

Известия высших учебных
заведений

ЭЛЕКТРОНИКА

6'2007



Научно-технический журнал

Издается с 1996 г.

Выходит 6 раз в год

СОДЕРЖАНИЕ

Материалы электронной техники

Балдина Н.А., Гончаров В.А., Тананыкин А.А.
Неоднородность примеси в полупроводниковых кри-
сталлах, выращенных в космических условиях метода-
ми направленной кристаллизации 3

Микроэлектронные приборы и системы

Бобрешов А.М., Дыбой А.В., Разуваев Ю.Ю.
Экспериментальные исследования возникновения
логических сбоев в базовых элементах цифровой элек-
троники при воздействии субнаносекундных видеоим-
пульсов 11

Володин Е.Б., Игнатъева Е.А., Уздовский В.В.
Моделирование и оптимизация КМОП-структуры
с вертикально интегрированными в нее одноконтан-
тными фотодетекторами с разделением цветов видимо-
го спектрального диапазона 18

*Усанов Д.А., Скрипаль А.В., Абрамов А.В., Боголюбов А.С.,
Скворцов В.С., Мерданов М.К.* Использование волно-
водных фотонных структур для измерения параметров
нанометровых металлических слоев на изолирующих
подложках 25

Схемотехника и проектирование

Петросяц К.О., Козылко П.А. Усовершенствованная
подсистема электротеплового моделирования систем
на печатных платах в САПР Mentor Graphics 33

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.
Казённых Г.Г.
Коноплёв Б.Г.
Копеев Ю.В.
Коркишко Ю.Н.
Королёв М.А.
Кубарев Ю.В.
Неволин В.К.
Неволин В.Н.
Петросяц К.О.
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.miet.ru
<http://www.miet.ru>

Красин А.А., Игумина С.Ю. Использование схемы замещения для ускорения моделирования кварцевых генераторов	39
--	----

Информационные технологии

Карпов О.А. Адаптивная стыковка парциальных кадров в радиолокаторах с синтезированной апертурой при сложных видах обзора.....	48
--	----

Акиншин Р.Н. Оценка выбора средств защиты информации в условиях неопределенности	59
---	----

Проблемы высшего образования

Лупин С.А., Милехина Т.В. Метод решения задачи составления расписания, ориентированный на кластерные вычислительные системы.....	63
---	----

Краткие сообщения

Милешко Л.П. Особенности кинетики анодного окисления вращающихся кремниевых пластин в легирующих электролитах.....	70
---	----

Тимошенков С.П., Ануфриенко В.В., Мьо Хейн Зо Особенности формирования фоторезистивных пленок на подложках некруглой формы.....	71
--	----

Сергеев В.А., Широков А.А. Зависимости температурного коэффициента прямого напряжения на гетеропереходных светодиодах от тока и температуры	74
--	----

Локтев Д.В., Зиновьев Д.В. Снижение турбулентности газового потока в микроканалах.....	77
---	----

Ключников А.С. Численное моделирование и оптимизация площади мощного ДМОП-транзистора	79
--	----

Подъяпольский С.Б. Требования к системе обеспечения и контроля качества изготовления ИМС в условиях кремниевых фабрик.....	81
---	----

Куликов К.Е., Совин А.В. Система на кристалле для теплового пожарного извещателя.....	82
--	----

Юбилей

40 лет кафедре интегральной электроники и микросистем МИЭТ.....	85
---	----

Конференции. Семинары

III Всероссийская научно-техническая конференция «Проблемы разработки перспективных микро- и наноэлектронных систем - 2008».....	87
--	----

Научно-технический семинар «Проектирование и верификация систем на кристалле/плате» (18 октября 2007 г., г. Москва, г. Зеленоград)	88
--	----

15-я Всероссийская межвузовская научно-техническая конференция студентов и аспирантов «Микроэлектроника и информатика - 2008»	3 стр. обложки
---	----------------

Contents	89
Abstracts	90
Тематический указатель статей, опубликованных в 2007 году	93
К сведению авторов	99

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 30.11.07.
Формат бумаги 60х84 1/8.
Печать офсетная.
Объем 11,63 усл.печ.л.,
10,9 уч.-изд.л.
Заказ № 141.

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.

Неоднородность примеси в полупроводниковых кристаллах, выращенных в космических условиях методами направленной кристаллизации

Н.А.Балдина, В.А.Гончаров, А.А.Тананыкин

Московский государственный институт электронной техники
(технический университет)

Проанализированы результаты экспериментов по выращиванию кристаллов полупроводников на различных космических аппаратах. Численно решена задача Стефана при выращивании кристаллов методом Бриджмена. Выявлен новый физический механизм – зависимость поперечной неоднородности примеси от скорости роста. Результаты расчетов дают количественные совпадения с неожиданными результатами, полученными в ряде космических экспериментов.

В экспериментах по космическому материаловедению значительное место отводится направленной кристаллизации в закрытых ампулах. Космические эксперименты проводились с целью получения однородных кристаллов. Конвекция является гравитационно-чувствительным процессом и в условиях невесомости ($g = 0$) она должна отсутствовать. При этом режим роста будет диффузионным, а следовательно, выращенный кристалл – однородным.

Однако в ряде экспериментов по направленной кристаллизации полупроводников в космических условиях наблюдалась аномальная неоднородность распределения примесей по диаметру кристаллов. Режим роста не являлся чисто диффузионным из-за существования остаточных ускорений на борту космических аппаратов (КА). Например, в эксперименте «Универсальная печь» [1] при кристаллизации в условиях микрогравитации твердого раствора германий–кремний, легированного сурьмой ($Ge < Si, Sb >$), распределение кремния и сурьмы по сечению слитка неоднородно. Отношение концентраций кремния на противоположных концах поперечного сечения составляло 5–7, а сурьмы – 2–3. Заметим, что в наземном эксперименте-аналоге неоднородность примесей не превышала 10%.

Аналогичные результаты получены на КА «Салют-6» – «Союз» (1980 г.) в эксперименте по растворению затравки InSb в расплаве InSb–InBi при величине остаточных микроускорений $g \approx 10^{-5} - 10^{-3} g_0$ [2]. В экспериментах по выращиванию методом Бриджмена монокристаллов Ge, легированных 1 ат.% Si и 0,001 ат.% Sb, In, Ga, на КА «Фотон-1» (1985 г.) и «Фотон-2» (1986 г.) максимальное содержание компонентов в

поперечных сечениях отличалось примерно в 2–2,5 раза при $g \approx 10^{-7} - 10^{-5} g_0$ [3]. Характерная для условий микрогравитации неоднородность была получена и на КА «Фотон-3» (1987 г.) при выращивании монокристаллов InSb, легированных Te, методом бестигельной зонной плавки. Действие малых квазистационарных ускорений нашло свое отражение в характере распределения примеси и в более поздних экспериментах на КА «EURECA» (1992–1993 гг.) и «Space Shuttle» (1994 г.) и др.

В результате этих экспериментов установлен факт существования несимметричного распределения примеси в кристаллах, выращенных в космосе. Величина поперечной концентрационной неоднородности значительно превосходила те значения, которые были получены в аналогичных наземных экспериментах. Результаты приведенных выше экспериментов по направленной кристаллизации в ампулах оказались неожиданными. Теоретические представления того времени не объясняли возникновения такой большой поперечной неоднородности.

Механизмы возникновения неоднородности. Проведен ряд теоретических исследований [4, 5], связанных с вопросом о природе и механизме возникновения неоднородности примеси в кристаллах $\text{Ge} < \text{Si}, \text{Sb} >$, выращенных методом Бриджмена (эксперимент [1]) в условия полета КА «Союз-Аполлон».

Для описания движения расплава, содержащего примесь, используются уравнения Навье – Стокса, которые являются вторым законом Ньютона для сплошной среды, и диффузии примеси. Сила тяжести $\rho \vec{g}$ в этом уравнении является внешней по отношению к расплаву и определяет величину ускорений, а таким образом, и конвективных скоростей в сплошной среде.

Конвективный перенос и диффузия являются двумя конкурирующими механизмами в уравнении диффузии примеси. В предельном случае больших конвективных скоростей диффузия пренебрежимо мала, и примесь распределяется по линиям тока расплава, создавая нежелательную неоднородность (наземный режим роста кристаллов). В другом предельном случае ($g = 0$) конвективного переноса нет, поэтому распределение примеси линейно в направлении роста кристалла и однородно в поперечных направлениях.

Обнаружено [5], что в промежуточном режиме, когда конвективный и диффузионный механизмы переноса сравнимы, неоднородность примеси достигает своих максимальных значений (эффект концентрационного расслоения). Этот физический эффект имеет фундаментальный характер и важен как для решения рассматриваемой проблемы, так и для всей области механики сплошной среды.

Таким образом, выяснено, что диффузионный режим роста достижим только на более совершенных КА или далеких от Земли орбитах, а слабая гравитационная конвекция в расплаве, которая имела место в перечисленных космических экспериментах, может приводить к значительной неоднородности распределения примеси в объеме расплава. Однако учет этого эффекта в математических моделях, основанных на решении уравнений Навье–Стокса, не дал количественного согласия с результатами космических экспериментов. Во всех случаях – как в плоских двумерных задачах [4, 6], так и в более поздних трехмерных численных моделях [7, 8], неоднородность примеси по диаметру не превосходила 30–40%, в то время как в космических экспериментах отношение концентраций примеси на противоположных концах поперечного сечения кристалла равнялась 2–3 или даже 5–7.

В монографии [9] осуществлен более универсальный подход к данной проблеме, была сформулирована стационарная задача Стефана. Вместе с тем при непосредственном решении задачи в этой работе допущены серьезные упрощения. Так, уравнение теплопроводности численно не решалось, профиль температуры выбирался линейным по направлению кристаллизации, численное решение уравнения движения заменялось выбором аналитического решения для скоростей течения расплава в бесконечной области. В результате нелинейный конвективный процесс переноса примеси в расплаве не был исследован, что позволило провести только качественный анализ образования концентрационной неоднородности. Таким образом, парадоксальные результаты космических экспериментов по выращиванию кристаллов и твердых растворов полупроводников более 25 лет не имели теоретического объяснения.

Вместе с тем авторы самих космических экспериментов неоднократно указывали, что математическая модель должна учитывать изменение концентрации примеси в приграничной с фронтом кристаллизации области расплава. Так как природа этой приграничной концентрационной неоднородности также связана с гравитационной конвекцией в ампуле, для адекватного описания процесса необходимо численное моделирование, основанное на решении нестационарной трехмерной задачи Стефана и подробном расчете полей течения и концентрации примеси вблизи фронта кристаллизации. В подтверждение своих взглядов авторами были предложены полуколичественные обобщенные параметры, которые оценивали зависимость радиальной неоднородности примеси от скорости выращивания кристалла и ряда других параметров [10, 11]. Подход, предложенный в настоящей работе, является развитием этих идей авторов космических экспериментов.

Постановка математической задачи. Решение трехмерной нестационарной задачи Стефана является сложной и трудоемкой вычислительной задачей. При решении такой задачи для сокращения вычислительных затрат важно знать, в каких диапазонах значений безразмерных параметров следует искать решение. Поэтому в данной работе обсуждается промежуточный этап решения проблемы – результаты решения двумерной осесимметричной нестационарной задачи Стефана. Для такой задачи возможно провести большое число параметрических расчетов. Кроме того, в случае положительного решения вопроса, т.е. количественного совпадения результатов расчетов и космических экспериментов, естественно ожидать положительного решения этого вопроса и для трехмерной задачи Стефана.

Нестационарная осесимметричная задача Стефана решается в цилиндрических координатах (r, z) с неплоским фронтом кристаллизации $z = \varphi(r, t)$. В осесимметричной задаче будет анализироваться максимальная неоднородность концентрации примеси между осью и периферией кристалла. В области расплава решаются уравнения Навье–Стокса в приближении Буссинеска для несжимаемой жидкости (1), уравнение теплопроводности (2), уравнение для концентрации примеси (3) и уравнение неразрывности (4):

$$\frac{d\vec{v}}{dt} = -\nabla p + T \vec{e}_z + \frac{1}{\text{Re}} \nabla^2 \vec{v}, \quad (1)$$

$$\frac{dT}{dt} = \frac{1}{\text{Re} \cdot \text{Pr}} \text{div grad } T, \quad (2)$$

$$\frac{dC}{dt} = \frac{1}{\text{Re} \cdot \text{Sc}} \text{div grad } C, \quad (3)$$

$$\text{div } \vec{v} = 0. \quad (4)$$

Здесь \vec{v} – вектор скорости с компонентами (u, w) ; t – время; p – давление; T – температура; C – концентрация примеси; сила тяжести направлена вертикально вниз, \vec{e}_z – единичный вектор вдоль оси OZ .

Уравнения приведены в безразмерной форме [12], здесь и далее в граничных условиях участвуют безразмерные числа подобия Рейнольдса (Re), Прандтля (Pr), Шмидта (Sc), Пекле (Pe) и Стефана (St). В области кристалла решается уравнение теплопроводности (5), а на фронте кристаллизации $z = \phi(r, t)$ ставятся граничное условие Стефана (6) и условие, моделирующее оттеснение примеси в расплав (7):

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{1}{\text{Pe}} \text{div grad } T, \quad (5)$$

$$\lambda \left. \frac{\partial T}{\partial n} \right|_- = \left. \frac{\partial T}{\partial n} \right|_+ + \text{St} \cdot v_p, \quad (6)$$

$$-\frac{\partial C}{\partial n} = \text{Re} \cdot \text{Sc} \cdot v_p (1 - k) C. \quad (7)$$

В (6) и (7) λ – отношение теплопроводностей в кристалле и в расплаве; n – внешняя к фронту кристаллизации нормаль; v_p – скорость роста кристалла; k – равновесный коэффициент распределения примеси. Граничные условия на оси симметрии и на боковых границах имеют обычный вид: для скоростей на твердых стенках ставятся условия непротекания и прилипания, на оси симметрии $u = \frac{\partial w}{\partial z} = 0$, $\frac{\partial T}{\partial r} = \frac{\partial C}{\partial r} = 0$. Полностью граничные условия задачи приведены в [12] и в [13].

При решении нестационарной задачи Стефана для направленной кристаллизации расплавов зависимость неоднородности распределения примеси от скорости роста кристалла (6), (7) представлена в явном виде. Таким образом, задача приобретает дополнительный параметр, влияние которого подробно исследуется.

Технологическим параметром является профиль температуры, поддерживаемый на внешних границах области (на боковых и на торцевом нагревателях электропечи). Уравнения теплопроводности в расплаве и кристалле решаются совместно, и с учетом граничного условия (6) вычисляется скорость роста кристалла.

Расчеты проводились на сетке 29×105 . Вдоль оси r равномерно расположено 29 узлов. Вдоль оси z в области кристалла равномерно расположено 35 узлов; в области расплава – 70 узлов сетки. При кристаллизации слитка сетка вдоль оси z в кристалле разрежается, в расплаве – сгущается. В расплаве сетка вдоль оси z неравномерная, сгущается от середины области к фронту кристаллизации и к противоположной границе с коэффициентом геометрической прогрессии $Q = 1,15$ в начале счета. При дальнейшем счете коэффициент Q уменьшается так, чтобы минимальное расстояние между узлами у фронта кристаллизации не изменялось. Применение неравномерной сетки в расплаве необходимо для подробного разрешения диффузионного пограничного слоя у фронта кристаллизации, в котором удастся расположить от 3 до 5 узлов сетки. Это, а

также полная консервативность численной схемы позволяют получать достаточно точные решения на сравнительно небольшом числе узлов. Решение тестовых задач [14] и задач космического материаловедения [15] показало высокую эффективность используемого численного метода.

Анализ результатов. Рассмотрим нестационарную осесимметричную задачу Стефана при моделировании выращивания твердого раствора $\text{Ge} < \text{Sb} >$ методом Бриджмена [1]. Результаты этого космического эксперимента являлись предметом постоянного сравнения с теоретическими исследованиями (с 1975 г.). Пусть длина слитка $L = 150$ мм, диаметр $d = 50$ мм.

Физико-химические параметры $\text{Ge} < \text{Sb} >$:

Коэффициент температурного расширения β, K^{-1}	$1,1 \cdot 10^{-4}$
Температуропроводность в расплаве $\lambda_1, \text{м}^2/\text{с}$	$7,2 \cdot 10^{-6}$
Температуропроводность в кристалле $\lambda_s, \text{м}^2/\text{с}$	$3,3 \cdot 10^{-6}$
Удельная теплоемкость $C_p, \text{Дж/кг} \cdot \text{К}$	430
Кинематическая вязкость расплава $\nu, \text{м}^2/\text{с}$	$3,85 \cdot 10^{-7}$
Плотность (средняя) $\rho, \text{кг/м}^3$	$5,7 \cdot 10^3$
Удельная теплота плавления $\gamma, \text{Дж/кг}$	$6,0 \cdot 10^5$
Коэффициент сегрегации k	$3,0 \cdot 10^{-3}$
Коэффициент диффузии $D, \text{м}^2/\text{с}$	$6,0 \cdot 10^{-9}$

Безразмерные числа подобия для данной задачи: $\text{Re} = (208-2076)$; $\text{Sc} = 21,67$; $\text{Pr} = 0,018$; $\text{Pe} = 81,78$; $\text{St} = 2592$.

Обсуждается характер поперечной концентрационной неоднородности в кристалле для диапазона малых значений ускорения g , которые часто реализовывались в космических экспериментах по выращиванию полупроводниковых кристаллов. Так, величина

$g = 10^{-6} - 10^{-4} g_0$ (g_0 – земное ускорение силы тяжести) соответствует многим экспериментам на беспилотных космических аппаратах типа «Фотон», а величина $g = 10^{-4} - 10^{-3} g_0$ наблюдалась на орбитальных станциях «Союз-Аполлон», «Мир», МКС.

При решении задачи Стефана исследована зависимость неоднородности примеси от скорости роста при значении числа Рейнольдса, которое примерно соответствует максимуму концентрационной неоднородности в объеме расплава ($\text{Re} = \text{const} \cdot \sqrt{g}$). В данной задаче это соответствовало ускорению силы тяжести $g \approx 10^{-3} g_0$.

Получено, что зависимость радиальной неоднородности примеси от скорости роста имеет ярко выраженный максимум (рис.1). При малых скоростях выращивания задача

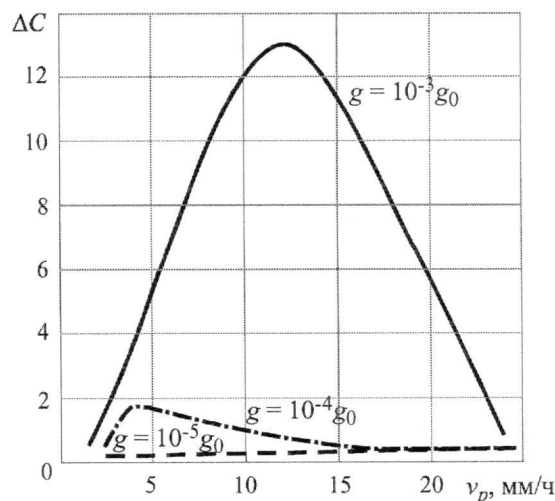


Рис.1. Зависимость радиальной неоднородности распределения примеси ΔC от скорости роста v_p . $\Delta C = (C_{\max} - C_{\min})/C_{\min}$, где C_{\max} , C_{\min} – максимальные и минимальные значения концентрации по диаметру кристалла

квазистационарна, и величина радиальной неоднородности примеси не превосходит 30–40%, как у авторов [4–6], которые решали только задачу в расплаве (система уравнений Навье–Стокса). При очень больших скоростях выращивания почти вся примесь, которая находится у фронта кристаллизации в расплаве, поглощается кристаллом ($k \approx 1$). В этом случае граничное условие (7) принимает вид $\frac{\partial C}{\partial n} \approx 0$, и поперечная не-

однородность примеси сравнительно невелика.

В промежуточном режиме при $v_p = 12$ –14 мм/ч величина концентрационной неоднородности достигает максимума; отношение концентраций примеси на оси и периферии кристалла достигает 13 (см. рис.1). Таким образом, впервые теоретически получено, что отношение концентраций в поперечном сечении не только может достигать 2–3 или 5–7, но даже превосходить эти значения при одновременном выполнении условий максимума концентрационной неоднородности, $g = 10^{-3} g_0$, и максимума, связанного с величиной скорости роста кристалла. При микроускорении $g = 10^{-4} g_0$, т.е. для значений числа Рейнольдса, не соответствующих максимуму объемного концентрационного расслоения, максимальное отношение концентраций примеси вдоль радиуса составляет более чем 2 раза (см. рис.1). Поскольку величина микроускорений в эксперименте [1] составляла примерно $g = 10^{-3} g_0$ – $10^{-4} g_0$, скорость выращивания $v_p = 10$ мм/ч, а отношение концентраций в поперечном сечении для сурьмы в германии равнялось 2–3, то можно говорить об очень хорошем количественном соответствии расчетных и экспериментальных данных.

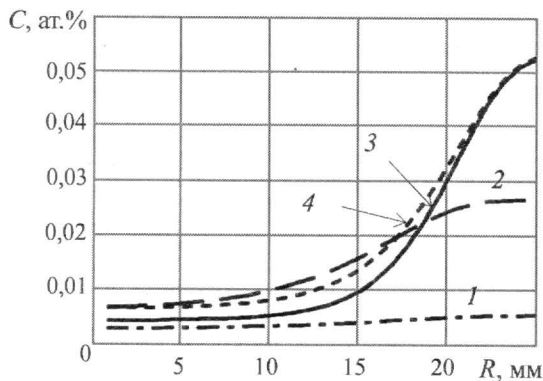


Рис.2. Радиальное распределение концентрации примеси C для скорости роста $v_p \approx 12$ мм/ч. ϕ — положение фронта кристаллизации в момент времени t : 1 — $t = 45$ мин, $\phi = 41,5$ мм; 2 — $t = 244$ мин, $\phi = 88,8$ мм; 3 — $t = 392$ мин, $\phi = 125,1$ мм; 4 — $t = 432$ мин, $\phi = 134,8$ мм

На рис.2 приведена динамика изменения концентрационной неоднородности сурьмы вдоль радиуса кристалла в разные моменты времени и соответственно на разной длине кристалла $z = \phi(r, t)$. В начале роста кристалла радиальная неоднородность концентрации невелика (кривая 1), затем она постепенно достигает максимума (кривая 3) и далее уменьшается (кривая 4).

Отметим, что в задачах, связанных с конвекцией и ростом кристаллов, важную роль играет соотношение геометрических размеров области. Значительная часть обсуждаемых экспериментов в космосе проводилась для областей кристаллизации с геометрическими размерами $L/d = 4$. В связи с этим были проведены дополнительные расчеты задачи, сформулированной выше, полагая $L = 200$ мм, $d = 50$ мм. Принято $g = 10^{-4} g_0$, что неодно-

кратно встречалось в космических экспериментах. В этом режиме также имеет место максимум неоднородности примеси от скорости роста, и при $v_p = 4-6$ мм/ч достигается отношение концентраций примеси в поперечном сечении более чем в 5 раз.

Выполненные расчеты дают объяснение ряду экспериментальных данных, связанных с аномальным распределением примеси при выращивании полупроводниковых кристаллов на КА. Впервые теоретически показано, что поперечная неоднородность концентрации примеси в космических экспериментах могла достигать различий в несколько раз. Получено количественное совпадение результатов расчетов и известного космического эксперимента.

Выявлен новый механизм – зависимость неоднородности распределения примеси от скорости роста. Этот механизм усиливает известный ранее максимум концентрационного расслоения в замкнутых объемах. Совокупность этих двух факторов позволила показать, что величина поперечной неоднородности примеси в кристаллах, выросших в космосе, могла быть еще больше.

Литература

1. Плавнение, кристаллизация и фазообразование в невесомости / *Л.И.Иванов, В.С.Земсков, В.Н.Кубасов и др.* – М.: Наука, 1979. – 256 с.
2. *Земсков В.С., Раухман М.Р.* Ликвация компонент в расплавах индий–сурьма–висмут под действием силы тяжести // *Физика и химия обработки материалов.* – 1982. – № 4. – С. 35–39.
3. Экспериментальное изучение ликвации компонент в кристаллах твердых растворов германий–кремний, легированных сурьмой, галлием и индием, полученных в невесомости на автоматических ИСЗ «Космос-1645», «Космос-1744» / *И.Н.Белокурова, В.С.Земсков, А.Н.Титков и др.* // *Физика и химия обработки материалов.* – 1990. – № 6. – С. 61–67.
4. Конвективные процессы в невесомости и их значение в задачах космической технологии / *К.С.Дубовик, С.А.Никитин, В.И. Полежаев и др.* // *Гидромеханика и тепломассообмен в невесомости: Сб. статей.* – М.: Наука, 1982. – С. 61–72.
5. *Полежаев В.И., Федюшкин А.И.* Гидродинамические эффекты концентрационного расслоения в замкнутых объемах // *Изв. АН СССР. Механика жидкости и газа.* – 1980. – № 3. – С. 11–18.
6. *Nikitin S.A., Polezhaev V.I., Fedushkin A.I.* Mathematical Simulation of impurity distribution in crystals prepared under microgravity conditions // *J. Crystal Growth.* – 1981. – Vol. 52. – P. 471–477.
7. *Polezhaev V.I., Bessonov O.A., Nikitin S.A.* Dopant inhomogeneities due to convection in microgravity: spatial effects // *Adv. Space Res.* – 1998. – Vol. 22. – P. 1217.
8. *Бессонов О.А., Брайловская В.А., Полежаев В.И.* Пространственные эффекты конвекции в расплавах: концентрационные неоднородности, возникновение несимметрии и колебания // *Изв. РАН. МЖГ.* – 1997. – № 3. – С. 74–82.
9. Конвективные процессы в невесомости / *В.И.Полежаев, М.С.Бело, Н.А.Верезуб и др.* – М.: Наука, 1991. – 240 с.
10. *Земсков В.С., Белокурова И.Н., Хавжу Д.М.* О распределении примеси в поперечном сечении кристаллов при направленной кристаллизации в невесомости // *Физика и химия обработки материалов.* – 1985. – № 6. – С. 75–80.
11. *Белокурова И.Н., Земсков В.С., Хавжу Д.М.* Анализ результатов изучения ликвации компонент в легированных кристаллах германия, выращенных направленной кристаллизацией в условиях невесомости и на Земле // *Физика и химия обработки материалов.* – 1990. – № 6. – С. 71–75.
12. *Гончаров В.А.* Об одном методе решения двухфазной задачи Стефана с неплоской границей // *Журн. вычисл. матем. и матем. физ.* – 2000. – Т. 40, № 11. – С. 1706–1715.
13. *Авдеев А.Ю., Гончаров В.А.* Решение задачи Стефана для нестационарного процесса роста кристаллов в условиях микрогравитации // *Изв. вузов. Электроника.* – 1999. – № 1–2. – С. 9–15.

14. **Гончаров В.А., Марков Е.В.** Численная схема моделирования задач термоконвекции // Журн. вычисл. матем. и матем. физ. – 1999. – Т. 39, № 1. – С. 87–97.

15. Исследование влияния малых сил на радиальную неоднородность кристаллов полупроводников / **В.А.Гончаров, А.А.Савостиков, В.С.Земсков и др.** // Тр. 6-й Междунар. конф. «Рост кристаллов и тепломассоперенос» (Обнинск, Россия, 2005). – 2005. – Т. 4. – С. 793–802.

Статья поступила
2 июля 2007 г.

Балдина Надежда Александровна – магистрант кафедры высшей математики № 1 МИЭТ. *Область научных интересов:* вычислительная математика, численное моделирование роста полупроводниковых материалов.

Гончаров Виктор Анатольевич – доктор физико-математических наук, профессор кафедры высшей математики № 1 МИЭТ. *Область научных интересов:* вычислительная математика, методы оптимизации, численное моделирование роста полупроводниковых кристаллов.

Тананыкин Александр Александрович – магистрант кафедры высшей математики № 1 МИЭТ. *Область научных интересов:* вычислительная математика, численное моделирование роста полупроводниковых материалов.

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

Вы можете оформить подписку на 2008 г. в редакции с любого номера. Стоимость одного номера – 600 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>

МИКРОЭЛЕКТРОННЫЕ ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ

УДК 621.382.029.6

Экспериментальные исследования возникновения логических сбоев в базовых элементах цифровой электроники при воздействии субнаносекундных видеоимпульсов

А.М.Бобрешов, А.В.Дыбой, Ю.Ю.Разуваев

Воронежский государственный университет

Предложены схема эксперимента и автоматизированная измерительная установка для исследования воздействия сверхкоротких импульсов (СКИ) на базовые элементы цифровой электроники. Показано, что воздействие СКИ на входы таких элементов может приводить к их переключению и являться причиной сбоев в цифровой аппаратуре. Полученные экспериментальные результаты свидетельствуют о наличии механизмов временной деградации полупроводниковых структур. Такие механизмы вносят существенный вклад в развитие процессов, приводящих к сбоям.

В настоящее время проблема воздействия сверхкоротких импульсов (СКИ) на электронную аппаратуру представляет большой практический интерес. Известно, что помеха в виде СКИ может приводить не только к информационным сбоям радиоэлектронной аппаратуры (РЭА), но и к возникновению целого спектра явлений, называемых обратимой или необратимой деградацией полупроводниковых структур [1]. Развитие современной цифровой электроники, увеличение сложности интегральных схем, переход к глубоко субмикронным технологиям и снижение пороговых логических напряжений выводят на первый план проблему помехозащищенности и стойкости к интенсивным перегрузкам. Типичной является ситуация, когда сложные цифровые устройства работают с небольшим числом или даже одним тактовым доменом. В этом случае одновременное переключение большого числа элементов может приводить к наведению в цепях интенсивных кратковременных выбросов напряжений и токов. Источниками помех, имеющих вид СКИ, могут служить грозовые разряды или заряды статического электричества, работающие радары или системы связи, специальные средства. Кроме того, расширение области применения цифровых технологий зачастую требует создания устройств, рассчитанных на эксплуатацию в крайне жесткой электромагнитной обстановке. Ранее проводились исследования воздействия СКИ на маломощные GaAs полевые транзисторы [2, 3]. Рассмотренные механизмы временной деградации являются универсальными, и следует ожидать их появления в базовых КМОП-структурах. В настоящей работе экспериментально исследованы и систематизированы возможные появления сбоев в цифровой аппаратуре под воздействием СКИ.

В электронных устройствах, подвергающихся воздействию источников помех, максимальные напряжения и токи наводятся на длинных линиях и дорожках печатных плат, а также информационных шлейфах. При этом для повышения нагрузочной способности и помехозащищенности такие соединения подключаются к схеме через буферные элементы. Таким образом, можно считать, что воздействие помех на цифровые устройства потенциально опасно, если оно может привести к переключению или нарушению работоспособности буферных элементов.

Однако далеко не всегда спонтанное переключение буфера приводит к сбою аппаратуры. В большинстве цифровых схем информационные сигналы проходят через ряд синхронизирующих устройств (синхронные регистры). Такое схемотехническое решение обеспечивает высокую скорость и надежность работы сложных цифровых схем [4]. Сбой аппаратуры не возникнет, если переключение буферного элемента произойдет в тот момент, когда входы тактирующих устройств будут заблокированы. Очевидно, что возникновение сбоя в синхронных компонентах, в частности в тактирующих цепях, многократно увеличивает вероятность нарушения работоспособности аппаратуры в целом. Поэтому особый интерес представляет экспериментальное определение восприимчивости базовых синхронных элементов (синхронных триггеров) к импульсным помехам, поступающим на тактовый вход.

Исходя из сказанного, в качестве объектов исследования, характеризующих стойкость цифровой аппаратуры к воздействию СКИ, были выбраны буферные элементы и синхронные триггеры.

Идея эксперимента и измерительная установка. Идея эксперимента заключается в воздействии сигналов генератора СКИ на внешние выводы исследуемых образцов контактным способом. Конечно, в этом случае наблюдаемые эффекты могут отличаться от тех, которые будут зарегистрированы при полевом или другом сложном воздействии, когда наводимые в проводниках сигналы действуют на все цепи одновременно. Однако при решении исследовательских задач контактное воздействие способно дать более строгий и пригодный для последующей интерпретации результат, поскольку в этом случае можно явно контролировать форму и амплитуду подаваемых сигналов, воздействовать на отдельные цепи и выводы исследуемых образцов. Можно утверждать, что только интерпретация отдельных механизмов, приводящих к сбоям и нарушению работоспособности РЭА, способна прояснить общую картину, наблюдаемую при комплексном воздействии СКИ на сложные цифровые системы.

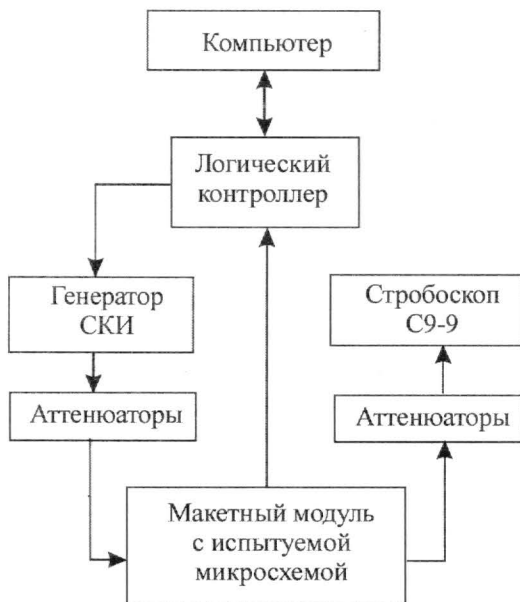


Рис. 1. Блок-схема измерительной установки

Для решения поставленной задачи была изготовлена лабораторная измерительная установка, блок-схема которой изображена на рис.1. Установка содержит генератор СКИ типа ТМГ250085ВП01 (выпускается фирмой «Трим», г. Санкт-Петербург), вырабатывающий импульсы формой, близкой к гауссовой, с длительностью 250 пс по уровню 0,5. Измеренная в ходе эксперимента амплитуда импульсов при работе с нагрузкой 50 Ом составляла 75 В. Широкополосный аттенюатор позволяет задавать коэффициент ослабления амплитуды СКИ с шагом 2,5 дБ. Конструктивно он выполнен в виде набора фиксированных аттенюаторов, соединяемых последовательно для достижения нужного ослабления. Испытуемая микросхема устанавливается на специальный модуль в колодку для упрощения процесса монтажа и демонтажа.

Логический контроллер функционирует под управлением компьютера. При исследовании буферных элементов он выдает периодический сигнал для запуска генератора СКИ, а также сигнал синхронизации горизонтальной развертки стробоскопического осциллографа, на экране которого наблюдается отклик.

Для исследования реакции синхронных триггеров (счетчиков) используется другой алгоритм. Контроллер получает от компьютера информацию о частоте следования импульсов и их числе, в соответствии с этим формирует последовательность сигналов запуска генератора СКИ. Затем контроллер регистрирует и подсчитывает изменения выходного сигнала испытуемой микросхемы (число логических переключений). После завершения импульсной последовательности результат передается компьютеру для обработки и отображения результатов.

Исследовались интегральные микросхемы, выпускаемые фирмой Texas Instruments (США): SN74HC04 (содержит 6 логических инвертирующих буферов в одном корпусе) и SN74HC163 (синхронный 4-разрядный двоичный счетчик). Предполагалось, что схемотехника, топология и характеристики инвертирующего и неинвертирующего буфера практически совпадают. Другими словами, результаты, полученные при исследовании инверторов, могут непосредственно распространяться на любые буферные элементы, выполненные по стандартной КМОП-технологии. Выбор счетчиков в качестве объектов исследования обоснован тем, что они конструктивно содержат синхронные триггеры, являющиеся базовыми элементами любых синхронных устройств. Срабатывание указанных триггеров может быть надежно зафиксировано по изменению состояний выходной шины счетчика. Намеренно была выбрана серия микросхем SN74HC, обладающая невысокими параметрами быстродействия, но в то же время выполненная по современным технологиям и имеющая достаточно широкое распространение в электронном оборудовании. При этом оказывается, что длительность входных СКИ во много раз меньше той, которая требуется для срабатывания в нормальном режиме эксплуатации. Указанное в технической документации значение максимальной рабочей частоты для микросхем данной серии составляет 25 МГц, минимальное время удержания входного сигнала, необходимое для срабатывания, составляет порядка 20 нс.

Исследование восприимчивости буферных элементов к воздействию СКИ. Перед проведением эксперимента образцы были исследованы в нормальном режиме работы при входных воздействиях, не выходящих за рамки допустимых паспортных значений. Измеренная длительность переднего и заднего фронта выходного сигнала составляла около 6 нс. Задержка между изменением логического уровня входного сигнала и изменением логического состояния на выходе составила 11 нс.

В ходе эксперимента воздействию СКИ подвергались входы, выходы и цепи питания исследуемых образцов. Ни одна из исследуемых схем не вышла из строя даже при воздействии перегрузок с максимальной амплитудой (75 В). Отсутствие наблюдаемых катастрофических отказов может быть связано как с недостаточной энергией отдельных импульсов, не способных вызвать тепловой пробой схемы, так и с наличием защитных диодов, устанавливаемых почти во все серийно выпускаемые интегральные схемы для защиты от статических зарядов. Заслуживающие внимания результаты получены при воздействии СКИ на входы образцов, причем была достигнута высокая повторяемость наблюдаемых эффектов.

Временные диаграммы выходных сигналов исследуемых образцов при различных амплитудах входного воздействия в виде СКИ приведены на рис.2. Момент воздействия СКИ легко может быть определен по наблюдаемым выбросам, которые на всех

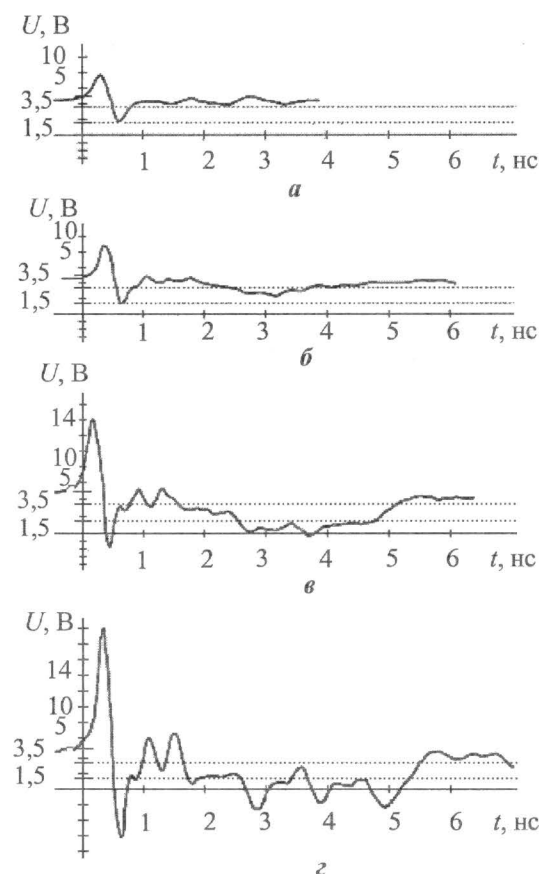


Рис.2. Осциллограммы выходных сигналов буферных элементов при различных амплитудах входного воздействия в виде СКИ: а – 7,4 В; б – 13,2 В; в – 23,4 В; г – 37,1 В

приведенных графиках расположены в начале временной шкалы. В интервалах между импульсами на входы буферных элементов подавался нулевой потенциал, следовательно, в отсутствии входного воздействия на выходах наблюдались напряжения, соответствующие логической единице (порядка 4,5 В). Пороговые значения логического нуля и единицы изображены на всех графиках горизонтальными пунктирными линиями.

На рис.2,а изображен выходной сигнал, полученный при воздействии СКИ с амплитудой 7,4 В. Наблюдается быстро затухающий переходной процесс во время прохождения входного импульса, однако воздействие с данной амплитудой не приводит к переключению буфера в состояние логического нуля.

На рис.2,б показан результат действия СКИ с амплитудой 13,2 В. При этом сигнал некоторое время находится в зоне неопределенности логических уровней. Это время составляет порядка 1 нс.

При увеличении амплитуды до 23,4 В, как показано на рис.2,в, наблюдается выраженный переход в состояние логического нуля. В этом состоянии сигнал находится около 2 нс. Рассмотренный случай может привести к нарушению функционирования аппаратуры, поскольку длительность отклика значительно превышает время входного воздействия.

Другими словами, на выходе буферного элемента наблюдается сбой. При дальнейшем увеличении амплитуды входного сигнала наблюдается увеличение длительности сбоя, т.е. времени, в течение которого выходной сигнал находится в области напряжений логического нуля.

При воздействии на вход СКИ с амплитудой 37,1 В (рис.2,г) длительность сбоя превышает 3 нс.

Дальнейшее повышение амплитуды СКИ приводит к увеличению длительности сбоя, которая может достигать 10 нс и более.

Исследование восприимчивости синхронных триггеров к воздействию СКИ.

Для экспериментального исследования восприимчивости синхронных триггерных элементов к СКИ на тактовый вход испытуемых микросхем контактным способом подавалась серия импульсов с амплитудой 37,1 В. В целом, триггеры (счетчики) показали более высокую стойкость к сбоям при действии СКИ на тактовые входы, поскольку при меньших амплитудах переключения вообще не наблюдались. Это может быть связано с тем, что триггеры представляют собой более сложные устройства, чем буферы. Для их переключения требуется последовательное срабатывание нескольких вентилях, что увеличивает время, требуемое для реакции на входной процесс.

Эксперименты были проведены для 10 образцов, взятых из одной партии микросхем. В результате анализа полученных результатов был выявлен ряд устойчивых закономерностей.

Было зарегистрировано скачкообразное изменение количества переключений счетчика в зависимости от частоты следования СКИ при фиксированном числе импульсов в последовательности. На рис.3 представлены зависимости отношения числа зафиксированных переключений к числу воздействующих импульсов P , выраженные в процентах, от частоты следования F . Результаты получены путем усреднения по 10 экспериментам для трех образцов. Легко видеть, что восприимчивость микросхем к воздействию СКИ резко возрастает вблизи некоторой частоты следования, различной для каждого образца. Такую частоту будем называть пороговой. Для исследованных образцов значения пороговых частот находились в диапазоне от 115 Гц до 70 кГц. Следует отметить, что только для нескольких образцов были получены достаточно гладкие кривые, подобные тем, что изображены на рис.3. Часто наблюдались интервалы резкого спада и восстановления восприимчивости при частотах больше пороговой. Это явление представлено на рис.4.

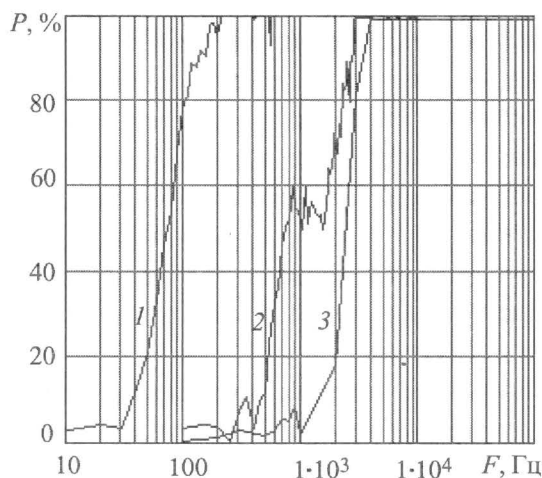


Рис.3. Зависимость относительного числа переключений от частоты следования СКИ для трех образцов (кривые 1–3 соответственно)

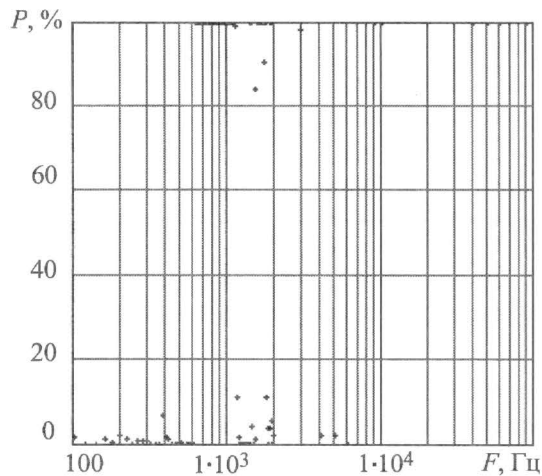


Рис.4. Зависимость относительного числа переключений от частоты следования СКИ с участками низкой и высокой восприимчивости

В общем случае нельзя предсказать, как будет изменяться восприимчивость образца в зависимости от частоты следования СКИ, но можно полагать, что при частотах меньше пороговой микросхема будет невосприимчива к СКИ, а при больших частотах вероятность переключения триггера будет достаточно велика. Пороговая частота не является независимой характеристикой образца и зависит от амплитуды СКИ. Очевидно, что длительность и форма импульса должны также оказывать на нее существенное влияние. Например, увеличение амплитуды до 75 В приводило к срабатыванию всех образцов даже при воздействии одиночными импульсами.

Интерпретация наблюдаемых эффектов требует выявления механизмов, которые приводят к повышению восприимчивости образцов к СКИ. Очевидно, что эти механизмы должны обладать последствием. Схема эксперимента исключает возможность того, что такое последствие связано с накоплением энергии и зарядов в реактивных цепях, поскольку соединение генератора с входом исследуемого образца выполнено без применения внешних реактивных элементов. Во всех проводимых экспериментах временной интервал между действиями СКИ превышал 10 мкс, что исключает также влияние паразитных элементов схемы и самого образца. В этом случае можно предположить,

что наблюдаемые явления обусловлены временной деградацией полупроводниковых структур исследуемых образцов, а время восстановления исходных параметров в конкретных условиях эксперимента связано с наблюдаемой пороговой частотой. В [1] имеются указания на то, что временная деградация, как правило, представлена целым спектром явлений, имеющих разные времена восстановления, интенсивность и пороговые уровни активизации. Поэтому в последующих экспериментах более тщательно было исследовано поведение образцов на частотах, близких к пороговой. Схемы подвергались не-

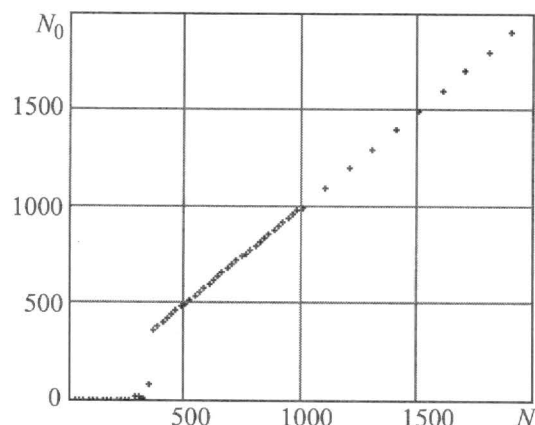


Рис.5. Зависимость числа переключений от числа импульсов при длительном воздействии СКИ

прерывному воздействию сериями СКИ с одинаковой частотой следования импульсов, которая на 20 Гц ниже пороговой. Количество импульсов в сериях постоянно увеличивалось. В результате получены закономерности, подобные показанной на рис.5. В начале эксперимента переключения счетчиков не происходили, однако по истечении времени, которое обычно составляло десятки секунд, наблюдались стабильные переключения (число переключений практически совпадало с количеством действующих импульсов). Данный результат свидетельствует о наличии явлений деградации со значительными характеристическими временами.

Следует отметить, что практически все наблюдаемые явления носили обратимый характер. Только один из образцов был выведен из строя в результате длительного непрерывного тестирования.

Таким образом, в ходе эксперимента смоделированы условия воздействия СКИ на цифровую аппаратуру. Показано, что тактовые входы синхронных элементов, ложные срабатывания которых наиболее критичны, в то же время обладают более высокой устойчивостью к действию СКИ, чем буферные элементы. Полученные экспериментальные результаты свидетельствуют о наличии эффектов, связанных с временным изменением свойств полупроводниковых структур с последующим восстановлением (временная деградация). Активизация указанных эффектов приводит к повышению восприимчивости схем к действию СКИ, а возможно, и к общему снижению помехоустойчивости схем.

Литература

1. Влияние мощных импульсных микроволновых помех на полупроводниковые приборы и интегральные микросхемы / В.В.Антипин, В.А.Годовицын, Д.В.Громов и др. // Зарубежная радиоэлектроника, 1995. – № 1. – С. 37–53.
2. Баранов И.А., Обрезан О.И., Ропий А.И. Стойкость твердотельных модулей СВЧ к кратковременным электроперегрузкам // Обзоры по электронной технике. Сер.1. СВЧ-техника. – 1997. – 111 с.
3. Исследование обратимых отказов GaAs ПТШ при импульсных перегрузках / А.М.Бобрешов, А.В.Дыбой, Ю.И.Китаев и др. // Изв. вузов. Электроника. – 2006. – № 5. – С. 69–77.
4. Узрюмов Е.П. Цифровая схемотехника. – СПб.: БХВ-Петербург, 2000. – 528 с.

Статья поступила
29 мая 2007 г.

Бобрешов Анатолий Михайлович – доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой электроники Воронежского государственного университета. *Область научных интересов:* проблемы электромагнитной совместимости, СВЧ-электроника и малошумящие СВЧ-приборы, сверхширокополосные системы связи и радиолокации, исследование воздействия сверхкоротких импульсов на полупроводниковые приборы и структуры.

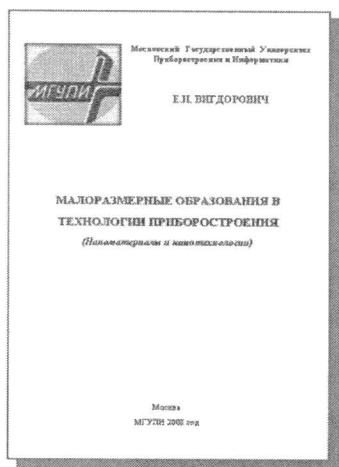
Дыбой Александр Вячеславович – кандидат физико-математических наук, доцент кафедры электроники Воронежского государственного университета. *Область научных интересов:* СВЧ-электроника и малошумящие СВЧ-приборы, исследование воздействия сверхкоротких импульсов на полупроводниковые структуры, обеспечение помехозащищенности и стойкости полупроводниковых приборов и систем.

Разуваев Юрий Юрьевич – студент Воронежского государственного университета. *Область научных интересов:* цифровая электроника и проектирование цифровых систем, программирование; исследование помехоустойчивости и стойкости к электроперегрузкам полупроводниковых приборов и структур.

Книжные новинки



Вигдорович Е.Н. Малоразмерные образования в технологии приборостроения: Уч. пособие. - М.: МГУПИ, 2008. - 205 с.
ISBN 978-5-87623-132-7



В книге представлены результаты работ по развитию технологий малоразмерных образований для создания нового поколения устройств и приборов. Учебное пособие содержит изложение основ физики и химии малоразмерных образований, в том числе наноструктур, - одной из наиболее актуальной и быстроразвивающейся областей физики и технологии веществ. Представлены данные по изменению основных свойств веществ от размера образований и возникновения новых фундаментальных и квантоворазмерных эффектов. Рассмотрены различные методы формирования микро- и нанообразований: вакуумные методы получения тонких покрытий, молекулярно-лучевая эпитаксия; методы поверхностного и объемного наноструктурирования, ионная литография и др. Приведены результаты применения технологий малоразмерных образований в различных областях науки и техники.

Книга представляет интерес для специалистов в области приборостроения, физики и химии твердого тела, микро-, наноэлектро-ники, оптики, фотоники и др, а также для преподавателей, аспирантов и студентов соответствующих специальностей высших учебных заведений.

Моделирование и оптимизация КМОП-структуры с вертикально интегрированными в нее одноконтakтными фотодетекторами с разделением цветов видимого спектрального диапазона

Е.Б.Володин, Е.А.Игнатъева, В.В.Уздовский

Московский государственный институт электронной техники
(технический университет)

Приведены результаты моделирования вертикально интегрированных в КМОП-структуру минимальных по размеру фотодетекторных ячеек с вертикальным разделением цветов (R, G, B) видимого спектрального диапазона. Ячейки имеют по одному контакту и расположены ввиду дефицита площади наряду с транзисторами схем считывания (и частично под ними) в зазорах ячеек ИК-диапазона.

В последние годы наметился значительный прогресс по интеграции узкозонных полупроводников из КРТ [1–3], СОГТ:In [4], PtSi [5], PbS и PbSe [6, 7] в кремниевые схемы считывания. Кроме того, наблюдается тенденция по расширению информативности получаемых фотоприемником изображений путем приема их в различных поддиапазонах спектра на уровне каждого пиксела [8], т.е. с жесткой привязкой мультиспектральных изображений к координатам и времени. Это особенно важно для фотоприемных устройств, обеспечивающих всепогодное и круглосуточное видение.

В настоящей работе приведены результаты моделирования вертикально интегрированных в КМОП-структуру минимальных по размеру фотодетекторных ячеек с разделением цветов (R, G, B) видимого спектрального диапазона, имеющих по одному контакту и расположенных ввиду дефицита площади наряду с транзисторами схем считывания (и частично под ними) в зазорах ячеек ИК-диапазона (рис.1). Одноконтakтная трехцветная ячейка отличается от известных тем, что в структуре фотодиодов сформиро-

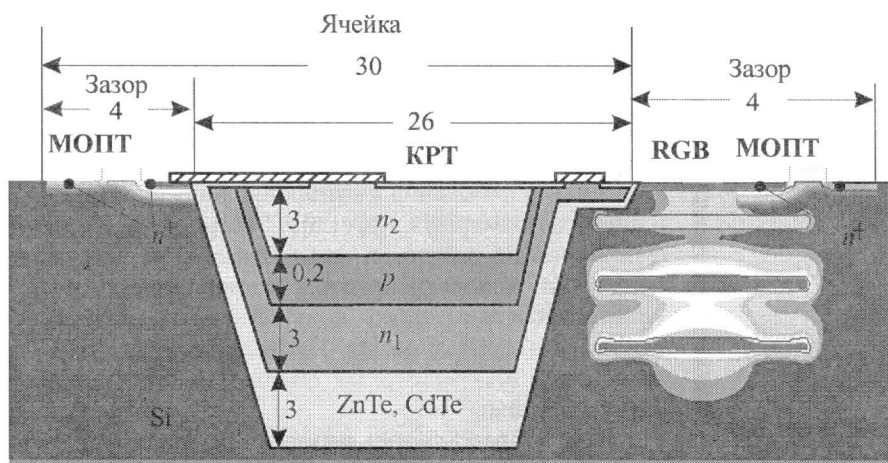


Рис.1. Ячейка многоспектрального матричного фотоприемника, содержащая двухцветный ИК-фотодетектор из КРТ и трехцветный фотодетектор видимого диапазона, интегрированные в КМОП-схему считывания (в КРТ нижняя n -область – MWIR, верхняя – LWIR; в RGB нижняя n^+ -область – R, средняя – G, верхняя – B)

ван канал, по которому фотодиоды могут обмениваться носителями тока при приложении к поверхностному контакту соответствующего напряжения относительно общей для всех ячеек базы и таким образом передавать в схему считывания накопленные фотозаряды.

Принцип действия одноконтактной RGB-ячейки. Расположенные друг над другом фотодиоды чувствительны к голубому (B), зеленому (G) и красному (R) участкам спектра видимого диапазона благодаря различной глубине проникновения света в кремний с различными длинами волн из-за разницы в коэффициентах поглощения в кремнии. Цветные фотоприемники на этом принципе с рекордной плотностью пикселей впервые были освоены фирмой «Фовион» (США) [9]. Однако каждый пиксел в ячейке имеет три контакта, требующих определенной площади для их размещения.

В настоящей статье проведены исследования на основе моделирования трехцветной предельно минимизированной ячейки с одним контактом (предложенной Е.Б.Володиным). Для двумерного анализа использовались программы приборно-технологического моделирования ISE TCAD.

Принцип действия одноконтактной трехцветной ячейки, содержащей три расположенных друг над другом фотодиода, основан на том, что в структуре этих диодов сформирован канал, по которому они могут обмениваться носителями тока (в данной структуре – электронами) при приложении к поверхностному контакту соответствующего напряжения относительно общей для всех ячеек базы.

Разрез структуры ячейки приведен на рис.2,а в минимальном виде, когда она сведена к размеру канала, изолированного от соседних ячеек областью базы. В структуре K_1 , K_2 , K_3 – три n^+ -области (с концентрацией мышьяка 10^{20} см^{-3} , толщиной 0,2 мкм с гауссовым распределением), образующие с окружающей их p -областью базы p - n -переходы, смещенные в запирающем направлении. Эти n^+ -области являются коллекторами фотоэлектронов. Их размер может быть значительно больше размера канала (рис.2,б) за счет пассивных частей, увеличивающих накопительную емкость, если это необходимо, без увеличения площади ячейки, так как пассивные области могут располагаться под транзисторами схем считывания.

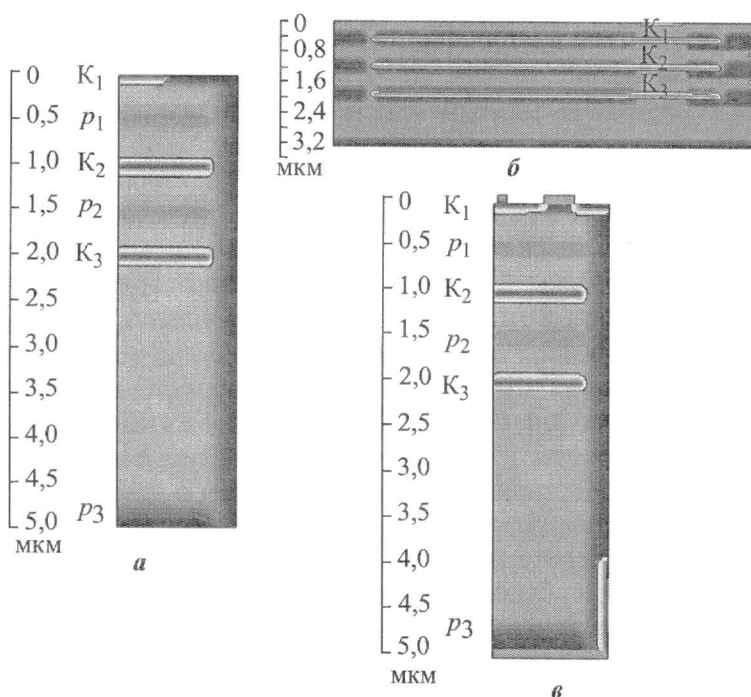


Рис.2. Разрез структуры одноконтактной трехцветной ячейки с минимальными размерами (а) и увеличенными пассивными заглубленными областями (б); структура одноконтактной ячейки, подключенной к транзистору схемы считывания (в)

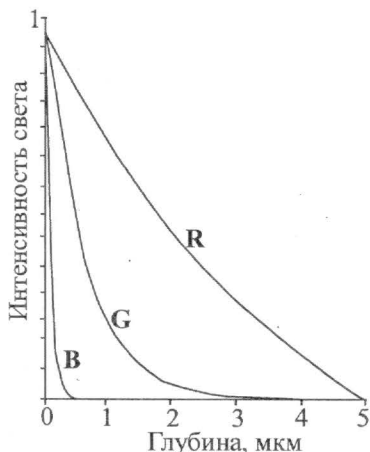


Рис.3. Распределение интенсивности света в относительных единицах в ячейке по глубине для трех длин волн 0,4 мкм (B), 0,5 мкм (G), 0,7 мкм (R)

В канале n^+ -области разделены p^- -областями базы, которые в рассматриваемом варианте имеют концентрацию подложки 10^{15} см^{-3} . Кроме этого, они отделены посередине барьерными областями p -типа (p_1 и p_2 на рис.2,а), которые выполняют две функции: направляют фотоэлектроны от своего центра к близлежащим n^+ -областям, т.е. разграничивают участки кремния на зоны фотоносителей от голубого, зеленого и красного цветов (соответственно расположенные между K_1 и p_1 , p_1 и p_2 , p_2 и p_3); обеспечивают необходимое для работы канала распределение поля и потенциала между n^+ -областями.

В исходном состоянии при отключенной от K_1 схеме считывания на каждой из n^+ -областей K_1, K_2, K_3 предварительно создан и сохраняется относительно p -базы положительный потенциал V_i , т.е. в этих областях структуры сформированы потенциальные ямы для электронов. Фотоэлектроны, порожденные голубой, зеленой и красной частями светового спектра, соответственно

затягиваются каждый на своем участке кремния в свою яму в областях K_1, K_2, K_3 и снижают ее потенциал. Чужие носители составляют строго определенную часть от основной, которая может быть учтена и скорректирована при обработке сигналов. Распределение интенсивности света по глубине для трех длин волн 0,4 мкм (голубой), 0,5 мкм (зеленый), 0,7 мкм (красный) показано на рис.3. Количество фотоэлектронов, собранных на K_1, K_2, K_3 , определяется интегралом поглощенных световых квантов по объему цветовой зоны. Самая обширная зона – красная, и до нее не доходит голубой свет и почти не доходит зеленый. Меньшая зона – зеленая, и в ней частично поглощается и красная и немного голубой составляющей, но в максимальной степени все же зеленая. То же относится и к голубой зоне, в которой вместе с небольшой зеленой и красной составляющей в основном поглощается голубая часть.

Накопление фотоносителей и снижение потенциалов ям происходит без взаимовлияния между зонами, так как потенциалы на n^+ -областях не превышают относительно друг друга пороговую величину, равную V_i , препятствующую перетоку электронов между ямами.

После периода накопления к электроду области K_1 подключается схема считывания, имеющая потенциал V_i , и заряжает область K_1 до этого потенциала. Величина дозаряжающего заряда является сигналом о голубой составляющей. При этом, как показано на рис.4,а,б (кривая 2), разряженная фотоэлектронами потенциальная яма в области K_2 не затрагивается, поскольку потенциалом в области K_1 не превзойден порог относительно области K_2 . Далее схема считывания увеличивает напряжение в области K_1 до $2V_i$ (кривая 3) и тем самым превосходит порог для области K_2 . Электроны из области K_2 (если ее потенциал ниже V_i) начинают перетекать в область K_1 и схему считывания, пока область K_2 не достигнет потенциала V_i . Заряд дозарядки является сигналом о зеленой составляющей. После этого схема считывания повышает потенциал K_1 до $3V_i$ (кривая 4). На K_2 он станет $2V_i$ в результате оттока электронов через канал к K_1 и в схему считывания, а потенциал K_3 поднимется до V_i . Заряд дозарядки K_3 будет сигналом о красной составляющей.

Отметим, что в чистом виде сигнальный заряд дозарядки имеет место при считывании K_1 напряжением V_i . При считывании K_2 к сигнальному заряду добавляется фиксированный заряд изменения потенциала на K_1 от V_i до $2V_i$. При считывании K_3 к сигнальному заряду добавляется заряд изменения потенциала на K_1 от $2V_i$ до $3V_i$ и на K_2 от V_i до $2V_i$. Эти фиксированные заряды вычитаются из суммарных в схеме считывания (операцией типа двойной коррелированной выборки).

Последовательность изменения от времени напряжения на K_1 , формируемая схемой считывания, приведена на рис.4,в.

После считывания всех трех зарядов проводится фаза восстановления ям. Схема считывания уменьшает напряжение на K_1 до 0. В результате этого потенциал области K_2 снижается до V_t в результате притока электронов от K_1 . Потенциал области K_3 , равный V_t , остается неизменным. На заключительной фазе восстановления потенциал на K_1 поднимается схемой считывания до V_t , после чего она отключается от K_1 , а все три ямы оказываются восстановленными до потенциала V_t и электрически изолированными друг от друга. Эта изоляция сохраняется и в периоде накопления, так как потенциалы ям изменяются только в меньшую сторону от пороговой величины и электроны отделены пороговыми барьерами.

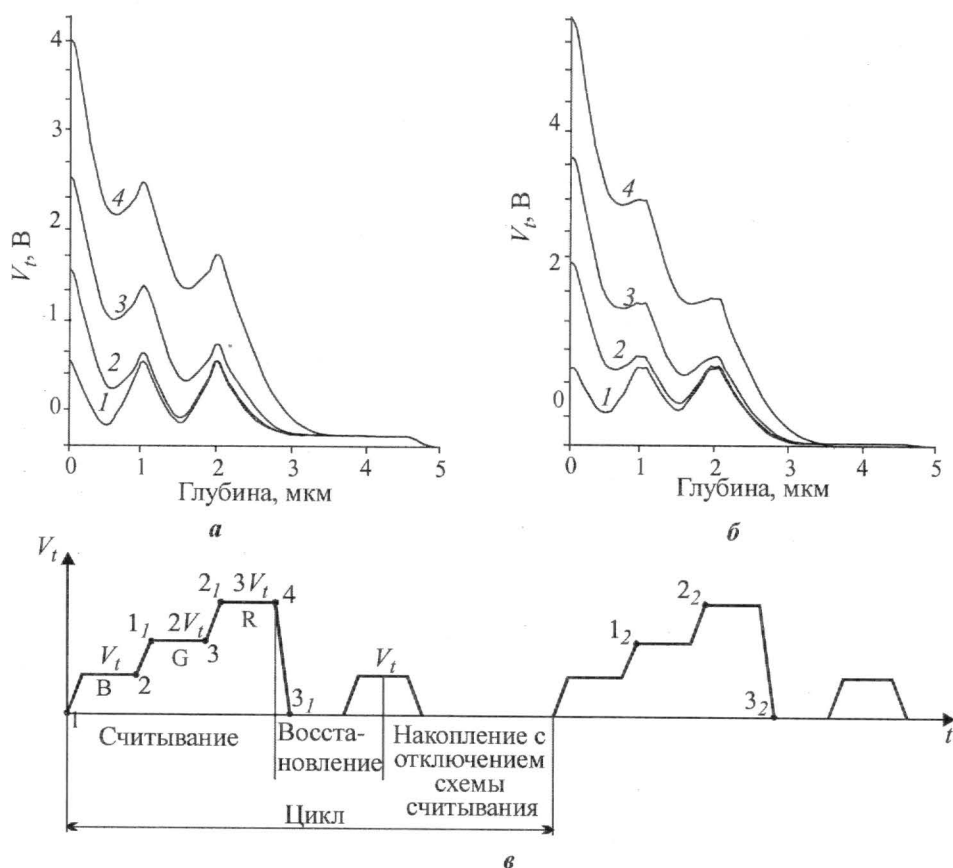


Рис.4. Распределение потенциала по глубине структуры для различных моментов в процессе считывания составляющих R, G, В: а – при 300 К; б – при 80 К; в – циклическая последовательность изменения от времени напряжения на K_1 , формируемая схемой считывания (нижние индексы соответствуют номерам кривых)

Потенциальный рельеф ячейки. На рис.4, 5 приведены результаты моделирования структур, показанных на рис.2,а,б. В обеих структурах области K_1 , K_2 , K_3 находятся друг от друга на расстоянии 1 мкм, легированы мышьяком с центральной концентрацией 10^{20} см^{-3} и с гауссовым распределением по толщине 0,2 мкм. Между ними в области канала шириной 1 мкм – подложка p -типа с концентрацией примеси 10^{15} см^{-3} . Посредине между парами n^+ -областей расположены барьерные слои p -типа с центральной концентрацией $(0,8-1) \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$.

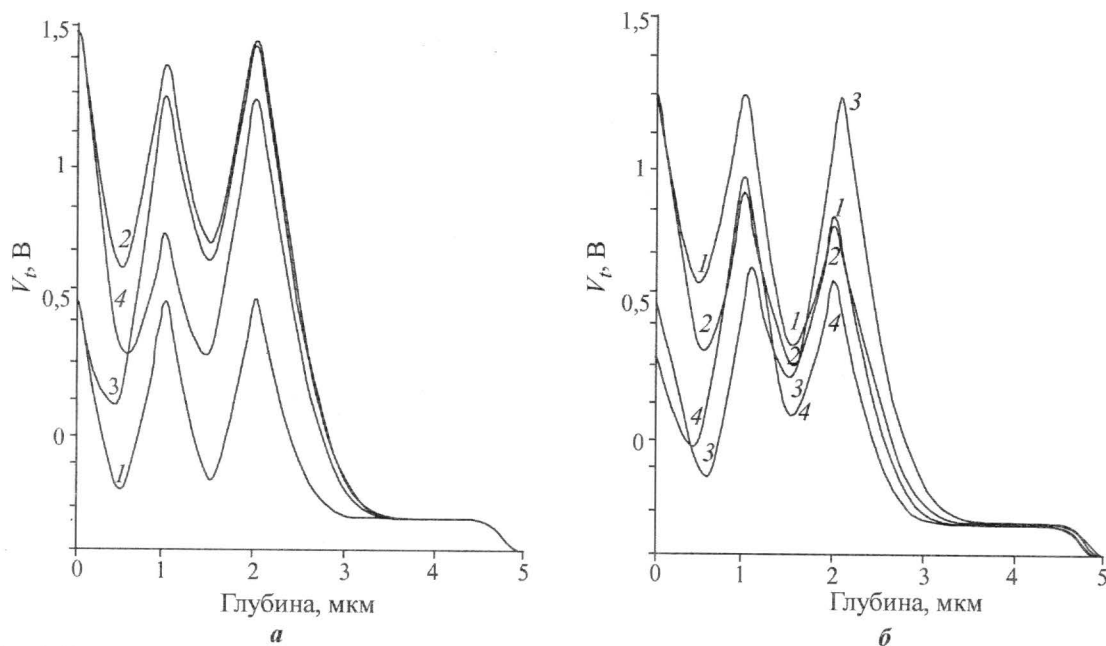


Рис.5. Распределение потенциала в структуре: а – при полностью заполненных и пустых потенциальных ямах (кривые 1, 2 соответственно), при частично заполненных ямах от голубого и зеленого света (кривые 3, 4); б – при частично заполненных ямах – от красного, красного и зеленого, голубого и зеленого, голубого и красного света (кривые 1, 2, 3, 4 соответственно)

с гауссовым распределением по толщине 0,3 мкм. Ширина области K_1 равна 0,5 мкм, так как она является составной частью истока транзистора схемы считывания (см. рис.2,в). В модели к ней имеется контакт для подачи напряжения считывания. Канал окружен p -областью базы шириной 0,3 мкм с концентрацией в центральной части $2 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$. Для создания барьера против проникновения из подложки глубинных термо- и фотоносителей на глубине 5 мкм (красная граница) расположен слой p -типа p_3 с центральной концентрацией примеси $2 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$, к которому в модели имеется заземленный базовый контакт.

Ширина заглубленных областей K_1 , K_2 , K_3 в структуре на рис.2,б составляет 9 мкм. Таким образом, эта двумерная модель учитывает емкости областей, имеющиеся в трехмерной конструкции с размерами n^+ -областей 3×3 мкм.

На рис.4,а,б показаны кривые изменения потенциала в структуре по осевой линии канала ($x = 0$) во временных точках диаграммы рис.4,в, в которых завершается считывание зарядов из K_1 , K_2 , K_3 (R, G, B). Точки на рис.4,в и соответствующие им кривые на рис.4,а,б помечены одинаковыми номерами.

На рис.5,а приведены кривые распределения потенциала в структуре при полностью заполненных электронами ямах и полностью пустых ямах. Потенциалы кривых 3 и 4 (рис.5,а) и кривых 1–4 (рис.5,б) соответствуют различным комбинациям частично заполненных за время накопления ям при облучении голубым, зеленым и красным светом различной интенсивности. На рис.6 показаны токи электронов, возникающие в структуре на разных этапах ее работы, а именно в точках, отмеченных на диаграмме рис.4,в. Кривые токов даны однополярными, поэтому их истинная полярность указана знаками «+» и «-».

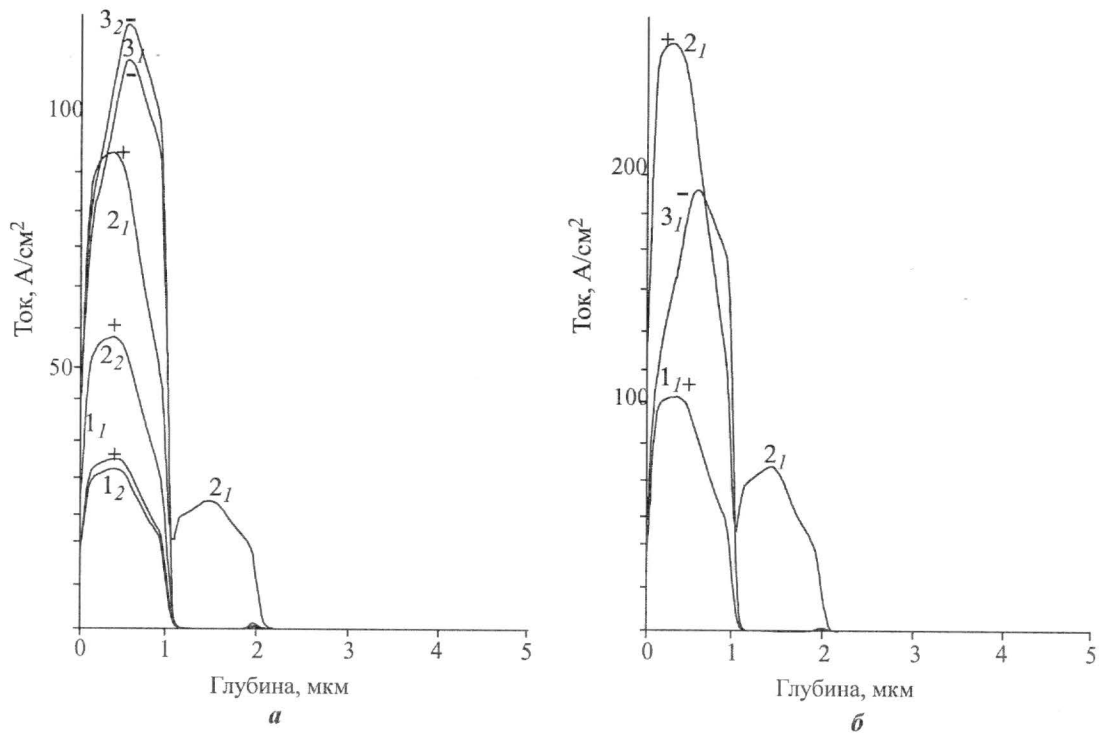


Рис.6. Токи электронов, возникающие в структуре на разных этапах ее работы (см.рис.4, в); а – при 300 К; б – при 80 К. Кривая 1₂ отсутствует, если нет света

В дальнейшем будет проведено моделирование процессов, протекающих в канале, в том числе процессов, характеризующихся распределением потенциалов, электрического поля, концентрации тока электронов и дырок в стационарных и динамических условиях, т.е. во всех фазах работы ячейки. А также будут представлены зависимости основных характеристик от параметров областей структуры и обсуждены технологические аспекты ее реализации.

Литература

1. Molecular beam epitaxy grown long wavelength infrared HgCdTe on compliant Si substrates / *Priyalal S. Wijewarnasuriya, Yuanping Chen, Gregory Brill et al.* // Proc. of SPIE. – 2006. – Vol. 6206. – P. 6206 11-1–6206 11-10.
2. Integrated infrared detectors and readout circuits / *J.W. Cairns, L.Buckle, G.J. Pryce et al.* // Proc. of SPIE. – 2006. – Vol. 6206. – P. 6206 14-1–6206 14-9.
3. Pat. USA 6,657,194 B2. Multispectral monolithic infrared focal plane array detectors / *R.Ashokan, P.Boieru, Y.Chen, J.P.Faurie, S. Sirananthan.* – 2003.
4. Сусов Е.В., Смолин О.В., Володин Е.Б. Фотоприемное устройство для дистанционного зондирования земли из космоса или самолета // Наука и технология в промышленности. – 2005. – № 3. Конгресс по безопасности. – С. 18–22.
5. *Villani T.S.* Performance of Generation III 640×480 PtSi MOS Array // Proc. of SPIE. – 1994. – Vol. 2225. – P. 2–10.
6. *Beystrum T., Himoto R., Jacksen N., Sutton M.* Low cost PbSalt FPA-s // Proc. of SPIE. – 2004. – Vol. 5406. – P. 287–294.
7. *Vergara G.* Progress on uncooled PbSe detectors for low cost applications // Proc. of SPIE. – 2004. – Vol. 5406. – P. 279–286.

8. Third generation FPA development status at raytheon vision systems / *W.A. Radford, E.A. Patten, D.F. King et al.* // Proc. of SPIE. – 2005. – Vol. 5783. – P. 331–339.

9. Pat. USA 5,965,875. Color separation in an active pixel cell imaging array using a triple-well-structure / *R.B. Merrill.* – 1999.

Статья поступила
19 марта 2007 г.

Уздовский Валерий Владимирович – доктор физико-математических наук, профессор кафедры общей физики МИЭТ. *Область научных интересов:* физика полупроводников, фотоэлектрические процессы в объемных каналах фотоприемников.

Володин Евгений Борисович – кандидат технических наук, старший научный сотрудник ОАО «Ангстрем». *Область научных интересов:* физика полупроводников, схемотехника полупроводниковых приборов.

Игнатьева Елена Александровна – аспирант кафедры общей физики МИЭТ. *Область научных интересов:* физика полупроводников, моделирование фотоэлектрических процессов в фотоприемных структурах.

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

С тематическими указателями статей за 1996 - 2007 гг., аннотациями и с содержанием последних номеров можно ознакомиться на нашем сайте:

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

Использование волноводных фотонных структур для измерения параметров нанометровых металлических слоев на изолирующих подложках

Д.А.Усанов, А.В.Скрипаль, А.В.Абрамов, А.С.Боголюбов

Саратовский государственный университет им. Н.Г.Чернышевского

В.С.Скворцов, М.К.Мерданов

ОАО «НПК «Тристан» (г. Москва)

Представлены результаты исследования возможности применения фотонных волноводных структур для измерения параметров нанометровых металлических слоев на изолирующих подложках. Показано, что выбором параметров фотонной структуры и частоты зондирующего излучения в области «окна» прозрачности, обусловленного нарушением периодичности фотонной структуры, вследствие изменения толщины или диэлектрической проницаемости одного из ее слоев, возможно регулирование чувствительности коэффициента отражения к изменению толщины металлического слоя измеряемой структуры.

Интенсивное развитие нанотехнологий стимулировало разработку и создание нового класса периодических структур, получивших название фотонных кристаллов. Эти структуры состоят из периодически расположенных составляющих, размеры которых сравнимы с длиной волны распространяющегося в них электромагнитного излучения. В спектре пропускания такой структуры имеется частотная область, запрещенная для распространения электромагнитной волны – аналог запрещенной зоны в кристаллах. При наличии нарушений в периодичности слоистой структуры в запрещенной зоне фотонного кристалла могут возникать узкие «окна» прозрачности [1].

В СВЧ-диапазоне одномерный фотонный кристалл может быть реализован с помощью планарных линий передач с периодически изменяющейся структурой [2, 3]. На основе СВЧ-фотонных кристаллов созданы полосовые фильтры, перестраиваемые резонаторы, миниатюрные антенны [4–6]. Известна высокая чувствительность частотной зависимости «окон» прозрачности в запрещенной зоне фотонного кристалла к нарушению периодичности в слоистой структуре. Авторами [7] показана возможность использования этого свойства фотонных кристаллов для контроля диэлектрической проницаемости слоистых диэлектриков.

Отметим, что к настоящему времени существует множество методов измерения параметров диэлектрических слоев, в том числе на СВЧ. Менее разработаны методы измерения параметров металлодиэлектрических и металлополупроводниковых структур, в особенности в области нанометровых толщин металлических покрытий. Такого рода структуры используются в акустоэлектронике при создании линий задержки, в микро- и наноэлектронике и других областях.

В работах [8–10] показана возможность измерения толщины нанометровых металлических слоев, нанесенных на полупроводниковую или диэлектрическую подложку, по спектрам отражения электромагнитного излучения. Реализация предложенного в [9, 10] способа предполагает необходимость проведения измерений в широкой полосе частот.

В настоящей работе приведены результаты исследования возможности использования отмеченных выше свойств волноводных фотонных структур для измерения параметров нанометровых металлических слоев на изолирующих подложках.

Теоретическая модель. В качестве составляющих частей волноводного фотонного кристалла использовался отрезок волновода со структурой, представляющей собой периодически чередующиеся слои двух типов диэлектриков с различными значениями толщины и диэлектрической проницаемости.

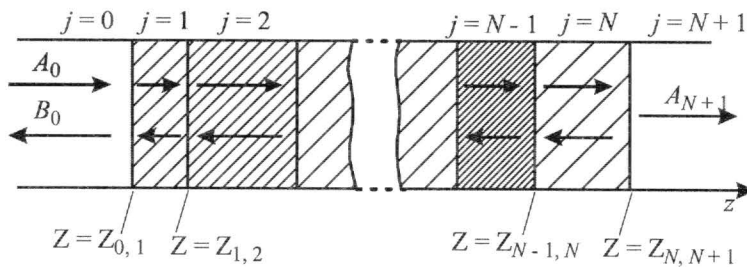


Рис.1. Слоистая структура, состоящая из N слоев

Для расчета коэффициентов отражения и прохождения электромагнитной волны при ее нормальном падении на такую многослойную структуру (рис.1) использовалась матрица передачи волны между областями с различными значениями постоянной распространения электромагнитной волны γ_j и γ_{j+1} [8–10]:

$$T(z_{j,j+1}) = \begin{pmatrix} \frac{\gamma_{j+1} + \gamma_j}{2\gamma_{j+1}} e^{(\gamma_{j+1} - \gamma_j)z_{j,j+1}} & \frac{\gamma_{j+1} - \gamma_j}{2\gamma_{j+1}} e^{(\gamma_{j+1} + \gamma_j)z_{j,j+1}} \\ \frac{\gamma_{j+1} - \gamma_j}{2\gamma_{j+1}} e^{-(\gamma_{j+1} + \gamma_j)z_{j,j+1}} & \frac{\gamma_{j+1} + \gamma_j}{2\gamma_{j+1}} e^{-(\gamma_{j+1} - \gamma_j)z_{j,j+1}} \end{pmatrix},$$

которая связывает коэффициенты A_j , B_j и A_{j+1} , B_{j+1} , определяющие амплитуды падающих и отраженных волн по обе стороны от границы $z_{j,j+1}$, соотношением

$$\begin{pmatrix} A_{j+1} \\ B_{j+1} \end{pmatrix} = T(z_{j,j+1}) \cdot \begin{pmatrix} A_j \\ B_j \end{pmatrix}.$$

Коэффициенты A_{N+1} и B_0 , определяющие амплитуды волны, прошедшей через многослойную структуру (см. рис.1), и волны, отраженной от нее, связаны с коэффициентом A_0 , определяющим амплитуду падающей волны, следующим соотношением:

$$\begin{pmatrix} A_{N+1} \\ 0 \end{pmatrix} = T_N \begin{pmatrix} A_0 \\ B_0 \end{pmatrix},$$

где $T_N = \begin{pmatrix} T_N[1, 1] & T_N[1, 2] \\ T_N[2, 1] & T_N[2, 2] \end{pmatrix} = \prod_{j=N}^0 T_{j,(j+1)} = T(z_{N,N+1}) \cdot T(z_{N-1,N}) \dots T(z_{1,2}) \cdot T(z_{0,1})$ есть матрица передачи слоистой структуры, состоящей из N слоев.

Коэффициенты отражения $R = B_0/A_0$ и прохождения $T = A_{N+1}/A_0$ электромагнитной волны, взаимодействующей со слоистой структурой, определяются через элементы матрицы передачи T_N с помощью соотношений

$$R = -\frac{T_N[2, 1]}{T_N[2, 2]}, \quad (1)$$

$$T = \frac{T_N[1, 1] \cdot T_N[2, 2] - T_N[1, 2] \cdot T_N[2, 1]}{T_N[2, 2]}. \quad (2)$$

Полученные соотношения могут быть использованы для нахождения значений коэффициентов отражения и прохождения при взаимодействии электромагнитной волны с многослойными структурами, в том числе периодическими.

Рассматривалась 11-слойная структура фотонного кристалла, представляющая собой чередующиеся слои керамики (Al_2O_3) толщиной 1 мм с диэлектрической проницаемостью $\epsilon_c = 9,6$ и пенопласта толщиной 12 мм и диэлектрической проницаемостью $\epsilon_f = 1,1$.

Рассчитанная с использованием выражения (1) зависимость коэффициента отражения R электромагнитной волны от 11-слойной структуры фотонного кристалла в 3-сантиметровом диапазоне длин волн при распространении волны типа H_{10} представлена на рис.2, кривая 1. На этом же рисунке приведены результаты расчетов частотной зависимости коэффициента отражения фотонного кристалла при наличии в нем нарушения в виде одного (шестого) слоя меньшей толщины d_6 (см. рис.2, кривые 2–5). В этом случае на частотной зависимости коэффициента отражения появляется узкое «окно» прозрачности, местоположение которого можно регулировать, изменяя толщину этого слоя диэлектрика.

По аналогии с реальными кристаллами, при введении в которые нарушений в виде примесных атомов, создающих донорные или акцепторные уровни в запрещенной зоне, создание описанных выше нарушений в фотонных кристаллах, как следует из рис.2, также приводит к появлению в запрещенной зоне «донорных» окон прозрачности, расположенных вблизи верхней частотной границы запрещенной зоны (кривая 5), или «акцепторных» окон, расположенных вблизи нижней частотной границы запрещенной зоны (кривая 2).

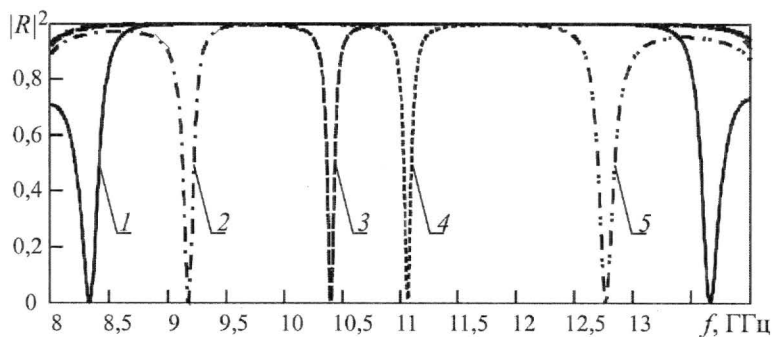


Рис.2. Частотные зависимости квадрата модуля коэффициента отражения фотонного кристалла для различных значений толщины нарушенного 6-го слоя d_6 , мм (слой пенопласта): 2 – 7,0; 3 – 4,0; 4 – 3,0; 5 – 1,0 (кривая 1 соответствует фотонному кристаллу без нарушений)

При изменении диэлектрической проницаемости одного из слоев такого фотонного кристалла величина коэффициента отражения в «окне» прозрачности и его местоположение на частотной зависимости $R(\omega)$ изменяется.

Результаты вычисления частотных зависимостей коэффициента отражения фотонного кристалла с «окном» прозрачности для различных значений диэлектрической проницаемости ϵ одного из слоев представлены на рис.3.

Из приведенных на рис.3 зависимостей следует, что по частотной зависимости квадрата модуля коэффициента отражения фотонного кристалла $R(\omega)$ с использованием соотношения (1) может быть определена диэлектрическая проницаемость пластин в широком диапазоне значений. Расчеты показывают, что, изменяя толщину слоя неоднородности и тем самым изменяя положение «окна» прозрачности в частотном диапазоне, можно регулировать чувствительность коэффициента отражения к величине ϵ измеряемой пластины в диапазоне значений как меньших, так и больших ϵ_c .

Можно предположить, что при размещении такого фотонного кристалла перед измеряемым образцом, представляющим собой полупроводниковую или диэлектрическую пластину с нанесенным на нее нанометровым металлическим слоем, частотная зависимость коэффициента отражения в «окне» прозрачности фотонного кристалла будет зависеть от толщины металлического слоя.

На рис.4 представлены рассчитанные частотные зависимости коэффициента отражения фотонного кристалла вблизи «окна» прозрачности при наличии в нем нарушения в виде одного (шестого) слоя меньшей толщины d_6 для различных значений толщины нанометрового металлического слоя h . Как следует из результатов, при изменении h от 0 до 200 нм наблюдается сдвиг «окна» прозрачности от первоначального положения на величину ~ 50 МГц.

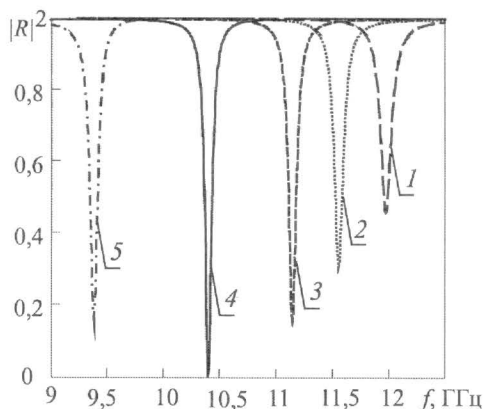


Рис.3. Частотные зависимости квадрата модуля коэффициента отражения фотонного кристалла для различных значений диэлектрической проницаемости ϵ 7-го слоя при толщине нарушенного 6-го слоя $d_6 = 4$ мм (пенопласт): 1 – 1; 2 – 3; 3 – 5; 4 – 9,6; 5 – 15

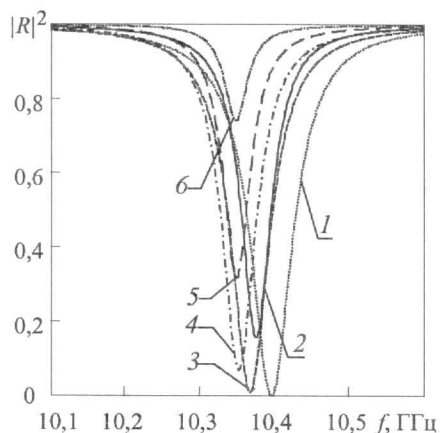


Рис.4. Частотные зависимости квадрата модуля коэффициента отражения фотонного кристалла для различных значений толщины нанометрового металлического слоя h при размещении фотонного кристалла перед измеряемой структурой ($d_6 = 4$ мм): 2 – 0; 3 – 4 нм; 4 – 20 нм; 5 – 50 нм; 6 – 200 нм (кривая 1 соответствует фотонному кристаллу без измеряемой структуры)

На частоте $f_{\min 1} = 10,39$ ГГц, соответствующей минимуму квадрата модуля коэффициента отражения фотонного кристалла без измеряемого образца, коэффициент отражения приближается к насыщению при толщине металлического (хром) слоя больше 40 нм, в то время как на частоте $f_{\min 2} = 10,365$ ГГц, соответствующей минимуму коэффициента отражения фотонного кристалла с измеряемым образцом, коэффициент отражения приближается к насыщению при толщине металлического (хром) слоя больше 150 нм.

Такой характер резонансного отражения позволяет использовать частотные зависимости коэффициента отражения фотонного кристалла при наличии в нем нарушения в виде одного слоя меньшей толщины для регулирования чувствительности коэффициента отражения к изменению толщины нанометрового металлического слоя измеряемой структуры.

Использование частотной зависимости квадрата модуля коэффициента отражения электромагнитного излучения $|R(\omega)|^2$ от фотонной структуры с измеряемым образцом при известных параметрах подложки позволяет из решения уравнения (1) определить толщину $t_{\text{м.иск}}$ нанометровой металлической пленки при известной ее электропроводности.

Для определения искомой толщины $t_{\text{м.иск}}$ нанометровой металлической пленки по частотной зависимости $|R(\omega)|^2$ может быть использован метод наименьших квадратов, при реализации которого находится такое значение параметра $t_{\text{м.иск}}$, при котором сумма $S(t_{\text{м.иск}})$ квадратов разностей экспериментальных $|R_{\text{эксп}}|^2$ и расчетных $|R(\omega, t_{\text{м.иск}})|^2$ значений квадратов модулей коэффициента отражения [8–10]

$$S(t_{\text{м}}) = \sum \left(|R_{\text{эксп}}|^2 - |R(\omega, t_{\text{м.иск}})|^2 \right)^2$$

становится минимальной.

Искомое значение толщины металлической пленки $t_{\text{м.иск}}$ определяется численным методом в результате решения уравнения

$$\frac{\partial S(t_{\text{м.иск}})}{\partial t_{\text{м.иск}}} = \frac{\partial \left(\sum \left(|R_{\text{эксп}}|^2 - |R(\omega, t_{\text{м.иск}})|^2 \right)^2 \right)}{\partial t_{\text{м.иск}}} = 0.$$

При размещении измеряемого образца перед фотонным кристаллом, вид частотной зависимости коэффициента отражения в области «окна» прозрачности, как следует из результатов расчета, приведенных на рис.5, также претерпевает существенные изменения с ростом толщины металлического слоя. При этом наиболее резкое изменение величины квадрата модуля коэффициента отражения в минимуме зависимости $|R(\omega)|^2$ наблюдается в диапазоне толщин металлической (хром) пленки 0 – 20 нм.

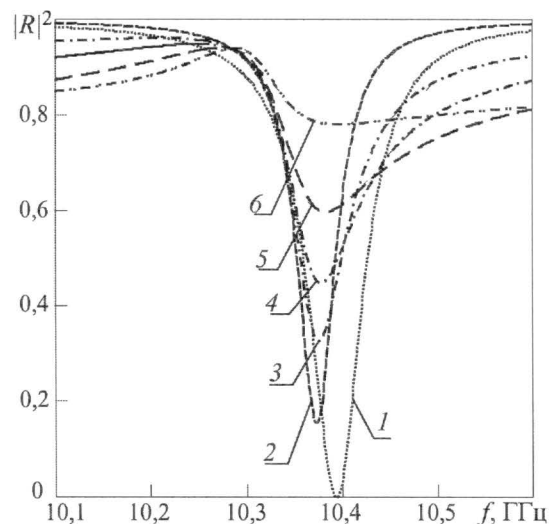


Рис.5. Частотные зависимости квадрата модуля коэффициента отражения фотонного кристалла для различных значений толщины нанометрового металлического слоя h при размещении измеряемой структуры перед фотонным кристаллом при толщине нарушенного 6-го слоя $d_6 = 4$ мм (пенопласт): 2 – 0; 3 – 2,5 нм; 4 – 5 нм; 5 – 10 нм; 6 – 25 нм (кривая 1 соответствует фотонному кристаллу без измеряемой структуры)

Экспериментальные результаты. В ходе экспериментальных исследований в диапазоне частот 8–12 ГГц была измерена частотная зависимость модуля коэффициента отражения электромагнитной волны от 11-слойной структуры, состоящей из чередующихся слоев поликора ($\epsilon = 9,6$) толщиной 1 мм и пенопласта ($\epsilon = 1,1$) толщиной 12 мм. Измерения проводились с помощью панорамного измерителя КСВН и ослабления Р2 – 61.

На рис.6 представлены измеренные частотные зависимости квадрата модуля коэффициента отражения $|R_{\text{экс}}|^2$ электромагнитной волны от фотонного кристалла вблизи «окна» прозрачности для различных значений толщины 6-го слоя (пенопласта). Приведенные результаты подтверждают возможность регулирования местоположение «окна» прозрачности в запрещенной зоне фотонного кристалла на основе волноводных структур.

Результаты измерений частотных зависимостей квадрата модуля коэффициента отражения фотонного кристалла с «окном» прозрачности для различных значений диэлектрической проницаемости ϵ 7-го слоя приведены на рис.7. Представленные зависимости демонстрируют высокую чувствительность вида частотной и амплитудной характеристик «окна» прозрачности в запрещенной зоне фотонного кристалла от диэлектрической проницаемости одного из слоев периодической структуры.

Результаты измерений $|R_{\text{экс}}(\omega)|^2$ для различных значений толщины пленки хрома, нанесенной на поликоровую подложку, при размещении фотонного кристалла перед измеряемой структурой, при наличии в нем нарушения в виде шестого слоя меньшей толщины d_6 , представлены на рис.8,а. При увеличении толщины слоя хрома от нуля до 144 нм величина $|R_{\text{экс}}(\omega)|^2$ в минимуме «окна» прозрачности фотонного кристалла изменяется в интервале от 0,03 до 0,5.

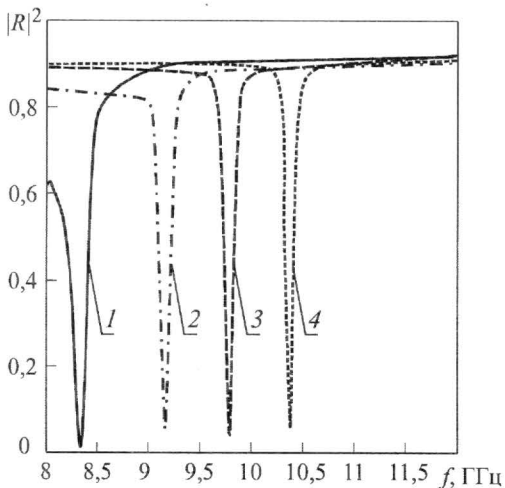


Рис.6. Измеренные частотные зависимости квадрата модуля коэффициента отражения фотонного кристалла для различных значений толщины нарушенного 6-го слоя d_6 , мм (слой пенопласта): 2 – 7,0; 3 – 5,0; 4 – 4,0 (кривая 1 соответствует фотонному кристаллу без нарушений)

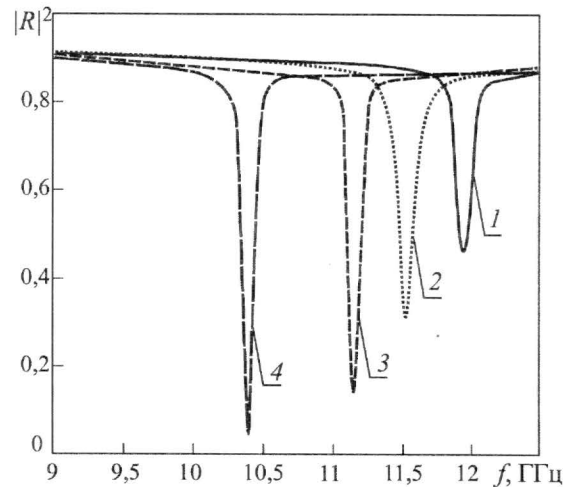


Рис.7. Измеренные частотные зависимости квадрата модуля коэффициента отражения 11-слойной структуры фотонного кристалла для различных значений ϵ 7-го слоя при толщине нарушенного 6-го слоя $d_6 = 4$ мм: 1 – 1,0 (воздушный зазор); 2 – 3,0 (сополимер стирола СТ-3); 3 – 5,0 (сополимер стирола СТ-5); 4 – 9,6 (поликор)

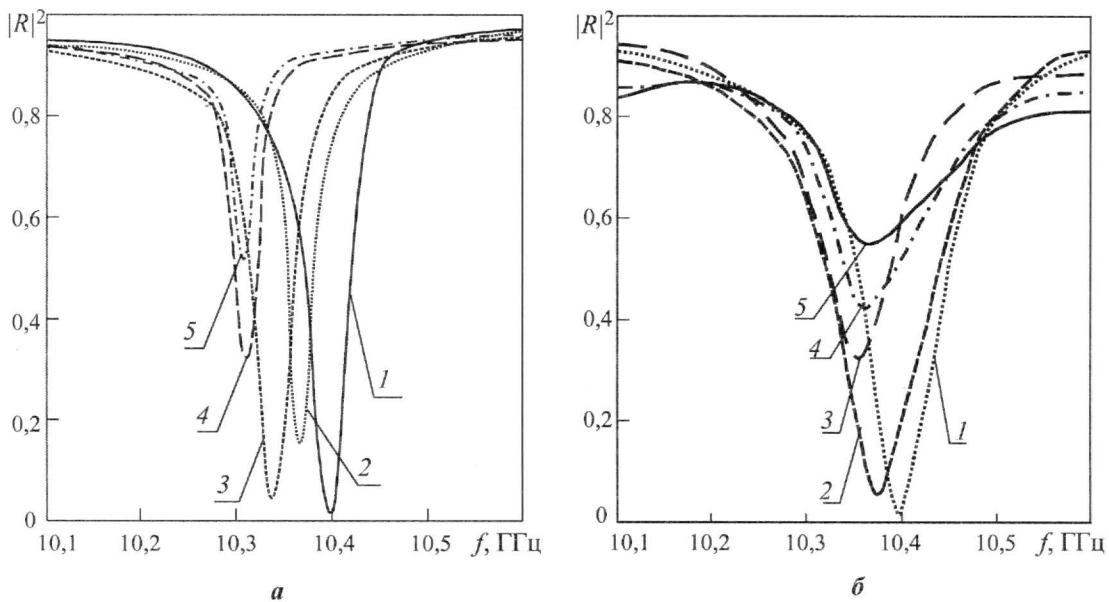


Рис.8. Измеренные частотные зависимости квадрата модуля коэффициента отражения фотонного кристалла при наличии в нем нарушения в виде 6-го слоя (пенопласт) меньшей толщины ($d_6 = 4$ мм) для различных значений толщины нанометрового металлического слоя h при размещении фотонного кристалла: а – перед измеряемой структурой (2 – 0; 3 – 21 нм; 4 – 76 нм; 5 – 144 нм); б – после измеряемой структуры (2 – 0; 3 – 12 нм; 4 – 18 нм; 5 – 21 нм). Кривая 1 соответствует фотонному кристаллу без измеряемой структуры

Результаты измерений $|R_{\text{эксп}}(\omega)|^2$ для различных значений толщины пленки хрома, нанесенной на поликоровую подложку, при размещении измеряемой структуры перед фотонным кристаллом представлены на рис.8,б. В этом случае величина $|R_{\text{эксп}}(\omega)|^2$ в минимуме «окна» прозрачности фотонного кристалла изменяется от 0,18 до 0,55 единиц при увеличении толщины слоя хрома от нуля до 20 нм.

Некоторое количественное расхождение теоретических результатов, представленных на рис.4 и 5, с экспериментальными результатами, представленными на рис.8, может быть объяснено следующими трудно учитываемыми факторами: наличием зазоров между слоями периодической структуры, отличием формы слоев от идеальной (принятой в теории), неоднородностью диэлектриков.

Таким образом, показана возможность использования волноводных фотонных структур для измерения параметров нанометровых металлических слоев на изолирующих подложках. Установлено, что выбором параметров фотонной структуры и частоты зондирующего излучения в области «окна» прозрачности фотонной структуры, обусловленного наличием нарушения в его периодической структуре, возможно регулирование чувствительности коэффициента отражения к изменению толщины металлического слоя измеряемой структуры.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ (грант РФФИ 05-08-17924 а, грант Президента РФ для поддержки молодых российских ученых МК-2083.2007.8).

Литература

1. **Yablonovitch E.** Inhibited spontaneous emission in solid-state physics and electronics // Phys. Rev. Lett. – 1987. – Vol. 58, N 20. – P. 2059–2062.
2. **Duchamp J.M., Perrier A.L., Ferrari P.** MS, CPW and Fin-line attenuators and dispersion effects on microwave and millimeter wave PBG structure parameters // Proc. of 34rd European Microwave Conf. (Amsterdam, Netherlands, 12–14-th October 2004). – 2004. – Vol. 2. – P. 877–880.
3. **Tae-Yeoul and Kai Chang.** Uniplanar one-dimensional photonic-bandgap structures and resonators // IEEE Transactions on microwave theory and techniques. – 2001. – Vol. 49, N 3. – P. 549–553.
4. **Crystal Gerard W. Burns, Thayne I.G., Arnold J.M.** Improvement of Planar Antenna Efficiency When Integrated With a Millimetre-Wave Photonic // Proc. of European Conf. on Wireless Technology (Amsterdam, Netherlands, 11–12-th October 2004). – 2004. – P. 229–232.
5. **Pattern Hsien-Shun Wu, Ching-Kuang C.** Tzuang Miniaturized High-Gain Synthetic Rectangular Waveguide Antenna of Near-Omnidirectional Radiation // Proc. of 34-rd European Microwave Conf. (Amsterdam, Netherlands, 12–14-th October 2004). – 2004. – Vol. 2. – P. 1189–1192.
6. **Kuriavidou C.A., Contopanagos H.F., Alexopoulos N.G.** Monolithic waveguide filters using printed photonic-bandgap materials // IEEE Transactions on microwave theory and techniques. – 2001. – Vol. 49, N 2. – P. 297–306.
7. **Oliynik V., Makarov D., Danilov V.** Dielectric permeability measurements with waveguide bragg structure usage // Proc. of 15-th-Int. Crimean Conf. «Microwave & Telecommunication Technology» (CriMiCo'2005) (Sevastopol, Crimea, Ukraine 12–16 September 2005.). – 2005. – P. 785, 786.
8. **Усанов Д.А., Скрипаль А.В., Абрамов А.В., Боголюбов А.С.** Измерения толщины нанометровых слоев металла и электропроводности полупроводника в структурах металл–полупроводник по спектрам отражения и прохождения электромагнитного излучения // ЖТФ. – 2006. – Т. 76. Вып. 5. – С. 112–117.
9. Measurements of thickness of metal films in sandwich structures by the microwave reflection spectrum / **D.A.Usanov, Al.V.Skripal, A.V. Abramov et al.** // Proc. of 36-rd European Microwave Conf. (Manchester, UK, 10–15-th September 2006). – 2006. – P. 921–924.
10. Методика измерения электропроводности нанометровых металлических пленок в слоистых структурах по спектрам отражения электромагнитного излучения / **Ю.А.Чаплыгин, Д.А.Усанов, А.В.Скрипаль и др.** // Изв. вузов. Электроника. – 2006. – № 6. – С. 27–35.

Статья поступила 25 сентября 2007 г.

Усанов Дмитрий Александрович – доктор физико-математических наук, профессор, заслуженный деятель науки РФ, заведующий кафедрой физики твердого тела, проректор по НИР Саратовского государственного университета им. Н.Г. Чернышевского. *Область научных интересов:* твердотельная, микро- и нанoeлектроника, радиофизика.

Скрипаль Александр Владимирович – доктор физико-математических наук, профессор кафедры физики твердого тела Саратовского государственного университета им. Н.Г. Чернышевского. *Область научных интересов:* твердотельная, микро- и нанoeлектроника, радиофизика.

Абрамов Антон Валерьевич – кандидат физико-математических наук, ассистент кафедры физики твердого тела Саратовского государственного университета им. Н.Г. Чернышевского. *Область научных интересов:* физика полупроводников, твердотельная электроника.

Боголюбов Антон Сергеевич – кандидат физико-математических наук, ассистент кафедры физики твердого тела Саратовского государственного университета им. Н.Г. Чернышевского. *Область научных интересов:* физика полупроводников, твердотельная электроника.

Скворцов Владимир Сергеевич – заместитель генерального директора по НИР ОАО «НПК «Тристан», г. Москва. *Область научных интересов:* твердотельная, микро- и нанoeлектроника, радиофизика.

Мерданов Мердан Казимагомедович – заместитель генерального директора по инновациям ОАО «НПК «Тристан», г. Москва. *Область научных интересов:* твердотельная, микро- и нанoeлектроника, радиофизика.

СХЕМОТЕХНИКА И ПРОЕКТИРОВАНИЕ

УДК 621.38.014.144:519.876.5:004.42:658.512.22.011.56

Усовершенствованная подсистема электротеплового моделирования систем на печатных платах в САПР Mentor Graphics

К.О.Петросянц, П.А.Козынько

Московский государственный институт электроники и математики
Центр Mentor Graphics – МИЭМ

В базовый маршрут проектирования печатных плат компании Mentor Graphics включен этап автоматизированного электротеплового моделирования. Разработана программа-диспетчер TransPower, управляющая итерационным процессом электротеплового расчета, объединяющая в единый цикл программы электрического (Analog Designer) и теплового (BETAsoft) моделирования. В результате резко снижены трудоемкость и время выполнения этапа электротеплового моделирования печатных плат, повышена точность и достоверность расчетов, исключены ошибки, вносимые пользователем.

Нормальное функционирование электронной аппаратуры возможно лишь при условии обеспечения тепловых режимов ее элементов в заданных пределах. Современные дискретные элементы, логические устройства, микропроцессоры и др., как правило, упаковываются в малогабаритные корпуса, а плотность их размещения на печатных платах (ПП) постоянно повышается. Как следствие, во многих случаях увеличиваются удельные рассеиваемые мощности элементов, повышаются их рабочие температуры, что заставляет разработчиков искать новые конструктивно-технологические решения и совершенствовать способы отвода тепла. Поэтому расчет тепловых режимов электронных устройств на ПП – чрезвычайно важная и актуальная задача для обеспечения их работоспособности и надежности. Задача решается за счет включения в промышленные САПР ПП программ теплового анализа [1, 2].

Современные программы теплового анализа печатных плат представляют собой, как правило, автономные продукты, ориентированные на определенные системы проектирования ПП. Одной из самых популярных, по оценкам специалистов, является программа BETAsoft Board компании Dynamic Soft Analysis [3], которая поставлялась как штатное средство для теплового моделирования в составе САПР компании Mentor Graphics. Разработчиков ПП привлекает, во-первых, высокая достоверность получаемых с помощью BETAsoft результатов и, во-вторых, то обстоятельство, что реализован встроенный интерфейс связи с ней в мощном пакете разработки печатных плат Expedition PCB, который позволяет напрямую обмениваться с BETAsoft данными, описывающими конструкцию ПП: позиционные обозначения, типы компонентов, их форма и координаты и т.п.

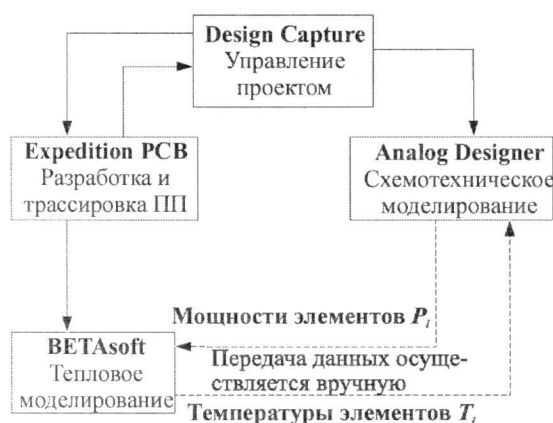


Рис.1. Схема взаимодействия программ при тепловом моделировании ПП в САПР Mentor Graphics

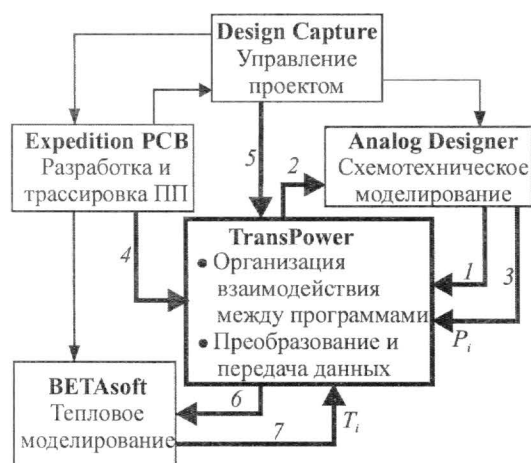


Рис.2. Взаимодействие программ при автоматизированном электротепловом моделировании

Схема взаимодействия программ в САПР Mentor Graphics при тепловом моделировании ПП показана на рис.1.

К сожалению, передача данных о мощностях элементов P_i из Analog Designer в BETAsoft и о температурах элементов T_i из BETAsoft в Analog Designer осуществляется пользователем вручную [4].

Автоматизированная процедура электротеплового моделирования. Перечисленные выше недостатки устранены в предложенной и реализованной на практике подсистеме автоматизированного электротеплового моделирования ПП (рис.2).

Существовавшая ранее структура передачи данных (см. рис.1) дополнена специально разработанной программой-диспетчером TransPower (на рис.2 обозначена жирными линиями), которая вместо ручной передачи данных из Analog Designer в BETAsoft и обратно, во-первых, реализует автоматизированный обмен информацией между этими программами и, во-вторых, организует итерационный процесс совместного электротеплового расчета ПП.

Программа TransPower собирает информацию из файлов трех типов: файлов, сгенерированных Expedition PCB для BETAsoft, и файлов результатов расчета BETAsoft; файлов задания на схемотехническое моделирование и результатов этого моделирования в Analog Designer; двоичного файла базы данных редактора схемы в пакете управления проектом Design Capture.

Алгоритм электротеплового моделирования выглядит следующим образом (см. рис.2).

1. Анализ spi файла Analog Designer, составление списка греющихся элементов, для которых необходим расчет мощностей (связь 1).

2. Формирование нового spi файла для Analog Designer (связь 2).

3. Результаты моделирования в виде мощностей элементов P_i из Analog Designer добавляются к списку элементов (связь 3).

4. Из файла библиотеки BETAsoft, сгенерированного Expedition PCB, составляется список библиотечных имен (связь 4).

5. С использованием информации из файла схемы (файл Design Capture, связь 5) устанавливается связь между библиотечными именами BETAsoft и схемными именами Analog Designer.

6. Если значения мощностей элементов из списка, составленного на шаге 3, отличаются от тех, которые были получены в предыдущем цикле моделирования (так же на шаге 3), более чем на ϵ_P (заданную точность расчета по мощности, мВт), то используя

связи, установленные на шаге 5, полученные значения мощностей переписываются в файл библиотеки компонентов BETAsoft (связь 6); в противном случае алгоритм прерывается в связи с окончанием.

7. Результат моделирования в виде температур элементов T_i из BETAsoft добавляется к списку элементов (связь 7).

8. Если полученные на шаге 7 температуры элементов отличаются от температур, полученных в предыдущем цикле моделирования (так же на шаге 7), более чем на ε_T (заданную точность расчета по температуре, °C), то осуществляется формирование нового `spi` файла для Analog Designer с учетом полученных на шаге 7 температур (связь 2); в противном случае алгоритм прерывается в связи с окончанием.

9. Переход к шагу 3 алгоритма.

Данный алгоритм прерывается тогда, когда либо мощности, либо температуры, полученные в предыдущем цикле моделирования, отличаются от полученных в текущем цикле менее чем на заданную величину ε , характеризующую точность расчета (шаги 6 и 8 алгоритма).

Пример электротеплового моделирования. Эффективность разработанной подсистемы электротеплового моделирования (см. рис.2) продемонстрируем на примере разработки ПП УНЧ, электрическая схема которого приведена на рис.3. Схема содержит 27 элементов; средняя мощность, рассеиваемая схемой, составляет 5 Вт. Моделирование электрического режима работы УНЧ проводилось с помощью Analog Designer. Размещение элементов

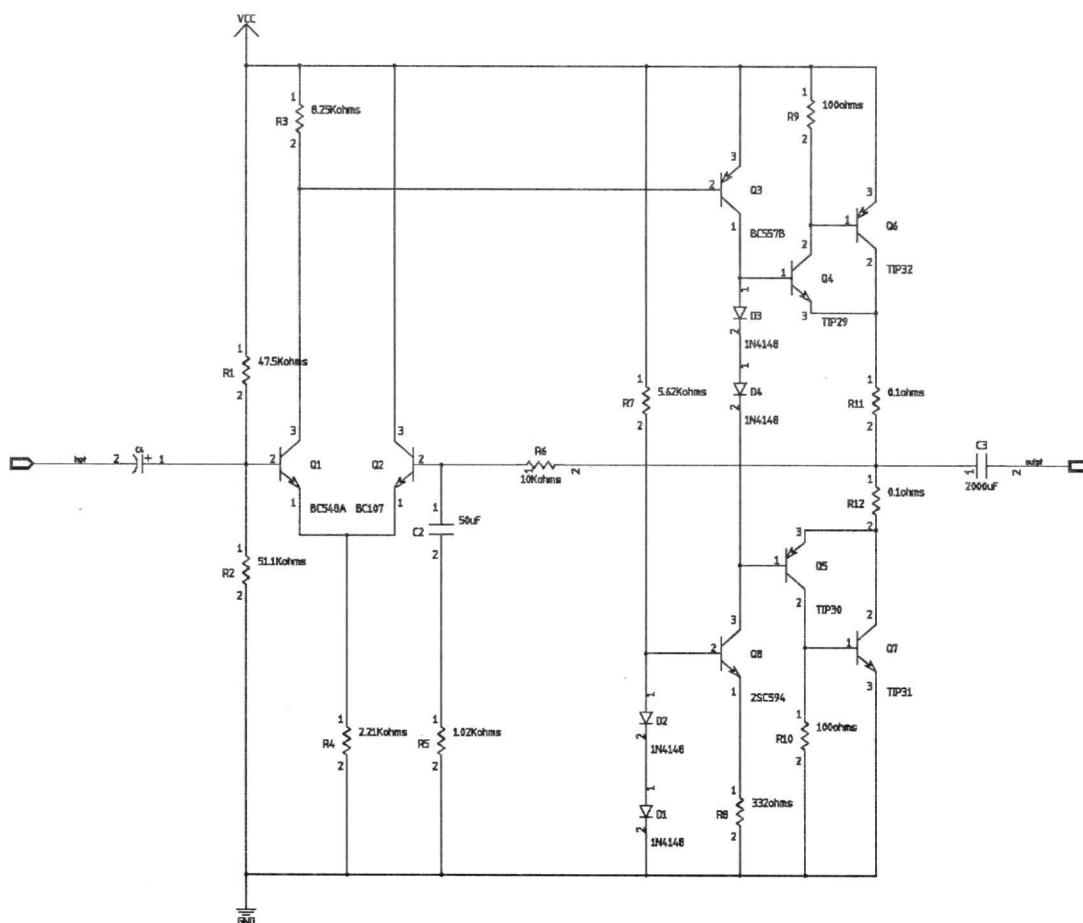


Рис.3. Электрическая схема УНЧ

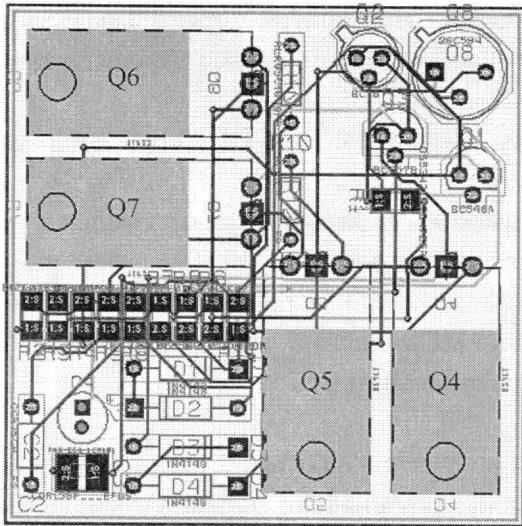


Рис.4. Печатная плата УНЧ

схемы и их разводка на печатной плате были выполнены с помощью Expedition PCB (рис.4). Плата имеет размеры 50×50 мм. Четыре транзистора ($Q4$, $Q5$, $Q6$ и $Q7$) размещены на обратной стороне ПП (на рис.4 обозначены пунктирными линиями).

На рис.5 приведено распределение тепловых полей, полученное с помощью программы BETAsoft, соответственно в первоначальной (см. рис.1) и усовершенствованной (см. рис.2) схемах взаимодействия. Время, затрачиваемое на электротепловой расчет в разных схемах взаимодействия, приведено в таблице.

Результаты электротеплового моделирования

Вариант моделирования	Количество итераций	Максимальная ошибка по T , °C	Время расчета
1. Тепловой расчет в исходной версии САПР ПП Mentor Graphics (см. рис.1)	1 (вручную)	27	20 мин
2. Уточненный электротепловой расчет в исходной версии САПР ПП Mentor Graphics (см. рис.1)	2 (вручную)	5–7	55 мин
3. Электротепловой расчет в усовершенствованной подсистеме (см. рис.2)	6 (автоматически)	0, 2	22 с

При сравнении результатов моделирования (см. таблицу) видно, что в варианте 1 максимальная ошибка расчета температуры элементов при использовании первоначальной схемы Mentor Graphics (см. рис.1) составляет 27 °C. Более точный результат можно получить, сделав две итерации электротеплового моделирования (вариант 2). Однако это более трудоемко и требует гораздо больше времени из-за ручной передачи данных из Analog Designer в BETAsoft и обратно. В этом случае ошибка расчета температур составляет 5–7 °C.

Наилучшие показатели как по точности, так и по времени расчета достигаются с помощью реализованной полностью автоматизированной процедуры электротеплового моделирования (вариант 3).

Таким образом, расширены возможности существующей версии САПР ПП Expedition PCB фирмы Mentor Graphics за счет добавления новой полностью автоматизированной процедуры электротеплового моделирования. С этой целью в структуру САПР введена программа-диспетчер TransPower, которая устанавливает порядок взаимодействия между модулями подсистемы Expedition PCB и автоматически осуществляет конвертацию и передачу данных в процессе обмена между программами электрического (Analog Designer) и теплового (BETAsoft) моделирования ПП.

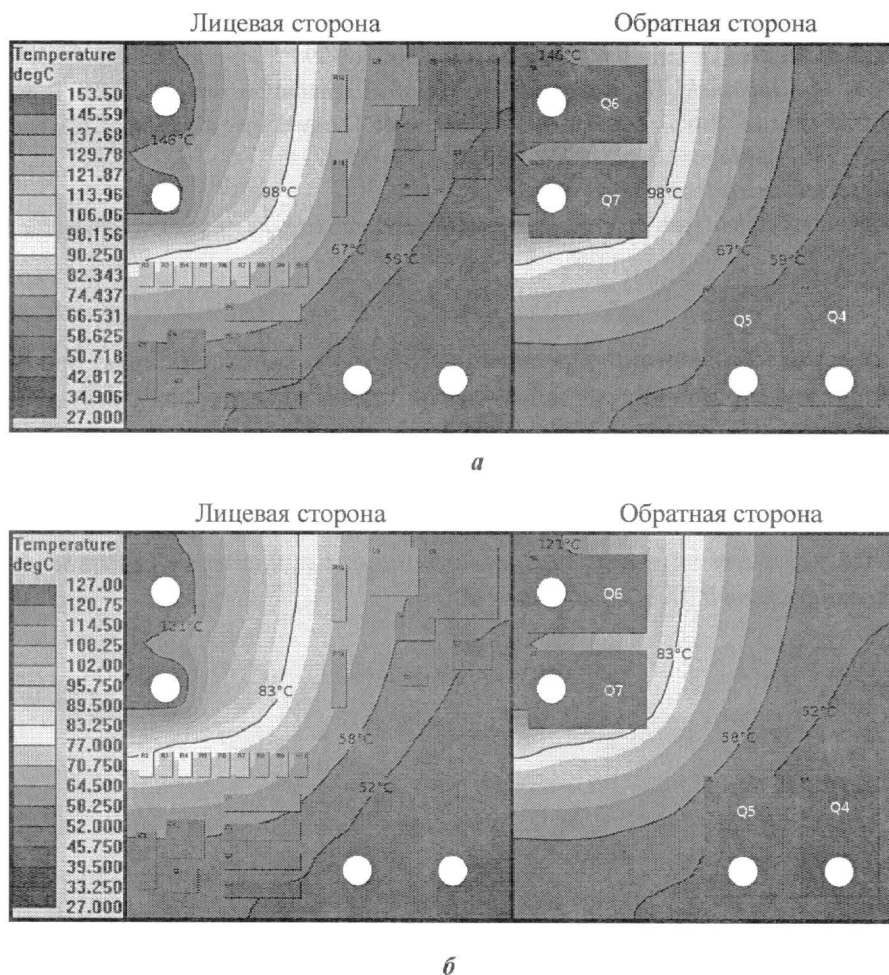


Рис.5. Распределение тепловых полей на плате УНЧ, полученное с использованием первоначальной схемы взаимодействия (а) и усовершенствованной схемы взаимодействия (б)

В результате по сравнению с исходным вариантом САПР ПП Mentor Graphics в новой версии:

- полностью исключены передача данных вручную и случайные ошибки, вносимые пользователем при подготовке и передаче данных между программами электрического и теплового моделирования ПП;
- резко снижена трудоемкость и время выполнения электротеплового моделирования;
- повышена точность и достоверность этапа теплового проектирования печатных плат.

В последнюю версию САПР ПП Expedition PCB фирмы Mentor Graphics были введены новые компоненты – DxDesigner и DxSim, которые предназначены в будущем заменить Design Capture и Analog Designer соответственно. В связи с этим разработаны необходимые изменения и дополнения, которые в ближайшее время будут внесены в TransPower, чтобы реализовать процедуру автоматизированного электротеплового моделирования в новой версии САПР ПП фирмы Mentor Graphics.

Литература

1. Mentor Graphics Product Description – Board Station 500. – 1994.
2. *Furmanczyk M., Jablonski G., Naperalski A.* Thermal simulation with TULSOFT package in the CADENCE design framework // Proc. of the Intern. Workshop of Thermal Investigation of ICs and Microstructures (THERMINIC, 1996) (Budapest, Sept. 1996). – 1996.
3. <http://www.betasoft-thermal.com>
4. http://www.mentor.com/company/partner_programs/opendoor/partners_index/dynamicsoft.cfm

Статья поступила
8 августа 2007 г.

Петросяни Константин Орестович – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой электроники и электротехники, декан факультета автоматизации и вычислительной техники МИЭМ. *Область научных интересов:* моделирование полупроводниковых приборов и элементов БИС, САПР элементной базы ЭВА и РЭА.

Козыинко Пётр Александрович – ассистент кафедры электроники и электротехники МИЭМ. *Область научных интересов:* тепловое и электротепловое моделирование режимов работы РЭА и компонентов.

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

Вы можете оформить подписку на журнал по каталогу «Газеты, журналы» Агентства «Роспечать» в любом почтовом отделении связи.

**Подписной индекс
47570**

Использование схемы замещения для ускорения моделирования кварцевых генераторов

А.А.Красин, С.Ю.Игумина

ООО «ИДМ» (г. Москва)

Представлен метод ускоренного расчета переходных процессов в кварцевых генераторах с использованием доступных средств моделирования электрических схем (Spice, Spectre). Ускорение моделирования достигается за счет преобразования схемы генератора в такую эквивалентную электрическую схему, где напряжения и токи представляют огибающие соответствующих высокочастотных колебаний в исходной схеме, а сами высокочастотные колебания отсутствуют.

Исключительно высокая добротность кварцевых резонаторов ($\sim 10^5$) является серьезной проблемой при проектировании кварцевых генераторов, так как хорошо разработанные и доступные методы прямого моделирования переходных процессов в электрических схемах здесь оказываются неэффективными. Для резонаторов с частотой 10–50 МГц характерное время запуска кварцевого генератора составляет 1–10 мс, что в десятки и сотни тысяч раз превышает период колебаний. При прямом моделировании для получения точной информации о медленном изменении амплитуд, тока потребления и времени запуска приходится проводить расчет высокочастотных колебаний последовательно во всех промежуточных точках этого интервала времени с очень мелким шагом $\sim 0,1$ нс и большими затратами времени.

В предлагаемом методе исходная схема генератора заменяется ее моделью, где электрические напряжения и токи соответствуют огибающим (амплитудам) высокочастотных колебаний в исходной схеме (линия, проходящая точно через пиковые значения тока, строго говоря, не является огибающей, хотя различие между ними при высокой добротности очень мало). Такой прием значительно повышает скорость и сокращает время моделирования нестационарного поведения кварцевого генератора.

Обоснование метода. Кварцевый генератор (рис.1,а) состоит из кварцевого резонатора (кварца) и генераторной схемы. В известной схеме замещения кварца имеется две ветви: последовательная цепочка, включающая емкость C_m , индуктивность L_m и эффективное сопротивление потерь R_s , и параллельно с ней – шунтирующая емкость кварца C_0 . В [1] показано, что удобно анализировать генератор, если представить его в виде цепочки $C_m-L_m-R_s$ и остальной части генератора, включающей C_0 и имеющей комплексный импеданс $Z_C = \text{Re}(Z_C) + j \cdot \text{Im}(Z_C)$ (рис.1,б). Мнимая часть Z_C не влияет на энергию колебаний в резонаторе и очень слабо влияет на их частоту $\omega \approx \frac{1}{\sqrt{L_m C_m}}$.

Поэтому для расчета огибающих (амплитуд) $\text{Im}(Z_C)$ можно из схемы исключить и представить кварцевый генератор в виде обобщенного RLC -резонатора (контура), состоящего из L_m , C_m и зависящего от времени активного сопротивления $R(t) = R_s + \text{Re}(Z_C)$ (рис.1,в).

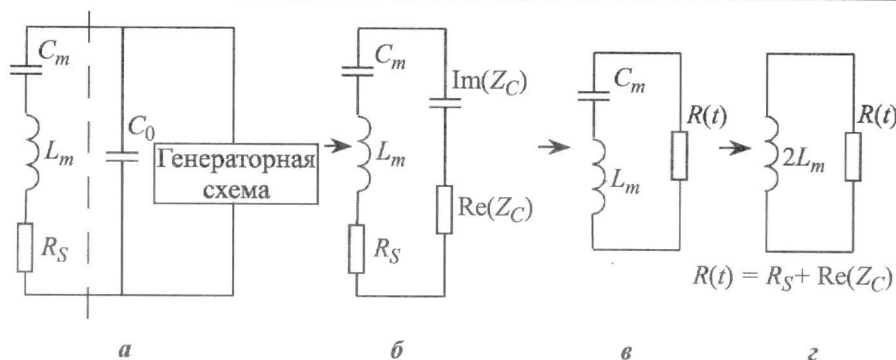


Рис.1. Последовательная замена представлений кварцевого генератора для ускоренного моделирования огибающих

Идея предлагаемого метода заключается в замене RLC -контура на соответствующий ему $R2L$ -контур с удвоенной величиной индуктивности и тем же $R(t)$ (рис.1,г). Уравнение для тока i в RLC -контуре (см. рис.1,в) имеет вид

$$\frac{d^2 i}{dt^2} + \frac{1}{L_m} \cdot \frac{d}{dt} [R(t)i] + \frac{i}{L_m C_m} = 0. \quad (1)$$

Здесь L_m и C_m не зависят от времени. Вводя обозначения $\omega_0 = 1/\sqrt{L_m C_m}$ – циклическая частота колебаний тока в резонаторе без затухания в радианах за секунду, $\tau = \omega_0 t$ – масштабированное безразмерное время в радианах, $Q(t) = \frac{L_m \omega_0}{R(t)}$ – добротность,

$D(t) = \frac{R(t)}{L_m \omega_0} = \frac{1}{Q}$ – величина, обратная добротности, уравнение (1) приведем к виду

$$\frac{d^2 i}{d\tau^2} + D(\tau) \cdot \frac{di}{d\tau} + \left[1 + \frac{dD(\tau)}{d\tau} \right] i = 0. \quad (2)$$

Это однородное линейное уравнение 2-го порядка с переменными коэффициентами перед $\frac{di}{d\tau}$ и i . Уравнение тока I_P в $R2L$ -контуре (см. рис.1,г)

$$\frac{1}{I_P} \cdot \frac{d}{dt} I_P = -\frac{R(t)}{2L_m} = -\frac{R_S + \text{Re}(Z_C)}{2L_m} \quad (3)$$

с теми же обозначениями приводится к виду

$$\frac{dI_P}{d\tau} + 0,5D(\tau) \cdot I_P = 0, \quad (4)$$

а его общее решение

$$I_P(\tau) = I_P(0) \cdot \exp\left[-\int_0^\tau 0,5D(\tau') d\tau'\right], \quad (5)$$

где τ' – переменная интегрирования.

В частном случае, когда добротность не зависит от времени, $\frac{dD}{d\tau} = 0$ и начальные условия $\tau = 0$, $\frac{di}{d\tau} = 0$ и $i(0) = I_P(0)$, решение уравнения (2) представляет колебания,

пиковые значения которых точно описываются выражением (5). Получить решение уравнения (2) в общем случае не представляется возможным, однако и в этом случае пиковые значения колебаний тока описываются выражением (5) с погрешностью

$$\text{Егр} = \frac{I_P - |i_P|}{|i_P|} \cong \frac{1}{4} \left(\frac{D^2}{2} + \frac{dD}{d\tau} \right) \Big|_0^\tau = F(\tau) - F(0). \quad (6)$$

Здесь i_P – пиковое значение тока в RLC -контуре в любой момент времени τ ,

когда $\frac{di}{d\tau} = 0$, а $F(\tau) = \frac{1}{4} \left(\frac{D^2}{2} + \frac{dD}{d\tau} \right)$. Вы-

ражение (6) получено путем анализа результатов численного моделирования тока в RLC - и $R2L$ -контурх с различными функциями $D(\tau)$ и может рассматриваться как аналитическая модель Егр . Эта модель не является точной, но ее ошибка

при $|D| < 0,01$ и $\left| \frac{dD}{d\tau} \right| < 0,01$ не превышает

1% от максимального значения Егр (рис.2 и 3) и быстро уменьшается при

уменьшении $|D|$ и $\left| \frac{dD}{d\tau} \right|$. Заметим, что при

численном моделировании в Spectre более 10^5 колебаний и изменении амплитуды тока на 6 порядков эта погрешность не увеличивается и устойчиво соответствует выражению (6).

Запуск типичного генератора (подобно процессу, показанному на рис.3) происходит при постоянной $D = 1/Q < 0$ в течение интервала времени t_1 , где замена RLC -контра на $R2L$ -контур не дает погрешности. Уровень тока за это время вырастает от ~ 1 нА (тепловые колебания) до ~ 100 мкА, т.е. в $\sim 10^5$ раз. При $t_1 = 1$ мс, $\omega = 2\pi \cdot 10^7$ рад/с из (5) можно оценить уровень обратной добротности $|D| = |1/Q| = 5 \cdot \ln 10 / (t_1 \cdot \omega) = 2 \cdot 10^{-3}$. Далее в течение интервала времени t_2 из-за естественного падения крутизны или под действием петли регулирования $|1/Q|$ уменьшается до 0 с установлением стационарных колебаний. Если это происходит за время $t_2 \sim 0,1$ мс, то

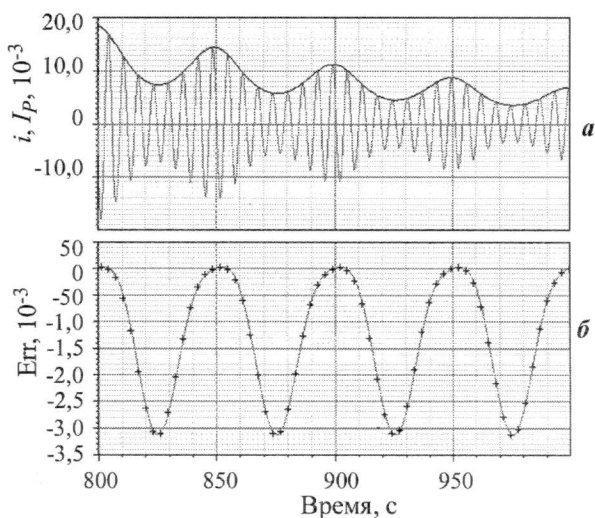


Рис.2. Результаты моделирования токов в RLC - и $R2L$ -контурх, где $\omega_0 = 1$ и $D(\tau) = 0,01 + 0,1 \cdot \sin(\tau)$, $I_P(0) = 1$ (а); фактические значения погрешности Егр (символы «+») и ее модель (б) – сплошная линия (б)

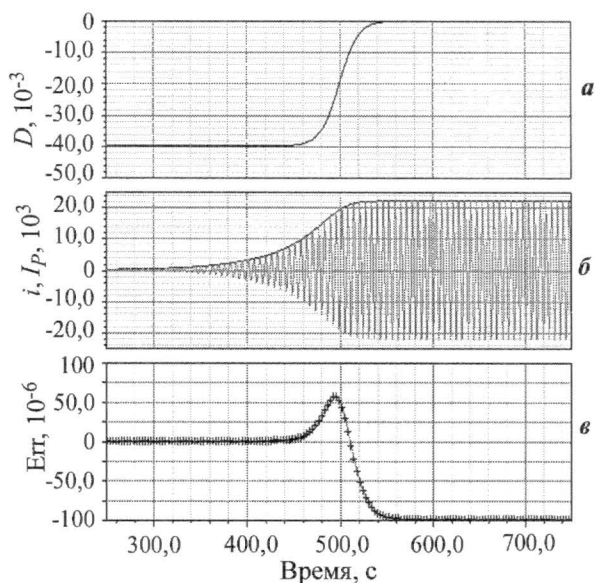


Рис.3. Типичная зависимость $D(\tau)$ при запуске генератора (а) и токи в RLC - и $R2L$ -контурх с $\omega_0 = 1$ и $I_P(0) = 1$ (б), фактические значения погрешности Егр (символы «+») и ее аналитическая модель (в)

$\left| \frac{dD}{d\tau} \right| \approx \frac{2 \cdot 10^{-3}}{2\pi \cdot 10^7 \cdot 10^{-4}} = 0,3 \cdot 10^{-6}$, а максимальная ошибка от замены RLC -контура на $R2L$ -контур согласно (6) составит около $0,5 \cdot 10^{-6}$.

Построение модели. В $R2L$ -контуре (см. рис.1,2) параметры кварца L_m и R_S определяются из его спецификации, и для моделирования амплитуд колебаний в кварцевом генераторе остается построить модель $\text{Re}(Z_C)$. Рассмотрим только наиболее распространенные кварцевые генераторы с параллельным резонансом, построенные по так называемой емкостной трехточечной схеме (рис.4). Все генераторы имеют высокодобротный резонатор, состоящий из кварца X_1 и двух конденсаторов C_1, C_2 . Два последних вместе с паразитной емкостью схемы C_S , параллельной X_1 , образуют емкость нагрузки кварца $C_L = \frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2} + C_S$, номинальное значение которой указывается в его спецификации. Обычно $C_S \ll C_L$.

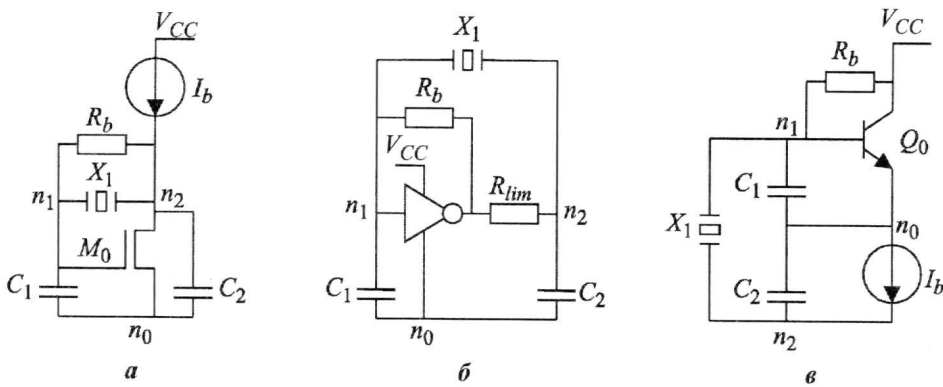


Рис.4. Кварцевые генераторы Пирса (а, б), генератор Колпитца (в)

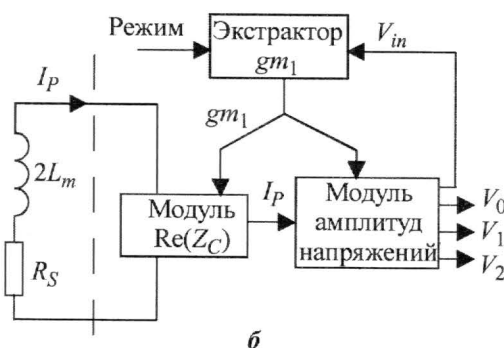
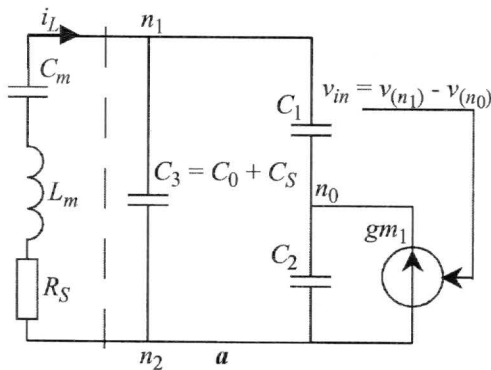


Рис.5. Линейная эквивалентная схема (а) и модель кварцевого генератора (б)

Колебания тока в резонаторе поддерживаются генераторным элементом – транзистором или КМОП-инвертором, который подключен к резонатору в трех точках. Символы n_0, n_1 и n_2 на схемах – имена этих трех узлов.

Из-за высокой добротности резонатора в индуктивности эквивалентной схемы кварца всегда течет неискаженный гармонический ток $i_L = I_p \cdot \sin(\omega t)$ с амплитудой I_p [1], и если игнорировать потери в генераторной схеме, то все три схемы можно представить одной и той же линейной схемой, показанной на рис.5,а.

Здесь емкость $C_3 = C_0 + C_S$ (C_0 – шунтирующая емкость кварца из его спецификации), а транзистор или КМОП-инвертор замещен управляемым источником тока с входным напряжением $v_{in} = v(n_1) - v(n_0)$ и крутизной gm_1 . Вы-

ражение для $\text{Re}(Z_C)$ части схемы на рис.5,а справа от пунктира между точками n_1 и n_2 получено в [1]:

$$\text{Re}(Z_C) = \frac{gm_1(C_1C_2)}{(gm_1C_3)^2 + \omega^2(C_1C_2 + C_2C_3 + C_1C_3)^2}. \quad (7)$$

В этом выражении C_1 , C_2 , C_3 и ω (циклическая частота параллельного резонанса кварца) не зависят от времени, т.е. являются параметрами. А вот крутизна gm_1 зависит от режима генераторного элемента и амплитуды V_{in} его входного напряжения $v_{in} = V_{in} \sin(\omega t + \phi)$ и в нестационарном состоянии изменяется с течением времени. Значит, для получения $\text{Re}(Z_C)$ нужно еще построить модели gm_1 и V_{in} . Вопрос об экстракции крутизны gm_1 будет рассмотрен отдельно, что же касается V_{in} , то, применяя законы Кирхгофа к схеме на рис.5,а, можно получить выражение

$$V_{in} = I_P \left[\sqrt{\left(gm_1 \frac{C_3}{C_2} \right)^2 + \omega^2 \left(C_1 + \frac{C_1C_3}{C_2} + C_3 \right)^2} \right]^{-1} \quad (8)$$

и, если требуется, выражения для амплитуд напряжений V_0 , V_1 , V_2 в узлах n_0 , n_1 , n_2 . Заметим, что выражения эти различны для схем Пирса и Колпитца, так как в них на рис.5,а заземлены разные узлы (n_0 и n_2 соответственно), что надо иметь в виду при их выводе.

В отличие от параметров C_1 , C_2 , C_3 и ω , величины gm_1 , $\text{Re}(Z_C)$, I_P , V_{in} и амплитуды напряжений в узлах изменяются со временем. Их взаимные связи показаны на блок-схеме модели кварцевого генератора на рис.5,б. Модель строится в виде электрической схемы, где нет колебаний на резонансной частоте кварца, а узловые напряжения представляют огибающие (амплитуды) колебаний напряжения в узлах реального генератора и другие меняющиеся во времени величины независимо от их размерности – крутизну, амплитуды колебаний токов и т.д. Для преобразования величин в такой схеме используются модули, описанные на языке verilog-A (Cadence), или источники, реализующие нелинейные передаточные функции (Spice) [2]. Модель на рис.5,б включает $R2L$ -контур, где импеданс генератора представлен модулем $\text{Re}(Z_C)$, а также модуль амплитуд узловых напряжений и модуль экстракции крутизны gm_1 . Модуль $\text{Re}(Z_C)$, с одной стороны, в соответствии с (7) преобразует gm_1 в $\text{Re}(Z_C)$, а с другой – преобразует ток $R2L$ -контура в напряжение, представляющее I_P . Модуль амплитуд напряжений преобразует I_P в V_{in} в соответствии с (8) и в амплитуды узловых напряжений V_0 , V_1 , V_2 . Экстрактор крутизны преобразует режим генераторного элемента и V_{in} в проводимость gm_1 . Рассмотрим экстрактор gm_1 подробнее.

Экстрактор крутизны – это схема, включающая генераторный элемент, например транзистор, и преобразующая V_{in} в крутизну. Легко построить схему, напряжение на выходе которой будет численно равно малосигнальной крутизне транзистора $gm_0 = \frac{I_{out}}{V_{in}}$, где I_{out} и V_{in} – амплитуды выходного тока и входного напряжения.

Достаточно поставить пару таких транзисторов с малой разностью входных напряжений, например 1 мВ, и преобразовать разность их выходных токов в напряжение с коэффициентом 1000 В/А. Достоинство этой схемы в том, что она отражает зависимость gm_0 от режима (тока I_b на рис.4,а,в), температуры и вариаций техпроцесса, заложенную в модели транзистора.

С ростом V_{in} искажения выходного тока транзистора сильно возрастают, но для поддержания колебаний в высокочастотном резонаторе имеет значение лишь первая гармоника тока [1]. Поэтому малосигнальную крутизну gm_1 надо заменить эффективной крутизной $gm_1 = \frac{I_1}{V_{in}}$, где вместо выходного тока стоит амплитуда его первой гар-

моники I_1 . На практике оказывается, что для МОП- и биполярных транзисторов хорошим приближением является $gm_1 = gm_0 f(V_{in}, T)$, где $f(V_{in}, T)$ – функция, зависящая только от амплитуды входного напряжения и температуры. Она равна 1 при амплитуде на входе менее 10 мВ и убывает с ростом амплитуды.

В простейшем случае для МОП-транзистора удовлетворительные результаты можно получить даже с $f(V_{in}, T) = 1 - KV_{in}$, где K – постоянный коэффициент. Для биполярного транзистора хорошо подходит более сложное выражение

$$f(V_{in}, T) = \exp \left[-K \frac{(V_{in}/\phi_T)^A}{(V_{in}/\phi_T)^B - C} \right]. \text{ Здесь } \phi_T = \frac{kT}{q} \text{ – тепловой потенциал; } K, A, B \text{ и } C \text{ –}$$

постоянные коэффициенты. Постоянные коэффициенты в любой аппроксимации $f(V_{in}, T)$ выбирают так, чтобы она как можно лучше соответствовала измеренному путем моделирования транзистора отношению gm_1/gm_0 при всех ожидаемых значениях рабочего тока I_b (см. рис.4,а,в), амплитуды входного напряжения, температуры и вариаций техпроцесса. В экстракторе gm_1 полученная аппроксимация $f(V_{in}, T)$ используется для преобразования малосигнальной крутизны gm_0 и амплитуды V_{in} в крутизну gm_1 .

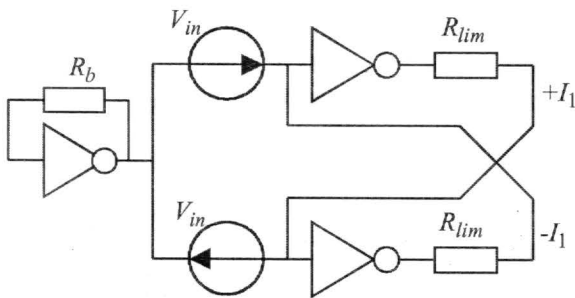


Рис.6. Упрощенная схема экстрактора крутизны КМОП-инвертора

Экстрактор gm_1 для схемы Пирса на рис.4,б строится иначе. Из-за симметрии КМОП-инвертора, дающего два противоположных импульса выходного тока за период, и резистора R_{lim} , ограничивающего ток, напряжение $v(n_2, n_0)$ на емкости C_2 даже при большой амплитуде искажается незначительно. Его амплитуда почти равна амплитуде напряжения $v(n_1, n_0)$, а фазовый сдвиг относительно инверсии $v(n_1, n_0)$ не превышает 30 градусов. Поэтому на практике хорошие результаты дает схема экстрактора крутизны, показанная на рис.6.

Здесь левый инвертор служит для получения рабочей точки, а два других дают положительное и отрицательное пиковое значение выходного тока для получения среднего $I_1 = \frac{|+I_1| + |-I_1|}{2}$. Отношение $\frac{I_1}{V_{in}}$ преобразуется в напряжение и используется в модели как крутизна gm_1 КМОП-инвертора. Как и раньше, такая схема отражает

зависимость gm_1 от амплитуды V_{in} , режима (напряжения питания), температуры и вариаций техпроцесса.

Модель на рис.5,а при необходимости легко модифицируется. Например, потери мощности в резонаторе от резистора R_b , который в схемах на рис.4а,в и 5,а по переменному току включен между узлами n_1 и n_2 параллельно с конденсаторами C_1 , C_2 и C_3 , можно учесть, пересчитав его в эффективное добавочное сопротивление, включенное последовательно с $\text{Re}(Z_C)$:

$$R = \frac{1}{R_b \{ \omega [(C_1 C_2 / (C_1 + C_2)) + C_3] \}^2}.$$

Еще один пример модификации – схема автоматического регулирования амплитуды. В реальных генераторах она сравнивает амплитуду колебаний напряжения с опорным уровнем и в зависимости от их разности изменяет режим генераторного элемента (для транзисторов на рис.4,а и 4,в это ток I_b). В рассматриваемой модели нет высокочастотных колебаний, поэтому детектор амплитуды надо модифицировать так, чтобы он давал такой же отклик на огибающую входного высокочастотного напряжения. Остальная часть схемы регулятора амплитуды может быть включена в модель без изменений. После этого модель позволяет исследовать стабильность петли регулирования (запас по фазе) с помощью обычного АС-анализа.

Отладка и верификация модели. Очень важен вопрос о точности модели. При ее построении каждый модуль сначала отлаживается отдельно. После сборки модели ее поведение сравнивается с поведением схемы реального генератора в одинаковых условиях. В частности, сравниваются стационарные амплитуды модели и генератора. С помощью PSS-анализа в Cadence можно достаточно быстро получить стационарные амплитуды токов и напряжений в генераторе. Важный критерий в нестационарном состоянии – это скорость относительного изменения амплитуды тока I_P в индуктивности схемы замещения кварца, так как при известных L_m и R_S согласно уравнению (3) эта скорость является мерой $\text{Re}(Z_C)$. Точность предсказаний модели 5–10% можно считать удовлетворительной. Если расхождение велико, то следует искать ошибки либо уточнять модель.

Отлаженная модель является очень эффективным инструментом и позволяет исследовать поведение генератора от пуска до выхода в стационарный режим и в переходах между разными стационарными состояниями, например при переключении режима генераторного элемента для подстройки амплитуды. Начальным условием при моделировании запуска генератора служит амплитуда тепловых колебаний в резонаторе

$$I_P = \sqrt{\frac{kT}{L_m}}, \text{ полученная из уравнения для энергии колебаний } W = \frac{L_m I_P^2}{2} = \frac{kT}{2}.$$

Высокая скорость моделирования позволяет в сжатые сроки исследовать влияние большого количества параметров кварца и генератора (L_m , R_S , ω , C_0 , C_L , C_1 , C_2 , C_S), режима генераторного элемента, схемы регулирования амплитуды, температуры, питания и вариаций техпроцесса и оптимизировать схему генератора. Примеры результатов моделирования показаны на рис.7 и 8.

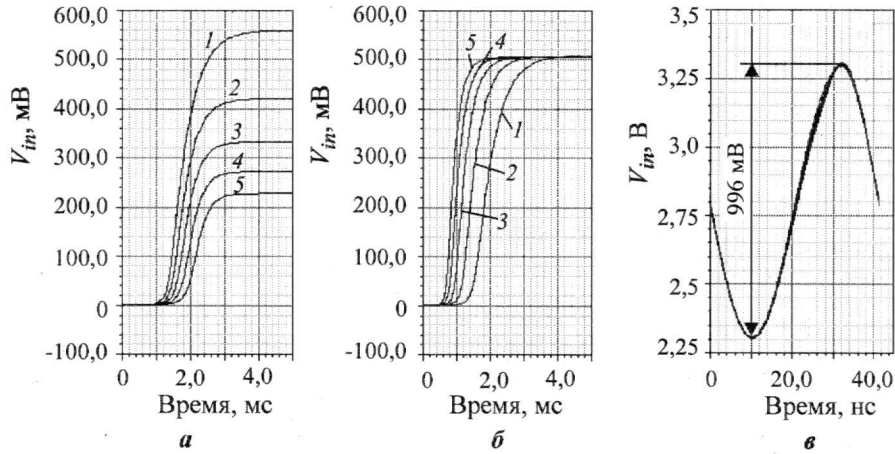


Рис.7. Запуск модели генератора Пирса (см. рис.4,а) с частотой 24 МГц, $C_m = 6$ фФ, $C_0 = 0,7$ пФ, $C_1 = 16$ пФ, $C_2 = 16$ пФ, $C_S = 2$ пФ, R_S равно 10, 20, 30, 40 и 50 Ом (кривые 1–5 соответственно): а – при фиксированном $I_b = 50$ мкА; б – с уровнями тока $I_b(R_S)$, дающими стационарную амплитуду $V_{in} = 500$ мВ; в – стационарные колебания, полученные с помощью PSS-анализа с тем же $I_b(R_S)$

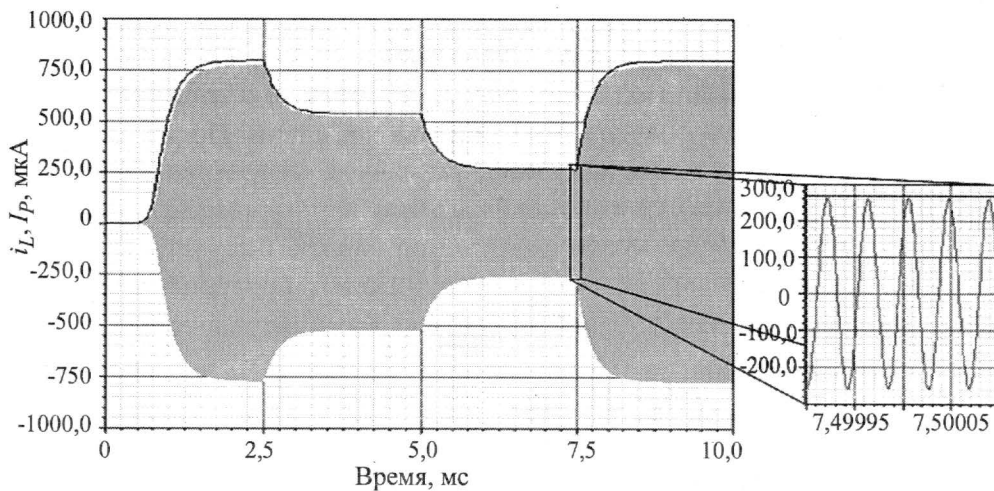


Рис.8. Сравнение результатов прямого моделирования генератора Колпитца (см. рис.4,в) и его модели на примере тока в резонаторе i_L с амплитудой I_P при ступенчатом изменении тока I_b . Погрешность предсказания моделью амплитуды тока составляет менее 4%, время расчета менее 0,5 с (время прямого моделирования составило более 8 ч)

Представленный метод значительно ускоряет моделирование переходных процессов в кварцевом генераторе и позволяет получить зависимость от времени амплитуд колебаний в генераторе, ток потребления во время переходного процесса, время включения и выхода в стационарный режим, а также оценить стабильность петли регулирования амплитуды колебаний. Ускорение моделирования не только сокращает сроки проектирования, но позволяет в разумные сроки провести анализ поведения генератора в различных условиях и с разными резонаторами, оптимизировать его схему по большому количеству параметров и, в конечном счете, снизить риск и повысить надежность проектирования, что особенно важно при проектировании интегральных схем.

Метод дважды был успешно использован при проектировании сложных кварцевых генераторов с подстройкой частоты, ускоренным запуском и автоматической регулировкой амплитуды в составе ИС для локальной радиосвязи. Поведение реальных генераторов в ИС соответствовало расчету, их отладка и коррекция не потребовались.

Литература

1. **Vittoz E.A., Degrauwe M.G.R., Bitz S.** High-performance crystal oscillator circuits: theory and application // IEEE J. Solid-State Circuits. – 1988. – Vol. 23. N 3. – P. 774–783.
2. **Разевиг В.Д.** Система схемотехнического моделирования и проектирования печатных плат Design center (PSpice). – М.: «СК Пресс», 1996. – 286 с.

Статья поступила
30 мая 2007 г.

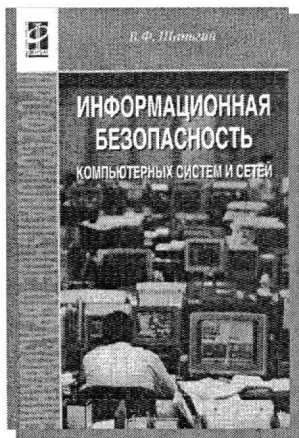
Красин Александр Алексеевич – начальник отдела радиочастотных ИС ООО «ИДМ» (г. Москва). *Область научных интересов:* аналоговые и радиочастотные ИС.

Игумина Софья Юрьевна – инженер-разработчик ИС ООО «ИДМ» (г. Москва). *Область научных интересов:* аналоговые и радиочастотные ИС, их элементная база, моделирование.

Книжные новинки



Шаньгин В.Ф. Информационная безопасность компьютерных систем и сетей: Уч. пособие. - М.: ИД «ФОРУМ»: ИНФРА-М, 2008. - 416 с.: ил.
ISBN 978-5-8199-0331-5 (ИД «ФОРУМ»)
ISBN 978-5-16-003132-3 (ИНФРА-М)



В учебном пособии формулируются основные понятия и определения информационной безопасности и анализируются угрозы информационной безопасности в компьютерных системах и сетях. Определяются базовые понятия политики безопасности. Рассматриваются основные криптографические методы и алгоритмы защиты компьютерной информации.

Обосновывается комплексный подход к обеспечению информационной безопасности корпоративных сетей. Описываются базовые технологии защиты межсетевых обмена данными. Рассматриваются методы и средства антивирусной защиты. Описывается организационно-правовое обеспечение информационной безопасности на основе стандартов и руководящих документов Государственной технической комиссии России.

Предназначено в качестве учебного пособия для студентов, обучающихся по соответствующим специальностям.

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

УДК 621.396.967:629.735.33

Адаптивная стыковка парциальных кадров в радиолокаторах с синтезированной апертурой при сложных видах обзора

О.А.Карпов

ОАО «Корпорация «Фазотрон-НИИР» (г. Москва)

Рассмотрена проблема стыковки парциальных кадров (ПК) радиолокационного изображения в единую радиолокационную карту, которая возникает в авиационных и космических радиолокаторах с синтезированной апертурой антенны при сложных видах обзора земной поверхности. Описан алгоритм адаптивной стыковки ПК и приведены результаты обработки реальных сигналов с помощью этого алгоритма.

К настоящему времени можно считать достаточно устоявшейся классификацию видов обзора земной поверхности в радиолокаторах с синтезированной апертурой антенны (РСА) авиационного и космического базирования с цифровой обработкой сигналов. Впервые в России такая классификация была дана в монографии [1]. Эта классификация различает три основных вида обзора поверхности.

1. Переднебоковой обзор (ПБО). Как подвиды в него входят собственно ПБО, заднебоковой и строго боковой (БО) обзоры. Этот вид обзора характеризуется тем, что при выбранном начальном угле установки $\Delta\alpha_0$ антенна РЛС стабилизируется по азимутальному углу $\alpha = \Delta\alpha_0 = \text{const}$ относительно либо вектора путевой скорости, либо строительной оси носителя, а зона захвата формируется вдоль некоторой линии на земной поверхности.

2. Телескопический обзор (ТО) (другой термин – прожекторный). Он характерен тем, что ось диаграммы направленности реальной антенны (ДНА) на всем интервале съемки отслеживает центральную точку (ЦТ) зоны захвата прямоугольной формы, размеры которой по азимуту и дальности ограничены размерами следа ДНА на земной поверхности.

3. Секторный обзор (СО). При классическом СО ось ДНА за счет сканирования луча в азимутальной плоскости перемещается по земной поверхности в процессе съемки, опережая или отставая от движения носителя. Зона обзора при этом имеет вид сектора. В зависимости от соотношения скоростей носителя и оси ДНА различают прямой и обратный подвиды СО.

Во всех перечисленных видах обзора ширина зоны захвата по дальности определяется шириной следа ДНА по этой координате. Для расширения зоны обзора по дальности в космических РСА используют специальные виды обзора, которые в иностранной литературе [2, 3] получили название сканирующих РСА (ScanSAR). Эти виды обзора реализуются с помощью последовательной съемки перекрывающихся по азимуту и смещенных по дальности зон обзора, что достигается путем дополнительного сканирования лучом ДНА по дальности.

При таком обзоре полная зона захвата формируется из нескольких парциальных зон. При этом предполагается, что каждая парциальная зона захвата в сканирующем по

дальности РСА может быть сформирована одним из «простых» (ПБО, ТО, СО) видов обзора. Поэтому виды обзора типа ScanSAR можно классифицировать как сложные.

В авиационных многофункциональных РСА также используются виды обзора, в которых зона захвата формируется из нескольких парциальных зон. Здесь использование сложных видов обзора может быть обусловлено, например, желанием минимизировать время съемки участков поверхности, превышающих азимутальную ширину ДНА РЛС.

Какими бы соображениями не было обусловлено применение сложных видов обзора, при их реализации возникает ряд дополнительных технических проблем, которые приходится решать при разработке программно-алгоритмического обеспечения режимов, использующих эти виды обзора. Действительно, при реализации любого сложного вида обзора формирование полного радиолокационного изображения (РЛИ) всей зоны обзора (полной радиолокационной карты зоны) осуществляется в два этапа. Сначала формируются РЛИ парциальных зон – парциальные кадры (ПК) РЛИ, которые затем стыкуются между собой, образуя полную радиолокационную карту (РЛК), перекрывающую всю зону обзора.

Таким образом, к этим дополнительным проблемам, прежде всего, следует отнести проблему стыковки ПК в полную РЛК. В идеале точность совмещения краев стыкуемых ПК по обеим координатам не должна быть хуже элемента разрешения. Если управление сложным обзором и выбор параметров обработки при формировании каждого ПК РЛИ осуществляется только по навигационным данным, то задача совмещения краев ПК с точностью до элемента разрешения предъявляет очень высокие требования к точности навигационных измерений.

Так, среднеквадратичную ошибку (СКО) δv_r измерения радиальной составляющей скорости носителя v_r относительно центральной точки парциальной зоны захвата для точной стыковки краев ПК по азимутальной координате можно оценить по формуле

$$\delta v_r \leq \Delta x V_n / (3r_0), \quad (1)$$

где Δx – линейное разрешение по азимутальной координате; V_n – путевая скорость носителя; r_0 – наклонная дальность от середины интервала наблюдения до центральной точки парциальной зоны.

Поскольку отношение V_n / r_0 как для космических РСА, так и для РСА авиационного базирования имеет порядок $\sim 10^{-3}$, то нетрудно подсчитать, что СКО измерения радиальной составляющей скорости носителя должно быть порядка нескольких сантиметров в секунду. Если учесть, что для вычисления v_r используются как составляющие вектора полной скорости носителя в орбитальной или земной системе координат, так и углы ориентации этого вектора относительно ЦТ парциальной зоны, то требования к точности навигационных измерений, вытекающих из задачи стыковки ПК, надо признать весьма жесткими.

Для сложного вида обзора и многокадрового способа формирования РЛК угловой размер ПК в азимутальной и угломестной плоскостях обычно выбирают не более ширины следа ДНА по уровню 0,7 на прием (или 0,5 на прием и передачу). При этом полная РЛК имеет некоторую модуляцию по яркости в пределах каждого ПК. Эта модуляция в той или иной степени прослеживается на РЛК и отмечается заказчиком как недостаток этих видов обзора.

Ось ДНА (точка O) в идеале должна совпадать с ЦТ парциальной зоны, а ЦТ парциальной зоны и парциального кадра должны быть совмещены (рис.1). В этом случае яркостную модуляцию РЛК $J_{cp}(\alpha)$ в режимах со сложными видами обзора можно устранить, если РЛИ каждого ПК поделить на известную нормирующую функцию, соответствующую форме главного лепестка ДНА РЛС на прием и передачу. Однако из-за ошибок управления антенной, как правило, положение оси ДНА не совпадает с ЦТ заданной парциальной зоны, причем их относительное смещение неизвестно. Положение ЦТ парциального кадра внутри парциальной зоны захвата также вычисляется с ошибкой.

На рис.2.показано взаимное положение зон захвата, оси ДНА и ПК РЛИ при наличии ошибок в управлении антенной и навигационных данных. Как видно из рисунка, наличие ошибок приводит к негативным последствиям, существенно снижающим качество РЛК. Так, при неверном вычислении относительных координат ЦТ и ошибках в установке антенны будет наблюдаться увеличение амплитудной модуляции. Кроме того, это приведет к искажениям РЛК в виде пропуска некоторых фрагментов поверхности, находящихся на границе стыкуемых кадров, или их повторения в РЛИ соседних ПК.

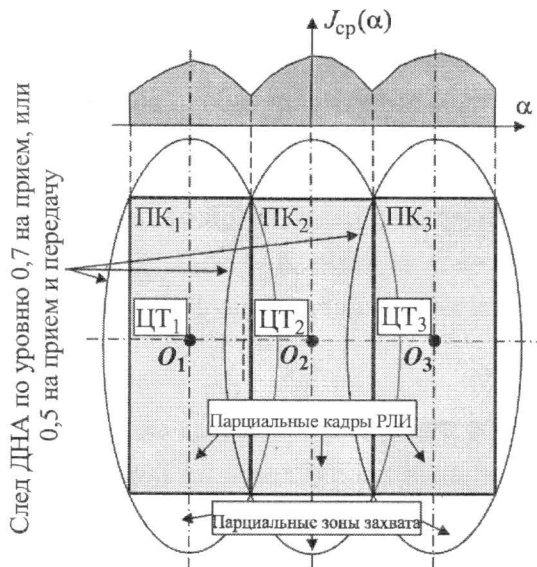


Рис.1. Взаимное положение зон захвата, оси ДНА и ЦТ ПК при сложных видах обзора

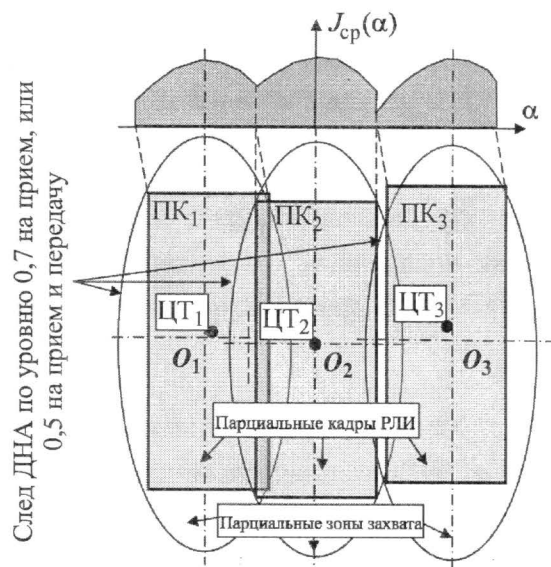


Рис.2. Взаимное положение зон захвата, оси ДНА и ЦТ ПК при наличии ошибок в управлении антенной и навигационных данных

Описанные выше ошибки при реализации режимов со сложными видами обзора, на наш взгляд, могут возникать по следующим причинам:

- недостаточная точность работы штатной навигационной системы;
- отсутствие или недостаточная точность работы системы микронавигации;
- недостаточное качество работы алгоритмов пересчета навигационных параметров движения носителя в фазовый центр антенны РЛС;
- неверная юстировка антенны и ошибки работы узлов механического поворота антенного полотна или конечный шаг перестройки антенны при электронном сканировании лучом.

Наряду с непосредственными устранениями этих причин предлагается воспользоваться возможностями адаптивной обработки сигналов, позволяющей в процессе фор-

мирования карты максимально скомпенсировать недостатки многокадровой съемки. Применение адаптивных алгоритмов позволит существенно (на несколько порядков) снизить требования к точности навигационных измерений и управления антенной, но за счет некоторого увеличения вычислительных затрат процессора сигналов и, следовательно, времени формирования карты.

Алгоритм адаптивной стыковки парциальных кадров. Для устранения ошибок стыковки ПК по азимуту и дальности предлагается использовать алгоритм корреляционного совмещения РЛИ соседних ПК. Для его реализации необходимо, чтобы первичные размеры РЛИ каждого ПК, формируемого при сложном обзоре поверхности, несколько превышали размеры заданной парциальной зоны обзора. В этом случае РЛИ соседних ПК будут иметь общие участки поверхности, которые при корреляционной обработке двух изображений дадут всплеск взаимной корреляционной функции (КФ). По положению этого всплеска можно с точностью до элемента изображения определить истинное взаимное расположение полученных РЛИ и осуществить их правильную стыковку.

При сложных видах обзора для формирования РЛИ ПК часто используются многофильтровые методы азимутального сжатия. В этих методах РЛИ всех точек поверхности формируются на одном интервале синтезирования. Обычно многофильтровое азимутальное сжатие осуществляют способом гармонического анализа (ГА) с использованием быстрого преобразования Фурье (БПФ). При этом формируется изображение местности, как минимум, в два раза шире, чем используется затем для создания полной карты. Таким образом, после операции БПФ на первичных РЛИ соседних по азимуту ПК заведомо будут находиться изображения одинаковых участков поверхности, которые используются затем для корреляционного совмещения РЛИ ПК.

Чтобы организовать корреляционную стыковку ПК, смещенных по дальности в режимах типа «ScanSAR», необходимо предусмотреть некоторое перекрытие первичных РЛИ этих ПК по наклонной дальности.

Рассмотрим алгоритм адаптивной стыковки соседних по азимуту РЛИ ПК корреляционным способом. Как уже отмечалось, при азимутальном сжатии способом ГА с использованием БПФ формируется изображение местности в два раза шире, чем для создания полной карты. Известно, что диапазон гармонического анализа определяется частотой повторения РЛС, а она выбирается из условия однозначности по азимуту. При этом должно быть обеспечено однозначное воспроизведение гармоник всей полосы доплеровских частот в пределах ширины ДНА по уровню не более чем -20 дБ на прием.

Таким образом, полученное способом ГА первичное РЛИ ПК содержит участок поверхности, накрываемый следом ДНА до уровня -20 дБ, что примерно в два раза шире, чем требуемый размер ПК. Возможное взаимное расположение двух соседних по азимуту ПК показано на рис.3.

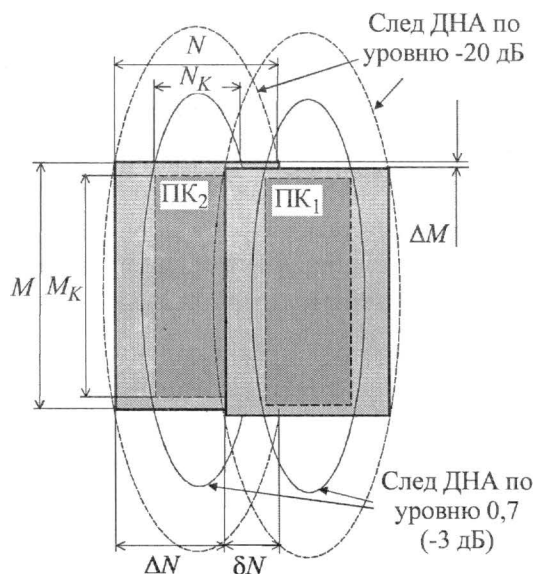


Рис.3. Взаимное расположение двух соседних ПК при сложном виде обзора

На этом рисунке введены следующие обозначения: N и M – размеры первичного РЛИ ПК (в пикселях) по азимуту и дальности. При азимутальном сжатии сигнала способом ГА с использованием БПФ по основанию 2 число пикселей по азимуту $N = 2^n$, здесь n – целое число. M выбирается из условия $M = M_{\text{РЛК}} + \Delta M_{\text{max}}$, где ΔM_{max} – максимально возможное смещение РЛИ по дальности; N_K и M_K – заданные размеры ПК (в пикселях) по азимуту и дальности; ΔN и ΔM – текущее относительное смещение ПК по азимуту и дальности. В отсутствие ошибок навигации и управления $\Delta N = N_K$, $\Delta M = 0$; δN – размер области взаимного пересечения двух соседних ПК по азимуту.

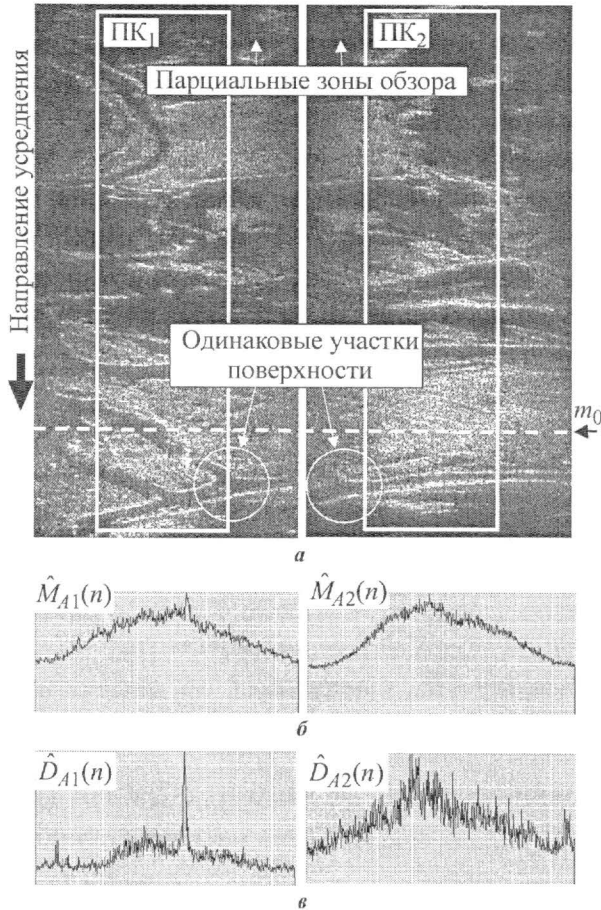


Рис.4. Примеры РЛИ двух соседних ПК при сложном виде обзора: РЛИ двух соседних зон обзора (а); математическое ожидание (б) и дисперсия РЛИ (в), вычисленные усреднением по дальности

На рис.4,а приведены примеры РЛИ двух соседних ПК, которые иллюстрируют схему обзора, представленную на рис.3. РЛИ получены с помощью самолетной РЛС Н-011 при секторно-телескопическом обзоре поверхности и азимутальном сжатии способом ГА. На этом рисунке явно видны участки поверхности, одинаковые для обоих ПК. Размеры первичных РЛИ $N \times M = 256 \times 512$ пикселей, размеры ПК – $N_K \times M_K = 128 \times 500$. Полная РЛК в этом режиме строится из пяти ПК.

Входными данными алгоритма корреляционной стыковки кадров (АКС) являются действительные массивы данных (двумерные цифровые матрицы $N \times M$ элементов), представляющие собой сигналы РЛИ на выходе алгоритма азимутального сжатия после операции вычисления модуля: $e_1(n, m)$ – действительное РЛИ первого ПК, $e_2(n, m)$ – второго.

В общем случае относительное смещение этих ПК по азимуту и дальности может быть определено с помощью вычисления двумерной взаимной КФ

$$R(k, l) = \sum_{m=0}^{M-1} \sum_{n=0}^{N-1} e_1(n, m) e_2(n + k, m + l). \quad (2)$$

Благодаря свойствам преобразования Фурье это выражение может быть реализовано в частотной области:

$$R(k, l) = \text{Re} \left\{ F_{kl}^{-1} \left\{ E_1(i, j) E_2^*(i, j) \right\} \right\} = \text{Re} \left\{ F_{kl}^{-1} \left\{ F_{ij}^{-1} \left\{ e_1(n, m) \right\} F_{ij}^* \left\{ e_2(n, m) \right\} \right\} \right\}, \quad (3)$$

где $F_{ij}\{\cdot\}$, $F_{kl}^{-1}\{\cdot\}$ – операторы прямого и обратного дискретного двумерного преобразования Фурье; $E_1(i, j) = F_{ij}\{e_1(n, m)\}$, $E_2^*(i, j) = F_{ij}^*\{e_2(n, m)\}$ – дискретные двумерные спектры, $*$ – знак комплексного сопряжения; $\text{Re}\{\cdot\}$ – оператор выделения действительной части комплексного числа.

Вычисление двумерного преобразования Фурье эквивалентно последовательному применению к двумерному массиву двух одномерных преобразований по обеим координатам: $F_{ij}\{\cdot\} = F_i\{F_j\{\cdot\}\}$ – для прямого и $F_k^{-1}\{F_l^{-1}\{\cdot\}\}$ – для обратного преобразования.

Если операторы $F_i\{\cdot\}$, $F_k^{-1}\{\cdot\}$ реализуются с помощью алгоритмов БПФ, то вычисление КФ $R(k, l)$ с помощью выражения (3) по объему вычислительных затрат имеет существенные преимущества [4,5] перед прямым вычислением по формуле (2). Тем не менее, вычислительные затраты остаются весьма существенными. В общей сложности для реализации выражения (3) необходимо выполнить $2M$ прямых и M обратных одномерных БПФ длиной $2N$ отсчетов (преобразование по азимуту) плюс $2N$ прямых и N обратных БПФ длиной $2M$ отсчетов (преобразование по дальности).

Удвоение длины БПФ по сравнению с размерами преобразуемого массива связано с цикличностью операции цифровой корреляции в частотной области, а также с тем, что длина взаимной КФ двух последовательностей в два раза превышает их длину. Таким образом, перед операцией прямого БПФ преобразуемая в частотную область строка или столбец РЛИ должны быть дополнены нулями до двойной длины. Для дополнительного снижения вычислительных затрат предлагается оценку смещений по азимуту и дальности осуществлять раздельно.

Предположим, что смещения по дальности отсутствуют, тогда азимутальное смещение РЛИ можно определить по максимуму выражения

$$R(k, 0) = R_A(k) = \sum_{m=0}^{M-1} \sum_{n=0}^{N-1} e_1(n, m) e_2(n + k, m), \quad (4)$$

или в частотной области

$$R_A(k) = \text{Re} \left\{ F_k^{-1} \left\{ \sum_{m=0}^{M-1} E_1(i, m) E_2^*(i, m) \right\} \right\}, \quad (5)$$

где $E_1(i, m) = F_i\{e_1(n, m)\}$, $E_2^*(i, m) = F_i^*\{e_2(n, m)\}$ – одномерные спектры m -й строки первичных изображений правой и левой парциальных зон.

Согласно выражению (5) произведения спектров всех M строк, коррелируемых РЛИ, суммируются, а затем вычисляется всего одно обратное БПФ. Таким образом, для вычисления азимутальной КФ $R_A(k)$ потребуется $2M$ прямых и одно обратное БПФ длиной $2N$ отсчетов.

Сумму $R_{Am}(k) = \sum_{n=0}^{N-1} e_1(n, m) e_2(n + k, m)$ в выражении (4) можно трактовать как одномерную КФ совпадающих по дальности строк первичных РЛИ, тогда азимутальную КФ $R_A(k) = \sum_{m=0}^{M-1} R_{Am}(k)$ можно рассматривать как результат усреднения функций $R_{Am}(k)$ по всем дальностям.

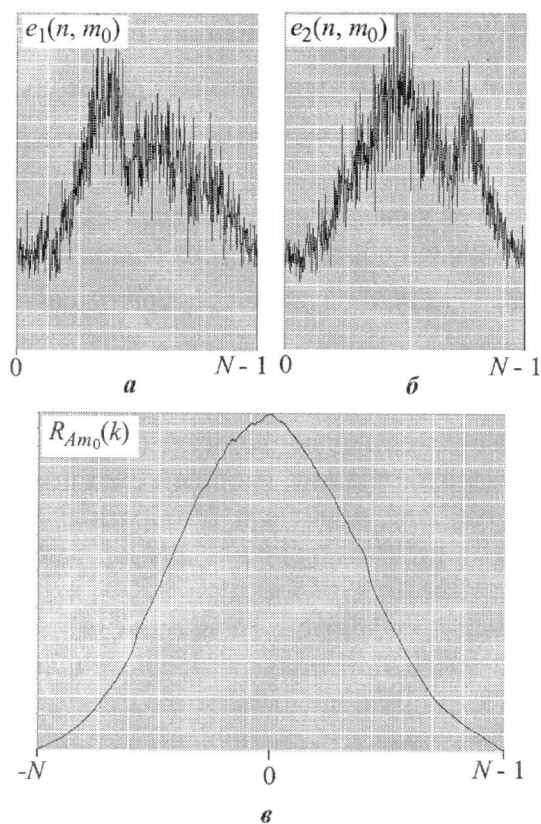


Рис.5. Вид сечений РЛИ соседних зон на одинаковой дальности (а и б) и их взаимная корреляционная функция (в)

Это можно сделать с помощью операций

$$\tilde{e}_1(n, m_0) = [e_1(n, m_0) - \hat{M}_{A1}(n)] / \sqrt{\hat{D}_{A1}(n)}, \quad (6)$$

$$\tilde{e}_2(n, m_0) = [e_2(n, m_0) - \hat{M}_{A2}(n)] / \sqrt{\hat{D}_{A2}(n)}, \quad (7)$$

где $\hat{M}_{A1}(n)$, $\hat{M}_{A2}(n)$ и $\hat{D}_{A1}(n)$, $\hat{D}_{A2}(n)$ – оценки МО и дисперсии, полученные усреднением соответствующих РЛИ:

$$\hat{M}_{A1}(n) = \frac{1}{M} \sum_{m=0}^{M-1} e_1(n, m), \quad \hat{D}_{A1}(n) = \frac{1}{M} \sum_{m=0}^{M-1} [e_1(n, m) - \hat{M}_{A1}(n)]^2,$$

$$\hat{M}_{A2}(n) = \frac{1}{M} \sum_{m=0}^{M-1} e_2(n, m), \quad \hat{D}_{A2}(n) = \frac{1}{M} \sum_{m=0}^{M-1} [e_2(n, m) - \hat{M}_{A2}(n)]^2.$$

Примеры полученных усреднением функций $\hat{M}_{A1}(n)$, $\hat{M}_{A2}(n)$, $\hat{D}_{A1}(n)$, $\hat{D}_{A2}(n)$ представлены на рис.4,б,в.

Как показал опыт обработки реальных сигналов, функции $\tilde{e}_1(n, m_0)$, $\tilde{e}_2(n, m_0)$, полученные после операций (6), (7), носят однородный характер, но имеют ненулевое постоянное МО. Из-за этого в КФ $\tilde{R}_{Am_0}(k)$ все же остается нескомпенсированная «энерге-

Вид функций $e_1(n, m_0)$ и $e_2(n, m_0)$, соответствующих сечению РЛИ на дальности m_0 (на рис.4 показано пунктирной линией), а также их взаимной КФ $R_{Am_0}(k)$ представлены на рис.5.

Как можно предположить из рис.5, функции $e_1(n, m_0)$, $e_2(n, m_0)$, рассматриваемые как реализации случайного процесса, имеют ненулевое математическое ожидание (МО) $M_A(n)$ и переменную дисперсию $D_A(n)$.

Вследствие ненулевого МО их взаимная КФ имеет плавную неслучайную «энергетическую» составляющую, имеющую максимум при нулевом смещении между РЛИ ($k=0$). Эта составляющая маскирует локальный максимум, соответствующий совпадению изображений одного и того же участка поверхности на обоих РЛИ.

Чтобы исключить влияние неслучайной составляющей КФ, необходимо перед вычислением корреляции преобразовать функции $e_1(n, m_0)$, $e_2(n, m_0)$ в реализации однородного случайного процесса с нулевым МО.

тическая» составляющая, которая для постоянного МО имеет известную форму: как КФ двух прямоугольных импульсов она имеет вид равнобедренного треугольника (рис.6,а) и ее легко устранить на последнем этапе вычислений.

Вид усредненной функции $\tilde{R}_A(k)$ после вычитания треугольной «энергетической» составляющей показан на рис.6,б. Именно по положению максимума этой функции определяется азимутальное смещение РЛИ парциальных кадров. Для рассматриваемого примера это смещение составило $k_{\max} = 150$ элементов вместо ожидаемых 128. Вид РЛК, состоящей из двух состыкованных корреляционным способом ПК, показан на рис.7,а.

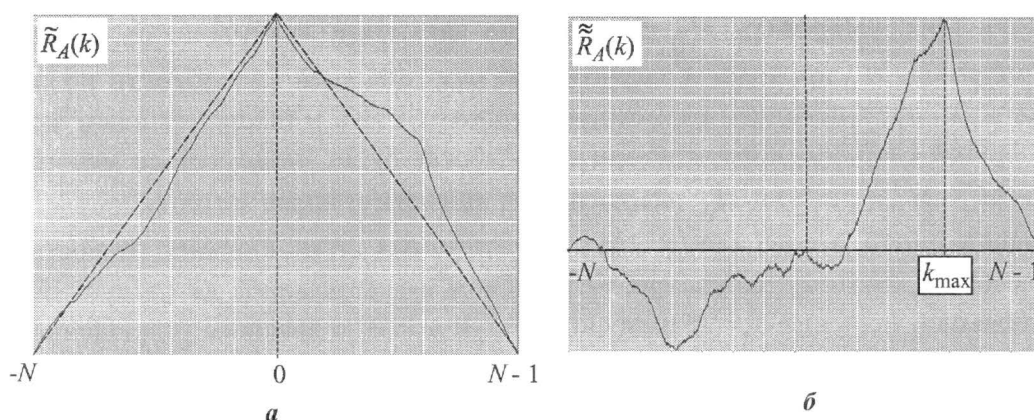


Рис.6. Вид усредненной корреляционной функции до (а) и после (б) вычитания треугольной «энергетической» составляющей

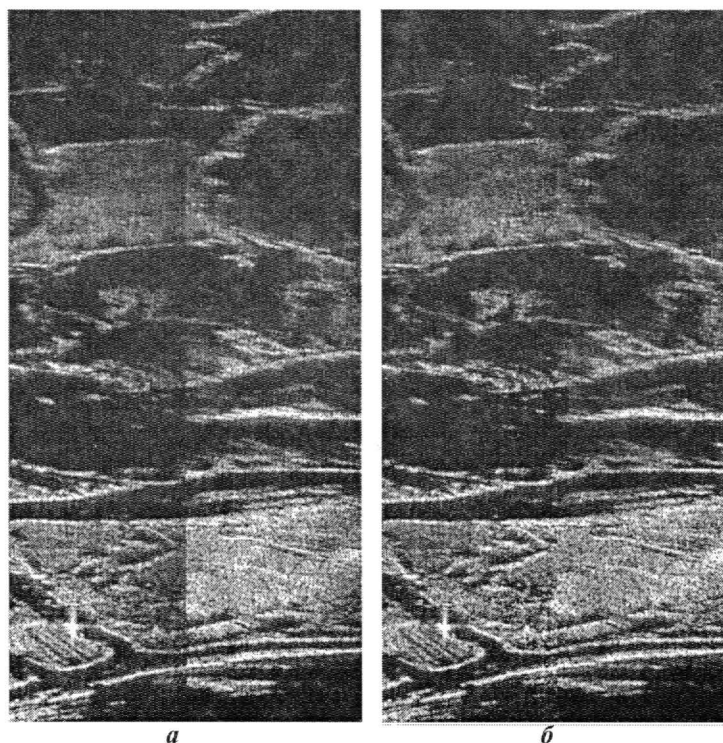


Рис.7. Радиолокационная карта из двух состыкованных корреляционным способом ПК до (а) и после (б) устранения амплитудной модуляции

В приведенных выше рассуждениях предполагалось, что при оценке азимутального смещения ПК отсутствует сдвиг РЛИ по дальности. В реальной ситуации сдвиг между стыкуемыми РЛИ по координате наклонной дальности вполне может присутствовать. Его величина при довольно средних точностях навигационного обеспечения невелика, обычно составляет несколько пикселей, и визуально сдвиг практически незаметен. Для рассматриваемых РЛИ этот сдвиг, например, составлял 2 элемента.

Но даже небольшой сдвиг на 1-2 пикселя приведет к тому, что корреляции по азимуту будут подвергаться строки РЛИ с разных дальностей, что нарушит работу алгоритма. Чтобы этого не произошло, предлагается перед выполнением корреляционной обработки просуммировать M_{Σ} соседних по дальности азимутальных строк РЛИ. С одной стороны, это приведет к загромождению разрешающей способности по дальности до величины, превышающей возможное смещение РЛИ, и исключит сдвиг по дальности. С другой стороны, корреляционной обработке будет подвергаться меньшее число строк – $M' = M/M_{\Sigma}$, что в M_{Σ} раз уменьшит вычислительные затраты.

Очевидно, что уменьшение числа коррелируемых строк снижает точность измерения смещений, поэтому злоупотреблять числом суммирований не следует. Но достаточно большое значение отношения сигнал/шум в РЛИ с высоким разрешением позволяет без ущерба для точности выбирать $M_{\Sigma} \leq 10$. В рассмотренном выше примере при разрешении по азимуту и дальности ≈ 10 м оценка смещения проводилась при $M_{\Sigma} = 8$.

Всего для оценки азимутального смещения двух соседних ПК в этом случае потребуется выполнить $2M' = 2M/M_{\Sigma}$ БПФ длиной N отсчетов.

После того как оценка смещения ПК по азимуту будет реализована, можно будет выполнить совмещение ПК по дальности. Алгоритм оценки смещений по дальности может строиться по тем же принципам, что были описаны выше.

Алгоритм устранения амплитудной модуляции при формировании полной радиолокационной карты. Как следует из рис.7,а, точная стыковка соседних парциальных кадров РЛИ при наличии ошибок навигации и установки ДНА может привести к значительной амплитудной модуляции полной радиолокационной карты.

Для устранения этой модуляции можно воспользоваться уже вычисленными в алгоритме корреляционной стыковки ПК функциями $\hat{M}_{A1}(n)$ и $\hat{M}_{A2}(n)$ (см. рис.4). Эти функции представляют собой усредненную по всем строкам дальности яркость РЛИ и могут служить нормирующими функциями, позволяющими выровнять яркость РЛИ по азимуту. Форма функций определяется как формой ДНА РЛС, так и структурой радиолокационного рельефа (РЛР) наблюдаемого участка поверхности. Чтобы устранить остатки микроструктуры РЛР, перед операцией нормировки функции $\hat{M}_{A1}(n)$, $\hat{M}_{A2}(n)$ сглаживаются. Размеры и форма сглаживающего окна выбираются опытным путем. Достаточно хороший результат дает сглаживание с прямоугольным окном размером $N_0 = N/8$.

После операции нормировки из РЛИ парциальных зон размером $N \times M$ с учетом вычисленных смещений вырезаются РЛИ парциальных кадров $N_K \times M_K$ элементов, которые затем объединяются в радиолокационную карту. Пример радиолокационной карты, полученной из РЛИ двух ПК с учетом вычисленного смещения и после амплитуд-

ной нормировки, показан на рис.7,б. Полная РЛК из пяти ПК, полученная по сигналу РЛС Н-011 без использования алгоритма автоматической стыковки ПК и после его применения, представлена на рис.8.

На рис.9 представлены РЛИ, полученные в режимах со сложными видами обзора на РЛС семейства «Жук» разработки корпорации «Фазотрон-НИИР» с версией программного обеспечения, в которую были включены алгоритмы устранения амплитудной модуляции и адаптивной стыковки парциальных кадров. На рис.9,а показано РЛИ с низким, а на рис.9,б с высоким разрешением, полученное из предыдущего укрупнением масштаба.

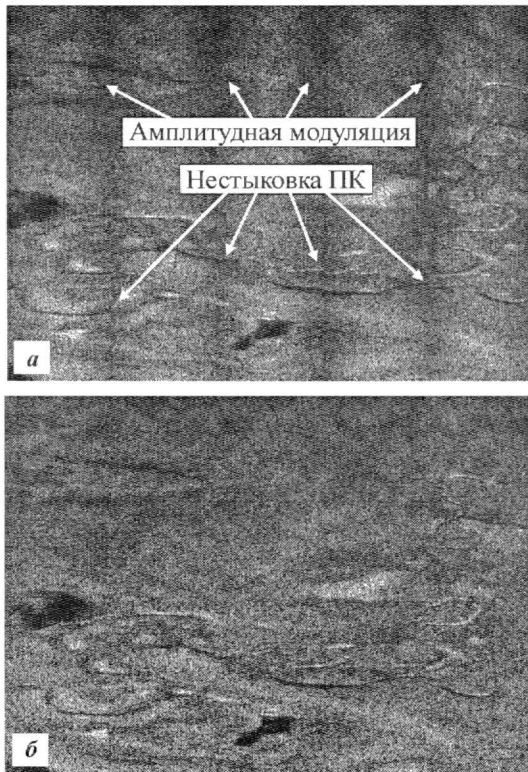


Рис.8. РЛК из пяти ПК, полученные для режима со сложным видом обзора РЛС Н-011 до (а) и после (б) адаптивной стыковки ПК и выравнивания амплитуды

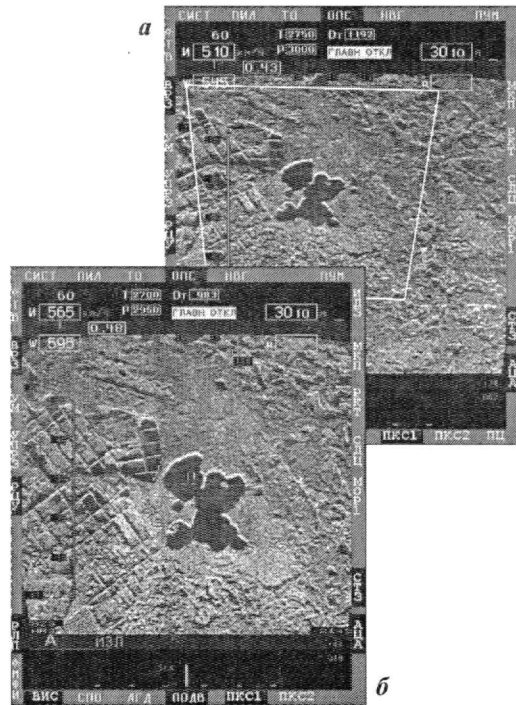


Рис.9. Бортовые РЛИ режимов с низким (а) и высоким (б) разрешением РЛС «Жук» оз. Великое Рязанской области

Из анализа этих изображений следует, что предложенные выше алгоритмы адаптивной стыковки и устранения амплитудной модуляции в ПК при формировании полной РЛК для сложных видов обзора вполне успешно решают поставленную задачу.

Литература

1. Радиолокационные станции с цифровым синтезированием апертуры антенны / **В.И.Антипов, В.Т.Горяинов, А.Н.Кулин и др.** / Под ред. **В.Т.Горяинова**. – М.: Радио и связь, 1988.
2. **Guarnieri A.M., Guccione P.** Optimal 'focusing' for Low Resolution ScanSAR // IEEE Trans Geosci. RemoteSensing, March 2001. – P. 479–491.
3. **Purry C.S., Dumper K., Verwey G.C., Pennock S.R.** Resolving doppler ambiguity for ScanSAR data. Geoscience and remote sensing symposium proc., IGARSS 2000 // IEEE Int. – 2001. – Vol. 5. – P. 2272–2274.

4. **Голд Б., Рейдер Ч.** Теория и применение цифровой обработки сигналов: Пер. с англ. / *Под ред. А.М.Трахтмана.* – М.: Сов. радио, 1973.
5. **Оппенгейм А.В., Шафер Р.В.** Цифровая обработка сигналов / *Под ред. С.Я.Шаца.* – М.: Связь, 1979.

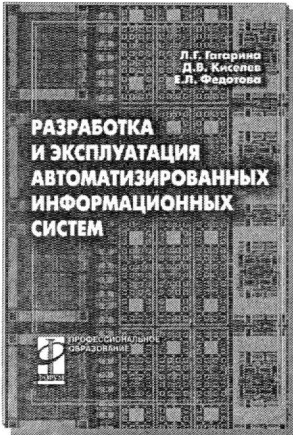
Статья поступила
17 мая 2007 г.

Карпов Олег Анатольевич – кандидат технических наук, старший научный сотрудник ОАО «Корпорация «Фазотрон-НИИР» (г. Москва). *Область научных интересов:* цифровая обработка сигналов в РЛС с синтезированной апертурой антенны.

Книжные новинки



Гагарина Л.Г., Киселев Д.В., Федотова Е.Л. Разработка и эксплуатация автоматизированных информационных систем: Уч. пособие / Под ред. проф. Л.Г. Гагариной. - М.: ИД «ФОРУМ»: ИНФРА-М, 2007. - 384 с.: ил.
ISBN 978-5-8199-0316-2 (ИД «ФОРУМ»)
ISBN 978-5-16-003008-1 (ИНФРА-М)



Приведены основные понятия и определения процесса проектирования автоматизированных информационных систем на основе анализа предметной области; освещены вопросы разработки программно-информационного ядра АИС на основе систем управления базами данных. Рассмотрены системы автоматизированного проектирования структур баз данных, язык структурных запросов SQL, стандартные системы доступа к базам данных.

В качестве основополагающих факторов изучения автоматизированного проектирования СУБД приведены клиенты удаленного доступа и дано построение запросов к СУБД; разработка клиентского программного обеспечения; основные элементы клиентских программ. Изложены также особенности эксплуатации АИС, методы и средства сбора и передачи данных; обеспечение достоверности информации в процессе ее хранения и обработки; экспортирование структур баз данных; восстановление информации в базах данных.

Для студентов средних специальных учебных заведений, обучающихся по специальностям 2202 «Автоматизированные системы обработки информации и управления», 2203 «Программное обеспечение вычислительной техники и автоматизированных систем»; может быть использовано для самообразования в области информационных технологий.

Оценка выбора средств защиты информации в условиях неопределенности

Р.Н.Акиншин

Тульский артиллерийский инженерный институт

Предложен методический аппарат для построения интегральных оценок вариантов создания комплекса средств защиты и выбора наиболее рационального из них в условиях неопределенности.

В задаче оценки и выбора комплекса средств защиты (КСЗ) информационных систем (ИС) необходимо рассмотреть некоторую совокупность показателей (критериев) оценки, характеризующих различные аспекты защищенности данной ИС. Причем многие из этих показателей могут носить качественный характер, т.е. отображаться оценками типа «удовлетворительно», «неудовлетворительно» и т.д. Также необходимо отметить иерархический характер системы показателей оценки КСЗ. Практически каждый из показателей некоторого уровня может характеризоваться несколькими показателями следующего (более низкого) уровня.

С учетом этих факторов задачу оценки и рационального выбора КСЗ ИС можно отнести к категории слабоструктурированных задач в условиях неопределенности. Для решения задач подобного рода в последние годы используются методы теории нечетких множеств, получившей развитие в конце XX в. [2, 3].

Постановка задачи. Пусть для заданной конкретной ИС имеется некоторое количество вариантов построения КСЗ $X = \{x_{ni}\}, n = \overline{1, N}$. Задана также иерархическая система показателей оценки качества вариантов КСЗ в виде $Q = \{q_i, q_{ij}, q_{ijk} \dots\}$. Применяемые на каждом уровне иерархии показатели в общем случае неравнозначны, т.е. степень важности отдельных показателей зависит от специфики конкретной ИС, ее назначения, особенностей и условий функционирования и т.п. Эта специфика известна лицу, принимающему решение (ЛПР), которое и отвечает за проведение объективной оценки КСЗ [1].

Необходимо построить методический аппарат, который бы обеспечивал построение интегральных оценок для каждого варианта построения КСЗ и выбор наиболее рационального из них.

Используем методы теории нечетких множеств для решения рассматриваемой задачи [3].

Опираясь на основные положения теории нечетких множеств, рассматриваемую задачу формально представим следующим образом.

1. Задано множество $X = \{x_n\}, n = \overline{1, N}$ альтернативных вариантов построения КСЗ для рассматриваемой ИС.

2. Определено множество показателей (критериев) оценки вариантов построения КСЗ $Q = \{q_j\}, j = \overline{1, M}$.

3. Задано нечеткое отношение важности показателей $\mu: Q \times Q \rightarrow [0,1]$. При этом величина $\mu(q_i, q_j)$ понимается как степень предпочтительности, с которой показатель q_i считается не менее важным, чем показатель q_j . Нечеткое отношение типа «не хуже» используется, исходя из соображения, что для его использования необходимо лишь соблюдать свойство рефлексивности, т.е. функция принадлежности $\mu(q_i, q_j) = 1$ при $i = j$.

4. Для каждого фиксированного показателя задано нечеткое отношение предпочтения на множестве альтернативных вариантов построения КСЗ – X , т.е. задана функция

$$\varphi: X \times X \times Q \rightarrow [0, 1],$$

значение $\varphi(x_i, x_j, q_k)$ которой трактуется как степень предпочтительности альтернативы x_i альтернативе x_j по показателю q_k . Здесь также используется нечеткое отношение типа «не хуже».

Методика расчета. Построим следующую последовательность расчетов.

1. Определяется нечеткое подмножество недоминируемых альтернатив для фиксированного показателя на основании следующего соотношения [2]:

$$\varphi^{\text{нд}}(x_i, q_k) = 1 - \sup_{x_j \in X} [\varphi(x_j, x_i, q_k) - \varphi(x_i, x_j, q_k)]. \quad (1)$$

Величина, определяемая соотношением (1), есть степень недоминируемости альтернативы x_i на множестве X по показателю q_k .

2. Находится нечеткое отношение предпочтения, индуцированное на множестве X функциями $\varphi^{\text{нд}}(x_i, q_k), \mu(q_k, q_l)$ по формуле [2, 3]:

$$\eta(x_i, x_j) = \sup_{q_k, q_l \in Q} \min \{ \varphi^{\text{нд}}(x_i, q_k), \varphi^{\text{нд}}(x_j, q_l), \mu(q_k, q_l) \}. \quad (2)$$

По своему физическому смыслу это нечеткое отношение предпочтения рассматривается как результат свертки семейства нечетких отношений $\varphi(x_i, x_j, q)$ в единое результирующее нечеткое отношение предпочтения с учетом информации об относительной важности критериев, заданной также в форме нечеткого отношения. Таким образом, с построением нечеткого отношения предпочтения типа (2) исходная задача выбора альтернатив сводится к задаче выбора с единственным отношением предпочтения.

3. На множестве (X, η) выделяется нечеткое подмножество недоминируемых альтернатив на основе соотношения

$$\bar{\eta}^{\text{нд}}(x_i) = 1 - \sup_{x_j \in X} [\eta(x_j, x_i) - \eta(x_i, x_j)]. \quad (3)$$

4. Подмножество, определяемое соотношением (3), корректируем в соответствии с выражением

$$\eta^{\text{нд}}(x_i) = \min \{ \bar{\eta}^{\text{нд}}(x_i), \eta(x_i, x_i) \}. \quad (4)$$

Корректировка (4) осуществляется в целях исключения искусственного завышения оценки типа (3) в ситуациях, когда оценка некоторой альтернативы неизвестна или не определена, или мала, что может не отражать фактической степени недоминируемости этой альтернативы.

5. В качестве решения задачи выбора наиболее рационального варианта принимается альтернатива с наибольшей степенью недоминируемости, т.е. альтернатива, позволяющая достигнуть максимума функции (4).

Анализ показывает, что рассмотренная задача может быть также решена с использованием известного метода анализа иерархий Т.Саати [4]. В методе анализа иерархий (МАИ) степень влияния, или приоритетность, элементов одного уровня относительно их важности для элементов более высокого уровня определяется, как и в выше рассмотренном методе, путем попарного сравнения этих элементов. Далее числа, отражающие достигнутое при сравнении согласие, помещаются в матрицу, и отыскивается собственный вектор матрицы с наибольшим собственным значением. Собственный вектор обеспечивает упорядочение приоритетов, а собственное значение является мерой согласованности суждений.

Рассмотрим последовательность расчетов для этого случая. Дана совокупность элементов $A = \{A_i\}$, $i = \overline{1, N}$ некоторого уровня иерархии. Необходимо определить степень влияния (веса) $W = \{w_i\}$, $i = \overline{1, N}$ этих элементов на некоторый элемент более высокого уровня. Построим матрицу парных сравнений A_i по степени их влияния $C = \{c_{ij}\}$, $i, j = \overline{1, N}$, придерживаясь следующих правил:

а) если $c_{ij} = c$, то $c_{ji} = 1/c$, $c \neq 0$;

б) если суждения имеют одинаковую важность (оказывают одинаковое влияние на вышестоящий элемент), то $c_{ij} = c_{ji} = 1$, в частности, $c_{ii} = 1$ для всех i .

Построенная описанным образом матрица сравнений называется обратно симметричной матрицей. Такая матрица является согласованной, если справедливо $c_{ik} = c_{ij}c_{jk}$, $i, j, k = \overline{1, N}$. Очевидной для согласованности матрицы представляется типичная ситуация, когда сравнения основаны на точных измерениях, т.е. веса элементов точно известны.

В этом случае имеем

$$c_{ij} = w_i / w_j, \quad i, j = \overline{1, N}, \quad (5)$$

тогда

$$c_{ij}c_{jk} = (w_i / w_j)(w_j / w_k) = w_i / w_k = c_{ik}.$$

Кроме того, в этой ситуации очевидно, что

$$c_{ij} = w_i / w_j = 1/(w_j / w_i) = 1/c_{ji}.$$

Из соотношения (5) следует

$$c_{ij}w_j / w_i = 1, \quad i, j = \overline{1, N}.$$

Отсюда ясно, что справедливо соотношение

$$\sum_j c_{ij}w_j / w_i = N, \quad i = \overline{1, N}$$

или

$$\sum_j c_{ij}w_j = Nw_i, \quad i = \overline{1, N}. \quad (6)$$

Выражение (6) эквивалентно следующему соотношению:

$$Cw = Nw. \quad (7)$$

В теории матриц эта формула отражает тот факт, что w является собственным вектором матрицы C с собственным значением N .

В случае если значения элементов матрицы сравнений основываются не на точных измерениях, а на субъективных суждениях, то их значения будут отклоняться от идеальных отношений w_i / w_j и поэтому уравнение не будет иметь места.

Однако математический аппарат теории матриц позволяет произвести необходимые расчеты для решения поставленной задачи и в этом случае.

Таким образом, рассмотрены два возможных подхода к решению задачи оценки и выбора КСЗ в условиях неопределенности [1, 2]. Интерес представляет их сравнительное исследование на некотором фактическом материале.

Поскольку теоретическая основа указанных методов существенно разная, то наиболее рациональным путем их сравнительной оценки является экспериментальное исследование на некоторой выборке исходных данных. Однако корректная оценка методов возможна лишь при условии, если исходные данные для каждого расчета будут отображать одну и ту же реальную ситуацию. С этой целью необходимо построить единую систему исходных данных для обоих рассматриваемых методов.

Проведенные экспериментальные исследования подтверждают, что конечный результат совпадает при расчетах по обеим методическим схемам. Однако использование МАИ является предпочтительным, так как позволяет получить непосредственное ранжирование вариантов на основе нормированной оценки. Что касается второго метода, то его привлекательность определяется простотой расчетов, которые могут быть выполнены даже вручную для практически возможной размерности прикладной задачи оценки. Поэтому и данный метод, по-видимому, имеет свою «нишу» практического использования.

Литература

1. Математические модели, алгоритмы и методы обеспечения защищенности информации в территориально-распределенных информационно-вычислительных системах / *Р.Н.Акиншин*. – Тула, Тульский ГУ, 2005. – 350 с.
2. Оценка и оптимизация характеристик систем обработки данных / *В.А.Балыбердин*. – М.: Радио и связь, 1987. – 176 с.
3. *Заде Л.* Основы нового подхода к анализу сложных систем и процессов принятия решений // В кн.: Математика сегодня. – М.: Знание, 1974. – С.5–48.
4. *Саати Т.Л.* Принятие решений. Метод анализа иерархий. – М.: Радио и связь, 1993.

Статья поступила
24 апреля 2007 г.

Акиншин Руслан Николаевич – кандидат технических наук, преподаватель кафедры радиоэлектронных устройств и систем радиопередачи Тульского артиллерийского инженерного института. *Область научных интересов:* радиоэлектроника, защита информации.

ПРОБЛЕМЫ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ

УДК 519.6

Метод решения задач составления расписания, ориентированный на кластерные вычислительные системы

С.А.Лупин, Т.В.Милехина

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

Предложен метод решения задачи составления расписания занятий в вузе. Метод ориентирован на параллельные вычислительные системы и предполагает замену векторного критерия оптимальности на скалярный.

В процессе своей деятельности человек постоянно сталкивается с различными задачами оптимизации как на бытовом, так и на профессиональном уровне. С точки зрения количества критериев такие задачи можно разделить на одно- и многокритериальные. В качестве простейшей задачи оптимизации можно рассмотреть нахождение максимального числа в массиве, критерий только один – значение числа, а вот задача выбора подходящего товара по соотношению цена–качество уже не является простейшей. Для ее решения необходимо построить некоторый обобщенный критерий, учитывающий два или более параметров. Решая подобные задачи, человек руководствуется не только разумом и опытом, но и интуицией. Принимая то или иное решение из множества возможных, рассуждают логически, выстраивая для себя ряд альтернатив. С увеличением количества критериев, требований и ограничений задача оптимизации становится трудноразрешимой для человека. Если удастся формализовать требования, то можно использовать для решения задач многокритериальной оптимизации мощные вычислительные системы. В простейшем случае они могут перебрать все возможные варианты решений и выбрать из них оптимальное с точки зрения обобщенного критерия. На практике число вариантов решений может оказаться неприемлемо большим даже для современных суперкомпьютеров, и, кроме того, должна быть очень тонко сконструирована обобщенная функция, учитывающая приоритеты разных критериев.

Одной из таких объемных и сложных задач является составление расписания в вузе. Расписание – это важнейший документ для организации учебного процесса. Несмотря на то что эту задачу никак нельзя назвать новой и имеется весьма большой опыт ее решения, сегодня еще нет общепринятого алгоритма для составления расписания. Даже широкое распространение компьютеров не изменило ситуации – высокая вычислительная сложность задачи не позволяет использовать эффективные алгоритмы из-за слишком большого времени решения. Только мощные параллельные вычислители могут дать нужный эффект. Для их использования нужно разработать новый подход к решению задачи составления расписания, основанный на параллельных алгоритмах.

Существует несколько подходов к организации учебного процесса в вузе. Некоторые из них предполагают компактное изучение отдельных предметов, при этом

студенты полностью изучают один предмет, а потом переходят к другому. Будем рассматривать более традиционные методы – изучение предмета происходит равномерно в течение семестра. В этом случае расписание составляется на целый семестр, месяц разбивается на недели с первой по четвертую. Недели для удобства именуются: первый числитель, первый знаменатель, второй числитель, второй знаменатель. Это необходимо для равномерного распределения занятий по семестру.

Определим в задаче составления расписания несколько объектов, с которыми манипулирует алгоритм:

- студенческие группы (G), имеющие уникальный идентификатор;
- преподаватели (P) или группы преподавателей, проводящие занятие;
- учебные дисциплины (S) с видами и объемом занятий;
- аудитории (R).

Единицей расписания является пара – совокупность объектов: группа, преподаватель, аудитория, предмет и время. Зачастую такие атрибуты пары как группа, преподаватель и предмет являются заданными. При составлении расписания определяются недостающие – время (T), аудитория (R) и периодичность (F) проведения занятия (пара может идти каждую неделю, раз в две недели или раз в месяц). Таким образом, в сформированном расписании у каждой единицы (пары) будут определены все атрибуты (G, P, S, R, T, F).

Результат решения задачи составления расписания обычно представляется в графическом виде на один день (таблица). По аналогии составляется расписание на неделю и месяц.

Вид расписания на один день

День	Пара (T)	Группа 1 (G)	...	Группа N
Понедельник (T)	1 (9.00–10.20)	Физика (S) 1202 (R) Петров В.И. (P) Каждую неделю (F)		–
	2 (T)	(S, R, P, F)		–
	3 (T)	Перерыв		–
	4 (T)	(S, R, P, F)		–
	5 (T)	–		–
	6 (T)	–		–
	7 (T)	–		(S, R, P, F)
	8 (19.50–21.10)	–		(S, R, P, F)

Введем некоторые обозначения. Расписание (Time-Table) будем рассматривать как 3-мерный массив, элемент которого это кортеж

$$TT_{ijk} = (P, S, R),$$

где $i = \overline{(1, 48)}$ – номер пары (атрибут T); $j = \overline{(1, N)}$ – идентификатор группы (атрибут G); $k = \overline{(1, 4)}$ – порядковый номер недели в месяце (атрибут F).

При этом элементы таблицы TT_{ijk} могут быть как различными, так и одинаковыми (если несколько групп объединены в поток).

Задача составления расписания относится к задачам многокритериальной оптимизации. В общем случае число различных критериев, учитываемых при ее решении, может быть достаточно большим и зависит как от конкретных особенностей института, так и от опыта работника. При неоправданном увеличении числа критериев оптимизации происходит очевидное усложнение алгоритма, однако качество получаемого решения может и не улучшиться. Выделим критерии, наиболее значимые с точки зрения организации учебного процесса:

- количество «окон» у групп – f_1 ;
- количество «окон» у преподавателей – f_2 ;
- максимальное количество пар в день у групп – f_3 ;
- максимальное количество пар в день у преподавателей – f_4 ;
- количество лекций в день у преподавателя – f_5 ;
- совпадение с пожеланиями преподавателей – f_6 ;
- процент автоматически расставленных занятий – f_7 .

Кратко рассмотрим влияние этих критериев на качество расписания. Наличие «окон» у группы (критерий f_1) негативно влияет на организацию учебного процесса, кроме тех случаев, когда студентам для следующего занятия необходимо переместиться в другой корпус института. Преподавателям отдых между лекциями просто необходим, но ситуация, когда перерыв длится две и более пары, является крайне нежелательной (критерий f_2).

Критерий f_3 призван обеспечивать равномерность учебной нагрузки для лучшего усвоения материала (оптимальное количество пар в день – три или четыре). Аналогичные критерии f_4 и f_5 равномерно распределяют нагрузку преподавателей, хотя при этом могут возникнуть противоречия, связанные с необходимостью учета задаваемых в мягкой или жесткой форме разнообразных пожеланий преподавателей – критерий f_6 .

Критерий f_7 позволяет находить решение с минимумом нерасставленных занятий.

Кроме того, необходимо учитывать ряд дополнительных параметров, влияющих на процесс составления расписания (на его качество):

- занятость преподавателя в неделю – f_8 ;
- количество групп в потоке (для лекций) – f_9 ;
- ранг преподавателя – f_{10} ;
- вместимость аудитории – f_{11} .

Параметры f_8 и f_9 являются константами, определяемыми исходя из учебного плана текущего семестра, а параметр f_{10} отражает меру учета пожеланий преподавателя и связан с наличием у него административных функций или других обстоятельств, ограничивающих его участие в учебном процессе.

Очевидно, что учет этих параметров необходим для определения последовательности составления расписания и получения решения с высоким значением критерия f_7 . Например, занятия преподавателя с большим значением параметра f_8 должны быть размещены в первую очередь, иначе возможность их расстановки будет сильно ограничена временными конфликтами.

Аналогично и потоковые лекции предпочтительнее размещать в первую очередь, так как для их проведения требуется, чтобы в одно и то же время были свободны все группы потока, что трудно реализовать на заключительном этапе формирования расписания.

При составлении расписания необходимо учитывать еще и множество плохо формализуемых факторов. К ним можно отнести то, что занятия по физической культуре необходимо равномерно распределять в течение недели и что для некоторых дисциплин нужно обеспечить заданное чередование занятий лекция/семинар и некоторые другие.

Любое найденное решение должно удовлетворять пространственным и временным условиям неконфликтности расписания:

- в одной аудитории не может проходить одновременно несколько занятий;
- одно занятие не должно проходить одновременно в разных аудиториях (исключая специальные лабораторные работы, когда может потребоваться несколько аудиторий для проведения занятия);
- у группы не может проходить одновременно несколько разных занятий (исключая дисциплины по выбору);
- преподаватель не может проводить одновременно несколько занятий.

При автоматическом составлении расписания необходимо также формализовать ряд ограничений, отражающих специфику вуза, например учет удаленности аудиторий друг от друга (если занятия проходят в разных корпусах) или необходимость формирования временных учебных групп для проведения занятий по военной подготовке. Существенное влияние на качество автоматического решения оказывают и те критерии; которые человек использует чисто интуитивно, опираясь на свой опыт. Как правило, именно такие критерии хуже всего формализуются. Можно утверждать, что даже второстепенные критерии могут оказать существенное влияние на качество расписания.

Таким образом, многокритериальную задачу составления расписания можно сформулировать следующим образом: необходимо найти сочетание пар (определить их атрибуты G, P, S, R, T, F), принадлежащее множеству возможных решений X , соответствующее минимуму векторного критерия $f = (f_1, f_2, \dots, f_m)$, определенного на множестве X .

Как уже отмечалось, при решении задачи составления расписания сложным этапом является перевод критериев из словесного описания в численную форму и их нормирование, а также определение значимости отдельных критериев. На практике значения весовых коэффициентов (значимости) критериев определяются опытным путем.

Опишем критериальные функции через операции с элементами 3-мерной таблицы расписания, число учебных групп обозначим N_{gr} , а число преподавателей N_{pr} :

$$1) f_1 = \sum_{g=1}^{N_{gr}} \sum_{w=1}^4 \sum_{d=0}^5 \sum_{p=2}^7 wGr_{(d \cdot 8 + p), g, w}, \text{ где } wGr_{(d \cdot 8 + p), g, w} = 1, \text{ если } TT_{(d \cdot 8 + p), g, w} = \emptyset, \text{ и } \exists i \in \overline{(1, p-1)} \text{ и } j \in \overline{(p+1, 8)} \text{ такие, что } TT_{(d \cdot 8 + i), g, w} \neq \emptyset \text{ и } TT_{(d \cdot 8 + j), g, w} \neq \emptyset;$$

$$2) f_2 = \sum_{pr=1}^{N_{pr}} \sum_{w=1}^4 \sum_{d=0}^5 \sum_{p=2}^7 wPr_{(d \cdot 8 + p), w}, \text{ где } wPr_{(d \cdot 8 + p), w} = 1, \text{ если } TT_{(d \cdot 8 + p), g, w}(P) \neq pr \text{ при } 1 \leq g \leq N_{gr}, \exists g1 \in \overline{(1, N_{gr})} \text{ при } i \in \overline{(1, p-1)} \text{ такое, что } TT_{(d \cdot 8 + i), g1, w}(P) = pr \text{ и } \exists g2 \in \overline{(1, N_{gr})} \text{ при } j \in \overline{(p+1, 8)} \text{ такое, что } TT_{(d \cdot 8 + i), g2, w}(P) = pr;$$

$$3) f_3 = \sum_{w=1}^4 \sum_{g=1}^{N_{gr}} \sum_{i=0}^5 mGr_{i, g, w}, \text{ где } mGr_{i, g, w} = \left(\sum_{m=1}^8 TT'_{(i \cdot 8 + m), g, w} \right) - \max Gr, \text{ где } TT'_{(i \cdot 8 + m), g, w} = 1 \text{ в том случае, если } TT_{(i \cdot 8 + m), g, w} \neq \emptyset; \max Gr - \text{максимально допустимое число занятий у группы в день, критерий учитывает только превышение допустимого числа занятий, поэтому суммируются только положительные значения } mGr_{i, g, w};$$

$$4) f_4 = \sum_{w=1}^4 \sum_{pr=1}^{N_{pr}} \sum_{i=0}^5 mPr_{i, pr, w}, \text{ где } mPr_{i, pr, w} = \left(\sum_{m=1}^8 TT'_{(i \cdot 8 + m), gr, w} \right) - \max Pr, \text{ где } TT'_{(i \cdot 8 + m), gr, w} = 1, \text{ если } \exists g \in \overline{(1, N_{gr})} \text{ такое, что } TT_{(i \cdot 8 + m), g, w}(P) = pr, \max Pr - \text{максимально допустимое}$$

число занятий у преподавателя в день, критерий учитывает только превышение допустимого числа занятий, поэтому суммируются только положительные значения $mPr_{i,pr,w}$;

5) критерий f_5 подсчитывается аналогично критерию f_4 , но учитываются только лекционные занятия;

$$6) f_6 = \sum_{pr=1}^{N_{pr}} \sum_{w=1}^4 \sum_{d=0}^5 \sum_{p=1}^8 \text{wantPr}_{(d \cdot 8 + p),w}, \text{ где } \text{wantPr}_{(d \cdot 8 + p),w} = (+k, 0, -m) \text{ в зависимости}$$

от совпадения с пожеланиями преподавателя, если $TT_{(d \cdot 8 + p),g,w}(P) = pr$ при $1 \leq g \leq N_{gr}$;

7) критерий f_7 определяет долю расставленных занятий на очередном шаге алгоритма.

Решением задачи составления расписания будет такая расстановка занятий, которая отвечает этим критериальным функциям, а также учитывает предпочтения лица, принимающего решение (ЛПР). При этом отношение предпочтения – это отношение Парето.

Отношение доминирования, определенное как [1]:

$$x \succ x' \Leftrightarrow \forall k: [f_k(x) \geq f_k(x')] \wedge [f(x) \neq f(x')]$$

называется отношением Парето.

Если для некоторой точки $x \in X$ не существует более предпочтительной по Парето точки, т.е. такой точки x' , что $x' \succ x$, то тогда точка x называется эффективным или Парето-оптимальным решением многокритериальной задачи.

Суть понятия эффективного решения состоит в том, что оптимальное значение x следует искать только среди элементов множества недоминируемых элементов $P(X)$ (принцип Парето). В противном случае всегда найдется точка $x' \in X$, оказывающаяся более предпочтительной с учетом всех частных целевых функций $f_i(x')$.

Для задачи составления расписания это означает, что на каждом этапе необходимо выбирать такое решение (атрибуты пары (G, P, S, R, T, F)), которое будет лучше или не хуже других возможных решений на данном шаге.

Таким образом, задачу можно представить в виде

$$f_i(x) \rightarrow \min_{x \in X}, f_i: X \rightarrow R, i = 1, \dots, m; X \subseteq R^m. \quad (1)$$

При этом лучшим решением будет являться то, которое обеспечивает минимальное значение критериев f_i .

Если в качестве критериев используются функции, которые надо максимизировать, например f_7 , необходимо использовать обратную функцию. В нашем случае это доля нерасставленных занятий.

Из двух вариантов решения не всегда возможно выбрать лучший, так как они могут быть и не связаны отношением Парето [2]. Поэтому необходимо определить отношение предпочтений и между критериями, ЛПР должно решить, что является с его точки зрения более важным для качественного расписания, например наличие в расписании окон у студентов или у преподавателей.

Существует большое количество методов многокритериальной оптимизации. Для решения задачи составления расписания может быть использован так называемый метод линейной свертки [1].

Метод свертки – наиболее часто применяемый метод «скаляризации» многокритериальной задачи, позволяющий заменить векторный критерий оптимальности $f = (f_1, f_2, \dots, f_m)$ на скалярный $\text{Shed}: X \rightarrow R$. Он основан на линейном объединении всех частных целевых функционалов f_1, f_2, \dots, f_m в один:

$$\text{Shed}(\bar{x}) = \sum_{i=1}^m \alpha_i f_i(\bar{x}) \rightarrow \min_{x \in X}; \alpha_i > 0, \sum_{i=1}^m \alpha_i = 1. \quad (2)$$

Здесь (\bar{x}) – вариант расписания.

Весовые коэффициенты α_i могут при этом рассматриваться как показатели относительной значимости отдельных критериальных функционалов f_i . Чем большее значение придают критерию f_i , тем больший вклад в сумму (2) он должен давать и, следовательно, тем большее значение α_i должно быть выбрано.

Эти весовые коэффициенты и определяют предпочтения ЛПП между разными критериями.

Прежде чем приступать к построению алгоритмов решения задачи, необходимо оценить ее сложность. С некоторыми допущениями можно считать, что существует $(48 \cdot N_{gr})!$ решений и, следовательно, использовать алгоритмы полного перебора невозможно даже на самых мощных суперкомпьютерах. Решение надо искать с помощью последовательных и итерационных алгоритмов.

Скалярный критерий оптимальности позволяет использовать для решения задачи простой последовательный алгоритм П1.

Шаг 1. Возьмем произвольное нерасставленное занятие и попробуем поставить его на все свободные места $T_{ij,k}$ в расписании. При этом будем подсчитывать значение $\text{Shed}(x)$.

Шаг 2. Выберем тот вариант, который обеспечивает минимум $\text{Shed}(x)$. При этом будем учитывать и ограничения, например f_{10} .

Шаг 3. Повторим шаги 1 и 2, если список нерасставленных занятий еще не исчерпан.

Алгоритм не исключает тех случаев, когда остаются нерасставленные занятия.

Эффективность алгоритма существенно зависит от того порядка, в котором происходит выбор очередного занятия. В качестве метода, позволяющего преодолевать этот недостаток, можно использовать предварительную сортировку списка нерасставленных занятий с учетом параметров f_8, f_9 и f_{10} . Заметим, что на практике будет существовать и нулевой шаг алгоритма. Это ручная расстановка некоторых занятий.

Усложнение алгоритма П1 позволяет избежать предварительной сортировки и уменьшить ошибки при выборе решения на каждом шаге. Последовательный алгоритм П2 следующий.

Шаг 1. Возьмем все нерасставленные занятия и попробуем поставить их на все свободные места $T_{ij,k}$ в расписании. При этом будем подсчитывать значение $\text{Shed}(x)$.

Шаг 2. Выберем тот вариант расстановки, который обеспечивает минимум $\text{Shed}(x)$. При этом будем учитывать и ограничения, например f_{10} .

Шаг 3. Повторим шаги 1 и 2, если список нерасставленных занятий еще не исчерпан.

Алгоритм также не исключает случаев, когда остаются нерасставленные занятия.

Оценим сложность алгоритма П1.

Пусть число элементов в таблице ТТ (число пар занятий N_{par}) будет равно

$$N_{par} = 48N_{gr}.$$

При этом не учитываются недельные циклы. Максимальное число шагов в алгоритме равно N_{par} , так как на каждом шаге фиксируется только одно занятие. Чтобы выбрать лучшую позицию, необходимо оценить все свободные места, для чего надо вычислить функцию $\text{Shed}(x)$. Если сложность вычисления $\text{Shed}(x)$ обозначить F , то сложность алгоритма

$$C = (48 + 47 + 46 + \dots + 1) \cdot F \cdot N_{gr} = 1176 \cdot F \cdot N_{gr}$$

$$\text{или } C \approx O(N_{gr}).$$

Оценим сложность алгоритма П2.

Аналогичные рассуждения приводят к следующей формуле:

$$C = (N_{par} + (N_{par} - 1) + (N_{par} - 2) + \dots + 1) \cdot F = (N_{par} + 1) \cdot (N_{par}/2) \cdot F$$

$$\text{или } C \approx O(N_{gr}^2).$$

Сложность алгоритмов П1 и даже П2 позволяет говорить о возможности их реализации на последовательных вычислительных системах для размерности порядка сотен групп. Однако получить качественное решение, опираясь только на простые алгоритмы, невозможно. Усложнение алгоритмов повышает их вычислительную сложность и заставляет переходить на параллельные вычислители. Рассмотрим возможности такого перехода.

Алгоритмы П1 и П2 в какой-то мере реализуют подход, который используется при ручном составлении расписания – последовательная расстановка занятий. На каждом шаге алгоритма определяются атрибуты одного элемента таблицы ТТ, т.е. блокируется некоторый свободный ресурс (например аудитория, преподаватель или время). При переходе к следующему шагу необходимо знать результат предыдущего, поэтому эффективное распараллеливание возможно только на первом шаге алгоритмов П1 и П2. Для этого множество нерасставленных занятий нужно распределить по узлам вычислительной системы, произвести подсчет функции $Shed(x)$ и выбор локальных минимумов. Это полностью независимые по данным вычисления. Выбор глобального минимума можно производить только на ведущем узле системы, собрав на нем локальные данные.

Тестовый вариант программы был реализован для кластерной вычислительной системы, состоящей из 25 узлов (Intel Pentium IV (Prescott) 2.4GHz). Параллельная программа реализована в среде MPI (версия MPICH.NT.1.2.2). Расписание для 200 занятий было получено за 3 минуты на одном узле, а для 1200 – за 90 минут на одном узле и за 25 минут на четырех. Полученные результаты подтверждают возможность эффективного использования параллельных вычислителей для решения задачи составления расписания. Однако качество решения уступает сделанному вручную. Для практического применения необходимы дальнейшее усложнение алгоритмов и исследования по влиянию весовых коэффициентов α_i в скалярном критерии на качество решения.

Литература

1. **Черноруцкий И.Г.** Методы принятия решений. – СПб.: БХВ-Петербург, 2005. – 408 с.
2. **Ногин В.Д.** Принятие решений в многокритериальной среде. Количественный подход. – М.: Физматлит, 2002. – 144 с.

Статья поступила
1 июня 2007 г.

Лупин Сергей Андреевич – кандидат технических наук, профессор кафедры вычислительной техники МИЭТ. *Область научных интересов:* информационно-управляющие и информационные системы, параллельные вычисления, кластерные вычислительные системы.

Милехина Татьяна Викторовна – аспирант кафедры вычислительной техники МИЭТ. *Область научных интересов:* параллельные вычисления.

КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ

УДК 541.13:621.315.592.3

Особенности кинетики анодного окисления вращающихся кремниевых пластин в легирующих электролитах

Л.П.Милешко

Технологический институт Южного Федерального университета в г. Таганроге

В известных работах кинетические закономерности гальваностатического анодирования неподвижных пластин кремния изучались в основном по вольт-временным зависимостям $U_{\phi}(t)$, которые нелинейны в начальный период [1]. Для высокоомного кремния n -типа наблюдался спад напряжения формирования U_{ϕ} до минимального значения, а в случае низкоомного кремния p -типа – подъем до индукционного участка. После нелинейных участков зависимости $U_{\phi}(t)$ становятся строго линейными вплоть до предельного значения U_{ϕ} .

При исследовании процесса электролитического анодирования (ЭА) кремния методом вращающегося диска по методике, описанной в [2], выявлено, что на линейных участках U_{ϕ}, t -зависимостей (рис.1, 2) скорость роста формирующего напряжения dU_{ϕ}/dt (наклон линейных участков) практически не зависит от числа оборотов подложки (пластины кремния КЭФ-0,3 размером 5×10 мм) до 30 об/с при содержании H_3PO_4 и H_3BO_3 в этиленгликоле (ЭГ) + $0,05$ М HNO_3 + 1 М H_2O от 0,001 до 2 [3] и от 0,5 до 2,5 моль/л [4] соответственно и при плотности тока $j_r = 150$ А/м². Однако в условиях вращения подложки предельное напряжение формирования в концентрированных растворах повышается до 360 В (см. рис.1, 2), что соответствует

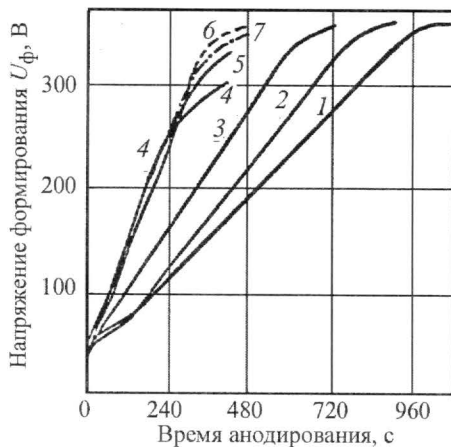


Рис.1. Зависимость напряжения формирования U_{ϕ} от времени анодирования кремния КЭФ-0,3 при плотности тока $j_r = 150$ А/м² в ЭГ+0,05 М HNO_3 +1 М H_2O + 10^{-3} (кривая 1); 10^{-2} (2); 10^{-1} (3); 1 М H_3PO_4 (5, 6); 2 М H_3PO_4 (4, 7) при неподвижной (1–5) и вращающейся с числом оборотов 30 об/с подложке (6, 7); $T_{эл} = 285 \pm 1$ К

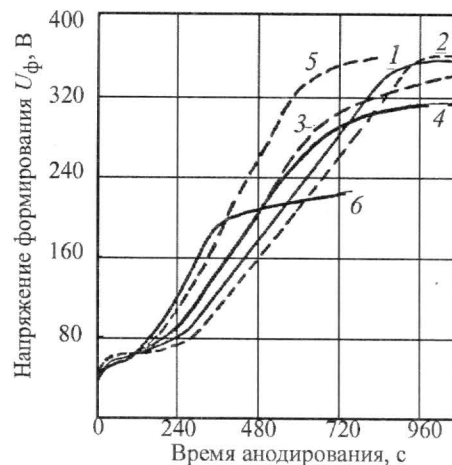


Рис.2. Зависимость напряжения формирования U_{ϕ} от времени анодирования кремния КЭФ-0,3 при плотности тока $j_r = 150$ А/м² в ЭГ+0,05 М HNO_3 +1 М H_2O +1 М H_3BO_3 (кривые 1, 2); 1,5 М H_3BO_3 (3, 4) и 2,5 М H_3BO_3 (5, 6) при неподвижной (1, 4, 6) и вращающейся с числом оборотов 30 об/с подложке (2, 3, 5); $T_{эл} = 285 \pm 1$ К

процессу ЭА в электролите без легирующих добавок. Причем более эффективно это проявляется в случае боратных электролитов (см. рис.2). Это, вероятно, обусловлено тем, что вращение способствует облегчению отвода пузырьков газа, которые заметно выделяются при переходе к предельному напряжению формирования и затрудняют поставку реагентов. Следовательно, на участках линейной протяженности $U_{\text{ф}}, t$ -зависимостей процесс формирования анодных оксидных пленок на кремнии индифферентен к массопереносу легирующих добавок в электролите, а влияние вращения подложки на стадии перехода к предельному напряжению формирования подтверждает предположение о диффузионной природе контроля на этой стадии, сделанное в работе [5] на основании анализа $U_{\text{ф}}, t$ -кривых с точки зрения формальной аналогии процессов термического и анодного окисления кремния. В начальной стадии и на линейных участках вольт-временных зависимостей наблюдается кинетический контроль [5].

Таким образом, процесс образования фосфатных и боратных анодных оксидных пленок кремния индифферентен к массопереносу анионов легирующих компонентов в электролитах на основе этиленгликоля.

Литература

1. *Мамина С.П., Одынец Л.Л.* Электрохимическое окисление кремния в этиленгликоле // *Электрохимия*, 1966. – Т. II. – Вып. 3. – С. 346–350.
2. *Милешко Л.П., Сорокин И.Н., Чистяков Ю.Д.* Кинетика электролитического окисления карбида и нитрида кремния // В кн. «Активируемые процессы технологии микроэлектроники». М.: МИЭТ, 1980. – С. 29–40.
3. *Бредихин И.С., Милешко Л.П., Селиванова В.А.* Электролит для легирования оксидной пленки кремния фосфором. Авт. свид. СССР № 527989 от 19.05.1975. БИПМ, 2001. – № 10. – С. 334.
4. *Милешко Л.П., Бредихин И.С., Селиванова В.А.* Электролит для легирования оксидной пленки кремния бором. Авт. свид. СССР № 545210 от 10.07.1975. БИПМ, 2001. – № 10. – С. 334.
5. *Шаталов А.Я., Владимиров Л.Н.* Аналогия в формально-кинетическом описании роста анодного и термического SiO_2 // *Полупроводниковые материалы и их применение: Сб. статей.* – Воронеж: ВГУ, 1977. – С. 66–69.

Поступило
13 ноября 2006 г.

Милешко Леонид Петрович - кандидат технических наук, доцент кафедры химии и экологии ТТИ ЮФУ. *Область научных интересов:* физико-химические основы и экологическая безопасность микро- и нанотехнологий с применением электрохимических методов.

УДК 621.382.002

Особенности формирования фоторезистивных пленок на подложках некруглой формы

С.П.Тимошенков, В.В.Ануфриенко, Мьо Хейн Зо

Московский государственный институт электронной техники
(технический университет)

Исследования формирования пленок резистов в поле центробежных сил [1–4] показали, что по углам некруглых подложек образуются утолщенные области. Однако механизм, предложенный в [4] для объяснения наблюдаемых утолщенных областей, не убеждает в справедливости принятых допущений.

В данной работе приведены результаты экспериментального исследования формирования на прямоугольных и квадратных подложках покрытий из растворов с различными значениями плотности, коэффициентов вязкости и поверхностного натяжения. Нанесение покрытий осуществлялось на центрифуге с быстроразгонным приводом (время разгона

подложки до задаваемой частоты вращения не превышало 50 мс). Для визуализации линий тока растекающегося по подложке раствора в него вводился мелкодисперсный порошок сажи. Измерения толщины и профиля покрытия проводились на микроинтерферометре МИИ-4 с использованием фото- и киносъемки.

На основе анализа проведенных исследований предложена следующая физическая модель процесса.

1. В результате взаимодействия центробежных сил и сил поверхностного натяжения на краях каждой стороны некруглой подложки образуется краевой валик. Из условия равновесия между этими силами получено уравнение для определения диаметра d меридионального сечения краевого валика на круглой подложке [1, 3]:

$$d = 2r = 2 \sqrt{\frac{\sigma}{R\omega^2\rho}}, \quad (1)$$

где σ – коэффициент поверхностного натяжения, Н/м; R – радиус подложки, м; ρ – плотность жидкости, кг/м³; ω – угловая скорость, с⁻¹.

2. Образовавшийся краевой валик на каждой из сторон прямоугольной или квадратной подложки можно представить как трубу, в которой происходит течение раствора под действием тангенциальной составляющей $F_{ц}''$ (рис.1) центробежной силы $F_{ц}$ от середины каждой из сторон к углам подложки с относительной линейной скоростью $v_{отн\phi}$ (относительно подложки). Относительная скорость возрастает от нуля на середине стороны подложки до некоторого значения, зависящего от тангенциальной составляющей центробежной силы. Очевидно, что на движущуюся в валике с относительной скоростью жидкость и участвующую во вращательном движении с частотой ω вместе с подложкой будет действовать сила Кориолиса $F_{К\phi}$, вектор которой определяется направлением вращения подложки (по часовой стрелке или против). Сила Кориолиса возрастает так же, как и относительная скорость – от нуля в середине стороны подложки к некоторому значению в углу подложки. За счет действия силы Кориолиса, когда ее вектор по нормали к стороне подложки направлен внутрь, происходит характерное натекание раствора на подложку (см рис.1,б сторона B во II четверти подложки и рис.1,а сторона B в I четверти) [3].

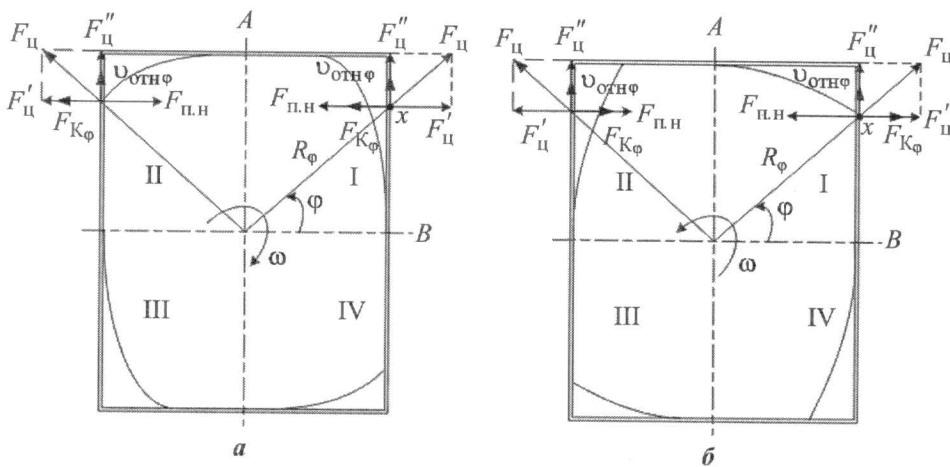


Рис.1. Схема векторов сил и скоростей в краевом валике на прямоугольной подложке со сторонами A и B при вращении по часовой стрелке (а) и против (б) ($F_{п.н}$ – сила поверхностного натяжения)

Составляющая $F_{\text{ц}}'$, направленная по нормали к стороне B подложки, влияет на величину валика и определяется зависимостью

$$F_{\text{ц}}' = F_{\text{ц}} \cos \varphi = \rho \omega^2 \left(\frac{a}{2} \right). \quad (2)$$

Из выражения (2) следует, что $F_{\text{ц}}'$ не меняется при перемещении точки x вдоль стороны B . Следовательно, диаметр равновесного валика $d_b = 2r$ на стороне B является постоянной величиной, определяемой из (1): $d_b = \sqrt{\frac{8\sigma}{\rho \omega^2 a}}$. По аналогии можно получить выражение для d_a на стороне A .

В различных четвертях прямоугольной подложки вдоль ее сторон образование утолщенных областей будет определяться направлением вращения подложки (см. рис.1). При вращении подложки по часовой стрелке утолщенные области образуются на сторонах подложки с размером B в I и III четвертях и на сторонах с размером A во II и IV четвертях. При вращении против часовой стрелки наблюдается зеркальное отражение картины утолщенных областей.

Скалярная величина силы Кориолиса выражается известной зависимостью $F_K = 2\rho \omega v_{\text{отн}\varphi}$.

Учитывая, что $F_{\text{ц}}'' = F_{\text{ц}} \sin \varphi = \frac{a}{2} \rho \omega^2 \operatorname{tg} \varphi$ и $v_{\text{отн}\varphi} = \frac{v_{\tau\varphi}}{\cos \varphi}$, (где $v_{\tau\varphi} = \omega R_{\varphi} = \frac{\omega a}{2 \cos \varphi}$ – окружная скорость в точке x), получим функциональную зависимость $F_{K\varphi}$, определяющую форму границы натекания раствора внутрь подложки:

$$F_{K\varphi} = \frac{\rho \omega^2 a}{\cos^2 \varphi}. \quad (3)$$

Площадь утолщенной области покрытия можно рассчитать, учитывая (3), по уравнению

$$S = \frac{ab}{4} - \int_{\varphi=0}^{\varphi=\arctg \frac{b}{a}} \frac{\rho \omega^2 a}{\cos^2 \varphi} d\varphi.$$

Предложенные физическая и математическая модели, описывающие процесс образования утолщенных областей полимерных покрытий, наносимых на подложки некруглой формы при центрифугировании, могут быть полезны при проектировании центрифуг и в технологии нанесения равномерных фоторезистивных пленок при изготовлении фотошаблонов, гибридных микросхем, печатных плат, оптических элементов и др.

Литература

1. Ануфриенко В.В., Мью Хейн Зо. Исследование параметров валика, образующегося на краях подложек при нанесении фоторезиста на центрифуге // Естественные и технические науки. – 2006. – № 6 (26). – С. 278–282.
2. Xiao-guo Feng, Lian-chun Sun. Mathematical model of spin-coated photoresist on a spherical substrate // Optics express. – 2005, 5 September. – Vol. 13, N 18. – С. 7070–7075.

3. *Ануфриенко В.В., Кутко.П.С., Перемыщев В.А.* Растекание раствора фоторезиста при центрифугировании на подложках некруглой формы // В сб.: Электронная техника, сер.7 «Технология, организация производства и оборудование». – 1971. – Вып 3(51). – С. 64 – 69.

4. *Carcano G., Ceriani, M., Soglio F.* Spin coating with high viscosity photoresist on square substrates // Hybrid Circuits. – 1993. – Vol. 32, Sept. – P. 12.

Поступило
14 мая 2007 г.

Тимошенков Сергей Петрович – доктор технических наук, заведующий кафедрой микроэлектроники МИЭТ. *Область научных интересов:* микросистемная техника, конструирование и технология изготовления микроэлектромеханических систем.

Ануфриенко Вячеслав Владимирович – кандидат технических наук, профессор кафедры микроэлектроники МИЭТ. *Область научных интересов:* технологические процессы и оборудование, используемые в производстве микросхем.

Мьо Хейн Зо – аспирант кафедры микроэлектроники МИЭТ. *Область научных интересов:* технологические процессы и оборудование, используемые в производстве микросхем.

УДК 621.315.592

Зависимости температурного коэффициента прямого напряжения на гетеропереходных светодиодах от тока и температуры

В.А.Сергеев, А.А.Широков

Ульяновский филиал Института радиотехники и электроники РАН

В спецификациях на серийно выпускаемые светодиоды (СИД) приводятся усредненные значения температурного коэффициента прямого падения напряжения (ТКН), но не указываются режимы его измерения и диапазоны возможных изменений. Вместе с тем известно, что ТКН гетеропереходных СИД является чувствительным к электрофизическим параметрам структуры и параметрам режима [1–3]. Зависимости ТКН от тока и температуры необходимо учитывать при определении температуры активной области структур СИД косвенным методом [2], при оценке нестабильности тока СИД и в ряде других задач.

Измерения ТКН проводились на серийных гетеропереходных СИД фирмы Vishay Semiconductors [4] трех типов: TLCR5800 (красные) на основе AlInGaP/GaAs; TLCB5800 (голубые) и TLCTG5800 (зеленые) на основе InGaP/SiC, в диапазоне токов 0,1–10 мА и температур 0–90 °С. Для изменения и поддержания температуры капсулы светодиода использовался двухступенчатый элемент Пельтье типа ТВ-127-1,4-2,5. Температура капсулы измерялась термопарой мультиметра МУ-64 с погрешностью ± 1 °С. Для обеспечения приемлемой точности определения ТКН его значения рассчитывались по изменению прямого падения напряжения ΔU_{10} при изменении температуры ΔT корпуса светодиода на 10 °С: $K_T = \Delta U_{10}/10$ [мВ/К]. Путем многократного повторения циклов нагрева и охлаждения с усреднением результатов общая погрешность определения ТКН, по нашим оценкам, не превышала 8%.

У красных СИД модуль ТКН существенно (в 2–3 раза) меньше, чем у зеленых и голубых (рис.1). У зеленых СИД (рис.1,а) наблюдается общий тренд снижения ТКН (на 30–40%) с ростом температуры вплоть до 70–80 °С; при дальнейшем увеличении температуры ТКН возрастает; при токах 1,0 и 10 мА в интервале температур 40–60 °С на зависимости $K_T(T)$ наблюдается локальный максимум. У голубых СИД (рис.1,б) наблюдаются два локальных максимума, у красных СИД – один четко выраженный максимум в диапазоне температур 40–60 °С, который с ростом тока смещается в сторону более высоких температур (рис.1,в).

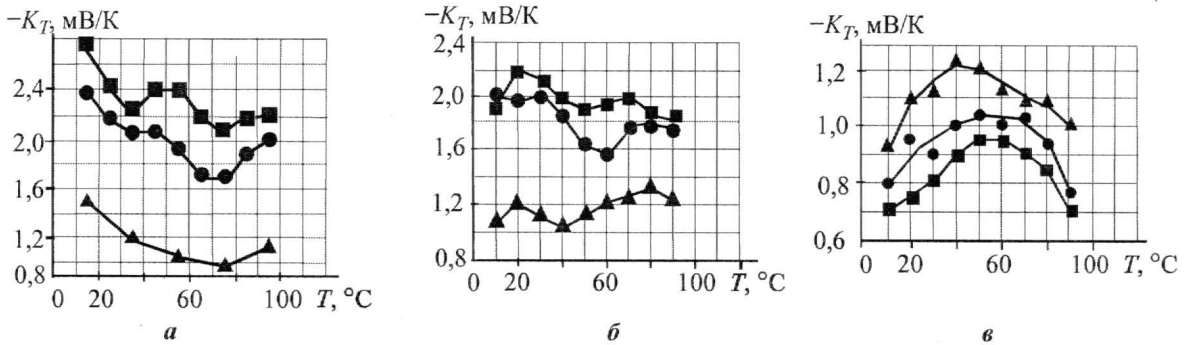


Рис.1. Зависимость ТКН на гетеропереходных СИД от температуры: а – зеленые InGaP/SiC; б – голубые InGaP/SiC; в – красные AlInGaP/GaAs (▲ – 0,1 мА; ● – 1,0 мА; ■ – 10,0 мА)

Зависимости усредненного в исследуемом диапазоне температур ТКН от тока показаны на рис.2. У зеленых и голубых СИД с увеличением тока модуль ТКН сублинейно растет, что качественно совпадает с результатами работы [2] для гетероструктур на основе InGaP/AlGaP/GaN. Малое значение ТКН и его уменьшение с ростом тока у красных СИД на основе AlInGaP/GaAs объясняется, вероятно, наличием (в исследованном диапазоне токов) значительной диффузионной составляющей прямого тока (что согласуется с мнением авторов [2] в отношении GaAs/GaAlAs СИД). В результате токовые и температурные зависимости ТКН этих гетеропереходов становятся подобными аналогичным зависимостям гомопереходов.

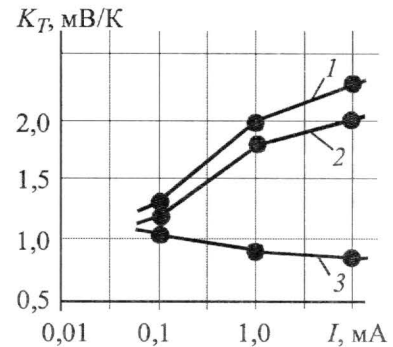


Рис.2. Зависимость усредненного ТКН гетеропереходных СИД от тока: 1 – зеленые InGaP/SiC; 2 – голубые InGaP/SiC; 3 – красные AlInGaP/GaAs

Согласно обобщенной модели [1] без учета падения напряжения на омическом сопротивлении квазинейтральных областей СИД, что вполне допустимо в исследуемом диапазоне токов, ВАХ анизотипных гетеропереходов может быть записана в виде

$$I_d = A \exp\left(-\frac{qU_{b0}}{kT}\right) \left(\exp \frac{qU}{\eta kT}\right), \quad (1)$$

где A – параметр, слабо зависящий от температуры и определяемый механизмом токопрохождения; U_{b0} – напряжение на барьере при отсутствии внешнего смещения; q – заряд электрона; k – постоянная Больцмана; коэффициент η определяется типом механизма токопереноса, прева-

лирующего при том или ином смещении. Полагая параметры A , U_{b0} и η в первом приближении слабо зависящими от температуры, из (1) нетрудно получить выражение для ТКН

$$K_T = \left. \frac{dU}{dT} \right|_{I_d = \text{const}} = \frac{\eta k}{q} \ln \left(\frac{I_d}{A} \right) \quad (2)$$

или в иной форме, не содержащей в явном виде параметр A :

$$K_T \approx - \frac{\eta U_{b0} - U_0}{T_0}. \quad (3)$$

Согласно (2) и (3) температурные и токовые зависимости ТКН СИД определяются соответствующими зависимостями коэффициента $\eta = F(T, I_d)$, что можно использовать для оценки электрофизических параметров гетеропереходов и превалирующих механизмов токопереноса в гетеропереходных СИД.

Авторы выражают благодарность студентам базовой кафедры радиотехники, опто- и наноэлектроники Ульяновского государственного технического университета в УФ ИРЭ РАН Березиной Э.В. и Копыловой А.С. за помощь в проведении измерений.

Литература

1. Шарма Б.Л., Пурухит Р.К. Полупроводниковые гетеропереходы: Пер. с англ. / Под ред. Ю.В.Гуляева. – М.: Сов. радио, 1979. – 232 с.
2. Сукач Г.А., Смертенко П.С., Олексенко П.Ф., Suji Nakamura Анализ температуры перегрева активной области зеленых СИД на основе нитридов III группы // ЖТФ. – 2001. – Вып. 4. – С. 76–79.
3. Грушко Н.С., Лакалин А.В., Сомов А.И. Определение механизма токопереноса в p - n -переходах по анализу температурной зависимости прямых вольт-амперных характеристик // Изв. вузов. Электроника. – 2007, № 2. – С. 35–40.
4. Document Number 83176. Rev. A1, 05-Mar-02. www.vishay.com.

Поступило
24 августа 2007 г.

Сергеев Вячеслав Андреевич – доктор технических наук, доцент, директор Ульяновского филиала ИРЭ РАН, заведующий базовой кафедрой радиотехники, опто- и наноэлектроники Ульяновского государственного технического университета в УФ ИРЭ РАН. *Область научных интересов:* токораспределение и теплофизические процессы в твердотельных структурах, полупроводниковых приборах и интегральных микросхемах; методы и средства измерения теплофизических параметров изделий электронной техники.

Широков Алексей Анатольевич – кандидат технических наук, заместитель директора по научной работе Ульяновского филиала ИРЭ РАН, доцент базовой кафедры радиотехники, опто- и наноэлектроники Ульяновского государственного технического университета в УФ ИРЭ РАН. *Область научных интересов:* электрофлуктуационные процессы в полупроводниковых приборах и изделиях микроэлектроники, методы неразрушающего контроля качества и оценки надежности изделий электронной техники.

Снижение турбулентности газового потока в микроканалах

Д.В.Локтев., Д.В.Зиновьев

Московский государственный институт электронной техники (технический университет)

Благодаря компактности, быстродействию, удобству обработки выходных сигналов термосенсоры (термоанемометры, катарометры, манометры Пирани, метаноопределители и др.) широко распространены в измерительной технике. Объектом измерения чаще всего являются газы, на которых функционирует множество технических систем, таких как двигатели внутреннего сгорания, газотурбинных, ракетных, паросиловых установок. В микроэлектронике – при контроле газовой среды в технологических процессах, таких как восстановление кремния из хлорсиланов, эпитаксия, диффузия, окисление, синтез полупроводниковых соединений.

Термоанемометры чувствительны к скорости потока – одному из важных объектов измерения, а она распределяется в любом трубопроводе неравномерно по сечению, аналитический пересчет ее в расход в общем случае крайне затруднен. Чувствительный элемент можно вынести на внешнюю поверхность трубки, как и в сенсорах первого поколения. Однако для точного и малоинерционного измерения требуется, чтобы нагреватели и терморезисторы термоанемометра были расположены внутри потока, но при этом вследствие отмеченной неоднородности возникает неопределенность, которую устраняют с помощью перегородок с отверстиями, пачки трубок (хонейкомбов) [1].

Измерение больших расходов обычно выполняется в байпасных линиях, и в этом случае необходимо устранять пульсации, возникающие вследствие турбулентности на входе в трубку малого диаметра из-за смены направления потока и отрыва пограничного слоя. Эффективным способом устранения пульсаций является сжатие и последующее расширение потока, но применяемые для этого устройства не должны вызывать турбулентность и поэтому требуют плавных переходов и большой длины. Согласно многим экспериментам ламинарность с пульсациями не более 1% создается на длине прямой трубки $L = 0,056 \cdot Re \cdot D$, где D – диаметр трубки; Re – число Рейнольдса [2]. Так, при максимальной скорости воздуха 10 м/с в байпасе диаметром 1,5 мм число $Re = 100$, а длина канала $L = 10$ мм, что в несколько десятков раз превышает размеры собственно чувствительного элемента, препятствуя миниатюризации прибора в целом. Кроме того, поскольку причиной ламинаризации служит трение о поверхность, качество ее обработки, воспроизводимость геометрической формы должны быть строго контролируемы, а загрязнения сведены к минимуму, что не просто обеспечить как в процессе изготовления, так и при эксплуатации, учитывая малые размеры изделия.

Важным фактором является сокращение длины коммуникаций газораспределительных систем, являющихся непременным компонентом многих установок для производства полупроводниковых приборов и ИС. Проиллюстрировать влияние способности поверхности удерживать примеси, содержащиеся в газовой смеси, можно следующим примером из технологии эпитаксии кремния. Если через трубку с поверхностью 100 см^2 пропускать сначала смесь $\text{SiCl}_4 + \text{AsH}_3$, обеспечивающую наращивание слоев с удельным сопротивлением 2–5 Ом·см, а затем, изменив соответственно концентрацию AsH_3 , попытаться получить слои с $\rho = 30\text{--}50$ Ом·см, потребуется длительная предварительная продувка газовых линий. Эксперименты показывают, что наличие

мономолекулярного адсорбционного слоя, содержащего 10^{17} атомов As, достаточно для формирования переходного слоя толщиной 1 мкм на 32 подложках диаметром 100 мм.

Очевидно, что освоение наноструктур на основе кремния, сплавов Si – Ge, GaAs – AlAs и т.п. ввиду скоротечности технологических и переходных процессов потребует резкого сокращения длины линий газораспределительных систем и новых эффективных способов управления потоками газов.

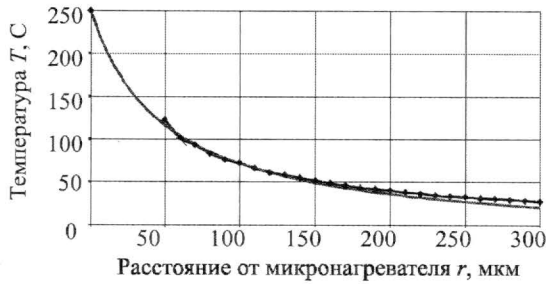


Рис. 1. Тепловое поле микронагревателя:
—♦— эксперимент; — теория [4]

Разработан новый способ снижения турбулентности, основанный на трении так называемой ограниченной транзитной струи о покоящийся газ [3]. Эффективность этого способа была резко повышена за счет создания с помощью микронагревателя теплового пограничного слоя и сжатия потока вследствие уменьшения проходного сечения трубопровода. Причиной этих необычных свойств газа в районе 100 мкм вокруг точечного нагревателя, конструкция которого приведена в [5], является огромная кривизна его поверхности и высокий градиент температуры ($10000 - 20000$ К/см) (рис.1), что

обуславливает особое упорядоченное состояние газа и образование теплового пограничного слоя [6]. Если предположить, что этот слой создает большое гидравлическое сопротивление для внешнего потока, то следует ожидать повышения общего сопротивления на участке канала, в котором расположен нагреватель при его включении. В эксперименте для увеличения эффекта в длинном канале с шагом 5 мм было установлено последовательно 15 нагревателей мощностью около 30 мВт каждый. Предварительно удостоверившись, что все тепло отдается тонкими стенками металлической трубки в атмосферу и газ не нагревается, измеряли прирост давления, обусловленный действием на поток микронагревателей. Разница оказалась в 26 Па, т.е. около 2 Па на нагреватель. Насколько эффективно такое сжатие можно судить из сравнения с гидравлическим сопротивлением сетки, которое можно рассчитать [2]:

$$\Delta P = \frac{\xi \rho v^2}{2}, \quad \xi = \left(\frac{1-S}{S} \right)^2, \quad S = \left(1 - \frac{d}{m} \right)^2,$$

где ξ – коэффициент гидравлического сопротивления; S – живое сечение сетки; ρ – плотность газа; v – его скорость; d – диаметр проволоки сетки; m – размер ячейки.

Расчет показывает, что эффективность теплового успокоителя соответствует двум последовательно установленным сеткам с шагом $d + m = 50$ мкм.

Пульсации сигнала электрического сопротивления, вызванные колебаниями температуры нагревателя и достигающие 10% измеряемой скорости, при включении первого по ходу потока микронагревателя устраняются полностью (рис.2).

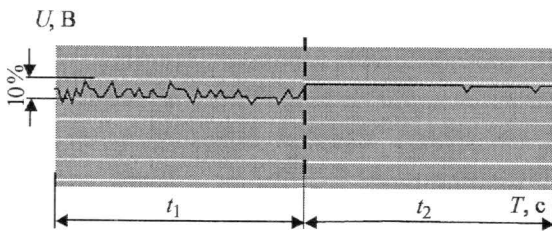


Рис. 2. Сигнал термоанемометра: t_1 – до включения микронагревателя; t_2 – после включения

В следующей серии экспериментов регулятор расхода был установлен в конец цепочки микронагревателей и измерения ΔP были выполнены под давлениями 1, 2 и 3 атм. Из результатов следует, что по мере повышения давления его перепад на каждом нагревателе уменьшается. Это свидетельствует о сокращении пограничной градиентной зоны, что вполне укладывается в развитую модель теплопроводности высокоградиентного слоя [6].

Столь разнообразный комплекс свойств микронагревателя – терморезистора резко расширяет сферу применения тепловых МЭМС нового поколения.

Литература

1. *Gehman R.W., Murray M.G., Speldrich J.W.* Reduced package size for medical flow sensor, honeywell // Previously Presented at the IMAPS Technical Symposium (May 3, 2000). – 2000. – P. 2–5.
2. *Фабер Т.Е.* Гидроаэродинамика. – М.: Постмаркет, 2001. – 732 с.
3. *Калицин В.П., Дроздов Е.В.* Основы гидравлики и аэродинамики – М.: Стройиздат, 2001. – 296 с.
4. Теплотехника / *Под ред. Луканина В.Н.* – М.: Высш. шк., 2002. – 671 с.
5. Эффект гигантской теплоотдачи телами субмиллиметровых размеров / *Д.В.Зиновьев, К.А.Тузовский, В.М.Андреев и др.* // Докл. Академии наук РФ. – 1999. – Т. 366, № 2. С. 178–180.
6. *Zinoviev D.V., Andreev V.M., Tuzovsky K.A., Loktev D.V.* Investigation of microobjects heat transfer // Second Intern. Conf. on Transport Phenomena in Micro and Nanodevices (II Ciocco Hotel and Conference Center, Barga, Italy, 11–15 June 2006). – 2006.

Поступило
22 августа 2007 г.

Локтев Дмитрий Викторович – аспирант кафедры материалов и процессов твердотельной электроники МИЭТ. Область научных интересов: датчики, МЭМС.

Зиновьев Дмитрий Валерьевич – кандидат технических наук, доцент кафедры материалов и процессов твердотельной электроники МИЭТ. Область научных интересов: датчики, МЭМС, газофазная эпитаксия кремния, газодинамика.

УДК 621.3.049.77.002

Численное моделирование и оптимизация площади мощного ДМОП-транзистора

А.С.Ключников

Московский государственный институт электронной техники (технический университет)

Для исследования, разработки и оптимизации ДМОП-транзистора с заданными электрическими параметрами и оптимальной площадью использовался пакет программ приборно-технологического моделирования.

ДМОП-транзистор можно условно разделить на две части: область, состоящую из множества параллельных ячеек (рис.1,а), и охранную область*. С использованием пакета программ приборно-технологического моделирования рассчитана ячейка ДМОП-транзистора и получены зависимости пробивного напряжения U и сопротивления R_{cell} от различных значений размеров области затвора L_g , области истока L_s , толщины эпитаксиальной пленки H_{epi} и концентрации примеси в пленке N . При этом технологические параметры устройства не изменялись (доза, энергия и др.).

* *Королев М.А., Швец А.В., Ключников А.С.* Численное моделирование пробивного напряжения ДМОП-транзистора с охранными кольцами // Материалы международной науч.-техн. конф. «Фундаментальные проблемы радиоэлектронного приборостроения», «INTERMATIC – 2006». – М., 2006. – С. 183–186.

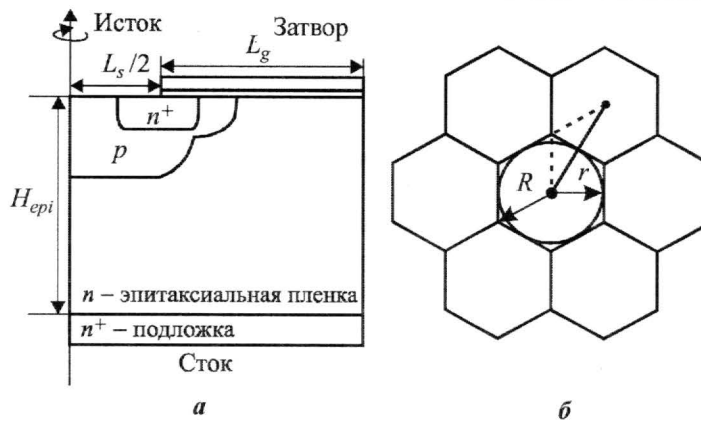


Рис. 1. Ячейка ДМОП-транзистора: а – сечение ячейки; б – площадь, занимаемая ячейками, и их взаимное расположение

Площадь, занимаемая ячейкой, равна $S_{cell} = 2\sqrt{3}r^2$ (рис.1,б), где $r = L_g + L_s/2$. Зная, что сопротивление ДМОП-транзистора должно быть не более 8 Ом, можно оценить количество ячеек k , необходимых для получения заданного сопротивления: $k = \frac{R_{cell}}{8}$. Площадь, которую будут занимать все ячейки, равна $S = kS_{cell}$.

Пробой ячейки будет происходить в направлении, показанном на рис. 1,б (штриховая линия). Сопротивление и пробивное напряжение ячейки рассчитывались для трехмерной структуры, полученной вращением сечения ячейки ДМОП-транзистора вокруг оси (см. рис.1,а). При расчете сопротивления радиус ячейки выбирался равным r , а при расчете пробивного напряжения $R = 2\frac{\sqrt{3}}{3}r$, где R – радиус описанной окружности. Таким образом, сопротивлению ячейки с радиусом r будет соответствовать пробивное напряжение ячейки с радиусом R ($L_s = \text{const}$).

Используя приведенные формулы и соответствие пробивного напряжения и сопротивления при определенных размерах ячейки, построена зависимость полученной площади от пробивного напряжения для различных значений концентрации примеси в эпитаксиальной пленке (рис.2). Из рисунка видно, что при заданных электрических характеристиках (пробивное напряжение не меньше 600 В и сопротивление не более 8 Ом) наименьшую площадь получаем при следующих значениях параметров ячейки: $N = 2 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$; $L_g = 6 \text{ мкм}$; $L_s = 12,5 \text{ мкм}$; $H_{epi} = 60 \text{ мкм}$; глубина залегания p -области $\sim 8 \text{ мкм}$; концентрация на поверхности $\sim 10^{18} \text{ см}^{-3}$; глубина залегания истока $\sim 1 \text{ мкм}$; концентрация на поверхности $\sim 10^{20} \text{ см}^{-3}$; толщина подзатворного оксида $0,1 \text{ мкм}$.

Для получения минимальной площади, занимаемой всеми ячейками, проводилось моделирование при других значениях параметров ячейки (N , L_g , L_s , H_{epi}). Далее из зависимости, показанной на рис.2, но с учетом других значений параметров ячейки определялись размеры ячейки, толщина и концентрация примеси в эпитаксиальной пленке. В результате из полученных значений выбираются те, при которых площадь, занимаемая прибором, минимальна.

Поступило
16 августа 2007 г.

Ключников Алексей Сергеевич – аспирант кафедры интегральной электроники и микросистем МИЭТ. Область научных интересов: приборно-технологическое моделирование полупроводниковых приборов и интегральных микросхем.

Требования к системе обеспечения и контроля качества изготовления ИМС в условиях кремниевых фабрик

С.Б.Подъяпольский

ФГУ «22 ЦНИИ Минобороны России»

Современное состояние и темпы развития микроэлектронного производства ставят ряд проблем перед изготовителями и потребителями в первую очередь в области контроля и обеспечения качества.

Традиционная система процедуры разработки и внедрения изделий в производство предусматривает следующие общие этапы:

- проектирование изделий и подготовка комплекта документации, изготовление опытной партии, ее испытание и приемка. Как правило, это проводится на одной фирме – институт и завод либо завод и конструкторское бюро;
- корректировка документации по результатам приемки опытной партии, изготовление установочной партии с дальнейшим присвоением соответствующего литеры документации, утверждение технических условий и внесение изделий в Перечень разрешенных для применения электрорадиоизделий (серийное освоение может проводить как предприятие-разработчик, так и независимый серийный завод).

Процесс изготовления ИМС обеспечен действующей нормативной базой, включающей комплекс стандартов: общие технические требования; требования к системе обеспечения качества в процессе разработки; требования к технологическому процессу, системе и методам операционного контроля; система и методы статистического контроля и регулирования технологических процессов.

Основой приведенной стройной и оправдавшей себя системы обеспечения качества является то, что на всех этапах объектом выступает функционально законченное изделие со своими параметрами и характеристиками, которые, являясь критериальными, могут быть измерены на каждом этапе изготовления.

В настоящее время мировые тенденции интеграции стран в единую экономическую систему с глубокой специализацией производства для сокращения сроков от идеи (разработки) до ее реализации и появления товара на рынке наряду с традиционной системой разработки привели к созданию нового подхода, основанного на наличии у фабрики технологических возможностей по производству определенного класса изделий. Эти возможности предлагаются заказчику, в качестве которого выступает разработчик ИМС [1, 2]. Производители предоставляют разработчику (заказчику) комплект документации с правилами проектирования. Разработчик на основе представленных данных и своего подхода к схемотехническому проектированию определяет необходимость (возможность) его использования для конкретного изделия, проектирует его по представленным правилам и передает на фабрику. Изготовленные в таком формате изделия

контролируются фабрикой – на тестовых элементах и по результатам операционного контроля. Заказчику (разработчику) передаются пластины с «заказными изделиями», которые могут идентифицироваться как микросхемы только после контроля параметров у разработчика.

Литература

1. Немудров В.Г., Мартин Г.И. Системы-на-кристалле. Проектирование и развитие. – М.: Техносфера, 2004. – 212 с.
2. Alberto Sangiovanni-Vincenteli The Tides of EDA IEE Design and Tesnov // Dec. – 2003. – 59–75.

Поступило
28 сентября 2007 г.

Подъяпольский Сергей Борисович – начальник научно-исследовательского испытательного центра сертификации ФГУ «22 ЦНИИ Минобороны России». Область научных интересов: система обеспечения качества и надежности, методология сертификационных испытаний изделий микроэлектроники отечественного и иностранного производства.

УДК 621.3.087

Система на кристалле для теплового пожарного извещателя

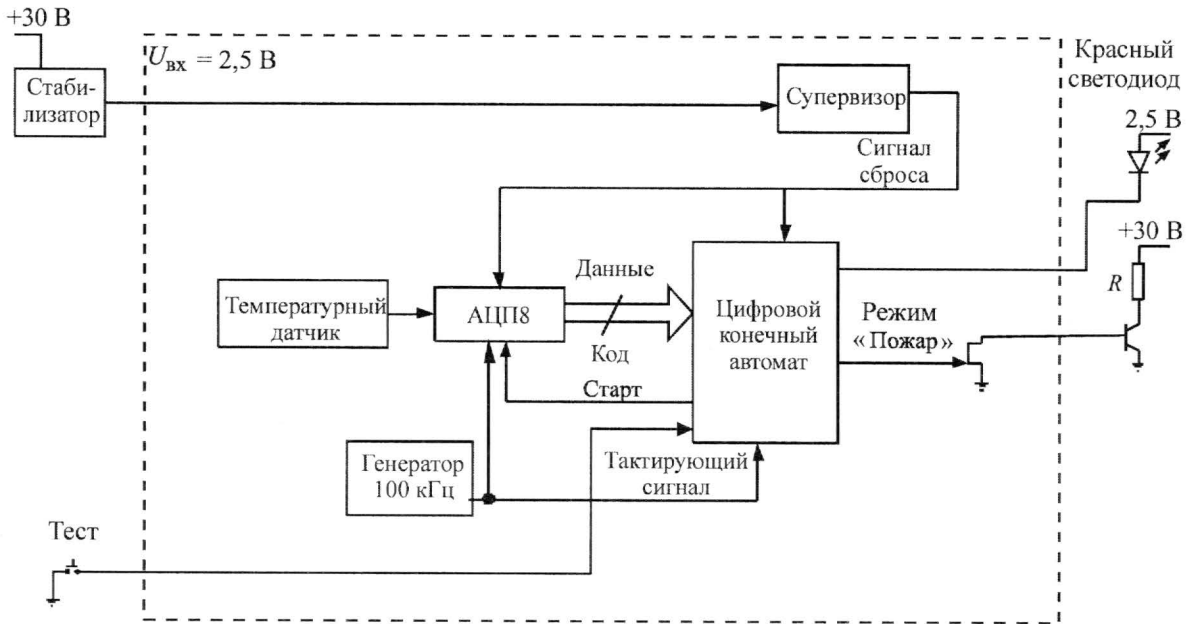
К.Е.Куликов, А.В.Совин

Московский государственный институт электронной техники
(технический университет)

Современный тепловой пожарный извещатель реагирует не только на превышение заданного порога температуры, но и на скорость нарастания температуры*. Все большее применение среди тепловых извещателей находят так называемые комбинированные, максимально-дифференциальные извещатели, которые реагируют и на заданный температурный порог, и на скорость повышения температуры. В таком извещателе реализован метод прямого измерения температуры и вычисления скорости ее увеличения, что обеспечивает высокую надежность срабатывания при отсутствии ложных тревог.

Предлагается интегрированное решение для теплового извещателя, которое представляет собой систему на кристалле (СНК), включающую в себя микроконтроллер (цифровой конечный автомат), температурный датчик и аналогово-цифровой преобразователь (АЦП) (рисунок). Микросхема выполнена по технологии 0,25 мкм. Разработанная микросхема для теплового пожарного извещателя имеет два режима работы: «Дежурный» и «Пожар».

* Шаровар Ф. Сравнительная оценка эффективности применения тепловых максимальных, дифференциальных и дымовых извещателей // Противопожарные и аварийно-спасательные средства. – 2006. – № 4.



Блок-схема микроконтроллера пожарного теплового максимально-дифференциального извещателя

Сигнал «Пожар» формируется через 3–8 с после начала увеличения температуры в помещении, что обеспечивает раннее предупреждение о возгорании. Извещатель активизируется при скорости повышения температуры 8 °С/мин либо при достижении пороговой температуры, равной 58 °С в случае медленного ее увеличения. В соответствии с требованиями раздела «Пожарные извещатели установок» СНиП 2.04.09-84 температура срабатывания максимально дифференциальных извещателей должна быть не менее чем на 20 °С выше допустимой температуры в помещении. Соответственно тепловой извещатель с пороговой температурой 58 °С может устанавливаться в помещениях, которые имеют допустимую температуру до 38 °С, т.е. наиболее оптимален для всех жилых, офисных, производственных и складских помещений.

В дежурном режиме микроконтроллер через каждые 5 с вырабатывает импульс длительностью порядка 50 мкс, который поступает на температурный датчик. С датчика снимается сигнал и попадает на АЦП микроконтроллера, где преобразуется в 8-разрядный цифровой код. Полученное значение температуры (цифровой код) анализируется (сравнивается с пороговым значением и вычисляется скорость изменения температуры). Если вычисленная скорость повышения температуры равна 8 °С/мин или температура достигает порогового значения 58 °С, для предотвращения ложных срабатываний микроконтроллер делает два дополнительных замера температуры с периодом 1 с, после чего, при подтверждении данных, переводит извещатель в режим «Пожар». При этом обеспечивается свечение оптического индикатора извещателя в непрерывном режиме и выдача сигнала на приборно-контрольную панель.

Извещатель находится в режиме «Пожар» и после снижения температуры. Возврат в режим «Дежурный» проводится кратковременным отключением напряжения питания.

Использование комбинированного (максимально-дифференциального) теплового пожарного извещателя с современными алгоритмами повышает вероятность своевременного обнаружения очага возгорания по сравнению с максимальным или дифференциальными пожарными извещателями, а интеграция всех блоков в одну микросхему позволяет уменьшить ее физические размеры, стоимость и энергопотребление конечного устройства.

Поступило
28 мая 2007 г.

Куликов Константин Евгеньевич – аспирант кафедры проектирования и конструирования интегральных микросхем (ПКИМС) МИЭТ. *Область научных интересов:* цифровая схемотехника, сетевые технологии, помехоустойчивое кодирование.

Совин Антон Валерьевич – аспирант кафедры ПКИМС МИЭТ. *Область научных интересов:* аналоговая схемотехника, сетевые технологии.

Дымовой пожарный извещатель

- алгоритм компенсации запыленности
- низкий ток потребления
- широкий температурный диапазон
- встроенная функция самодиагностики



всего лишь
ОДНА
микросхема

IC ЮНИКАЙСИЗ

Москва, Зеленоград
факс (495) 534-40-43
тел. (495) 535-09-81
www.uniqueics.ru

Контрактная разработка и производство микросхем

1 Реализация функциональных алгоритмов и электронных схем в кремнии на заказ.	3 Импортзамещение для компонентов, имеющих ограниченное использование в России.
2 Разработка эквивалента ПЛИС-макета на основе БМК до 500 000 вентилей	4 Замена дискретных компонентов интегральной схемой для уменьшения размеров и энергосбережения.

ЮБИЛЕИ

40 лет кафедре интегральной электроники и микросистем МИЭТ

В ноябре 2007 г. исполнилось 40 лет с момента создания кафедры интегральной электроники и микросистем факультета электроники и компьютерных технологий Московского государственного института электронной техники (технического университета).

Первоначально она называлась кафедрой интегральных полупроводниковых схем. Выдающийся вклад в организацию кафедры и становление ее научного потенциала внес первый заведующий д-р физ.-мат. наук, профессор, директор НИИ молекулярной электроники, в настоящее время академик РАН, научный руководитель Физико-технологического института РАН *Валиев К.А.* Им были разработаны методические основы подготовки высококвалифицированных специалистов в области микроэлектроники и организована работа кафедры по успешному их выпуску. Большой вклад в становление кафедры и организацию учебного процесса внес заместитель заведующего д-р техн. наук, профессор *Орликовский А.А.*, ныне академик РАН и директор Физико-

технологического института РАН. В 1981 г. заведующим кафедрой стал проректор по научной работе, затем ректор МИЭТ, д-р физ.-мат. наук, профессор *Вернер В.Д.* В эти годы под руководством *В.Д. Вернера* была проделана большая работа по созданию в МИЭТ принципиального нового структурного подразделения – Технологического центра, выросшего в крупную научно-техническую организацию, осуществляющую исследования и разработки в области микроэлектроники и микросистемной техники.

Современные тенденции развития микроэлектроники отражались на названии кафедры: в 1987 г. она была переименована в кафедру физики и технологии интегральных микросхем, а с 1998 г. называется кафедрой интегральной электроники и микросистем. В 1999 г. кафедру возглавил ректор МИЭТ, д-р техн. наук, профессор, в настоящее время член-корр. РАН *Чаплыгин Ю.А.*

В первый год образования на кафедре преподавали ведущие специалисты в области тех-



Кафедра ИПС, открытие учебной лаборатории 4201 (1972 г.). Стоят: *Вернер В.Д.*, *Валиев К.А.*, *Кармазинский А.Н.*, *Дейнеховская И.В.*, *Королев М.А.*, *Орлов Б.И.*, *Пашинцев Ю.И.*, *Сквира А.В.*, *Родионов Ю.П.*, *Иванов Н.Н.*, *Старосельский В.И.*, *Парменов Ю.А.*, *Глазов В.М.*, *Темнова Г.Е.*, *Ревелева М.А.*, *Титова И.Н.*, *Орликовский А.А.*; сидят: *Ракова Н.К.*, *Исакина С.Г.*, *Шустина Г.В.*, *Сымакова Л.Д.*

нологии и схемотехники интегральных схем, в том числе сотрудники одного из крупнейших предприятий того времени – НИИМЭ, кандидаты наук, руководители ведущих подразделений института, такие как *Голубев А.П., Баталов Б.В., Пашиинцев Ю.И.* В 1968 – 1972 гг. на кафедру пришли кандидаты наук, доценты *Родионов Ю.П., Ракова Н.К., Королев М.А., Мороча А.К., Парменов Ю.А., Ревелева М.А.,* ассистенты *Анфалова Е.С., Глазов В.М., Сквиря А.В., Подопригора Н.А.*

В настоящее время на кафедре работают 8 профессоров: *Чаплыгин Ю.А., Королев М.А., Старосельский В.И., Жигальский Г.П., Шевяков В.И., Путря М.Г., Парменов Ю.А., Крупкина Т.Ю.*; 5 доцентов: *Астахова Н.А., Балашиов А.Г., Красюков А.Ю., Лосев В.В., Миндеева А.А., Шишина Л.Ю.*; 2 старших преподавателя: *Карев А.В., Титова И.Н.*; 2 ассистента: *Артамонова Е.А., Козлов А.В.*

Научная и педагогическая деятельность сотрудников кафедры получила высокую оценку государства: *Валиев К.А.* – лауреат Ленинской премии, премии Совмина СССР в области науки и техники; *Чаплыгин Ю.А.* – лауреат премии Правительства РФ в области науки и техники и премии Президента РФ в области образования; *Вернер В.Д.* – лауреат премии Правительства РФ в области науки и техники, заслуженный деятель науки РФ; *Старосельский В.И.* – лауреат премии Правительства РФ в области науки и техники; *Королев М.А.* – заслуженный деятель науки РФ.

Выпускники кафедры возглавляют крупные организации и ведущие предприятия в отечественной микроэлектронике: д-р техн. наук, профессор *Шурчков И.О.* в 1991 – 1994 гг. возглавлял Государственный комитет по промышленной политике РФ; член-корр. РАН *Красников Г.Я.* – генеральный директор ОАО «НИИМЭ и з-д «Микрон»; д-р техн. наук, профессор *Васильев А.Г.* – генеральный директор ФГУП ГЗ «Пульсар»; В МИЭТ ведут большую учебно-методическую и научную работу д-р техн. наук, профессор *Сауров А.Н.* – директор ГУП НПК «Технологический центр» МИЭТ; д-р техн. наук *Беспалов В.А.* – проректор МИЭТ; профессор *Савченко Ю.В.* – декан факультета МП и ТК; профессор *Баринев В.В.,* профессор *Горбачевич А.А.* – заведующие кафедрами.

На кафедре созданы научные школы, которые в значительной мере способствовали развитию отечественной науки и техники по следующим направлениям:

- физика и технология элементов интегральных микросхем и микросистем;
- интегральная схемотехника и технология ИС на арсениде галлия;
- трехмерные интегральные схемы на основе КНИ-структур;
- интегральная схемотехника сверхбыстродействующих ЗУ;
- интеллектуальные мощные ИС;
- перспективная элементная база микро- и нанoeлектроники.

В рамках перечисленных направлений кафедра тесно сотрудничает с академическими институтами, такими как ФИРАН, ФТИ РАН, ИРЭ РАН ИППМ РАН и ведущими предприятиями электронной промышленности.

В результате успешной научно-педагогической деятельности научных школ на кафедре было подготовлено 27 докторов наук, более 100 кандидатов наук, а также получено свыше 200 патентов и авторских свидетельств на изобретение, часть из которых внедрена на предприятиях российской электронной промышленности. Основные научные результаты опубликованы более чем в 1000 научных работах.

Большую работу кафедра провела по созданию Института проектирования приборов и систем МИЭТ–Cadence – единственного в России комплексного учебного центра по подготовке магистров в области проектирования СБИС с использованием самого современного оборудования и программного обеспечения. Кафедра была инициатором и организатором Международного учебного центра приборно-технологического моделирования МИЭТ – Synopsys, на основе которого проводятся учебные занятия, готовятся курсовые и дипломные проекты, а также магистерские и кандидатские диссертации. Значительный вклад в успешное развитие международных образовательных проектов внесли заведующий кафедрой *Чаплыгин Ю.А.* и профессор *Королев М.А., Путря М.Г., Крупкина Т.Ю.,* доцент *Шишина Л.Ю.*

Поздравляем коллектив кафедры с юбилеем, желаем творческих достижений, успехов в благородном труде – подготовке кадров для отечественной науки и промышленности.

КОНФЕРЕНЦИИ. СЕМИНАРЫ

Научно-технический семинар

«Проектирование и верификация систем на кристалле/плате» (18 октября 2007 г., г. Москва, г. Зеленоград)

18 октября 2007 года в МИЭТ был проведен Научно-технический семинар по проектированию и верификации систем на кристалле/плате. Семинар организован в рамках Инновационной образовательной программы кафедрой микроэлектроники, компанией Mentor Graphics и ее официальным дистрибьютором Megrates на базе Центра проектирования «МИЭТ - Mentor Graphics».

На встрече с руководителями Mentor Graphics ректор МИЭТ Ю.А. Чаплыгин выразил удовлетворение взаимовыгодным сотрудничеством в области подготовки студентов по проектированию систем на кристалле/плате. Генеральный менеджер компании Mentor Graphics по Европе Daniel Le Boulbar, технический директор компании Benoit Gretere и исполнительный директор Представительства в России Лохов А.Л. высоко оценили деятельность вуза по развитию центра компании Mentor Graphics в МИЭТ и выразили уверенность в дальнейшем плодотворном сотрудничестве.

В работе семинара приняли участие более 100 специалистов, в том числе представители 12 научно-промышленных организаций г. Зеленограда: ОАО «НИИМЭ и завод Микрон», ОАО «Ангстрем», ФГУП «НИИ «Субмикрон»», ООО «Unique ICs», ОАО «Компонент», ЗАО НТЦ «ЭЛИНС», НИИ ТАП, ЗАО ПКК «МИЛАНДР», ГНЦ НПК «Технологический центр» МИЭТ, НИИФП, ФГУП НПК «СПУРТ», ЗАО «НИИМП-Т», а также аспиранты и студенты МИЭТ.

Компания Mentor Graphics является одним из мировых лидеров в области САПР электроники. Диапазон средств, предлагаемых Mentor Graphics, охватывает все основные этапы проектирования и верификации интегральных схем, печатных плат и систем - от концептуального уровня до подготовки производства изделий. Направления, в которых Mentor Graphics занимает одно из ведущих положений на мировом рынке, это системное и функциональное проектирование и верификация систем на кристалле/плате, повышение технологичности и выхода годных, постпроизводственное тестирование и диагностика.

На семинаре компания была представлена ведущими специалистами, которые сделали обзор текущего состояния по данным направлениям, проанализировали основные тенденции развития на ближайшее время. Особый интерес присутствовавших вызвало проектирование схем с наноразмерами элементов, которые могут обеспечить технологический прорыв для проектирования и изготовления элементов микросистемной техники. В заключительной части специалисты Mentor Graphics ответили на вопросы и приняли участие в дискуссии.



III Всероссийская научно-техническая конференция «Проблемы разработки перспективных микро- и нанoeлектронных систем – 2008» МЭС-2008



6–10 октября 2008 г., Московская обл., санаторий «Истра».

Организаторы:

Институт проблем проектирования в микроэлектронике РАН
(ИППМ РАН)

Московский государственный институт электронной техники
(технический университет)

ФГУП «Научно-исследовательский институт микроэлектронной
аппаратуры «Прогресс».

Тематика:

- Теоретические аспекты проектирования микро- и нанoeлектронных систем (МЭС)
- Методы и средства автоматизации проектирования микро- и нанoeлектронных схем и систем (САПР СБИС)
- Опыт разработки цифровых, аналоговых, цифро-аналоговых, радиотехнических функциональных блоков СБИС
- Системы на кристалле перспективной РЭА
- Выставка и презентация коммерческих продуктов
- Форум диссертационных работ

Область интересов конференции:

- Проектирование цифровых СБИС
- Проектирование аналоговых и радиотехнических функциональных блоков СБИС
- Проектирование СБИС со смешанными сигналами
- Методы структурного синтеза аналоговых, цифровых и смешанных СБИС и СФ блоков
- Системы на кристалле
- Наноразмерные схемы и системы
- Микромеханические системы
- Специализированные (стойкие к спецвоздействиям, фоточувствительные и т. п.) СБИС
- Фоточувствительные СБИС
- Методы цифровой обработки информации
- Методы высокоуровневого моделирования
- Методы логического синтеза и логического моделирования в САПР СБИС
- Методы электрического моделирования в САПР СБИС
- Методы аналогового и смешанного поведенческого моделирования
- Методы моделирования радиотехнических СБИС
- Методы генерации моделей для САПР СБИС
- Методы автоматизации топологического проектирования в САПР СБИС
- Методы приборно-технологического моделирования
- Методы моделирования межсоединений
- Методы проектирования и моделирования новых приборных структур и схем нанoeлектроники

Крайний срок приема докладов: 15 января 2008 года.

Рабочий язык конференции – русский.

Контакты:

124681 Москва, ул. Советская, д. 3, Институт проблем проектирования в микроэлектронике
РАН, Оргкомитет МЭС-2008 Борискин Вячеслав Степанович;

тел.: 8(499) 729-95-69;

факс: 8(499) 729-92-08;

E-mail: boriskin@ippm.ru

Сообщить о планируемых научных событиях можно по адресу info@elementy.ru.

Внимание: редакция «Элементов» не гарантирует публикацию присланной информации.

CONTENTS

Electron engineering materials

- N.A.Baldina, V.A.Goncharov, A.A.Tananykin* Impurity Inhomogeneities during Semiconductor Crystals Growth by Directed Crystallization under Microgravity 3

Microelectronic devices and systems

- A.M.Bobreshov, A.V.Dyboy, Y.Y.Razuvaev* Experimental Research of Ultrashort Pulses' Influence on Input Circuitry of Digital Electronic Elements 11
- E.B.Volodin, E.A.Ignatjeva, V.V.Uzdovskii* Modeling and Optimization of CMOS-Structure with One-Contact Photodetectors Vertically Integrated into It with Colors' Division of Visible Range 18
- D.A.Usanov, A.V.Skripal, A.V.Abramov, A.S.Bogolubov, V.S.Skvortsov, M.K.Merdanov* Use of Waveguide Phonic Structures for Measurements of Parameters of Nanometer Metal Layers on Dielectric Substrates 25

Circuit engineering and design

- K.O.Petrosjanc, P.A.Kozynko* Improved Electro-Thermal Simulation Subsystem for Mentor Graphics PCB Design System..... 33
- A.A.Krasin, S.U.Iguminova* Use of Substitution Circuits to Accelerate Simulation of Crystal Oscillators 39

Information technologies

- O.A.Karpov* Adaptive Joining of Separate Frames in Radars with Synthesized Antenna Aperture under Conditions of Surveillance Complex Kinds..... 48
- R.N.Akinshin* Evaluation of Choosing Information Protection Means in Ambiguity Conditions 59

University education problems

- S.A.Lupin, T.V.Milechina* Method of Making a Decision on Problem of Drawing up Timetable, Oriented at Cluster Computing Systems 63

Brief reports

- L.P.Mileshko* Features of Kinetics of Spinning Silicon Plates' Anode Oxidation in Doping Electrolytes 70
- S.P.Timoshenkov, V.V.Anufrienko, Myo Hein Zaw* Peculiarities of Forming Photoresist Films on Non-Circular Substrates..... 71
- V.A.Sergeev, A.A.Shirokov* Dependencies of Temperature Coefficient of Forward Voltage on Heterojunction Light Emitting Diode on Current and Temperature 74
- D.V.Loktev, D.V.Zinoviev* Reduction of Turbulent Gas Flow in Microchannels 77
- A.S.Kluchnikov* Numerical Modeling and DMOSFET Power Area Optimization 79
- S.B.Pod'yipolsky* MIC Quality Assurance and Manufacturing Quality Control Requirements under Conditions of Foundries..... 81
- K.E.Kulikov, A.V.Sovin* System on Chip for Thermal Fire Alarm Box..... 82

ABSTRACTS

ELECTRON ENGINEERING MATERIALS

Impurity Inhomogeneities during Semiconductor Crystals Growth by Directed Crystallization under Microgravity

N.A.Baldina, V.A.Goncharov, A.A.Tananykin

The results of the semiconductor crystals growth under microgravity have been analyzed. The Stephen problem for Bridgman technique has been numerically solved. A new physical mechanism – the dependence of the radial impurity inhomogeneity upon the crystal growth velocity – has been revealed.

MICROELECTRONIC DEVICES AND SYSTEMS

Experimental Research of Ultrashort Pulses' Influence on Input Circuitry of Digital Electronic Elements

A.M.Bobreshov, A.V.Dyboy, Y.Y.Razuvaev

The scheme of the experiment and the automated measuring equipment for the research of the ultrashort pulses' influence on the basic elements of digital electronics has been proposed. It has been shown that the ultrashort pulses' influence on the inputs of such elements can lead to their switching and be a cause of the logical failures in digital appliances. The experimental results testify the existence of a mechanism of the semiconductor structures' temporal degradation. Such phenomena make a considerable contribution into the development of the processes, which lead to logical failures.

Modeling and Optimization of CMOS-Structure with One-Contact Photodetectors Vertically Integrated into It with Colors' Division of Visible Range

E.B.Volodin, E.A.Ignatjeva, V.V.Uzdovskii

The results of modeling vertically integrated into CMOS structure of minimal size photodetector cells with vertical colors' division of (R, G, B) of visible range have been presented. Each cell has one contact and because of the area deficiency along with the ROIC transistors and partially under them is located in the IR range backlashes.

Use of Waveguide Phonic Structures for Measurements of Parameters of Nanometer Metal Layers on Dielectric Substrates

D.A.Usanov, A.V.Skripal, A.V.Abramov, A.S.Bogolubov, V.S.Skvortsov, M.K.Merdanov

The results of the study on the possibility of using the waveguide photogenic structures for measurements of the parameters of nanometer metal layers on dielectric substrates have been presented. It has been shown that by selecting the parameters of the photogenic structure and the frequency of probing radiation in the range of the «window» of transparency due to irregularity in the photogenic structure as a result of different thickness or permittivity of one of its layers, one can tune the range of values to be measured of the metal layer thickness from 1 to 3000 nm.

CIRCUIT ENGINEERING AND DESIGN

Improved Electro-Thermal Simulation Subsystem for Mentor Graphics PCB Design System

K.O.Petrosjanc, P.A.Kozynko

The automatic electro-thermal simulation has been implemented in Mentor Graphics PCB Design Flow. New program-dispatcher TransPower has been developed to control the electro-thermal calculation process, combining the programs of the electric (Analog Designer) and thermal (BETAsoft) simulation into a single cycle. As a result, the labor consumption and the PCB electro-thermal simulation time have been significantly reduced, the accuracy and reliability of calculations have been improved and the human errors have been eliminated.

Use of Substitution Circuits to Accelerate Simulation of Crystal Oscillators

A.A.Krasin, S.U.Iguminova

A method of accelerated simulation of transient processes using the well-known electric circuit simulators (Spice, Spectre) has been described. The acceleration is achieved due to transformation of the oscillator circuit to an equivalent electric circuit, in which voltages and currents represent the envelopes of respective high frequency oscillations in the basic circuit and the high frequency oscillations themselves are absent.

INFORMATION TECHNOLOGIES

Adaptive Joining of Separate Frames in Radars with Synthesized Antenna Aperture under Conditions of Surveillance Complex Kinds

O.A.Karpov

The problem of joining separate frames of the radar-tracking image into a uniform radar-tracking map, which arises in the aircraft and space Synthetic Aperture Radar (SAR) under conditions of the earth surface surveillance complex kinds, has been considered. The algorithm of adaptive joining separate frames has been described, and the results of real signal processing using this algorithm have been presented.

Evaluation of Choosing Information Protection Means in Ambiguity Conditions

R.N.Akinshin

The systematic apparatus for constructing the integral evaluations of variants for creating the protection means complex and for choosing the most rational of them under the ambiguity conditions has been proposed.

UNIVERSITY EDUCATION PROBLEMS

Method of Making a Decision on Problem of Drawing up Timetable, Oriented at Cluster Computing Systems

S.A.Lupin, T.V.Milechina

The method of making a decision on a problem of drawing up the schedule of employment in the institute has been offered. The method is oriented at parallel computing systems and assumes the replacement of the optimality vector criterion by the scalar one.

BRIEF REPORTS

Features of Kinetics of Spinning Silicon Plates' Anode Oxidation in Doping Electrolytes

L.P.Mileshko

It has been determined that the process of forming the silicon phosphate and borate anode oxide films is indifferent to the mass transfer of the doping component anions in the electrolytes based on ethylene glycol during the silicon plates' spinning up to 30 revolutions per second.

Peculiarities of Forming Photoresist Films on Non-Circular Substrates

S.P.Timoshenkov, V.V.Anufrienko, Myo Hein Zaw

Some data on the investigation of ripple areas, arising in the corners of non-circular substrates during spin coating photoresist films and other polymer coverings upon them, have been presented. Based on the results of the data processing and the analysis of investigations a physical and mathematical models, which permit to take into account the technological parameters affecting the coating non-uniformity and to determine the shape and the area of characteristic ripple regions, formed on the non-circular substrates while spin coating polymer films from solutions upon them, have been proposed.

Dependencies of Temperature Coefficient of Forward Voltage on Heterojunction Light Emitting Diode on Current and Temperature

V.A.Sergeev, A.A.Shirokov

The results of measuring the forward voltage coefficient (TVC) of three types of the heterojunction light emitting diodes, batch-produced by Vishey Semiconductors, have been presented: the red one based on the AlInGaP/GaAs structures, the green and blue ones – based on the InGaN/SiC structures, within 0-90 °C temperature range and 0.1-10 mA current range, have been presented. It has been determined that on the temperature dependencies TCV of red LED the maximum in the 40-60 °C range steadily develops, TVC of green LED decreases up to 70-80 °C temperature and further increases, and that one of blue LED is practically unaltered in the set range of temperature, besides, TVC of red LED is decreasing and TVC of green and blue ones is increasing in the superlinear proportion to the current increase. The obtained dependencies are explained by the temperature dependencies of the prevailing component of the LED's forward current.

Reduction of Turbulent Gas Flow in Microchannels

D.V.Loktev, D.V.Zinoviev

The model of thermal conductivity of the microheater high gradient boundary layer has been presented. The practically efficient effect - thermal laminarization of flows in the gas distribution system channels - has been discovered. The advantages of the new laminarization method versus the well-known ones have been shown on an example of the point source microheater.

Numerical Modeling and DMOSFET Power Area Optimization

A.S.Kluchnikov

DMOSFET with the given electrical parameters and the minimal area has been designed. For this structure analysis the process and device simulation software has been used.

MIC Quality Assurance and Manufacturing Quality Control Requirements under Conditions of Foundries

S.B.Pod'yipolsky

The MIC active quality assurance procedure has been analyzed. It has been shown that the main feature of creating state-of-the art VHSIC is clean fabless and foundry producing custom-built chips.

System on Chip for Thermal Fire Alarm Box

K.E.Kulikov, A.V.Sovin

The integrated solution of thermal maximum-differential fire alarm box, representing the system on chip (SoC) with a microcontroller (digital finite state machine), a temperature sensor and an analog-digital converter (ADC), has been presented. The principle of operation of the microchip for the thermal maximum-differential fire alarm box has been considered.

Тематический указатель статей, опубликованных в 2007 году

Материалы электронной техники

- Балдина Н.А., Гончаров В.А., Тананыкин А.А.** Неоднородность примеси в полупроводниковых кристаллах, выращенных в космических условиях методами направленной кристаллизации. № 6, с. 3.
- Бобринецкий И.И., Кукин В.Н., Неволин В.К., Симунин М.М.** Исследование углеродного наноматериала методами атомно-силовой и электронной микроскопии. № 4, с. 3.
- Буддуган А.А., Гаврилов С.А., Громов Д.Г., Редичев Е.Н., Чулков И.С.** Феноменологическое описание процесса диспергирования на капли тонких пленок кремния толщиной 8–60 нм на инертной поверхности Al_2O_3 . № 2, с. 21.
- Ильяшева Е.В.** Исследование физико-химических свойств стекловидных материалов системы $\text{SrO}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{B}_2\text{O}_3$. № 2, с. 16.
- Максимов С.К., Максимов К.С.** Фаза La_2CaF_8 со структурой, производной от LaF_3 , и проблема структурной организации нестехиометрических фаз. № 3, с. 3.
- Малиюков С.П., Стефанович В.А., Чередниченко Д.И.** Исследование модели самосогласованного роста монокристаллов сапфира по методу горизонтальной направленной кристаллизации. № 2, с. 3.
- Милешко Л.П.** Механизмы формирования легированного фосфором или бором анодного SiO_2 на карбиде кремния. № 2, с. 10.
- Милешко Л.П.** Механизм электрохимического формирования SiO_2 из структур $\text{Si}_3\text{N}_4-\text{Si}$. № 1, с. 3.
- Морозова Н.К., Мидерос Д.А.** Влияние Te на самоактивированное свечение ZnSe . № 3, с. 12.
- Поголов А.И., Грушевский А.М., Блинов Г.А., Жуков П.А.** Исследование напряженно-деформированного состояния материалов гибких шлейфов. № 5, с. 13.
- Рощин В.М., Яковлев В.Б., Силибин М.В., Ловягина М.С.** Исследование свойств наноразмерных пленок титаната-цирконата свинца. № 5, с. 3.
- Чаплыгин А.Н., Спириг Е.А., Сизов А.С.** Влияние технологии обработки поверхности многокомпонентных оксидных соединений со структурой силленита на кинетику электронных переходов в приповерхностных областях. № 5, с. 8.
- Шерченков А.А., Апальков А.Б.** Распределение зарядовых состояний в щели подвижности $\alpha\text{-Si:H}$. № 4, с. 7.

Технология микроэлектроники

- Антонов Ю.Н.** Применение нечетких моделей данных для регулирования технологического процесса изготовления плат гибридных интегральных схем. № 2, с. 29.
- Барабан А.П., Петров Ю.В.** Зарядовое состояние центров люминесценции в структурах $\text{Si}-\text{SiO}_2$, подвергнутых последовательной имплантации ионами кремния и углерода. № 3, с. 18.
- Белов А.Н.** Локальное травление кремния с использованием твердой маски на основе пористого оксида алюминия. № 1, с. 11.
- Белоусов С.С., Гаврилов С.А., Громов Д.Г., Редичев Е.Н., Чулков И.С.** Исследование и моделирование температуры плавления малоразмерных систем. № 1, с. 15.

Микроэлектронные приборы и системы

- Бобрешов А.М., Аверина Л.И., Хрипушин А.В., Макаренко Д.А.** Изменение собственного шума усилителя на биполярном транзисторе с гетеропереходом в нелинейном режиме. № 4, с. 15.
- Бобрешов А.М., Дыбой А.В., Разуваев Ю.Ю.** Экспериментальные исследования возникновения логических сбоев в базовых элементах цифровой электроники при воздействии субнаносекундных видеоимпульсов. № 6, с. 11.
- Володин Е.Б., Игнатьева Е.А., Уздовский В.В.** Моделирование интеграции ИК-фотоприемников и КМОП-мультиплексора. № 1, с. 28.
- Володин Е.Б., Игнатьева Е.А., Уздовский В.В.** Двумерное моделирование субмикронных МОП-транзисторов в охлаждаемых ИК-фотоприемниках. № 4, с. 21.
- Володин Е.Б., Игнатьева Е.А., Уздовский В.В.** Моделирование и оптимизация КМОП-структуры с вертикально интегрированными в нее одноконтактными фотодетекторами с разделением цветов видимого спектрального диапазона. № 6, с. 18.
- Грушко Н.С., Лакалин А.В., Сомов А.И.** Определение механизма токопереноса в p - n -переходах по анализу температурной зависимости прямых вольт-амперных характеристик. № 2, с. 35.
- Кузнецов Г.В., Белозерцев А.В.** Поля температур поверхности кристалла мощного биполярного транзистора. № 1, с. 22.
- Лугин А.Н., Оземша М.М.** Электрические характеристики контактного узла тонкопленочных резисторов. № 2, с. 41.
- Малышев В.А., Михайлов Н.А.** Учет влияния шума спонтанного излучения в модели устойчивости стационарной генерации полупроводниковых инжекционных лазеров. № 5, с. 18.
- Мамедов А.К.** Аппроксимации температурно-частотных характеристик контактов металл-полупроводник с барьером Шоттки. № 1, с. 36.
- Падеров В.П., Никитанов С.В.** Влияние параметров канала полевого транзистора на характеристики интегральной микросхемы истокового повторителя. № 3, с. 30.
- Усанов Д.А., Скрипаль А.В., Абрамов А.В., Боголюбов А.С., Скворцов В.С., Мерданов М.К.** Использование волноводных фотонных структур для измерения параметров нанометровых металлических слоев на изолирующих подложках. № 6, с. 25.
- Чаплыгин Ю.А., Галушков А.И., Семёнов А.А., Усанов Д.А.** Магнитоуправляемый двухплюсник с отрицательным дифференциальным сопротивлением и ВАХ N -типа. № 3, с. 23.

Схемотехника и проектирование

- Булах Д.А.** Использование языка Verilog-A в современных схемотехнических САПР. № 1, с. 55.
- Иванов В.В.** Методы логической и схемотехнической организации псевдокомплементарной логики. № 4, с. 7.
- Красин А.А., Изуминова С.Ю.** Использование схемы замещения для ускорения моделирования кварцевых генераторов. № 6, с. 39.
- Круглов Ю.В., Симонов И.С., Германов В.А.** Комбинированный метод моделирования сложных дискретных схем. № 1, с. 41.
- Лобская И.В.** Формализация задачи построения центроидных структур в прецизионных аналоговых микросхемах. № 1, с. 49.
- Малинаускас К.К.** Специальная диаграмма Вороного для построения графа ограничений в задачах топологического проектирования СБИС. № 3, с. 36.

Мосин С.Г. Анализ методов тестопригодного проектирования аналоговых и смешанных ИС. № 1, с. 59.

Мосин С.Г. Анализ методов встроенного самотестирования аналоговых и смешанных интегральных схем. № 2, с. 85.

Петросянц К.О., Козылко П.А. Усовершенствованная подсистема электротеплового моделирования систем на печатных платах в САПР Mentor Graphics. № 6, с. 33.

Соловьев Р.А., Глебов А.Л., Гаврилов С.В. Обнаружение ложных путей в цифровых схемах на основе логических импликаций. № 2, с. 78.

Стемпковский А.Л., Гаврилов С.В., Глебов А.Л., Егоров Ю.Б. Методы многоуровневого анализа быстродействия цифровых КМОП СБИС. № 4, с. 28.

Микросистемы

Зотов С.А. Анализ динамики чувствительных элементов микромеханического гироскопа LL-типа. № 2, с. 91.

Зотов С.А. Анализ влияния анизотропных свойств материала на собственные частоты кольцевых резонаторов микромеханических гироскопов. № 5, с. 30.

Тимошенков С.П., Зотов С.А., Калугин В.В., Рубчиц В.Г., Захаров А.А. Реле на основе МЭМС с электростатическим принципом управления. № 4, с. 44.

Тимошенков С.П., Бойко А.Н., Симонов Б.М. Методика оценки параметров чувствительных элементов микроакселерометров и микрозеркал. № 5, с. 23.

Тутов Е.А. МОП-структуры с аморфным триоксидом вольфрама для емкостных сенсоров влажности. № 5, с. 36.

Микропроцессорная техника

Агафонов Ю.М., Акиншин Н.С., Акиншин Р.Н., Анкудинов К.А., Анкудинов А.И., Казаков К.Ю. Применение микроконтроллеров для синтеза цифровых конечных автоматов. № 5, с. 40.

Информационные технологии

Акиншин Р.Н. Оценка подходов к выбору средств защиты информации в условиях неопределенности. № 6, с. 59.

Беляев С.В. Развитие цифровых последовательных интерфейсов. № 2, с. 68.

Гагарина Л.Г., Кокорева Е.В. Пакет программ для анализа вероятностно-временных характеристик сетей GPRS. № 4, с. 58.

Епишин Ю.В. Алгоритм проверки с помощью графа линейной модели на устойчивость. № 5, с. 53.

Игнатова И.Г., Шевнина Ю.С. Метод формирования целевых Web-интерфейсов для работы с информационными ресурсами. № 4, с. 65.

Карпов О.А. Адаптивная стыковка парциальных кадров в радиолокаторах с синтезированной апертурой при сложных видах обзора. № 6, с. 48.

Колдаев В.Д. Эвристические алгоритмы контурной сегментации изображений. № 4, с. 71.

Лихачев А.С., Лупин С.А. Оценка качества речепреобразования в низкоскоростных вокодерах на этапах проектирования. № 5, с. 45.

Назаров Л.Е., Головкин И.В. Итеративный посимвольный прием ансамблей сигналов на основе низкоплотностных кодов. № 3, с. 43.

Погибельский Д.А., Никитов С.А. Применение генетических алгоритмов для оптимизации структуры мета-данных Java-приложения. № 5, с. 59.

Сокол А.В. Выбор показателя для оценки уровня интермодуляционных искажений в оптико-электронных системах космических аппаратов дистанционного зондирования Земли. № 3, с. 55.

Сотников А.В., Туркин А.В. Система биометрической идентификации по локальным особенностям отпечатков пальцев. № 2, с. 60.

Портнов Е.М., Пономарев Д.А. Математическая модель системы управления квазистационарными логистическими потоками. № 4, с. 51.

Чобану М.К. Синтез многоскоростных систем с помощью методов компьютерной алгебры. № 2, с. 50.

Юрченко Д.Б. Распределение объектов автоматизации в системах локального сбора информации. № 3, с. 50.

Янчук Е.Е. Анализ возможности повышения достоверности телесигнализации в радиорелейных линиях связи. № 1, с. 65.

Биомедицинская электроника

Новикова Н.М., Будко В.Н. Модель восприятия символьной информации человеком-оператором с экрана дисплея. № 4, с. 76.

Терещенко С.А., Маслобоев Ю.П., Долгушин С.А., Гавриков А.И. Экспериментальное исследование временных распределений коротких лазерных импульсов после прохождения однородного слоя сильно рассеивающей биологической среды. № 1, с. 72.

Проблемы высшего образования

Гагарина Л.Г., Баркова А.И. Проблемы ИТ-подготовки специалистов непрофильных специальностей на примере специальности 080801 «Прикладная информатика в экономике». № 3, с. 62.

Лисов О.И., Гриненко Н.С., Ко Ко Аунг Вариативное управление актуализацией знаний в учебном процессе. № 5, с. 65.

Лупин С.А., Милехина Т.В. Метод решения задачи составления расписания, ориентированный на кластерные вычислительные системы. № 6, с. 63.

Попова Т.В. Организация кураторской работы на факультете. № 3, с. 66.

Чжо Чжо Кхаин Программный комплекс актуализации знаний при изучении методов технической диагностики. № 5, с. 74.

Краткие сообщения

Алюшин М.В., Мьо Ньунт Вин Особенности моделирования узлов ФЭУ для исследования гамма-камеры в системе OrCAD. № 3, с. 77.

Алюшин М.В., Мьят Вин Тун Моделирование аналоговых узлов PET-сканера в системе OrCAD. № 3, с. 79.

Алюшин М.В., Мьо Ти Ха Многоканальный усилитель для 2D и 3D микрофонных решеток. № 4, с. 91.

- Аунг Мьинт Эй, Пронин А.А., Кондратов А.В.* Экспериментальное исследование затухания радиоволн внутри помещений на частоте 433 МГц. № 5, с. 86.
- Бобринецкий И.И., Суханов В.Н.* Катодно-плазменная металлизация тканых материалов. № 3, с. 73.
- Бойченко О.Л.* Особенности проектирования системы безопасности объекта. № 4, с. 87.
- Галушков А.И., Годовицын И.В., Сауров А.Н., Красноборожье С.Ю., Шевяков В.И.* Исследование сложнопрофильных микрообъектов методами атомной силовой микроскопии. № 1, с. 83.
- Герасименко Н.Н., Апрелов С.А., Тарасенков А.Н., Калинин С.В., Турьянский А.Г., Пиришин И.В.* Рентгеновская рефлектометрия кремния, имплантированного фтором. № 3, с. 70.
- Горлов М.И., Козьяков Н.Н., Смирнов Д.Ю.* Диагностика надежности ИС по НЧ-шуму с использованием термоциклирования. № 4, с. 89.
- Громов Д.Г., Жигальский Г.П., Карев А.В., Карев И.А., Чулков И.С.* Исследование нелинейности вольт-амперных характеристик тонких пленок меди и никеля импульсным методом. № 5, с. 84.
- Гуреев А.В., Шахворостов Д.Ю.* Влияние технологических факторов на спектр пьезоэлектрического резонатора. № 3, с. 75.
- Дубовой Н.Д., Демкин В.И., Со Лин Аунг* Система управления соотношением скоростей двухкоординатного шагового привода. № 5, с. 90.
- Дубовой Н.Д., Тарасова Г.И., Тун Мин Наинг, Вин Мьинт Зо* Параметрическая оптимизация системы автоматического регулирования термическим объектом при изодромном управлении. № 4, с. 85.
- Жигальский Г.П., Карев И.А., Гваськов А.А., Рудаков Г.А.* Шум вида $1/f$ в МОП-транзисторах с разным типом проводимости канала при температурах 300 и 77 К. № 3, с. 81.
- Зайнабидинов С., Назыров Д.Э.* Исследование диффузии лантана в кремнии. № 1, с. 87.
- Локтев Д.В., Зиновьев Д.В.* Снижение турбулентности газового потока в микроканалах. № 6, с. 77.
- Крекотень Ф.В.* Оперативно перестраиваемая система функционального контроля СБИС. № 1, с. 81.
- Ключников А.С.* Численное моделирование и оптимизация площади мощного ДМОП-транзистора. № 6, с. 79.
- Куликов К.Е., Совин А.В.* Система на кристалле для теплового пожарного извещателя. № 6, с. 82.
- Милешко Л.П.* Особенности процессов гальваностатического анодирования алюминия, кремния и пленок нитрида кремния. № 5, с. 88.
- Милешко Л.П.* Особенности кинетики анодного окисления вращающихся кремниевых пластин в легирующих электролитах. № 6, с. 70.
- Пашинкин А.С., Малкова А.С., Михайлова М.С.* Теплоемкость твердого теллурида висмута. № 5, с. 80.
- Подъяпольский С.Б.* Требования к системе обеспечения и контроля качества изготовления ИМС в условиях кремниевых фабрик. № 6, с. 81.
- Сергеев В.А., Широков А.А.* Зависимости температурного коэффициента прямого напряжения на гетеропереходных светодиодах от тока и температуры. № 6, с. 74.
- Тимошенков С.П., Зотов С.А.* Состояние разработки микроакселерометров серии АРК. № 1, с. 85.
- Тимошенков С.П., Ануфриенко В.В., Мьо Хейн Зо* Особенности формирования фоторезистивных пленок на подложках некруглой формы. № 6, с. 71.
- Фархшатов Р.Х.* Виртуальная файловая система как метапротокол для организации взаимодействия приложений. № 5, с. 82.

Юбилей

Вернеру Виталию Дмитриевичу – 75 лет. № 1, с. 90

40 лет кафедре интегральной электроники и микросистем МИЭТ. № 6, с. 85.

Конференции. Семинары. Выставки

14-я Всероссийская межвузовская научно-техническая конференция студентов и аспирантов «Микроэлектроника и информатика – 2007». № 1, 4-я стр. обложки.

15-я Всероссийская межвузовская научно-техническая конференция студентов и аспирантов «Микроэлектроника и информатика – 2008». № 6, 3-я стр. обложки

III Всероссийская научно-техническая конференция «Проблемы разработки перспективных микро- и наноэлектронных систем - 2008». № 6, с. 87.

XIII Московская промышленная выставка. № 5, с. 93.

Вернер В.Д., Сауров А.Н. Компоненты, системы и их применение (выставка «Электроника – 2006», г. Мюнхен). № 3, с. 83.

Вторая Международная научно-техническая конференция «Информационные технологии в науке, технике и образовании». № 1, с. 92.

Научно-технический семинар «Проектирование и верификация систем на кристалле/плате» (18 октября 2007 г., г. Москва, г. Зеленоград). № 6, с. 88.

Об итогах 14-й Всероссийской межвузовской научно-технической конференции «Микроэлектроника и информатика – 2007». № 3, с. 89.

Юбилейная Международная научно-техническая конференция «50 лет модулярной арифметике». № 1, с. 93.

Памяти Преснухина Леонида Николаевича. № 4, с. 94.

К СВЕДЕНИЮ АВТОРОВ

(Правила оформления рукописей действуют с 1 января 2007 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 на официальном бланке, 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, l – эль, v – ню, u – ипсилон, ε – эпсилон;
- русские буквы помечаются снизу знаком $_$, а латинские \sim ;
- 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, не вставляя в MS Word. Допускаются полутонные рисунки (фотографии) в формате TIFF (без компрессии);

2. Черной тушью на белой бумаге (или кальке) или представлены в виде качественных черно-белых фотографий на матовой бумаге (предпочтительно формат 9х12 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».

Подрисуночные 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>

15-я Всероссийская межвузовская научно-техническая конференция студентов и аспирантов «Микроэлектроника и информатика - 2008»

Московский государственный институт электронной техники (технический университет) проводит **23–25 апреля 2008 года 15-ю Всероссийскую межвузовскую научно-техническую конференцию студентов и аспирантов «Микроэлектроника и информатика - 2008».**

Оргкомитет приглашает молодых исследователей принять участие в работе конференции.

Цели конференции: подготовка кадров высшей квалификации, развитие научно-технического творчества аспирантов и студентов, ознакомление научной общественности с результатами исследований молодых ученых.

Научные направления работы конференции (по секциям):

1. Нанотехнологии в электронике.
2. Материалы микро-, опто- и наноэлектроники.
3. Проектирование и технология электронных компонентов.
4. Микро- и наносистемная техника.
5. Опто- и акустоэлектроника.
6. Математические модели и алгоритмы в информатике.
7. Автоматизированные информационные системы.
8. Информационно-управляющие и вычислительные системы и приборы.
9. Телекоммуникационные системы и связь.
10. Биомедицинская электроника.
11. Экологические аспекты микро- и наноэлектроники.
12. Менеджмент и маркетинг наукоемких производств.

Форма участия в работе конференции — выступление с секционным докладом. Продолжительность доклада — 10 мин.

По итогам работы секций будет проводиться конкурс работ, авторами которых являются **только студенты и/или аспиранты**. Лучшие работы будут отмечены дипломами лауреатов.

Один автор (или в соавторстве) может подать только один доклад.

Ответственный секретарь Оргкомитета — Харац Валентина Павловна.

Адрес Оргкомитета: 124498, Москва, г. Зеленоград, проезд 4806, д. 5, МИЭТ, ОНТИ, на конференцию «МЭИнф-2008».

Тел. (495) 532-98-30

e-mail: id@rnd.miee.ru (тезисы и доклады принимаются по e-mail до 20 февраля 2008 г.)