

Секция МИКРО- И НАНОЭЛЕКТРОНИКА

ПЕРСПЕКТИВНЫЕ МАТЕРИАЛЫ И СТРУКТУРЫ

Выращивание и свойства монокристаллов $MnIn_5S_{8.5}$.....	10
И.В. Боднар, Р.Л. Бунцевич, С.А. Павлюковец	
Инфракрасные спектры отражения монокристаллов $FeGa_2Se_4$.....	12
И.В. Боднар, С.А. Павлюковец, А.Г. Кароза, Г.Ф. Смирнова, Т.В. Смирнова	
Твердые растворы в системе $Cu_2ZnSnSe_4-Cu_2ZnSnS_4$.....	14
И.В. Боднар, И.А. Викторов, Л.В. Котковец, С.А. Павлюковец	
Эффективность разложения воды на наноструктурированных твердых растворах метастабильного полупроводника.....	16
А.А. Ковалевский, В.А. Лабунов, О.М. Комар, Д.А. Котов	
Анализ штарковского расщепления мультиплетов иона Tm^{3+} в монокристалле YVO_4.....	18
Л.А. Фомичева, А.А. Корниенко, Е.Б. Дунина, Е.В. Павлова	
Люминесцентные свойства пленок InN с различным уровнем легирования	20
А.Л. Гурский, В.Д. Живулько, А.В. Мудрый	
Перовскитоподобные пленки с замещающими ионами	22
М.В. Руденко, Н.В. Гапоненко	
Влияние Na на микроструктурные свойства пленок $Cu_xIn_xZn_{2-2x}Se_2$.....	24
В.В. Хорошко, И.Н. Цырельчук, В.Ф. Гременок, А.М. Струц	
Особенности синтеза пленок $Cu_xIn_xZn_{2-2x}Se_2$ методом селенизации слоев $ZnSe/Cu-In$.....	26
И.Н. Цырельчук, В.А. Мишутко, В.В. Хорошко, В.Ф. Гременок	
Микроструктурированные пленки пористого анодного оксида алюминия для применения в оптоэлектронике и фотокатализе.....	28
Л.С. Хорошко, А.М. Ашариф, М.В. Меледина, Т.И. Ореховская, В.А. Сокол, Н.В. Гапоненко	
Частотные характеристики многослойных структур металл/диэлектрик.....	30
В.А. Петрович, В.В. Баранов, С.В. Редько	
Формирование и свойства фотокаталитически активных толстых пленок с диоксидом титана.....	32
К.В. Ашуркевич, В.Е. Борисенко	
Структура и оптические свойства тонких пленок теллура	34
Б.С. Колосницын, И.А. Сицко	
Фотокаталитические свойства диоксида титана и его применение.....	36
А.С. Комаров	
Исследование механизма формирования нанопористых матриц на основе анодного Al_2O_3 при двухстороннем сквозном анодировании.....	38
Д.Л. Шиманович, В.А. Сокол, Д.И. Чушкова	
Особенности формирования диоксида титана в пористом кремнии p-типа проводимости.....	40
Н.М. Денисов, В.Е. Борисенко	
Получение и свойства наночастиц $CuXTe_2$ ($X - In, Ga$) в диэлектрической матрице	42
И.В. Боднар, Н.П. Соловей, А.П. Молочко	

Фотокаталитическое разложение тетрациклина гидрохлорида в присутствии структур Al/TiO₂ и Al/TiO₂:Au	44
О.П. Линник, М.А. Жуковский, Г.Н. Старух, Н.П. Смирнова, Н.В. Гапоненко, А.М. Ашариф, Т.И. Ореховская	
Электронные свойства квазидвухмерных структур халькогенидов переходных металлов V группы.....	46
О.А. Козлова	
Ферромагнетизм наноструктурированного оксида цинка	47
М.С. Зеленина, О.А. Козлова, В.Р. Стемпицкий, В.В. Баркалин	
Влияние морфологии на зонную структуру InAs и GaAs нанопроводов	49
Д.А. Яцыно, Я.С. Арситов, Д.Б. Мигас	
Исследование механизма взаимодействия бактерии BACILLUS SUBTILIS с поверхностью кремния посредством квантово-механических методов моделирования	52
В.А. Бурко, Я.В. Долгая, В.Р. Стемпицкий, В.В. Баркалин	
Совершенствование процесса импульсного серебрения изделий.....	54
М.М. Борисик, А.А. Хмыль	

ДИСКРЕТНЫЕ ПРИБОРЫ И ИНТЕГРАЛЬНЫЕ МИКРОСХЕМЫ

Интегрированные пленочные системы в твердотельных структурах диодов Шоттки	56
В.А. Солодуха, В.В. Баранов, Ф.Ф. Комаров, О.В. Мильчанин, О.Э. Сарычев, Я.А. Соловьев, А.С. Турцевич, Н.К. Фоменко	
Электрохимическая технология изготовления многокристалльных модулей современной радиоэлектронной аппаратуры.....	58
В.А. Сокол	
Технология быстрого проектирования и производства систем на пластине	59
И.Л. Баранов, А.Г. Черных, А.С. Тymoщик, А.Б. Зимин	
Создание бесшаблонного производства СБИС	61
В.А. Лабунов, И.Л. Баранов, А.Г. Черных	
Сравнительный анализ кристаллических и тонкопленочных технологий фотоэлектрических преобразователей на основе кремния	62
В.П. Василевич, Е.В. Ядренцева	
Повышение надежности транзисторов в металлокерамических микрокорпусах.....	65
А.С. Турцевич, С.С. Волкенштейн, А.Ф. Керенцев, А.А. Хмыль	
Газовые сенсоры на подложках из нанопористого оксида алюминия.....	67
Г.Г. Горох, А.И. Захлебаева, А.А. Лозовенко, Е.В. Сочнева	
Самоорганизующаяся наноструктура в конструкции солнечного элемента на основе диода Шоттки	69
Я.В. Сацкевич, А.Г. Смирнов, А.А. Степанов	
Динамика переключения элемента резистивной памяти	71
Д.В. Стремоус, А.Л. Данилюк	
Влияние упругих напряжений на частоту колебаний намагниченности в ферромагнитных наноструктурах	73
А.В. Кухарев, А.Л. Данилюк	
Флуктуации лавинного тока на нерегулярностях структур диодного типа.....	75
С.С. Дереченник, В.В. Буслук, Ю.Н. Янковский, А.М. Стрибук	
Использование внешнего резонатора для усиления высокочастотного сигнала полупроводниковой сверхрешеткой.....	77
В.В. Макаров, А.Е. Храмов, А.А. Короновский, О.И. Москаленко, С.А. Куркин, К.Н. Алексеев, А.Г. Баланов	
Модель диодов Шоттки с МОП-канавочной структурой	79
В.С. Котов, В.Е. Борисенко	

Моделирование биполярного транзистора с изолированным затвором, сформированного по КНИ-технологии.....	81
И.Ю. Ловшенко, В.Р. Стемпицкий, И.М. Шелибак	
Оптимизация параметров диффузионно-дрейфовой модели МОП-транзистора.....	83
В.Р. Стемпицкий, А.М. Боровик, Чан Туан Чунг	
Моделирование одиночного сбоя в МОП-транзисторе.....	85
И.Ю. Ловшенко	
Физическое моделирование термоактивационного пробоя в полупроводниковых приборах	87
Б.С. Колосницын, И.А. Манкевич	
Автофотокатоды на основе микроструктур из кремния.....	89
В.А. Столер	

ОБОРУДОВАНИЕ

Зондовый автоматический технологический контроль микро-, нано- и СВЧ-структур на пластине.....	91
В.А. Минченко, Г.Ф. Ковальчук, С.Б. Школык, В.А. Зайцев	
Программно-аппаратный комплекс управления электронно-оптической системой.....	93
Я.О. Орлов	
Разрядные характеристики ионно-лучевого источника с анодным слоем.....	95
Е.П. Роговский, Д.А. Котов	
Программно-управляемые источники тока для научных исследований и модернизации гальванических производств	97
А.М. Гиро, М.М. Борисик, А.А. Глушков	
Управление в режиме реального времени в системах перемещений прецизионного оборудования	99
И.В. Дайняк, В.В. Жарский, Д.Г. Бегун	
Система управления шаговыми двигателями в режиме реального времени на основе технологии ETHERCAT	101
Д.Г. Бегун	
Прецизионная система перемещений на реконфигурируемых механизмах параллельной кинематики.....	103
И.В. Дайняк, В.В. Поляковский, Н.И. Кекиш, В.Н. Нестеренко	

ПЕРСПЕКТИВНЫЕ МАТЕРИАЛЫ И СТРУКТУРЫ

УДК 621.315.592

ВЫРАЩИВАНИЕ И СВОЙСТВА МОНОКРИСТАЛЛОВ $\text{MnIn}_5\text{S}_{8.5}$

И.В. БОДНАРЬ, Р.Л. БУНЦЕВИЧ, С.А. ПАВЛЮКОВЕЦ

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
ул. П. Бровки, 6, г. Минск, 220013, Республика Беларусь
chemzav@bsuir.by*

Методом Бриджмена (вертикальный вариант) выращены монокристаллы $\text{MnIn}_5\text{S}_{8.5}$ диаметром ~ 14 и длиной ~ 40 мм. Определен состав полученных монокристаллов, структура и параметр элементарной ячейки. В интервале 80–600 К проведены исследования теплового расширения и определены коэффициенты теплового расширения, а также рассчитаны температура Дебая и среднеквадратичные динамические смещения атомов.

Ключевые слова: метод Бриджмена, структура, коэффициент теплового расширения, температура Дебая, среднеквадратичные динамические смещения атомов.

В последнее время значительное внимание уделяется изучению магнитных полупроводников типа $MB_2^{\text{III}}C_4^{\text{VI}}$ (M – Mn, Fe, Co, Ni; B^{III} – Al, Ga, In; C^{VI} – S, Se, Te). Магнитные полупроводники этого класса являются новыми и практически малоизученными материалами. Указанные соединения являются перспективными материалами для создания на их основе лазеров, модуляторов света и других устройств, управляемых магнитным полем. В данной работе представлены данные по выращиванию монокристаллов $\text{MnIn}_5\text{S}_{8.5}$, определению состава, структуры и исследованию теплового расширения.

Кристаллы предварительно получали из элементарных компонентов полупроводниковой степени чистоты. Полученные слитки измельчали и перегружали в двойные кварцевые ампулы, из которых внутренняя ампула заканчивалась цилиндрическим капилляром, который обеспечивал формирование монокристаллической затравки. К наружной ампуле снизу приваривали кварцевый стержень, служивший держателем. После вакуумирования ампул до остаточного давления $\sim 10^{-3}$ Па ее помещали в вертикальную однозонную печь с заданным температурным градиентом в которой проводили выращивание монокристаллов. Температуру печи повышали со скоростью 150 К/ч до ~ 1420 К и для гомогенизации расплава, выдерживали при этой температуре 2 ч. После указанного времени выдержки, проводили направленную кристаллизацию расплава, понижая температуру печи со скоростью ~ 2 К/ч до полного затвердевания расплава. Для гомогенизации полученных слитков их отжигали при 1020 К в течение 300 ч. Выращенные в таких условиях монокристаллы $\text{MnIn}_5\text{S}_{8.5}$ имели диаметр ~ 14 и длину ~ 40 мм, были однородными и гомогенными.

Состав выращенных монокристаллов определяли с помощью микрозондового рентгеноспектрального анализа, структуру – рентгеновским методом.

Результаты микрозондовых рентгеноспектральных измерений показали, что содержание компонент в выращенных монокристаллах удовлетворительно согласуется с заданным составом в исходной шихте.

Дифрактограммы, снятые из разных участков монокристаллов, соответствовали кубической структуре шпинели. Параметры элементарной ячейки, рассчитанные методом наименьших квадратов равны: $a = 10,753 \pm 0,005$ Å. Разрешение высокоугловых линий на дифрактограммах свидетельствует о равновесности выращенных монокристаллов $\text{MnIn}_5\text{S}_{8.5}$.

Тепловое расширение монокристаллов $\text{MnIn}_5\text{S}_{8.5}$ измеряли на кварцевом dilatометре в интервале 80–600 К. Измерение температурной зависимости относительного удлинения ($\Delta l/l_0$) проводили на образцах средними размерами $3 \times 3 \times 12$ мм. На зависимостях $\Delta l/l_0$ и α_L никаких аномалий не наблюдается (рис. 1 и 2).

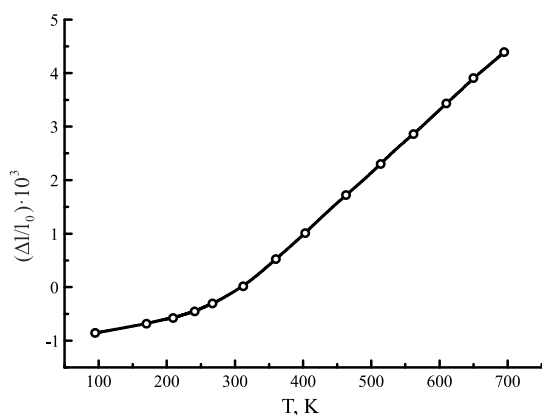


Рис. 1. Температурная зависимость относительного удлинения

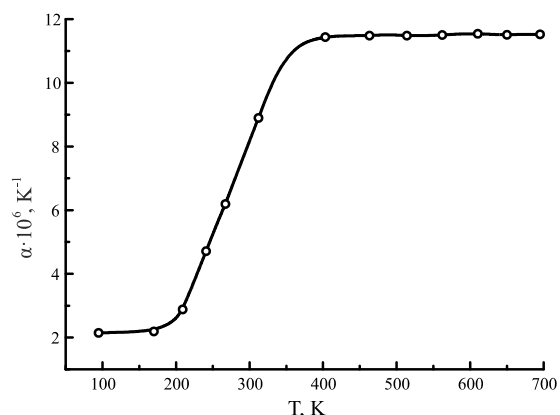


Рис. 2. Температурная зависимость коэффициента теплового расширения

Это свидетельствует о том, что в исследованном интервале температур для исследованных монокристаллов фазовые превращения отсутствуют. Анализ зависимости $\alpha_L(T)$ показывает, что коэффициент теплового расширения очень слабо изменяется в интервале 80–200 К (от 2,2 до $2,5 \cdot 10^6 \text{ K}^{-1}$), затем наблюдается резкий рост α_L вплоть до 450 К (от 2,5 до $11,5 \cdot 10^6 \text{ K}^{-1}$), после чего температура на величину α_L влияния не оказывает. Такое поведение КТР связано с изменением степени ангармонизма тепловых колебаний атомов в монокристаллах $\text{MnIn}_5\text{S}_{8.5}$.

Полученные значения коэффициента теплового расширения были использованы для расчета характеристической температуры Дебая (Θ_D) и среднеквадратичных динамических смещений атомов $\sqrt{\bar{u}^2}$ (табл. 1) по следующим формулам:

$$\Theta_D^\alpha = \frac{14,3}{\alpha_L^{1/2} \bar{A}^{1/2} V^{1/3}}, \quad (1)$$

$$\bar{u}^2 = 4,3 \cdot 10^{-14} \left[\frac{D(\Theta/T) + 1}{\Theta/T + 4} \right] \frac{1}{\bar{A}\Theta}, \quad (2)$$

где α_L – коэффициент теплового расширения, \bar{A} – средняя атомная масса, V – средний атомный объем, $D(\Theta/T)$ – функция Дебая.

Табл. 1. Коэффициенты теплового расширения, температуры Дебая и среднеквадратичных динамических смещений атомов $\text{MnIn}_5\text{S}_{8.5}$

№	$T, \text{ K}$	$\alpha_L \cdot 10^6, \text{ K}^{-1}$	$\Theta_D, \text{ K}$	$\sqrt{\bar{u}^2}, \text{ \AA}$	№	$T, \text{ K}$	$\alpha_L \cdot 10^6, \text{ K}^{-1}$	$\Theta_D, \text{ K}$	$\sqrt{\bar{u}^2}, \text{ \AA}$
1	80	2,14	343	0,084	5	300	8,15	176	0,259
2	170	2,19	339	0,106	6	403	11,44	149	0,356
3	209	2,88	296	0,132	7	514	11,48	149	0,402
4	255	5,53	213	0,198	8	600	11,54	148	0,436

ИНФРАКРАСНЫЕ СПЕКТРЫ ОТРАЖЕНИЯ МОНОКРИСТАЛЛОВ FeGa_2Se_4

И.В. БОДНАРЬ¹, С.А. ПАВЛЮКОВЕЦ¹, А.Г. КАРОЗА²,
Г.Ф. СМИРНОВА¹, Т.В. СМИРНОВА³

¹Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
ул. П. Бровки, 6, г. Минск, 220013, Республика Беларусь
chemzav@bsuir.by

²Институт физики имени Б.И. Степанова НАН Беларуси
пр-т Независимости, 68, г. Минск, 220072, Республика Беларусь

³Международный государственный экологический университет имени А.Д. Сахарова
ул. Долгобродская, 23, г. Минск, 220070, Республика Беларусь

Исследованы спектры отражения в области инфракрасного излучения, обусловленные колебаниями решетки в монокристаллах FeGa_2Se_4 , выращенных методом Бриджмена. Рассчитаны контуры однофононных спектров отражения и определены параметры фононов, эффективные ионные заряды и диэлектрические постоянные.

Ключевые слова: дисперсионный анализ Крамерса-Кронига, частоты продольных ω_{LO} и поперечных ω_{TO} фононов, диэлектрические постоянные, эффективные заряды.

Изучение колебательных спектров сложных полупроводниковых соединений в далекой ИК области дает информацию не только об оптических модах, но и позволяет решать проблемы структуры и динамической теории кристаллической решетки.

В данной работе впервые представлены результаты исследования колебательных спектров отражения монокристаллов FeGa_2Se_4 в области инфракрасного излучения.

Монокристаллы FeGa_2Se_4 получены прямым сплавлением элементов высокой степени чистоты методом Бриджмена [1]. Спектры ИК отражения измерены на Фурье-спектрометре FIR-30 в области частот $500\text{--}50\text{ см}^{-1}$ при комнатной температуре с разрешением $2\text{--}4\text{ см}^{-1}$.

Тройное соединение FeGa_2Se_4 кристаллизуется в кубической решетке с пространственной группой D_{2d}^1 ($R\bar{4}2m$). Исследуемое соединение является изоструктурным аналогом $\alpha\text{-CdIn}_2\text{Se}_4$. Решетка FeGa_2Se_4 может быть получена из решетки цинковой обманки путем заполнения четырех металлических узлов последней одним атомом Fe^{2+} и двумя атомами Ga^{3+} (один узел остается пустым); в элементарной ячейке содержится 8 атомов и 16 валентных штрихов.

На основании теоретико-группового анализа в центре зоны Бриллюэна должны наблюдаться 2 акустические моды и 13 оптических мод следующих симметрий [2]:

$$\Gamma = 2A_1 + 2A_2 + B_1 + 4B_2 + 6E$$

Согласно правилам отбора, колебательная мода симметрии A_2 является неактивной как в ИК, так и КРС спектрах. Все остальные моды как акустические, так и оптические являются активными в спектрах КРС. ИК активными являются моды симметрии B_2 и E . В симметриях B_2 и E по одной моде акустической, а все остальные моды оптические.

На рис. 1 представлены спектры ИК отражения для монокристаллов FeGa_2Se_4 , где в исследуемой области частот четко проявляются десять полос отражения.

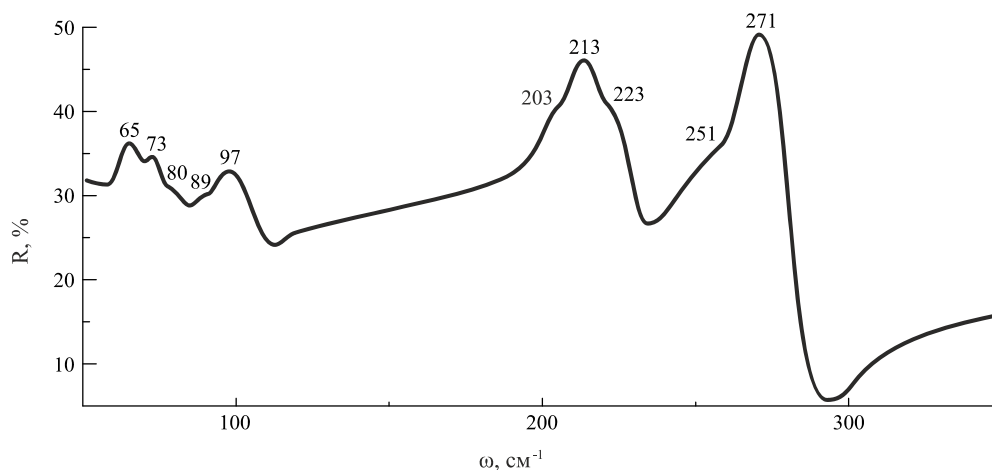


Рис. 1. ИК спектр отражения монокристаллов FeGa₂Se₄

Полученные спектры ИК отражения обрабатывали методом последовательного дисперсионного анализа Крамерса-Кронига [3], по которому были определены основные термодинамические параметры монокристаллов FeGa₂Se₄ (табл. 1).

Табл. 1. Параметры оптических фононов и эффективных зарядов

№ моды	$\omega_{LO}, \text{см}^{-1}$	$\omega_{TO}, \text{см}^{-1}$	g_n	S_n	ϵ_∞	ϵ_0	$\frac{e_s^*}{Z_{\text{эфф}}e}$	$\frac{e_s^*}{Ze}$	$\frac{e_B^*}{Ze}$
1	281	265	8	0,008	8,4	9,3	0,72	0,84	-2,90
2	256	244	6	0,007					
3	229	221	4	0,005					
4	217	209	4	0,005	$\frac{\epsilon_0}{\epsilon_\infty} = 1,11$	$\prod_{n=1}^{10} \left(\frac{\omega_{LO}^2}{\omega_{TO}^2} \right) = 1,10$	соотношение Лиддена – Сакса – Теллера		
5	205	200	2,5	0,003					
6	105	93	6	0,018					
7	89	87	1	0,003					
8	81	79	1	0,003					
9	75	71	2	0,008					
10	67	61	3	0,014					

Полученные результаты свидетельствуют о том, что в спектрах ИК отражения выявлены все колебательные моды, которые вносят основной вклад в ϵ_∞ , а также определены эффективные заряды, которые отражают специфические особенности кристаллической структуры монокристаллов FeGa₂Se₄.

Список литературы

1. Боднарь И.В., Викторов И.А., Павлюковец С.А. // Сб. докл. Междунар. науч. конф. «Актуальные проблемы физики твердого тела». Минск, 20–23 октября 2009 г. С. 144–147.
2. Neumann H., Kissinger W., Lévy F. et al. // Crys. Res. Tech. 1990. Vol. 25. № 12. P. 1455–1459.
3. Бурлаков В.М., Рзаев Д.А., Пырков В.Н. Методика расчета оптических характеристик из спектров ИК отражения монокристаллов. Троицк, 1985.

ТВЕРДЫЕ РАСТВОРЫ В СИСТЕМЕ $\text{Cu}_2\text{ZnSnSe}_4\text{-Cu}_2\text{ZnSnS}_4$

И.В. БОДНАРЬ¹, И.А. ВИКТОРОВ², Л.В. КОТКОВЕЦ¹, С.А. ПАВЛЮКОВЕЦ¹

¹Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
ул. П. Бровки, 6, г. Минск, 220013, Республика Беларусь
chemzav@bsuir.by

²ГНПО «Научно-практический центр НАН Беларуси по материаловедению»
ул. П. Бровки, 19, г. Минск, 220072, Республика Беларусь

Методом Бриджмена выращены кристаллы соединений $\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$, $\text{Cu}_2\text{ZnSnSe}_4$ и твердые растворы $\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_{4x}\text{Se}_{4(1-x)}$. Определен состав и структура полученных кристаллов. Установлено, что параметры элементарной ячейки с составом x изменяются линейно. Методом ДТА определены температуры фазовых превращений в указанных кристалла и построена диаграмма состояния системы $\text{Cu}_2\text{ZnSnSe}_4\text{-Cu}_2\text{ZnSnS}_4$.

Ключевые слова: твердые растворы, параметры элементарной ячейки, методы РФА и ДТА, диаграмма состояния.

Кристаллы $\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$, $\text{Cu}_2\text{ZnSnSe}_4$ и твердые растворы $\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_{4x}\text{Se}_{4(1-x)}$ выращивали методом Бриджмена (вертикальный вариант). Исходными веществами служили медь, цинк, олово, сера и селен. Элементарные компоненты взятые в соотношениях $\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4 = 2:1:1:4$ в количестве ~ 25 г, загружали в двойные кварцевые ампулы с плоским дном. После вакуумирования внутренней ампулы до остаточного давления $\sim 10^3$ Па ее помещали во вторую кварцевую ампулу большего диаметра, которую также вакуумировали. К наружной ампуле снизу приваривали кварцевый стержень, служивший держателем, который присоединяли к вибратору. В процессе нагревания ампулы в печи применяли вибрационное перемешивание, которое в значительной мере ускоряет образование соединений или твердых растворов и препятствует взрыву ампул.

В начальный период температуру в печи повышали со скоростью ~ 50 К/ч до 870 К. При указанных температурах проводилась изотермическая выдержка в течение ~ 2 ч с включением вибрации. Затем с той же скоростью температуру повышали до ~ 1280 К и снова выдерживали 2 ч. После этого вибрацию отключали и проводили направленную кристаллизацию расплава, понижая температуру печи со скоростью ~ 2 К/ч до ~ 1020 К и при этой температуре проводили гомогенизирующий отжиг полученных слитков в течение 600 ч.

Результаты микрондальных рентгеноспектральных измерений показали, что содержание компонент в выращенных кристаллах соединений $\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$, $\text{Cu}_2\text{ZnSnSe}_4$ и твердых растворах $\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_{4x}\text{Se}_{4(1-x)}$ удовлетворительно согласуется с заданным составом в исходной шихте.

Равновесность кристаллов тройных соединений и гомогенность твердых растворов определяли рентгеновским методом. Угловые положения линий дифракционного спектра записывали на рентгеновском аппарате ДРОН – 3М в CuK_α – излучении с графитовым монохроматором. Проведенные исследования показали, что на всех снятых дифрактограммах присутствуют индексы отражений, характерные для тетрагональной структуры. Разрешение высокоугловых линий на дифрактограммах свидетельствует о равновесности соединений и гомогенности твердых растворов. Параметры элементарной ячейки, рассчитанные методом наименьших квадратов, равны $a = 5,432 \pm 0,005$ Å;

$c = 10,81 \pm 0,01 \text{ \AA}$ для $\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$ и $a = 5,682 \pm 0,005 \text{ \AA}$; $c = 11,42 \pm 0,01 \text{ \AA}$ для $\text{Cu}_2\text{ZnSnSe}_4$. Установлено, что изменение указанных параметров с составом x изменяется линейно.

Для определения температур фазовых превращений соединений $\text{Cu}_2\text{ZnSnSe}_4$, $\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$ и твердых растворов на их основе, а также построения диаграммы состояния системы $\text{Cu}_2\text{ZnSnSe}_4\text{-Cu}_2\text{ZnSnS}_4$ использовали рентгенофазовый (РФА) и дифференциальный термический (ДТА) анализы.

Проведенные исследования показали, что на термограммах как соединений $\text{Cu}_2\text{ZnSnSe}_4$ и $\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$, так и на термограммах твердых растворов присутствует один тепловой эффект (рис. 1). Для соединений он соответствует температуре плавления, для твердых растворов – точкам солидуса и ликвидуса.

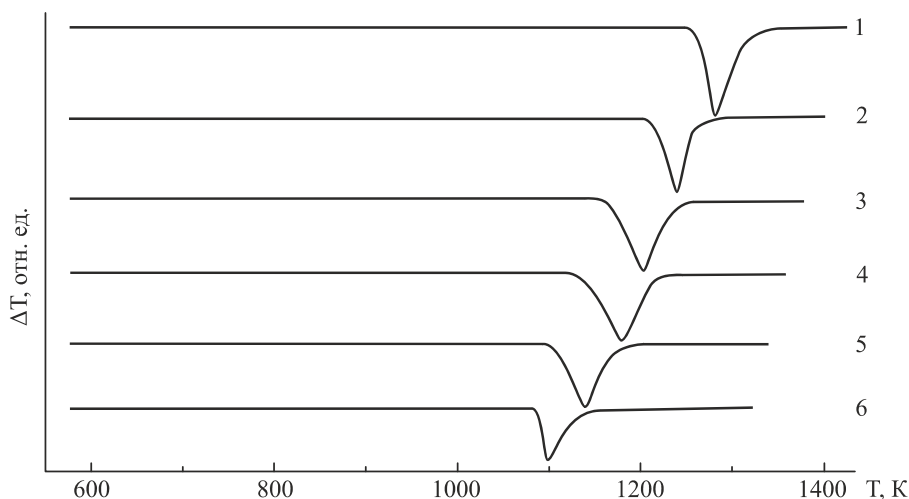


Рис. 1. Термограммы соединений $\text{Cu}_2\text{ZnSnSe}_4$, $\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$ и твердых растворов $\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_{4x}\text{Se}_{4(1-x)}$:
1 – $x = 1.0$; 2 – $x = 0.8$; 3 – $x = 0.6$; 4 – $x = 0.4$; 5 – $x = 0.2$; 6 – $x = 0.0$

По результатам РФА и ДТА построена диаграмма состояния системы $\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_{4x}\text{Se}_{4(1-x)}$ (рис. 2).

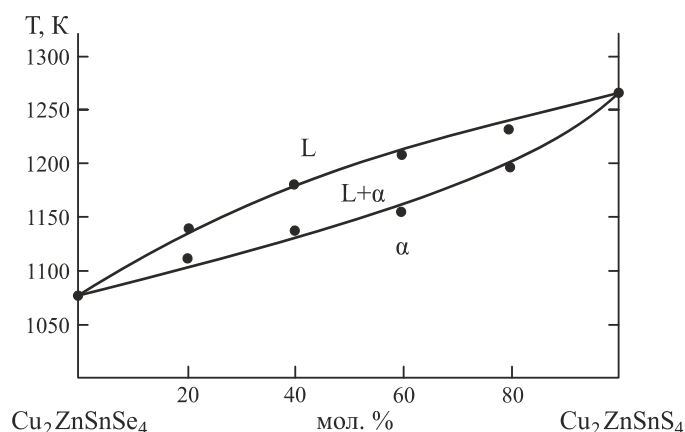


Рис. 2. Диаграмма состояния системы $\text{Cu}_2\text{ZnSnSe}_4\text{-Cu}_2\text{ZnSnS}_4$

Видно, что построенная диаграмма состояния характеризуется небольшим интервалом кристаллизации и её можно отнести к первому типу по классификации Розебома.

ЭФФЕКТИВНОСТЬ РАЗЛОЖЕНИЯ ВОДЫ НА НАНОСТРУКТУРИРОВАННЫХ ТВЕРДЫХ РАСТВОРАХ МЕТАСТАБИЛЬНОГО ПОЛУПРОВОДНИКА

А.А. КОВАЛЕВСКИЙ, В.А. ЛАБУНОВ, О.М. КОМАР, Д.А. КОТОВ

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
ул. П. Бровки, 6, г. Минск, 220013, Республика Беларусь
olga_komar@tut.by*

Рассмотрено соединение на основе дисилицида титана с высоким удельным сопротивлением как фотокатализатор в реакции разложения воды. Установлены наиболее значимые технологические параметры, от которых зависит эффективность процесса разложения. Установлены зависимости скорости разложения воды от ее кислотности pH, размера частиц фотокатализатора, температуры процесса и длины волны видимого света.

Ключевые слова: вода, водород, дисилицид титана, разложение воды, фотокатализатор.

Постоянные поиски новых путей синтеза водорода и его использования в качестве альтернативного топлива в различных сферах производства является определяющей тенденцией в развитии новых подходов при разработках технологии синтеза материалов способных разлагать воду на водород и кислород.

Область гетерогенного катализа разложения воды на водород и кислород на дисилициде титана начинает только развиваться [1]. К настоящему времени продемонстрирована возможность проведения процессов разложения воды под действием солнечного излучения при комнатной температуре [2].

Твердый раствор на основе дисилицида титана ($TiSi_2$) с удельным электрическим сопротивлением ≥ 1000 Ом·см. является весьма привлекательным материалом для применения в солнечной энергетике при разложении воды в качестве фотокатализатора [3,4]. Он способен разлагать воду под действием видимого света ($\lambda = 420 - 760$ нм).

Суть процесса разложения воды сводится к тому, что $TiSi_2$ на первом этапе при контакте с водой под воздействием солнечного света или эквивалентного освещения от галогеновых ламп, а также светодиодов образуются комплексы кислорода, которые на второй стадии работают как катализатор восстановления иона водорода в водном растворе в молекулярный водород. В этом случае полупроводниковый материал катализирует разложение воды при облучении видимым светом. При этом донор электронов окисляет OH^- ионы в кислород (O_2), а акцептор электронов восстанавливает ионы H^+ в молекулярный водород.

Наработка фотокатализаторов на основе $TiSi_2$ в солнечный день составляет до $1,0-90$ см³ в час. При этом наибольшая эффективность разложения воды наблюдается во временном интервале суток 12-16 часов (рис. 1). При прочих равных условиях солнечной радиации, эффективность разложения воды зависит от таких технологических параметров как: наличие магнитного поля, скорость перемешивания воды, размер частиц фотокатализатора, температуры воды и pH, массовое соотношение воды и катализатора и длина волны солнечного излучения [4,5].

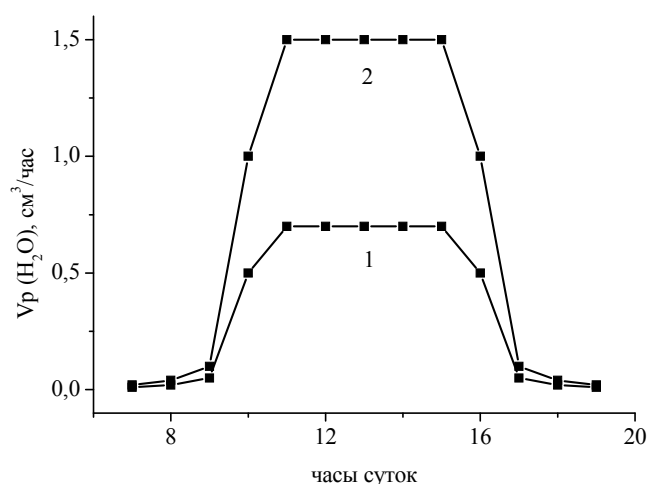


Рис. 1. Изменение эффективности реакции разложения воды на наноструктурированном твердом растворе диоксида титана в течение дня:
1 – отношение массы диоксида титана к массе воды 1:150, 2 – 1:75

Экспериментально установлено, что наиболее значимыми из технологических параметров, от которых зависит эффективность разложения воды, являются концентрация солнечной радиации, время суток, в течение которого наиболее эффективно используется солнечная радиация, размер частиц фотокатализатора, температура и pH воды. Важным достоинством наноструктурированных фотокатализаторов на основе $TiSi_2$, является то, что они эффективно преобразуют в химическую энергию концентрированное солнечное излучение с любой степенью концентрации $K = 50-1000$ солнц, что не могут делать другие фотокатализаторы. Так, с увеличением концентрации светового потока, генерируемый солнечным элементом фототок увеличивается линейно, выход водорода при разложении воды возрастает сверхлинейно. Оптимальным материалом для изготовления таких фотокатализаторов, как показали полученные результаты, является диоксид титана ($TiSi_2$) с размером частиц ≤ 70 нм, фотокатализаторы на основе которого могут достигать эффективности 98 %.

Список литературы

1. Климов В.В. // Соревский Обозревательный журнал. 1996. № 8. С. 6–13.
2. Ковалевский А.А., Строгова А.С., Борисевич В.М. и др. // V Российская конференция «Физические проблемы водородной энергетики», Санкт-Петербург, Россия, 16–18 ноября. 2009. С. 23–24.
3. Ковалевский А.А., Строгова А.С., Цыбульский В.В., и др. // Нано- и микросистемная техника. 2011. № 1. С. 6–30.
4. Ковалевский А.А., Власукова Л.А., Строгова А.С., Лученок А.Р., Шевченко А.А., Цыбульский В.В. // Нано- и микросистемная техника. 2012 №5. С. 15–21.
5. Ковалевский А.А., Власукова Л.А., Строгова А.С., Лученок А.Р., Шевченко А.А., Цыбульский В.В. // Нано- и микросистемная техника. 2012 №6. С. 6–11.

АНАЛИЗ ШТАРКОВСКОГО РАСЩЕПЛЕНИЯ МУЛЬТИПЛЕТОВ ИОНА Tm^{3+} В МОНОКРИСТАЛЛЕ YVO_4

Л.А. ФОМИЧЕВА¹, А.А. КОРНИЕНКО², Е.Б. ДУНИНА², Е.В. ПАВЛОВА²

¹Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
ул. П. Бровки, 6, г. Минск, 220013, Республика Беларусь
fatichova@mail.ru

²Витебский государственный технологический университет
Московский пр, 72, г. Витебск, 210035, Республика Беларусь
a_a_kornienko@mail.ru

Выполнено описание штарковской структуры мультиплетов иона Tm^{3+} в YVO_4 в различных моделях кристаллического поля. На основе анализа штарковской структуры получены параметры четного и нечетного кристаллического поля и параметры ковалентности.

Ключевые слова: конфигурационное взаимодействие, кристаллическое поле, штарковская структура, лантаноид.

Для описания штарковской структуры мультиплетов в приближении слабого конфигурационного взаимодействия обычно используют гамильтониан:

$$H_{cf} = \sum_{k,q} B_q^k C_q^k. \quad (1)$$

Здесь B_q^k – параметры кристаллического поля, C_q^k – сферические тензоры, действующие на угловые переменные f -электронов.

Для учета влияния возбужденных конфигураций на штарковскую структуру кристаллических систем, активированных f -элементами, расчеты можно выполнять в приближении промежуточного и сильного конфигурационного взаимодействия [1]. Однако для некоторых оксидных систем влияние возбужденных конфигураций настолько сильное, что для его учета необходимо использовать гамильтониан, полученный в приближении аномально сильного конфигурационного взаимодействия [2, 3]:

$$H_{cf} = \sum_{k,q} \left\{ B_q^k + \left(\frac{\Delta_d^2}{\Delta_d - E_J} + \frac{\Delta_d^2}{\Delta_d - E_{J'}} \right) \tilde{G}_q^k(d) + \right. \\ \left. + \sum_i \left(\frac{\Delta_{ci}^2}{\Delta_{ci} - E_J} + \frac{\Delta_{ci}^2}{\Delta_{ci} - E_{J'}} \right) \tilde{G}_q^k(c) \right\} C_q^k. \quad (2)$$

Здесь Δ_d и Δ_{ci} – энергии возбужденной конфигурации противоположной четности типа $4f^{N-1}5d$ и конфигурации с переносом заряда соответственно; $\tilde{G}_q^k(d)$, $\tilde{G}_q^k(c)$ – параметры, задающие величину вкладов соответствующих возбужденных конфигураций.

Величину вкладов возбужденной конфигурации противоположной четности $4f^{N-1}5d$ в \tilde{G}_q^k можно оценить по формуле [1]:

$$\begin{aligned} \tilde{G}_q^k(d) = & -\frac{2k+1}{2\langle f\|C^k\|f\rangle} \sum_{p',p''} \sum_{t',t''} (-1)^q \begin{pmatrix} p' & p'' & k \\ t' & t'' & -q \end{pmatrix} \times \\ & \times \begin{Bmatrix} p' & p'' & k \\ f & f & d \end{Bmatrix} \langle f\|C^{p'}\|d\rangle \langle d\|C^{p''}\|f\rangle \frac{B_{t'}^{p'}(d)}{\Delta_d} \frac{B_{t''}^{p''}(d)}{\Delta_d}, \end{aligned} \quad (3)$$

где $\langle f\|C^k\|f\rangle, \langle f\|C^{p'}\|d\rangle$ – приведенные матричные элементы сферических тензоров, $\begin{pmatrix} p' & p'' & k \\ t' & t'' & -q \end{pmatrix}, \begin{Bmatrix} p' & p'' & k \\ f & f & d \end{Bmatrix}$ – 3j и 6j коэффициенты векторного сложения углового момента, $B_{t'}^{p'}(d), B_{t''}^{p''}(d)$ – параметры кристаллического поля нечетной симметрии.

Вклад в \tilde{G}_q^k от процессов с переносом заряда задается выражением [1]:

$$\tilde{G}_q^k(c) = \sum_b \tilde{J}^k(b) C_q^{k*}(\Theta_b, \Phi_b). \quad (4)$$

Здесь суммирование осуществляется по лигандам ближайшего окружения; Θ_b, Φ_b – сферические углы, фиксирующие направление на лиганд b.

Для расчета параметров $\tilde{J}^k(b)$ удобно использовать выражения [1]:

$$\begin{aligned} \tilde{J}^2(b) & \approx \frac{5}{28} [2\gamma_{\sigma}^2 + 3\gamma_{\pi}^2], \\ \tilde{J}^4(b) & \approx \frac{3}{14} [3\gamma_{\sigma}^2 + \gamma_{\pi}^2], \\ \tilde{J}^6(b) & \approx \frac{13}{28} [2\gamma_{\sigma}^2 - 3\gamma_{\pi}^2], \end{aligned} \quad (5)$$

где γ_{ij} ($i = \sigma, \pi$) – параметры ковалентности соответствующие перескоку электрона из i -оболочки лиганда в f -оболочку лантаноида.

В данной работе выполнен анализ кристаллического расщепления мультиплетов иона Tm^{3+} в YVO_4 с учетом влияния возбужденных конфигураций противоположной четности $4f^{N-1}5d$ и конфигурации с переносом заряда (2). Такой подход позволяет улучшить описание штарковской структуры мультиплетов по сравнению с приближением слабого конфигурационного взаимодействия (1), а также дает возможность на основе экспериментальных данных по штарковской структуре [4] определить параметры ковалентности и параметры кристаллического поля нечетной симметрии.

Список литературы

1. Корниенко А.А. Теория спектров редкоземельных ионов в кристаллах. Курс лекций. Витебск. 2003.
2. Dunina E.B., Kornienko A.A., Fomicheva L.A. // Cent. Eur. J. Phys. 2008. Vol.6, №3. P.407–414.
3. Фомичева Л.А., Корниенко А.А., Дунина Е.Б. // ЖТФ. 2007. Т.77, №10. С.6–10.
4. Lisiecki R., Solarz P., Dominiak-Dzik G. et. al // Phys. Rew. B. 2006. Vol.74. P 035103-1 – 035103-14.

ЛЮМИНЕСЦЕНТНЫЕ СВОЙСТВА ПЛЕНОК InN С РАЗЛИЧНЫМ УРОВНЕМ ЛЕГИРОВАНИЯ

А.Л. ГУРСКИЙ¹, В.Д. ЖИВУЛЬКО², А.В. МУДРЫЙ²

¹Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
ул. П. Бровки, 6, г. Минск, 220013, Республика Беларусь
gurskii@bsuir.by

²НПЦ по материаловедению НАН Беларуси
ул. П.Бровки, 19, г. Минск, 220013, Республика Беларусь
mudryi@ifftp.bas-net.by

Приводятся результаты исследований люминесцентных свойств тонких пленок InN, полученных методом молекулярно-лучевой эпитаксии, перспективных для создания оптоэлектронных приборов нового поколения, а также расчетов констант электрон-фононного взаимодействия в этом материале.

Ключевые слова: люминесценция, примеси, InN, тонкие пленки, электрон-фононное взаимодействие

Типичные спектры краевой люминесценции двух образцов InN, различающихся концентрацией электронов, снятые при температуре $T = 4.2$ К, показаны на рис. 1.

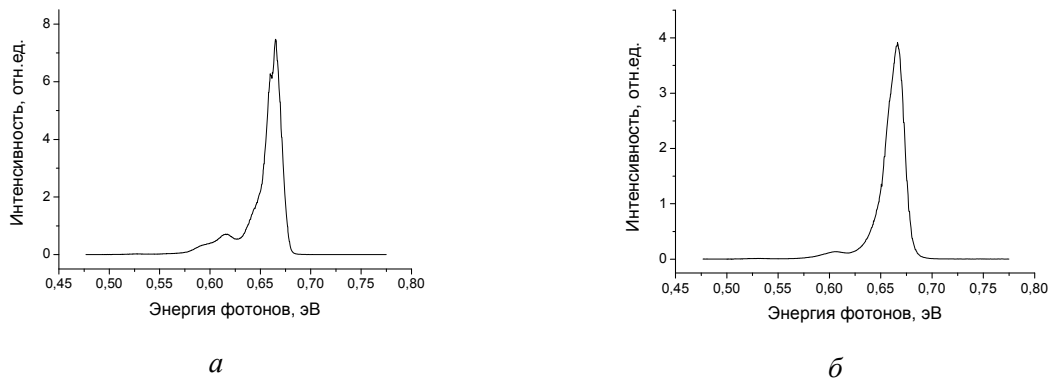


Рис. 1. Спектры фотолюминесценции тонких пленок InN:
с различной концентрацией электронов $\sim 5 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$ (а); $\sim 10^{18} \text{ см}^{-3}$ (б)

В спектрах наблюдается полоса, обусловленная рекомбинацией электронов из зоны проводимости (включая и мелкие донорные состояния) в валентную зону с максимумом ~ 0.66 эВ, а также примесная полоса ~ 0.61 эВ с ее фононным повторением ~ 0.56 эВ [1]. В спектре люминесценции образца с концентрацией электронов $\sim 5 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$ (рис. 1, а) видна тонкая структура этой полосы, обусловленная, скорее всего, наличием нескольких альтернативных каналов рекомбинации. Наблюдаются две примесные полосы с максимумами бесфононных линий 0.615 и 0.592 эВ. Увеличение концентрации электронов приводит к уширению всех спектральных полос с одновременным исчезновением тонкой структуры (рис. 1, б). Поскольку интенсивности фононных повторений определяются параметром электрон-фононного взаимодействия, были проделаны расчеты этого параметра для случая примесной рекомбинации в InN. Расчеты производились по методикам, изложенным в [2]. В качестве исходных данных брались следующие параметры InN: эффективная масса электронов $0.05m_e$, циклотронная эффективная масса $0.062m_e$, эффективная масса легких

дырок $m_h = 0.08m_e$, тяжелых дырок $(0.84 - 1.74)m_e$, статическая диэлектрическая проницаемость $\epsilon_0 = 10.5$, высокочастотная $\epsilon_0 = 6.7$, энергия продольного оптического фонона $E_{LO} = 72.6$ мэВ. Для этих значений были рассчитаны постоянные Фрелиха, равные $\alpha_e = 0.173$, $\alpha_h = 0.677$, и поляронные энергии $E_e = 0.0125$ эВ и $E_h = 0.049$ эВ для зоны проводимости и валентной зоны, соответственно.

Поскольку мелкие донорные состояния в сильнолегированном InN (концентрация электронов $\sim 10^{18}$ см⁻³ и выше) могут быть ионизованы даже при 4.2 К вследствие эффекта уменьшения энергии ионизации донорного состояния [3], наиболее вероятным механизмом рекомбинации, приводящим к появлению наблюдаемых в спектрах примесных полос следует считать излучательные переходы зона-акцептор. Для этого случая были проведены расчеты параметра электрон-фононного взаимодействия (фактора Хуанга – Райса, S), при этом в качестве параметра принималась энергия ионизации акцепторного уровня. Результаты расчетов показаны на рис. 2.

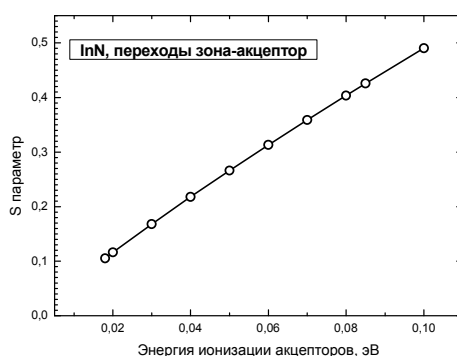


Рис. 2. Рассчитанная зависимость параметра электрон-фононного взаимодействия S от энергии ионизации акцепторов в InN

Из спектров, представленных на рис. 1, можно определить экспериментальные значения S с учетом того, что интенсивность k-ого фононного повторения $I_k(S) = (S^k/k!)e^{-S}$. В спектре люминесценции образца InN с концентрацией примесей 10^{18} см⁻³ (рис. 1б) соотношение интенсивности фононной реплики к бесфононной полосе около 0,1. Разделение спектра люминесценции образца InN с концентрацией примесей $5 \cdot 10^{17}$ см⁻³ на элементарные полосы с определением их интенсивностей затруднено из-за сильного перекрытия полос. Если предположить, что полосы соответствуют переходам на два различных акцепторных уровня, то соответствующие значения энергий ионизации, определяемые из положения спектральных полос, составляют примерно 50 и 75 мэВ. Это соответствует расчетной величине $S \sim 0.3-0.4$. Такая разница между расчетом и экспериментом может быть обусловлена неучетом расщепления валентной зоны за счет кристаллического и спин-орбитального взаимодействия InN, при котором примесные акцепторные состояния должны рассматриваться как суперпозиция состояний, формируемых дырками с различной эффективной массой [4].

Авторы благодарят профессора В. Шаффа (Корнельский университет, США), предоставившего эпитаксиальные пленки InN с высокой степенью совершенства.

Список литературы

1. Klochikhin A.A., Davydov V.Yu., Emtsev V.V. et al. // Phys. Rev. B. 2005. V.71. P. 195207-1-195207-16.
2. Germain M., Kartheuser E., Gurskii A.L. et al. // J. Appl. Phys. 2002. V.91. P. 9827-9834.
3. Иванова Г.Н., Недеогло Д.Д. // ФТП. 1979. Т. 13, № 1. С. 37-40.
4. Le Si Dang, Romestain R. // Solid State Commun. 1982. Vol.43, № 8. P.829-831.

ПЕРОВСКИТОПОДОБНЫЕ ПЛЕНКИ С ЗАМЕЩАЮЩИМИ ИОНАМИ

М.В. РУДЕНКО, Н.В. ГАПОНЕНКО

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
ул. П. Бровки, 6, г. Минск, 220013, Республика Беларусь*

Кристаллические соединения, обладающие структурой перовскита, находят широкое практическое применение в опто- и микроэлектронике благодаря ряду ценных свойств: сегнето- и антисегнетоэлектрики, ферромагнетики и др. В частности, большой интерес представляет сегнетоэлектрик танталат стронция висмута (ТСВ) как перспективный материал для элементов энергонезависимой памяти.

Ключевые слова: перовскиты, золь-гель метод, танталат стронция висмута.

Сегнетоэлектрическая фаза танталата стронция висмута $\text{Bi}_2\text{SrTa}_2\text{O}_9$ формируется из аморфного танталата стронция висмута выше пороговой температуры [1], после чего ТСВ имеет слоистую структуру Ауривилиуса с расположенными друг за другом перовскитными блоками $(\text{SrTa}_2\text{O}_7)^{-2}$ и двумерными слоями $(\text{Bi}_2\text{O}_2)^{2+}$ [2, 3]. Наличие спонтанной поляризации делает данные сегнетоэлектрики ключевым материалом устройств энергонезависимой памяти. Введение редкоземельных элементов [4] позволяет получить люминесценцию в синем диапазоне. Таким образом, представляется целесообразным исследование структурных возможностей соединения и развитие методики их синтеза.

В данной работе пленки ТСВ получали золь-гель методом. Для синтеза золей использовали этоксид тантала $(\text{Ta}(\text{OC}_2\text{H}_5)_5)$ и уксуснокислые соли стронция $(\text{SrCH}_3\text{COO})$ и одноосновного висмута $(\text{BiOCH}_3\text{COO})$. В качестве стабилизатора в золи добавляли ацетон. Время, в течение которого золь является пригодным для использования, составляет 1 неделю, после чего образуется желеподобный гель. Золи наносили методом центрифугирования со скоростью 2700 об/мин на подложки монокристаллического кремния. После нанесения каждого слоя образцы подвергались термообработке при температуре 200°C в течение 10-20 мин. Затем следовала окончательная термообработка в течение 40 минут при температуре 700°C .

На рис. 1 представлены изображения пленок ксерогеля $(\text{Sr}_x\text{Bi}_y)\text{Bi}_2\text{Ta}_2\text{O}_9$ с избыточной концентрацией висмута 15%, полученного из золя (а, б) и жидкого геля (в, г), толщина пленок соответственно составляет 140 нм и 318 нм.

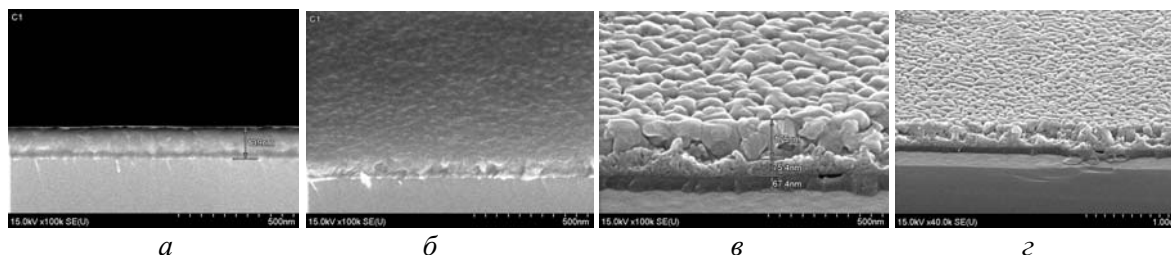


Рис. 1. РЭМ-изображения поверхности и скола пленок ксерогеля $(\text{Sr}_x\text{Bi}_y)\text{Bi}_2\text{Ta}_2\text{O}_9$, полученного из золя (а, б) и жидкого геля (в, г)

На дифрактограммах (рис. 2, 3) отмечены отчетливые линии кристаллической фазы образцов, соответствующие соединению $(\text{Sr}_{0,82}\text{Bi}_{0,12})\text{Bi}_2\text{Ta}_2\text{O}_9$ (PDF 00-089-6491).

Кристаллическая решетка имеет орторомбическую структуру с параметрами элементарной ячейки $a = 5.51415$, Å $b = 5.51415$, Å $c = 25.0322$ Å.

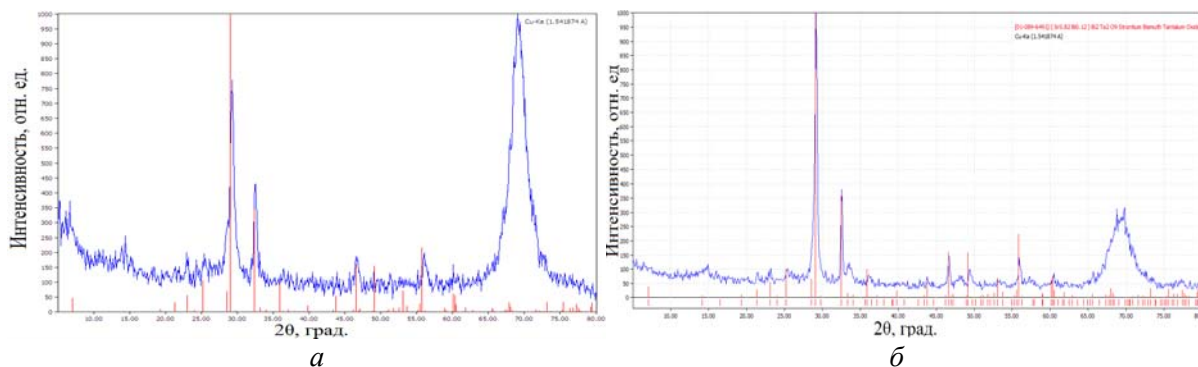


Рис. 2. Дифрактограмма пленок ксерогеля $(\text{Sr}_x\text{Bi}_y)\text{Bi}_2\text{Ta}_2\text{O}_9$, полученного из золя (а) и жидкого геля (б)

При уменьшении избыточной концентрации висмута до 5% кристаллическая структура получаемого ксерогеля соответствует фазе $\text{Bi}_2\text{SrTa}_2\text{O}_9$ (PDF 00-049-0609). Кристаллическая решетка имеет орторомбическую структуру с параметрами элементарной ячейки $a = 5.5274$ Å, $b = 5.5374$ Å, $c = 24.9914$ Å.

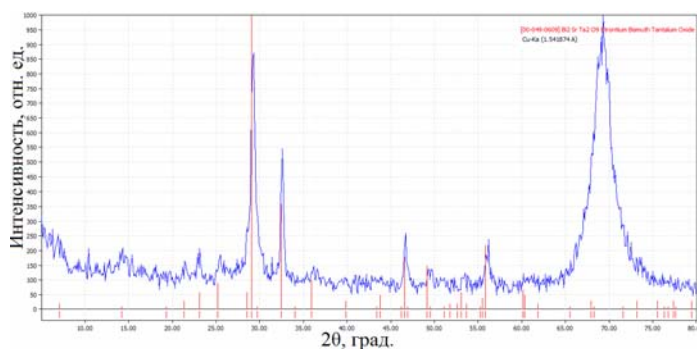


Рис. 3. Дифрактограмма пленки ксерогеля $\text{Bi}_2\text{SrTa}_2\text{O}_9$

Разработанная нами методика золь-гель синтеза позволяет получать пленки танталата стронция висмута $\text{Bi}_2\text{SrTa}_2\text{O}_9$ из уксуснокислых солей стронция и висмута. Продолжаются исследования зависимости фазового состава от концентрации висмута в соединении.

Список литературы

1. Housei Akazawa, Hiroshi Ando // J. Appl. Phys. 2010. Vol. 108. P. 083704.
2. R. L. Withers, J. G. Thompson, A. D. Rae // J. Solid State Chem. 1991. Vol. 94. P. 404.
3. A. D. Rae et al. // Acta Crystallogr. B Struct. Sci. 1992. Vol. 48. P. 418.
4. Ting-Shan Chan et al. // J. Mater. Chem. 2011. Vol. 21. P. 17119-17127.

ВЛИЯНИЕ Na НА МИКРОСТРУКТУРНЫЕ СВОЙСТВА ПЛЕНОК $Cu_xIn_xZn_{2-2x}Se_2$

В.В. ХОРОШКО¹, И.Н. ЦЫРЕЛЬЧУК¹, В.Ф. ГРЕМЕНОК², А.М. СТРУЦ¹

¹Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
ул. П. Бровки, 6, г. Минск, 220013, Республика Беларусь
khoroshko1986@mail.ru

²НПЦ Институт Физики Твердого Тела и Полупроводников Национальной Академии Наук Беларуси
ул. П.Бровки, 19, г. Минск, 220072, Республика Беларусь
gremenok@gmx.net

Тонкие пленки $Cu_xIn_xZn_{2-2x}Se_2$ являются одним из перспективных материалов для использования в качестве поглощающего слоя в тонкопленочных солнечных элементах. Использование метода двухстадийной селенизации для получения тонких пленок $Cu_xIn_xZn_{2-2x}Se_2$ позволяет получать однородные слои большой площади. В работе приводятся исследования влияния натрия на микроструктурные свойства тонких пленок.

Ключевые слова: тонкие пленки, твердые растворы $Cu_xIn_xZn_{2-2x}Se_2$.

Методика получения тонких пленок $Cu_xIn_xZn_{2-2x}Se_2$ (CIZS), описанная в [1], позволяет получать однородные слои большой площади. Натрий (Na) используется в процессе роста поглощающего слоя халькогенидных тонкопленочных солнечных элементов (ТСЭ) и повышает эффективность преобразования СЭ [2]. Na диффундирует из стекла через омический Mo-контакт. Соответственно, концентрация Na, проникающего из стекла, зависит от свойств Mo-контакта и свойств стеклянной подложки. Изменение свойств омического контакта и стеклянной подложки должны приводить к изменениям содержания Na и затрудняет его контроль. Вариации в содержании Na могут быть устранены посредством осаждения слоя Na-содержащего соединения, так называемого Na-прекурсора, перед осаждением слоя CIZS. Это предполагает применение Na -прекурсора совместно с подложкой, не содержащей Na, и открывает возможность применения новых, не содержащих Na материалов подложки. Приборы высокого качества могут быть получены с использованием Na_2S и Na_2Se слоев осажденных предварительно или одновременно с осаждением поглощающего слоя в едином технологическом процессе [3].

Для сравнительного анализа влияния Na на микроструктурные свойства CIZS, на предварительно осажденный соиспарением слой ZnSe/Cu-In был нанесен слой NaF толщиной 0.03 мкм в едином процессе. Затем производился отжиг полученной структуры в атмосфере Se/N₂ при различных температурах. Микрофотографии поперечного скола пленок CIZS, не содержащих Na и Na-содержащих полученных при температурах рекристаллизации $T_s = 400$ °C и $T_s = 540$ °C приведены на рис. 1. Дифрактограммы слоев CIZS не содержащих Na и слоев, с наличием Na приведены на рис. 2. Исходя из микрофотографий и дифрактограммы, можно говорить об улучшении микроструктуры слоев с введением Na. Введение Na привело к увеличению размеров зерна и возрастанию преимущественной ориентации [112] на дифрактограмме. В рамках данных исследований трудно установить точный механизм влияния натрия на пленки CIZS, но наиболее вероятным является образование халькопиритной поверхностной фазы, т.к. Na является изовалентным к меди.

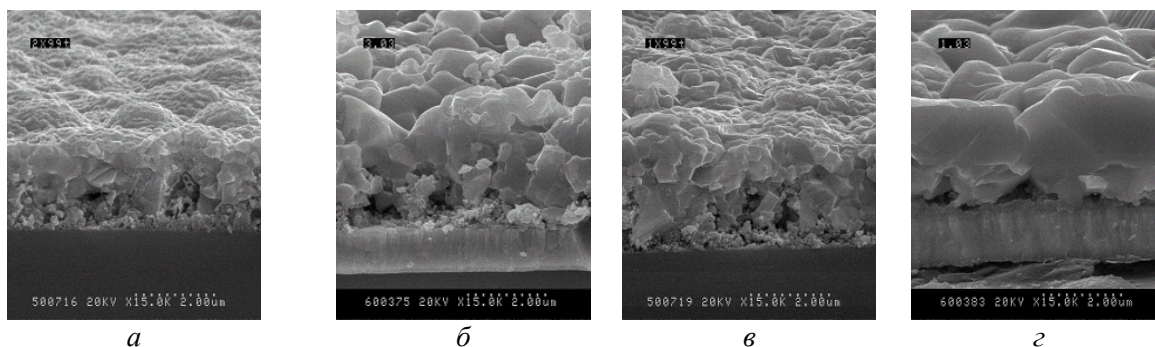


Рис. 1. Микрофотографии поперечного скола пленок CIZS не содержащих Na (а, в) и Na-содержащих (б, г), полученных при различных температурах селенизации: 400 °С (б, г) и 540 °С (а, в)

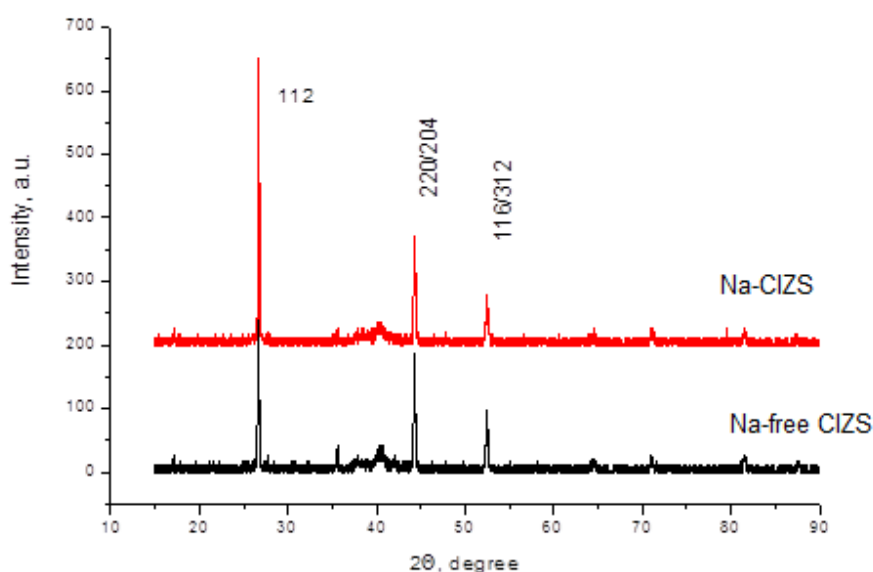


Рис. 2. Дифрактограммы слоев CIZS не содержащих Na и слоев, синтезированных с наличием слоя NaF на поверхности исходного базового слоя

Все вышеуказанные условия должны приводить к улучшению эффективности фотопреобразования пленок CIZS, при этом можно сделать вывод, что для улучшения эффективности преобразования возможно введение Na при оптимизированном процессе синтеза слоя. Таким образом дальнейшие исследования свойств тонких пленок CIZS являются весьма перспективными.

Список литературы

1. И.Н.Цырельчук, В.В.Хорошко, В.Ф.Гременок, В.А.Мишутин // Проблемы физики, математики и техники, Гомель 2013, №1(14) С. 33–36.
2. M. Bodegard, J. Hedstrom, K. Granath, A. Rockett // Proc. 13th European Photovoltaic Solar Energy Conference. 1995. p.2080.
3. D. Rudmann, G. Bilger, M. Kaelin, F.-J. Haug, H. Zogg, A.N. Tiwari. Effects of NaF coevaporation on structural properties of Cu(In,Ga)Se₂ thin films // Thin Solid Films. 431–2 (2003). –p.37-40.

ОСОБЕННОСТИ СИНТЕЗА ПЛЕНОК $\text{Cu}_x\text{In}_x\text{Zn}_{2-2x}\text{Se}_2$ МЕТОДОМ СЕЛЕНИЗАЦИИ СЛОЕВ $\text{ZnSe}/\text{Cu-In}$

И.Н. ЦЫРЕЛЬЧУК¹, В.А. МИШУТО¹, В.В. ХОРОШКО¹, В.Ф. ГРЕМЕНОК²

¹Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
ул. П. Бровки, 6, г. Минск, 220013, Республика Беларусь
tsyrelchuk@gmail.com

²НПЦ НАН Беларуси по материаловедению
ул. П. Бровки, 19, г. Минск, 220072, Республика Беларусь
gremenok@gmx.net

Синтез тонких пленок $\text{Cu}_x\text{In}_x\text{Zn}_{2-2x}\text{Se}_2$ методом селенизации слоев для создания тонкопленочных фотопреобразователей является перспективным направлением развития, так как обеспечивает получение однородных слоев большой площади. В работе представлены результаты оценки расхода селена в процессе селенизации.

Ключевые слова: двухстадийная селенизация, солнечные элементы, тонкие пленки $\text{Cu}_x\text{In}_x\text{Zn}_{2-2x}\text{Se}_2$.

На основании анализа достоинств и недостатков известных методов синтеза пленок $\text{Cu}_x\text{In}_x\text{Zn}_{2-2x}\text{Se}_2$ (CIZS), $\text{CuIn}_x\text{Ga}_{1-x}\text{Se}_2$ (CIGS), CuInSe_2 (CIS) [1] и экологической безопасности был разработан метод селенизации в объёме, ограниченном подложками с нанесёнными прекурсорами $\text{ZnSe}/\text{Cu-In}$ и источником металлического селена, прототипом которого является метод селенизации в графитовом боксе.

Процессы селенизации осуществлялись следующим образом: контейнер с селенизуемыми пленками помещался в реактор диффузионной печи. Диффузионная печь разогревалась на двух смежных рабочих зонах до температур, соответствующих стадиям селенизации. Первая стадия селенизации осуществлялась при температуре 240-270 °С в течение 10-30 минут, вторая стадия – при температурах 460 – 540 °С в течение 10-50 минут. Процессы селенизации протекали при потоке азота, равном 35 л/час. Перед проведением селенизации контейнер выдерживался в сильном потоке азота, для создания инертной атмосферы (подготовительная стадия), после завершения селенизации проводилось 2-3 часовое постепенное остывание реакторной зоны диффузионной печи, необходимое для охлаждения синтезированных образцов до комнатной температуры.

На основании анализа ряда литературных источников [1-2] и изучения диффузионных, дрейфовых и химических процессов, протекающих в реакторной системе селенизации общую формулу, описывающую расход селена можно представить в виде выражения (1).

$$\Delta m_{\text{Se}} \approx \frac{\mu_{\text{Se}} P_{\text{Se}}(T) a b \tau}{RT} + \frac{4 b \tau}{3 d_{\text{Se}}^2 \Delta z} \cdot \sqrt{\frac{k \mu_{\text{Se}} T}{N_a \pi^2}} \cdot \frac{P_{\text{Se}}(T)}{P_{\text{Se}}} \cdot \Delta t +$$

$$+ \frac{4 P_{\text{Se}}(T) \mu_{\text{Se}} v b \tau}{\pi d_{\text{mp}}^2 RT} \cdot \Delta t + \frac{\mu_{\text{Se}} a b \delta}{2} \cdot \sum_{i=1}^n \rho_i \sum_{i=1}^n \frac{\gamma_i n_i}{\mu_i}, \quad (1)$$

где Δm_{se} – общая масса селена, необходимая в системе для селенизации; *первое слагаемое* – масса селена, необходимого для поддержания избыточного парциального давления его паров; *второе слагаемое* – масса селена, теряемого за счёт его диффузии через открытые границы системы; *третье слагаемое* – масса селена, теряемого за счёт его дрейфа вместе с потоком инертного газа; *четвёртое слагаемое* – масса селена, связываемого в результате химических реакций с плёнкой внутри системы; μ_{se} – молярная масса селена; $P_{se}(T)$ – парциальное давление паров селена при температуре T ; a , b – длина и ширина подложек; δ – толщина прекурсора; τ – величина зазора между селенизуемыми подложками; R – универсальная газовая постоянная; T – абсолютная температура; $d_N = 3.8 \cdot 10^{-8}$ м – эффективный диаметр молекулы азота; Δz – диффузионная длина паров селена в реакторной системе; $k = 1.38 \cdot 10^{-26}$ Дж/К – постоянная Больцмана; $N_A = 6.02 \cdot 10^{26}$ Дж/К – постоянная Авогадро; $P_{ин}$ – давление инертного газа; Δt – общее время процесса; V – расход азота на поддержание инертной газовой атмосферы; $d = 0.1$ м – диаметр реактора диффузионной печи, в котором проводится термообработка; ρ_i , μ_i , n_i – плотность, молярная масса и массовая доля i -го элемента в прекурсор; γ_i – атомный коэффициент химической реакции между i -ым элементом в прекурсор и селеном.

Сравнение математических расчётов для четвёртого слагаемого, отвечающего за расход селена при селенизации металлического слоя ZnSe/(Cu-In), с экспериментальными данными, полученными в результате взвешивания обрабатываемых плёнок до и после процесса, показывает максимальное расхождение между ними до 16 %. Вклад подготовительного и первого этапов селенизации в оценку расхода селена в сумме составляют менее 1.0 %. Таким образом, при проведении практических расчетов можно ограничиваться вычислением потерь селена только на второй (высокотемпературной) стадии процесса. Сравнение экспериментальных данных и результатов теоретических расчётов по формуле 1 показывает хорошее соответствие между ними при максимальном отклонении до 18 %. Однако несмотря на такую величину погрешности, точность вычислений затрат селена по формуле 1 оказывается приемлемой для проведения практических расчетов. Минимальная масса селена, необходимая для селенизации прекурсоров площадью 25×75 мм², составляла 75 – 100 мг.

Список литературы

1. *Ivanov V.A., Gremenok V.F., Victorov I.A., Zaretskaya E.P., Bente K., Schmitz W.* // Properties of Cu(In,Zn)Se₂ // Thin Films Prepared by Selenization of Co-Sputtered Cu-In- Zn Alloys. Abstract at POLYSE 2004 Conference, 5-10 September, 2004, Germany.
2. *Rastogi A.C., Balakrishnan K.S., Sharma R.K., Jain K.* Growth phases during electrochemical selenization of vacuum deposited CuIn metal layers for formation of semiconducting CuInSe₂ films. Thin Solid Films 1999, 357, 179-188.

МИКРОСТРУКТУРИРОВАННЫЕ ПЛЕНКИ ПОРИСТОГО АНОДНОГО ОКСИДА АЛЮМИНИЯ ДЛЯ ПРИМЕНЕНИЯ В ОПТОЭЛЕКТРОНИКЕ И ФОТОКАТАЛИЗЕ

Л.С. ХОРОШКО, А.М. АШАРИФ, М.В. МЕЛЕДИНА, Т.И. ОРЕХОВСКАЯ,
В.А. СОКОЛ, Н.В. ГАПОНЕНКО

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
ул. П. Бровки, 6, г. Минск, 220013, Республика Беларусь
Lyudmila.s.st@gmail.com, nik@nano.bsuir.edu.by*

Приведены примеры изготовления планарных структур с заданным рисунком на основе пористого анодного оксида алюминия и золь-гель синтеза с применением фотолитографии. Данная технология является перспективным направлением ввиду возможности использования различных ксерогелей, содержащих легирующие примеси. Обсуждаются перспективы использования таких структур в оптоэлектронике и устройствах для фотокаталитической очистки воды.

Ключевые слова: пористый анодный оксид алюминия, ксерогель, фотолитография, планарные структуры.

Пленочные структуры ксерогель/пористый анодный оксид алюминия, легированные лантаноидами, являются эффективными люминофорами [1], а также конверторами рентгеновского излучения [2]. Возможность формирования регулярной высокоупорядоченной структуры повышает интерес к использованию пленок ПАОА для планарных фотонно-кристаллических волноводов, в которых снижение потерь обеспечивается за счет интерференции в двумерном фотонном кристалле [3]. Фотолюминесценция тербия и европия, введенного в поры анодного оксида алюминия в процессе золь-гель синтеза или методом осаждения солей из растворов в соответствии с рисунком изображения, представляет интерес для изготовления элементов защиты информации на алюминии [4]. Люминесценция эрбия в составе оксидов, сформированных в пористом анодном оксиде алюминия золь-гель методом, указывает на перспективу разработки микролазеров [5] и планарных эрбиевых усилителей [6]. Применение указанных структур требует разработки технологии изготовления планарных элементов – волноводов и микродисков на основе структур ксерогель/ПАОА. Подобные структуры нам представляются перспективными для применения и в системах фотокаталитической очистки воды.

При изготовлении таких структур предусмотрено выполнение ряда операций:

- непосредственно изготовление матрицы ПАОА;
- нанесение легированных и/или нелегированных ксерогелей, формирующих на ПАОА ровную поверхность;
- нанесение фоторезиста (и его задубливание), проявление фоторезиста;
- травление в окнах литографической маски с использованием селективных травителей с формированием рисунка.

При подборе соответствующих составов электролитов анодирования, зольей и способов формирования ксерогелей, травителей и режимов селективного травления можно получить достаточно ровные вертикальные стенки канавок травления для предотвращения дополнительного рассеяния излучения. Так травление в окнах литографической маски в 2-4 % растворе фтористоводородной кислоты в течение 2-5 минут при

толщине пористого анодного оксида алюминия 20 мкм и 8 слоях сформированного ксерогеля оксида титана, легированного европием, позволяет получать структуры с вертикальными стенками (рис. 1).

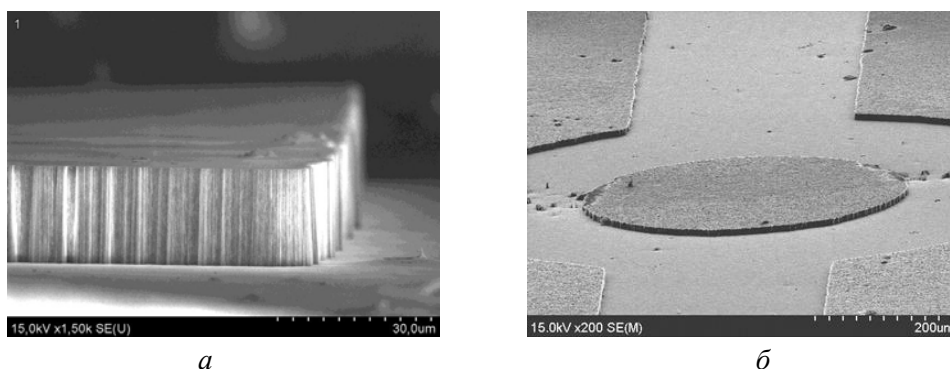


Рис. 1. Изображения пленочных структур ксерогель оксида титана/пористый анодный оксид алюминия толщиной 10–20 мкм с размером пор 20–25 нм, полученные методом анизотропного травления в окнах литографической маски: прямоугольная структура (а) и планарный элемент волновода и микродиска (б)

Такие структуры с толщиной анодной оксидной пленки 50-100 мкм могут быть сформированы на основе алюминиевой фольги, что накладывает определенные ограничения на использование ряда люминофоров, синтез которых требует термообработки выше температуры плавления алюминия. В частности, алюмоиттриевые композиты, синтезированные золь-гель методом, являются эффективными детекторами ионизирующих излучений при формировании их в фазе $Y_3Al_5O_{12}$ (алюмоиттриевый гранат) и $YAlO_3$ (ортоалюминат иттрия) при температурах порядка 900–1200 °С [7], что существенно выше температуры плавления алюминия.

Установлено, что при использовании ПАОА с размером пор менее 50 нм получаются более качественные структуры, что обусловлено формированием сплошной пленки ксерогеля на его поверхности. Полученные структуры микроцилиндра и волновода позволяют заключить, что совокупность предложенных операций перспективна для планарной оптоэлектроники. Модифицирование поверхности ПАОА для фотокаталитического применения подразумевает увеличение площади контакта ксерогеля оксида титана с загрязненными растворами, а наличие дорожек травления может повысить фотокаталитическую активность структуры за счет эффективного массопереноса воды.

Список литературы

1. Гапоненко Н.В. Пленки, сформированные золь-гель методом на полупроводниках и в мезопористых матрицах: монография. Мн., 2003.
2. Gaponenko N.V., Kortov V.S., Rudenko M.V. et al. // Journal of Applied Physics. 2012. Vol. 111. P. 103101.
3. Желтиков А.М. // Успехи физических наук. 2000. Т. 170, N 11. С. 1203-1215.
4. Гапоненко Н.В., Ореховская Т.И., Меледина М.В. и др. Способ формирования рисунка для получения люминесцентного изображения на алюминиевой поверхности. Пат. РБ № 15052.
5. Yang L., Armani D.K., Vahala K.J. // Applied Physics Letters. 2003. Vol. 83, N 5. P. 825-826.
6. Polman A. // Journal of Applied Physics. 1997. Vol. 82, N 1. P. 1–38.
7. Podhorodecki A., Banski M., Misiewicz J. et al. // Journal of The Electrochemical Society. 2010. Vol. 157. P. H628-H632.

ЧАСТОТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ МНОГОСЛОЙНЫХ СТРУКТУР МЕТАЛЛ/ДИЭЛЕКТРИК

В.А. ПЕТРОВИЧ, В.В. БАРАНОВ, С.В. РЕДЬКО

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
ул. П. Бровки, 6, г. Минск, 220013, Республика Беларусь
ml.redkov@gmail.com*

Исследованы частотные зависимости иммитансных характеристик многослойных периодических структур «металл-диэлектрик» в частотном диапазоне 25 Гц – 1 МГц. Диэлектрик обладает релаксационными механизмами поляризации, свойственными церезину, воде и др. Выявлены области частот, где структура обладает как положительными, так и отрицательными значениями действительной части комплексной диэлектрической и магнитной проницаемости, а также отрицательным значением эффективного удельного сопротивления.

Ключевые слова: метаматериалы, комплексные электрофизические параметры, периодические композитные структуры.

За последние два десятилетия наблюдается резкий рост исследований, посвященных изучению материалов, имеющих отрицательное значение действительной части комплексного коэффициента оптического преломления n [1]. Величина n определяется как $\sqrt{\epsilon\mu}$. Здесь ϵ и μ – действительные части комплексных диэлектрической и магнитной проницаемостей соответственно. В том случае, когда ϵ и μ – положительные числа, величина n также положительна. Этот случай соответствует природным материалам. В том случае, когда ϵ и μ одновременно являются отрицательными, знак n тоже должен быть отрицательным, как этого требуют фундаментальные уравнения Максвелла и векторная форма уравнения Пойнтинга:

$$[\mathbf{K} \times \mathbf{E}] = \frac{\omega}{c} \mu \mathbf{H}, \quad [\mathbf{K} \times \mathbf{H}] = \frac{\omega}{c} \epsilon \mathbf{E}, \quad \mathbf{S} = [\mathbf{E} \times \mathbf{H}],$$

где ω – круговая частота, c – скорость электромагнитной волны в вакууме.

Искусственно созданные периодические решетки из отрезков проводников или рассеянных кольцевых проводников обеспечивают в первом случае отрицательное значение ϵ , а во втором случае – отрицательное значение μ . Совокупность этих двух решеток обеспечивает отрицательное значение n . При этом важно то, что уже созданные структуры с отрицательным n функционировали при частотах порядка 1 – 100 ГГц, что затруднительно для их экспериментальных исследований [2].

В настоящей работе исследовали многослойную структуру «металл-диэлектрик». Она представляла собой чередующиеся пластинки алюминиевой фольги и электрокартона толщиной 10 и 20 мкм соответственно. Электрокартон был пропитан полярной пастой церезин. Из чередующихся алюминиевых пластин была сформирована встречно-штыревая конденсаторная структура, аналогичная встречно-штыревым преобразователям, используемым в акустоэлектронике. Количество чередующихся слоев составило 600 единиц при площади каждого слоя 50 см².

Регистрацию иммитансных характеристик осуществляли в диапазоне частот 25 Гц – 1 МГц с помощью прибора Е7-25.

На частотах 25 – 100 Гц $C_S = C_P = 15$ мкФ, $R_S = 520$ Ом, $R_P = 48$ кОм, $\text{tg}\delta = 0,005$, $|Z| = 108$ Ом, $\varphi = -89,7^\circ$. Совокупность этих данных указывает на то, что изготовленная структура на низких частотах представляет собой конденсатор с «хорошим» диэлектриком.

В диапазоне частот 200 – 320 кГц наблюдается переход значений C_S и C_P из области положительных значений (частоты до 270 кГц) в область отрицательных значений (частоты свыше 270 кГц). В совокупности с величиной и знаком угла сдвига фаз φ , можно утверждать следующее: структура до частоты 270 кГц обладает емкостным характером с положительной ϵ , а далее – отрицательной. Это же положение применительно к магнитной проницаемости, выглядит так: до частоты 270 кГц величина μ отрицательна, а затем она становится величиной положительной.

В целом иммитансные характеристики, представленные на рис. 1, согласуются с аналогичными характеристиками резонансных последовательных (для рис. 1, а) и параллельных (для рис. 1, б) колебательных контуров (здесь не приводятся).

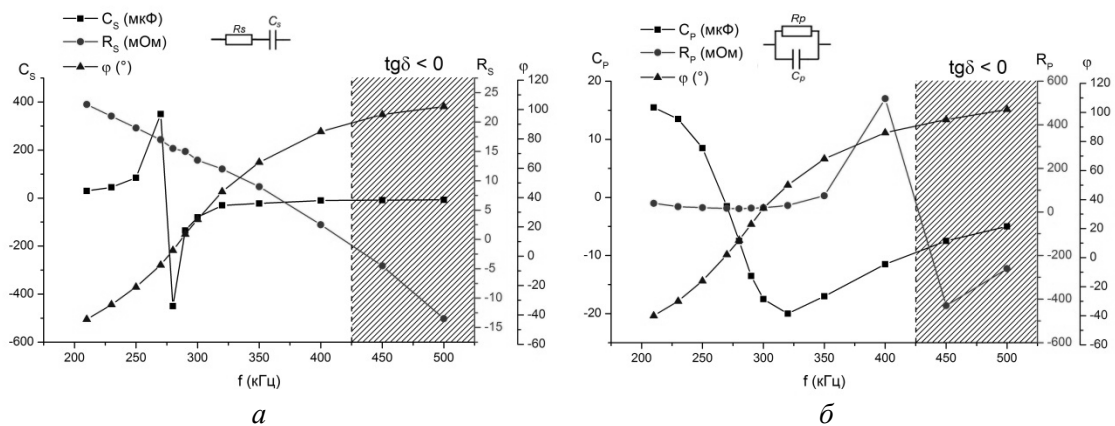


Рис. 1. Иммитансные характеристики многослойной структуры для последовательной (а) и параллельной (б) схемы замещения

Существенным отличием представленных зависимостей на рис. 1 от аналогичных зависимостей для обычных LC- контуров является наличие отрицательных значений R_S , R_P , а так же угла сдвига фаз φ свыше 90° (заштрихованные области на рис. 1). Этот факт указывает на то, что многослойная структура металл/диэлектрик на частотах свыше 420 кГц является не потребителем, а источником активной энергии P . При $R_{S(P)} > 0$ $P = \frac{U^2}{R_{S(P)}} = I^2 R_{S(P)}$ и является величиной положительной. Знак P меняется на минус, когда $R_{S(P)} = \rho \frac{1}{S} < 0$, т.е. при $\rho < 0$, где ρ – эффективное удельное сопротивление структуры.

Предложена модель, объясняющая поведение многослойной структуры.

Представленные материалы исследований используются в учебном процессе БГУИР на кафедрах МНЭ и ПИКС.

Список литературы

1. Веселаго В.Г. // Электродинамика материалов с отрицательным коэффициентом преломления. Успехи физических наук. 2003. Т.173. № 7. С. 790–794.
2. Воронов В.К., Подоплелов А.В. Современная физика: конденсированное состояние. М. ЛКИ. 2008. С. 18–23.

ФОРМИРОВАНИЕ И СВОЙСТВА ФОТОКАТАЛИТИЧЕСКИ АКТИВНЫХ ТОЛСТЫХ ПЛЕНОК С ДИОКСИДОМ ТИТАНА

К.В. АШУРКЕВИЧ, В.Е. БОРИСЕНКО

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
ул. П. Бровки, 6, г. Минск, 220013, Республика Беларусь
orson@tut.by*

Приведены результаты разработки и исследования технологии формирования фотокаталитически активных пористых пленок толщиной порядка 20 мкм путем вжигания пасты из порошка нанодисперсного диоксида титана и натриевого жидкого стекла на стеклянных подложках при 200 – 400 °С. Показано, что повышение пористости уже воженных пленок может быть осуществлено путем химического растравливания в них пор и межблочных границ, увеличивая таким образом эффективную поверхность до 30 м²/г. Фотокаталитическая активность сформированных таким образом пленок подтверждена результатами разложения органического красителя – метиленового синего, в водном растворе, подвергнутом ультрафиолетовому облучению.

Ключевые слова: толстые пленки, диоксид титана, фотокаталитическая активность.

Диоксид титана (TiO₂) является одним из наиболее простых по технологии получения и в тоже время эффективным для фотокаталитических применений материалом [1]. Значительные усилия направлены на разработку технологии получения этого материала, пригодную для массового производства фотокаталитических систем, в особенности для очистки воды и воздуха от органических загрязнений.

Пленки из диоксида титана получают различными способами, среди которых наиболее часто используются электрохимическое оксидирование титана [2] и золь-гель технология.

Вместе с этим, наиболее простым и экономически выгодным способом получения фотокаталитических поверхностей, на наш взгляд, является толсто пленочная технология. Она широко используется для производства пассивных компонентов интегральных микросхем (резисторы, конденсаторы, межсоединения). Однако ее применение для создания фотокаталитически активных толстых пленок на основе диоксида титана остается малоизученным.

Целью проведенной нами работы явилось экспериментальное отыскание таких соотношений компонентов исходной толсто пленочной композиции, включающей диоксид титана, которые обеспечили бы формирование из нее фотокаталитически активных толстых пленок после вжигания при температуре не выше 500 °С.

Экспериментальные толсто пленочные композиции (пасты) составляли из нанодисперсного порошка диоксида титана (Degussa P25, размер частиц TiO₂ ~ 25 нм, 80% анатаз и 20% рутил) и натриевого жидкого стекла (ГОСТ 13078-81). Была подготовлена серия образцов с содержанием TiO₂ 20, 25 и 30 мас.%. Смешивание компонентов и гомогенизацию пасты проводили агатовым пестиком в агатовой ступке.

В качестве подложек использовали стеклянные пластинки размером 25x75 мм толщиной 1 мм. Их подготовка включала: обезжиривание в этиловом спирте 10 мин при комнатной температуре, обработку в хромовой смеси (K₂Cr₂O₇ + H₂SO₄) в течение 10 мин при комнатной температуре, промывку в дистиллированной воде и сушку на воздухе при 100 °С.

После нанесения пасты подложки с нанесенной пленкой подвергали термообработке при 200, 250, 300, 350 и 400 °С в течение 20 мин на воздухе. Толщина сформированных таким образом пленок составляла около 20 мкм. Структуру поверхности сформированных пленок исследовали с использованием растровой электронной микроскопии (РЭМ), элементный состав – рентгеновским энергодисперсионным анализом, фазовый состав – рентгеновским дифракционным анализом. Температура вжигания, является одним из главных технологических факторов, определяющих структуру толстых пленок. Ее роль иллюстрируют приведенные на рис. 1 РЭМ-изображения поверхности пленок.

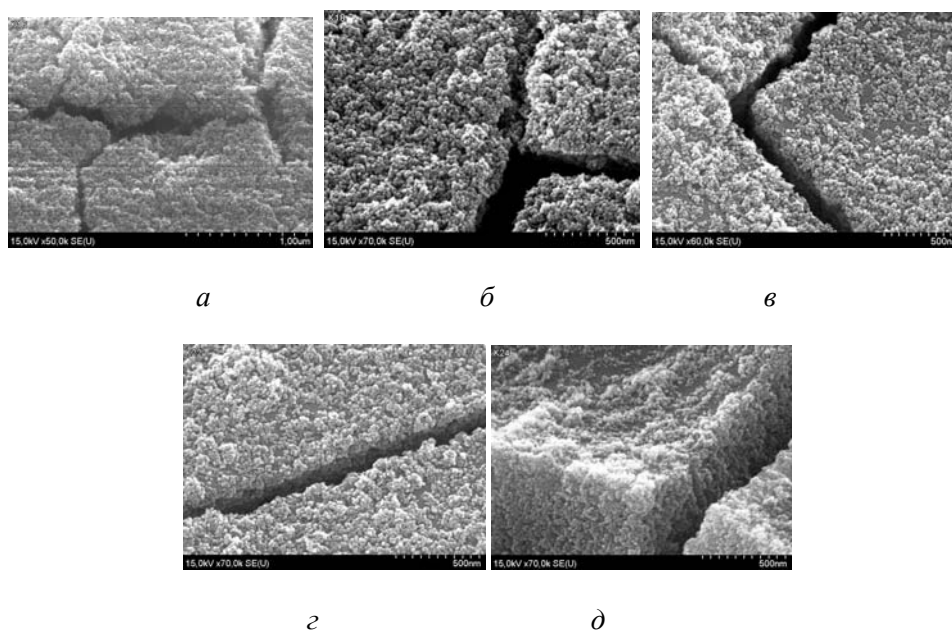


Рис. 1. Поверхность толстых пленок, содержащих 25 мас.% TiO_2 , вожженных при 200 °С (а), 250 °С(б), 300 °С (в), 350 °С (г) и 400 °С (д) на воздухе в течение 20 мин и подверженных травлению в 5 % растворе плавиковой кислоты в течение одной минуты

Анализ РЭМ-изображений показывает, что уже при 200 °С формируется приемлемая пористая структура толстой пленки.

В заключении отметим, что разработан простой и эффективный метод создания неорганических пористых пленок, содержащих наноструктурированный диоксид титана, по толстопленочной технологии. В состав пастообразной композиции, используемой для формирования таких пленок, входит натриевое жидкое стекло (ГОСТ 13078-81) и нанодисперсный порошок диоксида титана (Degussa P25). Создаваемые таким образом пленки принципиально пригодны для фотокаталитической очистки воды.

Список литературы

1. *Carp O., Huisman C. L., Reller. A.*// Prog. Sol. State Chem. 32, 33-177 (2004).
2. *Gong D. C., Grimes A.O., Varghese K.W., и др.* // *J. Mat. Res.* 16, 3331-3334 (2001).

СТРУКТУРА И ОПТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ТОНКИХ ПЛЕНОК ТЕЛЛУРА

Б.С. КОЛОСНИЦЫН, И.А. СИЦКО

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
ул. П. Бровки, 6, г. Минск, 220013, Республика Беларусь
irina_sitsko@mail.ru*

К новым материалам, которые используются в накопителях информации, относятся пленки халькогенидных стеклообразных полупроводников (ХСП), в состав которых входит теллур. Для прогнозирования параметров ЭСППЗУ с накопителем на ХСП, необходимо исследовать электрофизические и оптические характеристики пленок теллура.

Ключевые слова: ХСП, ЭСППЗУ, накопитель информации, дифрактограмма.

Рентгеноструктурный анализ пленок теллура проводили на автоматизированной установке «Дрон-3М» в монохроматизированном свете при помощи никелевого фильтра медном СиК-а излучении.

Как показали рентгеноструктурные исследования, для пленок толщиной $d=200$ нм и скорости осаждения $V=0,5$ нм/с на дифрактограммах максимальным был пик 1011. При увеличении скорости осаждения величина пика 1011 сначала ослабевала, проходя через минимум при $V=2,5$ нм/с, а затем резко усиливалась (рис. 1). В диапазоне скоростей $V=2,0\div 3,0$ нм/с уже пик 1010 превалировал над остальными пиками, что говорит о преимущественной ориентации зерен в тонких пленках призматическими плоскостями, параллельными поверхности подложки.

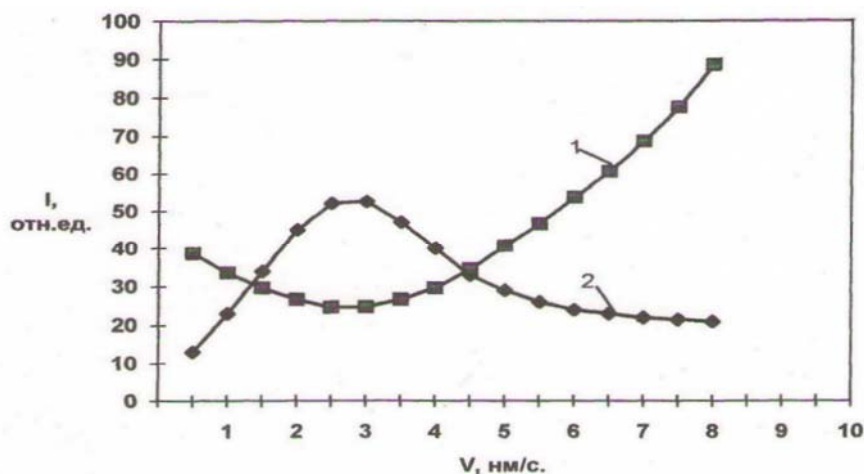


Рис. 1. Изменение интенсивностей пиков 1011 (1) и 1010 (2) в зависимости от скорости осаждения для пленок толщиной $d = 200$ нм

Таким образом, исходя из рентгеноструктурных исследований предварительно можно сделать следующие выводы:

1. На начальной стадии конденсации растут кристаллы без азимутальной ориентации с осью С, параллельной поверхности подложки. Это говорит о том, что кинетика зарождения пленок на начальной стадии конденсации обусловлена отсутствием цен-

тров кристаллизации. Такой текстурный рост обычно характеризуют как кольцевой азимутально неограниченный относительно главной оси.

2. С увеличением толщины пленок наблюдается переход к преимущественному развитию кристаллов, ориентированных главной осью близко к нормали поверхности подложки.

Необходимо отметить, что рентгеноструктурные исследования выявили общую тенденцию роста пленок на ситалловых подложках. Поэтому из анализа снимков, сделанных методом просвечивающей микроскопии, можно констатировать, что за текстуру на начальной стадии роста пленок несут ответственность плоские кристаллы, размер зерен которых увеличивался с ростом скорости осаждения от $V=0,5$ нм/с до $V=3,0$ нм/с. При дальнейшем увеличении скорости осаждения ($V>3,0$ нм/с) размеры зерен уменьшались. Электроннограммы от пленок Те также подтверждают вышеуказанную закономерность роста плоских кристаллов, хотя полная индексация всех линий сложна ввиду присутствия дополнительных отражений от окислов теллура.

Измерение края оптического поглощения проводили на инфракрасном спектрофотометре ИКС – 22 с использованием стеклянной призмы Ф1 и призмы NaCl.

Для исследования оптических свойств тонких пленок теллура, их толщиной $d\approx 50,0$ нм осаждали на пластины из полированного кварца со скоростями $V=1,0\dots 10,0$ нм/с.

Из анализа спектральной зависимости оптического поглощения пленок теллура в высокочастотном диапазоне, т.е. там, где происходят межзонные электронные переходы, видно, что величина ширины оптической запрещенной зоны теллура, пленки которого получены в диапазоне скоростей $V=1,0\dots 10,0$ нм/с, составляет $0,42$ эВ. Край оптического поглощения практически не изменяется с увеличением скорости осаждения. При этом следует отметить, что четко проявляется «размытость» края поглощения у пленок, осажденных со скоростью $10,0$ нм/с, т.е. коэффициент поглощения постепенно возрастает в диапазоне энергий $0,5\dots 1,1$ эВ (так называемый «край Урбаха»).

Под правилом Урбаха первоначально понимали зависимость, описывающую выражение для спектра межзонного поглощения

$$I(E) \sim \exp[-\sigma(E_g - E)/kT], \quad (1)$$

где E – разность энергий начального и конечного состояний электронов, которая характеризуется температурной зависимостью спектров электронного поглощения в изоляторе.

Для аморфного же полупроводника кривая хвоста Урбаха от температуры фактически не зависит.

Не вызывает сомнений тот факт, что хвост Урбаха обязан своим происхождением беспорядку. В случае кристаллов – это динамический беспорядок, источником которого выступает обусловленное решеточными колебаниями электрон-фононное взаимодействие. Флуктуации потенциала, вызванные колебаниями решетки, распределены по закону Гаусса. В аморфных полупроводниках распределение флуктуации потенциала, вызванных неупорядоченностью длин и углов между связями, также можно считать нормальным.

ФОТОКАТАЛИТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ДИОКСИДА ТИТАНА И ЕГО ПРИМЕНЕНИЕ

А.С. КОМАРОВ

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
ул. П. Бровки, 6, г. Минск, 220013, Республика Беларусь
ak.komarov@gmail.com*

Использование наноструктурированных материалов находит применения во всех сферах нашей жизни. Благодаря своим фотокаталитическим свойствам, диоксид титана является одним из самых перспективных материалов для стерилизации очистки от органических соединений. В данной работе изучены свойства и возможные сферы применения диоксида титана.

Ключевые слова: диоксид титана, фотокаталитические свойства, стерилизация, дезинфекция.

Большое число полупроводниковых материалов, которые используются в качестве фотокаталитических веществ, являются окислами металлов TiO_2 , SnO_2 , Fe_2O_3 , WO_3 , In_2O_3 , ZnO , CdO . Такие материалы используются во многих процессах, в том числе для очистки воды и воздуха от органических загрязнений [1], а также для уничтожения бактерий [2]. Например, для дезинфекции воды традиционно используют ультрафиолетовое (УФ) излучение, а также целый ряд химических средств (хлор- и фенолсодержащие препараты, др.). В то же время перечисленные антимикробные агенты имеют целый ряд недостатков: УФ-излучение характеризуется низкой проникающей способностью, хлор- и фенолсодержащие препараты нестабильны, взаимодействуют с обрабатываемыми материалами, а их длительное использование может привести к искусственному отбору устойчивых форм микроорганизмов.

Диоксид титана выгодно отличается высокой fotocувствительностью и обладает приемлемой шириной запрещенной зоны ($E_g = 3,2 \text{ eV}$). Поскольку он также является химически и биологически инертным и имеет низкую стоимость, он принадлежит к числу наиболее часто используемых фотокатализаторов.

Появление уникальной фотокаталитической активности у мезопористых образцов диоксида титана было продемонстрировано в 2004 году, что предопределило возросший интерес к получению экологически безопасных фотокатализаторов, способных разрушать практически любые органические соединения. В 2009 г. были получены мезопористые покрытия на основе TiO_2 , которые обладали такими же высокими каталитическими свойствами. Эти свойства проявлялись благодаря толстым стенкам пор и высокой кристалличности [3].

Сейчас диоксид титана все чаще используется в качестве материала для фотокаталитической стерилизации в медицинской и пищевой промышленности, а также для решения экологических проблем [4]. Обработка сочетанием окиси титана с ультрафиолетовым облучением является одной из лучших дезинфекционных технологий, поскольку при этом, в отличие от других дезинфекционных технологий не образуются опасных (канцерогенных, мутагенных, плохо пахнущих) соединений.

TiO_2 обычно существует в виде трех кристаллических структур: рутит, брукит и анатаз. Наименее стабильной фазой является брукит, к тому же его очень трудно получить. Вероятно, по этой причине брукит редко используется в фотокаталитических исследованиях. Большинство таких исследований проводилось для чистого анатаза, чистого рутила или для смеси этих двух фаз. Часто наиболее фотокаталитичной фазой счи-

тают анатаз. Однако смесь анатаза с рутилом проявляет лучшие фотокаталитические свойства для большего числа органических соединений [5].

Процесс фотокаталитического окисления на поверхности TiO_2 происходит только, если пленка облучается светом (или другим источником облучения) с энергией выше ширины запрещенной зоны. На первом этапе процесса под воздействием фотона, в зоне проводимости появляется электрон, оставляющий дырку в валентной зоне. На втором этапе дырки реагируют с адсорбированными частицами с образованием радикалов. Большинство радикалов являются нестабильными объектами, они исчезают, реагируя с другими, частицами или разлагаются. Обычно конечным продуктом являются простые молекулы. Если объектом фотоокисления являются органические соединения, конечными продуктами являются, в основном, CO_2 , вода и малые полярные молекулы. Бактерицидное воздействие TiO_2 под воздействием ультрафиолетового излучения было исследовано на многих опасных бактериях и вирусах, известных в больничной практике. В случае *Escherichia coli*, обработка разрушает как живые ячейки, так и эндотоксин, возникающий при их гибели [6]. Последний эффект особенно важен так, как эндотоксин неблагоприятно влияет на человека даже в сверхнизкой концентрации.

По данным европейского патентного общества получено 4 патента на технологию стерилизации с применением диоксида титана, 3 из которых получены в 2013 году и 1 в 2009. Также зарегистрировано 4 патента, использующих бактерицидный эффект TiO_2 , в 2011 году. И 40 патентов использующие фотокаталитические свойства TiO_2 под воздействием ультрафиолетового излучения. Большая часть патентов приходится на заявителей из Китая и Японии, это связано с необходимостью разработки новых способов очистки воды и дезинфекции в странах с большой плотностью населения.

Таким образом, можно сделать вывод о значимости проведения исследований по изучению фотокаталитических свойств TiO_2 для его дальнейшего применения в устройствах по стерилизации и дезинфекции.

Список литературы

1. *Хороших В.М., Белоус В.А.*, Пленки диоксида титана для фотокатализа и медицины // ФИП. 2009. Т.7, №3, С. 223–238.
2. *Xu M., Huang N., Xiao Z., Lu Z.*, Photoexcited TiO_2 nanoparticles through $\cdot\text{OH}$ -radicals induced malignant cells to necrosis // *Supramol. Sci.* – 1998. – Vol. 5. – P. 449–451.
3. *Tanaka K., Capule M. F. V., Hisanaga T.* Effect of crystallinity of TiO_2 on its photocatalytic action // *Chem. Phys. Lett.* – 2010. – Vol. 129. – P. 73–78.
4. *Sclafani A., Herrmann J. M.*, Comparison of the photoelectronic and photocatalytic activities of various anatase and rutile forms of titanium in pure liquid organic phases and in aqueous solutions // *J. Phys. Chem.* – 1996. – Vol. 100. – P. 13655–13661.
5. *Guillard C., Disdier J., Herrmann J.-M., Lechaut C., Chopin T., Malato S., Blanco J.*, Comparison of various titanium samples of industrial origin in the solar photocatalytic detoxification of water containing 4-chlorophenol // *Catalysis Today.* – 1999. – Vol. 54. – P. 217–228.
6. *Ibanez J.A., Litter M.I., Pizarro R.A.*, Photocatalytic bactericidal effect of TiO_2 on *Enterobacter cloacae* // *J. Photochem. Photobiol. A Chem.* – 2003. – Vol. 157. – P. 81–85.

ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИЗМА ФОРМИРОВАНИЯ НАНОПОРИСТЫХ МАТРИЦ НА ОСНОВЕ АНОДНОГО Al_2O_3 ПРИ ДВУХСТОРОННЕМ СКВОЗНОМ АНОДИРОВАНИИ

Д.Л. ШИМАНОВИЧ, В.А. СОКОЛ, Д.И. ЧУШКОВА

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
ул. П. Бровки, 6, г. Минск, 220013, Республика Беларусь
ShDL@tut.by*

Разработаны технологические способы и особенности формирования пористых наноразмерных матриц на основе двухслойных Al_2O_3 мембран толщиной 73-216 мкм с диаметром пор ~55 нм с использованием двухстороннего сквозного анодирования в электролите щавелевой кислоты и последующего биполярного анодирования. Получена высокая формо- и трещиностойчивость бимембран при высокотемпературных воздействиях, коэффициент объемного роста при превращении Al в Al_2O_3 составил ~1,44-1,46.

Ключевые слова: алюминий, электрохимическое анодирование, пористый оксид алюминия, барьерный слой, биполярное анодирование, бимембрана, наноструктурированный материал.

Объект исследований – наноструктурированные бимембранные матрицы на основе свободных двухслойных пленок пористого Al_2O_3 , сформированные методом двухстороннего сквозного анодирования и последующей обработкой биполярным анодированием. Перспективность их использования определяется высокоупорядоченным наноструктурным характером их ячеисто-пористой морфологии, которая может контролироваться электрохимическими и температурными режимами при проведении электрохимического процесса анодирования. Мембраны на основе свободных пленок Al_2O_3 , полученные двухстадийным, но односторонним анодированием Al фольги и химическим удалением остаточного Al, широко освещены в научных изданиях [1, 2]. Однако такая методика обладает недостатками, связанными с необходимостью маскирования одной из сторон Al, необходимостью химического травления непроанодированного Al, получением неплоскостных с признаками коробления Al_2O_3 мембранных структур из-за механических напряжений на границе роста Al- Al_2O_3 , отсутствием формоустойчивости таких мембран при высокотемпературных испытаниях и эксплуатации, наличием у широкоформатных мембран разброса по толщине. В настоящей работе представлены технологические приемы формирования бимембранных матриц на основе Al_2O_3 с использованием двухстадийного двухстороннего анодирования до полного сквозного прокисления исходных Al пластин. Однако основная проблема при таком подходе связана с высокими требованиями к степени шероховатости и качеству обработки поверхности исходного Al материала, иначе на заключительной стадии глубокого сквозного двухстороннего анодирования возникает эффект отсечки подвода потенциала, приводящий к появлению локальных недоанодированных Al включений внутри свободных Al_2O_3 бипластин в области стыка двух встречных барьерных слоев. Ликвидация Al вкраплений осуществлялась применением биполярного анодирования после основной стадии глубокого сквозного анодирования.

В качестве исходного материала использовалась Al фольга (99,99 %) толщиной ~60, 110, 160 мкм. После многократной прокатки через полированные валики осуществлялась ее терморихтовка для снятия механических напряжений, увеличения параметров пластичности и далее штамповкой формировались образцы размером 60×48 мм.

Для сглаживания и устранения микронеровностей проводилась электрохимическая полировка Al в электролите на основе хлорной и уксусной кислот (22 % : 78 %) при $T \sim 7-9^\circ\text{C}$ при $U \sim 25-27\text{ В}$ в течение 1 мин. После проведенных операций толщина Al пластин составляла $\sim 50, 100, 150\text{ мкм}$. Процесс двухстороннего анодирования проводился в две стадии в 7 % электролите $\text{H}_2\text{C}_2\text{O}_4$ при $T \sim 16-18^\circ\text{C}$ при постоянном напряжении $\sim 55\text{ В}$. Предварительная стадия анодирования длилась ~ 10 мин с последующим селективным химическим травлением сформированного Al_2O_3 в растворе $\text{CrO}_3:\text{H}_3\text{PO}_4:\text{H}_2\text{O}$ при 85°C в течение 5 мин, в результате чего поверхность Al наследовала упорядоченную матрицу рельефных наноточек пористого Al_2O_3 . Последующая стадия анодирования Al с таким текстурированием приводила к формированию Al_2O_3 с высокой степенью упорядоченности. Процесс глубокого двухстороннего сквозного пористого анодирования проводили до падения силы тока в электрохимической ванне практически до нуля при смыкании двух встречнорастущих оксидных слоев. В результате были сформированы свободные анодные наноструктурированные бипластины с толщиной двухслойного $\text{Al}_2\text{O}_3 \sim 73, 145, 216\text{ мкм}$, диаметром симметрично расположенных двухсторонних пор $\sim 55\text{ нм}$, общей толщиной барьерных слоев $\sim 140\text{ нм}$, но с наличием дефектных локальных Al включений произвольной формы и разной величины (рис. 1, а). Коэффициент объемного роста при превращении Al в Al_2O_3 составил $\sim 1,44-1,46$. На рис. 1, б продемонстрировано СЭМ фото, характеризующее упорядоченную матрицу входных отверстий нанопор одной из поверхностей свободной Al_2O_3 бипластины.

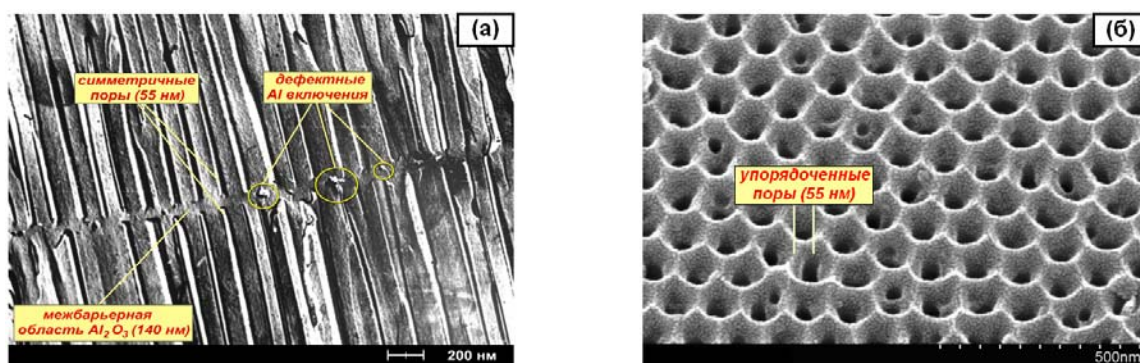


Рис. 1. СЭМ фото свободной Al_2O_3 бимембранной матрицы толщиной $\sim 145\text{ мкм}$, полученной двухсторонним сквозным анодированием: а – поперечное сечение; б – вид сверху

Основная идея метода биполярного анодирования заключалась в использовании двухкамерной электролитической ванны, где образец свободной Al_2O_3 биструктуры, но с дефектными зонами токопроводящих Al вкраплений внутри нее, помещался как изолирующая перегородка, с одной стороны которой использовался электролит анодирования (7 % $\text{H}_2\text{C}_2\text{O}_4$), а с другой стороны – буферный электролит (10 % CuSO_4). В первую из камер помещался катод (-), во вторую – анод (+). При включении тока ($U \sim 55\text{ В}$) на одной стороне бипластины напротив Al включений появлялся положительный заряд, она становилась анодом, и проходил процесс анодного доокисления (анодирования) этих включений.

Список литературы

1. Шиманович Д.Л., Чушкова Д.И., Сокол В.А. // Матер. Всерос. молодежн. конф. «Химия поверхности и нанотехнология». Казань, 10-11 октября 2012 г. С. 59-61.
2. Сокол В.А., Яковцева В.А., Шиманович Д.Л. // Докл. БГУИР. 2012. № 2 (64). С. 21-27.

ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ ДИОКСИДА ТИТАНА В ПОРИСТОМ КРЕМНИИ *p*-ТИПА ПРОВОДИМОСТИ

Н.М. ДЕНИСОВ, В.Е. БОРИСЕНКО

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
ул. П. Бровки, 6, г. Минск, 220013, Республика Беларусь
waefae@gmail.com*

Получены структуры пористый кремний/диоксид титана по золь-гель технологии, в которых пористый кремний был сформирован на монокристаллических кремниевых пластинах с *p*-типом проводимости, а диоксид титана был получен из Ti-содержащего золя. Формирование TiO₂ в пористом кремнии преимущественно в фазе анатаза подтверждено данными рентгеноструктурного анализа.

Ключевые слова: золь-гель метод, диоксид титана, пористый кремний.

Диоксид титана (TiO₂) считается практически идеальным полупроводником для использования в качестве фотокатализатора благодаря его высокой стабильности, низкой стоимости и безопасности для человека и окружающей среды [1].

Морфология и кристаллическая структура TiO₂ сильно влияет на эффективность его применения [2]. Структуры с развитой поверхностью и высокой пористостью, обеспечивающие большую площадь контакта фотокатализатора с очищаемой средой, демонстрируют наилучшие результаты в этом отношении [3, 4]. Как показано в [5], материал подложки не менее важен, поскольку определяет зонную структуру гетероперехода TiO₂/подложка и может, как увеличить, так и уменьшить фотокаталитическую активность и эффективность фотоэлектрического преобразования.

Целью данной работы является получение структур диоксид титана/пористый кремний по золь-гель технологии, исследование их структуры, фазового и элементного состава.

Пористые слои были сформированы на пластинах монокристаллического кремния с проводимостью *p*-типа и объемным сопротивлением 0,005 Ом·см. Для этого анодное травление этих пластин производили в 10 % водном растворе HF при плотности тока 15 мА/см² в течение 90 с при комнатной температуре и постоянном перемешивании электролита. Часть образцов с пористым слоем подвергали окислению на воздухе (500 °С, 20 мин) после чего образовавшийся оксид кремния стравливали в 5 % растворе HF.

Золь для формирования TiO₂ включал 1.197 г тетраизопропоксида титана (Ti(*i*-OC₃H₇)₄), 8 мл монометилового эфира этиленгликоля (НОСН₂СН₂ОСН₃) и азотную кислоту для установления pH = 1.

Нанесение золя на подложки производили методом центрифугирования (2700 об/мин 30 с), затем следовала их сушка и отжиг (200 °С, 5 мин; 500 °С, 10 мин).

На рис. 1 *a* показана структура пористого кремния после формирования на нем пленки диоксида титана. Исходный слой пористого кремния имеет губчатую структуру, что типично для кремния с *p*-типом проводимости, анодно протравленном в HF [6]. Формирование на пористом слое пленки TiO₂ сопровождается заполнением пор этим материалом, что заметно по уменьшению объема пор.

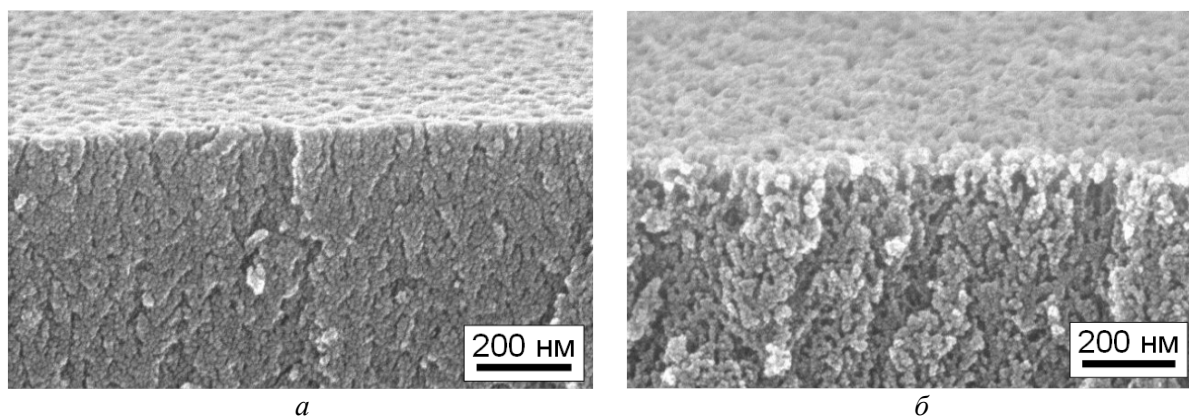


Рис. 1. Структур пористый кремний/диоксид титана с TiO_2 , полученным:
a – в свежесформированном пористом кремнии, *б* – в предварительно окисленном
и протравленном в HF пористом кремнии

Окисление исходного пористого кремния с последующим растворением окисленного слоя кремния в HF приводит к увеличению размера пор до 30 – 50 нм.

Пленку TiO_2 в структуре пористого кремния сложно идентифицировать по СЭМ фотографиям, однако по визуальному изменению объема пор ее толщину можно оценить величиной порядка нескольких нанометров.

Проведенные рентгеноструктурные исследования экспериментальных образцов обнаружили присутствие TiO_2 преимущественно в фазе анатаза. Энергодисперсионный анализ выявил наличие Si, Ti, O и C в пористых слоях. Установлено, что окисление пористого кремния и растворение оксидного слоя практически не влияет на содержание Ti в золь-гель сформированных структурах диоксид титана/пористый кремний.

Структуры диоксид титана/пористый кремний, исследованные в данной работе, являются перспективными для применения в качестве фотокатализаторов, поэтому планируются дальнейшие исследования их фотокаталитической активности.

Список литературы

1. *Gupta Shipra Mital, Tripathi Manoj.* A review of TiO_2 nanoparticles // *Physical Chemistry*. 2011. V.56, № 16. P. 1639-1657.
2. *Memesa M., Lenz S., Emmerling S., Nett S., Perlich J., Muller-Buschbaum P., Gutmann J.* Morphology and photoluminescence study of titania nanoparticles // *Colloid. Polym. Sci.* 2011. № 289. P. 943-953.
3. *Купреева О. В., Лазарук С. К., Борисенко В. Е., Кун Л., Канг Т. Б.* Фотокаталитические свойства наноструктурированного диоксида титана // *Журнал прикладной спектроскопии*. 2012. Т.79. № 6. С. 1010-1013.
4. *Ашуркевич К. В., Николаенко И. А., Борисенко В. Е.* Формирование и свойства фотокаталитически активных толстых пленок с диоксидом титана // *Доклады БГУ-ИР*. 2012. № 6, С. 51-57.
5. *Linnik O., Smirnova N., Zhukovskiy M., Orekhovskaya T., Asharif A., Borisenko V., Gaponenko N.* Influence of support nature on photocatalytic activity of TiO_2 film // *Advanced Science, Engineering and Medicine*. 2013. Т. 5. № 4. С. 281-286.
6. *Borisenko V. E., Ossicini S.* What is What in the Nanoworld. Third, Revised and Enlarged Edition (Wiley-VCH, Weinheim, 2012), 601 p.

ПОЛУЧЕНИЕ И СВОЙСТВА НАНОЧАСТИЦ CuXTe_2 (X – In, Ga) В ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ МАТРИЦЕ

И.В. БОДНАРЬ, Н.П. СОЛОВЕЙ, А.П. МОЛОЧКО

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
ул. П. Бровки 6, г. Минск, 220013, Республика Беларусь
33770011@mail.ru*

Изучена возможность формирования наночастиц тройных полупроводниковых соединений CuInTe_2 , CuGaTe_2 в силикатных стеклах системы $\text{SiO}_2\text{-CaO-Na}_2\text{O}$. Показано, что при введении в состав стекла указанных соединений получены наноструктуры хорошего оптического качества. Исследовано оптическое поглощение низкоразмерных структур в видимой и ближней ИК областях спектра. Особенности спектров объясняются изменением типа кристаллической решетки сформированных наночастиц.

Ключевые слова: наночастицы, полупроводники, стеклянная матрица, квантово-размерный эффект.

Тройные полупроводниковые соединения CuInTe_2 , CuGaTe_2 являются перспективными материалами для различных устройств твердотельной электроники. Однако, прикладные возможности этих материалов значительно расширяются при переходе к нанобъектам, сформированных в различных средах. Вследствие пространственного ограничения движения квазичастицы экситона в таких материалах появляются новые размерно-зависимые свойства (двухфотонное поглощение, эффект квантования и т.д.), что вызывает значительный научный и практический интерес.

Возможность формирования наночастиц CuInTe_2 , в силикатном стекле показана нами ранее [1, 2]. Изучены условия синтеза, характер локализации, размеры, структура и оптические свойства наночастиц. Соединение CuGaTe_2 по сравнению с CuInTe_2 имеет более высокую температуру плавления 1145 К (для CuInTe_2 – 1060 К), температуру фазового перехода халькопирит-сфалерит 1050 К (для CuInTe_2 – 950 К). Ширина запрещенной зоны (E_g) равна 1,25 эВ для CuGaTe_2 (для CuInTe_2 – 0,96 эВ). Сведений об формировании наночастиц соединений CuGaTe_2 в матрице стекла не обнаружено.

В настоящей работе представлены результаты исследований условий формирования наночастиц полупроводникового соединения CuGaTe_2 в силикатном стекле, а также изучены их спектральные свойства. В то же время проведен сравнительный анализ спектральных свойств наночастиц CuInTe_2 , CuGaTe_2 в силикатной матрице.

В качестве стеклянной матрицы использовали систему $\text{SiO}_2\text{-CaO-R}_2\text{O}$ (R – Li, Na, K). Кристаллический CuGaTe_2 синтезировали из элементов двухтемпературным методом при температуре 1170 К с последующим длительным (в течение 240 ч.) гомогенизирующим отжигом, халькопиритная кристаллическая структура идентифицирована рентгенографически.

Формирование стекол с наночастицами CuGaTe_2 осуществляли таким же методом, что и для соединения CuInTe_2 , а именно, путем введения предварительно синтезированного соединения (0,75 мас.%) в стеклообразующую смесь указанных компонентов, высокотемпературного плавления (~1650 К) в восстановительной атмосфере и быстрого охлаждения. Об образовании наночастиц в стекле свидетельствовало появление характерной окраски (исходные стекла бесцветны). Результаты ранее проведенных ЭМ исследований стекол, содержащих НЧ CuInTe_2 , синтезированных таким же методом, подтверждают выделение нанокристаллической фазы. Частицы имеют форму, близкую

к сферической, расположены, в основном, изолированно, но в ряде случаев образуют цепочки и небольшие агрегаты, средний размер их находится в пределах 15-30 нм. Предполагается, что сформированные наночастицы CuGaTe_2 имеют такие же размеры.

Спектральными исследованиями установлено, что край полосы собственного поглощения таких материалов находится в области 0,6-1,6 мкм (рис. 1, а). В целом, спектры пропускания представляют пологие кривые с невысоким пропусканием (60 %).

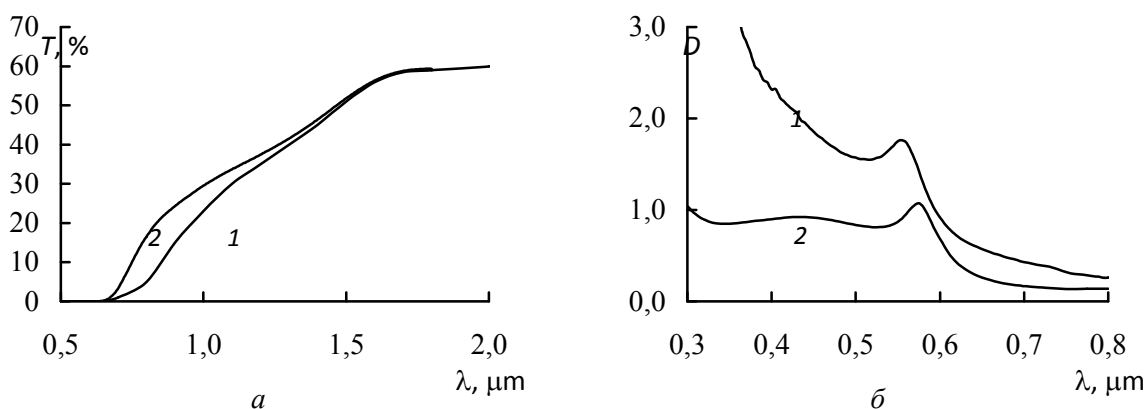


Рис. 1. Спектры пропускания (а) и спектры поглощения (б) стекол с наночастицами:
1 – CuInTe_2 ; 2 – CuGaTe_2

В стеклах с НЧ CuInTe_2 на спектральной кривой выраженных максимумов не обнаружено, что свидетельствует о том, что при переходе к наночастицам зонная структура не изменяется. Напротив, для стекол с наночастицами CuGaTe_2 на спектральной кривой обнаружен слабо выраженный максимум в области 850 нм. Следует отметить, что спектральные кривые в обоих случаях существенно смещены в область высоких энергий по сравнению с массивным материалом.

В видимой области на спектрах оптической плотности (рис. 1, б) установлен максимум в области 560-570 нм, который при переходе к НЧ CuGaTe_2 смещается в сторону длинных волн. Наблюдаемые на спектрах в видимой области максимумы можно отнести к проявлению экситонного перехода ($1s-1s$) в наночастицах, характерного для частиц с размерным эффектом. Высокоэнергетический сдвиг спектральной кривой и увеличение E_g может быть обусловлено образованием нанопазы с кубической решеткой (типа сфалерита). Рентгеновское исследование, проведенное нами ранее, указывает на такую возможность для этого класса соединений. В сфалеритной структуре с более высокой симметрией решетки плотность экситонных состояний ожидается выше, чем в халькопиритной, и существует вероятность вырождения ряда уровней, что сопровождается появлением экситонных максимумов на кривых оптической плотности. В то же время структура после синтеза стекол может не отвечать равновесному состоянию, что приводит к появлению дополнительных полос поглощения, в частности, слабо выраженного максимума в области 450 нм в видимой области (рис. 1, б, кривая 2) и в области 850 нм на ИК спектрах (рис. 1, а, кривая 2).

Разработанные материалы могут быть использованы для создания оптических фильтров и нелинейно-оптических элементов ближней ИК области.

Список литературы

1. Боднарь И.В., Гурин В.С., Соловей Н.П. и др. // ФТП. 2007. т. 41. вып. 8. С. 959 – 964.
2. Боднарь И.В., Гурин В.С., Соловей Н.П. и др. // Докл. БГУИР. 2010. № 4(50). С. 23 – 27.

ФОТОКАТАЛИТИЧЕСКОЕ РАЗЛОЖЕНИЕ ТЕТРАЦИКЛИНА ГИДРОХЛОРИДА В ПРИСУТСТВИИ СТРУКТУР Al/TiO_2 И $\text{Al/TiO}_2:\text{Au}$

О.П. ЛИННИК¹, М.А. ЖУКОВСКИЙ¹, Г.Н. СТАРУХ¹, Н.П. СМИРНОВА¹,
Н.В. ГАПОНЕНКО², А.М. АШАРИФ², Т.И. ОРЕХОВСКАЯ²

¹ Институт химии поверхности им. А.А. Чуйко НАН Украины,
ул. Генерала Наумова, 17, г. Киев, Украина

² Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
ул. П. Бровки, 6, г. Минск, 220013, Республика Беларусь
nik@nano.bsuir.edu.by

Синтезированы мезопористые пленки диоксида титана на алюминиевых подложках различной морфологии. Исследовано влияние типа подложки на адсорбционные и фотокаталитические свойства индивидуального и модифицированного наночастицами золота диоксида титана в виде тонких пленок, синтезированных золь-гель методом в процессе фотокаталитического разложения тетрациклина гидрохлорида.

Ключевые слова: диоксид титана, золь-гель синтез, фотокатализ, тетрациклина гидрохлорид.

Диоксид титана является актуальным материалом для применения в гетерогенном фотокатализе для устранения загрязнителей окружающей среды в связи с его низкой себестоимостью, высокой биологической совместимостью, стабильностью полупроводниковых свойств и возможностью проведения в присутствии диоксида титана одновременно реакций окисления и восстановления. Интересным представляется использование иммобилизованных фотокатализаторов, сформированных в виде тонких пленок диоксида титана на различных подложках, таких как стекло, керамика, сталь, мембраны пористого анодного оксида алюминия (ПАОА) и др. [1]. Пленки диоксида титана на мембранах ПАОА проявляют высокую фотокаталитическую активность в водных растворах органических красителей при облучении ультрафиолетом как вдоль каналов пор ПАОА, так и под углом 45° , с глубоким окислением красителя без образования устойчивых промежуточных продуктов реакции [2]. При модифицировании оксидных пленок наночастицами (НЧ) благородных металлов можно получить материалы с необычными оптическими, сенсорными, электрохимическими и каталитическими свойствами [3, 4].

Для изготовления фотокаталитически активных структур на алюминиевых подложках использовались пленки ПАОА, сформированные двухстадийным анодированием алюминиевой фольги в марки А99 в 5% растворе щавелевой кислоты при напряжениях 60 В, температуре 12°C . Текстурированные подложки алюминия были получены растворением ПАОА в растворе на основе ортофосфорной кислоты (30%) и хромового ангидрида (10%) при температуре $60-70^\circ\text{C}$. Мезопористые пленки диоксида синтезировались золь-гель методом [5] при совместном гидролизе тетраизопропоксида титана $\text{Ti}(\text{i-Pro})_4$ с добавлением триблоксополимера оксидов этилена и пропилена $(\text{PEO})_{20}(\text{PPO})_{70}(\text{PEO})_{20}$ (Pluronic P123). В качестве комплексообразователя использовался ацетил ацетон. Мольное соотношение компонентов в полученном золе составляет: $\text{Ti}(\text{i-Pro})_4:\text{P123}:\text{CH}_3\text{COCH}_2\text{COCH}_3:\text{H}_2\text{O}:\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}:\text{HClO}_4 = 1:0,05:0,5:1:40:1$. Пленки TiO_2 , модифицированные НЧ золота, синтезировались аналогично с добавлением ко всем

компонентам 0,25 М водного раствора тетрахлорауратной кислоты. Соотношение элементов в растворе составляло Ti:Au=1:0.01. Пленки наносились на подложки методом «dip-coating» со скоростью вытягивания 1,5 мм/с и отжигались при температуре 400 °С.

Для исследования фотокаталитической активности синтезированных структур их погружали в кварцевый реактор объемом 40 мл, содержащий водный раствор тетрациклина гидрохлорида (ТС) с концентрацией $2 \cdot 10^{-5}$ М (9,6 мг/л). Облучение проводили ртутной лампой (1000 Вт) при поддержании постоянной температуры реакционной смеси (20° С) без дополнительного насыщения системы кислородом. Уровень pH раствора составлял 6-7. Понижение концентрации ТС определялось изменением оптической плотности максимума поглощения при 358 нм, регистрируемым через каждые 20 мин. Спектры поглощения приведены на рис. 1.

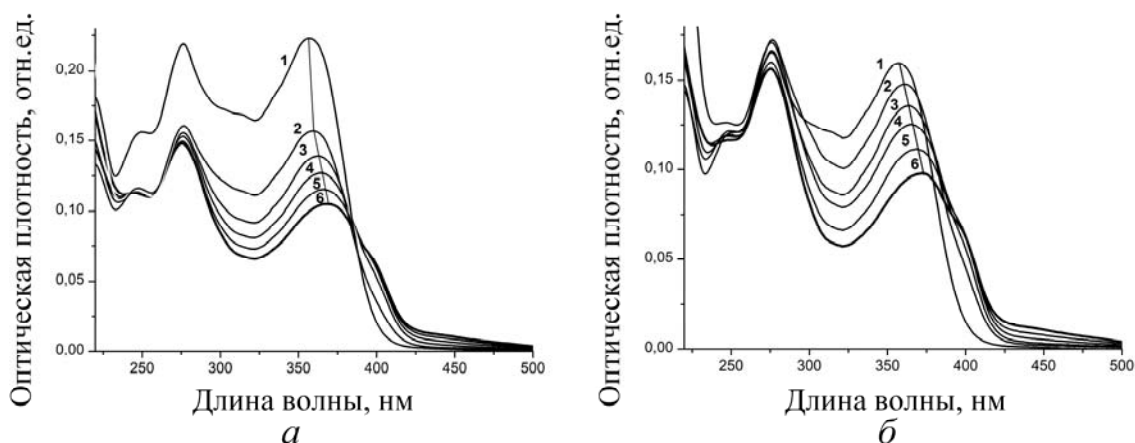


Рис. 1. Эволюция спектров поглощения тетрациклина в присутствии плёнок Al/TiO₂:Au (а), Al/Al₂O₃//TiO₂:Au (б): исходная концентрация (1); после адсорбции (2) и облучения в течение 20 мин (3), 40 мин (4), 60 мин (5), 90 мин (6)

Наличие инкорпорированных НЧ золота в матрице диоксида титана незначительно увеличивает эффективность процесса, что свидетельствует об образовании значительного количества рекомбинационных центров, как следствие влияния золота и подложки. При детальном анализе спектров поглощения тетрациклина, наблюдался заметное смещение максимума полосы с 357 нм до 360 нм после адсорбции в темноте, после 90 минут облучения до 370 нм для Al/Al₂O₃//TiO₂:Au и до 368 нм для Al/TiO₂:Au с уширением полосы поглощения со сдвигом края в видимую область.

Список литературы

1. N.V. Gaponenko, V.S. Kortov, N. P. Smirnova, T.I. Orekhovskaya, I.A. Nikolaenko, V.A. Pustovarov, S.V. Zvonarev, A.I. Slesarev, O. P. Linnik, M. A. Zhukovskii, V.E. Borisenko // *Microelectronic Engineering*. 2012. № 90. P.131–137.
2. Н.В. Гапоненко, Т.И. Ореховская, И.А. Николаенко, О.П. Линник, М.А. Жуковский, Н.П. Смирнова, С.Я. Прислоский // *Журнал прикладной спектроскопии*. 2010. № 77(3) С. 25-29.
3. N. Smirnova, V. Vorobets, O. Linnik, E. Manuilov, G. Kolbasov // *Surface and Interface Analysis*. 2010. Vol. 42. P. 1205-1208.
4. O. Linnik, N. Smirnova, O. Korduban, A. Eremenko // *Materials Chemistry and Physics* 2013. Vol. 142, P. 318-324.
5. O. Linnik, N. Smirnova, M. Zhukovskiy, T. Orekhovskaya, A. Asharif, V. Borisenko, N. Gaponenko // *Advanced Science, Engineering and Medicine*. – 2013. – Vol. 5, pp. 371–376.

ЭЛЕКТРОННЫЕ СВОЙСТВА КВАЗИДВУХМЕРНЫХ СТРУКТУР ХАЛЬКОГЕНИДОВ ПЕРЕХОДНЫХ МЕТАЛЛОВ V ГРУППЫ

О.А. КОЗЛОВА

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
ул. П. Бровки, 6, г. Минск, 220013, Республика Беларусь
olga.bsuir@gmail.com

Представлен анализ результатов теоретических и прикладных исследований по изучению электронных и магнитных свойств электронных свойств квазидвухмерных структур халькогенидов переходных металлов V группы (MeX_2 , где Me - V, Nb, Ta, X - S, Se, Te), в том числе, полученных с использованием первопринципных методов моделирования.

Ключевые слова: квазидвухмерные структуры, халькогениды переходных металлов, электронные свойства, микроэлектронные устройства.

В многообразии новых материалов особое место занимают материалы, имеющие наномасштабную структуру. Исследования последних лет продемонстрировали важную роль наноструктур в различных областях науки и техники. Важное место в дальнейшем прогрессе понимания и объяснения физических явлений, происходящих в наноразмерных объектах, принадлежит использованию *ab initio*, первопринципных методов моделирования.

Ультратонкие двухмерные структуры слоистых дихалькогенидов переходных металлов (ХПМ) технологически просты в производстве и эффективны в использовании. В отличие от графена, их электрохимические свойства универсальны. Структуры, состоящие из одного или нескольких слоев ХПМ, полученные посредством отслаивания объемных материалов или CVD-методом, - являются прямозонными полупроводниками, значение запрещенной зоны и тип носителя заряда которых, колеблется в зависимости от кристаллографической конфигурации, химического состава и размерности соединений. Таким образом, возможность модификации электронной структуры ХПМ делает их привлекательными для различных приложений микро- и наноэлектроники.

В дополнение к составу и кристаллографической конфигурации атомов в соединениях ХПМ, размерность играет решающую роль в определении их основных электронных свойств. Наиболее ярким примером проявления аналогичного поведения является графен, уникальные свойства которого отсутствуют в объемном графите [1–3]. Быстрые темпы исследования электронных свойств графена и разработанных методологий подготовки и получения сверхтонких слоев привело к освоению других двухмерных материалов [4]. В частности, монослои ХПМ структур, подобные структуре графита, получили значительное внимание, так как некоторые из них являются полупроводниками с значительной шириной запрещенной зоны и широко распространены в природе.

В слоистых структурах ХПМ V группы, каждый слой имеет толщину $6 \sim 7$ Å, который состоит из гексагонально упакованного слоя атомов металла между двумя слоями атомов халькогена. Связи М - X внутри слоя преимущественно ковалентные, слои соединены слабыми ван-дер-ваальсовыми силами, таким образом, возможно легко расщепить кристалл вдоль поверхности слоя. Соединения ХПМ V группы являются узкозонными полупроводниками или полуметаллами, характеризуются низким значением удельного электрического сопротивления ($\sim 10 - 6$ Ом·см) и периодическим перераспределением в пространстве электронного, ионного и суммарного зарядов (волна зарядовой плотности) [5]. Длина связи М — М в структурах ХПМ V группы изменяется в диапазоне от $3,15$ Å до

4,03 Å, в зависимости от размера ионов металла и халькогена. Эти величины на 15-25% больше, чем длины связей, в соединениях переходных металлов твердых веществ, что указывает на ограниченное энергетическое и пространственное перекрытие орбиталей в соединениях ХПМ. Кристаллографическая конфигурация металлов М в структуре ХПМ может быть как тригонально призматической, так и октаэдрической [6].

Разнообразный физико-химический состав квазидвухмерных структур на основе ХПМ предоставляет множество возможностей для использования электронных и магнитных свойств указанных соединений для широкого круга приложений микро- и наноэлектроники, в частности для устройств хранения энергии, каталитически активных элементов в оптоэлектронике, и в структурных компонентах микроэлектронных приборов. Однако остаются нерешенными ключевые проблемы, связанные с увеличением электрической проводимости и повышением стабильности квазидвухмерных структур, решение которых требует интеграции экспериментальных и теоретических исследований.

Список литературы

1. *Novoselov K. S. et al. // Science. 2011. Vol. 306. P. 666–669.*
2. *Castro Neto A. H., Guinea F., Peres N. M. R., Novoselov K. S., Geim A. K. // Rev. Mod. Phys. 2009. Vol. 81. P.109–162.*
3. *Geim A. K. // Science Vol. 2009. Vol. 324. P. 1530–1534.*
4. *Li H. et al. // Small. 2012. Vol. 8. P. 63–67.*
5. *Castro Neto A. H. // Phys. Rev. Lett. 2001. Vol. 86. P. 4382–4385.*
6. *Chhowalla M., Shin H.S., Eda G., Li L.-J., Loh K. P., Zhang H. // Nature chemistry. 2013. Vol. 5. P. 263–275.*

УДК 537.622.4

ФЕРРОМАГНЕТИЗМ НАНОСТРУКТУРИРОВАННОГО ОКСИДА ЦИНКА

М.С. ЗЕЛЕНИНА¹, О.А. КОЗЛОВА¹, В.Р. СТЕМПИЦКИЙ¹, В.В. БАРКАЛИН²

¹*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
ул. П. Бровки, 6, г. Минск, 220013, Республика Беларусь
nil44@bsuir.by*

²*Белорусский национальный технический университет
пр-т Независимости, 65, г. Минск, 220013, Республика Беларусь
barkaline@yahoo.com*

Помимо интересных электрофизических и оптических свойств, оксид цинка является материалом, проявляющим высокотемпературный ферромагнетизм. Ранее удавалось получать соединения на основе оксида цинка с температурой Кюри выше комнатной. Однако, результаты, полученные исследователями, не сводятся к единому выводу, а именно, если одна группа коллективов экспериментаторов получила проявление ферромагнетизма, то другая группа не смогла выявить его.

Ключевые слова: граница зерна, оксид цинка, ферромагнетизм.

Высокотемпературный ферромагнетизм наблюдается у оксида цинка легированного переходными 3d элементами. Магнитные ионы примеси в узлах металлической подрешетки кристалла, вызывают проявление магнитных свойств. Следует заметить, что зависи-

мость намагниченности насыщения легированных пленок оксида цинка от концентрации примеси магнитных ионов немонотонна: чем больше возможных степеней окисления у легирующих ионов, тем сложнее поведение концентрационной зависимости [1].

Исследования серии пленок ZnO:Co и ZnO, осажденных на подложках различных типов с помощью процесса MOCVD с использованием в качестве активного газа кислорода или водяного пара, показали, что решающее влияние на возникновение магнетизма в пленках ZnO:Co оказывает структура поверхности пленки, а не допирующая примесь [2]. Предполагается, что причиной ферромагнетизма низкоразмерных форм ZnO является нестехиометрия по кислороду.

Для анализа магнитного состояния наноструктуры используют современные методы зонных расчетов, основанных на теории функционала электронной плотности. Наиболее популярными среди них является первопринципный (*ab initio*) метод псевдопотенциалов, реализованный в программном пакете VASP.

Используя первопринципные методы, было в очередной раз подтверждено наличие ферромагнитных свойств у оксида цинка легированного переходными 3d элементами [3-5]. Однако особый интерес представляют случаи обнаружения подобных свойств у чистого ZnO.

Посредством программного комплекса VASP проведены расчеты магнитных свойств в чистом оксиде цинка с наличием точечных дефектов [6]. Построены суперячейки размером $2 \times 2 \times 2$ ($Zn_{16}O_{16}$) с внедрениями (вакансиями) атомов цинка и кислорода. Расчет производился в два этапа: структурная релаксация и расчет электронных и магнитных свойств материала. Обнаружено, что полный магнитный момент, приходящийся на суперячейку, отличен от нуля в случаях вакансии цинка либо при наличии внедренного атома кислорода. Основным магнитным состоянием системы при наличии таких точечных дефектов является ферромагнитное состояние.

Объектом изучения настоящей работы является оксид цинка. Как известно, пленки оксида цинка имеют зернистую структуру. В целях получения достоверных результатов теоретических расчетов, была воспроизведена модель границы зерна и проведено моделирование полученной структуры в программном комплексе VASP.

Межзеренную границу можно рассматривать как область, в которой осуществляется контакт двух кристаллов, различающихся только ориентацией. Граница зерен - атомный слой толщиной 1-2 атомных диаметра, по обе стороны от которого кристаллические решетки различаются только пространственной разориентацией.

Применяя подход, изложенный выше, была построена модель межзеренной границы у которой угол разориентации между кристаллитами составляет десять градусов. На рис. 1 изображена структура после процесса релаксации.

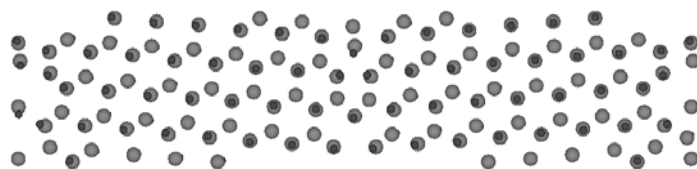


Рис. 1. Малоугловая модель границы зерна оксида цинка

Было получено подтверждение того, что межзеренная граница имеет свойства ферромагнетика. Магнитный момент равен 2 μ_B . Таким образом, в структуре существует система неспаренных электронов. На рис. 2 представлено распределение намагниченности насыщения. Как видно, все неспаренные электроны локализованы на межзеренной границе.



Рис. 2. Распределения намагниченности насыщения, в структуре моделирующей границу зерна оксида цинка

Причины их возникновения можно связать с нарушениями трансляционной симметрии системы, которые инициируют значительные зарядовые и спиновые перераспределения, а также обусловленные этим эффекты локализации-делокализации прифермиевских электронов с образованием атомных магнитных моментов.

Список литературы

1. Страумал Б. Б., Протасова С. Г. и др. // Письма в ЖЭТФ. 2013. Т.97. с. 415 – 426.
2. Ивановский А. Л. // УФН. 2007. Т. 177, №10, С. 1083-1104.
3. Byung-Sub Kang, Kwang-Pyo Chae. // J. Mag. 2012. 17(3). 163-167.
4. Bin Shao, Hong Liu, Jian Wu et al. // J. Appl. Phys. 2012. 111, 07C301-07C301-3.
5. Bin Shao, Min Feng, Hong Liu et al. // J. Appl. Phys. 2013. 17C728-17C725-3.
6. Xu Zuo, Soack-Dae Yoon, Aria Yang et al. // J. Appl. Phys. 2009. 105. 07C508-1-07C508-3.

УДК 621.794.61

ВЛИЯНИЕ МОРФОЛОГИИ НА ЗОННУЮ СТРУКТУРУ InAs И GaAs НАНОШНУРОВ

Д.А. ЯЦЫНО, Я.С. АРСИТОВ, Д.Б. МИГАС

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
ул. П. Бровки, 6, г. Минск, 220013, Республика Беларусь
migas@bsuir.by*

Результаты расчетов, проведенных с помощью метода из первых принципов, показали, что свойства $\langle 111 \rangle$ -ориентированных GaAs и InAs нанощнуров изменяются от металлических до полупроводниковых в зависимости морфологии наноструктур. Отсутствие $\{112\}$ граней в виде кромок между каждыми соседними $\{011\}$ гранями, которые характеризуют поверхность GaAs и InAs нанощнуров, приводит к появлению электронных состояний в запрещенной зоне, находящихся на уровне Ферми, и металлических свойств. В то время как наличие $\{112\}$ граней обеспечивает полупроводниковый характер электронных энергетических зон.

Ключевые слова: GaAs и InAs нанощнуры, морфология и зонная структура нанощнуров.

Полупроводниковые наноразмерные шнуры (нанощнуры) являются уникальными структурами для исследования квантоворазмерных эффектов и также представляют собой готовые элементы для изготовления электронных и оптоэлектронных приборов

нового поколения [1]. Для GaAs и InAs экспериментально установлено, что нанопроволоки этих материалов могут иметь структуру цинковой обманки и структуру вюрцита, причем ориентации роста наноструктур соответственно являются $\langle 111 \rangle$ и $\langle 0001 \rangle$. Для $\langle 111 \rangle$ -ориентированных GaAs и InAs нанопроволок со структурой цинковой обманки характерно сечение шестигранной призмы с $\{011\}$ или $\{112\}$ гранями на поверхности. Теоретические расчеты показали, что GaAs и InAs нанопроволоки с $\{011\}$ гранями на поверхности обладают металлическими свойствами, так как уровень Ферми пересекает несколько зон в районе запрещенной зоны [2].

Для структурной оптимизации и расчета зонного спектра GaAs и InAs нанопроволок применен метод псевдопотенциалов. На рис. 1 представлены сечения исследуемых наноструктур в виде шестигранной призмы с диаметрами около 2,5 – 2,7 нм и с двумя морфологиями: только $\{011\}$ грани (рис. 1 *а* и *б*), как предполагалось в работе [2], и наличие $\{112\}$ граней между соседними $\{011\}$ гранями (рис. 1, *в*, *г*).

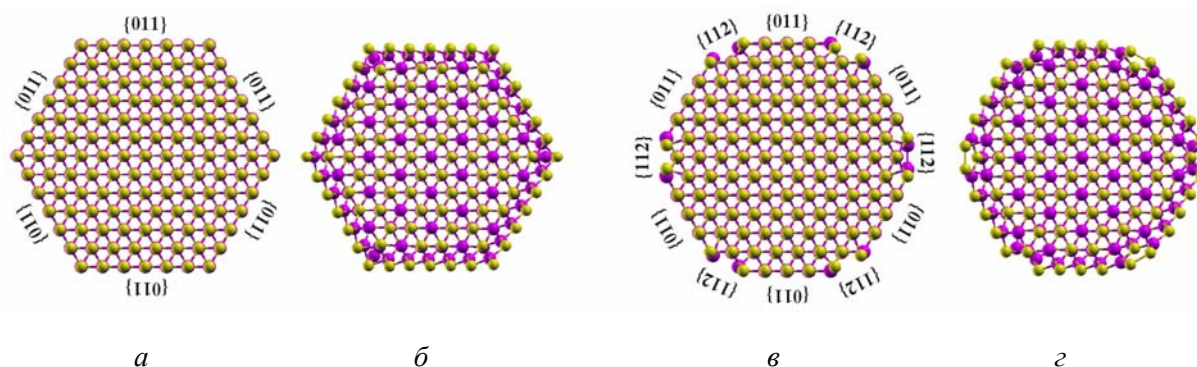


Рис. 1. Сечения GaAs и InAs нанопроволок с различной морфологией до (*а* и *в*) и после (*б* и *г*) структурной оптимизации. Грани обозначены

Структуры после релаксации сохраняют свою форму за исключением поверхностных атомов, которые могут формировать димеры атомов мышьяка (рис.1 *г*) на поверхности $\{112\}$ граней. Следует отметить, что структуры GaAs и InAs нанопроволок практически подобны. Проведенные оценки полной энергии GaAs и InAs нанопроволок с различной морфологией показывают, что наличие $\{112\}$ граней приводит к существенному уменьшению полной энергии и повышению стабильности данных систем. Это утверждение особенно справедливо для нанопроволок с меньшими диаметрами.

Зонные структуры для GaAs и InAs нанопроволок с различными морфологиями показаны на рис. 2. Очевидно, что предложенная морфология в работе [2], где присутствуют только $\{011\}$ грани (рис. 1, *а*, *б*), действительно приводит к металлическим свойствам нанопроволок (рис. 2, *а*, *в*). В данном случае уровень Ферми пересекает группу зон, сформированных p -состояниями поверхностных атомов галлия, индия и мышьяка, находящихся в углах между соседними $\{011\}$ гранями, даже при наличии энергетического зазора. При формировании $\{011\}$ граней как раз удаляются эти атомы галлия, индия и мышьяка, что влечет за собой появление обычного электронного энергетического спектра с запрещенной зоной, свойственного полупроводникам, без наличия поверхностных состояний в запрещенной зоне.

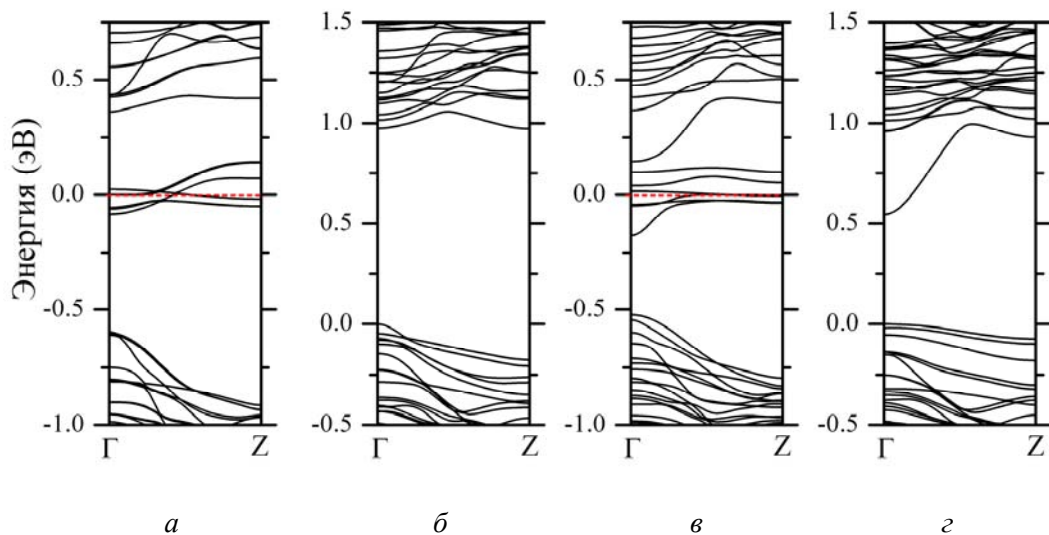


Рис. 2. Зонные структуры GaAs (*a* и *б*) и InAs (*в* и *г*) нанопроволок с различными морфологиями: *a* и *в* – только {011} грани на поверхности, *б* и *г* наличие {112} граней между {011} гранями. Ноль на шкале энергий соответствует уровню Ферми (*a* и *в*) или потолку валентной зоны (*б* и *г*)

В этой работе нами теоретически показано с помощью метода псевдопотенциалов, что появление небольших по размерам {112} граней между соседними {011} гранями в <111>-ориентированных GaAs и InAs нанопроволках является не только термодинамически выгодным, но и приводит к полупроводниковым свойствам, так как уровень Ферми находится в запрещенной зоне, не пересекая никаких зон.

Список литературы

1. Lu W., Lieber C. M. Semiconductor nanowires // J. Phys. D: Appl. Phys. 2006. Vol. 39, № 6. P. R387–R406.
2. Rosini M., Magri R. Surface effects on the atomic and electronic structure of unpassivated GaAs nanowires // ACSNano. 2010. Vol. 4, № 10. P. 6021–6031.

ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИЗМА ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ БАКТЕРИИ *BACILLUS SUBTILIS* С ПОВЕРХНОСТЬЮ КРЕМНИЯ ПОСРЕДСТВОМ КВАНТОВО-МЕХАНИЧЕСКИХ МЕТОДОВ МОДЕЛИРОВАНИЯ

В.А. БУРКО¹, Я.В. ДОЛГАЯ², В.Р. СТЕМПИЦКИЙ¹, В.В. БАРКАЛИН²

¹Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
ул. П. Бровки, 6, г. Минск, 220013, Республика Беларусь
nil44@bsuir.by

²Белорусский национальный технический университет
пр-т Независимости, 65, г. Минск, 220013, Республика Беларусь
douhaja_grid@bntu.by

Существенной проблемой эксплуатации биологических препаратов является необходимость соблюдения строгих условий хранения. Для решения этой проблемы предложено использовать пористые материалы в качестве «контейнера» для осаждения и хранения бактерий, такие как пористый кремний. В работе представлены результаты исследований механизмов взаимодействия бактерии *Bacillus subtilis* с поверхностью кремния методом квантовой механики.

Ключевые слова: бактерия *Bacillus subtilis*, биопестициды, пористый кремний, метод квантовой механики.

Преимущества пористых материалов заключаются в том, что условия в поре можно считать постоянными, и бактерии, находящиеся в такой поре изолированы от воздействий окружающей среды, что позволяет продлевать сроки хранения бактерий и замедлить ее ферментативный процесс.

Бактерии *Bacillus subtilis* являются грамположительными, спорообразующими, аэробными бактериями, представителями рода бациллы (*Bacillus*). В работе использовался штамм бактерии БИМ В-439Д, выделенный в лаборатории средств биологического контроля Института микробиологии НАН Беларуси. Морфологические признаки: вегетативные клетки культуры представляют собой палочки бациллярной формы размером 0,6-0,7×1,0-1,3 мкм с округлыми концами. Экспериментальные исследования показали: внесение в питательную среду порошкообразного пористого кремния в концентрациях 0,001-0,1% приводит к увеличению концентрации клеток бактерий на 32-56% и спор – на 38-88%, не оказывая влияния на их антимикробную активность; при использовании пористых материалов в качестве носителей для посевного материала, концентрация спор полученного указанным способом биопрепарата составляет $1,3 \times 10^9$ /мл, что на 32% выше, чем с обычным посевным материалом.

Для теоретического исследования механизма взаимодействия бактерии *B. subtilis* рассматривается строение клеточной стенки грамположительных бактерий, состоящей главным образом из цепочек пептидогликана (рис. 1). Поскольку слой пептидогликана расположен таким образом, что в сторону подложки будут направлены чередующиеся N-ацетилмурамовая кислота и N-ацетилглюкозамин, то можно ограничиться только соответствующими фрагментами, а так как части фрагментов, которые взаимодействуют с кремнием этих двух молекул совпадают, поэтому для дальнейшего исследования выбран N-ацетилглюкозамин. Анализируя структуру этой молекулы важно обратить внимание на двойную связь кислорода с углеродом. Известно, что вторая связь двойной

связи энергетически более слабая, поэтому она может быть разорвана. Учитывая высокую химическую активность кислорода, вполне вероятно, что разорванная связь кислорода образует новую связь.

Рассмотрены два механизма образования новой связи кислорода с подложкой: C-O-H-Si и C-O-Si (рис. 2), причем в первом случае вероятно образование водородной связи. Вычисления проводились в программе NWChem методом SCF (теория самосогласованного поля) [1-3]. Для атомов, участвующих во взаимодействиях использовался базис 6-31G*, для остальных – 3-21G. Результаты вычислений показали, что при взаимодействии клеточной фрагмента стенки с поверхностью кремния по механизму C-O-Si, как и предсказывалось, может образовываться ковалентная связь Si-O, длиной ~ 0.17 нм. Взаимодействие по механизму C-O-H-Si не приводит ни к образованию ковалентной связи, ни к образованию водородной связи. Из полученных результатов можно сделать вывод, что бактерия будет иммобилизоваться посредством образования химических связей на кремниевой подложке, поверхность которой очищена от водорода.

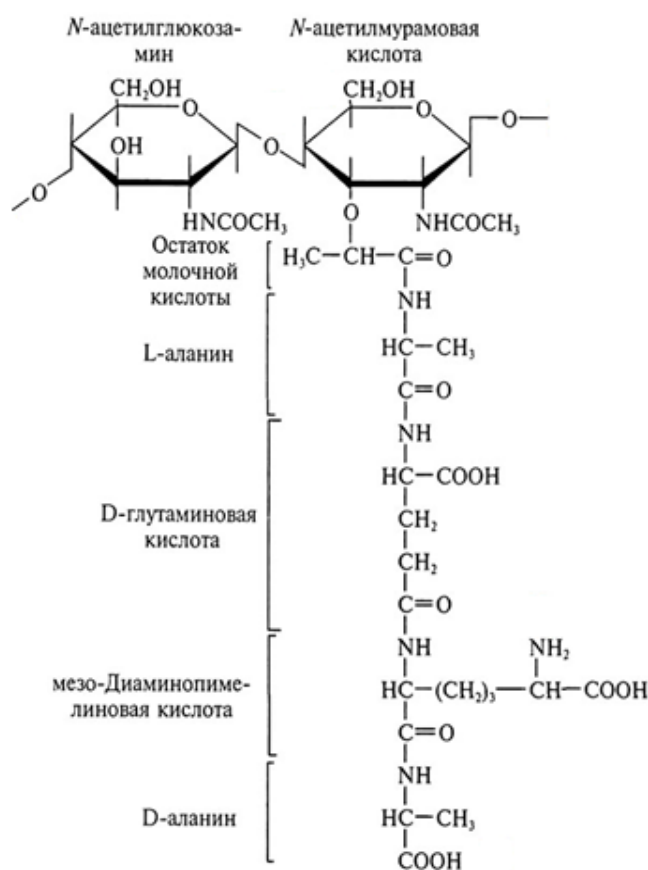


Рис. 1. Структура молекулы муреина грамположительных бактерий

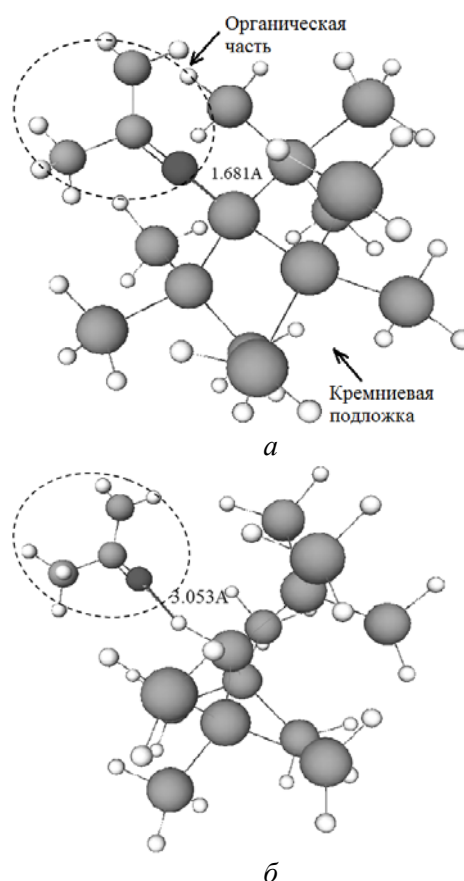


Рис. 2. Механизмы взаимодействия: а: C-O-Si; б: C-O-H-Si

Список литературы

1. NWChem Site [Electronic resource]. – Mode of access: <http://www.nwchem-sw.org>. – Date of access: 4.01.2014.
2. Valiev M. [et al.] // Comput. Phys. Commun. 2010. Vol. 181. P. 1477-1489.
3. Wong A.T., Harrison R.J. // J. Comp. Chem. 1995. Vol. 16. P. 1291-1300.

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ПРОЦЕССА ИМПУЛЬСНОГО СЕРЕБРЕНИЯ ИЗДЕЛИЙ

М.М. БОРИСИК, А.А. ХМЫЛЬ

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
ул. П. Бровки, 6, г. Минск, 220013, Республика Беларусь
marisik@bsuir.by*

В производстве изделий радиоэлектронной аппаратуры широко применяются гальванические серебряные покрытия. С целью дальнейшего совершенствования процесса серебрения изделий разработан новый способ, сущность которого заключается в том, что металл осаждается импульсами тока, в паузах которого в электролитическую ванну вводят ультразвуковые колебания (УЗК). Экспериментально установлено, что введение в электролит акустических колебаний в паузах импульсного тока приводит к получению блестящих серебряных покрытий в широком диапазоне плотностей тока при высокой скорости осаждения металла.

Ключевые слова: гальванические серебряные покрытия, ультразвуковые колебания

Для реализации данного способа была изготовлена специальная гальваническая ванна, в дно которой вмонтирован пьезокерамический преобразователь, питаемый от генератора звуковой частоты через усилитель мощности. Металл осаждался в электролите следующего состава (г/л): AgNO_3 -10-45, $\text{K}_4\text{Fe}(\text{CN})_6$ x H_2O -50-150, K_2CO_3 -15-30 при температуре 20-25°C. Образцы изделий предварительно подготавливались по типовой методике. Исследование влияния УЗК на производительность процесса оценивалась по скорости осаждения покрытий и катодному выходу по току.

Скорость электроосаждения серебра, определяемая при прочих равных условиях предельно допустимой плотностью тока, существенно зависит от гидродинамических условий, имеющих место в приэлектродных слоях электролита. Новым эффективным средством влияния на гидродинамические условия протекания процессов электроосаждения серебра служат интенсивные акустические поля, возбуждаемые в жидкостях [1].

Ультразвуковые колебания, введенные в паузах осаждающего тока, оказывают сильное перемешивающее действие, что позволяет поднять рабочую плотность импульсного тока до 10-12 А/дм² и тем самым достигнуть максимальной скорости осаждения металлов (рис.1). Такой способ введения в электролит УЗК выбран потому, что во время импульса прикатодный слой обедняется ионами осаждаемого металла, а во время паузы - пополняется ими за счет диффузии. Т.к. скорость диффузии очень мала, то для установления концентрационного равновесия необходимо снижать плотность тока или устанавливать большую паузу, что и ограничивает производительность процесса.

Исследование других способов введения в электролит УЗК показывает следующее: наложение на процесс электролиза УЗК в непрерывном режиме или импульсном, но во время действия импульса тока вызывает значительное снижение блеска покрытия даже по сравнению с импульсным током без действия ультразвука.

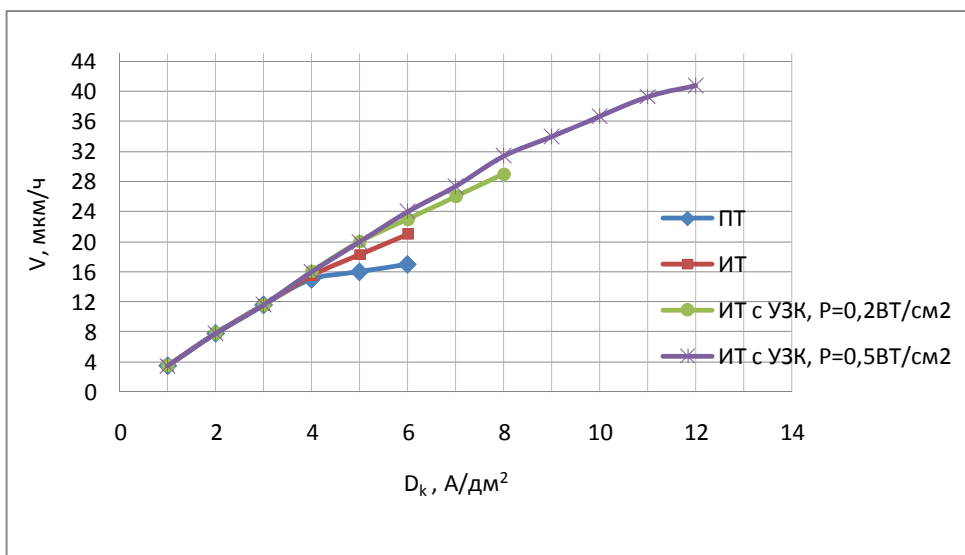


Рис. 1. Зависимость скорости осаждения от плотности тока

При воздействии ультразвука выход металла по току заметно повышается по сравнению с выходом по току, полученным без ультразвука (рис. 2).

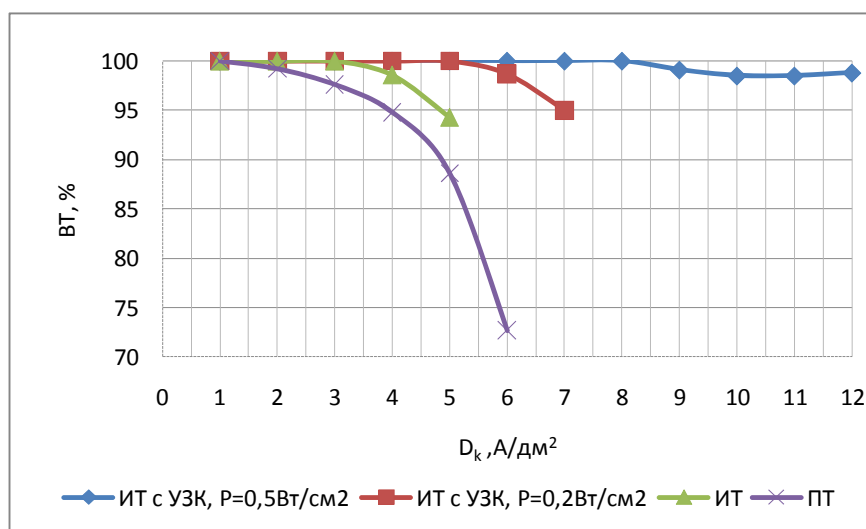


Рис. 2. Зависимость катодного выхода металла по току от плотности тока

Механизм воздействия ультразвука на процесс электрохимического осаждения серебра представляет существенный интерес для проведения дальнейших исследований.

Список литературы

1. Pollet, B. Power ultrasound in electrochemistry: from versatile laboratory tool to engineering solution // Wiley.-2012.

ДИСКРЕТНЫЕ ПРИБОРЫ И ИНТЕГРАЛЬНЫЕ МИКРОСХЕМЫ

УДК 621.372.049.77

ИНТЕГРИРОВАННЫЕ ПЛЕНОЧНЫЕ СИСТЕМЫ В ТВЕРДОТЕЛЬНЫХ СТРУКТУРАХ ДИОДОВ ШОТТКИ

В.А. СОЛОДУХА¹, В.В. БАРАНОВ², Ф.Ф. КОМАРОВ³, О.В. МИЛЬЧАНИН³,
О.Э. САРЫЧЕВ¹, Я.А. СОЛОВЬЁВ¹, А.С. ТУРЦЕВИЧ¹, Н.К. ФОМЕНКО²

¹ОАО «ИНТЕГРАЛ» - Управляющая компания Холдинга «ИНТЕГРАЛ»
ул. Казинца, 121 А, г. Минск, 220108, Республика Беларусь
dzpom@integral.by

²Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
ул. П. Бровки, 6, г. Минск, 220013, Республика Беларусь
vrb@bsuir.by

³«Научно-исследовательское учреждение «Институт прикладных физических проблем
имени А.Н. Севченко» Белорусского государственного университета
ул. Курчатова, 7, г. Минск, 220108, Республика Беларусь
KomarovF@bsu.by

Актуальность исследований обусловлена тем, что для силовой электроники характерным является существенное упрощение активной твердотельной структуры, в частности, использование структур без р-п-переходов, таких как диоды Шоттки. Это позволяет снизить потери мощности на кристалле при протекании прямого тока. В работе исследованы контакты Шоттки на основе различных переходных металлов с учётом требований к высоте барьера, стабильности и устойчивости к повышенным температурам эксплуатации.

Ключевые слова: тонкие плёнки переходных металлов, диоды Шоттки, микроструктура, электрофизические свойства.

Исследованы экспериментальные образцы диодов Шоттки с барьером Re / Si n-типа. Образцы диодов Шоттки SB1540S имели размер кристалла (2,5x2,5) мм. Показано, что значение высоты барьера Шоттки $\phi = 0,75$ эВ для экспериментальных образцов диодов Шоттки с Re барьером практически не отличается от теоретического значения ($\phi = 0,77$ эВ).

Впервые оценена устойчивость диодов Шоттки к воздействию разрядов статического электричества для твердотельных структур Re-V-Ti-Ni-Ag в составе диодов Шоттки с барьером на основе сплава Mo-Re и высокочистого Re. Экспериментальные образцы диодов Шоттки с Re барьером сохраняют работоспособность при температуре 150°C и выдерживают разряд статического электричества до 14 кВ. Результат может быть использован на ОАО «ИНТЕГРАЛ» в производстве диодов Шоттки серии SB под заказ для серии приборов, выдерживающих повышенные температуры.

Также исследованы структурно-фазовые превращения на границе структуры Pt/Si при низкотемпературных термообработках. Установлены основные особенности формирования силицидов Pt₂Si и оптимизированы режимы их формирования. Процесс силицидообразования начинается при 180-200°C с формирования фазы Pt₂Si на границе раздела Pt/Si. Отжиг при температуре 240-260°C приводит к полному переходу от пленки платины к слою силицида Pt₂Si. Полный переход слоя в фазу PtSi наблюдался при 360°C отжиге. При этом формируются структурно-однородные по толщине и размеру зерен поликристаллические слои силицидов с четкими межзеренными границами. Низкотемпературный способ формирования моносилицида платины (в качестве

контактного слоя диода Шоттки) позволяет получать структурно более совершенный силицидный слой, более качественную границу кремний/силицид, а также получить диоды с низкими обратными токами утечки по сравнению со стандартной термообработкой. Полученные в работе слои силицида PtSi характеризуются крупнозернистой структурой и пригодны для формирования структур диодов Шоттки.

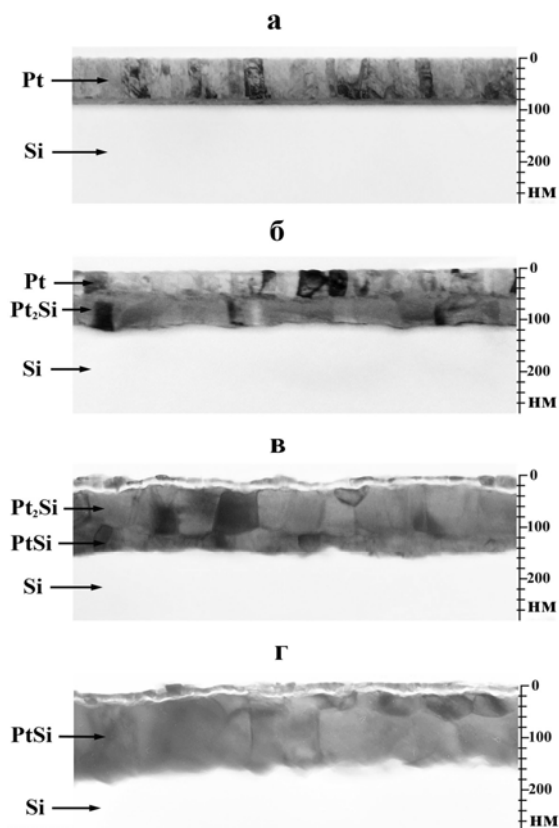


Рис. 1. ПЭМ-фотографии сечения структур Pt/Si после нанесения (а) и термообработки: 240°C, 120 мин (б); 300°C, 120 мин (в); 360°C, 60 мин (г)

Также проведены исследования структуры и фазовых превращений при двухстадийной термообработке в тонких композитных слоях металлов (Ni-Pt-V) на кремнии. По результатам исследований были оптимизированы режимы формирования барьерного силицидного слоя в экспериментальных образцах диодов Шоттки. Пленки сплава никель-платина-ванадий толщиной 35 и 70 нм наносили магнетронным распылением сплавной мишени с соотношением компонентов 77-18-5 масс. %, соответственно, на подложки монокристаллического кремния *n*-типа проводимости с удельным сопротивлением 0,6 Ом·см и ориентацией (111). Наличие ванадия обеспечивало создание немагнитного многокомпонентного сплава металлов, что приводило к более устойчивому и воспроизводимому процессу нанесения пленок. Максимальная высота барьера к кремнию (0,71 В) в экспериментальных образцах диодов Шоттки наблюдалась при первой термообработке при 300°C в течение 60 минут и последующей при 550°C в течение 30 минут. Установлено, что данная термообработка приводит к образованию поликристаллического силицидного слоя с размером зерен 100-300 нм и имеющего орторомбическую структуру атомной решетки, близкой к фазе NiSi, но с большими межплоскостными расстояниями за счет замещения атомов никеля в решетке атомами платины. Установлено, что вследствие преимущественной диффузии атомов платины на границу силицид/кремний происходит увеличение высоты барьера к кремнию.

ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКАЯ ТЕХНОЛОГИЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ МНОГОКРИСТАЛЬНЫХ МОДУЛЕЙ СОВРЕМЕННОЙ РАДИОЭЛЕКТРОННОЙ АППАРАТУРЫ

В.А. СОКОЛ

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
ул. П. Бровки, 6, г. Минск, 220013, Республика Беларусь
sokol@bsuir.by*

Ключевые слова: анодирование, алюминиевые основания, пористый оксид алюминия, нано-электронные устройства.

Многокристалльные модули (МСМ) как более высокая версия гибридных интегральных микросхем являются стратегическим конструктивно-технологическим направлением производства современного и перспективного радиоэлектронного оборудования. В Белорусском государственном университете информатики и радиоэлектроники разработана и продолжает совершенствоваться принципиально новая электрохимическая технология многокристалльных модулей. Эта технология является единственной в мире технологией, которая позволяет в едином технологическом процессе и на едином оборудовании изготавливать все основные конструктивные элементы современных МСМ, а именно, металлические (алюминиевые) основания с высококачественным диэлектрическим слоем, многоуровневую планарную систему межсоединений, пассивные элементы (резисторы, конденсаторы) и многовыводные алюминиевые корпуса. Основным базовым технологическим процессом в этой технологии является электрохимический процесс окисления (анодирование) металлов, таких как Al, Ta, Nb, Ti, Hf, и их интерметаллических соединений и сплавов. Поэтому по аналогии с такими известными технологиями многокристалльных модулей как МСМ-L, МСМ-D, МСМ-C и другими мы называли предлагаемую технологию как МСМ-A в связи с тем, что ее базовой операцией является операция анодирования. Кроме анодирования базовыми операциями в технологии МСМ-A являются вакуумное напыление металлических пленок, фотолитография и сборка. Основная сущность технологии заключается в том, что все диэлектрические слои в конструктивных элементах многокристалльных модулей формируются путем превращения металла в его собственный оксид, например, Al в Al_2O_3 , Ta в Ta_2O_5 . Так формируется диэлектрический слой алюминиевых оснований, размеры которых практически неограниченны, а толщина диэлектрического слоя Al_2O_3 может достигать сотен микрон и выдерживать напряжения относительно основы более 1000 В. Достоинством таких оснований является механическая прочность, высокая теплопроводность, экологичность. Многоуровневая система межсоединений по технологии МСМ-A изготавливается путем вакуумного напыления металла, например, Al, фотолитографическим формированием специальной маски по рисунку дорожек межсоединений и, в отличие от известных технологий, не путем травления металла, а путем превращения Al между дорожками в диэлектрик Al_2O_3 . Межуровневая изоляция, контактные переходы и последующие слои формируются чередованием лишь трех базовых операций – напыления, фотолитографии, анодирования. Таким образом, можно получить систему межсоединений с шириной дорожек до 10 мкм и выше. На основе технологии МСМ-A был разработан и испытан широкий спектр изделий, работающих в диапазоне температур от 10 К до 100°C и диапазоне частот от 0 до десятков ГГц. Это изделия авиа и космиче-

ской техники, автомобильной и компьютерной электроники, телевизионной, медицинской и др. техники. Освоение технологии не требует разработки специализированного технологического оборудования. Она может быть освоена в короткие сроки на предприятиях, имеющих полупроводниковую или тонкопленочную технологию гибридных интегральных микросхем.

Кроме этого на основе технологии МСМ-А разрабатываются процессы изготовления датчиков температуры, давления, влажности, прецизионные мембраны, нагревательные элементы, автоэмиссионные катоды и приборы на их основе, пленки с анизотропной проводимостью и др.

Технология МСМ-А запатентована в США. Различные изделия, изготовленные по этой технологии, успешно прошли испытания в России, США, Израиле. Российская фирма «РУСАЛОКС» в 2013 году запустила в серийное производство специальные модули по алюмооксидной технологии.

УДК 621.382.002

ТЕХНОЛОГИЯ БЫСТРОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ И ПРОИЗВОДСТВА СИСТЕМ НА ПЛАСТИНЕ

И.Л. БАРАНОВ, А.Г. ЧЕРНЫХ, А.С. ТЫМОЩИК, А.Б. ЗИМИН

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
ул. П. Бровки, 6, г. Минск, 220013, Республика Беларусь
minifab@bsuir.by*

Представлена технология проектирования, использующая применение готовых IP-блоков, мегаэлементов и базовых матричных кристаллов и бесшаблонное производство систем на пластине, реализуемое лазерным генератором изображений на кремнии. Обеспечено повышение быстродействия, надежности, а также снижение стоимость систем.

Ключевые слова: система на пластине, бесшаблонная технология.

Последние достижения электронной промышленности в технологии интегральных схем и их проектирования с целью дальнейшего улучшения рабочих характеристик изделий, при одновременном снижении энергопотребления, габаритов и стоимости позволили начать освоение нового поколения микросхем – однокристалльных систем, интегрирующих на одном чипе процессоры, логические запоминающие устройства, аналоговые схемы и др. элементы.

Дальнейшим шагом в данном направлении и наиболее радикальным решением должно последовать создание систем на целой кремниевой пластине (SoW) – самого сложного изделия микроэлектроники, которое объединяет дополнительными уровнями металлизации в подсистему всех ИС, созданных на пластине. За счет более полного использования кремния, исключения операций по сборке ИС, соединения их в систему с помощью печатных плат, позволяет значительно увеличить быстродействие, надежность, а также снизить стоимость систем.

Особенность производства таких систем - мелкосерийность (1-100 шт.). Они не могут быть изготовлены на обычном крупносерийном дорогом производстве, которому это экономически невыгодно.

Для быстрого и дешевого проектирования и изготовления SoW разработана новая технология проектирования и гибкое производство единичных уникальных заказных изделий – минифабрика.

В основе проектирования – не уровень транзисторов, а использование имеющихся на рынке для вторичного применения так называемых интеллектуальных блоков (IP), мегаэлементов (процессоров, запоминаящих, линейных и цифровых устройств), а также хорошо освоенных и доступных на рынке базовых матричных кристаллов (БМК) с их богатыми библиотеками элементов.

На современном этапе практических результатов в создании таких систем можно достичь по простой стратегии, заключающейся в соединении на пластине тех ИС, которые окажутся исправными. Определив их расположение на пластине путем измерений, можно с помощью САПР БИС выработать топологию соединений между ними в подсистему на пластине.

Фактически это является воплощением на новом уровне идеи заказной БИС на матрице стандартных логических элементов. В качестве элементов матрицы в данном случае выступают БИС, изготовленные на пластине. На каждой пластине расположение исправных БИС случайно, поэтому для их соединения в систему необходимо проектирование и изготовление металлизации выполнять индивидуально применительно к каждой конкретной пластине. Это так называемый «метод избирательной разводки». Его реализация стандартной технологией СБИС для каждой пластины требует изготовления индивидуального комплекта фотошаблонов. Это приводит к значительным материальным и временным затратам, исключающим использование этого метода в производстве.

Учитывая перспективность систем на целых пластинах кремния необходимо разработать другие технологии, которые обеспечивают соединение не только годных, но и частично годных, а также резервных ячеек, в первую очередь исключив использование фотошаблонов. Это достигается разработанной нами новой технологией создания систем на пластине, использующей уникальные возможности лазерного непосредственного формирования рисунка на кремниевой пластине, с помощью генератора изображений ЭМ-5299, разработанного ГНПО «Планар», г.Минск, который имеет поле экспонирования 200x200 мм при минимальном размере элементов меньше 0,5 мкм и точности их размещения лучше 50 нм.

Исключение шаблонов и непосредственное формирование рисунка по всей поверхности пластины позволяет только с помощью программного обеспечения управления работой генератора изображений создать для каждой пластины свои нестандартные соединения годных и частично годных с учетом их расположения. Высокая точность определения местонахождения каждого элемента на пластине обеспечивает возможность подключения в систему вплоть до одного резервного вентиля.

Разработанная технология предназначается, в первую очередь, для создания дисков памяти на кремниевой пластине и многопроцессорных кремниевых пластин для суперкомпьютеров с распараллеливанием вычислительных процессов между более чем тысячами микропроцессорами. Это обеспечит более чем в 100 раз снижение стоимости таких суперкомпьютеров при увеличении их производительности и существенном повышении их надежности.

На рис. 1 представлена система на пластине БМК серийного производства ПО «Интеграл», реализуемая лазерным бесшаблонным программированием межсоединений как в пределах каждого БМК, так и между ними по всей площади пластины.

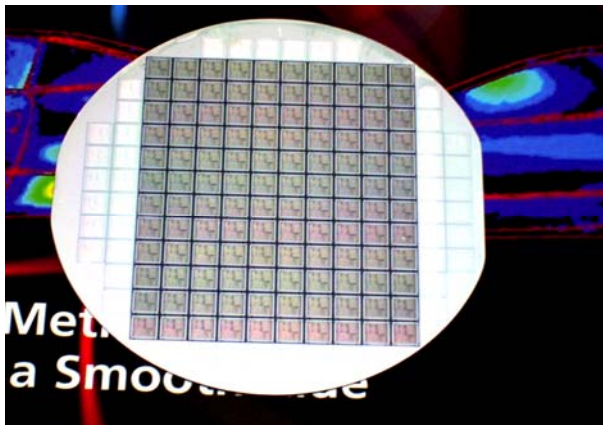


Рис. 1. SoW на БМК K1574XM11

Данные БМК

Диаметр пластины: 102 mm.
 Размер кристалла: 6.3×6.3 mm.
 Количество кристаллов: 150.
 Число затворов (вентилей): 75К (300К).

Программируемые уровни БМК

I слой – контакты к ячейкам.
 II слой – первый металл.
 III слой – межуровневые контакты.
 IV слой – второй металл.

Программируемые уровни SoW

I слой – пассивация, контакты к площадкам.
 II слой – межсоединения первого уровня.
 III слой – межуровневые контакты.
 IV слой – межсоединения второго уровня.

УДК 621.382.002

СОЗДАНИЕ БЕСШАБЛОННОГО ПРОИЗВОДСТВА СБИС

В.А. ЛАБУНОВ, И.Л. БАРАНОВ, А.Г. ЧЕРНЫХ

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
 ул. П. Бровки, 6, г. Минск, 220013, Республика Беларусь
 minifab@bsuir.by*

Производство СБИС с индивидуальной обработкой пластин в вакуумной кластерной системе с использованием бесшаблонной технологии, реализуемой лазерным генератором изображений. Исключение из технологического цикла фотошаблонов значительно (до 10 раз) удешевляет и ускоряет производство ИМС, упрощает корректировку топологических и конструктивных ошибок.

Ключевые слова: бесшаблонная технология, лазерный генератор, минифабрика, вакуумная кластерная система.

Существенным недостатком производств, использующих традиционные массовые технологии создания ИМС, является то, что они не приспособлены к быстрому изменению номенклатуры изделий.

Выходом из этой ситуации является создание недорогих производств с индивидуальной обработкой пластин, небольшой производительностью (100-1000 пл./месяц), но с быстрым циклом изготовления (около недели), так называемых минифабрик. На таких производствах необходимо использовать бесшаблонную технологию, которая может быть реализована с использованием лазерных генераторов изображения, производимых ГНПО «Планар». Технологические операции производства ИМС необходимо осуществлять в едином замкнутом цикле в вакуумной кластерной системе. Исключение из технологического цикла фотошаблонов значительно (до 10 раз) удешевляет и ускоряет производство ИМС, упрощает корректировку топологических и конструктивных ошибок. Переход от одного изделия к другому осуществляется только изменением про-

грамм управления работой генератора изображений. Это обеспечивает реализацию нескольких проектов на одной пластине, что также существенно удешевляет производство новых изделий. Отметим, что при использовании стандартной литографии при изготовлении современных СБИС, требуется 15-25 фотошаблонов, каждый из которых стоит около 2000 долларов. Срок изготовления комплекта фотошаблонов - более 1 месяца. Для формирования критических слоев (затворы, контакты) в СБИС с минимальным топологическим размером 0,25-0,1 мкм используют специальные фазосдвигающие шаблоны стоимостью до 20000 долларов.

Разрабатываемый в настоящее время УП "КБТЭМ-ОМО" лазерный генератор обеспечит минимальный размер 0,2 мкм, а при его модернизации (использовании новой иммерсионной технологии) позволит достичь разрешения менее 0,1 мкм. Это позволит разрабатывать и изготавливать заказные изделия современного уровня.

В результате можно создать компактную (площадь менее 200 м²) недорогую (стоимость до 10 млн. долл.) микро- и нанотехнологическую линию (минифабрику), с минимальным количеством оборудования (максимум 10 кластеров), которую можно использовать в лабораториях научно-исследовательских организаций или центрах проектирования для мелкосерийного выпуска конкурентоспособной на мировом рынке продукции.

УДК 621.383.51

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ КРИСТАЛЛИЧЕСКИХ И ТОНКОПЛЕНОЧНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ НА ОСНОВЕ КРЕМНИЯ

В.П. ВАСИЛЕВИЧ¹, Е.В. ЯДРЕНЦЕВА²

*¹Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
ул. П. Бровки, 6, г. Минск, 220013, Республика Беларусь
vasilevichvp@bsuir.by*

*²Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
ул. П. Бровки, 6, г. Минск, 220013, Республика Беларусь
l.yadrentseva@gmail.com*

Сравнение кристаллических и тонкопленочных фотоэлектрических преобразователей (ФЭП) на основе кремния по себестоимости 1Вт мощности, КПД и себестоимости 1кВт·ч вырабатываемой ими электроэнергии позволяет делать объективные прогнозы по развитию этих направлений и обозначает ориентиры для будущих направлений научных исследований и инвестиций в технологии солнечной энергетики.

Ключевые слова: фотоэлектрический преобразователь, кристаллический кремний, аморфный тонкопленочный кремний, паритет цен на электроэнергию.

Не вызывает сомнений, что доминирующие сейчас на рынке ФЭП на основе кристаллического кремния (с-Si) будут конкурировать с тонкопленочными ФЭП. Ожидается, что в течении 5 лет массовая доля рынка тонкопленочных солнечных модулей возрастет с 10 % до 20 % [1].

Среди тонкоплёночных технологий наибольшее распространение получили ФЭП на основе тонкопленочного кремния (α -Si), теллурида кадмия (CdTe) и диселенида меди–индия–галлия (CIGS). Сравнение этих направлений оказывается в пользу тонкопленочного кремния по следующим причинам. Технология ФЭП на основе тонких пленок аморфного и микрокристаллического кремния имеет большой потенциал за счет низкой себестоимости производства, элементы на основе α -Si обладают отличными характеристиками фотоэлектрического преобразования в условиях низкой освещенности, а конструктивные материалы не дефицитны [2].

Мы использовали данные по фактической и прогнозируемой себестоимости производства 1 Ватта мощности и КПД с шагом в 5 лет [1] для ФЭП на основе кристаллического и тонкопленочного кремния. При использовании технологии на тонкопленочном кремнии возможны следующие конструктивно-технологические варианты ФЭП: с одним p-n переходом на стекле, тандем из аморфного кремния (α -Si) и микрокристаллического кремния (μ c-Si) с двумя p-n – переходами на стекле и тандем из трех p-n– переходов на базе аморфного кремния на фольге из стали (рис. 1).

Средняя стоимость электроэнергии (табл. 1), произведённой различными ФЭП сегодня составляет порядка \$0,19 за 1 кВтч электроэнергии. По прогнозам, данный показатель преодолеет отметку \$0,15/кВтч к 2016 году и достигнет отметки \$0,10/кВтч к 2021 году, вплотную приблизившись к традиционным источникам электроэнергии [1]. Разброс цен между различными технологиями будет минимален, ожидается сетевой паритет цен между всеми технологиями, что позволит выбрать потребителю именно то, что ему нужно, а не то, что диктует рынок.

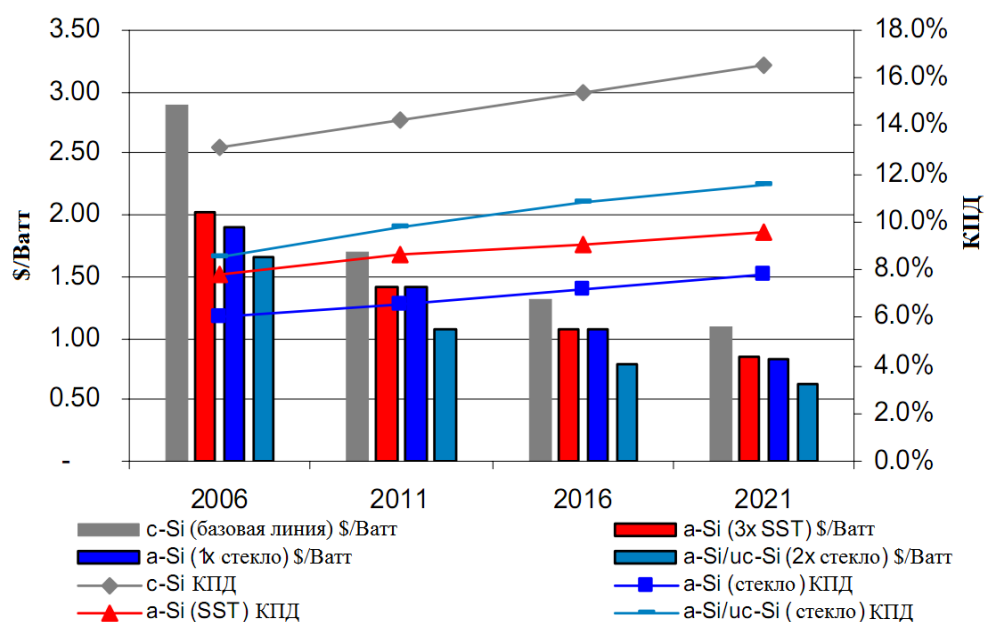


Рис. 1. Себестоимость производства 1 Ватта мощности и КПД модулей на основе кристаллического и тонкопленочного кремния

Табл. 1. Актуальные и прогнозируемые цены на электроэнергию

Технология	Подложка	\$/кВтч 2006	\$/кВтч 2011	\$/кВтч 2016	\$/кВтч 2021
α -Si (1x)	Твёрдая (стекло)	0,28	0,21	0,15	0,12
α -Si (2x)	Твёрдая (стекло)	0,29	0,17	0,13	0,10
α -Si (3x)	Гибкая (сталь)	0,34	0,19	0,14	0,11
c-Si	Твёрдая (пла- стины Si)	0,32	0,19	0,14	0,11

По приведённым выше данным можно сделать следующие выводы:

- при создании фотоэлементов на кристаллическом кремнии, неизбежно предварительное изготовление самого поликристаллического кремния, а также его модификация и резка на пластины, что определяет более высокую себестоимость ФЭП на его основе;
- тонкоплёночная технология, несмотря на более низкие значения КПД, выглядит перспективнее и предпочтительнее, как в экономическом плане, так и в технологическом;
- все проанализированные технологии, как кристаллическая, так и тонкоплёночные имеют потенциал, чтобы достичь к 2021 году сетевого паритета цен на уровне готовой фотоэлектрической системы, и способны занять свою нишу на рынке.

Список литературы

1. *O'Rourke, S. Technology and economics: thin films and crystalline silicon / S. O'Rourke, P. Kim, H. Polavarapu // Deutsche Bank Global Markets Research. USA, 9 July 2007. P. 75 – 98.*
2. *Радже Д., Дик Д. Анализ мирового рынка поликристаллического кремния/ Д. Радже, Д. Дик// «Евразийский банк развития». 2009. С.75.*

ПОВЫШЕНИЕ НАДЕЖНОСТИ ТРАНЗИСТОРОВ В МЕТАЛЛОКЕРАМИЧЕСКИХ МИКРОКОРПУСАХ

А.С. ТУРЦЕВИЧ¹, С.С. ВОЛКЕНШТЕЙН², А.Ф. КЕРЕНЦЕВ¹, А.А. ХМЫЛЬ³

¹ОАО «ИНТЕГРАЛ»-управляющая компания холдинга «ИНТЕГРАЛ»,
ул. Казинца И.П., 121А, г. Минск, 220108, Республика Беларусь,
akerentsev@integral.by

²УП «КБТЭМ-СО», пр-т Партизанский, 2, г. Минск, 220033, Республика Беларусь,
wolkenstein@kbttem.by

³Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
ул. П. Бровки, 6, г. Минск, 220013, Республика Беларусь
alesvsh@bsuir.by

Миниатюризация компонентов электронной техники и микроэлектроники приводит к необходимости ужесточения мониторинга технологического процесса герметизации сваркой. При этом незаменимым средством неразрушающего контроля неразъёмных соединений, формирующих герметизирующие швы корпусов с визуализацией их внутренней структуры, является лазерная фотоакустическая микроскопия.

Ключевые слова: транзистор, металлокерамический корпус, герметичность, неразрушающий контроль, лазерная фотоакустическая микроскопия.

Транзисторы средней мощности (5 Вт) в металлокерамическом корпусе для поверхностного монтажа широко используются в различных блоках радиоэлектронной аппаратуры (усилителях, электронных коммутационных устройствах, преобразовательной аппаратуре, а также в термостатированных и термостабилизированных кварцевых генераторах). В процессе эксплуатации в экстремальных условиях возможно снижение надежности в результате потери герметичности из-за привнесенных дефектов в процессе сварки крышки с основанием корпуса. Поэтому повышение надежности транзистора в металлокерамическом корпусе путем улучшения качества герметизации является актуальной задачей.

В данной работе представлены результаты по повышению качества герметизации микрокорпусов типа КТ-99-1, размером 4,6x4,2x1,7 мм³ (рис. 1, а, б). Присоединение крышек к основанию корпуса выполнялось на полуавтомате 03КС-700-2 методом односторонней шовно-роликовой сваркой в импульсном режиме с дискретно-регулируемой длительностью паузы между пачками сварочных импульсов. В результате конвейерного перемещения герметизируемых корпусов и прохождения электрического тока через две пары роликовых электродов (рис. 1, с) происходит мгновенный нагрев до 1450°С (температура плавления кобальта) в локальной области крышки и ободка корпуса с образованием сварного шва в виде перекрывающихся сварных зон по наружному периметру крышки [1]. При этом варьированием амплитуды тока сварки и длительностью сварочных импульсов определены условия формирования микротрещин, приводящих к потере герметичности корпуса. Визуализация дефектов с помощью цветного пенетранта, проникающего под действием капиллярных сил, выявила присутствие микротрещин (микротрещин) в металлокерамических спаях (рис. 2, а, б).

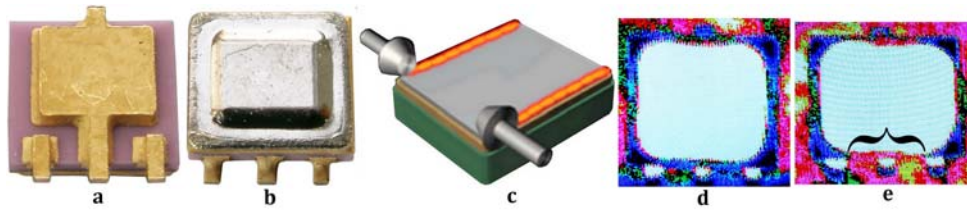


Рис. 1. Внешний вид корпуса (а – снизу, b – сверху), схема шовно-роликовой сварки (с), лазерные фотоакустические топограммы герметичного (d) и негерметичного (e) корпусов. Негерметичный участок шва показан фигурной скобкой

Установлено, что увеличение длительности сварочного импульса (t) способствует росту мощности сварки и повышению тепловой энергии (Q), выделяемой в сварочном шве, согласно закону Джоуля-Ленца $Q = I_{св}^2 R_{св} t$. Это создает дополнительный перегрев основания из алюмооксидной керамики, обладающей пониженной теплопроводностью (13 Вт/м·К). В условиях ограниченных размеров герметизируемого изделия (максимальная толщина корпуса не превышает 1,7 мм), возникающий термический удар приводит к росту механических напряжений в металлокерамических спаях и образованию микротрещин (микротрещин).

Ограничение мощности сварочных импульсов осуществлялось уменьшением длительности до 4 мс фазоимпульсным методом путем выставления углов включения и выключения тиристоров, а также выбором допустимого тока сварки. Установлено образование микротрещин при токах сварки более 80 А и ухудшение качества сварки при токах менее 50 А из-за локальных непроваров сварного шва с уменьшением его ширины с 85 до 20 мкм (рис. 1, e) [2]. Это приводило не только к ухудшению герметичности и снижению выхода годных, но и формированию потенциально ненадежных узлов, способствующих медленному натеканию и росту относительной влажности внутри корпуса (рис. 2, b).

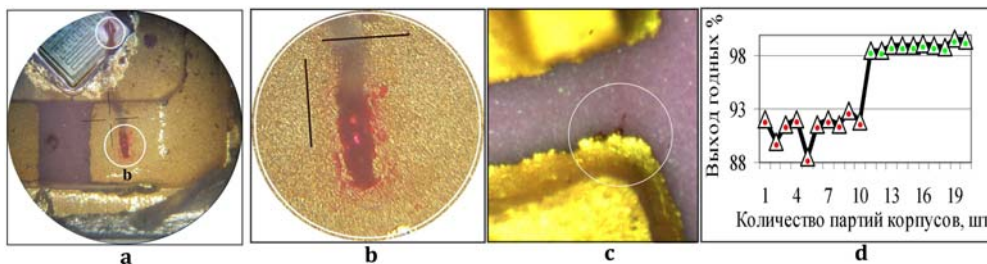


Рис. 2. Выявление родамина в металлокерамическом соединении (а), (b – увеличено), (с) и динамика выхода годных по герметичности (d) для разного тока сварки (80 А для партий № 1-10 и 65А для партий № 11-20)

Таким образом, выбор оптимальных режимов шовно-роликовой сварки и диагностики лазерной фотоакустической микроскопией приводит к росту выхода годных по герметичности и повышению надежности транзисторов в металлокерамических микрокорпусах за счет исключения скрытых дефектов в процессе сварки.

Список литературы

1. Солодуха В.А., Турцевич А.С., Керенцев А.Ф. Металлокерамические корпуса мощных п/п приборов. Министерство Образования РБ.-Гомель: ГГУ им. Ф. Скорины, 2010. 16 С.
2. Волкеништейн С.С., Хмыль А.А. // Сб. тезисов докладов III МНПК «Прецизионное оборудование и технологии производства изделий микро- и радиоэлектроники». Минск 2012. С. 88-90.

ГАЗОВЫЕ СЕНСОРЫ НА ПОДЛОЖКАХ ИЗ НАНОПОРИСТОГО ОКСИДА АЛЮМИНИЯ

Г.Г. ГОРОХ, А.И. ЗАХЛЕБАЕВА, А.А. ЛОЗОВЕНКО, Е.В. СОЧНЕВА

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
ул. П. Бровки, 6, г. Минск, 220013, Республика Беларусь
gorokh@bsuir.by*

Представлены результаты разработки химических полупроводниковых сенсоров на нанопористых подложках из анодного оксида алюминия. С целью минимизации тепловых потерь проведена оптимизация конструкции тонкопленочного газового сенсора, разработаны научные основы технологии изготовления нанопористых подложек с требуемыми параметрами, проведена апробация полупроводниковых газовых сенсоров на нанопористых подложках и исследованы их функциональные характеристики.

Ключевые слова: анодный оксид алюминия, наноструктурированные материалы, химические сенсоры.

В последние годы в газовой сенсорике большое внимание уделяется разработке микромощных полупроводниковых химических сенсоров, изготавливаемых на диэлектрических мембранах по кремниевой МЭМС-технологии с металлооксидным чувствительным слоем [1]. Несмотря на видимую перспективность этой технологии, она обладает существенными недостатками, сдерживающими ее широкое применение, такими как высокая трудоемкость, плохое согласование термических и механических свойств используемых пленок, низкая адгезия материала нагревателя к оксиду и нитриду кремния, которые, в целом, приводят к снижению выхода годных и надежности сенсоров [2]. Одним из путей усовершенствования этой конструкции является использование наноструктурированного темплейта для формирования металлооксидного слоя, что позволяет увеличить эффективную поверхность активного слоя и повысить чувствительность и селективность самого сенсора [3,4].

В настоящей работе предложен новый подход, суть которого заключается в использовании пористых матриц анодного оксида алюминия (АОА) в качестве масок или шаблонов, на поверхности или в порах которых осаждаются или выращиваются необходимые материалы, в результате чего формируются наноструктурированные пленки [5] или специальным образом распределенные по поверхности наноструктуры [6]. За счет пористой структуры, использование в конструкции газовых сенсоров подложек из АОА позволяет снизить тепловые потери на нагрев сенсора и повысить адгезию платинового нагревателя к подложке.

Разработана методика формирования подложек из нанопористого оксида алюминия и создания на их основе газового сенсора. Методика основана на следующих основных этапах. Подготовка подложек – терморихтовка заготовок и электрохимическая полировка алюминия. Формирование с одной стороны подложки слоя анодного оксида методом двухстадийного электрохимического анодирования. Селективное растворение непроанодированного алюминия для получения свободной подложки и расширение пор. Изготовление кристалла химического сенсора на подложке из АОА: осаждение платины и формирование нагревателя с электродами и электродов к чувствительному слою методами двухсторонней фотолитографии и ионно-лучевого травления. Нанесение газочувствительного слоя SnO_2/Pd толщиной 15–20 мкм капельным методом на соответствующую область нагревателя.

Проведены исследования откликов сенсора на H_2 . Величина сенсорного отклика была определена как разность между сопротивлением сенсора при воздействии активного газа (R_{gas}) и сопротивлением сенсора в воздухе (R_{air}). Чувствительность сенсора была рассчитана как процентное отношение R_{gas} и R_{air} : $S = (R_{gas}/R_{air}) \times 100\%$. Результаты исследований показали, что при использовании в конструкции сенсора подложек из АОО с объемной пористостью 35–55%, тепловые потери на его нагрев снижаются на 10–18%. При этом механические свойства подложек, необходимые для проведения всех технологических циклов, сохраняются.

На рис. 1 приведены изотермические отклики сенсора на концентрации водорода 10, 20, 50, 100 и 200 ppm в атмосфере содержащей разный уровень влажности (сухой, с 25 и 50% влажности).

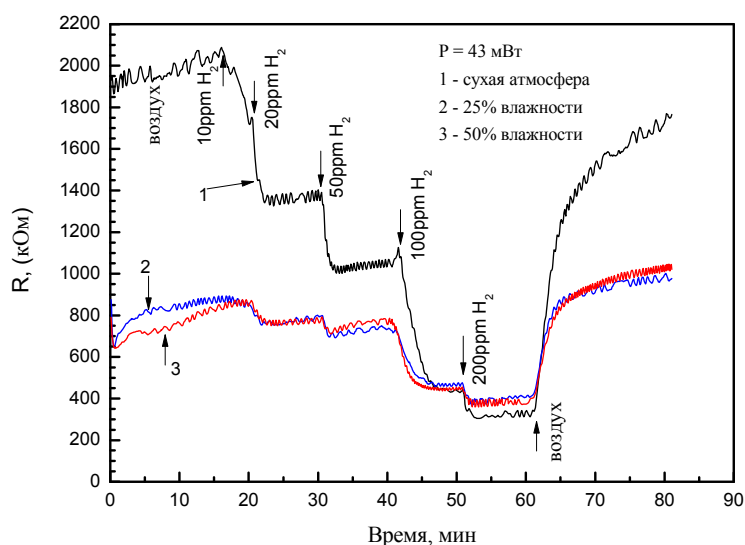


Рис. 1. Отклики сенсоров, сформированных на наноструктурированной подложке из АОО, на H_2

Анализ представленных результатов показал, что использование в качестве подложки для формирования полупроводниковых газовых сенсоров наноструктурированного анодного оксида алюминия позволяет существенно снизить их потребляемую мощность и повысить чувствительность к водороду. Кроме того, благодаря пористой структуре АОО обеспечивается высокая адгезия платины к подложке и ее электропроводность, а также хорошо согласовываются термомеханические свойства пары платиновый нагреватель – материал чувствительного слоя.

Список литературы

1. Moon S.E., Choi N.-J., Lee H.K. et al. // ETRI Journal. 2013. Vol. 35. Iss. 4. P. 617–624.
2. Васильев А.А., Гогин-Клушин С.Ю., Харитонов Д.Ю. и др. // Сенсор. 2002. № 3.С. 23–29.
3. Khatko V.V., Gorokh G.G., Mozalev A.M. et al. // Sens. Act. B. 2006. Vol. 118. Iss. 1–2. P. 255–262.
4. Kim S. Choi J. Jung M. et al. // Sensors. 2013. Vol. 13. Iss. 10. P. 13575–13583.
5. Khatko V.V., Mozalev A.M., Gorokh G.G. et al. // J. Electrochem. Soc. 2008. Vol. 155. Iss. 7. P. K116–K123.
6. Gorokh G.G., Mozalev A.M., Solovei D.V. et al. // Electrochem. Act. 2006. Vol. 52. Iss. 4. P. 1771–1780.

САМООРГАНИЗУЮЩАЯСЯ НАНОСТРУКТУРА В КОНСТРУКЦИИ СОЛНЕЧНОГО ЭЛЕМЕНТА НА ОСНОВЕ ДИОДА ШОТТКИ

Я.В. САЦКЕВИЧ, А.Г. СМИРНОВ, А.А. СТЕПАНОВ

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
ул. П. Бровки, 6, г. Минск, 220013, Республика Беларусь
yanina0221@gmail.com*

Сегодня солнечные элементы на основе диода Шоттки привлекают большое внимание в виду своей простоты изготовления и применения в тонкопленочной полупроводниковой системе большой площади. В связи с бурным развитием технологий изготовления и конструктивных решений альтернативных источников энергии возникает необходимость в создании фотоэлектрического преобразователя с высокой эффективностью работы и равномерностью преобразования падающей световой энергии в электрическую энергию по поверхности.

Ключевые слова: наноструктурированное алюминиевое покрытие, фотоэлектрические преобразователи.

Солнечный элемент на основе диода Шоттки с самоорганизующимся алюминиевым наноструктурированным электродом работает на основе принципа прямого преобразования солнечной энергии в электрическую и может быть использован в качестве автономного маломощного источника питания. При освещении структура обладает выпрямляющими свойствами и представляет собой диод Шоттки. Процесс генерации фототока происходит за счет поглощения фотонов в металле, что приводит к возбуждению дырок через барьер в полупроводник, и диффузии электронов к обедненной области в результате генерации электронно-дырочных пар в нейтральном объеме полупроводника под действием длинноволнового излучения [1].

В качестве основания в данном элементе может быть использована пластина монокристаллического кремния, на поверхности которой сформирован слой алюминия. В результате электрохимического оксидирования на поверхности кремния образуется оптически прозрачная алюминиевая наноструктурированная пленка, выполняющая роль электрода и составляющая с полупроводниковой подложкой контакт Шоттки [2,3]. Слой пористого оксида алюминия поверх наноструктурированного электрода выполняет защитную функцию, а также является антиотражающим покрытием (рис. 1).

Эффективность работы такой конструкции солнечного элемента с самоорганизующимся алюминиевым наноструктурированным покрытием достигает 9,4%. Использование данной самоорганизующейся наноструктуры имеет ряд преимуществ и решает ряд задач:

- увеличение равномерности преобразования солнечной энергии в электрическую энергию по поверхности структуры;
- увеличение срока службы за счет снижения разогрева структуры на границе раздела металл-полупроводник и применения защитного от внешних воздействий слоя пористого оксида алюминия.

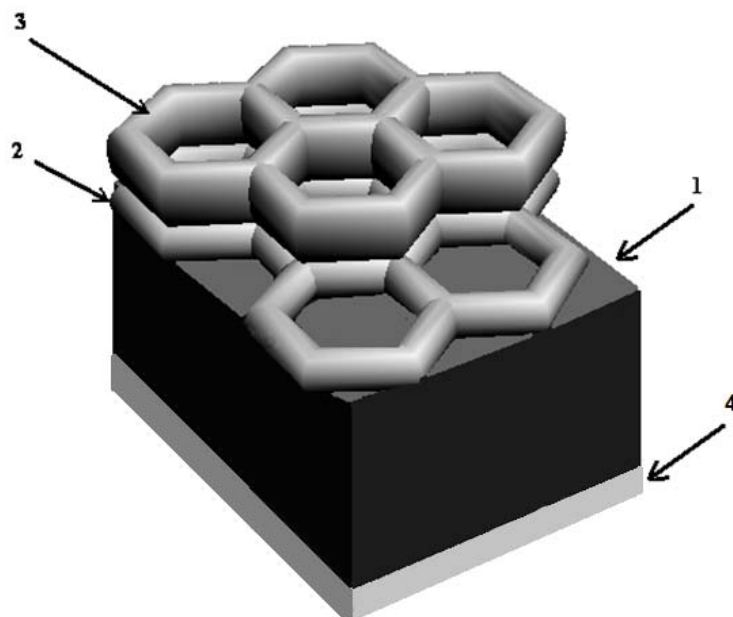


Рис. 1. Схематическое представление солнечного элемента на основе диода Шоттки с самоорганизующейся алюминиевой наноструктурой:
 1 – монокристаллическая кремниевая пластина, 2 – наноструктурированный алюминиевый электрод, 3 – слой пористого оксида алюминия, 4 – сплошной тыльный контакт

Преимущества самоорганизующегося алюминиевого электрода:

- использование стандартной технологии формирования диода Шоттки;
- использование низкотемпературных процессов;
- возможность технологической вариации электрооптических параметров;
- воспроизводимость результатов.

С точки зрения технико-экономической эффективности конструкция солнечного элемента с металлическим наноструктурированным электродом обладает важными качествами: простота и дешевизна применяемых материалов и технологии изготовления вследствие исключения из технологического процесса дорогостоящих операций фотолитографии и высокотемпературной обработки [4].

Список литературы

1. Sze, S. M. // A Wiley-Interscience publication John Wiley & Sons, New York Chichester Brisbane Toronto Singapore. 1981. P. 453 – 455.
2. A. Smirnov, A. Stsiapanau, Ya. Satskevich // 33 Int. Display Research Conf.: proc. of the Eurodisplay-2013, London, UK., Sept. 2013. P. 68 – 69.
3. A. Stsiapanau, P. Jaguiro, A. Smirnov, H. Kwok, A. Murauski, Y. Jacob. Nanostructured metal transparent conductive layer and method of its self-ordered fabrication from valve metal film / USA Patent No. application 61/213,283.
4. Я. В. Сацкевич, А. Г. Смирнов, А. А. Степанов и др. // Тезисы докладов Международной молодежной научной школы "Современная нейтронография". Дубна, Россия, 28 октября - 1 ноября 2013 г. С. 43.

ДИНАМИКА ПЕРЕКЛЮЧЕНИЯ ЭЛЕМЕНТА РЕЗИСТИВНОЙ ПАМЯТИ

Д.В. СТРЕМОУС¹, А.Л. ДАНИЛЮК²

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
ул. П. Бровки, 6, 220013 Минск, Республика Беларусь
¹stremous@list.ru, ²danylyuk@nano-center.org*

Рассчитаны ВАХ, пороговое напряжение переключения и сопротивление элемента резистивной памяти (RRAM) в зависимости от скорости нарастания внешнего смещения и рабочей температуры. Предложенная аналитическая модель адаптирована для использования в пакете схемотехнического моделирования SPICE.

Ключевые слова: резистивная память, SPICE моделирование, пороговое напряжение.

В настоящее время получают широкое распространение устройства резистивной энергонезависимой памяти с произвольным доступом (RRAM). Для разработки таких устройств необходимо создание эквивалентных схем и адаптация моделей устройств для использования в стандартных пакетах симуляторов схем, такие как SPICE. С помощью моделей SPICE можно рассчитывать динамические эффекты RRAM, такие как пороговое напряжение, изменение сопротивления при переключении, а также паразитные эффекты. Схема и модель SPICE также могут быть легко расширены за счет включения дополнительных эффектов, связанных с изменением внутреннего состояния, а также являются основой при разработке и моделировании памяти и логических схем на основе резистивных коммутационных элементов.

Элемент RRAM - это наноструктура, которая функционирует на основе обратимого резистивного переключения под действием импульсов электрического тока различной полярности. Такие схемы расширяют функциональность интегральных схем, являются энергонезависимыми и имеют возможность 3D-интегрирования [1].

Для моделирования в среде SPICE была создана эквивалентная схема. В ней переменная состояния представлена в виде плавающего напряжения в узле между идеальным конденсатором и источником тока (рис. 1).

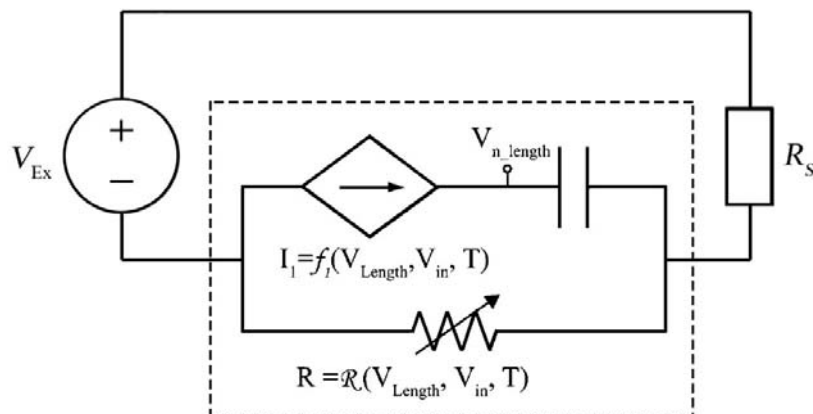


Рис. 1. Схема для расчета динамики переключения элемента RRAM.
Эквивалентная схема RRAM обведена пунктиром

Для проведения расчетов схема соединяется последовательно со статическим резистором R_S и программируется импульсами напряжения. В результате проведенных расчетов установлено, что переключение ячейки характеризуется гистерезисным эффектом и пороговым напряжением, связанным с резким изменением сопротивления при переключении. Согласно динамике процесса пороговое напряжение не является фиксированным и зависит от скорости нарастания (развертки) напряжения. Например, при изменении скорости развертки с 2 до 8 В/с, пороговое напряжение изменяется с 2.4 до 2.6 В. Этот эффект зависимости порога напряжения от скорости развертки был подтвержден экспериментально и использован в моделях SPICE.

На рис. 2 показана динамика переключения элемента RRAM при приложении программируемых прямоугольных импульсов напряжения 5 В в зависимости от рабочей температуры.

Из полученных результатов видно, что элемент RRAM не включается сразу же, а проходит определенное время, прежде чем измеряемый ток регистрируется (порядка 2-5 нс). Это ожидание включения является уникальным для нелинейного роста проводящей области (токового шнура, или иначе филамента) и текущего тока. Момент переключения (включения) качественно определяется по резкому росту проводимости, таким образом, время включения может быть определено разностью между временем начала приложения программируемого импульса и моментом переключения.

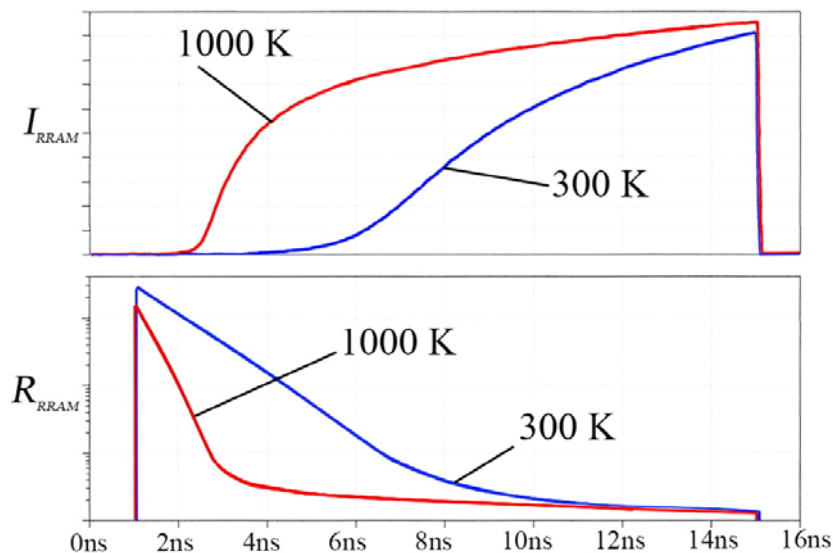


Рис. 2. Динамика переключения элемента резистивной памяти при приложении программируемых импульсов напряжения (5 В) при рабочих температурах 300 и 1000 К

Время включения экспоненциально зависит от внешнего смещения. Этот результат показывает важность динамических эффектов, так как структура характеризуется целым рядом переходных процессов. Полученные результаты по моделированию в пакете SPICE согласуются с экспериментальными данными.

Список литературы

1. Sheridan P., Kim K.-H., Gaba S. et al. // *Nanoscale*. 2011. Vol. 3, № 9. P. 3833-3840.

ВЛИЯНИЕ УПРУГИХ НАПРЯЖЕНИЙ НА ЧАСТОТУ КОЛЕБАНИЙ НАМАГНИЧЕННОСТИ В ФЕРРОМАГНИТНЫХ НАНОСТРУКТУРАХ

А.В. КУХАРЕВ, А.Л. ДАНИЛЮК

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
ул. П. Бровки, 6, г. Минск, 220013, Республика Беларусь
kuharev-sp@mail.ru, danilyuk@nano-center.org*

Посредством численного моделирования исследовано влияние однородных упругих механических напряжений на частоту колебаний намагниченности, возникающих в ферромагнитном слое в форме диска в составе наноструктуры Co/Cu/Co при прохождении через нее спин-поляризованного тока.

Ключевые слова: эффект переноса спина, колебания намагниченности, упругие напряжения.

Колебания намагниченности могут возбуждаться в ферромагнитном слое в составе наноструктуры ферромагнетик/ немагнитный металл /ферромагнетик при прохождении через нее спин-поляризованного тока по механизму переноса спина, открытому Слончевским и Берже [1], что может использоваться для разработки наноразмерных генераторов микроволнового излучения. В процессе формирования таких наноструктур в них возникают упругие механические напряжения. Упругие напряжения приводят к появлению магнитоупругой анизотропии в ферромагнитном материале [2], что обуславливает изменение режимов колебаний намагниченности [3]. Поэтому актуальным является исследование влияния упругих напряжений на частоту колебаний намагниченности в таких структурах.

Исследуемая структура состоит из двух ферромагнитных слоев, разделенных тонкой немагнитной прослойкой. Намагниченность первого ферромагнитного слоя является закрепленной (с помощью антиферромагнетика), а намагниченность второго ферромагнитного слоя – свободной. При пропускании через структуру электрического тока электроны первого слоя передают спиновый угловой момент атомам решетки второго слоя, что создает вращающий момент, действующий на намагниченность. Для описания динамики намагниченности \mathbf{M} свободного ферромагнитного слоя используется обобщенное уравнение Ландау-Лифшица-Гильберта [4, 5]:

$$\frac{\partial \mathbf{M}}{\partial t} = -\gamma [\mathbf{M} \times \mathbf{H}] - \frac{\gamma \alpha}{M^2} [\mathbf{M} \times [\mathbf{M} \times \mathbf{H}]] \quad (1)$$

где t – время, γ – гиромагнитное отношение, α – параметр релаксации Гильберта. Эффективное магнитное поле \mathbf{H} включает поле магнитной кристаллографической анизотропии, размагничивающее поле и поле, связанное с переносом спина, которое пропорционально плотности пропускаемого тока j .

Учет упругих напряжений может быть описан в терминах эффективных размагничивающих факторов [2]. Если к диску вдоль его оси (ось z) приложено однородное механическое напряжение σ_z , то изменение размагничивающего фактора N_z задается формулой

$$\Delta N_z = 3 \frac{\lambda}{\mu_0 M^2} \sigma_z, \quad (2)$$

где λ – константа магнитострикции вдоль оси z , μ_0 – магнитная постоянная.

На рис. 1 представлены результаты моделирования колебаний намагниченности однодоменного слоя кобальта в форме диска толщиной 5 нм и диаметром 50 нм в составе структуры Co/Cu/Co, когда намагниченность закрепленного слоя и кристаллографическая анизотропия диска направлены вдоль оси диска. Результаты моделирования показывают, что в такой структуре возникают устойчивые колебания намагниченности в отсутствие внешних магнитных полей в широком диапазоне изменения плотности пропускаемого тока (от $0,2 \times 10^6$ А/см² до 18×10^6 А/см²). Частота колебаний намагниченности увеличивается с ростом плотности тока, причем при небольших токах зависимость частоты от плотности тока близка к линейной (рис. 1, а). При токах выше 18×10^6 А/см² происходит переключение направления намагниченности, что сопровождается затухающими колебаниями.

Влияние упругих напряжений на частоту колебаний намагниченности наиболее существенно проявляется при больших плотностях тока. Так, при однородной механической нагрузке 100 МПа частота колебаний намагниченности диска изменяется в среднем на 1% при токе $10,0 \times 10^6$ А/см² и на 4% при токе $17,2 \times 10^6$ А/см². При малых токах ($j < 3,0 \times 10^6$ А/см²) влияния напряжений на частоту колебаний не обнаружено (рис 1, б).

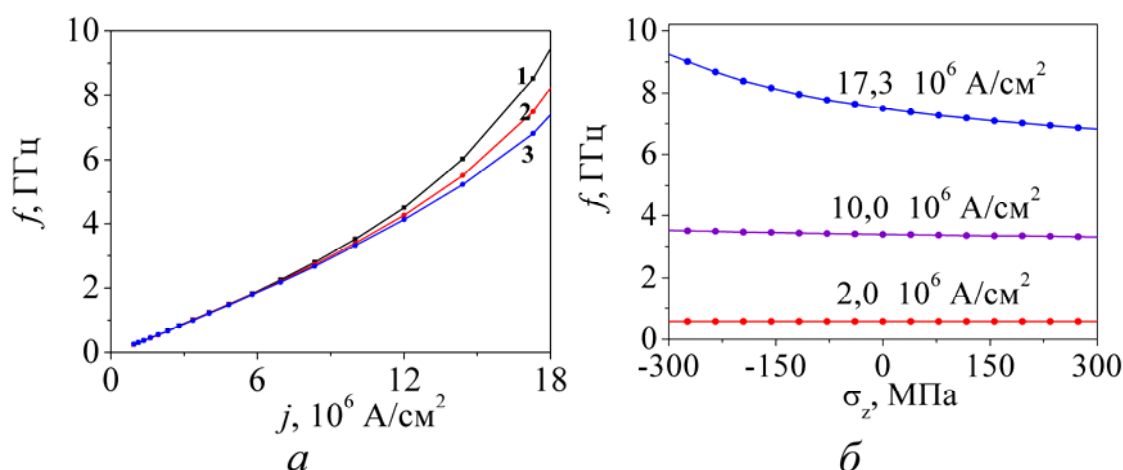


Рис. 1. Частота колебаний намагниченности диска кобальта при воздействии спинполяризованного тока и упругих напряжений: а – зависимость частоты f от плотности тока j (1 при растяжении с $\sigma_z = -300$ МПа, 2 – в отсутствии напряжений, 3 – при сжатии с $\sigma_z = +300$ МПа).

б – зависимость частоты f от величины напряжений σ_z

Список литературы

1. Slonczewski J.C. / J. Magn. Magn. Mater. 1996. Vol. 159. P. 1–7.
2. Baranov S.A. / J. Magn. Magn. Mater. 2003. Vol. 266. P. 278–281.
3. Кухарев А.В., Данилюк А.Л., Борисенко В.Е. // Прикл. физика. 2011. № 4. С. 12–19.
4. Звездин А.К., Звездин К.А., Хвальковский А.В. // УФН. 2008. Т. 178, № 4. С. 436–442.
5. Корнеев В.И., Попков А.Ф., Чиненков М.Ю. // ФТТ. 2009. Т. 51, № 1. С. 118–128.

ФЛУКТУАЦИИ ЛАВИННОГО ТОКА НА НЕРЕГУЛЯРНОСТЯХ СТРУКТУР ДИОДНОГО ТИПА

С.С. ДЕРЕЧЕННИК¹, В.В. БУСЛЮК², Ю.Н. ЯНКОВСКИЙ³, А.М. СТРИБУК⁴

¹*Брестский государственный технический университет
ул. Московская, 267, г. Брест, 224017, Республика Беларусь
cm@brest.by*

²*Научно-исследовательское унитарное предприятие «СКБ Запад»
ул. Суворова, 96/1, г. Брест, 224022, Республика Беларусь
skbwest@rambler.ru*

³*Белорусский государственный университет
пр-т Независимости, 4, г. Минск, 220030, Республика Беларусь
yankouski@bsu.by*

⁴*Открытое акционерное общество «Цветотрон»
ул. Карьерная, 11, г. Брест, 224022, Республика Беларусь
postmaster@tsvetotron.com*

Создание твердотельных источников широкополосного шума является одним из важнейших направлений развития электронных систем защиты информации. В этой связи большой интерес представляют кремниевые диоды, генерирующие электрический шум вследствие микроплазменного характера лавинного пробоя p - n -перехода. Интенсификация формирования микроплазм возможна за счет управляемого формирования структурных, фазовых и геометрических нерегулярностей в p - n -переходе и пленочном планарном контакте прибора.

Ключевые слова: кремниевый генератор шума, структурно-геометрическая нерегулярность, наноструктура, лавинный пробой, токовые флуктуации.

Последние десятилетия характеризуется интенсивным развитием электронных систем обработки и защиты информации, предназначенных, в том числе, для портативных устройств. Используемые в таких системах твердотельные приборы, в частности, кремниевые генераторные диоды, должны обеспечивать получение шумового сигнала, оптимального по амплитудным, частотным и статистическим характеристикам. Основой работы современных генераторных диодов являются ударная ионизация и лавинный пробой p - n -переходов. Лавинный пробой реального перехода обычно имеет микроплазменный характер и сильно локализован [1]. Микроплазмы, как правило, располагаются в местах скопления различного рода дефектов и несовершенств [2]. В связи с этим актуальными представляются исследования закономерностей образования структурно-фазовых, геометрических и топологических нерегулярностей в планарных кремниевых структурах, в том числе в тонкопленочных системах на основе силицид- и оксидобразующих металлов.

В качестве объекта исследования были выбраны диоды-генераторы шума ND103, амплитудные и частотные параметры которых превосходят показатели других приборов аналогичного назначения. Основу структуры, не содержащей эпитаксиального слоя кремния, образует подложка 3A2яКДБ0.03(111)4°-460, в которую последовательно проводятся две селективные диффузии фосфора для формирования p - n -переходов: кольцевого (защитного) глубиной 8 мкм с напряжением пробоя 12 В, и центрального (рабочего) глубиной 1 мкм с напряжением пробоя около 9 В. К рабочей области формируется пла-

нарный пленочный контакт Si-V/Ag. Особенности технологии формирования исследуемой структуры являются: длительные высокотемпературные (1050°C и 900°C) воздействия при диффузии, низкотемпературное (320°C) напыление пленки планарного контакта, среднетемпературное (460...520°C) воздействие при герметизации кристалла в корпус. Целью исследования явилось изучение нерегулярностей структуры элементов планарного кремниевого диода как существенных факторов интенсивной генерации широкополосного электрического шума при лавинном пробое *p-n*-перехода.

В работе выполнено имитационное моделирование физического осаждения монослоя и тонких пленок металла на кремниевую подложку, а также экспериментальные исследования: поверхностной плотности дислокаций в подложке, температурных зависимостей электрических характеристик *p-n*-перехода и параметров шумового сигнала диода в различных токовых режимах [3-5].

Низкое удельное сопротивление кремниевых подложек достигается за счет высокой, близкой к пределу растворимости, концентрации легирующих примесей, что обуславливает существование дислокаций с поверхностной плотностью до 100 см^{-2} . В такой системе, наряду с точечными структурными дефектами, присутствуют атомы технологических (фоновых) примесей, таких как медь и железо, которые образуют в кремнии неупорядоченный твердый раствор, нарушающий периодичность кристаллической решетки.

В результате вычислительных экспериментов получены модельные образцы тонких металлических пленок, исследованы их топологические (координационное и контактное числа, форма зерен) и структурно-морфологические характеристики (микропористость, фрактальная размерность кластеров). Установлена слабая упорядоченность и сравнительно малая плотность тонких пленок металла, осаждаемых на подложку с невысокой температурой. В результате высокоэнергетичного процесса легирования формируются фрактальные поверхности раздела (пленочного контакта к кремнию, а также собственно границы *p-n*-перехода) с многочисленными, случайно локализованными нерегулярностями наноразмерного уровня. Одновременно возрастает и структурно-фазовая неоднородность пленок, в том числе за счет образования металлических соединений различного стехиометрического состава.

Нерегулярности, обусловленные структурно-кристаллическим несовершенством подложки, фазовой неоднородностью состава пленочных элементов, а также фрактальной геометрией поверхностей раздела *p-n*-перехода и пленочной контактной системы, приводят к локальным сужениям области пространственного заряда и увеличению в этих местах напряженности электрического поля, инициируя, таким образом, флуктуации лавинного тока за счет интенсивного образования микроплазм при пробое перехода. Геометрический масштаб всех названных нерегулярностей позволяет относить их к так называемым наноструктурам, а сам объект исследования – к наносистемной технике.

Список литературы

1. Грехов И.В., Сержкин Ю.Н. Лавинный пробой *p-n*-перехода в полупроводниках. Л., 1980.
2. Ионычев В.К., Ребров А.Н. // ФТП, 2009. Т. 43, № 7. С. 980–984.
3. Дереченник С.С., Баранов В.В., Раткевич А.В. и др. // Вестник Полоцкого государственного университета, 2004. № 11. С. 79–85.
4. Буслюк В.В., Ворончук С.И., Лешкевич И.В. // Тр. V Междунар. науч. конф. «Материалы и структуры современной электроники». Минск, 10-11 октября 2012. С. 24–27
5. Буслюк В.В., Просолович В.С., Янковский Ю.Н. и др. // Матер. 6-й междунар. НТК «Приборостроение-2013». Минск, 20–22 ноября 2013. С. 271–272.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ВНЕШНЕГО РЕЗОНАТОРА ДЛЯ УСИЛЕНИЯ ВЫСОКОЧАСТОТНОГО СИГНАЛА ПОЛУПРОВОДНИКОВОЙ СВЕРХРЕШЕТКОЙ

В.В. МАКАРОВ¹, А.Е. ХРАМОВ¹, А.А. КОРОНОВСКИЙ¹, О.И. МОСКАЛЕНКО¹,
С.А. КУРКИН¹, К.Н. АЛЕКСЕЕВ², А.Г. БАЛАНОВ^{1,2}

¹*Саратовский государственный университет
ул. Астрахарская, 83, г. Саратов, 410012, Российская Федерация
Саратовский государственный технический университет имени Ю.А. Гагарина
ул. Политехническая, 77, г. Саратов, 410054, Россия
vladmak404@gmail.com*

²*Университет города Лафборо
Loughborough LE11 3TU, United Kingdom*

Исследовано усиление внешнего сигнала автономной сверхрешеткой и сверхрешеткой, помещенной во внешнюю резонансную систему. Показано, что автономная сверхрешетка может усиливать внешний сигнал только на низких частотах до 30 ГГц. Обнаружено, что при подключении внешней резонансной системы области усиления существенно расширяются и смещаются в высокочастотную область (суб-терагерцовый диапазон).

Ключевые слова: полупроводниковая сверхрешетка, суб-терагерцовый диапазон, внешняя резонансная система.

Полупроводниковые сверхрешетки представляют собой наноструктуру, состоящую из нескольких слоев различных (двух и более) полупроводниковых материалов с различной шириной запрещенной зоны, что приводит к периодической модуляции зоны проводимости[1]. В такой структуре реализуются такие интересные квантово-механические эффекты как Брегговские отражения, лестница Ваннье-Штарка, последовательное и резонансное туннелирование, Блоховские колебания[2]. Также, при превышении определенного порогового напряжения в данной структуре может возникать неустойчивость, приводящая к возникновению электронных сгустков (доменов), распространяющихся в продольном направлении. Частота следования этих доменов может достигать сотен гигагерц, что делает сверхрешетку перспективным элементом усилителей терагерцового и суб-терагерцового диапазона.

Использование внешних резонансных систем является широко известным методом для повышения характеристик различных устройств в оптике и радиоэлектронике. В том числе внешний резонатор может быть использован для повышения частоты генерации или усиления внешнего сигнала. В данной работе рассматривается возможность использования внешней резонансной системы для усиления высокочастотного сигнала полупроводниковой сверхрешеткой.

Было исследовано усиление [3] внешнего сигнала в автономной сверхрешетке при изменении его частоты, проведено двухпараметрическое исследование величины усиления от напряжения питания сверхрешетки и частоты внешнего сигнала при различных амплитудах внешнего сигнала. Показано, что в автономной сверхрешетке возможно усиление только на низких частотах внешнего сигнала. Определено характерное поведение системы в клювах синхронизации и в асинхронном режиме.

Далее было проведено исследование усиления внешнего сигнала в сверхрешетке, помещенной во внешнюю резонансную систему при различных частотах внешнего резонатора. Обнаружено, что в данной системе существует возможность усиления внеш-

него сигнала на частоте, существенно превышающей частоту доменного транспорта сверхрешетки (рис. 1), которая в автономном режиме составляет 13.07 ГГц. Причем, в случае малой расстройки частоты резонатора и частоты следования доменов, наблюдаются достаточно узкие области усиления.

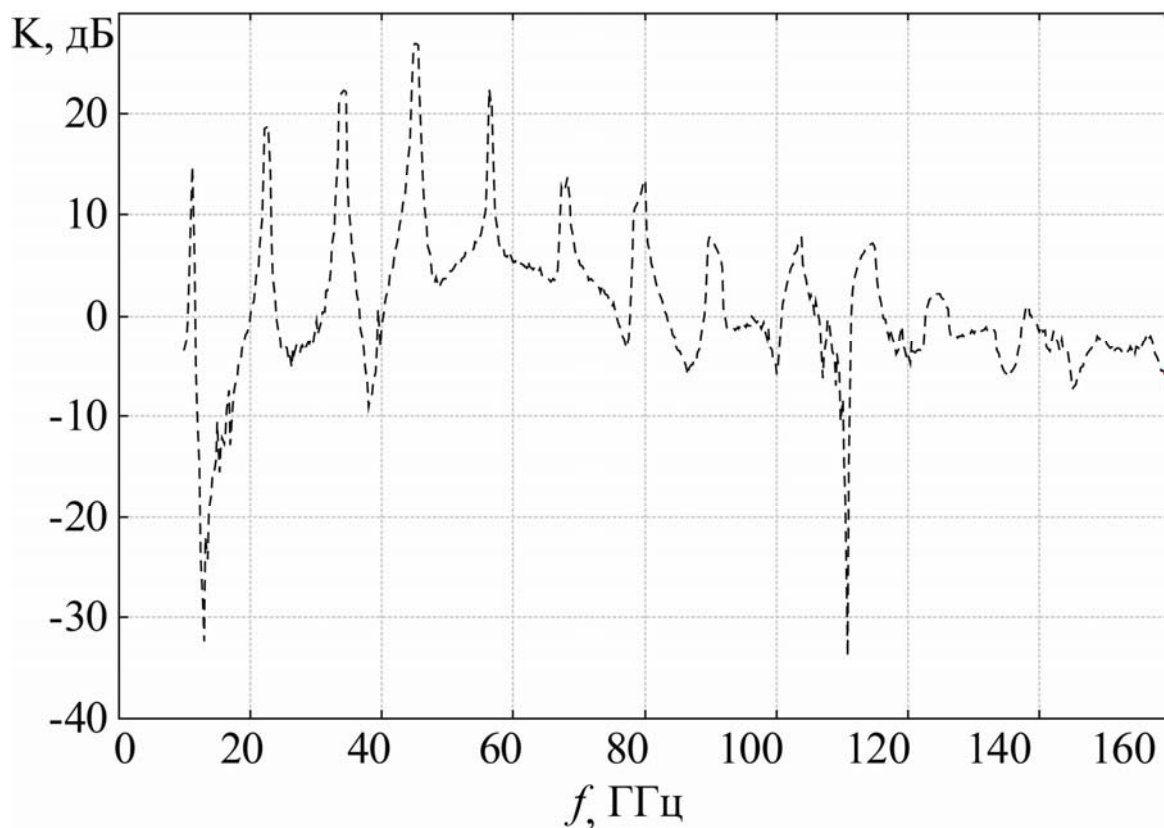


Рис. 1. Усиление внешнего сигнала при изменении частоты внешнего воздействия в сверхрешетке, помещенной во внешний резонатор.
Амплитуда внешнего сигнала 20 мВ, напряжение питания 510 мВ

При увеличении частоты резонатора области усиления расширяются и смещаются на более высокие частоты, что говорит о том, что внешний линейный резонатор позволяет эффективно управлять динамикой системы и параметрами усиления. При существенном удалении частоты резонатора от частоты собственных колебаний сверхрешетки области усиления сужаются и исчезают.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 12-02-33071) и Совета по грантам Президента Российской Федерации для государственной поддержки молодых российских ученых - докторов наук (МД-345.2013.2).

Список литературы

1. *L. Esaki and R. Tsu* // IBM J. Res. Develop. 1970. V. 14 № 1. P. 61.
2. *R. Tsu*, Superlattices to nanoelectronics, Elsevier, 2005.
3. *Timo Hyart Kirill, N. Alekseev and Erkki V. Thuneberg* // Phys. Rev. B. 2008. V. 77 P. 165330.

МОДЕЛЬ ДИОДОВ ШОТТКИ С МОП-КАНАВОЧНОЙ СТРУКТУРОЙ

В.С. КОТОВ¹, В.Е. БОРИСЕНКО²

¹ООО “СКТБ «Микроника»
ул.Тростенецкая, 3, г. Минск, 220033, Республика Беларусь
vladimir.k@micronica-msq.com

²Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
ул. П. Бровки, 6, г. Минск, 220013, Республика Беларусь
borisenko@bsuir.by

Предложена и экспериментально подтверждена модель переноса носителей заряда в мощных кремниевых диодах Шоттки с МОП-канавочной структурой, в которой впервые перенос зарядов через центральную и периферийную область контактов Шоттки разделен на соответствующие составляющие части со своими собственными контактными разностями потенциалов барьера и величиной понижения высоты барьера из-за действия сил изображения и дипольного эффекта.

Ключевые слова: кремний, диод Шоттки, канавочная структура, TMBS, модель диода, пробивное напряжение, прямое напряжение, ток утечки.

Существующие в настоящее время классические представления и модели диодов Шоттки нового поколения: с МОП-канавочной структурой (Trench MOS barrier Schottky diodes, TMBS диодов), не позволяют описать с достаточной точностью экспериментально регистрируемые характеристики (прямое падение напряжения и ток утечки при обратном смещении). Поэтому конструкции и технология изготовления этих диодов пока далеки от оптимальных. Преодолению этого ограничения посвящена данная работа.

В силу конструктивных особенностей TMBS диода электрическое поле в каждом конструктивном элементе диода (ячейке) действует как в зоне формирования барьера Шоттки (перпендикулярно границе раздела металл/полупроводник), так и в структуре поликремний/SiO₂/Si, перпендикулярно боковым стенкам канавок. Поэтому модель диода Шоттки должна учитывать краевые эффекты, обусловленные влиянием дополнительного электрического поля от боковых стенок канавки. В центральной области формирования барьера Шоттки в ячейке (рис. 1) распределение электрического поля можно считать соответствующим классической модели.

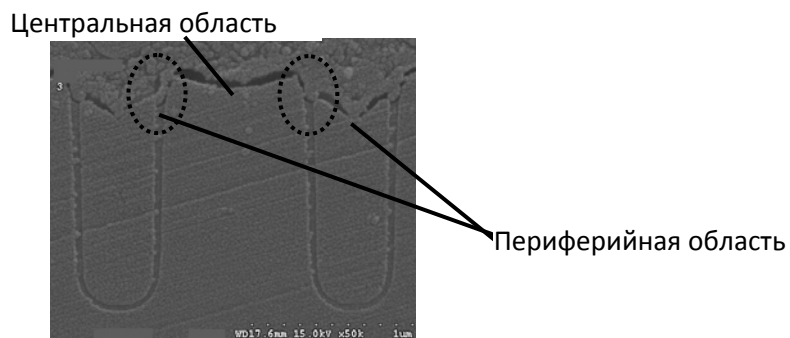


Рис. 1. Расположение центральной и периферийной областей контакта Шоттки в ячейке TMBS диода

Из-за влияния дополнительного электрического поля высота барьера ϕ_B будет разной в центральной и периферийной областях барьера Шоттки..

С учетом вышеизложенного выражение для тока I через TMBS диод в зависимости от приложенного напряжения U_D будет иметь следующий вид [1]:

$$I = \left[S_1 A^* T^2 \exp\left(-\frac{q(\phi_{B1} - \Delta\phi_1)}{kT}\right) + S_2 A^* T^2 \exp\left(-\frac{q(\phi_{B2} - \Delta\phi_2)}{kT}\right) \right] \times \left[\exp\left(\frac{qU_D}{kT}\right) - 1 \right], \quad (1)$$

где S_1 и S_2 – площадь периферийной и центральной контактных областей; ϕ_{B1} , ϕ_{B2} и $\Delta\phi_1$, $\Delta\phi_2$ – контактная разность потенциалов идеального барьера и понижение высоты барьера из-за действия сил изображения и дипольного эффекта соответственно периферийной и центральной областей барьера Шоттки;

Понижение высоты барьера $\Delta\phi$ описывается выражением

$$\Delta\phi = \beta \sqrt{\frac{qE}{4\pi\epsilon_s}} \pm \alpha E, \quad (2)$$

где β - безразмерный коэффициент, который может быть значительно больше единицы для аномального эффекта Шоттки; α - глубина проникновения электрического поля диполя от поверхности контакта Шоттки.

Экспериментальные исследования проводили на TMBS диодах с рабочим напряжением до 100 В и током до 10 А. ВАХ диода при прямом смещении и её сравнение с расчетными данными показаны на рис. 1, при обратном смещении – на рис. 2 [2].

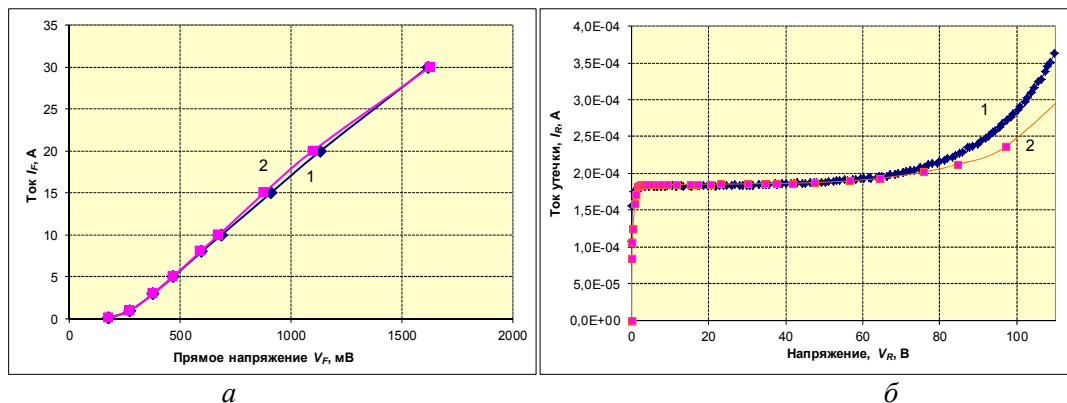


Рис. 2. Экспериментальные (1) и рассчитанные (2) ВАХ TMBS диода:
 a – при прямом смещении, b – при обратном смещении

Результаты численных расчетов в рамках единой модели с высокой степенью точности совпадают с экспериментальными данными во всем диапазоне исследованных ВАХ. Разница между экспериментальными данными и результатами расчета по предложенной модели не превышает 3 % для прямого падения напряжения и 10 % для тока утечки при обратном смещении, что подтверждает корректность модели.

Список литературы

1. Котов В.С., Голубев Н.Ф., Токарев В.В. и др. // Практическая Силовая Электроника. 2013. № 51(3). С. 48–53.
2. Котов В.С., Голубев Н.Ф., Борисенко В.Е. // Доклады БГУИР. 2013. № 5(75). С. 12–16.

МОДЕЛИРОВАНИЕ БИПОЛЯРНОГО ТРАНЗИСТОРА С ИЗОЛИРОВАННЫМ ЗАТВОРОМ, СФОРМИРОВАННОГО ПО КНИ-ТЕХНОЛОГИИ

И.Ю. ЛОВШЕНКО, В.Р. СТЕМПИЦКИЙ, И.М. ШЕЛИБАК

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
ул. П. Бровки, 6, г. Минск, 220013, Республика Беларусь
nil44@bsuir.by*

Среди современных приборов силовой электроники в настоящее время доминируют два базовых типа: полевые транзисторы и биполярные транзисторы с изолированным затвором (БТИЗ, англ. Isolated Gate Bipolar Transistor, IGBT), а также различные интегрированные структуры на их основе. БТИЗ вследствие своих исключительных функциональных характеристик, сочетающих положительные свойства мощных полевых и биполярных транзисторов, является широко используемым силовым устройством. БТИЗ, изготовленные по технологии «Кремний на изоляторе» (КНИ, англ. Silicon on insulator, SOI), отличаются высоким значением напряжения пробоя, а также совместимостью с КМОП-технологией.

Ключевые слова: биполярный транзистор с изолированным затвором, конструкция, технология изготовления, статические и динамические характеристики, оптимизация.

Многочисленные требования к мощным электронным системам стимулируют исследования новых конструкций, технологий изготовления, материалов структурных элементов таких приборов и топологий. Совершенствование структур БТИЗ направлено на повышение быстродействия, предельных коммутируемых токов и напряжений.

В работах [1-2] проводились исследования зависимости статических и динамических характеристик БТИЗ от различных технологических параметров ее формирования для структуры, представленной на рис. 1 а. Толщина эпитаксиального слоя такой структуры была выбрана равной 141 мкм, а толщина p^+ -коллекторного слоя – 17 мкм, как и в работе [3].

Из всего разнообразия возможных структур БТИЗ на КНИ описанных в литературе [4-6] была выбрана структура, представленная на рис. 1 б. База транзистора представляет собой пленку кремния, расположенную на изоляционном материале. БТИЗ может иметь любую полярность: биполярный транзистор pnp -типа с n -МОП транзистором или биполярный транзистор pnp -типа с p -МОП транзистором. Большая плотность тока в БТИЗ структурах достигается с помощью сформированного n -кармана истока, увеличивающего ток базы биполярного транзистора в БТИЗ. Затворы могут управлять одним или двумя каналами МОП транзисторов. Вертикальные размеры n -типа дрейфовой области увеличены для повышения плотности тока без роста величины падения напряжения на n -дрейфовой области.

Моделирование технологического маршрута формирования и электрических характеристик структуры БТИЗ на КНИ выполнялось с использованием программного комплекса компании SILVACO [7] в соответствии с последними тенденциями производства БТИЗ на КНИ [8-9].

Толщина подзатворного диэлектрика h_{ox} варьировалась в пределах от 30 до 70 нм. Как показали результаты моделирования, толщина подзатворного диэлектрика оказывает существенное влияние на электрические характеристики БТИЗ на КНИ. При этом время включения для обеих структур БТИЗ остается равным 25 нс, а время выключения возрастает от 55 нс для $h_{ox} = 40$ нм до значения 75 нс $h_{ox} = 30$ нм. Рассчитан-

ные значения времен включения и выключения на порядок меньше (25 нс и 75 нс для БТИЗ на КНИ и 350 нс и 870 нс для структур на объемном кремнии), а величина тока коллектора (30 мкА) больше на порядок чем для вертикальной структуры БТИЗ на основе объемного кремния (4 мкА).

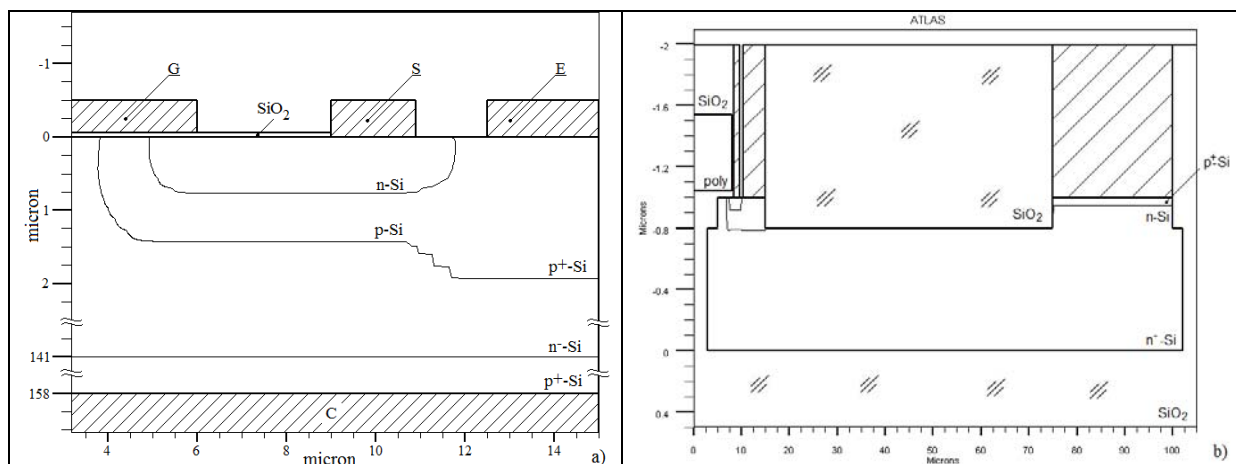


Рис. 1. Структура БТИЗ на объемном кремнии (а) и на КНИ (б)

В табл. 1 приведены данные для сравнения особенностей БТИЗ для устройств, изготовленных по технологии КНИ и по технологии объемного кремния.

Табл. 1. Сравнение электрические характеристики IGBT, производства SOI технологии и по стандартной технологии объемного кремния.

Параметр	БТИЗ на объемном кремнии	БТИЗ на КНИ
Ток коллектора, мкА	5	175
Пороговое напряжение, В	2,5	4,5
Время включения, нс	350	25
Время выключения, нс	870	75

Как видно из табл. 1 БТИЗ на КНИ обладает лучшими динамическими характеристиками, что позволяет использовать его в качестве высокочастотного переключающего элемента.

Список литературы

1. *Ловшенко И.Ю., Стемпицкий В.Р. и др.* // Докл. БГУИР. 2013. №4. С. 10-16.
2. *Ловшенко И.Ю., Стемпицкий В.Р. и др.* // Электроника-Инфо. 2013. №3. С. 23-26.
3. *Khanna V.K.* The Insulated Gate Bipolar Transistor IGBT. Theory and Design / IEEE. 2003.
4. *Hideaki Kawahara, Philip Leland Hower.* // US Patent No. US 2010/0032713 A1.
5. *Masato Taki et al.* // US Patent No. 7,943,957 B2.
6. *Akio Nakagawa et al.* // US Patent No.5,241,210.
7. SILVACO. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://silvaco.com/>. – Дата доступа: 20.01.2014.
8. *Lu L.* // IEEE Industry Applications. 2008.
9. *Lu L.* // IEEE Industry Applications. 2005.

ОПТИМИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ ДИФФУЗИОННО-ДРЕЙФОВОЙ МОДЕЛИ МОП-ТРАНЗИСТОРА

В.Р. СТЕМПИЦКИЙ, А.М. БОРОВИК, ЧАН ТУАН ЧУНГ

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
ул. П. Бровки, 6, г. Минск, 220013, Республика Беларусь
nil44@bsuir.by*

Совокупность недостатков и трудностей при использовании компактных моделей приборов «глубокого субмикрона» требует применения новых подходов и аппроксимационных методов. Особую актуальность при этом имеют методы и алгоритмы оптимизации физико-математических моделей. В связи с этим разработан модифицированный метод прямого поиска с целью оптимизации параметров диффузионно-дрейфовой модели.

Ключевые слова: компактная модель, оптимизация, метод прямого поиска, МОП-транзистор.

Для приборов «глубокого субмикрона» используются компактные модели четвертого поколения [1]. Главным их недостатком является незавершенность используемых физических моделей и механизмов транспорта носителей заряда. Вся совокупность недостатков и трудностей, связанных с использованием таких компактных моделей, требует применения новых подходов и аппроксимационных методов.

Оптимизация, как эффективный алгоритм, позволяющий получить область экстремума целевой функции с заданной точностью, является основной областью использования методов и результатов проведения статистического анализа данных. Особую актуальность имеют методы и алгоритмы, позволяющие получать оценки вектора управляемых переменных, которому соответствует минимальное значение функции $f(x)$. Задача нахождения минимума функции $f(x)$ решается посредством процедуры систематического получения последовательности точек x_0, x_1, \dots, x_k таких, что $f(x_0) > f(x_1) > \dots > f(x_k) > \dots$. После выбора начальной точки x_0 необходимо выбрать направление, вдоль которого предполагается расположить следующую точку, и величину шага. Механизм образования последовательности точек и его эффективность в локализации точки минимума в сильной мере зависят от минимизируемой функции, а также информации, которая может быть использована для определения следующей точки [2].

К числу общих особенностей методов прямого поиска следует отнести относительную простоту соответствующих вычислительных процедур, которые легко реализуются и быстро корректируются. Идея используемой методологии заключается в выборе базовой точки и оценивании значений целевой функции в точках, окружающих ее. При решении задачи с двумя переменными можно воспользоваться квадратным образцом, представляющим собой базовую точку в центре и пробные точки в вершинах. Затем «наилучшая» из пяти исследуемых точек выбирается в качестве следующей базовой точки. В задачах большой размерности вычисление значений целевой функции проводится во всех вершинах, а также в центре тяжести гиперкуба [3].

Оптимизация параметров осуществляется для МОП-транзистора с длиной канала 90 нм [4] для участка ВАХ, соответствующего напряжению на затворе до 0,5 В. Оценка соответствия экспериментальным результатам ВАХ, полученных в результате варьирования значений параметров, проводится по методу наименьших квадратов. В соответствии с [5] наиболее значимыми параметрами модели подвижности Дарвиша

для рассматриваемой области ВАХ являются A_N и α_{1N} . На основании анализа степени и характера влияния значений параметров на ВАХ, выбран диапазон изменения значений параметров ($[2,064; 3,096]$ для A_N , $[0,3; 1,06]$ для α_{1N}), каждый из которых разбит на 8 равных поддиапазонов. В табл. 1 представлены значения СКО, соответствующие рассматриваемым точкам двумерной области на каждом из этапов реализуемого алгоритма при движении к оптимальному значению. Очевидно, что на последнем этапе базовая точка является наиболее оптимальной. Затем аналогично был рассмотрен новый, значительно меньший, диапазон ($[2,838; 3,096]$ для A_N , $[0,87; 1,06]$ для α_{1N}), включающий ранее найденную точку. В результате определены значения параметров модели Дарвиша ($A_N=2,999$, $\alpha_{1N}=0,989$), обеспечивающие получение наименьшего значения СКО, а значит, и оптимальных параметров модели для выбранных условий исследования. ВАХ, демонстрирующие результаты проведенной оптимизации, представлены на рис. 1.

Табл. 1. Значения СКО в рассматриваемых точках двумерной области

Номер этапа	Значения параметров в точке	СКО, А	Номер этапа	Значения параметров в точке	СКО, А
1	$A_N=2,58; \alpha_{1N}=0,68$ (базовая)	8,55699E-06	3	$A_N=2,838; \alpha_{1N}=0,87$ (базовая)	5,59562E-06
	$A_N=2,709; \alpha_{1N}=0,775$	7,75045E-06		$A_N=2,967; \alpha_{1N}=0,965$	1,37447E-06
	$A_N=2,451; \alpha_{1N}=0,775$	8,30842E-06		$A_N=2,709; \alpha_{1N}=0,965$	7,10758E-06
	$A_N=2,451; \alpha_{1N}=0,585$	8,99669E-06		$A_N=2,709; \alpha_{1N}=0,775$	7,75045E-06
	$A_N=2,709; \alpha_{1N}=0,585$	8,38378E-06		$A_N=2,967; \alpha_{1N}=0,775$	1,52195E-06
2	$A_N=2,709; \alpha_{1N}=0,775$ (базовая)	7,75045E-06	4	$A_N=2,967; \alpha_{1N}=0,965$ (базовая)	1,37447E-06
	$A_N=2,838; \alpha_{1N}=0,87$	5,59562E-06		$A_N=3,096; \alpha_{1N}=1,06$	2,09373E-06
	$A_N=2,58; \alpha_{1N}=0,87$	7,86906E-06		$A_N=2,838; \alpha_{1N}=1,06$	5,12741E-06
	$A_N=2,58; \alpha_{1N}=0,68$	8,55699E-06		$A_N=2,838; \alpha_{1N}=0,87$	5,59562E-06
	$A_N=2,838; \alpha_{1N}=0,68$	6,06104E-06		$A_N=3,096; \alpha_{1N}=0,87$	2,07973E-06

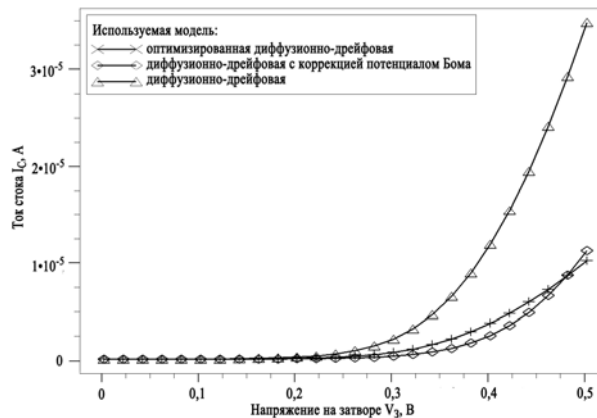


Рис. 1. Вольтамперные характеристики МОП-транзистора

Анализ результатов свидетельствует об эффективности использования предложенной методологии при оптимизации параметров физико-математических моделей.

Список литературы

1. Денисенко В. В. Компактные модели МОП-транзисторов для SPICE в микро- и наноэлектронике. М., 2010.
2. Аоки М. Введение в методы оптимизации. М, 1977.
3. Реклейтис Г., Рейвиндран А., Регсдел К. Оптимизация в технике. Книга 1. М, 1986.

4. "Well-Tempered" Bulk-Si NMOSFET Device Home Page [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www-mtl.mit.edu/researchgroups/Well/>. – Дата доступа: 20.01.2014.

5. Trung Tran Tuan, Borovik A., Stempitsky // V. Proc. of Int. Workshop on New Approaches to High-Tech: Nano-Design, Technology, Computer Simulations (NDTCS'2013) Minsk, 2013. P. 85 – 87.

УДК 621.382

МОДЕЛИРОВАНИЕ ОДИНОЧНОГО СБОЯ В МОП-ТРАНЗИСТОРЕ

И.Ю. ЛОВШЕНКО

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
ул. П. Бровки, 6, г. Минск, 220013, Республика Беларусь
nil44@bsuir.by*

С развитием полупроводниковых технологий, когда постоянно уменьшаются размеры и напряжение питания интегральных микросхем (ИМС), а тактовая частота растет, задача повышения радиационной стойкости становится важной для производителей коммерческой микроэлектроники. Ее решение требует принятия мер на всех уровнях разработки ИМС: синтеза и верификации, трассировки шин питания, конструирования библиотечных элементов схем, технологического процесса изготовления. Моделирование радиационных эффектов позволяет сократить время и затраты на разработку радиационно стойких ИМС.

Ключевые слова: биполярный транзистор с изолированным затвором, конструкция, технология изготовления, статические и динамические характеристики, оптимизация.

Одиночный сбой (ОС, англ. Single-event Upset, SEU) является наиболее распространенным и наименее опасным последствием ионизирующего воздействия. Обычно ОС происходят, когда тяжелые частицы (космические лучи, протоны, электроны, альфа-частицы, термические нейтроны и т.д.) попадают в ИМС. Проникая вглубь полупроводникового материала, они оставляют за собой след свободных носителей заряда [1-2]. В случае обычных МОП-схем в подзатворном диэлектрике происходит генерация электронно-дырочных пар. Импульс тока, вызванный рекомбинацией индуцированных ионом дырок и электронов, изменяет состояние логического элемента. С уменьшением размеров транзисторов уменьшается и величина ионизирующего заряда, достаточного для ОС, который зависит от напряжений на электродах прибора и линейной передачи энергии (ЛПЭ, англ. Linear energy transfer, LET). Основные принципы учета радиационных эффектов при моделировании ИМС изложены в [3].

Моделирование технологического маршрута формирования и электрических характеристик структуры мощного МОП-транзистора выполнялось с использованием программного комплекса компании SILVACO [4].

ОС вызван частицей с линейной энергией транспорта равной $37,2 \text{ МэВ}\cdot\text{см}^2/\text{мг}$ (что соответствует иону брома [1]), проходящей в центре устройства ($x=0$). В момент удара напряжение на затворе равно $-13,9 \text{ В}$, на коллекторе 30 В .

Распределение концентрации дырок через 5, 50 и 150 пикосекунд после радиационного воздействия показаны на рис. 1. Результаты моделирования тока коллектора представлены на рис. 2.

Результаты моделирования показывают, что отдельная ядерная частица (ОЯЧ) вызывает генерацию дополнительных носителей заряда. Эти носители заряда являются причиной увеличения тока коллектора до значения 60 мА. В дальнейшем происходит снижение тока коллектора до первоначальной величины (момент времени $t = 9 \cdot 10^{-10}$ с).

Один из распространенных способов борьбы с ОС и накоплением индуцированного излучением заряда – изготовление ИС по технологии «кремний на изоляторе» (КНИ, англ. Silicon-on-insulator, SOI).

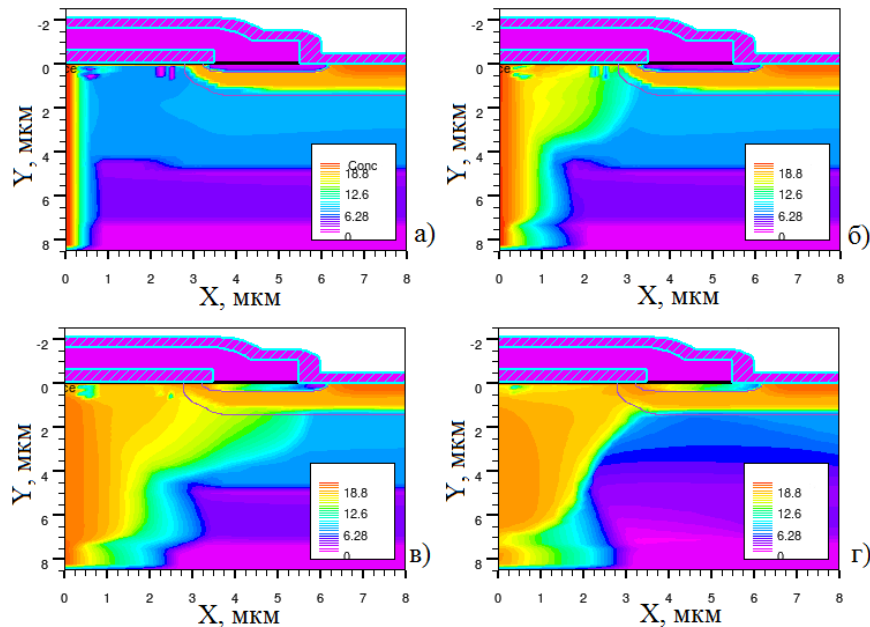


Рис. 1. Распределение концентрации дырок в структуре мощного МОП-транзистора в момент времени $t = 0$ с (а), $t = 5 \cdot 10^{-12}$ с (б), $t = 50 \cdot 10^{-12}$ с (в), $t = 150 \cdot 10^{-12}$ с (г)

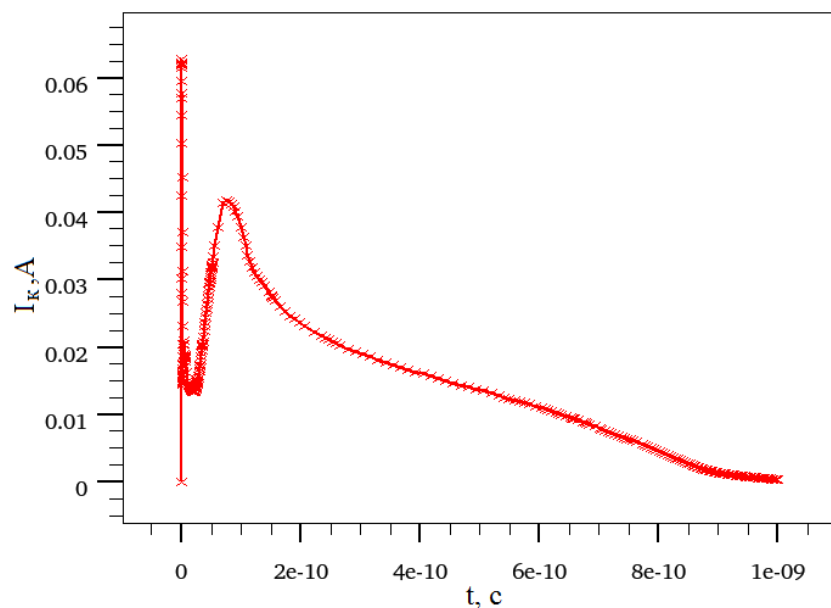


Рис. 2. Динамика изменения тока коллектора

Список литературы

1. Никифоров А.Ю. Радиационные эффекты в КМОП ИС. М., 1984.
2. Чумаков А. И. Действие космической радиации на интегральные схемы. М., 2004.
3. Петросяц К.О., Самбурский Л.М., Харитонов И.А. Компактная макромодель КНИ/КНС МОП-транзистора, учитывающая радиационные эффекты // Известия вузов. Электроника. 2011. №1. С. 20-27.
4. SILVACO. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://silvaco.com/>. – Дата доступа: 20.01.2014.

УДК 621.38.032(075)

ФИЗИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕРМОАКТИВАЦИОННОГО ПРОБОЯ В ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПРИБОРАХ

Б.С. КОЛОСНИЦЫН, И.А. МАНКЕВИЧ

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
ул. П. Бровки, 6, г. Минск, 220013, Республика Беларусь
kafme.bsuir.by*

В работе рассматривается новое направление связанное с механизмами пробоя полупроводниковых приборов. Применение ESD устройств позволяет моделировать физические процессы термоактивационного пробоя биполярных и МОП структур. При этом, благодаря размещению ESD устройства на чипе с изучаемым прибором, появляется возможность задавать максимальные величины напряжений испытания без эффектов образования токовых шнуров.

Ключевые слова: полупроводниковые приборы, испытание ESD устройств, токовые шнуры.

Различные сценарии проводимости тока при пробое и нестабильных условиях могут быть реализованы в устройстве с импульсом электростатического разряда (ESD) в зависимости от конструкции устройства и влияний параметров схемы[1,2].

Физический уровень понимания работы полупроводниковой структуры при ESD разряде имеет решающее значение для успешного проектирования. Таким образом, несмотря на различные устройства защиты от ESD разрядов и устройства подключения, возможен единый подход к физическим эффектам во время ESD тактов. Цель этой работы заключается в демонстрации того, что операция с высоким током при ESD разрядах не только подчиняется тем же принципам, но и имеет набор одних и тех же базовых изотермических механизмов проводимости, которые участвуют в физическом ограничении электрической области безопасной работы полупроводникового прибора (SOA) в стандартных устройствах.

ESD защита стала очень авторитетной областью знаний в связи с развитием интегральных схем.

Стратегической задачей развития ESD является реализация возможности интегральных схем выдерживать высокие импульсные.

На уровне проектирования схемы, ESD можно считать внедрением импульсной силовой цепи в цепь питания ИМС. В идеальном случае, внедрение ESD не должно мешать нормальной работе схемы.

Типичные ESD устройства по существу являются импульсными устройствами питания с некоторыми настраиваемыми компонентами, для работы во время пробоя.

Проблема проектирования ESD устройства заключена в нескольких задачах: обеспечение надлежащего баланса энергии внутри устройства, правильности выбора баланса тока на уровне устройства подключения, получении надлежащего общего уровня тока, и, наконец, предоставлении величин напряжения и импульса тока срабатывания для защиты контакта.

Граница токовой неустойчивости при использовании устройств ESD обычно соответствует импульсному ограничению SOA для стандартных устройств.

Практически в большинстве случаев новый полупроводниковый прибор должен быть разработан не только с реверсивным импульсом основного SOA, но и с конкретными импульсными параметрами границы неустойчивости. Кроме того, желательно, чтобы данная цель была достигнута путем применения топологических решений архитектуры устройства.

В правильно разработанных ESD устройствах реальные физические ограничения связаны с рассеянием энергии ESD импульса. В большинстве случаев, нереверсивная SOA ESD устройства сходятся в одну точку из-за низкого контроля объемной горизонтальной модуляции проводимости в условиях высокой инжекции на поверхности или высоким сопротивлением базовых электродов. Физическое ограничение для необратимого SOA ESD устройства является довольно сложной задачей. В большинстве случаев эта задача может сводиться к модуляции проводимости контактных областей и достижения гораздо большей инжекции из металлических электродов, превышающей пределы внутренней металлизации, локализованным нагревом и плавлением за счет тока шнурования.

Внутренний контур ESD устройства конструируется в расчете на значительно более высокое напряжение, чем уровень перенапряжения пределов SOA для стандартных компонентов. Такое напряжение достигается путем реализации меньшего эффекта сцепления с управляющими электродами устройства, для того, чтобы внутренние блоки схемы работали при максимально возможном напряжении срабатывания в то время, когда управляющий электрод работает при низком потенциале.

В связи с быстрым временем нарастания, ESD импульс автоматически обеспечивает условия для чистого электрического включения. Электрический ток неустойчивости инициируется в квази-изотермических условиях и направлен на модуляцию проводимости высокого тока. В большинстве случаев, изменением температуры кристаллической решетки можно пренебречь до срабатывания за счет равномерного распределения тока и на короткое время до момента отключения.

После включения, наблюдается значительное тепловыделение. Тем не менее, характеристики тепловыделения значительно отличаются от характеристики при постоянном токе. В связи с тем, что импульс достаточно короткий, тепловыделение наблюдается в достаточно небольшой площади (несколько микрометров) в непосредственной близости от активной области устройства. Рассеяние тепла, а так же электромеханическая нагрузка, пробой диэлектрика, блокирование устойчивых связей и внутренних пределов обеспечивают физические ограничение работы ESD устройства.

В работе предложены ESD устройства для моделирования эффектов пробоя в p-n плоскостных и n-канальных МОП транзисторах.

Список литературы

1. Ker M.D., Chang H. // Solid-State Electron. 2000. №44. С. 425–445.
2. Vashchenko V.A., Hopper P. // J. Reliab. 2005. №3. С. 457–471.

АВТОФОТОКАТОДЫ НА ОСНОВЕ МИКРОСТРУКТУР ИЗ КРЕМНИЯ

В.А. СТОЛЕР

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
ул. П. Бровки, 6, г. Минск, 220013, Республика Беларусь
stoler@bsuir.by*

Полупроводники в виде многоострийной системы, имеющие высокую стабильность автоэмиссии в условиях технического вакуума, активно используются в микроэлектронике. Интерес представляет пористый кремний, полученный при электрохимическом анодировании монокристаллического кремния. Ультразвуковая обработка электролита с появлением кавитационных эффектов существенно влияет на гидродинамику в приповерхностной зоне микроструктур из кремния, что позволяет получать качественные автофотокатоды.

Ключевые слова: автокатоды, кремний, электрохимическое анодирование, микроструктуры, ультразвук, кавитация, гидродинамика, приемники излучения.

Необходимость создания интегральных схем, функционирующих в широком интервале температур, имеющих высокую радиационную стойкость, низкую потребляемую мощность, стимулировала в свое время развитие новой ветви микроэлектроники – вакуумных интегральных схем, активным элементом которых являлся ненакаливаемый катод, реализующий принципиальные возможности автоэлектронной эмиссии, такие как большие плотности тока при точечности источника [1]. В настоящее время особое внимание уделяется ненакаливаемым катодам в виде многоострийной системы на основе полупроводников, имеющих высокую стабильность автоэмиссии при давлении 10^{-4} - 10^{-2} Па, тогда как для металлических систем эта величина составляет 10^{-7} Па. Например, микроструктуры из вольфрама при давлении 10^{-5} - 10^{-4} Па и токе 1-2 мкА работают всего несколько минут.

С целью создания многоострийных автокатодов на основе полупроводников с плотностью упаковки микроострий 10^5 мм⁻², устойчиво работающих в вакууме 10^{-4} Па, был использован процесс электрохимического анодирования подложки из монокристаллического кремния для формирования пористого кремния, с последующим травлением его вдоль образованных пор до получения системы микровыступов в виде острий, статистически расположенных на подложке и составляющих единое целое с ней [2]. Образование острий происходило за счёт разной скорости травления по толщине слоя пористого кремния. Получение необходимого профиля микроструктур в ряде случаев, стало возможно благодаря использованию методов ультразвуковой (УЗ) обработки технологических жидкостей с появлением кавитационных эффектов. При этом основной акцент ставился на существенное изменение гидродинамики раствора в приповерхностной зоне обрабатываемой структуры, учет которой дал возможность целенаправленно влиять на геометрические характеристики изделия.

При стандартном электрохимическом процессе формирования поверхностей возникают проблемы связанные с малоподвижностью раствора в зонах сложного рельефа и наличием концентрационно-диффузионных ограничений, появляющихся в связи с соизмеримостью размеров объекта обработки с толщиной диффузионного слоя. Учет граничных условий протекания технологического процесса при УЗ обработке электролита позволяет рассматривать гидродинамическую ситуацию в приповерхностной зоне в зависимости от сложности рельефа обрабатываемой поверхности, идеализировав ко-

тору, в общем случае можно представить в виде каналов капиллярного типа, мысленно изолированных от остальной поверхности, и рассматривать движение раствора в них. Область раствора, выделенную в слой заданной толщины, рассматривали в виде четырехслойной структуры. Расчеты и анализ ситуации в отмеченных слоях с позиций ламинарности и турбулентности потока показали, что в них при обычных условиях реализуется ламинарный режим течения пуазейлевского профиля. Рассматривая зависимость течения от коэффициента молекулярной диффузии, и оценивая толщину диффузионного и вязкого пограничных слоев, приходим к выводу, что в случае УЗ воздействия на поверхность сложного рельефа при размерах меньше 1 мкм в определенных условиях может инициироваться кавитационный процесс с появлением турбулентных течений с признаками кумулятивности, характеризующихся отчетливой границей.

Результаты исследований позволили установить несколько механизмов УЗ воздействия на объект обработки в зависимости от размеров и сложности рельефа его поверхности и параметров ультразвука, среди которых определяющим является кавитационный [3]. Использование выявленных механизмов и их комбинаций, позволило получить острийные структуры с необходимыми характеристиками. Проведённые испытания автоэмиссионных свойств показали, что микроструктуры с плотностью острий 10^5 мм^{-2} в диодном включении обеспечивали ток 5-8 мА в непрерывном режиме и 5 А в импульсном. Стабильный уровень тока фиксировался при прохождении 10^{11} импульсов. Флуктуация тока эмиссии в первые два часа работы составляла 15 %, а через 12 часов работы – 28 % с повышением давления на порядок за счет локального газоотделения анода, связанного с его перегрузкой. Для устранения анодных эффектов использовались импульсы длительностью 50 нс. Сравнительно высокий показатель стабильности свидетельствует об участии большинства микроострий в автоэлектронной эмиссии. Тренировка экспериментальных образцов осуществлялась формовкой катода за счет ступенчатого увеличения отбираемого с него эмиссионного тока с выдержкой по времени. Вольт-амперные характеристики образцов снимались в координатах Фаулера-Нордгейма $\lg(i/u^2)=(1/u)$ и были линейны, что говорит об автоэмиссионном механизме работы катода. Эмитирующая площадь вычислялась из вольт-амперной характеристики по методу Оострома [4].

В заключение необходимо отметить, что острийные автокатоды на основе полупроводников представляют значительный интерес в качестве приёмников излучения в видимой и близкой инфракрасной области, что позволяет создать новый тип электронно-оптических преобразователей [5]. При этом в режиме автофотоэлектронной эмиссии, когда используется область насыщения вольт-амперной характеристики, влияние разброса геометрии микроострий не сказывается на стабильности тока, что важно при эксплуатации приборов на основе острийных автокатодов.

Список литературы

1. Ненакаливаемые катоды / Под ред. М.И. Елинсона. М., 1974.
2. Лыньков Л.М., Столер В.А., Зильберман М.М. Способ изготовления многоострийного автокатаода из кремния / Авторское свидетельство №1342330.
3. Дежкунов Н.В., Котухов А.В., Столер В.А. и др. // Докл. БГУИР. №2(64). 2012. С.92-98.
4. Oostrom A. // J. Appl. Phys. 1962. Vol. 33. N 10. P. 2917.
5. Столер В.А., Столер Д.В. // Тез. докл. XI Белорусско-российской НТК «Технические средства защиты информации». Минск, 5-6 июня 2013. С. 75-76.

ОБОРУДОВАНИЕ

УДК. 621. 382. 088 (088)

ЗОНДОВЫЙ АВТОМАТИЧЕСКИЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ КОНТРОЛЬ МИКРО-, НАНО- И СВЧ-СТРУКТУР НА ПЛАСТИНЕ

В.А. МИНЧЕНКО, Г.Ф. КОВАЛЬЧУК, С.Б. ШКОЛЫК, В.А ЗАЙЦЕВ

*Государственное научно–производственное объединение «Планар»
Партизанский проспект, 2, г. Минск, 220763, Республика Беларусь
shkolyk@kbtcm.by*

Рассмотрены проблемы и указаны пути их решения при зондовом контроле БИС (до 0,3 нс) и СВЧ-полупроводниковых структур на пластине. Предложены принципы построения и структурные схемы СВЧ-зондовых автоматических систем контроля (СВЧ-ЗСК) и СВЧ-контактирующих устройств (СВЧ-КУ) и определены их переходные характеристики (ПХ) с помощью рефлектометрической установки с пикосекундным разрешением. Рассмотрены особенности СВЧ-зондовой установки ЭМ-6390 для контроля СВЧ-структур на поверхностных акустических волнах и электромеханических систем на пластине с использованием векторного анализатора СВЧ-диапазона.

Ключевые слова: зондовый СВЧ-контроль, полупроводниковая пластина.

Современная микро- и нанoeлектроника расширила диапазон рабочих частот до сверхвысоких частот: в структурах на поверхностных акустических волнах (ПАВ), в частности фильтрах и электромеханических микроструктурах (МЭМС) – от сотен МГц до нескольких ГГц. СВЧ-микросхемы используются: в системах связи, микропроцессорах, в системах радиолокации и специальных системах и др.

Особенностями контроля ПАВ, МЭМС и СВЧ-структур и микросхем является достижение воспроизводимости параметров структур в рабочем диапазоне частот (до 6 ГГц) на пластинах диаметром до 200 мм до монтажа их в корпус [1]. Необходимость СВЧ-зондирования структур: многие ИМС СВЧ не могут быть проверены по постоянному току или на низких частотах ввиду своего специального назначения (генераторы, узкополосные усилители СВЧ и др.) Проверка по статическим параметрам не всегда гарантирует их параметры. СВЧ – диапазон требует новых решений СВЧ-ЗСК и СВЧ-КУ, рассмотренных концептуально ниже.

В микроэлектронике достигнуты размеры элементов (за рубежом – 22 нм, в РФ и СНГ – 90нм) и быстродействие БИС до 0,3 нс, что значительно усложняет их автоматический контроль [2-4]. Более сложной проблемой является контроль ПАВ, МЭМС и СВЧ – структур на пластине в гигагерцовом диапазоне. С помощью одного вида ЗСК невозможно контролировать на пластине все типы изделий. ЗСК служат для совмещенного статико-динамического или отдельного контроля быстродействующих ИС (БИС); ЗСК для температурного контроля; СВЧ-системы и др.

Сейчас зондовый контроль осуществляется с помощью специальных систем [2, 3], в частности для контроля параметров ИС (БИС) в нано- и пикосекундном диапазоне используются многоканальные системы с коаксиально-полосковыми зондовыми каналами, обеспечивающими широкополосную коммутацию и подачу (испытательных и измерительных) сигналов без искажений на контактную площадку контролируемых изделий. Контроль параметров СВЧ-структур на данном этапе осуществляется с по-

мощью специализированной зондовой установки контроля ПАВ, МЭМС СВЧ-структур ЭМ-6390, использующая полосково-копланарные измерительные каналы и векторные анализаторы (измерение шумовых и S-параметров структур и изделий).

Концепции построения СВЧ-зондовых контактирующих устройств включают следующие подходы. Концепция 1: коаксиально – копланарная (без встроенного позиционера по координатам X, Y, Z); недостатки – большие размеры и невозможность установки значительного количества СВЧ-зондов, необходимость применения индивидуального позиционера на каждый СВЧ-зонд; концепция 2: полосково-копланарная со встроенным позиционером по координатам X, Y, Z и встроенным СВЧ-трактом (преимущества – малые размеры и ширина СВЧ-КУ, встроенный позиционер). Обе концепции обеспечивают полосу частот 6 – 7 ГГц, используя двух- или многоконтактные: сигнальные и экранные зонды GS, SG, GSG, GSGSG и др.

Перспективно направление конструирования с преобразованием частоты СВЧ-диапазона в промежуточную частоту, которую значительно проще передавать по линии передачи без искажений, однако такая конструкция имеет большие размеры. Проведенные исследования принципов построения и некоторых реальных конструкций показали возможность конструирования СВЧ-КУ в заданном диапазоне частот.

Экспериментальные исследования ПХ ВЧ и СВЧ-трактов зондовой установки ЭМ-6390 проводились с помощью рефлектометрической установки с пикосекундным разрешением: время нарастания ПХ составило для СВЧ-КУ от 50 до 350 пс, для ВЧ-КУ от 0,3 до 1,5 нс [4].

Основными узлами установки являются: позиционер по координатам X, Y, Z, φ (погрешность позиционирования не выходит за пределы ± 4 мкм); индивидуальные позиционеры СВЧ-зондов; СВЧ-зонды; зондовая платформа; СВЧ-трансформаторы; аттенуаторы; измерители: векторный анализатор или измеритель СВЧ-шума; метрологические меры калибровки зондового тракта и др. Особенностью зондовой СВЧ-установки является то, что СВЧ-КУ устанавливаются на позиционерах, обладающих повышенной жесткостью, что обеспечивает точную установку СВЧ-зондов на контактные площадки и надежное контактирование с ними. Использование обычных позиционеров невозможно из-за значительных крутящих моментов, создаваемых коаксиальными кабелями и самими СВЧ-зондами.

Установка ЭМ-6390, производимая в Республике Беларусь (по сравнению с аналогом) может контролировать также цифровые БИС.

Список литературы

1. Бугаец Е.С., Колесова А.В., Орлов О. Е. и др. // СВЧ – зондирование интегральных схем на пластине. Зарубежная радиоэлектроника. № 5. 1990. с.56 – 62.
2. Минченко В.А., Ковальчук Г. Ф., А., Школьник С. Б. // Принципы построения и структурные схемы зондовых автоматических систем контроля параметров изделий микро – и нанoeлектроники на кристалле. Приборы и методы измерений. № 2. 2012, с. 67 – 75.
3. Минченко В. А., Ковальчук Г.Ф., Школьник С.Б. и др. // Анализ и расчет быстродействия измерительных каналов зондового оборудования для контроля изделий микроэлектроники на пластине. Материалы третьей международной научно – практической конференции « Прецизионное оборудование и технологии производства изделий микро – и радиоэлектроники ». Минск . 2012. с. 63 – 67.
4. Ковальчук Г. Ф., Минченко В. А., Школьник С. Б. // Методы и результаты определения параметров измерительных каналов передачи широкополосных сигналов зондовых систем для контроля изделий микро – и нанoeлектроники на кристалле. Метрология и приборостроение. № 4. 2012. с. 28 – 32.

ПРОГРАММНО-АППАРАТНЫЙ КОМПЛЕКС УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОННО-ОПТИЧЕСКОЙ СИСТЕМОЙ

Я.О. ОРЛОВ

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
ул. П. Бровки, 6, г. Минск, 220013, Республика Беларусь
kom_post@mail.ru*

Использование роботизированных систем является одним из важнейших направлений развития МЭМС/НЭМС. В этой связи большой интерес представляют системы управления роботизированными системами, в частности применение микроконтроллерных программируемых блоков для управления и контроля работы систем.

Ключевые слова: роботы, электронно-оптическая система, управление, микроконтроллеры.

Последние два десятилетия характеризуются интенсивным развитием исследований методов управления роботизированными системами. Современные методы управления электронными системами применяют микроконтроллеры. Они представляют собой микросхему, сочетающую на одном кристалле функции микропроцессора, периферийных устройств, постоянных и оперативных запоминающих устройств, и может выполнять простые задачи. К достоинствам микроконтроллера, по сравнению с другими методами управления можно отнести малые габариты, высокое быстродействие, низкое энергопотребление (от 10 мВт в режиме простоя).

Цель работы состоит в создании программно-аппаратного комплекса управления роботизированной пневматической системой, созданием на базе комплекса лабораторно-методического комплекса.

Реализацию аппаратной части комплекса управления принято выполнить на микропроцессорном блоке *Arduino* (рис. 1) с микроконтроллером *ATMega2560*.

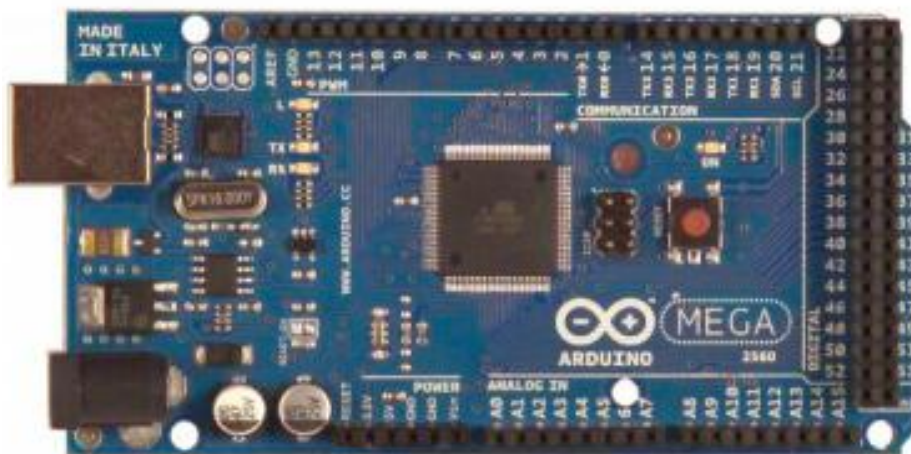


Рис. 1. Общий вид микроконтроллерного блока *Arduino*

К достоинствам данного микроконтроллерного блока можно отнести следующие характеристики:

- низкое энергопотребление
- высокая частота работы до 16 МГц
- наличие до 54 цифровых, 16 аналоговых и 14 ШИМ выходов
- встроенный программатор с интерфейсом USB
- автоматический выбор источника питания
- встроенные защиты микроконтроллера
- малые габариты модуля
- коммуникационные выходы
- открытая кроссплатформенная среда разработки
- простота освоения и применения
- низкое напряжение питания, что снижает опасность использования

Микропроцессорный блок включается в состав комплекса управления с помощью штырьковых выводов и, при необходимости, может быть быстро демонтирован или заменён.

Для программирования блока используется специализированная среда разработки. Используемый в ней язык программирования прост в применении и освоении благодаря тому, что схож с языком программирования C++. Блок подключается к ПЭВМ при помощи стандарта USB и не требует специального оборудования, поскольку функции программатора реализованы на самом блоке.

Цифровые и аналоговые выходы микропроцессорного блока можно использовать как входы. В комплексе реализована обратная связь с применением оптоэлектронных приборов – оптических пар. Это позволит добавить в систему гибкость и дополнительную функциональность технического зрения.

Для работы в составе комплекса будут доступны 12 цифровых выходов для управления пневматическими приводами, 24 цифровых выхода для реализации световой индикации и информирования, 6 аналоговых входов для реализации обратной связи с применением оптоэлектронных приборов.

В комплексе реализована система защищённого включения и аварийного выключения, чтобы предотвратить поражение персонала электрическим током.

Работа комплекса может производиться как в автономном режиме, так и в режиме передачи операций и данных с ПЭВМ.

Лабораторно-методический комплекс позволят в полной мере оценить современные методы управления электронными системами, получить необходимые знания для работы с микропроцессорными блоками.

РАЗРЯДНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ИОННО-ЛУЧЕВОГО ИСТОЧНИКА С АНОДНЫМ СЛОЕМ

Е.П. РОГОВСКИЙ, Д.А. КОТОВ

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
ул. П. Бровки, 6, г. Минск, 220013, Республика Беларусь
eugene.rogovsky@gmail.com, kotov@bsuir.by*

Исследованы разрядные характеристики ионно-лучевого источника с анодным слоем в диапазоне напряжений разряда 1500 – 3500 В и расходов рабочего газа 2 – 7 сссм. Приведена зависимость коэффициента токовой эффективности от напряжения разряда.

Ключевые слова: ионно-лучевой источник с анодным слоем, разрядные характеристики, коэффициент токовой эффективности.

На сегодняшний день ионно-лучевой источник с анодным слоем (ИИАС) получил широкое применение в вакуумной технологии формирования тонкопленочных покрытий [1]. В основе ИИАС с замкнутым, или азимутальным, дрейфом электронов лежит принцип ускорения ионов самосогласованным электрическим полем, которое создается в плазме вследствие резкого уменьшения поперечной подвижности электронов в магнитном поле [2,3]. Для эксплуатации ИИАС важно знать его эффективные режимы работы [4].

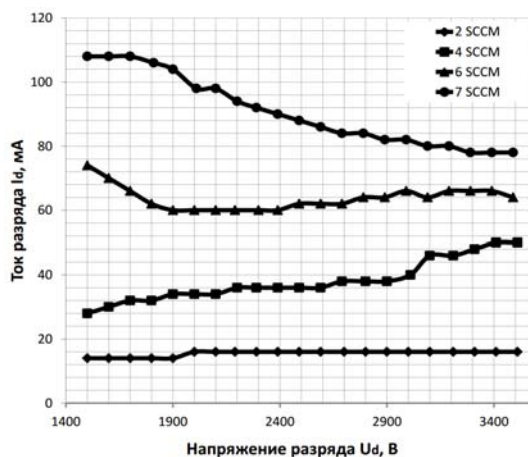


Рис. 1. Семейство кривых ВАХ ионно-лучевого источника при различных расходах рабочего газа

На рис. 1 представлено семейство кривых вольт-амперных характеристик (ВАХ) ИИАС при напряжениях разряда U_d в диапазоне 1500 - 3500 В и при различных расходах рабочего газа (аргон) Q . Насыщение величины тока пучка с ростом напряжения разряда говорит о переходе ИИАС в самосогласованный режим разряда. Режим насыщения тока пучка при уменьшении величины расхода рабочего газа наступает при меньших значениях напряжения разряда, что подтверждает ВАХ источника при $Q = 2$ сссм.

Пик на ВАХ с последующим уменьшением тока пучка при увеличении напряжения разряда при высоком значении расхода рабочего газа $Q = 7$ сссм является след-

ствием сложного поведения газового разряда в магнитном поле присутствующего в ионно-лучевых источниках с анодным слоем [5].

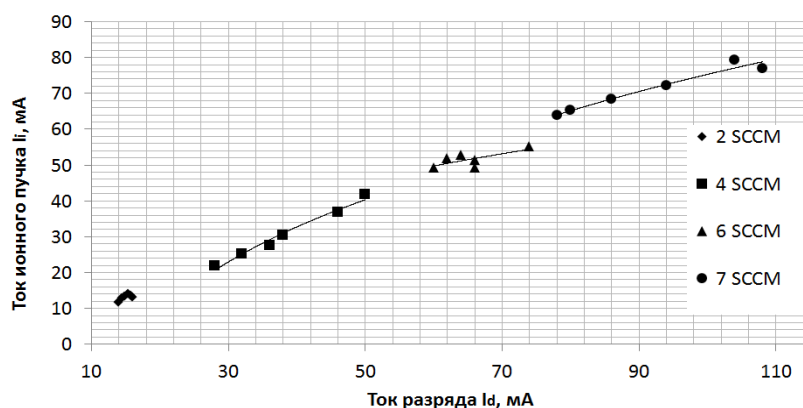


Рис. 2. Зависимость тока ионного пучка от тока разряда

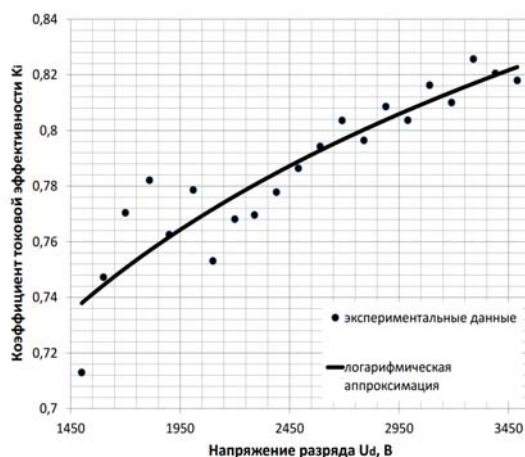


Рис. 3. Зависимость коэффициента токовой ионизации от напряжения разряда

На рис. 2 приведена зависимость тока ионного пучка I_i от тока разряда I_d , которая показывает, что ток I_i не равен I_d . Это является следствием того, что в большинстве режимов работы ИИ рабочий газ ионизирован не полностью или часть его не подвергается воздействию электрического разряда. Коэффициент полезного действия ИИ можно определить через коэффициент токовой эффективности K_i , который равен отношению тока пучка I_i к току разряда I_d [1]. На рис. 3 приведена зависимость K_i от U_d для $Q = 7$ SCCM. ИИАС обладает высоким K_i , значения которого изменяются от 0,71 до 0,82. Таким образом, эффективность ионизации рабочего газа является высокой.

Список литературы

1. Zhurin V.V. Industrial ion sources: broadbeam gridless ion source technology. Weinheim, 2012.
2. Гришин С.Д., Лесков Л.В. Электрические ракетные двигатели космических аппаратов. М., 1989.
3. Zhurin V.V. // Plasma sources sci. technology. 1999. №8. С. 3–25.
4. Роговский Е.П., Котов Д.А., Зеневич Г.В. // Матер. 10-й междунар. конф. «Взаимодействие излучения с твердым телом». Минск, 24–27 сентября 2013 г. С.
5. Zhurin V.V. // VTC. 2010. № 5. С.41–53.

ПРОГРАММНО-УПРАВЛЯЕМЫЕ ИСТОЧНИКИ ТОКА ДЛЯ НАУЧНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ И МОДЕРНИЗАЦИИ ГАЛЬВАНИЧЕСКИХ ПРОИЗВОДСТВ

А.М. ГИРО, М.М. БОРИСИК, А.А. ГЛУШКОВ

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
ул. П. Бровки, 6, г. Минск, 220013, Республика Беларусь
a.m.ghiro@gmail.com*

Разработан ряд специализированных программно управляемых источников тока с использованием технологии высокочастотного импульсного преобразования энергии. Источники позволяют проводить катодные и анодные электрохимические процессы на стабилизированном постоянном, линейно возрастающем (убывающем), униполярном импульсном и знакопеременном импульсном токе. Приборы могут быть использованы как для проведения исследовательских работ, так и в производственных целях. Организовано промышленное производство приборов на одном из предприятий г. Минска.

Ключевые слова: импульсные источники тока, источники импульсного напряжения, программно управляемые источники питания, высокочастотные преобразователи энергии

Процессы гальванического нанесения защитных металлических покрытий на металл и электрохимического анодирования широко используются на предприятиях РБ. По данным, полученным путем экспертных оценок и рассылки опросных листов, оборудование для нанесения гальванических покрытий на промышленных предприятиях РБ в массе своей является морально и физически устаревшим. Более 50% используемого оборудования изготовлено 20 и более лет назад, его физический износ составляет 70 – 80%. Вследствие этого, на предприятиях не могут быть реализованы современные высокоэффективные и энергосберегающие технологии гальванических покрытий. В соответствии с постановлением Совета Министров Республики Беларусь от 31.10.07. № 1421 «Об утверждении Программы технического переоснащения и модернизации литейных, термических, гальванических и других энергоемких производств на 2007-2010 годы» в БГУИР был разработан ряд специализированных программно-управляемых источников тока, которые могут быть использованы как для проведения исследовательских работ, так и в производственных целях. Информация о трех изделиях из разработанного ряда представлена на рис. 1.

Программно-аппаратный комплекс, разработанный для исследовательских и опытно-промышленных целей (рис. 1, а), позволяет осаждать микрослоистые покрытия с различными свойствами и составом отдельных слоев (до десяти микрослоев) в одном технологическом цикле. Для реализации такой возможности формируется до десяти различных последовательностей импульсов тока (напряжения). Источник обеспечивает стабилизированные токи до $\pm 10\text{A}$, напряжения до $\pm 12\text{В}$ при длительности импульсов и пауз от 40 микросекунд до 1000 секунд. При наличии соответствующих программных средств, архитектура прибора позволяет реализовать любую форму и последовательность стабилизированных выходных токов (напряжений), гармонический состав которых находится в частотном диапазоне от 0 до 500 кГц. Программа, обеспечивающая требуемую последовательность и форму импульсов тока (напряжения), задается с помощью управляющего персонального компьютера и записывается в энергонезависимую память микропроцессорного узла управления прибора.

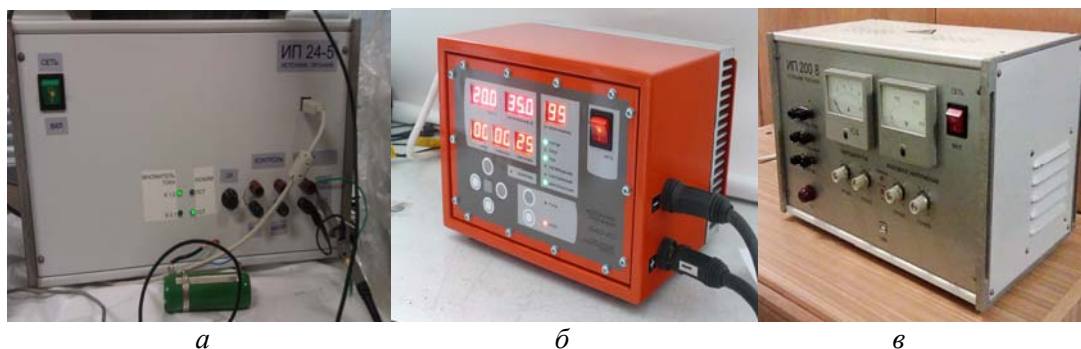


Рис. 1. Программно управляемые источники импульсного тока (напряжения): а- для исследовательских и опытно-промышленных целей; б- для промышленного использования; в- для проведения анодных электрохимических процессов.

Программно управляемый источник импульсного тока (напряжения) для промышленного использования (рис. 1, б) работает в автоматическом режиме в соответствии с одной из ста программ, хранящихся в энергонезависимой памяти. Обеспечивает работу в потенциостатическом либо гальваностатическом режимах с двухэлектродным включением нагрузки. Обеспечивает стабилизированный импульсный, либо постоянный ток (напряжение) в диапазоне от 5 до 100А, при напряжении до 12 В. Длительность импульса и длительность паузы задается в диапазоне от 0,05 до 1000 секунд с шагом 0,01 секунды. Нестабильность выходного тока (напряжения) при изменении сопротивления нагрузки и изменении напряжения сети, не более, $\pm 1,0\%$. Прибор питается от трехфазной сети напряжением 400В, 50 Гц, имеет защиту от короткого замыкания, перегрева и перегрузки. Охлаждение - воздушное принудительное. Корпус прибора обеспечивает степень защиты от внешних воздействий по IP 64. Масса прибора – не более 15 кг, габариты 280x215x265 мм³.

Программно управляемый источник тока (напряжения) для проведения анодных электрохимических процессов (рис. 1, в) работает в режиме ручного либо автоматического управления в соответствии с программой, хранящейся в энергонезависимой памяти. Обеспечивает работу в потенциостатическом либо гальваностатическом режимах с двухэлектродным включением нагрузки. Обеспечивает стабилизированный постоянный ток (напряжение) в диапазоне от 0,5 до 10А, при напряжении до 200 В. Позволяет осуществить автоматическое линейное изменение тока (напряжения) во временном интервале от 1 до 1000 секунд (шаг задания длительности - 1 секунда). Нестабильность выходного тока (напряжения) при изменении сопротивления нагрузки и изменении напряжения сети, не более, $\pm 1,0\%$. Прибор питается от однофазной сети напряжением 230В, 50 Гц, имеет защиту от короткого замыкания, перегрева и перегрузки. Охлаждение – воздушное принудительное. Масса прибора – не более 10 кг, габариты 380x250x240 мм³.

Во всех разработках использованы технологии высокочастотного преобразования энергии [1-3]. Организовано промышленное производство приборов на одном из предприятий г. Минска.

Список литературы

1. R.W. Erickson, D. Maksimovic // Fundamentals of Power Electronics. Springer. 2001. 883 p.
2. Basso C.P. // Switch-mode Power Supply SPICE Cookbook. McGraw-Hill. New York. 2001. 263 p.
3. Мелешин В. // Транзисторная преобразовательная техника. Москва. «Техносфера». 2005. 632 с.

УПРАВЛЕНИЕ В РЕЖИМЕ РЕАЛЬНОГО ВРЕМЕНИ В СИСТЕМАХ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ ПРЕЦИЗИОННОГО ОБОРУДОВАНИЯ

И.В. ДАЙНЯК¹, В.В. ЖАРСКИЙ², Д.Г. БЕГУН¹

¹*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
ул. П. Бровки, 6, г. Минск, 220013, Республика Беларусь
dainiak@bsuir.by*

²*Общество с ограниченной ответственностью «Рухсервомотор»
ул. Монтажников, 5, г. Минск, 220019, Республика Беларусь
v.jariski@ruchservomotor.com*

Рассматривается реализация управления реального времени в мультикоординатных системах перемещений на основе технологии EtherCAT. Представлены структуры систем управления, позволяющие реализовывать все необходимые технологические процессы, на примере универсального сборочного модуля и тестера печатных плат.

Ключевые слова: прецизионная система перемещений, прецизионное оборудование, система управления.

Системы перемещений современного автоматизированного технологического оборудования микроэлектроники представляют собой мультикоординатные системы, построенные на интегрировании в одном рабочем пространстве однотипных координатных модулей, называемых координатными позиционерами. Такая конфигурация характерна для универсальных сборочных роботизированных установок, многофункциональных тестеров контроля многослойных печатных плат, автоматизированных комплексов реализации современных планарных технологий микро- и нанoeлектроники.

Мультикоординатные системы создаются, как правило, на двух параллельных статорах больших размеров, на каждом из которых перемещаются три и более (в зависимости от реализуемой технологии) двухкоординатных планарных позиционера с приводом прямого действия на магнитовоздушной опоре. Такая структура построения оборудования позволяет реализовывать все необходимые технологические процессы и межоперационные транспортные перемещения с повторяемостью в пределах 1 мкм, а выполнение технологических операций возможно с точностью до 1 мкм.

Структурная схема системы управления универсальным сборочным модулем, содержащим шесть позиционеров, с использованием технологии EtherCAT приведена на рис. 1.

Каждый из позиционеров в составе сборочного модуля включает планарный двигатель PF28HS с функцией управляемого разворота в пределах ± 1 углового градуса и две технологические подачи инструментов: практически 3 интерполируемые и 2 независимые оси подачи. В технологических зонах применяются обратные связи на базе интерферометров или голографических оптических решеток с разрешением в единицы нанометров. В транспортном режиме двигатель работает с обратной связью по положению на базе датчика Холла с повторяемостью позиции в пределах 1 мкм.

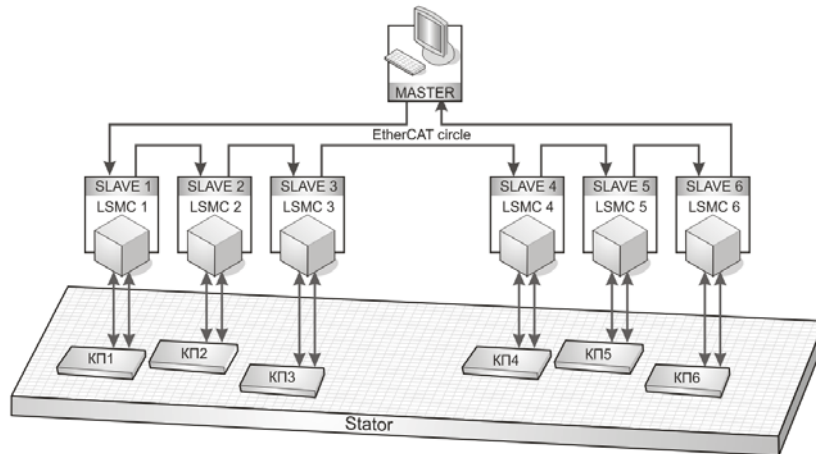


Рис. 1. Структура системы управления универсальным сборочным модулем

Каждый позиционер управляется контроллером на базе LSMC-5, который в режиме EtherCAT-Slave решает задачу реального времени по генерации траектории внутрисплайновой интерполяции, обработки сигналов датчика, расчета положения и скорости объекта управления с учетом возможных коллизий с другими пятью позиционерами, имеющими общую базовую статорную плиту.

Промышленный компьютер PC-Master обеспечивает траекторный расчет точек пересечения сплайнов по 12 позиционным осям, обработку сигналов прецизионных датчиков рабочих постов и поддержку технологии и алгоритма работы всего сборочного модуля.

На рис. 2 приведена структурная схема системы управления 72-координатного тестера печатных плат, разработанного на предприятии «Рухсервомотор» с использованием технологии EtherCAT.

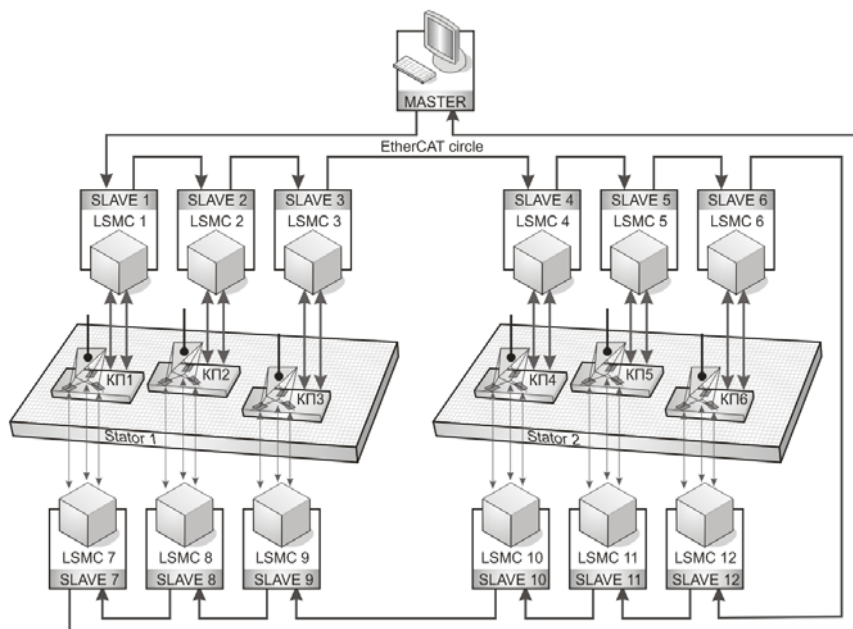


Рис. 2. Структура системы управления тестером печатных плат

При реализации системы были решены три важные системные задачи. Первой из них является расчет и формализация траектории отдельного планарного якоря с тетраэдрной зондовой системой, выполняемая на уровне LSMC-Slave. Вторая задача состоит в аналитическом решении проблемы траекторных коллизий планарных позиционеров и решается на уровне PC-Master. Третья задача – коммуникационная задача передачи информации от промышленного компьютера к контроллерам привода, для решения которой использованы технология и протокол EtherCAT.

УДК 621.794.61:621.357.8:669.71

СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ШАГОВЫМИ ДВИГАТЕЛЯМИ В РЕЖИМЕ РЕАЛЬНОГО ВРЕМЕНИ НА ОСНОВЕ ТЕХНОЛОГИИ ETHERCAT

Д.Г. БЕГУН

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
ул. П. Бровки, 6, г. Минск, 220013, Республика Беларусь
begun.dx@gmail.com*

Разработка прецизионных многокоординатных систем перемещений является важным направлением развития современного технологического оборудования для микроэлектроники. Одним из направлений является совершенствование технологий и алгоритмов управления. Применение технологии EtherCAT предоставляет новые возможности в данной области.

Ключевые слова: шаговый двигатель, EtherCAT, система управления, система перемещений.

Расширению сферы применения персональных компьютеров в системах автоматизации производства способствовало использование промышленных шин. Однако стремительный рост производительности управляющих устройств привел к тому, что традиционные промышленные шины стали «узким местом» вычислительных систем. Сложная многоуровневая архитектура управления, состоящая из нескольких подчиненных систем (как правило, циклических), также стала фактором снижения производительности. В результате время реакции системы может превышать управляющий цикл в 3...5 раз, что уже неприемлемо на сегодняшний день. Поэтому многие разработчики промышленных сетей и многие крупные компании выбрали Ethernet в качестве расширения или замены технологии полевой шины и разработали для этого стандарты.

Существуют различные подходы обеспечить режим реального времени в Ethernet-технологиях. Например, отключение процедуры множественного доступа к общей передающей среде с контролем коллизий (CSMA/CD) и замена ее процедурой последовательного опроса. Однако использование классических технологий Ethernet обеспечивает низкую эффективность обмена полезными данными, не превышающую 5%, при этом каждому устройству данные передаются отдельными Ethernet-пакетами.

Альтернативой такому подходу является использование протокола и технологии EtherCAT. По протоколу EtherCAT пакет, отправленный главным устройством («мастером»), проходит через все устройства, как показано на рис. 1, пока не достигнет конца сегмента или ответвления.

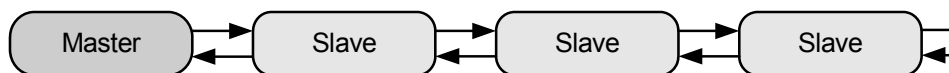


Рис. 1. Направление передачи данных между устройствами EtherCAT

Во время прохождения пакета через EtherCAT-модуль считываются данные адресованные устройству и записываются ответные. При этом время задержки на модуле составляет несколько наносекунд. Типовое время цикла для шины EtherCAT составляет от 50 до 250 мкс, а КПД использования канала связи – до 90%, в то время как у классических полевых шин время обновления занимает от 5 до 15 мс. Технология поддерживает связь «мастер–подчиненный» (master-to-slave), «подчиненный–подчиненный» (slave-to-slave) и «мастер-мастер» (master-to-master). Главной задачей мастера является управление шиной EtherCAT: отправка так называемых телеграмм подчиненным устройствам и получение их обратно [1].

Структура системы управления многокоординатной системы перемещений на основе шаговых двигателей, построенная на базе технологии EtherCAT показана на рис. 2.

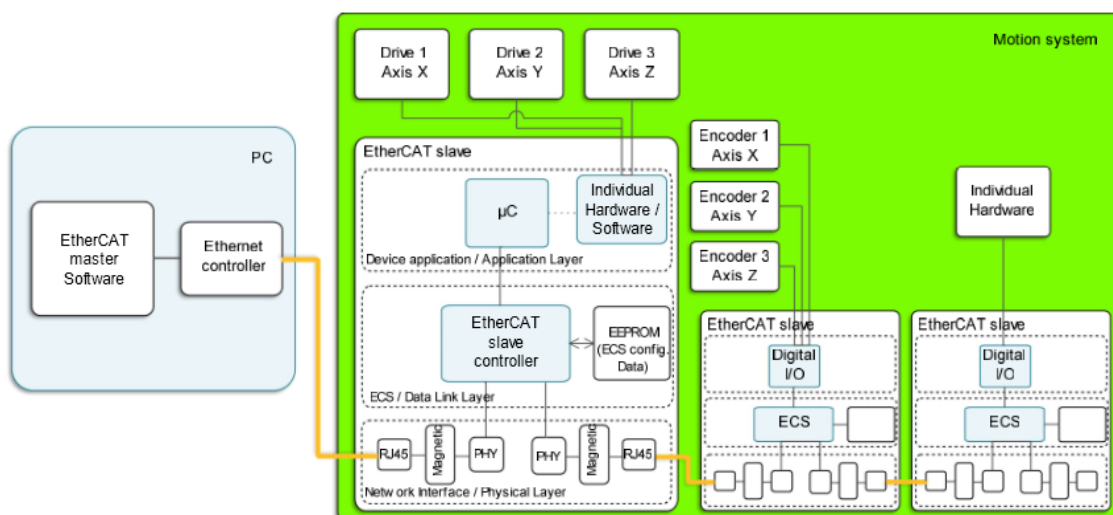


Рис. 2. Структура системы управления многокоординатной системы перемещений на основе протокола EtherCAT

В качестве мастера выступает промышленный компьютер с программой управления, подключенный через стандартный порт к локальной сети Ethernet. Подчиненные устройства, входящие в состав системы перемещений, должны использовать специальный ESC-контроллер (EtherCAT slave controller) для организации взаимодействия с мастером, который может быть реализован в виде отдельного чипа, интегральной схемы специального назначения (ASIC), а также в виде кода для FPGA-матриц [2]. Также в настоящее время существует большое количество библиотек функций (SOEM, IgH и др.), которые можно применить для реализации требуемой программы управления.

Подобная конфигурация системы позволяет реализовать алгоритмы управления шаговыми двигателями, а также другими устройствами системы перемещений на уровне программного обеспечения. Решается проблема синхронизации контуров управления, встроенных в периферийные устройства [3].

Использование технологии и протокола EtherCAT в составе системы многокоординатных перемещений дает и другие новые возможности и преимущества. Среди

них наиболее значимыми являются уменьшение аппаратных ресурсов, удешевление системы в целом, повышение производительности и надежности.

Список литературы

1. EtherCAT – the Ethernet Fieldbus / EtherCAT Technology Group [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <http://www.ethercat.org/en/technology.html>. – Дата доступа: 26.12.2013.

2. EtherCAT Slave Implementation Guide / EtherCAT Technology Group [Электронный ресурс]. – Режим доступа : http://www.ethercat.org/pdf/english/ETG2200_V2i1i0_G_R_SlaveImplementationGuide.pdf. – Дата доступа: 28.12.2013.

3. В.В. Жарский, С.Е. Карпович, И.В. Дайняк и др. Системы многокоординатных перемещений и исполнительные механизмы для прецизионного технологического оборудования. Минск: Бестпринт, 2013. 208 с.

УДК 62-83

ПРЕЦИЗИОННАЯ СИСТЕМА ПЕРЕМЕЩЕНИЙ НА РЕКОНФИГУРИРУЕМЫХ МЕХАНИЗМАХ ПАРАЛЛЕЛЬНОЙ КИНЕМАТИКИ

И.В. ДАЙНЯК, В.В. ПОЛЯКОВСКИЙ, Н.И. КЕКИШ, В.Н. НЕСТЕРЕНКО

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
ул. П. Бровки, 6, г. Минск, 220013, Республика Беларусь
dainiak@bsuir.by*

Рассмотрены особенности построения систем перемещений на основе реконфигурируемых механизмов параллельной кинематики для прецизионного оборудования производства изделий электронной техники. Предложено интегрировать в одну систему исполнительный механизм параллельной кинематики и многокоординатный кольцевой привод на автономно управляемых сегментах. Приведена структура системы управления.

Ключевые слова: прецизионная система перемещений, реконфигурируемый механизм параллельной кинематики, кольцевой электропривод, система управления.

Проведенный анализ сборочного и оптико-механического оборудования показывает, что его центральным узлом, определяющим возможности по дальнейшему уменьшению топологической нормы, повышению производительности, снижению брака при изготовлении ИМС, являются прецизионные координатные системы. Нарращивание функциональных возможностей координатных систем путем традиционного подхода к пространственной компоновке и интеграции нескольких отдельных базовых координатных модулей в одном исполнительном устройстве не позволяет обеспечить повышенной точности на больших скоростях и ускорениях, что является существенным ограничением к увеличению производительности оборудования микроэлектроники. Решение этой проблемы возможно путем перехода к построению прецизионных координатных систем на базе реконфигурируемых механизмов параллельной кинематики.

На кафедре высшей математики в учебно-научной лаборатории «Математическое моделирование технических систем и информационные технологии» под научным руко-

водством проф. С.Е. Карповича и доцента И.В. Дайняка на протяжении последних десяти лет проводятся научно-исследовательские работы по теории структуры, кинематики и динамики механизмов параллельной кинематики с целью изучения возможности построения на их основе прецизионных систем перемещений для технологического оборудования. Благодаря ранее накопленному опыту разработки и создания приводов прямого действия стала возможной интеграция этих двух направлений в конкретные мехатронные изделия, одним из которых и является предложенная в докладе система перемещений с переменным числом степеней свободы до шести включительно. Реализация такой системы как механо-аппаратно-программного комплекса основано на конструктивном, кинематическом, аппаратном и программном объединении кольцевого многокоординатного электропривода с автономно управляемыми сегментами и реконфигурируемого манипулятора параллельной кинематики с шестью степенями свободы. Возможный вариант такой интеграции показан в виде структурно-кинематической схемы на рис. 1.

Для управления перемещениями подвижных сегментов предлагается аппаратно-программный комплекс на основе контроллера LSMC-х, разработанный на предприятии «Рухсервомотор» совместно с НИГ 3.2 «Мехатроника и микросистемы» НИЧ БГУИР, который позволяет одновременно управлять шестью сегментами в замкнутом режиме. Структурная схема системы управления показана на рис. 2.

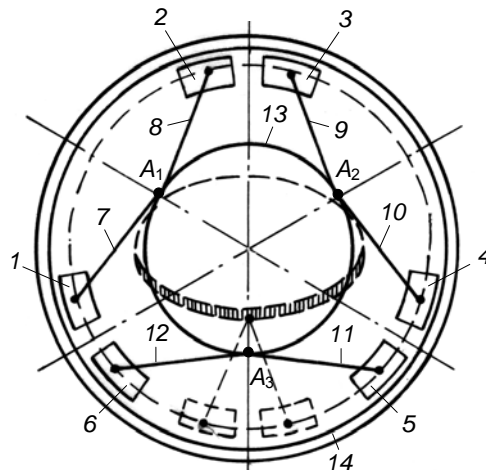


Рис. 1. Структурно-кинематическая схема прецизионной системы перемещений:
 1, 2, 3, 4, 5, 6 – подвижные сегменты; 7, 8, 9, 10, 11, 12 – параллельные кинематические цепи; 13 – подвижная платформа; 14 – кольцевой статор;
 A_1, A_2, A_3 – сферические соединения на подвижной платформе

Представленный вариант системы перемещений обладает повышенной точностью и быстродействием и предназначен для встраивания в сборочное и оптико-механическое оборудование взамен координатных систем на ЛШД. В качестве альтернативы ЛШД впервые предложено использовать этот механизм для адаптивной стабилизации координат позиционирования оптических элементов в виде конструктива из двух колец, одно из которых неподвижно в корпусе с электромагнитными модулями движения, а другое – подвижное с оправкой для оптического элемента, управляемое через промежуточные кинематические цепи.

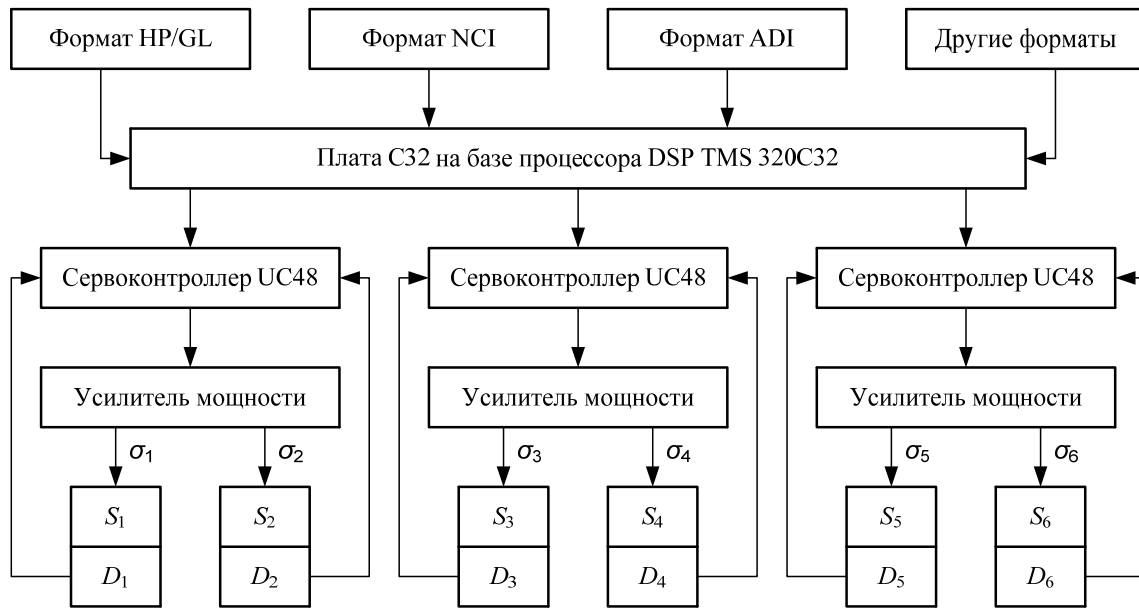


Рис. 2. Структура системы управления на базе контроллера LSMC-х:
 $\sigma_1, \sigma_2, \dots, \sigma_6$ – функции управления; S_1, S_2, \dots, S_6 – подвижные сегменты;
 D_1, D_2, \dots, D_6 – позиционные датчики