TATO- 21 MKPOCKCEMERE TEXTIO- 21 MKPOCKCEMERE Nº 9 (110) \$ 2009

ЕЖЕМЕСЯЧНЫЙ МЕЖДИСЦИПЛИНАРНЫЙ ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ И ПРИКЛАДНОЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

Журнал выпускается при научно-методическом руководстве Отделения нанотехнологий и информационных технологий Российской Академии наук

Журнал включен в перечень научных и научно-технических изданий ВАК России и в систему Российского индекса научного цитирования

Главный редактор Мальцев П. П.

Зам. гл. редактора Лучинин В. В.

Редакционный совет:

Аристов В. В. Асеев А. Л. Гапонов С. В. Каляев И. А. Квардаков В. В. Климов Д. М. Ковальчук М. В. Нарайкин О. С. Никитов С. А. Сауров А. Н. Сигов А. С. Чаплыгин Ю. А. Шевченко В. Я.

Редакционная коллегия:

Абрамов И. И. Андриевский Р. А. Антонов Б. И. Арсентьева И. С. Астахов М. В. Быков В. А Волчихин В. И. Горнев Е. С. Градецкий В. Г. Гурович Б. А. Захаревич В. Г. Кальнов В. А. Карякин А. А Колобов Ю. Р. Кузин А. Ю. Мокров Е. А Норенков И. П. Панич А. Е. Панфилов Ю. В. Петросянц К. О. Петрунин В. Ф. Путилов А. В. Пятышев Е. Н. Серебряников С. В. Сухопаров А. И. Телец В. А. Тимошенков С. П. Тодуа П. А. Шубарев В. А.

Отв. секретарь Лысенко А. В.

Редакция:

Григорин-Рябова Е. В. Чугунова А. В. **Учредитель:**

Издательство "Новые технологии"

Издается с 1999 г.

СОДЕРЖАНИЕ ____ НАНОТЕХНОЛОГИИ И ЗОНДОВАЯ МИКРОСКОПИЯ Колешко В. М., Дейнак Д. А., Чашинский А. С., Хмурович Н. В. Проектирова-2 Поляков В. В. Метод компенсации паразитной емкости в сканирующей емкост-6 МОДЕЛИРОВАНИЕ И КОНСТРУИРОВАНИЕ МНСТ Егоров В. В. Рассеяние волн на границе раздела двух сред 11 МАТЕРИАЛОВЕДЧЕСКИЕ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МНСТ Обижаев Д. Ю., Жукова С. А., Бабаевский П. Г., Четверов Ю. С. Свойства и структура нанотолщинных слоев нитрида кремния, формируемых на поверхности полиимида низкотемпературным плазмохимическим синтезом 14 Чебанова Е. В., Кабиров Ю. В., Куприна Ю. А., Куприянов М. Ф. Эффекты неоднородности структурных состояний ВаТіО₃ и РbTiO₃ 20 Астахов М. В., Родин А. О., Селезнев В. В., Пигузов М. Ю. Свойства деформированных порошков неорганических сцинтилляторов..... 26 Александров П. А., Демаков К. Д., Шемардов С. Г., Кузнецов Ю. Ю. Использование имплантации ионов водорода и последующего высокотемпературного отжига для уменьшения дефектности эпитаксиального кремния на сапфире... 30 ЭЛЕМЕНТЫ МНСТ Алексенко А. Г. Микро- и наносистемы беспроводной электроники. 33 Белкин М. Е. Исследование эффективности применения полупроводникового лазерного излучателя для передачи сверхвысокоскоростного цифрового 36 Спирин В. Г. Анализ технологических погрешностей сопротивления тонкопле-42 МОЛЕКУЛЯРНАЯ ЭЛЕКТРОНИКА И БИОЭЛЕКТРОНИКА Ерофеев А. С., Яминский И. В. Кантилеверные биохимические анализаторы . 45 48 Совещание ректоров и руководителей НОЦ вузов по нанотехнологии 53

A

Аннотации на русском и английском языках с 1999 г. по настоящее время находятся в свободном доступе на сайтах журнала (http://www.microsystems.ru) и научной электронной библиотеки (http://elibrary.ru). Электронные версии полнотекстовых статей расположены на сайте журнала: с 1999 г. по 2003 г. в разделе "ПОИСК СТАТЕЙ" и с 2008 г. — в разделе "АРХИВ".

ПОДПИСКА:

- по каталогу Роспечати (индекс 79493);
 - по каталогу "Пресса России" (индекс 27849)
- Адрес для переписки: e-mail: nmst@novtex.ru

55

в редакции журнала (тел./факс: (499) 269-55-10)

© Издательство "Новые технологии", "Нано- и микросистемная техника", 2009.

Чанотехнологии и зондовая микроскопия

УДК 534.2:[539.21:577.32]

В. М. Колешко¹, д-р техн. наук, проф., зав. каф., Д. А. Дейнак², аспирант,

А. С. Чашинский¹, ст. преподаватель

Н. В. Хмурович², вед. специалист,

¹ Белорусский национальный технический университет,

² Концерн "Белбиофарм", г. Минск, e-mail: smart@rambler.ru

ПРОЕКТИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОННОГО НОСА НА ОСНОВЕ НАНОТРУБОК И ДНК

Рассмотрена возможность создания электронного носа с чувствительным элементом в виде нанотрубок, молекул ДНК или их комбинации для определения взрывчатых, наркотических и психотропных веществ. Определена оптимальная структура чувствительного элемента. Рассчитана его чувствительность к исследуемым веществам. Рассмотрена избирательная селективность нанотрубок относительно определения основания ДНК.

Ключевые слова: электронный нос, ПАВ-структура, чувствительный элемент, нанотрубка, ДНК, адсорбция, взрывчатые, наркотические и психотропные вещества.

Введение

В последние годы разработано много различных типов ДНК-сенсоров, основанных на радиохимических, ферментативных, флуоресцентных, электрохимических, оптических и акустических принципах. В настоящее время используются, преимущественно, оптические ДНК-сенсоры, хотя уже есть результаты эффективного использования электрохимических сенсоров [1]. Недостатками оптических сенсоров являются высокие требования к аппаратуре и сложность процесса считывания и распознавания сигнала, что, в свою очередь, повышает стоимость проведения анализа. Между тем, сенсоры на поверхностно-акустических волнах (ПАВ) являются высоко чувствительными устройствами для обнаружения биомолекулярного взаимодействия за малый промежуток времени. В этом отношении биосенсоры на ПАВ являются более привлекательными устройствами для биохимического анализа жидких, гетерогенных и газовых сред [2].

Одним из наиболее перспективных направлений в разработке интеллектуальных сенсорных систем вкуса и запаха является создание электронных языков (е-язык) и носов (е-нос) на поверхностно-акустических волнах, чувствительным элементом которых являются нанотрубки, цепочки ДНК в виде линейной двойной спирали, или их сочетания.

Электронный язык и электронный нос на ПАВ представляют собой тонкую пластину из пьезоэлектрического материала (например, кварца, LiNbO₃, LiTaO₃, Si/SiO₂/ZnO, Si/SiO₂/AlN), на которую нанесены напылением металла электроды для двух систем встречно-штыревых преобразователей (ВШП). Электроды связаны с генератором переменного тока с диапазоном частот до 5 ГГц. Напряжение переменного тока индуцирует в пьезоактивной подложке акустическую волну, распространяющуюся со скоростью ~ 3000 м/с. Длина акустической волны определяется расстоянием между электродами ВШП. Электронные языки на ПАВ структурах могут функционировать в нескольких режимах: резонатора, линии задержки [2, 3], а также в режиме дифференциальной схемы, состоящей из двух резонаторов, двух линий задержки, одной линии задержки и одного резонатора [4, 5]. Дифференциальная схема электронного языка позволяет одновременно измерить два механических (физико-акустических) и два электрических (электроакустических) параметра исследуемых жидких и/или гетерогенных сред.

На рис. 1 (см. вторую сторону обложки) представлена сенсорная система е-языка и е-носа с двумя линиями задержки [3]. Например, для е-языка одна линия задержки (металлизированная золотом) измеряет механические параметры (вязкость, массу, импеданс), а вторая — диэлектрическую проницаемость и электропроводность среды. Электрические параметры связаны с некоторыми свойствами вкуса, так, например, соленое — натрий, сладкое — сахароза.

На металлизированную золотом линию задержки (чувствительный канал) помещен чувствительный элемент (ЧЭ): нанотрубки, цепочки ДНК или их комбинации (см. рис. 1). При взаимодействии

Параметры ПАВ-микросенсоров для е-языка и е-носа

Пологотал	Материал звукопровода						
параметры	LiTaO ₃	Si/SiO ₂ /ZnO	SiO ₂	Si/SiO ₂ /AlN	GaAs	LiNbO ₃	
Ширина электродов ВШП, мкм Скорость ПАВ, м/с Частота синхронизма, МГц Число пар электродов ВШП Апертура ВШП, мкм Длина ПАВ, мкм	17 4212,6 55—65 28 30λ 7513	3 2943,82 245,32 9 89λ 12	3 3159 263,03 19 46λ 12	3 3679,93 306,661 31 89λ 12	$2 \\ 2604 \\ 325,5 \\ 67 \\ 4\lambda \\ 8$	2 3488 436 4 221λ 8	

этих элементов с исследуемой средой изменяется скорость и/или происходит затухание акустической волны — один из принципов считывания электрических свойств газовых, жидких и гетерогенных сред.

В табл. 1 представлены основные параметры ПАВ-сенсоров в зависимости от материала звуко-провода.

В настоящей работе представлено моделирование адсорбционных свойств чувствительных элементов с взрывчатыми, наркотическими и психотропными веществами, рассмотрена возможность использования ЧЭ при производстве электронных языков и электронных носов.

Метод исследования

Для молекулярно-динамического моделирования адсорбционных свойств чувствительных элементов с взрывчатыми, наркотическими и психотропными веществами использовался пакет *Нурег-Chem* фирмы *Нурегсиbe Inc.*

В данной работе использован эффективный потенциал MM+ как наиболее подходящий для моделирования процесса взаимодействия веществ с чувствительными элементами.

Эффективный потенциал ММ+ разрабатывался для органических молекул. Он учитывает потенциальные поля, формируемые всеми атомами рассчитываемой системы, и позволяет гибко модифицировать параметры расчета в зависимости от конкретной задачи, что делает его, с одной стороны, наиболее общим, а с другой стороны, резко увеличивает необходимые ресурсы по сравнению с другими методами молекулярной механики.

Потенциал ММ+ представляет собой расширение поля ММ2, разработанного Н. Л. Аллингером с сотрудниками [6, 7]. В ММ+ используются самые последние параметры ММ2 и типы атомов с изменяемой функциональной формой, позволяющие учесть периодические граничные условия, удлинение связи и изменяющие кубическую форму на квадратичную форму на больших расстояниях и т. д.

Энергия взаимодействия элементов в системе "вещество — чувствительный элемент" описывается связывающими и несвязывающими взаимодействиями. Связывающее взаимодействие определяется как потенциальная энергия деформации, которая является нулевой при некоторой идеальной конфигурации атомов в молекуле и характеризуется увеличением энергии, когда идеальная конфигурация деформируется. К связывающим взаимодействиям относятся: удлинение связи, изгиб, вращение двугранного угла. Несвязывающие взаимодействия включают: притяжение и барьерное отталкивание (Ван-дер-Ваальсовские силы), электростатические взаимодействия.

Основные компоненты силового поля MM+ представлены ниже.

Растяжение связей. Это слагаемое описывает изменение потенциальной энергии при изменении длины связи от r_0 до *r*. В MM+ используется кубическая форма этого слагаемого:

$$V_{\text{bond}} = \frac{1}{2} \sum_{\substack{i,j \\ \text{bonds}}} K_r^{ij} (r_{ij} - r_{ij}^0)^2 \times \\ \times \left[1 + \delta \left(r_{ij} - r_{ij}^0, \frac{1}{3} C_S^{ij}, \frac{4}{3} C_S^{ij} \right) C_S^{ij} (r_{ij} - r_{ij}^0) \right], \qquad (1)$$

где K_r — силовая постоянная данной связи; C_S — ее параметр ангармоничности. По умолчанию $C_S = -2,0$ (если *r* и r_0 даются в ангстремах). Функция переключения **δ** вводится для обнуления кубического члена при больших растяжениях связи:

$$\delta(x, a, b) = \begin{cases} 1, x \le a \\ 0, x \ge b \\ \frac{(b-x)^2(b+2x-3a)}{(b-a)^3}, a < x < b . \end{cases}$$
(2)

Диполи на связях. В MM+ вклад электростатических сил параметризуется дипольными моментами, ассоциированными с каждой полярной связью. Центр диполя по определению совпадает с серединой связи, и для каждой связи вводятся два дипольных момента μ_i и μ_j , находящихся на расстоянии r_{ij} друг от друга в местах расположения атомов, образующих связь. Дипольное слагаемое в потенциальной энергии потенциала MM+ есть

$$V_{\text{dipole}} = \frac{\varepsilon}{2} \sum_{\substack{i,j \\ \text{bond}}} m_i \mu_j \frac{\cos \chi - \cos \alpha_i \cos \alpha_j}{r_{ij}^3}, \qquad (3)$$

где диэлектрическая постоянная ε имеет по умолчанию значение 1,5; χ — угол между направлениями диполей; α_i и α_j — углы, образуемые направлениями диполей с вектором r_{ii} .

Угол между связями. Это слагаемое ассоциировано с изменением угла между связями θ по сравнению с нормальным углом θ_0 :

$$V_{\text{angle}} = \frac{1}{2} \sum_{\substack{\text{bond} \\ \text{angles}}} K_{\theta} (\theta - \theta_0)^2 [1 + C_{\theta} (\theta - \theta_0)^4].$$
(4)

По умолчанию $C_{\theta} = 7,0 \cdot 10^{-8}$. В MM+ используются также особые значения силовой постоянной K_{θ} , если атомы входят в трех- или четырех-членное кольцо.

Взаимодействие между растяжением связей и углом между ними. В ММ+ содержится член взаимодействия между растяжением связей и углом между ними. Если валентный угол задан атомами *i*, *j* и *k*, где *k* — центральный атом, то в потенциальную энергию ММ+ входит слагаемое

$$V_{\text{stretch-bond}} = \sum_{\substack{\text{bond}\\\text{angles}\,ikj}} K_{sb}(\theta - \theta_0)_{ikj} [(r - r_0)_{ik} + (r - r_0)_{jk}].$$
(5)

Пусть *R* есть атом, отличный от водорода, тогда $K_{sb} = 0,120$ для XR_2 , $K_{sb} = 0,090$ для XRH, где X = атом первого длинного периода, или $K_{sb} = 0,250$ для XR_2 ; $K_{sb} = -0,400$ для XRH, X = атом второго длинного периода.

Двугранные углы. Это слагаемое ассоциировано с тенденцией двугранных углов иметь определенное значение, близкое к 360/*n*, и минимум энергии, соответствующий цис- или трансконформациям, что учитывается в MM+ слагаемым

$$V_{\text{dihedral}} = \frac{1}{2} \sum_{\text{dihedrals}} V_n [1 + \cos(n\varphi - \varphi_0)]. \quad (6)$$

Периодичность этого взаимодействия 360/n. Для n = 1 и $\varphi_0 = 0$ оно соответствует ситуации, при которой энергия минимальна в трансконформации с потенциальным барьером V_n , максимальным для перехода в цисконформацию. При $\varphi_0 = 180^{\circ}$ реализуется противоположная ситуация. Значение n ограничивается промежутком от 1 до 6, поэтому для данного двугранного угла может задаваться до шести Фурье-компонент (6).

Ван-дер-Ваальсовские взаимодействия. В ММ+ Ван-дер-Ваальсовские взаимодействия представляются суммой членов, описывающих экспоненциальное отталкивание и притягивающее дисперсионное взаимодействие вида 1/R⁶.

Основными параметрами являются Ван-дер-Ваальсовский радиус r^* каждого атома и параметр жесткости ε_i , определяющий глубину потенциальной ямы и то, насколько легко или тяжело сдвинуть атомы ближе друг к другу. Это взаимодействие задается для всех не связанных химически атомных пар *ij*. Параметры для каждой пары определяются индивидуальными атомными параметрами:

$$r_{ij}^* = r_i^* - r_j^*,$$
 (7)

$$\varepsilon_{ii} = \sqrt{\varepsilon_i \varepsilon_i}.$$
 (8)

Тогда

$$V_{vdW} = \sum_{ij-\text{pairs}} \varepsilon_{ij} (A_{ij} \mathbf{e}^{-\rho_{ij}} - B_{ij} \rho_{ij}^{-6}), \qquad (9)$$

где A_{ij} и B_{ij} — константы; $\rho_{ij} = r_{ij}/r_{ij}^*$.

Моделирование

Цель моделирования — определить оптимальную структуру чувствительного элемента. Процесс моделирования адсорбционных свойств ЧЭ состоит из двух этапов.

На первом этапе в качестве чувствительного элемента выступают расположенные гексагональным кольцом молекулы ДНК и нанотрубки. Семь двойных цепочек ДНК имеют длину 24 Å (2,4 нм) каждая и состоят из 3001 атома. Нанотрубки имеют длину 42 Å (4,2 нм) каждая и состоят из 3017 атомов. Использовались нанотрубки с закрытым и открытым концами. В данном случае рассматривались углеродные нанотрубки в качестве чувствительного элемента. Между тем, существует возможность использования нанотрубок, созданных из BeO, Si_xC_{1-x}, BN и ZnO, которые ни в чем не усту-

Таблица 2

Список исследуемых веществ

	ВЗРЫВЧАТЫЕ ВЕЩЕСТВА				
1 2 3 4 5 6 7	Гексоген Нитробензол Тринитротолуол, тротил Нитроглицерин Нитрометан Октоген Пентаэритриттетранитрат (ТЭН)	Hexogen (HG) Nitrobenzol (NB) TNT (TNT) Nitroglicerine (NG) Nitromethane (NM) Oktogen (O) TEN (TEN)			
	НАРКОТИЧЕСКИЕ ВЕШ	ЦЕСТВА			
1	Амфетамин	Amphetamine (A)			
2	Барбитурат	Barbiturate (B)			
3	Кокаин	Cocaine (C)			
4	Валиум	Valium (V)			
5	Эфедрин	Ephedrin (E)			
6	Морфин	Morphine (Mo)			
7	Героин	Heroin (H)			
8	Либриум	Librium (L)			
9	Диэтиламид лизергиновой кис- лоты (ЛСД)	Lysergic acid diethylamide (LSD)			
10	Метилендиоксиамфетамин (МДА), "любовный наркотик"	MDA (MDA)			
11	Метилендиоксиметамфетамин (МДМА), Экстази, ХТС, Адам, Essence, Cardillac	MDMA (MDMA)			
12	Мескалин	Meskaline (M)			

пают, а по некоторым параметрам и превосходят углеродные нанотрубки.

На втором этапе в качестве чувствительного элемента выступает нанотрубка с шестью цепочками ДНК и, наоборот, цепочка ДНК с шестью нанотрубками (рис. 2, a, см. вторую сторону обложки). Исследуемое вещество (табл. 2) помещается над чувствительным элементом (рис. 2, δ).

Расчеты проводились с помощью вычисления единичной точки (single point calculation), в процессе которого определялись молекулярные свойства, такие как энергия или спиновая плотность, задаваемые молекулярной структурой. Результатом вычисления являются энергия и градиент этой энергии, т. е. средняя квадратичная производная энергии относительно декартовых координат. При минимуме воздействия сил на атомы градиент равен нулю. Значение градиента дает качественную информацию о том, близка ли система к минимуму энергии. Расчеты велись с заданным градиентом, равным 0,01 ккал/(Å · моль). Геометрическая оптимизация молекул системы проводилась по алгоритму Полака—Рибиера. Время выполнения одной итерации вычисления полной энергии системы, состоящей из ~3050 атомов, составляет 45 с. Время геометрической оптимизации системы "чувствительный элемент — вещество" составляет ~3 ч.

Результаты моделирования

Основным параметром, определяющим адсорбцию системы и характеризующим возможности чувствительного элемента, является энергия связи, определяемая как

$$V_{\rm CB} = V_{\rm U\Im} + V_{\rm MOI} - V_{\rm CHC}, \tag{10}$$

где $V_{\rm U}$ — полная энергия чувствительного элемента; $V_{\rm MOR}$ — полная энергия молекулы наркотического или взрывчатого вещества; $V_{\rm cuc}$ — энергия системы "вещество — чувствительный элемент".

В результате моделирования получены зависимости энергии связи взрывчатых, наркотических



Рис. 3. Зависимость энергии связи при адсорбции взрывчатых веществ от различных структур ЧЭ:

I-нанотрубка;
 2-ДНК; 3-нанотрубка/6 ДНК;
 4-ДНК/6 нанотрубок



Рис. 4. Зависимость энергии связи при адсорбции наркотических и психотропных веществ от различных структур ЧЭ: 1 — нанотрубка; 2 — ДНК; 3 — нанотрубка/6 ДНК; 4 — ДНК/6 нанотрубок

и психотропных веществ для различных структур ЧЭ, представленные на рис. 3 и 4.

По результатам моделирования взрывчатых веществ можно сделать вывод, что двойная цепочка ДНК и нанотрубка имеют практически одинаковые адсорбционные свойства (см. рис. 3). Между тем, для наркотических и психотропных веществ это соотношение меняется в пользу двойной цепочки ДНК. Чувствительный элемент, состоящий из двойной цепочки ДНК и шести расположенных в виде гексагонального кольца нанотрубок, имеет наилучший показатель адсорбции среди рассмотренных структур как для взрывчатых, так и для наркотических и психотропных веществ.

Таким образом, оптимальным вариантом чувствительного элемента для е-языка и е-носа на ПАВ из рассмотренных выше является система из одной двойной цепочки ДНК и шести нанотрубок, расположенных в виде гексагонального кольца вокруг этой цепочки. При этом чувствительность такой системы гораздо выше чувствительности других систем.

Также была рассмотрена избирательная селективность нанотрубок относительно определения основания нанотрубки (рис. 5, см. вторую сторону обложки).

При проведении исследований использовалась нанотрубка хиральностью 10×10 (D = 1,36 нм). Выбирались основания ДНК (аденин, гуанин, тимин и цитозин) и устанавливались на определенном расстоянии от конца нанотрубки. Благодаря способности нанотрубки "всасывать" в себя цепочки ДНК были определены скорости "всасывания" азотистых оснований ДНК, в результате чего получены данные, представленные на рис. 6, где видно, что существует обратная зависимость между молекулярной массой адсорбированного в нанотрубку ДНК и скоростью "всасывания" данного основания. Этот эффект может быть использован при создании ПАВ-сенсоров, в которых в качестве чувстви-



ПНС. 0. зависимость изменения скорости всясывания основания ДНК в углеродную нанотрубку от молекулярной массы основания ЛНК:

А – аденин; С – гуанин; Т – тимин; С – цитозин

тельного материала применены углеродные нанотрубки, при пропускании ДНК через которые будет меняться скорость ПАВ-волны сенсоров.

На основании полученных данных можно сделать вывод о возможности определения вида осно-

УДК 620.187:539.25

В. В. Поляков, зам. директора по разработкам, ЗАО "Нанотехнология-МДТ", г. Москва, Зеленоград, e-mail: polyakov@ntmdt. ru

МЕТОД КОМПЕНСАЦИИ ПАРАЗИТНОЙ ЕМКОСТИ В СКАНИРУЮЩЕЙ ЕМКОСТНОЙ МИКРОСКОПИИ

Предложены зондовый датчик специальной конструкции и оригинальный метод компенсации паразитной емкости для 2D-характеризации профилей легирования полупроводниковых структур с помощью методики сканирующей емкостной микроскопии (CEM). Разработано соответствующее устройство, реализующее методику CEM. Представлены результаты, демонстрирующие преимущества использования метода компенсации в CEM и высокое (на уровне 10...20 нм) пространственное разрешение методики. Результаты получены на образцах с концентрацией носителей в диапазоне 10¹⁵...10²⁰ см⁻³.

Ключевые слова: емкостная микроскопия, зондовая микроскопия, атомно-силовая микроскопия, сканирующий зондовый микроскоп, концентрация носителей, профиль легирования.

Введение

Важной задачей контроля в микро- и наноэлектронике является 2D-характеризация уровней легирования полупроводниковых структур. Для этого с разным успехом применяется большое число вания ДНК при адсорбции молекул ДНК углеродными нанотрубками.

Список литературы

1. **Pearson J. E., Gill A., Vadgama P.** Analytical aspect of biosensors // Ann. Clin. Biochem. 2000. N 37. P. 119–145.

2. Колешко В. М., Мешков Ю. В. Микроэлектронные преобразователи информации на поверхностно-акустических волнах // Электроника. 1985. № 9.

3. Колешко В. М., Мешков Ю. В., Скопич В. И., Трынов В. Г. Преобразователь информации на поверхностных акустических волнах: А. с. СССР № 1648234, 1991.

4. Колешко В. М., Мешков Ю. В., Лозовский Э. И. Дифференциальный пьезоэлектрический преобразователь на поверхностных акустических волнах. А. с. СССР № 1501867, 1989.

5. Колешко В. М., Мешков Ю. В., Лозовский Э. И. Стабильные высокочастотные генераторы на быстродействующих логических элементах с резонаторами на поверхностных акустических волнах // Приборы и техника эксперимента. 1988. № 3. С. 119—122.

6. Burkert U., Allinger N. L. Molecular Mechanics // ACS Monograph. 1982. 177.

7. Allinger N. L. // J. Am. Chem. Soc. 1977. 99. 8127.

методов, в том числе методы сканирующей туннельной микроскопии [1] и атомно-силовой микроскопии (ACM), такие как методика зонда Кельвина [2; 3], методика определения контраста сопротивления растекания [4], сканирующая емкостная микроскопия (CEM). Последняя является, пожалуй, наиболее перспективной среди перечисленных [5], так как обеспечивает высокое пространственное разрешение (порядка 10 нм) и в отличие от методики определения контраста сопротивления растекания является неразрушающей.

В доступных на рынке сканирующих зондовых микроскопах (СЗМ) для реализации методики СЕМ используется так называемый метод модуляции паразитной емкости, принципы и недостатки которого обсуждаются в работе. Далее предложены зондовый датчик для СЕМ специальной конструкции и оригинальный метод компенсации паразитной емкости, а также устройство, реализующее этот метод на серийно выпускаемом ЗАО "Нанотехнология-МДТ" приборе Интегра, перечислены преимущества метода и представлены экспериментальные результаты.

Физические принципы методики СЕМ и существующие методы ее реализации

В основе СЕМ лежит изучение локальных вольт-фарадных характеристик системы, представляющей собой проводящий зонд СЗМ, прижатый к тонкому слою диэлектрика на поверхности исследуемой полупроводниковой структуры (рис. 1).



Рис. 1. Проводящии зонд СЗМ, прижатыи к слою диэлектрика на поверхности полупроводниковой структуры, и электрические емкости в такой системе

В зависимости от типа проводимости и концентрации носителей в полупроводнике кривая С-V этой системы будет иметь различный характер. Если удается в каждой точке области сканирования СЗМ получить о кривой С-V информацию, то можно говорить, что построен 2D-контраст профиля легирования полупроводника. Для этого обычно измеряют распределение по растру зондового микроскопа некоторого сигнала, пропорционального производной dC/dV емкости системы [6]. Поскольку рассматриваемое изменение емкости в зависимости от приложенного напряжения является полевым эффектом, а электрическое поле в такой системе локализовано в районе острия зондового датчика, то следует ожидать высокого (порядка радиуса закругления острия) пространственного разрешения методики СЕМ.

На пути практической реализации этой идеи имеется ряд трудностей. Во-первых, исходя хотя бы из приближения плоского конденсатора, легко оценить, что характерные значения образованной кончиком иглы и образцом емкости C(V), где V напряжение между зондом и образцом, составляют по порядку величины 10^{-16} ... $10^{-17} \Phi$ (10...100 а Φ), т. е. для реализации методики требуется уметь измерять емкость системы с разрешением на уровне порядка единиц аттофарад. Во-вторых, в системе имеются паразитные емкости C_1 и C_2 (см. рис. 1), образованные балкой, чипом зондового датчика и образцом соответственно, которые в сумме составляют около 0,5 пФ [7]. В-третьих, вследствие изменения геометрии системы в процессе сканирования изменяется также значение паразитной емкости; ее вариации составляют по порядку величины от 1 до 100 аФ/мкм при перемещении зонда в латеральном и от 2 до 4 $a\Phi$ /нм в вертикальном направлениях [7; 8].

В выпускаемых серийно C3M для реализации методики CEM применяется метод модуляции паразитной емкости, суть которого состоит в следующем [6]. На образец подается постоянное смещение и переменный (с частотой 10...100 кГц) сигнал. Тем самым, общая емкость в системе модулируется за счет малых вариаций емкости C(V)



Рис. 2. Схема реализации СЕМ методом модуляции паразитной емкости [6]

в результате полевого эффекта. Для измерения глубины модуляции емкости, которая и является здесь полезным сигналом, применяют СВЧ емкостной датчик. В таком датчике (рис. 2) измеряемая емкость включается в резонансный контур, который индуктивно возбуждается высокостабильным СВЧ-генератором на частоте около 900 МГц. Небольшие изменения измеряемой емкости приводят к заметному смещению резонансной кривой образованного контура и, следовательно, к изменению снимаемого индуктивно отклика системы.

Разрешение по емкости такой системы достаточно высоко, однако метод модуляции паразитной емкости имеет ряд недостатков. Во-первых, при изменениях паразитной емкости в процессе сканирования изменяется чувствительность системы или, говоря другими словами, крутизна преобразования емкостного датчика. На получаемых сканированных изображениях в таких случаях наблюдаются искажения [7, 8]. Отчасти по этой причине емкостные измерения проводят в большинстве случаев на сколах образцов, когда в силу геометрии паразитная емкость, образованная чипом зондового датчика и образцом, существенно уменьшается. Во-вторых, при использовании такой схемы измерений невозможно детектировать присутствие омического сопротивления, да и само наличие этого сопротивления уменьшает чувствительность системы [7].

Балансные методы также использовались различными группами для реализации СЕМ [9] при емкостных измерениях как в туннельных, так и в атомно-силовых микроскопах, но никогда не применялись в выпускаемых серийно СЗМ. Преимуществом таких подходов является легкость измерения абсолютного значения емкости в системе. Однако и здесь остаются существенными искажения, вызванные изменением паразитной емкости в процессе сканирования. В работе [7] предложен численный метод коррекции этих искажений, аналогичный по сути методам нелинейной коррекции пьезокерамики, широко используемым в C3M, но такая процедура достаточно громоздка. Кроме того, описанные в литературе мостовые схемы имеют относительно большие (на уровне 20...100 мс) времена измерения при характерном времени измерения C3M в точке, порядка 1 мс.

Зонд специальной конструкции для СЕМ и метод компенсации паразитной емкости

Предлагаемый метод состоит в следующем. Паразитная емкость в системе образована преимущественно чипом зондового датчика и образцом. Несложные оценки позволяют утверждать, что и изменения паразитной емкости при сканировании в основном обусловлены изменениями емкости между чипом и образцом. Использование зонда специальной конструкции [10] позволяет во многом обойти эти трудности. Для этого на чип со стороны иглы наносится проводящий слой, отделенный от собственно чипа диэлектрической прослойкой толщиной 30...50 мкм (рис. 3), а гальванический контакт к игле осуществляется с противоположной стороны чипа.

Если на образец подать зондирующий сигнал, то токи, протекающие с образца на чип такого зондового датчика, вместо измерительных цепей устройства потекут в землю. Таким образом, мы вместо паразитной емкости, образованной чипом и образцом, получили превосходящую ее в 3-5 раз емкость, образованную теперь чипом зондового датчика и экраном через диэлектрическую прослойку. Однако бороться с паразитной емкостью на землю прибора схемотехнически проще, чем с паразитной емкостью между чипом и образцом. При этом емкость, создаваемая экраном, не изменяется в процессе сканирования. В этом и состоит главное преимущество предложенного зондового датчика. Его использование позволяет более чем на порядок уменьшить изменения паразитной емкости в процессе сканирования.

После такого экранирования остается нескомпенсированной паразитная емкость, образованная



Рис. 3. Предложенный зондовый датчик специальной конструкции: 1 — чип зондового датчика; 2 — диэлектрическая прослойка; 3 — проводящий слой; 4 — балка зондового датчика; 5 — острие



Рис. 4. Структурная схема разработанного устройства: 1 — зондовый датчик специальной конструкции; 2 — компенсационный электрод; 3 — варикап; 4 — балансный усилитель измерительной головки; 5 — выносной блок устройства; 6 рабочая станция СЗМ

балкой зондового датчика и образцом, а также неэкранированной (размерами порядка $0,1 \times 1$ мм) частью чипа и образцом, с суммарной емкостью около 20 фФ. Ее и следует компенсировать, что предложено делать в два этапа. На исследуемый образец подается постоянное смещение и зондирующий сигнал на частоте 10 МГц амплитудой 0,1-1 В. Первый этап представляет собой электромеханическую компенсацию — над балкой и чипом зондового датчика располагается компенсационный электрод, выполненный в форме полукольца. Электрод и зонд соединяются с инвертирующим и неинвертирующим входами балансного усилителя измерительной головки устройства соответственно (рис. 4). Угловое положение компенсационного электрода относительно образца подбирается при первоначальной настройке головки таким образом, чтобы при касании иглы образца наблюдался минимально возможный выходной сигнал головки. Второй этап компенсации паразитной емкости электрическая компенсация. Один из входов усилителя соединяется через варикап с общей шиной прибора. При корректной настройке электромеханической компенсации (то есть положения электрода относительно образца) и изменении емкости варикапа от ее минимального значения до максимального на выходе наблюдается минимум амплитуды выходного сигнала. В результате описанной процедуры удается добиться симметрии входов балансного усилителя головки на уровне порядка 100 аФ как относительно общей шины прибора, так и относительно образца.

Конструктивно компенсационный электрод встраивается в держатель зондового датчика измерительной головки, а в целом измерительная головка представляет собой юстировочный столик для СЗМ Интегра производства ЗАО "Нанотехнология-МДТ".

Выходной сигнал измерительной головки подается на блок обработки, в котором он через повторитель попадает на синхронный детектор (см. рис. 4). Опорный сигнал на детектор поступает с кварцевого генератора (от которого подается и зондирующее напряжение на образец) через регулируемый фазовращатель. Наличие фазовращателя позволяет компенсировать неконтролируемые набеги фаз на пути сигнала от генератора к детектору через образец и измерительную головку. На выходе детектора будем, следовательно, иметь некоторое постоянное напряжение, пропорциональное с точностью до аддитивной постоянной (обусловленной наличием остаточной нескомпенсированной емкости) значению емкости между острием зондового датчика и образцом. Этот сигнал, который обозначим как "C(V) + const", подается на внешний вход контроллера C3M.

Измерение контраста производной dC/dV при движении зонда по области сканирования осуществляется следующим образом. В каждой точке сканируемой области на образец подается сначала некоторое постоянное смещение, затем его значение изменяется на некоторую величину dV, составляющую 0,5...3 В. Выходной сигнал блока обработки оцифровывается в соответствующие моменты времени. Вычитая полученные таким образом значения, будем иметь сигнал, пропорциональный производной dC/dV системы.

Приемы синхронного детектирования используются здесь на частоте 10 МГц, что дает возможность при прочих равных условиях снизить спектральную плотность шумов емкостного датчика по сравнению с методом модуляции паразитной емкости, где синхронное детектирование используется лишь на модулирующей (десятки килогерц) частоте.

Экспериментальные результаты

Приведем некоторые результаты, полученные с помощь разработанного устройства. Эксперименты проводились на СЗМ Интегра производства ЗАО "Нанотехнология-МДТ".

На рис. 5 представлены сканированные изображения емкостного контраста dC/dV (рис. 5, *a*) и рельефа (рис. 5, *б*) поверхности интегральной



Рис. 5. Сканированные изображения интегральной схемы: a — емкостной контраст dC/dV; δ — рельеф. Область сканирования 40 × 40 мкм, характерные высоты рельефа — 350 нм



Рис. 6. Тестовый образец для сканирующей емкостной микроскопии:

a — структура исследуемого образца; δ — сканированное изображение емкостного контраста dC/dV; e — рельеф образца. Область сканирования 3,5 × 5 мкм



Рис. 7. Кривые С-V, измеренные:

а — в легированной области; *б* — на подложке. Масштабы по оси емкости одинаковы, начала отсчета смещены



Рис. 8. Тестовый образец для сканирующей емкостной микроскопии:

a — изменение концентрации носителей в исследуемом образце; δ — рельеф образца; a — сканированное изображение емкостного контраста; c — сканированное изображение емкостного контраста dC/dV. Область сканирования 28 × 7 мкм

схемы. Подложка имеет *p*-тип проводимости, выполненные в ней карманы — *n*-тип.

На рис. 6, а представлена структура другого образца (предоставлен National Nano Device Laboratories, Taiwan, Mao-Nan Chang, Ph. D). Образец изготовляется следующим образом. Дифракционная решетка с периодом 2,8 мкм, выполненная на кремниевой подложке *n*-типа с ориентацией (100), легируется ионами BF_2 с энергией 20 кэВ. Доза при имплантации такова, что концентрация примеси в легированных областях решетки составляет порядка 10^{20} см⁻³. Затем два скола такой решетки соединяются вместе. На рис. 6, δ и 6, e представлены сканированные изображения емкостного контраста и рельефа этого образца соответственно. На рис. 7 представлены *C*-*V* кривые, полученные на данном образце в легированной области (рис. 7, a) и на подложке (рис. 7, δ).

Еще один образец, использовавшийся для тестовых измерений, представляет собой скол пластины, легированной таким образом, что концентрация носителей меняется в глубину, как показано на рис. 8, *а*. На рис. 8, *б* представлен рельеф образца, на рис. 8, *в* приведено сканированное изображение емкостного контраста (выходной сигнал выносного блока разработанного устройства), на рис. 8, *г* — емкостной контраст dC/dV.

Анализ результатов и выводы

Одной из проблем реализации методики СЕМ является то, что при исследованиях больших планарных образцов изменения паразитной емкости в системе в процессе сканирования составляют порядка 1—100 а Φ /мкм при латеральном смещении зонда, что затрудняет применение СЕМ на таких образцах, в частности, вносит нелинейные искажения в получаемые изображения. Для того чтобы побороть этот эффект, нами был предложен зонд специальной конструкции. Результаты, представленные на рис. 5, полученные при сканировании образца размером 10 × 10 мм по области 40 × 40 мкм, подтверждают сказанное. Действительно, изменения паразитной емкости в таком случае составляют по порядку величины около $400 a\Phi$; тем не менее на изображении четко видны границы по-разному легированных областей и нет нелинейных искажений. Это обстоятельство является существенным преимуществом разработанного устройства по сравнению с аналогами, поскольку открывает возможность получения на образцах фактически любой геометрии емкостного контраста, лишенного искажений и пригодного для последующего численного анализа профиля легирования. Таким образом, имеется возможность применения СЕМ для контроля результатов легирования пластин стандартных для микроэлектроники размеров с высоким пространственным разрешением.

Результаты, показанные на рис. 6 и 8, демонстрируют высокое пространственное разрешение методики (см. рис. 6) и достаточный для приложений динамический диапазон концентраций носителей в образцах (от 10^{15} см⁻³ до 10^{20} см⁻³, как показывают в совокупности результаты, приведенные на рис. 6 и рис. 8), которые можно детектировать.

В целом, предложенный метод реализации СЕМ с использованием зонда специальной конструкции обеспечивает достаточную чувствительность методики по емкости и высокое пространственное разрешение, а также позволяет получать неискаженные и пригодные для дальнейшего анализа результаты на образцах фактически любой геометрии. Ясно, что следующим шагом развития методики должна стать разработка алгоритмов численного анализа результатов, получаемых в методике СЕМ, для восстановления профилей легирования полупроводниковых структур.

Список литературы

1. Yu E. Nanoscale characterization of semiconductor materials and devices using scanning probe techniques // Materials Science and Engineering. 1996. R17. P. 147–206.

2. Vatel O., Tanimoto M. Kelvin probe force microscopy for potential distribution measurement of semiconductor devices // Journal of Applied Physic. 1995. 77. P. 2358.

3. **Kikukawa A., Hosaka S., Imura R.** Silicon pn junction imaging and characterizations using sensitivity enhanced Kelvin probe force microscopy // Applied Physics Letters. 1995. 66. P. 3510.

4. Shafai C., Thimson D. J., Simard-Normandin M. et al. Deliniation of semiconductor doping by scanning resistance microscopy // Applied Physics Letters. 1994. 64. P. 342.

5. Nakagiri N., Yamamoto T., Sugimura H. et al. Application of scanning capacitance microscopy to semiconductor devices // Nanotechnology. 1997. N 8. A32–A37.

6. **Born A., Wiesendanger R.** Scanning capacitance microscopy as a tool for the characterization of integrated circuits // Applied Physics A Materials Science & Processing. 1998. 66. S421—S426.

7. Lee D. T., Pelz J. P., Bhushan B. Instrumentation for direct, low frequency scanning capacitance microscopy, and analysis of position dependent stray capacitance // Review of Scientific Instrument. 2002. 73. P. 3525.

8. **Pelz J. P., Lee D. T., Bhushan B.** Method for measuring mn-scale tip-sample capacitance: US Patent Application Publication, US 2005/0077915 Al.

9. Arakawa H., Nishitani R. Spatially resolved measurements of the capacitance by scanning tunneling microscope combined with a capacitance bridge // Journal of Vacuum Science and Technology B. 2001. 19. P. 1150–1153.

10. **2289862 RU**, МПК G12B 21/02. Зонд для сканирующей емкостной микроскопии. Быков В. А., Быков А. В., Мягков И. В., Поляков В. В. и др. Опубл. 2006. Бюл. № 35.

Моделирование и конструирование МНСТ

УДК 621.3.049.77 + 62-791.2

В. В. Егоров, канд. техн. наук, ст. науч. сотр., ЦНИТИ "Техномаш", г. Москва, e-mail: v-sphinks@yandex.ru

РАССЕЯНИЕ ВОЛН НА ГРАНИЦЕ РАЗДЕЛА ДВУХ СРЕД

Показано, что за счет выбора представления компонент граничного поля векторную задачу дифракции для границы раздела двух сред можно свести к системе скалярных задач дифракции.

Ключевые слова: уравнения Максвелла, граничная задача, интегральное уравнение, граница раздела, декомпозиция задачи.

Задача рассеяния волн на границе приводит к необходимости решения системы интегродифференциальных уравнений. Поскольку получить точное решение удается лишь в исключительных случаях, то основная масса исследований посвящена поиску его приближений: численных, если граница регулярна, и аналитических, использующих метод малого параметра в той или иной его форме, для случайной или не очень сложной границы. Как правило, все эти методы имеют весьма ограниченное применение и число решенных задач можно пересчитать по пальцам. Конечно, речь не идет о прикладных инженерных исследованиях, где страстное желание автора получить "хоть какой-то" результат оправдывает усилия, затраченные на достижение поставленной цели. Множество работ в этой области не поддается учету, а их систематизация, по всей видимости, смысла не имеет. Вместе с тем, приложений рассматриваемой задачи достаточно много и потребность в ее корректной постановке велика. Здесь можно упомянуть лазерные системы измерения шероховатости поверхности, оптоэлектронные системы обработки и измерения параметров регулярно неровной поверхности с высокой точностью (микро- и нанометры). Кроме того, они могут быть полезны и для систем передачи информации, в локации, при проектировании антенн, при расчете режимов схем

СВЧ, моделировании радиоэлектронных компонентов и в других применениях, где качество решения задачи определяет облик системы и напрямую связано с ее эффективностью и затратами на разработку.

В качестве исходной рассматривается известная система уравнений для заданной границы раздела двух сред в следующей форме [1]:

$$\begin{cases} E(r) = TE^{n}(r) + \frac{T}{4\pi} \int_{S} (ED_{n'}\phi - \phi D_{n'}E + n'\phi \operatorname{div} E)ds; \\ H(r) = TH^{n}(r) + \frac{T}{4\pi} \int_{S} (HD_{n'}\phi - \phi D_{n'}H + n'\phi \operatorname{div} H)ds, \end{cases}$$
(1)

где r — точка наблюдения; r' — точка поверхности S; S — поверхность рассеяния; \int — интеграл понимается в смысле главного значения; D — частная производная; n' — нормаль к поверхности S в точке r'; E и H — составляющие электрического и магнитного полей соответственно; E^n и H^n — электрическая и магнитная компоненты падающего поля; $\varphi = \exp(ikR)/R$; R = |r - r'| — радиус-вектор; T = $= \begin{cases} 2, r \in S; \\ 1, r \notin S, \end{cases} k$ — волновое число.

Система уравнений (1) связывает двенадцать компонент по три для каждой из составляющих E и H и их производных на границе. Учет граничных условий дает возможность получить недостающие шесть уравнений.

Для решения системы (1) привлекаются различные соображения симметрии, позволяющие упростить задачу за счет ее декомпозиции на более простые. В связи с этим полезно сослаться на работу [2], в которой дается обзор известных методов декомпозиции и предлагается их обобщение, основанное на методе Бромвича. Тем не менее, для тел и поверхностей, отличающихся от эллипсоида и плоскости, не удается провести декомпозицию путем удачного выбора координат, чтобы довести решение до обозримых аналитических результатов. В этом случае имеет смысл рассмотреть декомпозицию задачи по другим признакам, что, собственно, и является целью настоящей работы. Полезно переписать первое уравнение системы (1) в форме

$$\begin{cases} E(r) = E^{n}(r) + \frac{1}{4\pi} \int_{S} (ED_{n'}\phi - \phi q) ds; \\ q = -D_{n'}E + n' \text{div} E. \end{cases}$$
(2)

Вычисление нормальной производной от правой и левой частей (2) позволяет получить

$$D_n E(r) = D_n E^n(r) + \frac{1}{4\pi} \int_{S} (E D_{n'n} \varphi - q D_n \varphi) ds.$$
 (3)

Поскольку

$$D_{n'} \varphi = (\operatorname{grad} \varphi, n');$$

$$D_n \varphi = \{(\operatorname{grad}\varphi, n)/(\operatorname{grad}\varphi, n')\} D_{n'} \varphi = c D_{n'} \varphi,$$

где (,) — скалярное произведение, *с*-нормирующий коэффициент, соотношение (3) можно переписать в виде

$$D_n E(r) = D_n E^n(r) + \frac{1}{4\pi} \int_S (ED_{n'} cD_{n'} \phi + cqD_{n'} \phi) ds,$$

или

$$D_{n}E(r) = D_{n}E^{n}(r) + \frac{1}{4\pi} \int_{S} E(D_{n'}c)D_{n'}\phi ds + \frac{1}{4\pi} \int_{S} EcD_{n'n'}\phi ds + \frac{1}{4\pi} \int_{S} cq(D_{n'}\phi)ds.$$
(4)

Воспользовавшись тем, что

$$D_{n'n'}\phi = \Delta \phi + k^2 \phi - (\Delta_{\perp}' + k^2)\phi,$$

где — Δ оператор Лапласа, а Δ'_{\perp} — поперечный к *n*' оператор Лапласа в точке *r*', и учитывая равенство

$$\Delta \varphi + k^2 \varphi = 0,$$

можно переписать (4) в виде

$$D_{n}E(r) = D_{n}E^{n}(r) + \frac{1}{4\pi} \int_{S} (E(D_{n'}c) + cq)D_{n'}\varphi ds - - \frac{1}{4\pi} \int_{S} Ec(\Delta_{\perp}' + k^{2})\varphi ds.$$
(5)

Обозначив последний интеграл в (4) через *I* и выполнив очевидные преобразования, легко получить

$$I = \frac{1}{4\pi} \int_{S} (\Delta'_{\perp} + k^2) E c \varphi ds.$$
 (6)

При выводе (6) использовались замкнутость поверхности S и интегрирование по частям. Для первого интеграла в (5), обозначаемого I_2 , получается

$$I_{2} = \begin{cases} I_{2}, & r \notin S; \\ \frac{1}{2} (E(D_{n}c) + cq) + \frac{1}{4\pi} \int_{S(r' \neq r)} (E(D_{n'}c) + cq) D_{n'}\phi ds, & r \in S. \end{cases}$$

Учитывая (4)—(6), для точек на поверхности S можно записать систему уравнений относительно $E, D_n E$ и q в следующей форме:

$$E(r) = 2E^{n}(r) + \frac{1}{2\pi} \int_{S} (ED_{n'} \varphi + q\varphi) ds;$$

$$D_{n}E(r) = D_{n}E^{n}(r) + \frac{1}{4\pi} \int_{S} (E(D_{n'}c) + (7)) \varphi ds - \frac{1}{4\pi} \int_{S} \varphi(\Delta_{\perp}' + k^{2})(Ec) ds.$$

Для получения дополнительных уравнений, определяющих компоненты граничного поля, необходимо воспользоваться граничными условиями

$$\begin{cases} D_n E_{n_1} = -D_n E_{n_2}; \\ n \times (E_1 - E_2) = n \times (H_1 - H_2) = 0; \\ \varepsilon_1 E_{n_1} = \varepsilon_2 E_{n_2}; \\ \mu_1 H_{n_1} = \mu_2 H_{n_2}, \end{cases}$$
(8)

где индексы 1 и 2 относятся к первой и второй средам; ε_1 , ε_2 и μ_1 , μ_2 — электрическая и магнитная проницаемости сред 1 и 2; 1, 2 — подстрочные индексы обозначают соответствующие компоненты полей; × — здесь символ векторного произведения.

В силу уравнений Максвелла

$$\begin{cases} \operatorname{rot} E_1 = -j\omega\mu_1 H_1; \\ \operatorname{rot} E_2 = -j\omega\mu_2 H_2, \end{cases}$$

где ω — круговая частота, и того, что ротор, выраженный через определитель, имеет вид

$$\operatorname{rot} E = \begin{vmatrix} l & m & n \\ D_x & D_y & D_z \\ E_x & E_y & E_n \end{vmatrix} = l(D_y E_z - D_z E_y) - m(D_x E_z - D_z E_x) + n(D_x E_y - D_y E_x),$$

где $\{x, y, z\}$ — локальные ортогональные координаты в рассматриваемой точке поверхности; l, m направляющие векторы, а n к тому же нормаль к поверхности, т. е. $D_n = D_{z}$, а $E_n = E_z$. Легко ви-

— НАНО- И МИКРОСИСТЕМНАЯ ТЕХНИКА, № 9, 2009 —

деть, что при условии (8) нормальные и тангенциальные компоненты полей связаны между собой очевидными соотношениями

$$(1/\mu_2)D_n E_{2\tau} - (1/\mu_1)D_n E_{1\tau} = = (1/\mu_2) \operatorname{grad}_{\tau}(\boldsymbol{\varepsilon}_1/\boldsymbol{\varepsilon}_2) E_{n_1} - (1/\mu_1) \operatorname{grad}_{\tau} E_{n_2}, \qquad (9)$$

где grad_{τ} — оператор градиента, действующий в касательной плоскости; $E_{i\tau}$ (i = 1, 2) — тангенциальные компоненты вектора E в *i*-й среде.

Объединяя (6)—(9) для нормальных компонент q, $D_n E$ и E в первой среде, можно записать систему уравнений в следующей форме:

$$\begin{cases} E_n^n = (1 + \varepsilon_1/\varepsilon_2) \left(\frac{1}{2} E_n\right) + \\ + \frac{1}{4\pi} \int_S (E_{n'} D_{n'} + q_{n'})(\phi_2 - \phi_1) ds; \\ D_n E_n^n = 2D_n E_n + q_n + \frac{1}{4\pi} \int_S [\phi_2(\Delta_{\perp}' + k_2^2) - \\ - \phi_1(\Delta_{\perp}' + k_1^2)](E_{n'}c) ds + \frac{1}{4\pi} \int_S cq_{n'} D_{n'}(\phi_2 - \phi_1) ds; \\ q = -D_{n'}E + n' divE \end{cases}$$
(10)

либо сопряженную систему для тех же компонент:

$$\begin{cases} E_n^n = \frac{1}{4\pi} \int_{S} (E_{n'} D_{n'} - q_{n'}) ((\epsilon_1 / \epsilon_2) \varphi_2 + \varphi_1) ds; \\ D_n E_n^n = -\frac{1}{4\pi} \int_{S} [\varphi_2 (\Delta_{\perp}' + k_2^2) - (11) \\ -\varphi_1 (\Delta_{\perp}' + k_1^2)] (E_{n'} c) ds - \frac{1}{4\pi} \int_{S} cq_{n'} D_{n'} (\varphi_2 - \varphi_1) ds; \\ q = -D_{n'} E + n' \text{div} E. \end{cases}$$

Для тангенциальных составляющих E_{τ} и q_{τ} из аналогичных соображений следует:

$$\begin{cases} E_{\tau}^{n} = E_{\tau} + \frac{1}{4\pi} \int_{S} (E_{\tau} D_{n'} + q_{\tau})(\varphi_{2} - \varphi_{1}) ds; \\ D_{n} E_{\tau}^{n} = \left(\operatorname{grad}_{\tau} - \frac{\mu_{1}}{\mu_{2}} \operatorname{grad}_{\tau} \left(\frac{\varepsilon_{1}}{\varepsilon_{2}} \right) \right) E_{n} + \frac{1}{2} q_{\tau} \left(1 - \frac{\mu_{1}}{\mu_{2}} \right) + \\ + \frac{1}{4\pi} \int_{S} \left[\frac{\mu_{1}}{\mu_{2}} \varphi_{2} \left(\Delta_{\perp}' + k_{2}^{2} \right) + \varphi_{1} \left(\Delta_{\perp}' + k_{1}^{2} \right) \right] \times \\ \times (E_{\tau} c) ds - \frac{1}{4\pi} \int_{S} cq_{\tau} \left(\frac{\mu_{1}}{\mu_{2}} D_{n'} \varphi_{2} + D_{n'} \varphi_{1} \right) ds, \end{cases}$$
(12)

где q_{τ} — компоненты вектора q в касательной плоскости.

Рассматривая уравнения (10)—(12) как одно целое, мы, наконец, получаем искомое представление системы (1) с учетом граничных условий (8).

* * *

Сравним первоначальные уравнения с полученной выше системой. Если исходные соотношения связывали двенадцать компонент векторов $E, D_n E, H$ и $D_n H$, то в полученной системе неизвестными являются только шесть компонент векторов Е и q. Вообще говоря, ради этого не стоило бы так напрягаться, если бы не другое свойство независимость уравнений для нормальных компонент Е и q от уравнений для касательных составляющих. Более того, системы уравнений для касательных компонент снова оказываются несвязанными друг с другом, т. е. первоначальная система распадается на три пары уравнений, последние две из которых независимы друг от друга и имеют одинаковую форму записи, а нормальные составляющие входят в них в качестве возмущений. Приятно и то, что вид уравнений не определяется формой поверхности. Это очень важное свойство, позволяющее получить решение отдельно для каждой ИЗ составляющих и существенно сократить объем вычислений, если решение проводится численными методами. При анализе аналитическими методами подобное упрощение может служить платформой для получения решений граничной задачи в обозримом виле.

Список литературы

1. **Митра Р.** Вычислительные методы в электродинамике. М.: Мир, 1977, 488 с.

2. Пискунов К. Л. Разделение уравнений Максвелла методом Бромвича для неоднородных сред // Электромагнитные волны и электронные системы. 2005. 10. № 3. С. 4—11.

Материаловедческие и технологические основы МНСТ

УДК 621.382:537.525:538.97

Д. Ю. Обижаев¹, канд. техн. наук, ст. науч. сотр.,
С. А. Жукова¹, канд. техн. наук, нач. лаб.,
П. Г. Бабаевский², д-р техн. наук, проф., зав. каф.,
Ю. С. Четверов³, канд. техн. наук, нач. отдела,
¹ Институт нанотехнологии микроэлектроники
РАН, г. Москва
² "МАТИ" — Российский государственный
технологический университет
им. К. Э. Циолковского, 121552, Москва,
ул. Оршанская, З
³ Открытое акционерное общество "ЦНИИ

"ЦИКЛОН", г. Москва E-mail: ObizhaevD@mail.ru

СВОЙСТВА И СТРУКТУРА НАНОТОЛШИННЫХ СЛОЕВ НИТРИДА КРЕМНИЯ, ФОРМИРУЕМЫХ НА ПОВЕРХНОСТИ ПОЛИИМИДА НИЗКОТЕМПЕРАТУРНЫМ ПЛАЗМОХИМИЧЕСКИМ СИНТЕЗОМ

Проведены исследования слоев нитрида кремния толщиной от 2 до 300 нм, осажденных на поверхность полиимидных покрытий и пленок. Осаждение проводили низкотемпературным методом из газовой фазы с применением СВЧ плазменного стимулирования в условиях электронно-циклотронного резонанса. Исследования показали, что соотношения расходов реакционных газов в процессе осаждения влияют на химическую структуру слоев, морфологию и энергетические характеристики их поверхности и не оказывают существенного влияния на модуль упругости.

Ключевые слова: нитрид кремния, плазмостимулированные процессы, осаждение из газовой фазы, микроэлектромеханические преобразователи, поверхностная микрообработка, жертвенный слой, электронно-циклотронный резонанс.

Введение

Плазмохимический синтез нитрида кремния (HK) из реакционноспособных газов находит широкое применение при создании тонких функциональных слоев и покрытий в микроэлектронике и оптотехнике, а в последнее время — в производстве микро- и наносистемной техники (датчиков давления, акселерометров, болометров, оптических зеркал и др.) [1] благодаря высоким механическим, электрическим и оптическим свойствам получаемых продуктов.

Особенно перспективно использование плазмохимического синтеза НК при формировании балочных и мембранных сенсорных и исполнительных элементов микро- и наноэлектромеханических преобразователей по технологии поверхностной микрообработки с использованием полимерных, как правило, полиимидных (ПИ) "жертвенных" слоев, удаляемых на последнем этапе технологического процесса [2, 3]. Лимитирующим фактором при этом является температура, при которой происходит осаждение НК на ПИ "жертвенный" слой.

Одним из способов низкотемпературного синтеза НК является СВЧ плазменное стимулирование реакций газообразного моносилана SiH₄ с азотсодержащими реакционными газами, в том числе с газообразным азотом N2, в условиях электронно-циклотронного резонанса (ЭЦР). На образуемую в реакторе плазму при остаточном давлении ~10⁻⁶ Торр воздействуют СВЧ излучением с заданной частотой (2,45 ГГц), и в условиях ЭЦР (при совпадении частоты СВЧ излучения с частотой вращения свободных электронов плазмы вдоль линий магнитного поля с заданной индукцией 0,0875 Тл) энергия электронов резко возрастает [4]. В результате столкновения высокоэнергетических электронов с нейтральными молекулами моносилана SiH₄ и азота N₂ в плазме возникает большое число активных ионов и радикалов, способствующих образованию при сравнительно низкой температуре, определяемой мощностью СВЧ излучения, НК с преимущественным составом SiN_x без значительного включения атомов водорода, резко ухудшающих свойства продуктов реакций. В литературе имеются данные о влиянии режимов плазмохимического осаждения из реакционной смеси моносилана SiH₄ и азота N₂ в условиях ЭЦР на структуру и напряженно-деформированное состояние слоев НК толщиной 100-200 нм [5, 6]. Установлено, что критическим при этом является соотношение расходов SiH₄/N₂ в газовом потоке в интервале 0,3-07, а также присутствие инертного газа-носителя, в частности, гелия Не или аргона Ar. С увеличением соотношения расходов SiH₄/N₂ уменьшается число Si-N-связей и увеличивается Si-Si- и Si-H-связей в продуктах реакции, а также повышается плотность (понижается пористость) последних. Добавка гелия уменьшает скорость осаждения и увеличивает массовую плотность осаждаемого слоя. Осаждение НК проводиповерхности монокристаллического лось на кремния и металлического "жертвенного" слоя при сравнительно большой мощности СВЧ излучения (175 Вт) и, соответственно, высокой температуре на поверхности подложки (600 К), критической для ПИ. В данной работе приведены результаты исследования сплошности нанотолщинных (в интервале 2-24 нм) слоев НК, сформированных на необработанной и обработанной в ВЧ плазме воздуха поверхности ПИ плазмохимическим синтезом в условиях ЭЦР при соотношении SiH₄/N₂, равном 0,69, в присутствии газа-носителя аргона, при меньшей мощности СВЧ излучения (порядка 100 Вт) и, соответственно, при более низкой температуре на поверхности подложки (не выше 373 К). Представлены также результаты влияния плазмохимической обработки поверхности ПИ подложки на состав и свойства сплошных слоев НК толщиной 100-300 нм, синтезируемых данным методом при варьировании в широком интервале (от 0,3 до 1,06) соотношения реакционных газов SiH₄/N₂.

Экспериментальная часть

Слои НК осаждали на поверхность ПИ покрытий толщиной от 100 нм до 2 мкм, а также свободных ПИ пленок толщиной 5 мкм. ПИ покрытия получали из растворов полиамидокислоты (ПАК) на основе пиромеллитового диангидрида и оксидианилина (ПМДА-ОДА) в диметилацетамиде, нанося их методом центрифугирования на поверхность монокристаллического кремния с последующей сушкой и двухстадийной термоимидизацией ПАК по режимам, описанным в [7-8]. Свободные ПИ пленки на опорных кольцах получали отделением сформированных покрытий от кремниевых подложек. Для модификации поверхности ПИ покрытий их подвергали обработке в плазме воздуха при частоте 13,56 МГц в реакторе объемного типа [7]. Для ИК спектроскопических исследований слои НК наносили на кристаллы KBr.

Низкотемпературное осаждение слоев НК осуществляли в установке плазмохимического синтеза из газовой фазы с применением СВЧ плазменного стимулирования в условиях ЭЦР, разработанной в ИПТМ РАН (г. Черноголовка). Для синтеза применяли газовую смесь моносилана SiH₄ с аргоном Ar (25 % об. SiH₄ и 75 % об. Ar) и газообразный азот N₂. Азот вводили в резонансную камеру установки, а смесь моносилана с аргоном — в область поверхности обрабатываемой подложки через га-

зовое кольцо, локализуя таким образом синтез НК у подложки. При выбранном значении магнитной индукции возле кварцевого окна 0,0875 Тл реализовывался однородный режим, характеризующийся приблизительно одинаковой плотностью плазмы по всему радиальному профилю резонансной камеры [4]. Мощность СВЧ излучения выбирали таким образом, чтобы температура процесса осаждения не превышала 373 К. Осаждение проводили, задавая объемное соотношение реакционных газов SiH_4/N_2 , при постоянном объемном расходе азота 0,8 л/ч. Так как аргон не участвует в процессе осаждения, а является газом-носителем, его расход в соотношении реакционных газов не учитывался.

Для исследования свойств и структуры слоев НК и ПИ подложек использовали следующие методы.

Определение углов смачивания θ поверхностей полиимида и нитрида кремния жидкостями различной полярности (деионизированной водой, α -бромнафталином и глицерином) с известными значениями удельной поверхностной энергии (γ_L), ее дисперсионной (γ_L^D) и полярной (γ_L^P) составляющих ($\gamma_L = \gamma_L^D + \gamma_L^P$) проекцией капли на экран и микроинтерференционным методом [8] — для расчета дисперсионной (γ_S^D) и полярной (γ_S^P) составляющих и суммарного значения удельной поверхностной энергии (γ_S) твердой поверхности ($\gamma_S = \gamma_S^D + \gamma_S^P$) с использованием уравнения Вендта—Оуэнса [9]

$$1 + \cos\theta = \frac{2\sqrt{\gamma_S^{D}\gamma_L}}{\gamma_L} + \frac{2\sqrt{\gamma_S^{P}\gamma_L}}{\gamma_L},$$

а также для расчета термодинамической работы адгезии в отсутствии (W_A) и присутствии (W_A^L) воды на границе "ПИ-НК" по уравнениям [7]

 $W_A = 2\sqrt{\gamma_S^D \gamma_L^D} + 2\sqrt{\gamma_S^P \gamma_L^P}$

$$W_A^L = 2[\gamma_{lv} - \sqrt{\gamma_a^d \gamma_{lv}^d} - \sqrt{\gamma_a^p \gamma_{lv}^p} - \sqrt{\gamma_s^d \gamma_{lv}^d} - \sqrt{\gamma_s^p \gamma_{lv}^p} + \sqrt{\gamma_a^d \gamma_s^d} + \sqrt{\gamma_a^d \gamma_s^p}$$

соответственно, где γ_a^d , γ_a^p , γ_s^d , γ_s^p — дисперсионные и полярные составляющие удельных поверхностных энергий контактирующих поверхностей ПИ и НК соответственно; γ_{lv} , γ_{lv}^d , γ_{lv}^p — удельная поверхностная энергия воды и ее дисперсионная и полярная составляющие соответственно. По значению удельной поверхностной энергии НК на ПИ оценивали сплошность нанесенного слоя НК,

И

а по термодинамической работе адгезии — энергию связи слоя НК с ПИ в сухом состоянии и при воздействии воды.

Ожэ-электронная спектроскопия в режиме Auger Depth Profile, который заключается в чередовании процессов распыления поверхности образца ионами аргона и анализа обнажающейся поверхности регистрацией спектра в узком энергетическом окне 30—50 эВ с разрешением 0,3—0,5 эВ, с помощью микроанализатора РШ-660 фирмы "Perkin Elmer" — для оценки распределения атомных концентраций основных элементов по глубине осажденного слоя HK.

ИК-спектроскопия (спектрофотометр Specord M80, диапазон волновых чисел 4000—400 см⁻¹) — для исследования основных типов связей в слоях HK.

Сканирующая зондовая микроскопия (СЗМ) ("Наноскан", Россия) [10] — для получения изображения поверхности, оценки параметров ее шероховатости и определения локального модуля упругости слоев НК методом наноиндентирования, основанным на измерении зависимости частоты колебаний зонда *f*, находящегося в контакте с поверхностью, от степени прижима к ней [11, 19]:

$$f = \frac{f_0 \sqrt{R}}{k_c} E_1' \left(\frac{E_2'}{E_1' + E_2'}\right)^2 \sqrt{z},$$

где f_0 — собственная резонансная частота зонда (12 кГц); R — радиус закругления иглы (~100 нм); $E'_1 = \frac{E_1}{1-v_1}, E'_2 = \frac{E_2}{1-v_2}, E_1, E_2$ и v_1, v_2 — модули

упругости и коэффициенты Пуассона для иглы и исследуемого материала соответственно; *z* — расстояние до поверхности (величина прижима). Для описания контакта острия иглу с поверхностью использовали модель Герца; *k_c* — постоянная изгибной жесткости кантилевера.

Профилометрия и вертикально-сдвиговая интерферометрия (профилограф Talys-

tep, Англия и оптический профилометр WYCO NT 1100, США) — для определения толщины слоев НК и параметров шероховатости поверхности ПИ покрытий [12].

Оптическая микроскопия (микроскоп Axioskop 2 фирмы "Carl Zeiss") для получения микрофотографий поверхностей.

Определение диаграмм "нагрузка – 10 деформация" (разрывная машина Insrton модели TT-D) при растяжении 0 ПИ пленок, на обеих сторонах которых осаждены слои НК —для оценки глобального модуля упругости последних. Образцами для испытаний служили полоски ПИ пленок со слоями НК, вклеенные в бумажные в бумажные рамки. Длина рабочей части образцов составляет 10 ± 1 мм, ширина — 3 мм. После установки рамки с образцом в держатели разрывной машины боковые бумажные полоски перерезались. По диаграммам "нагрузка—удлинение" определяли эффективный модуль упругости трехслойных пленок $(E_{эф})$, а модуль упругости слоев НК E_2 рассчитывали по формуле для простого правила смеси:

$$E_{\ni \Phi} = E_1 \frac{h_1}{h_{\text{общ}}} + E_2 \frac{2h_2}{h_{\text{общ}}},$$

где $E_{9\phi}$, E_1 , E_2 , h_{06iii} , h_1 , h_2 — модули упругости и толщины трехслойной пленки, ПИ пленки и слоев НК соответственно, причем $h_{06iii} = h_1 + 2h_2$.

Определение массы слоев НК (аналитические весы GR-202, Япония), осажденных на поверхности ситалловых пластии — для оценки плотности НК. Плотность НК рассчитывали по соотношению $\rho = m/V$, где m и V — масса и объем слоя НК соответственно, причем V = lwh, где l и w — длина и ширина ситалловой пластины соответственно, h толщина слоя НК.

Результаты и их обсуждение

На рис. 1 представлены значения удельной поверхностной энергии и ее полярной и дисперсионной составляющих для слоев НК минимальной толщины (в интервале 2—24 нм), осажденных на ПИ покрытия, обработанные и необработанные в ВЧ плазме воздуха, при соотношении расходов SiH₄/N₂, равном 0,69, и выбранных низкотемпературных условиях плазмохимического синтеза в условиях ЭЦР (мощность СВЧ излучения 100 Вт, температура подложки не более 373 К). Значения удельной поверхностной энергии и ее составляющих при нулевой толщине слоя НК соответствуют свободной поверхности ПИ. Из приведенных данных видно, что как в случае необработанной, так и в случае обработанной в ВЧ плазме воздуха по-



следних. Образцами для испытаний Рис. 1. Зависимости удельной поверхностной энергии (γ_s) и ее дисперсионной (γ_s^d) и служили полоски ПИ пленок со слоями НК, вклеенные в бумажные $SiH_4/N_2 = 0,69$ на необработанную (*a*) и обработанную в ВЧ плазме воздуха поверх-



Рис. 2. Распределение атомных концентраций кремния, кислорода, азота и углерода по глубине слоя нитрида кремния толщиной 125 нм (от его внешней поверхности), осажденного на необработанной в плазме воздуха поверхности ПИ покрытия толщиной 100 нм при соотношении $\mathrm{SiH_4/N_2} = 0,69$ (стрелками указаны границы раздела НК—ПИ и ПИ—кремний)

верхности ПИ покрытий при толщине слоев НК больше 10 нм их удельная поверхностная энергия практически не зависит от толщины и примерно равна 50 мДж/м² при определяющем вкладе дисперсионной составляющей ($\gamma_s^d = 45 \text{ мДж/м}^2$, $\gamma_s^p = 5 \text{ мДж/м}^2$). Это свидетельствует об отсутствии заметного влияния подложки на структуру и свойства слоев НК при их толщине больше 10 нм. При толщине меньше 10 нм проявляется ее заметное влияние на удельную поверхностную энергию

ное влияние на удельную поверхностную энергию слоев НК, особенно резко выраженное в случае их нанесения на поверхность ПИ, обработанную в ВЧ плазме воздуха: полярная составляющая удельной поверхностной энергии уменьшается при этом примерно в 8 раз (рис. 1, δ). Проведенные ранее прямые эксперименты по отделению слоев НК от ПИ покрытия плазмохимическим травлением последнего показали, что сплошной слой НК может быть получен при толщине менее 10 нм (порядка 5 нм) [13]. Следовательно, ПИ подложка может влиять на состав сплошных слоев НК, а не только вносить свой вклад в энергию поверхности НК— ПИ в случае "островковых" слоев НК.

Анализ распределения атомных концентраций основных элементов (кремния, азота, углерода и кислорода), входящих в состав НК при данном методе синтеза, по глубине его слоя толщиной 125 нм, осажденного на необработанную в плазме воздуха поверхность ПИ покрытия толщиной 100 нм при соотношении SiH_4/N_2 , равном 0,69, подтверждает это предположение. Приведенные на рис. 2 данные показывают, что с приближением к границе раздела с поверхностью ПИ в составе слоя НК наблюдается заметное возрастание содержания атомов всех основных элементов. Хотя четкое определе-

ние границ области измененного состава при этом является сложной задачей, из приведенных данных видно, что повышенная концентрация основных элементов в слое НК наблюдается в пределах 10 нм от поверхности ПИ, а как раз до такой толщины слоев НК при данных условиях осаждения их удельная поверхностная энергия зависит от толщины (см. рис. 1).

Исследования методом C3M и с помощью профилометра Talystep морфологии и шероховатости поверхности слоев HK, осажденных на ПИ подложку при соотношении SiH₄/N₂ = 0,69 при температуре не выше 373 K, показали, что их поверхность при толщине до 300 нм однородна и практически идентична исходной поверхности ПИ (рис. 3, таблица).

Исследования влияния соотношений реакционных газов SiH_4/N_2 в диапазоне 0,3—1,06 при выбранных условиях синтеза и характере поверхности ПИ подложки на состав и свойства слоев НК проводили при их толщине от 100 до 300 нм. На рис. 4 представлены зависимости удельной поверхностной энергии, ее полярной и дисперсионной составляющих слоев НК толщиной 100 нм от соотношения реакционных газов при низкотемпературном осаждении на поверх-

Параметры шероховатости поверхности исходной ПИ подложки толщиной 2 мкм (в числителе) и осажденного на нее слоя НК толщиной 300 нм (в знаменателе)

Поверхность	<i>R</i> _{<i>a</i>} , нм	<i>R_{ms}</i> , нм	<i>R</i> _z , нм	<i>R</i> _{max} , нм
ПИ/НК	0,51/0,74	0,63/0,92	2,20/3,39	5,16/7,74

Примечание. R_a и R_{ms} — среднее арифметическое и среднеквадратическое значения отклонений профиля от средней линии в пределах базовой длины соответственно; R_z — высота неровности профиля по десяти точкам; R_{max} — расстояние между наибольшим пиком и наибольшей впадиной на базовой линии.



Рис. 3. Сканы, полученные методом СЗМ, поверхности исходного ПИ покрытия (*a*) и НК, осажденного на поверхности ПИ (*б*)



Рис. 4. Зависимости удельной поверхностной энергии (γ_s), ее дисперсионной (γ_s^d) и полярной (γ_s^p) составляющих слоев НК толщиной 100 нм от соотношения реакционных газов SiH₄/N₂



Рис. 5. Зависимости оптической плотности полос поглощения связей Si-N(1) и Si-Si(2) в слое HK, осажденного на поверхность KBr при низкотемпературном режиме, от соотношения реакционных газов (участок зависимостей в диапазоне соотношений от 0,3 до 0,5 получен экстраполяцией экспериментальных значений)

ность необработанного ПИ. Из приведенных данных видно, что при увеличении содержания SiH₄ в смеси реакционных газов удельная поверхностная энергия слоев НК снижается за счет полярной составляющей, уменьшающейся в 25 раз при изменении соотношения SiH₄/N₂ от 0,3 до 1,06. Это связано, вероятнее всего, с увеличением содержания неполярных (Si—Si и Si—H) и, соответственно, уменьшением полярных (Si—N) связей с повышением концентрации SiH₄ в смеси реакционных газов, что подтверждается заметным снижением оптической плотности полос пропускания для связей Si—N и ее повышением для связей Si—Si с увеличением концентрации SiH₄ (рис. 5). При этом получаемый HK отличается общим низким содержанием связей Si—N. Так, из приведенных на рис. 2 данных видно, что среднее значение *x* в формуле осаждаемого слоя SiN_{*x*}, синтезированного при соотношении SiH₄/N₂ = 0,69, равно примерно 0,3, тогда как в случае стехиометрического состава Si₃N₄ соотношение Si/N = 1,33. Аналогичные данные получены в работе [6] при синтезе слоев HK на поверхности кремния при температуре порядка 600 K и соотношения SiH₄/N₂, варьируемого от 0,3 до 1,2.

Высоким содержанием неполярных Si-Si и Si-H связей и его возрастанием с увеличением содержания моносилана в смеси реакционных газов можно объяснить результаты расчетов термодинамической работы адгезии слоев НК, осажденных при различном соотношении реакционных газов, к ПИ покрытиям, необработанным и обработанным в ВЧ плазме воздуха, в присутствии и отсутствии влаги на их границе раздела (рис. 6). Полученные результаты показывают, что в отсутствии воды плазмохимическая обработка поверхности ПИ покрытия перед осаждением слоя НК заметно повышает работу адгезии (при общем ее высоком уровне) по сравнению с необработанной поверхностью ПИ подложки (на рис. 6 кривые 1, 2), и в обоих случаях она уменьшается с увеличением соотношения SiH₄/N₂, особенно заметно до величины последнего порядка 0,7. В присутствии воды на межфазной границе ПИ-НК равновесная работа адгезии резко уменьшается по сравнению с сухим состоянием (на рис. 6, кривые 3, 4), причем при плазмохимической обработке поверхности ПИ подложки это уменьшение более значительное, чем при отсутствии такой обработки. При этом с увеличением соотношения реакционных газов SiH₄/N₂ равновесная работа адгезии в присутствии воды как в случае необработанной, так и обрабо-



Рис. 6. Зависимости расчетной термодинамической работы адгезии нитрида кремния к ПИ от соотношения реакционных газов (1, 4 -необработанное ПИ покрытие; 2, 3 -ПИ покрытие, подвергнутое ВЧ плазменной обработке) в отсутствии (1, 2) и в присутствии (3, 4) воды на границе раздела





танной в ВЧ плазме воздуха поверхности ПИ подложки несколько возрастает до соотношения SiH_4/N_2 , примерно равного 0,7, и далее практически не изменяется.

Значения глобального и локального модулей упругости слоев НК, осажденных при различном соотношении реакционных газов, приведены на рис. 7. Показано, что при прочих равных условиях модули упругости, определенные глобальным и локальным методами, практически не зависят от соотношения расходов реакционных газов, причем значения локального модуля упругости (порядка 77 ГПа) в среднем на 20 % больше по сравнению с глобальным модулем (порядка 62 ГПа). Максимальное значение модуля упругости, характерное для кристаллического НК с составом Si₃N₄, близким к стехиометрическому, т. е. с соотношением Si/N = 1,33, достигает значения порядка 300 ГПа [16]. Очевидно, что полученные в работе и приведенные на рис. 7 значительно более низкие значения модуля упругости слоев НК обусловлены резким отклонением состава и структуры синтезируемого НК от кристаллического состояния. Такие же низкие значения модуля упругости наблюдаются для слоев НК, полученных другими низкотемпературными плазмохимическими методами без дополнительной термообработки поверхности во время или после осаждения. Так, плазмохимическим осаждением НК из газовой фазы с применением емкостно-связанной плазмы при температуре 323 К получены слои с модулем упругости порядка 50 ГПа [16], а при температуре 373 К—83 ГПа [17]. Низкие значения модуля упругости, а также их слабая зависимость от соотношения реакционных газов могут быть объяснены не только низким содержанием связей Si-N в слоях НК. Значительно более важную роль при этом может играть аморфная структура и повышенная пористость слоев НК, возникающая в результате снижения подвижности

осаждаемых частиц на поверхности вследствие низкой температуры осаждения. Экспериментально полученные значения плотности слоев НК толщиной до 300 нм, осажденных при соотношении SiH₄/N₂ = 0,69, составляют приблизительно 2800 кг/м³. Эти значения несколько меньше, чем для слоев НК, полученных методом химического осаждения из газовой фазы при пониженном давлении и высокой температуре процесса (в диапазоне 1073—1123 К), плотность которых лежит в интервале 3100-3200 кг/м³ [18], но соизмерима со значениями плотности для слоев НК, полученных аналогичными применяемому в данной работе методами (2500—3040 кг/м³) [5, 6]. Отличие значений глобального и локального модуля упругости в таком случае может быть объяснено меньшим влиянием пористости в методе наноиндентирования.

Выводы

Систематическими исследованиями свойств и структуры нанотолщинных слоев НК, осажденных на поверхности ПИ подложки, установлено, что при низкотемпературном синтезе НК с СВЧ плазменным стимулированием реакций газообразного моносилана SiH₄ с азотом N₂ в присутствии инертного газа в условиях электронно-циклотронного резонанса при мощности СВЧ излучения 100 Вт, температуре подложки не выше 373 К и заданном соотношении SiH₄/N₂ влияние ПИ подложки на состав, структуру и свойства осаждаемого слоя распространяется до 10 нм, причем ВЧ плазменная обработка поверхности ПИ резко увеличивает это влияние. Сплошная пленка НК на поверхности ПИ формируется при минимальной толщине около 5 нм, а морфология и шероховатость поверхности нанесенного слоя НК при толщине до 100-300 нм практически идентична исходной поверхности ПИ подложки. Изменение соотношения реакционных газов приводит к существенным изменениям среднего по толщине химического состава слоев НК: при увеличении содержания SiH₄ в смеси реакционных газов увеличивается число неполярных связей Si—Si и Si—H и vменьшается число более полярных связей Si-N. Это приводит к уменьшению удельной поверхностной энергии слоев НК за счет полярной составляющей, особенно резко выраженному при их нанесении на обработанную в ВЧ плазме воздуха поверхность ПИ. Расчетная равновесная работа адгезии слоев НК к ПИ подложке при плазмохимической обработке ПИ покрытий перед осаждением на их поверхность слоев НК при заданном соотношении реакционных газов увеличивается в сухом состоянии и резко уменьшается в присутствии воды. Повышение соотношения SiH₄/N₂ при нанесении слоев НК на необработанную и обработанную в плазме поверхность ПИ подложки заметно уменьшает работу адгезии в сухом состоянии (при ее общем высоком уровне, причем более высоком в случае плазменной обработки подложки) и увеличивает (при ее очень низком уровне, причем более низком в случае плазменной обработки подложки) — в присутствии воды. Изменение соотношения реакционных газов не оказывает заметного влияния на модуль упругости слоев НК, значение которого при определении как глобальным, так и локальным методом существенно меньше по сравнению с кристаллическим НК. Это объясняется не столько пониженной концентрацией связей Si-N в формируемых слоях НК по сравнению со стехиометрическим соотношением Si₃N₄, сколько аморфной структурой и пористостью получаемых слоев.

Список литературы

1. Вардан В., Виной К., Джозе К. ВЧ МЭМС и их при-менение. М.: Техносфера. 2004.

2. Huang S., Zhang X. Application of polyimide sacrifical layers for the manufacturing of uncooled double-cantilever microbolometrs. // Mater. Res. Soc. Symp. Proc. 2006. V. 890. P. 125–131.

3. Hu M., Chen J., Lai Z., Mao H., Sheng D. Research for polyimide as a sacrificial layer in MEMS device // Proc. SPIE. 2004. 5774. P. 642–645.

4. Shapoval S. Y., Petrashov V. T., Popov Q. A., Yoder M. D., Maciel Jr., P. D., Lok C. K. C. Electron cyclotron resonance plasma chemical vapor deposition of large area uniform silicon nitride films. // J. Vac. Sci. Technol. A. 1991. V. 9. N 6. P. 3071-3076

5. Besland M. P., Lapeyrade M., Delmotte F., Hollinger G. Interpretation of stress variation in silicon nitride films deposited by electron cyclotron resonance plasma // J. Vac. Sci. Technol. A. 2004. V. 22. N 5. P. 1962–1970.

6. Cianci E., Pirola F., Foglietti V. Analysis of stress and composition of silicon nitride thin films deposited by electron cyclotron resonance plasma-enhanced chemical vapor deposition for microfabrication processes // J. Vac. Sci. Technol. B. 2005. V. 23. № 1. Р. 168—172. 7. Жуков А. А., Жукова С. А., Корнеева Г. А., Четверов Ю. С.

Влияние плазмохимического травления на свойства тонких полиимидных покрытий различного химического состава и молекулярной массы // Прикладная физика. 2004. № 2. C. 53-

8. Жуков А. А. Физико-химические и технологические основы получения полиимидных структур для микроэлекосновы получения полиимидных структур для микроэлек-тронных устройств микромеханики и микросенсорики // Дисс. ... на соискание ученой степени д-ра техн. наук, "МАТИ" — РГТУ им. К. Э. Циолковского, ОАО "ЦНИИ "Циклон", Москва, 2003. 234 с. 9. Кинлок Э. Адгезия и адгезивы: наука и технология: Пер. с англ. М.: Мир, 1991. 484 с. 10. www.nanoscan.info

11. Головин Ю. И., Тюрин А. И. Современные проблемы нано- и микротвердости твердых тел: Ч. 2 // Материалове-дение. 2001. N 2. C. 19–27. 12. www.taylor-hobson.com

13. Обижаев Д. Ю. Структура и свойства функциональных слоев нитрида кремния на различных стадиях их формирования в технологии устройств нано- и микросистеммпрования в технологии устроиств нано- и мпкроистем ной техники // Дисс. ... на соискание ученой степени канд. техн. наук, "МАТИ" — РГТУ им. К. Э. Циолковского, ОАО "ЦНИИ "Циклон", Москва, 2007. 149 с. 14. Казицына Л. А., Куплетская Н. Б. Применение УФ-,

ИК-, ЯМР- и масс-спектроскопии в органической химии. М.: Химия, 1983. 272 с.

15. Беллами Л. Инфракрасные спектры сложных моле-

 Кул. М.: Изд-во иностр. лит. 1963.
 16. Tsan M. P., Ong C. W., Chong N., Choy C. L., him P. K.,
 Huang W. W. Mechanical and etching properties of dual ion
 beam deposited hydrogen-free silicon nitride films // J. Vac. Sci. Technol. A. 2001. V. 19. N 5. P. 2542-2548

7. Martyniuk M., Antoszewski J., Walmsley B. A., Musca C. A., Dell J., Jung Y., Lawn B. R., Huang H., Faraone L Determi-

Dell J., Jung Y., Lawn B. R., Huang H., Faraone L Determi-nation of mechanical properties of silicon nitride thin films using nanoindentation // Proc. SPIE. 2005. V. 5798. P. 216—225. 18. **Pierson H. O.** Handbook of Chemical Vapor Deposition: Princi ples, Technology, and Applications. Noyes Publica-tions/William Andrew. 1999. 482 p. 19. **Усеинов А. С.** Измерение модуля Юнга сверхтвердых материалов с помощью СЗМ "Наноскан" // Приборы и тех-ника эксперимента. 2003. № 6. С. 1—5.

УДК 29.19.15

Е. В. Чебанова¹, канд. физ.-мат. наук, доц., **Ю. В. Кабиров**², канд. физ.-мат. наук, вед. инж., **Ю. А. Куприна**³, канд. физ.-мат. наук, науч. сотр.,

М. Ф. Куприянов², д-р физ.-мат. наук, проф.,

зав. каф., e-mail: kupri@phys.rsu.ru

1 Ростовский государственный строительный университет

E-mail: starphish@yandex.ru

² Южный федеральный университет

E-mail: salvator62@mail.ru

³ Научно-исследовательский институт физики Южного федерального университета

E-mail: kyprins@rambler.ru

ЭФФЕКТЫ НЕОДНОРОДНОСТИ СТРУКТУРНЫХ СОСТОЯНИЙ ВаТіО₂ И PbTiO₂

Проведено изучение закономерностей формирования перовскитовых тетрагональных фаз $BaTiO_3$ и $PbTiO_3$ при их синтезе и структурных изменений после интенсивного механического воздействия. Установлено, что

в результате температурного синтеза: BaTiO₃ при комнатной температуре является кубическим, а PbTiO₃ характеризуется близкими тетрагональными фазами с разными значениями спонтанной деформации отдельных кристаллитов. Интенсивное механическое воздействие на стабилизированные структуры BaTiO₃ и PbTiO₃ приводит к неоднородным структурным состояниям.

Ключевые слова: сегнетоэлектрики, перовскиты, неоднородные структурные состояния.

Введение

Со времени начала исследований сегнетоэлектрических кристаллов проблеме дефектов в них уделялось пристальное внимание [1, 2]. Многочисленными исследованиями было установлено, что радиационное воздействие разного вида при определенных дозах радиации приводит к структурным изменениям и подавлению сегнетоэлектрических свойств [3, 4]. Наиболее чувствительной к дефектам характеристикой является спонтанная поляризация. Поэтому с увеличением концентраций тех или иных дефектов снижается температура сегне-



Рис. 1. Изменение параметров элементарной ячейки ВаТіО3:

a — при уменьшении размеров частиц d (комнатная температура) по данным [17] о — 1, [18] • — 2, [20] + — 3; δ — при разных температурах отжига [20]; e — при изменении температуры [21]; e — при разных дозах облучения нейтронами [4]

тоэлектрических фазовых переходов, фазовые переходы размываются, коэрцитивные поля возрастают и т. д.

Интерес к созданию наноструктур, возникший в последние десятилетия (в частности, к созданию тонких сегнетоэлектрических пленок [5]), привел к масштабным исследованиям наноструктурированных сегнетоэлектрических материалов. К настоящему времени наиболее полно изучены наноструктурные эффекты в классических сегнетоэлектриках со структурой типа перовскита, в первую очередь в ВаТіО₃ (например, в работе [6]) и РbTiO₃ (например, в работе [7]). Считается надежно установленным, что в нанокристаллическом состоянии сегнетоэлектрические материалы характеризуются пониженной температурой сегнетоэлектрических фазовых переходов и в ряде случаев реконструктивными изменениями структур. Вопросам влияния размеров частиц на сегнетоэлектрические состояния в перовскитах, начиная с пионерской работы [8], уделяется постоянное внимание (например, в работах [9-12]). Примеры структурных изменений, связанных с размерными эффектами в других типах структур, приведены в работах [13—15].

Анализ изменений структур оксидных нанокристаллических материалов показывает, что при уменьшении размеров кристаллических частиц высокодисперсных порошков, мелкокристаллической керамики и толщины сверхтонких пленок (<100 нм) наблюдается увеличение параметров решетки, повышение симметрии, а в ряде случаев — и реконструктивные фазовые переходы.

Ранее в работе [16] нами по данным разных авторов проведено сравнение особенностей изменений структуры BaTiO₃ в зависимости от размеров кристаллитов [17—19], от температуры отжига [20], от температуры [21], от доз облучения нейтронами [4] (рис. 1) и обсуждено соотношение ролей в наблюдаемых эффектах нанокристалличности и дефектов структуры BaTiO₃. Анализ свидетельствует о практической неразличимости эффектов нанокристалличности и влияния дефектов.

Целью настоящей работы было изучение влияния, с одной стороны, условий приготовления на структурные состояния поликристаллических BaTiO₃ и PbTiO₃ при их синтезе, с другой стороны, представляло интерес изучение влияния интенсивного механического воздействия (ИМВ) [22] при комнатной температуре на стабилизированные структу-

ры BaTiO₃ и PbTiO₃, приводящего к наноструктурным состояниям и/или к созданию дефектов разного рода.

Эксперимент

Гель-смесь для синтеза образцов ВаТіО₃ приготовляли из раствора нитрата бария (Ba(NO₃)₂) и гидроксида титана (α -TiO · xH_2O) с его высушиванием при 120 °С. Синтез ВаТіО₃ проводили последовательными отжигами в течение 1 ч при температуре $450 \le T_{\text{отж}} \le 1200$ °C. Синтез PbTiO₃ проводили отжигами заготовок как из чистой стехиометрической смеси PbO и TiO₂, так и с модифицирующей добавкой NaCl в количестве 1 вес. % от смеси при 500 $\leq T_{\text{отж}} \leq$ 900 °C в течение 2 ч. Образцы ВаТіО₃ и РbTiO₃ со стабилизированной отжигами при высоких температурах перовскитовой структурой подвергались интенсивной механической обработке в установке, типа описанной в работе [22], при внешнем давлении на образец 0,5 ГПа с полными оборотами давящего стержня (пуансона). Рентгендифракционные профили измеряли для исходного образца и для двух образцов после двух и четырех таких оборотов, соответственно.

Очевидно, что кратным числам равномерных оборотов при одинаковых давлениях соответствуют кратные порции затраченной энергии на совершение работы по механическому измельчению кристаллитов и/или их пластической деформации.

Рентгеноструктурные исследования образцов проведены на рентгеновском дифрактометре ДРОН-3М (Си K_{α} -излучение) с компьютерной записью дифракционных профилей (шаг сканирования — 0,08°, время набора импульсов в каждой точке $\tau = 2$ с, интервал дифракционных углов $20 \le 2\theta \le 60^\circ$). Обработка данных велась с помощью программы Pow-derCell. Уточнялись типы кристаллических структур, их симметрия, параметры ячеек, позиционные атомные параметры. Результаты уточнения оценивались по значениям профильных факторов недостоверности (R_p , %).

Результаты и их обсуждение

В табл. 1 приведены структурные параметры перовскитовых фаз ВаТіО₃ и РbТіО₃, образующихся после отжигов при разной температуре. Можно видеть, что низкотемпературный отжиг BaTiO₃ (до 650 °C) гель-смеси приводит к образованию кубической фазы. Причем с повышением температуры отжига при комнатной температуре уменьшается параметр а ячейки. Отжиг в интервале температур $750 \le T_{\text{отж}} \le 1200$ °C приводит к существованию при комнатной температуре тетрагональной фазы ВаТіО₃ с увеличением спонтанной деформации ($\delta = c/a - 1$) при увеличении $T_{\text{отж}}$. Отметим, что при этом полуширины дифракционных отражений 200 и 002 (*B*₂₀₀ и *B*₀₀₂) уменьшаются. Однако отжиг при температуре 1200 °С привел к значительному уширению этих отражений.

Образование перовскитовой фазы $PbTiO_3$ наблюдается в образцах уже после отжига при 500 °C. При комнатной температуре фиксируется тетрагональная фаза PbTiO₃ с уменьшенной спонтанной деформацией. Важно отметить, что в образцах PbTiO₃, приготовленных при $T_{\text{отж}} \leq 600$ °C, наблюдается большая анизотропия полуширин дифракционных отражений. С повышением температур отжига ($T_{\text{отж}} \geq 700$ °C) спонтанная деформация ячейки PbTiO₃ ($\delta = c/a - 1$) при комнатной температуре возрастает, а полуширины B_{002} и B_{200} уменьшаются и становятся примерно одинаковыми. Отметим, что с увеличением температуры отжига объемы элементарных ячеек BaTiO₃ и PbTiO₃ уменьшаются.

Наблюдаемые особенности структурообразования перовскитовых фаз BaTiO₃ и PbTiO₃ могут быть объяснены следующим образом. Так как процессы структурообразования разных кристаллитов протекают по-разному вследствие флуктуаций типов и концентраций дефектов, при низкотемпературных синтезах, как правило, образуются фазы близких неоднородных структурных состояний со слабоотличающимися параметрами ячеек. Хорошо известно, что в классических сегнетоэлектриках типа смещения BaTiO₃, PbTiO₃ параметры ячеек тетрагональных фаз значительно варьируются в зависимости от типов и концентраций дефектов [23]. При этом наибольшие вариации имеют параметры с, отражая высокую чувствительность спонтанной поляризации (и, соответственно, спонтанной деформации) к дефектам структуры. Таким образом, значительные различия полуширин дифракционных отражений B₀₀₂ и B₂₀₀, экспериментально наблюдаемые в PbTiO₃, можно объяснить сосуществованием в образце кристаллитов с близкими структурными состояниями тетрагональной фазы, отличающихся степенями тетрагональности.

Таблица 1

Фазы		Температура синтеза	Параметры ячейки		Объем ячейки	Спонтанная деформация	Полуширины дифракционных отражени	
		<i>Т</i> _{отж} , °С	<i>a</i> , Å	<i>c</i> , Å	$V_{\rm gu}, Å^3$	$\delta = c/a - 1$	<i>B</i> ₀₀₂ , °	<i>B</i> ₂₀₀ , °
BaTiO	Кубическая	450 490 550 650	4,067 (2) 4,058 4,040 4,028		67,3 (1) 66,8 65,9 65,4			0,54 (2) 0,50 0,46 0,50
barro ₃	Тетрагональная	750 850 950 1200	4,027 4,025 4,022 4,014	4,032 4,031 4,029 4,029	65,4 65,3 65,2 64,9	0,001 (1) 0,002 0,002 0,004	0,54 0,38 0,29 0,50	0,54 0,33 0,29 0,46
PbTiO ₃	Тетрагональная	500 550 600 700 800 900	3,943 3,910 3,908 3,900 3,901 3,901	4,117 4,133 4,137 4,153 4,155 4,155	64,0 63,2 63,2 63,2 63,2 63,2 63,2	0,044 0,057 0,058 0,065 0,065 0,065	$1,03 \\ 1,02 \\ 0,82 \\ 0,28 \\ 0,26 \\ 0,26$	0,53 0,54 0,49 0,26 0,18 0,24

Структурные параметры BaTiO₃ и PbTiO₃, синтезированных при различных температурах

Если разделять общепринятую точку зрения о том, что физическое уширение дифракционного отражения определяется исключительно размерами областей когерентного рассеяния (ОКР) и/или микродеформациями, то различиям полуширин B_{002} и B_{200} должна соответствовать большая анизотропия этих характеристик, что представляется маловероятным.

Нами проведен анализ влияния: 1) анизотропных по размеру ОКР; 2) суперпозиции кристаллитов с разными спонтанными деформациями на полуширины дифракционных отражений поликристаллического PbTiO₃. В качестве примера для такого анализа выбран PbTiO₃, потому что в нем тетрагональная фаза при комнатной температуре характеризуется большой спонтанной деформацией, что приводит к четкому разделению на рентгенограммах анализируемых отражений 200 и 002. Для детального анализа причин различий B₀₀₂ и B_{200} , наблюдаемых в образцах PbTiO₃, рассмотрим вклады различных факторов, определяющих эти величины. Величины *B*_{hkl} принято считать зависимыми только от размеров ОКР и значений микродеформаций после учета инструментальных функций. В общем случае размеры ОКР и микродеформации в кристаллическом пространстве можно описывать тензорами 2-го ранга, учитывая различия этих характеристик по разным кристаллографическим направлениям. Однако, как правило, для большинства известных материалов возможные эффекты влияния анизотропии ОКР D_{ii} и микродеформаций ε_{ii} на различия полуширин B_{hkl} не обсуждаются.

Для стабилизированной тетрагональной фазы PbTiO₃ после $T_{\text{отж}} = 900$ °C (см. табл. 1) из $B_{002} \cong B_{200}$ следует отсутствие анизотропии D_{ij} , т. е. $D_{11} = D_{22} \cong$ $\cong D_{33}$. Это позволяет для $D_{9\varphi\varphi} \cong 400$ Å = 40 нм (при $B_{002} = B_{200} = 0.24^{\circ}$), определенного по формуле $D = \frac{k\lambda}{B\cos\theta}$, рассчитать эффективное значение $B_{111}^{9\varphi\varphi}$: $B_{111} = 0.23^{\circ}$, что вполне соответствует экспериментально определенному значению $B_{111}^{9\kappacn} =$ $= 0.21^{\circ}$ в пределах ошибки измерения.

Из соотношений $B_{002} > B_{200}$ в предположении анизотропии размеров OKP ($D_{33} < D_{11}$), для PbTiO₃ после $T_{\text{отж}} = 800$ °C ($B_{002}^{9\text{ксп}} = 0,26^{\circ}$, $B_{200}^{9\text{ксп}} = 0,18^{\circ}$, $B_{111}^{9\text{ксп}} = 0,16^{\circ}$) простой расчет показывает, что $B_{111}^{\text{расч}}$ заметно больше, чем $B_{111}^{9\text{ксп}} : B_{111}^{\text{расч}}$ (по $B_{002}^{9\text{ксп}}$) = 0,26°. То есть экспериментальная полуширина отражения 111 ($B_{111}^{9\text{ксп}}$) значительно меньше, чем расчетная полуширина ($B_{111}^{\text{расч}}$) по B_{002} . Аналогичная оценка $B_{111}^{\text{расч}}$ по $B_{200}^{\text{эксп}}$ приводит к более близкому значению $B_{111}^{\text{расч}}$: $B_{111}^{\text{расч}}$ (по $B_{200}^{\text{эксп}}$) = 0,18°. Это свидетельствует о том, что предположение малого размера ОКР по [001] не подтверждается экспериментально. Проведенные оценки полностью снимают проблему большой анизотропии размеров ОКР по разным кристаллографическим направлениям ([h00] и [00/]) тетрагональной фазы PbTiO₃.

Очевидно, что анизотропия микродеформаций ε_{ij} ($\varepsilon_{33} > \varepsilon_{11}$), определенная по соотношению B_{002}/B_{200} , также приводит к увеличенным расчетным значениям B_{111} по сравнению с экспериментальными.

Основанием для представления поликристаллического PbTiO₃ на разных стадиях его синтеза в виде суперпозиции разных, отличающихся по параметрам ячеек неоднородных неравновесных состояний тетрагональной фазы являются многочисленные экспериментальные данные по структуре PbTiO₃, которые обнаруживают широкие вариации этих параметров при комнатной температуре.

Формирование того или иного наблюдаемого дифракционного отражения от поликристаллических тел, в первую очередь, зависит от того, насколько одинаковыми по структуре являются отдельные кристаллиты. Как показывают многочисленные эксперименты, в моно- и поликристаллических сегнетоэлектриках структурные состояния широко варьируются при одних и тех же внешних условиях вследствие их высокой чувствительности к видам и концентрациям различных слабоконтролируемых дефектов. В работе [23] в результате исследований кристаллов, порошков, керамики PbTiO₃ установлено, что эти объекты характеризуются различиями параметров тетрагональной ячейки (значительными по периоду с) и, соответственно, значениями спонтанной деформации, дополнительно изменяющимися после механического дробления и отжигов.

Это позволяет полагать, что в наших поликристаллических образцах $PbTiO_3$ на разных стадиях их приготовления присутствуют кристаллические блоки с отличающимися параметрами ячеек, что и приводит к "уширениям" дифракционных отражений за счет суперпозиции отдельных близкорасположенных максимумов. Поскольку спонтанная поляризация (совпадающая по направлению с кристаллографическим направлением [001] в тетрагональной ячейке $PbTiO_3$) является чувствительной к дефектам разного рода, изменения параметра *с* ячейки однозначно отражают эту чувствительность. Поэтому для дефектных $PbTiO_3$, образую-



Рис. 2. Фрагменты экспериментального дифракционного профиля и уточненных модельных профилей трех состояний (T_1 , T_2 , T_3) тетрагональной фазы в образце PbTiO₃ с добавкой NaCl после отжига при $T_{\text{отж}} = 800$ °C

щихся на ранних стадиях синтеза, характерно соотношение $B_{002}/B_{200} > 1$. Отметим, что параметр *а* тетрагональной ячейки PbTiO₃ менее чувствителен к дефектам при малой их концентрации. Данное соображение объясняет, почему B_{002} для неравновесных структурных состояний PbTiO₃, как правило, больше, чем B_{200} .

На рис. 2 показан фрагмент дифракционного профиля образца PbTiO₃ с добавкой NaCl после отжига при $T_{\text{отж}} = 800$ °C. Можно видеть, что дифракция в окрестности 43° $\leq 2\theta \leq 44^{\circ}$ представляет собой суперпозицию отдельных максимумов. Исходя из предположения о том, что в данном образце присутствуют три неравновесных состояния тетрагональной фазы PbTiO₃, отличающиеся параметрами элементарной ячейки, но с одинаковыми $\langle D \rangle$ и є, получено удовлетворительное согласие между экспериментальным дифракционным профилем и сум-

Структур, состоя с доба	ные параметрь яний тетрагона вкой NaCl пос.	и вероятн пльной фа ле отжига	Т остных неравнове зы образца PbTiO а при <i>Т</i> _{отж} = 800 °	аблица 2 сных З С
	Параметры		Эффективные	

Состояния тетраго- нальной	Парам тетр наль яче	иетры аго- мых сек	<i>R</i> _p - фак-	Эффек пара тетраго яч	стивные метры нальных сеек	<i>R</i> _p - фак-
фазы	<i>a</i> , Å	<i>c</i> , Å	тор, %	a _{эфφ} , Å	с _{эфф} , Å	тор, %
$\begin{array}{c} T_1 \\ T_2 \\ T_3 \end{array}$	3,907 (2) 3,912 3,921	4,190 4,155 4,117	4,27	3,910	4,134	5,73

расчетным профилем марным $(R_{\rm p} = 4,27 \%)$ состояний тетрагональной фазы PbTiO₃ с параметрами, представленными в табл. 2. Следует подчеркнуть, что уточнение структуры в предположении одного среднего состояния тетрагональной фазы привело к большему $R_{\rm p}~(R_{\rm p}=5,73~\%)$. Можно видеть, что в модели трех неравновесных состояний очень хорошо описаны и формы дифракционных отражений. Очевидно, что в общем случае следует рассматривать непрерывное распределение кристаллических кристаллитов по параметрам тетрагональных ячеек.

Отметим, что гипотезе о сосуществовании в образце таких трех неравновесных фазовых состояний тетрагональной фазы PbTiO₃ не противоречат полученные экспериментально значения полуширин

всех наблюдаемых дифракционных отражений. Если предположить, что физическая полуширина *B*₀₀₂ определяется вкладами в общий дифракционный максимум отражений типа 002 от блоков с разными значениями d_{001} (разные параметры $c_{\rm T}$), то оценки значений других d_{hkl} (например, d_{111}) и их распределение не приводит к их противоречию с экспериментальными B_{hkl} . Например, ДЛЯ РbTiO3 с добавкой NaCl после отжига при $T_{\text{отж}} = 800$ °C, если предположить существование в образце двух отличных состояний тетрагональной фазы с параметрами T_1 : $a_1 = 3,907$ Å, c₁ = 4,190 Å, и *T*₃: *a*₃ = 3,921 Å, *c*₃ = 4,117 Å, то простой расчет позиций, соответствующих отражениям типа 111 для T_1 и T_3 на рентгенограмме, показывает, что угловые различия этих отражений составляют 0,12°, что значительно меньше полуширины наблюдаемого рефлекса 111 (В₁₁₁ = = 0,29°). Для характеристики таких сложных объектов с близкими, но разными параметрами ячеек обычно используют средние (эффективные) параметры, определяемые по центрам тяжести размытых дифракционных максимумов, а по полуширинам дифракционных рефлексов определяют формальные (эффективные) значения ОКР и микродеформаций. Соответственно в табл. 2 приведены эффективные параметры ячеек PbTiO₃, которые определялись по центрам тяжести дифракционных отражений.

Отметим, что данное структурное представление поликристаллических образцов PbTiO₃ как суперпозиции близких неравновесных фазовых со-

Г

Таблица 3

Спонтанная Полуширины Параметры Объем ячейки дифракционных отражений перовскитовых ячеек леформация *R*_n-фактор, Число оборотов пуансона при ИМВ % $V_{\rm gq}, Å^3$ $\delta = c/a - 1$ a, Å *c*, Å $B_{002},$ $B_{200},$ 0,009 (1) 0 4,000 (3) 4,034 64,5 0,37 (2) 0,29 4,89 4,020 0,005 2 4,006 64,5 0,60 0,46 5,00 BaTiO₃ 4 4,016 64,8 0,000 0,69 5,14 0 62,9 0,24 0,23 3,896 4,146 0,064 4,80 0,55 PbTiO₃ 3,897 0,79 2 4,147 63,0 0.064 5,09 4 3.903 4.143 63.1 0.061 1.00 0.45 5.46

Структурные параметры BaTiO₃ и PbTiO₃ после интенсивного механического воздействия

стояний тетрагональной фазы легко объясняет наблюдаемое размытие фазовых переходов PbTiO₃.

Как показывают многочисленные исследования [22], в результате интенсивных механических воздействий можно создавать наноструктурные материалы с разными размерами кристаллитов. На рис. 3 представлены фрагменты дифракционных профилей образцов ВаТіО₃ и РbTiO₃ как без механического воздействия, так и после двух и четырех оборотов пуансона под давлением. В табл. 3 представлены результаты уточнения основных структурных параметров этих образцов. Можно видеть, что в результате механических воздействий спонтанные деформации ВаТіО₃ и РbТіО₃ при комнатной температуре уменьшаются. При этом незначительно увеличиваются объемы ячеек и возрастает анизотропия полуширин В₂₀₀ и В₀₀₂, что свидетельствует об увеличении в образцах, в первую очередь, концентраций точечных и протяженных дефектов. В ВаТіО₃ после четырех оборотов пуансона при комнатной температуре наблюдается кубическая фаза. Перовскитовая фаза PbTiO₃ остается тетрагональной и после четырех оборотов пуансона.





Заключение

С увеличением температур синтеза BaTiO₃ и PbTiO₃ эффекты нанокристалличности и/или дефектности структур проявляются в уменьшении объемов ячеек и в увеличении спонтанных деформаций тетрагональных фаз. Кроме того, при синтезе PbTiO₃ большая анизотропия полуширин дифракционных отражений 002 и 200 при низких температурах синтеза свидетельствует об образовании близких структурных состояний тетрагональных фаз PbTiO₃, различие которых обусловлено разными концентрациями дефектов, преимущественно влияющих на значения спонтанных поляризаций (и, соответственно, спонтанных деформаций) вдоль полярного направления [001] в отдельных кристаллитах. Интенсивные механические воздействия на стабилизированные структуры ВаТіО₃ и РbTiO₃ последовательно приводят к возникновению неоднородных структурных состояний (отношения B_{002}/B_{200} увеличиваются) и/или нанокристалличности (объемы ячеек увеличиваются, значения спонтанных деформаций уменьшаются).

> Таким образом, показано, что эффекты нанокристалличности и неоднородности структурных состояний BaTiO₃ и PbTiO₃ одновременно проявляются, хотя и являются трудно различимыми.

> Работа поддержана грантом Российского фонда фундаментальных исследований 08-03-13504-офи_ц.

Список литературы

1. Hilczer B. Influence of lattice defects on the properties of ferroelectrics // Mater. Sci. 1976. II/1–2. P. 3–12.

2. Лайнс М., Глас А. Сегнетоэлектрики и родственные им материалы. М.: Мир, 1981. 736 с.

3. Колонцова Е. В. Радиационно-индуцированные состояния в кристаллах с ионно-ковалентными связями // Успехи физических наук. 1987. Т. 151. С. 149. 4. **Hauser O., Schenk M.** Strahleninduzierte Phasenumwandlungen einiger Subs-tanzen des Perowskit-Gittertyps und ihre thermodynamische Behandlung // Phys. Stat. Sol. 1966. V. 18. 547.

5. Суровяк З., Панич А. Е., Дудкевич В. П. Тонкие сегнетоэлектрические пленки. Ростов-на-Дону: Изд-во Рост. пед. ун-та, 1994. 192 с.

6. Hoshina T., Kakemoto H., Tsurumi T., Wada S. Size and temperature induced phase transition behaviors of barium titanate nanoparticles // J. Appl. Phys. 2006. V. 99. P. 054311.

7. **Chattopadhyay S., Ayyub P., Palkar V. R.** et al. Size-induced phase transition in nanocrystalline ferroelectric PbTiO₃ // Phys. Rev. B. 1995. V. 58. P. 13177–13183.

8. Anliker M., Brugger H. R., Känzig W. Das Verhalten von kolloidalen Seignetteelektrika III, Bariumtitanat BaTiO₃ // Helv. Phys. Acta. 1954. V. 27. 474.

9. Ishikawa K., Yoshikawa K., Okada N. Size effect on the ferroelectric phase transition in $PbTiO_3$ ultrafine particles // Phys. Rev. B. 1988. V. 37. P. 5852.

10. Meng J., Zou G., Ciu Q. Raman scattering from $PbTiO_3$ of various grain sizes at high hydrostatic pressures // J. Phys.: Conden. Matter. 1994. V. 6. P. 6543.

11. **Bursill L. A., Jiang B., Peng J. L., Ren T. L.** Hrtem analysis of nanocrystalline $BaTiO_3$ and $PbTiO_3$: Size effects on ferroelectric phase transition temperature // Ferroelectric. 1997. V. 191. P. 281.

12. **Huang H., Sun Ch. Q., Tianshu Zh.** et al. Grain-size effect on ferroelectric Pb($Zr_{1-x}Ti_{x}$) solid solution induced by surface bond contraction // Phys. Rev. B. 2001. V. 63. P. 184112.

13. Palkar V. L., Ayyub P., Chattopadhyay S. et al. Size-induced structural transitions in Cu–O and Ce–O systems // Phys. Rev. B. 1996. V. 53. 2167. 14. Zhang Y. H., Chan Ch. K., Porter J. F. et al. Micro-Raman spectroscopic characterization of nano-sized TiO_2 powders prepared by vapor hydrolysis // J. Matter. Res. 1998. V. 13. 2602.

15. Ayyub P., Palkar V. R., Chattopadhyay S. et al. Effect of crystal size reduction on lattice and cooperative properties // Phys. Rev. B. 1995. V. 51. P. 6135–6138.

16. Кофанова Н. Б., Куприна Ю. А., Куприянов М. Ф. О размерных эффектах в титанате бария // Известия РАН. Серия физическая. 2002. Т. 66. С. 839.

17. Caboche G., Chaput F. Cell Parameters of Fine-Grain $BaTiO_3$ Powders // Mater. Sci. Forum. 1993. V. 133–136. P. 801.

18. **Malbe S., Mutin J. C., Niepce J. C.** Distribution des parameters de maille crystalline dans des echantillon pulverulents de BaTiO₃ // J. Chim. Phys. 1992. V. 89. P. 825.

19. Uchino K., Sadanaga E., Hirose T. Dependence of the Crystal Structure on Particle Size in Barium Titanate // J. Amer. Ceram. Soc. 1989. V. 72. P. 1555.

20. **Harwood M. G., Klasseps H. A.** Influence of Firing Temperatures on the Preparation of Barium Titanate // Nature. 1950. V. 165. P. 73.

21. Kay H. F., Vousden P. Symmetry changes in barium titanate at low temperatures and their relation to its ferroelectric properties // Philos. Mag. 1949. V. 40. P. 1019.

22. Валиев Р. З., Александров И. В. Наноструктурные материалы, полученные интенсивной пластической деформацией. М.: Логос, 2000. 272 с.

23. Kupriyanov M., Kovtun P., Zakharov A., Kushlyan G., Yagunov S., Kolesova R., Abdulvakhidov K. Summary data on ferroelectric $PbTiO_3$ structure // Phase Transitions. 1998. V. 64. P. 145–164.

УДК 539.1.074.13

М. В. Астахов, д-р хим. наук, проф.,
А. О. Родин, канд. физ.-мат. наук,
В. В. Селезнев, аспирант,
М. Ю. Пигузов, студент,
Московский государственный институт стали и сплавов (технологический университет),
e-mail: wws-post@rambler.ru

СВОЙСТВА ДЕФОРМИРОВАННЫХ ПОРОШКОВ НЕОРГАНИЧЕСКИХ СЦИНТИЛЛЯТОРОВ

Описаны результаты исследования сцинтилляционных характеристик новых сцинтилляционных материалов, созданных на основе деформированных порошков галогенидов щелочных металлов. В деформированных порошках наблюдается значительное снижение времени высвечивания по сравнению с монокристаллами.

Ключевые слова: сцинтиллятор, время высвечивания, интенсивная пластическая деформация.

Введение

Известно, что одним из важнейших параметров сцинтилляционных материалов, определяющих эффективность их работы, является время высвечивания. Для сцинтилляционных материалов и детекторов, созданных на их основе, достижение малого времени высвечивания актуально по несколь-

ким причинам. Чем короче временной интервал сцинтилляции при ее фиксированной интегральной энергии, тем легче добиться высокого отношения "сигнал-шум" и тем самым повысить чувствительность системы. При времени высвечивания на уровне пикосекунд рентгеновский сцинтилляционный детектор позволяет получить точность определения пространственных координат скрытых внутри предметов или аномалий внутренних органов 0,3 мм. Это значительно лучше пространственного разрешения томографической техники, широко применяемой в настоящее время. Высокое временное разрешение особенно важно для детекторов, работающих по времяпролетному принципу регистрации, где по разнице времени вылета просвечивающего кванта и регистрации рассеянного внутренним предметом вторичного кванта определяется точка, в которой произошло рассеяние. Сокращение числа необходимых рентгеновских снимков от нескольких десятков (для нынешней томографии) до всего одного при времяпролетной диагностике многократно снижает и длительность диагностической процедуры, и дозу облучения исследуемого объекта.

Необходимого качественного прорыва за счет совершенствования монокристаллических сцинтилляторов ожидать трудно. Так, путем дальнейшего совершенствования монокристаллических сцинтилляторов за более чем 50 лет исследований во многих лабораториях разных стран их время высвечивания удалось сократить всего в полтора два раза. Вместе с тем, достигнут радикальный прогресс в свойствах при переходе от объемных материалов к микро- и наноструктурам. Получение деформированных порошков сцинтилляторов дешевле монокристаллических. Все это делает перспективным применение этих материалов как в физике высоких энергий (например, при создании гетерогенных электромагнитных [1] и адронных калориметров), так и в других областях физики, медицины, для создания антитеррористической и диагностической техники. Кроме того, представленные ниже экспериментальные данные и их обсуждение показывают, что в случае применения деформированных микро- и нанопорошков сцинтилляторов возможны многократные положительные изменения их свойств.

Изготовление деформированных порошков сцинтилляторов

В качестве объекта исследования были выбраны широко применяемые неорганические сцинтилляторы: BaF₂, CdF₂, PbF₂, LaF₃, CsI : Br, NaBi(WO₄). Указанные исходные монокристаллические сцинтилляторы были сильно деформированы (эту процелуру создания сильно деформированных сцинтилляторов можно отнести к интенсивной пластической деформации) [2]. В работе [3] приведены экспериментальные данные, которые показывают уменьшение (а для некоторых материалов — значительное) времени высвечивания некоторых деформированных неорганических сцинтилляторов. Очевидно, при изготовлении порошков сцинтилляторов можно добиться значительно больших деформаций, и их можно также использовать для создания новых быстрых сцинтилляторов. После размола сильно деформированных образцов (сцинтилляторов) в порошки средний размер частиц составил ~0,3-5 мкм. Размер частиц порошка при одинаковом деформационном воздействии определяется пластичностью, исходного материала. Для краткости такие порошки после деформации будем называть обработанными порошками.

Полученные обработанные порошки подвергались сухому прессованию. Целью процесса прессования являлось формование тела сцинтиллятора (заготовки) с заданной формой, размерами, плотностью и прозрачностью, необходимой для проведения сцинтилляционных исследований. При прессовании происходит деформирование некоторого начального объема свободно насыпанного порошка обжатием в пресс-форме под воздействием давления. Объем порошкового тела при прессовании изменяется в результате смещения отдельных частиц, заполняющих пустоты между ними, и за счет деформации самих частиц. Таким образом, при прессовании дополнительно вводится деформация, которая определяется усилием прессования. Прессование проводили при одинаковом давлении для всех серий образцов. Из обработанных порошков прессованием изготавливали диски диаметром 12 мм и толщиной 1—2 мм, что обеспечивало удобство при измерениях свойств образцов.

Измерение характеристик

Время высвечивания образцов деформированных сцинтилляторов определяли непосредственно после их изготовления методом счета отдельных фотонов [4]. Сцинтилляцию в образцах возбуждали β -частицами от радиоактивного источника ⁹⁰Sr с активностью ~10⁵ Бк. Фотон от сцинтилляции в образце попадает в счетчик, работающий в однофотоэлектронном режиме. В качестве эталона использовали сцинтиллятор фирмы Bicron с временем нарастания 0,7 нс и временем высвечивания 2,3 нс, максимум люминесценции которого соответствует ~ 408 нм, световыход ~68 % от антрацена [5]. Сигнал со счетчика поступает на дискриминатор постоянной части сигнала, который совместно с быстрым фотоэлектронным умножителем (ФЭУ) XP2020Q позволяет получить высокое временное разрешение. Квантовый выход ФЭУ равен ~12 % в области длин волн 410-460 нм. Отметим, что кварцевое входное окно ФЭУ позволяет эффективно регистрировать фотоны вплоть до УФ (~ 200 нм) диапазона. Сигнал с выхода ФЭУ поступает в триггерный модуль, который вырабатывает сигналы для запуска преобразователя время—цифра (TDC) и заряд-цифра (ADC). Разрядность модуля TDC имеет 12 бит, один отсчет равен 25 пс.

При измерении полученных образцов обратное рассеяние оказалась намного больше, чем при работе с эталонными сцинтилляторами. Причина заключатся в том, что толщина образцов составляет примерно 1-2 мм и эффективность измерений (т. е. вероятность возбуждения сцинтилляций) мала. Поскольку статистика измерений невелика, спадающие части кривых спектров высвечивания сцинтилляторов N(t) фитировали методом максимального правдоподобия упрощенной экспоненциальной функцией

$$N(t) = N_1 \exp\left(-\frac{t}{t_1}\right) + B.$$
(1)

Здесь N_1 — интенсивность высвечивания; t_1 — время высвечивания; B —уровень фона. Случай, когда для фитирования пришлось использовать две компоненты, будет специально отмечен в тексте этой работы. Для определения аппаратурной функции и временного разрешения установки t измеряли время высвечивания монокристаллического сцинтиллятора BaF₂, быстрая компонента которого $t_1 = 0.8$ нс [6]. Временное разрешение установки t составило около 0,8 нс.

Значения времен высвечивания для быстрых компонент в исследуемых образцах были получены путем фитирования экспериментальных спектров времени высвечивания с учетом найденной формы аппаратурной функции и временного разрешения установки *t*.

С помощью установки измеряли время высвечивания образцов в интервале $0 < \Delta t < 1000$ нс. Точность определения компонент времени высвечивания и их относительных интенсивностей составила ~10—20 %.

Характеристики деформированных порошков сцинтилляторов

Известно, что сцинтилляционные свойства материалов в сильной степени зависят от дисперсности порошков [7] и процедуры их приготовления [3, 8]. Измерения показали, что сцинтилляционные характеристики выбранных неорганических монокристаллических сцинтилляторов оказались достаточно близкими к их каталоговым значениям [9]. Небольшие отличия времени высвечивания некоторых образцов от каталоговых и опубликованных в журналах в нашем случае могут быть связаны с ограниченностью использованного временного интервала ($\Delta t = 1000$ нс), на котором они определялись. Для сравнения сцинтилляционные характеристики использованных монокристаллов представлены в таблице.

Результаты измерений времени высвечивания деформированных порошков сцинтилляторов представлены в таблице. Видно, что характеристики сцинтилляции всех порошков показали заметные отличия от характеристик их монокристаллов.

Характеристики времени высвечивания деформированных порошков сцинтилляторов представлены на рисунках. На рис. 1 приведен спектр времени высвечивания деформированного порошка сцинтиллятора LaF₃.

Видно, что деформационное воздействие вызвало заметное уменьшение времени высвечивания до t = 3,5 нс (см. таблицу, № 10), что более чем в 45 раз меньше времени высвечивания монокристаллического сцинтиллятора (№ 4).

r			
арактерист	ики иссло	едvемых м	атериалов
		· · · ·	

N⁰	Состав сцинтиллятора	Время высвечивания, нс				
	Монокристаллические сцинтилляторы					
1	BaF_2	650				
2	CdF_{2}	940				
3	PbF_2^2	320				
4	LaF ₃	160				
5	CsI:Br	5,0*; 27				
6	$NaBi(WO_4)$	12				
	Деформированные порош	ки сцинтилляторов				
7	BaF_2	$4,8 \pm 0,7$				
8	CdF_2	$5,5 \pm 0,5$				
9	PbF_2^2	$4,5 \pm 0,8$				
10	LaF_3^2	$3,5 \pm 0,6$				
11	CsI : Br	$4,8 \pm 0,3$				
12	NaBi(WO ₄)	$3,5 \pm 0,5$				
* Наблюдаются две компоненты времени высвечивания.						



Рис. 1. Спектр времени высвечивания LaF₃



Рис. 2. Спектр времени высвечивания $BaF_2(1)$, $PbF_2(2)$, $CdF_2(3)$

На рис. 2 показаны спектры времени высвечивания образцов деформированных порошков сцинтилляторов BaF_2 , CdF_2 , PbF_2 . Видно, что деформация вызвала уменьшение времени высвечивания материалов (\mathbb{N} 7, 8, 9) по сравнению с табличными значениями для монокристаллических сцинтилляторов (\mathbb{N} 1, 2, 3) такого же состава. Заметим, что характер и форма спектров времени высвечивания образцов на рис. 2 оказались достаточно близкими друг к другу.

На рис. 3 показаны спектры времени высвечивания образца деформированного порошка сцинтиллятора CsI : Br. Для монокристалла CsI : Br наблюдаются две компоненты времени высвечивания (№ 5). На долю быстрой компоненты с време-



нем высвечивания t = 5,0 нс приходится до 40 % от общего световыхода, остальную долю в спектре высвечивания занимает медленная компонента с t = 27 нс. Для деформированных порошков сцинтилляторов CsI : Вг наблюдается только одна компонента высвечивания t = 4,8 нс (№ 11), что с учетом ошибки соответствует времени высвечивания монокристалла, но на долю этой компоненты в спектре высвечивания приходится все 100 % световыхода. Следует отметить, что формы спектров времени высвечивания деформированных порошков CsI : Вг и PbF₂ хорошо совпадают.

На рис. 4 показаны спектры времени высвечивания образца деформированного порошка сцинтиллятора NaBi(WO₄). В этом деформированном сцинтилляторе наблюдается время высвечивания t = 3,5 нс (№ 12). Заметим, что монокристаллический сцинтиллятор обладает высоким быстродействием и его время высвечивания находится на уровне t = 12 нс (№ 6). Это означает, что интенсивная пластическая деформация воздействует на кинетику сцинтилляционных процессов и возможно улучшение временных параметров сцинтилляции даже таких быстродействующих сцинтилляционных материалов.

Таким образом, сцинтилляционные свойства практически полностью определяются деформационным воздействием (сдавливанием) на порошки сцинтилляторов. При возбуждении сцинтилляций мягкими γ -квантами световыход деформированных порошков сцинтилляторов будет определяться размерами кристаллов порошка. В нашем случае размер кристаллов в порошке был больше длины пробега выбитых γ -квантами вторичных электронов в веществе. Это означает, что большая часть ионизационных потерь сосредоточена внутри кристаллов порошка-сцинтиллятора, и световыход образцов в этом случае определяется уровнем световыхода порошка-сцинтиллятора.

Полученные образцы деформированных порошков сцинтилляторов обладают невысокой оптической прозрачностью. Действительно, для достижения хорошей прозрачности в композиционных материалах разница показателей преломления компонентов не должна различаться более чем на 0,02 [10] и размер кристаллов вводимых порошков должен быть крупным. Это объясняет тот факт, что оптическая прозрачность получившихся деформированных порошков сцинтилляторов оказалась невысокой.

Заключение

Результаты исследований сцинтилляционных характеристик новых сцинтилляционных материалов, изготовленных из сильно деформированных порошков неорганических сцинтилляторов, показали следующее:

- время высвечивания деформированных порошков сцинтилляторов оказалось заметно короче времени высвечивания композиционных сцинтилляторов из работы [11], содержащих аналогичные по составу, но обычные порошки, и заметно короче времени высвечивания монокристаллов, аналогичных по составу;
- дополнительно к подходу, предложенному в работе [12], в данной работе представлена еще одна возможность создания сцинтилляторов с наносекундным временем высвечивания.

Достигнутое время высвечивания для описанных сцинтилляторов не является предельным. Предельная длительность в них может быть ограничена только процессом разгорания сцинтилляций. Поэтому как достижение предельно коротких значений времени высвечивания, так и детальное выяснение причин возникновения сверхбыстрых компонент в сцинтилляторах с экситонным механизмом высвечивания требуют дополнительных исследований, которые выходят за рамки этой работы.

Простота технологии изготовления неорганических деформированных порошков сцинтилляторов позволяет получать из них сцинтилляторы сложных форм с коротким временем высвечивания. Некоторые из этих сцинтилляционных материалов можно использовать в качестве активных элементов в детекторах частиц при условии, что их толщина не будет превышать нескольких миллиметров.

Неорганические сцинтилляционные материалы, содержащие деформированные порошки сцинтилляторов, можно использовать для создания различных сенсоров, электретов, пьезоэлектриков, фоточувствительных и фотохромных материалов.

Список литературы

1. **Fessler H., Freund P., Gebauer I.** et al. A scintillator-lead photon calorimeter using optical fiber readout systems // Nuclear Instruments and Methods. 1985. V. A240. P. 28

2. Валиев Р. З., Александров И. В. Наноструктурные материалы, полученные интенсивной пластичной деформацией. М.: Логос, 2000.

3. Васильченко В. Г., Соловьев А. С. Свойства композиционных сцинтилляторов в статических и динамических состояниях // ПТЭ. 2003. № 6. С. 30. 4. Bellinger L. M., Thomas G. E. Measurement of the Time

4. **Bellinger L. M., Thomas G. E.** Measurement of the Time Dependence of Scintillation Intensity by a Delayed-Coincidence Method // Rev. Scientific Instruments. 1961. V. 32. P. 1044.

5. **Catalog** of BICRON Corporation. 12345 Kinsman Road. Newbury. OH 44065–9677. USA., 2002.

6. **Multicomponent** Crystals Based on Heavy Metal Fluorides for Radiation Detectors / Ed by B. P. Sobolev. Barselona: Institut D'Estudis Catalons, Arxius De Les Seccions Ciencies publ., 1994.

1994. 7. Материалы VI всесоюзной конференции по синтезу, производству и применению сцинтилляторов. 26—28 мая 1971. Харьков. Вып. 6. Ч. 1 Чебоксары: Изд-во НИИТЭХИМА, 1972.

8. Васильченко В. Г., Соловьев А. С. Новые композиционные сцинтилляторы (в статических и динамических состояниях) // ПТЭ. 2004. № 5. С. 38.

9. Troster Th., Schweizer S., Secu M., Spaeth J.-M. Luminescence of BaBr2:Eu2+ under hydrostatic pressure // Journal of Fluorescence. 2002. V. 99. P. 343.

10. **Бритвич Г. И., Бритвич И. Г., Васильченко В. Г.** и др. Новые тяжелые сцинтилляторы для гетерогенных электромагнитных калориметров // ПТЭ. 1999. № 4. С. 83.

магнитных калориметров // ПТЭ. 1999. № 4. С. 83. 11. Gektin A., Shiran N., Pogorelova N. et al. Inorganic-organic rubbery scintillators // Nuclear Instruments and Methods. 2002. V. A486. P. 191. 12. Derenzo S. E., Weber M. J., Borret-Courchesne E.,

12. Derenzo S. E., Weber M. J., Borret-Courchesne E., Klin-tenberg M. K. The quest for the ideal inorganic scintillator // Nuclear Instruments and Methods. Phys. Res. Sect. A. 2003. V. 55. P. 111.

УДК 621.315.592; 621.384.6

П. А. Александров, д-р физ.-мат. наук, директор, К. Д. Демаков, канд. техн. наук, вед. науч. сотр., С. Г. Шемардов, нач. группы, Ю. Ю. Кузнецов, мл. науч. сотр., Российский научный центр "Курчатовский институт. Институт информационных технологий, г. Москва e-mail: kuznetsov.yuri@kiae.ru

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ИМПЛАНТАЦИИ ИОНОВ ВОДОРОДА И ПОСЛЕДУЮШЕГО ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОГО ОТЖИГА ДЛЯ УМЕНЬШЕНИЯ ДЕФЕКТНОСТИ ЭПИТАКСИАЛЬНОГО КРЕМНИЯ НА САПФИРЕ

Низкодефектные кремниевые пленки на сапфире получены с использованием имплантации водорода и последующей термической обработки. Метод двухкристальной брэгговской дифракции показал, что ширина рентгеновской кривой качания (FWHM) уменьшилась на 40 %. **Ключевые слова:** имплантация, кремний-на-сапфире, высокотемпературный отжиг.

Введение

Среди многообразия структур кремний-на-изоляторе, используемых современной микроэлектроникой, особый интерес исследователей многих стран прикован к структурам кремний-на-сапфире (КНС). В настоящее время эти эпитаксиальные структуры, получаемые осаждением из газовой фазы, довольно длительное время выпускаются промышленным способом. Однако физические ограничения самого метода (островковый рост на начальной сталии эпитаксиального осаждения, разница в параметрах кристаллических решеток и в коэффициентах термического расширения кремния и сапфира, и т. д.) приводят к значительному количеству дефектов в кремниевом слое, особенно вблизи границы раздела кремний-сапфир. Это резко уменьшает использование КНС-структур несмотря на очевидные достоинства: полную диэлектрическую изоляцию, высокую теплопроводность сапфира, малые паразитные емкости и т. д.

Однако проведенные в последние годы работы по использованию процесса твердофазной рекристаллизации для улучшения структурного совершенства эпитаксиального монокристаллического кремниевого слоя резко изменили ситуацию [1—5]. Более того, появилась возможность получения ультратонких высококачественных эпитаксиальных кремниевых пленок (~100 нм), что принципиально невозможно при осаждении из газовой фазы.

Не прекращаются исследования и в других направлениях для создания альтернативных методов улучшения качества кремниевого слоя. Одним из перспективных направлений является взаимодействие водорода с дефектами в монокристаллическом кремниевом слое при высоких температурах. В работе [6] показано, что отжиг КНС-структур при температурах 1000...1100 °С приводит к существенному уменьшению ширины рентгеновской кривой качания (40...60 % для КНС-структур с толщиной слоя Si 0,6...2 мкм), что свидетельствует о кардинальном уменьшении дефектности эпитаксиального слоя. Правда необходимы весьма длительные отжиги (~5 ч). Значительное уменьшение дислокаций и микродвойников вблизи границы раздела, и соответственно, улучшение электрических свойств кремниевого слоя (уменьшение токов утечки более чем в 10 раз, увеличение напряжения пробоя диодов и т. д.) наблюдали авторы работы [7] при "наводораживании" эпитаксиального слоя в водородной плазме и последующем высокотемпературном отжиге.

В настоящей работе рассмотрены вопросы улучшения кристаллической структуры эпитаксиального кремниевого слоя КНС-структуры при использовании имплантации водорода.

Экспериментальные результаты

Образцы КНС-структуры с толщиной эпитаксиального слоя ~320 нм облучали ионами водорода на установке ИЛУ-100 [4]. Энергию имплантации (27,5 кэВ) выбирали из условия достижения концентрационного максимума на границе раздела кремний — сапфир. Выбранная плотность тока (~1 мкА/см²), учитывая массивность держателя образцов, позволяет говорить, что температура последних в процессе имплантации не превышала 50 °С. В работе использовались режимы отжига с разными скоростями нагрева: "классический" — 10 °С/мин и "средний" — 250 °С/мин. Оценка кристаллического совершенства эпитаксиального слоя КНС-структур проводилась методом высокоразрешающей двухкристальной рентгеновской дифракции на дифрактометре ДРОН-3М. Ширина рентгеновской кривой качания (FWHM) характеризовала структурное качество кремниевого слоя. FWHM исходных эпитаксиальных структур ~1400 угл. сек.

Технологическая процедура, которой подвергались исходные эпитаксиальные КНС-структуры, состоит из имплантации водорода при указанных



Рис. 1. Зависимость ширины кривой качания от дозы облучения Н⁺: *1* — "классический" отжиг (нагрев: 10 °С/мин, 1 ч — 1000 °С); *2* — "средний отжиг" (нагрев: 250 °С/мин, 30 мин — 1000 °С); *3* — "средний отжиг" (нагрев: 250 °С/мин, 1 ч — 1000 °С)

выше параметрах и отжиге при температуре 1000 °С. На этапе имплантации максимальную дозу выбирали из условия, чтобы концентрация водорода в максимуме распределения была значительно меньше значений (2...7) 10^{21} см⁻³, используемых в технологии Smart-Cut, для предотвращения образования полостей в материале при последующем отжиге с малыми скоростями нагрева [8]. Поскольку быстрый отжиг также стимулирует образование водородных "пузырей" [9, 10], то в наших экспериментах использовались значительно более низкие скорости нагрева.

На рис. 1 представлены результаты дефектности эпитаксиального слоя модифицированных КНСструктур, на основании которых можно сделать некоторые предварительные заключения:

- после всех видов термообработки наблюдается резко выраженный дозовый оптимум (около 5 · 10⁵ H⁺/см²);
- улучшение структуры кремниевого слоя наблюдается и после "классического" отжига, и после "среднего", хотя в последнем случае изменения более значительны;
- длительность отжига влияет на качество эпитаксиального слоя;
- наименьшее значение FWHM зафиксировано для "среднего" отжига (1000 °С — 1 ч);
- максимальное уменьшение FWHM по сравнению с исходными эпитаксиальными структурами ~33 %.

Предложенный выше имплантационный режим является оптимальным с точки зрения достижения наименьшей дефектности монокристаллического слоя Si. Это заключение подтверждает приведенный ниже эксперимент. Исходные эпитаксиальные структуры были проимплантированы ионами



Рис. 2. Зависимость ширины кривой качания от энергии облучения $H^+: E_1 = 23,5$ кэВ, $E_2 = 27,5$ кэВ, $E_3 = 32,5$ кэВ, $D = 5 \cdot 10^{25} H^+/cm^2$



Рис. 3. Зависимость ширины кривои качания от числа проведенні циклов. Один цикл = имплантация + отжиг (1000 °C - 1 ч)

водорода с энергиями 23,5 и 32,5 кэВ. Доза имплантации 5 · 10¹⁵ H⁺/см². В случае имплантации при меньшей энергии (23,5 кэВ) более 80 % имплантированного водорода находится в кремниевой пленке, максимум профиля удален от границы раздела на ~600 Å (60 нм). Во втором случае (энергия имплантации 32,5 кэВ) концентрационный максимум достигается в сапфировой подложке вблизи границы раздела, и большая часть профиля распределения располагается в сапфире. Несмотря на такие существенные различия в распределении имплантированного водорода образцы после отжига показывают близкие значения, FWHM хуже, чем в случае имплантации в границу раздела с энергией 27,5 кэВ (рис. 2). Данные результаты свидетельствуют, что улучшение структуры монокристаллического кремния в нашем случае в основном связано с взаимодействием водорода с дефектами в узкой области эпитаксиального слоя, прилегающего к границе раздела. Двухшаговая модификация (в этом случае технологическая процедура, состоящая из имплантации и отжига, повторяется 2 раза) ведет к дальнейшему улучшению кристаллической структуры кремниевого слоя (рис. 3).

Выводы

Предложенный метод (имплантация ионов водорода в эпитаксиальный слой при температурах вблизи комнатной плюс высокотемпературный отжиг в инертной атмосфере) позволяет значительно уменьшить дефектность монокристаллического кремниевого слоя эпитаксиальных КНС-структур. Двухшаговая модификация позволяет уменьшить FWHM слоя Si на ~ 40 %. Наличие водорода в наиболее дефектном слое кремния вблизи границы раздела с сапфиром способствует диффузионному залечиванию дефектов и уменьшает стабильность (приводит к развалу) промежуточных фаз алюмосиликатов вследствие высокого коэффициента диффузии комплекса ОН [11]. Все это улучшает структуру слоя кремния, происходит уменьшение FWHM и, вероятно, уменьшает число ловушек для носителей заряда вблизи границы раздела.

Список литературы

1. **Inoue T., Yoshii T.** Crystalline quality improvement of SOS films by Si implantation and subsequent annealing // Nucl. Instrum. Methods. 1981. Vol. 182/183. P. 683–690.

2. **Golecki I.** Method of eliminating p-type electrical activity and increasing channel mobility of Si-implanted and recrystallized SOS films // United States Patent. 1986. N 4. P. 588, 447.

3. **Burgener M. L., Reedy R. E.** Minimum charge FET fabricated on an ultrathin silicon on sapphire wafer // United States Patent. 1995. N 5. P. 416, 043.

4. Александров П. А., Демаков К. Д., Шемардов С. Г., Кузнецов Ю. Ю. Применение имплантации ионов кислорода и процесса твердофазной рекристаллизации для улучшения кристаллической структуры кремния на сапфире // Нано- и микросистемная техника. 2008. № 3. С. 54—56.

5. Александров П. А., Демаков К. Д., Шемардов С. Г., Кузнецов Ю. Ю. Особенности процесса твердофазной рекристаллизации аморфизированных ионами кислорода КНС-структур // ФТП. 2009. Т. 43. № 5. С. 627—629. 6. Таппо К., Kanamori M. The effect of high temperature

6. **Tanno K., Kanamori M.** The effect of high temperature hydrogen annealing on SOS films // J. Cryst. Growth. 1982. Vol. 58. P. 73–78.

7. **Cho H. Y., Park C. J.** Hydrogenation effect on silicon on sapphire grown by rapid thermal chemical vapor deposition // Physica E. 2003. Vol. 16. P. 489–494.

8. **Aspar B., Bruel M., Moricean H.** et al. Basic mechanisms involved in the Smart-Cut process // Microelectronic Engineering. 1997. Vol. 36. P. 233–240.

9. Li J. Novel semiconductor substrate formed by hydrogen ion implantation into silicon // Appl. Phys. Lett. 1989. Vol. 55. N 21. P. 2223–2224.

10. Peres H. E. M., Fernandez F. J. R. High resistivity silicon layers obtained by hydrogen ion implantation // Braz. J. Phys. 1997. Vol. 27/A. N 4. P. 237–239.

11. Mizuno B., Kubota M., Nomura N., Iwasaki H. Effective removal of oxygen from Si layer on buried oxide by implantation of hydrogen // J. Appl. Phys. 1987. Vol. 62. N 6. P. 2566–2568.

Элементы МНСТ

УДК 621.3.049.77

А. Г. Алексенко, д-р техн. наук, проф., НОЦ "Нанотроника" НИЯУ "МИФИ", e-mail: aalexenko@mail.ru

МИКРО- И НАНОСИСТЕМЫ БЕСПРОВОДНОЙ ЭЛЕКТРОНИКИ

Встроенные и интегрируемые с живыми и неживыми объектами беспроводные наносистемы обещают стать такими же символами нашего века, какими в прошлом "информационном" веке являлись транзисторы и Интернет.

Исходя из понимания способности ИТ и нанотехнологий к конвергенции наук, технологий и производств представлен прогноз создания "мира умных вещей" — базы для глубоких изменений индустрии, социальных и межличностных отношений цивилизации XXI века.

Ключевые слова: системы-на-кристалле, конвергенция, наддисциплинарность, ИТ, нанотехнологии, беспроводные наносистемы, персональный терафлопный суперкомпьютер, парадоксы, вызовы века.

Введение

Надисциплинарная, системообразующая роль нано- и информационных технологий, их конвергенция с биотехнологиями и науками о человеке — это источник и основная линия современного прогресса.

Об этапах, темпах, результатах, социальных и экологических последствиях такого прогресса существует немало фантазий, пророчеств, предостережений, "дорожных карт", "форсайтов" и т. д. (см., например, [1—4]. Мы остановимся на реализуемых в ближайшем десятилетии [5] беспроводных наносистемах, интегрирующих достижения многих наук и технологий и способных изменить среду обитания на планете с помощью распределенного "мира умных вещей".

Мир умных вещей. Две ветви развития

В 2008 г. была достигнута степень интеграции 1 млрд компонентов на чип кремния. При выходе годных свыше 95 % открываются две принципиально возможных ветви развития кремниевого производства.

Первая ветвь развития. Наращивание сложности чипов и глобализации ИТ. В 2008 г. преодолен рубеж производительности суперЭВМ в 1 петафлопс (1 Pflops = 10^{15} флоп/с). Уже доступен [6] (рис. 1, см. четвертую сторону обложки) персональный суперкомпьютер с производительностью несколько терафлопс (триллионов операций в секунду) и потребляемой мощностью 62 Вт. Центральный 80-процессорный чип занимает на кристалле кремния площадь S = 3,025 см². Следует напомнить, что первый (ASCI Red, 1996 г.) компьютер с терафлопсной производительностью (1 Tflops = 10^{12} оп/с) был составлен из 10 тыс. 200-мегагерцовых процессоров Pentium Pro, которые все вместе потребляли мощность 500 кВт.

Из этого и многих других примеров видно, что вхождение в жизнь персональных компьютеров (ПК) отстает от передовых достижений информационной электроники приблизительно лет на 15. Следовательно, к 2025 г. ПК будут способны сплотить мир в "глобальную деревню", обеспечив синхронный многоязычный машинный перевод и все виды образовательных и информационных услуг пользователям в любой точке Земли.

Доступность петафлопных суперЭВМ позволит масштабировать *предсказательное моделирование*, когда станет возможным точный прогноз погоды и явлений, влияющих на экологию, "ближних" результатов и генетических последствий биоинженерии, а также ход и результаты взаимодействия сотен миллионов атомов живых и неживых объектов, наконец, вывести на принципиально новый уровень промышленную технологию разработки, проектирования и испытаний любых новых изделий [7].

Вторая ветвь развития. Она связана с интеграцией и масштабированием достижений микрои наноэлектроники и определяется экономикой современных СБИС. В самом деле, стоимость чипа СБИС теперь пропорциональна только его площади при любой его сложности:



Рис. 2. Адаптированный из [12] рисунок иллюстрирует концепцию применения наноантенн для беспроводных соединений наносистем и макроприборов

1 см² чипа стоит \$4;

1 мм² чипа стоит \$0,04.

Отсюда следует возможность применения радиочастотных связей в пределах автомобилей, самолетов, ракет, других средств транспорта и индустрии, а также в быту, торговле, медицине, службах безопасности, логистике и т. п. системах (рис. 2).

Беспроводное оборудование

Беспроводное оборудование становится символом прогресса. Бесконтактный доступ и дешевизна чипов уже породили бум в технике радиочастотной идентификации (RFID, РФИД [8]). Системы РФИД востребованы всеми видами транспортных средств, логистикой предприятий, торговлей, сельским хозяйством (дистанционный контроль флоры и фауны), пограничными, таможенными и охранными службами.

Техника РФИД, совершенствуясь, создает основу для развития распределенных сенсорных сетей — массовых потребителей интеллектуальных систем-на-кристалле (System-on-Chip, SoC).

Сенсорные сети. Датчики любых величин (температуры, давления, освещенности, ускорений и т. д.) соединяются в пределах SoC с миниатюрным компьютером. Связываясь друг с другом по радио, SoC образуют устойчивую к сбоям распределенную сеть, которая анализирует состояние заданного объекта или среды в целом.

С помощью таких "интеллектуальных" сенсоров можно реализовать *"проактивные"*, или *упреждаю-щие* вычисления.

"Умная пыль" (Smart Dust). Сейчас [9, 10] такая разновидность сетевой технология существует в отладочных прототипах (рис. 3, см. четвертую сторону обложки), в которых сколько-нибудь "умная пылинка" выглядит похожей на микросборку.

Но к 2020 г. сети *в виде настоящих Smart Dust* будут развернуты повсеместно для реализации новых, немыслимых прежде применений. Это — мониторинг деталей механизмов и конструкций, дорог и сооружений, водоемов и шахт. Это — интеллектуальные наношпалы — элементы сети с полностью автономным питанием, встроенные системы мониторинга строительных конструкций ("пылинки" в нанобетоне) и т. д.

"Умная пыль" сможет исследовать планеты. Например, возможно исследование Марса с помощью микроскопических роботов-песчинок, которые будут дрейфовать в атмосфере планеты вместе с воздушными потоками. Устройства смогут двигаться плотным "роем", образуя нечто вроде единого организма.

Одно из возможных военных применений поражение танков вероятного противника: "рой" нанороботов, несущих заряд, проникает в бронированную машину и взрывает ее. Применения подобного рода устройств радикально изменят стратегию и тактику проведения военных и антитеррористических операций. В повседневной жизни "пылинки" будут выполнять индивидуализированную заботу о тех, кто в ней нуждается, осуществлять многомерный ситуационный мониторинг жилья и среды обитания и состояния здоровья, предупреждать нежелательные ситуации или болезни.

Таким образом, в недалеком будущем технологии соединят "всех со всеми" и сделают реальным то, что сегодня воспринимается как невозможное.

Наноантенны для беспроводной электроники. Такие антенны нужны для массовых применений, включающих в себя не только сенсорные сети и иные перечисленные выше приложения, но и межсоединения в повсеместно используемых микро- и наноэлектронных системах (см. рис. 2).

Диполь антенны для однокристальных приемопередатчиков должен иметь размер, соизмеримый с длиной волны λ. Совместить с чипом такую антенну традиционными методами нельзя. К счастью, существуют квантовые возможности. Из определения [11] энергии Ферми

$$E_F = \frac{1}{2} m v_F^2, \tag{1}$$

где m — масса частицы; v_F — скорость, с которой частица преодолевает квантованный интервал энергии E_F , следует определение скорости Ферми

$$v_F = \sqrt{\frac{2E_F}{m}}.$$
 (2)

Скорость Ферми является мерой инерционности квантованных уровней энергии. Для нанотрубок и графена $v_F = 8 \cdot 10^5$ м/с [12], т. е. заведомо на два порядка меньше скорости *с* распространения электромагнитных волн. При $v_F \le 0,01$ *с* (где *с* скорость света) на несущей частоте $f_0 = 4$ ГГц длина полуволны плазмона составит

что открывает перспективу размещения различных наноантенн и антенных решеток на чипе [13, 14]. Параметры таких антенн выражаются через квантовые величины [12]. Из этого примера видно, как *парадоксы квантового наномира* могут служить питательной средой и источником прогресса нанонауки и технологии.

Другие парадоксы

Графен. При мысленном "разворачивании" однослойной углеродной нанотрубки в плоский лист свойства углеродного каркаса парадоксально изменяются. Как показали эксперименты, возникает другой материал [15] с необычными электрическими и магнитными свойствами. Оказалось, что графен содержит не одну, а две кристаллические решетки — с "нормальными" и хиральными электронами. Хиральные электроны обладают противоположным знаком спинового числа и обусловливают необычный вариант туннельного эффекта, при котором туннелирование не зависит от ширины и высоты потенциального барьера, а волновая функция постоянна в туннельном промежутке (так называемый *парадокс Клейна*).

Как видно из рис. 4 (см. четвертую сторону обложки), однослойный (1) — и двуслойный (2) графены имеют разные диаграммы направлености.

Необычность и богатство свойств графена, полученного только в 2004 г., открывают необычные, пока не реализованные возможности для наноэлектроники.

В наномире закон Ома не действует. Как показано в [16], сопротивление *R* цилиндрического резистора наноразмеров нельзя вычислять по известной формуле

$$R = \rho L/S,\tag{3}$$

где *L* — длина; *S* — площадь поперечного сечения; ρ — удельное сопротивление материала резистора.

Опуская подробности, можно считать, что в наномире сопротивления всех резисторов одинаковы и равны кванту сопротивления [17]

$$R_0 = h/(2e^2) = 12.9 \text{ KOM}, \tag{4}$$

где e — заряд электрона (1,6 · 10⁻¹⁹ Кл); h — постоянная Планка (6,6 × 10⁻³⁴ Дж/с).

Таким образом, квант R_0 не зависит от размеров и вещества нанорезистора. Простой и элегантный вывод формулы (4) содержится в [17].

При прохождении тока в нанорезисторе не выделяется джоулева теплота.

Баллистическая проводимость. Проводимость в наномире, не зависящая от длины резистора, площади его поперечного сечения и не сопровождающаяся выделением теплоты, называется квантовой, или баллистической. Электроны, как снаряды, движутся через нанорезистор, не сталкиваясь с атомами, находящимися в узлах его кристаллической решетки.

Примером нанорезисторов, обладающих баллистической проводимостью, являются *углеродные нанотрубки* (УНТ). Так как нагрев отсутствует, нанотрубки способны пропускать токи огромной плотности — более 10⁷ А/см². Джоулева теплота рассеивается только на границах наномира, где нанотрубка, например, соединяется с проводником обычных размеров.

Экспериментальное подтверждение квантовой проводимости было впервые сделано путем погружения "висящих" УНТ в ртуть и измерения зависимости их сопротивления от длины и диаметра. Несмотря на большой разброс в размерах сопротивление всех нанотрубок составляло около 12,9 кОм [17].

Существование баллистической проводимости — еще один, помимо закона Мура, стимул для уменьшения межсоединений и компонентов СБИС до наноразмеров.

Симбиоз с природой. Техническое подражание природным феноменам (*бионика, биомиметика*) — не единственный и далеко не лучший путь развития междисциплинарной и системной нанонауки. На-

нотехнология открывает множество путей кооперации с объектами живой природы. Примером может служить проблема наноассемблеров, пробуксовывающая у всех на глазах и обрастающая многочисленными легендами и слухами насчет "серой слизи". Между тем в природе существуют готовые преобразователи органических веществ в электрическую энергию, электродвигатели, наноконтейнеры, мембраны и т. д. Проблема заключается *в рукотворном объединении "достижений"* живой природы и создании систем, способных или не способных к самовоспроизводству. Приведем всего один пример.

Электромоторы бактерий в качестве источника энергии используют разность протонных потенциалов на цитоплазматической мембране. Бактериальный мотор — аналог машины постоянного тока, созданной человеком.

Обычно электромотор бактерий вращается со скоростью, достигающей $50-100 \text{ c}^{-1}$, однако у некоторых видов бактерий скорость вращения превышает 1 тыс. с⁻¹.

Вращая хлыстообразные жгутики (рис. 5, см. четвертую сторону обложки), бактерии плавают со средней скоростью около 25 мкм/с, но некоторые виды могут двигаться поступательно со скоростью больше 100 мкм/с. Это означает, что за одну секунду бактерия перемещается на расстояние, которое в десять или более раз превышает ее собственную длину. Изменение направления вращения жгутиков изменяет ориентацию бактерии. Расплетание пучка останавливает бактерию, которая в этом случае начинает хаотически вращаться.

Электромоторы бактерий, питаемые биоэлектричеством, очень экономичны — они потребляют не более 1 % энергетических ресурсов бактериальной клетки.

Биомиметика и медицина

Адресная доставка лекарств. Если внедрить лекарство в такие "транспортные" бактерии (на рис. 5, см. четвертую сторону обложки, показана палочка E.coli), то управляя движением бактерий (например, лучом лазера или магнитным полем), можно организовать адресную доставку лекарств к нужным клеткам организма.

Вызовы века

Новые вызовы. Синергетическое конвергентное взаимодействие охарактеризованных выше технических средств не только неизбежно приведет к возникновению сильно распределенных мыслящих сетей, но и увеличит уязвимость мировой цивилизации. Действительно, чем сильнее мировая экономика и жизнь людей будут зависеть от информационных (и даже "мыслящих") сетей, тем более опасными становятся террористические атаки на эти сети или даже их ненадежность.

Помимо проблемы информационного терроризма нарастает угроза для экологии планеты и

здоровья людей при бесконтрольном применении трансгеники, а также нано- и биоматериалов.

Как ответить на вызовы. Средствами для осуществления превентивного и оперативного контроля за перечисленными выше и иными угрозами, несомненно, должны стать сильно распределенные беспроводные сенсорные сети, использующие средства нанотехнологии и неизбежно интегрируемые с бурно увеличивающимися вычислительными ресурсами.

Переход техники на беспроводные решения предъявляет совершенно новый уровень требований и к разработчикам, и к их разработкам, но вместе с тем обеспечивает создание принципиально новых, причем весьма емких с финансовой точки зрения секторов рынка современной электронной продукции, что дает уникальный шанс для выхода на мировой электронный рынок стран с растущей экономикой.

Конвергенция изменит многое. В заключение следует отметить, что способность ИТ и нанотехнологий к конвергенции наук, технологий и производств — база для индустрии XXI века и новых социальных и межличностных отношений.

Список литературы

1. **Kurzweil R.** The Age of Spiritual Machines: When Computers Exceed Human Intelligence, New York: Penguin Book, 2008. 330 p.

2. **Intel** Roadmag Guidance & Directions http://www.intel.com/in/irdonline/pdf/ird_q2_09_roadmap_all.pdf, http://www. intel. com/in/irdonline/?business-in+irdonline.

3. EC NanoRoadMap (NRM) Project Reports http://www. nanoroadmap.it/.

4. Дорожные карты наноиндустрии. Тематический выпуск // Российские нанотехнологии. 2009. № 3—4.

5. Алексенко А. Г. Новый облик электроники — беспроводные сенсорные системы // Нано- и микросистемная техника. 2007. № 1. С. 2—4.

6. **Intel** Research Advances 'Era Of Tera' World's First Programmable Processor to Deliver Teraflops Performance with Remarkable Energy Efficiency, http://www.intel.com/pressroom/archive/releases/20070204comp.htm, http://download.intel.com/pressroom/kits/Teraflops/Teraflops_Research_Chip_ Overview.pdf

7. Бетелин В. Б., Велихов Е. П. Развитие российского сегмента мировой ИТ-индустрии // Электроника: Наука, Технология, Бизнес. 2007. № 2. С. 4—11. 8. Дшхунян В. Л., Шаньгин В. Ф. Электронная иденти-

8. Дшхунян В. Л., Шаньгин В. Ф. Электронная идентификация. Бесконтактные электронные идентификаторы и смарт-карты. М.: NT Press, 2004. 695 с. 9. Warneke B., Bhave S. Smart Dust Mote Core Architec-

9. Warneke B., Bhave S. Smart Dust Mote Core Architecture. CS252, Spring 2000: Project Report, Berkeley, Berkeley Sensor and Actuator Center, 497 p. http://bwrc.eecs.berkeley.edu/classes/cs252/Projects/Reports/warnke.pdf.

10. **SmartDust** & Ubiquitious Computing Nanotechnology Now. Your Gateway to Everything. Nanotech. 29-Mar-2008, http://www.nanotech-now.com/smartdust.htm

11. **Eisberg R.** and **Resnick R.** Quantum Physics of Atoms, Molecules, Solids, Nuclei, and Particles, 2nd ed. New York: Wiley, 1985. 864 p.

12. Burke P. J., Shengdong Li, Zhen Yu. Quantitative theory of nanowire and nanotube antenna performance // IEEE Transations on Nanotechnology. 2006. V. 5. N 4. P. 314–334. 13. Hao J, Hanson G. W. Infrared and Optical Properties of

 Hao J, Hanson G. W. Infrared and Optical Properties of Carbon Nanotube Dipole Antennas. IEEE Transations on Nanotechnology. 2006. V. 6. P. 766–775.
 Basrur R. R., Jonathan H., Williams C., Boschen D.,

14. Basrur R. R., Jonathan H., Williams C., Boschen D., Ross J. T., Rosario E. N., Davis R. J. Characterizing the Effects of Mutual Coupling on the Performance of a Miniaturized GPS Adaptive Antenna Array. Michigan Univercity, Institute of Navigation. 2003. V. 50.

15. Katsnelson M. Graphene: carbon in two dimensions // Materialstoday. 2007. V. 10. N 1–2, Jan-Feb. P. 20–27.

16. Frank W. and oth. The Ohm Law? Science. 1998. V. 280. P. 1744.

17. Богданов К. Ю. Закон Ома для углеродных нанотрубок // Известия науки. 29.10.07 http://www.inauka.ru/blogs/article78620/print.html

УДК 621.373.826: 621.375.8

М. Е. Белкин, д-р техн. наук, зав. науч. лаб., Московский государственный институт радиотехники, электроники и автоматики (технический университет), МИРЭА, e-mail: belkin@mirea.ru

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ПОЛУПРОВОДНИКОВОГО ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧАТЕЛЯ ДЛЯ ПЕРЕДАЧИ СВЕРХВЫСОКОСКОРОСТНОГО ЦИФРОВОГО СИГНАЛА

Описываются принципы и особенности экспериментального исследования параметров лазерного излучателя в СВЧ диапазоне и качества передачи с помощью такого излучателя сверхвысокоскоростных цифровых сигналов. Предложен простой осциллографический метод анализа качества передачи цифрового сигнала, позволяющий рассчитать коэффициент ошибок по результатам измерения геометрических параметров глаз-диаграммы переданного цифрового сигнала. Приводятся методика и результаты исследования характеристик формы псевдослучайного сигнала, а также его глаз-диаграммы и коэффициента ошибок, подтверждающие эффективность применения разработанного лазерного излучателя с произведением средней мощности на полосу модуляции более 300 мВт • ГГц для передачи цифрового сигнала со скоростью до 10 Гбит/с.

Ключевые слова: лазерный излучатель, характеристики передачи сверхвысокоскоростных цифровых сигналов, волоконно-оптические системы.

Введение

Интенсивное научно-техническое развитие средств микроволновой фотоники [1] в последние годы создало четкие горизонты для дальнейшего увеличения пропускной способности локальных цифровых волоконно-оптических систем передачи (ВОСП) [2] и внедрения волоконно-оптических узлов в существующие и перспективные системы радиолокации и связи СВЧ диапазона. Наиболее типичными представителями в данном направлении являются локальные телекоммуникационные сети с использованием пассивной архитектуры (PON) [3], локальные распределительные системы волоконно-эфирной структуры (RoF) [4], а также радиолокационные системы на базе активных фазированных антенных решеток [5]. Важная особенность полупроводникового лазерного излучателя (ПЛИ) для перечисленных выше применений заключается в необходимости одновременного увеличения, как средней выходной оптической мощности P₀ (для увеличения числа точек распределения), так и быстродействия или полосы модуляции ΔF (для увеличения пропускной способности линии). При этом на первый план выступает такой целевой показатель, как произведение $P_0 \Delta F[6]$.

Основной задачей в ходе технологической разработки лазерных гетероструктур для ВОСП указанного выше назначения является оптимизация по критерию $P_0 \Delta F$ их геометрических, электрофизических и оптических параметров, которые, как правило, оказывают взаимно противоположное влияние [7]. Кроме того, общее быстродействие наиболее широко распространенного ПЛИ с так называемой непосредственной модуляцией за счет управления током инжекции в равной степени определяется не только технологическими особенностями структуры лазерного кристалла, но и его конструкцией, а также конструкцией узла электрического ввода лазерного модуля, в котором устанавливается данный излучатель [7]. Причиной этому при полосе модуляции в СВЧ диапазоне являются ограничивающие ее паразитные электрические эффекты, возникающие вследствие влияния конструкции электрических выводов лазерного кристалла и монтажных элементов, требуемых для его подсоединения к вводу модулирующего сигнала.

Основываясь на сказанном, основные усилия в ходе разработки ПЛИ должны быть сосредоточены на следующем:

- подробное моделирование электрофизических и оптических характеристик лазерных гетероструктур в приборно-технологической системе автоматизированного проектирования (САПР), что позволяет значительно сократить временные и трудовые затраты на разработку;
- тщательная технологическая отработка лазерных гетероструктур;
- широкое экспериментальное исследование параметров и характеристик разработанного ПЛИ как в режиме немодулированного излучения, так и в малосигнальном режиме модуляции током инжекции на частотах СВЧ диапазона.

Результаты разработки двух вариантов лазерных излучателей с произведением средней мощности

на полосу модуляции более 300 мВт · ГГц описаны в работе [7].

Важная задача, возникающая перед разработчиком современных ВОСП, заключается в оценке и обосновании эффективности применения конкретного лазерного излучателя в реально действующей аппаратуре, которая, как правило, работает в режиме модуляции большим сигналом. В настоящей статье предлагается подход для решения ее применительно к аппаратуре сверхскоростных цифровых ВОСП телекоммуникационного назначения.

Анализ частотно-модуляционной характеристики ПЛИ

Ключевым целевым показателем лазерного излучателя с точки зрения применения в аппаратуре высокоскоростных цифровых ВОСП является его частотно-модуляционная характеристика (ЧМХ), которая стандартно измеряется при модуляции оптического излучения малым по уровню измерительным сигналом со сравнительно медленным изменением (качанием) частоты. При этом во избежание недопустимо большой погрешности измерений в ходе испытаний лазерный излучатель устанавливается в так называемую измерительную камеру, в которой минимизированы потери и отражения модулирующего СВЧ сигнала. Кроме того, для достаточно полного устранения влияния измерительной камеры перед началом измерений проводится ее калибровка. Уровень мощности модулированного оптического излучения определяется с помощью измерительного фотодиода с собственной полосой пропускания существенно большей верхней частоты измерения ЧМХ.

Результаты моделирования ЧМХ лазерных гетероструктур, методика, порядок и результаты измерения ЧМХ разработанных ПЛИ подробно описаны в работе [7]. Типичные данные, полученные в ходе моделирования (пунктир) и экспериментального исследования (ромбы) лазеров с одинаковыми геометрическими, электрическими и структурно-технологическими параметрами, представлены на рис. 1¹. Следует отметить, что ЧМХ обеих разработанных гетероструктур при одинаковой геометрии лазерных кристаллов практически совпали, что свидетельствует о преимущественном влиянии конструкции кристалла, а не технологических особенностей структур (см. Введение).

Из графиков можно сделать следующие выводы:

 рассчитанная и измеренная верхняя частота полосы модуляции по уровню —3 дБ совпали с точностью до 2 %, что свидетельствует о корректности результатов моделирования;

¹ По оси ординат для удобства сопоставления отложены значения мощности на частоте измерения, нормированные по значению на частоте 100 МГц.



Рис. 1. Частотно-модуляционная характеристика разработанного лазерного излучателя при токе смещения 120 мА

 наблюдается существенное (до 4 дБ) расхождение результатов моделирования и экспериментального исследования по неравномерности ЧМХ в полосе модулирующих частот.

Полученная в результате экспериментальных исследований большая неравномерность ЧМХ в полосе модуляции, на наш взгляд, объясняется неточным соответствием расчетным данным уровня легирования активной области и ширины лазерного кристалла в процессе изготовления экспериментальных образцов. Влияние этих параметров показано в работах [6, 7]. Дополнительным источником неравномерности, который невозможно учесть в рамках использованной в данной работе для моделирования и расчетов приборно-технологической САПР, могут быть не скомпенсированные в ходе измерений паразитные эффекты при монтаже лазерного излучателя в измерительной камере.

Описанная выше неравномерность ЧМХ не должна оказать сколь-нибудь существенного влияния на показатели качества работающих в сравнительно узких полосах аналоговых ВОСП с СВЧ поднесущими, однако может серьезно ухудшить характеристики передачи современных сверхвысокоскоростных цифровых ВОСП, спектр информационного сигнала которых, как известно, занимает практически всю рабочую полосу ЧМХ.

Метод оценки качества передачи цифрового сигнала

Как известно, интегральным показателем качества цифровой системы передачи является коэффициент ошибок (BER)² [8]. Данный параметр по определению просто равен отношению числа ошибочно принятых символов к общему числу символов, переданных в течение достаточно длительного интервала времени, что предопределило его широкое распространение. Измерители коэффициента ошибок (ИКО) в настоящее время повсеместно ис-

Кроме того, при применении стандартного ИКО в ходе разработки аппаратуры современных высокоскоростных ВОСП возникают проблемы различного характера. А именно, точное измерение коэффициента ошибок с помощью ИКО принципиально требует значительных временных затрат. Помимо этого, существующие ИКО сигналов со скоростью до 10 Гбит/с иностранного производства, созданные для эксплуатации, имеют многочисленные избыточные сервисные функции, ненужные на этапе разработки, что значительно увеличивает их стоимость. В свою очередь, существенно более экономичные ИКО отечественного производства не удовлетворяют современным требованиям к цифровым системам передачи по скорости. Так, наш анализ показал, что она не превышает 100 Мбит/с, что явно недостаточно для оценки разработанного лазерного излучателя.

Вследствие указанных причин эффективность применения в реальной ВОСП новых оптоэлектронных узлов и устройств обычно оценивается качественно путем наложения на так называемую глаз-диаграмму специальной телекоммуникационной маски, параметры которой нормированы, например, в рекомендации МСЭ-Т G.957. Однако для сравнения полученных результатов требуется количественная оценка. Для ее обеспечения нами разработан простой осциллографический метод анализа качества передачи цифрового сигнала. На базе этого метода была разработана методика, позволяющая оценить коэффициент ошибок по результатам измерения глаз-диаграммы переданного цифрового сигнала, получаемой с помощью совре-

пользуются при эксплуатации линий связи, в том числе волоконно-оптических. Однако применение ИКО не удовлетворяет потребностям разработчиков узлов и устройств приемопередающего оборудования цифровых ВОСП, поскольку в данном случае необходимо знать не только результат, но и причины ухудшения качества передачи сигналов, а также локализовать место его возникновения. То есть одновременно требуется средство измерения, позволяющее численно определять в каждом каскаде разрабатываемого устройства вносимые временные и амплитудные искажения передаваемых сигналов (так называемую характеристику формы сигнала), а также оценивать локальный коэффициент ошибок и уровень его последовательного ухудшения вследствие указанных искажений. Оптимальным современным средством измерения характеристики формы цифрового сигнала является цифровой осциллограф, с помощью которого можно не только визуализировать, но и рассчитывать в реальном времени самые разнообразные параметры импульсной последовательности высокоскоростных систем передачи. Однако требуется разработка специальной методики и дополнительной аппаратуры для оценки с его помощью коэффициента ошибок.

² BER – Bit Error Rate.

менного высокоскоростного осциллографа (ВО) и входящего в его состав модуля генератора псевдослучайных последовательностей (ГПСП).

Процедура количественной оценки основывается на следующих теоретических положениях. Согласно работе [9] при анализе качества передачи цифровых ВОСП экспериментально измеряемый коэффициент ошибок с достаточной корректностью можно заменить на одномерную вероятность ошибки (p_{oui}) при приеме одного бита информации и считать распределения реализаций случайного сигнала и шумов гауссовскими. При данных допущениях вероятность ошибки однозначно связана с так называемым Q-фактором, который определяется как отношение электрического сигнала к шуму на выходе канала передачи:

$$p_{\rm OIII} = \frac{1}{2} \operatorname{erfc}\left(\frac{Q}{\sqrt{2}}\right),\tag{1}$$

где erfc (...) — функция ошибок, определяемая как

$$\operatorname{erfc}(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{x}^{\infty} \mathbf{e}^{-z^{2}/2} dz.$$
 (2)

При значениях Q > 3, что соответствует реальному случаю функционирования аппаратуры ВОСП, вероятность ошибки может быть найдена по следующей приближенной формуле [9]:

$$p_{\text{OIII}} \cong \frac{1}{Q\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{Q^2}{2}\right).$$
 (3)

Рассчитанный с помощью (3) график зависимости $p_{\text{ош}}$ от Q представлен на рис. 2. Как следует из





графика, стандартно требуемый в современных локальных цифровых ВОСП максимальный коэффициент ошибок 10^{-12} обеспечивается при $Q \approx 7$.

Приняв стандартные для анализа цифровых ВОСП допущения о некоррелированности логических единиц и нулей и о статистической независимости шума и сигнала, *Q*-фактор согласно рекомендации О.201 МСЭ-Т будет выражаться как

$$Q = \frac{\mu_1 - \mu_0}{\sigma_1 + \sigma_0},\tag{4}$$

где μ_1 и μ_0 — средние значения напряжений логических уровней единицы и нуля; σ_1 и σ_0 —средние квадратические отклонения шума в моменты передачи единиц и нулей.

Оценка коэффициента ошибок проводится в следующем порядке. По глаз-диаграмме на выходе измерительного тракта определяются значения максимального и минимального уровней сигнала логической единицы (μ_{1max} и μ_{1min}), максимального и минимального уровней сигнала логического нуля (μ_{0max} и μ_{0min}) и раскрыва глаза α . По измеренным значениям рассчитываются μ_1 и μ_0 :

$$\mu_1 = \frac{\mu_{1\max} + \mu_{1\min}}{2};$$
 (5)

$$\mu_0 = \frac{\mu_{0\max} + \mu_{0\min}}{2}, \qquad (6)$$

а также $\sigma_0 + \sigma_1 = \mu_p - \alpha$, где $\mu_p = \mu_{1max} - \mu_{0min}$. С помощью формулы (4) рассчитывается значение *Q*-фактора. Для данного значения *Q*-фактора с помощью графика, приведенного на рис. 2, оценивается коэффициент ошибок. Отметим, что в современных осциллографах вычисление указанных выше средних значений и средних квадратических отклонений может быть выполнено в автоматическом режиме с помощью встроенного блока математического анализа.

Исследование характеристик передачи сверхвысокоскоростного цифрового сигнала

Для оценки степени влияния отмеченной выше неравномерности ЧМХ разработанного лазерного излучателя с помощью предложенного метода проведено экспериментальное исследование его характеристик передачи реального цифрового сигнала со скоростью 10 Гбит/с по приведенной ниже методике.

В ходе испытаний количественно оцениваются следующие параметры передаваемых цифровых сигналов: характеристики формы сигнала, включающие уровни при передаче логической единицы и логического нуля, размах сигнала, длительности переднего и заднего фронтов, а также коэффициент битовых ошибок. Характеристики формы сигнала измеряются стандартным осциллографиче-



Рис. 3. Структурная схема установки для исследования характеристик передачи высокоскоростного цифрового сигнала осциллографическим методом

ским методом при передаче от генератора псевдослучайной последовательности (ГПСП) псевдослучайного сигнала соответствующей скорости и наблюдения отклика, переданного испытуемым оборудованием сигнала, во временной области на экране высокоскоростного осциллографа. Коэффициент ошибок измеряется описанным выше осциллографическим методом при передаче от ГПСП псевдослучайного сигнала соответствующей скорости и наблюдения так называемой глаздиаграммы на экране ВО, подключенного к выходу измерительного фотодиода.

В качестве источника сигнала на входе измерительной камеры используется стандартный генератор псевдослучайных последовательностей. Основные технические требования к данным ГПСП: соответствие максимальной скорости прибора полосе модуляции исследуемого лазерного излучателя; выходная цифровая последовательность в наиболее распространенном формате NRZ; амплитуда выходных импульсов должна соответствовать системе логических уровней 3,3 В ТТЛ либо ПЭСЛ. В качестве регистратора цифрового сигнала на выходе измерительного фотодиода используется высокоскоростной осциллограф. Основные технические требования к данному ВО: соответствие полосы пропускания прибора полосе модуляции исследуемого лазерного излучателя; чувствительность — не более 1 мВ; динамический диапазон по напряжению не менее 60 дБ; погрешность измерения уровня и времени — не более 0,5 мВ и 10 пс соответственно.

Структурная схема измерительной установки представлена на рис. 3.

Испытуемый образец лазерного излучателя (VD1) вводится в измерительную камеру, принципиальная схема которой представлена на рис. 4. Все пассивные электронные компоненты схемы за исключением высокочастотного дросселя выполнены по технологии поверхностного монтажа. Требования, структура и принципы проектирования примененной для испытаний измерительной камеры подробно описаны в работе [7].



Рис. 4. Принципиальная электрическая схема измерительной камеры

Блок управления лазером (БУ-Л) предназначен для стабилизации температуры образца в пределах 0,1 °C. На испытуемый образец от источника постоянного напряжения TEC-14 (см. рис. 3) подается требуемое прямое смещение. Уровни напряжения и тока этого смещения контролируются с помощью универсальных вольтметров соответственно B7-27 и B7-22. Оптический выход измерительной камеры согласуется с измерительным оптическим трактом (ИОТ), внешний вид которого представлен на рис. 5.

Как видно из рисунка, на оптическом рельсе установлено два юстировочных столика. На левом столике закреплена оснастка с измерительной камерой. Трехкоординатный правый юстировочный столик входит в состав ИОТ и для обеспечения эффективного ввода излучения испытуемого лазера в отрезок одномодового волокна на его верхней площадке закреплен держатель волокна. Введенный в волокно оптический сигнал подается на вход измерительного фотодиода (ИФД, на рисунке справа) модели 1414 (производство фирмы *New Focus, Inc.*) с полосой пропускания 25 ГГц. Подробнее принцип действия и структура ИОТ рассмотрены в работе [7].



Рис. 5. Измерительный оптический тракт



Рис. 7. Типичная глаз-диаграмма при модуляции разработанного лазерного излучателя псевдослучайным сигналом со скоростью 10 Гбит/с (масштаб по горизонтали 60 пс/дел., по вертикали 0,1 В/дел.)

На СВЧ вход измерительной камеры от встроенного модуля PPG-E135 высокоскоростного осциллографа LeCroy WE9000 (см. рис. 3) подается псевдослучайная последовательность (PRBS) длиной 2²³-1 со скоростью 10 Гбит/с в формате ТТЛ-3,3 В. Синхронизация последовательности осуществляется от генератора сигналов произвольной формы Tektronix AWG7102. Сигнал с выхода ИФД усиливается до необходимого уровня с помощью сверхширокополосного электронного усилителя (ЭУ) и формируется согласно рекомендации ITU-T G.957 с помощью формирующего фильтра (ФФ).

Параметры формы наблюдаемых на экране WE9000 реализаций псевдослучайного сигнала определяются с помощью блока математической обработки осциллографа. Коэффициент ошибок рассчитывается по изложенной выше методике, на основе данных также наблюдаемой на экране осциллографа глаз-диаграммы.

Реализация псевдослучайного сигнала со скоростью 10 Гбит/с, полученная с помощью описанной выше измерительной установки (без формирующего фильтра), представлена на рис. 6.

Размах импульсов получился на уровне 0,4 В, длительность одиночного импульса порядка 100 пс и длительность переднего и заднего фронтов порядка 35 пс, что соответствует требованиям к па-





раметрам реального сигнала стандартной цифровой линии передачи со скоростью 10 Гбит/с [10].

В ходе испытаний также исследовалась глаздиаграмма на экране ВО при подаче на СВЧ вход измерительной камеры с установленным испытуемым образцом лазерного излучателя псевдослучайной цифровой последовательности (PRBS) длиной 2^{23} -1 со скоростью 10 Гбит/с. Измерение глаз-диаграммы проводилось на основе рекомендации МСЭ-Т G.957, согласно которой к выходу измерительного фотодиода были подключены широкополосный усилитель и соответствующий формирующий фильтр. Типичный вид глаз-диаграммы на выходе измерительного тракта при среднем токе смещения лазера около 80 мА представлен на рис. 7.

По результатам измерения параметров глаз-диаграммы на основе приведенной выше методики рассчитывались значения коэффициента ошибок Y. В численном выражении максимальное значение для партии из 10 образцов лазерных излучателей получилось $1 \cdot 10^{-12}$, минимальное значение — $6 \cdot 10^{-14}$.

Полученные данные позволяют сделать следующий вывод: качество передачи с использованием разработанного лазерного излучателя реальных высокоскоростных цифровых сигналов, несмотря на отмеченную выше неравномерность частотно-модуляционной характеристики, существенно превышает требования действующего отечественного телекоммуникационного стандарта ($Y \le 1 \cdot 10^{-10}$ согласно ОСТ 45.104—97) и удовлетворяет последним требования МСЭ-Т к качеству передачи в локальных ВОСП со скоростью до 10 Гбит/с ($Y \le 1 \cdot 10^{-12}$ согласно рекомендации G.691 (03/2006)).

Заключение

Приведенные результаты исследования параметров формы, глаз-диаграммы и коэффициента ошибок при передаче цифровых сигналов со скоростью до 10 Гбит/с показывают, что разработанные лазерные излучатели могут найти эффективное применение в современных и перспективных сверхвысокоскоростных цифровых волоконно-оптических системах телекоммуникационного назначения.

Настоящая работа выполнена в рамках программы "Развитие научного потенциала высшей школы (2009—2010 годы)" Министерства образования и науки РФ.

Автор выражает благодарность д-ру техн. наук, проф. М. Г. Васильеву за предоставление образцов лазерных излучателей для проведения испытаний.

Список литературы

1. Seeds A. J., Williams K. J. Microwave Photonics // IEEE/OSA Journal of Lightwave Technology. 2006. V. 24. N 12. P. 4628–4641.

2. **O'Mahony M. J.** et al. Future optical networks // IEEE/OSA Journal of Lightwave Technology. 2006. V. 24. N 12. P. 4684—4696. 3. Lee C.-H. et al. Fiber to the Home Using a PON Infrastructure // IEEE Journal of Lightwave Technology. 2006. V. 24. N 12. P. 4568-4583.

4. Niiho T., Nakaso M., Masuda K. et al. Transmission performance of multichannel wireless LAN system based on radioover-fiber techniques // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. 2006. MTT-54. N 2. Part 2. P. 980–989.

5. **Parker D., Zimmermann D. C.** Phased Arrays. Parts 1, 2 // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. 2002. MTT-50. N 3. P. 678–698.

6. Белкин М. Е., Васильев М. Г., Засовин Э. А. Аналитическое исследование лазерного излучателя для комбинированных систем радиолокации и связи СВЧ диапазона // Радиотехника. 2008. № 1. С. 71—77.

7. Белкин М. Е., Васильев М. Г. Полупроводниковые лазерные излучатели с высоким произведением средней мощности на полосу модуляции // Нано- и микросистемная техника. 2008. № 9. С. 23–33.

8. **Фриман Р.** Волоконно-оптические системы связи: Пер. с англ. / Под ред. Н. Н. Слепова. М.: Техносфера, 2006. — 496 с.

9. Шевцов Э. А., Белкин М. Е. Фотоприемные устройства волоконно-оптических систем передачи. М.: Радио и связь, 1992. 224 с.

10. **ITU-T** Recommendation G.691 (03/2006) Optical interfaces for single channel STM-64 and other SDH systems with optical amplifiers. -51 p.

УДК 621.3.049.776

В. Г. Спирин, канд. техн. наук, Арзамасский политехнический институт, филиал Нижегородского технического университета им. Р. Е. Алексеева, e-mail: kitres@apingtu.edu.ru

АНАЛИЗ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПОГРЕШНОСТЕЙ СОПРОТИВЛЕНИЯ ТОНКОПЛЕНОЧНОГО РЕЗИСТОРА

Рассмотрены основные виды технологических погрешностей, которые оказывают непосредственное влияние на формирование сопротивления тонкопленочного резистора.

Ключевые слова: тонкопленочный резистор, сопротивление, технологические погрешности.

Технологические (производственные) погрешности тонкопленочных резисторов (ТПР) образуются в процессе их изготовления. Основными видами этих погрешностей являются: погрешности удельного поверхностного сопротивления; погрешности длины и ширины ТПР.

Погрешность удельного поверхностного сопротивления резистивной пленки включает в себя:

- градиентную и аппаратурную погрешности;
- погрешность ориентации длины резисторов на подложке;
- погрешность, обусловленную формированием защитной изоляции;
- погрешность, обусловленную наличием микродефектов.

Градиентная погрешность (погрешность толщины пленки) [1] — параметр, определяющий невоспроизводимость сопротивления резисторов вследствие градиентов технологических параметров напыления и термостабилизации по подложке. Основные источники градиентной погрешности градиент температуры по поверхности подложки и градиент скорости нанесения резистивной пленки во время всего технологического цикла напыления. При вращении подложек на дисках или барабанах выравнивается распределение конденсата в направлении движения подложек, но сохраняется его неоднородность в перпендикулярном направлении вследствие пространственной неоднородности потока (рис. 1). Эффективное выравнивание конденсата по поверхности подложки может быть достигнуто с помощью специально спрофилированной (корректирующей) диафрагмы. Обычно направление вращения подложек на барабане совпадает с более длинной стороной подложки [2], поэтому в дальнейшем будем считать, что длинная сторона подложки ориентирована вдоль оси Х, а короткая сторона — вдоль оси У. Отсюда градиентную погрешность можно разложить на две составляющие: δρ_x и δρ_y, которые распределены соответственно по оси Х и по оси У.

В работе [3] проведены исследования градиентной погрешности. Напыление резистивного сплава PC-3710 проводилось на вращающиеся подложки ионно-плазменным методом на установке УВН-75П-1. В итоге получены примерно одинаковые результаты распределения градиентной погрешно-



сти по поверхности подложки. Средняя неравномерность удельного поверхностного сопротивления с номинальным значением 1 кОм/ \Box на ситалловых подложках составила: $\delta \rho_x = 1...3 \%$ и $\delta \rho_y = 6...7 \%$. Следует отметить, что зависимость градиентной погрешности $\delta \rho_y$ от параметра *Y* носит нелинейный характер (рис. 2).

Аппаратурная погрешность [1] — параметр, определяющий невоспроизводимость сопротивления резисторов вследствие погрешностей контрольноизмерительной и регулирующей аппаратуры и погрешностей свидетеля. Аппаратурная погрешность имеет как систематическую составляющую, так и случайную. Систематическая погрешность компенсируется подбором измерительных приборов с требуемой точностью, точными конструкциями свидетеля и подбором значения удельного поверхностного сопротивления.

Погрешность ориентации длины резисторов на подложке. В работе [3] показано, что в пределах одной подложки различие сопротивлений резисто-



ров, расположенных параллельно и перпендикулярно оси вращения барабана, составляет 4...7 %. Проведенные автором исследования для резистивного материала РС-3710 показывают, что наблюдается устойчивое различие в значениях удельного поверхностного сопротивления по осям Хи Уподложки ($\rho_x > \rho_y$). Это различие можно оценить коэффициентом анизотропии: $K_a = \rho_x / \rho_v - 1$. Для резисторов, изготовленных на ситалловых подложках ($\rho = 1000 \text{ Om}/\Box$), коэффициент анизотропии составляет 3,4...11,6 %, а для резисторов, изготовленных на поликоровых подложках ($\rho = 100, 200,$ 300, 500 Ом/□), он равен 1,1...9,8 %. Причем ярко выраженной зависимости коэффициента анизотропии от величины ρ не наблюдалось. Учитывая, что толщина пленок РС-3710 в проведенном эксперименте не превышала 20...50 нм, что сравнимо с пиками бугорков подложки, данное явление можно объяснить методами полирования подложек, разными профилями бугорков на их поверхности, а также неравномерной конденсацией и кристаллизацией резистивной пленки в двух взаимно перпендикулярных направлениях. Для исключения данного вида погрешности длины всех резисторов должны иметь одинаковые направления на плате.

Погрешность, обусловленная формированием зашитной изоляции. Обычно проверка и подгонка сопротивления резисторов проводится до нанесения защитной изоляции. После ее нанесения подложки разделяют на платы и направляют на сборку без проверки сопротивления резисторов. Как показали исследования [4, 5], после нанесения защитной изоляции из фоторезистов ФН-11, ФН-11С сопротивление нетермообработанных ТПР, изготовленных из нихрома, изменялось в пределах 0,5...3 %, ТПР а термообработанных В пределах ____ 0,5...1,5 %. Следует отметить, что после формирования защитной изоляции сопротивление ТПР с $\rho \leq 300 \text{ Ом/}\square$ возрастает, а с $\rho \geq 1000 \text{ Ом/}\square$ уменьшается. Большой уход сопротивления резисторов при нанесении фоторезистивных покрытий можно объяснить химическим взаимодействием покрытия с пленкой фоторезиста при температуре 150...180 °C, при которой происходит его задубливание, а также процессами стабилизации и кристаллизации, происходящими в резистивной пленке [5]. В работе [6] рекомендуется измерение и подгонку сопротивления ТПР проводить после нанесения защитной изоляции. Погрешность ТПР, вследствие влияния формирования защитной изоляции, можно отнести к погрешностям удельного поверхностного сопротивления резистивной пленки.

Погрешности, обусловленные наличием микродефектов, образуются в результате влияния на воспроизводимость сопротивления ТПР следующих факторов: шероховатости подложки [7] и запыленности производственных помещений [1].

Шероховатость подложки оказывает влияние на точность воспроизведения сопротивления ТПР в связи с тем, что толщина резистивной пленки для нашего случая сравнима с пиками микробугорков, которые расположены на подложке случайным образом, в результате чего происходит изменение формы резисторов вследствие "проколов" микробугорками резистивной пленки. Так как размеры резистора, как правило, существенно больше размеров дефекта, то попадание дефекта в рабочую область обычно не приводит к полному отказу резистора, а лишь несколько изменяет его сопротивление. Дефект в резистивной пленке вызывает нарушение равномерности тока по ее сечению и увеличивает сопротивление в области дефекта. На некотором расстоянии от дефекта ток по сечению пленки распределен равномерно.

Влияние запыленности производственных помещений. В связи с микронными размерами элементов и зазоров между ними присутствие в воздушной среде механических частиц может существенно ухудшать качество и снижать процент выхода годных изделий [8]. Механические частицы могут приводить к разрывам проводящих дорожек, коротким замыканиям элементов, образованию сквозных пор, проколов в фоторезисте.

Погрешности формирования длины и ширины резистора включают в себя: погрешности изготовления фотошаблонов и погрешности вследствие процессов фотолитографии [9]. На воспроизводимость элементов микросборок (МСБ) самое непосредственное влияние оказывает инструмент, с помощью которого получают требуемый рисунок платы фотошаблоны (ФШ). В зависимости от материала пленочного покрытия различают ФШ на основе фотографической эмульсии (эмульсионные ФШ), металлической пленки, например пленки хрома (металлические ФШ) и других материалов, например оксида железа (цветные ФШ). В многономенклатурном производстве МСБ наибольшее распространение получили эмульсионные ФШ, так как они имеют наименьшую стоимость изготовления. Однако их точность несколько хуже, чем металлических или цветных ФШ. Кроме того, они имеют повышенную дефектность. Классы точности ФШ в зависимости от значений допусков на элементы и их кодовые обозначения приведены в работе [10].

На погрешность сопротивления ТПР в основном влияют два параметра ФШ: погрешность топологического размера и четкость края. Четкость края определяет результат визуального положения неравномерности и размытости края топологического элемента. В области нечеткого края при фотолитографии МСБ не всегда проявляется фоторезист, что увеличивает топологический размер МСБ. Еще одной погрешностью ФШ является погрешность несовмещения комплекта ФШ, которая, при исключении в конструкции ТПР КПП резистивного и проводящего слоев, увеличивает сопротивление ТПР.

Лучшие оптические микроскопы имеют погрешность визуальных измерений 0,3...0,6 мкм [11], что в принципе достаточно для измерения размеров топологических элементов с допусками, указанными в работе [10]. Однако далеко не все предприятия-изготовители МСБ имеют подобное дорогостоящее оборудование. На практике иногда применяют микроскопы (например УЦП-1М) с погрешностью в 3 мкм, что не обеспечивает требуемой точности измерения. Поэтому для измерения малых размеров топологических элементов технологи используют микроинтерферометр МИИ-4, который обеспечивает измерение линейных размеров с погрешностью не хуже 0,15 мкм. Погрешности линейных размеров элементов ФШ следует рассматривать как систематические, так как погрешность линейных размеров элементов МСБ определяется исходной точностью рисунка на ФШ.

Точность размеров элементов микросхем зависит главным образом от качества и стабильности процессов фотолитографии и влажного травления. Практика свидетельствует, что в процессе изготовления МСБ не удается получить полностью воспроизводимые размеры однотипных элементов даже в том случае, если партия подложек подвергалась фотолитографической обработке и травлению на одном и том же оборудовании, одним и тем же персоналом, с применением одних и тех же материалов. Существует большое число факторов, определяющих погрешности размеров элементов. Основные погрешности возникают из-за таких причин: засветки фоторезиста под элементами ФШ вследствие явления дифракции и отражения света от подложки, а также за счет рассеяния света на неоднородностях фоторезиста; переэкспонирования и перепроявления фоторезиста; нарушения адгезии фоторезиста к поверхности пленки; большого зазора между ФШ и фоторезистом на подложке, который определяется валиком фоторезиста, образующегося по краю прямоугольной подложки; неплоскостностью ФШ и подложки, а также частицами пыли, попавшими между ФШ и подложкой; подтравливания пленки вследствие изотропности ее травления [12].

Для получения рисунка МСБ применяют, как правило, позитивные фоторезисты. Увеличение зазора между ФШ и подложкой увеличивает размер засветки фоторезиста на границе элемента ФШ. Засветка фоторезиста приводит к его разрушению при проявлении, а следовательно, к уменьшению размеров элементов фоторезистивной маски. Размер изображения в позитивных фоторезистах сильно зависит от сочетания времен экспонирования и проявления. Переэкспонирование и перепроявление фоторезиста еще более уменьшает размеры элементов. Размер подтравливаемого участка пленки зависит от качества фоторезиста, его адгезии к поверхности пленки, от свойств материала, подвергающегося травлению, и свойств используе-



Рис. 3. Профили фоторезиста и тонких пленок после фотолитографии и травления

мого травителя. Следует иметь в виду, что сильные химические травители, такие, например, как фтористоводородная кислота, применяемая при травлении керметов, резистивных сплавов, частично разрушают и фоторезистивную маску. Это приводит к неконтролируемому изменению площади травления и еще большему снижению точности конфигурации элементов МСБ. Профили фоторезиста и тонких пленок, получаемых в процессе фотолитографии и травления, показаны на рис. 3, где $\Delta I_{\phi nc}$ — систематическая погрешность размера топологического элемента. Систематическая погрешность, вследствие рассмотренных выше физических явлений, приводит к уменьшению размеров тонкопленочных элементов МСБ.

Выводы

Рассмотрены основные виды погрешностей и их влияние на формирование сопротивления ТПР. Показано, что основными видами погрешностей являются погрешности формирования удельного поверхностного сопротивления, в частности, градиентная погрешность и погрешность формирования рисунка ТПР при фотолитографии и травлении.

Список литературы

1. Гимпельсон В. Д., Радионов Ю. А. Тонкопленочные микросхемы для приборостроения и вычислительной техники. М.: Машиностроение, 1976. 328 с.

2. Парфенов О. Д. Технология микросхем. М.: Высшая школа, 1986. 320 с.

3. Клименко Б. И., Сидорова И. А. Совершенствование технологии изготовления тонкопленочных резисторов из сплава PC-3710 // Технология авиационного приборо- и агрегатостроения. Производственно-технический сборник. 1987. Вып. 3—4. С. 36—38.

4. Баранова Н. В., Кротова Ю. В., Сенишин Я. М., Смеркло Л. М. Влияние защитной маски из фоторезиста ФН-11С на стабильность тонкопленочных резисторов // Обмен производственно-техническим опытом. 1989. Вып. 8. С. 21–22.

5. Волкова И. А., Клокова О. А., Папенко Л. А., Сенишин Я. М. Влияние защитных покрытий на стабильность тонкопленочных резисторов из нихрома // Обмен опытом в радиопромышленности. 1983. Вып. 2. С. 40—41.

6. Крючатов В. И., Антипова Р. И., Валеев М. З., Конов Ю. П. Подгонка тонкопленочных резисторов, защищенных фоторезистивным слоем // Обмен производственно-техническим опытом. 1988. Вып. 9. С. 23—24.

7. Фомин А. В., Боченков Ю. И., Сорокопуд В. А. Технология, надежность и автоматизация производства БГИС и микросборок. М.: Радио и связь, 1981. — 352 с.

8. **Коледов Л. А.** Технология и конструкции микросхем, микропроцессоров и микросборок. М.: Радио и связь, 1989. 400 с.

9. Моро У. Микролитография. М.: Мир, 1990. Т. 1, 2. 1240 с.

10. **ОСТ** 4 ГО.073.210—84. Фотошаблоны прецизионные. Общие технические условия.

11. Быстров Ю. А., Колгин Е. А., Котлецов Б. Н. Технологический контроль размеров в микроэлектронном производстве. М.: Радио и связь, 1988. 168 с.

12. Шумилин А. С. Точностные расчеты в микроэлектронике. Л.: Изд-во Ленинградского университета, 1980. 140 с.

Молекурярная электроника и биоэлектроника

УДК 53.084.2

А. С. Ерофеев, науч. сотр., e-mail: erofeev@polly.phys.msu.ru **И. В. Яминский,** д-р физ.-мат. наук, проф., директор, e-mail: yaminsky@nanoscopy.org ООО "Академия биосенсоров"

КАНТИЛЕВЕРНЫЕ БИОХИМИЧЕСКИЕ АНАЛИЗАТОРЫ

Своевременное определение сверхмалого количества вещества очень важно при раннем обнаружении первых симптомов ядовитых химических веществ в общественных местах, при определении степени загрязненности реагентами питьевой воды. Биохимические анализаторы, основанные на микромеханических кантилеверных системах, могут определять предельно малые концентрации веществ и позволяют регистрировать присоединенную массу с точностью менее чем один аттограмм $(10^{-18} г)$.

Ключевые слова: атомно-силовая микроскопия, биохимический анализатор, кантилевер, поверхностное натяжение.

Введение

После появления биохимических анализаторов, основанных на микромеханических кантилеверных системах, нанотехнологии смогли поспорить с природой в силе обоняния. Непревзойденный лидер, представленный природой в этом качестве, — собака. Обонятельный порог собаки к такому пахучему веществу, как масляная кислота, составляет 10⁴ молекул/мл [1]. Современные микромеханические кантилеверные сенсоры сравнялись с природой в этом показателе и даже обошли ее по некоторым параметрам обоняния. Такие биохимические анализаторы могут оперативно определять утечку газов, проводить раннее обнаружение первых симптомов ядовитых химических веществ в общественных местах [2, 3], определять степень загрязненности реагентами питьевой воды [4]. А также они могут применяться в медицине — в прикроватной онлайн-диагностике (непрерывном мониторинге) пациентов [5].

Кантилеверы

Исторически кантилеверы были созданы для атомно-силового микроскопа, и только через несколько лет впервые использованы в качестве биохимического анализатора. В атомно-силовой микроскопии кантилеверы использовались как высокочувствительные датчики сил между иглой микроскопа и поверхностью образца [6]. Кантилеверы, используемые в биохимических анализаторах, также высокочувствительны к силам и массам прилипающих к ним молекул.

Микромеханические кантилеверы представляют собой микроконсоли, длина которых не превышает нескольких сотен микрометров, а типичная ширина не превышает 40 мкм. Благодаря своей толщине — 1...10 мкм, что составляет около 1/10 человеческого волоса, кантилевер может гнуться при воздействии предельно малых сил (рис. 1). Сейчас технологии позволяют фиксировать отклонение до 10^{-3} нм, что превращает кантилеверы



Рис. 1. Изображение кантилевера, полученное на электронном просвечивающем микроскопе

в высокочувствительные силовые и массовые сенсоры (рис. 2, см. третью сторону обложки).

Сама идея создания прибора для регистрации сверхмалого количества вещества в газах и жидкостях на базе технологий зондовой микроскопии появилась на свет еще в 90-х годах прошлого века на родине атомно-силового микроскопа, в Швейцарии, в лаборатории Цюрихского подразделения корпорации IBM [7], но свое воплощение она получила только в XXI веке.

Физические принципы биохимического анализатора

У кантилеверных анализаторов существуют два основных принципа детектирования химических или биологических объектов: первый принцип основан на изменении параметров (частоты, фазы или амплитуды) собственных колебаний кантилевера; второй принцип — на регистрации статического отклонения консоли. Если на кантилевер садится микро- или наночастица, то происходит изменение параметров собственных колебаний кантилевера. Такая система позволяет регистрировать присоединенную массу с точностью менее чем один аттограмм (10^{-18} г) [8]. Если изначально на консоли была закреплена микро- или наночастица сорбента, то появляется возможность изучения кинетики сорбции газов этой частицей.

Такой способ может быть использован для обнаружения в воздухе различных газовых примесей и паров жидкостей. Этот метод можно использовать в жидких средах, однако его чувствительность в этом случае значительно падает, поскольку жидкая среда существенно демпфирует колебания кантилевера. Однако для измерений в жидкости можно использовать второй способ регистрацию статического отклонения кантилевера. Для этого метода используют кантилевер, противоположные стороны которого имеют поверхности, выполненные из разных материалов. Например, можно изготовить кремниевый кантилевер и одну из его сторон покрыть пленкой золота. Осаждение пленки вещества на одну из сторон кантилевера может приводить к его изгибу за счет изменения поверхностного натяжения на одной из сторон кантилевера [9]. Значение изгиба кантилевера прецизионно определяется либо с помощью лазерно-оптической системы, либо с помощью пьезорезистивной или пьезоэлектрической измерительной системы.

Отличительная особенность микромеханических кантилеверных сенсоров — устойчивость к актам неспецифического связывания [10], благодаря низким энергиям неспецифических связей и, следовательно, их незначительному вкладу в поверхностное натяжение рецепторной пленки. В этом параметре современные биохимические анализаторы превзошли природу. Обонятельные возможности собаки не позволяют ей определять разницу между этиловым и метиловым спиртом, что могут делать микромеханические кантилеверные сенсоры.

Технические характеристики

Следует отметить, что ни одна из компаний производителей кантилеверных биохимических анализаторов не дает четких технических характеристик производимого ими прибора в открытой информации, что вполне объяснимо. Можно выделить две основные характеристики таких приборов: предел обнаружения концентрации вещества и предел взвешиваемой массы. Обе характеристики зависят от исследуемого вещества, используемых кантилеверов и от внешних условий, которым подвержен прибор.

Обзор кантилеверных биохимических анализаторов

На современном международном рынке биохимических анализаторов, основанных на микромеханических кантилеверных системах, можно выделить четыре лидирующие компании — по одной из Швейцарии, Дании, Кореи и России.

Швейцарская компания Concentris (www.concentris.com) была основана в 2000 г. и является последователем родоначальника микромеханических кантилеверных систем — компании *IBM. Concentris* производит биохимический анализатор *Cantisens* (рис. 3, см. третью сторону обложки).

Этот прибор может работать в двух режимах в режиме сдвига параметров собственных колебаний кантилеверов и в режиме регистрации статической деформации кантилеверов. Компании *Concentris* использует свой запатентованный метод для детектирования веществ, основанный на многолазерной оптической системе [11]. Благодаря своей системе детектирования их прибор *Cantisens* (рис. 3, см. третью сторону обложки) может определять одновременно до восьми веществ или биомолекулярных взаимодействий. Цена на биохимический анализатор, представленный компанией *Concentris*, рекордно высока около 100 тыс. евро.

Еще одна европейская компания, преуспевшая в области микромеханических кантилеверных сенсоров, — это компания из Дании *Cantion* (www.cantion.com). Она продает две модификации биохимического анализатора *CantilabPro* (для промышленных целей) и *Cantilab3D* (для научно-образовательных целей).

Для работы их прибора необходимо устройство *Cantichip8*, включающее восемь кантилеверов с встроенной электронной системой считывания. Это устройство для детектирования основано на

пьезорезистивной измерительной системе, которая запатентована компанией *Cantion* [12].

В России существует только одна компания, которая занимается разработкой биохимических анализаторов, основанных на микромеханических кантилеверных системах, — это московская компания Академия биосенсоров (www.biosensoracademy.com), которая была основана в 2004 г. Продукт, производимый отечественной компанией, —биохимический анализатор Атомные весыбиоскан (рис. 4, см. третью сторону обложки).

Способ детектирования этого прибора основан на лазерно-оптической системе. Она уникальна тем, что в ней используется только один линейчатый лазер, что уменьшает уровень шумов электроники, а также позволяет использовать кантилеверные массивы с произвольным расстоянием между кантилеверами. Прибор имеет рекордно низкую цену на рынке биохимических анализаторов — менее 30 тыс. евро.

Корея, как одна из лидирующих стран в гонке нанотехнологий, представляет на мировом рынке свою микромеханическую кантилеверную сенсорную систему, которую производит *Intelligent Microsystem Center* (www.microsystem.re.kr), основанный в 2000 г.

Корейский биохимический анализатор имеет запатентованную систему детектирования [13], которая может поддерживать температуру в диапазоне от 10 до 60 °C и влажность от 10 до 90 %. Регистрация вещества осуществляется за счет сдвига резонансной частоты кантилеверов, который фиксируется пьезоэлектрической измерительной системой. Конечной целью корейских разработчиков является создание наручной диагностической лаборатории, на основе микромеханического кантилеверного сенсора. Размеры такого прибора должны быть соизмеримы с размерами наручных часов, что на данный момент кажется достижимой задачей.

Заключение

В мае 2008 г. в Германии была проведена Международная конференция "Наномеханические кантилеверные сенсоры" [14]. Число участников, планируемое организаторами, превысило ожидаемую цифру больше чем в 1,5 раза. Очередной факт, доказывающий, что биохимические анализаторы на основе микромеханической кантилеверной системы — это еще молодое, бурно развивающееся научное направление, которое внесет свой вклад во многие сферы жизни.

Работа проведена при поддержке программы "НАТО. Наука для мира" по проекту НАТО CBR. NR. NRSFPP № 983204 — "Сенсоры для химической и биологической защиты с возможностью удаленного контроля".

Список литературы

1. **Бронштейн А.** А. Обонятельные рецепторы позвоночных. Л.: Наука, 1977.

2. Lang H. P., Baller M. K., Berger R. et al. An artificial nose based on a micromechanical cantilever array // Analytica Chimica Acta. 1999. Vol. 393. P. 59–65.

3. Mertens J., Finot E., Nadal M.-H. et al. Detection of Gas Trace of Hydrofluoric Acid Using Microcantilever // Sensors and Actuators B: Chemical. April 2004. Vol. 99. P. 58–65.

4. **Pinnaduwage L. A., Boiadjiev V. I., Brown G. M.** et al. Detection of Hexavalent Chromium in Ground Water Using a Single Microcantilever Sensor // Sensor Letters. 2004. Vol. 2. P. 25–30.

5. Lavrik N. V., Tipple C. A., Sepaniak M. J. et al. Gold Nano-Structures for Transduction of Biomolecular Interactions into Micrometer Scale Movements // Biomedical Microdevices. March 2001. Vol. 3. N 1. P. 35–44.

6. Binnig G., Quate C. F., Gerber Ch. Atomic Force Microscope. // Physical Review Letters. 1986. Vol. 56. P. 930-933.

7. Патент WO 95/02180, 1995, класс G01N25/36: Calorimetric Sensor.

8. Li Mo, Tang H. X., Roukes M. L. Ultra-sensitive NEMS-based Cantilevers for Sensing, Scanned Probe and Very High-frequency Applications // Nature Nanotechnology. February 2007. P. 114–120.

9. Yaminsky I., Gorelkin P., Kiselev G. Concurrence of Intermolecular Forces in Monolayers // Japanese Journal of Applied Physics. 2006. Vol. 45. N 3B. P. 2316–2318.

10. **Braun T., Ghatkesar Krishna M., Backmann N.** et al. Nanomechanical Biosensors for Membrane Proteins // Proc. of International Conference on Nanoscience and Technology 2006. Swisserland, Basel. — 2006.

11. Патент EP 1 342 789 A2, 2003, класс C12Q1/02: Cantilever Apparatus and Method for Detecting Microorganisms.

12. Патент WO 2004/083802 A2, 2004, класс G01N: A Cantilever Array Chemical Sensor.

13. Патент WO 2006/031072 A2, 2006, класс GO IN 29/12: Method and System for Detecting Bio-Element.

14. **Max Planck** Institute for Polymer Research: Book of Abstracts // International Workshop on Nanomechanical Cantilever Sensors. Germany, Main. — May 2008.

Човости нанои микросистемной техники

Усиление защиты спутников с использованием нанотехнологии

В статье, опубликованной в Центре стратегии и технологии ВВС США, исследуется угроза для спутников, вызванная оружием направленной энергии земного базирования, и состояние исследований и разработок в области нанотехнологии, направленных на ослаблении этой угрозы. Особое внимание уделяется лазерному и высокомощному СВЧ излучениям с точки зрения воздействия на спутники.

Лазеры наземного базирования могут повредить систему теплового контроля, структурные компоненты и компоненты системы питания. Лазеры генерируют и фокусируют интенсивные лучи света, которые могут войти в контакт с целью с большого расстояния. Маломощные лазеры обычно предназначены для ввода в заблуждение или подавления спутниковых электрооптических датчиков, приводя к временному ослеплению спутника. Высокомощные лазеры могут вызывать повреждение или разрушение перегретых частей спутника. Наиболее чувствительными являются структура спутника, система теплового контроля и солнечные панели.

Высокомощные СВЧ системы наземного базирования дальнего действия в некоторых случаях могут быть использованы в качестве противоспутникового оружия. Интенсивное СВЧ излучение от высокомощного источника может вывести из строя или разрушить чувствительные электронные компоненты. В высокомощном излучении используются мягкие механизмы для повреждения спутников, с учетом свойственной спутникам уязвимости, а не жесткие механизмы, такие как расплавление или разрушение. Мягкий механизм повреждения может иметь место в двух вариантах: внутриполосное повреждение и внеполосное повреждение. СВЧ излучение на частоте антенны достигает ее и повреждает внутренние схемы за счет их перегрузки. Внеполосное повреждение имеет место, когда СВЧ излучение проходит через запасной выход или отверстия, не сконструированные специально для прохождения электромагнитной энергии. Электромагнитным способом индуцированный ток приводит к тепловому разрушению. Приводятся страны, которые обладают такими возможностями, и чего можно ожидать к 2025 г. Обсуждается роль орбиты в степени уязвимости спутника. Рассматриваются также подсистемы спутника общего назначения и оружие направленной энергии, которое может повредить указанные подсистемы. Приведено несколько решений

использования нанотехнологии для ослабления воздействия оружия направленной энергии:

- покрытия для упрочнения поверхности космического корабля и обеспечения лучшего противостояния тепловому и электромагнитному воздействиям. Наноструктурированное поверхностное покрытие будет или отражать, абсорбировать, или передавать падающую энергию, или выполнять комбинацию из указанных трех процессов;
- защиту также может обеспечить диспергирование. Лаборатория ВВС США в настоящее время управляет исследовательской программой, в которой для электромагнитного экранирования и усиления горизонтальной теплопроводности используются мембраны на углеродных нанотрубках;
- матрицы вертикально совмещенных углеродных нанотрубок исследуются для использования в качестве теплоотводов компьютерных схем, они также могут быть размещены под отражающим покрытием на поверхности спутника для улучшенного теплового рассеивания;
- пока чисто теоретически рассматривается вопрос создания "леса" из углеродных нанотрубок, который при небольшом напряжении и низком давлении будет излучать электроны.
 Эти электроны ионизируют атмосферу, генерируя плазменный экран вокруг структуры, если случайная электромагнитная энергия имеет короткую длительность, плазма погасит большую часть энергии.

Лаборатория BBC совместно с университетом Дэйтона осуществляет разработку метода управления теплопроводностью полимерных материалов, используемых для изготовления как промышленных, так и военных авиакосмических компонентов. В рамках проекта практически любой полимер преобразуется в многофункциональный материал, способный нести и рассеивать значительный электрический заряд. Специально сконструированные нанотрубки (диаметром 50...150 нм) с токовыми несущими, присущими меди, но при гораздо меньшей плотности, тщательно рассредоточивались в полимерной матрице, приводя к созданию электропроводящих полимерных композитов.

Рассматриваются различия наноматериалов, полученных из материалов с микро- и макроразмерами. Приводятся подробные характеристики различных материалов и даны объяснения, каким образом исследования и разработки в области нанотехнологии могут быть использованы для спутниковых подсистем. Например, поверхностные покрытия могут быть использованы для улучшения теплового контроля и электропроводности спутника, а наноматериалы — для улучшения радиационной стойкости спутниковых микропроцессоров и других структур.

Предсказывается, что к 2025 г. нанотехнология окажет значительное воздействие на спутники США, касаясь структуры и функций всех спутников в плане использования микропроцессоров с повышенной радиационной стойкостью, усовершенствованных поверхностных покрытий и уменьшения массогабаритных показателей спутников. Структурные усовершенствования, извлекаемые от использования макроразмерных наноструктур, по всей вероятности будут достигнуты, по крайней мере, через 10—15 лет.

Huntington J. Improving Satellite Protection with Nanotechnology.

http://oai.dtic.mil/oai/oai?&verb=getRecord&metadataPrefix =html&identifier = AD A474825 — Shields up! How nanotechnology can protect satellites from energy weapon. www.nanowerk.com/spotlight/spotid = 8308.php

Ученые разработали микросенсоры, применяемые во время химиотерапии

Инженеры из Массачусетского института технологий разработали микросенсоры, состоящие из углеродных нанотрубок. Микросенсоры имеют своей целью защиту ДНК в клетках организмов людей, больных раком. Разработчики говорят, что большинство препаратов, принимаемых во время химиотерапии, обладают активными агентами, которые разрушают раковые клетки, однако вместе с ними убивают и здоровые.

Микросенсоры способны обнаруживать наличие антираковых препаратов, таких как циспластин, некоторых видов токсинов и других агентов, имеющих свободные радикалы, повреждающие структуру ДНК.

"Мы создали сенсор, который можно поместить внутрь живой клетки — здоровой или пораженной — и обнаруживать несколько разных классов молекул, повреждающих ДНК", — рассказывает Майкл Страно, один из авторов исследования, результаты которого были опубликованы в журнале *Nature Nanotechnology*.

Ученые говорят, что подобные сенсоры можно применять для мониторинга состояния пациентов, прошедших курс химиотерапии, для того чтобы лечащие врачи могли убедиться в эффективности проведенного лечения, а также определить степень поражения здоровых клеток. "Многие химиотерапевтические препараты обладают массой побочных эффектов, поэтому очень важно убедиться, что они все-таки достигли тех целей, ради которых их принимали", — говорят разработчики микросенсоров. С научной точки зрения сенсор может обнаруживать ДНК-алкилирующие агенты класса препаратов, окисляющих среду. Сюда входят циспластин, перекись водорода и гидроксильные радикалы.

Источник: http://www.cybersecurity.ru/it/61083.html

Графеновые наноленточные туннельные транзисторы

Рассмотрен и смоделирован аналитически графеновый наноленточный (GNR) полевой транзистор (TFET). Ширина лент от 3 до 10 нм для энергетической зоны в диапазоне от 0,46 до 0,14 эВ. Показано, что TFET с шириной ленты 5 нм может осуществлять переключение с перепадом напряжения на затворе 0,1В. Транзистор обеспечивает ток в открытом состоянии 800 мА, в закрытом состоянии 26 пА, эффективный допороговый перепад 0,19 мВ/дек. По сравнению с проектируемым в 2009 г. *п*-МОП полевым транзистором GNR ТFET может обеспечить пятикратное преимущество по быстродействию, двадцатикратное улучшение по снижению динамической мощности, снижение рассеиваемой мощности в закрытом состоянии в 280 000 раз.

Разработка самого быстродействующего в мире графенового транзистора

Специалисты Исследовательского центра Тhomas J. Watson фирмы IBM объявили о разработке самого быстродействующего графенового полевого транзистора, работающего на частоте 26 ГГц. Транзисторы с верхним расположением затвора были изготовлены на пластинах со структурой кремний-на-изоляторе. Длина затвора транзистора составляет 150 нм, но поскольку пиковая частота увеличивается с уменьшением затвора, предполагается в будущем создание терагерцовых транзисторов с уменьшением длины затвора до ~50 нм. В отличие от углеродных нанотрубок, которые трудно подвергаются обработке, графеновые транзисторы получаются посредством осаждения атомов углерода в виде тонкой пленки, а рисунок может формироваться с использованием обычного литографического оборудования. Была продемонстрирована техника послойного осажде-

ния, которая решает проблемы помех, связанных с использованием узких лент графена как транзисторных каналов. В ходе работы были сняты высокочастотные характеристики при различных затворных напряжениях и длинах затвора. Результаты показали, что ток усиления графеновых транзисторов следует за традиционным уменьшением амплитудно-частотной характеристики с увеличением частоты. Ведется работа по совершенствованию затворного диэлектрического материала с тем, чтобы продемонстрировать ВЧ схемы, работающие в терагерцовом диапазоне. Работу частично финансировала DARPA в рамках программы по использованию углеродной электроники для ВЧ применений. Перед программой поставлена задача создания техники связи миллиметрового диапазона с конечной целью демонстрации малошумящего усилителя W-диапазона, работающего на частоте 100 ГГц или выше, с использованием графеновых тонкопленочных транзисторов, изготовленных на пластинах диаметром 200 мм или более.

Johnson R. C. IBM claims fastest graphene transistor. www.eetimes.com/showArticle.jhtml?articleID = 212501276

Defree S. IBM claims grapheme field-effects transistors at GHz frequencies // Electronic News. 12/19/2008.

Конструирование, изготовление и характеристики быстродействующего кремниевого нанопроволочного транзистора

Сообщается об изготовлении кремниевых нанопроволочных полевых транзисторов с двойным затвором, имеющих превосходные вольт-амперные характеристики, низкую допороговую характеристику, высокое значение отношения токов on/off. Кремниевые нанопроволочные приборы были изготовлены с использованием самосовмещенной технологии со стандартным фотолитографическим совмещением и обратной литографией металла, обеспечивающими высокую степень интеграции. Были также исследованы влияние структуры прибора и быстрого термического отжига на электрические характеристики нанопроволочного транзистора. Сделан вывод, что самосовмещенная технология и структура исток/сток с неперекрывающимся затвором, совмещенные с соответствующим пост-отжигом приводят к превосходным характеристикам прибора.

Zhang Q. et al. Graphene Nanoribbon Tunnel Transistors // IEEE Electronic Device Letters. Dec. 2008. Vol. 29. Is. 12. P. 1344—1346.

Quiliang L. et al. Design, Fabrication and Characterization of High-Performance Silicon Nanowire Transistory // 8th IEEE Conference on Nanotechnology. 18–21 Aug. 2008, on pages: 526–529.

Сотовые нейронные сети на базе СМОL-структур и параллельного процессора для будушей обработки изображений

Гибридные КМОП/молекулярные CMOL-схемы имеют перспективы для создания высокопроизводительных СБИС. Недавно были предложены схемы для обработки изображений на базе цифровых схем и схем CMOL для смешанной обработки сигнала. В данной статье приводится описание аналоговой сотовой нейронной сети (CNN) на базе CMOL, которая отличается высоким быстродействием и хорошими технологическими допусками. Параллельный процессор имеет высокое быстродействие и легкую конфигурируемость.

Монолитная интеграция КМОП СБИС и углеродных нанотрубок для гибридных применений нанотехнологии

В указанной интеграции были использованы достоинства КМОП-технологии и технологии изготовления углеродных нанотрубок (СNТ). Возникающие применения включают оптические, биологические и химические СNT датчики, которые требуют использования сложных КМОП-схем для контроля и калибровки датчиков и обработки сигнала. Успешная интеграция была продемонстрирована на тестовой схеме на кристалле, состоящей из двухтранзисторного мегагерцового каскодного усилителя с использованием как кремниевого *n*-канального полевого МОП-транзистора и СNT-транзисторов с общей потребляемой мощностью.

Конструирование модулей для цифровой обработки сигнала с использованием элементов наноэлектроники

Представлен новый подход к использованию нанопроволок с поперечной структурой (NW

crossbars) для цифровой обработки сигнала. Посредством использования распределенной арифметики (DA) сложные задачи обработки сигнала могут быть преобразованы в обычные операции памяти. Таким образом, такая архитектура хорошо согласуется с технологическими характеристиками нанопроволок с поперечной структурой. Характеристики предлагаемого подхода были продемонстрированы через КИХ-фильтр. Результаты моделирования показали, что наноЦОС модули на базе DA могут допустить избыточные помехи с незначительным ухудшением характеристик в диапазоне дефектообразования и рабочих условий.

Weiguo T., Lei W. Design of Digital Signal Processing Modules with Nanoelectronics // Proc. of 8th IEEE Conference on Nanotechnology. 18–21 Aug. 2008. P. 741–744.

Радиационно-стойкие кремниевые нанопроволочные полевые транзисторы

Изготовлены транзисторы на основе кремниевых нанопроволок и проверены на радиационную стойкость посредством воздействия излучения рентгеновских лучей Соб0 с дозой в 50...250 крад. Незначительное ухудшение характеристик транзистора наблюдалось при 250 крад. Результаты подтвердили радиационную стойкость, свойственную нанопроволочным приборам.

Tsakalakos L. et al. Radiation Hard Silicon Nanowire Field Effect Transistors // Proc. of 8th IEEE Conference on Nanotechnology. 18–21 Aug. 2008. P. 582–583.

Сравнение вольт-амперных характеристик полевых транзисторов из углеродных нанотрубок и нанопроволок

Вольт-амперные характеристики вблизи стока коаксиального нанопроволочного полевого транзистора и полевого транзистора с использованием углеродных нанотрубок были получены посредством использования метода, основанного на ВКБаппроксимации и баллистическом транспорте. Были сравнены смоделированные ВАХ указанных транзисторов. Показано, что отношение *Ion/Ioff* нанопроволочного полевого транзистора выше, чем у полевого транзистора с использованием углеродной нанотрубки. Кроме того, было показано, что полевой транзистор на углеродной на-

Wancheng Zh., Wu N.-J. CMOL — Based Cellular Neural Networks and Parallel Processor for Future Image Prrocessing // 8th IEEE Conference on Nanotechnology. 18—21 Aug. 2008. P. 737—740.

Akinwande D. et al. Monolithic Integration of CMOS VLSI and Carbon Nanotubes for Hybrid Nanotechnology Application // Proc. of 8th IEEE Conference on Nanotechnology. 18–21 Aug. 2008. P. 636–639.

нотрубке обеспечивает более высокое значение тока включения в зависимости от его структуры и параметров. Представленные результаты могут быть использованы для понимания основных характеристик нанотранзистора для применения их в конструкциях специализированных СБИС и других специализированных применениях.

Kargar A. Comparison of Current-Voltage Characteristics of Carbon Nanotube and Nanowire FETs // Proc. of 8th IEEE Conference on Nanotechnology. 18–21 Aug. 2008. P. 592–594.

Интеграция ВЧ-КМОП резонаторов с субмикронной промышленной КМОП-технологией

Обсуждается интеграция электростатически возбуждаемых и преобразуемых на емкостной основе МЕМЅ-резонаторов с промышленной КМОП-технологией. Определены критерии для исследования характеристик различных структурных слоев и различных технологий. Были изготовлены ВЧ и СВЧ МЕМЅ металлические резонаторы с применением промышленной 0,18 мкм КМОП-технологии и сняты их характеристики с помощью электрических тестов, без усилия, демонстрируя применимость технологического MEMS-процесса для будущих технологий. Кроме того, изготовленные приборы имеют сравнимые характеристики в значениях Q × fres с представленными ранее MEMS-резонаторами, когда малый зазор позволяет получить низкое внесенное сопротивление в конструкции с одним резонатором.

Lopez J. L. et al. Integration of RF-MEMS resonators on submicrometric commercial CMOS technologies // Journal of Micromechanics and Microengineering. January 2009. I. 1.

Конструкция и масштабирование ячейки наноэлектромеханической энергонезависимой памяти

Выполнено исследование посредством аналитического моделирования и моделирования с помощью метода конечных элементов (FEA) конст-

рукции ячейки наноэлектромеханической памяти (NEMory). Пропорциональное масштабирование всех размеров ячейки обеспечивает улучшенную плотность хранения, наряду с низкими значениями рабочего напряжения и малым временем программирования и стирания. По результатам FEAмоделирования ожидается, что ячейка NEMory с алюминиевым кантилевером длиной 75 нм будет иметь время стирания и программирования в субнаносекундном диапазоне при напряжении менее 1 В. Ввиду практических пределов масштабирования балки и ширины воздушного зазора трудно обеспечить низковольтную работу при использовании очень коротких балок (около 50 нм), пока используется материал балки с низкими значениями модуля Юнга. Напряжение на излом определяет фундаментальный предел при масштабировании длины балки. Таким образом, для расширения масштабируемости NEMory желателен материал балки с высокими значениями напряжений на излом.

Choi W. Y. et al. Nan—Electro-Mechanical Nonvolatile Memory (NEMory) Cell Design and Scaling // IEEE Transactions on Electron Devices. Dec. 2008. Vol. 55. Is. 12. P. 3482—3488.

ВЧ MEMS-переключатель на базе контакта с барьером Шоттки

Приводится описание конструкции, изготовление и результаты измерений нового BЧ MEMSпереключателя на основе контакта с барьером Шоттки. Этот контакт обеспечивает работу BЧ MEMS-переключателя в традиционном емкостном режиме не только при обратном смещении, но и проводит ток в состоянии прямого смещения. При прямом смещении в переключателе осуществляется рекомбинация захваченных зарядов, тем самым увеличивая срок его службы. Технология MEMS связана с твердотельной электроникой и обеспечивает уникальные характеристики BЧ прибора.

Pillans B. et al. Schottky Barrier Contact-Based RF MEMS Switch // Journal of Microelectromechanical Systems. Dec. 2008. Vol. 17. Is. 6. P. 1439–1446.

Составил В. А. Юдинцев

СОВЕЩАНИЕ РЕКТОРОВ И РУКОВОДИТЕЛЕЙ НОЦ ВУЗОВ ПО НАНОТЕХНОЛОГИИ (по тематическим направлениям ФЦП "Развитие инфраструктуры наноиндустрии в Российской Федерации на 2008—2010 годы")

П. П. Мальцев, д-р техн. наук, проф., МИРЭА, e-mail: P. Malcev@tcen.ru

В период с 9 по 11 июня 2009 года на базе Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ" проведены второе Совещание ректоров и руководителей НОЦ вузов по тематическим направлениям ФЦП "Развитие инфраструктуры наноиндустрии в Российской Федерации на 2008—2010 годы" и заседание Учебно-методического совета (УМС) по направлению "Нанотехнологии" УМО по образованию в области радиотехники, электроники, биомедицинской техники и автоматизации.

В работе совещания приняло участие более 130 представителей ведущих научно-педагогических школ, ректоров и руководителей НОЦ из 37 вузов России. Были представлены организации Министерства образования и науки РФ, Министерства промышленности и торговли РФ, РАН, а также Госкорпорация "РОСНАНО".

Основная цель совещания — анализ современного состояния и разработка плана развития образовательного сегмента национальной нанотехнологической сети.

С докладом "Координация работ для обеспечения развития национальной нанотехнологической сети (ННС)" выступил заместитель министра образования и науки Хлунов А. В.

Начальник управления научных исследований и инновационных программ Рособразования Кошкин В. И. выступил с докладами: "Ключевые проблемы развития образовательного сегмента ННС" и "Реализация проектов по организации взаимодействия НОЦ ННС в целях подготовки и переподготовки кадров".

Заместитель генерального директора государственной корпорации "Российская корпорация нанотехнологий" (РОСНАНО) Свинаренко А. Г. выступил с сообщением "Требования к подготовке и переподготовке кадров для реализации инновационных проектов в сфере наноиндустрии". Заместители руководителя учебно-методического совета по направлению "Нанотехнологии" ректор МИЭТ, член-корр. РАН Чаплыгин Ю. А. и заведующий кафедрой микроэлектроники СПбГЭТУ проф. Таиров Ю. М. в своем обращении к участникам совещания рассказали о новых образовательных стандартах для подготовки кадров в сфере наноиндустрии. Была отмечена следующая динамика развития в этой области:

— 4 июля 2003 г. — Приказ Минобрнауки РФ № 2398 "Об эксперименте по созданию нового направления подготовки специалистов "Нанотехнология" и специальностей "Нанотехнология в электронике" и "Наноматериалы". Председателем УМС по данному направлению утвержден академик Ж. И. Алферов. Подготовлены Государственные образовательные стандарты и учебные программы подготовки специалистов "Нанотехнология в электронике" и "Наноматериалы".

— 23 апреля 2004 г. — Приказ Минобрнауки РФ
 № 1922. Принято решение о подготовке бакалавров и магистров "Нанотехнология". Подготовлены Государственные образовательные стандарты и учебные программы подготовки по направлению "Нанотехнология".

— 12 июля 2005 г. — Приказ Минобрнауки РФ № 197. Отменен эксперимент и введены в действие Государственные образовательные стандарты подготовки бакалавров, магистров и специалистов в рамках направления "Нанотехнология".

— 2007 г. — Осуществлена закупка нового Федерального образовательного стандарта подготовки бакалавров и магистров по направлению "Электроника и наноэлектроника".

— 9 декабря 2008 г. — Осуществлена закупка нового Федерального образовательного стандарта подготовки бакалавров и магистров по направлению "Нанотехнология и микросистемная техника". Ректор Национального исследовательского ядерного университета "МИФИ" Стриханов М. Н. в своем выступлении обратил внимание на междисциплинарную подготовку кадров в области нанотехнологий в энергетике.

О международном сотрудничестве России и Европейского союза в сфере нанотехнологий проинформировал директор Российского регионального информационного центра FP6/FP7 Иванов А. С.

Завершилось совещание отчетами вузов (МИЭТ, МГТУ, МАИ. МИФИ. МГУ. МИСиС, СПбГУ, СПбГЭТУ, РХТУ. МФТИ) о результатах выполнения ФЦП "Развитие инфраструктуры наноиндустрии в РФ на 2008—2010 годы" и планах работ на 2009 год и презентациями ряда НОЦ (СПбГУ, СПбГТИ. СПбГУ ИТМО, СПбГПУ, СПбГЭТУ).

Участники совещания, обсудив ход реализации ФЦП "Развитие инфраструктуры наноиндустрии в Российской Федерации на 2008—2010 годы" в области развития образовательного сегмента ЕНС, отметили ряд особенностей:

- устойчивую тенденцию директивного и инициативного создания практически на всей территории России НОЦ для обеспечения научных исследований и образовательного процесса в наноиндустрии как основы формирования в стране новой технологической культуры;
- интеграцию реализуемой в вузах образовательной и научной деятельности в сфере наноиндустрии, с организациями государственных академий наук и промышленными структурами различных форм собственности;
- недостаточную координацию в использовании приборного парка уникального оборудования, а также в определении реальных потребностей в профессиональном кадровом обеспечении работ в сфере нанотехнологий;
- возрастание потребности наноиндустрии в кадрах с широкой фундаментальной подготовкой и в профессионально-ориентированных специалистах, имеющих навыки инженерной деятельности, что определяет необходимость динамичного сбалансированного развития образовательного сегмента ННС, ориентированного на все уровни кадрового обеспечения.

Отмечая необходимость развития в РФ образовательного сегмента ННС с учетом формирования наноиндустрии как интегрированного комплекса, основанного на системе современных знаний, технологической, метрологической, информационной и организационно-правовой культуре нового поколения, участники заседания подчеркнули необходимость реализации ряда мероприятий, включающих, в частности:

- создание Координационного совета НОЦ образовательного сегмента ННС;
- определение в качестве одного из приоритетов развития НОЦ вузов по направлению "Нанотехнологии" реализацию проектов, направленных на создание информационно-аналитической структуры, обеспечивающей сетевое взаимодействие НОЦ как фактора повышения эффективности функционирования образовательного сегмента ННС;
- разработку Координационным советом НОЦ при участии Федерального агентства по образованию регламента и организацию взаимодействия НОЦ по направлению "Нанотехнологии" с использованием информационно-аналитической инфраструктуры, создаваемой в рамках рассматриваемой на заседании ФЦП с учетом ее гармонизации с международной нанотехнологической сетью;
- введение в практику реализации сетевых форм научно-образовательной деятельности, направленных на повышение квалификации и эффективность переподготовки кадров, использование уникального оборудования и проведение исследований молодыми учеными на условиях их командирования в НОЦ вузов России.

Было также рекомендовано поручить Координационному совету подготовить предложения по повышению эффективности использования технологического и аналитического оборудования, программных и методических средств, приобретенных и разработанных вузами в рамках реализации ФЦП "Развитие инфраструктуры наноиндустрии в РФ на 2008— 2010 годы" и инновационных образовательных проектов в целях их широкого применения вузами в центрах коллективного пользования.

Одобрена инициатива вузов и признано рациональным одновременное проведение совещания ректоров и руководителей НОЦ вузов и заседания УМС по направлению "Нанотехнологии" как организационной формы, способствующей интеграции научного и образовательного процессов в сфере наноиндустрии в вузах России с ориентацией на повышение роли целенаправленной профессионально-ориентированной подготовки кадров.

Предложено провести третье Совещание ректоров и руководителей НОЦ вузов по тематическим направлениям ФЦП "Развитие инфраструктуры наноиндустрии в РФ на 2008—2010 гг." и заседание УМС по направлению "Нанотехнологии" в IV квартале 2009 г.

CONTENTS

Polyakov V. V. *Stray Capacitance Compensation Technique in Scanning Capacitance Microscopy*6 Specially designed probe and novel stray capacitance compensation technique for 2D dopant profiles characterization of semiconductor structures by scanning capacitance microscopy (SCM) have been advanced. Corresponding unit for SCM realization has been engineered. Advantages of using compensation technique and high (10-20 nm) spatial resolution of SCM are demonstrated on samples with dopant concentration in the range $10^{15}-10^{20} \text{ cm}^{-3}$.

Keywords: SCM, capacitance microscopy, SPM, AFM, probe microscopy, dopant profile.

Obizhaev D. Yu., Zhukova S. A., Babayevsky P. G., Chetverov Yu. S. Properties and Structure of

Nano-Thin Silicon Nitride Films Formed on Polyimide Surface by Low-Temperature Plasma Deposition 14 Silicon nitride films of 2—300 nm thickness deposited on polyimide coatings and films were investigated. Films were formed by low-temperature ECR chemical vapor deposition. It was shown that the ratio of precursor gases has an influence on chemical structure, morphology and surface energetic properties of the films and does not have an influence on Young's modulus.

Keywords: silicon nitride, plasma deposition, deposition of a gas phase, microelectromechanical converters, superficial microprocessing, a sacrificial layer, an elektron-cyclotron resonance.

Keywords: ferroelectrics, perovskite, heterogeneous structural states.

The scintillation characteristics of new scintillition materials based on deformed powders alkali metal halides were studied. Reduce decay times of deformed powders was observed in deformed powders scintillators as compared with the single crystal.

Keywords: scintillator, decay time, intensive plastic deformation.

Keywords: implantation, silicon on sapphire, high-temperature annealing.

Keywords: system-on-Chip (SoC), convergence, above branches of science, nano- and IT-technology, wireless nanosystems, personal teraflop supercomputer, paradoxes, century challenge.

Keywords: semiconductor laser, super-high speed digital signal transmission characteristics, fiber optic systems.

For foreign subscribers:

Journal of "NANO and MICROSYSTEM TECHNIQUE" (Nano- i mikrosistemnaya tekhnika, ISSN 1813-8586)

The journal bought since november 1999. Editor-in-Chief Ph. D. Petr P. Maltsev ISSN 1813-8586.

Address is: 4, Stromynsky Lane, Moscow, 107076, Russia. Tel./Fax: +7(499) 269-5510. E-mail: nmst@novtex.ru; http://www.microsystems.ru

Адрес редакции журнала: 107076, Москва, Стромынский пер., 4. Телефон редакции журнала (499) 269-5510. E-mail: nmst@novtex.ru Журнал зарегистрирован в Федеральной службе по надзору за соблюдением законодательства

в сфере массовых коммуникаций и охране культурного наследия.

Свидетельство о регистрации ПИ № 77-18289 от 06.09.04.

Дизайнер Т. Н. Погорелова. Технический редактор Е. М. Патрушева. Корректор М. Г. Джавадян

Сдано в набор 16.07.2009. Подписано в печать 18.08.2009. Формат 60×88 1/8. Бумага офсетная. Печать офсетная. Усл. печ. л. 6,86. Уч.-изд. л. 8,25. Заказ 748. Цена договорная

Отпечатано в ООО "Подольская Периодика", 142110, Московская обл., г. Подольск, ул. Кирова, 15

- НАНО- И МИКРОСИСТЕМНАЯ ТЕХНИКА, № 9, 2009 -