

Известия высших учебных заведений

ЭЛЕКТРОНИКА 2'2008

Научно-технический журнал

Издается с 1996 г.

Выходит 6 раз в год

СОДЕРЖАНИЕ

Фундаментальные исследования

- Горбацевич А.А., Журавлев М.В., Капаев В.В.* Квази-
безотражательные потенциалы в полупроводниковых
наногетероструктурах 3
- Коноплев Б.Г., Рыдин Е.А.* Исследование транспорта
носителей заряда в связанных квантовых областях 14

Материалы электронной техники

- Авров Д.Д., Дорожкин С.И., Таиров Ю.М., Фадеев А.Ю.,
Лебедев А.О.* О включениях углерода при выращивании
слитков карбида кремния модифицированным мето-
дом Лэли 23
- Димитрюк А.А., Одуев В.В.* Комплексная магнитная
проницаемость ферритовых материалов СВЧ-диапа-
зона 32
- Светличная Л.А., Милешко Л.П., Королев А.Н.*
Электрофизические свойства анодных пленок хлорсо-
держающего Cu_2O на стеклотекстолите 39
- Осипенкова Н.Г., ШUTOва Р.Ф., Козлова Е.Е.*
Исследование состава материалов на основе функци-
ональных стекол для изготовления толстопленочных
терморезистивных датчиков 43
- Ермошин И.Г., Цыпленков И.Н., Свешников Ю.Н.*
Оптимизация технологии получения гетероструктур
 GaN с использованием данных дифрактометрического
анализа 49



Учредители:

Министерство
образования и науки
Российской Федерации

Московский
государственный институт
электронной техники
(технический университет)

Главный редактор
В.Д.Вернер

Редакционная коллегия:

Бархоткин В.А.
Быков Д.В.
Грибов Б.Г.
Казённых Г.Г.
Коноплев Б.Г.
Капаев Ю.В.
Коркишко Ю.Н.
Королёв М.А.
Кубарев Ю.В.
Неволин В.К.
Неволин В.Н.
Петросянец К.О.
Руденко А.А.
Таиров Ю.М.
Телец В.А.
Тихонов А.Н.
Усанов Д.А.
Чаплыгин Ю.А. (зам. главного
редактора)

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

Микроэлектронные приборы и системы

- Чаплыгин Ю.А., Артамонова Е.А., Красюков А.Ю., Крупкина Т.Ю.* Исследование тепловых эффектов и явлений саморазогрева в планарных силовых МОП-транзисторах КНИ-типа 52

Микросистемы

- Тимошенков С.П., Шилов В.Ф., Бойко А.Н., Симонов Б.М.* Исследование влияния газового демпфирования на параметры микроакселерометров 58

- Борисов А.Г., Маханько Е.С., Чиликина Т.Д., Иванова О.М., Крутоверцев С.А.* Газовый оптический сенсор на основе планарного многомодового волновода 61

- Бритов А.Д., Белоконев В.М., Надеждинский А.И., Наместников Д.Ю., Попуровский Я.Я.* Лазерный детектор дистанционного обнаружения газов CO_2 , CH_4 и NH_3 65

Информационные технологии

- Кучинский А.С., Путря Ф.М.* Симулятор многоядерной вычислительной системы и примеры его применения 72

- Земсков В.Н., Бегишев С.В.* Кодирование с предсказанием в модифицированной системе сжатия методом ДИКМ 78

Проблемы высшего образования

- Акуленок М.В., Коринтели Н.З., Сиврюкова Ю.Ю.* О роли компетентностного подхода в обеспечении качества профессионального образования 85

- Мязина Р.А.* Особенности формирования готовности студентов к использованию информационных компьютерных технологий в свете компетентностного подхода 90

Юбилей

- Королеву Михаилу Александровичу – 75 лет 94
- Contents 95
- Abstracts 96
- 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 03.04.08
Формат бумаги 60х84 1/8.
Печать офсетная.
Объем 11,63 усл.печ.л.,
11,4 уч.-изд.л.
Заказ № 34.

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.

ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

УДК [539.23 + 539.194].001.24

Квазибезотражательные потенциалы в полупроводниковых наногетероструктурах

А.А.Горбачевич, М.Н.Журавлев

Московский государственный институт электронной техники
(технический университет)

В.В.Капаев

Физический институт им. П.Н.Лебедева РАН

Рассмотрен новый класс квазибезотражательных потенциалов, связанных с рассеянием при малых энергиях. Используя разложение пропускания системы по волновым векторам в области параметров, соответствующих выходу локализованных состояний в непрерывный спектр, определены эффективные параметры низкоэнергетического рассеяния. Найдены параметры гетероструктур, формируемых ступенчатым распределением состава, обеспечивающие условия безотражательности в области малых энергий.

Современные методы зонной инженерии на основе эпитаксиальных технологий позволяют создавать полупроводниковые гетероструктуры с заданными электронными свойствами [1, 2]. Поведение электронов в гетероструктурах с хорошей степенью точности описывается решением уравнения Шредингера для огибающей волновой функции (метод эффективной массы для гетероструктур) [3, 4]. В терминах огибающей гетеропереход представляет собой простую потенциальную ступеньку, разделяющую две области постоянного значения потенциала, а два последовательных гетероперехода, ограничивающие слой материала, отличающегося от материала объема образца, формируют потенциальную яму или потенциальный барьер. Таким образом, оказывается возможным экспериментально создавать и исследовать потенциалы, известные из учебников по квантовой механике, где они используются для описания фундаментальных квантовомеханических свойств частиц [5, 6]. Нетривиальным примером использования методов зонной инженерии является создание двухбарьерных резонансно-туннельных диодов [7], имеющих хорошие перспективы для приборных приложений, локализованных состояний в области континуума (continuum bound states) [8], каскадных лазеров на межподзонных переходах [9, 10].

Отличительной особенностью симметричной двухбарьерной резонансно-туннельной структуры является обращение коэффициента отражения электронов в нуль при некоторой энергии, соответствующей энергии квазистационарного состояния, сформированного в межбарьерной области [6]. Другой интересный класс объектов квантовой механики представляют собой безотражательные потенциалы (БОП), для

которых коэффициент отражения обращается в нуль формально для всех энергий. Простейший пример БОП – потенциал вида $U_0 \text{ch}^{-1}(\alpha x)$, который становится безотражательным при определенном соотношении между U_0 и α . Однако экспериментально воспроизвести подобный потенциал из-за необходимости строго выдерживать неоднородное непрерывно изменяющееся пространственное распределение состава представляется затруднительным. Существуют определенные указания на то, что БОП могут также реализовываться в результате многочастичных взаимодействий в конденсированных состояниях атомов в ионных ловушках.

В настоящей работе описан новый класс потенциалов, так называемых квазибезотражательных потенциалов, связанных с рассеянием при малых энергиях, которые можно реализовать в виде ступенчато-постоянного распределения состава. В квадратичном по энергии приближении коэффициент отражения для этих потенциалов тождественно равен нулю.

В трехмерной задаче рассеяния амплитуда рассеяния при малых энергиях имеет вид [5]

$$f = - \left[\kappa_0 + ik - \frac{1}{2} r_0 k^2 \right]^{-1}. \quad (1)$$

Здесь $k = \frac{1}{\hbar} \sqrt{2mE}$ – волновой вектор; κ_0^{-1} – обратная длина рассеяния потенциала, которая может быть как положительна (связанное состояние есть), так и отрицательна (связанное состояние отсутствует); r_0 – эффективный радиус взаимодействия потенциала. При наличии в системе мелкого уровня параметр r_0 характеризует вклад в нормировочный интеграл квадрата волновой функции области действия потенциала:

$$\int_{-\infty}^{\infty} \varphi_0^2 dx \approx \frac{1}{\kappa} - r_0, \quad (2)$$

где κ – мнимый волновой вектор связанного состояния ($k = i\kappa$ – полюс амплитуды рассеяния (1)). Если этот вклад меньше аналогичного вклада в нормировочный интеграл для потенциала нулевого радиуса, но с той же энергией связи, как, например, для квантовой ямы вблизи выхода связанного состояния в непрерывный спектр, то $r_0 > 0$ [5]. В реальных физических системах явный вид потенциальной энергии обычно неизвестен. При этом основными параметрами, характеризующими взаимодействие частиц как при моделировании межчастичных взаимодействий, так и при интерпретации экспериментальных данных, служат именно длина рассеяния и эффективный радиус взаимодействия. В последнее время интерес к вопросу о параметризации реальных потенциалов параметрами амплитуды рассеяния возрос в связи с исследованием конденсированных состояний атомов в ионных ловушках [11], свойства которых зависят от особенностей межчастичных взаимодействий.

В трехмерных системах сечение рассеяния, соответствующее амплитуде рассеяния (1), имеет максимум при нулевой энергии независимо от знака длины рассеяния, т.е. независимо от того, какой уровень связанного состояния (реальный или виртуальный) присутствует в системе. В одномерных системах, как показано в работе [12], ситуация иная – максимум сечения рассеяния имеет место при конечной энергии частицы и существуют два качественно различных резонанса при малой энергии, различающихся знаком эффективного размера потенциала. В одномерной системе амплитуда прохождения для симмет-

ричного потенциала, обладающего реальным или виртуальным локализованным состоянием с малой энергией, при малых энергиях рассеиваемой частицы имеет вид

$$t(ik) \approx (-1)^{n-1} \frac{ike^{-i\zeta k}}{\kappa_0 + ik - \frac{1}{2}\rho^* k^2}, \quad (3)$$

где ζ, ρ^* – параметры, определяемые конкретным видом потенциальной энергии [13], ρ^* – эффективный размер потенциала; n – номер локализованного состояния (нечетные n соответствуют симметричным состояниям, четные – антисимметричным). В одномерной задаче амплитуда прохождения представляет собой амплитуду рассеяния на нулевой угол. Эффективный радиус взаимодействия r_0 (2) связан с параметрами амплитуды рассеяния следующим образом:

$$r_0 = \rho^* + \zeta. \quad (4)$$

Коэффициент прохождения частицы, соответствующий амплитуде (3), имеет вид

$$T = |t|^2 = \frac{k^2}{k^2 + \left(\kappa_0 - \frac{1}{2}\rho^* k^2 \right)^2}. \quad (5)$$

Резонансы, описанные в работе [12], связаны с обращением выражения, стоящего в круглых скобках в знаменателе (5), в нуль. При этом из-за наличия в числителе (5) квадрата волнового вектора резонанс имеет место при фиксированном значении волнового вектора (фиксированной энергии). Рассмотрим ситуацию, когда параметры потенциала таковы, что в нуль обращаются одновременно и обратная длина рассеяния κ_0 , и эффективный размер потенциала ρ^* , связанный с эффективным радиусом взаимодействия (4). Как следует из (5), коэффициент прохождения при этом тождественно равен единице (а коэффициент отражения – нулю) при любых значениях энергии в пределах квадратичной точности. Такие потенциалы будем называть квазибездотражательными.

Исследуем возможность использования методов зонной инженерии для создания квазибездотражательных потенциалов. В [12] показана возможность существования в одномерных системах, представляющих собой инвертированный резонансно-туннельный диод (ИРТД) (барьеры заменены ямами и наоборот, вставка к рис.1), двух качественно различных типов резонансов при малых энергиях, различающихся знаком эффективного размера потенциала. При изменении параметров гетеросистемы наблюдается коллапс резонансов – слияние двух резонансов единичной прозрачности в один резонанс с прозрачностью меньше единицы. На рис.1 показан пример резонансных диаграмм. Точки V_1 – V_4 на рисунке обозначают глубины ям, при которых соответствующие уровни размерного квантования выходят в непрерывный спектр. В интервале глубин ям, когда нечетное состояние (1 или 3) является локализованным, а следующее уже выходит в непрерывный спектр, значение пропускания в максимуме T_{\max} строго равно единице. Линия единичных максимумов образует петлю, начинающуюся и оканчивающуюся в точках выхода локализованных состояний разной четности в непрерывный спектр. При малой ширине барьера, с уменьшением глубин ям $|U_w|$, начиная с V_3 , вначале отчетливо проявляются два максимума пропускания, по мере возрастания E_{\max} их ширина увеличивается и, наконец, максимумы при $U_w = U_2$ сливаются – имеет место коллапс резонансов. Анализируя особенности диаграмм на рис.1

с использованием (5) легко показать, что вблизи точек V_2 , V_3 и V_4 значение ρ^* отрицательно, а вблизи V_1 – положительно. Увеличивая мощность барьера, можно добиться ситуации, когда в окрестности точки V_3 значение ρ^* станет положительным, т.е. варьируя параметры такой системы можно реализовать и ситуацию, когда κ_0 и ρ^* равны нулю.

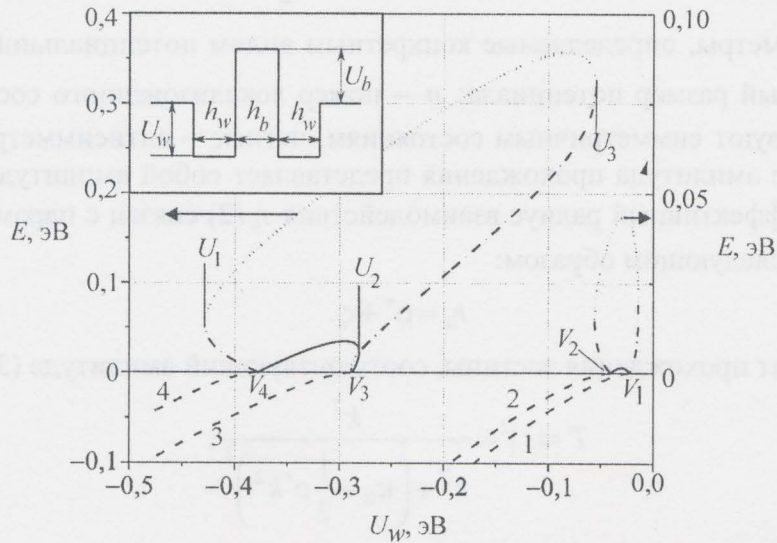


Рис.1. Зависимость энергий единичных (—) и неединичных (----) максимумов и минимумов (....) пропускания T и энергий размерного квантования (- - -) от глубины квантовой ямы U_w (ширина слоев $h_w = 50 \text{ \AA}$, $h_b = 15 \text{ \AA}$; высота барьера $U_b = 0,2 \text{ эВ}$; 1–4 – уровни размерного квантования)

Аналитическое определение взаимосвязи параметров гетеросистемы, показанной на вставке рис.1, и параметров амплитуды рассеяния (3) достаточно сложно, поэтому прежде чем переходить к рассмотрению безотражательной ситуации для этой системы, исследуем некоторые простейшие модели, допускающие точное аналитическое решение. Рассмотрим потенциал вида симметричной квантовой ямы шириной L и глубиной U :

$$U_1(x) = \begin{cases} -U & |x| \leq L/2, \\ 0 & |x| > L/2. \end{cases}$$

На границе квантовой ямы при $x = L/2$ имеют место условия сшивки волновой функции и ее производной:

$$\psi_W(L/2) = \psi_B(L/2), \quad \nabla \psi_W(L/2) = \nabla \psi_B(L/2). \quad (6)$$

Здесь $\psi_{W,B}(x)$ – волновые функции соответственно в яме и барьере, которые при $E < 0$ имеют вид

$$\psi_W(x) = B \cos\left(kx + (n-1)\frac{\pi}{2}\right), \quad \psi_B(x) = A e^{-\kappa x}. \quad (7)$$

Здесь четные n соответствуют симметричным, а нечетные – антисимметричным волновым функциям. Волновой вектор в яме k и параметр затухания в барьере κ связаны друг с другом соотношением

$$k^2 + \kappa^2 = \frac{2m}{\hbar^2} U = \tilde{U}. \quad (8)$$

Дисперсионное соотношение для определения энергии связанных состояний $E_n = -\frac{\hbar^2 \kappa^2}{2m}$ имеет вид [5]

$$k \cdot \operatorname{tg} \left(kx + (n-1) \frac{\pi}{2} \right) = \kappa. \quad (9)$$

С учетом (7) и (9) можно показать, что нормировочный интеграл от волновой функции локализованного состояния имеет вид

$$\int_{-\infty}^{\infty} \psi^2(x) dx = 2 \int_0^{L/2} \psi_W^2(x) dx + 2 \int_{L/2}^{\infty} \psi_B^2(x) dx = A^2 e^{-\kappa L} \left(\frac{1}{\kappa} \cdot \frac{U}{|E_n|} + \frac{L}{2} \cdot \frac{|E_n|}{U} \right),$$

что в пределе $\kappa L \ll 1$ переходит в

$$\int_{-\infty}^{\infty} \psi^2(x) dx \approx A^2 \left(\frac{1}{\kappa} - \frac{L}{2} \right). \quad (10)$$

Таким образом, как и следовало ожидать, эффективный радиус взаимодействия для квантовой ямы равен половине ее ширины $r_0 = L/2$. Заметим, что нормировочный интеграл (10) не зависит явно от номера связанного состояния и, следовательно, от его симметрии.

Определим параметры амплитуды рассеяния для квантовой ямы. Выражение для амплитуды рассеяния квантовой ямы при $E > 0$ имеет вид [5, 13]

$$t(ik_1) = \frac{1}{a(ik_1)} = e^{-ik_1 L} \frac{2ik_1 k_2}{2ik_1 k_2 \cos(k_2 L) + (k_1^2 + k_2^2) \sin(k_2 L)}, \quad (11)$$

где $k_{1,2}$ – волновой вектор электрона соответственно в области барьера и ямы ($k_2^2 - k_1^2 = \tilde{U}$). Процедура, предложенная в [12] для восстановления параметров амплитуды рассеяния, основана на сравнении различных членов разложений обратной амплитуды рассеяния по степеням k_1 ($k_1 L \ll 1$), вычисленной в конкретной микроскопической модели вблизи точки выхода уровня связанного состояния в непрерывный спектр, и общего выражения (3). Из (9) следует, что точка исчезновения/появления связанного состояния $\kappa = 0$ соответствует глубине квантовой ямы

$$U_0 = \frac{\hbar^2 (n-1)^2 \pi^2}{2mL^2} = E_0 (n-1)^2 \pi^2. \quad (12)$$

Вблизи точки $\kappa = 0$ волновой вектор k_2 согласно (9) можно представить как

$$k_2 L \approx (n-1)\pi + \frac{1}{2} \cdot \frac{\Delta + E}{(n-1)\pi E_0}, \quad (13)$$

где $\Delta = U - U_0$ ($\Delta \ll U_0$); $E = \frac{\hbar^2 k_1^2}{2m}$ – энергия электрона в области барьера. С учетом (12) и (13) представим параметр $a(ik_1)$ в (11) в виде

$$a(ik_1) \approx (-1)^{n-1} (a_0 + ik_1 a_1 - \frac{1}{2} k_1^2 a_2 + \dots) = (-1)^{n-1} \left[\frac{\Delta}{4LE_0} + ik_1 \left(1 + \frac{\Delta}{4E_0} \right) - \frac{3}{4} k_1^2 L \right]. \quad (14)$$

Воспользуемся для определения параметров амплитуды рассеяния (3) предложенной в [12] процедурой экстракции этих параметров из результатов расчета в микроскопической модели (14). В результате получаем

$$\varsigma = \left(\frac{a_1 - 1}{a_0} \right)_0 = L, \quad \kappa_0 = a_0 = \frac{\Delta}{4LE_0}, \quad \rho^* = (a_2)_0 - 2\varsigma = -\frac{1}{2}L. \quad (15)$$

Здесь и ниже индекс 0 у круглой скобки означает, что выражение в скобках берется в точке выхода локализованного состояния в непрерывный спектр (в данном случае при $\Delta = 0$). Для эффективного радиуса взаимодействия согласно (4) имеем:

$$r_0 = \frac{1}{2}L. \quad (16)$$

Таким образом, как было отмечено в работе [12], уже для простейшего потенциала, имеющего вид квантовой ямы, параметр ρ^* и эффективный радиус взаимодействия r_0 имеют разные знаки.

Для исследования более сложных гетеросистем, не теряя общности полученных выводов, можно аппроксимировать квантовые ямы и барьеры δ -функциями. Физически δ -функциональный потенциал можно рассматривать как глубокую и узкую квантовую яму или барьер. При этом в δ -функциональной квантовой яме (далее δ -яма), в отличие от реальной, может существовать только одно локализованное состояние, которое никогда не выходит в континуум.

Рассмотрим две δ -ямы, расположенные на расстоянии L друг от друга, т.е. потенциал вида

$$U_2(x) = -\alpha [\delta(x + L/2) + \delta(x - L/2)].$$

Здесь $(-\alpha)$ – мощность δ -ямы. Граничные условия имеют вид

$$\psi(\pm L/2) = \psi(\pm L/2), \quad \nabla \psi(\pm L/2) = \nabla \psi(\pm L/2) \mp \tilde{\alpha} \psi(\pm L/2), \quad (17)$$

где $\tilde{\alpha} = \frac{2m}{\hbar^2} \alpha$. Для обратной амплитуды рассеяния $a(ik) = t(ik)^{-1}$ находим разложение в ряд по степеням волнового вектора k :

$$a(ik) \approx \frac{(-1)^{n-1}}{ik} \left[\tilde{\alpha} \left(1 - \frac{\tilde{\alpha}L}{2} \right) + ik \left(1 - \frac{\tilde{\alpha}^2 L^2}{2} \right) + \frac{\tilde{\alpha}^2 L^3}{3} k^2 + \dots \right]. \quad (18)$$

Максимальное число локализованных состояний, которые могут образовать два δ -функциональных потенциала, равно двум. При этом нижний уровень, соответствующий симметричному состоянию, существует при любых сколь угодно малых $\tilde{\alpha}$. Условию выхода антисимметричного ($n=2$ в (3)) локализованного состояния в непрерывный спектр отвечает обращение первого члена в квадратных скобках в (18) в нуль. Согласно процедуре [12] из (18) находим следующие значения параметров амплитуды рассеяния:

$$\kappa_0 = \frac{1}{2}\tilde{\alpha}(\tilde{\alpha}L - 2), \quad \varsigma = 2L, \quad \rho^* = -\frac{4}{3}L, \quad r_0 = \frac{2}{3}L. \quad (19)$$

Заметим, что рассматриваемый притягивательный потенциал сосредоточен вблизи границ структуры, т.е. его «центр тяжести» смещен дальше от начала координат по сравнению с обычной квантовой ямой, и он обладает большими по абсолютной величине значениями параметров ρ^* и r_0 .

Добавим между двумя δ -функционными потенциалами третий:

$$U_3(x) = -\alpha[\delta(x + L/2) + \delta(x - L/2)] + \beta\delta(x). \quad (20)$$

Используя аналогичные (17) граничные условия, получим выражение для обратной амплитуды рассеяния:

$$a(ik) = (-1)^{n-1} \frac{e^{ikL}}{8(ik)^3} \left[2\tilde{\alpha}\tilde{\beta}(\tilde{\alpha} + 2ik) - \tilde{\alpha}^2(2ik + \tilde{\beta})e^{ikL} + (2ik + \tilde{\alpha})^2(2ik - \tilde{\beta})e^{-ikL} \right]. \quad (21)$$

Разложим функцию $(ik)^3 \cdot a(ik)$, не имеющую особенностей в точке $k = 0$, в ряд по степеням k в окрестности нуля. Нетрудно убедиться, что для этой функции первая производная равна нулю. После вычисления остальных производных получим:

$$a(k) \approx (-1)^{n-1} \frac{1}{ik} \left(a_0 + ia_1k - \frac{1}{2}a_2k^2 \right),$$

где введены следующие обозначения:

$$a_0 = -\frac{2 - \tilde{\alpha}L}{8} [2\tilde{\beta} - \tilde{\alpha}(4 + \tilde{\beta}L)], \quad a_1 = 1 + \frac{\tilde{\alpha}L^2}{8} [2\tilde{\beta} - \tilde{\alpha}(4 + \tilde{\beta}L)], \quad (22)$$

$$a_2 = \frac{\tilde{\alpha}L^3}{48} (8\tilde{\beta} - 32\tilde{\alpha} - 7\tilde{\alpha}\tilde{\beta}L).$$

Полюсы амплитуды рассеяния, расположенные на положительной мнимой полуоси, соответствуют связанным состояниям. Таким образом, заменив в (21) k на ik , из условия $a(k) = 0$ получим уравнение на собственные значения:

$$2\tilde{\alpha}\tilde{\beta}(\tilde{\alpha} - 2\kappa) + \tilde{\alpha}^2(2\kappa - \tilde{\beta})e^{-\kappa L} - (2\kappa - \tilde{\alpha})^2(2\kappa + \tilde{\beta})e^{\kappa L} = 0. \quad (23)$$

Условие выхода дискретных уровней локализованных состояний в непрерывный спектр определяется из (23) в пределе $\kappa \rightarrow 0$, что, как нетрудно видеть, совпадает с условием $a_0 = 0$ (22). Откуда для первого и второго локализованных состояний соответственно получаем

$$\tilde{\alpha} = \frac{2\tilde{\beta}}{4 + \tilde{\beta}L} \quad \text{и} \quad \tilde{\alpha} = \frac{2}{L}. \quad (24)$$

Используя разработанную в [12] процедуру экстракции, находим выражения для эффективных параметров потенциала в окрестности точки выхода первого локализованного состояния:

$$\kappa_0 = a_0, \quad \varsigma = -\frac{1}{4}\tilde{\beta}L^2, \quad \rho^* = \frac{\tilde{\beta}L^2(96 + 32\tilde{\beta}L + 3\tilde{\beta}^2L^2)}{12(4 + \tilde{\beta}L)^2}$$

и в окрестности точки выхода 2-го локализованного состояния:

$$\kappa_0 = -a_0, \quad \varsigma = L\left(2 + \frac{1}{4}\tilde{\beta}L\right), \quad \rho^* = -\frac{L}{12}(16 + 3\tilde{\beta}L). \quad (25)$$

Нетрудно убедиться, что при $\tilde{\beta} > 0$ выражения для эффективного размера потенциала ρ^* в обоих случаях являются знакопостоянными функциями во всем диапазоне параметров. Так как знаки ρ^* для первого и второго уровней являются противоположными, то в рассматриваемой системе невозможно реализовать ситуацию коллапса резонансов и, как следствие, подобрать параметры системы таким образом, чтобы эффективный размер потенциала стал равным нулю.

При $\tilde{\beta} < 0$ исследуемый потенциал представляет собой структуру, состоящую из трех δ -ям. Из (25) следует, что в окрестности точки выхода второго локализованного состояния при $\tilde{\beta} = -\frac{16}{3L}$ эффективный размер потенциала обращается в нуль, т. е. происходит смена топологического типа резонансной диаграммы [12]. Таким образом, при выполнении условия $\tilde{\alpha} = \frac{2}{L}$ и $\tilde{\beta} = -\frac{16}{3L}$ исследуемый потенциал становится квазибезотражательным при малых энергиях в пределах квадратичной точности.

Из (24) следует, что в системе из трех δ -ям существует критическое значение мощности центральной ямы, такое, что при $\tilde{\beta} > \tilde{\beta}_c = -4/L$ в континуум выходит только одно локализованное состояние, а при $\tilde{\beta} < \tilde{\beta}_c$ – два. Заметим, что если $\tilde{\beta} = \tilde{\beta}_c$, то точке выхода локализованного состояния формально соответствует $\tilde{\alpha} = \infty$.

Обычно использование аппроксимации квантовых ям и барьеров δ -функциями позволяет описать основные закономерности реальных систем. Система двух δ -ям, разделенных δ -барьером, является модельной для инвертированного резонансно-туннельного диода. Наличие только двух связанных состояний приводит к тому, что δ -система описывает только особенности в области V_1, V_2 ИРТД (см. рис.1). Численные расчеты подтверждают сделанный вывод о том, что в этой области параметров коллапса резонансов (и изменения знака ρ^*) добиться не удастся. Таким образом, условия квазибезотражательности в ИРТД следует искать в области выхода в непрерывный спектр старших уровней размерного квантования.

Как отмечено выше, форму петли подбарьерного резонанса для структуры ИРТД можно изменять, варьируя высоту и/или ширину центрального барьера. На рис.2 представлены зависимости положения максимумов пропускания E_{\max} от глубины квантовых ям для различных h_b .

Величины U_4 и U_3 соответствуют выходу 4-го и 3-го уровней размерного квантования в непрерывный спектр. Как видно из рис.2, в области U_3 с изменением h_b удастся добиться перехода от ситуации, когда резонанс с единичной прозрачностью существует при $|U_w| > |U_3|$, что соответствует $\rho^* > 0$ (кривые 1, 2), к ситуации с $T_{\max} = 1$ при $|U_w| < |U_3|$, $\rho^* < 0$ (кривая 3). В последнем случае имеет место коллапс резонансов в точке U_c . При переходе от кривой 1 к кривой 3 величина ρ^* меняет знак. Ситуация,

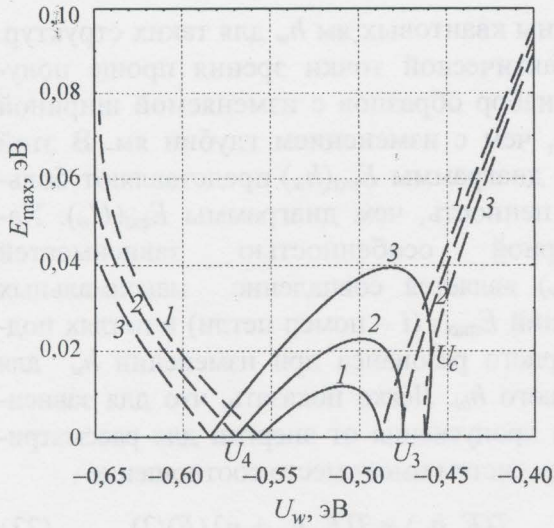


Рис.2. Зависимости положения максимума пропускания E_{\max} (— $T_{\max} = 1$; --- $T_{\max} < 1$) от глубины квантовых ям U_w для структуры обращенного резонансно-туннельного диода ($h_w = 40$ Å, $U_b = 0,2$ эВ) при различных ширинах центрального барьера h_b , Å: 1 – 20; 2 – 16,7; 3 – 14

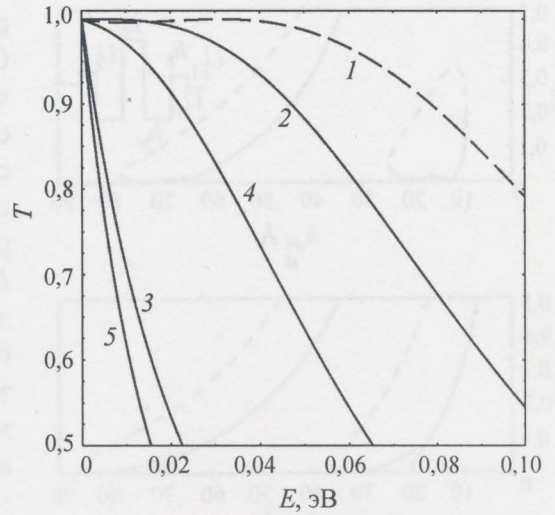


Рис.3. Зависимость пропускания T от энергии E для значений U_b , соответствующих U_3 (кривые 1, 2, 4) и U_4 (кривые 3, 5), $h_b = 14$ Å (1), 16,7 Å (2, 3) и 20 Å (4, 5)

когда $\rho^* = 0$, соответствует обращению в бесконечность производной dE_{\max}/dU_w . При этом условии в окрестности $k = 0$ пропускание не зависит от k (квазибезотражательная структура). Такому случаю соответствует кривая 2 на рис.2.

На рис.3 представлены зависимости пропускания T от энергии E при $U_w = U_{3,4}$. При $U_w = U_4$ качественных изменений поведения функции $T(E)$ при варьировании h_b не происходит (кривые 3, 5), а при $U_w = U_3$ изменения оказываются существенными (кривые 1, 2, 4). При $h_b = 16,7$ Å $\rho^* = 0$ и, как видно из рисунка, имеется достаточно широкая область энергии, в которой пропускание тождественно равно единице. При $h_b = 14,0$ Å зависимость $T(E)$ уже имеет два максимума, т.е. формально не является безотражательной, но значение в минимуме между ними составляет 0,996 и с практической точки зрения ситуация близка к безотражательной. Таким образом, соответствующим подбором параметров ИРТД удастся сформировать квазибезотражательный потенциал.

Расчеты показывают, что вольт-амперная характеристика ИРТД аналогична традиционному РТД, ток в пике может в несколько раз превосходить ток в долине. Это вполне приемлемо для практических применений. Трудность в реализации заключается в том, что наиболее интересное явление – коллапс резонансов имеет место при параметрах, когда в квантовой яме имеется по крайней мере два уровня размерного квантования. В стандартной конфигурации ИРТД эти уровни оказываются заполненными электронами, формируется внутреннее электрическое поле, искажающее потенциальный профиль структуры. Однако явление коллапса резонансов чрезвычайно чувствительно к форме профиля. В связи с этим возникает задача поиска структур, в которых явление коллапса резонансов может реализоваться из-за взаимодействия первых двух уровней размерного квантования. Коллапс реализуется в условиях, когда ширина каждого из резонансов становится сравнимой с расстоянием между резонансами.

Таким образом, управлять ситуацией можно, изменяя ширину резонансов. Этого можно добиться, ограничив структуру справа и слева дополнительными барьерами. В результате приходим к структуре, представленной на вставке к рис.4. На рисунке представлены диаграммы зависимости положения экстремумов пропускания E_{ext} от

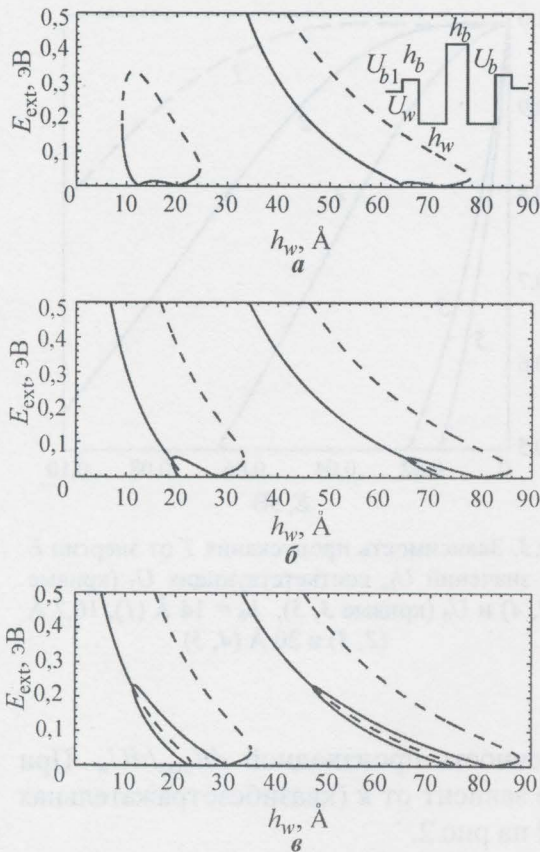


Рис. 4. Зависимость энергий максимумов (—) и минимумов (----) пропускания обращенного РТД с дополнительными барьерами от глубины ям h_w для $U_b = 0,5$ эВ, $h_b = 14$ Å, $U_w = 0,2$ эВ, $U_{b1} = 0,2$ эВ: а, б – $h_b = 0, 10$ Å; в – $h_b = 15$ Å

$E_{\max i}$ в каждой из петель. Иная ситуация для неединичных максимумов и минимумов. Значения пропускания в таких экстремумах для последующих петель не совпадают, в результате их положение не подчиняется формуле (23).

Как видно из рис.4, с ростом ширины барьеров h_{b1} существенно возрастает энергия в максимуме петли $E_{\max i}$ и E , соответствующая коллапсу резонансов. Наиболее важно то, что коллапс можно достичь и в ситуации, когда взаимодействуют уровни 1 и 2, при этом отсутствуют уровни размерного квантования в ямах и искажения профиля потенциала не происходит. Фактически структура с дополнительным барьером есть комбинация ИРТД и трехбарьерной структуры. Реализовать рассмотренную структуру можно на базе системы GaAs/AlGaAs/AlInAs.

Таким образом, методы зонной инженерии позволяют управлять тонкими характеристиками потенциала – параметрами амплитуды рассеяния и эффективным радиусом взаимодействия. При надлежащем подборе параметров гетероструктуры прозрачность ее в определенном интервале энергии практически равна единице, т.е. гетероструктура ведет себя как безотражательная. При этом свойствами безотражательного потенциала обладает структура со ступенчато-постоянным профилем потенциала, что облегчает возможность ее экспериментальной реализации.

ширины квантовых ям h_w для таких структур. С практической точки зрения проще получить набор образцов с изменяемой шириной слоев, чем с изменением глубин ям. В этой связи диаграммы $E_{\text{ext}}(h_w)$ представляют большую ценность, чем диаграммы $E_{\text{ext}}(U_w)$. Характерной особенностью зависимостей $E_{\text{ext}}(h_w)$ является совпадение максимальных значений $E_{\max i}$ (i – номер петли) в петлях подбарьерного резонанса при изменении h_w для заданного h_{b1} . Легко показать, что для зависимости пропускания от энергии для рассматриваемых систем имеет место соотношение

$$T(E, h_w) = T(E, h_w + n\lambda(E)/2), \quad (23)$$

где $\lambda = 2\pi \left[\frac{2m}{\hbar^2} (E + U_w) \right]^{-1/2}$ – длина волны

электрона в области квантовой ямы; $n = 1, 2, 3 \dots$, т.е. пропускание при заданной энергии – периодическая функция, с периодом, равным половине длины волны электрона в области ямы. В петле подбарьерных резонансов $T = 1$, поэтому последующие петли просто получаются из первой (формируемой выходом в непрерывный спектр первого и второго уровней размерного квантования) переносом по оси h_w в соответствии с формулой (23). Естественно при этом совпадение

Литература

1. **Алферов Ж.И.** История и будущее полупроводниковых гетероструктур // ФТП. – 1998. – Т. 32. – С. 1.
2. **Kroemer H.** Band Offsets and Chemical Bonding: The Basis for Heterostructure Applications // Physica Scripta. – 1996. – Т. 68. – С. 10–16.
3. **Bastard G.** Wave Mechanics Applied to Semiconductor Heterostructures. – N. Y.: Halsted Press. 1989.
4. **Foreman B.A.** Effective-mass hamiltonian and boundary conditions for the valence bands of semiconductor microstructures // Phys. Rev. B. – 1993. – Т. 48. – С. 4964–4967.
5. **Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М.** Квантовая механика (нерелятивистская теория). – М.: Физматлит, 2002.
6. **Aharonov Y., Bohm D.** Significance of electromagnetic potentials in quantum theory // Phys. Rev. – 1959. – Т. 115. – С. 485–491.
7. **Tsu R., Esaki L.** Tunneling in finite superlattice // Appl. Phys. Lett. – 1973. – Т. 22. – С. 562.
8. Nonparabolicity and a sum rule associated with bound-to-bound and bound-to-continuum intersubband transitions in quantum wells / **C. Sirtori, F. Capasso, J. Faist et al.** // Phys. Rev. B. – 1994. – Т. 50. – С. 8663–8674.
9. **Казаринов Р.Ф., Сурис Р.А.** О электромагнитных свойствах полупроводников со сверхрешеткой // ФТП. – 1971. – Т. 5. – С. 797–800.
10. Quantum Cascade Laser / **J. Faist, F. Capasso, D.L. Sivco et al.** // Science – 1994. – Т. 22. – С. 553–556
11. Theory of Bose-Einstein condensation in trapped gases / **F. Dalfovo, S. Giorgini, L. Pitaevskii et al.** // Rev. Mod. Phys. – 1999. – Т. 71. – С. 463–512.
12. **Горбачевич А.А., Журавлёв М.Н., Капаев В.В.** Коллапс резонансов в полупроводниковых гетероструктурах как переход с нарушением симметрии в открытой квантовой системе // ЖЭТФ. – 2008. – Т. 134.
13. **Драгунов В.П., Неизвестный И.Г., Гридчин В.А.** Основы нанoeлектроники. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2004.

Статья поступила
5 марта 2008 г.

Горбачевич Александр Алексеевич – доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой квантовой физики и нанoeлектроники МИЭТ. *Область научных интересов:* теория конденсированного состояния, нанoeлектроника.

Журавлев Максим Николаевич – аспирант кафедры квантовой физики и нанoeлектроники МИЭТ. *Область научных интересов:* нанoeлектроника, методы математического моделирования.

Капаев Владимир Васильевич – доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник Физического института им. П.Н. Лебедева РАН. *Область научных интересов:* теория конденсированного состояния, нанoeлектроника, методы математического моделирования.

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

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

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

Исследование транспорта носителей заряда в связанных квантовых областях

Б.Г.Коноплев, Е.А.Рындин

Южный научный центр РАН

Технологический институт Южного федерального университета в г. Таганроге

Рассмотрены особенности управляемой передислокации носителей заряда в наноструктурах на основе туннельно-связанных квантовых областей, образованных гетеропереходами GaAs/AlGaAs. Обсуждаются результаты численного моделирования динамики управляемой туннельной передислокации максимума амплитуды волновых функций носителей.

Одним из перспективных направлений развития наноразмерной элементной базы является создание структур на основе туннельно-связанных квантовых областей, образованных гетеропереходами GaAs/AlGaAs. В рамках данного направления разработан ряд полупроводниковых приборов, характеризующихся быстродействием, не ограниченным временем пролета электронами активных областей [1–3]. В основу функционирования приборов данного класса положен принцип управляемой передислокации максимума амплитуды волновых функций электронов между туннельно-связанными квантовыми областями.

Целью данной работы является модельное исследование туннельного транспорта носителей заряда в связанных квантовых областях, образованных гетеропереходами GaAs/AlGaAs.

В работах [3, 4] при рассмотрении наноструктур на основе туннельно-связанных квантовых областей показано, что управляемая передислокация электронов в подобных квантовых системах носит сложный характер и определяется не только параметрами туннельного барьера, но в значительной степени также энергетическим спектром носителей и формой импульсов управляющего напряжения. При ступенчатом изменении управляющего напряжения бездиссипативная передислокация электронов не происходит, а система переходит в возбужденное состояние, характеризующееся незначительными по амплитуде периодическими колебаниями вероятности нахождения электронов в связанных квантовых областях. Моделирование процесса передислокации в данном случае необходимо выполнять с учетом релаксации энергии.

В соответствии с [3, 4] для осуществления бездиссипативной передислокации необходимо подать управляющий импульс сложной формы:

- в начальный момент времени подается управляющее напряжение, соответствующее равновероятному нахождению электронов в туннельно-связанных квантовых ямах. При этом наблюдается периодическая передислокация носителей между квантовыми областями;

- в момент времени, соответствующий максимальной вероятности нахождения электрона в первой квантовой области и, следовательно, минимальной вероятности его нахождения во второй области, управляющее напряжение необходимо скачком увеличить до значения, соответствующего передислокации в стационарных условиях, что препятствует обратной передислокации.

В реальных схемах формирование подобных сложных импульсов весьма затруднительно и может стать серьезным препятствием на пути реализации наноструктур с

управляемой передислокацией максимума амплитуды волновых функций электронов.

В работе [5] обсуждается ряд проблем реализации элементов с управляемой передислокацией, связанных с использованием только каналов с электронной проводимостью: недопустимо низкая помехозащищенность, малый логический перепад, протекание сквозного тока в стационарных состояниях, значительное отношение суммарного числа электронов в связанных квантовых областях в противоположных стационарных состояниях, что ограничивает минимальное время задержки элемента временем пролета носителями активных областей.

С целью решения указанных проблем в [5] предложены методы построения наноразмерных элементов на основе туннельно-связанных квантовых областей с взаимодополняющими типами проводимости. Сочетание принципов управляемой туннельной передислокации и комплементарной логики, а также парафазное управление обеспечивают сохранение неизменного суммарного числа подвижных носителей в связанных квантовых областях при изменении управляющих напряжений и позволяют сократить минимальное время задержки приборов до значений, определяемых инерционностью туннельной передислокации, обеспечить повышение помехозащищенности, увеличение логического перепада и снижение энергии переключения.

На рис.1 приведены структура и схема инвертора на основе туннельно-связанных квантовых областей с электронным и дырочным типами проводимости [5]. Обозначения внешних контактов на рис.1,а,б (U_{dd} – напряжение питания; G_{nd} – шина нулевого потенциала; U_{in} – входное напряжение; U_{out} – выходное напряжение) соответствуют схеме, показанной на рис.1,в, где туннельно-связанные квантовые области условно изображены в виде пар транзисторов соответствующего типа проводимости, соединенных пунктирными линиями.

В соответствии с рис.1,а,б туннельно-связанная наноструктура определенного типа проводимости представляет собой две равные по ширине и глубине квантовые ямы, разделенные между собой туннельно-прозрачным гетеропереходным барьером. Квантовые ямы имеют отдельные омические контакты для регистрации состояния квантовой системы и парафазное управление передислокацией максимума амплитуды волновых функций посредством затвора Шотки на верхней грани кристалла и управляющего p - n -перехода со стороны полуизолирующей подложки. Омические контакты к областям управляющих p - n -переходов выполняются на периферии туннельно-связанных наноструктур и на рис.1 не показаны. Высоколегированные области омических контактов разделены слоями широкозонного нелегированного $AlAs$ толщиной около 20 нм для предотвращения туннелирования носителей между ними. Легированные барьерные области n/p - $Al_{0,3}Ga_{0,7}As$ отделены от квантовых ям i - $Al_{0,3}Ga_{0,7}As$ спейсерами для ослабления рассеяния подвижных носителей при продольном транспорте в квантовых ямах на дальнедействующем кулоновском потенциале ионов примесей.

В работе [5] приведены результаты численного моделирования элементов на основе туннельно-связанных квантовых областей с взаимодополняющими типами проводимости, в соответствии с которыми при изменении управляющих напряжений на величину логического перепада происходит необратимая бездиссипативная туннельная передислокация максимума амплитуды волновых функций носителей в связанных квантовых областях с задержкой менее 0,2 пс. Сопоставление данных результатов с полученными в [3, 4] требует проведения дополнительных модельных исследований с целью выявления особенностей туннельно-связанных наноструктур, обеспечивающих возможность бездиссипативной туннельной передислокации носителей заряда, а также причин необратимого характера управляемой передислокации максимума амплитуды волновых функций носителей при условии, что подобная бездиссипативная передислокация возможна.

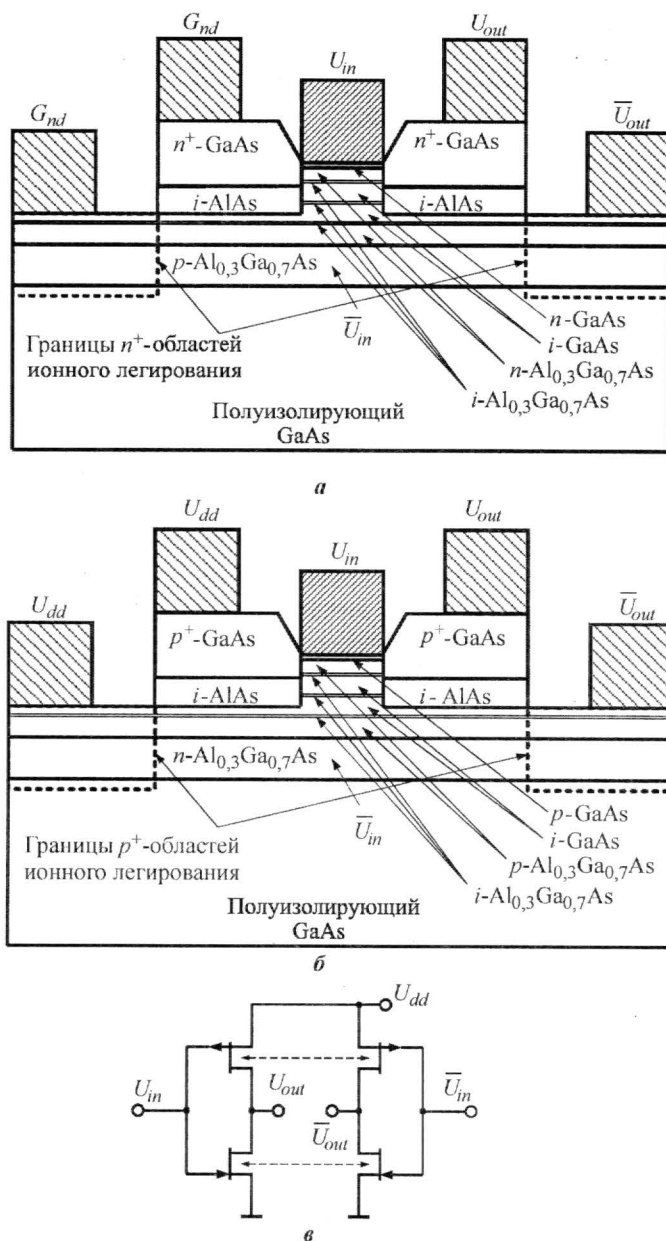


Рис. 1. Структура инвертора на основе туннельно-связанных квантовых областей с электронной (а) и дырочной (б) проводимостью и схема инвертора (в) [5]

Анализ особенностей управляемой передислокации максимума амплитуды волновых функций в туннельно-связанных квантовых областях выполнялся для наноструктур, представленных на рис.1,а, в предположении ступенчатого изменения парафазных управляющих напряжений по результатам численного решения нестационарного уравнения Шредингера [4]:

$$-i\hbar \frac{\partial \Psi}{\partial t} = \frac{\hbar^2}{2} \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{1}{m^*(x)} \frac{\partial \Psi}{\partial x} \right) - V\Psi(x,t),$$

где x – координата; t – время; $\Psi(x, t)$ – волновая функция электрона; V – потенциальная энергия; m^* – эффективная масса носителя заряда; i – мнимая единица; \hbar – постоянная Планка.

Энергетический спектр и волновые функции в начальный момент времени определялись из самосогласованного решения уравнения Пуассона и стационарного уравнения Шредингера согласно [2, 6]. На границах области моделирования (границах управляющих переходов) задавались условия Дирихле вида

$$\Psi(x_{\min}, t) = \Psi(x_{\max}, t) = 0,$$

где x_{\min} , x_{\max} – координаты границ области моделирования.

На рис.2 приведены временные зависимости вероятностей нахождения электронов в туннельно-связанных квантовых областях наноструктуры на основе гетеропереходов GaAs/Al_{0,3}Ga_{0,7}As с шириной квантовых ям 5 нм, шириной туннельного барьера 2 нм и шириной барьерных областей управляющих переходов 30 нм при ступенчатом (в течение одного шага приращения по времени) изменении разности потенциалов между управляющими затворами $U = U_{in} - \bar{U}_{in}$ (см. рис.1) от 0,5 В до 0 и от 0,5 до –0,5 В.

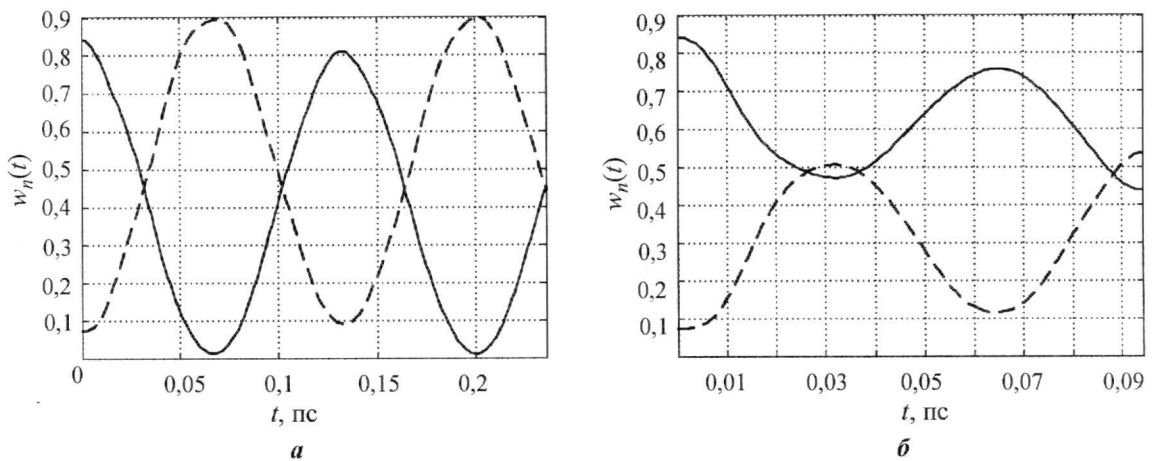


Рис.2. Временные зависимости вероятностей нахождения электронов в туннельно-связанных квантовых областях шириной 5 нм при ступенчатом изменении управляющего напряжения U от 0,5 В до 0 (а) и от 0,5 до –0,5 В (б) (— $w_{n1}(t)$; ---- $w_{n2}(t)$)

Данные результаты получены на неравномерной координатной сетке, содержащей по 30 шагов на каждый структурный слой полупроводника, с шагом приращения по времени 0,01 фс. Минимальный шаг приращения по энергии при решении стационарного уравнения Шредингера составлял $7 \cdot 10^{-9}$ эВ.

Исходная управляющая разность потенциалов $U = 0,5$ В соответствует максимальной вероятности нахождения электронов в верхней (на рис.1,а) квантовой яме и, следовательно, минимальной вероятности нахождения носителей в нижней. Учитывая симметрию рассматриваемой наноструктуры (равные значения параметров квантовых областей выше и ниже туннельного барьера в поперечном сечении), управляющее напряжение $U = 0$ соответствует равной вероятности нахождения электронов в верхней и нижней квантовых ямах. При этом без учета процессов релаксации энергии, как и следовало ожидать, наблюдается периодическая передислокация максимума амплитуды волновых функций носителей, что в соответствии с рис.2,а выражается в высокоамплитудных осцилляциях вероятностей нахождения электронов в туннельно-связанных квантовых областях с периодом 130 фс.

Поскольку рассматриваемое модельное представление не учитывает релаксацию энергии, при изменении разности потенциалов между управляющими затворами от 0,5 до –0,5 В, т.е. при изменении направления управляющего поля без изменения его модуля, следует ожидать либо отсутствия передислокации максимума амплитуды волновых

функций с переходом системы в возбужденное состояние, либо при определенном положении энергетических уровней, так же, как и в предыдущем случае, периодическую передислокацию, но с меньшим периодом, учитывая наличие электрического поля и финитный характер движения волнового пакета. Приведенные на рис.2,а графики подтверждают, что система переходит в возбужденное состояние и наблюдаются осцилляции вероятностей нахождения электронов в связанных квантовых областях с периодом примерно 65 фс. Амплитуда этих осцилляций невелика и максимум волновой функции основную часть времени остается в верхней квантовой области, т.е. бездиссипативная передислокация не происходит.

Ввиду невозможности практически осуществить ступенчатое изменение управляющего напряжения за указанное время (0,01 фс), целесообразно рассмотреть особенности управляемой передислокации при линейном изменении напряжения с более реальной длительностью фронтов. Согласно результатам, полученным в [3, 4], при линейном включении управляющего напряжения возможно осуществить бездиссипативную передислокацию за время менее 1 пс.

На рис.3 приведены временные зависимости вероятностей нахождения электронов в туннельно-связанной наноструктуре при линейном изменении управляющей разности потенциалов U от 0,5 до -0,5 В с различной длительностью фронтов.

Согласно рис.3,а при длительности фронтов 50 фс за счет увеличения времени нахождения квантовой системы в окрестности состояния, соответствующего резонансу уровней, амплитуда осцилляций вероятностей возрастает, что соответствует частичной периодической передислокацией максимума амплитуды волновых функций между связанными квантовыми областями.

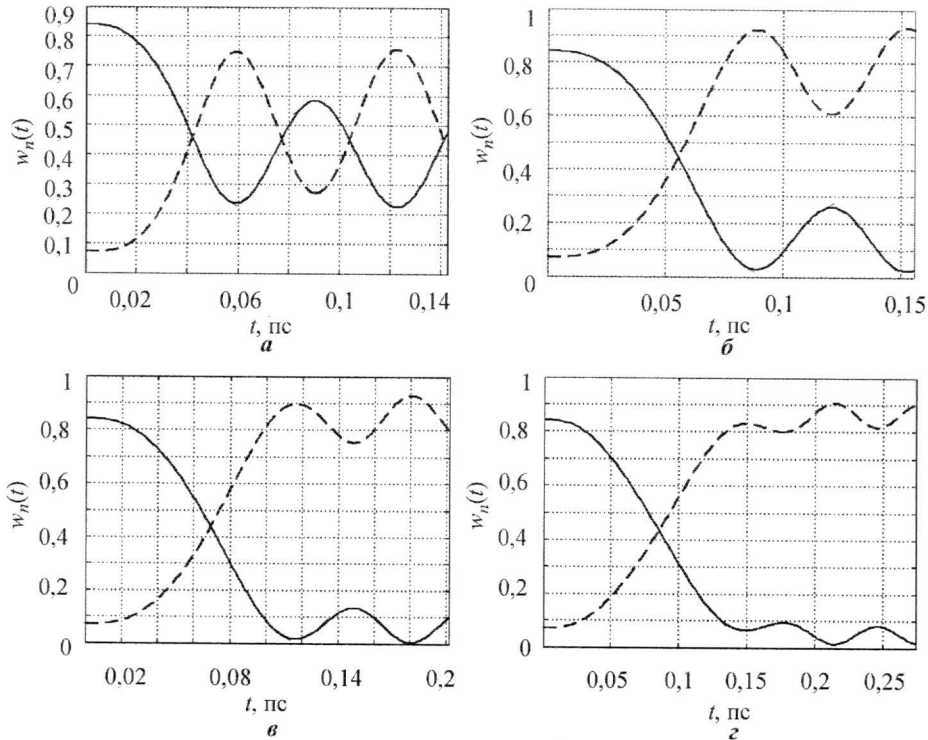


Рис.3. Временные зависимости вероятностей нахождения электронов в туннельно-связанных квантовых областях шириной 5 нм при линейном изменении U от 0,5 до -0,5 В с длительностью фронтов 50 фс (а), 100 фс (б), 150 фс (в), 200 фс (г) (— $w_{n1}(t)$; ---- $w_{n2}(t)$)

При длительности фронтов 100 фс и более (рис.3,б,в,г) время нахождения квантовой системы в окрестности состояния, соответствующего резонансу уровней, еще более увеличивается. Кроме того, к моменту окончания управляющего импульса происходит практически полная передислокация максимума амплитуды волновой функции. В результате после завершения фронта импульса, в отличие от рис.3,а, даже без учета диссипативных процессов, обратной передислокации не происходит, а наблюдаются лишь осцилляции вероятностей нахождения носителей в связанных квантовых областях, амплитуда которых уменьшается при увеличении длительности управляющего фронта.

Время необратимой передислокации максимума волновых функций при увеличении длительности фронтов управляющих импульсов от 100 до 200 фс также увеличивается с 75 до 130 фс (по уровням вероятностей 0,1 и 0,9) соответственно (рис.3,б,в,г).

Следует также отметить, что необратимому характеру бездиссипативной передислокации в данном случае способствует симметрия рассматриваемых наноструктур (равные значения параметров квантовых областей) и парафазное управление, определяющие равные значения энергии системы в противоположных стационарных состояниях и способствующие снижению энергии переключения.

Увеличение ширины квантовых областей приводит к резкому снижению интенсивности рассеяния носителей заряда на гетерограницах и позволяет значительно повысить подвижность носителей при продольном транспорте в квантовых ямах [7]. Поэтому представляет интерес рассмотрение особенностей управляемой передислокации в более широких связанных квантовых областях.

На рис.4 приведены аналогичные рассмотренным выше временные зависимости вероятностей нахождения электронов в туннельно-связанных квантовых ямах шириной 10 нм при линейном изменении управляющей разности потенциалов от 0,5 до -0,5 В с различной длительностью фронтов.

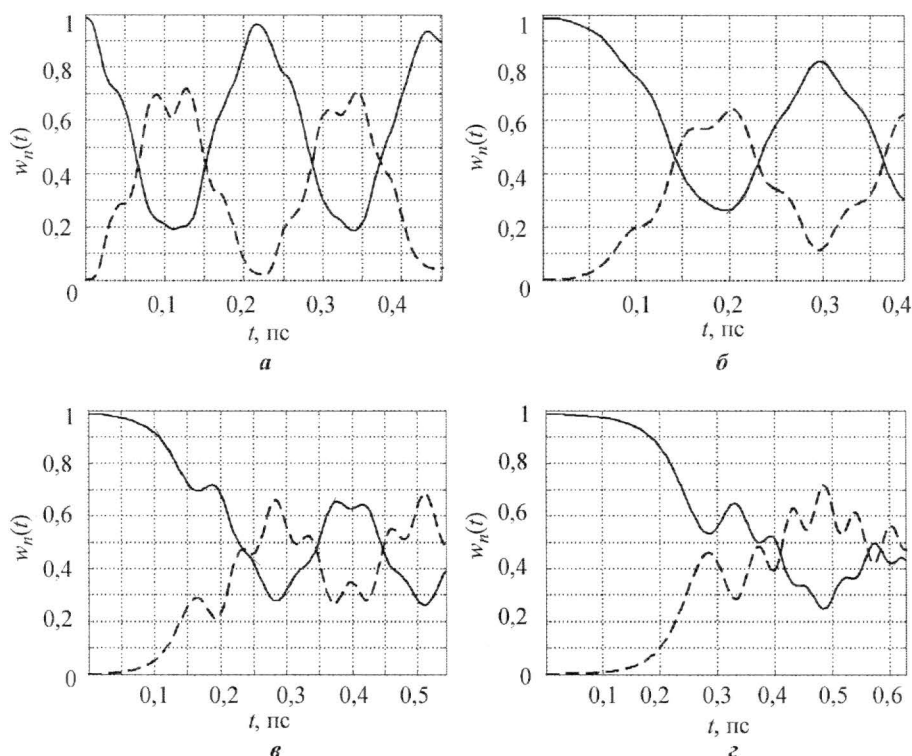


Рис.4. Временные зависимости вероятностей нахождения электронов в туннельно-связанных квантовых областях шириной 10 нм при линейном изменении U от 0,5 до -0,5 В с длительностью фронтов 0,1 пс (а), 100 фс (б), 200 фс (в), 400 фс (г) (— $w_{n1}(t)$; ---- $w_{n2}(t)$)

В данном случае, в отличие от узких квантовых ям, передислокация максимума амплитуды волновых функций наблюдается даже при практически ступенчатом изменении управляющего напряжения (рис.4,а). Время передислокации составляет примерно 110 фс, период осцилляций – 220 фс. Это объясняется увеличением числа разрешенных уровней энергии в квантовых областях и, следовательно, увеличением числа резонансов этих уровней при изменении управляющего напряжения. Увеличение периода осцилляций по сравнению с рис.3 соответствует увеличению ширины квантовых ям с 5 до 10 нм при неизменных параметрах туннельного барьера и барьерных областей управляющих переходов.

При увеличении длительности фронтов управляющих импульсов, как и в случае узких квантовых ям, амплитуда осцилляций максимума волновых функций относительно положений равновесия уменьшается (см. рис.4). Однако вследствие увеличения числа разрешенных уровней в квантовых областях в данном случае осцилляции вероятностей нахождения носителей заряда наблюдаются в окрестности значения 0,5, что приводит к обратимой частичной передислокации. Кроме того, наблюдаются дополнительные осцилляции малой амплитуды с периодом около 60 фс.

На рис.5 приведены отдельные обобщенные характеристики процесса управляемой туннельной передислокации максимума волновых функций носителей от параметров наноструктуры и управляющего сигнала, полученные для туннельно-связанных квантовых областей шириной 10 нм, разделенных туннельным барьером шириной 2 нм.

Зависимости усредненных вероятностей нахождения электронов в туннельно-связанных квантовых областях $\langle w_1 \rangle$, $\langle w_2 \rangle$ и амплитуды осцилляций данных вероятностей A_P от амплитуды управляющих импульсов U и ширины барьерных областей управляющих переходов W_B , приведенные на рис.5,а,б,г, получены при длительности фронта управляющих импульсов 100 фс и отражают картину, наблюдаемую после завершения данного управляющего фронта.

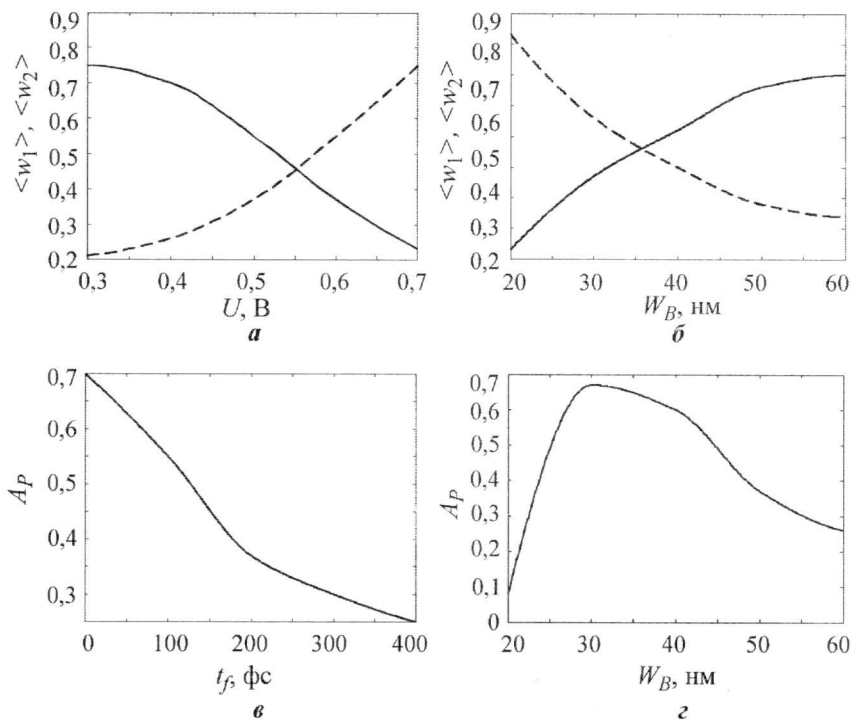


Рис.5. Зависимости усредненных вероятностей нахождения носителей в квантовых областях от амплитуды управляющего импульса (а) и ширины барьерных областей управляющих переходов (б); амплитуды осцилляций вероятностей нахождения электронов в связанных квантовых областях от длительности фронтов управляющего сигнала (г) и ширины барьерных областей управляющих переходов (з)

Анализ приведенных результатов численного моделирования позволяет сделать следующие основные выводы:

- в достаточно узких (шириной порядка 5 нм) туннельно-связанных квантовых областях ступенчатое изменение управляющего напряжения не приводит к передислокации максимума амплитуды волновых функций носителей заряда. Система переходит в возбужденное состояние, а передислокация происходит за счет диссипативных процессов;

- при линейном изменении управляющей разности потенциалов за счет увеличения времени нахождения квантовой системы в окрестности состояния, соответствующего резонансу уровней, наблюдается бездиссипативная передислокация максимума амплитуды волновых функций между связанными квантовыми областями, причем при длительности фронтов управляющих импульсов 100 фс и более даже без учета диссипативных процессов передислокация носит необратимый характер. При этом наблюдаются осцилляции вероятностей нахождения носителей в связанных квантовых областях, амплитуда которых уменьшается при увеличении длительности фронтов управляющих импульсов в соответствии с зависимостью, приведенной на рис.5,в;

- необратимому характеру бездиссипативной передислокации способствует симметрия наноструктур (равные значения параметров квантовых областей) и парафазное управление, определяющие равные значения энергии системы в противоположных стационарных состояниях и способствующие снижению энергопотребления;

- при увеличении ширины туннельно-связанных квантовых областей (10 нм и более) передислокация максимума амплитуды волновых функций наблюдается даже при ступенчатом изменении управляющего напряжения, что объясняется увеличением числа разрешенных уровней энергии в квантовых областях и, следовательно, увеличением числа резонансов этих уровней в процессе переключения;

- при увеличении длительности фронтов управляющих импульсов в связанных квантовых областях шириной 10 нм и более вследствие увеличения числа разрешенных уровней передислокация максимума амплитуды волновых функций носит обратимый характер;

- бездиссипативная передислокация в системе туннельно-связанных квантовых областей наблюдается лишь при амплитуде управляющих импульсов, превышающей определенное значение, зависящее от параметров наноструктуры. Например, при ширине квантовых ям 10 нм, ширине туннельного барьера 2 нм и ширине барьерных областей управляющих переходов 30 нм в соответствии с рис.5,а, разность усредненных вероятностей нахождения электронов в связанных квантовых областях меняет знак при амплитуде управляющих импульсов более 0,55 В. Причем именно при данной амплитуде наблюдаемые осцилляции вероятностей имеют максимальный размах и передислокация носит обратимый характер;

- динамика процесса передислокации в значительной степени определяется не только шириной квантовых ям и прозрачностью туннельного барьера, но также и шириной барьерных областей управляющих переходов, вследствие влияния отражения волновых функций носителей заряда от внешних границ (границ управляющих переходов). В соответствии с зависимостями, приведенными на рис.5,б, бездиссипативная передислокация по усредненным вероятностям нахождения частиц в связанных квантовых ямах наблюдается при ширине барьерных областей управляющих переходов менее определенного значения (в рассматриваемой наноструктуре – менее 35 нм). Причем, как показано на рис.5,г, именно при данной ширине барьерных областей наблюдаемые осцилляции вероятностей имеют максимальный размах и передислокация носит обратимый характер;

- учитывая, что даже при увеличении длительности фронтов управляющих импульсов передислокация в связанных квантовых областях шириной более 10 нм носит обратимый характер, в этом случае более адекватное для реальных приборов рассмотрение динамики управляемой передислокации возможно только с учетом диссипативных процессов.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ (шифр «2007-3-1.3-11-03-005»).

Литература

1. **Sakaki H.** Velocity-modulation transistor (VMT) – a new field-effect transistor concept // Jpn. J. Appl. Phys. – 1982. – Vol. 21, № 6. – P. L381–L383.
2. **Inoue K., Sakaki H., Yoshino J., Hotta T.** Self-consistent calculation of electronic states in AlGaAs/GaAs/AlGaAs selectively doped double heterojunction systems under electric fields // J. Appl. Phys. – 1985. – Vol. 58, № 11. – P. 4277–4281.
3. **Gorbatsevich A.A., Kapaev V.V., Kopaev Yu.V., Kremlev V.Ya.** Wave-function-rearrangement quantum devices // Phys. Low-Dim. Struct. – 1994. – № 4/5. – P. 57–62.
4. **Горбачевич А.А., Капаев В.В., Конаев Ю.В.** Управляемая эволюция электронных состояний в наноструктурах // ЖЭТФ. – 1995. – Т. 107. – Вып. 4. – С. 1320–1349.
5. **Коноплев Б.Г., Рындин Е.А.** Интегральные логические элементы на основе туннельно-связанных наноструктур // Изв. вузов. Электроника. – 2006. – № 3. – С. 18–26.
6. **Мнацаканов Т.Т., Левинштейн М.Е., Поморцева Л.И., Юрков С.Н.** Универсальный метод аналитической аппроксимации подвижности основных носителей заряда в полупроводниках в широком диапазоне температур и уровней легирования // Физика и техника полупроводников. – 2004. – Т. 38. – Вып. 1. – С. 56–60.
7. **Heiblum M., Mendez E.E., Stern F.** High mobility electron gas in selectively-doped n: AlGaAs/GaAs heterojunctions // Appl. Phys. Lett. – 1984. – Vol. 44, N 11. – P. 1064–1066.

Статья поступила

28 января 2008 г.

Коноплев Борис Георгиевич – доктор технических наук, профессор, декан факультета электроники и приборостроения ТТИ ЮФУ, руководитель группы нанoeлектроники Южного научного центра РАН. *Область научных интересов:* микро- и нанoeлектроника, микросистемная техника, методы автоматизированного проектирования СБИС.

Рындин Евгений Адальбертович – кандидат технических наук, доцент, ведущий научный сотрудник отдела физической и органической химии Южного научного центра РАН. *Область научных интересов:* элементная база микро- и нанoeлектроники, методы математического моделирования.

МАТЕРИАЛЫ ЭЛЕКТРОННОЙ ТЕХНИКИ

УДК 621.315

О включениях углерода при выращивании слитков карбида кремния модифицированным методом Лэли

Д.Д.Авров, С.И.Дорожкин, Ю.М.Таиров, А.Ю.Фадеев

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет

А.О.Лебедев

Физико-технический институт им. А.Ф.Иоффе РАН (г. Санкт-Петербург)

Представлен анализ проблемы появления включений углерода в монокристалле карбида кремния при выращивании слитков карбида кремния SiC модифицированным методом Лэли (так называемая графитизация слитка). Показано, что процесс графитизации слитка не связан с недостатком кремния в ростовой ячейке, напротив, именно избыток кремния у поверхности роста тормозит скорость процесса роста слитка и приводит к интенсивной коррозии графитовой арматуры.

Анализу причин, приводящих к появлению включений углерода в растущем слитке (так называемая графитизация слитка) в процессе выращивания монокристалла карбида кремния модифицированным методом Лэли, посвящен ряд публикаций [1–3]. Так, в [1] отмечается, как важно избежать появления включений углерода в затравке (графитизации затравки) перед началом процесса роста. Намеренное термическое травление затравки, предложенное в [4], приводит к графитизации затравки с последующим образованием дефектов в растущем кристалле. В качестве основной причины появления углерода в растущем слитке рассматривается истощение источника по кремнию в результате ухода кремния из ячейки и активного его взаимодействия с графитовой арматурой [2, 3]. Таким образом, поддержание высокого давления кремния у поверхности затравки декларируется в качестве актуальной задачи [1]. Для компенсации потерь кремния предлагается вводить дополнительный источник кремния [5] или использовать беспористые тигли из тантала [6], предотвращающие уход кремния из ячейки роста. В то же время отмечается, что избыток кремния в ряде случаев приводит к появлению капель кремния на растущей поверхности, а также к смене растущего политипа карбида кремния [5–7].

В настоящей работе последовательно рассмотрены возможные причины, приводящие к появлению включений углерода в растущем слитке.

Эксперимент. Объемные монокристаллы карбида кремния политипов 4Н и 6Н выращивали с использованием модифицированного метода Лэли в печи с резистивным нагревом при температурах 2000–2200 °С в ростовой ячейке из низкопористого графита марки МГ-1 отечественного производства. Продолжительность экспериментальных циклов составляла от 5 до 50 ч. Давление аргона p_{Ar} в процессе роста находилось в диапазоне от 5 до 100 торр.

Держатель затравки и непосредственно затравка располагались на верхней крышке стандартной ростовой ячейки, в нижней части находился порошкообразный источник карбида кремния – предварительно спеченный высокочистый карбид кремния марки Sika-Tech-E100 крупностью 100 мкм производства фирмы Saint-Gobain. Зазор между затравкой и источником составлял 20–50 мм. Температурные градиенты $\Delta T/\Delta x$ находились в диапазоне 10–30 К/см. Затравками служили предварительно подготовленные монокристаллические пластины SiC диаметром 54 мм толщиной 1 мм собственного производства.

Износ источника поликристаллического карбида кремния, а также потери вещества из ячейки определяли гравиметрически, по взвешиванию ячейки в целом, держателя затравки и источника.

Источник поликристаллического карбида кремния после процесса выращивания представляет собой смесь SiC и углеродного остатка. После отжига источника на воздухе (для удаления элементарного углерода) проводили повторное взвешивание и по расчетной методике, описанной в [8], оценивали стехиометрическое отношение Si/C в газовой фазе.

Для определения включений второй фазы выращенный слиток после резки на пластины исследовали методами рентгеноструктурной дифрактометрии и лазерной масс-спектрометрии. Скорость роста определяли гравиметрически и с помощью толщиномеров.

Все части графитовой арматуры исследовали визуально, а также гравиметрическим методом на предмет взаимодействия с компонентами газовой фазы в ходе процесса.

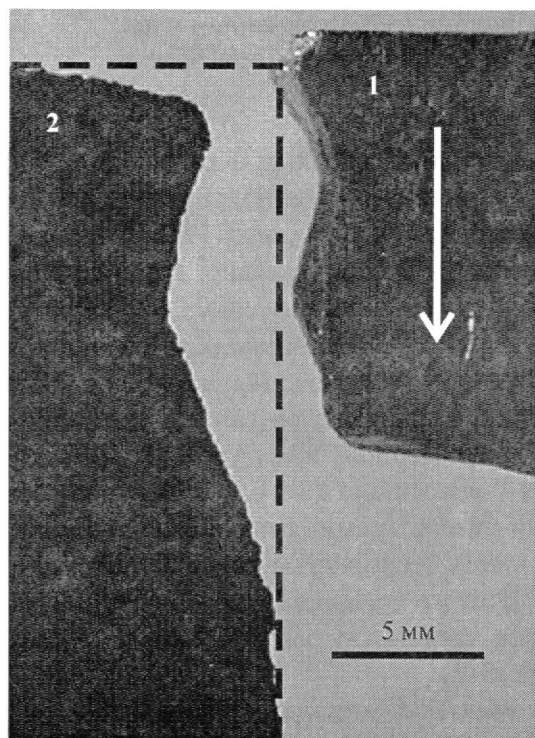


Рис.1. Коррозия частей ячейки роста, примыкающих к затравке и растущему слитку (вид сбоку), при $T=2150^\circ\text{C}$, скорости роста 0,7 мм/ч и продолжительности ростового цикла – 20 ч: 1 – слиток; 2 – цилиндрическая оправка из графита. Стрелкой обозначено направление роста слитка, пунктиром показан профиль оправки до начала процесса роста

Результаты и обсуждение. Процесс выращивания слитка сопровождается взаимодействием стенок графитовой ячейки с компонентами газовой фазы. Средние потери веса ячейки на единицу времени составляют 10^{-3} – 10^{-4} г/см²·ч, что соответствует скорости травления графитовой поверхности 0,5–5 мкм/ч. На всех внутренних поверхностях ячейки образуется мелкодисперсный углеродный порошок. Наиболее сильно выражена коррозия частей тигля, примыкающих к затравке, для которых скорость травления графитовой поверхности существенно выше и находится в диапазоне 3–60 мкм/ч (рис.1). На рисунке слиток и оправка для наглядности разнесены.

Используемая квазизамкнутая ячейка роста может быть охарактеризована двумя потоками вещества. Полезный поток F_1 отражает перенос вещества из источника на затравку и его осаждение в виде монокристаллического карбида кремния, второй поток F_2 (паразитный) характеризует уход вещества из ячейки (главным образом в форме газообразного кремния). Отношение потоков $F_2/(F_1 + F_2)$ в пересчете на кремний определяет долю кремния, покидающего ростовую ячейку в процессе выращивания. По нашим данным, указанное отношение слабо коррелирует с параметрами процесса (температу-

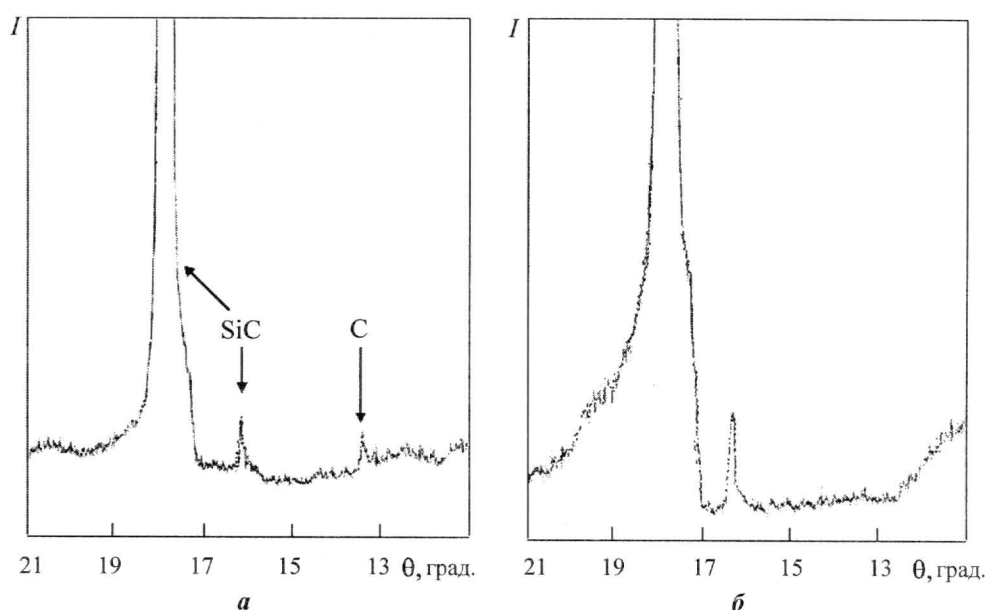


Рис.4. Типовые рентгенограммы слитков карбида кремния с включениями углерода (а) и без включений (б) (Cu-излучение, θ –2 θ -сканирование)

Рассмотрим и проанализируем возможные причины, которые могут приводить как к взаимодействию графитового тигля с компонентами газовой фазы, так и появлению углерода в растущем слитке.

Графитизация при диффузионно-лимитированном массопереносе. Оценка коэффициентов диффузии реагентов. Процесс диффузии в газовой фазе, состоящей из инертного газа аргона, разбавленного кремнийсодержащими реагентами (Si, Si₂C и SiC₂), может быть описан с использованием независимых бинарных коэффициентов диффузии соответствующих реагентов в аргоне. Оценки коэффициентов взаимной диффузии были выполнены в рамках кинетической теории газов по формуле Энскога–Чепмена [9]. Опуская промежуточные вычисления, для бинарных коэффициентов диффузии можно записать:

$$D = A \frac{T^{3/2}}{p}, \quad (1)$$

где D – бинарный коэффициент диффузии, см²/с; T – температура роста, К; p – давление, бар. Значения параметра A для расчета коэффициентов взаимной диффузии представлены ниже:

Компоненты газовой фазы	
Ar–Si.....	$5,04 \cdot 10^{-5}$
Ar–SiC ₂	$1,99 \cdot 10^{-5}$
Ar–Si ₂ C.....	$1,54 \cdot 10^{-5}$
Ar–SiC.....	$2,89 \cdot 10^{-5}$
Ar–Ar.....	$2,82 \cdot 10^{-5}$

Отметим, что вычисленные в соответствии с (1) коэффициенты диффузии для SiC₂ и Si₂C достаточно хорошо коррелируют с коэффициентом диффузии лимитирующего реагента, использованным в [10] при расчете массопереноса в ростовой ячейке.

Начальная графитизация затравки. Графитизация затравки может наблюдаться в процессе нагрева и выдержки затравки перед началом роста слитка, когда концентрация кремния в газовой фазе вблизи поверхности затравки ниже равновесной для темпе-

ратуры поверхности (обратный концентрационный градиент) [1]. В то же время эту возможность следует признать маловероятной, учитывая, что естественный масштаб времени процесса диффузии (из диффузионного критерия гомохронности) для температур выше 1000 °С крайне мал (доли секунды):

$$\tau = \frac{h^2}{D},$$

где h – характерный размер системы.

Вероятность начальной графитизации исследована численно при помощи моделирования одномерного диффузионного массопереноса в ячейке роста в зазоре между источником и затравкой в изменяющемся во времени температурном поле. Изменение температуры, во-первых, вызывает изменение коэффициентов диффузии и, во-вторых, приводит к увеличению равновесных концентраций газовых реагентов над порошкообразным источником и затравкой. Температуру в зазоре увеличивали линейно, сохраняя постоянным температурный градиент. Влиянием термодиффузии пренебрегали. Графитизацию определяли по формуле

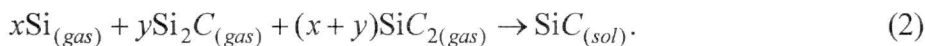
$$\Delta h = \frac{1}{\rho} \sum_i D_i \left(\frac{\Delta C}{\Delta x} \right)_i \Delta \tau_i,$$

где Δh – эффективная глубина графитизации; D_i – бинарный коэффициент диффузии кремния в i -й момент времени; $(\Delta C/\Delta x)_i$ – отрицательный градиент концентрации кремния в газовой фазе вблизи поверхности затравки в i -й момент времени; ρ – молярная плотность карбида кремния.

Расчеты проводили, используя реально наблюдавшиеся значения температурного градиента 2–30 К/см, зазора источник–затравка 1–5 см, давления аргона 5–300 торр. Температуру изменяли от комнатной до ≈ 2000 °С за 2–4 ч. Во всем диапазоне выбранных условий графитизация полностью отсутствовала. Эффект графитизации наблюдался только в конфигурации с обратным температурным градиентом, которая предложена в [4] для намеренного травления затравки перед началом процесса роста слитка. Глубины графитизации достигали 0,1 мм для значений обратного градиента 10 К/см ($T = 2100$ °С, $p = 10$ торр).

Таким образом, начальная графитизация затравки (до начала процесса роста) в обычных условиях затруднена. Это подтверждается также и нашими экспериментальными данными, когда процесс прерывали до начала осаждения и проводили визуальное и рентгеноструктурное исследование ростовой поверхности затравки.

Диффузия основных компонентов в ячейке. Если основные молекулярные формы в газовой фазе – $\text{Si}_{(gas)}$, $\text{Si}_2\text{C}_{(gas)}$, $\text{SiC}_{2(gas)}$, то стехиометрическое уравнение осаждения $\text{SiC}_{(sol)}$ может быть записано в виде



При квазистационарном протекании процесса должно удовлетворяться условие стехиометрии диффузионных потоков:

$$\frac{j_{\text{Si}}}{x} = \frac{j_{\text{Si}_2\text{C}}}{y} = \frac{j_{\text{SiC}_2}}{x+y},$$

где j – соответствующий диффузионный поток, моль/см²·с; x , y – стехиометрические коэффициенты.

При диффузии в неподвижной среде

$$j = \beta \Delta C = \frac{NuD}{d} \Delta C. \quad (3)$$

где β – коэффициент массопереноса; ΔC – разность концентраций; $Nu = \text{const}(D)$ – число Нуссельта; d – линейный размер; D – коэффициент диффузии.

Если имеется градиент температур, в (3) должен быть использован усредненный коэффициент диффузии. Заменяя градиент концентраций градиентом давлений, окончательно для случая диффузии в неподвижной среде для реакции (2) имеем:

$$\frac{D_{Si} \Delta p_{Si}}{x} = \frac{D_{Si_2C} \Delta p_{Si_2C}}{y} = \frac{D_{SiC_2} \Delta p_{SiC_2}}{x+y}, \quad (4)$$

где $\Delta p = p_{(source)} - p_{(seed)}$, $p_{(source)}$ – равновесное давление соответствующего газообразного реагента на источнике, $p_{(seed)}$ – то же для затравки.

При наличии конвекции $Nu \approx D^{-n}$, где $n = 1/3$. Для случая диффузии при наличии конвекции

$$\frac{D_{Si}^{2/3} \Delta p_{Si}}{x} = \frac{D_{Si_2C}^{2/3} \Delta p_{Si_2C}}{y} = \frac{D_{SiC_2}^{2/3} \Delta p_{SiC_2}}{x+y}. \quad (4a)$$

Очевидно, что условия (4) или (4a) могут быть выполнены только случайно. В общем случае некоторые из диффундирующих веществ должны накапливаться на поверхности затравки. Используя коэффициенты диффузии, определенные выше, можно провести анализ условия (4) и установить, какое из веществ будет лимитировать реакцию роста на поверхности затравки, а какие будут накапливаться на этой поверхности. Положение осложняется тем, что реальная кинетика роста карбида кремния неизвестна, как и стехиометрические коэффициенты x и y .

Рассмотрим все возможные варианты. Легко показать, что если x и y одного порядка или $y \gg x$, на поверхности затравки в больших количествах будет накапливаться кремний и в меньшей степени – SiC_2 . При $y \ll x$ на поверхности должен накапливаться Si_2C и в меньшей степени – Si . Таким образом, на поверхности роста слитка карбида кремния неизбежно накапливается газообразный реагент, в избытке содержащий кремний (вероятнее всего – элементарный кремний), который и приводит к интенсивному травлению графитовой арматуры в непосредственной близости от растущего слитка (см. рис.1).

Кинетические особенности. Увеличение потерь материала из ячейки приводит к некоторому возрастанию скорости роста карбида кремния (см. рис.3). Иными словами, в рассматриваемом диапазоне параметров гетерогенная реакция синтеза карбида кремния характеризуется отрицательным эффективным порядком по основным компонентам. Так как кремний имеет наибольший коэффициент диффузии, то это в первую очередь эффективный отрицательный порядок реакции по кремнию. Такой результат необъясним в рамках модели диффузионно-лимитированного роста карбида кремния, но может быть интерпретирован при учете кинетических особенностей в рассматриваемой системе.

Пусть реакция (2) протекает между адсорбированными веществами. В процессах гетерогенного катализа различают два противоположных случая: быстрая адсорбция, когда скорость всего процесса определяется медленной поверхностной реакцией, и когда скорость процесса лимитируется медленной активированной адсорбцией [11]. При быстрой адсорбции, предполагая, что

При диффузии в неподвижной среде

$$j = \beta \Delta C = \frac{\text{Nu} D}{d} \Delta C. \quad (3)$$

где β – коэффициент массопереноса; ΔC – разность концентраций; $\text{Nu} = \text{const}(D)$ – число Нуссельта; d – линейный размер; D – коэффициент диффузии.

Если имеется градиент температур, в (3) должен быть использован усредненный коэффициент диффузии. Заменяя градиент концентраций градиентом давлений, окончательно для случая диффузии в неподвижной среде для реакции (2) имеем:

$$\frac{D_{\text{Si}} \Delta p_{\text{Si}}}{x} = \frac{D_{\text{Si}_2\text{C}} \Delta p_{\text{Si}_2\text{C}}}{y} = \frac{D_{\text{SiC}_2} \Delta p_{\text{SiC}_2}}{x + y}, \quad (4)$$

где $\Delta p = p_{(\text{source})} - p_{(\text{seed})}$, $p_{(\text{source})}$ – равновесное давление соответствующего газообразного реагента на источнике, $p_{(\text{seed})}$ – то же для затравки.

При наличии конвекции $\text{Nu} \approx D^{-n}$, где $n = 1/3$. Для случая диффузии при наличии конвекции

$$\frac{D_{\text{Si}}^{2/3} \Delta p_{\text{Si}}}{x} = \frac{D_{\text{Si}_2\text{C}}^{2/3} \Delta p_{\text{Si}_2\text{C}}}{y} = \frac{D_{\text{SiC}_2}^{2/3} \Delta p_{\text{SiC}_2}}{x + y}. \quad (4a)$$

Очевидно, что условия (4) или (4a) могут быть выполнены только случайно. В общем случае некоторые из диффундирующих веществ должны накапливаться на поверхности затравки. Используя коэффициенты диффузии, определенные выше, можно провести анализ условия (4) и установить, какое из веществ будет лимитировать реакцию роста на поверхности затравки, а какие будут накапливаться на этой поверхности. Положение осложняется тем, что реальная кинетика роста карбида кремния неизвестна, как и стехиометрические коэффициенты x и y .

Рассмотрим все возможные варианты. Легко показать, что если x и y одного порядка или $y \gg x$, на поверхности затравки в больших количествах будет накапливаться кремний и в меньшей степени – SiC_2 . При $y \ll x$ на поверхности должен накапливаться Si_2C и в меньшей степени – Si . Таким образом, на поверхности роста слитка карбида кремния неизбежно накапливается газообразный реагент, в избытке содержащий кремний (вероятнее всего – элементарный кремний), который и приводит к интенсивному травлению графитовой арматуры в непосредственной близости от растущего слитка (см. рис.1).

Кинетические особенности. Увеличение потерь материала из ячейки приводит к некоторому возрастанию скорости роста карбида кремния (см. рис.3). Иными словами, в рассматриваемом диапазоне параметров гетерогенная реакция синтеза карбида кремния характеризуется отрицательным эффективным порядком по основным компонентам. Так как кремний имеет наибольший коэффициент диффузии, то это в первую очередь эффективный отрицательный порядок реакции по кремнию. Такой результат необъясним в рамках модели диффузионно-лимитированного роста карбида кремния, но может быть интерпретирован при учете кинетических особенностей в рассматриваемой системе.

Пусть реакция (2) протекает между адсорбированными веществами. В процессах гетерогенного катализа различают два противоположных случая: быстрая адсорбция, когда скорость всего процесса определяется медленной поверхностной реакцией, и когда скорость процесса лимитируется медленной активированной адсорбцией [11]. При быстрой адсорбции, предполагая, что

$$\frac{C_{\text{Si}}}{b_{\text{Si}}} \gg \frac{C_{\text{SiC}_2}}{b_{\text{SiC}_2}}, \frac{C_{\text{Si}_2\text{C}}}{b_{\text{Si}_2\text{C}}}, \quad (5)$$

где C – концентрация соответствующего реагента; $b = k_d/k_a$, k_d – константа скорости десорбции, k_a – константа скорости адсорбции, для скорости реакции (2) имеем:

$$V = k \frac{b_{\text{Si}}^2}{b_{\text{SiC}_2} b_{\text{Si}_2\text{C}}} \frac{C_{\text{SiC}_2} C_{\text{Si}_2\text{C}}}{(C_{\text{Si}} + b_{\text{Si}})^2}, \text{ если } y \gg x, \quad (6)$$

$$V = k \frac{b_{\text{Si}}}{b_{\text{SiC}_2}} \frac{C_{\text{Si}} C_{\text{SiC}_2}}{(C_{\text{Si}} + b_{\text{Si}})^2}, \text{ если } x \gg y, \quad (6a)$$

где k – константа скорости реакции на поверхности.

Оба предельных случая (6) и (6a) приводят к качественно одинаковому результату – отрицательному эффективному порядку реакции (2) по кремнию.

В случае медленной адсорбции, принимая во внимание условие (5), легко определить скорость процесса, которая будет равна скорости адсорбции:

$$V = \frac{dN}{dt} = k_a C_L \frac{b_{\text{Si}}}{b_{\text{Si}} + C_{\text{Si}}},$$

где N – степень заполнения поверхности; k_a – константа скорости адсорбции лимитирующего реагента; C_L – его концентрация. В этом случае также должен наблюдаться отрицательный эффективный порядок скорости реакции по концентрации кремния.

Таким образом, вне зависимости от лимитирующей стадии процесса есть веские основания предполагать, что на поверхности роста имеется большой избыток по кремнию и, таким образом, механизм графитизации не связан напрямую с недостатком кремния.

Термодинамика взаимодействия газового потока со стенками тигля. Взаимодействие газового потока со стенками тигля в реальном процессе роста слитка продемонстрировано в [3]. На стенке тигля, если не происходит осаждения карбида кремния, имеют место гетерогенные реакции, приводящие к перераспределению долей компонентов в газовой фазе:



Пусть источник паров нагрет до температуры T_1 , а стенка – до температуры T_2 . Тогда, например, для скорости реакции (7) на стенке тигля можно записать:

$$V = V_+ - V_- = (k_+ P_{\text{Si}}(T_1) - k_- P_{\text{SiC}_2}(T_1)) T_2/T_1, \quad (8)$$

где V – скорость реакции (7); V_+ и k_+ – соответственно скорость и константа скорости прямой реакции; V_- и k_- – то же для обратной реакции; $P_{\text{Si}}(T_1)$ и $P_{\text{SiC}_2}(T_1)$ – равновесные давления газообразных Si и SiC₂ при температуре источника, а член T_2/T_1 учитывает изменение давления при изменении температуры газовой смеси.

Для равновесных концентраций при $T = T_2$ имеем

$$V = V_+ - V_- = k_+ P_{\text{Si}}(T_2) - k_- P_{\text{SiC}_2}(T_2) = 0,$$

откуда

$$k_+/k_- = P_{\text{SiC}_2(T_2)}/P_{\text{Si}(T_2)}. \quad (9)$$

Подставляя (9) в (8) и пренебрегая температурной зависимостью k_+/k_- для относительно небольших градиентов температуры в ячейке роста, можно установить знак полной скорости реакции (7). Аналогичные рассуждения могут быть проведены и для реакций (7а) и (7б). Окончательно для $T_2 < T_1$ имеем следующую цепочку смещений химических равновесий:



Для горячей графитовой стенки ($T_2 > T_1$) направление цепочки противоположное.

В соответствии с (10) при контакте с графитовыми стенками газовая фаза (по сравнению с исходной смесью) может обогащаться или обедняться определенными газовыми компонентами. В то же время в наших условиях это превращение невелико, что выражается, в частности, в относительно малом, по сравнению с описанным в [3], износе ячейки, за исключением частей, прилегающих к заправке.

Потери кремния из ячейки. Графитизация источника поликристаллического карбида кремния. Компенсация потерь кремния из ячейки позволяет предотвратить графитизацию растущего слитка [5, 6]. В то же время (см. рис.2) доля кремния, покидающего ростовую ячейку, не превышает 25%. Принимая во внимание резкую зависимость равновесной концентрации кремния от температуры, в используемых условиях этого явно недостаточно для графитизации растущего слитка.

Графитизация, или обуглероживание, источника в процессе роста описана в литературе. Это неизбежный процесс, который определяется термодинамическим соотношением основных летучих кремний- и углеродсодержащих компонентов. Так как до $T = 2500$ К в газовой фазе доминирует кремний, в сработанном источнике будет накапливаться углерод. Обуглероживание источника определяется двумя факторами – потерями кремния из ячейки или взаимодействием его с внутренними графитовыми поверхностями. Однако, если в источнике еще достаточно карбида кремния (например, износ источника $< 50\%$), наличие избыточного углерода в источнике, по нашим данным, не изменяет ни свойств источника, ни скорости осаждения, ни свойств выращиваемого слитка. Относительно небольшое количество кремния, уходящего из ячейки (см. рис.2), свидетельствует о бесполезности использования дополнительного источника кремния в ячейке или применения танталового тигля для «удержания» уходящего кремния.

Таким образом, рассмотрены и проанализированы возможные причины, которые могут приводить как к взаимодействию графитового тигля с компонентами газовой фазы, так и включениям графита в растущий слиток при выращивании карбида кремния модифицированным методом Лэли. Показано, что проблема графитизации не может быть вызвана недостатком кремния. Более того, именно избыток кремния приводит к двум главным особенностям роста: рост происходит через слой, сильно обогащенный кремнием; взаимодействие избыточного кремния приводит к интенсивной коррозии графитовой арматуры. В связи с этим применение танталовых тиглей или введение дополнительного источника кремния в ячейку не решает проблемы. Основным источником графита в растущем слитке, вероятно, является инжекция частиц со стенок тигля или из источника по механизму термофореза, а также силой увлечения адвективным потоком [12]. В пользу такой гипотезы говорит то, что включения графита обычно наблюдаются при высоких температурных градиентах (высокая составляющая термофореза), при сильном износе источника (большое количество слабосвязанного углерода) или при нестабильных условиях в системе (откачка перед началом роста слитка).

Литература

1. **Li H., Chen X.L., Ni D.Q., Wu X.** An analysis of seed graphitization for sublimation growth of SiC bulk crystal // *Diamond and Related Materials*. – 2004. – Vol. 13, Issue 1. – P. 151–156.
2. **Liu J., Gao J., Cheng J., Yang J., Qiao G.** Effects of graphitization degree of crucible on SiC single crystal growth process // *Diamond and Related Materials*. – 2006. – Vol. 15, Issue 1. – P. 117–120.
3. Investigation of mass transport during PVT growth of SiC by ^{13}C labeling of source material / **Z.H.Herro, P.J.Wellmann, R.Pusche et al.** // *J. Crystal Growth*. – 2003. – Vol. 258, Issues 3–4. – P. 261–267.
4. Growth of silicon carbide ingots by the modified Lely method with «in situ» sublimation etching / **M.M.Anikin, R.Madar, A.Rouault et al.** // *Inst. Phys. Conf. Ser.* – N 142. – P. 33–36.
5. Analysis on defect generation during the SiC bulk growth process / **D.Hofmann, E.Schmitt, M.Bickermann et al.** // *Mater. Sci. Eng.B.* – 1999. – Vol. 61–62. – P. 48–53.
6. **Karpov S.Yu., Makarov Yu.N., Ramm M.S.** Simulation of Sublimation Growth of SiC Single Crystals // *Phys. Stat. Sol. B.* – 1997. – Vol. 202, Issue 1. – P.201–220.
7. Use of Ta-Container for Sublimation Growth and Doping of SiC Bulk Crystals and Epitaxial Layers / **Yu.A.Vodakov, A.D.Roenkov, M.G.Ramm et al.** // *Phys. Stat. Solidi B.* – 1997. – Vol. 202, Issue 1. – P. 177–200.
8. **Tupitsyn E.Y., Arulchakkaravarthi A., Drachev R.V., Sudarshan T.S** Controllable 6H-SiC to 4H-SiC polytype transformation during PVT growth // *J. Crystal Growth*. – 2007. – Vol. 299, Issue 1. – P. 70–76.
9. **Варгафтик Н.Б.** Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей. – М.: Наука, 1972. – 720 с.
10. **Ma R.-H., Zhang H., Ha S., Skowronski M.** Integrated process modeling and experimental validation of silicon carbide sublimation growth // *J. Crystal Growth*. – 2003. – Vol. 252, Issue 4. – 523–537.
11. **Франк-Каменецкий Д.А.** Диффузия и теплопередача в химической кинетике. – М.: Наука, 1987. – 494 с.
12. Defect formation in silicon carbide large scale ingots grown by sublimation technique / **D.D.Avrov, A.V.Bulatov, S.I.Dorozhkin et al.** // *J. Crystal Growth*. – 2005. – Vol. 275, Issues 1–2. – P. e485–e489.

Статья поступила

1 февраля 2008 г.

Авров Дмитрий Дмитриевич – кандидат технических наук, старший научный сотрудник кафедры микроэлектроники СПбГЭТУ-ЛЭТИ. *Область научных интересов:* фазовые равновесия, физика и технология роста широкозонных полупроводников.

Дорожкин Сергей Иванович – кандидат технических наук, старший научный сотрудник кафедры микроэлектроники СПбГЭТУ-ЛЭТИ. *Область научных интересов:* твердотельная электроника, физика и технология широкозонных полупроводников.

Таиров Юрий Михайлович – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой микроэлектроники СПбГЭТУ-ЛЭТИ. *Область научных интересов:* физика и технология материалов электронной техники.

Фадеев Алексей Юрьевич – студент СПбГЭТУ-ЛЭТИ. *Область научных интересов:* физика и технология роста объемных монокристаллов карбида кремния.

Лебедев Андрей Олегович – кандидат технических наук, старший научный сотрудник ФТИ РАН (г. Санкт-Петербург). *Область научных интересов:* рентгеновские методы исследования, физика и технология роста объемных монокристаллов карбида кремния.

Комплексная магнитная проницаемость ферритовых материалов СВЧ-диапазона

А.А.Димитрюк, В.В.Одоев

Саратовский государственный технический университет

Предложены уточненные формулы, позволяющие провести расчет комплексных компонент тензора магнитной проницаемости поли- и монокристаллических СВЧ-ферритов при различной степени намагниченности. Формулы учитывают внутреннее поле анизотропии, поэтому могут применяться для расчета параметров ферритов с гексагональной структурой.

В технике сверхвысоких частот для обеспечения различных функций обработки сигналов широко применяются устройства, использующие гиромангнитные свойства ферритовых материалов. По своим механическим и теплофизическим свойствам ферриты аналогичны керамике, т.е. представляют собой достаточно прочный кристаллический материал, хорошо поддающийся механической обработке и пригодный для изготовления подложек для интегральных схем СВЧ. Диэлектрическая проницаемость ферритов является скалярной величиной, ее относительное значение лежит в пределах 5–16.

Магнитная проницаемость СВЧ-ферритов является функцией нескольких переменных, в число которых входят рабочая частота f , намагниченность \vec{M} , величина постоянного подмагничивающего поля \vec{H}_0 , ширина кривой резонансного поглощения ΔH , величина внутреннего поля анизотропии \vec{H}_a .

В интегрированных СВЧ-устройствах, выполненных на единой ферритовой подложке и реализующих несколько функций обработки СВЧ-сигнала, содержатся области, где феррит намагничен до насыщения (развязывающий или фазосдвигающий узел), полностью размагничен, находится в состоянии остаточной намагниченности или частично намагничен. В каждой из таких областей гиромангнитные свойства СВЧ-феррита будут проявляться по-разному.

При отсутствии внешнего постоянного магнитного поля (в размагниченном состоянии) феррит имеет доменную структуру, т.е. состоит из областей размерами порядка 10^{-6} м. В пределах одного домена магнитные моменты электронов ориентированы в одном направлении, а отношение суммарного магнитного момента всех спинов к объему домена называется намагниченностью домена [1].

В целом по образцу результирующая намагниченность M при $H_0 = 0$ тоже равна 0 и феррит характеризуется скалярной относительной магнитной проницаемостью μ_r : $\mu = \mu_0 \mu_r$, где $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ – магнитная постоянная, Г/м.

В общем случае напряженность магнитного поля \vec{H} , намагниченность \vec{M} и индукция поля \vec{B} связаны соотношением [1, 2]:

$$\vec{B} = \mu_0 \left(\vec{H} + \vec{M} \right) = \mu_0 (1 + \chi) \vec{H},$$

где χ – относительная восприимчивость, определяющая крутизну кривой намагничивания феррита.

На низких частотах при отсутствии подмагничивающего поля χ скалярная комплексная величина $\chi = \chi' - j\chi''$, действительная часть которой определяет фазовые характеристики волны, распространяющейся в феррите, а χ'' – величину потерь. Обобщенная частотная зависимость χ для размагниченного феррита приведена на рис.1 [1, 2]. Видно, что при отсутствии внешнего подмагничивающего поля компонента χ'' имеет две резонансные области на частоте $f_{\text{рез}}$ (резонансные колебания границ доменов [2]) и на частоте f_e , называемой также частотой естественного ферромагнитного резонанса (ЕФМР). Этот резонанс относят за счет так называемого «внутреннего поля анизотропии» \vec{H}_a , величина которого зависит от различных факторов (кристаллографических, химических, технологических). Ориентация \vec{H}_a , как правило, произвольна, учесть ее при расчетах поликристаллических ферритов не удастся, поэтому ферритовые СВЧ-устройства работают на частотах выше f_e при подмагничивающем поле $H_0 \gg H_a$, когда потери малы. На частотах 10–100 МГц ненамагниченный СВЧ-феррит может использоваться как хороший поглотитель электромагнитных волн ($\chi'' \gg 1$).

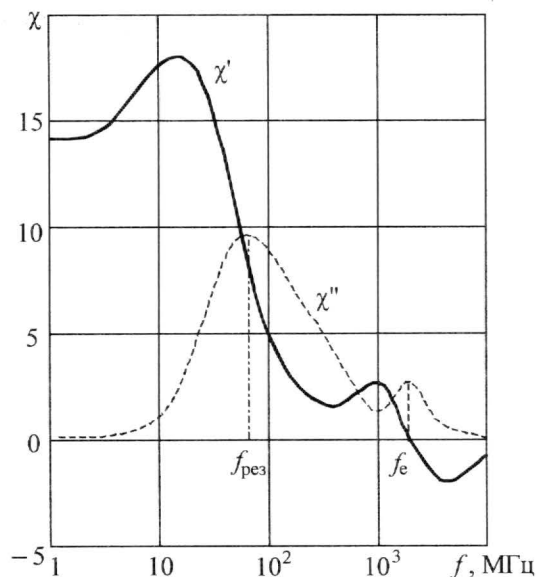


Рис.1. Обобщенная частотная зависимость магнитной восприимчивости феррита

Если значения H_a известны, то можно оценить минимальную рабочую частоту для данного типа феррита $f_{\text{мин}} = \gamma(H_a + \Delta H)$, где $\gamma = 35,18$ МГц/(кА/м) – гиромагнитное отношение. Обычно H_a по величине не превышает $0,1M_0$, но в некоторых ферритах составляет от 3 до $10M_0$.

В работе А.Л.Микаэляна [1] на основании анализа результатов экспериментальных исследований показано, что на частотах выше f_e магнитная проницаемость размагниченного феррита должна изменяться в пределах 0,4–1, приближаясь к 1 по мере роста частоты и удаления от области ЕФМР. Позднее Е.Шлёманн [3] предложил формулу, количественно описывающую такую зависимость:

$$\mu'_p = \frac{1}{3} + \frac{2}{3} \left\{ \left[\left(\frac{f}{\gamma} \right)^2 - (H_a - M_0)^2 \right] \left(\frac{f}{\gamma} \right)^{-2} \right\}^{0,5} = \frac{1}{3} \left(1 + 2 \sqrt{\frac{1 - (p_0 - q)^2}{1 - q^2}} \right), \quad (1)$$

где $p_0 = \gamma M_0 / f$; $q = \gamma H_a / f$.

Формулу (1) имеет смысл использовать, когда направления векторов \vec{H}_a и \vec{M}_0 известны, например в монокристаллах или в специальных ферритах (гексагонатах бария) с очень большим значением H_a , ориентацию которого можно задать в процессе изготовления. В случае же обычного поликристаллического феррита формула (1) приобретает следующий вид:

$$\mu'_p = \frac{1}{3} \left\{ 1 + 2 \left[1 - \left(\frac{\gamma^2 M_0^2}{f^2} \right) \right]^{\frac{1}{2}} \right\} = \frac{1}{3} (1 + 2\sqrt{1 - p_0^2}). \quad (2)$$

Сравнение результатов расчетов по формуле (2) с данными экспериментов показывает достаточно хорошее совпадение при средних значениях p_0 , однако при крайних значениях ($p_0 \approx 0$; $p_0 \approx 1$) совпадение хуже. Анализ экспериментальных данных, полученных как автором настоящей статьи, так и другими исследователями [1, 4], позволил предложить другую формулу для расчета:

$$\mu'_p = 0,15\pi \left(1 + \sqrt{\frac{1 - (p_0 - q)^2}{1 - q^2}} \right), \quad (3)$$

$$\mu''_p = p_0 \frac{\gamma \Delta H}{2f}.$$

Результаты расчетов по формуле (3) и полученные экспериментальные зависимости приведены на рис.2. Видно, что поле анизотропии \vec{H}_a , параллельное и антипараллельное

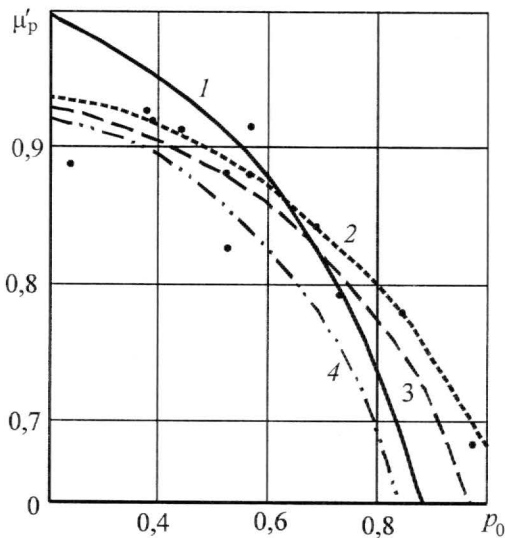


Рис.2. Зависимость магнитной проницаемости размагниченного феррита μ_p от частоты и намагниченности насыщения: 1 – расчет по формуле (2); 2–4 – по формуле (3) при разных значениях поля анизотропии H_a ($2 - H_a = -0,1M_0$; $3 - H_a = 0$; $4 - H_a = +0,1M_0$); точки – эксперимент

вектору \vec{M}_0 , приводит к изменению крутизны кривой и сдвигу ее вдоль оси абсцисс. Наличием неучтенного поля анизотропии в разных образцах можно объяснить и разброс экспериментальных данных.

Если поместить феррит в подмагничивающее поле напряженностью \vec{H}_0 , магнитная восприимчивость χ и магнитная проницаемость μ становятся тензорными величинами, причем вид компонент тензора $\vec{\mu}$ зависит от ориентации постоянного поля \vec{H}_0 относительно осей выбранной системы координат (здесь \vec{H}_0 – внутреннее поле в феррите с учетом размагничивающих факторов формы образца.) Чаще всего используются декартова и цилиндрическая системы координат, имеющие ось Z , поэтому обычно в литературе вид тензора $\vec{\mu}$ приводится для случая, когда вектор \vec{H}_0 направлен вдоль оси Z .

Физическая модель взаимодействия феррита с переменным электромагнитным СВЧ-полем предложена в работах Л.Д.Ландау и Е.М.Лифшица (1935 г.), затем развита К.Киттелем (1946 г.) и обобщена Полдером (1949 г.). В настоящее время чаще всего используется именно тензор Полдера, в котором учет потерь в феррите проводится по методике, основанной на решении уравнения магнитодинамики с релаксационным членом в форме, предложенной Ландау и Лифшицем.

Если вектор \vec{H}_0 направлен вдоль оси Z декартовой системы координат, то вектор намагниченности \vec{M}_0 прецессирует вокруг оси Z , образуя конус с углом у вершины 2Θ . В пределе, когда феррит полностью насыщен, т.е. внешнее поле велико, $\Theta \rightarrow 0$ и $M_Z = M_0$.

Для полностью насыщенного феррита решение уравнения движения для прецессии вектора намагниченности феррита $\vec{M} = \vec{M}_0 + \vec{m} \exp(j\omega t)$ относительно вектора магнитного поля $\vec{H} = \vec{H}_0 + \vec{h} \exp(j\omega t)$ (высокочастотное поле \vec{h} наложено на постоянное поле \vec{H}_0 перпендикулярно к нему, т.е. $h_z \ll H_0$) позволяет получить выражения для высокочастотной намагниченности \vec{m} , в котором отброшены слагаемые второго порядка малости ($\vec{m} \times \vec{h}$):

$$\vec{m} = \frac{1}{\omega_0^2 - \omega^2} [j\omega\gamma(\vec{M}_0 \times \vec{h}) + \gamma^2(\vec{H}_0 \cdot \vec{M}_0)\vec{h} - \gamma^2(\vec{H}_0 \cdot \vec{h})\vec{M}_0]. \quad (4)$$

Проведя операции векторного анализа, получим, что вектор \vec{m} связан с вектором \vec{h} соотношением $\vec{m} = \hat{\chi} \cdot \vec{h} = \mu_0^{-1} \tilde{\chi} \cdot \vec{h}$, где $\tilde{\chi}$ – тензор относительной магнитной восприимчивости, имеющий при $\vec{H}_0 = \vec{z}_0 \cdot \vec{H}_0$ вид

$$\tilde{\chi} = \begin{vmatrix} \chi_{xx} & -j\chi_{xy} & 0 \\ j\chi_{yx} & \chi_{yy} & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{vmatrix}.$$

С параметрами феррита эти компоненты связаны следующим образом:

$$\chi_{xx} = \frac{(\omega_0 + j\omega_p)\omega_M}{(\omega_0 + j\omega_p)^2 - \omega^2}, \quad \chi_{xy} = -\frac{j\omega\omega_M}{(\omega_0 + j\omega_p)^2 - \omega^2}, \quad (5)$$

где $\omega = 2\pi f$, $\omega_0 = 2\pi\gamma H_0$, $\omega_M = 2\pi\gamma M$, $\omega_p = \pi\gamma\Delta H$.

Магнитная проницаемость феррита μ будет тоже иметь вид тензора

$$\hat{\mu} = \mu_0 \tilde{\mu} = \mu_0 (\mu_p + \tilde{\chi}) = \mu_0 \begin{vmatrix} \mu & -j\mu_a & 0 \\ j\mu_a & \mu & 0 \\ 0 & 0 & \mu_z \end{vmatrix}. \quad (6)$$

Формула (6) отличается от общепринятой значением диагональной компоненты тензора $\tilde{\mu}$: $\mu = \mu_p + \chi_{xx}$, в то время как Полдер предложил запись вида $\mu = 1 + \chi_{xx}$. Предлагаемая поправка практически не сказывается при расчетах параметров феррита вблизи резонанса, но, по мнению авторов, лучше соответствует результатам измерений

характеристик ферритовых устройств, работающих на частотах выше f_{\min} , но ниже частот продольного и поперечного резонансов. На частотах выше резонансных предлагаемая формула (6) в пределе возвращается к классическому виду.

Для удобства расчетов и анализа результатов вводятся безразмерные относительные величины:

$$\sigma = \frac{\omega_0}{\omega}, \quad p_0 = \frac{\omega_M}{\omega}, \quad d = \frac{\omega_p}{\omega}, \quad q = \frac{2\pi\gamma H_a}{\omega}. \quad (7)$$

Параметр q учитывает внутреннее поле анизотропии в феррите. В этих обозначениях, учитывая комплексность магнитной проницаемости ($\mu = \mu' - j\mu''$, $\mu_a = \mu'_a - j\mu''_a$), получим [5, 6] из формул (5–7):

$$\begin{aligned} \mu' &= \mu_p + Dp\sigma(\sigma^2 - 1 - d^2); \quad \mu'' = Dpd(\sigma^2 + 1 + d^2); \\ \mu'_a &= -Dp(\sigma^2 - 1 - d^2); \quad \mu''_a = -2Dp\sigma d, \end{aligned} \quad (8)$$

$$D = \left[(\sigma^2 - 1 - d^2)^2 + 4\sigma^2 d^2 \right]^{-1}; \quad \sigma = \sigma_0 + q; \quad p = p_0 R.$$

Чаще всего компонента μ_z , определяющая фазовую скорость «обыкновенной» волны в поперечно намагниченной среде в направлении подмагничивания, принимается равной 1 и не зависит от гиротропных свойств среды. На самом деле μ_z несколько меньше 1 на величину второго порядка малости, пропорциональную векторному произведению $(\vec{m} \times \vec{h})$ и отброшенную при решении уравнения движения. При малых полях подмагничивания или в размагниченном состоянии амплитуда переменного поля \vec{h} при средних уровнях передаваемой мощности может быть оценена в единицы кА/м, что сравнимо с полями анизотропии, и ввиду большой крутизны кривой намагничивания для большинства СВЧ-ферритов-гранатов, может обеспечить хотя бы частичную намагниченность феррита.

Поэтому не будет большой ошибкой принять $\mu_z \approx \mu_p$, тем более, что анализ экспериментальных данных позволяет считать, что для большинства ферритов μ_p находится в пределах 0,8–0,9 при $f \rightarrow \infty$.

При выводе соотношений (8) полагалось, что векторы внутреннего поля анизотропии и внешнего подмагничивающего поля коллинеарны. В противном случае для определения резонансных частот и расчета компонент тензора следует использовать подход, описанный в работе [7].

Параметр R в формуле (8) можно назвать коэффициентом насыщенности феррита, он изменяется от 0 до 1 в процессе приложения внешнего подмагничивающего поля H_0 . При увеличении H_0 намагниченность M растет и при некотором H_s достигает максимального значения $M_s = M_0$, т.е. феррит намагничен до насыщения. Обычно кривая намагничивания для СВЧ-ферритов очень крутая [8, 9] и феррит насыщается уже при довольно слабых полях.

Для оценки величины $R = M/M_s$ в функции величины подмагничивающего поля лучше всего использовать экспериментальную кривую B/B_s , измеренную при различных полях. Аналитически провести расчет R нельзя, так как намагниченность зависит не только от H_0 , но и от предыдущего состояния феррита (наличие петли гистерезиса).

Однако кривую намагниченности, усредненную для многих образцов данного материала, можно аппроксимировать достаточно простыми зависимостями вида $Y = 1 - \exp[-(ax)^2]$, $Y = 1 - (bx + 1)^{-n}$, $Y = \text{th}(cx)$, где значения коэффициентов a , b , n , k зависят от марки феррита. Так, например, для иттриевых феррогранатов расчет компонент тензора $\vec{\mu}$ на участке намагничивания феррита в СВЧ-диапазоне с высокой степенью точности может быть проведен по формулам (3) и (8), если использовать представление R в виде:

$$R = \text{th}(cH_0), \quad \text{где} \quad c = \frac{2,5}{H_s}. \quad (9)$$

Значение поля насыщения H_s можно определить из кривой намагничивания, но для ориентировочных расчетов можно полагать $H_s \approx 0,2-0,5M_0$.

Результаты расчета μ' для двух марок феррита (феррит № 5 и феррит № 2 из [1]) по формулам Полдера и по формулам (3), (8), (9) приведены на рис.3. Там же приведены и экспериментальные результаты из [1]. Видно, что предлагаемые формулы при малых подмагничивающих полях лучше описывают действительный ход зависимости μ' от H_0 .

Результаты расчета μ_a , не приведенные здесь, тоже хорошо согласуются с результатами измерений.

Если феррит находится в состоянии остаточной намагниченности, то значение R можно задать отношением $R = B_r/B_s$. По сути, предысторию феррита, использованного в СВЧ-устройстве, установить трудно, поэтому с высокой степенью вероятности можно считать, что так называемый «размагниченный феррит» находится в состоянии остаточной намагниченности и нужно учитывать это обстоятельство при расчете электродинамических и радиотехнических характеристик устройства.

Таким образом, приведенные формулы и рекомендации по выбору области их применения позволяют повысить точность определения величины магнитной проницаемости СВЧ-феррита, находящегося в размагниченном (ферритовая подложка интегрального СВЧ-устройства), частично намагниченном (отдельные участки этой подложки) и намагниченном до насыщения (собственно ферритовое устройство) состоянии. Значение поля анизотропии, задаваемое с помощью параметра q , следует принимать не равным 0 лишь в том случае, когда ориентация \vec{H}_a известна (например, в монокристалле), так как обычно вектор \vec{H}_a может быть ориентирован относительно \vec{H}_0 и \vec{M} произвольным образом. Особую роль \vec{H}_a играет в специальных ферритах с гексагональной структурой на основе окислов бария, где H_a по величине в 3–10 раз может превосходить M_0 . Это позволяет использовать такие ферриты в миллиметровом диапазоне или вообще без внешнего подмагничивающего поля H_0 , роль которого и будет играть H_a ,

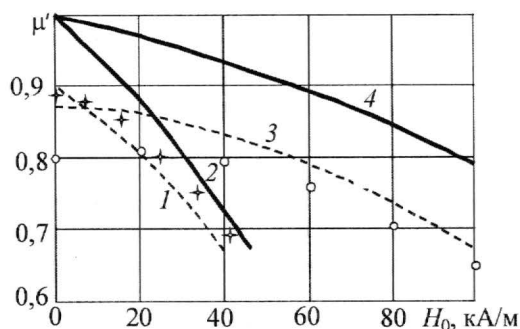


Рис.3. Зависимость μ' от величины подмагничивающего поля H_0 для двух марок феррита: кривые 2, 4 — расчет по формуле Полдера; кривые 1, 3 — по формулам (3), (8), (9); о, + (кривые 3, 4 и 1, 2 соответственно) — эксперимент [1]

или использовать ориентированное надлежащим образом внешнее поле для коррекции и настройки рабочих характеристик ферритового СВЧ-устройства.

Приведенные соотношения апробированы в процессе разработки ряда внедренных в производство многофункциональных ферритовых устройств для радиотехнических систем СВЧ-диапазона. Кроме того, планируется их использование для оценки свойств новых композитных материалов с гиротропными свойствами, получаемых методами нанотехнологии.

Настоящая работа подготовлена при финансовой поддержке программы «Развитие научного потенциала высшей школы» (2006–2008 гг.) РНП 2.1.1.8014.

Литература

1. **Микаэлян А.Л.** Теория и применения ферритов на сверхвысоких частотах. – М. – Л.: Госэнергоиздат, 1963. – 664 с.
2. **Лакс Б., Баттон К.** Сверхвысокочастотные ферриты и ферромагнетики. – М.: Мир, 1965. – 676 с.
3. **Schloemann E.** Microwave behavior of partly magnetized ferrites // J.Appl. Phys. – 1970. – Vol. 41. – P. 204–214.
4. **Димитрюк А.А., Краснов Е.С., Бакаленко И.Ю.** Исследование микрополосковых линий на ферритовых подложках // Изв. вузов. Радиоэлектроника. – 1984. – № 11. – С. 28–31.
5. **Димитрюк А.А., Одоев В.В.** Магнитная проницаемость размагниченных ферритов // Функциональные электродинамические системы и устройства низких и сверхвысоких частот: Межвуз. науч. сб. – Саратов: СГТУ, 2001. – С. 71–74.
6. **Димитрюк А.А., Иванов Р.Г., Осипов А.В.** Магнитная проницаемость ненасыщенных ферритов в устройствах СВЧ // Материалы междунар. науч.-техн. конф. «Проблемы управления и связи». – Саратов: СГТУ, 2000. – С. 110–112.
7. **Гуревич А.Г.** Магнитный резонанс в ферритах и антиферромагнетиках. – М.: Наука, 1973. – 592 с.
8. **Абрамов В.П., Дмитриев В.А., Шелухин С.А.** Невзаимные устройства на ферритовых резонаторах. – М.: Радио и связь, 1989. – 200 с.
9. Ферриты и магнитодиэлектрики: Справочник *под ред. Н.Д.Горбунова и Г.А.Матвеева*. – М.: Сов. Радио, 1968. – 130 с.

Статья поступила
после доработки
2 ноября 2007 г.

Димитрюк Александр Александрович – доктор технических наук, профессор, заместитель заведующего кафедрой радиотехники СГТУ. *Область научных интересов:* электродинамика гиротропных сред, многофункциональные миниатюрные ферритовые СВЧ-устройства, узлы приемно-передающих модулей для ФАР и АФАР.

Одоев Вячеслав Валериевич – аспирант кафедры радиотехники СГТУ. *Область научных интересов:* СВЧ-устройства обработки материалов и продуктов, ферритовые СВЧ-устройства.

Электрофизические свойства анодных пленок хлорсодержащего Cu_2O на стеклотекстолите

Л.А.Светличная, Л.П.Милешко, А.Н.Королев

Технологический институт Южного федерального университета в г. Таганроге

Определена ширина запрещенной зоны анодного Cu_2O , содержащего 5 ат.% хлора, равная 1,8 эВ. Показано, что в температурном диапазоне 20–75 °С сопротивление резисторов на основе анодных пленок хлорсодержащего Cu_2O снижается почти на 5 порядков, а при увеличении освещенности от 0 до 450 лк экспоненциально уменьшается в 2 раза. Выявлено образование в приконтактных областях $\text{Cu}-\text{Cu}_2\text{O} + 5 \text{ ат.}\% \text{ Cl}-\text{Cu}$ -структур двух встречновключенных $p-n$ -переходов (инверсионных слоев), что обнаруживается на ВАХ при варьировании температуры и освещенности.

Свойства полупроводника Cu_2O исследовались с 20-х гг. прошлого столетия. В.П.Жузе и Б.В.Курчатов впервые экспериментально показали существование примесной и собственной областей проводимости в Cu_2O , полученном термическим окислением [1]. Позже на основе разработанной теории были созданы и получили широкое применение меднозакисные выпрямители, изучались их фотоэлектрические свойства. В дальнейшем интерес к Cu_2O несколько уменьшился из-за появления новых полупроводниковых соединений. Тем не менее, постоянно появляются новые сообщения о его свойствах и выявляются новые возможности применения в электронике.

Несмотря на большое число известных методов получения Cu_2O , продолжается поиск и разработка новых способов его синтеза. Одним из перспективных процессов является анодное окисление медной фольги на стеклотекстолите. Этот метод открывает возможность разработки многофункциональных электронных устройств нового поколения и объединяет конструкторско-технологические достоинства микроэлектронных изделий и печатных плат.

В [2] показано, что в состав Cu_2O входит хлор с концентрацией 5 ат.%, и дана термодинамическая интерпретация его наличия в составе анодных оксидных пленок Cu (I) (АОПМ). Однако информация об их электрофизических свойствах до сих пор отсутствует. Цель настоящей работы – изучение влияния температуры и освещенности на проводимость хлорсодержащего анодного Cu_2O .

В качестве исходных образцов использовались пластины размером 3,5×1,5 см фольгированного медью стеклотекстолита марки СТФ 2-5-2,5. Анодное окисление меди проводилось в гальваностатическом режиме в электролите состава CuSO_4 (0,01 М), NaCl (0,005 М) и LiCl (0,005 М) [3] при температуре $T = 86^\circ\text{C}$. Удельная электропроводность $\lambda = 6 \text{ мОм}^{-1} \cdot \text{см}^{-1}$ и $\text{pH} = 4,8$ контролировались с помощью универсального иономера ЭВ-74. Объем анодирующего раствора составил 400 мл, расстояние между анодом и катодом равнялось 2,5 см, площадь анодируемой поверхности – 7,5 см². После анодирования образцы промывались дистиллированной водой и сушились на воздухе при комнатной температуре.

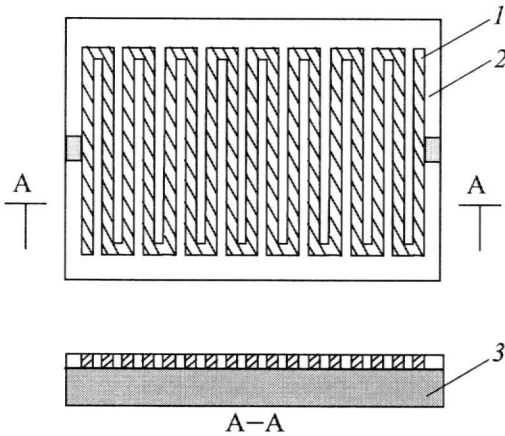


Рис. 1. Топологическая схема резистора: 1 – пленка Cu_2O ; 2 – контакты Cu ; 3 – подложка СТФ 2-5-2,5 (ширина пленки 290 мкм; ширина контактов 310 мкм)

Отметим наличие трех участков, соответствующих областям собственной, примесной и области истощения примеси [4]. Ширина запрещенной зоны в диапазоне температур 65–80 °С, рассчитанная по выражению [1]

$$\Delta \varepsilon_0 = \frac{2k}{0,43} \left| \Delta \lg \sigma / \Delta \left(\frac{1}{T} \right) \right| = \frac{2k}{0,43} \left| \lg \frac{\sigma(T_1)}{\sigma(T_2)} / \frac{T_1 - T_2}{T_1 T_2} \right|,$$

составляет 1,8 эВ. Это согласуется с литературными данными для полученного методом термического окисления Cu_2O [3, 4].

Кроме того, определено влияние освещенности светом видимого диапазона на сопротивление резисторов на основе АОП Cu_2O , сформированных при различных плотностях тока и температуре электролита 86 °С.

Как видно из рис. 2, б экспериментальные зависимости $R(E_v)$ спрямляются в полулогарифмических координатах. Это, по-видимому, обусловлено экспоненциальным возрастанием удельной электропроводности Cu_2O с увеличением освещенности. Независимо от плотности тока анодирования характер изменения сопротивления для всех образцов, примерно одинаков и падение сопротивления уменьшается приблизительно в 2 раза.

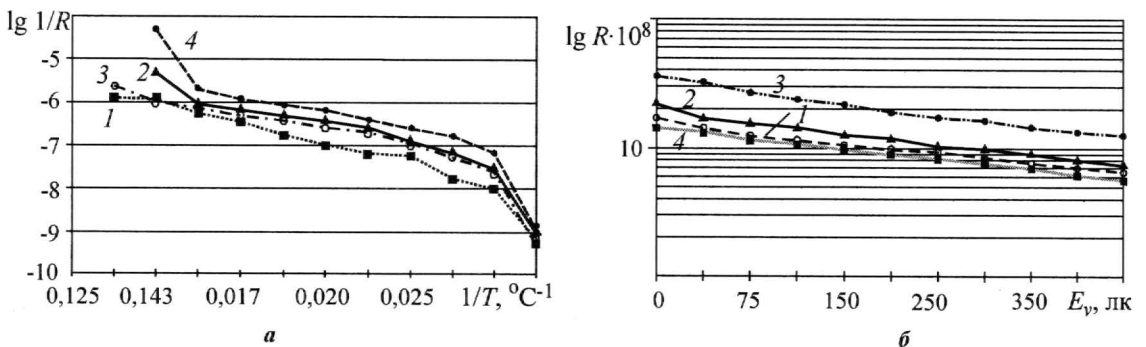


Рис. 2. Зависимость проводимости резисторов на основе анодных пленок Cu_2O от температуры (а) и освещенности (б) при плотностях тока $j = 2; 3; 4,5; 6$ мА/см² кривые 1–4 соответственно

На ВАХ резисторов (рис.3) четко проявляются высокоомные участки от $-8,8$ до $4,5$ В с током утечки менее $0,5$ мкА. Это, вероятно, обусловлено как образованием инверсионного слоя на границе $\text{Cu}_2\text{O}-\text{Cu}$, так и наличием $p-n$ -перехода, природа которого – в избытке атомов меди (сверхстехиометрии) в слое Cu_2O , непосредственно прилегающем к медным контактам и имеющем проводимость n -типа (в объеме пленка имеет p -тип проводимости за счет избытка кислорода).

С ростом температуры наклон кривых возрастает (рис.3,а). Аналогичное поведение кривых наблюдается и с повышением освещенности (рис.3,б). Особенностью является линейность прямой и обратной ветвей ВАХ, которая может быть вызвана большим вкладом сопротивления объемной части Cu_2O .

Присутствие встречновключенных $p-n$ -переходов (инверсионных слоев) в контактных областях вызывает, очевидно, симметричность ВАХ резисторов (рис.4).

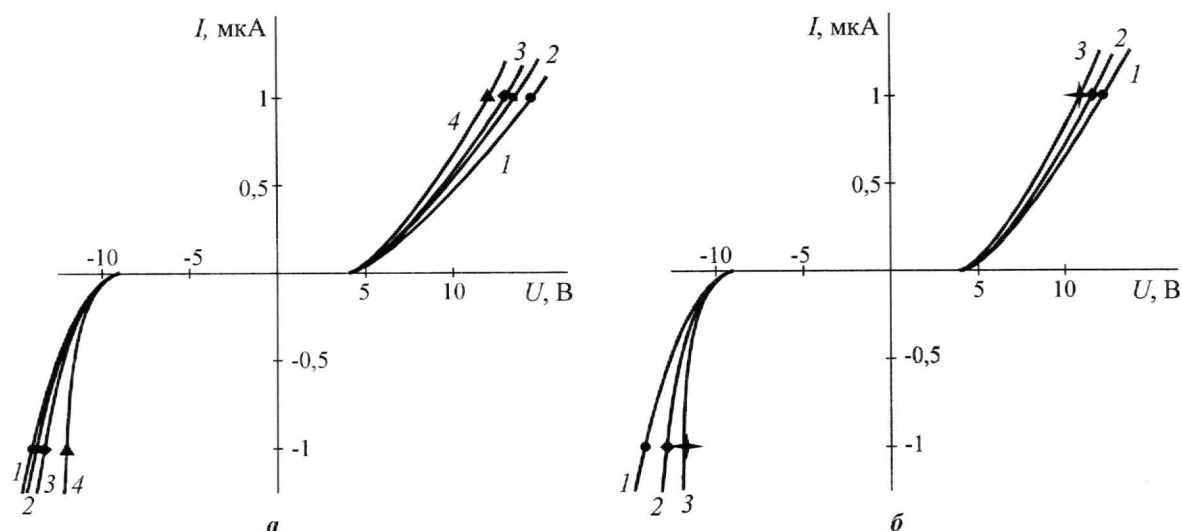


Рис.3. ВАХ $p-n$ -перехода (инверсионного слоя) на основе АОПМ: а – $E_v = 200$ лк ($T = 20; 40; 60; 70$ °С – кривые 1–4 соответственно); б – $T = 20$ °С ($E_v = 0; 200; 400$ лк кривые 1–3 соответственно)

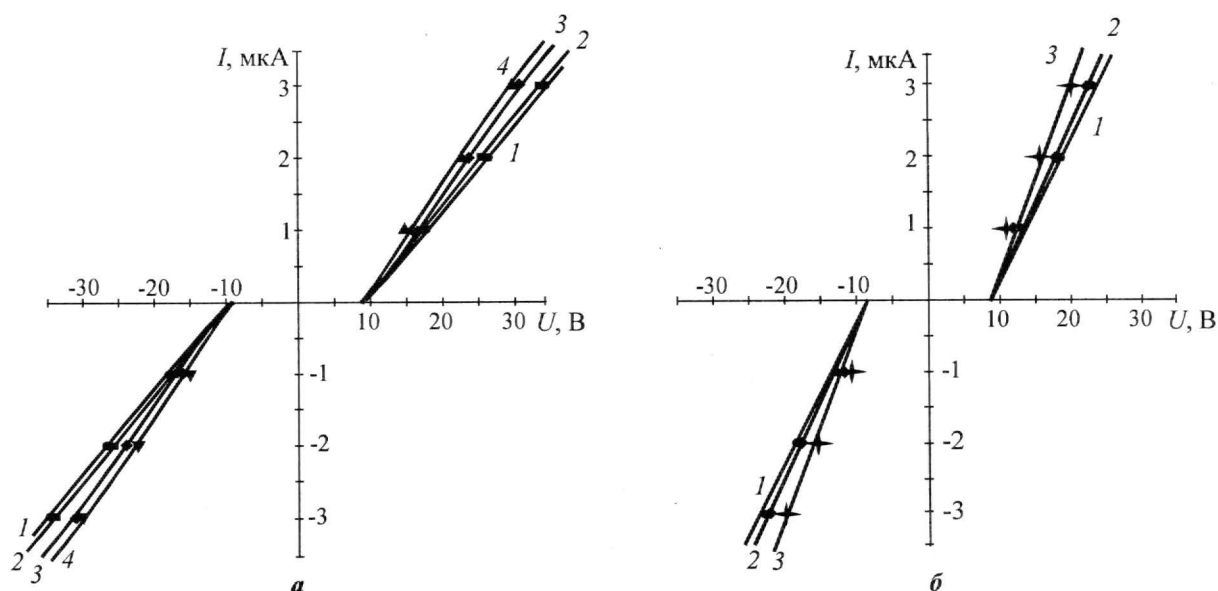


Рис.4. ВАХ резисторов на основе АОПМ: а – $E_v = 200$ лк ($T = 20; 40; 60; 70$ °С кривые 1–4 соответственно); б – $T = 20$ °С ($E_v = 0; 200; 400$ лк кривые 1–3 соответственно)

Созданные на стеклотекстолите структуры $\text{Cu-Cu}_2\text{O-Cu}$ могут быть рекомендованы для использования в качестве термо- и фоторезисторов в электронных устройствах специального назначения, поскольку в температурном диапазоне 20–75 °С сопротивление резисторов на основе Cu_2O падает примерно на 5 порядков, а в интервале освещенности от 0 до 450 лк – экспоненциально уменьшается в 2 раза. Ширина запрещенной зоны анодного хлорсодержащего Cu_2O составляет 1,8 эВ.

Обнаружено наличие двух встречновключенных $p-n$ -переходов (инверсионных слоев) в приконтактных областях $\text{Cu-Cu}_2\text{O-Cu}$ -структур, которые проявляются на ВАХ соответствующими изменениями наклонов кривых при варьировании температуры и освещенности.

Литература

1. **Иоффе А.Ф.** Физика полупроводников. – М. – Л.: Изд-во АН СССР. – 1957. – 491 с.
2. **Светличная Л.А., Милешко Л.П., Королев А.Н., Капитанчук Л.М.** Состав анодных пленок Cu_2O и термодинамическая модель их роста в сульфатно-хлоридном электролите // Сб. статей II МНТК «Материалы и технологии XXI века». – Пенза, 2004.
3. **Fortin E., Masson D.** Photovoltaic effects in $\text{Cu}_2\text{O-Cu}$ solar cells grown by anodic oxidation // Solid State Electron. – 1982. – Vol. 25, N 4. – P. 281–283.
4. **Пасынков В.В., Чиркин Л.К., Шинков А.Д.** Полупроводниковые приборы. – М.: Высшая школа. – 1966. – 415 с.

Статья поступила

1 июня 2007 г.

Светличная Людмила Александровна – инженер кафедры химии и экологии ТТИ ЮФУ. *Область научных интересов:* разработка и исследование газочувствительных химических сенсоров.

Милешко Леонид Петрович – кандидат технических наук, доцент кафедры химии и экологии ТТИ ЮФУ. *Область научных интересов:* физико-химические основы и экологическая безопасность технологических процессов.

Королев Алексей Николаевич – доктор технических наук, заведующий кафедрой химии и экологии ТТИ ЮФУ. *Область научных интересов:* физическая химия поверхности твердого тела (синтез композитных пленок и модификация поверхности); разработка и эксплуатация газочувствительных химических сенсоров; моделирование и контроль состояния окружающей среды.

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

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

**Подписной индекс
47570**

Исследование состава материалов на основе функциональных стекол для изготовления толсто пленочных терморезистивных датчиков

Н.Г.Осипенкова, Р.Ф.Шутова, Е.Е.Козлова

Московский государственный институт электронной техники
(технический университет)

Приведены результаты исследования материалов для толсто пленочных резистивных элементов с высоким температурным коэффициентом сопротивления (ТКС), обуславливающим возможность их применения в качестве терморезистивных датчиков. В исследованных композициях в качестве проводящей фазы использовали порошок на основе боридов и силицидов молибдена, а в качестве стеклосвязующего – порошки стекол системы $\text{MnO}-\text{B}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2$. Приведены области составов стекол и резистивных композиций для получения резистивных элементов с величиной ТКС порядка от -2500 до $+3000 \cdot 10^{-6} \text{K}^{-1}$.

В настоящее время большое внимание уделяется разработке различных датчиков, в том числе и терморезистивных. Одним из основных требований, предъявляемых к терморезисторам, является наличие у них высоких значений температурного коэффициента сопротивления (ТКС).

Объектом изучения были композиции для изготовления толсто пленочных резистивных элементов на основе функциональных стекол. В качестве проводящей фазы (ПФ) использовался порошок на основе боридов и силицидов молибдена (Mo_2B_5 и MoSi_2 в весовом соотношении 2:1), а в качестве стеклосвязующего (СС) – порошки стекол системы $\text{MnO}-\text{B}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2$. Молярная доля компонентов в % (мол.%): MnO 35–60; B_2O_3 10–50; SiO_2 35–60.

Многомарганцевые стекла (содержание MnO более 20 мол.%) проявляют уникальные электрофизические свойства. С одной стороны, в указанной системе имеется достаточно протяженная область составов стекол, которые по основным физико-химическим параметрам (температурный коэффициент линейного расширения, температура начала деформации, химическая стойкость) удовлетворяют требованиям, предъявляемым к стеклосвязующим толсто пленочных резистивных материалов. С другой стороны, при термообработке марганецсодержащих стекол образуются полупроводниковые соединения марганца. Вследствие этого марганецсодержащие стекла в составе резистивных композиций можно рассматривать как функциональные стеклосвязующие, т.е. стекла с растворенными в них оксидами металлов переменной валентности [1]. При введении в композицию на основе функционального стеклосвязующего восстановителей (боридов, силицидов, элементарного бора, кремния, алюминия, германия, мышьяка, сурьмы, висмута) проводящая фаза (или ее часть) формируется в результате химических реакций, протекающих в процессе вжигания резисторов. Использование функциональных стеклосвязующих позволяет управлять параметрами резистивных элементов не только за счет изменения процентного соотношения проводящей фазы и стеклопорошка в композиции, но и путем варьирования фазового состава стеклосвязующего.

Для исследования процессов, протекающих при вжигании резисторов, проводили дифференциально-термический (ДТА), термогравиметрический (ТГА) и рентгенофазовый (РФА) анализ порошков материалов проводящей фазы, а также резистивных композиций (рис.1).

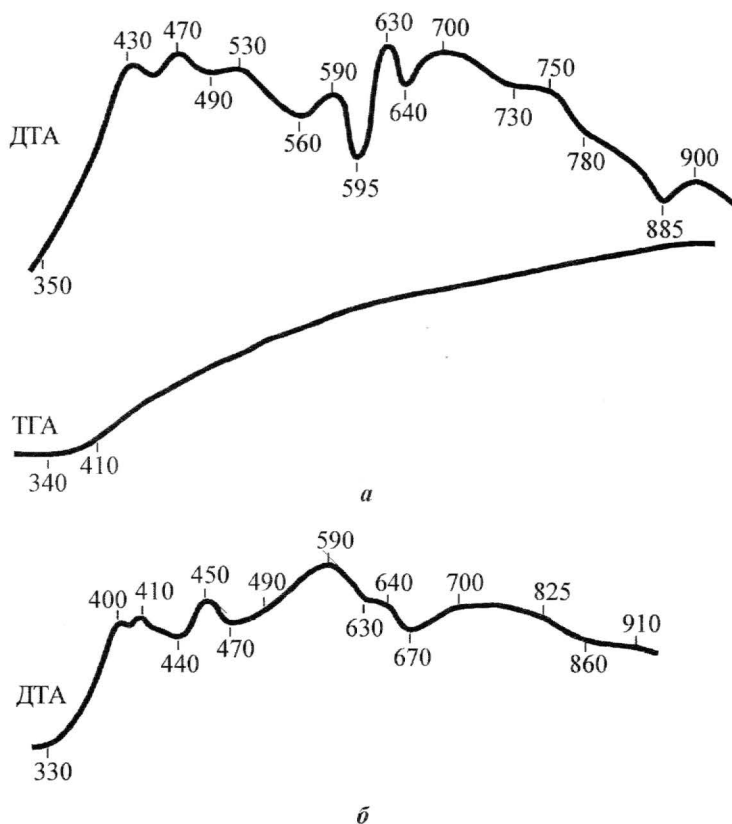


Рис.1. Кривые ДТА и ТГА порошка материала проводящей фазы (а) и резистивных композиций (б) (цифры на кривых – температура в °С)

На кривых ТГА (см. рис.1,а) материала проводящей фазы, начиная с температуры 350 °С, наблюдается увеличение веса порошков. Это связано с двумя одновременно протекающими процессами. При температурах 400–600 °С дисилицид молибдена окисляется с образованием оксидов кремния и молибдена [2]. Кроме того, происходит окисление борида молибдена по реакции: $\text{Mo}_2\text{B}_5 + \text{O}_2 \rightarrow \text{оксиды Mo} + \text{B}_2\text{O}_3$ [3]. Образовавшиеся в результате этих процессов оксиды бора и кремния, а также некоторая доля оксида молибдена (VI), по всей вероятности, находятся в стеклообразном состоянии. Об этом можно судить по наличию гало на рентгенограммах порошков проводящих фаз. Одновременно с окислением Mo_2B_5 может происходить процесс, при котором Mo_2B_5 способствует восстановлению MoO_3 до элементарного металла [4], – на рентгенограммах термообработанных порошков проводящих фаз присутствуют максимумы, соответствующие отражениям металлического молибдена. Указанным процессам на кривых ДТА порошков ПФ (см. рис.1,а) соответствует ряд пиков в диапазоне температур от 400 до 700 °С. Кроме того, в диапазоне температур 600–640 °С наблюдается также термический эффект, связанный, вероятнее всего, с процессом спекания порошка ПФ. При температуре 740 °С на кривых ДТА порошков ПФ наблюдается экзоэффект, относящийся к выделению звездообразных кристаллов MoO_2 . При температурах порядка 740–790 °С

оксид MoO_3 частично сублимируется [5] и плавится эвтектика $\text{MoO}_2\text{--MoO}_3$ [6]. Этому процессу на кривой ДТА соответствует незначительный эндотермический эффект.

Кривые ДТА порошков резистивных композиций (см. рис.1,б) показывают, что в диапазоне температур до 600°C наблюдаемые термические эффекты обусловлены в основном только процессами, протекающими в материале ПФ. Однако после размягчения стекла значимыми становятся процессы, протекающие в материале стеклосвязующего, поскольку с повышением температуры вязкость стекла снижается и стекло изолирует ПФ от взаимодействия с кислородом воздуха, а также процессы, обусловленные взаимным влиянием порошков СС и ПФ. Так, при наличии расплавленных оксидов окисление дисилицида молибдена протекает, по видимому, с образованием низшего силицида Mo_5Si_3 и SiO_2 . Этому процессу на кривых ДТА порошков резистивных композиций соответствует экзотермический эффект при 825°C . Наблюдается также экзозффект при температуре около 900°C , связанный с окислительно-восстановительными превращениями дисилицида молибдена в присутствии расплавленного стекла. На рентгенограммах термообработанных порошков резистивных композиций, так же как и на рентгенограммах порошков ПФ, обнаруживаются пики, которые могут быть отнесены к отражениям металлического молибдена. При этом интенсивность этих отражений значительно меняется с изменением состава стеклосвязующего (от 2 до 30 относительных единиц).

В области стекол с содержанием оксида марганца более 50 мол.% с увеличением содержания MnO в стекле интенсивность пиков металлического молибдена, образующегося в процессе термообработки композиций, уменьшается. Причиной следует считать тот факт, что в стеклах этой части системы при температурах, превышающих температуру размягчения стекол, начинается интенсивное окисление стеклопорошков с одновременной кристаллизацией продукта этого процесса – оксида Mn_2O_3 [1]. Это, в свою очередь, приводит к тому, что состав остаточной стеклофазы обедняется по марганцу и ее тугоплавкость повышается. Стекло не образует спеченой пленки, вследствие чего при термообработке резистивных композиций преобладают процессы окисления, а не восстановления материала проводящей фазы.

Для стекол, содержащих 40–50 мол.% MnO , интенсивность пиков, соответствующих металлическому молибдену, возрастает с увеличением соотношения $\text{B}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2$ в стекле, поскольку многоборные стекла более легкоплавки и образуют спеченные пленки при температурах ниже температуры окисления материала проводящей фазы, тем самым препятствуя протеканию окислительных реакций и способствуя реакциям восстановления.

Задачу оптимизации свойств получаемых резистивных элементов можно решить только проведением большого числа экспериментов. С целью уменьшения количества опытов применялись методы математического планирования эксперимента и статистической обработки результатов. В качестве параметров оптимизации выбраны ТКС и удельное поверхностное сопротивление резисторов ρ_s .

Зависимости удельного поверхностного сопротивления резисторов от состава стеклосвязующего для всех исследованных соотношений стеклосвязующего и проводящей фазы имеют подобный вид (рис.2). С увеличением содержания СС в композициях влияние химического состава стекла на параметры резисторов усиливается. С ростом количественного содержания СС в составе композиции диапазон ρ_s расширяется: при содержании СС, равном 40 мас.%, диапазон ρ_s резистивных элементов составляет $1\text{--}10^3 \text{ Ом}/\square$ (рис.2,а), а при 60 мас.% – $1\text{--}10^8 \text{ Ом}/\square$ (рис.2,в).

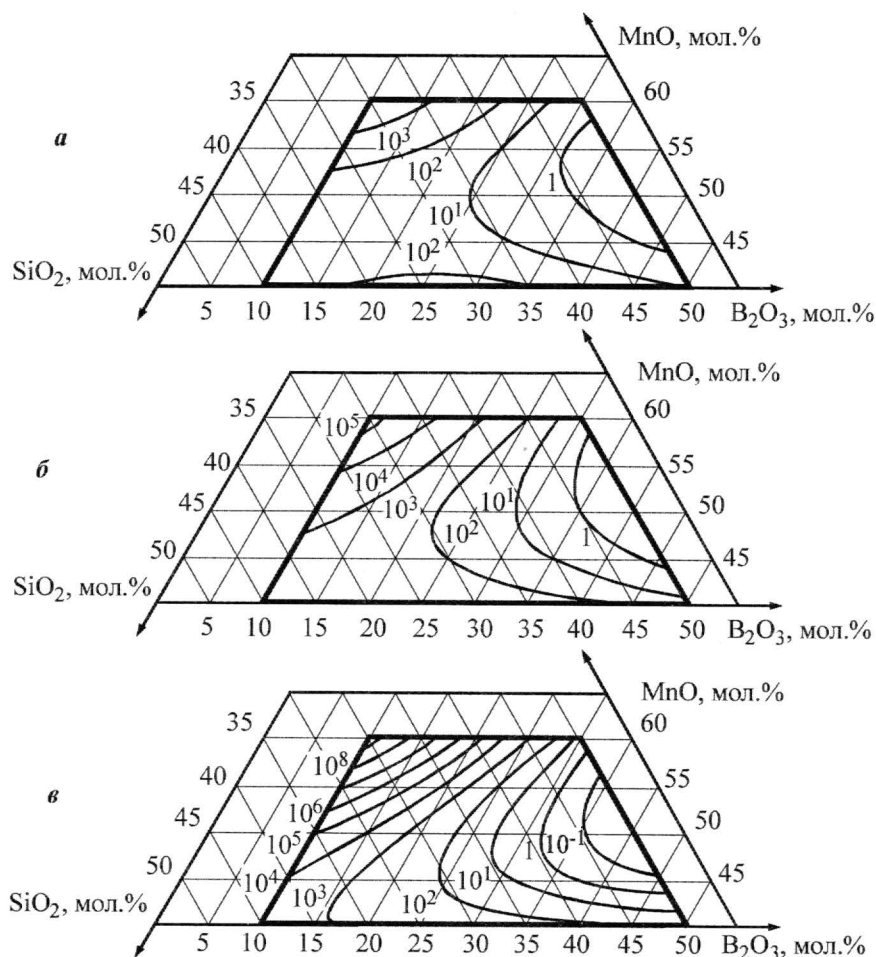


Рис.2. Зависимость сопротивления резисторов от химического состава стеклосвязующего при различных соотношениях СС:ПФ в композиции (мас.%): 40:60 (а); 50:50 (б); 60:40 (в) (цифры на кривых – сопротивление резистивных элементов, Ом/□)

При исследовании зависимости ТКС резисторов от состава стеклосвязующего установлено (рис.3), что при уменьшении количества токопроводящего компонента в составе композиций максимальное абсолютное значение ТКС увеличивается с 500 до $3000 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$.

С ростом p_s ТКС смещается в область отрицательных значений. Стекла, содержащие B_2O_3 меньше 15–25 мол.% (в зависимости от соотношения СС:ПФ), позволяют получать резистивные элементы с отрицательным ТКС, для резисторов на основе многоборных стекол ТКС положителен. Однако общность закономерностей сохраняется для всех композиций независимо от соотношения в них проводящего и связующего компонентов. Нулевая линия во всех трех случаях расположена в области, ограниченной содержанием оксида бора менее 25 мол.%, и с увеличением массового содержания стеклопорошка в композиции она постепенно сдвигается к многоборному углу концентрационного треугольника.

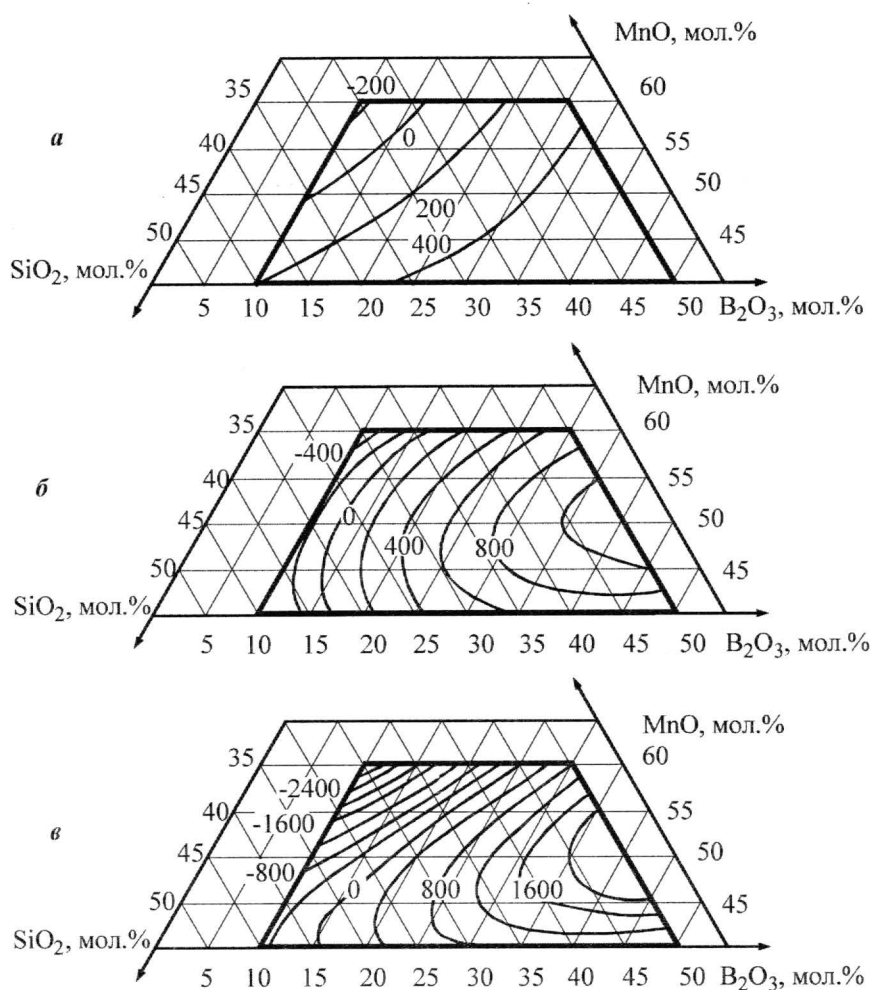


Рис.3. Зависимость ТКС резисторов от химического состава стеклосвязующего при различных соотношениях СС:ПФ в композиции (мас.%): 40:60 (а); 50:50 (б); 60:40 (в) (цифры на кривых – ТКС резистивных элементов, 10^{-6} K^{-1})

Таким образом, с точки зрения получения резисторов с максимальными значениями ТКС интерес представляют композиции с соотношением СС:ПФ не менее 60:40 мас.%. При этом наибольшие положительные значения ТКС могут быть получены при использовании стекол, область составов которых ограничена следующим содержанием компонентов (мол.%): SiO_2 50–55; B_2O_3 30–50; MnO 40–45. Наибольшие отрицательные значения ТКС наблюдаются для области следующих составов стекол: (мол.%): SiO_2 35–40; B_2O_3 10–15; MnO 55–60. Следует учесть, что один и тот же показатель ТКС может быть получен с использованием стеклосвязующих разных составов и при различном их содержании в композиции [7].

Литература

1. Осипенкова Н.Г., Шутова Р.Ф. Исследование кристаллизационной способности многомарганцевых стекол и стеклокристаллических материалов на их основе // Тез. докл. Второй Всероссийской науч.-техн. конф. с межд. участием (Зеленоград, 25–26 ноября 1997 г.). – М.: МИЭТ, 1997. – С. 72, 73.
2. Мамонтова М.Ю. Структура и свойства композиционных материалов на основе дисилицида молибдена. – Диссертация ... канд. техн. наук. – Свердловск, Уральский политехнический институт, 1989.

3. **Серебрякова Т.И., Неронов В.А., Пешев П.Д.** Высокотемпературные бориды. – М.: Металлургия, Челябинское отд., 1991. – 368 с.
4. **Гребенкина В.Г., Юсов Ю.П., Сорокин В.Н.** Объемные резисторы. – Киев: Наукова думка, 1976. – 210 с.
5. **Рипан Р., Четяну И.** Неорганическая химия: В 2 т. Т. 2. Химия металлов. – М.: Мир, 1971. – 872 с.
6. **Михосоев М.В., Алексеев Ф.П., Луцык В.И.** Диаграммы состояния молибдатных и вольфраматных систем. – М.: Наука, 1975. – 342 с.
7. **Шутова Р.Ф., Козлова Е.Е.** Резисторы для низкотемпературных подложек // Тез. докл. IV Междунар. науч.-техн. конф. «Электроника и информатика – 2002» (Москва, 19–21 ноября 2002 г.). – М.: МИЭТ, 2002. – Ч. 1. – С. 318.

Статья поступила
после доработки
14 ноября 2007 г.

Шутова Раиса Фроловна – кандидат технических наук, доцент кафедры общей химии и экологии МИЭТ. *Область научных интересов:* исследования в области разработки материалов для толсто пленочной технологии: резисторов, конденсаторов, межслойной изоляции и др.

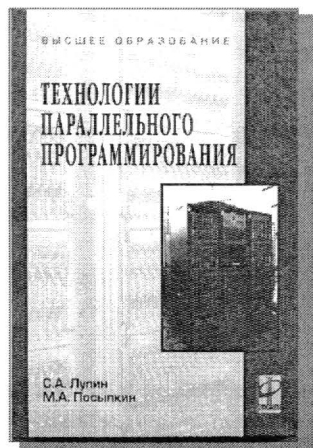
Козлова Елена Евгеньевна – старший преподаватель кафедры общей химии и экологии МИЭТ. *Область научных интересов:* исследования в области разработки стекловидных диэлектрических и резистивных материалов для толсто пленочной технологии.

Осипенкова Наталья Геннадиевна – кандидат технических наук, доцент кафедры общей химии и экологии МИЭТ. *Область научных интересов:* исследования в области разработки стекловидных материалов для толсто пленочной технологии: резисторов, межслойной изоляции и др.

Книжные новинки



Лупин С.А., Посыпкин М.А. Технологии параллельного программирования. - М.: ИД «ФОРУМ»: ИНФРА-М, 2008. - 208 с.
ISBN 978-5-8199-0336-0 (ИД «ФОРУМ»)
ISBN 978-5-16-00-155-2 (ИНФРА-М)



Рассматриваются современные средства разработки параллельных программ для многопроцессорных и многоядерных систем с общей и распределенной памятью: библиотеки MPI, POSIX Threads, система OpenMP. Изложение материала построено по модели постепенного усложнения и базируется на примерах реализации различных вычислительных алгоритмов.

Предназначена для студентов высших учебных заведений, обучающихся по направлению «Информатика и вычислительная техника» и изучающих дисциплины «Основы параллельного программирования», и преподавателей указанных дисциплин. Может быть полезна специалистам в области разработки приложений для многопроцессорных вычислительных систем.

Оптимизация технологии получения гетероструктур GaN с использованием данных дифрактометрического анализа

И.Г.Ермошин

Московский государственный институт стали и сплавов
(технологический университет)

И.Н.Цыпленков, Ю.Н.Свешников

ЗАО «Элма-Малахит» (г. Москва)

Рассмотрена процедура оптимизации получения слоев нитридов $\text{Al}^{\text{III}}\text{N}$ МОС-методом с использованием рентгенодифрактометрического анализа. Установлено, что структурное совершенство слоев, оцениваемое по измерению кривых качания, коррелирует с излучательными характеристиками светодиодных структур.

Широкозонные структуры на основе GaN обладают уникальными свойствами, что позволяет использовать их в современных высокоэффективных излучающих устройствах УФ, синего и зеленого диапазона. Требования, предъявляемые к излучательным характеристикам светодиодов, постоянно повышаются, и необходимо совершенствовать технологию производства гетероструктур.

В настоящей работе рассмотрены вопросы использования данных рентгенодифрактометрических исследований для оптимизации роста светодиодных структур, полученных методом газофазной эпитаксии из металлоорганических соединений (МОС).

Теория. Использование сапфировых подложек при получении гетероструктур InGaN/GaN приводит к образованию большой плотности дислокаций (10^{10} см^{-2}) при непосредственном осаждении GaN вследствие различия параметров кристаллических решеток этих материалов. Нанесение низкотемпературного буферного слоя [1] толщиной 20–40 нм перед основным слоем GaN позволяет снизить плотность дислокаций до 10^8 см^{-2} . Однако для достижения такого результата требуется тщательная оптимизация режимов роста.

Для оценки степени кристаллического совершенства эпитаксиальных слоев использовались рентгенодифрактометрические кривые качания, измеренные в двукристалльной геометрии отражения. Как показано в [2], наличие дислокаций в слоях не сдвигает кривую качания, а уширяет и привносит диффузное рассеяние отраженных рентгеновских лучей. Простая модель уширения предложена Хиршем [3], который показал, что разумная оценка плотности дислокаций $\rho = \beta^2/(9b^2)$, где β – уширение кривой качания; b – вектор Бюргерса.

Внешняя квантовая эффективность излучения светодиодных структур во многом определяется безызлучательным временем жизни носителей заряда, которое в основном связано с дефектами кристаллической структуры, например дислокациями. Поэтому для увеличения безызлучательного времени жизни и, следовательно, увеличения внешней квантовой эффективности излучения светодиодных структур требуется снизить плотность дислокаций в активном слое.

Эксперимент. Для оптимизации условий роста буферного слоя GaN и определения влияния этой стадии процесса на излучательные характеристики выращена и затем исследована светодиодная структура на подложке сапфира с ориентацией (0001) диамет-

ром 50 мм, полученная методом газофазной эпитаксии из металлоорганических соединений. Перед ростом основного буферного слоя GaN наносился низкотемпературный зародышевый слой толщиной примерно 40 нм при температуре 540 °С с последующим разрастанием в течение 10 мин. Толщина *n*-области составляла 3 мкм, активная область состояла из пяти квантовых ям InGaN/GaN с толщиной слоев 2,5/7,5 нм соответственно. Содержание In в слое InGaN было на уровне 10–12%. Толщина *p*-области AlGaIn находилась на уровне 0,13 мкм при мольной доле алюминия 10–15%.

Структурное совершенство слоев AlGaIn/InGaN/GaN светодиодной структуры оценивалось по полуширине рентгеновских кривых качания (ПШКК), измеренных в двукристалльной геометрии отражения на специализированном дифрактометре производства фирмы Accent «Vector-GaN». Излучательная эффективность оценивалась по измерению фототока, который генерировался в фотодатчике с известной чувствительностью в области 460 нм при пропускании прямого тока 10 мА через каждый из пяти контактов. Спектры электролюминесценции (ЭЛ) измерены при токе 5 мА для тех же контактов.

На рис.1 представлена зависимость внешней эффективности излучения от прямого

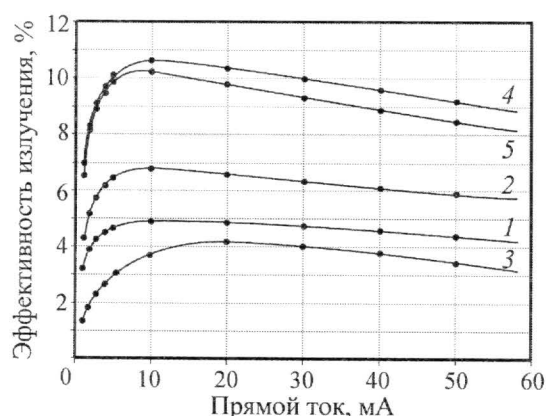


Рис.1. Зависимость квантовой эффективности от прямого тока (номера кривых соответствуют номерам контактов)

тока для каждой контактной области (см. вставку на рис.2). Для всех точек, кроме точки 3, максимальное значение эффективности наблюдается при токе в диапазоне 8–10 мА с учетом контактной площади $\sim 1 \text{ мм}^2$, плотность тока составляет 1 А/см^2 .

Эффективность излучения для точки 3 меньше, чем для других точек, и имеет максимум при более высоких значениях прямого тока. Кроме того, интенсивность излучения для этой контактной точки намного меньше, чем для других при том же значении прямого тока 5 мА (измерения ЭЛ). Можно сделать предположение, что такое поведение вызвано преобладанием безызлучательного механизма рекомбинации, что, в свою очередь, связано с

наличием более дефектной области под этой контактной площадкой. Это предположение подтверждается рентгенотрактометрическими измерениями.

Обсуждение результатов. На рис.2 приведены результаты измерения ПШКК для пяти областей структуры (см. вставку), а также измерения интенсивности в максимумах ЭЛ и эффективности излучения для тех же областей. В качестве сравнения приведены результаты измерения для светодиодной структуры после проведения оптимизации роста буферного слоя, имеющей идентичную активную область из квантовых ям. Оптимизация заключалась в определении наиболее благоприятных условий роста зародышевого слоя (температуры, скорости роста, толщины), а также процесса перекристаллизации (скорости подъема температуры, расходов реагентов) и переход к росту основного буферного слоя [4].

Для значений ПШКК выбрано обратное направление оси ординат с целью согласования с оставшимися исследуемыми величинами.

Как видно из рис.2, для всех трех исследуемых характеристик существует корреляция между структурным совершенством, которое представлено значениями ПШКК, интенсивностью излучения в максимуме и эффективностью излучения. Это подтверждается результатами измерений как для образца до оптимизации ростовых условий, так и для оптимизированного образца. Некоторые отклонения от полного соответствия могут быть отнесены к различию в свойствах наносимых для измерения ЭЛ контактов, что влияет на интенсивность излучения.

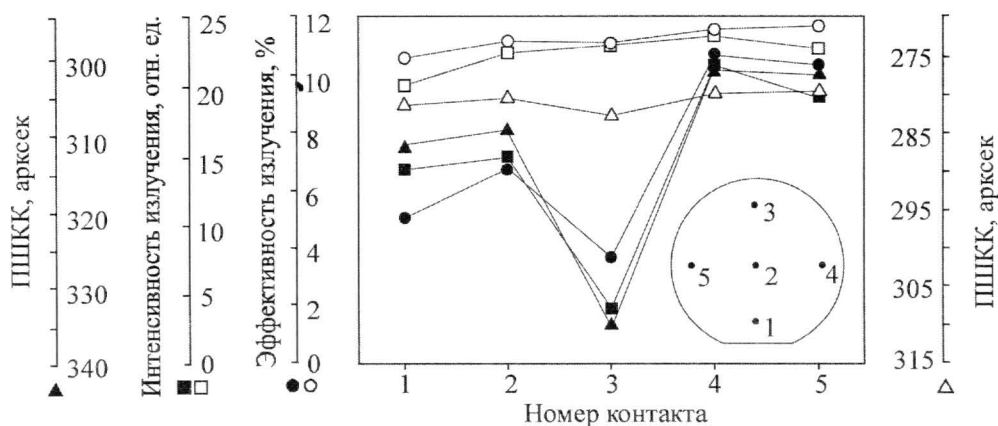


Рис. 2. Зависимость измеренных параметров для пяти контактов (▲, ■, ● – до оптимизации; △, □, ○ – после)

Проведенное исследование влияния структурного совершенства слоев AlGaIn/InGaIn/GaN светодиодной структуры по полуширине рентгеновских кривых качания на ее излучательные свойства показало неоднородное распределение этих характеристик по поверхности. Установлено, что в областях структуры, где рентгеновские кривые качания уширяются, отражая ухудшение структурных свойств AlInGaIn, происходит уменьшение эффективности излучения.

Таким образом, построение карт распределения ПШКК по поверхности светодиодной структуры позволяет определить/прогнозировать эффективность излучения светодиодных чипов, полученных из разных областей структуры с активной областью InGaIn/GaN. С учетом того, что рентгенодифрактометрические измерения являются неразрушающими и бесконтактными, этот метод перспективен для оптимизации режимов получения слоев нитридов и дальнейшего применения в промышленном производстве.

Литература

1. Systematic analysis and control of low-temperature GaN buffer layers on sapphire substrates / *Sumia M., Ogusu N., Yotsuda Y. et al.* // J. of Appl. Phys. – 2003. – Vol. 93, Issue 2. – P. 1311–1319.
2. Боуэн Д.К., Таннер Б.К. Высокора разрешающая рентгеновская дифрактометрия и топография. – СПб.: Наука, 2002.
3. *Hirsch P.B.* Mosaic structure // Progress in metal physics. – N.-Y.: Pergamon, 1956. – Ch. 6. – P. 137–141.
4. Influences of temperature ramping rate on GaN buffer layers and subsequent GaN overlayers grown by metalorganic chemical vapor deposition / *Dong-Sing Wu, Ray-Hua Horng, Wei-Hao Tseng et al.* // J. of Crystal Growth 220. – 2000. – P. 235–242.

Статья поступила
16 ноября 2007 г.

Ермошин Иван Геннадьевич – аспирант кафедры технологии материалов электроники МИСиС. Область научных интересов: метрологический контроль гетерослоев GaN, эпитаксия GaN МОС-методом.

Цыпленков Игорь Николаевич – кандидат технических наук, главный технолог ЗАО «Элма-Малахит» (г. Москва). Область научных интересов: управление технологией роста слитков GaP, исследование проблем резки и полировки пластин GaP.

Свешников Юрий Николаевич – кандидат технических наук, главный научный сотрудник ЗАО «Элма-Малахит» (г. Москва). Область научных интересов: технология эпитаксии GaN МОС-методом.

Исследование тепловых эффектов и явлений саморазогрева в планарных силовых МОП-транзисторах КНИ-типа

Ю.А. Чаплыгин, Е.А. Артамонова, А.Ю. Красюков, Т.Ю. Крупкина

Московский государственный институт электронной техники
(технический университет)

Рассмотрены проблемы теплоотвода, тепловые эффекты и явления саморазогрева, возникающие при работе планарных силовых МОП-транзисторов КНИ-типа. С помощью методов приборно-технологического моделирования исследованы характеристики транзисторов и область безопасной работы. Показано, что ограничения области безопасной работы связаны в большей степени с саморазогревом структуры, чем с включением паразитного биполярного транзистора.

В современных интегральных схемах, системах на кристалле и микросистемах наиболее остро стоит проблема отвода рассеиваемой мощности. Особенно это актуально для высокочастотных схем сверхбольшой и ультрабольшой степени интеграции, а также для схем силовой электроники. Эффективные решения, учитывающие влияние тепловых процессов на работоспособность электронных компонентов, можно получить за счет непрерывных усилий по совершенствованию конструкций приборов и схемотехнических проектов, используемых материалов и технологий производства.

Технология изготовления транзисторных структур на подложках КНИ-типа существует уже более 30 лет и широко используется в современной КМОП-электронике. Преимуществами данной технологии являются наличие толстого окисла вместо кремния под областями истока и стока, что существенно уменьшает емкость на подложку, а также простой процесс изоляции компонентов и высокая плотность интеграции из-за отсутствия изолирующих карманов. МОП-структуры КНИ-типа отличаются высокой радиационной стойкостью и повышенной надежностью при высоких температурах. Короткоканальные эффекты в таких приборах могут быть подавлены простым уменьшением толщины кремниевого слоя, а наклон подпороговой характеристики получается практически идеальным [1].

МОП-структуры КНИ-типа широко используются при создании аналоговых биполярных и БиКМОП-схем, а также в радиационно стойкой и высокотемпературной цифровой КМОП-электронике. Кроме того, простота изоляции отдельных компонентов интегральной схемы позволяет широко использовать КНИ-структуры для создания силовых интеллектуальных схем.

Теплопроводность пленки оксида кремния приблизительно на два порядка ниже по сравнению с теплопроводностью кремния в КНИ-приборах, в результате чего возникает

ет проблема с отводом тепла в подложку, что приводит к резкому возрастанию температуры в канале. Следствием этого также может быть отрицательное значение дифференциальной проводимости при больших смещениях на затворе, уменьшение подвижности носителей в канале и максимального значения тока насыщения. Сильный саморазогрев силовых МОП-транзисторов КНИ-типа может привести к выходу из строя прибора как из-за тепловых пробоев в самом кремнии, так и по причине «выгорания» алюминиевых контактов на границе с кремнием.

Экспериментальные данные показывают [2], что температура существенно зависит от ряда геометрических параметров структур КНИ-типа. В частности, температура в пленке кремния резко повышается при увеличении толщины скрытого окисла, уменьшении толщины пленки кремния и увеличении расстояния от затвора до контакта к стоку.

Дополнительную сложность при расчете ВАХ МОП-транзисторов КНИ-типа вызывает эффект «плавающей подложки», связанный с особенностями формирования контакта к тонкой подложке. Сопротивление активной p -области, являющейся базой паразитного биполярного n - p - n -транзистора исток–тонкая подложка–сток, из-за тонкого рабочего слоя кремния выше по сравнению с сопротивлением кремниевых структур подложечного типа. Поэтому подложечные эффекты, связанные с накоплением дырок и дырочным током, проявляются в значительной степени. Дырочный ток повышает потенциал тонкой подложки, что может привести к включению паразитного биполярного транзистора. Пробивное напряжение паразитного биполярного транзистора также зависит от температуры.

В работах [3–9] предложены различные конструктивно-технологические методы решения рассмотренных проблем. Например, формирование контакта к подложке, как и в объемных транзисторах, рядом с контактом к истоку, снижая тем самым сопротивление тонкой подложки, являющейся базой паразитного биполярного транзистора [4]. В работе [2] предлагается структура силового биполярного транзистора с изолированным затвором (БТИЗ), в которой заглубленный окисел частично удален под областью канала (Quasi-SOI). Такая конструкция позволяет напрямую связать область канала с низкоомной p -подложкой, дырки могут уходить в подложку, а не скапливаться в канале, повышая сопротивление базы паразитного биполярного транзистора и улучшая теплоотвод в подложку. Другим примером частичной КНИ-изоляции может служить структура планарного силового КНИ-транзистора, в которой слой окисла расположен только под стоком [7]. В работах [8, 9] предложено формировать скрытый слой из нескольких слоев, что позволяет повысить температурную надежность приборов по сравнению с классическими КНИ-структурами за счет увеличения термической проводимости составного слоя. В работе [8] рассмотрена конструкция, в которой верхние электроды соединяют с управляющей кремниевой подложкой прямым контактом через слои тонкого кремния и скрытого окисла. Благодаря такой конструкции поток тепла направляется из активной области прибора в управляющую подложку через соединительный контакт.

Очевидно, что при проектировании МОП-структур КНИ-типа необходимо особенно тщательно рассчитывать влияние температуры на поведение прибора и на надежность межсоединений. Расчетные модели должны учитывать влияние генерации тепла, распределение потоков тепла, разогрев решетки и эффекты, связанные с локализацией температуры, на физические константы.

В настоящей работе исследовано влияние тепловых эффектов на работу силовых МОП-транзисторов КНИ-типа с использованием средств приборно-технологического моделирования. Структура такого транзистора представлена на рис.1. От обычного низковольтного транзистора структура отличается наличием дополнительной слаболегированной области между каналом и сильнолегированной областью стока. Эта область выполняет роль высокоомного резистора, на котором падает все напряжение, прикладываемое к стоку, что позволяет увеличить напряжение лавинного пробоя p - n -перехода сток-подложка. Чтобы уменьшить электрическое поле на границе затвор-слаболегированная область, край затвора выведен на толстый окисел. Это приводит к уменьшению сопротивления силового прибора в открытом состоянии при сохранении высокого пробивного напряжения прибора в закрытом состоянии.

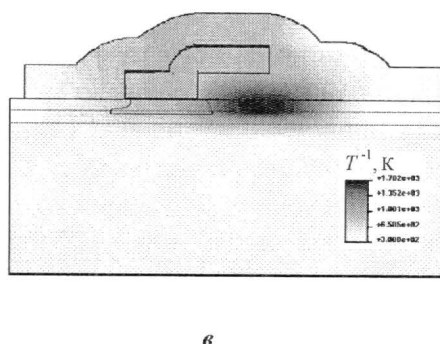
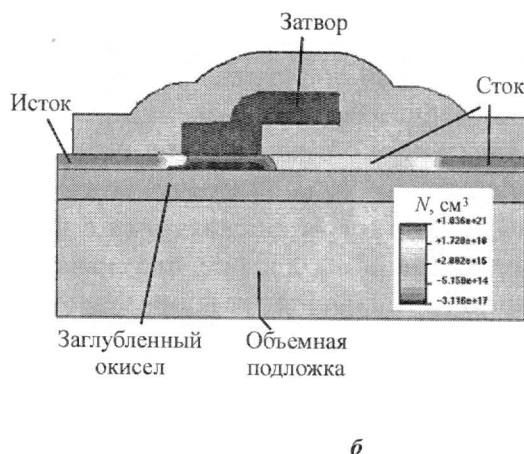
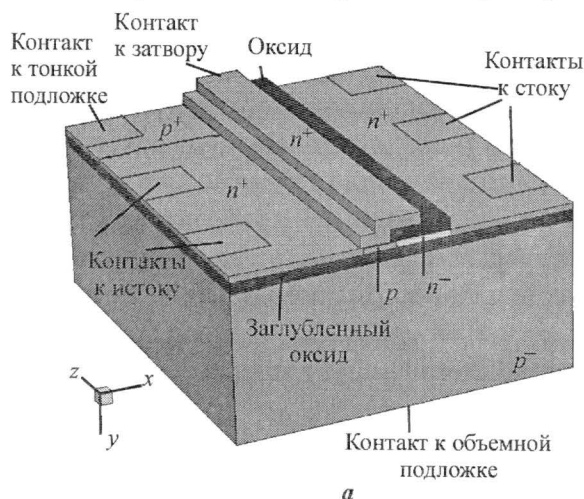


Рис.1. Структура планарного силового МОП-транзистора КНИ-типа (а); двумерное сечение транзистора, полученное по результатам технологического моделирования (б); результаты моделирования распределения максимальной температуры при напряжении пробоя (в). Область максимальной температуры приходится на слаболегированную часть стока

Характеристики прибора рассчитывались средствами приборно-технологического моделирования TCAD Synopsys, которые представляют собой комплекс программных модулей, интерактивных оболочек и средств визуализации, позволяющих решать следующие задачи:

- моделировать отдельные технологические операции, рассчитывать профили распределения примеси, толщины и электрофизические параметры слоев;
- моделировать интегральные структуры, получаемые в результате последовательности технологических операций – технологического маршрута;
- рассчитывать на основе численного моделирования электрические, оптические, электромагнитные и другие характеристики полупроводниковых структур;

- выполнять экстракцию схемотехнических параметров прибора по его электрическим характеристикам, рассчитывать фрагменты схем;
- проводить планирование эксперимента, моделировать прохождение «виртуальной партии» пластин по базовому технологическому маршруту с расщеплением входных технологических параметров («сплит»-партии);
- выполнять оптимизацию параметров технологических операций, технологического маршрута, размеров элементов с целью получения заданных характеристик изделия.

Для анализа эффектов, связанных с паразитным биполярным транзистором, рассчитаны семейства выходных характеристик транзистора при разных напряжениях на затворе. Предполагалось, что отвод тепла осуществляется через контакты к стоку, истоку, затвору и объемной подложке. В процессе моделирования на соответствующих контактах поддерживалась постоянная температура (300 K). На рис.2 представлены результаты моделирования структуры с учетом паразитного биполярного транзистора. Определена точка включения паразитного биполярного транзистора. Из рисунка видно, что в момент перегиба кривой (точка 1) потенциал подзатворной области увеличивается на 0,7 В, что соответствует практически полному смещению n^+ - p -перехода исток-подложка в прямом направлении. Следовательно, отрицательный загиб кривой ВАХ связан с включением паразитного биполярного транзистора. Скачки поля происходят на границах p - n -переходов. Максимальный скачок приходится на границу слаболегированной и сильнолегированной областей стока.

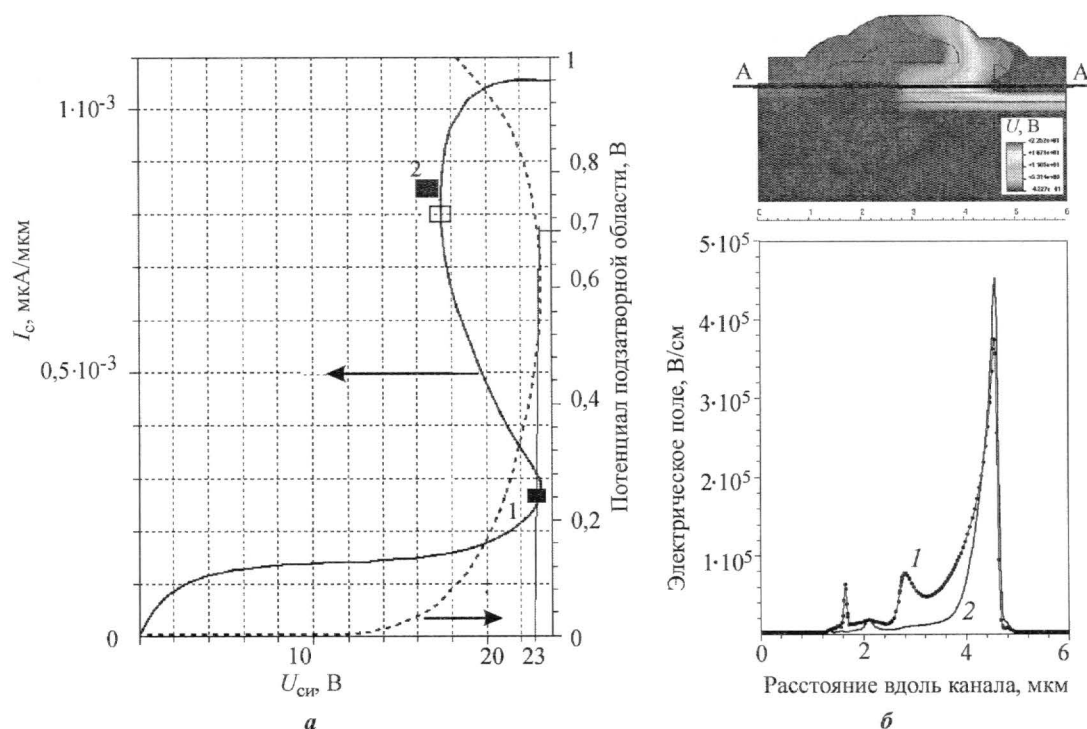


Рис.2. Зависимость тока стока и потенциала тонкой подложки от напряжения на стоке при напряжении на затворе $U_{зи} = 10$ В (а) и распределение электрического поля вдоль сечения А-А в точках 1 (кривая 1) и 2 (кривая 2) (б)

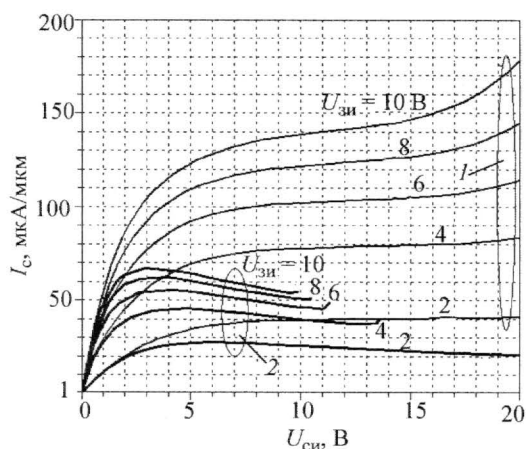


Рис.3. Семейства выходных ВАХ планарного силового МОП-транзистора КНИ-типа, рассчитанное с учетом теплоотвода от металлизации истока, стока, затвора и толстой подложки (1) и только от контакта к толстой объемной подложке (2)

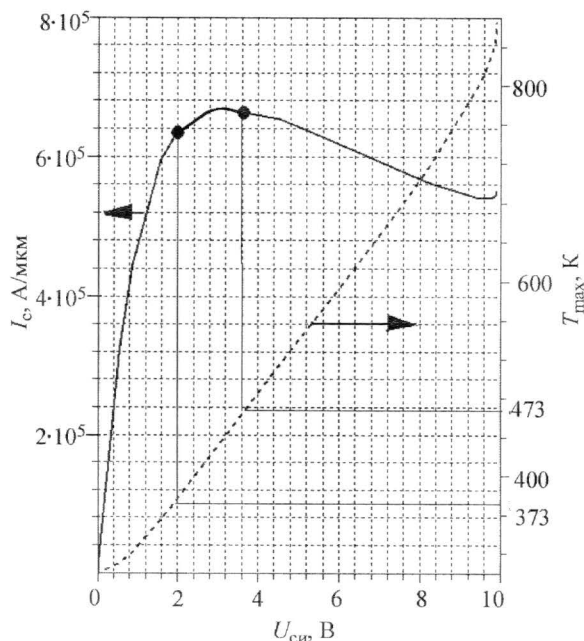


Рис.4. Зависимость тока стока и максимальной температуры от напряжения на стоке при напряжении на затворе $U_{зи} = 10$ В

При сравнении граничных токов и напряжений, связанных с включением паразитного биполярного транзистора и эффектами саморазогрева (см. рис.2,а и рис.4), можно заключить, что последние имеют существенно меньшее значение. Следовательно, при оценке области безопасной работы прибора имеет смысл оценивать именно температурную ОБР. На рис.5 представлена температурная ОБР исследуемого силового транзистора при условии неперевышения максимально допустимых температур.

В ходе исследований разработаны методы расчета электрической и температурной ОБР прибора с использованием средств приборно-технологического моделирования TCAD Synopsys. Результаты моделирования показали, что эффекты, связанные с само-

Для анализа эффектов, связанных с саморазогревом структуры, рассчитаны семейства выходных ВАХ транзистора при разных напряжениях на затворе (рис.3). Проанализировано влияние условий теплоотвода на характеристики транзистора. Если предположить, что в структуре есть возможность отвода тепла через контакты к истоку, стоку, затвору и объемной подложке, то повышение температуры внутри активной части транзистора не оказывает существенного влияния на характеристики (семейство 1). Если отвод тепла происходит только через объемную подложку, эффекты саморазогрева проявляются в максимальной степени (семейство 2). В этом случае процесс моделирования устанавливает условие постоянной температуры (300 К) только на объемной подложке.

Для силовых транзисторов важным является понятие области безопасной работы (ОБР) — совокупность электрических характеристик, при соблюдении которых обеспечивается надежная работа полупроводникового ключа без существенного ухудшения его характеристик и параметров. При определении ОБР оцениваются максимально допустимые значения выходного тока, напряжения, а также максимальная рассеиваемая мощность и допустимая температура перехода [10].

На рис.4 представлена ВАХ транзистора для случая, показанного на рис.3,б, и зависимость максимальной температуры прибора от напряжения на стоке при напряжении на затворе 10 В. Зависимости позволяют определить границу температурной области безопасной работы прибора, исходя из критерия неперевышения максимально допустимой температуры (в данном случае 100 и 200 °С).

разогревом структуры, гораздо сильнее ограничивают рабочие напряжения и токи, чем эффекты, связанные с включением паразитного биполярного транзистора.

При анализе влияния условий теплоотвода на характеристики транзистора, в предположении, что в структуре есть возможность отвода тепла не только через объемную подложку, но и через контакты к истоку, стоку и затвору, выяснено, что проблемы, связанные с саморазогревом, практически не проявляются. На основании исследований построена температурная область безопасной работы прибора для наилучшего случая, когда отвод тепла происходит только через объемную подложку.

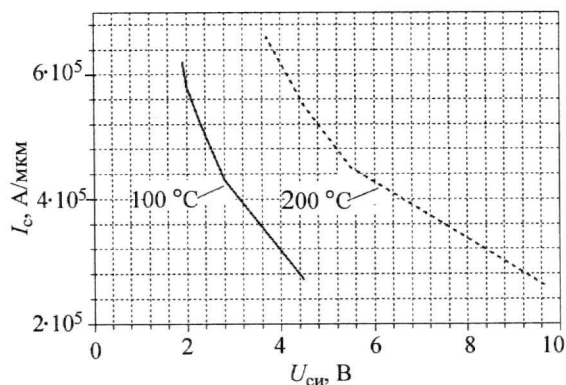


Рис.5. Границы ОБР силового МОП-транзистора КНИ-типа, рассчитанные при условии отвода тепла через объемную подложку

Литература

1. Material and process limits in silicon VLSI technology / *J.D.Plummer et al.* // Proc. of the IEEE. — 2001. — Vol. 89, N 3. — P. 240–258.
2. Measurement and Modeling of Self-Heating in SOI NMOSFET's / *L.T.Su, J.E.Chung, D.A.Antoniadis et al.* // IEEE transactions on electron devices. — 1994. — Vol. 41, N 1, January. — P. 69–75.
3. Efficiency of SOI-Like structures for reducing the thermal resistance in thin-film SOI power LDMOS-FETs / *J.Roig, J.Urresti, I.Cortes et al.* // IEEE electron device letters. — 2004. — Vol. 25, N 11. — P. 743–745.
4. *Fiorenza G., Antoniadis A., Jesus A. del Alamo.* RF Power LDMOSFET on SOI // IEEE electron device letters. — 2001. — Vol. 22, N 3. — P. 139–141.
5. *Fiorenza G., Antoniadis A., Jesus A. del Alamo.* Experimental comparison of RF power LDMOSFETs on thin-film SOI and bulk silicon // IEEE transactions on electron devices. — 2002. — Vol. 49, N 4. — P. 687–692.
6. *S.Matsumoto et al.* A new high performance lateral insulated gate bipolar transistor formed on quasi-SOI // IEEE electron device letters. — 1995. — Vol. 16, N 9. — P. 402–404.
7. The partial silicon-on-insulator technology for RF power LDMOSFET devices and on-chip microinductors / *Ren Changhong et al.* // IEEE transactions on electron devices. — 2002. — Vol. 49, N 12. — P. 2271–2278.
8. Study of novel techniques for reducing self-heating effects in SOI power LDMOS / *J.Roig, D.Flores, M.Hidalgo et al.* // Solid State Electronics. — 2002. — Vol. 46, N 12. — P. 2123–2133.
9. Efficiency of SOI-like structure for reducing the thermal resistance in thin-film SOI POWER LDMOS-FETs / *J.Roig et al.* // IEEE electron device letters. — 2004. — Vol. 25, N 11. — P. 743–745.
10. *Воронин П.А.* Силовые полупроводниковые ключи. — М.: Издательский дом Додэка-XXI, 2001. — 384 с.

Статья поступила 7 февраля 2008 г.

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

Артамонова Евгения Анатольевна — ассистент кафедры интегральной электроники и микросистем МИЭТ. *Область научных интересов:* численное моделирование технологических процессов и интегральных приборов.

Красюков Антон Юрьевич — кандидат технических наук, доцент кафедры интегральной электроники и микросистем МИЭТ. *Область научных интересов:* численное моделирование элементов интегральных схем и микросистем.

Крупкина Татьяна Юрьевна — доктор технических наук, профессор кафедры интегральной электроники и микросистем МИЭТ. *Область научных интересов:* моделирование технологических процессов и интегральных приборов, методы проектирования интегральной элементной базы и микросистем.

МИКРОСИСТЕМЫ

УДК 681.586

Исследование влияния газового демпфирования на параметры микроакселерометров

С.П.Тимошенков, В.Ф.Шилов, А.Н.Бойко, Б.М.Симонов

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

Проведено исследование влияния газового демпфирования на ширину полосы пропускания микроакселерометров маятникового типа. Установлено, что для увеличения ширины пропускания необходимо обеспечить остаточное давление внутри объема корпуса не более $1-5 \cdot 10^{-1}$ мм рт. ст. Данное условие реализуемо с помощью разработанной технологии герметизации микроэлектромеханических приборов в металlostеклянных корпусах.

Работоспособность микромеханических приборов зависит от следующих факторов: давления остаточной атмосферы внутри микрообъема, состава остаточной атмосферы, динамики изменения этих параметров при эксплуатации или хранении. Например, на работоспособность микроакселерометров и микрогироскопов может оказывать влияние газовое демпфирование. Поэтому во многих случаях необходимо обеспечить вакуум во внутренних объемах микромеханических приборов для уменьшения демпфирования колебаний микромеханических чувствительных элементов [1, 2]. Точность измерения параметров некоторых микромеханических приборов возрастает с увеличением степени вакуума в их внутрикорпусных объемах. Но вместе с тем вакуумирование микрообъемов требует и увеличения затрат на герметизацию корпусов.

В настоящей работе исследуется влияние газового демпфирования на ширину полосы пропускания микроакселерометров маятникового типа. Использовались два типа микроакселерометров: с газовой средой внутри объема корпуса при нормальном атмосферном давлении; с давлением внутри объема герметичного корпуса $p \approx 1 \cdot 10^{-1}$ мм рт. ст. Применялись стандартные металlostеклянные корпуса.

Влияние газового демпфирования на параметры микроакселерометров маятникового типа обусловлено затуханием колебаний подвижной части чувствительного элемента из-за потери энергии при взаимодействии с внутрикорпусной газовой средой. Для исследования ширины полосы пропускания микроакселерометров проведены виброиспытания. При разработке приборов определено, что ширина полосы пропускания микроакселерометров должна составлять 50 Гц.

Чувствительный элемент микромеханического акселерометра представляет собой кремниевую рамку, подвешенную на упругих элементах – торсионах. Для управления и съема информации с чувствительного элемента выбрана емкостная система съема измеряемых сигналов, так как она проста в реализации, имеет низкое энергопотребление и высокую температурную стабильность. Схема включения микромеханического акселерометра для измерения его параметров представлена на рис.1.

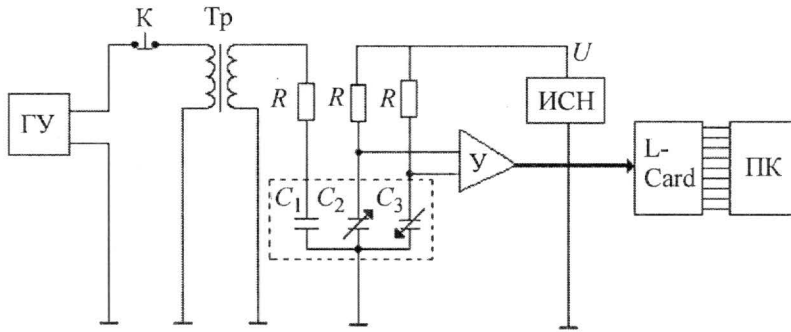


Рис.1. Схема включения микромеханического акселерометра для измерения его параметров и характеристик (ГУ – генератор управляемый; ИСН – источник стабилизированного напряжения; Тр – трансформатор; $R = 200 \text{ кОм}$; C_1 – электрическая емкость между электродами управления и рамкой; $C_{2,3}$ – электрические емкости между электродами датчика положения и рамкой; У – операционный усилитель; ПК – персональный компьютер)

Запись выходных сигналов датчиков производилась с помощью специализированной цифровой платы сбора и обработки данных L-Card, пакетов стандартных программ Lab-View, MatLab, а также разработанного специализированного программного обеспечения.

Экспериментально определялась амплитудно-частотная характеристика (АЧХ) при ускорении вдоль оси чувствительности с частотой от 0 до 200 Гц при атмосферном давлении. С увеличением частоты внешнего колебательного воздействия амплитуда выходного сигнала акселерометра уменьшается (рис.2), что связано с влиянием газового демпфирования.

С уменьшением давления в корпусе микроакселерометра влияние газового демпфирования снижается, так как уменьшается эффективная вязкость газовой среды, определяемая выражением [3]:

$$\eta_{eff} = \frac{\eta}{1 + 9,638 \left(\frac{L_0 P_0}{Pd} \right)^{1,159}},$$

где η – динамическая вязкость газовой среды; L_0 – длина свободного пробега молекулы; P_0 – давление, при котором длина свободного пробега равна L_0 ; P – давление внутри объема; d – зазор между подвижным элементом и неподвижной поверхностью.

Амплитуда выходного сигнала становится максимальной при совпадении частоты внешнего воздействия и собственной (резонансной) частоты колебаний чувствительного элемента (рис.3). На рис.4 представлен выходной сигнал акселерометра при воздействии внешнего гармонического ускорения с частотой 50 Гц.

Полученные результаты позволяют заключить, что исследованные образцы микроакселерометров наиболее эффективно функционируют в условиях вакуума ($1-5 \cdot 10^{-1}$ мм рт. ст.), что позволяет обеспечить заданную ширину их полосы пропускания. Используемые технологии

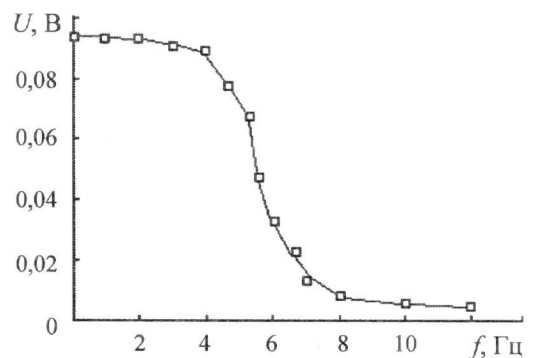


Рис.2. АЧХ акселерометра в условиях нормального атмосферного давления внутри корпуса

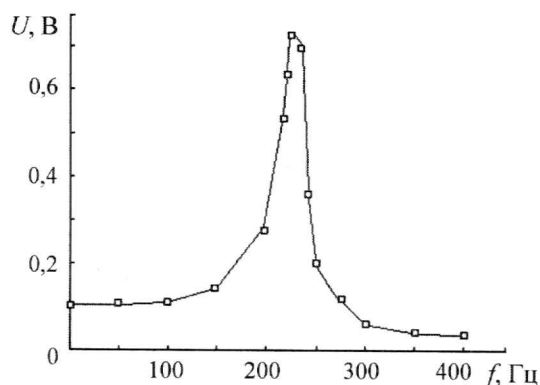


Рис.3. АЧХ акселерометра в условиях вакуума ($p \sim 1 \cdot 10^{-1}$ мм рт. ст)

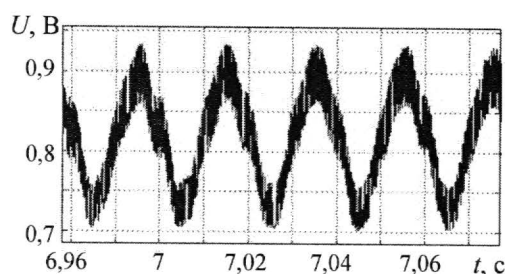


Рис.4. Выходной сигнал акселерометра при воздействии внешнего гармонического ускорения

герметизации металlostеклянных корпусов, например сваркой лазером, позволяют получать остаточное давление внутри корпуса не хуже $1-5 \cdot 10^{-1}$ мм рт. ст. [4] и в полной мере удовлетворяют предъявляемым требованиям.

Проведенные исследования влияния газового демпфирования на ширину полосы пропускания микромеханических акселерометров разработанной конструкции позволили установить, что для увеличения ширины пропускания необходимо обеспечить остаточное давление внутри объема корпуса не более $1-5 \cdot 10^{-1}$ мм рт. ст. Данное условие вполне реализуемо практически при герметизации микроэлектромеханических приборов в металlostеклянных корпусах.

Литература

1. Sparks D., Massoud-Ansari S., Najafi N. Reliable Vacuum packaging using nanogettersTM and glass frit bonding // Integrated Sensing Systems Inc. – USA, Jan 2004. – P. 71–75.
2. Перспективы создания и применения микромеханических вибрационных гироскопов / С.П.Тимошенков, В.Г.Рубицц, В.Ф.Шилов и др. // Сб. «ДДАТ-2003». – Пенза, 2003. – С. 39.
3. Veijola T. Equivalent circuit models for micromechanical inertial sensors // Circuit Theory Laboratory Report Series CT-39. – Helsinki University of Technology, 1999. (www.aplac.hut.fi).
4. Бойко А.Н., Фортинский Ю.К. Разработка технологии герметизации микромеханических датчиков // Тез. докл. VII Междунар. научн. техн. конф. «Электроника и информатика – 2005». – М.: МИЭТ, 2005. – С. 59.

Статья поступила
11 октября 2007 г.

Тимошенков Сергей Петрович – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой микроэлектроники МИЭТ. Область научных интересов: микросистемная техника, структуры кремний–на–изоляторе.

Шилов Валерий Федорович – инженер кафедры микроэлектроники МИЭТ. Область научных интересов: микросистемная техника.

Бойко Антон Николаевич – кандидат технических наук, доцент кафедры микроэлектроники МИЭТ. Область научных интересов: микросистемная техника.

Симонов Борис Михайлович – кандидат технических наук, доцент кафедры микроэлектроники МИЭТ. Область научных интересов: микросистемная техника.

Газовый оптический сенсор на основе планарного многомодового волновода

А.Г.Борисов, Е.С.Маханько, Т.Д.Чиликина

Московский государственный институт электронной техники
(технический университет)

О.М.Иванова, С.А.Крутоверцев

ОАО «Практик-НЦ» (г. Москва)

Рассмотрены результаты математического моделирования распространения света в газовом оптическом сенсоре на основе планарного многомодового волновода ($d \gg \lambda$). Показано, что при соответствующем выборе геометрических и оптических характеристик волновода и чувствительного слоя сигнал сенсора при наличии определяемого компонента может изменяться более чем на два порядка, обеспечивая высокую чувствительность сенсора.

Газовые оптические сенсоры отличаются от аналогов высокой чувствительностью, селективностью и быстродействием, способностью работать в агрессивных, пожаро- и взрывоопасных средах, а также широким температурным диапазоном. В настоящее время промышленность выпускает сенсоры на основе эффектов селективного поглощения монохроматического излучения (обычно в ИК-области спектра) исследуемой газовой средой, а также фото- и хемилюминесценции. В последнем случае для уменьшения размеров чувствительного элемента сенсора его выполняют на основе оптического волокна, на торец или боковую поверхность которого наносится слой селективно-чувствительного вещества. Общим недостатком таких сенсоров является сложность конструкции и (или) технологии изготовления чувствительного элемента. Решением указанной проблемы может стать использование плоских оптических волноводов, сочетающих в себе небольшие габариты с технологичностью процессов формирования необходимых структур на его поверхности.

Рассмотрим плоский прямоугольный волновод толщиной d ($d \gg \lambda$), на небольшой участок верхней поверхности которого нанесен однородный слой вещества толщиной h , причем $h \approx \lambda$ (λ – длина волны света). Волновод характеризуется показателем преломления n_0 , а слой – комплексным показателем преломления $\hat{n} = n_1 - i\chi_1$, где χ_1 – показатель поглощения света в веществе. Показатель преломления среды примем равным 1. Предположим, что потери света происходят только на участке, покрытом слоем вещества. В этом случае световой поток на выходе волновода будет определяться только коэффициентом отражения света на границе волновод – слой – внешняя среда:

$$I = I_0 (R)^q, \quad (1)$$

здесь R – коэффициент отражения; q – число отражений от границы волновод – слой – внешняя среда. При этом q рассчитывается по формуле $q = \frac{l}{2d \cdot \operatorname{tg} \varphi}$, где l – длина волновода; φ – угол падения света на поверхность волновода.

Будем считать, что определяемый компонент среды способен селективно и обратимо хемосорбироваться в объеме слоя. Это приводит к смещению полосы поглощения вещества так, что новый спектр не перекрывается с исходным. Учитывая, что хемосорбция сопровождается иммобилизацией компонента, без большой потери точности кинетику этого процесса можно описать реакцией псевдопервого порядка:



где A – молекула исходного вещества; X – определяемый компонент; $[A \cdot X]$ – продукт хемосорбции.

Тогда для длины волны света, соответствующей максимуму поглощения исходного вещества, и в силу того, что $\chi_1 \sim C_A$, справедливо

$$\chi_1 = \chi_{\max} e^{-\frac{t}{\tau}},$$

где C_A – концентрация молекул вещества A ; χ_{\max} – максимальное значение показателя поглощения на указанной длине волны света; τ – постоянная времени процесса хемосорбции.

Согласно теории аномальной дисперсии в отличие от показателя поглощения показатель преломления на резонансной длине света (частоте) от концентрации молекул не зависит [1]. Поэтому коэффициент отражения будет меняться в соответствии с изменением показателя поглощения.

В соответствии с уравнением (1) максимально возможная амплитуда изменения сигнала сенсора определяется выражением

$$Q_{\max} = \left(\frac{R_{\infty}}{R_0} \right)^q,$$

где R_0, R_{∞} – коэффициенты отражения света в начальный момент и после завершения процесса хемосорбции соответственно.

В настоящей работе расчет коэффициентов отражения от границы волновод – слой – внешняя среда для различных параметров волновода, слоя, и углов падения светового луча на поверхность волновода проводился с использованием формул Френеля по методу, предложенному в классическом труде Борна для определения оптических характеристик слоистых структур [2].

В последнее время в качестве материалов для чувствительных слоев газовых сенсоров, в том числе и оптических, широко применяют металлокомплексы фталоцианинов и других супрамолекулярных соединений, содержащих развитую систему сопряжения [3]. Спектры этих соединений характеризуются рядом интенсивных полос поглощения, для которых $\chi_{\max} = 0,1-0,5$, а показатель преломления лежит в диапазоне 1,3–1,7 [4, 5]. Поэтому на первом этапе моделирования за основу принималась структура, представляющая собой кварцевый волновод ($n_0 = 1,46$), на поверхность которого нанесен слой окрашенного вещества ($n_1 = 1,5$; $\chi_{1\max} = 0,5$). Толщина слоя соответствует диапазону $\frac{\lambda}{8} \leq h \leq 2\lambda$ при длине волны света $\lambda = 600$ нм. При этом предполагалось, что продукт хемосорбции на этой длине свет не поглощает.

На рис.1 показана зависимость коэффициента отражения R от времени, рассчитанная для разных углов падения при заданных оптических параметрах структуры: $h = \frac{\lambda}{2}$; $n_1 = 1,5$; $\chi_1 = 0,5$; $\tau = 40$ с. Анализ зависимостей позволяет сделать следующие выводы.

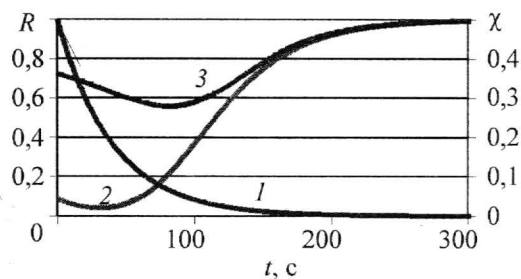


Рис. 1. Зависимость показателя поглощения (кривая 1) и коэффициента отражения света (кривые 2, 3) от времени для разных углов падения света: 2 – 45°; 3 – 85°

1. В общем случае сигнал сенсора будет не-монотонно зависеть от концентрации определяемого компонента в окружающей среде, что не позволяет однозначно трактовать результаты определения и снижает его чувствительность.

Учитывая, что при заданном угле падения и длине волны света значение коэффициента отражения определяется толщиной слоя и его показателем поглощения, а следовательно концентрацией чувствительного вещества в слое, подбором этих двух параметров можно добиться того, что в начальный момент времени коэффициент отражения света будет минимален, т.е. $R_0 = R_{\min}$. В этом случае при изменении концентрации определяемого компонента сигнал сенсора будет изменяться монотонно.

2. Максимальный диапазон изменения сигнала сенсора определяется выражением

$$Q_{\max} = \left(\frac{R_{\infty}}{R_{\min}} \right)^q = \left(\frac{1}{R_{\min}} \right)^q.$$

На рис.2 представлена зависимость Q_{\max} от угла падения для структуры, параметры которой приведены выше. Видно, что максимальный эффект достигается при падении луча света под углом, равным критическому (для рассматриваемой структуры – 43,2°).

На рис.3 представлены зависимости R_{\min} и Q_{\max} от толщины слоя для одного отражения при оптимальном угле падения светового луча на границу раздела волновод – слой.

Монотонное уменьшение минимального коэффициента отражения с увеличением толщины слоя сопровождается увеличением Q_{\max} . При $h = \frac{5}{4}\lambda$ минимальный коэффициент отражения R_{\min} составляет ~ 1%, а $Q_{\max} \sim 100$, что является хорошим результатом для чувствительного элемента сенсора. Увеличение числа отражений позволяет уменьшить толщину слоя, что должно улучшить динамические характеристики сенсора (время отклика, время возврата), так как они в первую очередь зависят от скорости хемосорбции – десорбции определяемого компонента в объеме слоя, а следовательно – от толщины слоя.

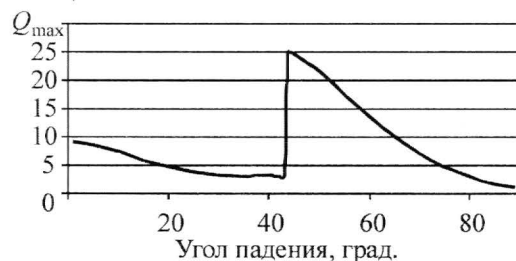


Рис. 2. Зависимость Q_{\max} от угла падения луча на границу раздела волновод – слой при однократном отражении ($n_0 = 1,46$; $n_1 = 1,5$; $h = \frac{\lambda}{2}$)

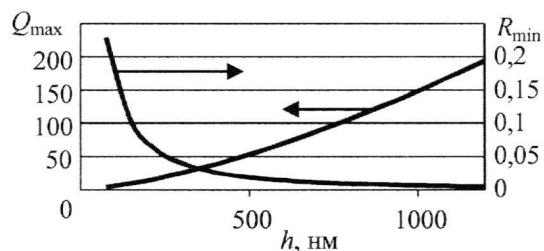


Рис. 3. Зависимости минимального коэффициента отражения R_{\min} и Q_{\max} от толщины слоя при однократном отражении ($n_0 = 1,46$; $n_1 = 1,5$)

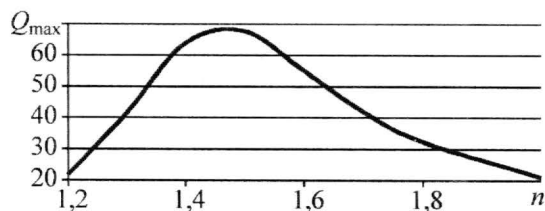


Рис. 4. Зависимость Q_{\max} от показателя преломления слоя ($h = \lambda$, $\varphi = 45^\circ$)

Величина Q_{\max} немонотонно зависит от показателя преломления слоя (рис.4). Максимум на кривой соответствует диапазону значений показателя преломления 1,4–1,5. Для кварцевого волновода этому диапазону соответствует минимальное значение коэффициента отражения от границы волновод – слой. Поэтому процессы, происходящие в слое, оказывают максимальное влияние на величину светового потока в волноводе.

Таким образом, рассмотренная в работе конструкция газового оптического сенсора сочетает в себе достоинства фотометрических сенсоров с сенсорами на основе оптического волокна и в то же время обеспечивает высокую чувствительность. Одновременно она проще в технологическом исполнении и позволяет в процессе формирования широко использовать технологические операции, применяемые для изготовления интегральных схем, что в перспективе дает возможность минимизировать размеры чувствительного элемента сенсора.

Литература

1. Ландсберг Г.С. Оптика. – М.: Наука, 1976. – 928 с.
2. Борн М., Вольф Э. Основы оптики. – М.: Наука, 1973. – 720 с.
3. UV – Vis absorption optosensing materials based on metallophthalocyanines thin films / J.Spadavecchia, G.Ciccarella, G.Vasapollo et al. / Sensors and Actuators. – 2004. – В 100. – Р. 135–138.
4. Березин Б.Д. Координационные соединения порфиринов и фталоцианина. – М.: Наука, 1978. – 280 с.
5. Золотарев В.М., Морозов В.Н., Смирнова Е.В. Оптические постоянные природных и технических сред: Справочник. – Л.: Химия, 1984. – 216 с.

Статья поступила
8 ноября 2007 г.

Борисов Александр Григорьевич – кандидат технических наук, доцент кафедры общей химии и экологии МИЭТ. *Область научных интересов:* оптические сенсоры.

Маханько Евгения Сергеевна – аспирант кафедры общей химии и экологии МИЭТ. *Область научных интересов:* разработка газовых сенсоров.

Чиликина Татьяна Дмитриевна – кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник отдела содействия научным исследованиям МИЭТ. *Область научных интересов:* материалы электронной техники.

Иванова Ольга Михайловна – кандидат химических наук, начальник отдела разработки сенсоров ОАО «Практик-НЦ» (г. Москва). *Область научных интересов:* материалы для газовых сенсоров.

Крутоверцев Сергей Аркадьевич – кандидат технических наук, генеральный директор ОАО «Практик-НЦ» (г. Москва). *Область научных интересов:* разработка и производство сенсоров влажности, газовых сенсоров и приборов контроля на их основе.

Лазерный детектор дистанционного обнаружения газов CO_2 , CH_4 и NH_3

А.Д.Бритов

Московский энергетический институт (технический университет)

В.М.Белоконев

ФГУП «Альфа» (г. Москва)

А.И.Надеждинский, Д.Ю.Наместников, Я.Я.Понуровский

Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН

Представлен прототип прибора для одновременного измерения следовых концентраций газов CO_2 (1,60 мкм), CH_4 (1,65 мкм) и NH_3 (1,51 мкм) на основе диодных гетеролазеров с одномодовым волоконным выводом излучения. Управление трехканальным газоанализатором производилась с использованием станции ввода/вывода National Instruments PXI-6289M и режима временного мультиплексирования для трех независимых лазерных источников. Достигнутая чувствительность газоанализатора на трассе 100 м составила для $\text{CH}_4 \sim 300$ ppb, для $\text{CO}_2 - 30$ ppm и для $\text{NH}_3 - 0,5$ ppm.

Дистанционное обнаружение следовых концентраций различных газовых примесей в атмосфере является актуальной задачей научного приборостроения. При разработке «электронного носа» перспективным является лазерно-спектроскопический метод, основанный на перестраиваемых по частоте полупроводниковых лазерах и получивший название диодная лазерная спектроскопия (ДЛС). Этот метод имеет ряд неоспоримых преимуществ перед другими оптическими методами [1, 2].

С помощью метода ДЛС, взятого за основу при создании детектора, обеспечивает обнаружение человека по его химическому полю, взрывчатых веществ по их летучим компонентам, утечки метана в газопроводах, а также решаются многие другие прикладные задачи. В Институте общей физики им. А.М. Прохорова РАН (ЦЕНИ ИОФ РАН) создан экспериментальный образец детектора. При разработке принципиальной схемы детектора, удовлетворяющей методу ДЛС, решались две основные задачи:

- 1) выбор оптимальной спектральной области аналитических линий поглощения искоемых газов;
- 2) выбор оптимальных лазеров и фотоприемников, используемых в измерительной системе.

С целью выбора спектральной области наблюдения исследован спектр молекулярного поглощения основных газов, используемых для обнаружения объектов, предназначенных для детектирования, в том числе и человека. Одновременно проанализированы промышленно выпускаемые гетеролазеры с точки зрения возможности их применения в различных диапазонах длин волн, надежности и экономичности.

Необходимо отметить, что с точки зрения интенсивности молекулярного поглощения наиболее приемлемым является средний и дальний ИК-диапазон (2,3–10 мкм), где располагаются фундаментальные полосы поглощения различных молекул. В ближней

ИК-области расположены, как правило, лишь обертоны и комбинационные частоты основных полос, обладающие значительно меньшей интенсивностью. Тем не менее были выбраны гетеролазеры ближнего ИК-диапазона (рис.1). Основная причина этого в том, что существующие в настоящее время полупроводниковые лазеры среднего ИК-диапазона функционируют лишь при низких температурах и чаще всего для их работы требуется охлаждение жидким азотом. Это создает значительные трудности практического использования газоанализаторов, в то же время полупроводниковые лазеры и приемники ближнего ИК-диапазона (0,8–2,3 мкм) работают при температурах, близких к комнатной.

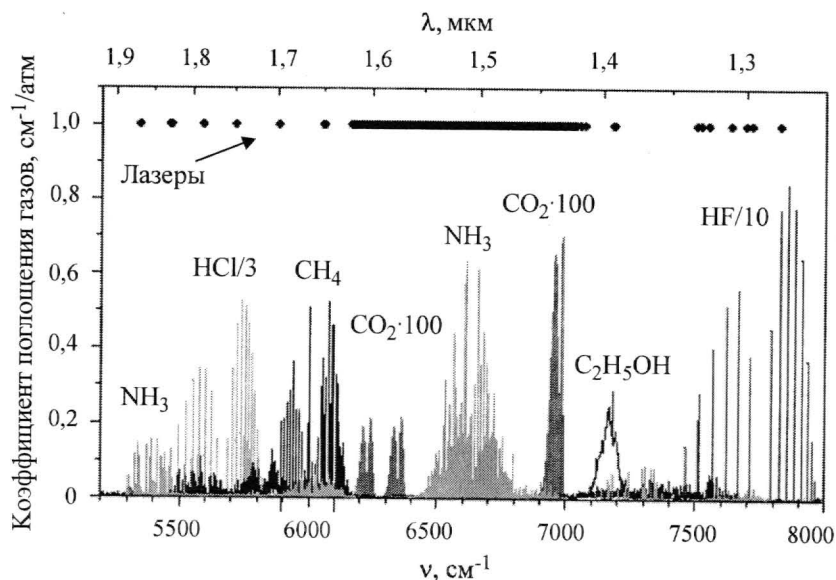


Рис.1. Спектры молекул в ближней ИК-области и частоты промышленно выпускаемых гетеролазеров

В результате проведенного анализа с учетом пропускания атмосферы выбраны аналитические линии поглощения для одновременного мониторинга трех молекулярных объектов – биомаркеров химического поля человека как наиболее универсальных из всех продуктов жизнедеятельности человека: NH_3 (1,51 мкм), CO_2 (1,60 мкм) и CH_4 (1,65 мкм). Следующим этапом исследований стал выбор конструкции применяемого в системе лазера.

Работы Хинкли [3, 4] положили начало применению перестраиваемых диодных лазеров в молекулярной спектроскопии высокого разрешения. Одним из уникальных свойств полупроводниковых гетеролазеров является их способность к перестройке по частоте в достаточно широких пределах простыми аппаратными средствами [5, 6]. При необходимости изменения частоты излучения в достаточно широких пределах ($50\text{--}100\text{ см}^{-1}$) можно использовать изменение рабочей температуры лазера. Для более прецизионного сканирования частоты в области линии поглощения (порядка $1,5\text{--}2\text{ см}^{-1}$) используется режим сканирования с помощью изменения тока накачки гетеролазера. Изменение тока приводит к изменению пространственных функций распределения температуры и концентрации носителей в активной области лазера и, как следствие, к изменению эффективного показателя преломления последней и частоты излучения гетеролазера. В настоящее время можно получать гетеролазеры на основе твердых растворов $\text{A}^{\text{III}}\text{B}^{\text{V}}$ и $\text{A}^{\text{IV}}\text{B}^{\text{VI}}$, перекрывающие спектральный диапазон от ближнего УФ-диапазона до дальнего ИК-диапазона.

На рис.2 представлена блок-схема трехканального детектора следов газовых примесей в атмосфере на основе гетеролазеров с распределенной обратной связью (РОС).

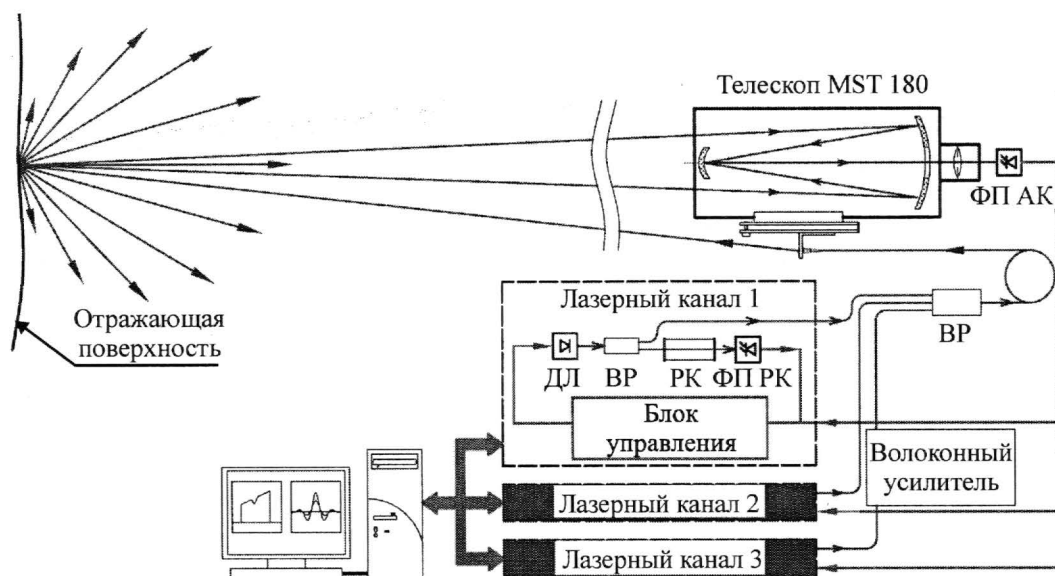


Рис.2. Блок-схема трехканального детектора следов газовых примесей в атмосфере на основе РОС-гетеролазеров

Излучение диодных лазеров (ДЛ) делится на Y-образных волоконных разветвителях на аналитический и реперный каналы. Излучение аналитических каналов объединяется и направляется на топографический отражатель. Малая часть отраженного излучения принимается телескопической системой (MST 180) и регистрируется фотоприемником аналитического канала. Излучение реперного канала в каждом из трех независимых лазерных каналов проходит через реперную кювету, наполненную опорным газом с известным давлением и концентрацией и принимается фотоприемником реперного канала. Накачка трех РОС гетеролазеров осуществляется импульсами трапецевидной формы длительностью для каждого лазера порядка 500 мкс с частотой повторения импульсов от каждого лазера порядка 0,55 кГц. При этом между импульсами от разных лазеров осуществляется задержка порядка 100 мкс. Частота опроса каналов ЦАП/АЦП платы составляет 40 кГц.

Далее для каждого из трех лазерных каналов применяется единый алгоритм обработки сигналов. Эта операция проводится для аналитического и реперного каналов независимо друг от друга с целью определения количественного содержания анализируемого газа.

С помощью температурной стабилизации гетеролазер выводится в необходимый частотный диапазон генерации. После этого на него подается импульс тока трапецевидной формы с наложением модуляции (рис.3,а). Это позволяет сканировать линию поглощения фактически два раза за один импульс сканирования частоты и избавляться в дальнейшем от механических помех путем математической обработки сигнала. Глубина модуляции выбирается из условия, чтобы изменение частоты при изменении тока было значительно меньше ширины линии поглощения.

После приема сигнала фотоприемником осуществляется разделение сигналов S_1 и S_2 внутри импульса сканирования (рис.3,б), берется логарифм отношения этих сигналов, в результате чего получаем функцию $X(t)$ (рис.3,в).

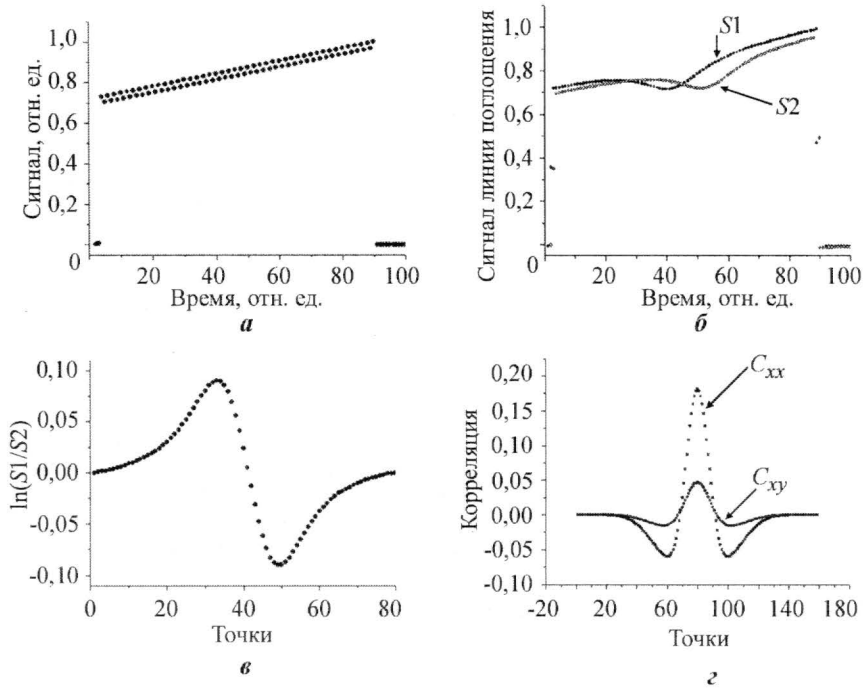


Рис.3. Этапы обработки принимаемого сигнала при определении концентрации: а – сигнал, генерируемый лазером; б – сигнал фотоприемника при сканировании линии поглощения; в – логарифм отношения сигналов на разнесенных частотах S1 и S2; г – функции автокорреляции реперного канала C_{xx} и корреляции аналитического канала с реперным C_{xy}

После проведения корреляционной обработки сигналов реперного и аналитического каналов можно рассчитать концентрацию искомого газа в аналитическом канале в относительных единицах ppm, что соответствует концентрации молекул газа на данной трассе (1 ppm = 10^{-6} молекул в объеме):

$$C = \frac{\alpha P_r L_r}{P_a L_a} \cdot 10^6,$$

где α – коэффициент корреляции сигналов в реперном и аналитическом каналах; P_r – парциальное давление газа в реперном канале, P_a – атмосферное давление; L_r , L_a – расстояние, проходимое лазерным излучением в реперном и аналитическом каналах соответственно.

С целью идентификации объекта по анализируемым газам проводится одновременное детектирование с помощью трех гетеролазеров. В данной системе этот режим осуществляется методом, который можно назвать временным мультиплексированием (рис.4). Суть метода заключается в разнесении во времени импульсов от разных лазеров, в результате чего фотоприемник принимает последовательность импульсов трапецевидной формы от трех лазеров с частотой следования порядка 1,66 кГц. Использование режима временного мультиплексирования позволяет проводить одновременные измерения содержания нескольких молекул (в существующей конфигурации возможна реализация до 6 независимых лазерных каналов). При этом время одиночного измерения пропорционально числу измеряемых компонент.

Для осуществления предложенного метода в разработанной системе использовалась рабочая станция National Instruments PXI-1031DC совместно с многоканальными платами ввода/вывода National Instruments PXI-6289M и программным обеспечением, специально

написанным в LabView 7.1. Созданный трех-канальный детектор следов газов успешно испытан в лабораторных и полевых условиях и продемонстрировал отличные результаты по одновременной дистанционной регистрации трех молекулярных объектов CO_2 , CH_4 и NH_3 на расстоянии до 100 м.

На рис.5 и 6 представлены результаты лабораторных испытаний по дистанционной регистрации следов газов в атмосфере на трассе 50 м. В ходе эксперимента с небольшими интервалами выпускались контрольные газы: CO_2 (99,96%) – 5 л, CH_4 (99,99%) – 0,5 л и NH_3 (99,99%) – 0,01 л (см. рис.5). На графиках показаны результаты измерений концентраций этих газов во времени. Приведены интегральные (по всей длине измеряемой трассы) значения концентраций газов.

Главным результатом можно считать отсутствие влияния выпуска калиброванной пробы одного вида газа на измерение содержания двух других. Это обстоятельство является принципиальным и говорит о селективности метода измерения.

Результаты лабораторных испытаний по дистанционной регистрации несанкционированного присутствия человека в помещении по молекулярному объекту CO_2 представлены на рис 6. На рис.6,а показаны результаты долговременных измерений. Видно превышение концентрации CO_2 в районе 16 ч, вызванное присутствием в помещении 5 человек в течение 10 мин. На рис.6,б представлены результаты аналогичного эксперимента с участием 11 человек, находившихся в помещении в течение 8 мин.

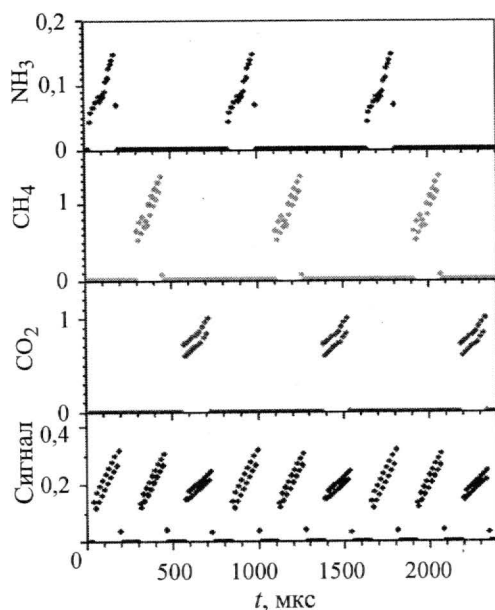


Рис.4. Режим временного мультиплексирования сигнала

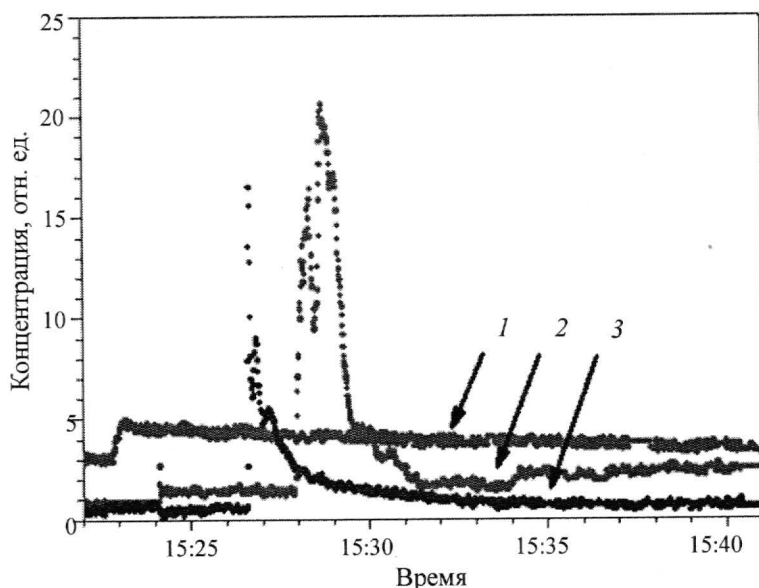


Рис.5. Одновременная регистрация следов газов на трассе 50 м:
1 – CO_2 (ppm/100); 2 – CH_4 (ppm); 3 – NH_3 (ppm·10)

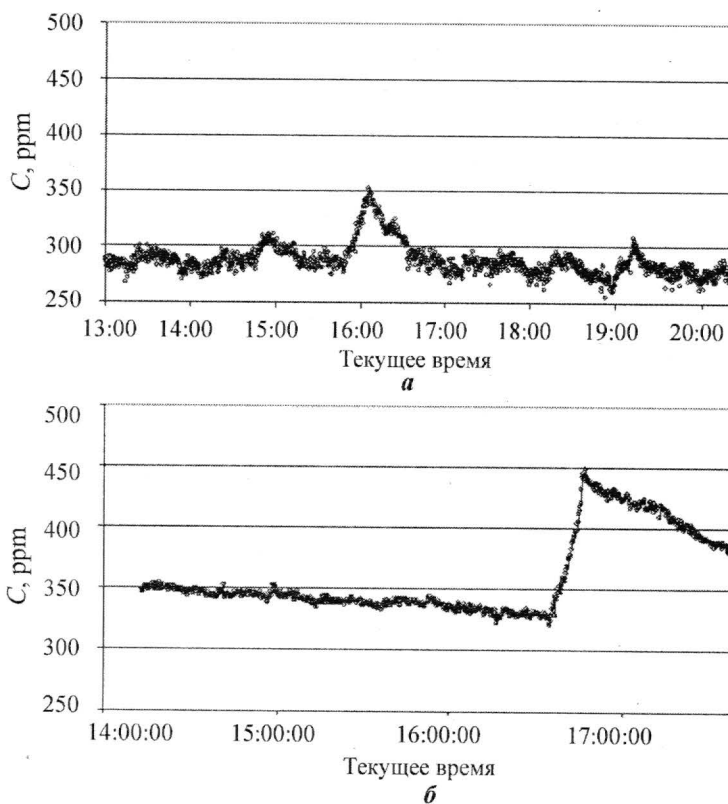


Рис. 6. Дистанционная регистрация несанкционированного присутствия людей в помещении: а – 5 человек в течение 10 мин; б – 11 человек в течение 8 мин

Таким образом, впервые создана система, способная вести мониторинг по трем молекулярным объектам одновременно. Разработанный алгоритм накачки гетеролазеров с математической обработкой сигнала с фотоприемника позволил получить чувствительность на уровне 300 ppb для CH_4 , 30 ppm для CO_2 и 0,5 ppm для NH_3 на трассе до 100 м.

Материалы статьи были доложены на III Международной научно-технической конференции «Информационные технологии в науке, технике и образовании» (Республика Абхазия, Пицунда, 19-29 сентября 2007 г.).

Литература

1. Электронный нос и проблемы безопасности / А.Г.Березин, А.Д.Бритов, Д.Ю.Наместников и др. // Наука и технологии в промышленности. – 2005. – № 3. – С. 31.
2. Березин А.Г., Бритов А.Д., Надеждинский А.И., Наместников Д.Ю. / Оптико-электронный детектор утечек метана // Материалы междунар. научн.-техн. конф. «Фундаментальные проблемы радиоэлектронного приборостроения». – М.: 2004. – Ч. 1. – С. 2091.
3. Hinkley E.D. High-resolution infrared spectroscopy with a tunable diode laser // Appl. Phys. Lett. – 1970. – Vol. 16, Issue 9. – P. 351–354.
4. Hinkley E.D. Laser Monitoring of the Atmosphere // Topics in Appl. Phys. – Berlin: Springer, 1976. – Vol. 14. – P. 157.

5. Дистанционное детектирование ВВ методами диодной лазерной спектроскопии (ДЛС) / **А.И.Надеждинский, Д.Ю.Наместников, Я.Я.Понуровский и др.** // Тез. докл. V общероссийского семинара по диодной лазерной спектроскопии (ДЛС). – М., 2006. – С. 4.

6. Дистанционное обнаружение следов газов / **А.И.Надеждинский, Д.Ю.Наместников, Я.Я.Понуровский и др.** // Сб. тр. III Научн.-техн. конф. «Системы наблюдения, мониторинга и дистанционного зондирования земли» (11 – 15 сентября 2006 г.). – М.: МНТО РЭС им. А.С.Попова, 2006. – С. 37.

Статья поступила
26 ноября 2007 г.

Бритов Александр Дмитриевич – доктор физико-математических наук, профессор кафедры полупроводниковой электроники МЭИ, лауреат Ленинской премии. *Область научных интересов:* молекулярная диодная лазерная спектроскопия и газоанализ с использованием разработанных диодных газоанализаторов высокого разрешения и чувствительности, лазерные оптико-электронные приборы, физика квантовых систем.

Белоконев Виктор Михайлович – кандидат технических наук, заместитель директора ФГУП «Альфа» (г. Москва) по научной работе, начальник НТЦ. *Область научных интересов:* фотоприемники и фотоприемные устройства для тепловидения и инфракрасной техники, оптико-электронные приборы, лазерные приборы, тепловизионные приборы, приборы ночного видения.

Надеждинский Александр Иванович – доктор физико-математических наук, профессор ИОФ РАН. *Область научных интересов:* молекулярная диодная лазерная спектроскопия и газоанализ с использованием разработанных диодных газоанализаторов высокого разрешения и чувствительности, исследование поглощения атмосферных газов.

Наместников Дмитрий Юрьевич – научный сотрудник ИОФ РАН. *Область научных интересов:* лазерные оптико-электронные приборы, молекулярная диодная лазерная спектроскопия и газоанализ с использованием разработанных диодных газоанализаторов высокого разрешения и чувствительности.

Понуровский Яков Яковлевич – кандидат физико-математических наук, заведующий лабораторией ИОФ РАН. *Область научных интересов:* физика спектроскопии, молекулярная диодная лазерная спектроскопия и газоанализ с использованием разработанных диодных газоанализаторов высокого разрешения и чувствительности.

Информация для читателей журнала

«Известия высших учебных заведений. Электроника»

Вы можете оформить подписку на 2008 г. в редакции с любого номера.

Стоимость одного номера – 600 руб. (с учетом всех налогов и почтовых расходов).

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

Тел.: (495) 534-62-05. Факс: (495) 530-54-29. E-mail: magazine@rnd.miee.ru

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

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

УДК 004.42:004.272.3

Симулятор многоядерной вычислительной системы и примеры его применения

А.С.Кучинский

ГУП НПЦ «ЭЛВИС» (г. Москва)

Ф.М.Путря

Московский государственный институт электронной техники
(технический университет)

Рассмотрен симулятор, позволяющий оценивать производительность широкого спектра архитектур многоядерных систем на кристалле для различных алгоритмов. Показано, что одним из главных достоинств симулятора является возможность учета таких топологических и функциональных особенностей моделируемой архитектуры, как расстояние между элементами и стадийность вычислительного конвейера. Приведен пример моделирования работы программы быстрого преобразования Фурье на многоядерных архитектурах с различными совокупностями параметров составляющих их модулей.

Современные производители вычислительных систем различного назначения однозначно сделали выбор в пользу многоядерных систем на кристалле. Однако выбор оптимальной архитектуры многоядерной системы для определенного круга задач является далеко неочевидным.

В большинстве случаев выяснить реальную производительность новой многоядерной системы, не имеющей близких аналогов, удастся только после изготовления кристалла. Это обусловлено тем, что высокоуровневая модель, как правило, дает описание только функциональных возможностей системы, не учитывая при этом ряда особенностей, существенно влияющих на ее производительность, а моделирование RTL-модели – очень медленный процесс, что исключает возможность проверки системы на реальных приложениях до изготовления кристалла. Еще более усложняет задачу выбора архитектуры тот факт, что для получения первых оценок производительности необходима разработка полного RTL-описания системы. Это является довольно трудоемким процессом и исключает возможность анализа различных вариантов систем на этапе выбора архитектуры. Ряд симуляторов, например разработанных для процессоров Niagara фирмы SUN [1] и CELL фирмы IBM [2], позволяют оценивать производительность этих процессоров, получая результаты с погрешностью от 4 до 10% относительно RTL-модели. Однако данные симуляторы привязаны к конкретным архитектурам процессоров. Кроме того, в процессе проектирования системы в текущий проект приходится вносить множество изменений, а иногда и довольно существенные коррекции,

обусловленные серьезными задержками на линиях связи внутри кристалла. В результате этого могут меняться стадийность конвейера вычислительных ядер, времена доступа к модулям памяти и ряд других параметров. Эти параметры существенно влияют на производительность системы, однако существующие симуляторы не обладают достаточной гибкостью для анализа их влияния на производительность всей системы.

Разработка универсального симулятора. В настоящей работе предлагается решение, позволяющее оценивать влияние вносимых структурных изменений на производительность системы еще на этапе проектирования кристалла. Разработанный симулятор представляет собой отдельное программное обеспечение, предназначенное для проведения предварительной оценки производительности и анализа обменных процессов в многоядерных вычислительных системах на этапе выбора архитектуры многоядерной системы и на ранних стадиях разработки этой системы, а также для анализа эффективности выполнения программ на выбранной архитектуре. Симулятор предоставляет широкие возможности для моделирования различных архитектур многоядерных систем на кристалле с произвольным числом вычислительных ядер. При этом моделируемая система с помощью графического интерфейса пользователя собирается из определенного набора стандартных элементов, между которыми задаются связи. После этого производится более детальная настройка каждого элемента системы и связей между ними. Симулятор позволяет моделировать как симметричные системы с общей или разделенной памятью, так и структуры с асимметричным доступом к памяти, а также структуры, комбинирующие в себе эти подходы. Для создания систем с общей памятью в набор стандартных элементов, из которых собирается моделируемая система, введены специальные модули арбитража, организующие доступ нескольких ведущих устройств к одному ведомому. При этом моделируемая система может быть построена на основе шинной архитектуры, а также на основе коммутатора с пространственным разделением, например такого, как АНВ BUSMATRIX [3]. В качестве средств обмена данными между ядрами могут быть использованы каналы DMA (Direct memory access), обменный буфер либо общая память, если система собрана как система с общей памятью. В каждый функциональный модуль встроены мониторы, собирающие информацию о характере работы устройства. Результатом работы симулятора является информация об общем времени выполнения программ, о времени простоя ядер, наличии конфликтов между элементами структуры, причинах простоя, а также количественные оценки загруженности шин. Это дает разработчику системы исчерпывающую информацию, необходимую как для оптимизации программ и алгоритмов под конкретную архитектуру, так и для оптимизации самой многоядерной архитектуры.

Особенности симулятора. Одним из основных преимуществ симулятора является возможность учета топологических расстояний между элементами моделируемой системы. Например, связи между элементами задаются с помощью параметризованных очередей типа FIFO, при этом задается как глубина очереди, так и ширина, определяющая количество одновременных обращений по связи и их разрядность. При этом задается и метод передачи данных по очереди, эмитирующей связь. Очередь может работать как обычный буфер, выполняя задержку обращения при передаче по связи, либо как очередь типа FIFO, внося амортизирующий эффект в процесс обмена данными между элементами. Это позволяет при моделировании в полной мере учитывать физические расстояния между любыми элементами и способ их соединения на кристалле.

В логику модулей арбитража заложен ряд механизмов разрешения конфликтов, что позволяет проанализировать, какой из механизмов арбитража и набор значений параметров (значение ограничителя *lim*, режим определения плотности потоков, длины входных очередей и т.д.) будут оптимальными для конкретной задачи.

Модель вычислительного ядра также имеет определенную гибкость настройки. Программно может быть задано количество стадий конвейера, требуемых на выборку и декодирование, количество исполнительных стадий конвейера, а также включение или выключение механизма ByPass (рис.1). Длина инструкции (количество операций в одной инструкции) также является параметром. Система команд вычислительного ядра задается пользователем, что не привязывает симулятор к какой-либо конкретной реализации ядра.

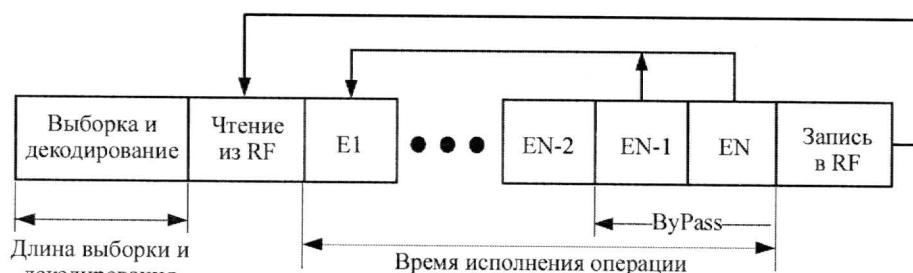


Рис.1. Конвейер вычислительного ядра (указано влияние длины конвейера и параметра ByPass на работу ядра)

Для ускорения моделирования не проводится арифметических вычислений, а зависимости между инструкциями анализируются перед стартом симулятора. Дополнительный анализ зависимостей в процессе моделирования производится только на последних командах аппаратно-реализованных циклов.

Программно задается способ организации памяти (разбиение на физические блоки, их количество и способ размещения адресов по этим блокам), определяется время доступа к каждому блоку памяти. Путем задания связей между ядрами и блоками памяти через модули арбитража в симуляторе можно создавать системы со сложной иерархией памяти, что дает возможность моделировать архитектуры с асимметричным доступом к памяти. Для каждой связи определяется наличие или отсутствие буферизации.

Перечисленные возможности симулятора позволяют не только моделировать различные архитектуры, но и производить гибкую настройку выбранной архитектуры для учета ряда функциональных и топологических особенностей и анализа влияния этих особенностей на производительность системы. Такая гибкость вместе с возможностью учета расстояний между элементами выгодно отличает разработанный симулятор от аналогов, позволяя уже на этапе проектирования системы оценивать, как предлагаемое функциональное изменение либо корректировка топологии будет влиять на производительность системы в целом, а также сравнивать производительность разных архитектурных решений многоядерных систем.

Для сравнения рассматриваемой программы со стандартным RTL-симулятором выбрана RTL-модель разрабатываемого на фирме «ЭЛВИС» многоядерного процессора, RTL-симулятор NCSIM фирмы Cadence. Параметры моделируемой архитектуры были настроены под конкретный процессор. Сравним время моделирования различных тестов на разработанном и на RTL-симуляторе:

Тест	Симулятор	RTL-симулятор
Перемножение матриц.....	< 1с	90–100 с
Быстрое преобразование Фурье (БПФ).....	27–30 с	54–60 мин

Видно, что при настройке всех параметров симулятора под RTL разрабатываемого многоядерного процессора расхождение оценок производительности, полученных на симуляторе, с результатами моделирования RTL составляет не более 2–3% (рис.2).

Таким образом, применение разработанного симулятора заметно ускоряет процесс выбора оптимального архитектурного решения для проектируемой системы, так как отсутствует необходимость разработки RTL для каждого варианта и значительно ускоряется процесс моделирования.

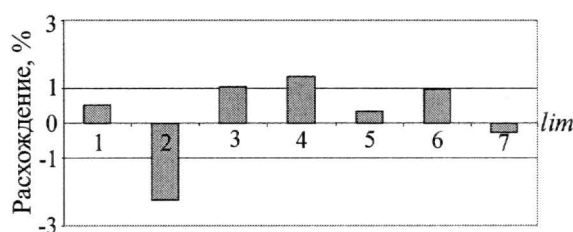


Рис.2. Сравнение производительности системы, полученной в результате моделирования ее RTL-описания, с оценкой производительности на разработанном симуляторе для различных *lim*

Пример использования симулятора для анализа алгоритма БПФ, реализованного на различных вычислительных системах. Разработанный симулятор позволяет моделировать широкий спектр архитектур, проводя гибкую настройку каждого варианта моделируемой структуры. Для демонстрации возможностей симулятора рассмотрим пример анализа алгоритма БПФ на системах с управляющим RISC ядром и четырехъядерным кластером DSP с асимметричным доступом к общей памяти. В каждой из моделируемых архитектур внутренняя память состоит из 32 блоков объемом по 16 кбайт, а количество каналов DMA равно количеству ядер DSP в многоядерном кластере. В процессе анализа сравнивались результаты для различных вариантов структур с перечисленными параметрами, отличающимися организацией доступа к памяти и механизмом арбитража.

Для моделирующей задачи выберем алгоритм, основанный на матричном подходе к вычислениям [4]. Этот алгоритм можно распараллелить на два или три асинхронных во времени потока. Один поток будет вычисляться на первом ядре DSP, а второй – на другом. Также есть вариант реализации одномерного БПФ с использованием трех ядер при разбиении задачи на 3 этапа. При необходимости реализации двумерного БПФ возможно запустить эту же программу, изменив лишь схему адресации данных с помощью устройства генерации адресов (адресного генератора), на двух других ядрах и выполнять все вычисления параллельно.

Схема вычислений БПФ, реализованного на четырехъядерной системе. Обработка производится по матричной схеме вычислений. В такой схеме одномерный сигнал представляется в виде матрицы. Первое вычислительное ядро обрабатывает исходный сигнал по столбцам, второе ядро производит промежуточное умножение на поворачивающие векторы, а третье – вычисления по строкам. Разделение памяти данных организовано по принципу двух буферов. Данный принцип основан на том, что, пока идет запись исходных данных из внешнего источника (внешние каналы DMA, внешние устройства и т.д.) во внутреннюю память данных, вычисления производятся по буферу, который уже заполнен на предыдущей итерации записи исходных данных в память.

Анализ результатов моделирования. Для анализа эффективности работы программы БПФ на разных вариантах многоядерных систем была использована функция параметрического анализа, интегрированная в симулятор. Эта функция циклически запускает моделируемую программу, в каждой итерации цикла автоматически меняется один параметр моделируемой структуры, и программа запускается заново. Количество тактов, затраченных на выполнение моделируемой программы, а также другая служеб-

ная информация (количество блокировок при обращениях к памяти, время работы, количество тактов в каждом вычислительном ядре и т.д.) сохраняются в файл для дальнейшего анализа. Анализ проводится по следующему алгоритму:

- определяется множество значений количества тактов, затраченных на выполнение алгоритма;
- для каждого значения из множества определяется, какие параметры не изменяются (эти параметры ядер и модулей арбитража не влияют на работу многоядерной системы);
- определяются параметры, изменение которых не ведет к принципиальному изменению количества тактов, затраченных на выполнение алгоритма.

Далее эта информация используется для того, чтобы определить, какими рабочими параметрами должна обладать многоядерная система, чтобы с наибольшей эффективностью решать задачу по вычислению БПФ.

Результаты моделирования программы БПФ на четырехъядерной системе. В результате анализа результатов, полученных в процессе моделирования работы программы БПФ на четырехъядерной системе, установлено следующее.

Минимальное количество тактов, необходимых для исполнения программы БПФ, равно 195739. Этот эффект достигается при параметрах системы, представленных в строке с номером позиции 1 (таблица). Изменение какого-либо из указанных параметров ведет к увеличению задержек при работе с памятью и, соответственно, количества тактов, необходимых для выполнения алгоритма БПФ на модели четырехъядерной системы. В процессе моделирования происходит перебор всех возможных ситуаций с помощью циклического запуска моделируемой программы БПФ, что позволяет оценить долю влияния каждого из параметров системы. В частности, выявлено, что наиболее сильное влияние на количество тактов, необходимых для выполнения БПФ на четырехъядерной системе, оказывают три параметра: буферизация записи; буферизация чтения; группировка адресов памяти по блокам.

Результаты моделирования многоядерной системы на разработанном симуляторе

Номер позиции	Метод арбитража	Буферизация записи	Буферизация чтения	Разрядность счетчиков	Группировка адресов памяти по блокам	Параллельные обращения к одной группе	FIFO-амортизация	Количество тактов
1	Статический	1	1	0-5	2-6	1	1	195739
2	Циклический	1	1	0-5	2-6	1	1	195753
4	По максимальному количеству блокировок	1	1	0-5	2-6	1	1	195856
5	По минимальному количеству обращений	1	1	0-5	2-6	1	1	195895
7	Статический	0	1	0-5	2-6	1	1	261276
8	Статический	1	0	0-5	2-6	1	1	275430
9	Статический	0	0	0-5	2-6	1	1	357934
3	Статический	1	1	0-5	2-6	0	1	195843
6	Статический	1	1	0-5	2-6	1	0	196608

Симулятор позволяет получить количественную информацию о времени простоя вычислительных ядер и причинах этого простоя. На рис.3 приведено сравнение суммарного количества блокировок разного типа для структур, использующих и не использующих буферизацию обращений к памяти.

Результаты моделирования представлены в таблице, где в строке с номером позиции 1 приведено наиболее оптимальное сочетание параметров модулей многоядерной системы. Такая совокупность параметров модулей обеспечивает выполнение программы БПФ на четырехъядерной системе с минимальным количеством тактов. В строках с номерами позиций больше или равно 2 показано влияние изменения одного параметра системы относительно оптимальной конфигурации на количество тактов, требуемых для выполнения программы БПФ.

Приведенный пример анализа программы БПФ показывает, что разработанный симулятор позволяет оценивать производительность различных конфигураций многоядерных архитектур с учетом множества функциональных параметров. Подобная гибкость, исчерпывающий объем информации о причинах простоя системы и возможность учета топологических расстояний между элементами выгодно отличают его от существующих аналогов. Существенное по сравнению с RTL-симуляторами уменьшение времени моделирования ускоряет процесс выбора оптимального архитектурного решения для проектируемой системы и упрощает анализ влияния различных параметров системы на ее производительность. Симулятор позволяет облегчить оптимизацию программ под конкретную архитектуру, однако он предназначен только для предварительного анализа производительности. Для окончательной оптимизации следует пользоваться результатами, полученными на реальном кристалле.

Литература

1. Davis J.D., Fu C., Laudon J. The RASE (Rapid, Accurate Simulation Environment) for chip multiprocessor // Computer Architecture News. – 2005. – Vol. 33, N 4. September – P. 14–23.
2. www.ibm.com
3. Soo-Yun Hwang, Kyoung-Sun Jhang An Improved Implementation Method Of AHB BUSMATRIX // IEEE Intern. SOC Conf. – 2005. – P. 211–214.
4. Воеводин В.В. Вычислительная математика и структуры алгоритмов. – М.: Изд-во Московского ун-та, 2006. – 112 с.

Статья поступила 5 декабря 2007 г.

Кучинский Александр Сергеевич – старший инженер-программист ГУП НПП «ЭЛВИС» (г. Москва). *Область научных интересов:* программирование, цифровая обработка сигналов, микроэлектроника, микропроцессоры, многоядерные системы на кристалле.

Путря Федор Михайлович – аспирант кафедры интегральной электроники и микросистем МИЭТ. *Область научных интересов:* микроэлектроника, микропроцессоры, многоядерные системы на кристалле, цифровая обработка сигналов.

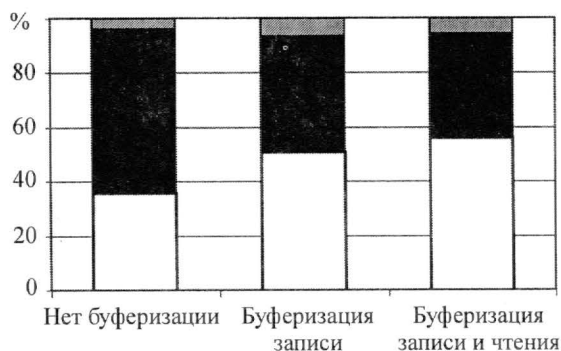


Рис.3. Соотношение блокировок, вызванных зависимостями по данным, и блокировок, вызванных конфликтами при одновременных обращениях к блокам памяти и при обращении к дальней памяти, для разных конфигураций моделируемой структуры: ■ – конфликты арбитража; □ – доступ к дальней памяти; ▒ – зависимости по данным

Кодирование с предсказанием в модифицированной системе сжатия методом ДИКМ

В.Н.Земсков, С.В.Бегишев

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

Предложена новая методология построения адаптивных алгоритмов кодирования с предсказанием, применимых в модифицированной системе сжатия методом ДИКМ. Адаптация предсказателя к локальной статистике изображения основывается на байесовской оценке апостериорной вероятности в комбинации с прогнозом по Грэхему. Сжатие осуществляется либо адаптивным RPPM-кодером, либо статистическим кодированием длин нулевых серий. Приводятся результаты обработки ряда тестовых изображений, показывающие эффективность предложенной методики и сопоставимость по качеству с известным стандартом JPEG 2000.

Сжатие изображений является актуальной задачей при решении проблемы обмена визуальной информацией, поскольку в последнее время объем визуальных данных растет быстрее, чем емкость накопителей и пропускная способность каналов связи.

В практике цифровой обработки изображений хорошо известна система сжатия методом дифференциальной импульсно-кодовой модуляции (ДИКМ) [1, 2]. В этом методе используется статистическая связь яркостей соседних пикселей изображения (межэлементная избыточность) и для каждого текущего пикселя формируется предсказание (прогноз) на основе линейной комбинации ранее декодированных пикселей. Затем вычисляется разность между фактическим значением яркости и ее предсказанным значением (ошибка предсказания). Полученная разность квантуется, после чего подвергается кодированию и передается по каналу.

На приемном конце символы декодируются, а информация восстанавливается с помощью схемы линейного предсказания, идентичной той, которая использовалась при сжатии. Требование идентичности предсказателя приводит к необходимости включить квантователь в петлю обратной связи с предсказателем. Тем самым схема с обратной связью предотвращает накопление неконтролируемой ошибки на выходе декодера и позволяет восстановить изображение с наименьшими потерями, определяемыми главным образом ошибками квантования.

Заметим, что сжатие в схеме ДИКМ достигается за счет некоторого сокращения динамического диапазона и существенного уменьшения дисперсии разностей по сравнению с дисперсией входного сигнала. При этом характеристики сжатия определяются точностью предсказывающего устройства, качеством работы квантователя и эффективностью кодирования.

Основное достоинство дифференциального кодирования – это его простота: реализация метода не требует значительных аппаратных затрат как на внутреннюю память системы, так и на вычислительные операции. Основной недостаток – слабая адаптация линейного предсказателя к локальным статистическим свойствам изображения. Следствием этого является сравнительно невысокая эффективность сжатия (1–3 бита на пиксель), поэтому система ДИКМ находит ограниченное применение на практике.

В настоящей работе исследуются теоретические и практические аспекты построения адаптивных алгоритмов кодирования с предсказанием, применимых в так называемой модифицированной системе дифференциальной импульсно-кодовой модуляции (МСДИКМ).

Принципиальная схема, назначение и работа блоков МСДИКМ приведены в [3]. Данная система имеет два принципиальных отличия от описанной выше классической схемы ДИКМ. Во-первых, квантователь располагается перед предсказателем и отсутствует петля обратной связи. В результате такой перестановки значения сигнала с выхода квантователя будут восстановлены без ошибки на приемнике после декодирования. Это позволяет контролировать качество восстановленного изображения уже на начальном этапе сжатия. Во-вторых, разностный сигнал после предсказания принимает лишь целочисленные значения в узком диапазоне $[-k+1; k-1]$, где k – число уровней квантования. При этом в результате работы предсказателя с высокой степенью адаптации число нулевых значений разностного сигнала, образующих серии разной длины, составляет для большинства исследуемых изображений не менее 80% от всего множества значений сигнала. Используя эффективные методы контекстного кодирования, можно получить достаточно высокие коэффициенты сжатия.

Рассмотрим более подробно основу построения адаптивного алгоритма кодирования с предсказанием для системы МСДИКМ. Вначале опишем два базовых алгоритма предсказания (Грэхема и Байеса), которые будут использоваться далее.

Обозначим $Q = (q(i, j))$, $(i, j) \in \Omega = \{(i, j) | 1 \leq i \leq l_1, 1 \leq j \leq l_2\}$ – матрица квантованного на n уровней изображения размером $l_1 \times l_2$. Множество активных уровней (центров квантования) определяется вектором $c = \text{unique}(Q(:)) = (c_1, c_2, \dots, c_n)$. Таким образом, для квантованного изображения выполняется условие $q(i, j) \in \{c_1, c_2, \dots, c_n\}$, $(i, j) \in \Omega$. Соответствующее множество индексов обозначим $E = \{1, 2, \dots, n\}$. Конвертируя матрицу Q в матрицу индексов U , получим индексированное изображение $U(i, j) \in E, (i, j) \in \Omega$.

Предсказатель Грэхема. Одна из модификаций нелинейного предсказателя Грэхема [1], адаптивного к контурам четырех направлений, схематически представлена на рис.1.

Предсказатель считывает значение пикселя, помеченного кружком на схеме, с наилучшего направления. Наилучшим направлением считается то, на котором сумма модулей разности между значениями элементов матрицы U , соединенных стрелками, достигает минимума.

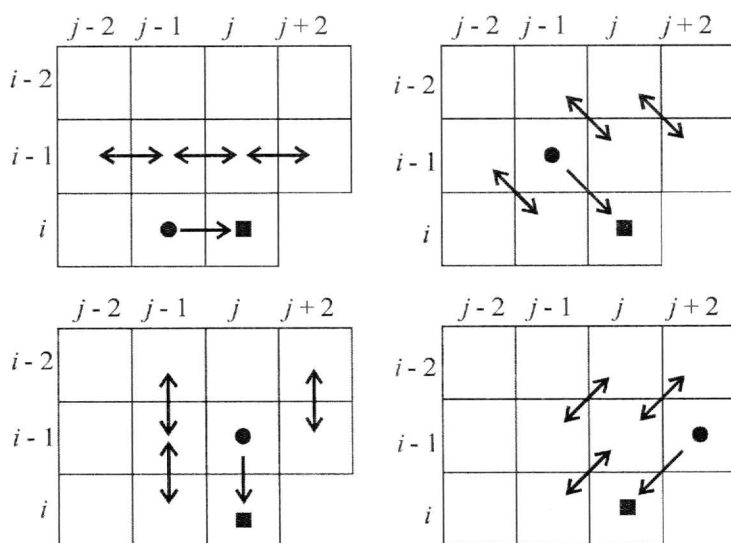


Рис.1. Схема предсказателя Грэхема. Стрелки указывают на пиксели, по которым вычисляются разности; ■ – предсказываемый пиксель; ● – предсказываемое значение пикселя

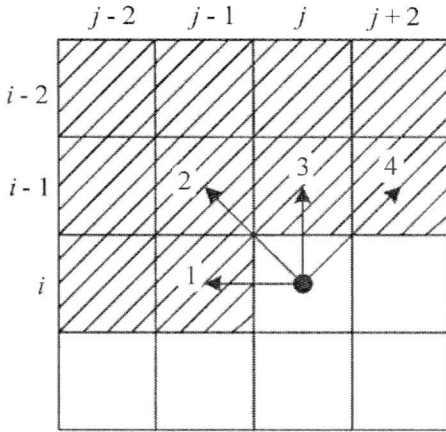


Рис.2. Схема направлений прогноза в алгоритме Грэхема (цифрами обозначены номера направлений)

На изображении, содержащем четкие протяженные контуры, ориентированные в одном из четырех направлений (рис.2), предсказатель Грэхема дает нулевую ошибку прогноза в окрестности любого из таких контуров.

Если изображение сильно зашумлено или содержит много мелких деталей, то форма контуров искажается и качество прогноза по Грэхему ухудшается. Для таких изображений требуется большая адаптация предсказателя к локальным вероятностным характеристикам в окрестности каждого пикселя. Заметим, что известные в литературе линейные оптимальные предсказатели [2] оказываются малоэффективными в применении к квантованным изображениям.

Предсказатель на основе байесовской оценки апостериорной вероятности.

Пусть $m = u(i, j)$ – значение текущего пикселя индексированного изображения, для которого осуществляется прогноз, $v(m) = (v_1, v_2, v_3, v_4) = (u(i, j-1), u(i-1, j-1), u(i-1, j), u(i-1, j+1))$ – вектор значений элементов из каузальной окрестности текущего пикселя. Обозначим $p(w, m) = p\{u(i, j) = m, v(m) = w\}$ – вероятность совместного осуществления указанных событий. Байесовский прогноз определяется уравнением

$$m^* = \arg \max_k (p(k/w)) = \arg \max_k \left(\frac{p(w, k)}{p(w)} \right), \text{ где } p(w) = \sum_{l=1}^n p(w, l).$$

Несмещенной и состоятельной оценкой вероятности $p(w, k)$ является пятимерная нормированная гистограмма $g(w, k)$, структура которой отличается от двумерной гистограммы, определенной в [4], лишь увеличением размерности. Байесовский предсказатель наиболее эффективен для изображений с высоким уровнем межстрочных корреляций.

Комбинированный адаптивный предсказатель. В основу алгоритма комбинированного предсказания положен байесовский предсказатель, который включается при выполнении следующих условий: 1) коэффициент корреляции между текущей строкой индексированного изображения и предшествующей строкой превышает заданный порог; 2) для текущего значения вектора w в окрестности прогнозируемого пикселя со значением $u(i, j) = m$ выполняется неравенство $\sum_{k=1}^n g(w(m), k) > 0$ (т.е. гистограмма для фиксированного значения $w(m)$ не пуста).

Если хотя бы одно из указанных условий не выполняется, то включается предсказатель Грэхема. Дополнительно, при нарушении условия 1, гистограмма g обнуляется и затем снова последовательно накапливается в процессе сканирования по строкам.

Если хотя бы одно из указанных условий не выполняется, то включается предсказатель Грэхема. Дополнительно, при нарушении условия 1, гистограмма g обнуляется и затем снова последовательно накапливается в процессе сканирования по строкам.

Сочетание лучших свойств предсказателей Грэхема и Байеса позволяет существенно повысить адаптацию алгоритма к локальным характеристикам изображения посредством учета корреляционной зависимости между строками и за счет этого улучшить точность прогноза.

Рассмотрим более подробно алгоритм комбинированного предсказания по шагам. При описании будем использовать в целях краткости изложения командный язык пакета MATLAB-7, ставшего уже привычным для специалистов, работающих в области цифровой обработки изображений [5].

Входные параметры: Q – матрица квантованного на n уровней изображения; $porog$ – управляемый параметр ($0,6 < porog < 1$).

Выходные параметры: Z – разностный массив после предсказания.

Шаг 0. Инициализация матриц. Положить $u = \text{zeros}(l_1, l_2)$, $g = \text{zeros}(n, n, n, n)$, $z = \text{zeros}(l_1, l_2)$.

Шаг 1. Преобразовать матрицу Q в индексный массив. Вычислить $c = \text{unique}(Q(:))$; положить $\text{ind}(c(k)) = k, k = 1, 2, \dots, n$; $u(:) = \text{ind}(Q(:))$. В результате получаем массив u , удовлетворяющий условию $u(i, j) \in E, (i, j) \in \Omega$.

Шаг 2. Вычислить вектор межстрочных корреляций: $\rho(k) = \text{corr2}(u(k, :), u(k+1, :))$, $k = 1, 2, \dots, l_1 - 1$.

Шаг 3. Первоначальное накопление гистограммы прогноза. Для $i = 2$ (вторая строка изображения) вычислить: $\text{pix} = u(i, j)$, $w = [u(i, j-1) \ u(i-1, j-1) \ u(i-1, j) \ u(i-1, j+1)]$ – вектор окружения текущего пикселя. Положить $g(w, \text{pix}) = g(w, \text{pix}) + 1$; $j = 2, 3, \dots, l_2 - 1$.

Шаг 4. Установить переключатель $\text{swit} = 0$. Начать цикл по строкам с номерами $i = 3 : l_1 - 2$. Если $\rho(i-1) \geq \text{porog}$, перейти к шагу 5, в противном случае – к шагу 9.

Шаг 5. Подготовка байесовского прогноза. В цикле по столбцам с номерами $j = 3 : l_2 - 2$ вычислить: $\text{pix} = u(i, j)$, $w = [u(i, j-1) \ u(i-1, j-1) \ u(i-1, j) \ u(i-1, j+1)]$, $s = \text{sum}(g(w, :))$; если $s = 0$, перейти к шагу 6, иначе – к шагу 7.

Шаг 6. Прогноз по Грэхему. Вычислить: $\delta(m) = \text{sum}(\text{abs}(d(m, :)))$, где $d(m, k)$ – k -я разность m -го направления; $m = 1 : 4, k = 1 : 3$. Определить наилучший номер направления: $m^* = \arg \min_m (\delta(m))$; положить $\text{pix}^* = w(m^*)$ и $z(i, j) = \text{pix} - \text{pix}^*$. Перейти к шагу 8.

Шаг 7. Прогноз по Байесу. Вычислить весовой вектор $\text{wes}(k) = g(w, k), k = 1, 2, \dots, n$. Положить $\text{pix}^* = \arg \max_k (\text{wes}(k))$ и $z(i, j) = \text{pix} - \text{pix}^*$.

Шаг 8. Продолжить накопление гистограммы прогноза для текущей строки. Перейти к шагу 11.

Шаг 9. Прогноз по Грэхему. Увеличить значение переключателя: $\text{swit} = \text{swit} + 1$; занулить гистограмму: $g = \text{zeros}(n, n, n, n)$. В цикле по столбцам $j = 3 : l_2 - 2$ вычислить текущее значение pix^* по алгоритму Грэхема (повторить необходимые операции шага 6). Положить $z(i, j) = \text{pix} - \text{pix}^*$.

Шаг 10. Если $z(i, j) = 0$, продолжить накопление гистограммы; в противном случае перейти к шагу 11.

Шаг 11. Проверка конца цикла по строкам. Если $i < l_1 - 2$, вернуться к шагу 4; в противном случае перейти к шагу 12.

Шаг 12. Конец алгоритма.

Замечания к алгоритму.

1. Описан базовый алгоритм формирования суженного массива разностей размером $(l_1 - 2) \times (l_2 - 2)$. Граница изображения шириной в два пикселя (окаймление) не может быть обработана по алгоритму Грэхема, так как для этого не хватает «пространства» на изображении. Для прогнозирования точек, относящихся к окаймлению, используются более простые алгоритмы, например предсказатель первого порядка по предшествующему элементу при сканировании «змейкой». Как показывают оценки для реальных изображений 400×400 и выше, ухудшение качества прогноза в этой малой части изображения приводит к уменьшению степени сжатия не более, чем на 1%.

2. Большая величина переключателя *swit* на выходе алгоритма может свидетельствовать о завышенном значении входного параметра *porog*, определяющего критическое значение коэффициента межстрочной корреляции, ниже которого происходит переключение с байесовского предсказателя на предсказатель Грэхема.

Для изображений с высоким средним значением коэффициента межстрочной корреляции ρ неплохой оценкой указанного параметра является величина, определяемая как «среднее выше среднего», т.е. $porog \approx \left\{ \overline{\rho(k) \geq \rho}, k=1,2,\dots,l_1-1 \right\}$, где черта над множеством означает обычное усреднение по множеству.

Адаптивное кодирование разностного сигнала. Рассмотрим три современных и эффективных метода кодирования, которые с успехом могут быть применены для сжатия изображений в системе МСДИКМ.

Метод LZW (Lempel – Ziv – Welch). Последовательность символов источника отображается на равномерный код, при этом не требуется априорного знания вероятностей появления кодируемых символов (в противоположность кодам Хаффмана).

Метод LZW основан на создании так называемой кодовой книги (словаря) в процессе кодирования и декодирования информации [2]. Каждое слово кодовой книги отображает серию из одного или нескольких последовательных символов источника. Формирование кода и его запись в кодовую книгу происходит только тогда, когда при поступлении нового символа образуется новая серия, отсутствующая в кодовой книге.

Уникальное достоинство метода LZW состоит в том, что словарь создается в процессе кодирования потока данных и поэтому не требует битовых затрат на его хранение.

Метод PPM (Prediction by Partial Matching). В данном методе кодирование осуществляется на основе предсказания по частичному совпадению. Это метод контекстного моделирования конечного порядка (finite context modeling), позволяющий оценить вероятность очередного символа в зависимости от N предыдущих символов. Число N определяет порядок контекстной модели. Полученная оценка кодируется энтропийным кодером (чаще всего используется адаптивный арифметический кодер), в результате чего и происходит сжатие данных.

Впервые метод PPM был предложен в [6] и в дальнейшем непрерывно совершенствовался. В настоящей работе использовалась D-модификация PPM-кодера, предложенная Д.Шкариным [7].

Статистическое кодирование. Последовательность символов источника отображается на неравномерный код, обеспечивающий наименьшее число кодовых символов (битов), приходящихся на один символ источника. В системах кодирования с предсказанием и в особенности в МСДИКМ это достигается путем кодирования длин серий, т.е. цепочек символов, состоящих из последовательности нулей и заканчивающихся ненулевым символом.

В настоящей работе для кодирования длин серий используется контекстно-адаптивная модификация экспоненциальных кодов Голомба [8]. Адаптация кодов Голомба осуществляется благодаря особому контексту разностного сигнала после предсказания. Для подавляющего большинства изображений, обработанных МСДИКМ, наблюдается стойкий эффект: число серий, заканчивающихся символами ± 1 , во много раз больше числа серий, заканчивающихся любым другим ненулевым символом. Это позволяет ввести оптимальный префиксный код для таких серий и тем самым получить существенный выигрыш в сжатии.

Экспериментальные результаты. Вычислительный эксперимент проводился в среде MATLAB-7 на ряде широко известных тестовых полутоновых изображений. Для квантования исходного изображения использовался адаптивный квантователь *quant3*, специально разработанный для системы МСДИКМ на основе кластер-анализа двумерной гистограммы [4]. Далее разностное изображение, полученное после предсказания, переупорядочивалось

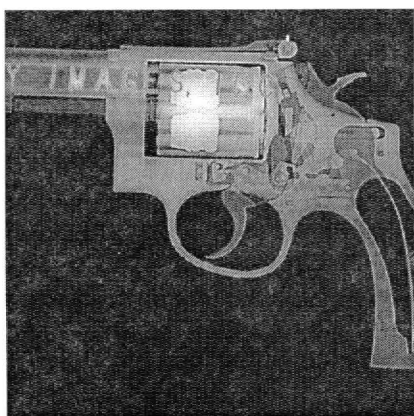
в одномерный массив путем сканирования «змейкой» и подвергалось кодированию одним из приведенных выше кодеров. Результаты сжатия сравнивались как между собой, так и с результатами стандарта JPEG 2000 (программа Photoshop CS2).

Ошибка восстановления оценивалась по величине $PSNR = 20 \lg \frac{255}{MSE}$ (пиковое отношение сигнал/шум в дБ), где MSE (mean square error) – среднеквадратичная ошибка. Степень сжатия оценивалась по величине BPP (bits per pixel) – битовые затраты, приходящиеся на один пиксель. Еще раз отметим, что ошибка восстановления в данном методе в точности совпадает с ошибкой квантования, так как никаких дополнительных потерь информации на этапах предсказания и кодирования не происходит.

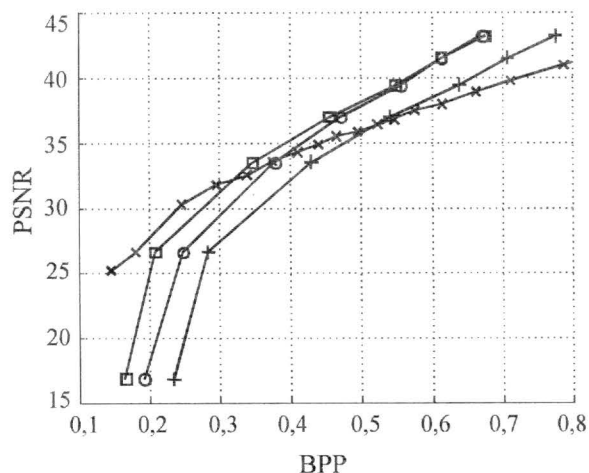
На рис.3 и рис.4 представлены результаты сжатия двух рентгеновских снимков. На графиках приведены кривые зависимости значений PSNR (характеристика качества восстановленного изображения) от BPP (характеристика сжатия).

Из анализа кривых можно сделать следующие выводы: 1) из трех предложенных методов кодирования менее эффективным является метод LZW, а наиболее эффективным – метод PPM; 2) статистический метод близок по качеству к методу PPM и лишь немного уступает ему; 3) для каждого из кодеров существует критическое значение $PSNR_0$, такое, что при условии $PSNR > PSNR_0$ сжатие МСДИКМ приводит к меньшим битовым затратам, чем сжатие системой JPEG 2000.

Для изображения револьвера «магнум» (см. рис.3) выигрыш существенен, что объясняется наличием большого фонового пространства и высоким средним значением длин нулевых серий (адаптивный предсказатель хорошо прогнозирует пиксели в окрестности границ). В этой ситуации PPM-кодер и статистический кодер работают наиболее эффективно.



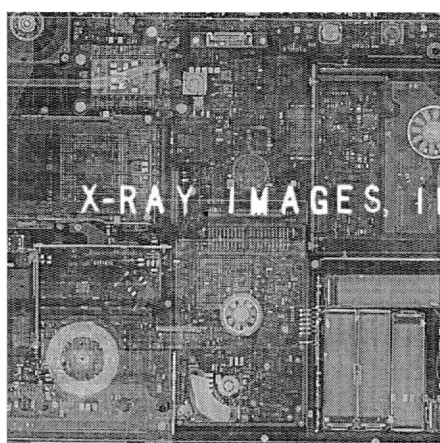
а



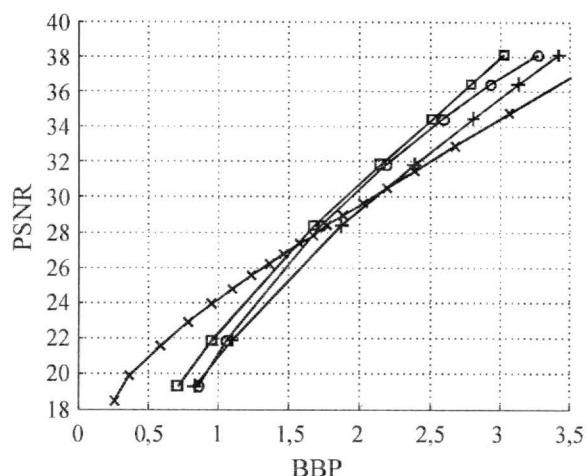
б

Рис.3. Результаты сжатия изображения: а – исходное изображение 38revolver.bmp; б – графики зависимости PSNR от BPP (× – JPEG; ○ – STAT; + – LZW; □ – PPM)

Сложный рентгеновский снимок схемы ноутбука (см. рис.4) плохо сжимается обоими методами. Это объясняется наличием большого числа резких перепадов функции яркости в малых локальных областях изображения. Для предсказателя это оборачивается большим количеством ошибок и ухудшением гистограммы длин серий, а для системы JPEG необходимо передавать большое число высокочастотных коэффициентов. Тем не менее и здесь наблюдается выигрыш в сжатии, реализуемый в области таких значений PSNR, которые определяют высокое качество восстановления ($PSNR > 30$ дБ). Например, для изображения *laptop* при значении $PSNR = 33$ дБ, как видно из графиков (см. рис.4,б) выигрыш в степени сжатия методом PPM по сравнению с JPEG составляет 9,45%.



а



б

Рис.4. Результаты сжатия изображения: а – исходное изображение *laptop.bmp*; б – графики зависимости PSNR от BPP (x – JPEG; o – STAT; + – LZW; □ – PPMD)

В заключение отметим, что тесты, проведенные на множестве изображений разных классов, показали, что наилучшие результаты по сжатию МСДИКМ следует ожидать для изображений, плохо поддающихся сжатию системой JPEG. К таковым можно отнести многие рентгеновские и ультразвуковые снимки в биомедицине и микросхемотехнике, аэрокосмические снимки земной поверхности, изображения с фрактальной текстурой и др.

Литература

1. Методы компьютерной обработки изображений / Под ред. В.А.Сойфера. – 2-е изд., испр. – М.: Физматлит, 2003. – 784 с.
2. Гонсалес Р., Вудс Р. Цифровая обработка изображений. – М.: Техносфера, 2005. – 1072 с.
3. Земсков В.Н., Бегинев С.В. Методы сжатия изображений в модифицированной схеме дифференциальной импульсно-кодовой модуляции // Математические методы в технике и технологиях: Сб. тр. XX Междунар. науч. конф. – Ярославль: Изд-во Ярославского гос. техн. ун-та, 2007. – С. 81–84.
4. Земсков В.Н., Ким И.С. Сжатие изображений на основе автоматической классификации // Изв. вузов. Электроника. – 2003. – № 2. – С. 50–56.
5. Гонсалес Р., Вудс Р., Эддингс С. Цифровая обработка изображений в среде MATLAB. – М.: Техносфера, 2006. – 616 с.
6. Cleary J.G., Witten I.H. Data compression using adaptive coding and partial string matching // IEEE Trans. Commun. – COM 32, 4 (Apr.), 1984. – P. 396–402.
7. <ftp://ftp.elf.stuba.sk/pub/pc/pack/Компрессор>.
8. Golomb S.W. Run-length encoding // IEEE Trans. on Inf. Th., IT-12. – 1966. – P. 399–401.

Статья поступила 12 декабря 2007 г.

Земсков Владимир Николаевич – кандидат технических наук, доцент кафедры высшей математики № 1 МИЭТ. Область научных интересов: математическое моделирование в области цифровой обработки изображений, статистические методы анализа, классификации и распознавания образов.

Бегинев Сергей Владимирович – магистрант кафедры вычислительной техники МИЭТ. Область научных интересов: методы цифровой обработки изображений, математическое моделирование.

ПРОБЛЕМЫ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ

УДК 658.562:378.4

О роли компетентностного подхода в обеспечении качества профессионального образования

М.В.Акуленок, Н.З.Коринтели, Ю.Ю.Сиврюкова

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

Рассмотрены вопросы внедрения компетентностного подхода в российскую систему образования в рамках Болонского процесса и принципиальные отличия нового подхода от традиционной технологии образования. Проведен анализ влияния основных принципов менеджмента качества на проектирование образовательных программ и технологию организации учебного процесса при компетентностном подходе. Показано значение компетентностного подхода для повышения результативности процессов системы менеджмента качества.

Понятие «качество профессионального образования» имеет множество аспектов [1–3], включая результативность подготовки квалифицированных кадров и сбалансированное соответствие профессиональных и личностных компетенций выпускников потребностям и ожиданиям различных заинтересованных сторон.

Заинтересованность сторон в результатах высшего образования во многом совпадает, хотя и имеет различия [1–3]. Государство заинтересовано в воспроизводстве трудовых ресурсов с соответствующими компетенциями и стабильном развитии экономики страны, работодатели – в специалистах различного уровня и квалификации, компетенции которых соответствуют структуре имеющихся рабочих мест. Интересы личности – получение за соответствующий период времени за приемлемую плату образования требуемого уровня, приобретение необходимых компетенций для последующего трудоустройства.

При поиске баланса интересов всех заинтересованных сторон неизменной целью любой системы менеджмента качества (СМК) остается повышение результативности деятельности организации, в частности для вуза – результативности его образовательной деятельности, т.е. обеспечение достижения результатов и целей обучения и повышение степени удовлетворенности потребителей, главным образом работодателей.

Одним из важнейших факторов, обеспечивающих качество образования (и удовлетворенность потребителей), является формирование его содержания.

Присоединение Российской Федерации к Болонскому процессу [4] определило в качестве одного из основных направлений развития системы образования «обеспечение качества образования», стимулировало реформы российского образования, в частности внедрение компетентностного подхода (КП) как метода моделирования и проектирования результатов обучения [5] и, как следствие, определения содержания образования.

Цель настоящей работы – показать значение компетентностного подхода для повышения результативности системы менеджмента качества образовательной деятельности и ее совершенствование.

Смена парадигмы образования обозначила переход от традиционного способа проектирования образовательных программ (ОП), ориентированного прежде всего на формулирование получаемых знаний (и определение существующего подхода как «знаниевого»), к компетентностному, который при оценке качества подготовки специалистов ориентируется на формирование у студента набора компетенций и готовности к будущей деятельности в профессиональной области. Приведем принципиальные различия организации учебного процесса при компетентностном подходе и существующей системе образования:

Особенности существующей системы образования	Особенности учебного процесса при компетентностном подходе
Знания и умения выпускника должны соответствовать требованиям ГОС	Результаты обучения формулируются в виде компетенций
Формирование содержания образовательной программы в соответствии с ГОС	Учет требований работодателя при формулировании компетенций (результатов обучения)
Наличие в ГОС второго поколения трех компонентов (федерального, регионального, вузовского), жестко регламентирующих содержание соответствующих учебных дисциплин	Структурирование компетенций, дифференциация уровней подготовки и достигаемых результатов в процессе обучения
Формирование учебного плана по циклам дисциплин (в том числе циклы гуманитарных и социально-экономических дисциплин, естественно-научных и математических, общепрофессиональных, специальных)	Модульный принцип организации учебного процесса, преемственность учебных дисциплин в формировании компетенций
Измерение трудоемкости в часах	Измерение трудоемкости в зачетных единицах
«Линейный» учебный план, единый для всех обучающихся по образовательной программе	Вариативность индивидуальных траекторий обучения
Аттестация уровня знаний по каждой дисциплине, итоговая аттестация	Оценка степени формирования соответствующих компетенций

Под компетенцией понимается прежде всего способность, стремление и готовность применять знания, умения и личностные качества для успешной деятельности в определенной области [5].

К основным особенностям компетентностного подхода к разработке образовательных программ относятся:

- ориентация всего процесса обучения по образовательной программе на общие цели (цели образовательной программы), согласованные с миссией вуза;
- ориентация результатов обучения (компетенций) на сформулированные цели образовательной программы;
- учет требований работодателей к компетенциям выпускников, т.е. к результатам обучения;
- преемственность учебных курсов в формировании компетенции выпускников по учебному плану;
- обеспечение измеримости результатов обучения.

Необходимым условием для формирования «компетентностной модели выпускника» и последующей реализации образовательного процесса на основе компетентностного подхода является наличие сформулированных требований потребителей и заинтересованных сторон. В настоящее время государственные образовательные стандарты являются наилучшим, а часто единственным примером документированного отражения долгосрочных потребностей государства. К достаточно четко сформулированным требованиям можно отнести критерии общественно-профессиональной аккредитации [6]. Остальные потребители и заинтересованные стороны, в том числе такие важные, как работодатели, свои требования часто не в состоянии сформулировать [3].

При определении качества подготовки специалистов существующая система образования ориентируется на оценку знаний по отдельным предметным областям, что не позволяет оценить умение выпускника решать реальные производственные задачи. Однако работодателя интересует главным образом способность справиться с поставленной производственной задачей, а не знания выпускника по тому или иному предмету, пройденному в вузе.

Приведенные основные отличительные особенности компетентностного подхода и существующей системы образования свидетельствуют о серьезных отличиях нового подхода, например в технологии проектирования ОП и в специфике организации учебного процесса, а также об увеличении гибкости образования, предоставлении обучающимся возможности самостоятельно выбирать траекторию обучения и продолжать его в других вузах, в том числе и в других странах.

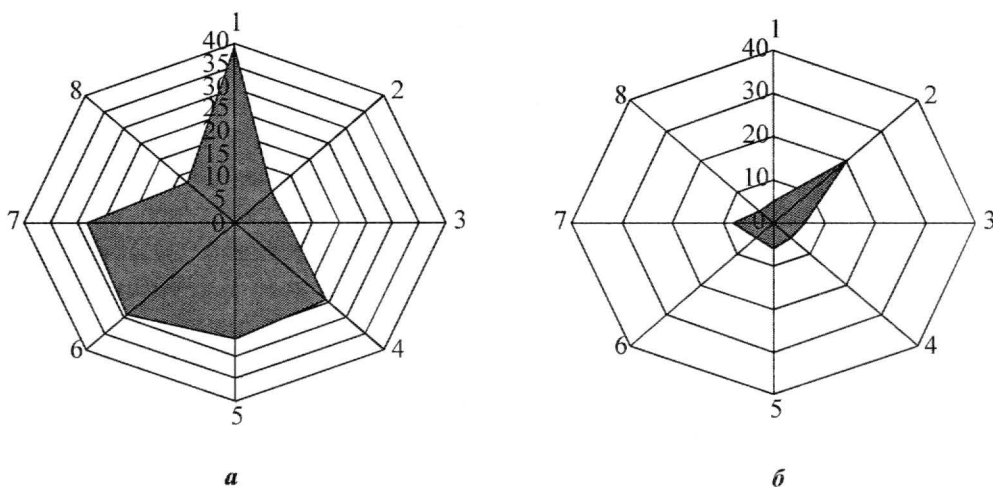
Основными принципами управления качеством являются [7] известные принципы TQM (Total Quality Management): ориентация на потребителя; лидерство руководителя; вовлечение работников; процессный подход; системный подход; постоянное улучшение; принятие решений, основанных на фактах; взаимовыгодные отношения с поставщиками.

Независимо от выбранной модели построения СМК образовательной деятельности вуза, включая международную серию стандартов ИСО 9000, ее национальные издания, EFQM и др. [7–9], перечисленные принципы остаются неизменными. Взаимное влияние этих принципов определяет синергетический эффект их совместного применения [9]. Вопрос о взаимном влиянии требований СМК и особенностей организации образовательного процесса и возможном проявлении подобного эффекта остается открытым.

Лепестковые диаграммы, иллюстрирующие результаты анализа взаимного влияния особенностей КП и требований серии МС ИСО 9000-2000, проведенного методом парных сравнений [10], представлены на рисунке. Приведенные диаграммы свидетельствуют о большей степени гармонизации особенностей КП и основных принципов построения СМК, при этом наибольшее влияние внедрение КП оказывает на реализацию принципа «ориентация на потребителя» за счет активного взаимодействия с будущими работодателями при проектировании образовательной программы и учета интересов обучающегося при проектировании индивидуального учебного плана.

Модульная система построения образовательных программ при КП является по существу отражением принципов процессного и системного подходов.

Мониторинг результатов обучения (как отдельного студента, так и всех студентов, обучающихся по ОП) позволяют не только принимать решения, основанные на фактах, но и создавать основу для постоянного улучшения ОП.



Сравнительная характеристика взаимного влияния принципов менеджмента качества и особенностей образовательной деятельности в рамках компетентного подхода (а) и существующей системы образования (б): 1 – ориентация на потребителя; 2 – лидерство руководителя; 3 – вовлечение работников; 4 – процессный подход; 5 – системный подход; 6 – постоянное улучшение; 7 – принятие решений, основанных на фактах; 8 – взаимовыгодные отношения с поставщиками

Дальнейший углубленный анализ с учетом развития основных принципов в требованиях стандарта ГОСТ Р ИСО 9001-2001 [7] показал направления актуализации документации СМК при внедрении КП:

- реализация механизма адаптации структуры и содержания образовательных программ к требованиям рынка труда и соответствующий информационный обмен при выявлении требований и ожиданий потребителей, и его отражение в соответствующей документации СМК (п.7.2. и п.5.2 ГОСТ Р ИСО 9001-2001);

- требования работодателя наравне с требованиями ФГОС – входные данные для проектирования и разработки ОП (п.7.3), в том числе с учетом регистрации в виде обязательных записей (п.7.3.2);

- изменения в структуре и характере процессов мониторинга и измерений в учебном процессе как необходимое условие для обеспечения совершенствования образовательных программ, а также статистическая обработка результатов измерений, выделение общих (систематических) причин и случайных причин вариабельности результатов обучения с целью обеспечения адекватности управленческих вмешательств в процесс.

Таким образом, компетентный подход находит непосредственное отражение в таких процессах СМК вуза, как связь с потребителями (п.7.2); проектирование и разработка ОП (п.7.3); организация учебного процесса (п.7.5); прослеживаемость (п.7.6); измерения, анализ, улучшение (п.8.0).

Причем последний процесс (п.8.0) предполагает наличие или разработку стандартов, отражающих процедуры мониторинга достижения результатов обучения как отдельными студентами, так и оценку результатов по программам в целом; оценку удовлетворенности потребителей, анализ и механизмы принятия решений, направленных на улучшения образовательной программы.

Проведенный анализ показал не только серьезные изменения, но и значительные преимущества КП с точки зрения обеспечения качества подготовки выпускников. Можно говорить о синергетическом эффекте КП и СМК в образовательной деятельности, а КП рассматривать как инструмент актуализации процессов СМК, повышения их результатив-

ности. При этом совместная реализация КП и СМК образовательной деятельности может служить механизмом повышения конкурентоспособности выпускника, а следовательно, и вуза, а также обеспечить его выход на мировой рынок образовательных услуг и успешное функционирование в рыночных условиях.

Литература

1. **Кузьмин Б.И.** Диагностика компетенций в практике Российского корпоративного менеджмента // Вестник ВогГУ. Сер. 3. – 2006. – Вып. 10. – С. 104–110.
2. **Чучалин И.А., Боев О.В., Криушова А.А.** Качество инженерного образования: баланс интересов на основе компетенций // Материалы междунар. симпозиума «Качество высшего образования и подготовки специалистов к профессиональной деятельности». – М., 2005. – С. 34–39.
3. **Акуленок М.В.** Сравнительный анализ запросов и ожиданий основных потребителей образовательных услуг // Материалы конф. «Инновационные технологии организации обучения в техническом вузе: на пути к новому качеству образования». – Пенза, 2004. – Ч. 1. – С. 91–95.
4. http://www.bologna-bergen2005.no/Docs/00-Main_doc/990719BOLOGNA_DECLARATION.PDF.
5. **Байденко В.И.** Компетентностный подход к проектированию государственных образовательных стандартов высшего профессионального образования (методологические и методические вопросы): Методическое пособие. – М.: Исследовательский центр проблем качества подготовки специалистов, 2005. – 114 с.
6. **Похолков Ю.П., Чучалин А.И., Боев О.В., Могильницкий С.Б.** Общественно-профессиональная аккредитация образовательных программ в системе подготовки элитных специалистов // Материалы междунар. конф. в рамках симпозиума «Элитное техническое образование». – М., 2003. – С. 13–16.
7. ГОСТ Р ИСО 9001-2001. Системы менеджмента качества. Требования. – М.: Изд-во стандартов, 2001. – 26 с.
8. **Степанов С.А.** Модель и критерии эффективности внутривузовской системы менеджмента качества // Качество. Инновации. Образование. – 2004. – № 1. – С. 30–37.
9. **Адлер Ю.П.** Восемь принципов, которые меняют мир // Стандарты и качество. – 2001. – № 5–6. – С. 49–60.
10. **Макино Т., Охаси М., Докэ Х., Макино К.** Контроль качества с помощью персональных компьютеров / Пер. под ред. Ю.П.Адлера. – М.: Машиностроение, 1991. – 224 с.

Статья поступила
16 октября 2007 г.

Акуленок Марина Викторовна – кандидат технических наук, доцент кафедры системной среды качества МИЭТ. *Область научных интересов:* проблемы качества образовательной деятельности.

Коринтели Николай Зурабович – аспирант кафедры системной среды качества МИЭТ. *Область научных интересов:* проблемы внедрения компетентностного подхода в высшее профессиональное образование.

Сиврюкова Юлия Юрьевна – аспирант кафедры системной среды качества МИЭТ. *Область научных интересов:* методы проектирования систем менеджмента качества.

Особенности формирования готовности студентов к использованию информационных компьютерных технологий в свете компетентностного подхода

Р.А.Мязина

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

Рассмотрена проблематика использования студентами информационных компьютерных технологий (ИКТ). Приведен обзор существующих решений, изложены основы формирования ИКТ-компетентности, предложены пути формирования готовности студентов к использованию ИКТ на основе компетентностного подхода и определены соотношения понятий «готовность» и «компетентность» в условиях информатизации образования.

Информатизация образовательной отрасли становится одним из приоритетных направлений реформы образования, при этом именно информационная культура студентов, их готовность к использованию компьютерных технологий является фактором, определяющим успех. По мнению российских ученых, информационная культура является показателем не общей, а скорее профессиональной культуры, но со временем станет важным фактором развития личности.

Формирование информационной культуры студентов осуществляется в процессе овладения содержанием информационных дисциплин, определенных Государственным образовательным стандартом высшего профессионального образования (ГОС ВПО) каждой отдельно взятой специальности. Активно развивающаяся теория личностно-ориентированного образования, наиболее полно освещенная в трудах Е.В.Бондаревской, В.В.Горшковой, В.И.Гинецинского, В.В.Серикова, И.С.Якиманской, открывает принципиально новые возможности для педагогического осмысления процесса формирования информационной культуры личности. Именно поэтому актуальным направлением совершенствования вузовской подготовки студентов является информатизация в рамках Федеральной целевой программы развития образования на 2006–2010 годы, которая предусматривает в качестве основных направлений совершенствования:

- организацию и формирование единого информационного пространства в области образования, развитие федеральных и региональных компьютерных сетей, баз правовых данных, данных по кадрам, учебным программам, технологиям;
- интеграцию в международное информационное и коммуникационное пространство.

Происходящий процесс информатизации общества предъявляет новые требования к профессиональным качествам и уровню подготовки специалистов любого профиля в области информатики. Так, информационный аспект развития образования достаточно полно отражен в исследованиях А.Д.Аветисяна, И.А.Возгрина, Е.П.Драпкина, А.М.Зинина, Б.В.Кваши, С.В.Киселева, Н.С.Полевого, Е.Р.Российской. Разработке модели и технологии процесса профессиональной подготовки студентов как условий пе-

дагогического обоснования дидактической целесообразности использования информационных компьютерных технологий (ИКТ) в учебном процессе посвящены диссертации Р.Г.Семеренко, Е.Н.Бабоновой и др. Определяя информационную культуру личности, исследователи рассматривают ее с разных точек зрения: как компьютерную грамотность – отдельные знания, умения, навыки в области информатики и информационных технологий; готовность человека к их использованию в своей общекультурной и профессиональной деятельности, или компетентность в этой области; различные аксиологические, нравственные, социальные аспекты деятельности личности в информационной среде, выраженные в компонентном составе информационной культуры; методологию, методику и мировоззрение информационного общества в целом; социально значимый способ жизнедеятельности личности в информационной среде и т.д.

Цель настоящей работы – исследование путей (способов, методов) формирования готовности студентов к использованию ИКТ на основе компетентностного подхода и определение в связи с этим соотношения понятий «готовность» и «компетентность» в условиях информатизации образования.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- определить основные аспекты формирования ИКТ-компетентности;
- определить составляющие компоненты формирования ИКТ-компетентности;
- на основе анализа указанных задач предложить пути формирования потребности студентов в использовании ИКТ;
- проанализировать составляющие понятия «готовность личности»;
- определить соотношение понятий «готовность» и «компетентность» в условиях информатизации образования.

Расширение информационного пространства за формальные пределы в параллельные структуры системы непрерывного образования и формирование навыков деятельности в любой предметной области определяют ключевую роль компетентностного подхода в профессиональном развитии специалистов в части применения ИКТ. При этом для реализации компетентностного подхода в системе образования необходима подготовка и переподготовка преподавательских кадров, способных в реальной жизненной и профессиональной практике применять универсальные (ключевые) компетенции, среди которых в первую очередь следует выделить информационную и коммуникативную (зачастую их объединяют в единую инфокоммуникативную или ИКТ-компетентность). Они являются инвариантными в существующих российских и зарубежных программах и служат естественным результатом широкого распространения и использования ИКТ.

ИКТ-компетентность специалиста проявляется как:

- готовность к освоению эффективного доступа к практически неограниченному объему информации и ее аналитической обработке;
- наличие высокого уровня коммуникативной культуры (в том числе коммуникации посредством информационных средств), теоретических представлений и опыта организации информационного взаимодействия, осуществляемого в режиме диалога «человек – компьютер»;
- готовность к совместному со всеми субъектами информационного взаимодействия освоению научного и социального опыта, совместной рефлексии и саморефлексии;
- освоение культуры получения, отбора, хранения, воспроизведения, представления, передачи и интеграции информации (в том числе в рамках выбранной предметной области).
- стремление к формированию и развитию личных творческих качеств.

Компетентный специалист обладает знаниями, составляющими информативную основу коммуникации и познавательной деятельности, владеет умениями и навыками эффективной коммуникации и поисковой деятельности в сфере пользовательских программ и технических ресурсов, ощущает потребность в использовании ИКТ в профессиональной деятельности. К основным составляющим компонентам формирования такой потребности можно отнести следующие: содержательный, мотивационный, организационный.

Содержательный компонент включает:

- разработку адаптивных учебных программ, обеспечивающих подготовку и стимулирующих к использованию ИКТ в самообразовании;
- создание образовательных баз данных на основе современных информационных и коммуникационных технологий, содержащих научную, методическую, психологическую, техническую, справочную литературу, содержательную учебную информацию различного вида, программное обеспечение разного типа и другие материалы.

Мотивационный компонент связан с созданием условий, способствующих преодолению внутренних барьеров, его психологической готовности работать в компьютеризированной среде, повышению квалификации в области использования средств ИКТ.

Организационный компонент, в свою очередь, связан с вопросами профессиональной подготовки с учетом уровня сформированной внутренней потребности (ценностной ориентации) и факторов, влияющих на активное применение средств ИКТ в самообразовании.

Предложены следующие пути формирования потребности студентов в использовании ИКТ в процессе обучения:

- обеспечение самоактуализации потребности студентов в применении средств ИКТ;
- организация обучения на различных курсах с использованием адаптивных учебных программ;
- создание благоприятных условий для повышения квалификации в сфере использования средств ИКТ;
- развитие способности накапливать и передавать практический опыт использования средств ИКТ в различных условиях;
- стимулирование активного применения средств ИКТ в процессе самообразования;
- создание комфортных условий для работы в компьютеризированной среде.

Отметим, что понятие компетентности интегрирует когнитивный (знания), операциональный (способы деятельности и готовность к осуществлению деятельности) и аксиологический (наличие определенных ценностей) аспекты, т.е. компетентный специалист является индивидуумом, обладающим способностью осознавать и рефлексировать собственные ценности, сопоставлять, оценивать себя и иное, проектировать будущее. В то же время готовность понимается как интегративное качество личности и как фундаментальное условие успешного выполнения любой деятельности. Таким образом, готовность – это внутреннее состояние (способность) личности, представляющее собой определенную целостность, являющееся признаком профессиональной квалификации, а также результатом целенаправленной подготовки. Готовность как сложное психологическое образование, кроме необходимых знаний, умений и навыков, включает не только адекватные требования к профессиональной деятельности, человеческим качествам личности и способностям, но и познавательные (понимание профессиональных задач, оценка их значимости и т.д.), мотивационные (интерес к профессии, стремление добиться успеха и т.д.) и волевые (преодоление сомнений, умение мобилизовать свои силы и т.д.) компоненты, а следовательно, включает когнитивную, операциональную и

аксиологическую составляющие. Это наводит на мысль о некотором совпадении понятий компетентности и готовности, однако тот факт, что компетентный специалист способен выходить за рамки предмета своей профессии позволяет определить компетентность как высшую степень готовности.

Анализ результатов теоретических и практических исследований по применению ИКТ в учебном процессе подготовки специалистов позволяет определить готовность студентов к применению ИКТ как комплексное состояние личности, основанное на ее психологических, нравственных, профессиональных качествах, обеспечивающее полноценную способность реализовывать компетентностный подход посредством применения новых информационных технологий.

Литература

1. Tuning educational structures in Europe final report phase one edited by Julia González Robert Wagenaar 2003 University of university of deusto groningen.
2. Computing Curricula 2005. Association for computing machinery and computer society of IEEE.
3. Компетентностный подход в педагогическом образовании / *Под ред. В.А.Козырева и Н.Ф.Радионовой.* – СПб.: Изд-во РГПУ им. А.И.Герцена, 2004. – 392 с.
4. *Ракитина Е.А.* Построение методической системы обучения информатике на деятельностной основе: Автореф. докт. дисс. – М., 2002. – 48 с.
5. *Байденко В.И.* Компетентностный подход к проектированию государственных образовательных стандартов высшего профессионального образования (методологические и методические вопросы): Метод. пособ. – М., 2005.
6. *Байденко В.И.* Концептуальная модель государственных образовательных стандартов в компетентностном формате (дискуссионный вариант) // Материалы ко второму заседанию методологического семинара. – М.: Исследовательский центр проблем качества подготовки специалистов, 2004.

Статья поступила
после доработки 25 сентября 2007 г.

Мязина Раиса Сергеевна – старший преподаватель кафедры истории и права МИЭТ. *Область научных интересов:* современные информационные технологии в образовательном процессе, научно-методологическое обеспечение второго высшего образования в области юриспруденции, теория и методика преподавания специальных предметов в области юриспруденции.

ЮБИЛЕИ

Королёву Михаилу Александровичу – 75 лет



5 марта 2008 г. исполнилось 75 лет известному специалисту в области разработки и исследований МДП-структур и МДП-транзисторов, одному из первых разработчиков МДП-приборов и интегральных схем на основе КНИ-структур, доктору технических наук, профессору Королёву Михаилу Александровичу.

М.А.Королёв в 1957 г. окончил Московский химико-технологический институт им. Д.И.Менделеева по специальности «Технология электровакуумного и полупроводникового производства». Его трудовая деятельность началась в институте НИИ-35 («Пульсар»). Это было первое в СССР научное учреждение, которое занималось разработкой полупроводниковых приборов. Через несколько лет М.А.Королёв перешел в Институт точной механики и вычислительной техники АН СССР, откуда был приглашен на работу в Зеленоград, в НИИ Молекулярной электроники, где организовал и возглавил отдел по разработке МОП-интегральных схем.

С 1971 г. М.А.Королёв работает в МИЭТ на кафедре интегральных полупроводниковых схем, возглавляемой тогда академиком К.А.Валиевым, и становится ведущим преподавателем дисциплин технологического цикла. Он интенсивно занимается научной работой, под его руководством в 70-е годы

были разработаны оригинальные биполярные схемы на инжекционной логике на основе «обращенных структур», полученные при одновременной диффузии нескольких примесей. В 1991 г. после защиты докторской диссертации он получает звание профессора, с 1996 по 2007 г. – декан факультета электроники и компьютерных технологий (ЭКТ) (ранее – физико-технический факультет) МИЭТ.

М.А.Королёвым была создана научная школа по разработке трехмерных ИС на основе КНИ. Он является основателем нового технологического направления – создания схем на КНИ-структурах, формируемых оригинальным методом использования косвенного лазерного нагрева. На основе исследований были разработаны и получены схемы с повышенной радиационной стойкостью, не имеющие аналогов в своем классе.

М.А.Королёв проделал большую работу по организации международных учебно-научных центров на факультете ЭКТ.

Михаил Александрович – талантливый педагог, заслуживший большое уважение коллег и любовь студентов. Им подготовлен и читался студентам МИЭТ оригинальный курс лекций «Маршруты СБИС», которому нет аналогов по глубине и широте освещения особенностей, методов, принципов и маршрутов изготовления современных сверхбольших интегральных схем.

Под руководством М.А.Королёва были защищены 5 докторских и 10 кандидатских диссертаций.

М.А.Королёв является соавтором 3 монографий и автором более 250 научных работ. Под его редакцией и при непосредственном участии было подготовлено и издано в МИЭТ 18 учебных и учебно-методических пособий.

М.А.Королёв – заслуженный деятель науки России, награжден орденом Почета, медалями, знаками «За отличные успехи в работе в высшей школе», «Изобретатель СССР», «Почетный работник электронной промышленности СССР», имеет серебряную медаль ВДНХ.

Поздравляем Михаила Александровича со знаменательной датой, желаем здоровья, оптимизма и дальнейших творческих успехов.

Редколлегия

CONTENTS

Fundamental researches

<i>A.A.Gorbatsevich, M.V.Zhurbaev, V.V.Kapaev</i> Quasireflectionless Potentials in Semiconductor Nanoheterostructure.....	3
<i>B.G.Konoplev, E.A.Ryndin</i> Investigation of Carrier Transport in Connected Quantum Wells.....	14

Electronic engineering materials

<i>D.D.Avrov, S.I.Dorozhkin, A.O.Lebedev, Yu.M.Tairov, A.Yu.Fadeev</i> On Carbon Inclusions in Silicon Carbide Ingots during Modified-Levy Growth.....	23
<i>A.A.Dimitryuk, V.V.Oduev</i> Complex Magnetic Permeability of Ferrite Materials of Microwave Range.....	32
<i>L.A.Svetlichnaya, L.P.Mileshko, A.N.Korolev</i> Electro-Physical Properties of Chlorine Containing Anode Cu ₂ O Films on Glass-Fabric-Based Laminate.....	39
<i>N.G.Osipenkova, R.F.Shutova, E.E.Kozlova</i> Study on Composition of Materials Based on Functional Glasses for Manufacturing Thick-Film Thermo-Resistive Gauges.....	43
<i>I.G.Ermoshin, I.N.Cyplenkov, Yu. N.Sveshnikov</i> Optimization of Technology for Producing Gallium Nitride Heterostructures Using Diffractometry Analysis Data.....	49

Microelectronic devices and systems

<i>Yu.A.Chaplygin, E.A.Artamonova, A.Yu.Krasyukov, T.Yu.Krupkina</i> Electrical-Thermal and Self-Heating Effects in Lateral Power SOI MOSFET's	52
------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	----

Microsystems

<i>S.P.Timoshenkov, V.F.Shilov, A.N.Boiko, B.M.Simonov</i> Investigation of Gas Damping Influence on Microaccelerometers Parameters.....	58
<i>A.G.Borisov, O.M.Ivanova, S.A.Krutovertsev, E.S.Mahanko, T.D.Chilikina</i> Gas Optical Sensor Based on Planar Multimode Waveguide.....	61
<i>A.D.Britov, V.M.Belokonev, A.I.Nadezdinsky, D.J.Namestnicov, J.J.Ponuruvsky</i> Laser Detector for Distant Detection of CO ₂ , CH ₄ and NH ₃ Gases	65

Information technologies

<i>A.S.Kuchinsky, F.M.Putrya</i> Multicore System Simulator and Its Applications.....	72
<i>W.N.Zemskov, S.V.Begishev</i> Coding with Prediction in Modified DPCM Compression System	78

University education problems

<i>M.W.Akoulonok, N.Z.Korinteli, Y.Y.Sivryukova</i> On Role of Competence Approach in Providing Professional Education Quality	85
<i>R.N.Myazina</i> Peculiarities in Formation of Students' Readiness for Using Information Computer Technologies in View of Competence Approach.....	90

Anniversaries

Korolev M.A. is 75 years old.....	94
-----------------------------------	----

ABSTRACTS

FUNDAMENTAL RESEARCHES

Quasireflectionless Potentials in Semiconductor Nanoheterostructure

A.A.Gorbatsevich, M.V.Zhurbaev, V.V.Kapaev

A new class of quasireflectionless potentials, associated with low energy scattering, has been considered. The effective parameters of low energy scattering have been determined using the system expansion by the wave vectors in the region of the parameters corresponding to the exit of the localized states into the continuum. The parameters of the heterostructures, formed by the composition step-like distribution, which provide the reflectionless conditions in the low-energy region, have been found.

Investigation of Carrier Transport in Connected Quantum Wells

B.G.Konoplev, E.A.Ryndin

Some peculiarities of the controlled rearrangement of charge carriers in the nanostructures based on the tunnel-connected quantum regions, formed by GaAs/AlGaAs heterojunctions, have been considered. The results of numerical modeling of the wave function rearrangement dynamics have been discussed.

ELECTRONIC ENGINEERING MATERIALS

On Carbon Inclusions in Silicon Carbide Ingots during Modified-Levy Growth

D.D.Avrov, S.I.Dorozhkin, A.O.Lebedev, Yu.M.Tairov, A.Yu.Fadeev

The comprehensive analysis of the problem of appearance of the carbon inclusions in the silicon carbide monocrystal during growing the silicon carbide ingots by the modified-Levy method (so called ingot graphitization) has been presented. It has been shown that the ingot graphitization process can not be caused by silicon deficiency in the growth cell, on the contrary, just an excess of silicon near the growth surface retards the rate of the ingot growth process and results in the intensive corrosion of the graphite fittings.

Complex Magnetic Permeability of Ferrite Materials of Microwave Range

A.A.Dimitryuk, V.V.Oduev

Some more precise expressions, allowing the computation of the complex components of magnetic permeability tensor of poly- and monocrystal microwave ferrites with different magnetization extent, have been proposed. The expressions take into account the anisotropy internal field and therefore can be applied for calculating the parameters of ferrites with a hexagonal structure.

Electro-Physical Properties of Chlorine Containing Anode Cu₂O Films on Glass-Fabric-Based Laminate

L.A.Svetlichnaya, L.P.Mileshko, A.N.Korolev

It has been found that the bandgap of anode Cu₂O containing 5 at.% Cl is 1,8 eV. It has been shown that the resistance of the chlorine-containing Cu₂O resistors is almost 5 orders reduced in the 20–75° temperature range and is 2 times exponentially decreased with the light exposure increasing from 0 up to 450 lux. Two opposite-included p-n junction (inversal layers) formations have been revealed in the contact areas of Cu-Cu₂O+5 at.%Cl-Cu structures, that is detected while varying the temperature and the light exposure.