь кода для компенсирующей модуляции состоит из сумматора, с помощью которого формируется код «пилы», и второго сумматора, который используется в контуре цифрового регулятора амплитуды компенсирующей модуляции. Сигналом рассогласования для цифрового регулятора амплитуды компенсирующей модуляции служит сигнал со схемы обработки сигнала с УФП, снятый в моменты спадов «пилы». Этот же сигнал используется и для подстройки амплитуды вспомогательной модуляции.

На рис.13 представлена реализация выходного сигнала прибора ТИУС-500М. Некомпенсированный выходной сигнал изображен как функция времени. Дрейф смещения нулевого сигнала составляет менее 0,3 %/ч. Приведем параметры ТИУС-500М:

Диапазон измеряемых угловых скоростей, °/с	±500
Дрейф смещения нулевого сигнала, °/ч	<0,1
Погрешность масштабного коэффициента, %	≤ 0,03
Полоса пропускания, Гц	300
Спектральная плотность шума, °/√ч	≤0,005
Масса, кг	1,1
Габариты, мм	110×110×90
Выходной сигнал	RS-485

РКК «Энергия» принято решение о проведении летных испытаний волоконно-оптического гироскопа ТИУС-500М в экспериментальном телеметрическом режиме на корабле «Союз ТМА-9».

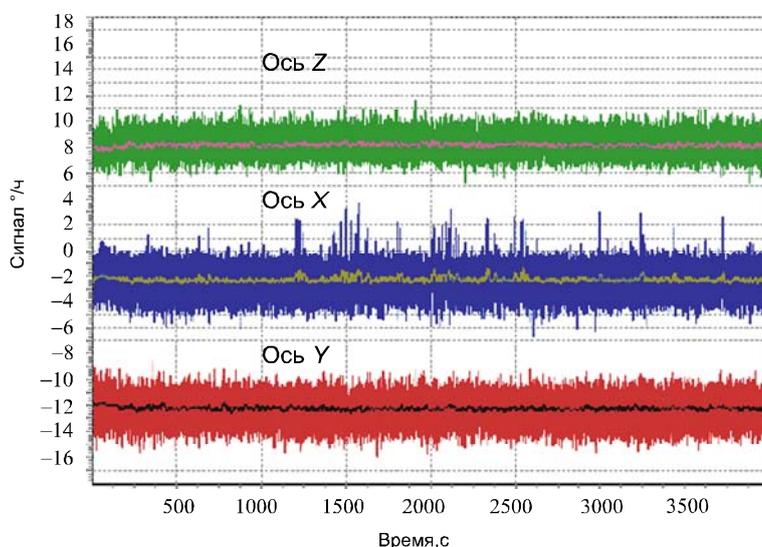


Рис.13. Некомпенсированный выходной сигнал ТИУС-500М при комнатной температуре

Таким образом, точностные и эксплуатационные характеристики одноосных и трехосных волоконно-оптических гироскопов с замкнутым контуром обратной связи позволяют применять их в инерциальных навигационных системах и системах управления различных объектов, в том числе ракетно-космической техники. Разработанные волоконно-оптические гироскопы уже используются в штатном режиме в системе управления спуском космических кораблей «Союз ТМА». В ближайшее время запланировано применение таких приборов в других космических аппаратах. Продолжение разработок и инженерные усилия сконцентрированы на выработке решений с целью уменьшения их размеров, повышения точности и оптимизации стоимости производства.

Литература

1. *Lefevre H.* The Fiber-optic gyroscope, artech house, 1993. – 313 p.
2. *Logozinski V., Safoutine I., Solomatin V.* Fiber optic gyro with digitally corrected output // Proc. 8-th Saint Petersburg Intern. Conf. on Integrated Navigation Systems. – 2001. – P. 49–56.
3. Высокоточный волоконно-оптический гироскоп с линейным цифровым выходом / *Ю.Н.Коркишко, В.А.Федоров, В.Е.Прилуцкий и др.* // Гироскопия и навигация. – 2004. – № 1. – С. 69–82.
4. Интерферометрические волоконно-оптические гироскопы с линейным выходом / *В.Е.Прилуцкий, В.Г.Пономарев, В.Г.Марчук и др.* // Гироскопия и навигация. – 2004. – № 3. – С.62–72.
5. *Burns W.K.* Phase error bounds of fiber gyro with polarisation – holding fiber // J.Lightwave Tech. – 1986. – Vol. 4. – P. 21–30.

6. *Korkishko Yu.N., Fedorov V.A., Feoktistova O.Y.* LiNbO₃ optical waveguide fabrication by high-temperature proton exchange // J. Lightwave Technology. – 2000. – Vol. 18. – P. 562–568.

7. Multifunctional integrated optical chip for fiber optical gyroscope fabricated by high temperature proton exchange / *Yu.N.Korkishko, V.A.Fedorov, S.M.Kostritskii et al.* // in Integrated Optical Devices: Fabrication and Testing, Ed. Righini G.C. – Proc. SPIE. – 2003. – Vol. 4944. – P. 262–267.

8. Трехосный волоконно-оптический гироскоп для ракетно-космического применения / *Ю.Н.Коркишко, В.А.Федоров, В.Е.Прилуцкий и др.* // Тр. 13-й Санкт-Петербургской междунар. конф. по интегрированным навигационным системам. – 2006. – С. 211–218.

Коркишко Юрий Николаевич – доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой материалов и процессов твердотельной электроники МИЭТ, генеральный директор ООО НПК «Оптолинк» (г.Москва). *Область научных интересов:* интегральная и волоконная оптика, физика и химия материалов оптоэлектроники.

Федоров Вячеслав Александрович – доктор физико-математических наук, профессор кафедры материалов и процессов твердотельной электроники, технический директор ООО НПК «Оптолинк» (г.Москва). *Область научных интересов:* интегральная и волоконная оптика, физика и химия материалов оптоэлектроники.

Кострицкий Сергей Михайлович – доктор физико-математических наук, доцент кафедры материалов и процессов твердотельной электроники, начальник отдела ООО НПК «Оптолинк» (г.Москва). *Область научных интересов:* интегральная оптика, фоторефрактивные материалы, оптические методы исследования материалов и структур оптоэлектроники.

Алкаев Александр Николаевич – кандидат технических наук, доцент кафедры материалов и процессов твердотельной электроники, линейный технолог ООО НПК «Оптолинк» (г.Москва). *Область научных интересов:* технология интегральной оптики.

Прилуцкий Виктор Евстафьевич – директор Саратовского отделения ООО НПК «Оптолинк». *Область научных интересов:* волоконно-оптические сенсоры, гироскопия.

Пономарев Владимир Григорьевич – кандидат технических наук, ведущий конструктор ООО НПК «Оптолинк» (г. Москва). *Область научных интересов:* волоконно-оптические сенсоры, гироскопия.

Морев Иван Владимирович – ведущий инженер ООО НПК «Оптолинк» (г. Москва). *Область научных интересов:* проектирование цифровых устройств.

Марчук Владимир Григорьевич – ведущий инженер ООО НПК «Оптолинк» (г. Москва). *Область научных интересов:* цифровая обработка сигналов.

Падерин Евгений Михайлович – главный технолог ООО НПК «Оптолинк» (г. Москва). *Область научных интересов:* технология интегральной и волоконной оптики.

Вихревые флуктуирующие потоки и их вклад в шумы молекулярно-электронных преобразователей

Д.Л.Зайцев, П.В.Дудкин, В.М.Агафонов

Московский физико-технический институт (государственный университет)

Экспериментально изучены шумы молекулярно-электронных преобразователей с пониженным гидродинамическим сопротивлением. Установлена зависимость спектральной плотности шума преобразователя от разброса характеристик между отдельными микроскопическими каналами молекулярно-электронных преобразователей. Разработана универсальная теория шума для всех типов преобразователей. Выяснено, что спектральная плотность шума определяется АЧХ преобразующего элемента.

Новый класс приборов для измерения инерциального движения основан на использовании молекулярно-электронных преобразователей (МЭП). Преобразующая ячейка МЭП состоит из четырех металлических электродов, разделенных диэлектрическими перегородками и помещенных в раствор электролита. Перфорация в перегородках способствует образованию в системе цилиндрических микроканалов, внутри которых располагаются элементы сетчатых электродов, находящиеся в контакте с раствором электролита. В рабочем состоянии между электродами приложена постоянная разность потенциалов, в результате в системе протекает электрический ток, а внутри микроканалов устанавливается градиент концентрации активных носителей заряда. Преобразующая ячейка помещена внутри корпуса, конструкция которого обеспечивает протекание жидкости через преобразующую перегородку под действием внешнего ускорения. В свою очередь поток жидкости изменяет распределение концентрации в микроканалах, вызывая изменения токов через электроды, пропорциональные измеряемому ускорению.

К измерительным системам предъявляются требования по уменьшению нижнего предела чувствительности МЭП, определяемого собственными шумами преобразователя. Кроме того, изучение шумов имеет принципиальное значение для понимания механизмов различных физических явлений в молекулярно-электронных системах.

В настоящее время не существует единой строгой теории шумовых характеристик МЭП [1–3], что обусловлено сложностью и многообразием физических механизмов, ответственных за шумы в МЭП. С одной стороны, случайные изменения скорости свободных носителей заряда, вызванные случайным характером их рассеяния, приводят к флуктуациям их локальной плотности, в результате чего появляются случайные токи диффузионной природы. В жидкости на шум диффузионного типа накладывается естественная конвекция, также связанная с неоднородностью распределения концентрации. С другой стороны, шум в МЭП может быть связан с гидродинамическими флуктуациями потока жидкости через преобразующую ячейку. Кроме того, свой вклад в общий шум системы вносят случайные явления, связанные с переносом заряда на границе раздела электрод – раствор электролита. Наконец, во всех измерениях малых флуктуаций надо принимать во внимание шумы электроники, задающей рабочее напряжение преобразователя и обеспечивающей преобразование токов в молекулярно-электронной

ячейке в выходное напряжение. На практике в устройствах на основе МЭП шумы на частотах выше нескольких герц определяются шумами электроники, а на более низких частотах – гидродинамическими флуктуациями потока электролита через преобразующую ячейку. Шум последнего типа подробно изучен в [1], где показано, что адекватные эксперименту результаты могут быть получены, если в эквивалентной схеме преобразователя параллельно гидродинамическому сопротивлению R_g поставить источник шумового потока со спектральной плотностью:

$$\langle \theta^2 \rangle_\omega = \frac{4kT}{R_g}, \quad (1)$$

где θ – объемная скорость потока электролита.

Из этой модели следует [1], что на низких частотах спектральная плотность шума, выраженная в единицах эквивалентного ускорения, не зависит от частоты и выражается формулой

$$\langle a^2 \rangle_\omega = \frac{2R_g T}{\rho^2 l^2}, \quad (2)$$

где ρ – плотность электролита; l – длина столба жидкости в направлении действующего ускорения. Формула (2) многократно подтверждена экспериментально для разных типов практически используемых приборов, имеющих гидродинамическое сопротивление $R_g \sim 10^9 \frac{\text{Н} \cdot \text{с}}{\text{м}^5}$. Из выражения (2) следует, что уменьшение шумов можно достичь увеличением плотности и геометрических размеров или снижением гидродинамического сопротивления преобразователя.

В настоящей работе исследованы шумы преобразователя с пониженным значением гидродинамического сопротивления $R_g \sim 10^8 \frac{\text{Н} \cdot \text{с}}{\text{м}^5}$. Показано, что в этом случае спектральная плотность шума не является частотно-независимой согласно формуле (2), а испытывает заметный подъем в сторону низких частот. Для объяснения полученных экспериментальных данных предложена модель, учитывающая возникновение флуктуирующих вихревых потоков в МЭП и их вклад в выходной ток с учетом разброса характеристик между отдельными микроканалами преобразующей ячейки. Показано, что предложенная модель является универсальной, и шум этого типа имеет место не только в преобразователях с пониженным значением R_g , но и для $R_g \sim 10^9 \frac{\text{Н} \cdot \text{с}}{\text{м}^5}$. В последнем случае, однако, его величина оказывается в несколько раз ниже гидродинамического шума, исследованного в [1], и шумы этого типа не проявляют себя в обычных условиях эксперимента. Установлено, что спектральная плотность шумов нового типа определяется АЧХ преобразующего элемента, а для снижения их влияния необходимо стремиться к снижению разброса параметров между микроканалами преобразователя.

Эксперимент. На основе МЭП изготовлен прибор с пониженным значением R_g . Уменьшение значения гидродинамического сопротивления достигается за счет увеличения общей площади преобразующей ячейки и соответствующего увеличения числа микроканалов при условии сохранения диаметра микроканалов, расстояния между ними, шага сетчатых электродов и т.д.

На рис.1 представлена экспериментальная зависимость спектральной плотности сигнала МЭП с пониженным гидродинамическим сопротивлением $R_g \sim 10^8 \frac{\text{Н} \cdot \text{с}}{\text{м}^5}$ в единицах приложенного ускорения (кривая 1). Для выделения шума из полученных экспериментальных данных чаще всего используется метод корреляции по трем приборам. Экспериментальное выделение шума из записанного сигнала не представляется возможным, так как в качестве опытного образца собран только один МЭП. Для МЭП с пониженным значением R_g модель, описанная в [1], определяет собственные шумы преобразователя так же, как и для обычно используемого МЭП на частотах, ниже нескольких герц. Поэтому можно дать теоретическую оценку уровня собственных шумов МЭП при $R_g \sim 10^8 \frac{\text{Н} \cdot \text{с}}{\text{м}^5}$. Значение шума будет составлять -155 Дб (см. рис.1, кривая 3).

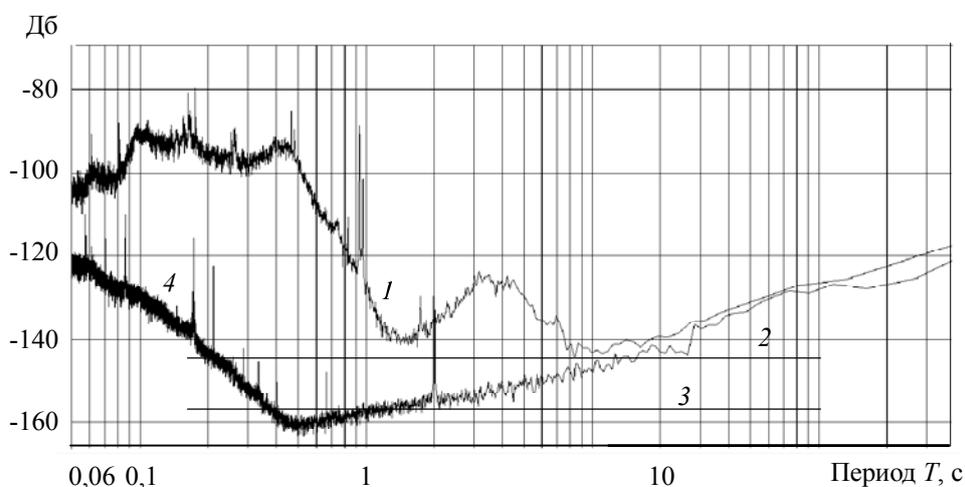


Рис.1. Спектральная плотность сигнала в единицах приложенного ускорения: 1 – спектральная плотность сигнала МЭП; 2 – спектральная плотность собственного шума МЭП с $R_g \sim 10^8 \frac{\text{Н} \cdot \text{с}}{\text{м}^5}$; 3 – спектральная плотность собственного шума МЭП с $R_g \sim 10^9 \frac{\text{Н} \cdot \text{с}}{\text{м}^5}$; 4 – спектральная плотность шума МЭП с $R_g \sim 10^9 \frac{\text{Н} \cdot \text{с}}{\text{м}^5}$, в котором отсутствует гидродинамическая составляющая

В качестве косвенного метода сопоставления теоретического расчета и экспериментальных данных используется следующий подход. Путем жесткой фиксации торцов канала, по которому протекает электролит, можно избежать интегрального механического протекания жидкости через преобразующий элемент МЭП. Тогда в получившемся приборе будет исключена возможность регистрации какого-либо внешнего сигнала, в том числе и шумов, описываемых в [1].

Результаты эксперимента по шумовым измерениям для такого прибора с пониженным значением R_g приведены на рис.1 (кривая 4). Видно, что модель, предложенная в [1], находится в соответствии с полученными экспериментальными данными только на небольшом участке вблизи частоты 1 Гц, а на более низких частотах измеренный шум оказывается существенно выше теоретического уровня с заметным подъемом спектральной плотности в сторону низких частот. Это свидетельствует о существовании и преобладающем воздействии другого, отличного от рассмотренного в [1], вида шума. Отметим,

что форма спектральной характеристики МЭП с пониженным значением R_g на частотах ниже 0,1 Гц (см. рис.1) определяется этим шумом. Возникает вопрос об универсальности обнаруженного шума. Аналогичный опыт был проведен с МЭП при $R_g \sim 10^9 \frac{\text{Н} \cdot \text{с}}{\text{М}^5}$. Выяснилось, что обнаруженный вид шума также имеет место, но в этом случае его величина существенно ниже гидродинамического шума из [1], поэтому в обычных условиях эксперимента не удастся обнаружить шумы этого типа.

Таким образом, во-первых, шум преобразователей с пониженным значением R_g отличается от белого шума в области низких частот, что подтверждает существование и преобладающее действие другого (отличного от рассмотренного в [1]) механизма шума. Во-вторых, обнаруженный вид шума является универсальным для всех типов приборов. Следовательно, природа его возникновения должна заключаться в принципиальной схеме конструкции МЭП.

Теоретическая модель и ее сравнение с экспериментом. Рассмотрим молекулярно-электронную ячейку (МЭЯ), в которой исключена возможность механического протекания электролита через электродную сетку. В этом случае интегрального потока жидкости в системе нет. Тем не менее возможно существование замкнутых микропотоков через отдельные микроскопические каналы. Несоответствие периода электродной сетки периоду расположения микроскопических каналов, а также дефекты в геометрии системы способствуют возникновению шумового тока в МЭЯ. Система микроканалов с протекающими по ним замкнутыми микропотоками электролита показана на рис.2,а.

Рассмотрим систему из N каналов. Предположим, что шум, возникающий в результате прохождения циркуляционных потоков через n каналов ($n < N$), известен и равен I_n (рис.2,б). Найдем вклад в общий шумовой поток $(n + 1)$ -го канала.

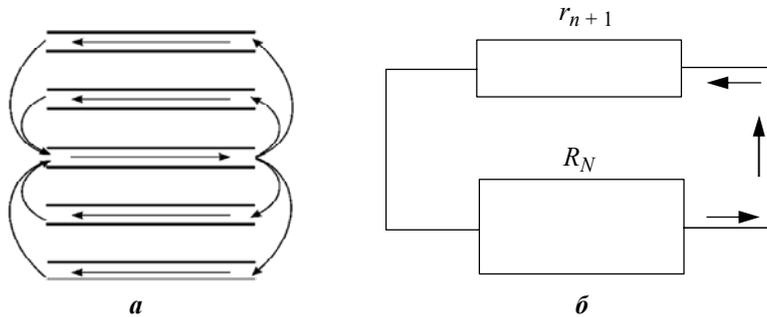


Рис.2. Схема системы микроканалов: а – вихревые микропотоки в МЭЯ; б – циркуляционный поток в $(n + 1)$ -м канале МЭП

Используя метод случайных сил [1], получим выражение для объемной скорости потока, протекающего по дополнительному каналу $(n + 1)$:

$$\langle \theta_n^2 \rangle = \frac{4kT}{r_{n+1} + R_n},$$

где r_{n+1} – гидродинамическое сопротивление $(n + 1)$ -го канала; R_n – гидродинамическое сопротивление N каналов.

Тогда шумовая добавка к току будет равна $I_{ш}^{n+1} = \theta_n(k_{n+1} - k_n)$ (где k_n – коэффициент преобразования скорости потока жидкости в ток). Следовательно, среднее от квадрата

значения $I_{ш}^{n+1}$ будет равно: $\langle I_{ш}^{n+1} \rangle = \langle \theta_n^2 \rangle \Delta k_n^2 = \frac{4kT}{r_{n+1} + R_n} \Delta k_n^2$. Отметим, что коэффициент преобразования не является характеристикой воздействия на систему внешней скорости. Это так называемый электрохимический коэффициент, характеризующий эффективность преобразования скорости движения электролита через сетку электродов в электрический ток.

Полный шумовой ток, обусловленный подобными процессами, можно записать в виде

$$\langle I_N \rangle^2 = \sum_{n=1}^N \langle I_n^2 \rangle = \sum_{n=1}^N \frac{4kT}{r_n} \Delta k_n^2 = \sum_{n=1}^N \frac{4kT}{r_n} \frac{\Delta k_n^2}{r_n}, \quad R_n \ll r_n.$$

Переходя от знака суммы к средним значениям,

получим
$$I_N = \sqrt{4kTN} \sqrt{\left\langle \frac{\Delta k_n^2}{r_n} \right\rangle}. \quad (3)$$

Если отклонение r_n от среднего значения много меньше самого r_n , аналогично имеем

$$I_N = \sqrt{\frac{4kT}{R_g}} \sqrt{\langle \Delta k_n^2 \rangle}.$$

Перепишем выражение (3), заменив $\sqrt{\left\langle \frac{\Delta k_n^2}{r_n} \right\rangle}$ на $\frac{\bar{k}}{\sqrt{RN}} \sqrt{\frac{\langle \Delta k_n^2 \rangle / r_n}{\bar{k}^2 / RN}}$ (где \bar{k} – усред-

ненная по всем микроканалам электрохимическая составляющая передаточной функции МЭП). Тогда для шумового тока получим

$$I_N = \sqrt{\frac{4kT}{R}} \frac{\bar{k}}{\bar{k}} \sqrt{\frac{\langle \Delta k_n^2 \rangle}{\bar{k}^2}}. \quad (4)$$

Предположим, что I_N имеет ту же частотную зависимость, что и \bar{k} , тогда последняя дробь от частоты не будет зависеть. Переходя к объемной скорости, будем иметь

$$\sqrt{\langle \theta^2 \rangle} = \sqrt{\frac{4kT}{R}} \sqrt{\frac{\langle \Delta k_n^2 \rangle}{\bar{k}^2}}. \quad (5)$$

Полученный результат (5) сильно отличается от результата работы [1]. Несмотря на кажущееся совпадение формул, зависимость (5) получена из совершенно иных соображений.

Исходя из предложенной модели, можно сделать несколько важных предположений. Во-первых, безразмерный коэффициент в последнем выражении должен быть меньше единицы, в противном случае в полосе частот вблизи 1 Гц этот шум имел бы преобладающее над гидродинамическим шумом действие. Во-вторых, подъем спектральной плотности шума в сторону низких частот согласно (4) должен быть обусловлен точно таким же подъемом электрохимической составляющей передаточной функции. Таким образом, для проверки достоверности гипотезы необходим ряд

экспериментов по измерению электрохимической составляющей передаточной функции серийного МЭП и сопоставление полученных результатов с изложенной теорией.

Учитывая универсальность обнаруженного шума, экспериментальную проверку описанной выше теории удобно осуществить при помощи прибора, изготовленного из датчика со стандартным гидродинамическим сопротивлением $R_g = 9 \cdot 10^8 \frac{\text{Н} \cdot \text{с}}{\text{м}^5}$.

На рис.3 представлено сравнение шумовых характеристик МЭП с жестко фиксированными торцами каналов, по которым протекает электролит, и различными R_g . Видно, что результаты эксперимента хорошо согласуются с теоретическими выкладками, шумовая характеристика прибора со стандартным R_g лежит примерно в три раза ниже шумовой характеристики прибора с пониженным R_g . Полученный результат подтверждает одинаковую природу обнаруженного шума для обоих исследуемых приборов.

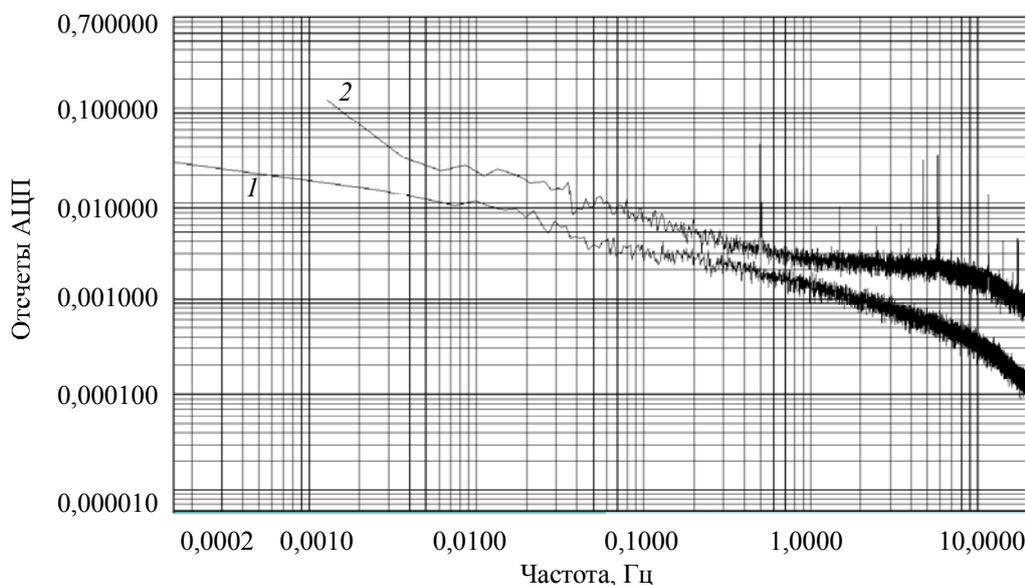


Рис.3. Сравнение шумовых характеристик приборов с различными гидродинамическими сопротивлениями: 1 – $R_g = 9 \cdot 10^8 \frac{\text{Н} \cdot \text{с}}{\text{м}^5}$; 2 – $R_g = 10^8 \frac{\text{Н} \cdot \text{с}}{\text{м}^5}$ (1 отсчет АЦП равен $1,19 \cdot 10^{-6}$ В)

Для получения электрохимической передаточной функции потребовалось устройство, способное создавать поток электролита, протекающий сквозь сетки электродного узла МЭП с заданной объемной скоростью. Такое устройство было разработано на базе МЭП со стандартным гидродинамическим сопротивлением.

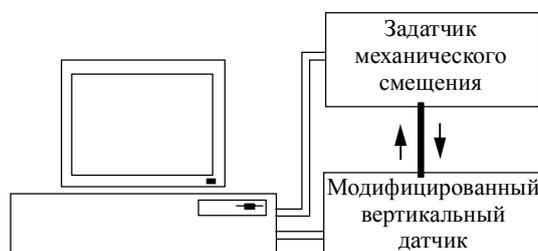


Рис.4. Блок-схема экспериментальной установки

Измерение электрохимической передаточной функции МЭП проводилось на установке, схематически изображенной на рис.4.

В качестве высокоточного задатчика смещения, а также для измерения полной передаточной функции МЭП $W(\omega)$ использовался калибратор для сейсмодатчиков. Посредством жесткой тяги механические колебания синусоидальной формы от калибратора передавались на поршень модифицированного сейсмометра, задавая тем самым колебания

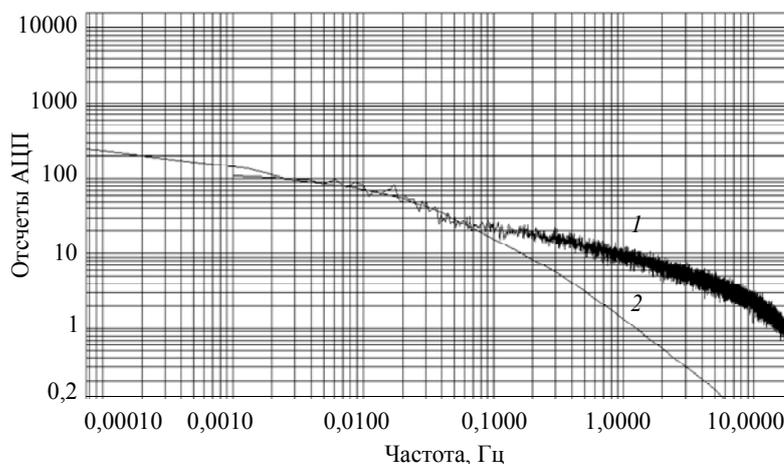


Рис.6. Сравнение шума прибора с жестко фиксированными торцами канала, по которому протекает электролит, с коэффициентом электрохимической передачи (1 отсчет АЦП равен $1,19 \cdot 10^{-6}$ В)

Результаты проведенной работы позволяют не только оценить влияние геометрии электродной системы на шумовые характеристики МЭП, но и предложить некоторые пути уменьшения этого влияния на МЭП с пониженным гидродинамическим сопротивлением. Во-первых, при изготовлении МЭЯ необходимо добиваться кратности периода расположения микроканалов ячейки и периода электродной сетки, во-вторых, необходимо максимально снизить образование различных дефектов конструкции в ходе производства сетчатых электродов. Совокупность этих мер позволит снизить описанные шумы для всех типов МЭП, а для МЭП с пониженным значением гидродинамического сопротивлением выйти на уровень шумов, описанных в работе [1].

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект № 04-07-90305) и Федерального агентства по науке и образованию (госконтракт № 02.435.11.6005).

Литература

1. Козлов В.А., Сахаров К.А. Собственные шумы молекулярно-электронных преобразователей диффузионного типа // Физические основы жидкостных и твердотельных измерительных систем и устройств обработки информации. – М.: МФТИ, 1994. – С. 43–49.
2. Козлов В.А., Сафонов М.В. Собственные шумы молекулярно-электронных преобразователей // ЖТФ. – 2003. – Т. 73, вып. 12. – С. 81.
3. Антохин А. Ю., Козлов В.А. Неравновесный шум в молекулярно-электронных преобразователях // Физические процессы в приборах электронной и лазерной техники. – М.: МФТИ, 1995. – С. 150–154.
4. Ван Дер Зил А. Флуктуации в радиотехнике и физике / Пер. с англ. под ред. Л.С.Гуткина. – М.: Госэнергоиздат, 1958. – 295 с.
5. Ван Дер Зил А. Шумы при измерениях / Пер. с англ. под ред. А.К.Нарышкина. – М.: Мир, 1979. – 250 с.

Зайцев Дмитрий Леонидович – аспирант кафедры экологически чистых источников энергии и молекулярной электроники МФТИ. *Область научных интересов:* молекулярная электроника.

Дудкин Павел Валентинович – аспирант кафедры экологически чистых источников энергии и молекулярной электроники МФТИ. *Область научных интересов:* молекулярная электроника.

Агафонов Вадим Михайлович – доцент кафедры экологически чистых источников энергии и молекулярной электроники МФТИ, кандидат физико-математических наук. *Область научных интересов:* физика диэлектриков, молекулярная электроника.

Исследование обратимых отказов GaAs ПТШ при импульсных перегрузках

А.М.Бобрешов, А.В.Дыбой, Ю.И.Китаев, Ю.Н.Нестеренко, Г.К.Усков

Воронежский государственный университет

О.И.Обрезан

ФГУП «НПП «Исток» (г. Фрязино)

Исследованы механизмы обратимых отказов малошумящих GaAs полевых транзисторов с затвором Шотки (ПТШ) в результате перегрузок СВЧ- и видеоимпульсами, действующими по входной цепи. Исследуемые эффекты связаны с зарядом глубоких уровней полуизолирующей подложки ПТШ. Проведено экспериментальное исследование обратимой деградации ПТШ под действием видеоимпульсов. Описанный экспериментальный метод может быть использован для тестирования ПТШ на стойкость к обратимым отказам.

Одной из самых распространенных причин отказов радиоприемной аппаратуры СВЧ под воздействием мощных СВЧ-импульсов, действующих со стороны антенного тракта, является перегрузка входных твердотельных малошумящих усилителей радиочастоты (МШУ), в качестве которых наиболее часто используются МШУ на базе малошумящих GaAs полевых транзисторов с затвором Шотки (ПТШ) [1–4]. В связи с этим актуальна задача прогнозирования стойкости ПТШ к перегрузкам в процессе эксплуатации аппаратуры, а также задача обеспечения стойкости к заданным уровням перегрузок.

Перегрузка ПТШ может привести как к катастрофическим, так и к некатастрофическим отказам. Последние выражаются либо в необратимой, либо в обратимой деградации функциональных параметров. Необратимая деградация может иметь характер как быстрого отказа в результате перегрузки, так и характер медленного процесса, имеющего место даже в отсутствие перегрузок при длительной эксплуатации ПТШ [5]. Обратимая деградация всегда является быстрым эффектом, который наступает при кратковременной перегрузке в виде импульса или серии импульсов. По этой причине обратимые эффекты представляют серьезную опасность, поскольку вызывают внезапные отказы аппаратуры с постепенным восстановлением параметров после прекращения действия перегрузки. Вероятность обратимых отказов по причине непреднамеренных помех на практике выше, чем вероятность катастрофических отказов, поскольку требуемая мощность для них ниже. Существуют приложения, для которых вероятность обратимых отказов весьма велика. Такие отказы типичны, например, для приемников в составе радаров, где деградация ПТШ под действием импульсов от собственного передатчика, просачивающихся через защитное устройство, может приводить к снижению чувствительности приемника в межимпульсных промежутках [1–4].

Поэтому необходимо дальнейшее развитие методов диагностики ПТШ с точки зрения прогнозирования его стойкости к обратимым отказам в процессе эксплуатации.

Очевидно, что методы диагностики должны базироваться на понимании физических процессов, протекающих в полупроводниковой структуре транзистора в условиях перегрузок. Это создает основу для разработки более рациональных и эффективных методик тестирования. Так, обычно применяющиеся методики испытаний ПТШ основаны на воздействии СВЧ-импульсами, т.е. на возможно более точном воспроизведении реальных условий [2, 3]. В то же время с точки зрения аппаратной организации тестирования предпочтительно использование воздействий в форме видеоимпульсов. Для того чтобы использовать результаты тестирования видеоимпульсами для СВЧ-перегрузок, необходима уверенность в подобии механизмов деградации в обоих случаях.

В настоящей работе рассматривается физический механизм обратимой деградации ПТШ, который может проявляться как под действием видеоимпульсов, так и под действием СВЧ-импульсов. Общность механизма деградации в обоих случаях позволяет реализовать относительно несложный метод тестирования ПТШ на подверженность обратимым отказам на основе техники видеоимпульсов. Проведенные эксперименты демонстрируют возможности предлагаемого метода.

Проявление эффекта обратного управления ПТШ под действием импульсной перегрузки во входной цепи. Обратимая деградация ПТШ под действием перегрузки СВЧ-импульсами со стороны входной цепи проявляется в виде уменьшения коэффициента усиления и увеличения коэффициента шума транзистора в межимпульсных промежутках [1–3]. Восстановление исходных параметров происходит за время, которое зависит от типа транзистора, испытываемого экземпляра, температуры, и может составлять от десятков микросекунд до нескольких секунд [2, 3]. В опытах с перегрузками ПТШ входными видеоимпульсами обратной полярности, обсуждаемых в данной работе, деградация ПТШ выражается в уменьшении тока стока после воздействия импульса по сравнению с его величиной до этого воздействия с последующим восстановлением исходной величины с характерными временами, согласующимися со случаем СВЧ-перегрузок. Ток стока для ПТШ является универсальным показателем, связанным с основными функциональными СВЧ-параметрами (коэффициентом усиления, коэффициентом шума) [3].

Причина обратимой послеперегрузочной деградации ПТШ состоит в наличии глубоких уровней в полупроводниковой структуре транзистора. Решающая роль при этом принадлежит глубоким уровням в материале полуизолирующей подложки GaAs вблизи границы с активным слоем [1, 2]. Явления деградации ПТШ можно объяснить накоплением отрицательного объемного заряда на этих уровнях в условиях действия перегрузок и соответствующей модуляцией проводимости канала. При этом имеет место аналогия с эффектом обратного управления ПТШ (backgating) [6–8] и сопровождающим его явлением накопления отрицательного заряда на глубоких уровнях подложки при обратном смещении подложки относительно активного слоя. Покажем, что механизм зарядки глубоких уровней подложки при перегрузках по входной цепи ПТШ может быть интерпретирован как проявление эффекта обратного управления.

Эффект обратного управления (эффект управления по подложке) заключается в изменении проводимости канала из-за изменения толщины зарядного слоя на границе раздела подложки и канала вследствие изменения потенциала между подложкой и каналом [8]. Отметим, что степень проявления эффекта обратного управления ПТШ зависит от наличия и свойств буферного слоя на границе раздела канал/подложка. Буферный слой может уменьшать этот эффект, но не устраняет его полностью. Поэтому при рассмотрении явлений, связанных с обратным управлением, имеет смысл ограничиться простым случаем отсутствия буферного слоя и рассматривать структуру типа полуизо-

лирующая подложка – n^+ -слой [6–8]. Будем считать, что материалом подложки является GaAs, легированный хромом, поэтому глубокие уровни подложки имеют акцепторную природу.

Эффект обратного управления связан с потенциальным барьером на границе раздела канал/подложка. Барьеру соответствует объемный заряд: отрицательный – со стороны подложки и положительный – со стороны канала. Отрицательный заряд подложки связан с заполнением электронами глубоких уровней полуизолирующего GaAs [6, 8], а положительный заряд со стороны канала n^+ образован ионизированными мелкими донорами в обедненной области. Если к переходу канал/подложка приложено напряжение, знак которого совпадает со знаком встроенного потенциала перехода (подложка отрицательно смещена относительно канала), барьер повышается, а область объемного заряда расширяется как со стороны подложки, так и со стороны канала, при этом проводимость канала уменьшается.

Нетрудно убедиться, что напряжение на переходе канал/подложка, являющееся причиной обратного управления, может появиться в результате приложения к затвору ПТШ напряжения обратной полярности. Рассмотрим действие одиночного импульса напряжения затвор–исток обратной полярности, абсолютная величина которого $U_{\text{имп}}$ превышает напряжение отсечки.

В рабочем режиме транзистора, когда напряжение на затворе U_{30} не превышает напряжения отсечки $U_{\text{отс}}$, проводящий слой канала экранирует барьер границы раздела канал/подложка от действия напряжений затвор–исток и затвор–сток. Можно считать, что в этом режиме имеется некоторая стационарная объемная конфигурация заряженных областей границы раздела, не зависящая или весьма слабо зависящая от этих напряжений.

При напряжении на затворе, превышающем по абсолютной величине напряжение отсечки $|U_{\text{имп}}| > |U_{\text{отс}}|$, обедненная область в канале под затвором смыкается с обедненной областью перехода канал/подложка, в результате возникают условия, при которых электрическое поле, созданное напряжениями затвор–исток и затвор–сток, проникает в область перехода (рис.1). Это приводит к проявлению тех же самых физических процессов, которые действуют при обратном управлении, с той особенностью, что источником дополнительной (относительно встроенного потенциала) разности потенциалов на переходе канал/подложка является напряжение, приложенное к затвору. Как следует из рис.1, на границе раздела канал/подложка должны существовать области, где дополнительная разность потенциалов имеет тот же знак, что и встроенный потенциал, и области, где знаки этих потенциалов противоположны. Направление поля встроенного потенциала E_{bi} показано на рис.1. Знак дополнительной разности потенциалов относительно знака встроенного потенциала определяет направление изменения заряда на глубоких уровнях подложки: при совпадении знаков заряд увеличивается, в противном случае – уменьшается. Несмотря на существование областей границы, процессы в которых разнонаправлены, в эксперименте наблюдается снижение тока стока после снятия импульсного напряжения. Это говорит о том, что результирующим эффектом действующим

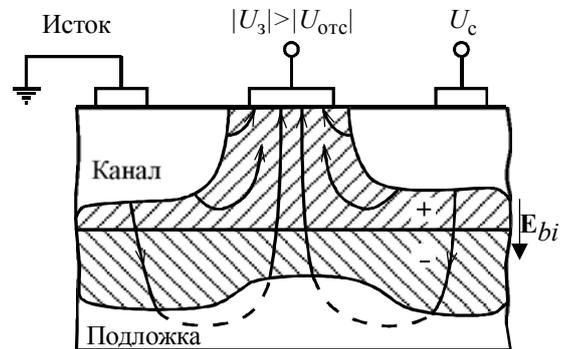


Рис.1. Объемный заряд и электрическое поле в ПТШ во время действия импульса перегрузки

дополнительной (относительно встроенного потенциала) разности потенциалов на переходе канал/подложка является напряжение, приложенное к затвору. Как следует из рис.1, на границе раздела канал/подложка должны существовать области, где дополнительная разность потенциалов имеет тот же знак, что и встроенный потенциал, и области, где знаки этих потенциалов противоположны. Направление поля встроенного потенциала E_{bi} показано на рис.1. Знак дополнительной разности потенциалов относительно знака встроенного потенциала определяет направление изменения заряда на глубоких уровнях подложки: при совпадении знаков заряд увеличивается, в противном случае – уменьшается. Несмотря на существование областей границы, процессы в которых разнонаправлены, в эксперименте наблюдается снижение тока стока после снятия импульсного напряжения. Это говорит о том, что результирующим эффектом действующим

щего импульса является накопление отрицательного заряда в подложке и соответствующее сужение канала.

Произошедшее во время действия импульса изменение толщины зарядного слоя границы раздела имеет значительную инерцию, связанную с большим временем релаксации заполнения глубоких уровней подложки. В связи с этим после возврата напряжения на затворе из отсечки к рабочему значению U_{30} конфигурация зарядного слоя будет в течение некоторого времени стремиться к своему равновесному состоянию, которое существовало до импульсного воздействия. В эксперименте рассмотренное явление наблюдается как послеперегрузочное восстановление тока стока.

Рассмотренный механизм, по-видимому, является основной причиной обратимой деградации ПТШ как при перегрузках видеоимпульсами, так и при СВЧ-перегрузках. Для активизации этого механизма требуются два основных условия:

- наличие незанятых глубоких уровней в подложке транзистора;
- воздействие на затвор напряжения отрицательной полярности, абсолютное значение которого превышает напряжение отсечки.

Первое условие в наибольшей степени проявляется в случае недостаточно точно компенсированной подложки. Второе условие может быть реализовано как при перегрузках ПТШ видеоимпульсами, так и при его перегрузках СВЧ-импульсами. В последнем случае это условие реализуется во время отрицательного полупериода СВЧ-сигнала.

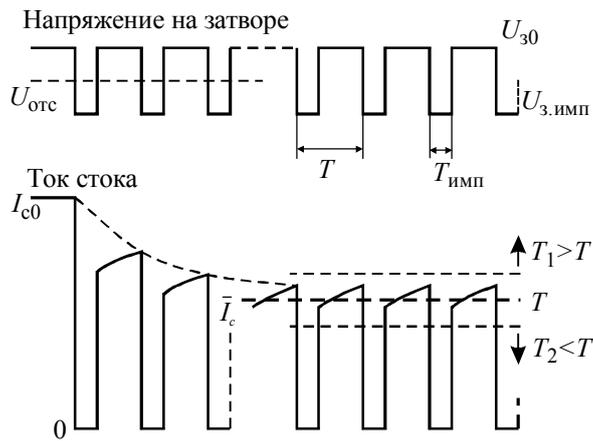


Рис.2. Воздействие периодических импульсов на затвор ПТШ и развитие деградации тока стока. U_{30} – напряжение затвор–исток в рабочем режиме; $U_{3,имп}$ – напряжение импульса перегрузки; $U_{отс}$ – напряжение отсечки

определенными временами τ_3 и τ соответственно. Интерпретация экспериментальных результатов в рамках используемых представлений возможна в предположении $\tau_3 \ll \tau$. В случае коротких испытательных импульсов, для которых выполняется

$$T_{имп} < \tau_3, \tag{1}$$

кумулятивный эффект имеет место при не слишком больших периодах следования импульсов T , таких что

$$T < \tau. \tag{2}$$

Обратимая деградация ПТШ под действием периодических импульсов.

Главной особенностью периодического воздействия на ПТШ по сравнению с воздействием одиночного импульса является наличие кумулятивного эффекта, в силу которого глубина деградации, достигаемая под действием периодических импульсов, может быть значительно больше, чем при одиночном импульсе той же амплитуды и длительности. Суть кумулятивного эффекта показана на рис.2, где воспроизведены условия реализованного эксперимента по воздействию на ПТШ периодических видеоимпульсов.

Процессы образования объемного заряда в подложке во время действия импульса и релаксации этого заряда в меж-импульсном промежутке характеризуются

Действительно, при коротких импульсах (1) полного заполнения глубоких уровней за время действия импульса не происходит, так же как при выполнении условия (2) в течение межимпульсного промежутка не происходит полной релаксации. Поэтому после запуска импульсной последовательности каждый последующий импульс на затворе увеличивает число заполненных акцепторных центров, так что величина заряда, накопленного в подложке, растет, пока не установится стационарное состояние процесса, являющееся результатом динамического равновесия между периодически следующими фазами заполнения глубоких уровней подложки и их освобождения.

Рассмотренное явление накопления заряда в подложке ПТШ проявляется в эксперименте в виде деградации тока стока (см. рис.2) При постоянном $T_{\text{имп}}$ каждому значению периода T соответствует свое состояние динамического равновесия процесса перезарядки глубоких уровней, которому отвечает вид кривой релаксации $I_c(t)$ в межимпульсном промежутке. Зависимость $I_c(t)$ характеризуется значением начальной точки релаксации, определяемой максимальной толщиной зарядного слоя в конце испытательного импульса, и значением конечной точки, определяемой минимальной толщиной зарядного слоя, достигаемой к концу межимпульсного промежутка. Интегральным показателем деградации тока стока может служить его среднее значение \bar{I}_c .

В эксперименте при плавном изменении T в широком диапазоне значений наблюдается весьма динамичная и наглядная картина изменения $\bar{I}_c(T)$ от максимального значения при $T \geq \tau$ до минимальных значений в пределе малых T . Наблюдение уменьшения $\bar{I}_c(T)$ позволяет оценить глубину деградации ПТШ при заданной амплитуде импульсов $U_{\text{з.имп}}$. Время послеперегрузочного восстановления ПТШ соответствует времени релаксации объемного заряда подложки τ . Это время можно оценить в эксперименте как значение периода T , после которого его увеличение больше не сопровождается возрастанием \bar{I}_c .

При невыполнении хотя бы одного из условий (1) или (2) кумулятивный эффект отсутствует, соответственно отсутствует и выраженная зависимость $\bar{I}_c(T)$. При всех $T \geq \tau$ фактически наблюдается результат действия одиночного импульса. При $T_{\text{имп}} \geq \tau_3$ наблюдаются различные временные отрезки одного и того же релаксационного процесса, начало которого соответствует максимальной толщине зарядного слоя, достигаемой при напряжении $U_{\text{з.имп}}$.

Наличие кумулятивного эффекта приводит к тому, что действие периодических СВЧ-импульсов близко по своему эффекту к действию периодических видеоимпульсов. Поэтому с помощью периодических видеоимпульсов можно воспроизвести условия деградации ПТШ, имеющие место под действием СВЧ-импульсов.

Эксперимент. Специфика обратимых отказов ПТШ такова, что спустя короткое время после окончания действия перегрузки параметры ПТШ приходят в норму и измерения, проводимые по истечении времени восстановления, не выявляют изменений состояния приборов. Таким образом, при тестировании ПТШ с целью определения их подверженности обратимой деградации параметры транзисторов должны быть измерены непосредственно после окончания действия испытательного импульса в случае одиночного импульса или же в межимпульсных промежутках в случае периодического воздействия. Использование периодических импульсов предпочтительнее прежде всего в силу удобства наблюдения периодических процессов. Кроме того, воздействие последовательности импульсов обладает кумулятивным свойством, так что заметная глубина деградации достигается при меньшей амплитуде импульсов, чем в случае одиночного

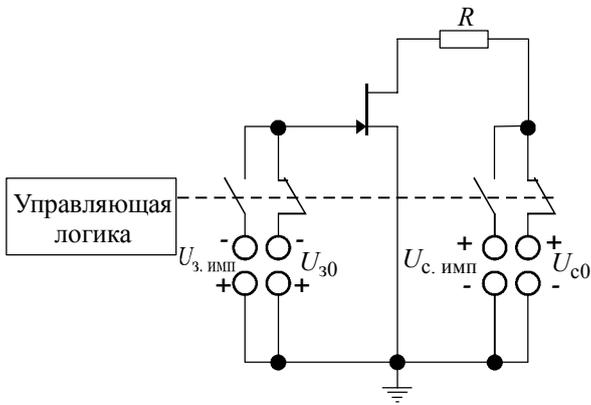


Рис.3. Принцип действия экспериментальной установки для исследования эффектов деградации ПТШ под воздействием перегрузок видеоимпульсами

импульса. Существенно также, что изменения в межимпульсных промежутках воспроизводят условия, существующие в радарах.

Для исследования эффектов деградации ПТШ под воздействием перегрузок видеоимпульсами использовалась установка, принцип действия которой показан на рис.3. Воздействие импульсов предусмотрено как по входной цепи затвор–исток, так и по выходной цепи сток–исток, поскольку в реальной аппаратуре перегрузки могут действовать по обеим цепям. В то время как СВЧ-перегрузки действуют преимущественно по входу, видеоимпульсные пере-

грузки могут действовать по обеим цепям [2]. Для генерации импульсов в каждой из цепей используются по два источника напряжения, один из которых задает смещение рабочего режима, а другой – напряжение перегрузки. Импульсы генерируются путем переключения источников с помощью аналоговых коммутаторов, управляемых программируемой логикой. Программным путем могут быть сформированы произвольные импульсные последовательности. Последствия импульсных воздействий оценивались по изменениям в межимпульсных промежутках величины тока стока I_c , протекающего через резистор R , падение напряжения на котором наблюдалось на экране осциллографа. Исследования проводились с двумя типами малошумящих ПТШ: 3П326А-2 и MGF1303В (Mitsubishi).

Отметим, что в экспериментах, проведенных с перегрузками в цепи стока в широком диапазоне параметров импульсных воздействий, видимых релаксационных явлений, характерных для обратимой деградации ПТШ, не наблюдалось. Имели место лишь катастрофические отказы, наступающие при превышении величины $U_{с.имп}$ некоторого предельного значения. В то же время воздействие на затвор приводило к четко выраженным явлениям релаксации в межимпульсных промежутках, наступающим при импульсных напряжениях отрицательной полярности $U_{з.имп}$, которые превышают напряжение отсечки $U_{отс}$. В рассмотренных далее экспериментах с импульсными воздействиями (см. рис.2) длительность импульса $T_{имп}$ составляла 0,5 мкс.

Экспериментальные результаты. Типичная реакция тока стока I_c на одиночный видеоимпульс напряжения затвор–исток $U_{з.имп}$ показана на рис.4. Реакция выражается в падении I_c после импульсного воздействия с последующим восстановлением. Наблюдения показывают, что общая продолжительность релаксации сильно зависит от типа транзистора. Так, для транзистора MGF1303В она не превышает десятков микросекунд, а для транзисторов 3П326А-2 может составить ~100 мс.

В общем случае процесс восстановления I_c после импульсного воздействия состоит из двух характерных частей (см. рис.4), описываемых существенно различными постоянными времени:

- быстрая релаксация в течение времени Δt_1 . Для разных типов и экземпляров транзисторов величина времени Δt_1 может составлять от 1 до 10 мкс;

- медленная релаксация, представляющая собой весьма растянутый во времени процесс до полного восстановления первоначального значения I_c . Время Δt_2 этого процесса сильно зависит от типа транзистора. Так, для транзисторов MGF1303В релаксация прекращается за десятки микросекунд, в то время как для транзисторов 3П326А-2

типовое время релаксации составляет единицы миллисекунд, а у некоторых образцов этот процесс достигает 100 мс.

Данные наблюдения соответствуют результатам исследований релаксационных процессов для обратимых изменений функциональных СВЧ-параметров ПТШ (коэффициент усиления, коэффициент шума, фаза коэффициента передачи) после перегрузок СВЧ [2], где также отмечено два типа релаксации с похожими временными характеристиками. Такая схожесть результатов свидетельствует, во-первых, о корреляции деградации тока стока с деградацией функциональных параметров СВЧ и, во-вторых, об идентичности физических механизмов, лежащих в основе деградации ПТШ под действием СВЧ-импульсов и видеоимпульсов. Наличие различных постоянных времени релаксационных процессов ПТШ связывают с наличием в структуре транзистора глубоких центров различной природы и локализации [2]. С глубокими центрами подложки всегда связываются медленные релаксационные процессы [1, 2, 9].

Исследовалась зависимость глубины деградации от интенсивности перегрузочного воздействия. Последняя задавалась амплитудой испытательных импульсов $U_{3,имп}$ и периодом их следования T . Во всех экспериментах имел место кумулятивный эффект, о чем свидетельствовала наблюдаемая зависимость среднего тока стока от периода $\bar{I}_c(T)$. Глубина деградации ПТШ определялась падением \bar{I}_c относительно значения тока стока в отсутствие импульсов I_{c0} . Типовые зависимости, полученные для двух транзисторов 3ПЗ26А-2 и одного MGF1303В, представлены на рис.5. Очевидна существенная разница в перегрузочных характеристиках между двумя исследуемыми типами транзисторов.

На основе данной методики можно проводить тестирование ПТШ с целью оценки их стойкости к обратимым отказам в условиях импульсных перегрузок или же для отбора типов или экземпляров ПТШ по критериям, связанным с конкретными приложениями.

Основным механизмом обратимой деградации ПТШ под действием импульсных перегрузок во входной цепи

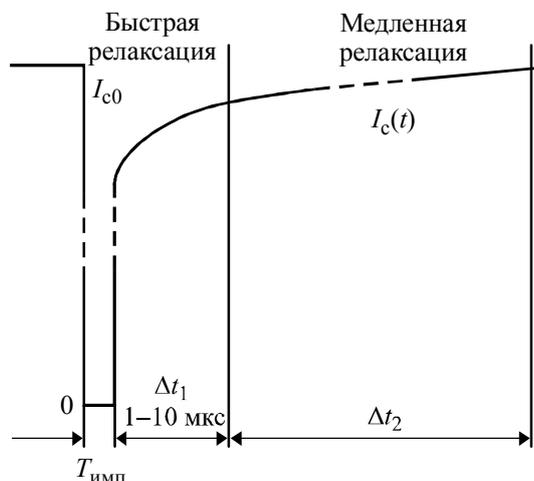


Рис.4. Релаксация тока стока после воздействия на затвор ПТШ одиночного импульса перегрузки

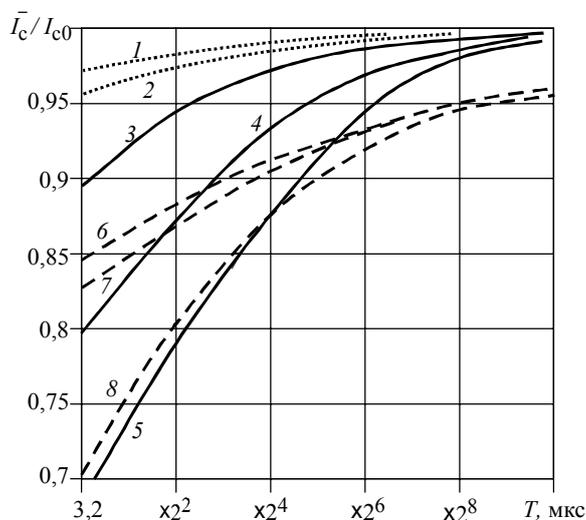


Рис.5. Зависимость деградации межимпульсного тока стока от амплитуды и периода следования испытательных импульсов T при различных значениях их амплитуд $U_{3,имп}$ для трех транзисторов: MGF1303В ($U_{c0} = 3$ В; $U_{30} = -0,4$ В; $I_{c0} = 12,4$ мА; $U_{отс} = -1,6$ В): 1 - $U_{3,имп} = -6$ В; 2 - $U_{3,имп} = -8$ В; 3ПЗ26А-2 № 1 ($U_{c0} = 2$ В; $U_{30} = -0,4$ В; $I_{c0} = 37,4$ мА; $U_{отс} = -2,8$ В): 3 - $U_{3,имп} = -4$ В; 4 - $U_{3,имп} = -5$ В; 5 - $U_{3,имп} = -6$ В; 3ПЗ26А-2 № 2 ($U_{c0} = 2$ В; $U_{30} = -0,4$ В; $I_{c0} = 29,4$ мА; $U_{отс} = -3$ В): 6 - $U_{3,имп} = -4$ В; 7 - $U_{3,имп} = -5$ В; 8 - $U_{3,имп} = -6$ В

является увеличение толщины зарядного слоя на границе канал/подложка вследствие заполнения электронами глубоких уровней полуизолирующей GaAs-подложки. Под действием входных перегрузок накопление объемного заряда в подложке происходит при воздействии на затвор ПТШ напряжения отрицательной полярности, абсолютное значение которого превышает напряжение отсечки. Действие перегрузок в виде периодических коротких импульсов обладает свойством накопления эффекта, следствием чего может быть заметная деградация ПТШ, несмотря на малую ширину отдельных импульсов. Рассмотренный механизм обратимой деградации ПТШ проявляется как под действием видеоимпульсов, так и под действием СВЧ-импульсов. Это позволяет развивать методы измерения параметров обратимой деградации ПТШ на основе более простой техники видеоимпульсов.

Рассмотренный экспериментальный метод исследования обратимой деградации ПТШ с помощью воздействия периодических видеоимпульсов на его затвор позволяет оценивать стойкость ПТШ к обратимым отказам в условиях входных импульсных перегрузок путем определения основных параметров обратимой деградации ПТШ (глубины деградации в зависимости от интенсивности перегрузки и времени послеперегрузочного восстановления). На основе метода могут быть организованы испытания ПТШ с целью отбора по критериям стойкости к обратимым отказам и решения таким образом проблемы надежности функционирования МШУ в условиях перегрузок.

Литература

1. Влияние мощных импульсных микроволновых помех на полупроводниковые приборы и интегральные микросхемы / *Антипин В.В., Годовицын В.А., Громов Д.В. и др.* // Зарубежная радиоэлектроника. – 1995. – № 1. – С. 37–53.
2. *Баранов И.А., Обрезан О.И., Роний А.И.* Стойкость твердотельных модулей СВЧ к кратковременным электроперегрузкам // *Обзоры по электронной технике. Сер. 1, СВЧ-техника.* – М.: ЦНИИ «Электроника». – 1997. – 111 с.
3. *James D.S., Dormer L.* A study of high power pulsed characteristics of lower-noise GaAs MESFET's // *IEEE Trans.* – 1981. – Vol. MTT-29. – N 12. – P. 1298–1310.
4. *Whalen J.J., Kemerley R.T., Rastefano E.* X-band burnout characteristics of GaAs MESFET's // *IEEE Trans.* – 1982. – Vol. MTT-32. – N 12. – P. 2206–2211.
5. *Эрвин Дж. К.* Надежность GaAs ПТШ // *Полевые транзисторы на арсениде галлия. Принципы работы и технология изготовления:* Пер. с англ. / *Под ред. Д.В. Ди Лоренцо, Д.Д. Канделуола.* – М.: Радио и связь, 1988. – С. 181–214.
6. *Kocot C., Stolte C.A.* Backgating in GaAs MESFET's // *IEEE Trans.* – 1982. – Vol. ED-29. – N 7. – P. 1059–1064.
7. *Шур М.* Современные приборы на основе арсенида галлия: Пер. с англ. – М.: Мир, 1991. – 632 с.
8. *Линдквист П.Ф., Форд У.М.* Полуизолирующие подложки из арсенида галлия // *Полевые транзисторы на арсениде галлия. Принципы работы и технология изготовления:* Пер. с англ. / *Под ред. Д.В. Ди Лоренцо, Д.Д. Канделуола.* – М.: Радио и связь, 1988. – С. 7–36.
9. *Simons M., King E.E., Anderson W.T., Day H.M.* Transient radiation study of GaAs metal semiconductor field effect transistors implanted in Cr-doped and undoped substrates // *J. Appl. Phys.* – Nov 1981. – P. 6630–6636.

Бобрешов Анатолий Михайлович – доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой электроники ВГУ. *Область научных интересов:* нелинейные многосигнальные явления в малощумящих твердотельных и вакуумных приборах СВЧ, проблема надежности их функционирования в условиях перегрузок, параметры

электромагнитной совместимости радиоприемных устройств и малошумящих усилителей СВЧ, методы измерений параметров электромагнитной совместимости.

Дыбой Александр Вячеславович – кандидат физико-математических наук, доцент кафедры электроники ВГУ. *Область научных интересов:* нелинейные многосигнальные явления в малошумящих твердотельных приборах СВЧ, параметры электромагнитной совместимости малошумящих усилителей СВЧ, методы радиоизмерений.

Китаев Юрий Иванович – кандидат технических наук, доцент кафедры электроники ВГУ. *Область научных интересов:* полупроводниковые устройства СВЧ, акустооптика.

Нестеренко Юрий Николаевич – кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник кафедры электроники ВГУ. *Область научных интересов:* нелинейные многосигнальные явления в малошумящих приборах СВЧ, проблема надежности их функционирования в условиях перегрузок, параметры электромагнитной совместимости радиоприемных устройств и методы их измерений.

Усков Григорий Константинович – аспирант кафедры электроники ВГУ. *Область научных интересов:* моделирование твердотельных приборов СВЧ, параметры электромагнитной совместимости малошумящих усилителей СВЧ, приемопередающие устройства СВЧ.

Обрезан Олег Иванович – кандидат технических наук, начальник отдела ФГУП «НПП «Исток» (г.Фрязино). *Область научных интересов:* надежность СВЧ-устройств, радиоизмерения в СВЧ-диапазоне.

Классификация надежности интегральных схем с использованием показателя формы спектра γ

М.И.Горлов, Д.Ю.Смирнов

Воронежский государственный технический университет

Д.Л.Ануфриев

НПО «Интеграл» (г. Воронеж)

Рассмотрена возможность использования показателя формы спектра шума вида $1/f^\gamma$ как критерия разделения ИС по надежности. Предложен способ разделения ИС по надежности.

На современном этапе развития полупроводниковых изделий (ППИ) с повышением их надежности все труднее проводить в системе отбраковочных испытаний электро-термотренировки. Поэтому большое внимание уделяется исследованию физической природы дефектов, возможности отбраковки при этом потенциально ненадежных приборов диагностическими способами. Представления о природе флуктуационных явлений в полупроводниковых приборах могут быть использованы в качестве одного из средств изучения дефектов в полупроводниковых материалах и приборах. В частности, в работах [1–3] показана взаимосвязь низкочастотного шума с некоторыми свойствами материалов структуры ППИ.

Термин «шумы» относится к самопроизвольным флуктуациям тока, протекающего через полупроводниковые материалы и приборы, и к флуктуациям напряжения на них. Наблюдаемые шумы обычно подразделяют на тепловой шум, дробовой шум и фликкер-шум, называемый также низкочастотным. Фликкер-шум отличается специфическим спектральным распределением $1/f^\gamma$ и играет важную роль на низких частотах [4]. У большинства ППИ шум типа $1/f^\gamma$ обусловлен наличием на поверхности полупроводника энергетических уровней медленного и быстрого поверхностных состояний. Число и постоянная времени поверхностных состояний в значительной степени зависят от физико-химического состояния поверхности, которая может определить срок службы ППИ. Также определяющим фактором для шума $1/f^\gamma$ является процесс электромиграции в межсоединениях ИС [5].

Для аппроксимации зависимости низкочастотного (НЧ) шума от режима работы по напряжению используется соотношение для среднеквадратичного напряжения шума [6]:

$$\overline{U}_{\text{ш}}^2 = \frac{AU^\alpha \Delta f}{f^\gamma},$$

где A – коэффициент; α , γ – показатели, зависящие от дефектности структуры; U – рабочее постоянное напряжение; Δf , f – полоса измеряемых частот и центральная частота соответственно.

Спектральное распределение НЧ-шума определяется показателем формы спектра γ при $\Delta f = \text{const}$ с использованием соотношения:

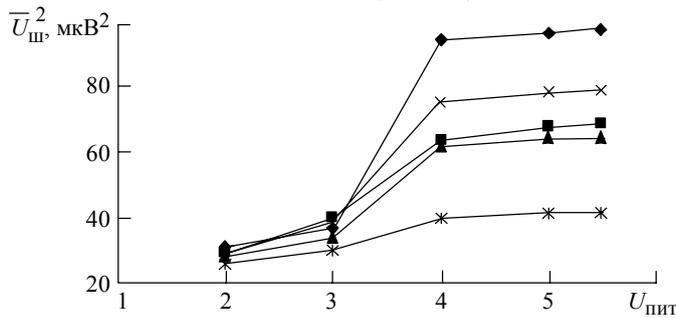
$$\gamma = \lg\left(\frac{\bar{U}_{ш1}^2}{\bar{U}_{ш2}^2}\right) / \lg\left(\frac{f_2}{f_1}\right), \quad (1)$$

где $\bar{U}_{ш1}^2$ и $\bar{U}_{ш2}^2$ – квадрат эффективного значения шума на частотах f_1 и f_2 соответственно.

В настоящей работе измерение $\bar{U}_{ш}^2$ проводилось в цепи питания ИС, так как все элементы ИС вносят общий вклад в рабочий ток источника напряжения [7].

Методом случайной выборки отобрано 10 интегральных схем типа КР537РУ13 (статическое ОЗУ выполнено по технологии КМОП, напряжение питания по ТУ составляет $5 \text{ В} \pm 10\%$), у которых измерялось значение среднеквадратичного напряжения шума $\bar{U}_{ш}^2$ методом прямого измерения [8] по выводам питание – общая точка на частотах 200 и 1000 Гц. Ширина полосы измерения частот $\Delta f = 200$ Гц, время усреднения $\tau = 2$ с.

Для предварительной оценки шума проведен эксперимент на пяти ИС данного типа по снятию зависимости $\bar{U}_{ш}^2$ на частоте 1000 Гц от напряжения питания $U_{пит}$ (рисунок). Из рисунка видно, что при питании 5 В происходит более стабильный разброс значений $\bar{U}_{ш}^2$ между отдельными ИС. Именно это значение напряжения выбрано для измерения среднеквадратичного напряжения шума. Показатель формы спектра γ определялся из выражения (1) на частотах 200 и 1000 Гц соответственно (табл.1).



Зависимость среднеквадратичного напряжения шума на выводах питания – общая точка от напряжения питания для ИС типа КР537РУ13: ■ – № 1; × – № 2; * – № 3; ▲ – № 4; ◆ – № 5

Таблица 1

Результаты измерений среднеквадратичного напряжения шума $\bar{U}_{ш}^2$ на различных частотах и рассчитанное значение γ

№ ИС	$\bar{U}_{ш}^2$, мкВ		γ
	200 Гц	1000 Гц	
1	439,9	68	1,16
2	553,8	79	1,21
3	203,3	42	0,98
4	394,5	64	1,13
5	786	97	1,3
6	419,7	67	1,14
7	201,6	43	0,96
8	833,4	98	1,33
9	303,5	56	1,05
10	534,3	75	1,22

Далее были проведены температурные измерения среднеквадратичного напряжения шума на этих же частотах (табл.2), вычислен показатель формы спектра γ по формуле (1), а также его среднее значение $\bar{\gamma}$ для разных температур (табл.3). Значение γ при нормальной температуре взято из табл.1.

Таблица 2

Результаты температурных измерений среднеквадратичного напряжения шума $\bar{U}_{ш}^2$ (мкВ) на различных частотах

№ ИС	0 °С		100 °С	
	200 Гц	1000 Гц	200 Гц	1000 Гц
1	644,7	79,6	853,7	97,9
2	836,3	96,8	1334,2	123,2
3	245,2	44,5	310,6	50,4
4	568,9	74,9	783,7	92,2
5	1322,7	124,2	1974,6	163
6	615,6	78,4	875	96,5
7	259,2	45,6	310,7	51,6
8	1294	125,4	2062,8	164,6
9	417,3	62,4	534,8	73,9
10	832,8	91,9	1209,7	117

Таблица 3

Результаты расчета показателя формы спектра γ и его среднее значение для различных температур

№ ИС	γ			$\bar{\gamma}$
	0 °С	25 °С	100 °С	
1	1,3	1,16	1,35	1,27
2	1,34	1,21	1,48	1,34
3	1,06	0,98	1,13	1,06
4	1,26	1,13	1,33	1,24
5	1,47	1,3	1,55	1,44
6	1,28	1,14	1,37	1,26
7	1,08	0,96	1,12	1,05
8	1,45	1,33	1,57	1,45
9	1,18	1,05	1,23	1,15
10	1,37	1,22	1,45	1,35

Если выбрать в качестве критерия для надежных схем среднее значение $\bar{\gamma} < 1,4$, то схемы № 5, 8 будут потенциально ненадежными. Эти ИС имеют максимальное значение γ при всех температурах. При проведении испытаний на безотказность (500 ч, 85 °С) ИС № 5, 8 имели параметрические отказы.

Предположим, что партию ИС можно разделить по надежности на три группы: ИС повышенной надежности, имеющие значение $\bar{\gamma} \leq 1,1$ (схемы № 3, 7); ИС с надежностью, соответствующей техническим условиям, имеющие значения $\bar{\gamma} < 1,4$ (схемы № 9, 4, 6, 1, 2, 10) и ИС потенциально ненадежные, имеющие значение $\bar{\gamma} \geq 1,4$ (схемы № 5, 8). Для проверки предположения проведены испытания на надежность ИС в течение 3000 ч при нормальных условиях с контролем основных параметров в соответствии с техническими условиями: ток потребления в режиме хранения $I_{CCS} \leq 5$ мкА и ток потребления в динамическом режиме $I_{CCO} \leq 50$ мА. Результаты измерений до и после проведения испытаний на надежность представлены в табл.4.

Значения токов потребления ИС при $U_{пит} = 5 В$

№ ИС	γ	$\bar{\gamma}$	До испытаний		После испытаний	
			I_{CCS} , мкА	I_{CCO} , мА	I_{CCS} , мкА	I_{CCO} , мА
1	1,16	1,27	1,52	22,48	3,97	38,4
2	1,21	1,34	1,65	23,06	4,65	47,0
3	0,98	1,06	1,49	19,57	2,44	18,1
4	1,13	1,24	1,49	23,17	3,89	38,2
5	1,3	1,44	1,58	20,94	13,29	158,3
6	1,14	1,26	1,58	19,46	3,87	37,3
7	0,96	1,05	1,45	16,07	2,45	19,0
8	1,33	1,45	1,59	23,10	14,29	172,9
9	1,05	1,15	1,44	22,24	3,21	27,3
10	1,22	1,35	1,45	23,10	4,67	45,9

Из таблицы видно, что ИС № 3, 7 со значением $\bar{\gamma} \leq 1,1$ имеют наименьшее значение токов потребления после испытаний, т.е. можно сказать, что эти ИС имеют повышенную надежность.

В работе экспериментально показано, что, определив показатель формы спектра γ при регистрации шума на двух частотах, в том числе и при разных температурах, можно разделять интегральные схемы по потенциальной надежности как в процессе производства, так и на входном контроле у потребителя.

Литература

1. *David J.P.R., Tan C.H., Plimmer S.A.* Avalanche multiplication noise in bulk and thin $Al_xGa_{1-x}As$ ($x = 0 - 0,8$) PIN and NIP diodes // SPI Conf. on «Photodetectors: Materials and Devices VI». San Jose. Calif. – 2001. – P. 39 – 46.
2. *Candelori A., Contarato D., Bacchetta N.* High – energy ion irradiation effects on thin oxide p-channel MOSFETs // IEEE Trans. Nucl. Sci. – 2002. – Vol. 49, N 3, Vol. 3. – P. 1364 – 1371.
3. *Virt I.S., Bilyk M., Kuzma M.* Noise properties of linear defects in $Hg_{1-x}Cd_xTe$ // J. Electron. Mater. – 2002. – Vol. 31, N 8. – С. 831 – 833.
4. *Зу С.* Физика полупроводниковых приборов: Пер. с англ. / *Под ред. И.М.Андреева.* – М.: Мир, 1984. – Кн. 1. – 456 С.
5. *Li-jun X., Lei D., Yi-Qi Z., Zhuo Q.* Xian dinzi keji daxue xuebau. J. Xidian Univ. – 2003. – N 1. – P. 70 – 74.
6. *Врачев А.С.* Возможности низкочастотного шума как прогнозирующего параметра при оценке качества и надежности изделий электронной техники // Мат. докл. научн.-техн. сем. «Шумовые и деградиционные процессы в полупроводниковых приборах». – М., 1996. – С. 191 – 197.
7. *Bell I.M., Camplin D.A., Taylor G.E., Bannister B.R.* Supply current testing of mixed analogue and digital ICs // Electron. Lett. – 1991. – Vol. 27, N 17. – С. 1581 – 1583.
8. *Ван дер Зил А.* Шум – источники, описание, измерение: Пер. с англ. / *Под ред. А.К.Нарышкина.* – М.: Сов. радио, 1973. – 178 с.

Горлов Митрофан Иванович – доктор технических наук, профессор кафедры полупроводниковой электроники ВГТУ. *Область научных интересов:* повышение надежности полупроводниковых изделий в процессе серийного производства, влияние воздействия внешних дестабилизирующих факторов на ИС, диагностические методы повышения качества и надежности полупроводниковых изделий.

Смирнов Дмитрий Юрьевич – аспирант кафедры полупроводниковой электроники ВГТУ. *Область научных интересов:* диагностические методы повышения качества и надежности полупроводниковых приборов.

Ануфриев Дмитрий Леонидович – аспирант БГУИР, инженер завода «Транзистор» НПО «Интеграл». *Область научных интересов:* повышение надежности полупроводниковых изделий в процессе серийного производства.

- * физика
- * электроника
- * приборостроение
- * автоматизация
- * измерительная техника
- * экология
- * методология

Фотоника II - VI

сентябрь 2006

Специализированная выставка научных работ студенческой лаборатории

Созданы:
МИЭТ, кафедра общей физики
ИТ факультета МИЭТ
библиотека МИЭТ

Идея:
старший преподаватель МИЭТ Лубегин Г.В.

Контакты:
Москва, Зеленоград, МИЭТ,
тел.: (495) 532-98-58, м. 28-58, ауд. 1202-а (1201-а),
кабинет физических демонстраций

Выставка «Фотоника II-VI» - первая попытка представить новое направление в физической экологии, развиваемое в Московском государственном институте электронной техники (техническом университете) студенческой научной лабораторией кафедры общей физики факультета электроники и компьютерных технологий.

На стендах библиотеки МИЭТ широко представлены оригиналы печатных работ, тезисы докладов, опубликованных в международных, отечественных изданиях, посвященные исследованию инжекционных фотодиодных структур из широкозонных монокристаллов АПВVI (ZnS, CdS, CdSe и др.), а также разработке фотоприемных устройств, спектральных измерительных приборов, методологии оценки загрязнений окружающей среды.

Результаты учебных проектов, работы по студенческому гранту, победа на Межвузовском конкурсе подтверждены образцами фотодиодов и фотоприемных устройств, реальными макетами приборов оперативного локального контроля газовых сред и излучений в ближней УФ-области, видимой и ближней ИК-областях спектра.

Выставленные экспонаты красочно иллюстрированы.

Механизм наноструктурирования нестехиометрических фторидов $Ba_{1-x}La_xF_{2+x}$ и $Ca_{1-x}La_xF_{2+x}$ с решеткой на основе CaF_2

С.К.Максимов

Московский государственный институт электронной техники
(технический университет)

Исследованы закономерности формирования наноструктурированности для нестехиометрических фторидов $Ba_{1-x}La_xF_{2+x}$ и $Ca_{1-x}La_xF_{2+x}$ – нового класса материалов, перспективных для решения многих проблем оптоэлектроники и микроэлектроники. Показано, что в $Ca_{1-x}La_xF_{2+x}$ расслоение осуществляется через формирование доменов упорядочения, описан механизм релаксации напряжений несоответствия, а также указано влияние возникающих при этом двойников на параметры упорядочения и величину композиционных вариаций и огранку преципитатов.

Нестехиометрические соединения (оксиды, сульфиды, фториды и др.) формируются в результате неизовалентного замещения [1–3], например, при формировании $Ca_{1-x}La_xF_{2+x}$ ион Ca^{2+} в CaF_2 замещается ионом La^{3+} . Согласно условию электронейтральности подобное замещение требует или появления межузельных ионов F^+ в анионной подрешетке, или вакансий в катионной [1–3]. Точечные дефекты являются такими же структурообразующими элементами этих соединений, как ионы формирующих их компонентов. Очень высокая плотность точечных дефектов ведет к изменению электрофизики нестехиометрических фаз по сравнению с исходными соединениями и обуславливает уникальность их физических свойств [1–3]. Например, высокотемпературная сверхпроводимость обнаружена только для нестехиометрических фаз [4].

В нестехиометрических оксидах основным типом структурных точечных несовершенств являются вакансии в катионной подрешетке, тогда как для фторидов $M_{1-x}R_xF_{2+x}$ (где $M = Ca, Sr, Ba, Cd, Pb$; R – 16 редкоземельных элементов) со структурой на CaF_2 (флюорита) электронейтральность обеспечивается межузельными ионами фтора. Дефектная структура нестехиометрических $M_{1-x}R_xF_{2+x}$ отличается от таковой для оксидов. Без изучения строения нестехиометрических фторидов невозможно построение общей теории строения нестехиометрических фаз [2].

Для нестехиометрических фаз наблюдается расслоение на наноразмерные объемы, различающиеся по содержанию компонентов и концентрациям точечных несовершенств. Расслоение может выражаться и в композиционной модуляции при сохранении однофазности и монокристалличности, и в возникновении включений второй фазы. В свою очередь, распад может происходить и при сохранении когерентности между

решетками включений и матрицы, и при ее нарушении, т.е., сопровождаться пластической деформацией [1, 2].

В зависимости от состава и типа замещающего иона нестехиометрические $Ba_{1-x}R_xF_{2+x}$ и $Ca_{1-x}R_xF_{2+x}$ могут быть и диэлектриками, и полупроводниками и даже ионными проводниками [2]. В результате расслоения в этих кристаллах формируются объемы с различными электрофизическими, оптическими, упругими параметрами. Эти фториды являются природными наноструктурированными объектами, в которых объемы различной природы чередуются в трех измерениях. Для оксидов наноструктурированность возникает через образование наноразмерных изоструктурных упорядоченных объемов, различающихся степенями упорядочения в распределении компонентов [1, 5]. Однако для фторидов со структурой флюорита предполагается, что объемы с повышенным содержанием редкоземельных элементов могут приобретать структуру, производную от структуры фаз, возникающих при концентрациях редкоземельных элементов, превышающих допустимую для фаз с флюоритовой решеткой [2]. Для $Ba_{1-x}La_xF_{2+x}$ и $Ca_{1-x}La_xF_{2+x}$ «промежуточные» фазы не обнаружены.

Для $Ca_{1-x}La_xF_{2+x}$ с приближением к концентрациям LaF_3 , предельным для фаз со структурой CaF_2 ($x \approx 0,46$), зависимость постоянной решетки от содержания LaF_3 отклоняется от линейной [2]. Для твердых растворов отклонение от закона Vegарда – признак взаимодействий между атомами (ионами) компонентов и нарушения однородности раствора [1]. В соединении $Ba_{1-x}La_xF_{2+x}$ со структурой на основе решетки флюорита выявлены наноразмерные объекты, которым отвечают электронные изображения с контрастом муара. Их плотность многократно растет в результате отжига [6, 7]. На электронограммах от объемов с этими объектами наблюдаются нематричные рефлекссы [7]. Эти объекты отождествляются с преципитатами 2-й фазы, но по рентгенодифракционным данным постоянная решетки $Ba_{1-x}La_xF_{2+x}$ не зависит от плотности указанных объектов [7].

Наноструктурированность фторидов может быть использована для решения проблем опто- и наноэлектроники [2], но без выяснения механизма наноструктурирования невозможно оценить перспективы использования этих соединений для решения технических проблем.

Результаты исследований структуры $Ba_{1-x}La_xF_{2+x}$ и $Ca_{1-x}La_xF_{2+x}$

В настоящей работе методами электронной микроскопии исследованы закономерности наноструктурирования в образцах заданных составов $Ba_{0,69}La_{0,31}F_{2,31}$ и $Ca_{0,65}La_{0,35}F_{2,35}$, полученных из расплава по методу Бриджмена. Исследовались структура исходных образцов и образцов, отожженных в атмосфере, содержащей фтор. $Ba_{0,69}La_{0,31}F_{2,31}$ отжигался при 1173 К в течение 360 ч, а $Ca_{0,65}La_{0,35}F_{2,35}$ – при 1023 К в течение 760 ч. Наряду с образцами $Ca_{0,65}La_{0,35}F_{2,35}$, выращенными по методу Бриджмена, исследовались образцы $La_{0,9}Ca_{0,1}F_{2,9}$, синтезированные при 1180 К из компонентов в течение 348 ч. Исследования проводились на микроскопе Philips CM-30 при ускоряющем напряжении 300 кВ ($\lambda = 0,0197 \text{ \AA}^{-1}$).

Все образцы – поликристаллические, с типичным размером кристаллитов $\approx 1,0$ мкм. В каждом образце встречались кристаллиты, которые по данным дифракции имели структуры, восходящие и к структуре CaF_2 (флюорита), и к структуре LaF_3 (тисонита). Поэтому при исследованиях $Ca_{1-x}La_xF_{2+x}$ во всех критических случаях состав кристаллитов оценивался посредством электронографических определений постоянных решеток a . Постоянные решетки определялись по точечным электронограммам для высокосимметричных

проекций $\langle 001 \rangle$, $\langle 110 \rangle$, $\langle 111 \rangle$, $\langle 112 \rangle$ путем осреднения значений, полученных по всем рефлексам электронограммы. Точность оценок постоянных решетки по точечным электронограммам была не хуже $\pm 0,0015$ нм. Составы кристаллитов оценивались с помощью номограмм [2]. Они варьировались в интервале $\text{Ca}_{0,85}\text{La}_{0,15}\text{F}_{2,15}$ до $\text{Ca}_{0,54}\text{La}_{0,46}\text{F}_{2,46}$. Точность оценок состава, определяемая точностью оценок постоянных решетки, составляла ± 3 мол. %.

Далее во всех случаях, когда описываются результаты, относящиеся к определенному слитку, состав этого слитка задается формулами $M_{1-x}R_xF_{2+x}$ или $R_{1-y}M_yF_{2+x}$, когда же речь идет об оценочном составе конкретного кристаллита, он характеризуется средним значением x .

Объекты для исследований формировались дроблением исходных образцов.

Особенности наноструктурированности для $\text{Ba}_{1-x}\text{La}_x\text{F}_{2+x}$. Электронограммы, отвечающие кристаллитам со структурой флюорита в образце $\text{Ba}_{0,69}\text{La}_{0,31}\text{F}_{2,31}$ и проекциям $[001]$ и $[111]$, приведены на рис.1. Они содержат отражения матрицы и нематричные рефлексы. Для проекции $[001]$ все нематричные рефлексы смещены относительно матричных вдоль направлений $\langle 011 \rangle$. Расстояния между матричными и нематричными рефлексами не зависят от порядка отражения и во всех случаях равны $|r| = \frac{1}{3} |g_{111}|$. Рефлексы строго лежат в позициях двойниковых отражений [8, 9]. На электронограмме для проекции $[111]$ все нематричные рефлексы также локализованы в позициях, типичных для двойниковых отражений [9]. Соответствие этих рефлексов объектам, которые на микрофотографиях имеют изображения с контрастом полос смещения, доказано с помощью темнопольных микрофотографий в указанных рефлексах.

Двойники суть типичные дефекты нестехиометрических фторидов $M_{1-x}R_xF_{2+x}$ [2]. Двойниковая природа объектов, которым отвечают изображения с контрастом муара, устраняет противоречия между изменениями плотности этих объектов и выполнением закона Вегарда, а также объясняет аномалии на электронных изображениях объектов. Однако плотность объектов растет в результате отжигов (т.е., это могут быть только

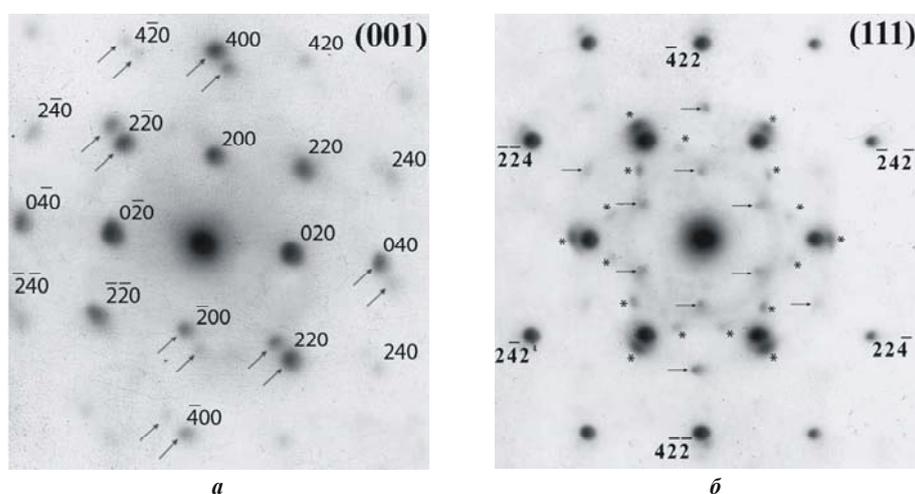


Рис.1. Электронограммы от кристаллитов $\text{Ba}_{0,69}\text{La}_{0,31}\text{F}_{2,31}$: а – проекция $[001]$ (стрелками указаны пары рефлексов двойников и матрицы, смещенные относительно друг друга вдоль $[1\bar{1}0]$; действует только одна из плоскостей двойникования), б – проекция $[111]$ (звездочками указаны отражения, объясняемые только как двойниковые; стрелками – также переносом из ненулевых Лауэ зон; двойники локализованы, как минимум, в 3-х плоскостях $\{11\bar{1}\}$, $\{1\bar{1}1\}$ и $\{\bar{1}11\}$). (Здесь и далее индексы отражений матрицы указаны прямым шрифтом)

деформационные двойники), и, следовательно, необходимо выявить источники напряжений, вызывающих их генерацию.

Двойники могут возникать при релаксации напряжений несоответствия в процессе преципитации [10], но объекты, которым соответствуют изображения с контрастом муара, являются единственными дефектами, выявленными в $Ba_{1-x}La_xF_{2+x}$ [7]. Изучение закономерностей наноструктурирования для $M_{1-x}R_xF_{2+x}$ было продолжено с помощью $Ca_{1-x}La_xF_{2+x}$, для которого оно происходит по тем же законам, что в $Ba_{1-x}La_xF_{2+x}$, но амплитуды атомного рассеяния Ca и La различаются.

Особенности наноструктурированности в $Ca_{0,65}La_{0,35}F_{2,35}$. Результаты экспериментальных исследований образцов. В кристаллитах со структурой флюорита в $Ca_{1-x}La_xF_{2+x}$ выявлены дефекты трех типов. Дефекты 1-го типа являются двойниками роста и возникают в процессе кристаллизации. Дефектам 2-го типа отвечают изображения с контрастом муара (рис.2,*a*). В $Ca_{0,65}La_{0,35}F_{2,35}$ они присутствуют в большинстве кристаллитов со структурой флюорита. Периодичность муара на изображениях этих объектов, локализованных в кристалле с $x \approx 0,32$, на рис.2,*a* примерно равна 1,5–2,0 нм. На электронограммах, отвечающих этому кристаллиту, имеются отражения, объясняемые как двойниковые (рис.2,*в,г*). Двойниковые рефлексы вытянуты вдоль направлений $\langle 111 \rangle$.

Соответствие двойниковых рефлексов объектам 2-го типа показано путем темнопольных микрофотографий в двойниковых рефлексах. Плотность двойников 2-го типа многократно растет в результате отжига.

Наряду с двойниками в $Ca_{0,65}La_{0,35}F_{2,35}$ присутствуют объекты иной природы. На микрофотографиях, им соответствуют круглые или овальные изображения с характерным размером 8–15 нм, поэтому далее они будут условно именоваться глобулярными. Изображения глобулярных объектов могут быть и светлыми и темными в зависимости от локальных дифракционных условий. Двойники группируются вокруг глобул; контуры муара на изображениях двойников при подходе к этим объектам изгибаются, а период муаровой осцилляции меняется (см. рис.2,*a*). Эти объекты могут быть центрами, релаксация напряжений вокруг которых ведет к генерации двойников.

Особенности наноструктурирования в $Ca_{1-x}La_xF_{2+x}$ иллюстрируются серией микрофотографий на рис.2,*б*. Рисунки 2,*б*(1–3) отвечают проекции $[110]$, и соответствуют электронограмме на рис.2,*г*. На рис.2,*б*(1) можно проследить, что грани преципитата пересекают плоскость проекций (110) по направлениям близким к $[\bar{1}1\bar{2}]$, $[001]$, $[\bar{1}12]$. Темнопольный снимок на рис.2,*б*(2), полученный в двойниковом рефлексе, маркированном на рис.2,*г* как $\Delta 1$, подтверждает, что объекты, которым соответствуют изображения с контрастом муара, суть двойники, и позволяет оценить характерную толщину двойников вдоль $\langle 111 \rangle$, равную 1,0–1,5 нм при латеральном размере 8–15 нм. Рис.2,*б*(3) подтверждает связь преципитатов со сверхструктурными отражениями и демонстрирует, что преципитаты распределены в матрице упорядоченно, формируя почти правильную сетку с рядами вдоль направлений $\langle 001 \rangle$ и $\langle 110 \rangle$. На рис.2,*б*(4), отвечающем проекции $[001]$, следы граней преципитата ориентированы вдоль направлений $[\bar{1}10]$, $[010]$, $[110]$. Совокупность изображений преципитатов для проекций $[001]$ и $[110]$ позволяет однозначно установить, что сопряжение решеток преципитатов и матрицы происходит по плоскостям $\{001\}$ и $\{111\}$, т.е. форма преципитатов развивается по направлению кубооктаэдрической. Двойники зарождаются в результате релаксации напряжений несоответствия вдоль линий пересечения граней преципитатов $\{001\}$ и $\{111\}$ (рис.2,*б*(1)). При этом направление двойникового ориентировано вдоль диагонали параллелограмма, образованного нормальными к плоскостям граней, пересекающихся по данной линии.

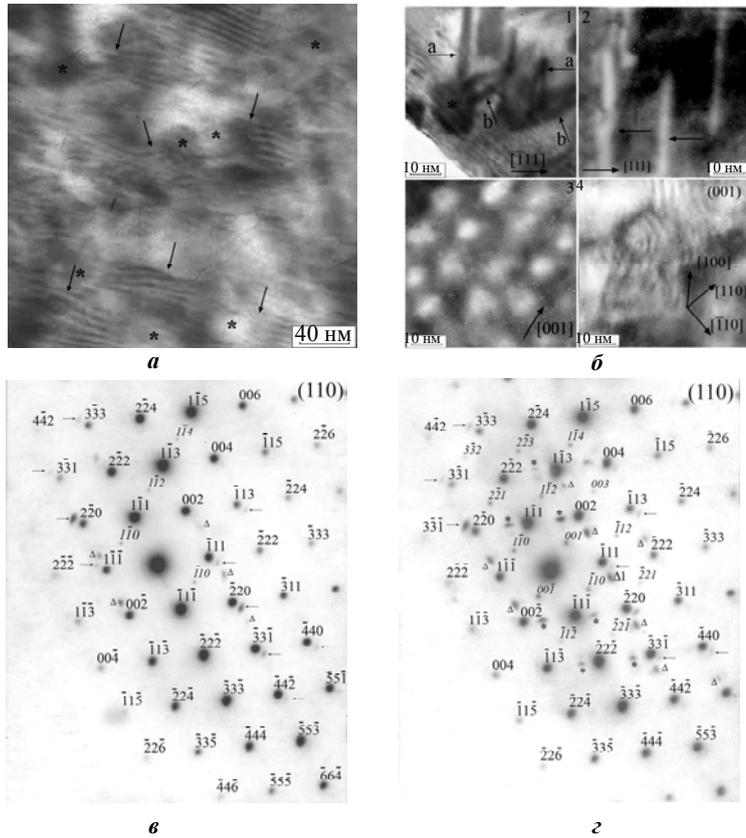
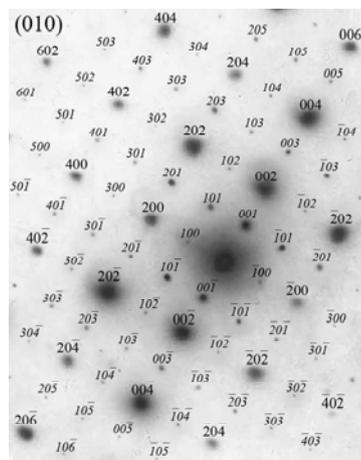
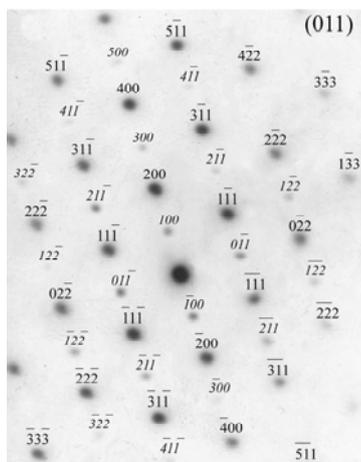


Рис.2. Микрофотографии (*а, б*) и электронограммы (*в, з*) для $\text{Ca}_{0,65}\text{La}_{0,35}\text{F}_{2,35}$ с $x \approx 0,32$: *а* – типичная дефектная структура образца, включающая преципитаты и двойники; проекция близка к $[001]$; звездочками маркированы изображения «глобулярных» преципитатов; стрелками указаны области изгибов контуров муара и изменения периода муаровой осцилляции на изображениях двойников; *б* – детализация особенностей дефектной структуры. 1. Светлополярная микрофотография с комплексами «преципитат + порожденные им двойники»; точная проекция $[110]$; прослеживается огранка преципитата; двойники зарождаются в точках стыка граней; *а* – двойники с плоскостью залегания $(\bar{1}11)$, *б* – двойники с плоскостью залегания $(1\bar{1}1)$; 2. Темнополярная микрофотография в двойниковом рефлексе, маркированном на рис.2,з как $\Delta 1$; двойники с плоскостью залегания $(\bar{1}11)$ указаны стрелками. 3. Темнополярная микрофотография в сверхструктурном рефлексе 110 на рис.2,з; «глобулярные» преципитаты формируют ряды вдоль направления $[001]$. 4. Изображение отдельного преципитата; проекция $[001]$; грани преципитата последовательно пересекают плоскость проекции по направлениям $[\bar{1}10]$, $[100]$, $[110]$, являющимися следами плоскостей (111) , (010) , $(\bar{1}11)$; преципитат имеет форму кубооктаэдра; *в* – проекция $[110]$; курсив – индексы сверхструктурных отражений; двойниковые отражения с плоскостями двойникования (111) и $(1\bar{1}\bar{1})$ маркированы Δ ; отражения от двойников с плоскостями двойникования $(\bar{1}11)$ и $(1\bar{1}1)$ – *; присутствуют преимущественно двойники, лежащие в плоскостях $(\bar{1}11)$ и $(1\bar{1}1)$; *з* – проекция $[110]$ (курсив – сверхструктурные отражения, направление упорядочения $[001]$), отражения двойников с плоскостью двойникования $(1\bar{1}1)$ маркированы Δ , отражения от двойников в плоскости $(\bar{1}11)$ – *; двойников в плоскостях (111) и $(1\bar{1}\bar{1})$ – стрелками. Двойникование происходит преимущественно по плоскостям $(1\bar{1}1)$ и $(\bar{1}11)$

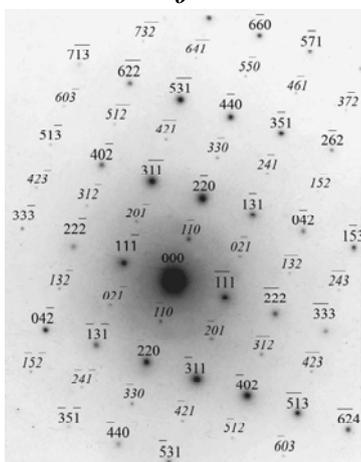
Возможная природа дилатационных центров. На рис.2,в,з, соответствующих двум объемам одного и того же кристаллита и проекции $[110]$, наряду с двойниковыми рефлексами, наблюдаются рефлексы, которые можно объяснить как отражения 001 , 011 , 021 и пр., запрещенные для кристаллов с решеткой CaF_2 . Если эти отражения объяснены правильно, то ионы Ca^{2+} и La^{3+} упорядоченно распределены по позициям катионной подрешетки. Однако наличие электронограмм только для одной проекции обратной решетки не достаточно для однозначной атрибуции фазы, в которой происходит упорядо-



а



б



в

Рис.3. Электрограммы со сверхструктурными индексами от кристаллитов $\text{Ca}_{1-x}\text{La}_x\text{F}_{2+x}$ при $x \geq 0,4$: а – проекция $[001]$; б – проекция $[011]$; в – проекция $[112]$. Изменения сеток при переходе от одной проекции к другой и отклонение от квадратичной формы сетки матричных отражений для проекции $[001]$ свидетельствуют об упорядочении по типу CuAu

чение, поскольку исследования других авторов не выявили упорядочения в $\text{Ba}_{1-x}\text{La}_x\text{F}_{2+x}$ и $\text{Ca}_{1-x}\text{La}_x\text{F}_{2+x}$ [2].

Необходимо доказать, что упорядочение вообще возможно в $\text{Ca}_{1-x}\text{La}_x\text{F}_{2+x}$.

Оценки показали, что в кристаллитах, на электрограммах от которых сверхструктурные отражения отсутствуют или проблематичны, x варьируется от $x = 0,15 \pm 0,03$ до $x = 0,25 \pm 0,03$, т.е., для них возможно концентрационное разупорядочение, и реальная степень порядка невысока. Поэтому поиск упорядочения в $\text{Ca}_{1-x}\text{La}_x\text{F}_{2+x}$ со структурой CaF_2 был продолжен для кристаллов с $x \geq 0,46$, поскольку для этих составов наблюдаются отклонения от закона Вегарда, возможно свидетельствующие о нарушении однородности твердого раствора $\text{Ca}_{1-x}\text{La}_x\text{F}_{2+x}$.

Упорядочение в кристаллитах со структурой CaF_2 в $\text{La}_{0,9}\text{Ca}_{0,1}\text{F}_{2,9}$. Предварительные исследования показали, что в образцах $\text{La}_{0,9}\text{Ca}_{0,1}\text{F}_{2,9}$ присутствуют кристаллиты с кубической структурой на основе флюорита, имеющие составы с $x \geq 0,4$. На электрограммах от таких кристаллитов наблюдаются рефлексы, которые могут объясняться как сверхструктурные. Электрограммы с развитыми сетками таких рефлексов для проекций $[001]$, $[110]$ и $[112]$ приведены на рис.3. Изменение сеток сверхструктурных рефлексов при смене проекций однозначно доказывает, что фазам со структурой CaF_2 присуще упорядочение.

Тетрагональные искажения в решетке упорядоченной фазы. На рис.3,а для проекции $[010]$ периодичность рефлексов вдоль $[001]$ соответствует межплоскостному расстоянию $d_{001} = 0,2801$ нм, а вдоль $[100]$ – $d_{100} = 0,2839$ нм, решетка является тетрагональной с отношением $c/a \approx 0,985$. Тетрагональность решетки упорядоченной фазы подтверждается обработкой электрограммы на рис.3,б для проекции $[110]$, для которой рефлексы 002 , 004 , 006 соответствуют межплоскостному расстоянию $d_{002} = 0,2780$ нм, а отражения $2\bar{2}0$, $4\bar{4}0$, $6\bar{6}0$ – межплоскостному расстоянию $d_{220} = 0,1980$ нм вместо $d_{220} = 0,1966$ нм, которое следовало бы ожидать, если бы решетка с $d_{002} = 0,2780$ нм оставалась кубической. На электрограммах для кристаллитов с упорядоченной структурой отсутствуют двойниковые отражения, а на темнопольных микрофотографиях в сверхструктурных рефлексах присутствуют только экстинкционные контуры. Упорядочение в этих кристаллах не сопровождается наноструктурированием.

Обсуждение результатов. Закономерности упорядочения в $\text{Ca}_{1-x}\text{La}_x\text{F}_{2+x}$. Катионная подрешетка кристалла со структурой флюорита имеет мотив, соответствующий ГЦК-структуре, поэтому, если Ca^{2+} и La^{3+} упорядоченно распределены в этой подрешетке, то следует ожидать возникновения сверхструктуры одного из трех типов: Cu_3Au , CuAu или CuPt . При упорядочении по типу Cu_3Au чередование компонентов происходит вдоль трех направлений $\langle 100 \rangle$, сверхструктурные отражения образуют ряды вдоль всех этих направлений, решетка не меняет симметрии, удвоение или утроение элементарной ячейки не происходит. В структурном типе CuAu компоненты чередуются послойно вдоль одного из направлений $\langle 100 \rangle$ и возникает выделенное направление упорядочения $[100]$, сверхструктурные отражения последовательности $[100]$ лежат только на этом направлении, решетка становится тетрагональной, хотя удвоение или утроение элементарной ячейки не происходит. В CuPt компоненты чередуются послойно вдоль одного из направлений $\langle 111 \rangle$, решетка искажается ромбоэдрически, происходит удвоение элементарной ячейки и существуют сверхструктурные отражения $1/2 \ 1/2 \ 1/2$ [11,12].

Отсутствие сверхструктурных отражений для проекций $[110]$ и $[112]$, локализованных на направлениях $[111]$, и признаков удвоения элементарной ячейки позволяет исключить из рассмотрения упорядочение по типу CuPt . Невозможность объяснить упорядочение в кубическом $\text{Ca}_{1-x}\text{La}_x\text{F}_{2+x}$ на основе структуры CuPt имеет принципиальное значение. Как будет показано в следующих статьях данной серии упорядоченная фаза в $\text{La}_{1-y}\text{Ca}_y\text{F}_{3-y}$ со структурой, производной от структуры тисонита, кристаллизуется в тригональной сингонии, причем ионы Ca^{2+} и La^{3+} чередуются вдоль направлений $\langle 0001 \rangle$, так же как атомы компонентов в CuPt . Поэтому фаза с упорядоченной структурой типа CuPt могла бы рассматриваться как переходная от структур на основе флюорита к структурам на основе тисонита.

На первый взгляд электронограммы для проекции $[010]$, на которых наблюдаются сверхструктурные отражения, лежащие вдоль направлений $[100]$ и $[001]$, свидетельствуют, что упорядочение происходит по типу Cu_3Au . Однако этот тип упорядочения не объясняет тетрагональных искажений, выявленных для всех электронограмм упорядоченной фазы в $\text{La}_{0,9}\text{Ba}_{0,1}\text{F}_{2,9}$. Упорядочение происходит по типу CuAu , а сверхструктурные отражения вдоль направления $[100]$ обусловлены двойной дифракцией или переносом рефлексов из ненулевых зон Лауэ.

О том, что упорядочение соответствует структурному типу CuAu свидетельствует также сопоставление электронограмм на рис.2,б и 2,г. На рис.2,г присутствует сетка сверхструктурных отражений, включающая рефлексы последовательности 001 , тогда как на рис.2,б наблюдаются только сверхструктурные отражения и $\bar{1}10$. Обе электронограммы соответствуют не только одному и тому же кристаллиту и одной и той же проекции $[110]$, но также одним и тем же отклонениям от этой проекции. Поэтому различия этих электронограмм могут объясняться только различиями в структурах, которые сводятся к изменению ориентационных отношений между матрицей и преципитатами с упорядоченной структурой. Однако для структур типа Cu_3Au выделенных направлений $\langle 100 \rangle$ не существует, и ориентационные соотношения являются одними и теми же для всех направлений с одинаковым набором индексов. Отсутствие отражений $[001]$ и наличие рефлексов $\bar{1}10$ и $\bar{1}10$ на проекции $[110]$ возможно, если упорядочение происходит по типу CuAu , а направление чередования компонентов разного типа совпадает с одним из направлений $\langle 100 \rangle$, наклонных относительно плоскости проекций. Электронограмма же на рис.2,г соответствует области, в которой чередование Ca^{2+} и La^{3+} происходит вдоль направления $[001]$. Различия

в направлениях упорядочения отразились также на особенностях двойниковых структур, наблюдаемых для этих объемов.

Тетрагональные искажения решетки для преципитатов с упорядоченной структурой в кристаллите с $x \approx 0,32 \pm 0,03$ не выявлены.

Последовательность процессов, обуславливающих возникновение наноструктурированности в $Ba_{1-x}La_xF_{2+x}$ и $Ca_{1-x}La_xF_{2+x}$. Даже малейшие признаки расслоения на объемы разного состава не наблюдаются для $Ca_{1-x}La_xF_{2+x}$ при составах $x \geq 0,4$, однако упорядочение для этих составов доказано однозначно. Следовательно, упорядоченная фаза термодинамически выгодней, чем неупорядоченный твердый раствор, упорядочение предшествует композиционному расслоению и является причиной, определяющей возникновение наноструктурирования в целом. Однако упорядочение в пределах каждого кристаллита происходит неоднородно через зарождение и развитие центров упорядочения [13]. При составах кристаллита $x \ll 0,4$, далеких от состава $Ca_{0,5}La_{0,5}F_{2,5}$ (соответствующего упорядочению по типу CuAu), возникновение центров порядка сопровождается перераспределением LaF_3 из неупорядоченной матрицы в эти центры. (Термины «упорядоченная» и «неупорядоченная» здесь и далее означают только то, что степень упорядочения в матрице ниже, чем в преципитатах.) Процесс протекает автокаталитически, чем выше степень порядка в конкретном объеме, тем выгодней его дальнейшее обогащение LaF_3 и соответственно дальнейшее развитие упорядочения [1]. Однако по мере увеличения степени порядка возрастают напряжения несоответствия, обусловленные двумя факторами: тетрагональностью решетки преципитатов и несовпадением постоянных решеток преципитатов и матрицы в результате различий в составах. Если релаксация напряжений не происходит, то разность концентраций LaF_3 в матрице и преципитатах определяется равенством энергетического «выигрыша» от перераспределения из «неупорядоченной» матрицы и «проигрыша» от развития напряжений несоответствия. Очевидно, что процессы релаксации напряжений несоответствия и перераспределения LaF_3 происходят параллельно: релаксация напряжений способствует дальнейшему перераспределению, а рост различий в составах преципитатов и матрицы – развитию деформационных процессов.

Иначе протекает упорядочение в кристаллитах с составом, близким к теоретическому составу фазы со структурой CuAu. При этом не существует причин для перераспределения LaF_3 из матрицы в упорядоченные объемы, и если даже упорядочение зародилось в немногих центрах, оно распространяется однородно на весь кристалл. Кристаллическая структура упорядоченной фазы остается неискаженной, достигается высокая степень упорядочения, и кристаллиты с $x \approx 0,46$ позволяют выявить тетрагональность решетки упорядоченной фазы.

Релаксация напряжений несоответствия посредством двойникования и глобулярная форма преципитатов упорядоченной фазы. Форма преципитатов приближается к кубооктаэдрической, хотя разные грани могут быть развиты в разной степени, как это видно, например, на рис.2,б(1). Кубооктаэдрическая форма преципитатов на микрофотографиях, соответствующих большинству проекций, воспринимается как глобулярная, особенно если они залегают в толстых фольгах. Различить огранку удается только, если частицы локализованы в тонких фольгах. На рис.2,б(1) и 2,б(4) грани $\{111\}$ наблюдаются даже если релаксация напряжений по этим граням не происходит. Возникновение граней $\{111\}$ обусловлено минимизацией энергии несоответствия и не связано с энергетикой релаксации напряжений несоответствия.

Релаксация напряжений несоответствия посредством двойникования возможна в разных структурах [14]. Однако дефектная структура нестехиометрических $M_{1-x}R_xF_{2+x}$ делает этот механизм релаксации преобладающим, например, в [15] показано, что ре-

лаккация напряжений несоответствия путем двойникования происходит в $\text{Sr}_{0,1}\text{La}_{0,9}\text{MnO}_3$ (близком к $M_{1-x}R_xF_{2+x}$ по дефектной структуре) при эпитаксии на SrTiO_3 уже при относительных расхождениях межатомных расстояний сопрягающихся фаз в плоскости сопряжения в 0,01–0,2%.

Тетрагональность решетки упорядоченной фазы вызывает напряжения несоответствия даже при идентичных составах преципитатов и матрицы. Оценки показывают, что при $c/a \approx 0,99$ тетрагональность решетки преципитатов, влияет больше на возникновение напряжений несоответствия, чем различия постоянных решетки при $x_p - x_m = 0,1$, где x_p относится к преципитатам и x_m – к матрице.

Максимальное несоответствие межплоскостных расстояний в преципитатах с тетрагональной решеткой и матрице наблюдается вдоль направлений $\langle 001 \rangle$. Однако знаки несоответствия вдоль разных $\langle 001 \rangle$ различны. При направлении упорядочения $[001]$ периодичность вдоль этого направления в преципитате меньше периодичности в матрице, а вдоль направлений $[100]$ и $[010]$ знак несоответствия решеток обратный. Поэтому относительное несоответствие межплоскостных расстояний по направлениям $[110]$ и $[\bar{1}\bar{1}0]$ в решетках преципитатов и матрицы равно несоответствию вдоль направлений $[100]$ и $[010]$, а периодичности вдоль направлений $[011]$, $[101]$, $[0\bar{1}1]$ и $[\bar{1}01]$ в этих решетках преципитатов и матрицы близки.

Максимальные напряжения, связанные с несоответствием решеток, возникают вдоль линий сопряжения разных граней. Сопряжение граней $\{001\}$ и $\{111\}$ происходит по направлениям $\langle 110 \rangle$. При направлении упорядочения $[001]$ наибольшие напряжения несоответствия возникают на линии сопряжения граней (001) с гранями $(\bar{1}11)$ и (111) , сопрягающимися по направлениям $[110]$ и $[\bar{1}\bar{1}0]$. Для пары граней $(\bar{1}11)$ и (001) максимальные напряжения лежат в плоскости $(1\bar{1}1)$, которая является диагональной для призмы, ограниченной плоскостями $(\bar{1}11)$ и (001) . Поэтому в результате релаксации напряжений несоответствия возникает двойник с плоскостью залегания $(1\bar{1}1)$. Соответственно для пары граней $(1\bar{1}1)$ и (001) плоскостью двойникования является плоскость $(\bar{1}11)$ и т.д. Эта закономерность выполняется для двойников на рис.3,б(1) и объясняет связь между направлениями упорядочения и двойникования. Релаксация напряжений несоответствия не только способствует развитию процессов расслоения и упорядочения, но стабилизирует также форму преципитатов.

По результатам исследования можно сделать следующие выводы.

Для $\text{Ca}_{1-x}\text{La}_x\text{F}_{2+x}$ энергетически выгодно упорядоченное распределение ионов Ca^{2+} и La^{3+} по позициям катионной подрешетки, причем упорядочение протекает по типу CuAu и сопровождается тетрагональными искажениями флюоритовой решетки. Упорядочение зарождается в отдельных центрах, протекает неоднородно и ведет к формированию объемов с разной степенью порядка. Упорядочение определяет механизм наноструктурирования. При составах исходной неупорядоченной фазы $\text{Ca}_{1-x}\text{La}_x\text{F}_{2+x}$, далеких от теоретического состава упорядоченной фазы со структурным типом CuAu ($x = 0,5$), энергетически выгоден переход LaF_3 из объемов с более низкой степенью упорядочения в более упорядоченные объемы, т.е., композиционное расслоение.

Упорядочение и расслоение означают распад однородного твердого раствора и возникновение преципитатов второй фазы. В силу тетрагональности решетки преципитатов и различий в составах матрицы и преципитатов на межфазных границах преципитат/матрица возникают напряжения несоответствия. Напряжения несоответствия лимитируют степень упорядочения и процесс расслоения, а также способствуют ограничению преципитатов по плоскостям $\{111\}$ и тому, что соседние преципитаты имеют одно и то же

направление упорядочения $[001]$ и выстраиваются вдоль этого направления. Релаксация напряжений несоответствия происходит вдоль линий пересечения граней преципитата $\{111\}$ и $\{001\}$ и осуществляется путем образования двойников, которые лежат в той из плоскостей $\{111\}$, которая является диагональной для призмы, образованной плоскостями пересекающихся граней. Релаксация напряжений несоответствия открывает путь к увеличению степени порядка, способствует композиционному расслоению, а также стабилизирует форму преципитатов.

Предлагаемый механизм наноструктурирования $\text{Ca}_{1-x}\text{La}_x\text{F}_{2+x}$ соответствует модели этого явления, описанной в [1] для нестехиометрических оксидов. Подобие структур, наблюдающихся для $\text{Ca}_{1-x}\text{La}_x\text{F}_{2+x}$ и $\text{Ba}_{1-x}\text{La}_x\text{F}_{2+x}$, позволяют предположить, что наноструктурирование в $\text{Ba}_{1-x}\text{La}_x\text{F}_{2+x}$ осуществляется по тем же законам, что в $\text{Ca}_{1-x}\text{La}_x\text{F}_{2+x}$.

Найденные закономерности наноструктурирования могут быть использованы при отработке технологии получения фторидов $\text{Ca}_{1-x}\text{La}_x\text{F}_{2+x}$ и $\text{Ba}_{1-x}\text{La}_x\text{F}_{2+x}$ с заданными свойствами.

Автор признателен Б.П.Соболеву (ИК РАН) за любезно предоставленные образцы.

Автор благодарит А.С. Авилова за полезные дискуссии.

Литература

1. *Adams D.M.* Inorganic Solids. An Introduction to Concepts in Solid-state Structural Chemistry. – London: John Wiley & Sons, 1974. – 327 p.
2. *Sobolev B.P.* The Rare Earth Trifluorides. Part 1. The High Temperature Chemistry of the Rare Earth Trifluorides. – Barcelona: Institut d'Estudis Catalans, 2000. – 520 p.
3. *Третьяков Ю.Д.* Химия нестехиометрических оксидов. – М.: МГУ, 1974. – 364 с.
4. *Antipov E.V., Khasanova N.R., Pshirkov J.S. et al.* // The superconducting Bismuth-Based Mixed oxides Journal of Low Temperature Physics. – 2003. – Vol. 131, № 3–4. – P. 575–587.
5. *Nikolaichik V.I., Amelinckx S., Klinkova L.A. et al.* HREM Study of Compounds in the Bi-Rich Part of the Ba-Bi-O System // J. Sol. State Chemistry. – Vol. 163, № 1. – P. 44–64.
6. *Соболев Б.П., Голубев А.М., Кривандина Е.А. и др.* $\text{Ba}_{1-x}\text{R}_x\text{F}_{2+x}$ фазы (R = Gd-Lu) с искаженной структурой флюоритового типа, полученные кристаллизацией из неконгруэнтных расплавов в системе $\text{BaF}_2\text{-RF}_3$. I. Кристаллы $\text{Ba}_{0,75}\text{R}_{0,25}\text{F}_{2,25}$ (Синтез и некоторые характеристики) // Кристаллография. – 2002. – № 2. – С. 237–248.
7. *Maksimov S.K., Avilov A.S., Sobolev B.P., Herrero P.* Anomalies of properties and structure of $\text{M}_{1-x}\text{R}_x\text{F}_{2+x}$ crystals // Proceedings of Fifth International Conference «Single crystal growth and heat & mass transfer» / Obninsk, Russia, 2003. – Vol. 2. – P. 379–388.
8. *Хуриш П., Хови А., Николсон Р., Пэшли Д., Уэлан М.* Электронная микроскопия тонких кристаллов. – М.: Мир, 1968. – 574 с.
9. *Pashley D.W., Stowell M.J.* Twin structure of Au // Philos. Mag, 1963. – Vol. 8. – P. 1605–1632.
10. *Хурт Дж., Ломе И.* Теория дислокаций. – М.: Атомиздат, 1972. – 599 с.
11. *Гинье А.* Рентгенография кристаллов. – М.: Физ.-мат ГИЗ, 1961. – 604 с.
12. *Жданов Г.С.* Физика твердого тела. – М.: МГУ, 1961. – 501 с.
13. *Кривоглаз М.А., Смирнов А.Ф.* Теория упорядочивающихся сплавов. – М.: Физ.-мат ГИЗ, 1958. – 338 с.
14. *Ovid'ko I.A., Sheinerman A.G.* Perfect, partial and split dislocations in quantum dots // Phys. Rev. B. – 2002. – Vol. 66, N 24, art 245309-1 ÷ 245309-8.
15. *Lebedev I., Van Tendenloo G., Amelinckx S., Razavi F., Habermeyer H.-U.* Periodic microtwinning as a possible mechanism for the accommodation of the epitaxial film/substrate mismatch in the $\text{La}_{1-x}\text{Sr}_x\text{MnO}_3/\text{SrTiO}_3$ system // Phil. Mag. A. – 2001. – Vol. 81. – P. 797–824.

Максимов Сергей Кириллович – доктор физико-математических наук, профессор, главный научный сотрудник лаборатории электронно-микроскопических исследований МИЭТ. *Область научных интересов:* закономерности дифракции и электронно-микроскопического контраста, применение электронной микроскопии к исследованиям материалов и твердотельных приборов, фазовые превращения, дефекты кристаллической структуры.

Нанотехнологии на основе анодных оксидных материалов

А.Н.Белов, С.А.Гаврилов, М.Г.Путря, В.И.Шевяков

**Московский государственный институт электронной техники
(технический университет)**

Отражены результаты исследования процессов формирования наноструктур на основе анодных оксидных материалов. На примерах оксидов алюминия и титана представлены приемы их создания с использованием как классических электрохимических методов, так и зондовой микроскопии. Приведены данные о возможности использования синтезированных анодных оксидных материалов для получения элементов опто- и наноэлектроники.

В последнее время развито множество приемов нанотехнологии, базирующихся на использовании большого ряда материалов и применении различного инструментария [1].

Повышенное внимание у исследователей как у нас в стране, так и за рубежом вызывают анодные оксиды металлов [2]. Эти материалы представляют научный и практический интерес для создания на их основе электронных и оптических приборов с улучшенными функциональными возможностями. В частности, оксиды алюминия и титана могут иметь наноразмерную пористую структуру [3, 4].

В настоящей работе представлены основные результаты, полученные авторами за последние несколько лет в области нанотехнологий на основе анодных оксидов металлов.

Пористые анодные оксиды алюминия и титана, синтезируемые на основе классических электрохимических методов. Среди множества пористых материалов пористый анодный оксид алюминия представляет собой естественную наноструктурированную матрицу ориентированных пор. В настоящее время известно несколько методов самоупорядочивания слоев пористого оксида алюминия, в которых использован прием создания предварительного нанорельефа на поверхности окисляемого алюминия. Так, в [5] предложен метод создания механически отпечатка на поверхности алюминия литографически подготовленной матрицей, изготовленной на основе SiC. В работе [6] приведен метод создания искусственного нанорельефа сканирующим зондовым микроскопом.

Одним из эффективных методов создания упорядоченной структуры пористого анодного оксида алюминия является окисление толстых подложек алюминия [7]. Данный метод основан на использовании двухстадийного анодирования.

Практическую значимость имеют методы анодного окисления структур, представляющих собой подложки с нанесенными слоями алюминия. Однако до последнего времени проблема создания в подобных структурах слоев пористого оксида алюминия с повышенной степенью упорядоченности не решена.

Проведено комплексное исследование факторов, определяющих свойства формируемых слоев пористого анодного оксида алюминия. Изучение кинетики анодирования алюминия проводили с использованием разработанной методики анализа электрохимического процесса формирования пористых оксидных пленок, основанной на непрерывном во времени контроле электрофизических характеристик процесса и температуры.

Из данных исследования выявлено, что на протяжении всего процесса анодирования наблюдается непрерывное изменение напряжения и плотности тока с ростом температуры в зоне реакции. Это обусловлено увеличением химической активности электролита с повышением его температуры и, как следствие, растворением во время анодирования стенок матрицы оксида алюминия. Для предотвращения этого явления предложен метод термической стабилизации зоны электрохимической реакции процесса. Однако на основании исследования процесса анодирования в условиях термостабилизации выявлено, что и в данном случае также наблюдается изменение напряжения и плотности тока, связанное с непрерывным увеличением толщины диэлектрического слоя оксида алюминия и отсутствием процесса растворения его стенок. В обоих случаях наблюдаемые изменения параметров процесса анодирования приводят к непрерывному изменению периода структуры и размеров пор оксида алюминия, что вызывает разупорядочивание его структуры.

Для решения задачи минимизации изменения в процессе анодирования геометрических характеристик структуры пористого анодного оксида алюминия предложена методика формирования анодного оксида алюминия в потенциостатическом режиме, воспроизводящая динамическое изменение температуры с изменением плотности тока. На ее основе определены оптимальные режимы анодирования. На рис.1 изображены зависимости степени упорядоченности структуры от времени процесса анодирования в различных режимах и типичное атомно-силовое изображение поверхности оксида алюминия, сформированного в одном из технологических режимов анодирования. В качестве критерия степени упорядоченности структуры оксида выбрано гексагональное расположение ячеек оксида друг относительно друга и предложено считать коэффициентом упорядоченности отношение количества ячеек, удовлетворяющих этому требованию, к общему количеству ячеек на выбранной площади оксида.

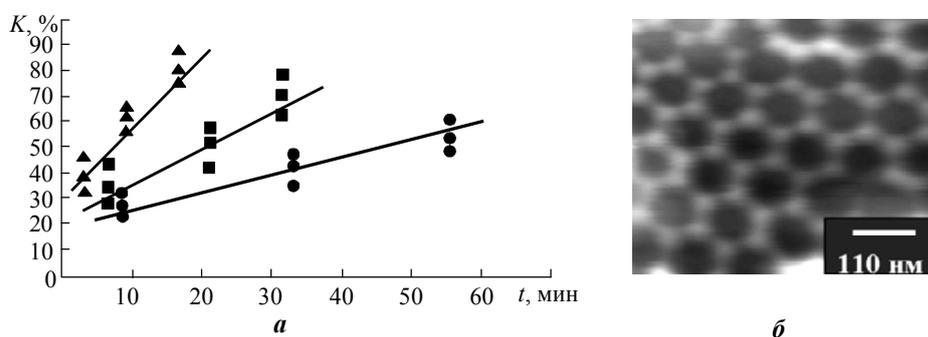


Рис.1. Зависимость степени упорядоченности (а) пористого оксида алюминия от времени процесса анодирования в различных режимах: ● – формирование в электролите на основе щавелевой кислоты в потенциостатическом режиме; ■ – при термостабилизации; ▲ – при динамическом изменении температуры с изменением плотности тока. АСМ-микрофотография пористого оксида алюминия (б)

Выявлено, что степень упорядоченности структуры оксида алюминия возрастает с течением времени процесса анодного окисления. Наивысшая степень упорядоченности достигнута для структур, при создании которых использовали режим анодирования с динамически изменяющейся во времени температурой в зоне электрохимической реакции, разработанный в соответствии с предложенной методикой.

Полученные упорядоченные пористые слои оксида алюминия были использованы для формирования в них электрохимическим осаждением нитевидных металлических

нанокристаллов. На примере серебра исследованы спектры оптического пропускания изготовленных структур. Обнаружено смещение края пропускания в коротковолновую область по мере уменьшения диаметра нанокристаллов. Типичные спектры представлены на рис.2. Как следует из представленных результатов, наблюдается сдвиг края оптического пропускания этих структур с изменением их периода. По сути, синтезированные структуры представляют собой фотонные кристаллы, характеризующиеся фотонной запрещенной зоной и представляющие качественно новые возможности управления световыми потоками [8].

Синтезированные структуры пористого оксида алюминия с повышенной степенью упорядоченности могут быть использованы в качестве технологических масок для травления, легирования различных материалов [1]. С помощью таких масок может быть реализован нелитографический способ формирования наноструктур. С применением маски пористого оксида и последующего ионного травления разработана технология формирования периодических поверхностных наноструктур в кремнии. На рис.3 приведены АСМ-изображение поверхности кремния после ионного травления через твердую маску пористого оксида алюминия и поперечный профиль сечения приповерхностного слоя кремния. Как показали результаты, данная технология воспроизводима. В свою очередь на основе таких кремниевых структур, характеризующихся развитой поверхностью, могут быть реализованы фотоприемные элементы и газовые датчики окружающей среды с повышенной чувствительностью.

Наряду с оксидом алюминия естественной упорядоченной структурой может обладать другой материал – оксид титана. Нанопористые пленки на основе оксида титана могут быть также получены классическим электрохимическим процессом анодного окисления. Однако до настоящего времени технология анодирования титана до конца не разработана.

Исследованы особенности технологии синтеза пористого анодного оксида титана. Технология заключалась в анодном окислении титана в различных растворах плавиковой кислоты. Анализ экспериментальных результатов показал, что выбор подходящих режимов анодирования позволяет получить пористые пленки оксида титана с необходимыми размерами пор и удовлетворительной однородностью. На рис.4 приведены РЭМ-микрофотография и АСМ-изображение поверхности синтезированного пористого анодного оксида титана.

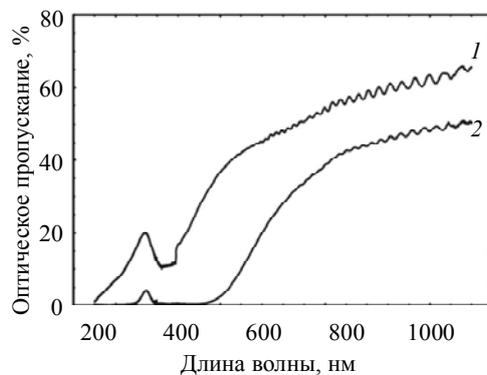


Рис.2. Спектры пропускания нитевидных нанокристаллов серебра, встроенных в матрицу пористого анодного оксида алюминия, сформированных в электролитах на основе серной (1 – диаметр 55 нм) и щавелевой (2 – диаметр 90 нм) кислот

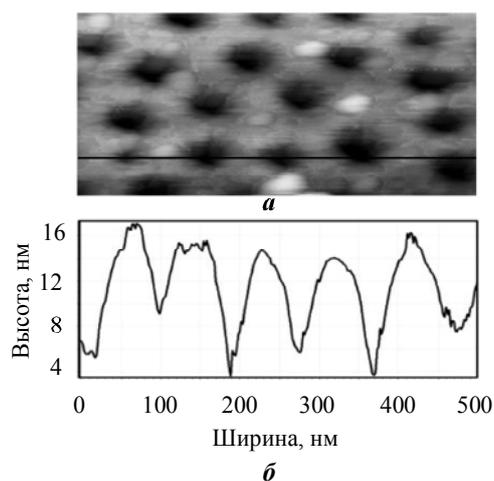


Рис.3. АСМ-изображение поверхности (а) и профиль структуры кремния (б) после ионного травления через твердую маску пористого оксида алюминия

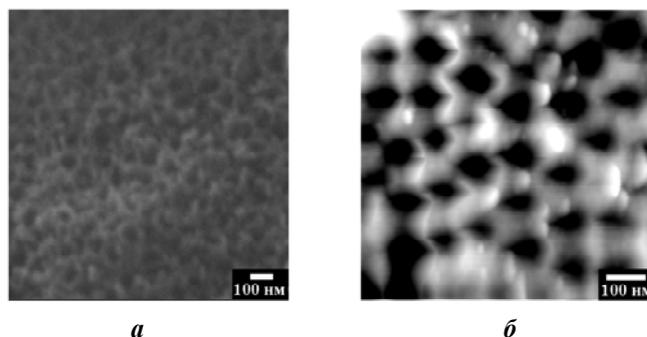


Рис.4. РЭМ-микрофотография (а) и АСМ-изображение (б) поверхности синтезированного пористого анодного оксида титана

Известно, что оксид титана представляет собой каталитический и газо-чувствительный материал. Благодаря развитой поверхности и высокой реакционной способности тонкие пленки оксида титана с нанопористой структурой могут быть использованы для создания высокочувствительных сенсоров и высокоэффективных преобразователей солнечной энергии.

Анодные оксиды металлов, синтезируемые на основе зондовых технологий. В последнее время широкое распространение получил один из эффективных инструментов нанотехнологии – сканирующая зондовая микроскопия (СЗМ) [9]. На ее основе сравнительно недавно развит метод локального зондового оксидирования сверхтонких пленок металлов, приповерхностных слоев ковалентных полупроводников и др. [9–11]. Суть метода связана с протеканием электрохимической реакции под проводящим зондом на способной окисляться поверхности при приложении к ней положительного смещения относительно зонда. Этот процесс подобен классическому электрохимическому и отличается лишь тем, что анод (анолируемый образец) и катод (зонд) специально не погружают в электролит. Во влажной атмосфере на поверхности образца и зонда имеются несколько монослоев адсорбированной влаги, которые образуют соединяющий мениск. Такого рода двухэлектродную электрохимическую систему принято называть «наноячейкой». Под действием электрического поля, создаваемого между зондом и проводящей поверхностью, на подложке образуются нанометровые окисленные участки. Классический электрохимический подход при описании кинетики роста анодного оксида показал, что он дает хорошее соответствие между теоретическими оценками и экспериментальными результатами [12, 13].

Процесс зондового оксидирования осуществляется на основе метода СЗМ – атомной силовой микроскопии с использованием электропроводящего зонда (кантилевера). Часто данный метод именуется как сканирующая электропроводящая микроскопия [14].

Проведены комплексные исследования влияния режимов АСМ, различных конструктивно-технологических и электрофизических факторов на скорость окисления и разрешающую способность метода локального зондового окисления сверхтонких металлических пленок титана [1, 12, 13]. Из анализа известных и полученных результатов выявлено, что скорость процесса зондового оксидирования в наибольшей степени зависит от влажности окружающей среды (интенсивность процесса критически уменьшается при падении относительной влажности воздуха ниже 20–25%), сопротивления окисляемого материала и прикладываемого к электрохимической ячейке напряжения. Разрешающая способность процесса (минимальная ширина формируемых оксидных участков) зависит от режима АСМ. Отмечено, что наиболее приемлемым является режим АСМ, использующий полуконтактную моду [1].

Из проведенных исследований выявлено, что разрешающая способность метода также зависит от радиуса кривизны острия иглы зонда. В экспериментах использовали кремниевые кантилеверы с различными проводящими покрытиями (W_2C , TiO_{2-x} , TiN , Pt , и алмазоподобным покрытием). При фиксированной относительной влажности окружающей среды (~45%) проводили окисление сверхтонких пленок титана в полуконтактном режиме АСМ. В таблице приведены данные сравнительного анализа разрешающей способности метода локального зондового оксидирования сверхтонких металлических пленок с использованием различных проводящих кантилеверов.

Результаты сравнительного анализа разрешающей способности метода локального зондового оксидирования сверхтонких металлических пленок

Материал проводящего покрытия	Радиус кривизны острия иглы, нм	Ширина локальных участков оксида, нм
Pt	~30	40
W_2C	~15–20	20
TiO_2	~20	25
C	~30	40
Алмазоподобное покрытие	~ (60–70)	70

Таким образом, повышению разрешающей способности процесса способствует снижение общего сопротивления системы проводящий кантилевер – окисляемый материал, использование проводящих кантилеверов с минимально возможным радиусом кривизны иглы, оптимизация параметров импульса подаваемого напряжения в полуконтактной моде АСМ и уменьшение относительной влажности окружающей среды.

Метод локального зондового окисления апробирован в настоящее время для локальной модификации свойств различных твердых материалов, для создания ряда наноструктур [1]. Решение проблем повышения его разрешающей способности (до единиц нанометров), качественного повышения производительности процесса позволит широко использовать данный метод в технологии элементной базы нанoeлектроники.

Таким образом, учитывая закономерности классических электрохимических процессов анодного оксидирования данных материалов и разработанных современных подходов, можно синтезировать пористые слои оксидов с высокой степенью упорядоченности. Данные структуры являются перспективными для создания на их основе элементов опто- и нанoeлектроники с качественно новыми функциональными возможностями.

Высокая разрешающая способность локального зондового анодного окисления сверхтонких металлических пленок делает его одним из перспективных методов нанотехнологии.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (гранты № 05-8-18057-а, № 05-03-32744-а, 06-08-81009-Бел_а).

Литература

1. Нанотехнологии в электронике / *Под ред. Ю.А.Чаплыгина*. – М.: Техносфера, 2005. – 448 с.
2. *Rao C.N.R., Deepak F.L., Gundiah G., Govindaraj A.* Inorganic nanowires // *Progress in Solid State Chemistry*. – 2003. – N 31. – P. 5–147.
3. *Jessensky O., Muller F., Gosele U.* Self-organized formation of hexagonal pore arrays in anodic alumina // *Appl. Phys. Lett.* – 1998. – Vol. 72, N. 109. – P. 1173–1174.
4. Titanium oxide nanotube arrays prepared by anodic oxidation / *D. Gong, C. A. Grimes et al.* // *J. Mater. Res.* – 2001. – Vol. 16, N. 12. – P. 3331–3334.
5. *Chakarvarty S.K., Vetter J.* Template synthesis – a membrane based technology for generation of nano-/micro materials: A review // *Radiation Measurements*. – 1998. – Vol. 29, N 2. – P.149–159.
6. *Hideki Masuda, Kenji Kanazawa, Kazuyuki Nishio.* Fabrication of ideally ordered nanohole arrays in anodic porous alumina based on nanoindentation using scanning probe microscope // *Chem. Lett.* – 2002. – Vol. 8. – P. 1218–1219.
7. *Францевич И.Н.* Анодные оксидные покрытия на металлах и анодная защита. – Киев: Наукова думка, 1985. – 280 с.
8. *Yablonovitch E.* Photonic band gap structures // *JOSA B*. – 1993. – N 10. – P.283–287.
9. *Неволин В.К.* Зондовые технологии в электронике. – М.: Техносфера, 2005. – 152 с.
10. *Sugimura H., Uchida T., Kitamura N., Masuhara H.* Tip-induced anodization of titanium surfaces by scanning tunneling microscopy: a humidity effect on nanolithography // *Appl. Phys. Lett.* – 1993. – Vol. 63. – P. 1288–1290.
11. *Snow E.S., Campbell P.M., Perkins F.K.* Nanofabrication with proximal probes // *Proc. IEEE*. – 1997. – Vol. 85. – P. 601–611.
12. Исследования особенностей процесса локального окисления пленок титана с использованием сканирующей зондовой микроскопии / *С.А.Гаврилов, С.В.Лемешко, В.М.Роцин и др.* // *Изв. вузов. Электроника*. – 2000. – № 3. – С. 27–33.
13. Investigation of tip-induced ultrathin Ti film oxidation kinetics / *S. Lemeshko, S. Gavrilo, V. Shevyakov et al.* // *Nanotechnology*. – 2001. – Vol 12, N 3. – P. 273–276.
14. *Shevyakov V., Lemeshko S., Roschin V.* Conductive SPM probe coatings based on Ti or W refractory compounds // *Nanotechnology*. – 1998. – Vol. 9. – P. 352–355.

Белов Алексей Николаевич – кандидат технических наук, доцент кафедры материаловедения и физической химии МИЭТ. *Область научных интересов:* наноструктуры на основе пористых материалов, процессы формирования и изучение свойств наноматериалов.

Гаврилов Сергей Александрович – доктор технических наук, заведующий кафедрой материаловедения и физической химии МИЭТ. *Область научных интересов:* технология формирования твердотельных наноструктур, электрохимическая и химическая обработка поверхности материалов микро-, опто- и наноэлектроники, технология получения и исследование свойств нанопористых полупроводников и диэлектриков.

Путря Михаил Георгиевич – доктор технических наук, профессор заместитель заведующего кафедрой интегральной электроники и микросистем МИЭТ. *Область научных интересов:* микро- и наноэлектроника, плазменные методы обработки.

Шевяков Василий Иванович – доктор технических наук, профессор кафедры интегральной электроники и микросистем МИЭТ. *Область научных интересов:* технология микро- и наноэлектроники, сканирующая зондовая микроскопия.

СХЕМОТЕХНИКА И ПРОЕКТИРОВАНИЕ

УДК 621.3.049.771.14

Статистический подход к временному анализу цифровых схем

А.Л.Стемпковский, С.В.Гаврилов, А.Л.Глебов

Институт проблем проектирования в микроэлектронике РАН (г. Москва)

Предложен новый метод статистического временного анализа цифровых схем. Метод основан на анализе блоков и сочетает в себе использование нормальной аппроксимации для плотностей вероятности временных величин и учет помех, влияющих на задержку. Для уменьшения пессимизма в оценке такой помехи используется большое количество логических корреляций, предварительно генерируемых в схеме. Приведенные экспериментальные результаты демонстрируют высокую эффективность предлагаемого метода.

Повышение степени интеграции цифровых СБИС и уменьшение минимальных размеров элементов с переходом в субмикронную область выдвигает на первый план задачу повышения надежности СБИС на этапе их проектирования. Существенными факторами, влияющими на работу схемы, становятся статистические вариации как внешних условий, в которых работает схема, так и параметров элементов самой схемы. К вариациям внешних условий можно отнести изменения температуры, напряжения питания, различные деградационные явления. Вариациями параметров элементов являются прежде всего случайные изменения размеров транзисторов. В этих условиях задержки как отдельных логических вентилях, так и всей схемы уже не являются обычными числами, но представляют собой случайные величины, описываемые функциями или плотностями распределения. Поэтому задача разработки эффективных и адекватных методов статистического временного анализа (т.е. нахождения указанных функций и плотностей распределения) становится все более актуальной.

Цель настоящей работы – решение задачи повышения надежности СБИС путем разработки методов и алгоритмов статистического временного анализа для цифровых схем, а также проведение численных экспериментов с указанными методами и алгоритмами. Достижения в области технологии СБИС делают задачу обычного (детерминированного) временного анализа далекой от реальности [1].

Известные из литературы методы статистического временного анализа можно разделить на две большие группы. Первую группу образуют методы, ориентированные на анализ путей [2, 3]. Эти методы применяются к заранее выбранному в схеме набору критических и околочитических путей. Поскольку этот набор содержит, как правило, достаточно большое количество путей, которые к тому же сложно правильно выбрать, методы данной группы обладают большой вычислительной сложностью.

© А.Л.Стемпковский, С.В.Гаврилов, А.Л.Глебов, 2006

Вторую группу образуют методы, ориентированные на анализ блоков [4–6]. Эти методы обрабатывают последовательно всю схему и являются более быстрыми за счет использования ряда упрощающих предположений. Многие из этих алгоритмов имеют сложность, линейную в зависимости от размера схемы. В [4] предложена каноническая модель задержки первого порядка. Эта модель позволяет учитывать как глобальные корреляции, так и случайные изменения параметров от элемента к элементу в кристалле. Источниками статистических вариаций могут являться внешние факторы (напряжение питания, температура) и деградиационные явления (электромиграция, эффекты горячих электронов, NTBI). Все временные величины в [4] (времена прибытия сигнала, задержки) аппроксимируются случайными величинами с нормальным распределением. При распространении времен прибытия сигнала через схему операции вычисления суммы и максимума двух случайных величин выполняются с помощью аналитических формул, полученных в [7].

В работе [5] задержки логических вентилях и всей схемы также аппроксимируются нормальными распределениями. Справедливость такой аппроксимации показана с помощью экспериментов по методу Монте-Карло. Операции вычисления суммы и максимума выполняются с использованием других формул, полученных на основе анализа главных компонент. Временные окна корректируются с учетом помех, влияющих на задержку. Каждый узел схемы последовательно рассматривается как узел-жертва со своим набором узлов-агрессоров, и предложен критерий пересечения для статистических временных окон. Агрессоры, чьи временные окна не пересекаются с временными окнами жертвы, не учитываются при вычислении помехи, генерируемой в узле-жертве. Однако при этом подходе помеха, влияющая на задержку, сильно переоценивается, поскольку не учитываются попарные перекрытия временных окон для пар агрессоров и логические корреляции между сигналами в схеме [8–11].

В работе [6] для описания случайных времен прибытия сигналов используется произвольная кусочно-линейная функция распределения вероятности, тогда как для описания задержек логических вентилях используется кусочно-постоянная плотность вероятности. Получены соответствующие формулы для выполнения операций суммирования и вычисления максимума.

Все известные из литературы методы обладают рядом недостатков (невысокая точность, отсутствие учета емкостных связей между проводниками, отсутствие учета статистических и логических корреляций между сигналами в схеме).

В данной работе разрабатываются и исследуются новые методы и алгоритмы статистического временного анализа цифровых схем, свободные от указанных недостатков. Предложен новый подход к статистическому временному анализу цифровой схемы, ориентированному на анализ блоков. Такой подход сочетает в себе использование нормальной аппроксимации для плотностей вероятности временных величин и метод распространения по схеме с критерием перекрытия статистических временных окон и итеративным методом учета помех, влияющих на задержку [4]. Для уменьшения пессимизма в оценке помехи, влияющей на задержку, используется формирование графа ограничений для каждого кластера схемы (образуемого жертвой и соответствующим набором агрессоров), на основе перекрытия временных окон и вычисления простых логических импликаций (ПЛИ), имеющих в схеме. Аналогичный метод был ранее использован при анализе функциональных помех и помех, влияющих на задержку, в работах [8–11]. После этого для графа ограничений решается задача нахождения независимого множества максимального веса (НММВ) [12] и определяется максимально возможная величина помехи. Хотя эта задача известна как NP-полная, в данном слу-

чае размер кластера и соответственно графа ограничений, как правило, невелик, что позволяет получить ее точное решение. Поскольку ПЛИ являются парными логическими корреляциями между сигналами в схеме, данный подход остается эвристическим и очень эффективным (как в смысле полученных результатов, так и в плане невысокого времени счета).

Статистический временной анализ, основанный на обработке блоков. Рассмотрим версию алгоритма, в которой сделана попытка учесть корреляции сигналов, существующие как благодаря внешним источникам вариаций, так и из-за расходящихся и вновь сходящихся путей сигналов.

Следуя [4], используем каноническую форму для представления всех временных величин (времена прибытия сигналов, задержки) в схеме. Если X – нормально распределенная случайная величина со средним значением m_X и дисперсией σ_X^2 , то она может быть представлена как

$$X = m_X + \sigma_X \Delta X, \quad (1)$$

где ΔX – случайная величина со стандартным нормальным распределением (нормальным распределением со средним значением 0 и дисперсией 1). Аналогично каждая временная величина представляется в канонической форме

$$A = a_0 + \sum_{i=1}^n a_i \Delta X_i + r_a \Delta R_a, \quad (2)$$

где a_0 – среднее (или номинальное) значение, ΔX_i , $i = 1, \dots, n$, и ΔR_a – случайные величины со стандартным нормальным распределением. Следует отметить следующие свойства этого представления:

- ΔR_a – независимая случайная величина, индивидуальная для каждой временной величины;

- ΔX_i может содержаться в более чем одной временной величине, описывая таким образом корреляции между ними.

Две основные операции, использующиеся в статистическом временном анализе (операции суммирования и вычисления максимума), выполняются следующим образом.

- 1) $C = A + B$: $c_0 = a_0 + b_0$, $c_i = a_i + b_i$, $r_c = \sqrt{r_a^2 + r_b^2}$;

- 2) $C = \max(A, B)$.

В общем случае результатом этой операции не является нормально распределенная случайная величина. Однако здесь мы используем аппроксимацию нормальным распределением. Для того чтобы получить параметры C , применяется следующая последовательность формул [4, 7].

Стандартные отклонения для A и B :

$$\sigma_A = \sqrt{\sum_{i=1}^n a_i^2 + r_a^2}, \quad \sigma_B = \sqrt{\sum_{i=1}^n b_i^2 + r_b^2}. \quad (3)$$

Коэффициент корреляции (в предположении статистической независимости ΔX_i , ΔR_a):

$$\rho = \frac{1}{\sigma_A \sigma_B} \sum_{i=1}^n a_i b_i. \quad (4)$$

Плотность распределения вероятности и интегральная функция распределения для стандартного нормального распределения в виде

$$\varphi(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{x^2}{2}\right), \quad \Phi(y) = \int_{-\infty}^y \varphi(x) dx. \quad (5)$$

Две вспомогательные величины:

$$\theta = \sqrt{\sigma_A^2 + \sigma_B^2 - 2\rho\sigma_A\sigma_B}, \quad T = \Phi\left(\frac{a_0 - b_0}{\theta}\right). \quad (6)$$

Среднее значение случайной величины С:

$$c_0 = a_0 T + b_0 (1 - T) + \theta \varphi\left(\frac{a_0 - b_0}{\theta}\right). \quad (7)$$

Дисперсия случайной величины С:

$$\sigma_C^2 = (\sigma_A^2 + a_0^2) T + (\sigma_B^2 + b_0^2) (1 - T) + (a_0 + b_0) \theta \varphi\left(\frac{a_0 - b_0}{\theta}\right). \quad (8)$$

Коэффициенты канонической формы для случайной величины С:

$$c_i = a_i T + b_i (1 - T), \quad i = 1, \dots, n, \quad r_c = \sqrt{\sigma_C^2 - \sum_{i=1}^n c_i^2}. \quad (9)$$

Алгоритм статистического временного анализа для максимальных времен прибытия сигнала работает следующим образом.

А. Для каждого первичного входа инициализировать параметры его времени прибытия сигнала следующим набором: ($a_0 = 0, a_i = 0, r_a = 0$).

В. Для каждого логического вентиля схемы распространить время прибытия от его входов к его выходам, используя операции суммирования и нахождения максимума.

Вычисление логических импликаций. Следующие обозначения были использованы в работе [8] для ПЛИ между двумя узлами схемы a и b :

$$(a=V_a) \rightarrow (b=V_b), \quad \text{где } V_a, V_b \in \{0,1\}.$$

Данная формула означает, что если узел a имеет логическое состояние V_a , то узел b имеет логическое состояние V_b (это относится к стационарному состоянию схемы, т.е. до или после всех переключений).

Алгоритм генерации ПЛИ состоит из двух шагов: ПЛИ генерируются для логических вентилях схемы; ПЛИ распространяются через схему, используя основные операции объединения списков, пересечения списков, и на основе контра-позитивного закона.

Для генерации исходных ПЛИ в схеме, содержащей сложные многовходовые вентили, схема должна быть предварительно представлена в виде сети из ROBDD (минимизированная упорядоченная диаграмма двоичных решений) [13]. Каждая ROBDD представляет одну схемную компоненту, связанную по постоянному току (DCCC). Затем ПЛИ генерируются для каждой DCCC с помощью ее представления в виде ROBDD.

После того как исходные ПЛИ сгенерированы для каждого вентиля в схеме, они распространяются через схему с использованием основных операций объединения спи-

сков, пересечения списков и на основе контра-позитивного закона. Рассмотрим, например, двухвходовый вентиль AND, имеющий входы a , b и выход x .

Если имеются списки импликаций L_H (L_L) в узлах a и b , то список импликаций L^x_H (L^x_L) на выходе вентиля вычисляется как объединение списков L^a_H и L^b_H (L^a_L и L^b_L). Аналогично, список H^x_H (H^x_L) вычисляется как пересечение списков H^a_H и H^b_H (H^a_L и H^b_L). Аналогичные правила могут быть сформулированы для вентиля OR и инвертора. Когда ПЛИ вычислены на входе вентиля, обратные ПЛИ могут быть получены с помощью контра-позитивного закона [8].

В дополнение к описанному *прямому* распространению импликаций, используется так называемое *боковое* распространение, предложенное в [8]. Это позволяет находить не прямые импликации, известные как особенно полезные в оптимизации логики [14, 15].

Таким образом, алгоритм вычисления логических импликаций состоит из следующих этапов. Сначала производится некоторое количество прямых проходов распространения ПЛИ до достижения сходимости (с одновременным применением контра-позитивного закона). Затем выполняется некоторое количество проходов бокового распространения ПЛИ, так же до достижения сходимости. При этом после каждого прохода бокового распространения выполняется один или более проходов прямого распространения.

Оценка помех, влияющих на задержку. После того как вычислены статистические временные окна (без учета помех) и ПЛИ, производится учет помех, влияющих на задержку. Для каждого узла-жертвы определяется набор узлов-агрессоров, потенциально способных вносить вклад в помеху. Узел-жертву вместе с соответствующим набором узлов-агрессоров будем называть *кластером*. В наборе агрессоров кластера необходимо найти подмножество, индуцирующее максимальную помеху в узле-жертве и удовлетворяющее всем ограничениям, следующим из временных окон, и логическим ограничениям, описываемым ПЛИ. Данная задача носит название задачи нахождения *максимальной реализуемой помехи*, а соответствующий набор агрессоров называется *максимальным реализуемым набором агрессоров*. В предлагаемом алгоритме каждый кластер анализируется индивидуально на каждой итерации корректирования временных окон. Следовательно, задача вычисления максимальной реализуемой помехи определяется следующей информацией:

- 1) один узел-жертва V ;
- 2) набор узлов-агрессоров A_i , индуцирующих помеху w_i ($i = 1, \dots, n$) в узле-жертве V ;
- 3) тип помехи t , $t \in \{RiseR, RiseF, FallR, FallF\}$.

Указанные четыре типа помехи соответствуют ситуациям, когда узел-жертва имеет тип переключения либо $0 \rightarrow 1$ (*RiseR* и *RiseF*) либо $1 \rightarrow 0$ (*FallR* и *FallF*), тогда как узлы-агрессоры имеют тип переключения $0 \rightarrow 1$ (*RiseR* и *FallR*) или $1 \rightarrow 0$ (*RiseF* и *FallF*).

В данной работе используется следующий критерий пересечения для двух статистических временных окон $[t1, t2]$ и $[t3, t4]$, предложенный в [5]. Окна пересекаются, если

$$\mu_{t4-t1} + 3\sigma_{t4-t1} > 0, \quad \mu_{t2-t3} + 3\sigma_{t2-t3} > 0, \quad (10)$$

$$\text{где } \mu_{i-j} = \text{Mean}(ti) - \text{Mean}(tj), \quad \sigma_{i-j} = \sqrt{\sigma_{ti}^2 + \sigma_{tj}^2 - 2\rho_{ti,tj}\sigma_{ti}\sigma_{tj}}, \quad (11)$$

коэффициент корреляции $\rho_{ti,tj}$ определен формулой (4).

Граф ограничений – это неориентированный граф $G=(V,E,w)$, имеющий множество вершин $V=\{v_1, \dots, v_n\}$, множество ребер $E=\{(u,v): u,v \in V, u \neq v\}$ и весовую функцию для

вершин w такую, что $w(u) \geq 0$ для любого u из V . Вершины графа соответствуют узлам-агрессорам кластера. Вес каждой вершины – это величина помехи, индуцируемой в узле-жертве соответствующим агрессором. Отдельный граф ограничений формируется для каждого типа помехи. Ребро между двумя вершинами графа ограничений означает невозможность одновременного переключения соответствующих агрессоров (и следовательно, невозможность одновременного их участия в создании помехи).

Для каждого типа помехи первоначально определяются исходное и конечное состояния узла-жертвы, а также исходное и конечное состояния узлов-агрессоров. После этого формируется граф ограничений и решается задача определения НММВ [12]. Именно это множество определяет максимальный реализуемый набор агрессоров и, следовательно, максимальную реализуемую помеху.

Результаты численных экспериментов. Предложенный в настоящей работе алгоритм тестировался с использованием ряда схем из набора ISCAS85. В качестве источников глобальных вариаций были выбраны вариации температуры и напряжения питания. В качестве источника локальной неопределенности использовались независимые вариации длины канала каждого транзистора. Используемая библиотека стандартных ячеек была предварительно аттестована с помощью программы SPICE.

Результаты численных экспериментов приведены в таблице. Колонки 4–7 содержат средние значения и среднеквадратичные отклонения (стандартные отклонения в таблице обозначены как Ст.откл.) для максимального значения задержки каждой схемы.

**Результаты численных экспериментов
по статистическому временному анализу**

Схема	Количество вентилей	Значение	Задержка схемы без коррекции	Задержка схемы с временной коррекцией	Задержка схемы с вре- менной и ло- гической коррекцией	Результаты метода Монте- Карло
1	2	3	4	5	6	7
C432	160	Среднее Ст.откл.	2,140 0,033	2,739 0,034	2,626 0,033	2,519 0,044
C499	202	Среднее Ст.откл.	0,794 0,031	1,142 0,034	1,080 0,036	1,104 0,039
C1355	546	Среднее Ст.откл.	1,290 0,024	2,717 0,026	2,613 0,026	2,591 0,028
C1908	880	Среднее Ст.откл.	1,481 0,019	2,673 0,026	2,527 0,023	2,474 0,031
C2670	1292	Среднее Ст.откл.	1,452 0,023	3,224 0,029	3,046 0,030	3,030 0,040
C3540	1668	Среднее Ст.откл.	1,891 0,018	4,755 0,037	4,683 0,031	4,547 0,049
C6288	2416	Среднее Ст.откл.	7,009 0,054	10,726 0,053	10,510 0,053	10,373 0,064
C7552	3512	Среднее Ст.откл.	1,735 0,021	4,253 0,039	4,202 0,037	4,193 0,044

Колонка 4 показывает результаты статистического временного анализа, основанного на обработке блоков и описанного выше (без учета помех, влияющих на задержку). Колонка 5 содержит результаты временного анализа, скорректированные, как в работе [5] (только удалением тех агрессоров, чьи временные окна не пересекаются с временными окнами соответствующей жертвы). Колонка 6 показывает результаты, рассчитанные алгоритмом, предложенным в данной работе (коррекция временных окон с помощью помех, влияющих на задержку, рассчитанных с учетом временных и логических корреляций, с формированием графа ограничений и решением задачи НММВ). Для сравнения в колонке 7 даны результаты, полученные по методу Монте-Карло.

Приведенные результаты показывают, что учет помех, влияющих на задержку, вносит значительные коррективы в расчет задержек. В то же время предлагаемый алгоритм демонстрирует заметное уменьшение пессимизма в оценке помехи по сравнению с методом, предложенным в [5]. Согласие с результатами метода Монте-Карло достаточно хорошее. Следует отметить, что время счета предлагаемого алгоритма для всех схем менее 1 с. Время счета по методу Монте-Карло в тысячи раз больше.

Интересным направлением для дальнейших исследований является использование логических импликаций в статистическом временном анализе, основанном на анализе путей. Можно показать, что исходя из наличия импликаций определенного вида между парой узлов пути вероятность того, что этот путь является критическим, равна нулю. Из предварительных численных экспериментов следует, что в больших схемах таким способом могут выбываать из рассмотрения сотни и тысячи самых длинных путей. Таким образом, количество путей, подлежащих статистическому анализу, заметно снижается и производительность метода увеличивается.

Литература

1. Актуальные проблемы моделирования в системах автоматизации схемотехнического проектирования / Под ред. А.Л.Стемповского. – М.: Наука, 2003. – 430 с.
2. *Orshansky M., Keutzer K.* A general probabilistic framework for worst case timing analysis // DAC–2002. – P. 556–561.
3. *Jess J.A.G., Kalafala K., Naidu S.R. et al.* Statistical timing for parametric yield prediction of digital integrated circuits // DAC–2003. – P. 932–937.
4. *Visweswariah C., Ravindran K., Kalafala K.* First-order parameterized block-based statistical timing analysis // TAU–2004. – P. 17–24.
5. *Le J., Li X., Pileggi L.T.* STAC: Statistical timing analysis with correlation // DAC–2004. – P. 343–348.
6. *Devgan A., Kashyap C.* Block-based static timing analysis with uncertainty // ICCAD–2003. – P. 607–614.
7. *Clark C.E.* The greatest of a finite set of random variables // Operations Research, March–April 1961. – P. 145–162.
8. *Glebov A., Gavrilov S., Blaauw D. et al.* False-noise analysis using logic implications // ACM Trans. on Design Automation, July 2002. – Vol. 7, N 3. – P. 474–498.
9. *Гаврилов С.В., Глебов А.Л., Стемпковский А.Л.* Анализ помехоустойчивости цифровых схем на основе логических импликаций // Изв. вузов. Электроника. – 2002. – № 5. – С. 60–67.
10. *Glebov A., Gavrilov S., Soloviev R. et al.* Delay noise pessimism reduction by logic correlation // ICCAD–2004.
11. *Гаврилов С.В., Глебов А.Л., Стемпковский А.Л.* Анализ фатальных помех в цифровых схемах на основе метода резолюций // Изв. вузов. Электроника. – 2004. – № 6. – С. 64–71
12. *Loukakis E., Tsouros C.* An algorithm for the maximum internally stable set in a weighted graph // Intern. J. Computer Math., 1983. – Vol. 13. – P. 117–129.
13. *Bryant R.E.* Graph-based algorithms for Boolean function manipulation // IEEE Trans. on Computers, 1986. – Vol. 35. – P. 677–691.

14. *Bahar R.I., Burns M., Hachtel G.D. et.al.* Symbolic computation of logic implications for technology-dependent low-power synthesis // ISPLED-96.

15. *Long W., Wu Y.L., Bian J.* IBAW: An implication-tree based alternative-wiring logic transformation algorithm // ASPDAC-2000. – P. 415-422.

Стемпковский Александр Леонидович – академик РАН, доктор технических наук, профессор, лауреат Государственной премии РФ, директор Института проблем проектирования в микроэлектронике РАН (г. Москва). *Область научных интересов:* автоматизация проектирования микроэлектронных систем.

Гаврилов Сергей Витальевич – кандидат технических наук, заведующий сектором автоматизации топологического проектирования ИППМ РАН. *Область научных интересов:* методы оптимизации СБИС, методы быстрого электрического моделирования, символический анализ схем, анализ помехоустойчивости.

Глебов Алексей Львович – доктор технических наук, заведующий сектором автоматизации логического проектирования ИППМ РАН. *Область научных интересов:* методы логического синтеза, анализ помехоустойчивости и оптимизация СБИС.

Информация для читателей журнала «Известия высших учебных заведений. Электроника»

Вы можете оформить подписку на 2007 г. в редакции с любого номера. Стоимость одного номера – 550 руб. (с учетом всех налогов и почтовых расходов).

Адрес редакции:

124498, Москва, Зеленоград, проезд 4806, д. 5, МИЭТ, комн. 7232

Тел.: (495) 534-62-05. Факс: (495) 530-54-29

E-mail: magazine@rnd.miee.ru

<http://www.miet.ru/static/je/os.html>

Сравнительный анализ схемотехнических моделей SiGe гетеропереходного биполярного транзистора

К.О.Петросянци, Р.А.Торговников

Московский государственный институт электроники и математики
(технический университет)

Рассмотрены современные SPICE-модели биполярного транзистора с целью выбора оптимальной модели SiGe гетеропереходного биполярного транзистора для расчета сверхбыстродействующих схем.

В настоящее время интенсивно развивающимися направлениями в системах связи и телекоммуникаций являются беспроводные технологии: мобильная связь, системы глобального позиционирования (GPS и ее аналоги), протоколы Wi-Fi и Bluetooth, локальные беспроводные сети WLAN. Рабочие частоты модулей приема-передачи таких устройств составляют несколько десятков гигагерц. Такое быстродействие достигается за счет использования в качестве ВЧ-компонентов SiGe гетеропереходных биполярных транзисторов (ГБТ), значения граничных частот которых достигают 120–210 ГГц [1]. Это позволяет создавать на их основе быстродействующие логические элементы, генераторы, управляемые напряжением, делители частоты, приемники и передатчики и объединять их в аналоговые и аналого-цифровые системы связи. Поэтому задача схемотехнического моделирования SiGe БИС является важной и актуальной.

Целью данной работы является проведение сравнительного анализа наиболее распространенных на сегодняшний день схемотехнических SPICE-моделей биполярных транзисторов и выбор оптимальной модели для SiGe ГБТ. К схемотехнической модели SiGe ГБТ предъявляются те же требования, что и к моделям обычных биполярных транзисторов: она должна адекватно описывать работу транзистора в широком диапазоне токов, напряжений и рабочих частот; иметь точную и однозначную методику экстракции параметров; быть понятной, легко осваиваемой и удобной в использовании. Помимо этого в модель должны быть также включены дополнительные параметры, описывающие специфические эффекты, присущие кремний-германиевому ГБТ.

Сравнение моделей. Наиболее распространенными моделями биполярного транзистора являются: модель Гуммеля–Пуна [2], модель VBIC (Vertical Bipolar Intercompany Model) [3], модель Mextram 504 [4] (MOst EXquisite TRAnsistor Model) фирмы Phillips и модель HICUM [5] (HIgh CUrrnet Model), разработанная в технологическом университете г. Дрездена в Германии. Эквивалентные схемы моделей приведены на рис.1. В основе всех этих моделей лежит модифицированное (для каждой модели по-своему) уравнение управления зарядом Мола–Росса, в соответствии с которым полный ток через транзистор определяется как

$$I_{CT} = \frac{I_S}{q_B} \left[\left(e^{\frac{qV_{BE}}{kT}} - 1 \right) - \left(e^{\frac{qV_{BC}}{kT}} - 1 \right) \right],$$

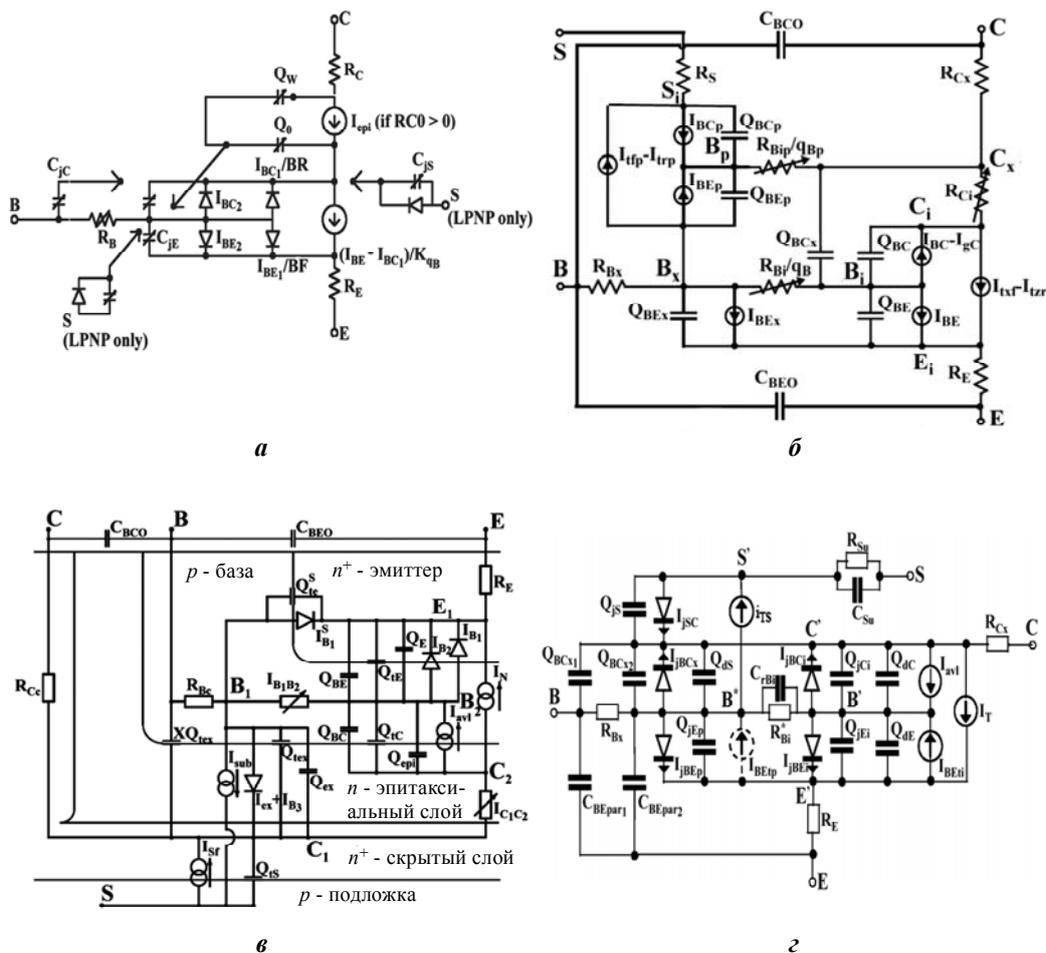


Рис.1. Эквивалентные схемы моделей: а – Гуммеля–Пуна; б – VBIC; в – Mextram 504; г – HICUM

где $q_B = Q_B/Q_{B0}$ представляет собой нормированный заряд в базе, т.е. отношение полного заряда основных носителей в базе Q_B к встроенному заряду основных носителей в базе Q_{B0} .

Точное описание характеристик современного быстродействующего биполярного транзистора обеспечивается за счет учета важнейших для его работы статических и динамических эффектов. В случае SiGe ГБТ к таким эффектам относятся: эффект Эрли (модуляция ширины базы), модуляция сопротивления базы, повышенная эффективность переноса носителей заряда в гетеропереходах, уменьшение времен пролета носителями заряда областей транзистора. Сравним способы описания этих эффектов в вышеупомянутых моделях.

Статические эффекты. Эффект Эрли. В модели Гуммеля–Пуна полный заряд в базе описывается выражением

$$q_B = q_1 + q_2 / q_B,$$

эффект Эрли моделируется через выражение

$$q_1 = 1 + V_{BC} / V_{AF} + V_{BE} / V_{AR},$$

где VAF и VAR – напряжения Эрли в прямом и инверсном включении транзистора. Недостаток такого подхода заключается в том, что в модели Гуммеля–Пуна при описании эффекта Эрли заряд q_1 и нормированный заряд базы q_B линейно зависят от напряжений на переходах, тогда как в реальном транзисторе зависимость нелинейная. Это приводит к серьезным неточностям, особенно при описании выходной проводимости транзистора $g_{0F} = dI_C / dV_{CE}$ для нормального включения транзистора и $g_{0R} = dI_E / dV_{EC}$ для инверсного. В модели Гуммеля–Пуна g_{0F} и g_{0R} величины постоянные, в то время как их значения, полученные на основе результатов измерений, заметно изменяются в зависимости от V_{CE} и V_{EC} соответственно.

В моделях VBIC, Mextram и HICUM эта неточность ликвидирована. В каждой из этих моделей выражение для заряда модифицировано, и в него вместо напряжений на p - n -переходах входят нормированные заряды обедненных областей p - n -переходов, которые нелинейно зависят от напряжений на переходах.

В частности, в модели VBIC

$$q_1 = 1 + q_{jC} / \text{VAF} + q_{jE} / \text{VAR} ,$$

в моделях Mextram, HICUM

$$q_1 = 1 + (Q_{IE} + Q_{IC}) / Q_{B0} .$$

Модуляция сопротивления базы. Как известно, сопротивление базы складывается из постоянной и переменной составляющих. Постоянная составляющая представляет собой сумму сопротивлений базового контакта и пассивной базы, переменная – сопротивление активной базы. Сопротивление активной базы модулируется тремя эффектами: Эрли, высокого уровня инжекции и оттеснения тока эмиттера.

На эквивалентной схеме модели Гуммеля–Пуна (см. рис.1,а) постоянная и переменная составляющие сопротивления базы представлены одним резистором R_B . В модели учтено влияние на сопротивление активной базы как заряда q_B , так и эффекта оттеснения, но эти эффекты учтены отдельно. Если пользователь модели не предполагает учитывать эффект оттеснения тока, то сопротивление базы r_{BB} зависит только от заряда q_B :

$$r_{BB} = RBM + (RB - RBM) / q_B ,$$

где RB – сопротивление базы при нулевом напряжении на эмиттерном p - n -переходе; RBM – минимальное сопротивление базы при больших токах.

В случае учета эффекта оттеснения эмиттерного тока выражение для сопротивления базы принимает вид

$$r_{BB} = RBM + 3(RB - RBM) \left(\frac{\tan(z) - z}{z \tan^2(z)} \right) ,$$

где $z = \frac{-1 + \sqrt{1 + 144 I_B / \pi^2 IRB}}{(24 / \pi^2) \sqrt{I_B / IRB}}$ – коэффициент, определяющий сопротивление базы как

функцию тока базы I_B ; IRB – параметр модели, определяющий ток базы, при котором сопротивление базы уменьшается до $r_{BB} = 2RBM$.

В модели VBIC сопротивление активной базы модулируется только нормированным зарядом q_B , и выражение для сопротивления активной базы имеет вид

$$r_B = \text{RBI} / q_B,$$

где RBI – сопротивление активной базы (определяется геометрическими размерами базы и значением ее удельного сопротивления, то есть зависит от технологии и конструкции прибора).

В модели VBIC эффект оттеснения эмиттерного тока в прямом виде не учитывается. Однако в данной модели сопротивление базы на схеме (рис.1,б) представлено двумя резисторами: постоянный резистор RBX представляет сумму сопротивлений контакта к базе и пассивной базы, а переменный резистор RBI/q_B – переменное сопротивление активной базы. Такая схема за счет дополнительного узла B_x позволяет разделить идеальный ток базы I_{BEi} на две составляющие: вертикальную I_{BE} , которая зависит от потенциала узла B_i , и боковую I_{BEx} , которая зависит от потенциала узла B_x . Параметр WBE определяет соотношение между этими токами:

$$\begin{aligned} I_{BE} &= \text{WBE} \cdot I_{BEi} \left(\exp\left(\frac{V_{BiEi}}{\text{NEI} \cdot V_T}\right) - 1 \right), \\ I_{BEx} &= (1 - \text{WBE}) I_{BEi} \left(\exp\left(\frac{V_{BxEi}}{\text{NEI} \cdot V_T}\right) - 1 \right). \end{aligned} \quad (1)$$

Таким образом, за счет наличия в модели бокового тока (1) косвенно учитывается эффект оттеснения тока. Однако сами авторы модели в работе [6] указывают на то, что такое описание не дает достаточно точного учета эффекта в широком диапазоне рабочих напряжений.

В модели Mextram 504, по сравнению с моделями Гуммеля–Пуна и VBIC, улучшен подход к определению переменного сопротивления базы. Вышеупомянутые эффекты учитываются одновременно в выражении для тока, текущего через переменное сопротивление активной базы (см. рис.1,в):

$$I_{B_1B_2} = \frac{q_B}{\text{RBV}} \left[2V_T \left(e^{V_{B_1B_2}/V_T} - 1 \right) + V_{B_1B_2} \right],$$

где RBV – параметр модели, сопротивление активной базы при нулевых напряжениях на переходах. А собственно сопротивление базы определяется в модели автоматически как V/I для расчета по постоянному току и как dV/dI по переменному.

В модели NICUM переменное сопротивление базы также представлено на эквивалентной схеме двумя отдельными резисторами: R_{Bx} и R_{Bi} (см. рис.1,г). R_{Bx} – так же, как и в модели Mextram, суммарное сопротивление пассивной базы и контакта к базе; R_{Bi} – сопротивление активной базы, определенное в модели как

$$R_{Bi} = r_i \cdot \ln(1 + \eta)\eta,$$

где $r_i = \text{RBI0} \frac{Q_0}{Q_0 + \Delta Q_p}$ – сопротивление базы, зависящее от величины заряда носителей в базе; RBI0 – сопротивление активной базы при нулевых смещениях переходов, зависящее от поверхностного сопротивления и геометрических размеров активной ба-

зы; Q_0 – встроенный заряд в базе; ΔQ_p – заряд в базе, зависящий от приложенного к эмиттерному переходу смещения; $\eta = FGE0 \cdot r_i i_{jBEi} / V_T$ – фактор оттеснения; $FGE0$ – форм-фактор; i_{jBEi} – ток перехода база–эмиттер.

Таким образом, в модели HICUM используется наибольшее количество параметров для описания эффекта модуляции сопротивления базы, что позволяет точнее подогнать характеристики под эксперимент.

Параметры, описывающие специфические эффекты в SiGe ГБТ. Физика работы SiGe ГБТ несколько отличается от физики работы обычного кремниевый БТ [7]. Усилительные и частотные свойства биполярных транзисторов зависят от значения собственной концентрации электронов в кремнии n_i , которая, в свою очередь, экспоненциально зависит от ширины запрещенной зоны:

$$n_{ib}^2(x) = \gamma n_{i0}^2 \cdot \exp\left(\frac{\Delta E_{gb}^{app}}{kT}\right) \cdot \exp\left(\frac{\Delta E_{g,Ge}(grade)}{kT} \frac{x}{W_b}\right) \cdot \exp\left(\frac{\Delta E_{g,Ge}(0)}{kT}\right).$$

Использование кремний-германия в качестве материала базы позволяет контролируемо уменьшать потенциальный барьер эмиттерного перехода на $\Delta E_g(0)$ и создавать градиент ширины запрещенной зоны в базе транзистора $\Delta E_g(grade)/W_b$ (рис.2), увеличивая тем самым собственную концентрацию носителей и, как следствие, увеличивая коэффициент усиления по току:

$$\frac{\beta_{SiGe}}{\beta_{Si}} = \tilde{\gamma} \tilde{\eta} \frac{\Delta E_{g,Ge}(grade)}{kT} \cdot \exp\left(\frac{\Delta E_{g,Ge}(0)}{kT}\right) \cdot \left[1 - \exp\left(-\frac{\Delta E_{g,Ge}(grade)}{kT}\right)\right]^{-1}$$

и уменьшая время пролета носителей через базу:

$$\frac{\tau_{b,SiGe}}{\tau_{b,Si}} = \frac{2}{\tilde{\eta}} \frac{kT}{\Delta E_{g,Ge}(grade)} \left[1 - \frac{kT}{\Delta E_{g,Ge}(grade)} \left(1 - \exp\left(-\frac{kT}{\Delta E_{g,Ge}(grade)}\right)\right)\right]$$

по сравнению со стандартным кремниевым БТ.

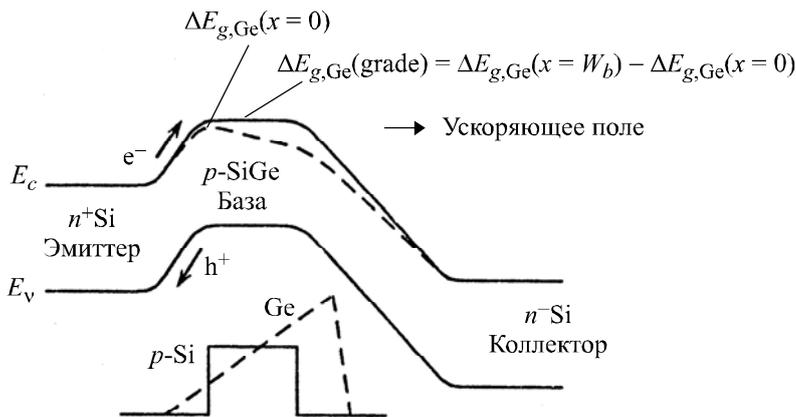


Рис.2. Зонная диаграмма, иллюстрирующая уменьшение потенциального барьера эмиттерного перехода и наличие «наклонной базы» в структуре SiGe ГБТ

Кроме того, для дополнительного увеличения быстродействия базу SiGe ГБТ часто легируют сильнее, чем базу обычного Si БТ, уменьшая тем самым ее сопротивление. Однако за счет высокой концентрации примеси в базе появляется дополнительная составляющая тока рекомбинации.

При расчете схем, содержащих SiGe ГБТ, желательно, чтобы используемая модель транзистора учитывала эти эффекты. Модели Гуммеля–Пуна и VBIC их не учитывают.

Модель Mextram 504 с точки зрения моделирования статических ВАХ SiGe ГБТ отличается от стандартной модели Гуммеля–Пуна наличием двух дополнительных параметров X_{rec} и dE_g . Параметр X_{rec} добавляется в выражение для тока базы и характеризует дополнительную рекомбинацию носителей в SiGe базе:

$$I_{B1} = \frac{I_S}{\beta_f} \left(e^{V_{B2E1}/V_T} - 1 \right) \left(1 + X_{rec} \frac{V_{tC}}{V_{ef}} \right).$$

Параметр dE_g вводится в модернизированное выражение для числа Гуммеля

$$\frac{G_B}{G_{B0}} = \frac{\exp\left[\left(\frac{V_{tE}}{V_{er}} + 1\right) \frac{dE_g}{kT}\right] - \exp\left(\frac{-V_{tC}}{V_{ef}} \frac{dE_g}{kT}\right)}{\exp\left(\frac{dE_g}{kT}\right) - 1}$$

для описания влияния градиента концентрации германия в базе на ток коллектора:

$$I_C = I_S \left(e^{V_{BE}/V_T} - e^{V_{BC}/V_T} \right) \frac{G_{B0}}{G_B}.$$

В модели HICUM ток коллектора транзистора

$$i_T = \frac{I_S Q_{p0}}{Q_{p,T}} \left[\exp\left(\frac{V_{BE}}{V_T \cdot MCF}\right) - \exp\left(\frac{V_{BC}}{V_T \cdot MCF}\right) \right]$$

определяется суммарным зарядом в базе $Q_{p,T}$:

$$Q_{p,T} = Q_{p0} + h_{jEi} Q_{jEi} + h_{jCi} Q_{jCi} + Q_{f,T} + Q_{r,T}.$$

Для описания влияния градиента концентрации германия в базе на ток коллектора в выражение для весового коэффициента h_{jCi} введен параметр α_G :

$$h_{jCi} = \exp\left(-\frac{\alpha_G w_{B0}}{V_T}\right).$$

Для учета изменений подвижности и собственной концентрации электронов в базе, связанных с наличием германия в базе SiGe ГБТ, в выражение для нормированного заряда неосновных носителей $Q_{jT} = Q_{j0} + h_{jE} \Delta Q_{Ef} + \Delta Q_{Bf} + h_{jC} \Delta Q_{Cf}$ включены весовые коэффициенты:

$$h_{jE} = \frac{\overline{\mu_{nB} n_{iB}^2}}{\mu_{nE} n_{iE}^2}, \quad h_{jC} = \frac{\overline{\mu_{nB} n_{iB}^2}}{\mu_{nC} n_{iC}^2}.$$

Динамические эффекты. Емкости p - n -переходов, времена пролета.

Учет динамических эффектов особенно важен для сверхбыстродействующих транзисторов, в том числе для SiGe ГБТ. К динамическим параметрам относятся барьерные и диффузионные емкости p - n -переходов, времена пролета носителями заряда эмиттерной, базовой и коллекторной областей транзистора, дополнительный сдвиг фазы переменного тока коллектора, определяющий собственную задержку коэффициента передачи тока, а также паразитные емкости транзисторной структуры.

С точки зрения моделирования барьерных емкостей p - n -переходов модели практически не отличаются, а основное выражение для барьерной емкости имеет вид

$$C = \frac{C_J}{(1 - V/V_d)^P},$$

где C_J – емкость перехода при нулевом смещении; V_d – встроенный потенциал; P – коэффициент крутизны ВФХ.

Небольшое отличие имеет место в модели Mextram 504, где для улучшения точности описания барьерной емкости коллекторного p - n -перехода в режиме квазинасыщения коллектора введена дополнительная зависимость емкости от тока I_{epi} .

В модели HICUM значения барьерной емкости коллекторного p - n -перехода в области средних и больших токов корректируются введением соответствующих коэффициентов.

При моделировании диффузионных емкостей и времен пролета между моделями наблюдаются существенные отличия.

В модели Гуммеля–Пуна диффузионный заряд на p - n -переходе база-эмиттер Q_{BE} является функцией суммарного времени пролета электронами всех областей транзистора в нормальном активном режиме τ_{FF} :

$$Q_{BE} = \tau_{FF} \frac{I_f}{q_B},$$

где I_f – ток, текущий через транзистор в нормальном активном режиме,

$$\tau_{FF} = TF \left(1 + XTF \left(\frac{I_f}{I_f + ITF} \right)^2 \cdot \exp \left(\frac{V_{BC}}{1.44 \cdot VTF} \right) \right), \quad (2)$$

где TF – идеальное суммарное время пролета электронами всех областей транзистора в нормальном активном режиме; XTF, VTF, ITF – параметры, определяющие зависимость TF от напряжения смещения и прямого тока.

В модели VBIC выражение для τ_F модифицировано с учетом влияния эффекта Эрли на время пролета носителей через базу, для чего в выражение (2) введен заряд q_1 :

$$\tau_F = TF(1 + QTF \cdot q_1) \left(1 + XTF \left(\frac{I_f}{I_f + ITF} \right)^2 \cdot \exp \left(\frac{V_{BC}}{1.44 \cdot VTF} \right) \right).$$

Параметр QTF определяет долю времени, потраченную на пролет через базу от общего времени пролета через всю структуру транзистора.

В модели Mextram 504 каждое из времен пролета носителей заряда через базовую, эмиттерную и коллекторную области описывается своим отдельным параметром τ_B , τ_E , и τ_{epi} соответственно. Такой подход позволяет точнее моделировать динамическую работу транзистора. Как следствие, в модели Mextram 504 диффузионные заряды определяются раздельно:

$$\begin{aligned} & \text{- для базы} & Q_{BE} &= 2q_1 \tau_B I_f / (1 + \sqrt{1 + 4I_f / I_K}); \\ & & Q_{BC} &= 2q_1 \tau_B I_r / (1 + \sqrt{1 + 4I_r / I_K}); \\ & \text{- для эмиттера} & Q_E &= \tau_E I_S e^{V_{B_2E_1} / m \tau V_T}; \\ & \text{- для коллектора} & Q_{epi} &\cong \tau_{epi} \left(\frac{x_i}{W_{epi}} \right)^2 I_{epi}. \end{aligned}$$

В модели HICUM выражение для времени пролета носителей через структуру транзистора имеет вид

$$\tau_f = \tau_{f0} + \Delta\tau_{ef} + \Delta\tau_{fh},$$

где $\tau_{f0} = f(V_{B'C'})$ – постоянная времени пролета из эмиттера в коллектор при низких уровнях тока, зависящая только от напряжения на коллекторном p - n -переходе $V_{B'C'}$;

$\Delta\tau_{ef} = \tau_{ef0} \left(\frac{i_{TF}}{I_{CK}} \right)^{g_{\tau E}}$ – дополнительное время пролета через нейтральную область эмиттера, появляющееся при средних и высоких уровнях тока (τ_{ef0} – постоянная времени в нейтральной области эмиттера, $g_{\tau E}$ – показатель степени);

$\Delta\tau_{fh} = \Delta\tau_{Bf} + \Delta\tau_{Cf} = \tau_{hcs} w^2 \left[1 + 2 \frac{i_{TF}}{I_{CK}} \sqrt{\left(1 - \frac{I_{CK}}{I_{TF}} \right)^2 + a_{hc}} \right]$ – дополнительная составляющая времени пролета через базу и коллектор, появляющаяся при высоких плотностях тока (τ_{hcs} – постоянная времени насыщения при высокой плотности тока; a_{hc} – сглаживающий коэффициент; w – безразмерный параметр, учитывающий изменение ширины базы; I_{CK} – критический ток, характеризующий большие плотности тока).

Таким образом, в моделях Mextram 504 и HICUM используются параметры, описывающие времена пролета через каждую область транзистора отдельно.

Паразитные емкостные эффекты. Модели VBIC, Mextram 504 и HICUM содержат дополнительные параметры для описания паразитных емкостей биполярного транзистора, не зависящих от приложенных смещений: внутренних емкостей перекрытия база–эмиттерный контакт, база–эмиттер, база–коллектор, внешних паразитных емкостей перекрытия поликремниевых контактов к эмиттерной, коллекторной и базовой областям (см. рис.3 и 4) и паразитных емкостей между металлическими электродами.

Учет влияния этих паразитных емкостей становится важным при описании частотных характеристик в СВЧ-диапазоне и переходных процессов длительностью в единицы пикосекунд.

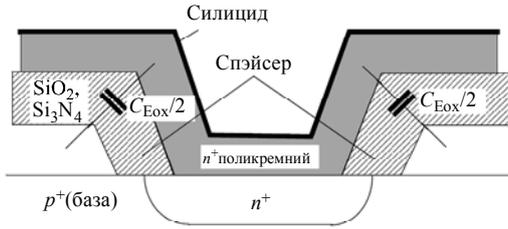


Рис.3. Паразитная емкость перекрытия базовый контакт – эмиттерный контакт

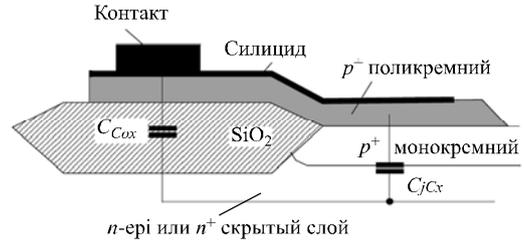


Рис.4. Паразитная емкость перекрытия базовый контакт – коллектор

В эквивалентную схему модели VBIC (рис.1,б) введены дополнительные емкости Q_{BCp} и Q_{BEp} , которые учитывают только паразитные емкости перекрытия поликремниевых слоев.

В модели Mextram 504 в эквивалентную схему (рис.1,в) входят дополнительные элементы C_{BE0} и C_{BC0} , включающие в себя сумму внутренних и внешних паразитных емкостей транзисторной структуры.

В модель HICUM также включены как внутренние, так и внешние паразитные емкости. Однако в эквивалентной схеме (рис.1,г) внутренние C_{BEpar2} , Q_{BCx2} и внешние C_{BEpar1} , Q_{BCx1} составляющие паразитных емкостей представлены отдельными конденсаторами.

Для оценки точности различных моделей при описании SiGe ГБТ и удобства работы с ними была проведена экстракция параметров различных моделей для реального SiGe ГБТ с эмиттером $0,32 \times 16,8$ мкм, разработанного IBM [8]. Наборы параметров каждой из моделей для SiGe ГБТ определялись из экспериментальных данных с использованием методик, рекомендованных разработчиками моделей [2, 9–11]. Результаты моделирования основных характеристик транзистора показаны на рис.5–7, а затраты машинного времени на их расчеты приведены в таблице.

Сравнение современных моделей БТ

Показатели модели	GP	VBIC	HICUM	Mextram 504
Количество параметров	65	86	114	75
Совместимость с моделью GP	–	Да	Нет	Да
Время расчета входной характеристики, с	0,06	0,07	0,06	0,08
Время расчета выходной характеристики, с	0,21	0,27	0,77	0,26
Время расчета F_t , с	51,79	99,36	64,71	93,25
Время расчета переходных процессов в 4-транзисторной ячейке памяти, с	0,52	0,99	1,81	2,53
Учет эффектов SiGe	Нет	Нет	Да	Да
Учет паразитных динамических эффектов	Нет	Частично	Да	Да

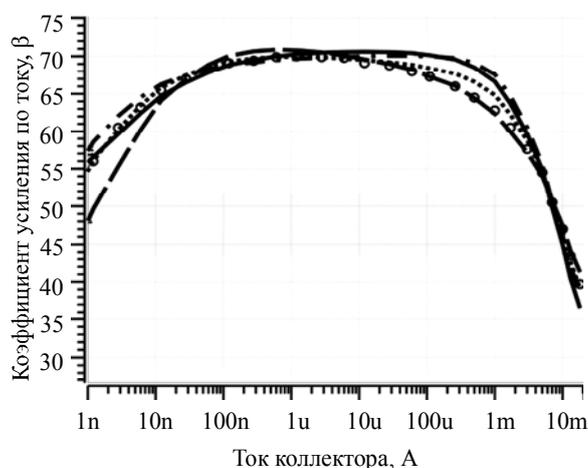


Рис.5. Зависимость коэффициента усиления от тока коллектора: - - - - VBIC95; — — — Mextram 504; - - - - HICUM; — — — GP

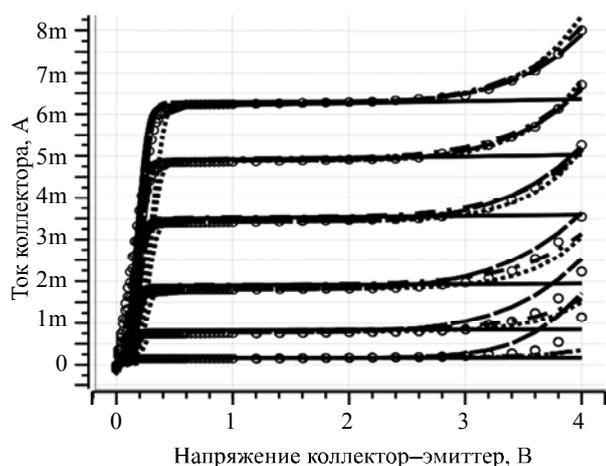


Рис.6. Выходные характеристики: - - - - VBIC95; — — — Mextram 504; - - - - HICUM; — — — GP

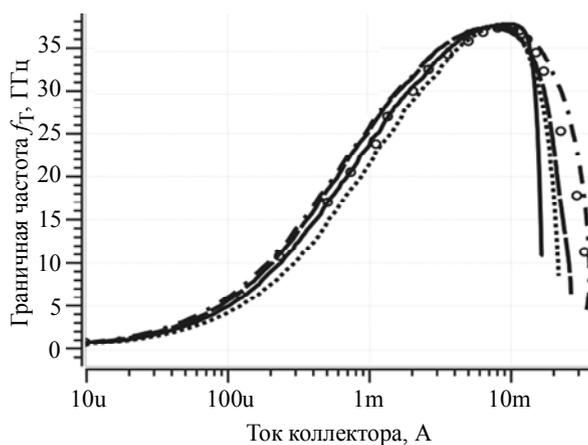


Рис.7. Зависимость граничной частоты от тока коллектора: - - - - VBIC95; — — — Mextram 504; - - - - HICUM; — — — GP

Из сравнения характеристик рис.5–7, полученных с помощью различных моделей, с экспериментальными значениями в широком диапазоне рабочих токов и напряжений, можно сделать следующие выводы. Модель Гуммеля–Пуна не учитывает многие эффекты, имеющие место в SiGe ГБТ, и ее использование может привести к серьезным неточностям при расчете статических и динамических характеристик. По сравнению с ней, модель VBIC точнее описывает поведение биполярных транзисторов, особенно их статических характеристик.

К преимуществам модели VBIC можно также отнести возможность получения набора основных параметров модели путем конвертации их из набора Гуммеля–Пуна. Однако, по оценкам специалистов, модель VBIC применима в основном для обычных гомопереходных БТ с граничными частотами f_T менее 30 ГГц.

Только модели HICUM и Mextram 504 обеспечивают достаточно высокую точность описания характеристик современных SiGe ГБТ и перспективны для моделирования приборов с граничной частотой f_T до 200–230 ГГц. Однако модель HICUM разрабатывалась первоначально как универсальная модель, пригодная для описания сильноточных транзисторов. Как следствие, она содержит слишком большое количество параметров – 114, часть из которых является избыточной при описании SiGe ГБТ. При этом набор параметров кардинально отличается от набора модели Гуммеля–Пуна, вследствие чего разработчику требуется значительное время на освоение как самой модели, так и методики экстракции ее параметров, что является серьезным недостатком.

Mextram 504 имеет привычный для разработчиков набор основных параметров (как у Гуммеля–Пуна) и обеспечивает корректное описание всех важных для SiGe ГБТ эффектов [12]. Меньшее количество параметров – 75 и относительная простота работы с моделью Mextram 504 позволяют сделать вывод о предпочтительности ее использования при моделировании схем на основе SiGe ГБТ.

Литература

1. Self Aligned SiGe NPN Transistors with 285-GHz f_{MAX} and 207-GHz f_T in a Manufacturable Technology / **B. Jagannathan, M. Khater, F. Pagette et al.** // IEEE Elect. Dev. Lett. – 2002. – Vol. 23. – P. 258–260.
2. **Antognetti P., Massobrio G.** Semiconductor device modeling with SPICE, - McGraw-Hill, 1988. – P.389.
3. VBIC95, the Vertical Bipolar Inter-Company Model / **C.C. McAndrew, J.A. Seitchik, D.F. Bowers et al.** // IEEE Journal of Solid-State Circuits. – 1996. – Vol. 31, N 10. – P. 1476–1483.
4. <http://www.semiconductors.philips.com/models/>.
5. www.iee.et.tu-dresden.de/iee/eb/comp_mod.html
6. <http://www2.fhtesslingen.de/institute/iafgp/neu/VBIC/documents/VbicText.pdf>
7. Si/SiGe epitaxial-base transistors – part I: materials, physics and circuits / **Harambe D.L., Comfort J.H., Cressler J.D. et al.** // IEEE Trans. on Electron Devices. – 1995. – Vol.42, N 3. – P.455–468.
8. **Sheridan D., Murty M.R., Ansley W., Harambe D.** IBM Bipolar Model Standartization: VBIC-MEXTRAM-HICUM // Proc. of CMC, 2002.
9. Parameter Extraction and Optimization for New Industry Standard VBIC Model / **X. Cao, J.McMacken, K. Stiles et al.** // Proc. 2nd International Conference ASDM (Slovakia. – oct. 1998). – 1998. – P. 107–115.
10. **Paasschens J.S.J., Cloosterman W.J., Havens R.J.** Parameter Extraction for the Bipolar Transistor Model Mextram Level 504 // Unclassified Report NL-UR 2001/801, Phillips Nat.Lab., 2001.
11. **D. Berger, D. Cell, M. Schroter et al.** // in Proc. ВСТМ. – 2002. – P.116–119.
12. **Петросянец К.О., Торговников Р.А.** Использование модели Mextram 504 для расчета сверхбыстродействующих ИС на SiGe гетеробиполярных транзисторах // Сб. «Электроника, микро- и нанoeлектроника». – МИФИ, 2006. – С. 20–24.

Петросянец Константин Орестович – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой электроники и электротехники, декан факультета автоматики и вычислительной техники МИЭМ. *Область научных интересов:* моделирование полупроводниковых приборов и элементов БИС, САПР элементной базы ЭВА и РЭА.
Торговников Ростислав Александрович – аспирант кафедры электроники и электротехники МИЭМ. *Область научных интересов:* моделирование полупроводниковых приборов и элементов БИС.

Информация для читателей журнала «Известия высших учебных заведений. Электроника»

С тематическими указателями статей за 1996 - 2005 гг.
и с содержанием последних номеров можно ознакомиться
на нашем сайте:

<http://www.miet.ru/static/je/os.html>

ПРОБЛЕМЫ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ

УДК 53:[001+002.2]

Школа А.Ф.Иоффе как пример единства науки, образования и производства

Д.А.Усанов

Саратовский государственный университет

Рассмотрены основные признаки, характеризующие научную школу А.Ф.Иоффе. Описана предложенная Иоффе и внедренная им в практику концепция естественно-научного и технического образования. Изложены взгляды Иоффе на исследования по междисциплинарным научным направлениям на стыке различных научных дисциплин, на изобретательскую деятельность ученых и инженеров. Отмечается близость принципов, заложенных в основу школы Иоффе, идеям и технологиям современной рыночной, инновационной экономики.

В 2005 г. исполнилось 125 лет со дня рождения академика А.Ф.Иоффе.

Роль А.Ф. Иоффе в развитии физики подробно освещалась еще при его жизни, начало творческого периода которой совпало с революцией в физике, связанной с зарождением и становлением квантовой механики, квантовой теории твердого тела, ядерной физики, физики полупроводников и других научных направлений современной физики. Читая воспоминания об Иоффе, написанные его биографами и многочисленными учениками [1–4], невольно обращаешь внимание на то, что в качестве главного достижения его жизни выступают не только и не столько полученные им лично многочисленные блестящие научные результаты, а и формирование целых поколений научной школы Иоффе. Из этой школы вышло более десяти академиков АН СССР (А.П.Александров, А.И.Алиханов, Л.А.Арцимович, П.Л.Капица, И.К.Кикоин, Ю.Б.Кобзарев, Г.В.Курдюмов, И.В.Курчатов, Л.Д.Ландау, П.П.Лукирский, Н.Н.Семенов, В.М.Тучкевич, Ю.Б.Харитон и др.). Не случайно очерк об А.Ф.Иоффе, вошедший в число популярных очерков в сборник о наиболее выдающихся ученых в области физики, называется «Основатель советской школы физиков». Нобелевский лауреат академик Н.Н.Семенов в сборнике «Воспоминания об А.Ф.Иоффе» пишет: «Я думаю, что во все времена ни у одного народа не было физика, который бы, подобно Иоффе, вырастил такое огромное число крупных ученых из своих учеников». Один из его учеников – С.Е.Бремер основной жизненной миссией, которую выполнил Иоффе, называет «создание первой русской школы физики и подъем нашей физики от почти нулевого уровня до уровня современной передовой науки». Повторяя слова Н.Н.Семенова, опубликованные им в статье «А.Ф.Иоффе и его школа», посвященной столетию со дня его рождения, можно сказать, что школа Иоффе продолжает развиваться и сейчас через учеников его учеников. Характеризуя школу А.Ф.Иоффе, Ф.Ф.Волькенштейн называет ее наиболее обширной, быстро растущей и новаторской.

© Д.А. Усанов, 2006

Начальный период становления школы Иоффе совпал со сменой общественного строя в России. В царской России практически вся исследовательская работа велась при кафедрах высших учебных заведений. Советская власть поддержала инициативу ученых по созданию ряда научных учреждений. В 1918 г. по предложению Иоффе в Петрограде был создан физико-технический отдел во вновь организованном рентгенологическом и радиологическом институте. В 1923 г. этот отдел был реорганизован в Физико-технический институт (ФТИ). Отметим, что институты создавались несмотря на существующую в стране разруху, голод, гражданскую войну. Свою научную деятельность Иоффе сочетал с педагогической. В 1906 г. он начал работать в Петербургском политехническом институте, в 1913 г. он стал профессором, а в 1919 г. был избран деканом созданного по его инициативе физико-механического факультета. Опыт взаимоотношений государства, науки, образования и производства в этот период несомненно актуален и для нашего времени, когда в России произошла очередная смена экономической и общественно-политической формации, когда вновь стоит вопрос о путях развития российской науки, образования, экономики. Конечно же наиболее ценным из этого опыта является то, что создало почву для успеха отечественной науки и образования того времени и, в частности, школы Иоффе. В сфере интересов современного российского государства сегодня – необходимость сохранения и развития научных школ. Не случайно на государственном уровне действуют программы поддержки ведущих научных школ и научно-педагогических коллективов.

Какой же видели «школу Иоффе» его ученики? Вот что писали об этом А.Р.Регель и Л.С.Стильбанс: «...основными признаками школы, как впрочем и любого другого творческого объединения, является единство образа мыслей, единство целей и единство действий. Школа – это не маленькая или большая группа эпигонов, повторяющих то, что в основном сделал их учитель, а коллектив, соединенный одинаковым отношением к своей специальности, к людям и жизни». Секрет успеха школы Иоффе во многом определялся его позицией по отношению к взаимосвязи между фундаментальными и прикладными аспектами науки, по поддержанию в коллективе баланса между теорией и практикой, его постоянному желанию проложить «мост» между ними, доводить исследования до их глубокого понимания, с одной стороны, и внедрения в народное хозяйство – с другой.

Близкое понимание сути естественно-научной школы высказывал Н.Н.Семенов. Он считал, что «под школой надо понимать воспринятый от учителя метод мышления и подхода к научному исследованию природы». По словам А.Р.Регеля и Л.С.Стильбанса «не было физика, который понимал бы значение теории лучше, чем Абрам Федорович, но он мало интересовался абстрактной теорией, оторванной от эксперимента, от реальной картины физических явлений».

Такая позиция нашла свое выражение как в научной, так и в педагогической деятельности Иоффе. Значение такой позиции особенно важно отметить сегодня, когда в силу различных причин, по мнению многих ученых, реальный эксперимент стал вытесняться из научной и педагогической практики виртуальным, численным. Иоффе, как писал один из его учеников В.Н.Кондратьев, поставил задачу привить будущим ученым и инженерам глубокие знания теории в тесном сочетании с актуальными задачами практики. Студенты на физико-механическом факультете Петроградского политехнического института сочетали учебу с занятиями наукой в лабораториях физико-технического института (ФТИ), общались с преподавателями в учебных аудиториях и научных лабораториях.

«Знания должны приобретаться параллельно с разработкой изобретений, с исследовательской работой», – писал Иоффе в своей автобиографической статье «Моя жизнь и работа» [5].

Такая обстановка способствовала быстрому росту молодых ученых, достижению высоких темпов и высокого качества научной работы.

Выпускники физико-механического факультета должны были изучить достижения современной физики и одновременно освоить основы материаловедения и конструирования. Важной составляющей обучения было решение задач по физике, математике и механике. По мнению Н.Н.Семенова такая система обучения привела к поразительным успехам. Дипломные работы студентов представляли собой, как правило, законченные научные работы, которые обычно печатались в наших, а иногда и в зарубежных журналах. Многих преподавателей Иоффе привлекал для работы в ФТИ. Он считал, что такой подход приведет к тому, что техники будут лучше понимать физику, а физики будут считать одной из своих задач не только развитие «академической» науки, но и применение ее достижений в промышленности. Именно поэтому Иоффе назвал свой институт не физическим, а физико-техническим. По свидетельству А.Ф.Чудновского Иоффе считал, что научная и преподавательская работа дополняют друг друга и способствуют формированию широко образованного физика. Он много раз повторял, что чтение лекций развивает важную для ученого способность концентрированно и последовательно излагать мысли, шлифует язык изложения, способствует формированию логического и стройного мышления. Отметим, что в последующем введенная Иоффе модель обучения получила распространение в масштабах страны, и, по-видимому, именно с такой концепцией отечественного естественно-научного и технического образования связаны общепризнанные его успехи.

Когда к концу 20-х – началу 30-х годов число научных работников в ФТИ превысило 500, Иоффе приступил к созданию сети таких институтов в масштабах страны. В 1929 г. был создан Харьковский ФТИ, затем при непосредственном участии Иоффе такие институты были организованы в Днепропетровске, Томске, Свердловске и в других промышленных центрах. Всего было создано 16 институтов. Сам ФТИ в 1930 г. был разделен на три отдельных института: ФТИ, директором которого остался Иоффе, электрофизический институт, который возглавлял А.А.Чернышов, и институт химической физики во главе с Н.Н.Семеновым. Впоследствии еще ряд лабораторий ФТИ по мере развития трансформировались в институты. Так, в частности, возник Институт атомной энергии, который возглавил ученик Иоффе И.В.Курчатов. В 1972 г. из ФТИ выделился Институт ядерной физики. В таком выделении из ФТИ новых институтов, научное направление работ в которых относилось к одной из физических проблем, можно увидеть движение по пути все большей специализации научных исследований. Отражением этого процесса в системе профессионального образования было открытие узкопрофильных учебных заведений, увеличение числа специальностей, по которым велась подготовка молодых специалистов. То обстоятельство, что именно ФТИ являлся первоначальным источником зарождения ряда таких институтов было связано с необычайной широтой фронта научных исследований, организованных Иоффе, его разносторонними научными интересами и, наконец, стремлением как можно шире использовать достижения физики в различных отраслях народного хозяйства. Так, например, Иоффе постоянно выступал против отсталости в приборостроении, предназначенном для сельского хозяйства, и связанного с этим слабого контроля за производством сельскохозяйственной продукции. «В сельском хозяйстве физические методы исследования и контроля практически отсутствуют... А между тем необходимость участия физики в

сельскохозяйственном производстве понимали передовые русские агрономы еще в XVIII в.», – писал он в 1955 г. [6]. Нет необходимости доказывать, что такая постановка вопроса актуальна и сегодня.

В 1932 г. по инициативе Иоффе в Ленинграде был организован Агрофизический институт. По воспоминаниям И.Б.Ревута идею его создания поддержал Н.И.Вавилов, который был своего рода учредителем этого института и главным консультантом Иоффе по вопросам биологии. А.Ф.Иоффе считают основателем советской школы агрофизиков. Он связывал с применением достижений физики в сельском хозяйстве открытие огромных перспектив. И.Б.Ревут писал о предсказании Иоффе крупнейших открытий в области биологии на основе достижений точных наук. Прогресс в развитии народного хозяйства вообще и сельского хозяйства в частности Иоффе связывал с развитием энергетики. Под его руководством были выполнены работы по уменьшению расхода жидкого топлива в сельском хозяйстве, давшие государству многомиллионную экономию.

Лаборатория в ФТИ, в которой велись исследования по биофизике, впоследствии выросла в Институт биофизики АН СССР.

Деятельность Иоффе в области агрофизики и биологии можно считать яркой иллюстрацией плодотворности исследований на стыке различных научных дисциплин по междисциплинарным научным направлениям. Отметим, что именно междисциплинарность является ключевым моментом концепции фундаментализации современного университетского образования. По свидетельству Ф.Ф.Волькенштейна интерес к проблемам, находящимся на стыке физики с другими науками, – характерная черта Иоффе. Он называл такие проблемы многообещающими, и в то же время, в силу сложившихся исторических причин, – наиболее медленно развивающимися.

А.Ф.Иоффе считал необходимым введение в обиход медицины всего арсенала физических методов исследования. Именно поэтому он приветствовал основание в 1921 г. во главе с известным врачом-рентгенологом М.И.Неменовым Государственного рентгенологического института. Отметим, что «медицинская физика» как учебная специальность в вузах России получила право на существование лишь в 90-е годы.

Ю.А.Храмов в биографическом справочнике, посвященном физикам, написал об А.Ф.Иоффе: «Особенно значительный вклад им был сделан в физику и технику полупроводников».

А.Р.Регель и Л.С.Стильбанс, ссылаясь на статью А.Ф.Иоффе «Полупроводники – новый материал электротехники», опубликованную им в 1931 г. в журнале «Советская физика» (Социалистическая реконструкция и наука), говорят о предсказании Иоффе более чем за 20 лет до того, как это было понято научным сообществом, огромного значения полупроводников для технического прогресса. Н.Н. Семенов высказывал мнение о том, что А.Ф. Иоффе следует считать первым в мире открывателем полупроводимости, широко поставившим эту научную проблему и получившим в этой области основные принципиальные результаты. Экспериментально необычные свойства материалов, впоследствии отнесенных к полупроводникам, были установлены еще М. Фарадеем в 1833 г., однако для понимания этих свойств потребовалось использовать достижения квантовой механики, а для их успешного применения – физики твердого тела, радиотехники, радиофизики, оптики, химии, материаловедения и ряда других физических и инженерных дисциплин. В этом отношении физика полупроводников относится к науке, синтезировавшей в себе достижения целого ряда научных дисциплин. Отметим, что это одно из наиболее динамично развивающихся научных направлений, из которого выросли такие его разделы, как опто-, микро- и нанoeлектроника. Именно с нанотехно-

логиями и нанoeлектроникой связывают наиболее перспективные применения физики в XXI в. Школе Иоффе принадлежит объяснение основного классификационного признака полупроводника – особого характера температурной зависимости его электропроводности, открытие квазичастицы – экситона, установление полупроводниковых свойств у соединений типа $A^{III}B^V$, и, наконец, именно в ФТИ имени А.Ф.Иоффе Ж.И.Алферовым была впервые показана возможность создания полупроводниковых лазеров, работающих при комнатной температуре.

В странах с развитой рыночной экономикой реализуется сегодня так называемая инновационная модель развития, базовым и начальным звеном которой является создание изобретений, имеющих перспективу использования в качестве продукта рынка. С такой моделью связаны соответствующая модернизация профессионального образования и требования, предъявляемые государством к направленности научных исследований. Иоффе писал: «Нужно вовлечь в общий план научной работы широко развернутое рабочее изобретательство, а рабочий-изобретатель должен стать основным ядром научных кадров» [5]. Понимание Иоффе значимости такого направления деятельности ученых и инженеров хорошо иллюстрируется личной поддержкой Иоффе создателей наиболее значимых изобретений и открытий того времени. По свидетельству М.М. Бредова, Иоффе активно поддержал работы Ю.Б.Кобзарева по созданию радиолокации, спасавшей Ленинград от вражеских налетов уже в 1939 г., вопреки резкой их критике со стороны многих специалистов. Иоффе лично способствовал присуждению степени кандидата наук без защиты диссертации автору пионерских изобретений в области полупроводниковой электроники О.В.Лосеву, формально не завершившему в свое время обучение в университете. Иоффе представил для опубликования в Докладах академии наук СССР статьи О.В.Лосева, посвященные открытому им явлению свечения карборундовых детекторов при прохождении через них тока, впоследствии названному электролюминесценцией и тем способствовал установлению приоритета отечественной науки в этом вопросе. По свидетельству Е.Ф.Гросса, Иоффе был среди немногих ученых, которые заинтересовались, сразу поняли и поддержали его пионерские работы по обнаружению спектра экситонов, признанные впоследствии научным открытием.

Можно привести еще много подобных примеров. Вся деятельность школы Иоффе и его самого является блестящим примером инновационной деятельности в современном ее понимании. Одной из истин современной рыночной экономики является рискованный (венчурный) характер инноваций. Увлеченный перспективами, открывающимися при внедрении разрабатываемых им идей, Иоффе далеко не всегда мог реализовать их в устанавливаемые в условиях плановой экономики сроки и тем самым навлекал на себя нарекания и упреки [7]. Еще одно затруднение, с которым он постоянно встречался, состояло, по свидетельству Я.Г.Дорфмана, в том, что даже выдающиеся представители промышленности редко могли сформулировать крупные перспективные проблемы и ограничивались запросами, связанными с повседневными сиюминутными задачами производства, нацеленными не на создание принципиально новых разработок, а лишь на улучшение уже существующих изделий. Нет нужды доказывать, что в подавляющем числе случаев подобная ситуация характерна и для настоящего времени. Такая ситуация скорее всего связана с отсутствием достаточной системы поддержки и стимулов для инновационной деятельности как во время, когда работал Иоффе, так и в сегодняшние дни, когда рыночные технологии в России находятся все еще в стадии формирования. Именно с неоправдавшимися надеждами, возлагавшимися Иоффе на результаты некоторых проектов, связывал в биографическом очерке о нем В.Я.Френкель его вынужденный уход в 1950 г. с поста директора ФТИ и переход в 1952 г. на пост руко-

водителя вновь организованной Лаборатории полупроводников Академии наук СССР, в 1955 г. преобразованной в возглавленный им Институт полупроводников АН СССР – последний из организованных им институтов. Заслуги и достижения школы Иоффе в физике полупроводников отмечали в своих нобелевских лекциях Дж. Бардин и Ж. Алферов.

Анализируя опыт, накопленный за многие годы существования школы Иоффе, сформированные в рамках этой школы подходы к путям развития науки и образования в нашей стране, способы преодоления трудностей, характерных для этой сферы деятельности, можно найти ответы на наиболее острые вопросы многочисленных дискуссий, ведущихся и сегодня, и избежать ошибочных решений и выборов, возможность которых нельзя исключить во времена резких общественных перемен, сформулировать своего рода практические рецепты по принятию неизбежных мер по модернизации, доставшейся в наследство формирующемуся строю системы взаимоотношений между наукой, образованием и производством. Опыт школы Иоффе в этом отношении может представлять наибольший интерес, так как многие принципы, заложенные в основу именно этой школы, по-видимому, наиболее близки к идеям и технологиям современной рыночной, инновационной экономики.

Литература

1. *Макеева Г.П., Медведев П.Е.* Рассказы о физиках. – Минск: Высшая школа, 1966. – 379 с.
2. Воспоминания об А.Ф.Иоффе. Сборник статей. – Л.: Наука, 1972. – 252 с.
3. Проблемы современной физики. Сборник статей. – Л.: Наука, 1980. – 587 с.
4. *Храмов Ю.А.* Иоффе Абрам Федорович. В кн.: Физики: биограф. справочн. (под ред. А.И. Ахиезера). – М.: Наука, 1983. – 400 с.
5. *Иоффе А.Ф.* О физике и физиках. – Л.: Наука, 1977. – 260 с.
6. *Иоффе А.Ф.* Физика и сельское хозяйство. – М., Л.: Изд-во АН СССР, 1955. – 32 с.
7. *Френкель В.Я.* Новые материалы об обсуждении в Физико-техническом институте старой проблемы взаимоотношения фундаментальных и прикладных исследований. Сборник статей. «Чтения памяти А.Ф.Иоффе». – СПб.: Наука, 1993. – С. 178–186.

Усанов Дмитрий Александрович – доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой физики твердого тела, проректор по научной работе СГУ. *Область научных интересов:* твердотельная электроника СВЧ, радиоволновые и оптические методы контроля, применение нелинейной динамики в полупроводниковой электронике.

ЮБИЛЕИ

Неустроеву Степану Архиповичу – 80 лет



28 июля 2006 г. исполнилось 80 лет профессору, доктору технических наук, ученому в области плазмохимических процессов микроэлектроники Неустроеву Степану Архиповичу.

Свою трудовую деятельность Неустроев С.А. начал на заводе станочником в 1942 г. на Урале. После окончания Уральского политехнического института работал в системе Министерства среднего машиностроения на заводе инженером. Разработанные с его участием технологические процессы и аппараты были внедрены в производство, подготовлена и защищена кандидатская диссертация (1963 г.). Работа была продолжена в НИИ точного машиностроения в г. Зеленограде, а с 1969 г. в Московском институте электронной техники.

По инициативе Неустроева С.А. в НИИТМ впервые для разложения летучих элементоорганических соединений с целью получения твердых покрытий и химически активных частиц была применена плазма газового ВЧ-разряда. Были разработаны плазмохимические установки для осаждения пленок диэлектриков, травления фоторезистов,

кремния и его соединений, металлов, которыми в последующем была оснащена электронная промышленность. Работая на кафедре специальных материалов электроники МИЭТ, Неустроев С.А. продолжил исследование плазмохимических процессов, а также принимал участие во внедрении разработанных установок в операциях герметизации и формирования многоуровневой разводки ИС, травления кремния для тренчерной изоляции, удаления фоторезиста и др. Итогом этих исследований была защита докторской диссертации в 1974 г. Результаты исследований были использованы в учебном пособии «Плазмохимические процессы в электронике», курс по которому читался автором в МИЭТ более 20 лет.

Профессор Неустроев С.А. ведет большую научно-педагогическую и организационную работу, являясь с 1973 г. ученым секретарем Ученого совета МИЭТ, членом двух диссертационных советов. Неустроев С.А. автор 350 научных трудов, в том числе 37 изобретений и патентов, за участие в конкурсе научных работ Минвуза СССР получено 2 медали. Им подготовлены 24 кандидата и три доктора наук.

Трудовая деятельности Неустроева С.А. высоко оценена – он награжден медалью «За доблестный труд в Великой Отечественной Войне 1941-45 гг.» и др. За многолетнюю учебно-педагогическую и научную деятельность и большой вклад в подготовку высококвалифицированных кадров Неустроев С.А. награжден знаком «Почетный работник высшего профессионального образования», имеет почетное звание «Заслуженный профессор МИЭТ».

Поздравляем Степана Архиповича с юбилеем. Желаем крепкого здоровья и творческих успехов.

Редколлегия

Носову Юрию Романовичу – 70 лет

8 сентября 2006 г. исполнилось 75 лет Носову Юрию Романовичу – начальнику лаборатории ОАО НПП «Сапфир», доктору технических наук, профессору, дважды лауреату Государственной премии СССР, лауреату премии Совета Министров СССР.

Юрий Романович родился в г. Москве в 1931 г. В 1954 г. окончил физико-технический факультет Московского государственного университета. Свою трудовую деятельность начал в СКБ 245 (будущий НИЦЭВТ) Министерства приборостроения, где занимался разработкой кремниевых диодов для импульсных схем. За три года Носов Ю.Р. прошел путь от инженера до начальника лаборатории. В 1959 г. в связи с реорганизацией перешел в НИИЗ11 – нынешний ОАО НПП «Сапфир», где бессменно работает в должности начальника лаборатории. В 1964 г. в Ленинградском физико-техническом институте им. А. Иоффе защитил кандидатскую диссертацию, посвященную кремниевым импульсным диодам. В 1969 г. в МИЭМ защитил докторскую диссертацию.

За более чем 50-летний период производственной и научной деятельности Ю.Р. Носов стал ведущим специалистом в области исследования, разработки и производства полупроводниковых диодов различного назначения. Под его руководством разработаны и внедрены в серийное и массовое производство более 20 типов диодов для импульсной и высокочастотной техники. Разработки Ю.Р. Носова нашли широкое применение в отечественных ЭВМ, а также системах управления ракетными комплексами и в спутниках связи. За выдающиеся достижения в области разработки и внедрения в производство плоскостных импульсных диодов в 1972 г. Ю.Р. Носову была присуждена Государственная премия СССР.

В середине 70-х годов Ю.Р. Носов одним из первых в стране начинает работы в новой области электроники – некогерентной оптоэлектронике. За разработку и внедрение в производство около 20 типов оптронов, оптоэлектронных схем и датчиков, волоконно-оптических устройств Ю.Р. Носову в 1986 г. вручается вторая Государственная премия СССР. Параллельно под его руководством интенсивно продолжают работы и по дальнейшему развитию диодной тематики. За создание серии импульсных диодов пикосекундного диапазона Ю.Р. Носову в 1991 г. присуждается премия Совета Министров СССР.

Ю.Р. Носов основатель крупной научной школы. Им сформулирован и развит ряд важнейших направлений современной электроники: теория работы и научно-технологические основы разработки



и создания полупроводниковых диодов различного назначения, приборов и устройств некогерентной оптоэлектроники, приборов с зарядовой связью. Ю.Р. Носов автор более 200 научных работ, в том числе монографий, ряд из которых переведены за рубежом. Будучи заведующим кафедрой микроэлектроники МИЭМ он воспитал плеяду учеников, среди которых 25 кандидатов наук и около десяти профессоров, докторов наук.

Под руководством Ю.Р. Носова организованы и проведены десятки конференций и семинаров, отличающихся научной актуальностью и широкой географией.

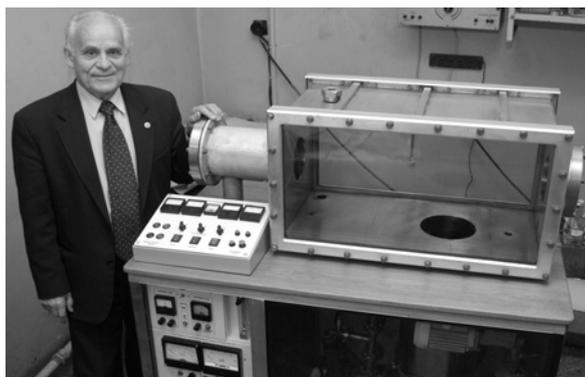
Заслуги Ю.Р. Носова признаны широкой научной общественностью, он является членом экспертного совета ВАК по электронике, измерительной технике, радиотехнике и связи, президентом отделения оптоэлектроники Международной академии информатизации, действительным членом Академии технологических наук, заместителем председателя секции «Микроэлектроника» НТОРЭС им. А.С. Попова и председателем секции «Оптоэлектроника» этого общества, членом редакционных коллегий научно-технических журналов.

Выдающийся труд Ю.Р. Носова по достоинству оценен государством. Носову Ю.Р. присвоено почетное звание заслуженного деятеля науки и техники. Он награжден орденом Трудового Красного Знамени, орденом «Знак Почета», многочисленными медалями, Почетной грамотой правительства Российской Федерации.

Поздравляем Юрия Романовича с юбилеем, желаем крепкого здоровья, счастья, новых творческих свершений.

Редколлегия

Кубареву Юрию Васильевичу – 70 лет



11 сентября 2006 г. исполнилось 70 лет члену редколлегии нашего журнала Юрию Васильевичу Кубареву – вице-президенту и действительному члену Академии инженерных наук им. А.М. Прохорова, доктору физико-математических наук, профессору, лауреату Государственной премии СССР, Заслуженному деятелю науки РФ.

Ю.В. Кубарев – известный ученый, создатель нового типа ускорителя плазмы – магнито-плазодинамического (МПДУ), ведущий специалист по автоматизации, управлению процессами в плазменных ускорителях и разработке для них диагностической и измерительной аппаратуры, применению их в наземных и космических условиях. Ускоритель нашел широкое практическое применение в энергетике, космической технике, экспериментальной физике, радиоэлектронике, геофизике и новых технологиях.

Ю.В. Кубаревым выполнены оригинальные теоретические и экспериментальные исследования процессов в МПДУ, проведена с ускорителем серия экспериментов в различных участках Земного шара в верхних слоях атмосферы и ионосфере, давшая уникальные результаты. Впервые была показана возможность управления величиной и знаком заряда космических аппаратов с помощью изменения режимов работы ускорителя плазмы.

Им установлены в лабораторных и проведены в космических условиях новые закономерности и явления в плазме, которые используются для создания различных конструктивных вариантов ускорителя, для автоматического управления его параметрами, выбора оптимальных режимов работы и т.д. На их основе разработаны

оригинальные способы и устройства, защищенные многими авторскими свидетельствами.

Ю.В. Кубарев предложил и обосновал многоцелевое использование МПДУ как электрореактивных двигателей, генераторов шумов и колебаний, плазменных антенн и волноводов, нейтрализаторов статических зарядов космических аппаратов, источников высокоскоростных заряженных и нейтральных частиц, технологических установок.

Ю.В. Кубарев – автор и соавтор свыше 300 научных работ и изобретений в различных областях науки и техники, около 30 из которых внедрены и использованы ведущими организациями страны. Он ведет большую научно-педагогическую и общественную работу в Московском государственном университете приборостроения и информатики, участвует во многих международных научных конференциях, организовал их на Украине, в Абхазии и др. Как вице-президент АИН им. А.М. Прохорова Кубарев Ю.В. проводит большую научно-организационную работу по внедрению достижений науки и техники в народном хозяйстве. По просьбе руководства Политехнического музея г. Москвы им создана действующая электровакуумная установка с МПДУ, демонстрирующая работу электрореактивного двигателя с управляемыми удельным импульсом и вектором тяги – прообраза двигателя для марсианского экспедиционного комплекса.

Ю.В. Кубарев награжден многими медалями и почетными дипломами Минобороны, Роскосмоса, Минвуза, АН СССР, Федерации Космонавтики СССР, РФ и Украины, ВДНХ, Международной академии естественных наук, АИН им. А.М. Прохорова и ведущих НПО. Он является Почетным профессором Шанхайской Аэрокосмической Академии, награжден в Китае серебряной медалью Высшей школы.

Поздравляем Юрия Васильевича с юбилеем, желаем крепкого здоровья, счастья, творческих успехов.

Редколлегия

CONTENTS

<i>V.D.Verner</i> The Journal «Proceedings of Universities» is 10 years old.	3
Fundamental researches	
<i>A.A.Gorbatsevich, A.E.Shyrokov</i> Envelope-Function Approach and Boundary States...	7
Microelectronics technology	
<i>B.G.Gribov, L.V.Lysak, V.S.Martemyanov</i> New Method of Silicon Wafer Cleaning....	15
<i>V.P.Timoshenkov</i> State and Future Development of Silicon Heterojunction Bipolar Transistor Technology for High Frequency Application.....	19
<i>S.A.Aprelov, V.M.Senkov, N.N.Gerasimenko, I.V.Pirshin, A.G.Turyanskii, V.I. Cehosh, E.N.Rybachek</i> Two-Wave X-Ray Film Reflectometry of Metals and Silicides of Metals on Silicon.....	27
Microelectronics devices and systems	
<i>A.A.Orlikovsky</i> Silicon transistor nanoelectronics	35
<i>Yu.N.Korkishko, V.A.Fedorov, S.M.Kostritsky, A.N.Alkaev, V.E.Prilutsky, V.G.Ponomarev, I.V.Morev, V.G.Marchuk, E.M.Paderin</i> Interferometric Closed-Loop Fiber-Optic Gyroscopes	45
<i>D.L.Zaitsev, P.V.Dudkin, V.M.Agafonov</i> Vortical Fluctuating Flows and Their Influence on Noise Level For Molecular Electronic Transformer	61
<i>A.M.Bobreshov, O.I.Obrezan, A.V.Dybov, Yu.I.Kitaev, Yu.N.Nesterenko, G.K.Uskov</i> Investigation of Recoverable Failures of GaAs MESFETs Under Exposure to Pulsed Overload	69
<i>M.I.Gorlov, D.Yu.Smirnov, D.L.Anufriev</i> Classification of Integrated Circuit Reliability Using Spectrum γ Form Parameter	78
Nanotechnology	
<i>S.K.Maksimov</i> Nano-Structuring Mechanism for Non-Stoichiometric $Ba_{1-x}La_xF_{2+x}$ and $Ca_{1-x}La_xF_{2+x}$ Fluorides with CaF_2 Lattice	83
<i>A.N.Belov, S.A.Gavrilov, M.G.Putrya, V.I.Shevyakov</i> Nanotechnologies Based on Anode Oxide Materials	93
Circuit engineering and design	
<i>A.L.Stempkovsky, S.V.Gavrilov, A.L.Glebov</i> Statistical Approach to Timing Analysis of Digital Circuits	99
<i>K.O.Petrosjanc, R.A.Torgovnikov</i> Comparative Analysis of Modern SPICE Models of SiGe Heterojunction Bipolar Transistor.....	107
University education problems	
<i>D.A.Usanov</i> Ioffe School as an Example of Realization of Science, Education and Industry Unity.....	118
Jubilees	
<i>S.A.Neustroev is 80 years old</i>	124
<i>Yu.R.Nosov is 75 years old</i>	125
<i>Yu.V.Kubarev is 70 years old</i>	126

ABSTRACTS

FUNDAMENTAL RESEARCHES

Envelope-Function Approach and Boundary States

A.A.Gorbatsevich, A.E.Shyrokov

The problem of the description of the interface states in the effective mass approach has been considered. The kind of the boundary conditions for the envelope function has been established by means of the procedure extraction parameters of the boundary condition from the scattering data. The obtained boundary condition describes the possibility of the zero-slope boundary condition on high barrier. It has been shown that the output for the framework one-band approach is necessary for the description of the boundary states.

MICROELECTRONICS TECHNOLOGY

New Method of Silicon Wafer Cleaning

B.G.Gribov, L.V.Lysak, V.S.Martemyanov

A new environmentally safe compound for cleaning the materials applied in the electronic industry has been developed. Its effectiveness and efficiency in the ICs production have been shown.

State and Future Development of Silicon Heterojunction Bipolar Transistor Technology for High Frequency Application

V.P.Timoshenkov

The technological capability in manufacture of the silicon heterojunction bipolar transistors with SiGe base has been described; some options of transistors from the first to the fourth generation have been discussed. The possibilities for improvement of the element base MW characteristics, that will permit to create the devices operating in the 70 – 80 GHz range, have been demonstrated.

Two-Wave X-Ray Film Reflectometry of Metals and Silicides of Metals on Silicon

S.A.Aprelov, V.M.Senkov, N.N.Gerasimenko, I.V.Pirshin, A.G.Turyanskii, V.I.Cehosh, E.N.Rybachek

The Ni, NiSi and NiSi₂ cuts produced by the magnetron scattering with subsequent annealing have been analyzed using the X-ray reflectometry. It has been shown, that the two-wave X-ray reflectometry permits to improve the accuracy in calculation of the structure parameters, to significantly reduce the calculation time. It is applicable for thin films process-dependent parameter control (thickness, roughness, thickness of interfaces) at various technological stages.

Silicon Transistor Nanoelectronics

A.A.Orlikovsky

This paper focuses on progress in the technology of silicon CMOS transistor nanoelectronics as the most important nanotechnology in the world. We view the development of the optical lithography in the sub-100 nm range. Starting from an analysis of MOS transistors evolution we present the dominant role of the quantum effects on the device operation at the gate length 10 nm and less. Quantum devices in sub -1 nm range are discussed.

MICROELECTRONICS DEVICES AND SYSTEMS

Interferometric Closed-Loop Fiber-Optic Gyroscopes

Yu.N.Korkishko, V.A.Fedorov, S.M.Kostritsky, A.N.Alkaev, V.E.Prilutsky, V.G.Ponomarev, I.V.Morev, V.G.Marchuk, E.M.Paderin

Some issues in designing, technology and preparation for industrial production of high-precision closed-loop fiber-optic gyroscopes (FOG), suitable for using in the inertial navigation systems, including space navigation ones, have been considered. A common approach to arranging the optical tract of the one-axis and three-axes closed-loop FOG with the integrated optics elements has been presented; the specific features of the structural schemes and electronic devices for signal processing have been described, the results of tests on the devices have been considered.

Vortical Fluctuating Flows and Their Influence on Noise Level For Molecular Electronic Transformer

D.L.Zaitsev, P.V.Dudkin, V.M.Agafonov

The noises of the molecular electronic transformers (MET) with hydrodynamic resistance have been experimentally investigated, the dependence of noise spectral density on the dispersion of the electro-chemical transfer function between MET separate microscopic channels has been found, the universal noise theory for all types of transformers has been developed; it has been determined that the noise spectral density is defined by the transforming element frequency response.

Investigation of Recoverable Failures of GaAs MESFETs Under Exposure to Pulsed Overload

A.M.Bobreshov, O.I.Obrezan, A.V.Dybov, Yu.I.Kitaev, Yu.N.Nesterenko, G.K.Uskov

The mechanisms of the recoverable degradation of low-noise MESFET under exposure to overloads by microwave and video pulses in the input circuits have been investigated. The investigated effects are connected with charging the deep levels of the MESFET semi-insulating substrate. The experimental investigation of MESFET degradation under exposure to video pulses has been conducted. The described experimental method can be used for MOSFET testing on resistance to recoverable failures.

Classification of Integrated Circuit Reliability Using Spectrum γ Form Parameter

M.I.Gorlov, D.Yu.Smirnov, D.L.Anufriev

The opportunity of using the parameter of the spectrum γ form of noise of $1/f'$ kind as a criterion of the integrated circuits division with respect to reliability has been considered. The IC division method with respect to reliability has been offered.

NANOTECHNOLOGY

Nano-Structuring Mechanism for Non-Stoichiometric $Ba_{1-x}La_xF_{2+x}$ and $Ca_{1-x}La_xF_{2+x}$ Fluorides with CaF_2 Lattice

S.K.Maksimov

The regularities in formation of nano-structuring for the non-stoichiometric fluorides $Ba_{1-x}La_xF_{2+x}$ and $Ca_{1-x}La_xF_{2+x}$ of the new class of materials, promising for solution of many problems in optoelectronics and microelectronics, have been investigated. It has been shown that in $Ca_{1-x}La_xF_{2+x}$ the stratification is executed through the formation of the ordering domains, the mechanism of the misfit strain relation has been described, and also, the influence of the twins, arising from that, on the ordering parameters and the value of the composition variations and the precipitate form, has been indicated.

Nanotechnologies Based on Anode Oxide Materials

A.N.Belov, S.A.Gavrilov, M.G.Putrya, V.I.Shevyakov

In this paper, the results of study on fabrication of the anode oxides based nanostructures have been described. On examples of the aluminum and titanium oxides the modes of their fabrication using both classical and electro-chemical methods and probe microscopy have been presented. The data on the possibility of using the synthesized anode oxide materials for fabrication of the opto-and nanoelectronics elements are given.

CIRCUIT ENGINEERING AND DESIGN

Statistical Approach to Timing Analysis of Digital Circuits

A.L.Stempkovsky, S.V.Gavrilov, A.L.Glebov

The new method of the statistical timing analysis for digital circuits has been proposed. The method is based on the analysis of locks and combines the use of normal approximation for the probability density of the timing quantities and the account of noise influencing on the delay. For reducing pessimism in estimating such noise, a large number of the logic correlation, preliminarily generated in the circuit, is used. The experimental results demonstrate high efficiency of the proposed method.

Comparative Analysis of Modern SPICE Models of SiGe Heterojunction Bipolar Transistor

K.O.Petrosjanc, R.A.Torgovnikov

In this paper the analysis of the advanced SPICE bipolar junction transistor (BJT) models for the purpose of choosing the optimal model of the SiGe heterojunction bipolar transistor for the calculation of the high-speed LSIs has been presented.

UNIVERSITY EDUCATION PROBLEMS

Ioffe School as an Example of Realization of Science, Education and Industry Unity

D.A.Usanov

The primary principles characterizing the A.F.Ioffe scientific school have been considered. The concept of the natural-scientific education, proposed by Ioffe and implemented by him in practice, has been described. The Ioffe's opinions concerning investigations of the inter-discipline scientific trends at the jointing point of different scientific disciplines, of the inventive activity of scientists and engineers have been presented. The similarity of the Ioffe scientific School principles, assumed as a basis of the Ioffe School, to ideas and technologies of the present market, innovation economics has been noted.

К СВЕДЕНИЮ АВТОРОВ

(Правила оформления рукописей действуют с 1 января 2006 г.)

Научно-технический журнал «*Известия вузов. ЭЛЕКТРОНИКА*» публикует на русском и английском языках оригинальные и обзорные (заказные) статьи. Верстка журнала осуществляется в издательской системе, функционирующей в сети IBM-совместимых компьютеров. Журнал имеет формат А4 и изготавливается по технологии офсетной печати.

Основные рубрики:

- фундаментальные исследования;
- материалы электронной техники;
- вакуумная электроника;
- технология микроэлектроники;
- микроэлектронные приборы и системы;
- нанотехнология;
- схемотехника и проектирование;
- микросистемы;
- микропроцессорная техника;
- информационные технологии;
- интегральные радиоэлектронные устройства;
- методы и техника измерений;
- биомедицинская электроника;
- проблемы высшего образования.

В редакцию представляются:

1. *Статья*, подготовленная на компьютере и распечатанная на лазерном принтере на белой бумаге формата А4 (в двух экземплярах).

2. *Дискета 3,5"* (1.44 Мбайт) или *лазерный диск* с текстом статьи для верстки, подготовленным на IBM PC в формате MS Word for Windows. Допускается передача электронного варианта статьи по e-mail.

3. *Аннотация* на английском языке с названием статьи, инициалами и фамилией автора; аннотация на русском языке. На дискете аннотации на английском и русском языках должны быть оформлены в виде отдельных текстовых файлов.

4. *Экспертное заключение, сопроводительное письмо, рекомендация кафедры.*

5. *Список авторов и сведения о них* (оформляется отдельным файлом): фамилия, имя, отчество (полностью); ученая степень, ученое звание; должность; краткая научная биография, область научных интересов (5–6 строк); место работы; служебный и домашний адреса; служебный и домашний телефоны (указать автора, ответственного за прохождение статьи в редакции).

Статья должна быть подписана всеми авторами.

Ориентировочный объем публикаций: для статьи не более 12 страниц текста и 5 рисунков, для краткого сообщения не более 3 страниц текста и 1 рисунок.

Первая страница статьи оформляется следующим образом: индекс УДК; название статьи; инициалы, фамилия автора; название учреждения, где выполнена работа; краткая (не более 7 полных строк) аннотация на русском языке. Далее следует текст статьи.

Текст:

- печатается *через два интервала* с размером шрифта не меньше стандартного машинописного (13 кегль);

- абзацы отделяются друг от друга одним маркером конца абзаца (применение этого символа в других целях не допускается), ширина отступа (0,75 см) устанавливается в меню Word Формат/Абзац; набор текста начинается с левого края; по правому краю текст не выравнивается; текст набирается без переносов;

- все слова внутри абзаца разделяются только одним пробелом;

- перед знаками препинания пробелы не ставятся, после них – один пробел;

- разрядка слов не допускается;

- не допускается применение псевдографики, а также стилей.

Формулы:

Для набора формул в MS Word (редактор MS Equation 3.0) используются установки Styles/Sizes (Стили/Размеры) только по умолчанию. Пронумерованные формулы (нумеруются только те, на которые ссылаются в тексте) выносятся отдельной строкой и располагаются по центру.

На втором экземпляре статьи автором должна быть сделана следующая разметка:

- близкие по начертанию прописные и строчные буквы помечаются двумя чертами снизу (прописные) или сверху (строчные)
- близкие по начертанию русские, латинские буквы и цифры поясняются на полях, например:
- в – русск., е – не эль, З – буква, к – русск., О,о – буква, У – русск., Ч,ч – буква, b – лат., Y – игрек, I – эль, v – ню, u – ипсилон, ε – эпсилон;
- русские буквы помечаются снизу знаком $_$, а латинские ~;
- буквы греческого алфавита обводятся красным карандашом;
- векторные величины подчеркиваются одной прямой линией;
- подстрочные индексы помечаются дугой сверху, надстрочные – снизу; индексы, являющиеся сокращением слов, должны быть пояснены отдельно.

Иллюстрации могут быть выполнены:

1. В отдельных файлах:

- в программе Corel Draw, также допускаются полутоновые рисунки (фотографии) в формате TIFF (без компрессии);
- в любом другом графическом редакторе. В этом случае требуется качественная распечатка рисунков, предназначенная для сканирования (разрешение 600 dpi).

2. Черной тушью на белой бумаге (или кальке) или представлены в виде качественных черно-белых фотографий на матовой бумаге (предпочтительно формат 9x12 см).

Формат рисунков не должен превышать А4. Рисунки должны быть упомянуты в тексте, пронумерованы и надписаны (на обороте каждого рисунка разборчиво написать порядковый номер, ФИО автора). На иллюстрациях, по внешнему виду которых трудно или невозможно определить их расположение, следует писать «верх» и «низ».

Подрисовочные подписи прилагаются на отдельном листе.

Таблицы должны быть обязательно упомянуты в тексте и иметь заголовки.

Библиографический список:

- оформляется согласно ГОСТ 7.1.84 «Библиографическое описание документа»; не должен превышать 10 названий (в обзорных (заказных) статьях – не более 50 названий); – ссылки в тексте даются в квадратных скобках: [1];

- нумерация источников должна соответствовать очередности ссылок в тексте.

В библиографическом списке указываются:

- для книг - фамилия, инициалы автора, название книги, город, издательство, год издания, число страниц;
- журнальных статей – фамилия, инициалы автора, название статьи, название журнала, год, том, серия, номер, выпуск, первая – последняя страницы статьи;
- депонированных статей – фамилия, инициалы автора, название статьи, город, год, количество страниц, название организации, в которой выполнена работа, дата депонирования, регистрационный номер;
- препринта – фамилия, инициалы автора, название издания, количество страниц, полное название издающей организации, год;
- материалов конференций, школ, семинаров – фамилия, инициалы автора, название статьи, время и место проведения конференции, название конференции, город, издательство, год, первая - последняя страницы статьи;
- ссылок на авторские свидетельства и патенты – сокращенное название документа (А.с. или Пат.), номер документа, аббревиатура страны, МПК, название А.с. или Пат., инициалы, фамилия автора. Оpubл., год. Бюл. N. Если А.с. не опубликовано, а патент пока не получен, то вместо даты опубликования пишется дата приоритета.

Ссылки на неопубликованные работы не допускаются.

За опубликованные материалы гонорар не выплачивается.

Рукописи не возвращаются.

Статьи направлять по адресу: 124498, г. Москва, Зеленоград, проезд 4806, д. 5, МИЭТ, редакция журнала «Известия вузов. Электроника», комн. 7232

Тел.: (495) 534-62-05

Факс: (495) 530-54-29

E-mail: magazine@rnd.miee.ru

http://www.miet.ru/static/je/os.html