

Известия высших учебных заведений

ЭЛЕКТРОНИКА 3'2007



Научно-технический журнал

Издается с 1996 г.

Выходит 6 раз в год

СОДЕРЖАНИЕ

Материалы электронной техники

Максимов С.К., Максимов К.С. Фаза La_2CaF_8 со структурой, производной от LaF_3 , и проблема структурной организации нестехиометрических фаз 3

Морозова Н.К., Мидерос Д.А. Влияние Te на самоактивированное свечение ZnSe 12

Технология микроэлектроники

Барабан А.П., Петров Ю.В. Зарядовое состояние центров люминесценции в структурах Si-SiO_2 , подвергнутых последовательной имплантации ионами кремния и углерода 18

Микроэлектронные приборы и системы

Чаплыгин Ю.А., Галушков А.И., Семёнов А.А., Усанов Д.А. Магнитоуправляемый двухполюсник с отрицательным дифференциальным сопротивлением и ВАХ N -типа 23

Падеров В.П., Никитанов С.В. Влияние параметров канала полевого транзистора на характеристики интегральной микросхемы истокового повторителя ... 30

Схемотехника и проектирование

Малинаускас К.К. Специальная диаграмма Вороного для построения графа ограничений в задачах топологического проектирования СБИС 36

Учредители:

Министерство
образования и науки
Российской Федерации

Московский
государственный институт
электронной техники
(технический университет)

Главный редактор
В.Д.Вернер

Редакционная коллегия:

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

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

Информационные технологии

Назаров Л.Е., Головкин И.В. Итеративный посимвольный прием ансамблей сигналов на основе низкоплотных кодов 43

Юрченко Д.Б. Распределение объектов автоматизации в системах локального сбора информации 50

Сокол А.В. Выбор показателя для оценки уровня интермодуляционных искажений в оптико-электронных системах космических аппаратов дистанционного зондирования Земли 55

Проблемы высшего образования

Гагарина Л.Г., Баркова А.И. Проблемы ИТ-подготовки специалистов непрофильных специальностей на примере специальности 080801 «Прикладная информатика в экономике» 62

Попова Т.В. Организация кураторской работы на факультете 66

Краткие сообщения

Герасименко Н.Н., Апрелов С.А., Тарасенков А.Н., Калинин С.В., Турьянский А.Г., Пиришин И.В. Рентгеновская рефлектометрия кремния, имплантированного фтором 70

Бобринецкий И.И., Суханов В.Н. Катодно-плазменная металлизация тканых материалов 73

Гуреев А.В., Шахворостов Д.Ю. Влияние технологических факторов на спектр пьезоэлектрического резонатора 75

Алюшин М.В., Мью Ньют Вин Особенности моделирования узлов ФЭУ для исследования гамма-камеры в системе OrCAD 77

Алюшин М.В., Мьят Вин Тун Моделирование аналоговых узлов РЕТ-сканера в системе OrCAD 79

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 81

Конференции. Выставки

Вернер В.Д., Сауров А.Н. Компоненты, системы и их применение (выставка «Электроника – 2006», г. Мюнхен) 83

Об итогах 14-й Всероссийской межвузовской научно-технической конференции «Микроэлектроника и информатика – 2007» 89

Contents 94

Abstracts 95

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 31.05.07
Формат бумаги 60x84 1/8.
Печать офсетная.
Объем 11,6 усл.печ.л.,
10,4 уч.-изд.л.
Заказ № 54.

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.

МАТЕРИАЛЫ ЭЛЕКТРОННОЙ ТЕХНИКИ

УДК 539.27:546.161:620.785.78

Фаза La_2CaF_8 со структурой, производной от LaF_3 , и проблема структурной организации нестехиометрических фаз

С.К.Максимов, К.С.Максимов

Московский государственный институт электронной техники
(технический университет)

Исследованы закономерности двойникования в нестехиометрической фазе $\text{La}_{1-y}\text{Ca}_y\text{F}_{3-y}$ со структурой, производной от структуры LaF_3 . Для этой фазы наряду с особенностями дифракции, свидетельствующими о двойниковании по плоскостям (001) и $\{\bar{1}20\}$, стандартным для тисонита, выявлены особенности, свидетельствующие о двойниковании по плоскостям $\{\bar{1}\bar{1}0\}$ и $\{\bar{1}\bar{1}2\}$. Необычные двойники объяснены как границы доменов упорядочения с противоположными направлениями чередования ионов Ca^{2+} и La^{3+} . Показано, что доменная структура является общей закономерностью структурной организации нестехиометрических фаз и эту особенность строения необходимо учитывать при объяснении их физических и механических свойств.

Нестехиометрические соединения (оксиды, сульфиды, фториды и пр.) являются перспективными материалами для решения многих технических проблем, в частности в твердотельной электронике [1–4]. Уникальные свойства этих соединений обусловлены их природой: они формируются в результате неизоэлектронного замещения, например $\text{Ca}_{1-x}\text{La}_x\text{F}_{2+x}$ формируется на основе CaF_2 при замещении двухвалентного иона Ca^{2+} трехвалентным ионом La^{3+} . Подобное замещение связано с нарушением электронейтральности, которая восстанавливается в результате появления в их структуре точечных дефектов: вакансий или межузельных атомов. В нестехиометрических соединениях точечные дефекты являются такими же структурообразующими элементами, как ионы формирующих их соединений. Зонная структура нестехиометрических соединений определяется высочайшей плотностью этих несовершенств, и при изменениях состава формируются материалы с разными характеристиками – от диэлектриков до проводников.

Равновесные структуры нестехиометрических фаз во многом определяются минимизацией деформационной компоненты свободной энергии, которая обеспечивается упорядочением в подрешетках компонентов и точечных дефектов. Тенденция к упорядочению определена как второй основной принцип структурной организации нестехиометрических фаз [5].

Двойникование и упорядочение в кристаллах со структурой, производной от структуры LaF_3 . Одной из проблем, препятствующих технологическому освоению нестехиометрических соединений, является неизученность присущих им закономерностей дефектообразования. Характерной особенностью деформационных процессов в этих фазах является склонность к двойникованию, которое возникает при аномально низких пороговых напряжениях. Снижение критических напряжений двойникования

было гипотетически объяснено специфической дефектной структурой нестехиометрических фаз [3, 4]. Эта гипотеза подтверждается анализом результатов, приведенных в [6, 7].

Объемы кристалла с высокой степенью порядка имеют повышенную плотность структурных несовершенств, и если снижение пороговых напряжений двойникования обусловлено дефектной структурой нестехиометрических фаз, то его проявления и механизм следует изучать в этих объемах. В $\text{La}_{1-y}\text{Ca}_y\text{F}_{3-y}$ сосуществуют две фазы со структурой, производной от тригональной структуры LaF_3 . Одна фаза представляет собой неупорядоченный раствор CaF_2 в LaF_3 и ее решетка отличается от таковой для LaF_3 только параметрами. Вторая фаза объясняется как упорядоченная и имеет формулу La_2CaF_8 [8]. Плотность двойников в кристаллитах предполагаемой фазы La_2CaF_8 многократно выше, чем у кристаллитов со структурой LaF_3 . В настоящей работе рассмотрены закономерности двойникования в этой фазе.

Объекты исследований. Образцы состава $\text{La}_{0,9}\text{Ca}_{0,1}\text{F}_{2,9}$ формировались путем твердофазного синтеза при температуре 1023 К в течение 760 ч. Они получены и отобраны для исследований в лаборатории фторидных материалов Института кристаллографии РАН. Структурные исследования проводились авторами на микроскопе Philips CM-30 при ускоряющем напряжении 300 кВ. Объекты для исследований формировались диспергированием. В образцах выявлены кристаллиты обеих фаз: упорядоченной и неупорядоченной. На электронограммах La_2CaF_8 на двух из трех однотипных для тригональной решетки проекций $[110]$, $[\bar{1}20]$, $[\bar{2}10]$ отсутствовали наиболее сильные для LaF_3 отражения типов 300 , 302 ... Вместо них наблюдались запрещенные для тисонита рефлексы 301 , 303 ... и присутствовали отражения 100 , 101 ..., объясняемые как сверхструктурные. Однако некоторые особенности электронограмм позволили предположить, что рефлексы, объясняемые как сверхструктурные, могут быть обусловлены рассеянием на двойниках с необычными для LaF_3 плоскостями двойникования (100), (101), (102).

Методика исследований. Ошибки возбуждения. При исследовании двойникования в фазе La_2CaF_8 важную роль играют оценки ошибок возбуждения (отклонений сферы отражения от узлов обратного пространства) и определения координат точек, в которых сфера отражения пересекает плоскости соответствующих зон Лауэ. Эти оценки проводились посредством преобразованных формул окружности:

$$y = \frac{2xR \sin \varphi - x^2}{\sqrt{R^2 \cos^2 \varphi + 2xR \sin \varphi - x^2 + R \cos \varphi}};$$

$$x = R \sin \varphi \pm \sqrt{R^2 \sin^2 \varphi - 2Ry \cos \varphi - y^2},$$

где y – ошибка возбуждения (расстояние между зонами Лауэ); x – расстояние от узла 000 до точек, в которых определяется или задается отклонение; R – радиус сферы отражения; для электронов с энергией 300 кэВ ($\lambda = 0,0197 \text{ \AA}$) $R \approx 50 \text{ \AA}^{-1}$.

Использование проекций $[110]/[\bar{1}20]$. Проекция $\langle 110 \rangle / \langle \bar{1}20 \rangle$, на которой локализованы некоторые направления двойникования, присущие LaF_3 , и гипотетические направления двойникования $[100] / \langle 1\bar{1}0 \rangle$, $[101] / \langle 1\bar{1}1 \rangle$, интересна для изучения закономерностей двойникования кристаллов со структурой LaF_3 и La_2CaF_8 . Однако на точной проекции $[110] / \langle \bar{1}20 \rangle$ позиции двойниковых отражений совпадают с позициями матричных отражений. Поэтому в исследованиях следует использовать малые отклонения от точных проекций. В силу особенностей строения обратного пространства для LaF_3 и La_2CaF_8 подобный наклон связан с дополнительными эффектами, которые могут быть использованы не только для выявления плоскостей двойникования, но и для выяснения природы отражений – двойниковой или сверхструктурной.

Индицирование электронограмм. Все представленные электронограммы проиндицированы в решетке LaF_3 . Причем для проекций, отвечающих малым отклонениям от проекции $[\bar{1}\bar{2}0]$, индицирование осуществлялось в соответствии со структурой обратного пространства для LaF_3 вдоль направления $[\bar{1}\bar{2}0]$, т.е. рефлексy распределялись по различным зонам Лауэ. Рефлексy ненулевых зон получили индексы, соответствующие формуле [9]

$$\left| hu + kv + \frac{1}{2}(hv + ku) + \frac{3c^2}{4a^2}lw \right| = N,$$

где hkl – индексы отражения; uvw – индексы плоскости; N – целое число, выбираемое из условия рациональности отражений (для решетки La_2CaF_8 и проекции $[\bar{1}\bar{2}0]$ оно кратно трем).

Результаты структурных исследований La_2CaF_8 . Электронограмма на рис.1 соответствует объему, в котором двойники не выявлены при электронно-микроскопических исследованиях. Однако при наклоне вблизи многих рефлексy появляются дополнительные максимумы, смещенные относительно матричного рефлексy вдоль направлений: $[001]$ (для отражений 002 , $00\bar{2}$, 600 , $00\bar{4}$, $\bar{6}00$, $\bar{6}0\bar{4}$, $\bar{6}0\bar{6}$), $[100]$ (для $\bar{6}00$, $\bar{6}00$, $12.0.0$) и $[101]$ (для 602 , $60\bar{2}$, $\bar{6}0\bar{2}$). Дополнительные максимумы отсутствуют вблизи рефлексy типа 303 , хотя наблюдаются для более слабых рефлексy $60\bar{2}$ и $00\bar{4}$.

Исследование формы рефлексy с помощью двух взаимно перпендикулярных точных проекций $[001]$, $[\bar{1}\bar{2}0]$ показало, что для всех рефлексy она изотропна. Поэтому дополнительные максимумы не могут объясняться вариациями состава или блочной структурой, но могут быть обусловлены расщеплением рефлексy, связанным с двойникованием [9]. При расщеплении выполняются следующие правила: двойниковый рефлекс hkl смещен относительно матричного рефлексy hkl вдоль проекции направления двойникования на плоскость электронограммы; двойниковые рефлексy hkl не возникают вблизи рефлексy $h_1k_1l_1$, лежащих на направлении двойникования; расстояние между двойниковым и матричным рефлексyми hkl не зависит от порядка отражения [9]. Последнее правило выполняется для рефлексy $\bar{6}00$ и $12.0.0$, $00\bar{2}$ и $00\bar{4}$, $00\bar{2}$, $\bar{6}0\bar{4}$ и $\bar{6}0\bar{6}$, подтверждая двойниковую природу расщепления.

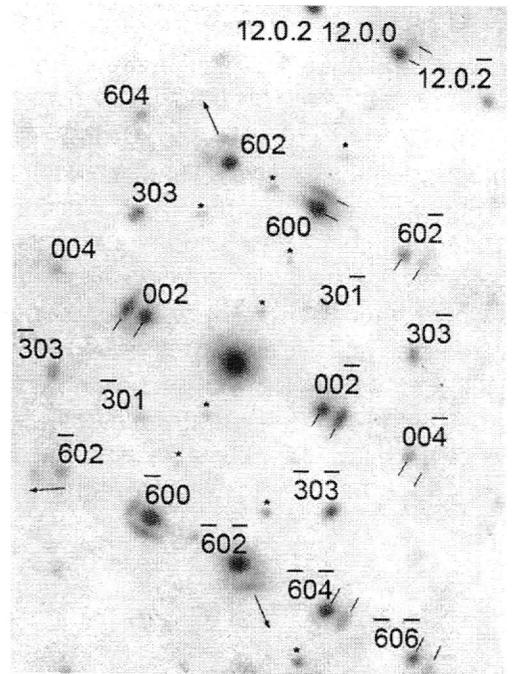


Рис.1. Электронограмма La_2CaF_8 , отклонение от проекции $[\bar{1}\bar{2}0]$ в $1,5^\circ$ вокруг направления $[101]$. Указаны индексы матричных отражений, сверхструктурные рефлексy маркированы точками. Наблюдаются дополнительные максимумы (расщепление рефлексy). Расстояния между основными рефлексyми и дополнительными максимумами не зависят от порядка отражения. Стрелками отмечены смещения дополнительных максимумов вдоль $[101]$

Если дополнительные максимумы связаны с двойникованием, то индексы плоскостей, в которых лежат направления двойникования, определяются системой уравнений [9]:

$$hx + ky + \frac{1}{2}(hy + kx) + \frac{3}{4} \frac{c^2}{a^2} lz = 0;$$

$$ux + vy + \frac{1}{2}(uy + vx) + \frac{3}{4} \frac{c^2}{a^2} wz = 0,$$

где hkl – индексы направлений, вдоль которых дополнительные максимумы смещены относительно основных рефлексов; uvw – индексы плоскости проекций; xyz – индексы искомым плоскостей. Направление смещения $[100]$ соответствует направлению двойникования, лежащему в плоскости (001) , для $[001]$ направление двойникования лежит в плоскости (100) , для $[101]$ – в плоскости $(1\bar{2}0)$. В плоскости (001) лежат направления двойникования $\langle 1\bar{2}0 \rangle$, присущие LaF_3 , а также гипотетические направления двойникования $\langle 100 \rangle$. В плоскости (100) лежат разрешенные направления двойникования $[001]$ и $[1\bar{2}0]$. Однако в силу сформулированных правил они не могут приводить к максимумам, смещенным вдоль $[001]$, и вероятной плоскостью двойникования может быть одна из плоскостей $[11n]$ (n – произвольное целое число). Для LaF_3 плоскости двойникования с такими индексами неизвестны. Для проекции $[1\bar{2}0]$ ни одно из направлений двойникования, разрешенных для LaF_3 , не может проецироваться на $[101]$. Кроме того, гипотеза о реализации одного из разрешенных для LaF_3 направлений двойникования не объясняет отсутствия дополнительных максимумов вблизи всех отражений $30\bar{6}$.

Направление $[101]$ определено как одно из возможных направлений чередования ионов La^{3+} и Ca^{2+} , направление $[102]$ также определено как направление упорядочения [8], и на него не могут проецироваться направления двойникования. Чтобы проверить возможную связь дополнительных максимумов с упорядочением, были изучены электронограммы, на которых наклон приводит к появлению отражений, лежащих на направлении $[102]$. Электронограмма на рис.2 содержит четыре отражения $30\bar{6}$.

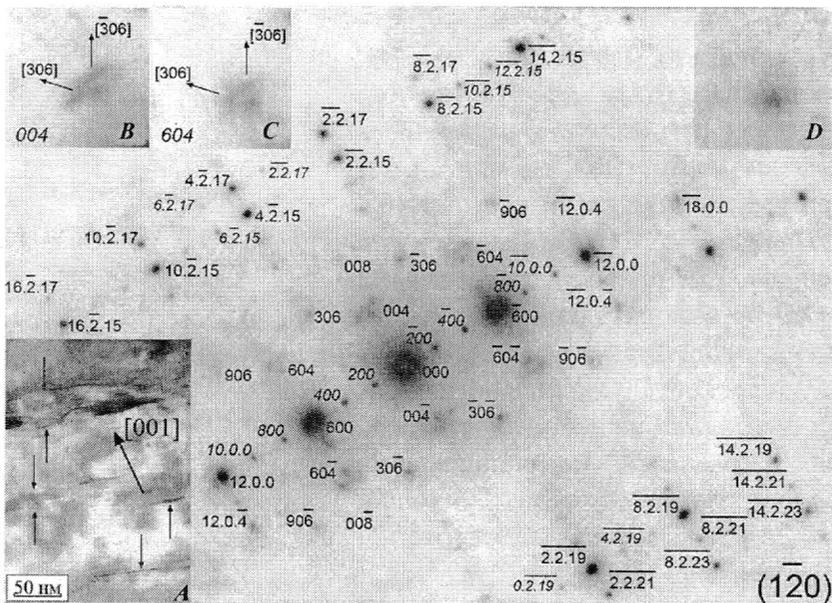


Рис.2. Электронограмма La_2CaF_8 . Отклонение в $1,3^\circ$ от проекции $[1\bar{2}0]$ вокруг направления $[100]$. На врезках: А – область кристалла, которой соответствует электронограмма, с изображениями двойников; В, С, D – увеличенные изображения рефлексов 004 , 604 и 306 . Стрелками указаны направления смещения дополнительных максимумов относительно главного

Она соответствует отклонению от проекции $[\bar{1}\bar{2}0]$ на $\approx 1,3^\circ$ вокруг $[100]$. Близость оси разворота к $[100]$ подтверждается изменениями интенсивности в ряду отражений, индцированных как $10.\bar{2}.17$, $4.\bar{2}.17$, $\bar{2}.\bar{2}.17$, $\bar{8}.\bar{2}.17$. Интенсивность этих отражений уменьшается практически симметрично при удалении от оси $[001]$, проходящей через узел 000 . На электронограмме наблюдаются три области с сетками отражений, между которыми лежат две области, свободные от рефлексов. Такие области возникают на электронограммах, если сфера отражения пересекает несколько зон Лауэ [9]. Схема формирования этой электронограммы приведена на рис.3.

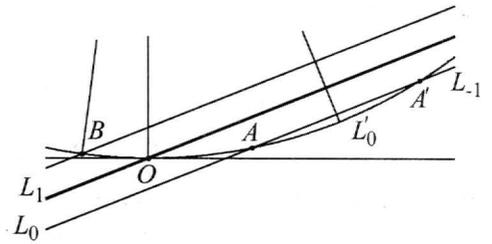


Рис.3. Схема пересечения зон Лауэ $\{-1\}$ и $\{+1\}$ сферой отражения: L'_0 – положение плоскости нулевой зоны для точной проекции; L_0 – плоскость нулевой зоны после разворота; L_1, L_{-1} – плоскости зон $\{-1\}$ и $\{+1\}$; A, A' – точки, в которых сфера отражения пересекает зону $\{-1\}$; B – точка, в которой сфера отражения пересекает зону $\{+1\}$

Закон чередования зон Лауэ вдоль $[\bar{1}\bar{2}0]$ для LaF_3 и La_2CaF_8 можно определить с помощью проекций $[001]$, на которых след плоскости $(\bar{1}\bar{2}0)$ совпадает с направлением $[100]$. Для проекции $[\bar{1}\bar{2}0]$ в 1-й зоне Лауэ лежат отражения $\bar{1}\bar{1}0$ и $\bar{2}10$. Для LaF_3 она отстоит на $\approx 0,139 \text{ \AA}^{-1}$ от узла 000 . Для кристалла La_2CaF_8 с двойниками (см. рис.2) сфера отражения ($\lambda = 0,0198 \text{ \AA}$, $\frac{1}{\lambda} \approx 50 \text{ \AA}^{-1}$) касается минус 1-й зоны Лауэ (далее зона $\{-1\}$, лежащая «ниже» нулевой зоны) при отклонении в $\approx 1,23^\circ$ от проекции $[\bar{1}\bar{2}0]$ в области, удаленной от рефлекса 000 на $\approx 2,15 \text{ \AA}^{-1}$ (для LaF_3 рефлексы 1-й матричной зоны Лауэ появляются в этой области при наклоне $> 3,7^\circ$). При наклоне в $1,3^\circ$ сфера отражения пересекает 1-ю зону (зону $\{+1\}$) на расстоянии $\approx 2,23 \text{ \AA}^{-1}$ от узла 000 вблизи ряда отражений с индексами $h.k.16$. Зона $\{-1\}$ пересекается дважды в точках $\approx 2,60 \text{ \AA}^{-1}$ и $\approx 3,05 \text{ \AA}^{-1}$ от 000 , и вблизи линий пересечения лежат ряды рефлексов с $h.k.\bar{1}9$, $h.k.\bar{2}3$, разделенных рядом отражений с $h.k.\bar{2}1$. Геометрия сеток отражений в зонах $\{+1\}$ и $\{-1\}$ полностью соответствует геометрии сетки отражений для проекции $[\bar{1}\bar{2}0]$. Возникновение зон $\{+1\}$ и $\{-1\}$, удаленных на $0,046 \text{ \AA}^{-1}$ от нулевой зоны Лауэ, объясняется утроением постоянной решетки La_2CaF_8 по сравнению с этой постоянной в решетке LaF_3 [8] и двойникованием по плоскостям $(\bar{1}\bar{2}0)$.

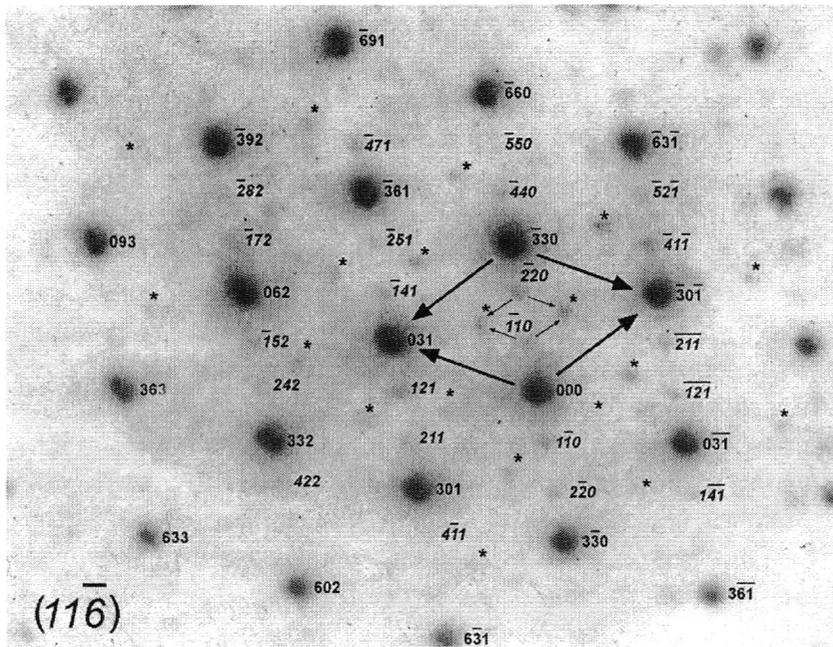
Зоны $\{-1\}$ и $\{+1\}$ отстоят друг от друга на $\approx 0,093 \text{ \AA}^{-1}$ и от нулевой зоны Лауэ на $\approx 0,046 \text{ \AA}^{-1}$. При таких расстояниях в областях отражений с $h.k.16$ или $h.k.\bar{1}9$ и $h.k.\bar{2}3$ не могут возбуждаться отражения нулевой зоны Лауэ и отражения зон противоположного знака, т.е. «перенос отражений» из нулевой зоны или зоны противоположного знака в сетки зон $\{-1\}$ и $\{+1\}$ невозможен. Сетки зон $\{-1\}$ и $\{+1\}$ отражают бездефектную структуру кристалла, и если дополнительные максимумы связаны с двойниками, то теоретически в этих сетках они возникать не должны. На рис.2 дополнительные максимумы наблюдаются вблизи отражений 004 и 604 , но вблизи отражений $h.k.16$ или $h.k.19$, которые многократно интенсивней 004 и 604 , дополнительные максимумы отсутствуют.

Природа сеток зон $\{-1\}$ и $\{+1\}$ исключает объяснение отражений с индексами $\overline{12.2.15}$, $\overline{10.2.15}$, $\overline{2.2.17}$, $\overline{6.2.15}$ как двойниковых, т.е. сетки зон $\{-1\}$ и $\{+1\}$ содержат только матричные и сверхструктурные отражения. В ряду отражений 000 , 200 , 400 , 600 отсутствуют рефлексы 100 и 300 , интенсивность которых для тригонального LaF_3 выше, чем интенсивность отражений 200 , 400 (для 300 – более чем на два порядка!). Поэтому рефлексы 200 , 400 , $\overline{12.2.15}$, $\overline{10.2.15}$ и другие не могут принадлежать тригональному LaF_3 . Электронограмма (см. рис.2) однозначно подтверждает правильность объяснения $\text{La}_2\text{Ca}_3\text{F}_8$ как фазы с упорядоченным распределением компонентов и угроченной постоянной решетки.

При развороте вокруг направления $[\overline{1}20]$ в $1,3^\circ$ сфера отражения отстоит от узлов 004 и 604 на $\cong 0,013 \text{ \AA}^{-1}$, от узлов 306 и 906 на $\cong 0,019 \text{ \AA}^{-1}$, от узлов 008 на $\cong 0,021 \text{ \AA}^{-1}$. Электронограммы (см. рис.1) позволяют оценить эффективные радиусы этих узлов для La_2CaF_8 , которые равны $\approx 0,025 \text{ \AA}^{-1}$ ($\approx 1/20 |g_{002}|$). Сфера отражения пересекает периферийные области этих узлов. Поэтому отвечающие им рефлексы имеют диффузный характер, но принадлежат нулевой зоне Лауэ, и если дополнительные максимумы обусловлены «переносом», то они должны наблюдаться вблизи отражений 004 , 604 и других, не лежащих на оси разворота.

Добавочные максимумы для отражений 004 и 604 смещены вдоль направлений, близких к $[102]$. Следы добавочных максимумов отмечены также вблизи отражений 906 , но отсутствуют вблизи рефлексов 306 , хотя на электронограмме наблюдаются даже отражения 008 , удаленные от сферы отражения на расстояние, близкое к критическому. Объяснение добавочных максимумов двухфазностью образца исключено. Если гетерофазность проявляется в сетке рефлексов нулевой зоны, то она должна проявляться в ненулевых зонах. Но даже малейшие признаки гетерогенности отсутствуют в сетках рефлексов зон $\{-1\}$ и $\{+1\}$. Добавочные максимумы не могут быть связаны с традиционными для тисонита плоскостями двойникования. При отклонении от проекции $[\overline{1}20]$ вокруг направления $[100]$ проявления двойникования по плоскостям $(1\overline{1}0)$ и $(2\overline{1}0)$ должны лежать на направлении оси разворота, а проявления двойникования по плоскости $[001]$ не могут наблюдаться для отражения 004 . Отсутствие дополнительных максимумов вблизи отражений 306 отвечает следующему правилу: добавочные максимумы не возникают для отражений, лежащих на направлениях двойникования. Смещения дополнительных максимумов вдоль $[101]$, $[102]$ и отсутствие этих максимумов вблизи рефлексов 101 и 306 доказывают, что в решетке La_2CaF_8 имеются особенности структуры, необычные с точки зрения закономерностей двойникования, присущих LaF_3 .

Для объяснения необычных расщеплений рефлексов рассмотрены электронограммы La_2CaF_8 , для которых направления упорядочения наклонены относительно плоскости проекции, например проекции $[11\overline{6}]$. В сетке сверхструктурных отражений на этой проекции наряду с рефлексами, индицируемыми в решетке LaF_3 (La_2CaF_8), наблюдаются подсетки отражений, которые должны иметь в решетке LaF_3 иррациональные индексы. Иррациональные сверхструктурные отражения смещены относительно индицируемых сверхструктурных отражений вдоль направлений $\langle 301 \rangle$, являющихся проекциями направлений $\langle 101 \rangle$ на плоскость $(11\overline{6})$ (рис.4). Расстояния между индицируемыми и неиндицируемыми рефлексами вдоль $\langle 301 \rangle$ равны $\approx 0,19 \text{ \AA}^{-1} \approx |g_{101}| \cos 25^\circ$ (угол между



Разворот в одной из подрешеток прямого пространства должен приводить к развороту той подрешетки обратного пространства, которая связана с разворачиваемой подрешеткой прямого. При этом возможны две ситуации. Если направление упорядочения нормально плоскости зеркальной симметрии кристалла, то при развороте «двойниковые» узлы hkl совместятся с матричными узлами $\bar{h}\bar{k}\bar{l}$. Подобная ситуация наблюдается для упорядочения по типу CuAu или Cu₃Au в кристаллах с кубической решеткой. Такой разворот не вызывает изменений формальной геометрии обратного пространства. Однако плоскости $\{101\}$, $\{102\}$ в тригональной решетке не являются плоскостями зеркального отражения, и доменно-двойниковой структуре кристалла должны соответствовать в обратном пространстве «доменно-двойниковые» узлы (см. рис.4).

Полученные результаты доказывают доменно-двойниковую структурную организацию La₂CaF₈, но имеют, по-видимому, и общее значение. Для нестехиометрических соединений упорядочение связано с минимизацией деформационной компоненты свободной энергии [5]. Оно протекает в подрешетках компонентов и структурообразующих дефектов. Доменно-двойниковый характер структурной организации должен быть общим законом для нестехиометрических фаз и определять многие их свойства. Например, снижение критических напряжений двойникового может объясняться возникновением центров релаксации упругих напряжений в точках стыка антифазных границ. Основные исследования нестехиометрических соединений проводятся для фаз с кубической решеткой, для которых направление упорядочения совпадает с $\langle 001 \rangle$ [2, 5, 6]. Для этих фаз доменная структура не сказывается на геометрии обратного пространства (однако она искажает интенсивности отражений, дифракционные векторы которых не параллельны направлению двойникового, и сказывается на оценках степени порядка). Латентность дифракционных проявлений доменно-двойниковой организации этих соединений, возможно, сказывается на недооценке этой особенности их строения при объяснении структуры и свойств нестехиометрических фаз. При определении структуры необходимо осуществлять проверку каждого объема, на основе которого она восстанавливается. Проверка должна предусматривать поиск антифазных границ, иррациональных отношений, добавочных максимумов при отклонении от точных проекций.

Авторы благодарят Соболева Б.П. за предоставленные образцы и Авилова А.С. за участие в обсуждении полученных результатов.

Литература

1. **Sobolev B.P.** The rare earth trifluorides. Part 1. The high temperature chemistry of the rare earth trifluorides. – Barcelona: Institut d'Estudis Catalans, 2000. – 520 p.
2. HREM study of compounds in the Bi-Rich part of the Ba-Bi-O system / **V.I.Nikolaichik, S.Amelinckx, L.A.Klinkova et al.** // J. of Solid State Chemistry. – 2002. – Vol. 163. N 1. – P. 44–64(21).
3. **Максимов С.К.** Особенности наноструктурирования нестехиометрических фторидов Ba_{1-x}La_xF_{2+x} и Ca_{1-x}La_xF_{2+x} с решеткой на основе CaF₂ // Изв. вузов. Электроника. – 2006. – № 5. – С. 83–92.
4. **Максимов С.К., Максимов К.С.** Механизм наноструктурирования Ba_{1-x}La_xF_{2+x} и Ca_{1-x}La_xF_{2+x} со структурой на основе структуры CaF₂ // Неорганические материалы. – 2007. – № 5.
5. **Adams D.M.** Inorganic Solids. An introduction to concepts in solid-state structural chemistry. – London: John Wiley & Sons, 1974. – 327 p.
6. Periodic microtwinning as a possible mechanism for the accommodation of the epitaxial film-substrate mismatch in the La_{1-x}Sr_xMnO₃/SrTiO₃ system / **I.Lebedev, van G.Tendenloo, S.Amelinckx et al.** // Phil. Mag. A. – 2001. – Vol. 81. – P. 797–824.

7. *Oka A., Koyama S., Shiohara Y.* Study of oxygen diffusion in $NdBa_2Cu_3O_{7-x}$ single crystal by in-situ observation of twin formation // *Physica C.* – 1998. – Vol. 305. – P.213 – 220.

8. *Максимов С.К.* Упорядоченная фаза La_2CaF_8 с модифицированной структурой тисонита // *Изв. вузов. Электроника.* – 2006. – № 4. – С. 3–7.

9. *Электронная микроскопия тонких кристаллов / П.Хири, А.Хови, Р.Николсон и др.* – М.: Мир, 1968. – 574 с.

Статья поступила
23 ноября 2006 г.

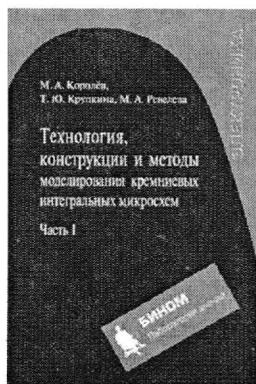
Максимов Сергей Кириллович – доктор физико-математических наук, профессор, главный научный сотрудник лаборатории электронно-микроскопических исследований МИЭТ. *Область научных интересов:* закономерности дифракции и электронно-микроскопического контраста, применение электронной микроскопии к исследованиям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

Максимов Кирилл Сергеевич – кандидат физико-математических наук, научный сотрудник лаборатории радиационных методов технологии и анализа МИЭТ. *Область научных интересов:* кристаллофизика.

Книжные новинки



Королёв М.А., Крупкина Т.Ю., Ревелева М.А. Технология, конструкции и методы моделирования кремниевых интегральных микросхем. Ч. 1. Технологические процессы изготовления кремниевых интегральных схем и их моделирование. – М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2007. – 397 с.



Дано представление об основных маршрутах изготовления и конструкциях изделий микроэлектроники на основе кремния. Рассмотрены основные процессы создания интегральных схем: химическая и плазмохимическая обработка материала; введение примесей в кремний; выращивание окисла кремния и его охлаждение; литография; создание металлических соединений и контактов. Приведены методы моделирования процессов распределения примесей в полупроводниковых структурах.

Для студентов и аспирантов, специализирующихся в области микроэлектроники и полупроводниковых приборов. Может быть использовано также специалистами, работающими в данной области.

Влияние Te на самоактивированное свечение ZnSe

Н.К.Морозова, Д.А.Мидерос

Московский энергетический институт
(технический университет)

Предложена интерпретация оптических свойств ZnSe на основе теории непересекающихся зон, определяющей инициированное кислородом расщепление зоны проводимости. Показано, что новый подход объясняет особенности самоактивированной люминесценции как ZnSe(O), так и ZnSe·Te(O). Дано объяснение влияния малых добавок Te(<1%) на люминесценцию ZnSe·Te в краевой области спектра. Приведена модель электронных переходов.

Самоактивированное свечение селенида цинка ZnSe известно как широкая оранжевая полоса – SA 600–630 нм. По аналогии с ZnS свечение связывалось с комплексами собственных дефектов. Классификация самоактивированных полос некоторых соединений $A^{II}B^{VI}$, в том числе и ZnSe, дана в работе [1], где высказывается предположение, что центр самоактивированного излучения включает кислород, который стабилизирует комплексы собственных дефектов. В [2] оранжевое свечение ZnSe объяснялось присутствием Te. Рассмотрим влияние этих изовалентных примесей на самоактивированное излучение ZnSe с позиций возможного изменения зонной структуры [3, 4].

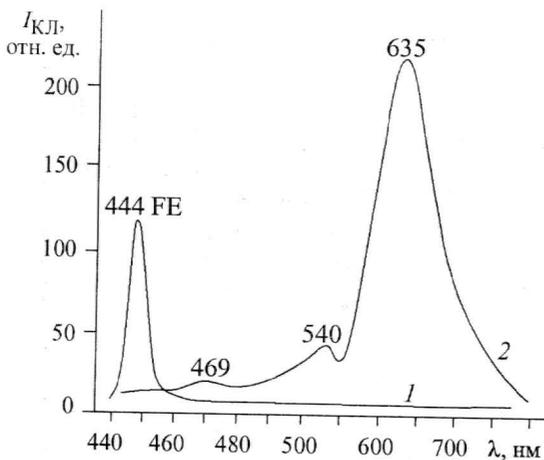


Рис. 1. Спектры, снятые в РЭМ при $T = 100$ К, монокристалла ZnSe: исходного (1); после ионной имплантации кислорода дозой 10^{16} см $^{-2}$ (10^{20} см $^{-3}$) и последующего отжига при 400 °С в течение 0,5 ч (2). Интенсивность возбуждения $5 \cdot 10^{24}$ см $^{-3} \cdot$ с $^{-1}$

На рис.1 показано возникновение SA свечения при ионной имплантации кислорода (представлен спектр микрокатодоллюминесценции исходного монокристалла ZnSe и ионнолегированного кислородом). Спектры микрокатодоллюминесценции исследованы в РЭМ при $T = 100$ К на сколах монокристалла ZnSe, выращенного из расплава. Ионная имплантация кислорода проведена при $T = 300$ К дозой 10^{16} см $^{-2}$ (10^{20} см $^{-3}$), энергии 300 кэВ с последующим отжигом при $T = 400$ °С в течение 0,5 ч. Исследовались однородные участки размером 10×10 мкм ионнолегированного слоя [5]. Как видно из рисунка, при внедрении кислорода $\sim 10^{20}$ см $^{-3}$ (или 0,5 мол%) возникает самоактивированное свечение ZnSe 635 нм. Кроме того, наблюдается вторая полоса – зеленая 540 нм, природа которой до настоящего времени не ясна, и поэтому часто ее связывают с примесью Cu.

Экситонная полоса катодоллюминесценции (КЛ) чистого ZnSe 444 нм (FE_{ZnSe}) при ионном внедрении кислорода в концентрации порядка 10^{20} см $^{-3}$ не наблюдается. Вместо нее измеряется уширенная и слабая полоса ~ 469 нм. Полоса соответствует,

по-видимому, перекрывающимся экситонам $ZnSe(O)$: свободному $FE_{ZnSe(O)}$ и связанному на SA центрах $BE_{ZnSe(O)}^{SA}$ [4]. Такое положение полосы $FE_{ZnSe(O)}$ согласуется с уменьшением ширины запрещенной зоны $ZnSe(O)$ при концентрации растворенного кислорода $[O_{Se}] \sim 1,25$ мол%, рассчитанной по спектральному положению компонент SA свечения 635 и 540 нм (см. рис.5).

В спектрах отражения (77 К) ионнолегированного кислородом $ZnSe$ появляется край дополнительного поглощения (КДП) порядка 460 нм ($FE_{ZnSe(O)}$ при $[O_{Se}] \sim 1$ мол%). КДП наблюдался в спектрах поглощения (отражения), снятых фотографической методикой на ИСП-51. Обычно он соответствовал $FE_{ZnSe(O)}$, хотя в излучении при этом преобладает связанный экситон BE^{SA} на превалирующих центрах самоактивированного свечения данного образца. При увеличении дозы ионного легирования кислородом (от 10^{19} до 10^{20} см⁻³) возникает и усиливается второй КДП ~ 500 нм, связанный с переходами $E^{SA} \rightarrow E_-$ (см. рис.5).

Помимо кислорода на возникновение самоактивированного свечения $ZnSe$ 600 – 635 нм влияют условия роста кристаллов, а именно: свечение наблюдается и усиливается преимущественно при избытке *Zn* в кристалле. Этот факт можно считать установленным согласно данным [1–3, 5–7], хотя согласно [2] только в $ZnSe$, содержащем *Te*, отжиг в парах цинка формирует суперстабильный центр 630 нм, который почти не меняет своих характеристик в диапазоне $T = 4,2–500$ К и не распадается после отжига. По данным [2] оранжевое SA свечение $ZnSe$ обязано присутствию в кристаллах примеси *Te*, поскольку оно усиливалось в спектрах излучения кристаллов, выращенных из расплава с добавками *Te* < 1%. В связи с этим в [2] полоса 630 нм самоактивированного свечения $ZnSe$ определялась комплексом $\{V_{Zn}^{II} Te_{Se} Zn_i^{II}\}$ или $\{V_{Zn}^I Te_{Se} D^{\cdot}\}$, включающим как обязательную составляющую *Te*.

Проведенный анализ литературных данных [5–10] по влиянию *Te* на свечение $ZnSe$ показал, что введение *Te* порядка 1% в $ZnSe$ при росте приводит к усилению свечения не в оранжевой области, а более коротковолновой (КВ) 467–500 нм. Оранжевая полоса при этом может вообще не наблюдаться [8–10]. Природа КВ полос 464–467 и 490–500 нм не выяснена. Первоначально они объяснялись экситонами, локализованными на изолированных атомах Te_{Se} и ближних парах $Te_{Se}-Te_{Se}$. Затем для обоснования возможности локализации экситонов использовались более сложные образования: Te_3 , Te_4 и кластеры, присутствие которых не подтвердилось последующей проверкой экспериментом [9, 10].

Учитывая усиление самоактивированного свечения $ZnSe$ при введении кислорода (см. рис.1), была проверена роль *Te* с учетом присутствия в кристаллах кислорода. Результаты представлены на рис.2 и 3. Спектры КЛ сняты на свежих сколах кристаллов, выращенных из расплава, с разными концентрациями кислорода при добавке *Te* < 1% в процессе роста с последующим отжигом их в парах *Zn*. На рис.2 приведены спектры КЛ кристаллов $ZnSe \cdot Te$ при увеличении концентрации *Te* в образцах от 10^{19} до 10^{20} см⁻³ и постоянной концентрации кислорода, равной согласно данным анализа $[O]_{общ} \sim 10^{20}$ см⁻³. Как видно, с введением теллура SA свечение 635–630 нм не усиливается, а затухает. Однако введение *Te* в $ZnSe$ усиливает свечение другого типа в области 460–490 нм (80 К) – назовем его SAL. На рис.3 представлены спектры КЛ для образцов с пониженной до 10^{19} см⁻³ концентрацией теллура и возрастающей концентрацией кислорода $[O]_{общ}$ от $5 \cdot 10^{19}$ до $2 \cdot 10^{20}$ см⁻³. Как видно, усиливаются полосы SA свечения $ZnSe \cdot Te(O)$ 635 и 550 нм, как и при введении кислорода ионной имплантацией в $ZnSe$.

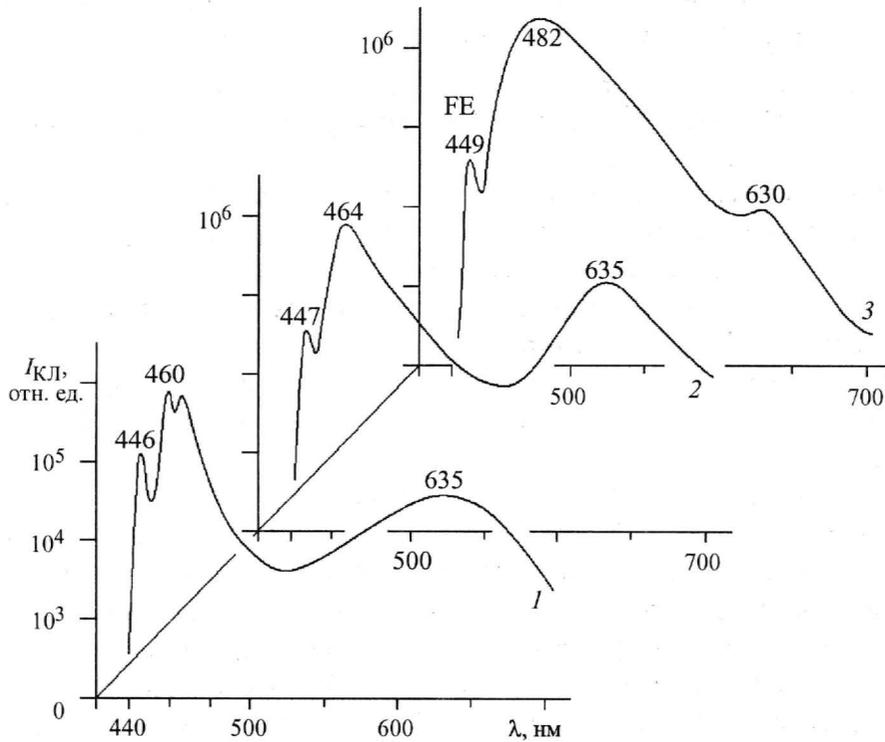


Рис.2. Зависимость КЛ кристаллов ZnSe Te(O) от содержания теллура $[\text{Te}]_{\text{общ}}$: $4 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$ (кривая 1); $1,2 \cdot 10^{20} \text{ см}^{-3}$ (кривая 2); $1,7 \cdot 10^{20} \text{ см}^{-3}$ (кривая 3). $[\text{O}]_{\text{общ}} \sim 10^{20} \text{ см}^{-3}$; интенсивность возбуждения $10^{22} \text{ см}^{-3} \cdot \text{с}^{-1}$; $T = 80 \text{ К}$

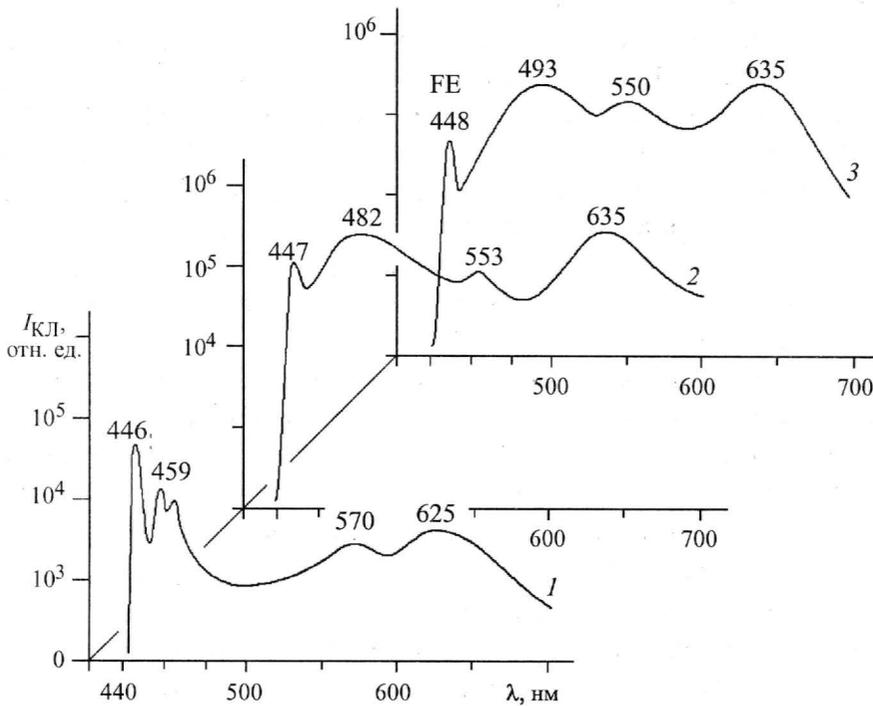


Рис.3. Зависимость спектров КЛ кристаллов ZnSe:Te(O) от содержания кислорода $[\text{O}]_{\text{общ}} 5 \cdot 10^{19} - 2 \cdot 10^{20} \text{ см}^{-3}$ (кривые 1-3). $[\text{Te}]_{\text{общ}}$ от $< 5 \cdot 10^{19}$ до $\sim 10^{20} \text{ см}^{-3}$; интенсивность возбуждения $10^{22} \text{ см}^{-3} \cdot \text{с}^{-1}$; $T = 80 \text{ К}$

Новый подход к интерпретации спектров на основе теории непересекающихся зон [4] позволяет объяснить возникновение двух SA полос без учета предположения о присутствии неконтролируемых примесей в кристаллах, в частности Cu. Согласно [4] кислород, создающий грубые локальные деформации в узлах решетки соединения $A^{II}B^{VI}$, приводит к расщеплению зоны проводимости на две непересекающиеся подзоны (см. рис.5). Кроме того, в [1] показано, что самоактивированное свечение ZnSe не ограничивается только SA свечением в оранжево-зеленой области: при изменении стехиометрии в сторону избытка Se вместо SA свечения возникает более коротковолновое свечение (SAL). Изменение комплексов дефектов, ответственных за возникновение SAL свечения, наблюдалось в ZnSe(O) вблизи точки стехиометрии или при небольшом избытке Se [1, 6]. В этих же работах показано, что центры самоактивированного свечения SAL, как и SA, стабильны при растворении или в местах скопления кислорода, который входит в их состав. Кислород O_{Se} обеспечивает объемную компенсацию Zn_i , препятствуя аннигиляции ближней френкелевской пары. Влияние кислорода на интенсивность SAL и SA свечения подтверждено в [6].

Условия усиления свечения в области спектра 459–493 нм кристаллов ZnSe·Te(O) соответствуют условиям возникновения SAL свечения в ZnSe(O) [1, 6]. Введение теллура с образованием твердого раствора в ZnSe·Te(O) изменяет состав кристалла в сторону увеличения концентрации избыточного над стехиометрическим составом металлоида – отношения $(Se + Te)/Zn$. Поэтому наблюдаемое в области 459–493 нм свечение ZnSe·Te(O) может быть сопоставлено SAL свечению ZnSe(O) и объясняется с тех же позиций (см. рис.5). На рис.2 и 3 SAL свечение ZnSe·Te не разрешается на составляющие, хотя в работах [8–10] в области КЛ 460–500 нм для ZnSe·Te наблюдались две составляющие. Это объясняется тем, что исследованные кристаллы, выращенные из расплава с добавками Te и отожженные в парах Zn, неоднородны, а съемка КЛ велась в широком пучке [5]. Две составляющие, однако, отчетливо выявляются локальной съемкой в пучке лазера при $[Te] > [O]$ и разных уровнях возбуждения (рис.4).

Влияние Te на спектры проявляется в некотором отличии спектрального положения полос ZnSe·Te(O) от ZnSe(O) при одной и той же $[O]_{общ}$, так как ZnTe образует с ZnSe неограниченный твердый раствор, что способствует небольшому смещению всего спектра, в частности SAL свечения, в длинноволновую сторону. Величина смещения экситона $ZnSe_{1-x}Te_x$ при введении менее 1% Te соответствует зависимости [9]:

$$E_{FE}(x) = 2,74x^4 - 6,55x^3 + 6,33x^2 - 2,94x + E_{FE}^{ZnSe}.$$

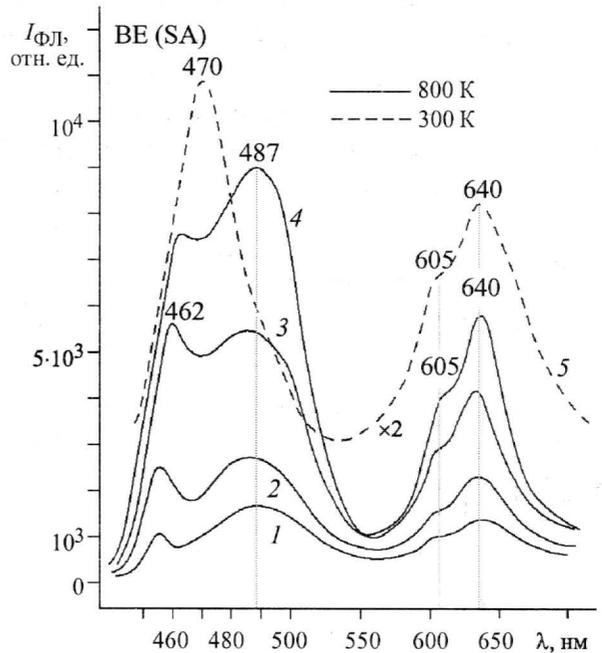


Рис.4. Спектры фотолюминесценции (ФЛ) выращенных из расплава монокристаллов ZnSe·Te(O) в зависимости от интенсивности импульсного возбуждения лазером: $3 \cdot 10^{25} \text{ см}^{-3} \cdot \text{с}^{-1}$ (1); $8 \cdot 10^{25} \text{ см}^{-3} \cdot \text{с}^{-1}$ (2); $5 \cdot 10^{26} \text{ см}^{-3} \cdot \text{с}^{-1}$ (3); $10^{27} \text{ см}^{-3} \cdot \text{с}^{-1}$ (4 и 5). $T = 80 \text{ K}$ (1–4) и 300 K (5); концентрация кислорода $[O_{Se}] \sim 5 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$, $[Te]_{общ} \sim 10^{20} \text{ см}^{-3}$.

Теллур в присутствии кислорода может влиять и на степень локального нарушения решетки ZnSe в области узла O_{Se} . Как известно, Te_{Se} в ZnSe не дает столь существенных нарушений как кислород (с расщеплением зоны проводимости), что отражает неограниченная растворимость ZnTe в ZnSe и весьма ограниченная (~ 1 мол%) ZnO в ZnSe. При росте селенида цинка из расплава (в присутствии кислорода) теллур с большим эффективным радиусом Te_{Se} ($r_{Te} = 1,98 \text{ \AA}$) должен входить с кислородом O_{Se} ($r_O = 1,28 \text{ \AA}$) для компенсации объемного несоответствия. Образова комплексы с кислородом, Te препятствует выделению его из твердого раствора ZnSe(O), увеличивая концентрацию кислорода в узлах решетки $[O_{Se}]$ по отношению к $[O]_{общ}$. Это находит подтверждение при исследовании спектров отражения (поглощения) кристаллов, а также микроструктуры образцов в РЭМ. Если $[Te]_{общ} < [O]_{общ}$, то кристаллы неоднородны в РЭМ. В спектрах отражения таких образцов ZnSe-Te при 77 К наблюдался КДП, например, при ~ 450–452 нм ($FE_{ZnSe(O)}$), что соответствует $[O_{Se}] \sim 0,4\text{--}0,5 \text{ мол\%}$ [3]. Это меньше концентрации кислорода $[O]_{общ}$, которая составляла в этих образцах по данным анализа 1,0 мол%.

При концентрации кислорода $[O]_{общ} = [Te]_{общ}$ в спектрах отражения при 77 К КДП сдвигался до ~ 460 нм ($FE_{ZnSe(O)}$). Сдвиг фундаментального поглощения ZnSe-Te(O) соответствует содержанию растворенного кислорода $[O_{Se}] \sim 1,0 \text{ мол\%}$ [3]. Такая же концентрация кислорода определена анализом: $[O]_{общ} \sim 1,0 \text{ мол\%}$. При этом в РЭМ отмечалась гомогенизация объема кристалла. Таким образом, в результате введения Te почти весь кислород может находиться в растворенном состоянии.

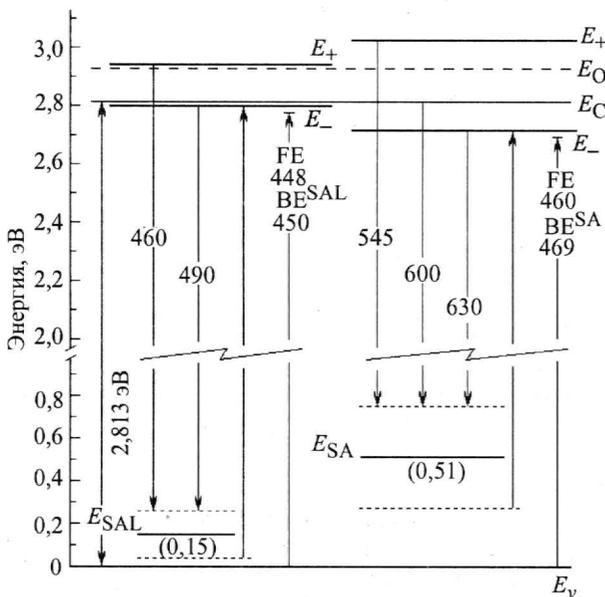


Рис.5. Зонная модель переходов при $T = 80 \text{ К}$ для кристаллов ZnSe(O) с позиций теории непересекающихся зон

На рис.5 приведена модель переходов, построенная по нашим экспериментальным данным с позиций нового подхода – теории непересекающихся зон [4]. Модель построена при $T = 80 \text{ К}$ для двух типичных концентраций кислорода $[O_{Se}]$: 0,2 мол%, при которой реализуется SAL свечение (левая часть диаграммы); 1 мол%, возможной при избытке Zn, когда преобладает SA свечение (правая часть диаграммы). Это отражает факт зависимости растворимости кислорода от стехиометрии, т.е. пониженной $[O_{Se}]$ в условиях избытка металлоида и повышенной при избытке Zn. На рисунке также показано инициированное растворенным кислородом расщепление зоны проводимости на две подзоны E_+ и E_- [4]. Величина расщепления зависит почти линейно от $[O_{Se}]$. Согласно этой модели

возникающее при избытке цинка SA свечение должно иметь две составляющие – переходы. Они и определяют две полосы самоактивированной люминесценции: оранжевую и зеленую. Аналогично две экспериментально наблюдаемые составляющие SAL излучения определяются переходами $E_- \rightarrow E_{SAL}$ и $E_+ \rightarrow E_{SAL}$ (см. рис.4). На основании эксперимента на рис.5 при измененной присутствием O_{Se} зонной структуре дано положение экситонных полос ZnSe-O – свободного экситона ($FE_{ZnSe(O)}$) и экситона, связанного (BE) на SA и SAL центрах.

В заключение следует отметить, что самоактивированная люминесценция кристаллов ZnSe-Te(O), как и в ZnSe(O) [3], получает объяснение с позиций теории непересекающихся зон [4], инициированных кислородом. Интерпретация свечения ZnSe-Te(O) в области 460–490 нм, превалирующего при введении теллура в ZnSe, дается впервые. Результаты важны при выращивании этих кристаллов с интенсивным свечением в оранжевой или голубой области спектра.

Литература

1. Морозова Н.К., Каретников И.А., Блинов В.В., Гавришук Е.М. Исследование центров люминесценции, связанных с Cu и O в ZnSe // ФТП. – 2001. – Т. 35, № 1. – С. 25–33.
2. Research of the recombination centres in isovalently doping monocrystals ZnSe:Te / V.D.Ryjkov, V.Havrushin, A.Klazlaskaz et al // J. Luminescence. – 1992. – Vol. 52, N 1–4. – P. 71–81.
3. Морозова Н.К., Мидерос Д.А., Гавришук Е.М. Self-Activated luminescence in ZnS-ZnSe system from positions of the band anticrossing model // Изв. вузов. Физика. – 2006. – N 10. – P. 166–199.
4. Band Anti-crossing in GaInNAs Alloys / W.Shan, W.Walukiewicz, J.W.Ager et al. // Phys. Rev. Lett. – 1999. – Vol. 82, N 6. – P. 1221–1224.
5. Селенид цинка. Получение и оптические свойства / Н.К.Морозова, В.А.Кузнецов, В.Д.Рыжиков и др. – М.: Наука, 1992. – С. 93.
6. Блинов В.В. Оптика центров, связанных присутствию кислорода и меди в соединениях A_2B_6 (на примере ZnSe): Дис. канд. физ.-мат. наук. – М.: МЭИ, 2003.
7. Назарова Л.Д. Влияние сложного легирования изоэлектронными примесями кислорода и теллура на оптические свойства сульфида кадмия и селенида цинка: Дис. канд. физ.-мат. наук. – М.: МЭИ, 1995.
8. Lee D., Mysyrowicz A., Nurmikko A.V., Fitzpatrick B.J. Exciton self-trapping in ZnSe-ZnTe alloys // Phys. Rev. Lett. – 1987. – Vol. 58, N 14. – P.1475–1478.
9. Экситонные спектры твердого раствора $ZnSe_{1-x}Te_x$ / А.Ю.Наумов, С.А.Пермогоров, А.Н.Резницкий и др. // ФТП. – 1987. – Т. 29, № 2. – С. 377–384.
10. Hanke M., Hennig D., Kaschte A. A Tight-Binding description of isovalent impurity clusters // Phys. Stat. Sol. (b). – 1987. – Vol. 143. – P. 655–661.

Статья поступила
1 февраля 2007 г.

Морозова Наталья Константиновна – доктор физико-математических наук, профессор кафедры полупроводниковой электроники МЭИ. *Область научных интересов:* изучение роли кислорода в создании и стабилизации собственно-дефектных и примесных центров в соединениях $A^{II}B^{VI}$.

Мидерос Мора Даниэль Алехандро – аспирант кафедры полупроводниковой электроники МЭИ. *Область научных интересов:* исследование оптических свойств сульфоселенидов цинка ZnS_xSe_{1-x} .

Зарядовое состояние центров люминесценции в структурах Si-SiO₂, подвергнутых последовательной имплантации ионами кремния и углерода

А.П.Барабан, Ю.В.Петров

Санкт-Петербургский государственный университет

Исследована электролюминесценция структур Si-SiO₂, подвергнутых последовательной ионной имплантации кремния и углерода, а также постимплантационному отжигу. Показано появление в результате ионной имплантации двух полос в спектре электролюминесценции с энергиями 2,7 и 4,3 эВ. После отжига в спектре появляется полоса с энергией 3,2 эВ, которую можно связать с образованием кластеров карбида кремния. Получены зарядовые характеристики исследуемых структур. Показано, что центры люминесценции, ответственные за все полосы, являются незаряженными.

Получение эффективных источников излучения на базе кремниевой технологии является одной из актуальных задач современной оптоэлектроники. Один из способов решения этой задачи – применение полупроводниковых нанокластеров (НК), сформированных в объеме диэлектрического слоя [1, 2]. В первую очередь предложено использовать кремниевые НК. В качестве диэлектрического слоя используется слой SiO₂, термически выращенный на кремниевой подложке. Это объясняется тем, что структуры Si-SiO₂ являются основой элементной базы современной микроэлектроники и технология получения данного диэлектрического слоя хорошо отработана. С целью создания избыточной концентрации кремния в окисном слое применяются такие методы, как ионная имплантация, осаждение нестехиометрического слоя SiO_x и т.п. Метод ионной имплантации широко используется в современной микроэлектронике и не требует существенных затрат на переоборудование технологического парка. Этот метод позволяет контролировать концентрацию и пространственное положение имплантируемой примеси. Преимуществом данного метода является возможность имплантации ионов практически любых химических элементов, что представляет особый интерес в плане формирования кластеров различных материалов. В [2, 3] рассматривалась возможность имплантации не только кремния, но и германия, а также углерода. В [4] предложено использовать в качестве излучающего материала НК карбида кремния SiC в слое SiO₂. В отличие от кремния и германия, SiC является эффективным источником излучения и используется в производстве светоизлучающих диодов. Получение таких НК проводилось путем последовательной имплантации кремния и углерода в окисный слой с последующим высокотемпературным отжигом.

Цель настоящей работы – исследование электролюминесцентных и зарядовых свойств структур Si-SiO₂, содержащих избыточный кремний и углерод в окисном слое, введенные путем последовательной ионной имплантации.

Методика эксперимента. Исследовались структуры Si-SiO₂, полученные путем влажного окисления кремния *p*-типа при температуре 1100 °С. Толщина окисного слоя составляла 400 нм. Первоначально проводилась последовательная имплантация ионов кремния с энергиями 130 и 60 кэВ, а затем углерода с энергией 60 кэВ (таблица).

Параметры имплантации

Образец	Этап имплантации		
	1	2	3
№ 1	Si ⁺ , 130 кэВ, 1,3·10 ¹⁶ см ⁻²	Si ⁺ , 60 кэВ, 5·10 ¹⁵ см ⁻²	C ⁺ , 60кэВ, 1·10 ¹⁶ см ⁻²
№ 2	Si ⁺ , 130 кэВ, 6,5·10 ¹⁶ см ⁻²	Si ⁺ , 60 кэВ, 2,5·10 ¹⁶ см ⁻²	C ⁺ , 60кэВ, 5·10 ¹⁶ см ⁻²

Условиям имплантации соответствует распределение избыточного кремния по глубине от 100 до 300 нм от поверхности SiO₂ с концентрациями в максимуме распределения 1 и 5 ат.% для образца № 1 и 2 соответственно. Имплантированный углерод локализован на глубине 100–250 нм, причем его концентрация в максимуме распределения совпадает с концентрацией избыточного Si [3, 4]. Постимплантационный отжиг структур проводился в атмосфере азота при температуре 1100 °С в течение 1 ч.

Спектры электролюминесценции (ЭЛ) регистрировались в системе электролит-диэлектрик-полупроводник (ЭДП) по методике, детально описанной в [5]. Регистрация спектров ЭЛ проводилась в режиме счета фотонов в спектральном диапазоне 250–900 нм при температуре 293 К.

Для исследования зарядовых свойств использовался метод высокочастотных вольт-фарадных характеристик (ВФХ). Измерения ВФХ проводились на частоте 1 МГц в системе ЭДП. Пространственное распределение заряда, встроенного в диэлектрический слой, определялось на основании измерения ВФХ в сочетании с послойным травлением окисного слоя водным раствором HF.

В качестве полевого электрода использовался одномолярный водный раствор Na₂SO₄. С тыльной стороны наносился омический контакт из In-Ga эвтектического сплава.

Экспериментальные результаты. Электролюминесценция. ЭЛ исследуемых структур наблюдается в электрических полях с напряженностью 5,6–8,2 МВ/см. В спектре ЭЛ структур Si-SiO₂, подвергнутых ионной имплантации, появляются полоса излучения с максимумом 2,7 эВ и сопутствующая ей менее интенсивная полоса с максимумом около 4,3 эВ (рис.1). Интенсивность этих полос ЭЛ возрастает при увеличении напряженности поля в окисном слое по экспоненциальному закону. Кроме того, в спектре наблюдаются полосы меньшей интенсивности с максимумами около 1,9 и 2,3 эВ. Пороговая напряженность электрического поля, необходимая для возбуждения ЭЛ, оказалась больше для образцов с меньшей дозой имплантации. Сравнение спектров ЭЛ при одинаковых плотностях тока показывает, что интенсивность полос 2,7 и 4,3 эВ растет при увеличении дозы имплантации. Отношение интенсивностей данных полос составляло 11±4 и сохранялось при изменении условий возбуждения.

Отжиг исследуемых структур приводит к уменьшению интенсивности полосы ЭЛ с максимумом 2,7 эВ и изменению вида спектра в коротковолновой области (рис.2). Аппроксимация набором гауссовых полос позволяет выделить в спектре основные полосы с максимумами около 2,7 и 3,2 эВ, а также слабые полосы с максимумами около 1,9 и 2,3 эВ. Интенсивность полосы 2,7 эВ возрастает при увеличении напряжения по экспоненциальному закону, аналогично неотожженным образцам, но пороговая напряженность поля, необходимая для возбуждения ЭЛ, составляет в этом случае 7,5 МВ/см.

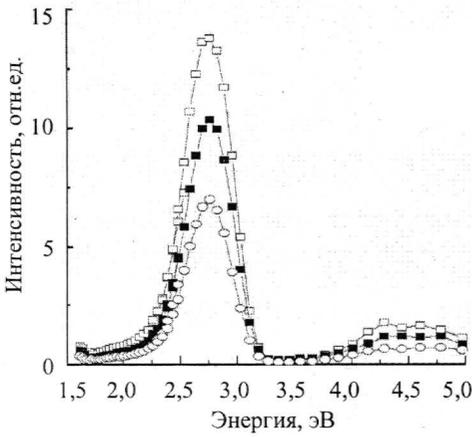


Рис.1. Спектры ЭЛ структур Si-SiO₂, подвергнутых совместной имплантации ионами углерода и кремния (Si-SiO₂:SiC 5%):
□ – 308 В; ■ – 301 В; ○ – 295 В

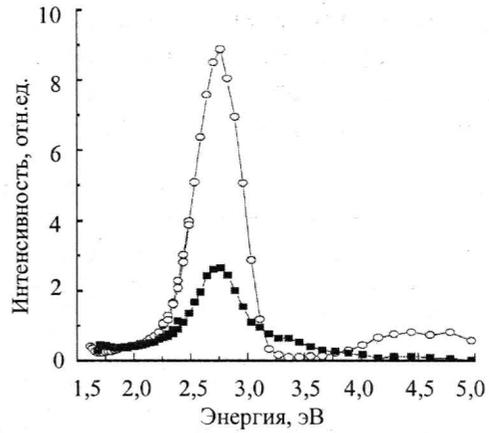


Рис.2. Спектры ЭЛ структур Si-SiO₂, подвергнутых совместной имплантации ионами углерода и кремния (Si-SiO₂:SiC 5%): ○ – до отжига; ■ – после отжига

Зависимость интенсивности полос 2,7 и 3,2 эВ от плотности тока через образец приведена на рис.3. Интенсивность полосы 2,7 эВ растет с увеличением плотности тока практически линейно, а полосы 3,2 эВ с некоторого значения перестают расти.

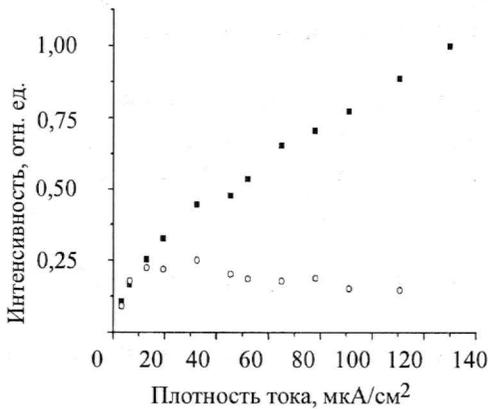


Рис.3. Зависимость интенсивности полос ЭЛ от плотности тока через образец: ■ – 2,7 эВ; ○ – 3,2 эВ

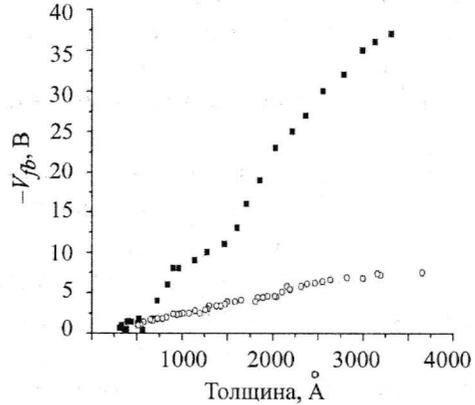


Рис.4. Зависимость напряжения $-V_{fb}$ от толщины окисного слоя при травлении: ■ – без отжига; ○ – отжиг в течение 1 ч

Зарядовые характеристики. На рис.4 представлены зависимости напряжения, соответствующего состоянию плоских зон в кремниевой подложке, от толщины окисного слоя при послойном травлении для образца № 1. Аппроксимация данной зависимости ломаной линией позволяет условно выделить четыре заряда, локализованных в окисном слое на разном расстоянии от границы с подложкой. Параметры этих зарядов следующие:

Q , см ⁻²	X , нм
$3,4 \cdot 10^{12}$	50
$-2,9 \cdot 10^{12}$	100
$3,3 \cdot 10^{12}$	150
$-2,3 \cdot 10^{12}$	200

Отжиг структур приводит к уменьшению суммарной величины встроенного заряда и исчезновению сложной зарядовой структуры. При этом остается только заряд, локализованный около границы с кремниевой подложкой. Величина этого заряда составляет $4,3 \cdot 10^{11}$ см⁻², а расстояние до межфазной границы не превышает 30 нм.

Для образца № 2 суммарный встроенный заряд превышает 10^{13} см⁻², что существенно затрудняет измерения. После отжига остается только заряд, локализованный около границы с подложкой, при этом его величина составляет $4,1 \cdot 10^{12}$ см⁻², а расстояние до межфазной границы не превышает 50 нм.

Обсуждение результатов. После ионной имплантации в слое SiO₂ образуются центры люминесценции, ответственные за полосы 2,7 и 4,3 эВ. Отметим, что данные полосы наблюдаются также в спектрах ЭЛ структур, подвергнутых имплантации ионами кремния [2, 6] и аргона [7]. В [6] появление этих полос излучения объясняется образованием в процессе ионной имплантации двухкоординированного по кислороду кремния (силиленового центра), энергия возбуждения которого составляет 5,0 эВ [8]. В данном случае наблюдаемые в спектре ЭЛ полосы также можно связать с силиленовым центром, образование которого в данных структурах может происходить как за счет радиационного разрушения структуры SiO₂, так и за счет внедряемого в окисный слой кремния.

Полосы излучения с максимумами 1,9 и 2,3 эВ наблюдаются в структурах, не подвергнутых ионной имплантации, и связаны с дефектами матрицы SiO₂ как присущими самому окислу, так и образовавшимися в процессе имплантации.

Отсутствие в образцах, подвергнутых отжигу, сложной зарядовой структуры в объеме окисного слоя и сохранение в спектре ЭЛ полосы с максимумом 2,7 эВ позволяют предположить, что центры люминесценции, ответственные за данную полосу, не связаны с зарядами в области имплантации. Кроме того, величина заряда, локализованного вблизи границы с подложкой, уменьшается в результате отжига на порядок, тогда как интенсивность полосы 2,7 эВ – приблизительно в 3 раза. Следовательно, можно считать, что центры люминесценции, ответственные за полосу 2,7 эВ, не заряжены. Обнаруженные в объеме SiO₂ заряженные центры являются радиационными дефектами, образовавшимися в процессе ионной имплантации. По данным ЭПР [9], в структурах, подвергнутых имплантации кремния, образуются положительно заряженные вакансии кислорода в кремний-кислородном тетраэдре. Положительный заряд в рассматриваемых структурах до отжига локализован в области 150 нм от межфазной границы, т.е. в области, соответствующей центру распределения имплантированного кремния. Это позволяет предположить, что данный заряд может быть связан с вакансиями кислорода.

Сравнение окисного слоя в сочетании со снятием спектра ЭЛ показывает, что центры люминесценции, ответственные за полосу 3,2 эВ, локализованы во внешней части окисла на расстоянии не более 150 нм от поверхности SiO₂. Отсутствие встроенного заряда на данной глубине в структурах, подвергнутых отжигу, позволяет предположить, что эти центры люминесценции также не заряжены.

По данным рентгеновской ФЭС [4] в аналогичных структурах после отжига максимум C–C и Si–C связей наблюдается на глубине 150 нм от поверхности образца, что соответствует максимуму распределения имплантированного углерода согласно данным ВИМС. Полоса ЭЛ с максимумом 3,2 эВ может быть связана с кластерами Si, C, SiC, образующимися в результате отжига в таких структурах [3, 4]. Детальная природа центров, ответственных за полосу люминесценции 3,2 эВ, требует дальнейших исследований.

Уменьшение интенсивности полосы 2,7 эВ в результате отжига может быть связано как с уменьшением количества соответствующих центров люминесценции, так и с изменением условий их возбуждения. Прекращение роста интенсивности полосы 3,2 эВ при плотностях тока больше 20 мкА/см² говорит о вовлечении в процесс излучения всех образовавшихся центров.

Таким образом, последовательная имплантация Si и C в объем SiO₂ приводит к появлению в спектрах ЭЛ полос с максимумами около 2,7 и 3,2 эВ (после дополнительного

отжига структур), которым соответствовали незаряженные центры люминесценции, а также к образованию в объеме окисного слоя сложной зарядовой структуры, связанной с радиационными дефектами.

Литература

1. Electroluminescence of silicon nanocrystals in MOS structures / *G.Franzo, A.Irrera, E.C.Moreira et al.* // Appl. Phys. A. – 2002. – Vol. 74. – P. 1–5.
2. *Rebohle L., Von Borany J., Frob N., Scorupa W.* The photo- and electroluminescence of silicon dioxide layers ion-implanted with group IV elements// Appl. Phys. B. – 2000. – Vol. 71. – P. 131–151.
3. White luminescence from Si⁺ and C⁺ ion-implanted SiO₂ films / *A.Perez-Rodriguez, O.Gonzalez-Varona, B.Garrido et al.* // J. Appl. Phys. – 2003. – Vol. 94, N 1. – P. 254–262.
4. Synthesis of luminescent particles in SiO films by sequential Si and C ion implantation / *O.Gonzalez-Varona, C.Bonafos, M.Lopez et al.* // Microelectronic Reliability. – 2002. – Vol. 40. – P. 885–888.
5. *Барабан А.П., Булавинов В. В., Коноров П. П.* Электроника слоев SiO₂ на кремнии. – Л.: Изд. ЛГУ, 1988. – С. 304.
6. *Барабан А.П., Егоров Д.В., Петров Ю.В, Милоглядова Л.В.* Электролюминесценция слоев SiO₂ с избыточным кремнием // Письма ЖТФ. – 2004. – Т. 30. – Вып.2. – С. 1–5.
7. *Барабан А.П., Коноров П.П., Малявка Л.В., Трошихин А.Г.* Электролюминесценция ионно-имплантированных структур кремний–диоксид кремния // ЖТФ. – 2000. – Т. 70. – Вып.8. – С. 87–90.
8. *Скуя Л.Н., Стрелецкий А.Н., Пакович А.Б.* Спектроскопические свойства двухкоординированных атомов кремния в стеклообразном диоксиде кремния // Физика и химия стекла. – 1988. – Т. 14. – С. 481–489.
9. Optical and structural characterization of Si nanocrystals ion beam synthesized in SiO₂: correlation between the surface passivation and the photoluminescence emission / *M.Lopez, B.Garrido, C.Bonafos et al.* // Solid State Electronics. – 2001. – Vol. 45, N 8. – P. 1495–1504.

Статья поступила
5 ноября 2006 г.

Барабан Александр Петрович – доктор физико-математических наук, профессор кафедры электроники твердого тела СПбГУ. *Область научных интересов:* неравновесные электронные процессы в тонких диэлектрических слоях на поверхности полупроводников.

Петров Юрий Владимирович – аспирант кафедры электроники твердого тела СПбГУ. *Область научных интересов:* физика полупроводников и диэлектриков.

Информация для читателей журнала

«Известия высших учебных заведений. Электроника»

С тематическими указателями статей за 1996 - 2006 гг.
и с содержанием последних номеров можно ознакомиться
на нашем сайте:

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

МИКРОЭЛЕКТРОННЫЕ ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ

УДК 621.38.049.77

Магнитоуправляемый двухполюсник с отрицательным дифференциальным сопротивлением и ВАХ N -типа

Ю.А. Чаплыгин

Московский государственный институт электронной техники
(технический университет)

А.И. Галушков

ГУ НПК «Технологический центр» МИЭТ

А.А. Семёнов, Д.А. Усанов

Саратовский государственный университет

Представлены результаты исследования воздействия постоянного магнитного поля на режимы работы активного двухполюсника, включающего двухколлекторный биполярный магнитотранзистор в качестве магниточувствительного элемента в управляющей цепи. Показана возможность реализации магнитоуправляемого прибора с отрицательным дифференциальным сопротивлением и ВАХ N -типа.

Создание полупроводниковых негатронов с характеристиками, управляемыми магнитным полем, безусловно, представляет широкий практический интерес, поскольку приборы такого рода позволяют с помощью одного схемотехнического решения реализовывать устройства различного функционального назначения [1–4].

Возможность синтеза активных двухполюсников с S -образными ВАХ, регулируемые индукцией приложенного магнитного поля, показана в работах [3, 4]. В настоящей работе приведены результаты исследования возможности создания полупроводникового магнитоуправляемого прибора с отрицательным дифференциальным сопротивлением (ОДС) и ВАХ N -типа.

Теорема, сформулированная Нильсоном и Уильсоном, позволяет синтезировать устройства с ОДС, обладающие как S -, так и N -образными ВАХ. Согласно этой теореме, чтобы двухполюсник обладал ОДС и ВАХ S - или N -типа, он должен представлять собой структуру с обратной связью. Под структурой с обратной связью подразумевается электронная схема, содержащая два транзистора n - p - n - или $(p$ - n - p)-типа или их комбинацию, сопротивления в которой могут быть представлены коротким замыканием или разомкнутой цепью.

Наличие в структуре обратной связи является необходимым, но не достаточным условием возникновения ОДС. Двухтранзисторная схема будет представлять собой устройство с ОДС, когда оба транзистора имеют возможность одновременно работать в линейном (активном) режиме, причем справедливы следующие положения:

- чтобы двухтранзисторное устройство с ОДС имело ВАХ S -типа, транзисторы должны быть комплементарными;

- для получения двухтранзисторного устройства с ВАХ N -типа оба транзистора должны быть одного типа проводимости [2].

Параметры ВАХ таких двухполюсников с ОДС можно варьировать, изменяя сопротивления резисторов, введенных в цепи положительных или отрицательных обратных связей устройств [1, 2]. Включая в цепи обратных связей элементы, проводимость которых зависит от величины приложенного внешнего магнитного поля, можно синтезировать структуры, параметры ВАХ которых управляются этим полем [3, 4]. Такой способ особенно эффективен при интегральном исполнении двухполюсников с ОДС, поскольку позволяет существенно снизить в изготавливаемой микросхеме количество управляющих выводов.

В качестве прототипа конструкции магнитоуправляемого двухполюсника была выбрана схема, выполненная на транзисторах одного типа проводимости и обладающая N -образной ВАХ, форму которой можно видоизменить от колоколообразной и пилообразной до трапецеидальной регулированием сопротивлений резисторов в цепях обратных связей, а также введением дополнительных обратных связей [2]. Выбор схемы прототипа был обусловлен удобством введения в ее состав двухколлекторного биполярного магнитотранзистора (БМТ) [5, 6] в качестве регулируемого элемента, проводимость которого изменяется под воздействием магнитного поля, причем отклик на приложенное воздействие представляет собой линейную зависимость в широком диапазоне значений величины поля.

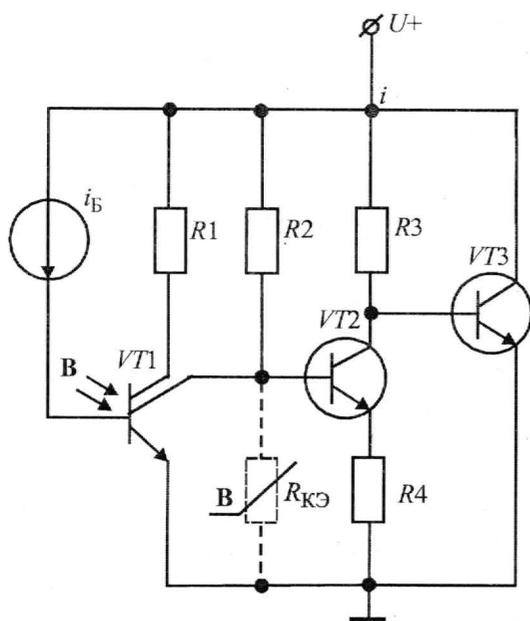


Рис.1. Упрощенная схема магнитоуправляемого двухполюсника с ОДС и ВАХ N -типа

Упрощенная схема такого прибора приведена на рис.1. По отношению к части схемы, выполненной на транзисторах $VT2$, $VT3$, узел, включающий в себя БМТ $VT1$ с источником базового тока i_B и резистором коллекторной нагрузки $R1$, по сути, представляет собой сопротивление $R_{КЭ}$ (изображено на рис.1 пунктирной линией), которое определяется действующим магнитным полем B . Резисторы $R_{КЭ}$ и $R2$ образуют делитель напряжения U , фиксирующий напряжение на переходе база-эмиттер $U_{БЭ2}$ транзистора $VT2$, причем $R2$ также выполняет роль коллекторной нагрузки в цепи второго коллектора БМТ ($R2 = R1$). При питающем напряжении U меньше некоторого порогового значения напряжение $U_{БЭ2}$ транзистора $VT2$ составляет величину, не достаточную для его открытия, т.е. транзистор $VT2$ закрыт. При этом практически все питающее напряжение прикладывается к переходу база-эмиттер транзистора $VT3$. Поэтому выходное дифференциальное сопротивление определяется преимущественно сопротивлением коллектор-эмиттер включившегося транзистора $VT3$. При питающем напряжении U , превышающем порог, транзистор $VT2$ включается, а транзистор $VT3$ выключается. Ток от источника питания протекает через делитель $R2$, $R_{КЭ}$, а также цепь, состоящую из резисторов $R3$, $R4$ и сопротивления перехода коллектор-эмиттер транзистора $VT2$. При этом резистор $R4$ образует цепь отрицательной обратной связи по току.

В случае, когда $R = R = 60 \text{ кОм}$, $R_3 = 200 \text{ кОм}$, $R_{КЭ} = 3 \text{ кОм}$, $R_4 = 4,7 \text{ кОм}$, на ВАХ устройства возникает падающий участок, на котором оно обладает ОДС N -типа. Изменение величины действующего магнитного поля B вызывает изменение сопротивления участка коллектор–эмиттер БМТ, в результате чего делитель напряжения $R_{КЭ}$ и R_2 определяет различные точки включения транзистора VT_2 , а падающий участок ВАХ N -типа перемещается вдоль оси напряжений. Следует отметить, что параметры БМТ в процессе изготовления устройства по интегральной технологии должны быть тщательно согласованы с остальными элементами схемы для соблюдения электрических режимов схемы по напряжению и току, а также выполнения условия изменения $R_{КЭ}$ в пределах $2,7\text{--}4,5 \text{ кОм}$ в диапазоне действующих значений магнитного поля.

Для проверки возможности создания магнитоуправляемого двухполюсника с ОДС и ВАХ N -типа разработано устройство, принципиальная электрическая схема которого приведена на рис.2. Усложнение схемотехнического решения по сравнению с изображенным на рис.1 вызвано необходимостью согласования предельных эксплуатационных характеристик, выходного импеданса и значений выходного сигнала типового бескорпусного кремниевого двухколлекторного магнитотранзистора Л5-11 [6] с электрическими параметрами остальной схемы. С этой целью в схему был введен компенсационный стабилизатор напряжения (транзистор VT_3 , стабилитрон VD и токозадающий резистор R_6), ограничивающий максимальное напряжение питания БМТ на уровне +9 В. Транзистор VT_2 , включенный по схеме эмиттерного повторителя, образует трансформатор импеданса, согласующий выходное сопротивление БМТ с низким входным сопротивлением каскада на транзисторе VT_4 , включенного по схеме с общим эмиттером. Делитель на резисторах R_3 , R_4 приводит уровень постоянного сигнала на выходе эмиттерного повторителя к допустимому значению входного смещения для транзистора VT_4 , входной ток которого определяет резистор R_5 . Сопротивление перехода коллектор–эмиттер VT_4 и резистор R_7 , включенные параллельно резистору R_9 , образуют эквивалент управляемого магнитным полем сопротивления $R_{КЭ}$ в схеме на рис.1. Подключение остальных элементов устройства полностью аналогично упрощенной электрической схеме и отличий в принципе работы эта часть конструкции не имеет.

Для численного анализа схемы, изображенной на рис.2, составлена PSpice-модель магнитотранзистора корректировкой параметров библиотечной модели кремниевого биполярного транзистора до значений, соответствующих электрическим характеристикам БМТ. Двухколлекторный выход прибора имитировали включенный в коллекторную цепь транзистора преобразователь ток–напряжение, выходной сигнал которого управлял двумя преобразователями напряжение–ток, подключенными к соответствующим резисторам коллекторных нагрузок. Воздействие магнитного поля имитировалось подключением источника напряжения между общим проводом схемы и выводами преобразователей напряжение–ток. Разбаланс, вносимый источником напряжения, приводил к перераспределению токов в выходных цепях модели, характерному для воздейст-

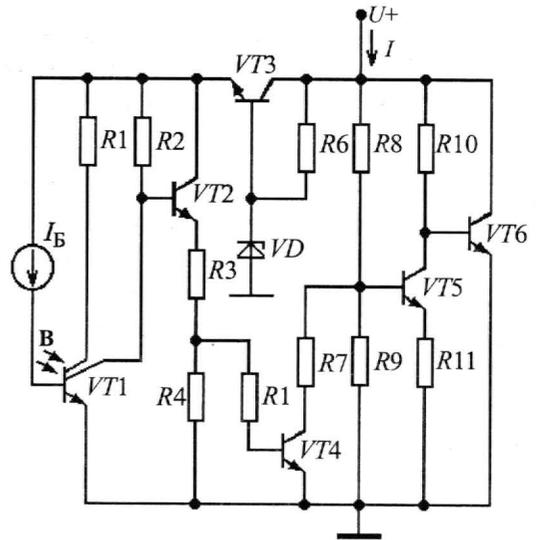


Рис.2. Принципиальная электрическая схема магнитоуправляемого прибора с ОДС и ВАХ N -типа

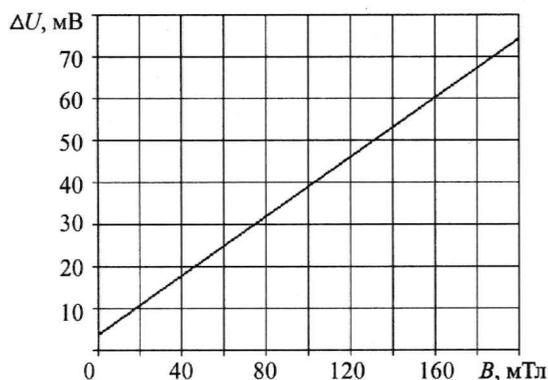


Рис.3. Вольт-тесловая характеристика кремниевого двухколлекторного БМТ типа Л5-11 (ΔU – разность напряжений между коллекторами)

вия магнитного поля на коллекторные токи реального магнитотранзистора. Коэффициенты передачи преобразователей подобраны так, что выходная характеристика модели полностью соответствовала вольт-тесловой характеристике кремниевого двухколлекторного БМТ типа Л5-11 (рис.3).

Моделирование работы магнитоуправляемого двухполюсника с отрицательным дифференциальным сопротивлением проводилось в программном пакете Electronics Workbench 5.12 Professional Edition, аппроксимирующем исследуемое устройство системой нелинейных дифференциальных уравнений, составленной методом узловых потенциалов, и вычисляющем мгновенные значения напряжений в узлах и токов в ветвях численным методом Гира шестого порядка.

ВАХ двухполюсника, полученные в результате численного анализа схемы (см. рис.2.) при различных значениях магнитного поля в интервале от -180 до 180 мТл, представлены на рис.4,а. Форма и взаимное расположение характеристик подтверждают выводы, сделанные при качественном анализе схемы, изображенной на рис.1:

ВАХ с участком ОДС;

- исследуемое устройство при заданных номиналах элементов обладает ВАХ с участком ОДС;
- падающий участок ВАХ N -типа при изменении магнитного поля перемещается вдоль оси напряжений, причем локальный максимум тока в точке перегиба увеличивается при смещении в область больших значений напряжения.

Для экспериментальной проверки полученных результатов был изготовлен макет устройства, технологически выполненный аналогично описанному в [4]. Дискретные элементы монтировались на миниатюрной печатной плате, а бескорпусной кремниевый БМТ закреплялся на специальном держателе, линейные размеры которого позволяли обеспечить размещение всей конструкции в калиброванном 10-миллиметровом зазоре лабораторного электромагнита. Фиксированные значения действующего в зазоре магнитного поля обеспечивались питанием электромагнита от стабилизированного источника постоянного тока. Номиналы элементов уточнялись в процессе моделирования и в экспериментальном образце имели следующие значения: $R1 = R2 = 30$ кОм; $R3 = 50$ кОм; $R4 = 5$ кОм; $R5 = 100$ кОм; $R6 = 820$ Ом; $R7 = 3$ кОм; $R8 = 60$ кОм; $R9 = 3,5$ кОм; $R10 = 200$ кОм; $R11 = 5,2$ кОм. В качестве транзисторов $VT2 - VT3$ использовались приборы типа КТ3102Б, в качестве VD – стабилитрон типа КС196. Транзисторный источник тока обеспечивал фиксированный ток базы магнитотранзистора 100 мкА.

Исследование ВАХ экспериментального устройства при различных значениях магнитного поля проводилось с помощью приставки-характериографа к осциллографу. Наблюдаемые характеристики фиксировались с помощью видеокамеры, имеющей интерфейс связи с компьютером. Представленные на рис.4,б осциллограммы ВАХ исследуемого устройства при значениях магнитного поля, задаваемых в диапазоне, аналогичном численному эксперименту, качественно соответствуют расчетным данным (см. рис.3). Количественное расхождение обусловлено разбросом коэффициентов передачи тока реальных транзисторов (в расчетах для всех транзисторов значение этого параметра принимается равным 300).

Исследование ВАХ экспериментального устройства при различных значениях магнитного поля проводилось с помощью приставки-характериографа к осциллографу. Наблюдаемые характеристики фиксировались с помощью видеокамеры, имеющей интерфейс связи с компьютером. Представленные на рис.4,б осциллограммы ВАХ исследуемого устройства при значениях магнитного поля, задаваемых в диапазоне, аналогичном численному эксперименту, качественно соответствуют расчетным данным (см. рис.3). Количественное расхождение обусловлено разбросом коэффициентов передачи тока реальных транзисторов (в расчетах для всех транзисторов значение этого параметра принимается равным 300).

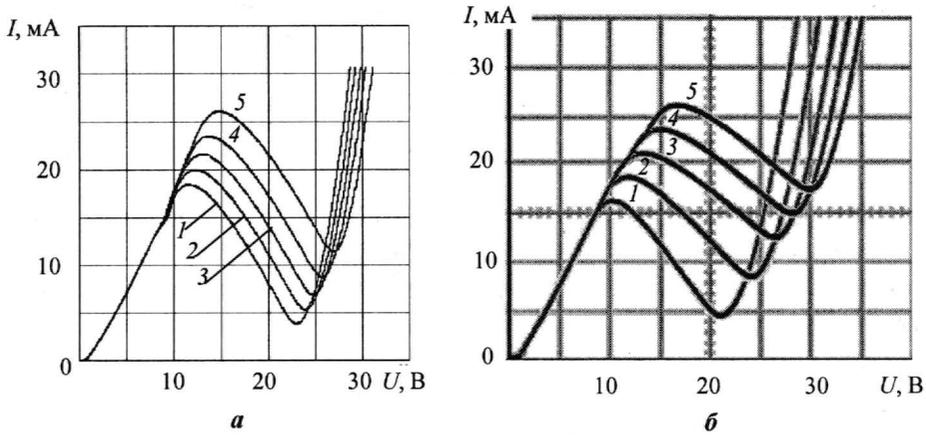


Рис.4. ВАХ исследуемого устройства при различных значениях внешнего магнитного поля (*а* – расчет; *б* – эксперимент). $B = -180$ мТл; $B = -90$ мТл; $B = 0$; $B = 90$ мТл; $B = 180$ мТл (кривые 1–5 соответственно)

Для исследования возможностей применения предложенного радиотехнического прибора на его основе был сконструирован автогенератор [7], принципиальная схема которого приведена на рис.5. С целью упрощения рисунка активный элемент, управляемый напряжением и магнитным полем, представлен на нем в виде двухполюсника с характеристикой $I(U, B)$. Положение рабочей точки на ВАХ двухполюсника определяют эдс источника питания E и включенный последовательно с источником резистор $R1 = 400$ Ом; емкость $C1 = 1$ мкФ и индуктивность $L1 = 100$ мГн образуют фильтр цепи питания устройства. Колебательный контур $L2, C3$, подключенный к активному элементу через емкостную связь ($C2 = 100$ нФ), предназначен для стабилизации частоты колебаний генератора и приближения их формы к гармонической. Резисторы $R2, R3 = 1$ Ом введены в схему генератора для наблюдения формы токов в цепях активного элемента и колебательного контура.

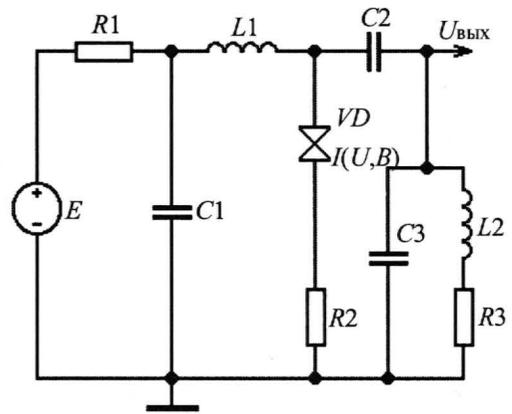


Рис.5. Принципиальная электрическая схема автогенератора на магнитоуправляемом двухполюснике с ОДС и ВАХ N-типа

При напряжении питания $E = +24$ В и параметрах элементов колебательного контура $L2 = 3$ мГн, $C3 = 400$ нФ выходной сигнал генератора был близок по форме к синусоидальному при изменении управляющего магнитного поля от 180 до 100 мТл, частота колебаний изменялась незначительно в пределах 4,63 – 4,75 кГц, что обусловлено стабилизирующим воздействием контура. Амплитуда сигнала при этом увеличивалась от 4 до 9 В, т.е. вольт-тесловая чувствительность устройства в указанном диапазоне значений магнитного поля составляла в среднем ~ 60 В/Тл, что более чем на два порядка превосходит значение этого параметра для магнитотранзистора, согласно его вольт-тесловой характеристике, приведенной на рис.3.

В интервале значений управляющего магнитного поля 100–160 мТл наблюдался режим многочастотной генерации. Переход в этот режим происходил через участок сложного динамического поведения генератора, напоминающего хаотическое. В диапазоне от –160 до –180 мТл форма колебаний приобретала существенно негармонический характер, колебательный режим становился неустойчивым, что в конечном итоге приводило к срыву генерации.

Проведенный численный анализ эквивалентной схемы генератора показал, что рассчитанные временные зависимости выходного сигнала при различных значениях индукции внешнего постоянного магнитного поля хорошо совпадали с экспериментальными данными. Интересной особенностью численного эксперимента оказалось, что исследуемая схема устойчиво демонстрирует хаотическое поведение (рис.6) при изменении значения поля в пределах 102–94 мТл, в то время как в физическом эксперименте этот режим был неустойчив и система быстро переходила к многочастотной генерации. Такое поведение реального генератора можно объяснить тем, что температурная нестабильность полупроводниковых приборов, пульсации источника питания, а также инерционность электромагнита в физическом эксперименте выводят исследуемую динамическую систему из состояния неустойчивого равновесия.

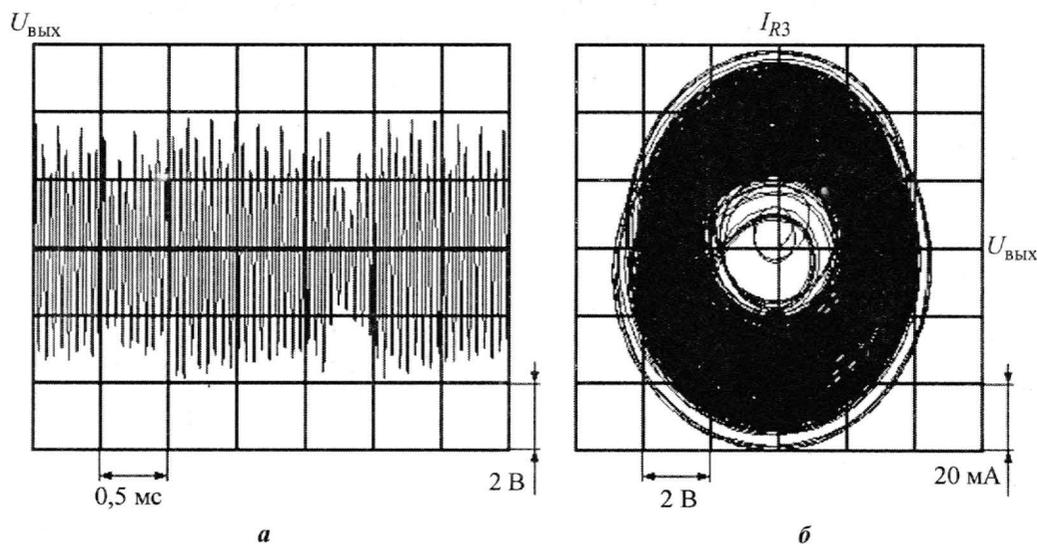


Рис.6. Зависимость выходного напряжения от времени (а) и фазовый портрет колебаний (б) исследуемого автогенератора в хаотическом режиме

Физически перестройка генератора в различные колебательные режимы при изменении значения и направления внешнего магнитного поля объясняется перемещением рабочей точки на ВАХ активного элемента, обусловленным сдвигами самой характеристики под воздействием меняющегося управляющего поля относительно нагрузочной прямой.

Таким образом, проведенные исследования показали возможность создания активного двухполюсника с ВАХ N -типа, положение участка ОДС на характеристике которого определяется направлением и индукцией магнитного поля, воздействующего на прибор. Автогенератор на таком негатроне позволял обеспечить в диапазоне значений магнитного поля 180–100 мТл вольт-тесловую чувствительность, в среднем более чем на два порядка превышающую аналогичный параметр для кремниевого двухколлекторного магнитотранзистора типа Л5-11.

Литература

1. *Арефьев А.А., Серьезнов А.Н., Степанова Л.Н.* Эквиваленты приборов с отрицательным дифференциальным сопротивлением. – М.: Знание, 1987. – Сер. Радиоэлектроника и связь. – № 2. – 64 с.
2. *Степанова Л.Н.* Новые устройства с отрицательным дифференциальным сопротивлением // За рубежом радиоэлектроника. – 1991. – № 8. С. 42–51.
3. Магнитотристор с регулируемыми характеристиками в низкоомном состоянии / *Ю.А. Чаплыгин, А.И. Галушков, А.А. Семенов и др.* // Изв. вузов. Электроника. – 2004. – № 3. С. 42–45.
4. *Чаплыгин Ю.А., Галушков А.И., Семенов А.А., Усанов Д.А.* Магнитоуправляемый динистор // Изв. вузов. Электроника. – 2005. – № 6. С. 56–60.
5. *Егизарян Г.А., Стафеев В.И.* Магнитодиоды, магнитотранзисторы и их применение. – М.: Радио и связь, 1987. – 88 с.
6. *Амеличев В.В., Галушков А.И., Зубенко Ф.Г., Чаплыгин Ю.А.* Интегральные датчики магнитного поля // Электронная промышленность. – 1992. – № 3. – С. 58, 59.
7. Дiodные генераторы и усилители СВЧ / *Давыдова Н.С., Данюшевский Ю.З.* – М.: Радио и связь, 1986. – 184 с.

Статья поступила
10 января 2007 г.

Чаплыгин Юрий Александрович – член-корреспондент РАН, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой интегральной электроники и микросистем, ректор МИЭТ. *Область научных интересов:* твердотельная электроника, радиоэлектронные компоненты, микро- и нанoeлектроника, физика и технология сенсоров и микросистем.

Галушков Александр Иванович – кандидат технических наук, начальник научно-технического отдела ГУ НПК «Технологический центр» МИЭТ. *Область научных интересов:* проектирование и разработка технологии изготовления магниточувствительных сенсоров и микросистем, элементной базы аналогово-цифровых КМОП ИС.

Семёнов Андрей Андреевич – кандидат физико-математических наук, доцент кафедры физики твердого тела СГУ. *Область научных интересов:* твердотельная электроника, микросхемотехника, применение нелинейной динамики в полупроводниковой электронике, радиофизика.

Усанов Дмитрий Александрович – доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой физики твердого тела, проректор по научной работе СГУ. *Область научных интересов:* твердотельная электроника СВЧ, радиоволновые и оптические методы контроля, применение нелинейной динамики в полупроводниковой электронике.

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.

**Подписной индекс
47570**

Влияние параметров канала полевого транзистора на характеристики интегральной микросхемы истокового повторителя

В.П.Падеров, С.В.Никитанов

Мордовский государственный университет им. Н.П.Огарева

Проанализировано влияние параметров канала полевого транзистора с управляющим $p-n$ -переходом на электрические параметры интегральной микросхемы истокового повторителя, работающей в малогабаритном электрентном микрофоне. Выведены аналитические выражения, характеризующие зависимости параметров истокового повторителя от геометрических размеров канала. Проведен анализ зависимостей, полученных по аналитическим выражениям и по результатам двумерного моделирования полевого транзистора и схемы истокового повторителя в TCAD.

Интегральная микросхема истокового повторителя (ИМС ИП) выполняет функцию согласования высокого выходного импеданса электрентных микрофонов (ЭМ) с последующим усилителем звуковой частоты. Современные ЭМ малогабаритны, что расширяет область их применения, в том числе в заушных и внутриканальных слуховых аппаратах.

Основными электрическими параметрами ИМС, работающей в малогабаритном ЭМ, являются коэффициент передачи по напряжению A_V и ток потребления I_{CC} . Типовое значение A_V для производимых ИМС ИП составляет 0,4–0,6 при напряжении питания $V_{CC} = 1,3$ В и проходной емкости схемы измерения $C_S = 10$ пФ, отражающей емкость мембраны ЭМ. В электрической схеме слуховых аппаратов истоковый повторитель питается от аккумуляторной батареи напряжением 1,3 В или от литиевой батарейки напряжением 1,5 В. Предпочтительнее запитывать ИМС ИП от внутреннего стабилизатора слухового аппарата, выходное напряжение которого составляет $\sim 0,9$ В.

В состав электрической принципиальной схемы ИП входят полевой транзистор с управляющим $p-n$ -переходом (ПТУП) VT , диод смещения затвора VD и нагрузочное сопротивление R_L (рис. 1).

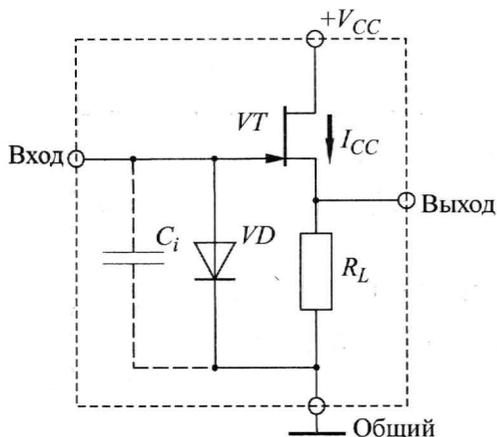


Рис. 1. Принципиальная схема ИМС ИП

Минимизация размеров ЭМ приводит к уменьшению емкости его звуковой мембраны C_S . Емкость C_S в совокупности с входной емкостью ИМС C_i (см. рис. 1) представляют емкостной делитель на входе ИМС. С уменьшением C_S при постоянной C_i и передаточной проводимости ПТУП коэффициент передачи емкостного делителя и ИМС падает. Для увеличения A_V необходимо уменьшать C_i и увеличивать передаточную проводимость ПТУП. Поэтому актуальна разработка новой ИМС ИП, работающей при пониженном

напряжении питания до 0,9 В и при малом токе потребления ($I_{CC} < 40$ мкА) и имеющей $A_V > 0,5$ при емкости мембраны электретного микрофона $C_S = 5$ пФ (меньшие габариты электретного кристалла).

Проведенное моделирование использовано при разработке такой ИМС ИП. Входная емкость ИМС и передаточная проводимость ПТУП в основном зависят от конструкции и физической структуры ПТУП: геометрических размеров области канала, параметров профилей и характера p - n -переходов.

Из анализа эквивалентной схемы следует, что коэффициент передачи по напряжению ИМС определяется [1] как

$$A_V = A_1 A_2. \quad (1)$$

Здесь A_1 – коэффициент передачи емкостного делителя на входе ИМС; A_2 – коэффициент передачи, обусловленный передаточной проводимостью ПТУП g_{fs} и сопротивлением нагрузки R_L ;

$$A_1 = \left(1 + \frac{C_i}{C_S} \right)^{-1}, \quad (2)$$

где C_i – входная емкость ИМС; C_S – емкость звуковой мембраны ЭМ.

Физическая структура ПТУП с обозначением геометрических размеров канала n -типа показана на рис.2. В [1] получено, что входная емкость определяется в основном емкостью затвора ПТУП и паразитной емкостью контактной площадки C_p :

$$A_1 = \left(1 + \frac{C_{J\text{уд}} LZ + C_p}{C_S} \right)^{-1}, \quad (3)$$

где $C_{J\text{уд}}$ – удельная емкость p - n -перехода затвора; L, Z – длина и ширина канала ПТУП (см. рис.2).

Коэффициент передачи A_2 в выражении (1) определяется передаточной проводимостью g_{fs} и сопротивлением нагрузки ПТУП R_L [2]:

$$A_2 = \left(1 + \frac{1}{g_{fs} R_L} \right)^{-1}. \quad (4)$$

Из анализа работы ПТУП следует: чтобы A_V и I_{CC} ИМС не зависели от напряжения питания V_{CC} , ПТУП должен работать в области насыщения его выходных характеристик. Дальнейшие аналитические выводы были получены в предположении, что характеристики ПТУП подчиняются схемотехнической модели Шихмана–Ходжеса [3], в которой режим насыщения выходных характеристик определяется выражением для тока стока

$$I_d = \beta (1 + \lambda V_{ds}) (V_{gs} - V_{TO})^2, \quad (5)$$

где β – коэффициент модели, определяющий крутизну; λ – коэффициент модуляции длины канала ПТУП; V_{ds} , V_{gs} и V_{TO} – напряжения сток–исток, затвор–исток и пороговое напряжение ПТУП соответственно.

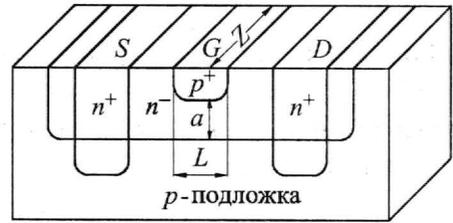


Рис.2. Физическая структура ПТУП в ИМС ИП

Передаточная проводимость g_{fs} , полученная из выражения (5), вычисляется по формуле

$$g_{fs} = 2\sqrt{\beta I_d (1 + \lambda V_{ds})}. \quad (6)$$

Если пренебречь модуляцией длины канала ПТУП и положить, что $\lambda V_{ds} \ll 1$, выражение (6) примет вид

$$g_{fs} = 2\sqrt{\beta I_d}. \quad (7)$$

Параметр модели β можно выразить через параметры канала ПТУП, используя следующие приближения: однородно легированный канал, плавный канал и резкие границы областей пространственного заряда в канале [4]:

$$I_{ds0} = \frac{q^2 \mu N_D^2 a^3 Z}{6 \epsilon_0 \epsilon_s L}, \quad (8)$$

$$|V_{TO}| = \frac{q N_D a^2}{2 \epsilon_0 \epsilon_s}, \quad (9)$$

$$\beta = \frac{I_{ds0}}{V_{TO}^2} = \frac{2 \mu \epsilon_0 \epsilon_s Z}{3 a L}, \quad (10)$$

где I_{ds0} – ток стока ПТУП при $V_{gs} = 0$; q – заряд электрона; μ – средняя подвижность электронов в канале; N_D – усредненная концентрация доноров в канале; a, Z, L – геометрические размеры канала (см. рис.2); ϵ_0 – диэлектрическая постоянная вакуума; ϵ_s – относительная диэлектрическая проницаемость кремния.

Режим насыщения ПТУП устанавливается при выполнении условия [3]

$$V_{ds} > V_{gs} - V_{TO}, \quad (11)$$

которое для схемы ИП преобразуется к виду

$$|V_{TO}| \leq V_{CC} - \Delta V_D, \quad (12)$$

где ΔV_D – падение напряжения на диоде VD (см. рис.1).

При напряжении питания ИМС $V_{CC} = 0,9$ В и $\Delta V_D \leq 0,1$ В $|V_{TO}|$ должно быть не более 0,8 В.

Ток потребления ИМС I_{CC} или ток стока ПТУП I_d можно рассчитать на основе уравнения (5) из анализа принципиальной схемы ИМС ИП, пренебрегая эффектом модуляции длины канала:

$$I_{CC} = I_d = \frac{\Delta V_D - V_{TO}}{R_L} - \frac{1}{2\beta R_L^2} \left[\sqrt{4\beta R_L (\Delta V_D - V_{TO}) + 1} - 1 \right], \quad (13)$$

где второе слагаемое при $V_{TO} = -0,7$ В и $\beta > 5 \cdot 10^{-4}$ А/В² составляет не более 30% от первого. Если пренебречь вторым слагаемым и малой величиной ΔV_D , то I_{CC} в основном зависит от порогового напряжения и сопротивления нагрузки:

$$I_d \approx \frac{|V_{TO}|}{R_L}. \quad (14)$$

С учетом (9), (10) и (14) выражение (7) будет иметь вид

$$g_{fs} \approx \sqrt{\frac{4 q N_D \mu Z a}{3 L R_L}}. \quad (15)$$

Подставив (15) в (4), получим выражение, связывающее A_2 с геометрическими размерами канала ПТУП

$$A_2 \approx \left(1 + \sqrt{\frac{3 L}{4 q N_D \mu a Z R_L}} \right)^{-1}. \quad (16)$$

Из анализа выражения (14) следует, что ток потребления ИМС определяется в основном пороговым напряжением ПТУП и сопротивлением нагрузки. Пороговое напряжение определяется минимально допустимым напряжением питания (12) и зависит от глубины канала и концентрации примеси в канале (9).

Из анализа (3) и (16) можно сделать следующие выводы: уменьшение длины канала увеличивает как A_1 , так и A_2 , а значит и коэффициент передачи ИМС в целом; глубина канала не влияет на A_1 , но с ее увеличением возрастает A_2 , поэтому глубина должна быть максимально возможной, но такой, чтобы пороговое напряжение не превышало 0,8 В; увеличение ширины канала приводит к уменьшению A_1 и к увеличению A_2 , поэтому для максимальной величины A_V величина Z должна быть оптимальной.

Сделанные исходные допущения и выведенные на их основе соотношения проверялись двумерным физико-топологическим моделированием физической структуры ПТУП и переходного процесса в принципиальной схеме ИМС в системе приборного и технологического моделирования TCAD. Двумерная модель ПТУП была получена на основе параметров физической структуры ИМС – прототипа КА1436УЕ1, выпускаемой на производственном объединении «Интеграл» (г. Минск).

Физическая структура ИМС представляет собой структуру, получаемую методом трех диффузий. В исходную подложку p -типа кремния последовательно проводят ионное легирование фосфора с последующей диффузией для создания n^- -области канала и n^+ -областей истока и стока. Затем ионным легированием бора с последующим отжигом формируется верхняя затворная область p^+ -типа. Была создана двумерная модель структуры ПТУП с гауссовскими профилями распределения примеси для каждого p - n -перехода.

Для низколегированной n^- -области кармана, имеющей глубину залегания p - n -перехода $x_{Jc} = 0,75$ мкм и поверхностное сопротивление $R_S = 2,75$ кОм/□, концентрация примеси в максимуме составляет $N_p = 10^{17}$ см⁻³, положение максимума $R_p = 0,09$ мкм. Для областей истока и стока с глубиной залегания p - n -перехода $x_{Js-d} = 1,2$ мкм и $R_S = 20$ Ом/□, $N_p = 1,4 \cdot 10^{20}$ см⁻³, $R_p = 0,09$ мкм.

Для области затвора, имеющей глубину залегания p - n -перехода $x_{Jg} = 0,3$ мкм, $N_p = 10^{20}$ см⁻³, $R_p = 0,31$ мкм. Глубина канала полученной структуры ввиду технологического разброса изменяется в пределах $a = 0,41$ – $0,49$ мкм.

На рис.3 показаны зависимости параметров ИМС $A_V(L, a, Z, R_L)$ и $I_{CC}(a, R_L)$, построенные как по аналитическим выражениям, так и по данным моделирования. Из анализа полученных зависимостей можно сделать следующие выводы.

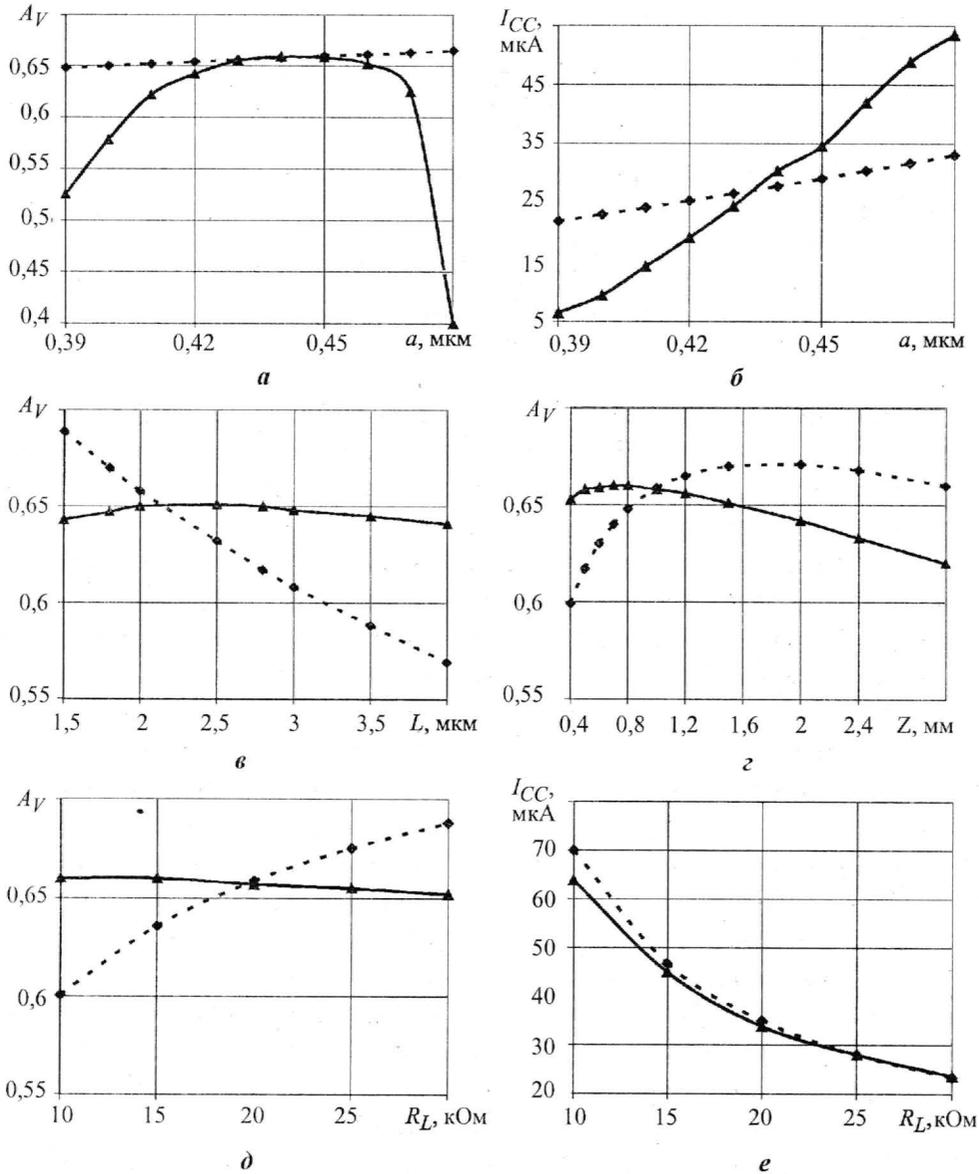


Рис.3. Зависимости параметров ИМС ИП: а – $A_V(a)$, $Z=1$ мм, $L=2$ мкм; б – $I_{CC}(a)$, $Z=1$ мм, $L=2$ мкм; в – $A_V(L)$, $Z=1$ мм; г – $A_V(Z)$, $L=2$ мкм, $a=0,45$ мкм; д – $A_V(R_L)$; е – $I_{CC}(R_L)$.

— \blacktriangle — аналитическая; — \blacklozenge — по модели

1. Коэффициент передачи и ток потребления зависят от глубины канала (рис.3,а,б), что связано с его частичным обеднением при пороговом напряжении меньше 0,8 В. При глубине канала менее 0,4 мкм концентрация свободных электронов n меньше разностной концентрации доноров и акцепторов в канале ($N_D - N_A$) более чем в 10 раз, т.е. нарушается приближение резких границ областей пространственного заряда в канале. При глубине канала более 0,47 мкм $V_{TO} > 1$ В и ПТУП выходит из режима насыщения, что приводит к резкому уменьшению A_V .

2. Зависимость A_V от длины канала более слабая, чем рассчитанная по аналитическим соотношениям (рис.3,в). Вероятно, такое поведение обусловлено нарушением приближения плавного канала и не имеет смысла делать его длину меньше 2 мкм, поскольку уменьшение длины приводит к спаду A_V .

3. Зависимость A_V от ширины канала имеет максимум, что следует как из результатов моделирования, так и из аналитических расчетов (рис.3,з), однако по результатам моделирования эта зависимость более слабая.

4. Коэффициент передачи слабо зависит от нагрузочного сопротивления (рис.3,д), которое влияет в основном на ток потребления (рис.3,е).

В результате моделирования переходного процесса ИМС ИП в программе Dessis при глубине канала $a = 0,45$ мкм, длине $L = 2$ мкм, ширине $Z = 1$ мкм, паразитной емкости контактной площадки $C_p = 1$ пФ, нагрузочном сопротивлении $R_L = 20$ кОм получены значения для коэффициента передачи $A_V \approx 0,66$ и тока потребления $I_{CC} = 35$ мкА.

Литература

1. **Никитанов С.В., Падеров В.П., Горячкин Ю.В.** Оптимизация геометрических размеров ПТУП в ИМС истокового повторителя // Материалы науч. конф. «XXXIV Огаревские чтения». В 2 ч. – Саранск: Изд-во Мордов. ун-та, 2006. – Ч. 2. – С. 221–222.
2. **Соклоф С.** Аналоговые интегральные схемы: Пер с англ. – М.: Мир, 1988. – 583 с.
3. **Massobrio G., Antognetti P.** Semiconductor device modeling with SPICE. – Second Ed. McGraw-Hill, Inc., 1988. – 479 p.
4. **Зи С.** Физика полупроводниковых приборов. Кн. 1. – М.: Мир, 1984. – 456 с.

Статья поступила
10 ноября 2006 г.

Падеров Виктор Петрович – кандидат физико-математических наук, доцент, заведующий кафедрой микроэлектроники МГУ им. Н.П.Огарева. *Область научных интересов:* проектирование интегральных микросхем, физика полупроводниковых структур.

Никитанов Сергей Валерьевич – аспирант кафедры микроэлектроники МГУ им. Н.П.Огарева. *Область научных интересов:* разработка и моделирование специализированных интегральных микросхем для слуховых аппаратов, физико-топологическое моделирование полупроводниковых приборов.

Книжные новинки



Неволин В.К. Зондовые нанотехнологии в электронике. - 2-е изд., испр. и доп. - М.: Техносфера, 2006. - 160 с.



Прогресс в микроэлектронике связывают с уменьшением линейных размеров функциональных элементов. Если их размеры становятся порядка нанометров, то существенными являются квантовые эффекты, принципиально меняющие физику работы. Созданием таких элементов и интегральных квантовых схем на их основе занимается нанотехнология.

В монографии изложены физические основы зондовой нанотехнологии на базе сканирующих туннельных и атомно-силовых микроскопов, показаны основные достижения, обсуждаются проблемы, требующие решения.

Предназначена для студентов старших курсов, аспирантов и молодых ученых, желающих познакомиться с новым научным направлением и попробовать свои силы в развитии технологии XXI века.

СХЕМОТЕХНИКА И ПРОЕКТИРОВАНИЕ

УДК 519.6:621.3.049.77

Специальная диаграмма Вороного для построения графа ограничений в задачах топологического проектирования СБИС

К.К.Малинаускас

Московский государственный институт электронной техники
(технический университет)

Представлен метод построения графа ограничений в задачах сжатия и корректировки топологии СБИС, основанный на диаграмме Вороного специального вида. С использованием концепции абстрактной диаграммы Вороного алгоритм имеет среднюю сложность $O(n \log n)$, что сравнимо с лучшими известными методами. Динамическое перестроение графа требует $O(n)$ времени в худшем случае при локальном изменении топологии.

Обычная топология ИС представляет собой набор прямоугольных фигур на плоскости со сторонами, параллельными координатным осям. Фигуры соответствуют различным объектам на кристалле (транзисторам, трассировочным соединениям и др.) и располагаются в определенных слоях. Задача сжатия топологии СБИС состоит в минимизации общей площади кристалла, занимаемой интегральной схемой, и уменьшении неиспользуемой площади при сохранении функциональности схемы [1]. Ограничениями задачи являются, во-первых, электрическая связность элементов топологии, во-вторых, технологические правила, налагаемые производственным процессом. Задача корректировки заключается в минимальных трансформациях и перемещениях отдельных элементов топологии с целью максимального удовлетворения технологических правил [2]. Обе задачи имеют общие ограничения, но разные целевые функции. Близкой является также задача проверки правильности топологии (Design Rule Checking), в которой создается отчет об ошибках, связанных с нарушениями правил проектирования [3]. На практике часто используются сходные методы решения перечисленных задач, в частности применение графа ограничений и определенного класса алгоритмов из теории графов [4].

Граф ограничений. Технологические правила проектирования ИС абстрагируются от деталей процесса и задаются в виде ограничений на размеры, форму и расположение элементов топологии. Большинство одномерных правил описываются в виде разностных ограничений на координаты фигур в одном из ортогональных направлений, которые можно представить в виде графа ограничений (ГО). Вершинами ГО являются координаты подвижных элементов топологии, например сторон многоугольников. Ребро в графе $x_i \rightarrow x_j$ с весом a соответствует линейному ограничению $x_j - x_i \geq a$. Построение ГО является наиболее затратной по времени процедурой в задачах проверки правильности топологии, ее исправления и сжатия [1, 2].

Диаграмма Вороного. В настоящей работе предлагается новый метод построения ГО с помощью диаграммы Вороного специального вида. Диаграмма Вороного (ДВ) для

набора точечных объектов есть разбиение плоскости на ячейки, каждая из которых – область точек, расположенных ближе к одному из объектов. ДВ представляется плоским графом, двойственный граф для которого (граф Делоне) отражает отношение соседства между объектами. Обобщим ДВ для вертикальных отрезков (сторон фигур) таким образом, чтобы граф Делоне отражал отношение горизонтальной видимости между отрезками. Тогда ребра ГО соответствуют ребрам графа Делоне.

Построение графа ограничений с помощью диаграммы Вороного специального вида. Рассмотрим граф горизонтальных ограничений (полученные результаты применимы и к графу вертикальных ограничений, если поменять оси координат местами).

В качестве вершин графа возьмем вертикальные стороны многоугольников – элементов топологии схемы, т.е. будем считать, что все многоугольники потенциально могут двигаться и трансформироваться. На рис.1 показаны возможные варианты ограничений между сторонами фигур в одном топологическом слое и для фигур в двух различных слоях топологии. Ребро в графе появляется, только в случае, если между соответствующими сторонами соответствующих фигур имеется отношение видимости вдоль горизонтального направления, т.е. их проекции на ось y пересекаются.

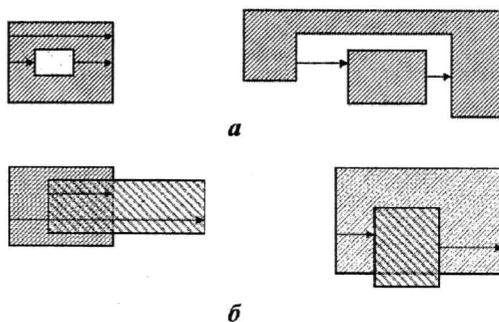


Рис.1. Варианты ограничений ширины фигуры (слева) и расстояния между фигурами (справа) в одном слое (а); перекрытия (слева) и включения (справа) фигур в различных слоях (б)

Введем понятие специальной диаграммы Вороного, естественным образом отражающей это отношение видимости. ДВ построим для объектов – вертикальных отрезков плоскости, соответствующих вертикальным сторонам многоугольников. Зададим функцию расстояния от точки u с координатами (x_u, y_u) до объекта-отрезка p с координатами концов (x_p, y_{p1}) и (x_p, y_{p2}) :

$$d(u, p) = \begin{cases} |x_u - x_p|, & y_u \in [y_{p1}, y_{p2}], \\ +\infty, & y_u \notin [y_{p1}, y_{p2}]. \end{cases}$$

На рис.2,а показаны возможные варианты биссектрис между вертикальными отрезками с заданной функцией расстояния. Видно, что при обычном определении биссектрисы как множества точек, равноудаленных от пары объектов, она может содержать ограниченный вертикальный отрезок и одну или две горизонтальные плоские полосы.

Пусть задан набор объектов – вертикальных отрезков p_1, \dots, p_n , и для каждой пары объектов p_i и p_j , $1 \leq i \neq j \leq n$, определена область доминирования p над q : $D(p, q) = \{u \mid d(u, p) < d(u, q)\}$. Биссектрисой $J(p, q)$ назовем теперь границу $\text{bd } D(p, q)$. В этом случае она всегда является неограниченной кривой и не содержит плоских областей. Однако при таком определении биссектриса не является симметричной, а плоскость может содержать области, не относящиеся ни к одной из областей доминирования (рис.2,б).

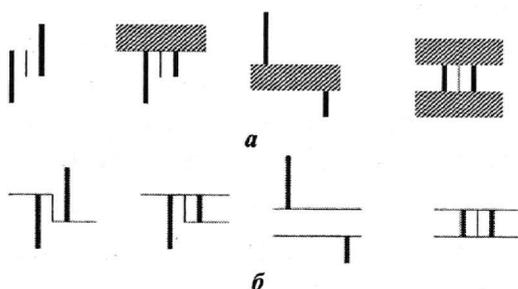


Рис.2. Возможные варианты биссектрисы как места точек, равноудаленных от пары объектов (а); как границы области доминирования, которая определяется функцией расстояния (б)

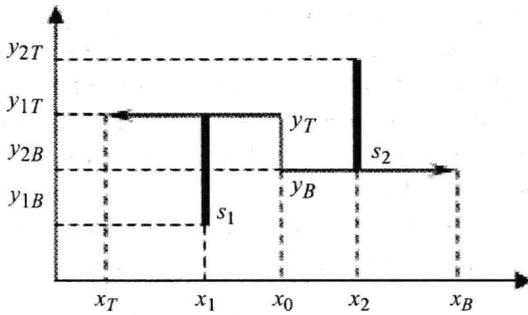


Рис.3. Окончательное определение биссектрисы

Изменим определение биссектрисы так, чтобы области доминирования вместе с биссектрисой покрывали всю плоскость. Пусть отрезок s_1 находится слева от s_2 . Биссектрисой будем называть кривую, состоящую из вертикального отрезка и двух лучей (рис.3).

Координаты вертикального отрезка:

$$x_0 = \frac{x_1 + x_2}{2}, \quad y_B = \max\{y_{1B}, y_{2B}\}, \\ y_T = \min\{y_{1T}, y_{2T}\}.$$

Направления горизонтальных лучей:

$$x_B = \begin{cases} +\infty, & y_{1B} < y_{2B}, \\ -\infty, & y_{1B} \geq y_{2B}; \end{cases} \quad x_T = \begin{cases} -\infty, & y_{1T} < y_{2T}, \\ +\infty, & y_{1T} \geq y_{2T}. \end{cases}$$

Таким образом, заданная система областей доминирования и биссектрис удовлетворяет аксиомам абстрактной диаграммы Вороного (АДВ) [5]:

- $D(p, q)$ является открытым неограниченным подмножеством \mathbf{R}^2 ;
- $J(p, q) = J(q, p)$ и $\mathbf{R}^2 = D(p, q) \cup J(p, q) \cup D(q, p)$ – дизъюнктивное объединение;
- $J(p, q)$ – кривая, гомеоморфная интервалу $(0,1)$;
- пересечение двух биссектрис имеет конечное число компонент связности.

АДВ задается следующим образом:

$$R(p, q) := \begin{cases} D(p, q) \cup J(p, q), & p < q, \\ D(p, q), & p > q, \end{cases}$$

$$EVR(p, S) := \bigcap_{q \in S, q \neq p} R(p, q), \quad VR(p, S) := \text{int } EVR(p, S),$$

$$V(S) := \bigcup_{p \in S} \text{bd } EVR(p, S).$$

Здесь $VR(p, S)$ – ячейка Вороного объекта p , или p -ячейка относительно множества объектов S ; $EVR(p, S)$ – расширенная ячейка Вороного объекта p относительно S ; $V(S)$ – абстрактная диаграмма Вороного множества объектов S ; int, bd – обозначение внутренней и границы множества соответственно.

Соблюдаются также следующие два условия, необходимые для корректного определения АДВ (для всех непустых подмножеств $S' \subseteq S$):

- $\forall p \in S' \quad VR(p, S') \neq \emptyset$, $EVR(p, S')$ и $VR(p, S')$ – линейно связные множества;
- $\mathbf{R}^2 = \bigcup_{p \in S'} EVR(p, S')$ – дизъюнктивное объединение.

Всевозможные варианты начертания определенных биссектрис показаны на рис.4, а на рис.5 представлена ДВ специального вида для набора вертикальных отрезков. ДВ является плоским графом, ребра которого суть ломаные линии, состоящие из горизонтальных и вертикальных отрезков. В общем случае ребро Вороного может содержать один вертикальный отрезок (возможно, вырожденный в точку)

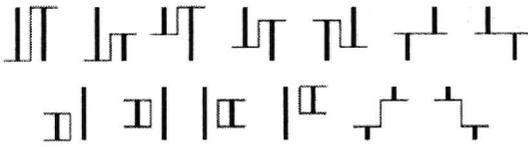


Рис.4. Возможные варианты биссектрисы

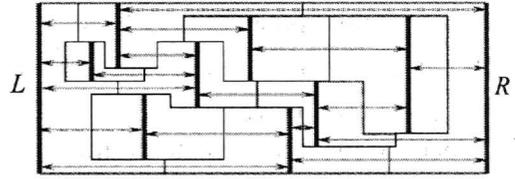


Рис.5. ДВ специального вида для набора вертикальных отрезков и ребра ГО

и до двух горизонтальных отрезков. Двойственный граф Делоне отражает отношение видимости между объектами по оси x , а ребра графа ограничений напрямую соответствуют тем ребрам Вороного, в которых содержится вертикальный участок (возможно, вырожденный в точку). Отметим, что два последних варианта биссектрисы на рис.4 соответствуют объектам, не состоящим в отношении горизонтальной видимости. Тем не менее подобных ребер на диаграмме Вороного можно избежать, если предположить, что топология схемы всегда имеет условные левую и правую границы – вертикальные отрезки L и R достаточно большой протяженности и все элементы топологии горизонтально проецируются на L справа и на R слева (см. рис.5).

Построение диаграммы Вороного специального вида. Для вычисления диаграммы Вороного предлагается использовать алгоритм, предложенный Р.Кляйном. Алгоритм вычисляет топологию абстрактной диаграммы Вороного, явно не используя геометрические свойства конкретно заданной системы биссектрис. Геометрические вычисления должны быть реализованы в базовой операции алгоритма $basic_op(p, q, r, t, s)$.

Алгоритм Р.Кляйна является рандомизированным инкрементным. Это означает, что ДВ вычисляется пошагово добавлением объектов в случайном порядке. Построение начинается с ДВ для трех объектов, топология которой изображена на рис.6. Специальный объект ∞ искусственно вводится для того, чтобы ячейки Вороного остальных объектов были ограниченными и односвязными. Только ячейка объекта ∞ является неограниченной и имеет единственную «дыру», объединяющую остальные ячейки.

Для каждого следующего добавленного объекта s алгоритм вычисляет топологию его ячейки и соответствующим образом изменяет ячейки соседних объектов. При этом часть диаграммы Вороного «вырезается» ячейкой нового объекта (см. рис.6). Отметим, что в перестроении ДВ задействована базовая операция, определяющая топологический тип пересечения ячейки объекта s и $prqt$ -ребра на текущей ДВ. Здесь $prqt$ -ребро – ребро Вороного, разделяющее объекты p и q так, что при обходе окрестности ребра по часовой стрелке объекты p, r, q, t встречаются в порядке, представленном на рис.7.

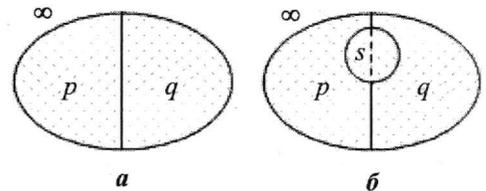


Рис.6. Начальная АДВ для трех объектов (а); добавление нового объекта (б)

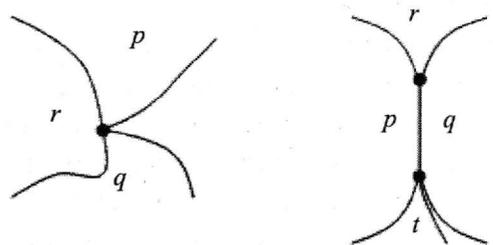


Рис.7. pqr -вершина и $prqt$ -ребро Вороного

Функция $\text{basic_op}(p, r, q, t, s)$. Входные данные: пятерка объектов (p, r, q, t, s) : $V(\{p, r, q, t\})$ содержит $prqt$ -ребро e и $s \notin \{p, r, q, t\}$. Результат: тип пересечения $e \cap \overline{\text{VR}}(s, \{p, r, q, t\})$, т.е. один из следующих типов (рис.8):

- 1) пересечение пусто;
- 2) пересечение непустое и связное:
 - ребро e целиком;
 - отрезок e , инцидентный prq -вершине;
 - отрезок e , инцидентный qtp -вершине;
 - отрезок, не инцидентный ни одному из концов e ;
- 3) пересечение непустое и состоит из двух компонент, инцидентных концам e .

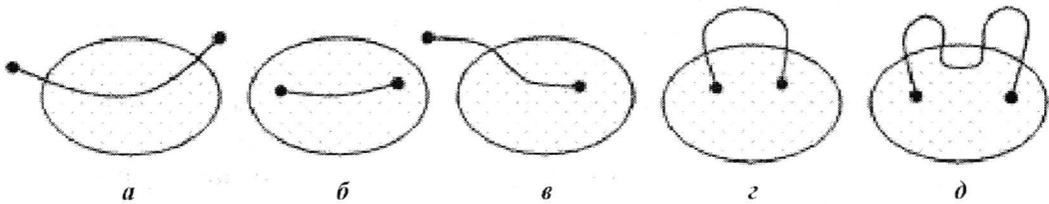


Рис.8. Возможные варианты пересечения s и e (a-г); невозможный вариант пересечения (д)

Базовую операцию необходимо реализовать для ДВ специального вида. В нашем случае возможны все варианты пересечений. Поскольку $prqt$ -ребро является частью биссектрисы, то в общем случае оно состоит из одного вертикального отрезка и двух горизонтальных отрезков или лучей. Для простоты луч также будем считать отрезком с координатой – большим числом, обозначенным ∞ или $-\infty$.

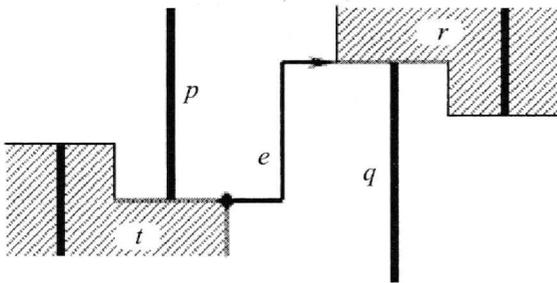


Рис.9. Построение $prqt$ -ребра из биссектрисы объектов p и q

Предположим, что биссектриса имеет направление «снизу вверх» (рис.9). Тогда $prqt$ -ребро получается из биссектрисы объектов p и q путем отсечения ее «верхней» части пересечением полуплоскостей $D(r, p)$ и $D(r, q)$, а также отсечения ее «нижней» части пересечением полуплоскостей $D(t, p)$ и $D(t, q)$. Полученная кривая является ребром Вороного, определяемым четырьмя смежными с ним объектами. Координаты кривой используются при начертании

диаграммы Вороного, а также при вычислении базовой операции. Для вычисления базовой операции находим пересечение $prqt$ -ребра e с $\overline{\text{VR}}(s, \{p, r, q, t\})$ и определяем один из шести типов пересечения, т.е. находим пересечение кривой и прямоугольного многоугольника, который, в свою очередь, является пересечением четырех полуплоскостей (неограниченных многоугольников): $D(s, p)$, $D(s, r)$, $D(s, q)$ и $D(s, t)$. Возможные варианты пересечения изображены на рис.10 (для сравнения см. варианты на рис.8).

Операции пересечения над прямоугольными многоугольниками являются хорошо изученными в вычислительной геометрии [6]. Заметим, что действия, проводящиеся в базовой операции, требуют в совокупности константного времени, что подразумевается в дальнейшем анализе сложности алгоритма.

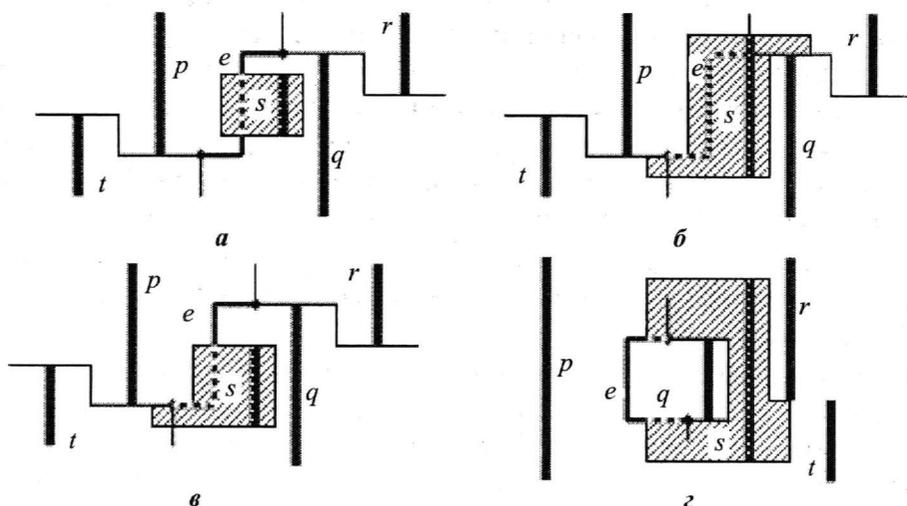


Рис.10. Варианты пересечения $prqt$ -ребра и ячейки нового объекта s

Предположим, что топология схемы имеет условные левую и правую границы (L и R). Тогда в качестве исходной диаграммы Вороного возьмем диаграмму для трех объектов L, R и ∞ (рис.11, для сравнения см. рис.6).

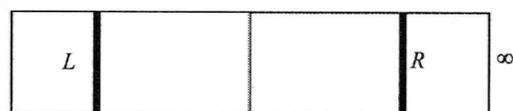


Рис.11. Исходная диаграмма Вороного для объектов L, R и ∞

Анализ сложности метода. Алгоритм Р.Кляйна имеет среднюю сложность $O(n \log n)$ и требует $O(n)$ памяти, где n – число объектов. Оценим затраты времени и памяти, необходимые на построение графа ограничений. Пусть топология содержит L слоев, в каждом из которых находится n_i вертикальных сторон многоугольников, $n_1 + \dots + n_L = n$.

Примем, что в графе ограничений n вершин, соответствующих вертикальным сторонам фигур во всех слоях топологии. Для построения всех возможных ограничений ширины и расстояния между фигурами в одном слое достаточно вычислить

ДВ для вертикальных отрезков в каждом из слоев, затратив $O(\sum_{i=1}^L n_i \log n_i) = O(n \log n)$

времени и $O(\sum_{i=1}^L n_i) = O(n)$ памяти. Построение всех возможных ограничений пере-

крытия и включения фигур в двух различных слоях требует вычисления $L(L-1)/2$ диаграмм Вороного для вертикальных отрезков из всевозможных пар слоев. При этом затрачивается $O(\sum_{i,j \in [1, \dots, L], i \neq j} (n_i + n_j) \log(n_i + n_j)) = O((L-1)n \log n)$ времени и

$O(\sum_{i,j \in [1, \dots, L], i \neq j} (n_i + n_j)) = O((L-1)n)$ памяти.

Следовательно, затраты рассмотренного метода для построения всех возможных одномерных ограничений: $O(Ln \log n)$ времени в среднем и $O(nL)$ памяти. Обычно $L \ll n$, следовательно, сложность нашего метода – $O(n \log n)$ по времени и $O(n)$ по памяти. Для сравнения: лучшие известные методы показывают сложность от $O(n\sqrt{n})$ до $O(n \log n)$. Преимущество предложенного метода в том, что диаграмма Вороного как топологическая абстракция содержит всю нужную информацию о взаимном располо-

жении элементов топологии. Таким образом, если в топологии схемы происходит локальное изменение, то с использованием ДВ можно быстро определить, какие части графа ограничений необходимо обновить. В [7] предложен полностью динамический алгоритм построения абстрактных диаграмм Вороного, эффективно перестраивающий диаграмму при относительно небольших изменениях во множестве объектов. Любые локальные изменения можно реализовать с помощью двух операций: удаления и вставки объектов. Первая операция динамического алгоритма занимает $O(\log n)$ времени в среднем, вторая – $O(n)$ времени в худшем случае, где n – число объектов на построенной в данный момент диаграмме Вороного. Перемещение объекта реализуется как его удаление с последующей вставкой.

С использованием динамического алгоритма появляется возможность относительно быстро перестраивать граф ограничений (за $O(n)$ времени в худшем случае) при локальных изменениях топологии ИС. Это более эффективно, чем построение графа заново, например, в задачах полуторамерного сжатия и корректировки топологии, а также при интерактивной проверке технологических правил с ручным или автоматическим устранением нарушений, т.е. в задачах, требующих повторного построения графа ограничений после произведенных незначительных модификаций топологии большого размера.

Литература

1. *Fang J., Wong J.S.L., Zhang K., Tang P.* A fast constraint graph based compactor for VLSI circuit layouts // Proc. of Inter. Conf. on Circuits and Systems (Shenzhen, China, June 1991). – 1991. – P. 628–631.
2. *Heng F.-L., Chen Zh., Tellez G.E.* A VLSI artwork legalization technique based on a new criterion of minimum layout perturbation // Proc. of ISPD'97 (Napa Valley, CA, USA, 1997). – 1997. – P. 116–121.
3. *Vonpase C.R., Lo C.-Y.* An $O(n \log m)$ algorithm for VLSI design rule checking // IEEE Transactions on Computer-Aided Design. – 1992. – Vol. 11, N 6, July. – P. 753–758.
4. *Малинаускас К.К.* Обзор алгоритмов поиска кратчайших путей в задачах сжатия топологии ИС // Изв. вузов. Электроника. – 2006. – № 6. – С. 36–55.
5. *Klein R.* Randomized incremental construction of abstract Voronoi diagrams // Computational Geometry: Theory and Applications. – 1993. – Vol. 3. – P. 157–184.
6. *Препарата Ф., Шеймос М.* Вычислительная геометрия: Введение. – М.: Мир, 1989. – 478 с.
7. *Малинаускас К.К.* Динамическое построение абстрактных диаграмм Вороного // Фундаментальная и прикладная математика. – 2007. – Т. 13, № 2. – С. 133–146.

Статья поступила
18 октября 2006 г.

Малинаускас Костас Костович – аспирант кафедры высшей математики № 1 МИЭТ. *Область научных интересов:* математическое и программное обеспечение САПР СБИС, задачи физического проектирования интегральных микросхем; дискретная математика и теоретико-графовые задачи; вычислительная геометрия и диаграммы Вороного на плоскости; сложность алгоритмов.

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

УДК 621.391.96

Итеративный посимвольный прием ансамблей сигналов на основе низкоплотных кодов

Л.Е.Назаров, И.В.Головкин

Институт радиотехники и электроники РАН (г. Фрязино)

Приведены описания и результаты компьютерного моделирования разработанных процедур итеративного посимвольного приема для ансамблей сигналов на основе блоковых низкоплотных кодов.

При создании систем передачи информации основные проблемы связаны с синтезом ансамблей дискретных сигналов и созданием производительных алгоритмов их приема, обеспечивающих достижение вероятностно-энергетических характеристик, близких к предельным характеристикам шенноновской пропускной способности канала [1, 2].

В последнее время интенсивно развивается теория ансамблей сигналов, допускающих применение итеративных вычислительных процедур при их приеме [3]. Суть данных процедур – декомпозиция оптимальных правил приема на совокупность более простых этапов обработки. Для широкого класса ансамблей сигналов этот подход приводит к существенному упрощению процедуры приема и незначительным энергетическим потерям по отношению к исходной процедуре оптимального приема. Примерами ансамблей сигналов из данного класса являются сигналы на основе низкоплотных кодов Галлагера [4], сигналы на основе блоковых низкоплотных кодов со свойством одношаговой ортогонализации [5], ансамбли сигналов под общим названием «турбо-код» [3, 6].

Исследования показывают, что по отношению к вероятностным характеристикам и сложности реализации процедур формирования и приема данные ансамбли сигналов составляют альтернативу известным ансамблям сигналов, включая сигналы на основе сверточных кодов в совокупности с алгоритмом приема Витерби. Результаты вычислительных экспериментов показывают, что данные ансамбли сигналов асимптотически оптимальны – при увеличении размеров информационных блоков до несколько десятков тысяч битов и применении процедур итеративного приема достигаются вероятностные характеристики, близкие к характеристикам шенноновской пропускной способности каналов с аддитивным белым гауссовским шумом [3, 7]. Это дает основание считать рассматриваемые ансамбли сигналов наиболее перспективными для применения в системах передачи информации.

Общая методика при разработке и исследовании алгоритмов итеративного приема может быть основана на применении методов теории графов Таннера [8]. С использованием этой методики разработаны соответствующие процедуры итеративного приема на основе известного в литературе алгоритма ВР (belief propagation) [9, 10].

В настоящей работе описан новый алгоритм посимвольного итеративного приема сигналов на основе блоковых низкоплотных кодов [2], интерес к которым со стороны исследователей в последнее время значительно усилился [9, 10, 11]. Разработанный алгоритм подобен процедуре итеративного приема турбо-кодов, суть которых – представление отношений правдоподобия для апостериорных вероятностей символов

кодовых слов в виде суммы трех составляющих, связанных с мягкими решениями с выхода демодулятора, с отношениями априорных вероятностей символов кодовых слов и с функционалами от отношений апостериорных вероятностей символов EI (extrinsic information) [3, 6]. Для последующей итерации величины EI используются как априорные вероятности символов кодовых слов. Вычисление отношений правдоподобия осуществляется с помощью алгоритма APP (a' posteriori probability) для множества проверочных соотношений ортогональных по отношению к символам кодовых слов [3].

Постановка задачи. Рассматривается передача дискретных сообщений по каналу без памяти с аддитивным белым гауссовским шумом с односторонней спектральной плотностью N_0 . Передача осуществляется с использованием ансамблей сигналов с двоичной фазовой модуляцией на основе двоичных блоковых кодов (n, k, d) с проверочной матрицей $H = (h_{li}; 0 \leq l < n - k; 0 \leq i < n - 1)$, где n – длительность кодовых слов $\vec{B} = (b_0, b_2, \dots, b_{n-1})$; k – размерность кодов; d – минимальное расстояние Хэмминга [2]. Пусть $\vec{Y} = (y_0, y_2, \dots, y_{n-1})$ – входная дискретная реализация, $y_i = (-1)^{b_i} aT/2 + \eta_i$; $\vec{x} = (x_0, x_1, \dots, x_{n-1})$ – последовательность ошибок, $x_i = 1$, если $(-1)^{b_i} = \text{sign}(y_i)$, иначе верно условие $x_i = 0$. Функция правдоподобия $p(\vec{Y}|\vec{B})$ полагается известной. Здесь T, a – длительность и амплитуда сигнала с выхода демодулятора; η_i – помеховая составляющая с нулевым средним и дисперсией $N_0T/4$; $\text{sign}(x) = 1$, если $x \geq 0$, и $\text{sign}(x) = -1$, если $x < 0$.

Полагается, что блоковые коды обладают свойством одношаговой организации множества J ортогональных проверочных соотношений по каждому из символов кодовых слов [4, 5]. Пусть $N(m) = (i : h_{mi} = 1)$ – множество номеров позиций кодовых символов, образующих m -е проверочное соотношение; $N(m)/l$ – множество $N(m)$ без l -го символа; $D(l) = (m : h_{ml} = 1)$ – множество проверочных соотношений относительно символа b_l ($m = 1, 2, \dots, J$); $D(l)/m$ – множество ортогональных проверок $D(l)$ без m -й проверки.

Правило оптимального посимвольного приема сигналов на основе блоковых кодов заключается в вычислении апостериорных вероятностей

$$\Pr(b_i = \xi | \vec{Y}) = \sum_{\vec{B}} \delta(b_i - \xi) \Pr(\vec{B} | \vec{Y}), \quad \xi = 0, 1 \quad (1)$$

и в принятии решений относительно b_i в пользу большей апостериорной вероятности [3]. Здесь $\delta(x) = 1$, если $x = 0$, и $\delta(x) = 0$ в противном случае.

При увеличении размерности блоковых кодов k вычисление соотношения (1) характеризуется чрезмерной сложностью.

Для рассматриваемых ансамблей сигналов со свойством одношаговой ортогонализации известен алгоритм порогового посимвольного приема APP [5]: принимается решение относительно ошибки $x_i = 1$ при выполнении условия

$$\sum_{j=1}^J A_j^{(i)} w_j^{(i)} > \frac{1}{2} \sum_{j=0}^J w_j^{(i)}, \quad (2)$$

где $A_j^{(i)} = \sum_{l:N(j), h_{ji}=1} x_l$ – значение j -го проверочного соотношения для i -го символа кодового

слова с использованием «жестких» решений; суммирование осуществляется в поле $GF(2)$. Весовые коэффициенты в (2) задаются выражениями [4,5]

$$w_0^{(i)} = \log \left(\frac{\Pr(x_i = 0 | y_i)}{\Pr(x_i = 1 | y_i)} \right), \quad w_j^{(i)} = \log \left(\frac{\Pr(A_j^{(i)} \oplus x_i = 0 | \vec{Y})}{\Pr(A_j^{(i)} \oplus x_i = 1 | \vec{Y})} \right) = \log \left(\frac{p_{ji}}{q_{ji}} \right).$$

Здесь $p_{ji} = (1 - q_{ji})$ – вероятность нечетного числа единиц в последовательности \vec{x} без x_i , входящих в j -е проверочное соотношение; \oplus – сложение в поле $GF(2)$.

Для весового коэффициента $w_0^{(i)}$ справедливо соотношение [5]

$$w_0^{(i)} = \log \left(\frac{p(y_i | x_i = 0) \cdot \Pr(x_i = 0)}{p(y_i | x_i = 1) \cdot \Pr(x_i = 1)} \right) = \left| \log \left(\frac{p(y_i | b_i = 0)}{p(y_i | b_i = 1)} \right) \right| + \log \frac{\Pr(x_i = 0)}{\Pr(x_i = 1)} = 4 |y_i| a / N_0 + L(x_i),$$

где $L(x_i) = \log \left(\frac{\Pr(x_i = 0)}{\Pr(x_i = 1)} \right)$ – отношение правдоподобия для априорных вероятностей ошибки x_i .

Выражение для $w_j^{(i)}$ ($j = 1, 2, \dots, J$) можно получить, используя методы теории отношений правдоподобия [3]

$$w_j^{(i)} = \log \left(\frac{\prod_{i':N(j)/i} (\exp(L_{ji'}) + 1) + \prod_{i':N(j)/i} (\exp(L_{ji'}) - 1)}{\prod_{i':N(j)/i} (\exp(L_{ji'}) + 1) - \prod_{i':N(j)/i} (\exp(L_{ji'}) - 1)} \right),$$

$$L_{ji} = L(x_{ji} | y_{ji}) = \log \left(\frac{p(y_{ji} | x_{ji} = 0) \cdot \Pr(x_{ji} = 0)}{p(y_{ji} | x_{ji} = 1) \cdot \Pr(x_{ji} = 1)} \right) =$$

$$= \left| \log \left(\frac{p(y_{ji} | b_{ji} = 0)}{p(y_{ji} | b_{ji} = 1)} \right) \right| + \log \frac{\Pr(x_{ji} = 0)}{\Pr(x_{ji} = 1)} = 4 |y_{ji}| a / N_0 + L(x_{ji}). \quad (3)$$

Здесь $L(x_{ji}) = \log \left(\frac{\Pr(x_{ji} = 0)}{\Pr(x_{ji} = 1)} \right)$ – отношение правдоподобия для априорных вероятностей ошибки x_{ji} ; x_{ji} – ошибка в j -м проверочном соотношении; y_{ji} – i -й отсчет реализации \vec{Y} в составе j -го проверочного соотношения.

Методы итеративного посимвольного приема рассматриваемых ансамблей сигналов, описания которых приведены ниже, более эффективны по сравнению с алгоритмом APP. Известным в литературе является алгоритм итеративного приема ВР [7, 9, 11].

Алгоритм итеративного приема ВР. Пусть $q_{mi}^{(\xi)}$ – вероятность события $q_{mi}^{(\xi)} = \Pr(x_i = \xi | D(i) / m)$; $r_{mi}^{(\xi)}$ – вероятность события $r_{mi}^{(\xi)} = \Pr(A_m = 0 | \bar{x}, x_i = \xi)$; $p_i^{(0)} = \Pr(x_i = 0)$ и $p_i^{(1)} = 1 - p_i^{(0)}$; $\xi = 0, 1$. Итерация алгоритма итеративного приема включает два этапа [7, 9, 11].

На первом этапе вычисляется вероятность события, когда значение m -й проверки равно $A_m = \xi$ при условии $x_i = 0$ или $x_i = 1$:

$$r_{mi}^{(0)} = \sum_{x_i: i' \in N(m)/i} \Pr(A_m = \xi | x_i = 0; x_{i'} : i' \in N(m)/i) \prod_{i' \in N(m)/i} q_{mi'}^{\xi},$$

$$r_{mi}^{(1)} = \sum_{x_i: i' \in N(m)/i} \Pr(A_m = \xi | x_i = 1; x_{i'} : i' \in N(m)/i) \prod_{i' \in N(m)/i} q_{mi'}^{\xi}.$$

На втором этапе оцениваются вероятности $q_{mi}^{(0)}$ и $q_{mi}^{(1)}$ с использованием значений $r_{mi}^{(0)}$ и $r_{mi}^{(1)}$:

$$q_{mi}^{(0)} = \alpha_{mi} p_i^{(0)} \prod_{m' \in D(i) \setminus m} r_{m'i}^{(0)},$$

$$q_{mi}^{(1)} = \alpha_{mi} p_i^{(1)} \prod_{m' \in D(i) / m} r_{m'i}^{(1)}.$$

Нормирующий коэффициент α_{mi} определяется из тождества $q_{mi}^{(0)} + q_{mi}^{(1)} = 1$. Вычисленные оценки вероятностей $q_{mi}^{(0)}$ и $q_{mi}^{(1)}$ используются для реализации первого этапа последующей итерации.

Решения относительно значений кодовых символов b_i принимаются на основе величин $q_{mi}^{(0)}$, $q_{mi}^{(1)}$: при выполнении условия $q_{mi}^{(1)} > q_{mi}^{(0)}$ принимается решение $b_i = 1$, в противном случае $b_i = 0$.

В работе [7] приведено описание модификации процедуры итеративного приема ВР, которая характеризуется пониженной сложностью реализации, так как требует лишь линейных операций сложение–вычитание–сравнение. Кроме того, не требуется априорного знания или оценки энергетического параметра a/N_0 . Путем моделирования показано, что энергетические потери при применении модифицированной процедуры итеративного приема сигналов в канале с аддитивным белым гауссовским шумом по отношению к исходной итеративной процедуре ВР не превышают 0,25 дБ.

Итеративный прием на основе алгоритма АРР. Основу разработанного метода итеративного посимвольного приема составляет алгоритм АРР (2).

Отношение правдоподобия $L(x_i | \{A_j^{(i)}\}, y_{ji})$ для значения y_{ji} и множества ортогональных проверок $\{A_j^{(i)}\}$ можно записать в виде

$$L(x_i | \{A_j^{(i)}\}, y_{ji}) = \sum_{j=1}^J \log \left(\frac{\Pr(\{A_j^{(i)}\} | x_i = 0, y_{ji})}{\Pr(\{A_j^{(i)}\} | x_i = 1, y_{ji})} \right) + \log \left(\frac{\Pr(x_i = 0 | y_{ji})}{\Pr(x_i = 1 | y_{ji})} \right). \quad (4)$$

Используя (4), в работе [5] доказана справедливость следующего соотношения для

$$L(x_i | \{A_j^{(i)}\}, y_{ji}) = \sum_{j=1}^J (1 - 2A_j^{(i)}) w_j^{(i)} + 4 |y_{ji}| a / N_0 + L(x_{ji}). \quad (5)$$

В соответствии с принципом методов итеративного приема, разработанных для турбо-кодов, слагаемое $\sum_{j=1}^J (1 - 2A_j^{(i)})w_j^{(i)}$ в (5) эквивалентно ЕИ [3]. Для реализации процедуры итеративного приема рассматриваемых ансамблей сигналов вычисленные значения ЕИ используются для последующей итерации как априорная информация $L(x_{ji})$ при вычислении L_{ji} (4) и весовых коэффициентов $w_j^{(i)}$ и $w_0^{(i)}$.

На последней итерации принимаются решения: при условии $L(x_i | \{A_j^{(i)}\}, y_{ji}) < 0$ принимается решение $x_i = 1$, в противном случае $x_i = 0$.

Модификация приведенной итеративной процедуры приема заключается в применении приближения для весовых коэффициентов $w_j^{(i)}$ [3]

$$w_j^{(i)} \approx \left(\prod_{i': N(j)/i} \text{sign}(L_{ji'}) \right) \cdot \min_{i': N(j)/i} |L_{ji'}|.$$

Данная модификация характеризуется пониженной сложностью реализации по отношению к исходной итеративной процедуре, требует лишь линейных операций сложение–вычитание–сравнение и не требует оценки энергетического параметра a/\bar{N}_0 .

Результаты моделирования. На рис.1 приведены вероятности ошибки на бит P_6 , полученные моделированием процедуры итеративного приема на основе алгоритма АРР для ансамбля сигналов, соответствующего низкоплотному блоковому коду (255,175) со свойством одношаговой ортогонализации. Видно, что для $P_6 = 10^{-4}$ энергетический выигрыш при использовании пяти итераций составляет 1,4 и 0,25 дБ по отношению к применению одной и четырех итераций соответственно. Увеличение числа итераций до 50 и более обуславливает получение дополнительного выигрыша по отношению к применению пяти итераций, не превышающего 0,2 дБ.

На рис.2 приведены вероятности ошибок P_6 , полученные моделированием процедур итеративного приема ВР и на основе алгоритма АРР для ансамбля сигналов на основе низкоплотного блокового кода со свойством одношаговой ортогонализации (63,37) (пять итераций). Видно, что применение итеративной процедуры приема на основе алгоритма АРР обеспечивает примерно

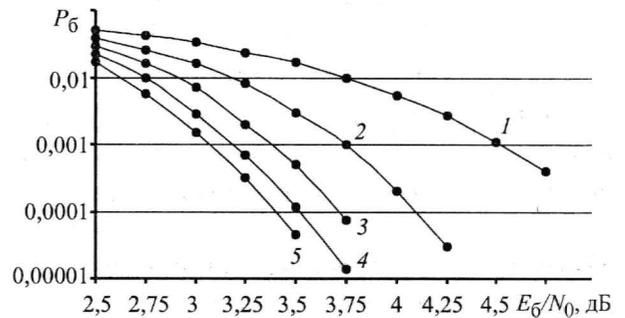


Рис.1. Вероятности ошибки на бит P_6 при применении процедуры итеративного приема с использованием алгоритма АРР для ансамбля сигналов на основе блокового кода (255,175): кривые 1, 2, 3, 4, 5 — одна, две, три, четыре, пять итераций соответственно

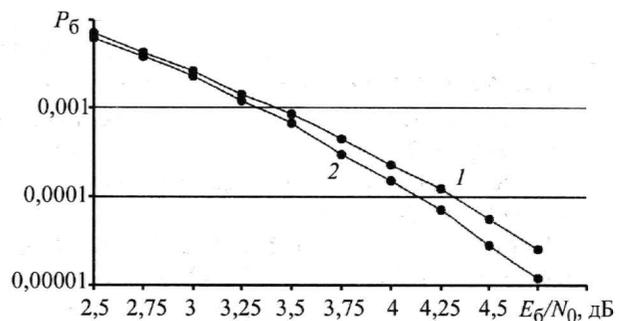


Рис.2. Вероятности ошибок на бит P_6 при применении итеративного приема ВР (кривая 1) и АРР (кривая 2) для ансамбля сигналов на основе блокового кода (63,37) (пять итераций)

в 1,5 раза меньшее значение P_6 по отношению к процедуре итеративного приема ВР в диапазоне моделируемых значений $\frac{E_6}{N_0}$.

На рис.3 приведены значения P_6 , полученные моделированием модифицированных процедур итеративного приема ВР и на основе алгоритма АРР с пониженной сложностью для сигналов на основе кода (63,37) (пять итераций). Видно, что применение мо-

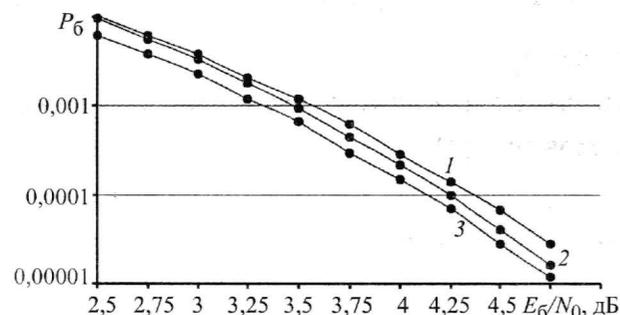


Рис.3. Вероятности ошибки на бит P_6 при применении итеративного приема ВР (кривая 1), на основе алгоритма АРР (кривая 3) и алгоритма АРР (кривая 2) с пониженной сложностью для сигналов на основе кода (63,37) (пять итераций)

Апробация данных процедур осуществлена с использованием ряда ансамблей сигналов на основе блоковых кодов со свойством одношаговой ортогонализации. Путем компьютерного моделирования показано, что применение пяти итераций обеспечивает достижение практически предельной эффективности процедур итеративного приема.

Разработанные процедуры итеративного приема на основе алгоритма АРР более эффективны по вероятностным характеристикам известной процедуры итеративного приема ВР и ее модификации.

Литература

1. Помехоустойчивость и эффективность систем передачи информации / А.Г.Зюко, А.И.Фалько, И.П.Панфилов и др. – М.: Радио и связь, 1985. – 272 с.
2. Питерсон У., Уэлдон Э. Коды, исправляющие ошибки: Пер. с англ. – М.: Мир, 1964. – 594 с.
3. Hagenauer J., Offer E., Papke L. Iterative decoding of binary block and convolutional codes // IEEE Trans. on Inform. Theory. – 1996. – Vol. 42, № 2. – P. 429–448.
4. Gallager R.G. Low-density parity-check codes // IRE Trans. – 1962. – Vol. 8, № 1. – P. 21–28.
5. Мессис Дж. Пороговое декодирование: Пер. с англ. – М.: Мир, 1966. – 208 с.
6. Назаров Л.Е. Применение алгоритма быстрого спектрального преобразования Уоша для итеративного декодирования турбо-кодов на основе двоичных блоковых кодов // Изв. вузов. Электроника. – 2003. – № 1. – С. 74–83.
7. MacKay D.J.C., Neal R.M. Near Shannon limit performance of low density parity check codes // Electronics Letters. – 1997. – Vol. 33, № 3. – P. 457, 458.
8. Tanner R.M. A recursive approach to low complexity codes // IEEE Trans. on Inform. Theory. – 1981. – Vol. 27, № 5. – P. 533–547.
9. MacKay D.J.C. Good error-correcting codes based on very sparse matrices // IEEE Trans. on Inform. Theory. – 1999. – Vol. 45, № 2. – P. 399–431.

10. *Pearl J.* Probabilistic reasoning in intelligent systems: networks of plausible inference. Morgan Kaufmann. – San Mateo. – 1988. – 498 с.

11. *Kou Y., Lin S., Fossorier M.* Low-density parity-check codes based on finite geometries // IEEE Trans. on Inform. Theory. – 2001. – Vol. 47, № 11. – P. 2711–2736.

Статья поступила
30 января 2007 г.

Назаров Лев Евгеньевич – доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник Института радиотехники и электроники РАН (г. Фрязино). *Область научных интересов:* теория цифровых систем связи, цифровая обработка сигналов, теория сигналов.

Головкин Илья Владимирович – аспирант Института радиотехники и электроники РАН (г. Фрязино). *Область научных интересов:* теория помехоустойчивого кодирования, схемотехника.



МОСКВА, 6-8 сентября 2007 г.

Московский государственный
технический университет им. Н.Э.Баумана

при участии
ОАО ЦНИТИ «Техномаш»

XIII Международная научно-техническая
конференция

**ВЫСОКИЕ ТЕХНОЛОГИИ
В ПРОМЫШЛЕННОСТИ РОССИИ
(МАТЕРИАЛЫ И УСТРОЙСТВА ФУНКЦИОНАЛЬНОЙ
ЭЛЕКТРОНИКИ И МИКРОФОТОНИКИ)**

XX Международный симпозиум

ТОНКИЕ ПЛЕНКИ В ЭЛЕКТРОНИКЕ

Посвящается 50-летию освоения космоса

Ученый секретарь

Екатерина Вадимовна Булыгина - доцент кафедры "Электронные технологии в машиностроении" МГТУ им. Н.Э. Баумана

(495)267-0983

(495)267-1739

E-mail: Bulygina@mx.bmstu.ru

Распределение объектов автоматизации в системах локального сбора информации

Д.Б.Юрченко

Московский государственный институт электронной техники
(технический университет)

Сформулирована задача распределения объектов автоматизации между обслуживающим персоналом в системах локального сбора информации. Предложены алгоритмы решения для случаев статического и динамического распределения.

Локальный сбор информации с помощью переносных устройств [1] используется в случаях, когда организация стационарных каналов связи и их обслуживание экономически невыгодны. В системе локального сбора информации затраты на транспорт и людские ресурсы составляют значительную часть. Поэтому важным этапом построения системы локального сбора информации является задача нахождения оптимального распределения объектов автоматизации между обслуживающим персоналом. Чтобы минимизировать затраты на локальный сбор информации, необходимо правильно выбрать количество операторов, задействованных в процессе локального сбора, и разработать оптимальные маршруты их движения. Критерием для разработки оптимальных маршрутов является время.

Для решения этих задач предлагается алгоритм, состоящий из нескольких фаз. На первом этапе находятся кратчайшие расстояния (времена перемещения) между всеми объектами автоматизации и центром сбора информации, исходя из имеющейся дорожной сети. Затем в полученном графе выделяется остовное дерево минимального размера. На последнем этапе реализуется эвристический алгоритм нахождения циклов (замкнутых маршрутов движения операторов). В итоге определяется необходимое количество операторов и маршруты их перемещений.

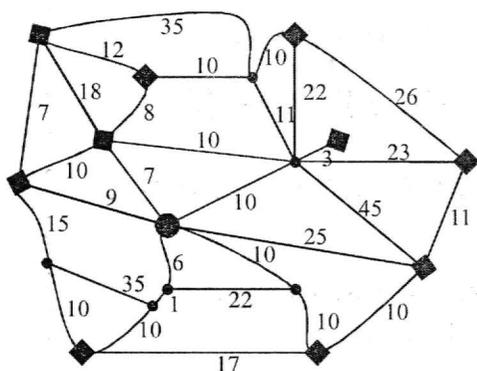


Рис.1. Транспортная сеть в виде графа:
 ● — центр локального сбора информации;
 ■ — объект автоматизации (подстанция);
 + — транспортный узел (перекресток)

Математическая формулировка задачи состоит в следующем. Имеется транспортная сеть, т.е. неориентированный граф G с множеством вершин $\{1, 2, \dots, n\}$, ребра которого имеют заданные веса (рис.1). Если вершины i и j соединены ребром, то d_{ij} обозначает вес ребра, т.е. время перемещения оператора из вершины i в вершину j (или наоборот). В графе G имеется особая вершина, называемая центром локального сбора. Из этой вершины операторы начинают движение по объектам автоматизации согласно сформированному заданию на сбор информации [2] и туда в конце установленного времени (рабочего дня) поступают результаты.

Имеется массив времен обслуживания каждого объекта автоматизации. Пусть T_0 – продолжительность рабочего дня оператора. Требуется найти в графе G несколько замкнутых путей, начинающихся и заканчивающихся в центре так, чтобы продолжительность прохождения каждого пути (включая время обслуживания) не превышала T_0 и их суммарная длина была минимальной.

Ввиду того что количество объектов автоматизации может быть достаточно велико, для решения задачи полным перебором предложен эвристический алгоритм. Алгоритм работает достаточно быстро и дает результат, близкий к оптимальному.

На первом этапе решения задачи с помощью алгоритма Дейкстры [3] находятся кратчайшие пути между объектами автоматизации и определяются их длины ρ_{ij} . Опишем фрагмент этого алгоритма: нахождение кратчайшего пути от вершины i до всех остальных вершин.

Имеется граф (рис.2, шаг 1). Назначаем начальной точке i постоянную метку $[-, 0]$. Просматриваем окрестности точки i , выставляя временные метки расстояний от точки i . Среди этих меток выбираем минимальную и объявляем ее постоянной (рис.2, шаг 2). Далее присваиваем временные метки вершинам, инцидентным вершине, которой последней присвоена постоянная метка, и выбираем минимум. Например, до точки b можно добраться из точки i напрямую $(i, 3)$ или через точку d с постоянной меткой $[i, 1] + (d, 4) = (d, 5)$. Минимальное расстояние будет $(i, 3)$. Метку на точке b делаем постоянной $[i, 3]$. Таким образом обходим точки a, c и f (рис.2, шаг 3). От точки f для точки e поставим временную метку $(f, 8)$ при обходе точки f . Анализируем временную метку точки e . Соседняя постоянная метка дает путь $[i, 1] + (d, 3) = (d, 4)$, что меньше, чем $(f, 8)$. Выбираем наименьшую метку и делаем ее постоянной (рис.2, шаг 4). В результате получаем кратчайшие пути от каждой точки графа до точки i .

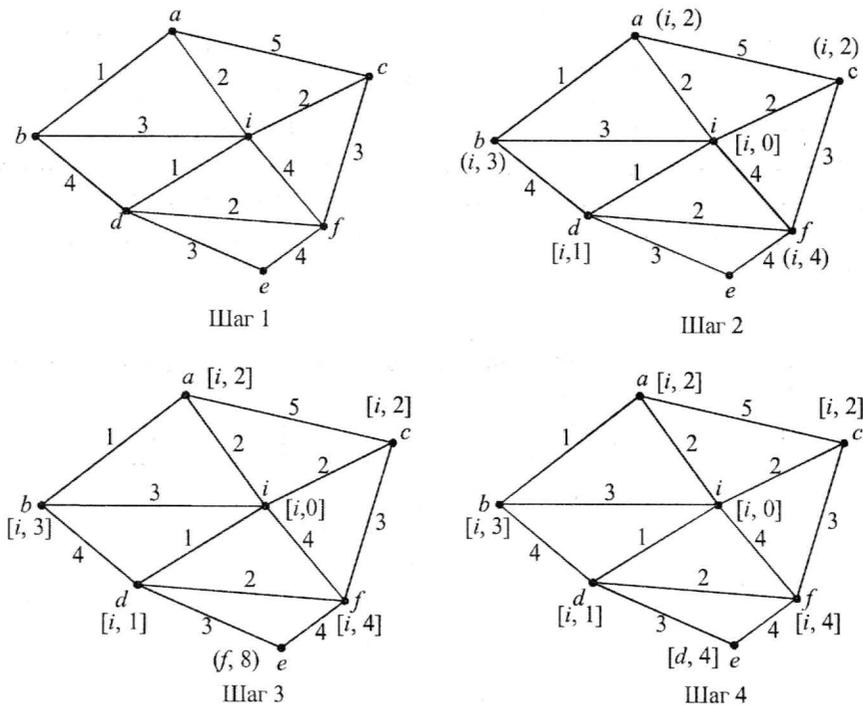


Рис.2. Фрагменты работы алгоритма Дейкстры

Для удобства нумерацию вершин графа G осуществим следующим образом: 1 - центр локального сбора; 2, 3, ..., k - объекты автоматизации; $k+1, k+2, \dots, n$ - прочие узлы транспортной сети. Нахождение кратчайших путей между i и j и их длины ρ_{ij} проводится для $i=1, 2, \dots, k, j=i+1, i+2, \dots, k$ ввиду симметрии ρ ($\rho_{ij} = \rho_{ji}$).

Введем новый граф G' с вершинами 1, 2, ..., k и длинами ребер ρ_{ij} . Граф G' полный, т.е. любая вершина соединена ребром с любой другой (ребром здесь является кратчайший по времени путь). Следующим этапом является нахождение остовного дерева минимального веса в графе G' . Так как «жадный» алгоритм [4] находит остовное дерево максимального веса, будем использовать двойственный алгоритм, изменив значения ρ_{ij} на противоположные и прибавив к ним $M+1$, где $M = \max_{i,j} \{\rho_{ij} | i, j \leq k\}$. Таким

образом, новые значения ρ_{ij} равны $M - \rho_{ij}$.

Шаг 1. Выберем ребро (i, j) максимального веса.

Шаг 2. Среди оставшихся ребер выбираем ребро, не образующее цикл с уже выбранными и имеющее наибольший вес. Возвращаемся к началу шага 2.

Выходом из алгоритма будет ситуация, когда невозможно выбрать ребро, не составляющее цикл с ранее выбранными. В этом случае выбранные ребра будут составлять остовное дерево с максимальной суммой весов нового графа G' . При обратном преобразовании весов мы получим остовное дерево с минимальной суммой весов ребер.

Последний этап алгоритма - нахождение оптимальных циклов - осуществим эвристическим алгоритмом, для которого исходной информацией являются:

- массив времен обслуживания каждого объекта автоматизации τ_i ($i=1, 2, \dots, k$);
- матрица ρ_{ij} ($i, j=1, 2, \dots, k$) кратчайших расстояний в графе G' ;

- список кратчайших путей из i в j ($i, j=1, 2, \dots, k$) в графе G ;

- остовное дерево минимального веса, заданное списком смежности вершин (табл.1).

В качестве корня остовного дерева возьмем центр (вершина 1), а направления путей - от центра. Например, дерево, изображенное на рис.3, задается списком смежности вершин из табл.2.

Таблица 1

Список смежности вершин

1	2	3	...	k
i_1	j_1	p_1	...	q_1
...
i_m	j_n	p_s	...	q_t

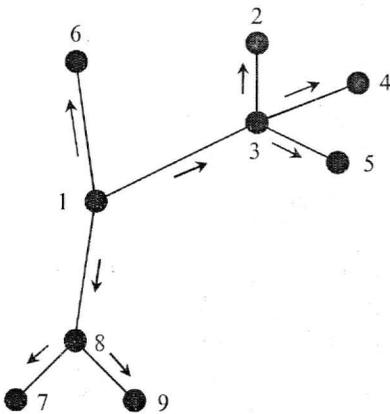


Рис.3. Пример нумерации вершин остовного дерева

Таблица 2
Пример списка смежности вершин остовного дерева

1	2	3	4	5	6	7	8	9
6		4					7	
3		5					9	
8		2						

Далее действуем следующим образом.

Шаг 1. По таблице находим расстояния в остовном дереве от корня до каждой висячей вершины $S_{i1}, S_{i2}, \dots, S_{im}$.

Шаг 2. Выбираем среди $S_{i1}, S_{i2}, \dots, S_{im}$ максимальное. Пусть это будет S_{i1} . Формируем цикл в графе G , пользуясь остовным деревом графа G' . Начало цикла – вершина 1. Следующая вершина цикла – вершина S_{i1} . После обслуживания вершины S_{i1} удаляем из остовного дерева эту вершину вместе с инцидентным ей ребром и возвращаемся в смежную вершину. Далее определяем наиболее дальнюю из оставшихся вершин множества $\{S_{i2}, \dots, S_{im}\}$ и идем в эту вершину, повторяя начало шага 2. Эта процедура осуществляется до тех пор, пока выполнено неравенство

$$U_{j1} + \tau_{j1} + U_{j2} + \tau_{j2} + \dots + U_{jp} + \tau_{jp} + V_{jp} \leq T_0,$$

где $U_{j1}, U_{j2}, \dots, U_{jp}$ – длины пройденных путей (времена их прохода); $\tau_{j1}, \tau_{j2}, \dots, \tau_{jp}$ – времена обслуживания; V_{jp} – время на обратную дорогу в вершину 1.

Вершины сформированного цикла удаляются из графа G' и его остовного дерева. Затем происходит переход к началу шага 2.

Алгоритм завершается после исчерпания вершин графа G' . Количество построенных циклов – это количество операторов, необходимых для выполнения задачи сбора информации со всех объектов автоматизации за время T_0 . Суммарная длина построенных циклов близка к минимуму, так как остовное дерево имеет минимальный вес, а длины ребер ρ_{ij} представляют кратчайший путь. Отметим, что в данном алгоритме, хотя циклы строятся в графе G' , истинный маршрут оператора проходит в графе G , что часто бывает значительно короче. Так, например, возврат в смежную вершину остовного дерева, а затем перемещение в наиболее удаленную висячую вершину осуществляется «мысленно», а фактический путь меньшей длины (рис.4). Если алгоритм предписывает после обслуживания объекта A вернуться в смежную вершину E , то путь из A в B необязательно таков: $A \rightarrow E \rightarrow D \rightarrow B$; возможно, что в графе G есть более короткий путь из A в B , который и будем использовать.

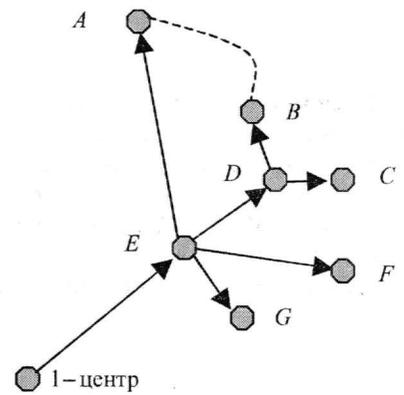


Рис.4. Фактическое перемещение

Описанный алгоритм применяется для тех объектов автоматизации, которые не имеют иных способов передачи информации в центр, кроме как локальным сбором. Маршруты локального сбора для таких объектов просчитываются на этапе проектирования системы автоматизации (статическое распределение).

При использовании локального сбора информации как аварийного канала связи, маршрут оператора должен формироваться динамически (динамическое распределение). В общем случае, чтобы с гарантией получить информацию с объектов автоматизации в течение определенного времени, можно использовать следующий алгоритм: оператор выдвигается из центра в направлении объекта автоматизации, обслуживает его и возвращается в центр, затем выдвигается к следующему объекту и снова возвращается в центр.

Введем следующие обозначения: A_1, \dots, A_n – штат из n операторов, занимающихся локальным сбором информации; S_1, \dots, S_m – набор объектов автоматизации; T – максимальное время, отведенное на локальный сбор информации; X_{ij} – факт назначения j -го объекта i -му оператору (если $X_{ij} = 1$, то объект назначен, в противном случае $X_{ij} = 0$); τ_{ij} – суммарное время, затрачиваемое i -м оператором на обработку j -го объекта автоматизации.

Требуется найти максимум суммы – количество обслуженных объектов автоматизации: $\sum_{i,j} X_{ij} \tau_{ij} \rightarrow \max$ при условиях $X_{ij} \geq 0$, $X_{ij} \leq 1$, $X_{ij} \in Z$ $\sum_i X_{ij} = 1$, $\sum_j X_{ij} \tau_{ij} \leq T$.

Эти условия означают, что X_{ij} принимает значения лишь 0 и 1, каждый объект автоматизации обязательно назначен, причем только одному оператору, и выполняется условие ограничения по времени локального съема информации.

Таким образом, поставлена задача целочисленного линейного программирования [5]. Используя различные методы, например алгоритм Гомори, можно найти распределение X_{ij} .

Рассмотренные алгоритмы позволяют получить распределение объектов автоматизации между обслуживающим персоналом, осуществляющим локальный сбор информации с помощью переносных устройств, как для статического случая, применяемого на этапе проектирования системы локального сбора информации, так и для динамического случая, когда локальный сбор информации является резервным каналом связи в системах сбора и обработки информации.

Литература

1. Юрченко Д.Б. Критерии выбора средств автоматизации в SCADA системах // Аспирант и соискатель. – 2003. – № 3. – С. 228, 229.
2. Юрченко Д.Б. Автоматическое планирование локального сбора информации со счетчиков электроэнергии в системе АСКУЭ // Актуальные проблемы современной науки. – 2003. – № 3. – С. 251–253.
3. Кристофидис Н. Теория графов. Алгоритмический подход. – М.: Мир, 1978. – 432 с.
4. Ревякин А.М. Алгоритмы и вычислительные методы. – М.: МИЭТ, 1989. – 110 с.
5. Ху Т. Целочисленное программирование и потоки в сетях. – М.: Мир, 1974. – 520 с.

Статья поступила
23 марта 2007 г.

Юрченко Дмитрий Борисович – соискатель кафедры микроэлектронных радиотехнических устройств и систем МИЭТ. *Область научных интересов:* разработка математического и программного обеспечения для систем сбора и обработки информации.

Выбор показателя для оценки уровня интермодуляционных искажений в оптико-электронных системах космических аппаратов дистанционного зондирования Земли

А.В.Сокол

Московский физико-технический институт
(государственный университет)

Предложен более универсальный показатель уровня интермодуляционных искажений, возникающих в оптико-электронном тракте космического аппарата дистанционного зондирования, основанный на оценке доли спектральной энергии широкополосного сигнала в полосе пространственных частот $[0, \nu_n]$.

Из теории линейной фильтрации известно, что искажения 1-го рода появляются вследствие дискретизации и последующего восстановления сигнала при невыполнении правил теоремы Котельникова [1]. Суть теоремы в следующем: пусть дан сигнал $H(x)$ со спектром $h(\nu) = F\{H(x)\}$ с граничной частотой $\nu_{гр}$, который необходимо дискретизировать с шагом Δ . После дискретизации спектр исходного сигнала «размножается» с периодом $2\nu_n$, где $\nu_n = 1/2\Delta$ – частота Найквиста.

По теореме Котельникова при выполнении условия

$$\nu_{гр} \leq \nu_n \quad (1)$$

дискретизированный сигнал можно восстановить к точному первоначальному виду $H(x)$. При невыполнении условия (1) происходит наложение спектральных компонент размноженного спектра и в восстановленном сигнале появляются принципиально неустранимые искажения, называемые искажениями 1-го рода.

Используемый показатель для оценки искажений 1-го рода. Чтобы понять механизм возникновения интермодуляционных искажений в оптико-электронном тракте (ОЭТ), рассмотрим основные его звенья. Для простоты на рис.1 приведен одномерный случай. В силу аналога центральной предельной теоремы для теории линейной фильтрации [2] совокупность линейных звеньев атмосфера – «смаз» изображения – оптичес-

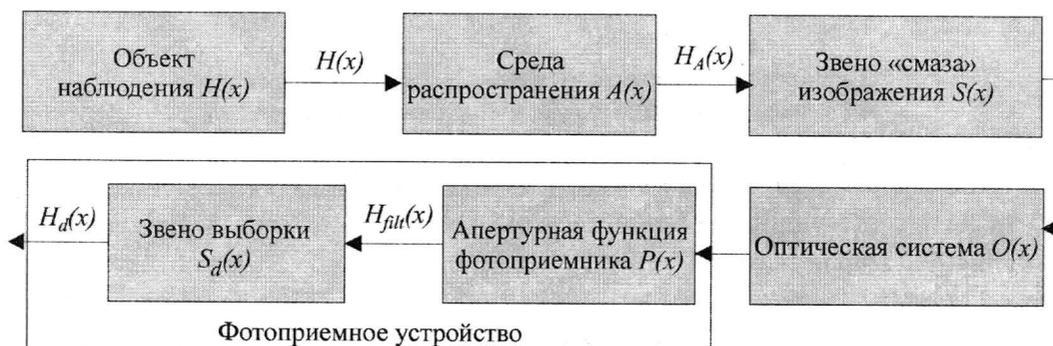


Рис.1. Блок-схема оптико-электронного тракта (без звена шума)

ская система – апертурная функция фотоприемника можно с хорошей точностью описать одним линейным звеном с апертурной функцией $T(x)$, имеющей гауссову форму:

$$T(x) = \exp(-x^2 / 2\sigma^2). \quad (2)$$

Таким образом, в силу линейности процесс преобразования сигнала $H(x)$ этими звеньями можно записать в виде [1]

$$H_{filt}(x) = \int_{-\infty}^{+\infty} T(y)H(x-y)dy. \quad (3)$$

По теореме о спектре свертки [1] в частотной области уравнение (3) эквивалентно выражению

$$h_{filt}(v) = t(v)h(v), \quad (4)$$

где $h_{filt}(v)$, $h(v)$, $t(v)$ – амплитудные спектры (преобразование Фурье, взятое по модулю) функций $H_{filt}(x)$, $H(x)$ и $T(x)$ соответственно. Оптическая передаточная функция $t(v)$ имеет гауссову форму (так как преобразование Фурье от функции Гаусса также является функцией Гаусса), т.е. звено $T(x)$ является фильтром нижних частот. Спектр результирующего сигнала $h_{filt}(v)$ примет вид, показанный на рис.2. Здесь и далее полагаем, что спектр исходного сигнала $h(v)$ примерно одинаков на отрезке $[0, v_h]$, $v_h \gg \sigma_v$, и в силу выражения (4) результирующий спектр будет повторять $t(v)$ по форме (см. рис.2). Такой подход означает, что уровень нелинейных искажений определяется только характеристиками звена $T(x)$ без влияния особенностей спектра исходного сигнала.

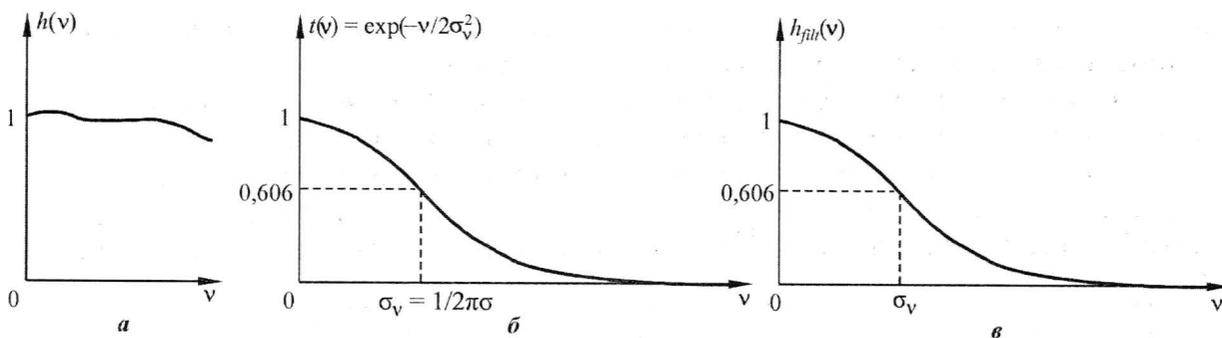


Рис.2. Преобразование сигнала звеньями ОЭТ в частотной области:
 а – исходный сигнал; б – фильтр; в – результирующий сигнал

Рассмотрим звено оптико-электронного тракта, осуществляющее дискретизацию (выборку) сигнала с помощью пространственной решетки (см. рис.1). Спектр функции $h_d(v)$ определяется выражением [1]

$$h_d(v) = \sum_{-\infty}^{+\infty} h_{filt}(v - n/\Delta). \quad (5)$$

Из (5) следует, что спектр функции $h_d(\nu)$ состоит из совокупности спектров $h_{filt}(\nu)$, размноженных с интервалом $2\nu_n = 1/\Delta$. Компоненты соседних спектров накладываются друг на друга, причем степень перекрытия размноженных спектров (т.е. уровень искажений 1-го рода) зависит не только от выбора частоты Найквиста, но также и от «ширины» гауссоиды, т.е. от $\sigma_\nu = 1/2\pi\sigma$. Отсюда уровень искажений 1-го рода может быть представлен функцией от параметра σ/Δ . В результате эксперимента, проведенного в НПО «Лептон», эта функция была определена (рис.3). Представленная зависимость показывает уровень потенциально возможных (максимальных) искажений 1-го рода. Эти искажения определяют усредненную на выборку оценку разницы между $H_{filt}(x)$ и $H_{rec}(x)$ ($H_{rec}(x)$ – восстановленный сигнал, прошедший оптимальную фильтрацию). При проектировании оптико-электронного тракта необходимо придерживаться величины $\sigma/\Delta \approx 0,5 - 0,6$. Уменьшение σ/Δ приведет к неприемлемому уровню искажений 1-го рода, а увеличение σ/Δ – к неоправданному возрастанию потока информации, передаваемой с космического аппарата. Согласованность характеристик оптики и фотоприемника имеет большое значение, например применение в космическом аппарате дистанционного зондирования Земли «Янтарь» излишне качественной оптики и фотоприемника с большим шагом «решетки» привело к показателю $\sigma/\Delta < 0,4$ и как следствие – к большому уровню искажений изображений малоразмерных объектов. В результате космический аппарат не обеспечил требуемого линейного разрешения на местности.

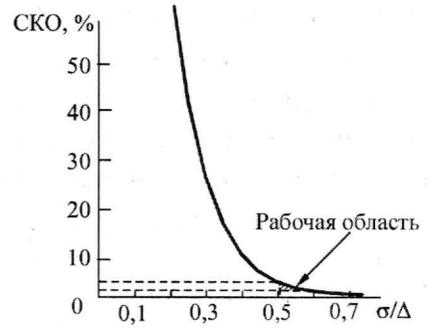


Рис.3. Зависимость уровня искажений 1-го рода от параметра σ/Δ (СКО – среднеквадратичная ошибка)

Между тем использование параметра σ/Δ не всегда возможно, так как существуют такие пространственные соотношения в ОЭТ, когда этот параметр принципиально не применим.

Обоснование нового параметра для оценки уровня искажений 1-го рода. В реальных системах возможны случаи, когда апертурные функции отдельных звеньев заметно отличаются друг от друга (рис.4). На рисунке для наглядности рассматривается функциональная пара оптика – фотоприемник. Здесь апертура фотоприемника $P(x)$ заметно «шире» апертуры оптической системы $O(x)$. При таких условиях аналог центральной предельной теоремы неприменим и суммарная апертурная функция $T(x)$ существенно отличается от гауссовой формы. Поэтому параметр σ не всегда определим.

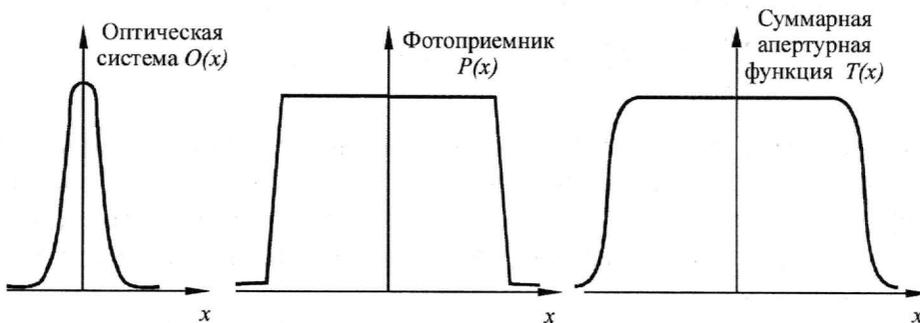


Рис.4. Пример пространственных соотношений звеньев ОЭТ

Один из возможных путей решения этой проблемы – замена $T(x)$ на гауссову функцию, подобранную так, чтобы она была предельно эквивалентной $T(x)$ по фильтрующему действию. Определив параметр $\sigma_{\text{эКВ}}$ такой «эквивалентной» гауссоиды, можно использовать параметр $\sigma_{\text{эКВ}}/\Delta$ для оценки уровня искажений. Такой способ приемлем, но для сильно ограниченного ряда апертурных функций $T(x)$ (возможных в ОЭТ). В ходе работы получено, что для ряда апертурных функций замена на гауссоиду приводит к слишком большой разнице в результате фильтрации и как следствие – в оценке нелинейных искажений.

Логично искать требуемый показатель в таком виде, чтобы он не был привязан к какой-либо конкретной функции. Тогда показатель будет универсальным и сможет охарактеризовать уровень искажений (корреляцию R) для всего спектра возможных в ОЭТ $T(x)$.

Физическая основа возникновения ошибки после дискретизации – наложение спектров (5). Будем считать, что спектр результирующего сигнала полностью повторяет форму звена $T(x)$ на достаточно большом участке оси ν . Степень перекрытия соседних спектров и определяет уровень нелинейных искажений 1-го рода. Введем показатель, позволяющий определить эту степень количественно:

$$E = E_1 / (E_1 + E_2), \tag{6}$$

где $E_1 = \int_0^{\nu_n} |F\{T(x)\}|^2 d\nu$; $E_2 = \int_{\nu_n}^{+\infty} |F\{T(x)\}|^2 d\nu$; ν_n – частота Найквиста.

Такой показатель отражает долю спектральной энергии, содержащейся в интервале $[0, \nu_n]$. Чем больше E , тем меньше перекрытие спектров. Если вся энергия спектра содержится в интервале $[0, \nu_n]$ ($E = 1$), то перекрытия спектров нет совсем, следовательно, нет искажений.

В настоящей работе ставилась задача установить связь между уровнем нелинейных искажений и величиной E . Выяснилось, что применение нормализованной среднеквадратической ошибки для оценки искажений имеет ряд недостатков, главный из которых – данная величина не ограничена сверху. Во время работы с различными апертурными функциями среднеквадратичная ошибка нередко принимала значение 120–150%, что затрудняло адекватную оценку искажений первого рода. Введем в качестве альтернативы среднеквадратичной ошибке другой показатель – нормализованный коэффициент взаимной корреляции:

$$R = \frac{\sum_{i=1}^N (H_{\text{filt}}(x_i) - \bar{H}_{\text{filt}}(x_i)) \sum_{i=1}^N (H_{\text{rec}}(x_i) - \bar{H}_{\text{rec}}(x_i))}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (H_{\text{filt}}(x_i) - \bar{H}_{\text{filt}}(x_i))^2 \sum_{i=1}^N (H_{\text{rec}}(x_i) - \bar{H}_{\text{rec}}(x_i))^2}},$$

где N – длина вектора x ; \bar{H} – математическое ожидание величины H . Данный коэффициент часто применяется для определения статистической взаимозависимости двух функций и имеет две четкие границы 0 и 1. Уровень взаимной корреляции позволит адекватно определить, насколько изменился входной сигнал после дискретизации и последующего восстановления.

Для определения зависимости «доля энергии E – нелинейные искажения (коэффициент корреляции R)» разработан алгоритм, блок-схема которого показана на рис.5.

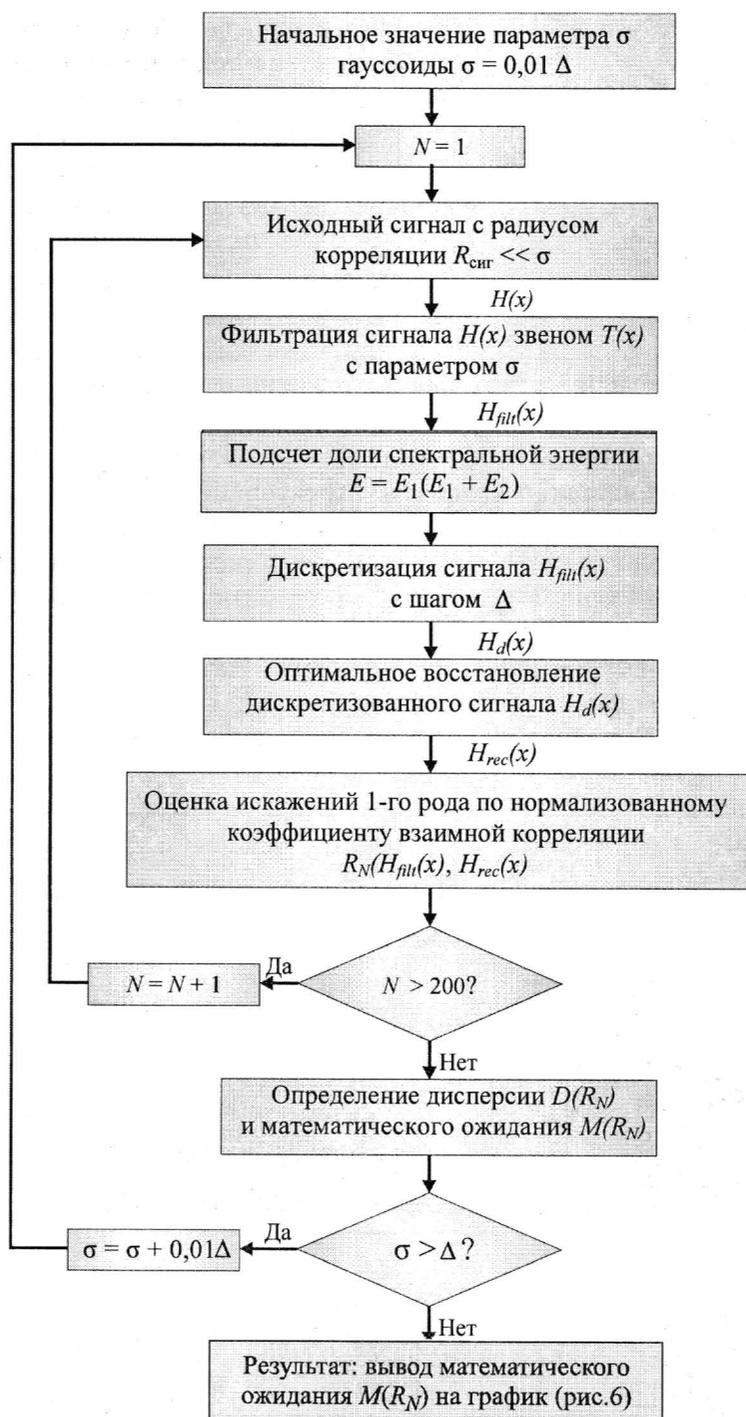


Рис. 5. Блок-схема алгоритма оценки нелинейных искажений

В качестве примера в алгоритме используются результирующая апертурная функция $T(x)$ в виде функции Гаусса, а также случайный сигнал $H(x)$ (полученный с помощью стандартной машинной функции `random`) с радиусом корреляции $R_{\text{корр}} \ll \sigma$. Это означает, что в спектре такого сигнала велика доля высокочастотных компонент. «Ширина» спектра профильтрованного сигнала $H_{\text{filt}}(x)$ определяется спектром звена $T(x)$. Выбор сигнала такого вида позволяет оценить потенциально возможный (максимальный) уровень

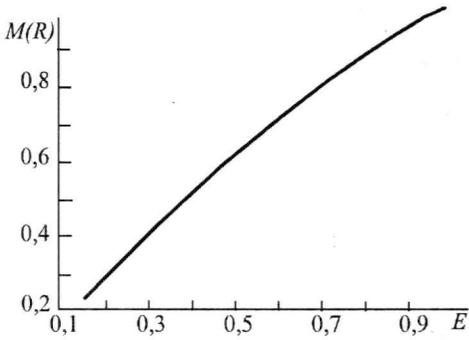


Рис. 6. Результат работы алгоритма оценки искажений

нелинейных искажений. Применение более коррелированного (более низкочастотного) сигнала уменьшает уровень перекрытия спектров, соответственно, ошибка дискретизации уменьшается.

На рис.6 показан результат работы алгоритма. Применение алгоритма для апертурных функций $T(x)$ различной формы показало, что для них также справедлива показанная на рис.6 зависимость. Таким образом, подтверждается обоснованность выбора E в качестве универсального показателя, по которому можно оценить уровень нелинейных искажений 1-го рода.

Экспериментальное определение влияния показателя E на качество космических снимков. Важно правильно согласовать характеристики фотоприемника и фильтрующих звеньев ОЭТ космического аппарата. Для подтверждения данного факта в НПО «Лептон» было смоделировано построение изображения, прошедшего через звенья ОЭТ, по аналогии с алгоритмом на рис.6. Эксперимент заключался в определении типа объекта (самолета, ракетной установки и др.) на изображении, прошедшего через фильтрацию и выборку, а затем восстановленного оптимальным образом. Характеристики изображения подобраны так, что наблюдаемый объект был близок к пределу распознавания (до типа). Вероятность такого распознавания оценивалась по изменению показателя E , смоделированного ОЭТ.

На рис.7 показано, какого вида искажения связаны с наложением спектров – это искажения контуров, пропадание истинных и появление ложных деталей и др.

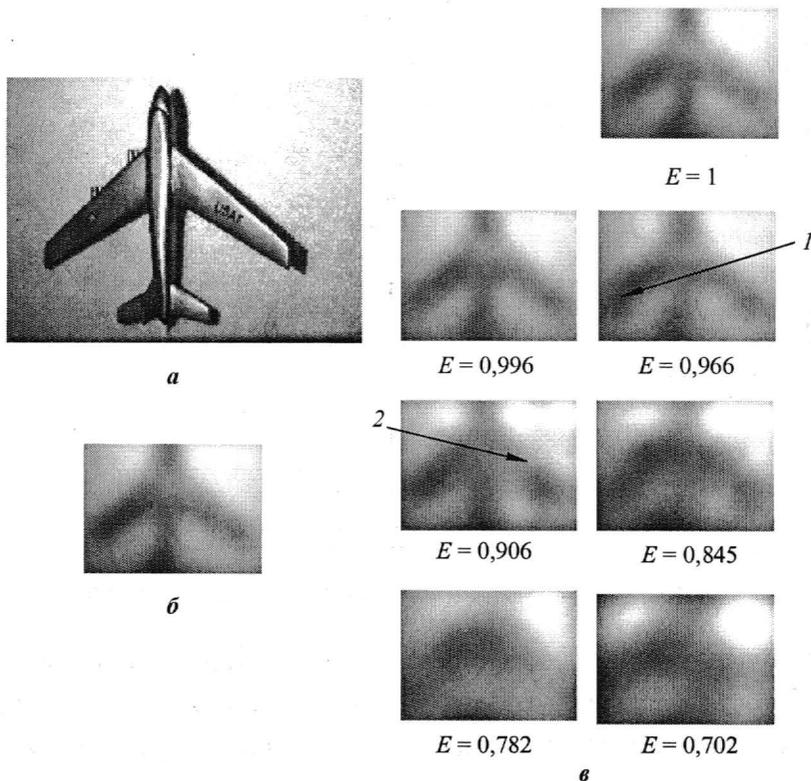


Рис. 7. Моделирование нелинейных искажений: *a* – исходное изображение (самолет Б-52); *б* – профилированное изображение – эталон, с которым сравнивают качество всех восстановленных снимков; *в* – восстановленные изображения. Искажения, связанные с наложением спектров: *1* – изменение контуров, *2* – исчезновение деталей

По результатам эксперимента можно сделать ориентировочный вывод, что допустимо наложение спектров до 2%, т.е. не менее 98% спектральной энергии должно находиться внутри интервала $[0, \nu_n]$ ($E = 0,98$). Если $E < 0,98$, то искажения заметны, а при $E \approx 0,8$ изображение искажается практически до неузнаваемости.

Предложенный показатель (6) позволяет априорно оценить уровень нелинейных искажений первого рода, возникающих в ОЭТ космического аппарата. Данный показатель можно вычислить для всех видов апертурных функций (возможных в ОЭТ), а зависимость «показатель E – уровень искажений» универсальна и не зависит от формы апертурной функции. Эксперимент показал, что при проектировании ОЭТ необходимо придерживаться $E \approx 0,98$.

Литература

1. *Ллойд. Дж.* Системы тепловидения. – М.: Мир, 1978. – 414 с.
2. *Вентцель Е.С., Овчаров Л.А.* Теория вероятностей и ее инженерные приложения. – М.: Наука, 1988. – 480 с.

Статья поступила
1 декабря 2006 г.

Сокол Александр Валентинович – аспирант кафедры «Системы, устройства и методы геокосмической физики» Московского физико-технического института (государственного университета). *Область научных интересов:* изучение и разработка устройств сжатия изображений на основе вейвлет-преобразования.



Книжные новинки

Герасименко Н.Н., Пархоменко Ю.Н. Кремний – материал нанoeлектроники. – М.: Техносфера, 2006. – 352 с., 3 с. цв. вклейки
ISBN: 978-5-94836-101-7



Монография посвящена рассмотрению проблем и возможностей использования кремния для создания приборов и устройств нанoeлектроники и нанoфотоники. Даны представления о квантоворазмерных эффектах, возможности их проявления в кремниевых элементах и структурах, а также физических ограничениях.

Рассмотрены наиболее перспективные технологические возможности формирования наноразмерных кремниевых структур.

ПРОБЛЕМЫ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ

УДК 658.14.8

Проблемы ИТ-подготовки специалистов непрофильных специальностей на примере специальности 080801 «Прикладная информатика в экономике»

Л.Г.Гагарина, А.И.Баркова

Московский государственный институт электронной техники
(технический университет)

Рассмотрены наиболее существенные проблемы информационной подготовки студентов по специальности 080801 «Прикладная информатика в экономике». Проанализированы возможности изменения программы обучения, приведены примеры решения актуальных проблем.

В век глобальной информатизации наиболее перспективной междисциплинарной специальностью является «Прикладная информатика в экономике». Эта двухпрофильная специальность (с квалификацией информатик-экономист) предоставляет широкие возможности в выборе деятельности: маркетинг и реклама; менеджмент организации и административное, антикризисное управление; страховое, таможенное, банковское дело; фондовый рынок; управление малым бизнесом; бухгалтерский учет; администрирование и разработка баз данных; проектирование и разработка информационных систем; прокладка и администрирование локальных сетей; проведение реинжиниринга бизнес-процессов организаций; бизнес и технические консультации; тестирование программного обеспечения; ИТ-менеджмент и др.

Квалификация выпускника дает неоспоримое преимущество при трудоустройстве, поскольку информатик-экономист – это эрудированный специалист широкого профиля, получивший фундаментальные знания в области информатики и профессиональные знания в области экономики, менеджмента и маркетинга. Широта кругозора и определенная универсальность специальности позволяют информатику-экономисту при необходимости полностью переориентировать свою деятельность на специализацию выбранной области.

Существуют определенные проблемы ИТ-подготовки специалистов. В настоящей работе рассматриваются наиболее актуальные из них.

В существующей системе образования знания устаревают быстрее, чем заканчивается процесс их передачи. Кроме того, образование должно быть непрерывным на протяжении всей активной фазы жизни человека. Следует отметить, что содержание образования, с точки зрения студента, делится на формально-бесполезное и прагматически-необходимое. «В зависимости от того, в какой из двух перспектив обучающийся воспринимает материал, он и учится – хорошо или плохо, ответственно или разгильдяйски. Советские «марксизмы-ленинизмы» воспринимались сложно в советской школе не потому, что они были из прошлого, а потому, что их было сложно привязать к реальной жизни. Они были формальностями. Тогда как при подготовке будущих философов на

философских факультетах вузов они смотрелись вполне прагматично» [1]. Поэтому необходимо определить, какой объем информации и какие направления знаний достаточно преподавать в рамках программы обучения.

Под профессиональным образованием традиционно понимается получение навыков в массовых профессиях. Как показывают современные исследования, эпоха профессий «на всю жизнь» проходит. Все больше выпускников работают не по специальности, используя образование как социализацию в смысле налаживания навыков, компетенций, социальных связей, а не как получение профессии. У информатиков-экономистов есть выбор между двумя совершенно разноплановыми направлениями: информатикой и экономикой. Можно углубиться в любую из областей, а также работать на их стыке.

По мнению многих студентов, высшее образование – вещь, в принципе, ненужная, но необходимая. Оно ничего не дает, но без него ничего не добиться. Это говорит о том, что образование воспринимается как формально-бесполезное в большинстве случаев и как прагматически-необходимое лишь за редким исключением. Все вышесказанное относится к фундаментальным знаниям, так как современная высшая школа строится на двух образовательных принципах: дать знания понемногу о многом; возможность выбора набора получаемых знаний (осуществляется государством в лице учебного заведения, а не студентом).

Известной проблемой российского профессионального образования в сфере ИТ-технологий на сегодняшний день является дефицит подготовленных специалистов. Одна из особо дефицитных позиций на современном рынке труда – ИТ-менеджеры – люди, способные руководить ИТ-проектами. Также существенный дефицит кадров сложился на рынке ИТ-консультантов, способных внедрять системы комплексной автоматизации предприятий (ERP-системы). Однако таких специалистов вузы ежегодно готовят лишь 3,5 тыс. человек. По данным компании «1С», существует потребность в ИТ-специалистах на уровне 350 тыс. человек в год. Проблема состоит в неспособности вузов готовить студентов этой специализации. Преподавателей, знающих как работать с программными продуктами SAP, Oracle, отечественных систем автоматизации от «1С» и иных ERP-систем, в вузах недостаточно [2].

Образование нуждается в тотальном техническом и технологическом переоснащении, повышении квалификации преподавательского корпуса и в организационной перестройке, т.е. в переходе к непрерывному профессиональному образованию с включением в единую систему всех его ступеней. Изменения в структуре и формах профобразования необходимо проводить одновременно с качественным обновлением его содержания [3].

Качество подготовки специалистов не удовлетворяет требованиям современных предприятий, которые вынуждены завершать подготовку молодого специалиста в течение 1–2 лет, что достаточно дорого [2]. Оторванность высшего образования от производства – одна из самых существенных проблем высшего профессионального образования.

С одной стороны, сложившаяся система дает фундаментальные знания во многих областях или всего понемногу. Плюсом является некоторая универсальность такого специалиста, ему легко перенастроиться, переучиться, минусом – сложно стать действительно профессионалом в своем деле. С другой стороны, специалист получает высокую квалификацию в единственной области знаний за счет ее узости.

Только объединив два совершенно противоположных подхода можно получить максимальный результат. Наиболее перспективным направлением подготовки ИТ-специалистов к успешному карьерному продвижению является объединение усилий предприятий и учебных заведений. В результате образовательные проекты

должны гармонично совмещать реальные потребности производства и фундаментальный уровень вузовской подготовки.

В качестве примера можно привести совместную деятельность МИЭТ и компании Cadence Design Systems, Inc. (NYSE:CDN), которые проводят специализированную магистерскую образовательную программу на базе МИЭТ при технической и финансовой поддержке компании Cadence. Основой проекта, стартовавшего в начале 2002 г., явился специализированный учебный план, совместно разработанный специалистами МИЭТ при поддержке компании Cadence, и ориентированный на обучение студентов выпускников бакалаврской программы современным средствам проектирования, используемым в микроэлектронике. Данный образовательный проект призван способствовать удовлетворению потребности высокотехнологических российских предприятий в новых специалистах в таких перспективных и быстро развивающихся областях, как аналогово-цифровой дизайн (AMS) и разработка систем на кристалле (SOC). Интерес к выпускникам программы со стороны будущих работодателей очень высок и, по оценкам МИЭТ, превышает предложение. Компания Cadence передала МИЭТ в безвозмездное пользование компьютеры и лицензии на свое программное обеспечение, финансирует оплату труда преподавателей и выплачивает дополнительные стипендии студентам, а также обеспечивает техническую поддержку специализированной лаборатории, подготовку и обучение преподавательского состава [4].

Другим примером успешного сотрудничества высших учебных заведений и предприятий является деятельность компании SoftLine – эксклюзивного партнера Microsoft по продвижению Программы Microsoft IT Academy в России и СНГ. Академическая программа SoftLine направлена на тесное взаимодействие и сотрудничество с ведущими вузами России и СНГ. Цель Программы – объединить в профессиональное сообщество университеты, учебные заведения дополнительного профессионального образования, производителей ПО, государственные и бизнес-структуры, заинтересованные в высоком качестве подготовки студентов к работе в компаниях ИТ-отрасли или в ИТ-отделах предприятий. Программа реализуется через сеть совместных учебных центров SoftLine Academy, главная задача которых – помочь студентам и выпускникам приобрести необходимые для ИТ-специалистов прикладные знания и навыки, а также подготовиться к сдаче экзаменов для получения международного сертификата ИТ-профессионала.

Учебные центры SoftLine Academy являются участниками Программы Microsoft IT Academy и предлагают систему дополнительного обучения, которая ориентирована на международную сертификацию слушателей и их трудоустройство в ведущие российские ИТ-компании и ИТ-отделы промышленных предприятий. Российское представительство корпорации Microsoft совместно с компанией SoftLine проводят бесплатные курсы по повышению квалификации для преподавателей вузов по продуктам и технологиям Microsoft.

SoftLine IT Graduate – новое направление группы компаний SoftLine, созданное для реализации потребности российских и международных организаций в привлечении к работе молодых специалистов. SoftLine IT Graduate специализируется в области информационных технологий и проводит круглогодичный отбор среди студентов и выпускников ИТ-специальностей, а также молодых специалистов с опытом работы до 1 года для последующего трудоустройства в ИТ-отделы крупных российских и международных компаний [5].

Существенная трудность ИТ-подготовки специалистов – отставание темпов внедрения нового программного обеспечения в образовательных учреждениях от темпов обновления программного обеспечения на ИТ-рынке. В этом случае существует несколько вариантов

решения проблемы: учебные заведения сами закупают программное обеспечение и обучают преподавателей (но не все вузы располагают столь существенными суммами на закупку программного обеспечения и обучение преподавательского состава); учебные заведения заключают договоры о сотрудничестве с отечественными и зарубежными фирмами-интеграторами, заинтересованными в высококачественной подготовке специалистов в области информационных технологий, которые и предоставляют наиболее современные программные продукты для использования в учебном процессе. В результате такого сотрудничества в некоторых вузах России преподаются учебные курсы с использованием таких программных продуктов, как БОСС-референт, БОСС-кадровик на платформе Lotus Notes, Project-Expert, Project-Market, ARIS, АХАРТА и др. [6].

Еще одним вариантом решения проблем ИТ-подготовки специалистов является создание специализированных институтов, которые не ставят своей целью подменить существующие вузы. Такие учебные заведения не занимаются фундаментальным образованием, в программах их специальностей нет социально-гуманитарных и естественно-научных дисциплин, они проводят узкоспециальное профессиональное обучение в области информационных технологий для тех, кто хочет получить практическую подготовку и найти достойную работу. Таким образом происходит «точечная заточка» будущих специалистов под конкретные ИТ-специальности. И делают это не преподаватели-теоретики, а ИТ-специалисты, передающие студентам свой опыт работы с ведущими мировыми телекоммуникационными и ИТ-компаниями.

Примером такого учебного заведения может служить Нижегородский институт информационных технологий (НИИТ), передающий опыт компании «Мера НН», которая работает со всеми телекоммуникационными стандартами и технологиями – CDMA, GSM, GPRS, а также с IP-телефонией. Помимо авторских курсов, в НИИТ проводится авторизованное обучение по программам ведущих компаний-производителей оборудования и программного обеспечения – Cisco Systems, Oracle, Microsoft [7].

Рассмотренные проблемы ИТ-подготовки информатиков-экономистов со временем трансформируются в более сложные, но с ними можно справиться в случае интеграции усилий высших учебных заведений и предприятий. Это необходимо провести в максимально короткий срок с привлечением возможных средств и ресурсов.

Литература

1. Шмидт С. Российское образование: в стороне от нормы, идеала и реальности от 25.04.2006. – <http://3mill.ru/index.php>
2. Спрос без предложения / Rambler Mass Media: Время новостей. – 2006. – <http://www.rambler.ru/news/>
3. Чижова Л. Развитие трудового потенциала: обоснование стратегии // Человек и труд. – 2006. – № 1.
4. http://www.miee.ru/strict/96/24_09_3.html
5. Официальный сайт SoftLine Academy <http://it-academy.ru/>
6. <http://www.mephi.ru/win/study/eai.htm>
7. Гурьева Л. Городу нужны программисты, но какие? от 06.10.2006. – <http://www.abm.r52.ru/>

Статья поступила
13 апреля 2007 г.

Гагарина Лариса Геннадьевна – доктор технических наук, профессор кафедры информатики и программного обеспечения вычислительных систем МИЭТ. *Область научных интересов:* автоматизация технологических процессов, проектирование автоматизированных информационных систем, управление в технологических системах.

Баркова Алёна Игоревна – студентка МИЭТ. *Область научных интересов:* реинжиниринг бизнес-процессов.

Организация кураторской работы на факультете

Т.В.Попова

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

Освещены различные виды работ, которые выполняет куратор на факультете технического вуза. Кураторство рассматривается как институт для повышения качества подготовки специалистов, а также для индивидуальной воспитательной работы со студентами. Приведены формы организации кураторской работы и ее задачи на подготовительном этапе. Рассмотрен примерный план работы куратора, приводятся конкретные виды его деятельности.

Истоки кураторской работы уходят корнями в прошлое. Еще в 1903 г. император Николай II утвердил «Инструкцию для кураторов», в которой указал, что «кураторы, служа посредниками между Советом Института и студентами, являются, с одной стороны, руководителями студентов, с другой же стороны, ходатаями перед соответствующими академическими органами об удовлетворении уважительных и в законных формах заявленных нужд и потребностей студентов».

В настоящее время Институт кураторства после некоторого перерыва вновь восстанавливается во многих вузах [1]. Куратор – это не просто формальная должность. Предназначение куратора с нашей точки зрения состоит в следующем:

- 1) налаживание связей между студентами группы и администрацией факультета;
- 2) налаживание связей между студентами группы и профессорско-преподавательским составом факультета;
- 3) помощь в налаживании деловых и неформальных связей по ряду потребностей и интересов в малой группе лиц с разным социальным уровнем;
- 4) «вживание» каждого конкретного студента группы в учебную и общественную жизнь факультета;
- 5) помощь в решении различных проблем студентов курируемой группы.

Приоритеты перечисленных выше пунктов изменяются в процессе «взросления» студенческой группы (в том числе переход на старшие курсы, психологический настрой группы).

По нашему мнению, для студентов младших курсов актуальность пунктов 3–5 является очевидной. Для них период самоорганизации связей проходит достаточно долго и иногда даже болезненно. Если в группе оказывается студент – прирожденный организатор, душа любой компании, тогда процесс сплочения идет быстро, если много организаторов или их вовсе нет, то задача сплочения студенческой группы становится актуальной.

Важен и процесс формирования характера коммуникаций для всей группы, для отдельных группировок (любовь, симпатия, расположение, дружба, товарищество, деловые связи, привязанность).

Желание студентов создать сплоченную группу и объективная необходимость этого процесса очевидны. Студенческая группа может быть заинтересована в деятельности внешнего наставника для сплочения, улучшения успеваемости и т.д. Эту услугу со стороны факультета предоставляет куратор.

Созданная система кураторства начинает работать уже с первого года обучения, и к четвертому курсу, сопровождаясь естественными подъемами и спадами активности, набирает силу.

Организация кураторской работы начинается с подготовительного этапа, на котором необходимо решить две задачи: подбор кураторов и подготовка плана работы на учебный год.

Кураторов выбирают из числа ведущих, опытных преподавателей, пользующихся авторитетом и уважением у студентов и имеющих склонность к воспитательной работе. К этой деятельности могут привлекаться и желающие молодые преподаватели, однако необходим больший контроль за их работой.

Куратор – наставник студентов. Он координирует внеучебную воспитательную работу в группе или на курсе, поддерживает контакты с администрацией, общественными организациями и средствами информации. В институте имеется «Положение о кураторе», которое регламентирует их работу и является ориентиром для молодых преподавателей.

План работы кураторов, как правило, состоит из пяти разделов. Это деление достаточно условно, так как различные виды работ в разных разделах тесно связаны друг с другом:

- 1) организационная работа;
- 2) общеинститутские мероприятия;
- 3) факультетская работа;
- 4) индивидуальная работа со студентами;
- 5) другие виды работ.

В организационную работу включаются: проведение собраний студентов, заседания Студсовета, выборы студенческого актива, оформление информационного стенда и т.д.

В первом семестре со студентами проводят два собрания. На первом рассказывают о будущей профессии, институте, его Уставе, структуре, порядках, традициях, об известных выпускниках, особенностях организации учебного процесса в вузе и требованиях к студентам.

Второе собрание посвящают выборам актива курса: старосты, профорга, спорторга и культорга из уже выбранных ранее активистов групп. Собрание помогают проводить (а в последнее время проводят самостоятельно) студенты-активисты старших курсов.

Вот уже несколько лет на факультете действует Студенческий Совет (Студсовет) – выборный орган студенческого самоуправления, который возглавляет председатель. В состав Студсовета входят активисты курсов. Устав Студсовета разрабатывается самими студентами. Следует отметить, что создание и становление Студсовета дело непростое. В первое время особого энтузиазма у большинства студентов это не вызывало. Во многих группах актив был сформирован не в полном составе. Но в Студсовет вошли люди энергичные, которые пользовались доверием. К этому добавилась ответственная работа председателя Студсовета, а также проводимые в институте общестуденческие мероприятия. В настоящее время почти во всех группах есть актив.

Студсовет регулярно организует заседания, на которых рассматриваются самые разнообразные вопросы: учеба, спорт, культурные мероприятия, подготовка к праздникам. На заседании также выбираются лучшие группы курсов по итогам прошедшего семестра.

Члены Студсовета оказывают помощь и поддержку организаторам во всех коллективных мероприятиях. Эффективность работы куратора значительно выше, если он опирается на работающий студенческий актив.

Возвращаясь к собраниям, необходимо добавить, что в последующем собрания курсов проводят один раз в семестр. Повестку дня куратор подготавливает при участии актива. Обсуждаются и подводятся итоги прошедшего семестра, особенности учебного процесса в текущем семестре, предстоящие внеучебные мероприятия.

Своевременно доведенная до сведения студентов информация помогает не только вовлекать студентов в активную общественную жизнь. В прошедшем учебном году силами активистов (при участии куратора) был создан стенд «Студенческая жизнь факультета».

Студенты факультета принимают участие во всех *общеинститутских мероприятиях*. Это различные праздники (вручение студенческих билетов, День первокурсника, День рождения института, День факультета, День Студгородка, День Победы, выпускной вечер и др.), научно-техническая конференция студентов и аспирантов, социологические опросы, субботники, конкурсы, выставки, спортивные соревнования, КВН, художественная самодеятельность и др. Основная тяжесть организационной работы лежит на недавно созданном в институте Управлении по внеучебной воспитательной работе (УВВР), которое координирует и направляет работу кураторов.

Участие в подобных мероприятиях воспитывает в студентах уважительное отношение друг к другу, стимулирует интерес к коллективному и индивидуальному творчеству.

Куратор участвует в большинстве мероприятий института. В данном случае главная его задача состоит не только в обеспечении организации мероприятий, но и в привлечении студентов к участию в них. Здесь не лишними будут беседы в группах, помощь актива, моральные стимулы (грамоты, благодарности). Конечно в этой части кураторской деятельности имеются проблемы. УВВР и кураторы пытаются сообща найти выход из трудных ситуаций.

Факультетская работа предполагает прежде всего контроль за текущей успеваемостью и зачетной и экзаменационной сессиями. По инициативе кураторов контроль текущей успеваемости введен на четвертом курсе, хотя прежде он был только на первых трех. Куратор постоянно взаимодействует со старостами групп, вызывает отстающих студентов, выясняет причины отставания, принимает меры к их устранению. При невыполнении учебного плана студенту по представлению куратора сначала объявляется выговор по деканату, затем выговор с предупреждением об отчислении и только после этого студент представляется к отчислению.

При возникновении конфликтных ситуаций (в том числе преподавателя со студентом или со студентами) куратор предварительно разбирается в случившемся. Затем (при необходимости) он организует заседание студенческого актива, на которое приглашает в зависимости от ситуации студентов, преподавателей, заведующего или заместителя заведующего кафедрой, членов Студсовета, а иногда и декана.

Одной из главных задач куратора в части факультетской работы является содействие в формировании студенческого коллектива. В каждой группе должна царить атмосфера дружбы и взаимопомощи. Инструментом для решения этой задачи являются мероприятия, в которых участвует группа. Дружные сплоченные коллективы обычно демонстрируют более высокую успеваемость и общественную активность.

Важным факультетским событием является проведение традиционного Дня факультета. Подготовкой занимаются в основном студенты при участии и контроле кураторов и декана.

Иногда студенты сами придумывают различные мероприятия. В последние годы по инициативе студентов старших курсов на факультете для студентов первого курса проводится шуточный выездной (на природе) праздник «Посвящение в студенты».

Особенность работы куратора на старших курсах – это помощь студентам в выборе места производственной практики с учетом их будущей работы, помощь в принятии решения о дальнейшей учебе и другие вопросы.

Как видно из изложенного, работа куратора является многогранной, сложной и трудоемкой. Однако необходимо помнить об *индивидуальной работе со студентами* [2].

Куратор должен строить свои взаимоотношения со студентом так, чтобы положительно воздействовать на его духовное и физическое развитие.

Индивидуальный подход в работе со студентами дает возможность реализовать и конкретизировать воздействие на личность, позволяет найти наиболее эффективные формы воспитания, которые надо выбирать так, чтобы в них обязательно присутствовало стимулирование активности и творческих усилий самого студента, так как для формирования личности недостаточно одного воздействия извне.

Куратор регулярно проводит консультации для студентов, на которые они могут прийти с любым вопросом. К сожалению, пока большую часть этого времени занимает не профилактика, а работа с «проблемными» студентами.

Важно неформально подходить к решению всех вопросов в отношении каждого студента и учитывать семейное, материальное положение, состояние здоровья.

Помощником в работе куратора является журнал, в который можно заносить различную информацию о студентах: их успеваемость, контактные телефоны, адреса, имена и телефоны родителей, участие в общественной работе, поощрения, выговоры. Ведение такого журнала – дело трудоемкое и хлопотное, но работа куратора становится при этом более продуктивной и удобной.

В других видах работ хотелось бы отметить взаимодействие с родителями студентов. Кураторы предоставляют информацию об успеваемости. В последнее время родителям отличников направляются письма с благодарностью.

Кроме того, куратор выполняет следующую работу:

- при необходимости составляет характеристики на студентов;
- участвует в назначении именных стипендий;
- посещает студентов, живущих в общежитии;
- участвует в работе дисциплинарной комиссии;
- подготавливает материалы для институтской газеты;
- вместе с активистами ведет фотохронику факультетской жизни.

Куратор несет ответственность за свою работу перед Ученым Советом факультета, который утверждает план его работы, регулярно заслушивает отчеты о проделанной работе. Это делается не только с целью контроля, но также помогает систематизировать свои представления о ходе воспитательной работы, выявлять ошибки, получать полезные советы.

Анализ результатов нескольких лет кураторской работы показал, что среди студентов, активно участвующих в работе Студсовета, в различных проводимых на факультете и в институте мероприятиях, практически нет двоечников и нарушителей дисциплины.

Изложенный материал поможет начинающим и уже работающим кураторам быстрее освоить непростое дело воспитания студентов. Как говорится, дорогу осилит идущий.

Литература

1. **Кагерманьян В.С.** Современная система воспитания студентов вузов: концептуальные основы и программа развития // Система воспитания в высшей школе: Аналитические обзоры по основным направлениям развития высшего образования. – М.: ФИРО, 2006. – Вып.4. – С.68.
2. Единство образовательного и культурно-воспитательного пространства в системе высшей школы. – Ростов-н/Д. – 2004.

Статья поступила
9 ноября 2006 г.

Попова Татьяна Викторовна – доцент кафедры проектирования и конструирования интегральных микросхем МИЭТ. *Область научных интересов:* логическое проектирование, языки высокого уровня как средство проектирования логических устройств; методология преподавания в высшей школе.

КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ

УДК 620.179.152.1:546.28

Рентгеновская рефлектометрия кремния, имплантированного фтором

Н.Н.Герасименко, С.А.Апрелов, А.Н.Тарасенков, С.В.Калинин

Московский государственный институт электронной техники (технический университет)

А.Г.Турьянский, И.В.Пиршин

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

Возможности принципиально новой модификации рентгеновского рефлектометра, основанного на использовании двухволновой измерительной схемы (результат формируется из анализа отношения сигналов) и других конструктивных решений, позволяют применять маломощные источники рентгеновского излучения (≤ 300 Вт), проводить экспресс-анализ с повышенной чувствительностью, а также сократить время на обработку результатов [1]. Использование такой установки для решения задач микроэлектроники базируется, прежде всего, на ее безопасности для обслуживающего персонала, возможности проведения систематических рутинных измерений (в том числе для пооперационного контроля), а также на применении разработанного пакета программ для анализа экспериментальных результатов. При этом решается проблема определения параметров имплантированных слоев без разрушения образца, выявляются ранее неизвестные эффекты.

Исследование кремния после ионной имплантации, в частности ионами F^+ , в ряде случаев представляет особый интерес для микроэлектронной технологии. Именно на таких объектах обнаружены ранее неизвестные явления, такие, как ускоренное образование стабильных радиационных дефектов [2] и спонтанное образование окисла (пленки естественного окисла, образующегося на поверхности кремния, модифицированного фтором) при хранении имплантированных образцов при комнатной температуре [3]. Исследованы два типа образцов, полученные имплантацией F^+ напрямую в матрицу кремния и через слой диоксида кремния (слой представляет собой пленку стехиометрического диоксида кремния, полученного термическим окислением во влажном кислороде при 1000 °С, толщиной $42,5$ нм; после имплантации сформированный слой удалялся травлением).

Параметры облучения образцов ионами F^+ представлены в табл.1. В табл.2 представлены результаты экспериментов с применением двухволнового рефлектометра (рис.1).

На основе анализа полученных данных можно сделать следующие выводы:

- нарастание окисла напрямую связано с дозой имплантации ионов фтора: толщина окисла, образовавшегося при комнатной температуре с большей дозой облучения (время формирования более 10 дней после облучения), заметно превышает толщину окисла, образовавшегося при меньшей дозе;

- толщина нарушенного слоя в облучаемой пластине кремния определяется условиями имплантации, т.е. при облучении через пленку окисла толщиной $42,5$ нм, толщина нарушенного слоя уменьшается на толщину окисла, что напрямую связано с профилем распределения потерь энергий налетающих ионов на упругие соударения и, следовательно, с профилем распределения вторичных радиационных дефектов (рис.2).

Таблица 1

Параметры облучения образцов ионами F^+ при $E = 40$ кэВ

Параметр	Образец			
	№ 1	№ 2	№ 3	№ 4
Доза D , $см^{-2}$	$1,25 \cdot 10^{15}$	$1,25 \cdot 10^{15}$	$9,25 \cdot 10^{15}$	$9,25 \cdot 10^{15}$
Толщина SiO_2 , нм	42,5	Естественный окисел	42,5	Естественный окисел

Таблица 2

Результаты анализа серии образцов после имплантации F^+

Материал	Параметры	Образец			
		№ 1	№ 2	№ 3	№ 4
SiO_2 (пленка естественного окисла)	Шероховатость, нм	0,7	0,9	0,1	0,1
	Толщина, нм	4,3	4,3	5,9	5,5
	Плотность, $г/см^3$	1,83	1,69	1,7	1,64
Si (нарушенный слой)	Шероховатость, нм	0,1	0,1	0,1	0,1
	Толщина, нм	42	83,3	41,2	84
	Плотность, $г/см^3$	2,29	2,29	2,29	2,29
Si (подложка)	Шероховатость, нм	0,1	0,1	0,1	0,1
	Толщина, нм	∞			
	Плотность, $г/см^3$	2,33			

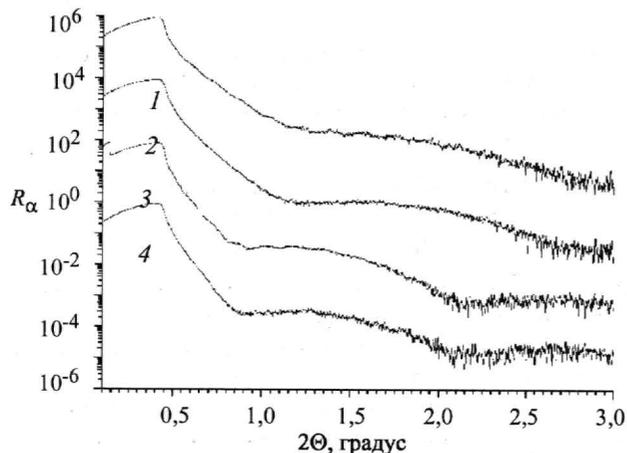


Рис.1. Экспериментальные кривые угловой зависимости коэффициентов отражения R_α от угла 2Θ для образцов, имплантированных F^+ различной дозы с энергией 40 кэВ: кривые 1, 2 – $D = 1,25 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$; 3, 4 – $D = 9,25 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$ (номера кривых соответствуют номерам образцов)

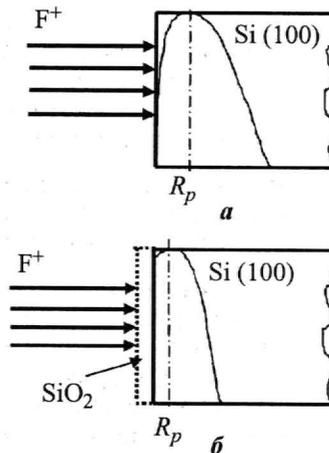


Рис.2. Схема распределения ионов F^+ при имплантации напрямую в матрицу кремния (а) и через слой диоксида кремния (б). (R_p – проецированная длина пробега ионов в кристалле)

Анализ результатов, приведенных в табл.2, позволяет обратить внимание и на другие особенности, требующие дальнейшей тщательной проверки.

1. Плотность нарушенного слоя заметно отличается от плотности монокристаллического (ненарушенного) кремния. Этот факт согласуется с моделью накопления дефектов вакансионного типа в максимуме потерь энергии на упругие соударения [4], которая основана на пространственном разделении вакансий и междоузельных атомов.

2. Плотность оксида с увеличением дозы уменьшается, причем наблюдается разница по плотности при облучении через пленку диоксида и без нее таким образом, что плотность пленки при одинаковой дозе облучения больше на образцах, облученных через пленку предварительно нанесенного диоксида. Обе эти зависимости согласуются с предположением, что количество внедренного фтора определяет плотность нарастающего при хранении естественного окисла. Эти наблюдения могут быть сопоставлены с известным фактом [5], что скорость травления пленки диоксида, выращенной на поверхности кремния, облученного ионами F^+ , увеличивается.

Таким образом, применение двухволновой рентгеновской рефлектометрии может служить эффективным методом контроля параметров как имплантированных слоев, так и пленок формирующихся на их поверхности. Однако для более точного определения геометрии нарушенных слоев и сопоставления измеряемой толщины нарушенного слоя с расчетными параметрами профиля распределения потерь энергии на упругие соударения (см. рис.2) необходимо учитывать реальное распределение вакансионных дефектов, накопление которых приводит к уменьшению плотности (при облучении легкими ионами это распределение смещается в сторону облучаемой поверхности образца [4]).

Литература

1. Турьянский А.Г., Виноградов А.В., Пиришин И.В. Двухволновой рентгеновский рефлектометр // ПТЭ. – 1999. – N 1. – С. 105.
2. Аномальное дефектообразование в монокристаллическом кремнии при имплантации ионов фтора / Н.Н.Герасименко, А.А.Жуков, Н.Н.Герасименко (мл.) и др. // Изв. вузов. Электроника. – 2005. – № 4-5. – С. 185–187.
3. Герасименко Н.Н. (мл.), Герасименко Н.Н., Троицкий В.Ю., Пархоменко Ю.Н. Термооптический контроль состояния поверхности кремни // Изв. вузов. Материалы электронной техники. – 2004. – № 12. – С. 20–24.
4. Физические процессы в облученных полупроводниках / Под ред. Смирнова Л.С. – Новосибирск: Наука, 1977. – 256 с.
5. Ono Y., Kimura Y., Ohta Y., Nishida N. Antireflection effect in ultrahigh spatial-frequency holographic relief gratings // Appl. Opt. – 1987. – N 26. – P. 1142.

Поступило
6 апреля 2007 г.

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

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

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

Тарасенков Алексей Николаевич – аспирант МИЭТ. *Область научных интересов:* физика ионной имплантации и ионного синтеза, дефектообразование в монокристаллах при ионной бомбардировке.

Калинин Сергей Викторович – магистрант МИЭТ. *Область научных интересов:* анализ полупроводниковых структур, созданных ионной имплантацией, рентгеноструктурные методы исследования.

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

Катодно-плазменная металлизация тканых материалов

И.И.Бобринецкий, В.Н.Суханов

Московский государственный институт электронной техники
(технический университет)

Одним из новых направлений создания композиций на основе тканых материалов является покрытие их пленками металлов микронной толщины. Металлизированные ткани, сохраняя в основном свои объемные свойства, приобретают много новых и полезных свойств [1].

В настоящей работе исследованы прочностные свойства нитей ткани из льна, покрытых пленками металлов, а также морфология поверхности волокон до и после нанесения металлических пленок. Используются лен и металлы, которые зарекомендовали себя позитивно в медицинской и бытовой практике.

Исследования проводились на серийно выпускаемой установке AST-601, реализующей катодно-плазменный метод распыления мишеней из металлов и их сплавов в плазме аргона и позволяющей наносить распыляемые материалы на поверхность ткани. Для получения пленок изготовлены держатели для ткани с размерами до 100 мм в диаметре. Использовалась ткань из льна марки 5CO-1900 как наиболее перспективная. В качестве металлов выбраны серебро, медь и никель, которые могут положительно влиять на здоровье человека [2]. Проводилось одностороннее и двухстороннее нанесение пленок металлов на ткань. В процессе экспериментальных исследований отработаны следующие режимы нанесения пленок металлов на поверхность льняной ткани:

Предварительный вакуум в рабочей камере, торр	$1,1 \cdot 10^{-5}$
Рабочий вакуум в рабочей камере, торр	$(1,0 - 1,2) \cdot 10^{-3}$
Анодное напряжение, В	70 ± 7
Анодный ток, А	$8,0 \pm 8$
Ток катода, А	15 ± 3
Напряжение на мишени, В	900 ± 90
Ток на мишени, мА	300 ± 30
Время плазменной очистки, мин	5
Время напыления, мин	5

До и после проведения экспериментов ткань расплеталась и исследовались нити, состоящие из множества волокон (рис.1). Средний исходный размер нитей составлял до нанесения металлических пленок 240 мкм. Толщины нитей после металлизации увеличивались до 260–280 мкм. При этом на поверхности нитей был явно выражен эффект тени, который образуется при нанесении металлов на переплетенные нити в ткани. Нити были покрыты с определенным периодом участками металла. Далее нити расплетались на отдельные волокна и методом атомно-силовой микроскопии исследовались металлизированные и неметаллизированные участки поверхности волокон на сканирующем зондовом микроскопе Солвер-Р47 (НТ-МДТ, Зеленоград) [3]. Атомно-силовая микроскопия показала, что исходная морфология поверхности волокон (рис.2) практически не изменяется после нанесения металлизации. Известно, что при покрытии поверхности волокон металлическими наночастицами меняется морфология поверхности – образуются отдельные скопления наночастиц, по-видимому, слабо связанные с ней [4].

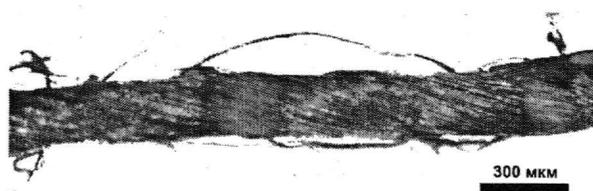


Рис.1. Фотография нити льна, покрытого медью

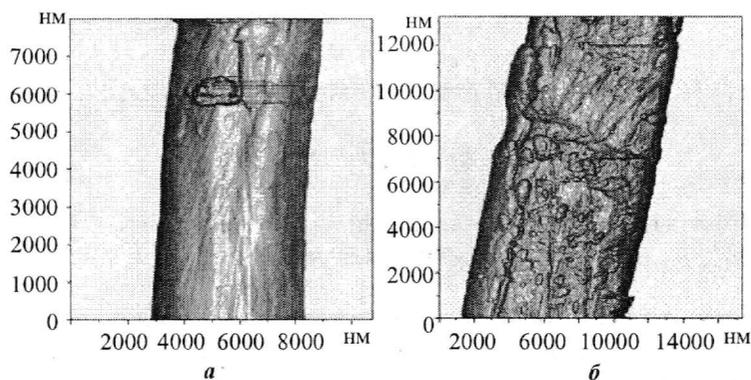


Рис.2. АСМ-изображение волокна льна: а – чистый лен (наблюдается мелковолокнистая структура с характерными размерами 100–200 нм); б – лен, покрытый серебром (наблюдаются равномерно распределенные по поверхности наночастицы с характерным размером ~40 нм)

Металлизация волокон по катодно-плазменной методике приводит к увеличению прочностных характеристик. Была измерена разрывная длина нитей L_p , которая является одной

Результаты измерений разрывной длины льна L_p (см) до и после металлизации

Композиция	L_p , см
Лен	$1,6 \pm 0,3$
Лен + серебро	$1,7 \pm 0,4$
Лен + медь	$1,7 \pm 0,2$
Лен + никель	$1,8 \pm 0,2$
Лен + (никель + серебро)	$1,8 \pm 0,1$

из основных характеристик, определяющей прочность нитей, волокон, тканей и других материалов, для которых невозможно определить площадь поперечного сечения (таблица). Разрывная длина нитей вычислялась по формуле $L_p = P_p l / Q$, где P_p – нагрузка при разрыве, Q – масса нити, l – исходная длина нити.

Можно видеть, что в результате частичной металлизации нитей происходит их упрочнение. При этом, как показали последующие исследования, проницаемость ткани, например, при фильтрации воды практически не изменилась, поскольку металлизации подвергаются отдельные волокна и сплошная металлическая пленка не образуется.

Литература

1. Перспективы использования метода магнетронного распыления для изготовления текстильных материалов со специальными поверхностными свойствами / *Б.П.Горберг, А.А.Иванов, В.А.Стечкин и др.* // Тез. докл. междунар. конф. «Нанотехнология в индустрии текстиля» (Москва, МГТУ, октябрь 2006). – М., 2006. – С. 27–32.
2. *Авцын А.П., Жворонков А.А., Риш М.А., Строчкова Л.С.* Микроэлементозы человека: этиология, классификация, органопатология. – М.: Медицина, 1991. – С. 48–77.
3. *Хаханина Т.И., Осипов Б.П., Бобринецкий И.И., Суханов В.Н.* Методы и средства атомно-силовой микроскопии в исследованиях волокнистого сырья и продукции текстильной промышленности: Научный альманах. – М.: Текстильная промышленность. – 2006. – № 1, 2. – С. 46–54.
4. *Хаханина Т.И., Суханов В.Н., Осипов Б.П.* Исследование тканых материалов, допированных металлическими и углеродными наночастицами // Тез. докл. Всероссийской научн.-техн. конф. «Новые материалы и технологии». НМТ-2006 (Москва, МАТИ, 21–23 ноября 2006). – М., 2006. – С. 82, 83.

Поступило
11 декабря 2006 г.

Бобринецкий Иван Иванович – кандидат технических наук, докторант Учебно-научного центра «Зондовая микроскопия и нанотехнология» МИЭТ. *Область научных интересов:* нанотехнология, атомно-силовая микроскопия.

Суханов Валерий Николаевич – старший преподаватель кафедры общей химии и экологии МИЭТ. *Область научных интересов:* экологическая безопасность, охрана окружающей среды, здоровье человека, приборы и методы контроля окружающей среды.

Влияние технологических факторов на спектр пьезоэлектрического резонатора

А.В.Гуреев, Д.Ю.Шахворостов

Московский государственный институт электронной техники
(технический университет)

Пьезокерамические резонаторы занимают одно из ведущих мест по применению в различных устройствах систем связи, в частности в фильтрах диапазона 450–500 КГц, формирующих амплитудно-частотные характеристики трактов промежуточной частоты радиоприемников. Ширина полосы пропускания таких фильтров по уровню 6 дБ варьируется от 3 до 40 кГц, избирательность и затухание в полосе задерживания достигает значений от 12 до 80 дБ, им присуща хорошая температурная стабильность, низкие значения группового времени задерживания и малые объемы [1].

В данной работе исследуется влияние отклонений от идеальной формы пьезокерамических резонаторов круглого сечения, вызванных различными технологическими факторами, на частоту и амплитуду колебаний ближайшего дополнительного резонанса, определяющих качество изготовления резонатора.

Расчеты проводятся с использованием программного комплекса ANSYS [2], базирующегося на методе конечных элементов. Этот метод в последнее время широко применяется в самых разных отраслях промышленности и науки для прочностных, тепловых расчетов, расчетов акустики, теплообмена, гидродинамики и др. Применение этого метода позволяет построить трехмерную модель и учесть влияние различных дефектов пьезокерамических резонаторов.

Дефект огранки (далее огранка) возникает при механической обработке резонатора. Количественной характеристикой этого дефекта может служить отношение h/D – величины отклонения h от диаметра D к самому диаметру. Результаты расчетов позволяют получить зависимость отношения амплитуд основного и дополнительного резонанса (a) от характеристики огранки h/D (рис.1).

Эллипсность – дефект, возникающий при механической обработке резонаторов, количественной оценкой которого может служить отношение e/D , где e – разность значений большой полуоси эллипса и радиуса окружности, D – диаметр окружности.

Смоделированные методом конечных элементов амплитудно-частотные характеристики резонаторов с различными значениями e/D позволили построить зависимость a от величины эллипсности (рис.2). Полученные зависимости от дефектов огранка и эллипсность показывают, что при увеличении величин e и h увеличивается интенсивность дополнительного резонанса, который находится в рабочей области частот и может негативно сказываться на АЧХ фильтров. Причем дефект огранка сильнее сказывается, нежели эллипсность. Например, при отношении $e/D = 0,05$ $a \sim 0,5$ дБ, а при отношении $h/D = 0,05$ $a \sim 10$ дБ.

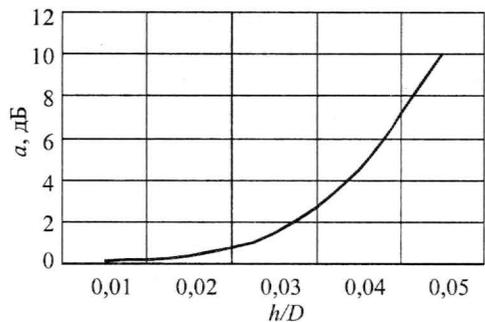


Рис.1. Зависимость отношения амплитуд основного и дополнительного резонанса от величины огранки

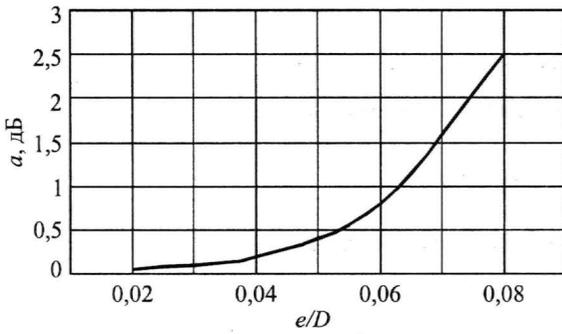


Рис.2. Зависимость отношения амплитуд основного и дополнительного резонанса от величины эллипсности

Вследствие особенностей технологии изготовления современных резонаторов одним из наиболее распространенных видов дефекта является скол. Скол возникает при механической обработке, хранении и транспортировке между операциями. За параметры скола приняты ширина t и глубина b . Как показано на рис.3, интенсивность дополнительного резонанса резко возрастает даже при незначительном увеличении глубины скола (при $b = 0,3$ мм, $t = 0,3$ мм a составляет 8–10 дБ), ширина скола в свою очередь оказывает меньшее влияние (при $t = 0,6$ мм, $b = 0,1$ мм $a \sim 1$ дБ).

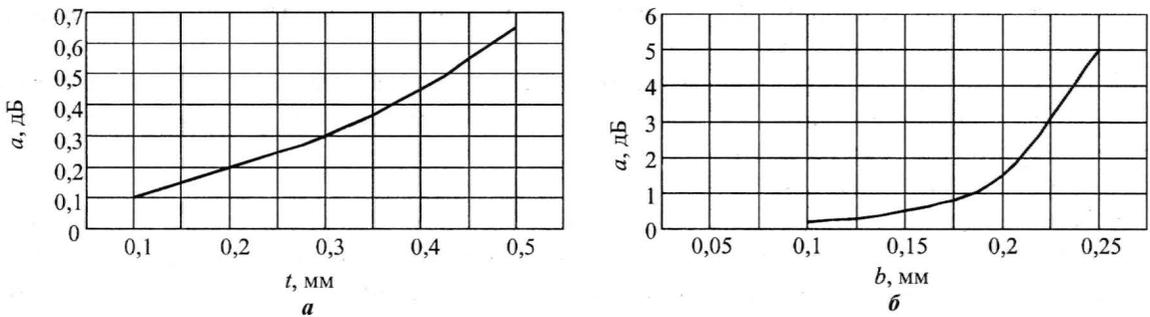


Рис.3. Зависимость отношения амплитуд основного и дополнительного резонанса от ширины (а) и глубины (б) скола ($D = 5,6$ мм)

Полученные результаты показывают, что возникающие при производстве пьезокерамических резонаторов дефекты, связанные с неидеальностью формы резонаторов, могут существенно исказить их спектр, привести к появлению дополнительных резонансов и поэтому должны учитываться при проектировании устройств.

Литература

1. Великин Я.И., Гельмонт З.Я., Зелях Э.В. Пьезоэлектрические фильтры. – М.: Связь, 1966. – 396 с.
2. Каплун А.Б., Морозов Е.М., Олферьева М.А. ANSYS в руках инженера. – М.: УРСС, 2003. – 272 с.

Поступило
2 марта 2007 г.

Гуреев Александр Васильевич – доктор технических наук, доцент кафедры радиоэлектроники МИЭТ. *Область научных интересов:* математическое моделирование и анализ характеристик беспроводных сетей, исследование процессов распространения электромагнитных волн в беспроводных сетях вне и внутри зданий, электродинамика неоднородно заполненных волноводных и резонансных структур.

Шахворостов Дмитрий Юрьевич – аспирант кафедры радиоэлектроники МИЭТ. *Область научных интересов:* математическое моделирование и анализ характеристик пьезокерамических элементов, исследование технологических аспектов пьезокерамических элементов и разработка изделий на их основе.

Особенности моделирования узлов ФЭУ для исследования гамма-камеры в системе OrCAD

М.В.Алюшин, Мью Ньют Вин

Московский инженерно-физический институт (государственный университет)

Используемые в современных гамма-камерах алгоритмы восстановления координат события, как правило, основываются на анализе баланса световой мощности в кристалле сцинтиллятора (КС) [1], что позволяет получить пространственное разрешение порядка 1–2 мм в центральной зоне при размерах окна ФЭУ до 8–12 см. При этом разрешение в периферийной зоне КС, особенно в его углах, значительно хуже, что обусловлено потерей части светового потока. Создание алгоритмов восстановления координат, эффективно работающих в периферийной зоне КС, требует тщательного моделирования как эффектов рассеивания света и амплитудно-пространственных характеристик (АПХ) ФЭУ, так и параметров электроники, обрабатывающей сигналы от ФЭУ.

Для этой цели в работе предложена модель блока ФЭУ (рис.1,*а*), позволяющая осуществить моделирование эффектов как в центральной, так и в периферийной зоне КС совместно с моделированием электронного тракта обработки данных в системе OrCAD.

Разработанная модель включает в себя следующие основные узлы (рис.1,*б*):

- импульсный источник тока V_{exp} , имитирующий световую вспышку в КС;
- конденсатор C имитирует эффекты отражения и поглощения света в КС и ФЭУ;
- параллельные резистивные цепи, имитирующие каналы прохождения света в КС;
- операционный усилитель, характеризующий сбор световых потоков в ФЭУ;
- стандартные модели системы OrCAD для электронных компонентов, использующихся для построения аналогового тракта обработки сигналов от ФЭУ.

Величины сопротивления элементов резистивных цепей $R_{11}–R_{1n}$, $R_{21}–R_{2n}$, $R_{31}–R_{3n}$ и $R_{41}–R_{4n}$ являются параметрами модели. Данные параметры определяются таким образом, чтобы АПХ ФЭУ блока, рассчитанные с помощью модели, наилучшим образом совпадали с измеренными АПХ ФЭУ. Для моделирования эффекта перехвата светового потока в КС в периферийной зоне, например для ФЭУ1, соответствующие резистивные цепи (R_{11} , R_{21}) отключаются от источника сигнала и подключаются к шине земли.

На рис.1,*а* показан типичный блок из трех расположенных рядом ФЭУ, предназначенный для определения координат X , Y события в КС на основе анализа светового баланса [2]. На рис.1,*б* показаны измеренные АПХ ФЭУ1, ФЭУ2 и ФЭУ3 соответственно V_1 , V_2 и V_3 .

Параметры модели C_1 , C_2 , C_3 , R_1 , ..., R_6 отвечают за чувствительность фотокатода соответствующего ФЭУ, а также коэффициенты их усиления. Это позволяет моделировать работу всего детектора гамма-камеры с учетом различных рабочих напряжений на ФЭУ (используется для выравнивания характеристик ФЭУ, в том числе при их старении).

Для разработки высокоэффективных алгоритмов восстановления координат события разработаны как модели для отдельных типов ФЭУ (отечественные, НАМАМАТСУ, RCA), так и модели для блоков, содержащие от 2 до 7 ФЭУ, что дает возможность моделировать основные эффекты регистрации гамма-квантов по всему рабочему полю КС.

Проведенный анализ характеристик ФЭУ, например типа ФЭУ-110 либо RCA 4534, позволил выявить зависимости точности воспроизведения АПХ ФЭУ от числа резистивных цепей N . Так, при $N = 16$ точность воспроизведения АПХ ФЭУ составляет $\sim 10\%$, а при $N = 32$ точность воспроизведения – порядка 5%.

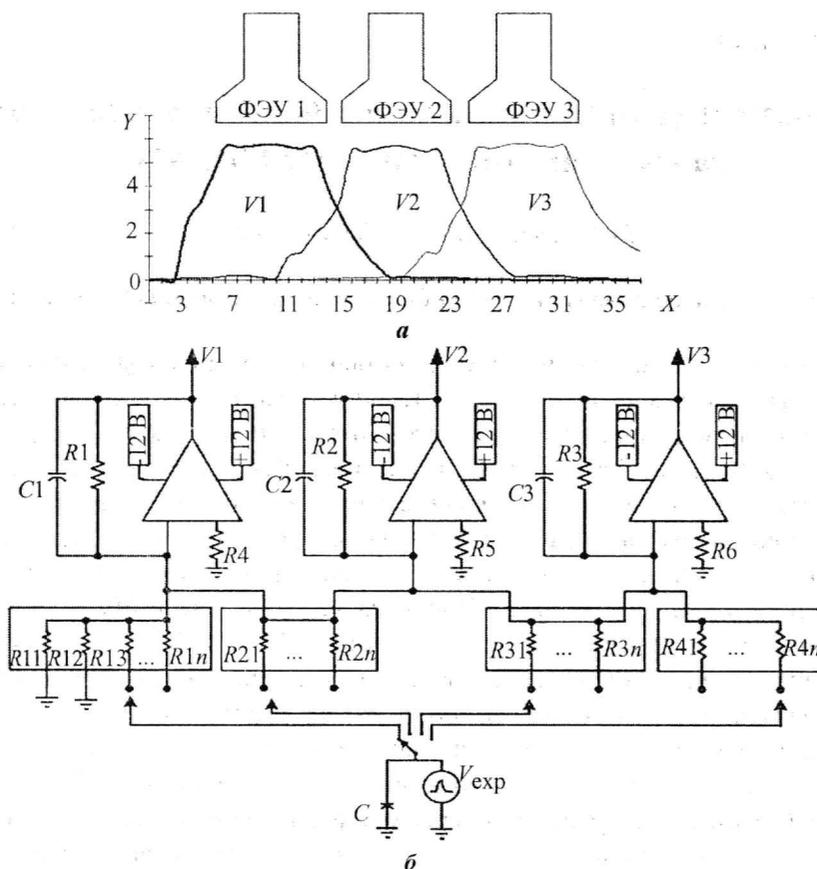


Рис.1. Типичные АПХ (а) блока из трех расположенных рядом ФЭУ, предназначенных для определения координат X и Y события в КС, и пример модели для изучения краевых эффектов в КС (б) в системе OrCAD

Таким образом, предложенные в работе модели дают возможность осуществить исследование и разработку высокоэффективных алгоритмов восстановления координат событий в современной гамма-камере за счет учета реальных АПХ каждого ФЭУ, а также сформулировать рекомендации по оптимальному расположению ФЭУ на КС для достижения максимального пространственного разрешения, в том числе на краях КС. Достоинством подхода также является возможность учета характеристик как электронных, так и оптических трактов обработки информации при использовании известной системы моделирования OrCAD.

Литература

1. **Мью Ньют Вин.** Способ и устройство для улучшения чувствительности гамма-камеры // Научная сессия МИФИ-2006: Сб. науч. тр. В 16 т. – М.: МИФИ, 2006. – Т. 16. – С. 94, 95.
2. **Мью Ньют Вин и др.** Разработка спецпроцессора реального времени для современной гамма-камеры на основе модуля ADP160QPC1 // Научная сессия МИФИ-2007: Сб. науч. тр. В 17 т. – М.: МИФИ, 2007. – Т. 1. – С. 158, 159.

Поступило
20 февраля 2007 г.

Мью Ньют Вин – аспирант кафедры электроники МИФИ. *Область научных интересов:* ядерная медицина, томография, многоканальные детекторы ядерного излучения, гамма-камера, алгоритмы восстановления 2D- и 3D- изображения, аналоговые и цифровые устройства ядерной электроники, САПР электронных устройств – Mentor Graphics, Cadence.

Алюшин Михаил Васильевич – кандидат физико-математических наук, доцент кафедры электроники МИФИ. *Область научных интересов:* системы распознавания образов, нейросети, многоканальные системы сбора и обработки данных, ядерная медицина, томография, акустика, гидроакустика, САПР электронных устройств (Mentor Graphics, Cadence).

Моделирование аналоговых узлов PЕТ-сканера в системе OrCAD

М.В.Алюшин, Мьят Вин Тун

Московский инженерно-физический институт (государственный университет)

Многоанодные и координатно-чувствительные ФЭУ, применяемые в настоящее время для создания современных PЕТ-сканеров и мини-PЕТ-сканеров для животных [1], предполагают использование сцинтилляционных матриц с поперечными размерами кристаллов порядка 1×1 мм. Эффективное применение таких сцинтилляторов требует учета зависимости чувствительности фотокатода ФЭУ от координат X , Y , что налагает определенные требования как на используемые аналоговые узлы FEE (Front End Electronics) обработки сигналов ФЭУ, так и на цифровые узлы [2, 3]. В связи с этим актуальной становится разработка моделей ФЭУ, учитывающих как неравномерность чувствительности фотокатода, так и распределенный характер воздействия световой вспышки на фотокатод. Последний фактор особенно важен для определения параметра DOI (Depth of Interaction), который отвечает за координату Z световой вспышки в узком кристалле сцинтиллятора.

На рис.1,*а* показана традиционная схема, обычно используемая для моделирования работы аналоговых узлов позиционно-чувствительных ФЭУ фирмы HAMAMATSU типа R8520-00-C12, обрабатывающих токовые сигналы от координатных сигналов $X1$ – $X6$. Данная модель учитывает влияние емкостей электродов ФЭУ – емкости $C1$ – $C6$. Для моделирования входного воздействия используется импульсный источник тока I_0 .

Получаемая в результате использования данной модели зависимость выходного напряжения Y от координаты X имеет практически линейный характер (рис.1,*б*), что не соответствует реальным характеристикам ФЭУ, особенно в краевых зонах.

В настоящей работе предложена модель, учитывающая краевые эффекты и распределенный характер засветки фотокатода ФЭУ (рис.1,*б*). Параметры модели $R1$, $R2$, $R3$ определяются исходя из характеристик экспериментально измеренного распределения света на фотокатоде. При этом резистор $R2$ используется для моделирования основного канала передачи света в ФЭУ, а резисторы $R1$ и $R3$ – для моделирования эффекта рассеивания светового потока, в том числе в слое стекла корпуса ФЭУ. Для моделирования краевых эффектов, например, обусловленных неровностью поверхности стекла ФЭУ в периферийной зоне, один из резисторов $R1$ либо $R3$ соединяется с шиной земли. Для ФЭУ R8520-00-C12 были приняты следующие значения: $R1 = R3 = 2$ кОм, $R2 = 6$ кОм. Получаемые при использовании данной модели характеристики представлены на рис.1,*г*. Ошибка в воспроизведении чувствительности фотокатода не превышает 10%, что также дает возможность моделировать эффекты перераспределения световой мощности сигнала в смежных кристаллах сцинтиллятора для определения параметра DOI. Аналогичные характеристики могут быть получены и для координатного сигнала Y .

На рис.1,*д* представлен фрагмент типичной модели аналогового тракта обработки сигналов ФЭУ, позволяющий осуществить усиление и преобразование дифференциальных однополярных координатных сигналов $X1$ – $X6$ в двухполярный выходной сигнал, формируемый на нагрузке $R14$. Величины резисторов входного делителя $R4$ – $R8$ выбираются в соответствии с рекомендациями технического описания данного типа ФЭУ. Параметры резисторов $R9$ – $R13$ и конденсаторов $C7$ – $C9$ выбираются с учетом характеристик используемых операционных усилителей и временных параметров импульса тока источника I_0 .

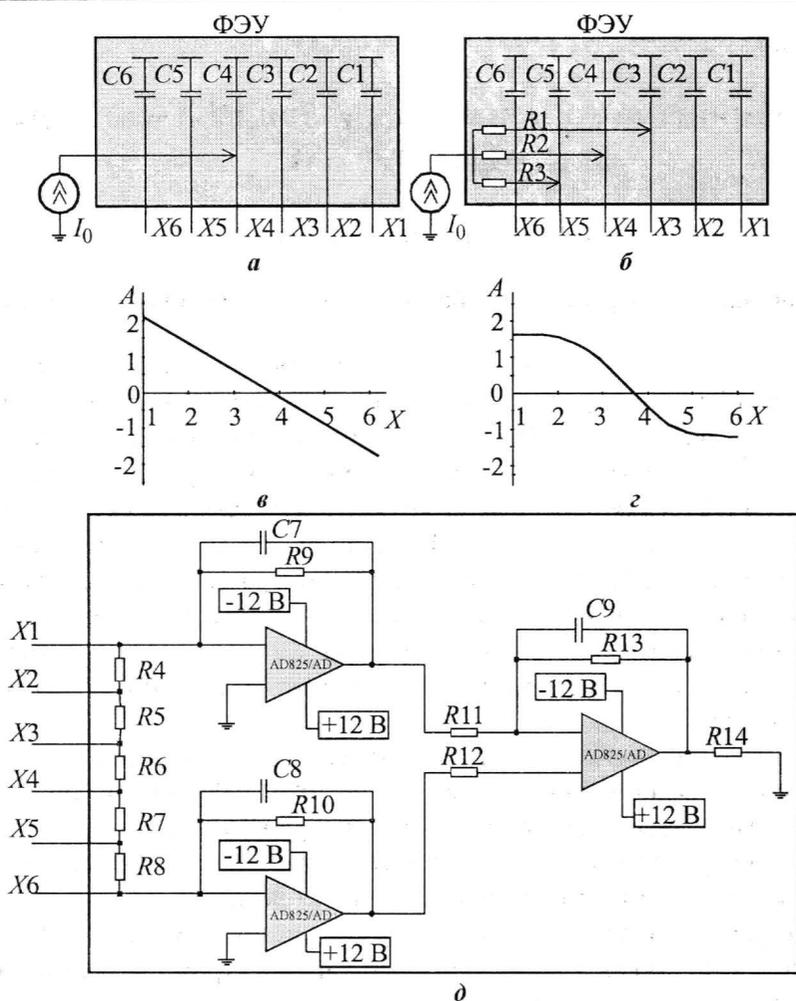


Рис.1. Моделирование узлов с помощью системы OrCAD: а – традиционная модель ФЭУ; б – предлагаемая модель; в, з – получаемые характеристики ФЭУ при использовании традиционной и предложенной моделей соответственно; д – фрагмент аналогового узла обработки сигналов от ФЭУ

Таким образом, предложенная модель, учитывающая распределенный характер воздействия света на фотокатод, а также краевые эффекты, позволяет получить реальные характеристики координатно-чувствительных ФЭУ фирмы НАМАМАТСУ, что необходимо для правильного проектирования аналоговых и цифровых узлов современного РЕТ-сканера.

Литература

1. Мьят Вин Тун. Особенности и разработка микроРЕТ-сканера // Научная сессия МИФИ – 2006: Сб. науч. тр. В 16 т. – М.: МИФИ, 2006. – Т. 1. – С. 92, 93.
2. Разработка модуля USB интерфейса для сбора данных в мини-РЕТ-сканере для животных / Мьят Вин Тун и др. // Научная сессия МИФИ – 2007: Сб. науч. тр. В 15 т. – М.: МИФИ, 2007. Т. 1. – С. 156, 157.
3. Устройство сопряжения с локальной сетью Ethernet для многоканальных систем сбора и обработки данных / Мьят Вин Тун и др. // Электроника, микро- и наноэлектроника: Сб. науч. тр. – М.: МИФИ, 2004. – С. 248, 249.

Поступило
20 февраля 2007 г.

Мьят Вин Тун – аспирант кафедры электроники МИФИ. Область научных интересов: ядерная медицина, томография, многоканальные детекторы ядерного излучения, алгоритмы восстановления 2D и 3D изображения, аналоговые и цифровые устройства ядерной электроники, САПР электронных устройств – Mentor Graphics, Cadence.

Алюшин Михаил Васильевич – кандидат физико-математических наук, доцент кафедры электроники МИФИ. Область научных интересов: системы распознавания образов, нейросети, многоканальные системы сбора и обработки данных, ядерная медицина, томография, акустика, гидроакустика, САПР электронных устройств (Mentor Graphics, Cadence).

Шум вида $1/f$ в МОП-транзисторах с разным типом проводимости канала при температурах 300 и 77 К

Г.П.Жигальский, И.А.Карев, А.А.Гваськов

Московский государственный институт электронной техники
(технический университет)

Г.А.Рудаков

ЗАО «Матричные технологии» (г. Москва)

В последние годы наблюдается повышенный интерес к фотоприемным ИК-матрицам со схемами считывания, созданным по КМОП-технологии. Они широко применяются в самых различных сферах деятельности в составе тепловизоров. Важнейшим параметром ИК-матрицы является уровень собственных шумов, который определяется шумами чувствительного элемента (барьером Шоттки, изготовленным из силицида платины PtSi) и КМОП-схемами считывания ИК-матрицы. Исследование и разработка методов снижения уровня шума вида $1/f$ в элементах схем считывания ИК фотоприемной матрицы, изготовленных на основе разных типов МОП-транзисторов, является важной задачей с точки зрения повышения пороговой чувствительности всей ИК-матрицы.

В единых технологических условиях были изготовлены тестовые структуры n - и p -канальных МОП-транзисторов с индуцированным каналом для исследования шума вида $1/f$. Транзисторы выполнены по КМОП-технологии с проектными нормами 1,2 мкм с затвором из поликристаллического кремния Si^* и металлизацией на основе сплава алюминия с кремнием, содержащим 1% кремния (сплав АК-1). Технология включает в себя набор из 10 стандартных фотолитографий. Толщина подзатворного диэлектрика SiO_2 составляла 25 нм. МОП-транзистор с каналом p -типа сформирован в кармане n -типа с концентрацией донорной примеси (фосфор) 10^{16} см^{-3} . Параметры тестовых МОП-транзисторов: длина канала $L = 2 \text{ мкм}$; ширина канала $W = 50 \text{ мкм}$; пороговое напряжение $U_T = -0,6 \text{ В}$ (p -тип), $U_T = 0,6 \text{ В}$ (n -тип); количество исследованных образцов – по 9 шт.

Исследование шума проведено на установке для измерения спектральной плотности (СП) $1/f$ -шума, описание которой дано в работе [1]. СП вычислялась в единицах $\text{В}^2/\text{Гц}$, а для сравнения уровней шумов разных типов транзисторов СП выражалась в относительных единицах $1/\text{Гц}$. Результаты обрабатывались по методу наименьших квадратов с функцией аппроксимации в виде прямой.

Поскольку рабочая температура ИК-матрицы $T = 77 \text{ К}$ (температура жидкого азота), проведены исследования параметров МОП-транзисторов при криогенных температурах.

Одним из основных источников шума в МОП-транзисторах с индуцированным каналом является шум вида $1/f$, возникающий вследствие захвата (с последующей эмиссией) носителей заряда в канале на ловушки в оксиде [2]. На рис.1 представлены экспериментальные зависимости СП $1/f$ -шума МОП-транзисторов от частоты при различных температурах (77 и 300 К).

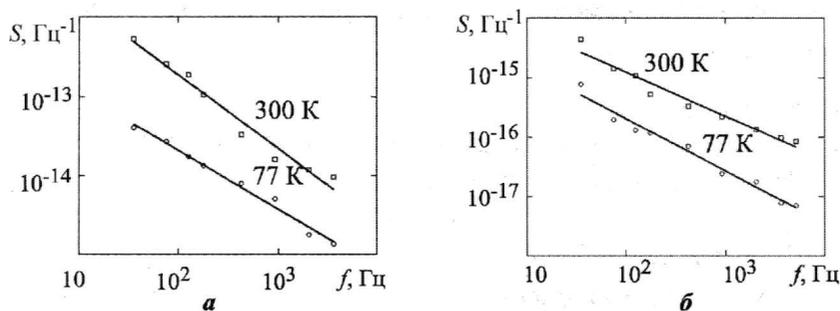


Рис.1. Зависимости СП $1/f$ -шума МОП-транзисторов от частоты при различных температурах: а – для n -канальных транзисторов; б – для p -канальных транзисторов. ($W = 50 \text{ мкм}$; $L = 2 \text{ мкм}$)

В результате исследований выявлено, что с понижением температуры уровень шума снижается для всех типов транзисторов, так как при более высокой температуре появляются носители с более высокой энергией, способные пройти сквозь потенциальный барьер, и как следствие, с большей вероятностью могут туннелировать из поверхностного канала на ловушки в оксиде, вызывая $1/f$ -шум.

У транзисторов n -типа с индуцированным каналом $1/f$ -шум выше примерно на порядок, чем у транзисторов p -типа. Объясняется это тем, что уровень Ферми в p -канальных транзисторах расположен глубже, чем в n -канальных. Это затрудняет процесс перехода носителей заряда из p -канала на ловушечные центры в диэлектрике. При этом вероятность туннелирования носителей из поверхностного канала на ловушки в оксиде уменьшается [3].

Литература

1. *Гваськов А.А., Жигальский Г.П., Ситкин П.О.* Исследование $1/f$ шума МДП-транзисторов с разным типом проводимости канала // Изв. вузов. Электроника. – 2006. – № 6. – С. 13–19.
2. *Майоров С.А.* Полевые транзисторы. Физика, технология и применение. – М.: Советское радио. 1971. – С. 176–190.
3. *Жигальский Г.П.* Избыточные шумы в структурах металл–диэлектрик–полупроводник // Радиотехника и электроника. – 1999. – Т. 44, № 12. – С. 1413–1430.

Поступило
20 декабря 2006 г.

Жигальский Геннадий Павлович – доктор физико-математических наук, профессор кафедры ИЭМС МИЭТ. *Область научных интересов:* электрические шумы в твердотельных электронных приборах.

Карев Иван Александрович – аспирант кафедры ИЭМС МИЭТ. *Область научных интересов:* разработка и изготовление ИС для ИК-техники.

Гваськов Алексей Александрович – аспирант кафедры интегральной электроники и микросистем (ИЭМС) МИЭТ. *Область научных интересов:* разработка и изготовление ИС для ИК-техники.

Рудаков Григорий Александрович – инженер ЗАО «Матричные технологии». *Область научных интересов:* разработка технологии изготовления и монтажа фоточувствительных ИС для ИК-техники.

Информация для читателей журнала

«Известия высших учебных заведений. Электроника»

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

Адрес редакции:

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

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

E-mail: magazine@rnd.miee.ru

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

КОНФЕРЕНЦИИ. ВЫСТАВКИ

Компоненты, системы и их применение (выставка «Электроника - 2006», г. Мюнхен)

В.Д.Вернер, А.Н.Сауров

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

На основе анализа экспозиции выставки «Электроника-2006» (г. Мюнхен) рассмотрены изменения стратегии развития производства изделий полупроводниковой промышленности и микросистемной техники в условиях стабильного роста их рынка.

Выставка «Электроника» проводится по четным годам, начиная с 1964 года, т.е. уже 22 раза. Это «мировой саммит электроники» [1], разделы которого охватывают практически все направления современной электроники. Продукция электроники составляет около 10% всемирного валового продукта. Это существенно само по себе. Но главное заключается в том, что практически ни одно более или менее сложное техническое изделие не создается сейчас без участия электронной компонентной базы. Например, стоимость современного автомобиля на 20–40% (в зависимости от класса) определяется стоимостью электронных составляющих. Еще в большей степени это касается систем вычислительной техники и телекоммуникаций. Проникновение изделий этих технических направлений в среду бытовой техники резко увеличило число реальных и потенциальных потребителей конечной продукции, содержащей электронную компонентную базу. По мнению организаторов, выставка «Электроника» является самым эффективным местом общения производителей и потребителей изделий электроники для реального развития партнерства между ними. Несколько формальных данных. Выстав-

ку посетило свыше 78 тыс. человек (на 5% больше, чем в 2004 году). Впервые доля иностранных участников (60%) превысила долю представителей Германии. Существенно возросло участие США, стран центральной и восточной Европы, России (28 фирм), Израиля, Китая, Индии и Бразилии. Экспонаты были представлены в 14 павильонах, общей площадью 150 000 м² на 2961 стенде.

На выставке в явной форме прозвучала основная тенденция развития современной электроники – направленность на применение ее достижений в различных сферах техники. Выставочные стенды стали не только местом демонстрации достижений фирмы, но и консультационным пунктом для возможных использований ее изделий. Помочь ориентироваться в многообразии предложений должны были многочисленные площадки обсуждения проблем конференции: «Автомобильная электроника», «Встроенная электроника», «Многоядерные системы» и 6 форумов, проводимых непосредственно в выставочных павильонах «Автомобильная электроника», «Встроенные системы», «Беспроводные системы», «Мир МЭМС», «Электроника», «Форум общества инженеров электроники (ZWEI)».

Всего было представлено более 250 докладов по 10–12 выступлений на заседании каждого из мероприятий. В рамках форума «Электроника» одно из заседаний было посвящено вопросам обеспечения инженерными кадрами. На форумах отдельно обсуждались вопросы полимерной электроники, радиочастотной идентификации (RFID), организации сетей на базе Zig Bee, контактных соединений и т.д.

Все форумы живого контакта между производителями изделий электроники и их потребителями строились по общему алгоритму: выступление представителей отдельных (ведущих) фирм и «дискуссионный клуб» с участием группы фирм по проблеме. Например, на форуме «Мир МЭМС» в течение трех дней выступили представители 20 фирм и были проведены дискуссии «Новый большой рынок для МЭМС в бытовой электронике», «Осуществляются ли надежды для РЧ МЭМС», «МЭМС в автомобиле. Кто следующий?», «Что принесет хорошие деньги в МЭМС?», «Инерциальные МЭМС в развитии». В каждой из дискуссий участвовали 5–6 представителей ведущих фирм – производителей МЭМС.

В результате анализа выступлений на этом форуме можно сделать несколько выводов:

1. МЭМС являются практически единственным видом изделий МСТ, которые вышли на рынок как продукт массового производства при годовом выпуске отдельных типов МЭМС в количестве 10 млн штук в год. Практически это достижимо только для фирм уже давно присутствующих на рынке полупроводниковых датчиков и МЭМС. Например, фирма Bosch (18 лет на этом рынке) в 2005 году выпустила 100 млн изделий, а фирма ADI – 2,4 млрд (14 лет присутствия на данном рынке). Фирма Freescale за 25 лет развития своих МЭМС-акселерометров выпустила их более 300 млн штук.

2. Рассматривая МЭМС как элементную базу МСТ, можно усреднить данные

различных аналитических фирм и принять, что в 2006 г. объем рынка компонентной базы МСТ составляет 6–7 млрд долл.

3. После автомобильной промышленности главным потребителем МЭМС становится производство товаров широкого потребления. Доля МЭМС для этого рынка в ближайшие годы должна вырасти от 6 до 22%. Это прежде всего различные так называемые «носимые» приборы личного пользования. Для них существенны малые значения весогабаритных характеристик МЭМС и их малое энергопотребление. Вообще, эпитет «самый маленький в мире» остался самой выразительной характеристикой инновационного изделия электронной техники. Например, фирма Tronic's Microsystems выступила с серией «ультраминиатюрных» датчиков давления, «MicroFAB Bremen» с «ультрамалым» датчиком давления (1,5×1,5×1 мм). Фирма Epcos рекламирует свой 32 кГц осциллятор размером в 10 раз меньше, чем у конкурентов (3,2×1,5×1,0 мм). Фирма Knowles Acoustics уменьшила на 3% размеры своего нового МЭМС-микрофона («Mine Zero Height»).

Примером агрессивного наступления МЭМС-изделия может служить емкостной МЭМС-микрофон для мобильных телефонов фирмы Knowles Acoustics. Замена стандартного электретного микрофона на емкостной МЭМС-микрофон дала 4-кратный выигрыш в размере кристалла, сделала возможным их поверхностный монтаж, улучшила акустические характеристики, повысила стойкость к удару до $10^4 g$. За счет массового производства фирма смогла снизить цену микрофона и выпустить свыше 300 млн штук, занять лидирующую позицию среди других поставщиков МЭМС-микрофонов (80% этого рынка). Заметим, что реализация преимуществ массового производства возможна только для достаточно объемного рынка. По оценкам экспертов, МЭМС-микрофоны составляли в 2005 го-

ду 5% общего объема рынка микрофонов (2,6 млрд долларов). В 2008 году они должны составлять 15%, годовой рост – 62%. МЭМС-микрофоны производит ряд других фирм: Sonion MEMS, Akustica, Infineon, Memstech [2].

При практической монополизации рынка в настоящий момент фирмой Knowless Akustica для других фирм остаются нишевые сегменты рынка. Например, фирма Acustica [3] развила интересную технологию создания микрофона на структуре слоев металлизации для КМОП ИС. Это автоматически решило проблему совместимости МЭМС и ИС технологий и дало возможность создать микрофон с цифровым выходом сигнала. Отсутствие электромагнитных помех и возможность осуществления коммутации внутри кристалла позволили предложить потребителю матрицы микрофонов. Они служат для создания направленного приема акустической волны. Такие микрофоны планируют использовать, например, для носимой вычислительной техники. Следует отметить, что Akustica-fabless – фирма и вряд ли может претендовать на массовое производство. Другие фирмы смогут потеснить Knowless Acustics, если технология их массового производства обеспечит более низкие цены на микрофон или какие-то дополнительные качественные характеристики. При цене порядка 0,5 долл. в производстве борьба идет за доли центов в себестоимости. Поэтому эффективная организация производства и хорошо отработанная фирменная технология массового производства определяет успех и место на рынке [4]. Отметим, что именно фирменная технология производства определяет «лицо» и узнаваемость изделий МСТ для потребителя, т.е. она является важнейшей составляющей фирменного бренда. На форуме явно прозвучало еще одно направление наступления МЭМС на традиционные изделия. В данном случае речь идет о рынке кварцевых осцилляторов с объемом продаж около 3 млрд долл.

Как и в случае микрофонов, МЭМС-осцилляторы дают выигрыш в размерах, температурном диапазоне применения, надежности. На форуме выступили представители фирм, выпускающих МЭМС-осцилляторы SiTime и Discera. Главный их козырь – резкое снижение цены от 65 долл. для кварцевого осциллятора до 1 долл. для МЭМС-осциллятора. Фирма Discera намерена ежегодно уменьшать их стоимость на 15%.

Следует отметить роль аналитической фирмы WTS [5], которая была организатором форума и обеспечила интересную тематику и высокий уровень форума. Ее представители комментировали ситуацию на рынке МЭМС. В частности, отмечалось, что в условиях прессинга постоянного снижения цен наблюдается конвергенция идей путем заимствования опыта смежных направлений МЭМС. Например, многие первоначальные решения были развиты при разработке МЭМС для бытовой техники из опыта создания МЭМС для автомобильной промышленности. Теперь, в свою очередь, «автомобилисты» перенимают опыт снижения цен у «бытовиков». В этом же направлении работает использование интеграции изделий МЭМС за счет создания систем в корпусе, а не систем на кристалле. Чувствительный элемент и ASIC располагается на разных кристаллах в одном корпусе. Точно так же в одном корпусе могут разместить два разных датчика (например, давления и температуры) или большее число датчиков. В частности, для снижения цены используют не монолитный трехосный акселерометр, а три одноосных гибридных акселерометра. Аналогичная тенденция прослеживается и для МЭМС-микрофонов, где чаще всего используется двухкристальная сборка, один – мембрана микрофона, другой – ASIC обработки сигнала. В целом выделение МЭМС-направления в форме самостоятельного раздела выставки можно считать признанием МЭМС как сложившегося сектора комплектующей базы электронных систем.

Помимо живой информации на форумах и семинарах, содержание экспозиции выставки и связанные с ней проблемы обсуждались в многочисленных информационных изданиях, доступных для посетителя выставки. Например, каждый день распространялась газета «Market@Technik», где анализировались отдельные направления электроники, новые идеи, например, связанные с применением нанотехнологии, достижения научных коллективов из Германии и других стран мира. Посетитель выставки должен быть подготовлен к восприятию информации на стендах выставки.

На выставке представлены все направления электроники: интегральные схемы, дискретные приборы, датчики, контактирующие изделия, печатные платы и т.д. – всего 26 выделенных групп продукции и направлений ее применения. Но главное внимание уделялось полупроводниковым приборам, прежде всего интегральным схемам. Методы оценки технического уровня производства ИС были изложены в нашей публикации о выставке «Электроника-2004» [6]. Современное состояние и прогноз развития можно оценить по «дорожной карте» полупроводникового производства, содержащейся в выпусках IRTS [7].

На прошлых выставках фирмы позиционировались относительно достижения показателей уровня, обозначенных в «дорожной карте». Отличием выставки «Электроника-2006» является демонстрация применимости изделий электроники для комплектации продукции потребителя. Это выразилось в тройном названии выставки: «Компоненты, системы и их применения».

На «Electronica Forum» выступили представители ряда ведущих фирм: NXP Semiconductor, Renesans, FreeScale, In fineon и др. Главный общий тезис: полупроводниковая промышленность сейчас другая, чем она была несколько лет

назад. Составляющие успеха назывались в разной форме и последовательности. Но можно выделить основные моменты:

- стратегическое партнерство для скорейшего достижения рубежей;
- глобализация производства и рынка;
- гибкость производства и предлагаемых изделий;
- близость к потребителю.

Не отрицая важности инноваций, основным источником которых пока по-прежнему остаются США, в меньшей мере Европа и не значительно Азия, отмечается, что важны не сами инновации, а возможность поставить на рынок нужный продукт в нужное время. Критерием успеха становится не технология, а контакт с потребителем и взаимопонимание. Чем ближе изделие полупроводниковой промышленности к конечному продукту потребителя, тем проще понимание. Внутри самой электронной промышленности возникает тенденция: от компонентов через подсистемы к системам. Для этого, как считает Ю.Вейер, президент фирмы FreeScale, необходимо повышать комплексность полупроводниковых изделий: «Мы живем в мире дальнейшей миниатюризации, очень малых размеров, увеличения функций на каждый квадратный миллиметр». Комплексность должна дополняться модульностью изделий, наличием программной составляющей для удовлетворения разнообразных потребителей, стандартизацией аппаратной составляющей, интерфейсов и программного обеспечения. Представитель фирмы Ercos эти положения сформулировал более кратко: «Миниатюризовать, комбинировать и интегрировать».

Возможно, именно усиление связи с потребителем является причиной главного изменения в развитии электроники: практическом прекращении цикличности развития рынка полупроводниковой промышленности. По данным фирмы WSTS в 2006 г. объем рынка вырос на 8,5% (до

246,8 млрд долл.), в 2007 г. ожидается такой же прирост, в 2008 г. – даже больший – 12%.

Аналогичным образом ожидается стабильный рост рынка МЭМС (таблица по данным фирмы Data Beans). Следует отметить, что это средние цифры. Как уже отмечалось, в зависимости от типов изделия цена может меняться в широких пределах. Цена МЭМС-изделия массового производства меньше одного доллара, темп снижения цены 10–20%, прирост объема рынка от единиц до десятков процентов в год. Изделия для аэрокосмической промышленности могут стоить сотни и тысячи долларов.

Стабилизация рынка полупроводников не означает, что все противоречия сняты. Остаются взаимные обвинения проектировщиков и технологов в причинах роста токов утечки при дальнейшей миниатюризации ИС. Цены на ИС памяти упали на 11% из-за «войны» между Intel и AMD. Остается и проблема обеспечения промышленности кадрами инженеров [6]. В Германии в 2005 г. число вакансий для инженеров было 15 тыс. В 2006 г. число вакансий еще увеличилось на 8,4%. Вместе с тем число студентов по специальностям машиностроительного и электротехнического профиля продолжает падать с темпом 5–10% в год [8]. Как сказал Saturo Ito (NXP Semiconductor): «Очень важно иметь хорошего работника,

но не менее важно иметь много хороших работников». Считают, что деятельность инженера обеспечивает 10 рабочих мест. Поэтому при дефиците инженерных кадров продолжается процесс аутсорсинга производства в регионы с наличием достаточно квалифицированных кадров и удовлетворительной инфраструктурой. Причины непрестижности инженерной профессии, по мнению западных специалистов, обсуждались в [6]. В дополнение можно привести мнение немецких специалистов [8]. Они считают одной из причин дефицита медленный рост зарплаты инженеров (2% в год). Для привлечения молодых нужен рост на уровне 10% в год. Выход видят также в создании центров элитарной подготовки инженеров, как, например, в Техническом университете г. Мюнхена.

В целом по широте тематики и глубине освещения проблем электроники выставку «Электроника» в г. Мюнхене можно считать наиболее авторитетным мировым центром взаимодействия производителей и потребителей электроники. Участие в качестве стендистов и посетителей ведущих специалистов фирм обеспечивает деловой и результативный характер работы выставки. 87% участников и 94% посетителей оценивают выставку как «хорошую или очень хорошую».

Изменения рынка МЭМС-компонентов [8]

Показатели	2004 г.	2005 г.	2006 г.	2007 г.	2008 г.	2009 г.	2010 г.	2011 г.	Рост, %
Объем рынка, млрд долл.	5,424	5,186	6,298	7,612	9,162	10,9756	13,306	15,647	20
Число изделий, млрд шт.	5,135	5,230	6,197	7,925	9,763	10,962	14,020	16,738	22
Средняя цена (за шт.), долл.	1,06	0,99	1,02	0,96	0,94	1,00	0,95	0,93	-2

Литература

1. Мировой саммит электроники // Электроника. Наука. Технология. Бизнес. – 2006. – № 6. – С. 118, 119.
2. SIMM-06-Silicon Microphones Markets // www.yole.fr
3. <http://www.akustika.com>
4. WTC-Think small! – 2006. – № 1, Vol. 1. – P. 1.
5. WTC-Wicht Technologic Consulting // www.wtc-consult.de
6. Быстрее, лучше, дешевле (выставка «Электроника-2004» г.Мюнхен) / **В.Д.Вернер, А.А.Ковалев, А.А.Резнев, А.Н.Сауров, Ю.А.Чаплыгин** // Изв. вузов. Электроника. – 2005. – № 3, С.95–102.
7. International Technology Roadmap for semiconductors // 2005 Edition. – 2005.
8. Mark@Technik 45/2006.

Вернер Виталий Дмитриевич – доктор физико-математических наук, профессор, председатель научно-технического совета НПК «Технологический центр» МИЭТ. *Область научных интересов:* физика и технология полупроводниковых приборов и интегральных микросхем, микросистемная техника.

Сауров Александр Николаевич – доктор технических наук, профессор, директор НПК «Технологический центр» МИЭТ. *Область научных интересов:* проектирование и технология интегральных микросхем и микросистемной техники.

Книжные новинки



Джексон Р. Новейшие датчики. – М.: Техносфера, 2007. – 384 с.
ISBN 978-5-94836-111-6



Стремительный рост числа разработок и применений датчиков на основе ранее не использовавшихся физических принципов и внедрения новых технологий для реализации известных эффектов стимулирует появление современных руководств.

В учебнике-монографии изложены многие недавно сформировавшиеся или обновившиеся направления сенсорики, включая измерительную микромеханику, датчики на ПАВах, оптические, ионизационные и магнитные, химические микросенсоры, оптико-волоконные и интеллектуальные измерительные системы, расходомерию для нестационарных потоков и ряд других.

Об итогах 14-й Межвузовской научно-технической конференции «МИКРОЭЛЕКТРОНИКА И ИНФОРМАТИКА – 2007»

В целях обмена научно-техническими достижениями, выявления и поддержки молодых исследователей, содействия профессиональному росту научной молодежи с 18 по 20 апреля 2007 г. в **Московском государственном институте электронной техники (техническом университете)** проводилась 14-я Межвузовская научно-техническая конференция «Микроэлектроника и информатика – 2007».

В рамках конференции проходил конкурс наиболее одаренных молодых ученых на получение финансовой поддержки от Фонда содействия развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере (Программа «УМНИК») в размере 200 тыс. рублей в год. В конкурсе приняли участие более 70 молодых ученых, аспирантов и студентов в возрасте до 28 лет.

На конференции работало 12 секций по научным направлениям: *нанотехнологии в электронике; материалы микро-, опто- и наноэлектроники; проектирование и технология электронных компонентов; микро- и наносистемная техника; опто- и акустоэлектроника; математические модели и алгоритмы в информатике; автоматизированные информационные системы; информационно-управляющие и вычислительные системы и приборы; телекоммуникационные системы и связь; биомедицинская электроника; экологические аспекты микро- и наноэлектроники; менеджмент и маркетинг наукоемких производств.*

В подготовке и работе конференции приняли участие ведущие ученые МИЭТ – руководители научных секций: д-р физ.-мат. наук, проф. Неволин В.К., д-р физ.-мат. наук, проф. Поспелов А.С.,

д-р физ.-мат. наук, проф. Умняшкин С.В., д-р физ.-мат. наук, проф. Коркишко Ю.Н., д-р техн. наук, проф. Казеннов Г.Г., д-р техн. наук, проф. Крупкина Т.Ю., д-р техн. наук, проф. Федоров В.А., канд. техн. наук, доцент Чистюхин В.В., д-р физ.-мат. наук, проф. Селищев С.В., д-р физ.-мат. наук, д-р техн. наук, проф. Каракеян В.И., д-р техн. наук, проф. Гагарина Л.Г., д-р экон. наук, проф. Моисеева Н.К. и др.

К открытию конференции были изданы Программа и Тезисы докладов «Микроэлектроника и информатика – 2007». В сборнике опубликовано 393 тезиса докладов: 195 – аспирантские, 133 – студенческие, в том числе 35 человек подали материалы на участие в программе «УМНИК». Из них 123 тезиса иногородних участников, в том числе 8 из Минска (Белоруссия) и Харькова (Украина), а также из Москвы, Санкт-Петербурга, Твери, Таганрога, Томска, Самары, Брянска, Перми, Ставрополя, Ульяновска, Волгограда, Нижнего Новгорода, Воронежа, Ярославля, Красноярска, Великого Новгорода, Рязани, Казани, Липецка, Обнинска, Петрозаводска, Новосибирска, Астрахани.

На Пленарном заседании с докладом «Перспективы и тенденции развития микро- и наносистемной техники» выступил д-р техн. наук, проф. Тимошенко С.П.

На заседаниях секций было заслушано 264 человека, в том числе 129 аспирантов, 101 студент, 34 участника – вне конкурса. Из общего числа более 60 докладчиков представляли Москву: МАИ, МИТХТ им. М.В. Ломоносова, МИФИ, МГИЭМ, МГТУ им. Н.Э. Баумана, МАТИ-РГТУ им. К.Э. Циолковского, МГУ им. М.В. Ломоносова, ФГУП ЦНИРТИ им. акад. А.И. Берга, ФГУП НИИ «Субмикрон», ФГУП «НИИМП-К», ГУП «ЭЛВИС», ИППМ РАН, ИСП РАН, ГУП НПЦ «СПУРТ», КБ «Судостроительный банк», Сбербанк

«Зеленоградское отделение», ОАО «Ангстрем», а также другие города России: Астрахань (АГТУ), Брянск (УНТИ БГТУ), Казань (КГУ), Липецк (ЛГПУ), Новосибирск (НГТУ), Санкт-Петербург (СПбГПУ, СПбГУАП), Самара (СГТУ, СГМУ, СГАУ), Ставрополь (СевКавГТУ), Таганрог (ТТИ ЮФУ), Тверь (ТвГУ), Томск (ТУСУР), Ярославль (ЯрГУ им. П.Г. Демидова).

На секции **«Нанотехнологии в электронике»** были представлены доклады на актуальные темы наноэлектроники и физики наноразмерных структур. Наиболее интересными были сообщения о теоретических исследованиях транспортных свойств в наноструктурах, в частности, на основе полупроводников $A^{III}B^V$.

При проведении исследований молодые ученые использовали современную научно-техническую базу, которую представляли Центры формирования компетенций МИЭТ.

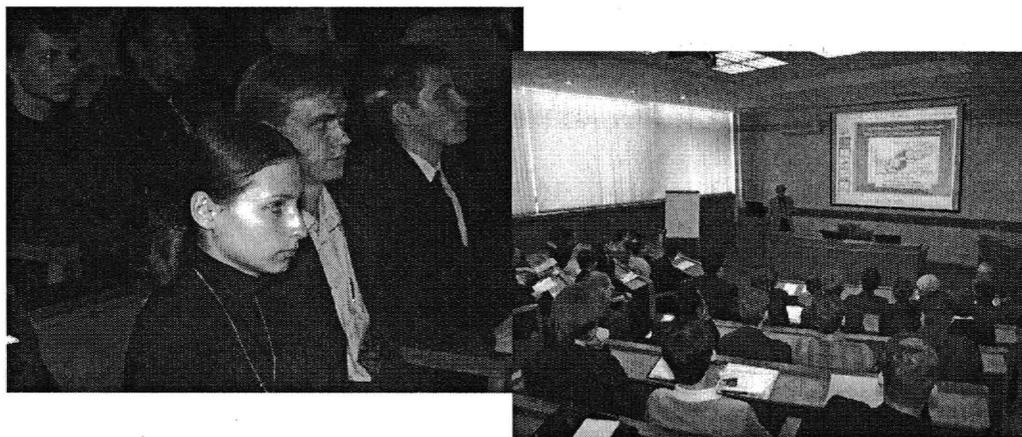
На секции **«Материалы микро-, опто- и наноэлектроники»** рассматривался достаточно широкий круг вопросов и задач: *полупроводниковые материалы; диэлектрические, проводящие, сверхпроводящие, магнитные и термоэлектрические материалы; органические материалы и фоторезисты; углеродные наноразмерные материалы; аналитические и аппаратные методы исследования структуры и свойств материалов; математическое и компьютерное моделирование процессов получения и свойств материалов.*

Характерной тенденцией для данной конференции явилось увеличение количества прикладных работ с конкретной направленностью на достижение конечного результата в виде готового продукта или изделия, при этом уровень разработок можно оценить как вполне высокий. Анализ выступлений участников конференции позволил сделать вывод о позитивных тенденциях в

развитии российской студенческой и аспирантской науки не только в учебных заведениях крупных промышленных регионов, но и в вузах городов с менее развитой инфраструктурой.

Тематика докладов, представленных в секции **«Проектирование и технология электронных компонентов»**, охватывала достаточно широкий круг актуальных научно-технических проблем, исследования по которым активно ведутся и в нашей стране и за рубежом. Среди наиболее значимых следует отметить направления, связанные с *развитием энергосберегающих технологий, разработкой программных средств автоматизации проектирования электронных компонентов различных классов, математическим моделированием интегральных структур, проблемами формирования контактов, разводки, корпусирования и монтажа готовых микросхем.*

Обстоятельная и оживленная дискуссия состоялась на заседаниях секции **«Опто- и акустоэлектроника»**. С докладами выступили аспиранты и студенты известных научных центров России: Новосибирска, Томска, Таганрога, Самары. Обсуждались *вопросы разработки, исследования и моделирования элементов и устройств оптоэлектроники (интегрально-оптический датчик росы, фотоприемные СБИС, голографические решетки, дифракционные оптические элементы, система стабилизации оптической линии визирования) и акустоэлектроники (широкополосный СВЧ дефлектор и дефлектор с двумерным сканированием, СВЧ фазометр-частотомер), а также по исследованию свойств материалов и структур современной акусто- и оптоэлектроники (оптические волноводы в ниобате лития, фоторефрактивные кристаллы силиката висмута, оптические элементы на основе полимерных материалов, отражательные решетки в ниобате лития, голографические решетки в титанате висмута).*



На секции «*Микро- и наносистемная техника*» рассматривались вопросы применения в микросистемной технике материалов и технологий, совмещающих в себе информационные и энергопреобразующие компоненты, в том числе созданные на базе использования микроэлектроники, микромеханики, оптоэлектроники, волоконно-оптической техники. Большое внимание уделялось практическому применению технологий микросистемной техники и микросенсорики для создания измерительных и контрольных средств в различных отраслях промышленности.

Доклады, представленные на секцию «*Биомедицинская электроника*», имели широкий диапазон тематики: от работ фундаментальной направленности до прикладных работ. К первым можно отнести работы, связанные с изучением взаимодействия лазерного излучения с рассеивающей биологической средой и разработкой методов томографической реконструкции физических характеристик такой среды. Среди прикладных работ наибольший интерес вызвали работы по обработке электроэнцефалограмм, разработке пульта психофизиологической диагностики, методам идентификации личности по голосу

и др. Ряд работ был посвящен актуальному направлению – разработке биосенсоров различного назначения.

Межвузовская научно-техническая конференция «*Микроэлектроника и информатика – 2007*» способствовала популяризации знаний в молодежной среде, навыкам публичного выступления, умению пользоваться мультимедиа для представления докладов, а также включению молодежи в инновационный процесс в современной экономике.

Можно отметить из года в год возрастающий уровень участников конференции, их знание последних достижений науки и техники, новых информационных технологий, программного обеспечения и т.д. Значительная часть материалов, представленных в докладах, имеет практическую ценность и перспективы внедрения.

Лучшие работы были отмечены дипломами лауреатов – всего 64 аспиранта и студента; 15 человек получили дипломы за активное участие в работе конференции.

Участники конференции выразили удовлетворение результатами ее работы, что подтверждено анализом анкет, которые заполнялись на секциях. Замечания и предложения будут учтены при подготовке МНТК «*Микроэлектроника и информатика – 2008*».

ВСЕРОССИЙСКИЙ КОНКУРСНЫЙ ОТБОР ИННОВАЦИОННЫХ ПРОЕКТОВ МОЛОДЫХ УЧЕНЫХ, АСПИРАНТОВ И СТУДЕНТОВ В РАМКАХ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОЙ КОНФЕРЕНЦИИ “ЭЛЕКТРОНИКА - 2007”

Московский государственный институт электронной техники (технический университет) проводит в первой половине сентября 2007 года Всероссийскую научно-техническую конференцию молодых ученых, аспирантов и студентов «Электроника - 2007» в рамках Программы «УМНИК».

Цель конференции: конкурсный отбор инновационных проектов молодых ученых, аспирантов и студентов в области электроники, определение путей и возможности их внедрения. На конференцию принимаются проекты по следующим приоритетным направлениям: *развитие науки, технологий и техники Российской Федерации: индустрия наносистем и материалы; информационно-телекоммуникационные системы; транспортные, авиационные и космические системы; живые системы; рациональное природопользование; безопасность и противодействие терроризму; энергетика и энергосбережение.*

Для победителей конкурсного отбора предусматривается открытие финансирования в размере 200 тыс. руб. ежегодно из средств Фонда содействия развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере. В рамках конкурса рассматриваются только проекты в области электроники, соответствующие представленным выше приоритетным направлениям.

Требования к представлению инновационных проектов: в конкурсе могут принимать участие только молодые ученые и специалисты (до 28 лет), аспиранты и студенты как индивидуально, так и в составе коллектива. На конкурс подаются самостоятельно выполненные научно-технические работы инновационной направленности. Научная работа должна представлять собой исследование по тематике конкурса, иметь научную новизну, а также инновационную значимость. В проекте должны быть указаны пути и способы возможной коммерциализации научной идеи, обоснован предполагаемый экономический эффект. Приветствуются документы, подтверждающие практическое внедрение результатов работы и их инновационную направленность.

Прием заявок на участие в конференции, докладов и тезисов до **1 июля 2007 г.**

Рассылка приглашений по электронной почте до **15 июля 2007 г.**

Работа конференции – **1-я половина сентября 2007 г.**

Заявки на участие, доклады и тезисы направлять по e-mail: id@rnd.miee.ru.

Адрес Оргкомитета: 124498, Москва, Зеленоград, проезд 4806, д. 5, МИЭТ.

Тел. (495) 532-98-30, факс: (495)530-54-29; E-mail: id@rnd.miee.ru

III МЕЖДУНАРОДНАЯ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ «ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В НАУКЕ, ТЕХНИКЕ И ОБРАЗОВАНИИ»

(РЕСПУБЛИКА АБХАЗИЯ, ПИЦУНДА, 19–29 СЕНТЯБРЯ 2007 Г.)

Тематика секций: авиационно-космические технологии и приборы; обеспечение качества и надежности приборов и аппаратуры; гидрофизика и морское приборостроение; информационные технологии в образовании; космический мониторинг окружающей среды, вопросы экологии; моделирование технологических систем и процессов; медицинское приборостроение; новые материалы и технологии в приборо- и машиностроении; физика и техника плазмы, плазменные технологии; физические процессы в материалах, структурах и приборах микро-, нано- и оптоэлектроники; современные проблемы гуманитарных наук.

Организаторы: Академия инженерных наук им. А.М. Прохорова (АИН РФ), Федеральное космическое агентство РФ, Военно-топографическое управление Генштаба МО РФ, Министерство образования и науки РФ, Московский государственный университет приборостроения и информатики (МГУПИ), Государственное научно-производственное объединение «Сухумский физико-технический институт» (ГНПО «СФТИ»), Сухумский государственный университет, Московский государственный институт электронной техники (технический университет), Московский энергетический институт и др.

Председатель Оргкомитета – вице-президент и действительный член Академии инженерных наук им. А.М. Прохорова, д-р физ.-мат. наук, проф., лауреат Государственной премии СССР, заслуженный деятель науки РФ, член Международной ассоциации авторов научных открытий, почетный профессор Шанхайской аэрокосмической академии Кубарев Юрий Васильевич.

По вопросам участия в конференции просьба обращаться в Секретариат конференции:

Трубицын Александр Константинович,
Пом. депутата Госдумы РФ
e-mail: pyg@duma.gov.ru
тел./факс (495) 692-68-54 (раб.), тел. (495) 488-45-56 (дом)

Ответственный секретарь
научных секций по космонавтике
Мещеряков Владимир Иванович,
зам. главного ученого секретаря
НТС «Роскосмоса», канд. техн. наук

Зверева Саида Гусейновна,
Заведующая редакцией журнала «Известия вузов. Электроника»
e-mail: magazine@rnd.miee.ru
тел. (495) 534-62-05 (раб.), факс (495) 530-54-29

Степанов Андрей Владимирович
Аспирант МЭИ
e-mail: stepanov.ru@mail.ru
тел. 8-926-122-37-14

Заезд участников с 17 сентября, оргвзнос – 1 тыс. руб.; проживание в двухместном номере и трехразовое питание - ориентировочно 500 руб. в день.

CONTENTS

Electron engineering materials

- S.K.Maksimov, K.S.Maksimov* La_2CaF_8 Phase with a Structure Derived from LaF_3 and Problem of Structural Organization of Non-Stoichiometric Phases 3
- N.K.Morozova, D.A.Mideros* Influence of Te on ZnSe Self-Activated Luminescence 12

Microelectronic technology

- A.P.Baraban, Yu.V.Petrov* Charge State of Luminescence Centers in Si-SiO₂ Structures, Multiply Implanted with Silicon and Carbon 18

Microelectronic devices and systems

- Yu.A.Chaplygin, A.I.Galushkov, A.A.Semenov, D.A.Usanov* Magnetosensible Device with Negative Differential Resistance and N-Type Volt-Ampere Characteristic 23
- V.P.Paderov, S.V.Nikitano* Influence of Junction Field-Effect Transistor Channel Parameters on Source Follower Integrated Circuit Parameters 30

Circuit engineering and design

- K.K.Malinauskas* A Special Voronoi Diagram for Constant Graph Building in VLSI Physical Design 36

Information technologies

- L.E.Nazarov, I.V.Golovkin* Iterative Symbol-By-Symbol Decoding of Signal Based on Low-Density Block Codes 43
- D.V.Yurchenko* Allocation of Automation Objects in Information Local Gathering Systems 50
- A.V.Sokol* Selection of Parameter for Estimation of Intermodulation Distortion Level 55

University education problems

- L.G.Gagarina, A.I.Barkova* IT – Education Problems of Secondary Specialty Students on an Example of 08001 Specialty «Applied Information Technology in Economy» 62
- T.V.Popova* On Curatorial Work at Faculty 66

Brief reports

- N.N.Gerasimenko, S.A.Aprelov, A.N.Tarasenkov, S.V.Kalinin, A.G.Turanskii, I.V.Pirshin* X-Ray Reflectometry of Fluorine-Doped Silicon 70
- I.I.Bobrinetskii, V.N.Sukhanov* Cathode-Plasma Metallization of Cloth Materials 73
- A.V.Gureev, D.Yu.Shakhvorostov* Influence of Technological Factors on Piezoceramic Resonator 75
- M.V.Alyushin, Myo Nyunt Win* OrCAD System PMT Block Model Development for Modern Gamma Camera Event Coordinates Reconstruction Algorithm Research 77
- M.V.Alyushin, Myat Win Tun* OrCAD System Analog Processing Units for Modern PET-Scanner Simulation 79
- G.P.Zhigal'skii, I.A.Karev, A.A.Gvaskov, G.A.Rudakov* $1/f$ Noise in MOS transistors with Different Type of Channel Conductivity at Temperatures of 300 and 77 K 81

Conferences. Exhibitions

- V.D.Verner, A.N.Saurov* Components, Systems and their application (Exhibition <<Electronics-2006>>, Munich) 83

ABSTRACTS

ELECTRON ENGINEERING MATERIALS

La₂CaF₈ Phase with a Structure Derived from LaF₃ and Problem of Structural Organization of Non-Stoichiometric Phases

S.K.Maksimov, K.S.Maksimov

Some regularities of twinning in the non-stoichiometric phase with a structure derived from LaF₃ have been investigated. The specific features, which indicate to twinning $\{1\bar{1}0\}$ and $\{1\bar{1}2\}$ planes, have been revealed in its diffraction patterns side by side with specific features belonging to twinning (001) and $\{1\bar{2}0\}$ planes standard for LaF₃. Unusual twins have been explained as antiphase boundaries of ordering domains with opposite directions of Ca²⁺ and La³⁺ interchange. It has been shown that the domain structure is the general rule in the structural organization of the non-stoichiometric phases, and therefore this peculiarity of their structure must be taken into consideration in the explanation of their physical and mechanical properties.

Influence of Te on ZnSe Self-Activated Luminescence

N.K.Morozova, D.A.Mideros

In the present work an interpretation of the ZnSe optical properties has been proposed based on the band anticrossing model, which is initiated by oxygen and is determined as a conduction band splitting. It has been shown, that the new approach explains the features of the self-activated luminescence in ZnSe (O) as well as in ZnSe·Te (O). The nature of the ZnSe·Te luminescence in the 460 – 500 nm area of the spectra has been described. A model of the electronic transitions in the band gap has been presented.

MICROELECTRONICS TECHNOLOGY

Charge State of Luminescence Centers in Si-SiO₂ Structures, Multiply Implanted with Silicon and Carbon

A.P.Baraban, Yu.V.Petrov

Electroluminescence of Si-SiO₂ structures multiply implanted with Si⁺ and C⁺ ions has been investigated. The electroluminescence spectra show two new bands centered at 2.7 and 4.3 eV. After annealing at 1100 °C a new band centered at 3.2 eV appears. This band probably originates from SiC nanoclusters. The charge distribution in silicon oxide has been investigated. It has been shown that all luminescence centers are neutral.

MICROELECTRONIC DEVICES AND SYSTEMS

Magnetosensible Device with Negative Differential Resistance and N-Type Volt-Ampere Characteristic

Yu.A.Chaplygin, A.I.Galushkov, A.A.Semenov, D.A.Usanov

The results of investigating the influence of magnetostatic field on the active one-port device, including the two-collector bipolar magneto-transistor as a magnetosensible element in the feedback

circuit, have been presented. It has been shown, that it is possible to realize the magnetosensible gauge with negative differential resistance and N-Type volt-ampere characteristic.

Influence of Junction Field-Effect Transistor Channel Parameters on Source Follower Integrated Circuit Parameters

V.P.Paderov, S.V.Nikitinov

In the paper, the influence of the junction field-effect transistor (JFET) channel parameters on the electric parameters of the source follower integrated circuit (IC) working in a small-size electret microphone has been analyzed. The analytical relations, that define the IC parameters depending on the geometrical dimensions of the JFET channel, have been derived. The analysis of the IC parameters obtained based on the analytical relations and the results of the two-dimensional computer simulation of JFET and the source follower basic circuit in TCAD has been carried out.

CIRCUIT ENGINEERING AND DESIGN

A Special Voronoi Diagram for Constant Graph Building in VLSI Physical Design

K.K.Malinauskas

In this paper, a new constraint graph building method for VLSI layout compaction and legalization tasks has been presented. The technique is based on a special Voronoi diagram. Applying the concept of the abstract Voronoi diagrams we produce a graph-building algorithm with the time complexity $O(n \log n)$ that is comparable to the best-known methods. The dynamic algorithm usage for the Voronoi diagram computation enables effective on-line physical design problem solving, when the frequent changes of the input data require a fast constraint graph reconstruction.

INFORMATION TECHNOLOGIES

Iterative Symbol-By-Symbol Decoding of Signal Based on Low-Density Block Codes

L.E.Nazarov, I.V.Golovkin

The descriptions of the developed symbol-by-symbol decoding procedures for signal sets based on the low-density block codes have been presented. The results of these decoding algorithm simulations have been described.

Allocation of Automation Objects in Information Local Gathering Systems

D.V.Yurchenko

The task of allocation of the automation objects among the operators in the system of information local gathering has been formulated. The algorithms of its solution for the cases of the static and dynamic allocation have been proposed.

Selection of Parameter for Estimation of Intermodulation Distortion Level

A.V.Sokol

A more universal factor of intermodulation distortions, arising in the optical-electronic tract of a distant probing space vehicle, based on the estimation of the part of broadband signal spectral energy in the spatial frequency band $[0, \nu_n]$ has been proposed.

UNIVERSITY EDUCATION PROBLEMS

IT – Education Problems of Secondary Specialty Students on an Example of 08001 Specialty «Applied Information Technology in Economy»

L.G.Gagarina, A.I.Barkova

In this paper the most essential problems in the information training of the 080801 «Applied Information Technology in Economy» have been considered. The possibilities to change the education program have been presented, as well as the existing examples of actual problems have been analyzed.

On Curatorial Work at Faculty

T.V.Popova

Various kinds of a faculty curatorial activity in a technical institute have been described. The curatorial activity is considered as an institution for improving the quality of specialists' training, as well as of individual educational work with students have been described. An approximate plan of the curatorial work with specific kinds of activity for each sector has been presented, the recommendations for its realization have been given. The curatorial work analysis has been presented.

BRIEF REPORTS

X-Ray Reflectometry of Fluorine-Doped Silicon

N.N.Gerasimenko, S.A.Aprelov, A.N.Tarasev, S.V.Kalinin, A.G.Turanskii, I.V.Pirshin

The results of the application of a principally new modification of X-Ray reflectometer for research of solid-state structures after various kinds of processing, including ion implantation, have been presented. 2 types of samples, produced by implantation F⁺ directly in a matrix of silicon and implantation through a silicon oxide layer (SiO₂ was etched after implantation) have been investigated. A number of peculiarities of the implanted fluorine anomalous influence on the parameters of the produced defect layers in silicon and the density of natural oxide increasing during storage have been revealed.

Cathode-Plasma Metallization of Cloth Materials

I.I.Bobrinetskii, V.N.Sukhanov

The methods of the cathode-plasma metallization of flax cloth have been developed. The surface morphology of fibers using the atomic-force microscopy and the mechanical properties of threads before and after metallization have been investigated.

Influence of Technological Factors on Piezoceramic Resonator

A.V.Gureev, D.Yu.Shakhvorostov

The influence of the divergence from an ideal form of the piezoceramic resonator with a circular section, caused by various technological factors, on the frequency and vibration amplitude of the nearest additional resonance, which determine the resonator production quality, has been investigated.

OrCAD System PMT Block Model Development for Modern Gamma Camera Event Coordinates Reconstruction Algorithm Research

M.V.Alyushin, Myo Nyunt Win

The PMT block amplitude-spatial characteristics OrCAD simulation features for modern gamma camera have been considered. The possibility of the scintillator crystal boundary effects simulation has been shown. The PMT Block Models with PMT number from 2 to 7 have been suggested.

OrCAD System Analog Processing Units for Modern PET-Scanner Simulation

M.V.Alyushin, Myat Win Tun

The analog processing unit simulation results for a modern PET-Scanner on the basis of OrCAD system have been presented. The model describing the boundary effects and the distributed character of light interaction with the photo cathode for HAMAMATSU position sensitive PMT has been proposed.

1/f Noise in MOS transistors with Different Type of Channel Conductivity at Temperatures of 300 and 77 K

G.P.Zhigal'skii, I.A.Karev, A.A.Gvaskov, G.A.Rudakov

The experimental results of 1/f noise research in MOS transistors with different types of the channel conductivity at temperatures of 300 and 77 K have been presented. The dependence of 1/f noise level on the channel conductivity type has been revealed. It has been determined, that the p-channel MOS transistors have 1/f noise level approximately 10 times lower than that of the n-channel MOS transistors. It has been shown, that the low-frequency noise level for all transistor types is higher at the room temperature (300 K) than at the temperature of 77 K.

CONFERENCES. EXHIBITIONS

Components, Systems and their application (Exhibition <<Electronics-2006>>, Munich)

V.D.Verner, A.N.Saurov

Based on the analysis of the exhibition <<Electronics-2006>>, Munich) exposition, the strategy changes in development of the semiconductor industry and microsystem engineering items production in conditions of their market growth have been considered.

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 рисунка.

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., e – не эль, З – буква, к – русск., O,o – буква, У – русск., Ч,ч – буква, b – лат., Y – игрек, I – эль, v – ню, u – ипсилон, ε – эпсилон;
- русские буквы помечаются снизу знаком \surd , а латинские ~;
- буквы греческого алфавита обводятся красным карандашом;
- векторные величины подчеркиваются одной прямой линией;
- подстрочные индексы помечаются дугой сверху, надстрочные – снизу; индексы, являющиеся сокращением слов, должны быть пояснены отдельно.

Иллюстрации могут быть выполнены:

1. В отдельных файлах в программе Corel Draw, не вставляя в MS Word. Допускаются полутоновые 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. Опубл., 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