

ЭЛЕКТРОННАЯ ТЕХНИКА

СЕРИЯ 3

МИКРОЭЛЕКТРОНИКА

Научно-технический журнал

Выпуск 1 (157) 2015

ELECTRONIC ENGINEERING

SERIES 3

MICROELECTRONICS

Scientific & technical journal

Issue 1 (157) 2015

Москва, 2015

"ЭЛЕКТРОННАЯ ТЕХНИКА. Серия 3. МИКРОЭЛЕКТРОНИКА"

Редакционный совет

Главный редактор

Красников Г.Я., д.т.н., академик РАН

Члены редакционного совета

Аристов В.В., член-корреспондент РАН,

Асеев А.Л., д.ф.-м.н., академик РАН.

Бетелин В.Б., академик РАН, д.ф.-м.н.,

Бокарев В.П., к.х.н., ответственный секретарь,

Бугаев А.С., д.ф.-м.н., академик РАН.

Быков В.А., д.т.н.

Галиев Г.Б., д.ф.-м.н.

Горбачевич А.А. член-корреспондент РАН, д.ф.-м.н.

Горнев Е.С., д.т.н., зам. главного редактора.

Грибов Б.Г., д.х.н., член-корреспондент РАН.

Зайцев Н.А., д.т.н.

Ким А.К., к.т.н.

Критенко М.И., к.т.н.

Немудров В.Г., д.т.н.

Орликовский А.А., д.т.н., академик РАН.

Петричкович Я.Я., д.т.н.

Сигов А.С., д.ф.-м.н., академик РАН.

Стемпковский А.Л., д.т.н., академик РАН.

Чаплыгин Ю.А., д.т.н., член-корреспондент РАН.

Шелепин Н.А., д.т.н. зам. главного редактора

Эннс В.И., к.т.н.

Адрес редакции

124460 г. Москва, Зеленоград,

1-й Западный проезд, д. 12, стр. 1

☎ +7 495 229-70-43

✉ journal_EEM-3@mikron.ru

🌐 www.mikron.ru/journal

Журнал издается с 1965 года

Учредитель

АО "Научно-исследовательский институт молекулярной электроники"

РАЗРАБОТКА И КОНСТРУИРОВАНИЕ

РАДИАЦИОННО-СТОЙКИЙ СЛОЖНОФУНКЦИОНАЛЬНЫЙ БЛОК ПРОЦЕССОРНОГО СИНТЕЗАТОРА ЧАСТОТ С ФАЗОВОЙ АВТОПОДСТРОЙКОЙ ЧАСТОТЫ

А.А.Гармаш, В.Д.Байков 4–9

РАДИАЦИОННО-СТОЙКИЕ ЭЛЕМЕНТЫ ПАМЯТИ ДЛЯ НАНОМЕТРОВЫХ КМОП СФ-БЛОКОВ И СБИС

Ю.М.Герасимов, Н.Г.Григорьев, А.В.Кобыляцкий, Я.Я.Петричкович 10–16

АДАПТАЦИЯ LVDS-ПРИЕМОПЕРЕДАТЧИКОВ ДЛЯ ВЫСОКОСКОРОСТНЫХ ПРИЛОЖЕНИЙ

И.Н.Алексеев, С.В.Кондратенко, Т.В.Солохина 17–24

ПРОЦЕССЫ И ТЕХНОЛОГИЯ

О ЖИДКОСТНОЙ ХИМИЧЕСКОЙ ОЧИСТКЕ ПЛАСТИН ПЕРЕД ПРОВЕДЕНИЕМ ТЕРМИЧЕСКИХ ОПЕРАЦИЙ

В.П.Бокарев, Е.С.Горнев, И.В.Кирюшина, С.О.Ранчин, А.А.Трусов 25–32

СВОЙСТВА МАТЕРИАЛОВ

ВАКУУМНЫЕ ФОТОРЕЗИСТОРЫ НА ОСНОВЕ PBS: ХАРАКТЕРИСТИКИ И МОРФОЛОГИЯ

Б.Н.Мирошников, И.Н.Мирошникова, А.И.Попов, М.Ю.Пресняков 33–40

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ CAR-РЕЗИСТОВ В ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОЙ ЛИТОГРАФИИ

Г.Я.Красников, О.П.Гущин, А.Д.Морозов, П.В.Игнатов, Е.С.Горнев, П.А.Каширин, В.А.Овчинников, Д.В.Базанов, Н.А.Орликовский, В.А.Кальнов 41–48

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

ИЗОБАРЫ АДсорбции ФТОРУГЛЕРОДНЫХ СОЕДИНЕНИЙ, ВЫБРАННЫХ ДЛЯ КРИОГЕННОГО ПЛАЗМЕННОГО ТРАВЛЕНИЯ LOW-K ДИЭЛЕКТРИКОВ

А.А.Резванов, О.П.Гущин, Е.С.Горнев, Г.Я.Красников, К.П.Могильников, Л.Чанг, Ж.-Ф.де Марнефф, К.Дюссаррат, М.Р.Бакланов 49–57

ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ПОВЕРХНОСТНОЙ ПРОВОДИМОСТИ ДИОКСИДА ТИТАНА ПРИ АДсорбции КИСЛОРОДА

С.В.Трошин, В.Н.Мурашев, Н.И.Каргин, Н.А.Харламов 58–62

АННОТАЦИИ 63–64

"ELECTRONIC ENGINEERING. Series 3. MICROELECTRONICS"

Editorial Council

Chief Editor

G.Ya. Krasnikov, Sc.D., Full Member of the RAS

The Members of Editorial Council

V.V. Aristov, Sc.D., Corresponding Member of the RAS

A.L. Aseev, Sc.D., Full Member of the RAS

V.B. Betelin, Sc.D., Full Member of the RAS

V.P. Bokarev, Ph.D., Responsible Secretary

A.S. Bugaev, , Full Member of the RAS

V.A. Bykov, Sc.D.

G.B. Galiev, Sc.D.

A.A. Gorbatshevich, Sc.D., Corresponding Member of the RAS
E.S. Gornev, Sc.D., Deputy Chief Editor

B.G. Gribov, Sc.D., Corresponding Member of the RAS

N.A. Zaitsev, Sc.D.

A.K. Kim, Ph.D.

M.I. Kritenko, Ph.D.

V.G. Nemudrov, Sc.D.

A.A. Orlikovsky, Sc.D., Full Member of the RAS

Ya. Ya. Petrichkovich, Sc.D.

A.S. Sigov, Sc.D., Full Member of the RAS

A.L. Stempkovskiy, Sc.D., Full Member of the RAS

Y.A. Chaplygin, Sc.D., Corresponding Member of the RAS

N.A. Shelepin, Sc.D., Deputy Chief Editor

V.V. Enns, Ph.D.

Editorial Staff Address

1-st Zapadny pr-d 12, str. 1.

Zelenograd, Moscow, 124460, Russian Federation

Phone: +7 (495) 229-70-43

E-mail: journal_EEM-3@mikron.ru

<http://www.mikron.ru/journal>

Journal was published from 1965 year

Founder

Joint-Stock Company "Molecular Electronic Research Institute"

DEVELOPMENT AND DESIGNING

RADIATION-HARD FREQUENCY SYNTHESIZER WITH PHASE LOCKED LOOP FOR MICROPROCESSOR SYSTEM

A.A.Garmash, V.D.Baykov 4–9

RADIATION HARDENED MEMORY CELLS FOR NANOSCALED SRAM IP-BLOCKS AND CHIPS

Y.M.Gerasimov, N.G.Grigoryev, A.V.Kobylyatskiy, Y.Y.Petrichkovich 10–16

ADAPTATION OF LVDS TRANSCEIVERS FOR HIGH-SPEED APPLICATIONS

I.N.Alekseev, S.V.Kondratenko, T.V.Solokhina 17–24

PROCESSES AND TECHNOLOGY

LIQUID CHEMICAL CLEANING OF WAFERS BEFORE THERMAL TREATMENT

V.P.Bokarev, E.S.Gornev, I.V.Kiryushina, S.O.Ranchin, A.A.Trusov 25–32

PROPERTIES OF MATERIALS

VACUUM PHOTORESISTORS BASED ON PBS: CHARACTERISTICS AND MORPHOLOGY

B.N.Miroshnikov, I.N.Miroshnikova, A.I.Popov, M.Yu.Presnjakov 33–40

USING CAR RESISTS IN ELECTRON - BEAM LITHOGRAPHY

G.Y.Krasnikov, O.P.Gushin, A.D.Morozov, P.V.Ignatov, E.S.Gornev, P.A.Kashirin, V.A.Ovtchinnikov, D.V.Bazanov, N.A.Orlikovsky, V.A.Kalnov 41–48

MATHEMATICAL SIMULATION

ADSORPTION ISOBARS OF FLUOROCARBON COMPOUNDS SELECTED FOR CRYOGENIC PLASMA ETCHING OF LOW-K DIELECTRICS

A.F.Rezvanov, O.P.Gutshin, E.S.Gornev, G.Ya.Krasnikov, K.P.Mogilnikov, L.Zhang, J.-F. de Marneffe, C.Dussarrat, M.R.Baklanov 49–57

THEORETICAL CALCULATION OF THE NEAR-SURFACE ELECTRICAL CONDUCTIVITY OF TITANIUM DIOXIDE SUBJECTED TO OXYGEN ADSORPTION

S.V.Troshin, V.N.Murashev, N.I.Kargin, N.A.Kharlamov 58–62

ABSTRACTS 63–64

РАДИАЦИОННО-СТОЙКИЙ СЛОЖНОФУНКЦИОНАЛЬНЫЙ БЛОК ПРОЦЕССОРНОГО СИНТЕЗАТОРА ЧАСТОТ С ФАЗОВОЙ АВТОПОДСТРОЙКОЙ ЧАСТОТЫ

► А. А. Гармаш, В. Д. Байков

Приведены результаты радиационно-стойкого проектирования (РСП) КМОП СФ-блока синтезатора частот (СЧ) с механизмом фазовой автоподстройки частоты (ФАПЧ). Рассмотрены особенности РСП внутренних блоков синтезатора. Приведены результаты испытаний на стойкость к воздействию специальных факторов и рабочие характеристики.

Ключевые слова: синтезатор частот, фазовая автоподстройка частоты, КМОП-микросхемы.

RADIATION-HARD FREQUENCY SYNTHESIZER WITH PHASE LOCKED LOOP FOR MICROPROCESSOR SYSTEM

A. A. Garmash, V. D. Baykov, National Research Nuclear University MEPhI, Moscow

In this article results of radiation-hard design of frequency synthesizer with phase locked loop are presented. The features of indoor units of synthesizer are considered. Results of tests of resistance to special factors and characteristics of performance are presented.

Keywords: frequency synthesizer, PLL, CMOS VLSI.

Для отечественного технологического процесса 180 нм ОАО "НИИМЭ и Микрон" разработан радиационно-стойкий сложно-функциональный блок синтезатора частот с фазовой автоподстройкой частоты, предназначенный для решения задач синхронизации высокопроизводительных цифровых устройств микропроцессорного типа, тактовая частота которых находится в диапазоне 5–600 МГц. Параметры СФ-блока оптимизированы в диапазоне значений напряжения источника питания (VDD) 1,6–2,0 В и в диапазоне рабочих температур –60...125°С. СФ-блок предназначен для интеграции в составе СБИС типа "Система на кристалле" (СНК) и является источником сигнала для проектирования распределенного дерева распространения тактового сигнала. Условное графическое обозначение СФ-блока ФАПЧ приведено на рис.1, назначение внешних выводов – в табл.1. Структурная схема СФ-блока представлена на рис.2. Она включает в себя цифровую и аналоговую часть.

Цифровая часть ФАПЧ:

- делители частоты с программируемыми коэффициентами К, L;
- делители частоты на 16 и на M = 4;
- мультиплексор.



Рис.1. Условное графическое изображение СФ-блока ФАПЧ

Значения К, L дешифрируются из SEL[6 : 0].

Аналоговая часть:

- стабилизированный блок напряжений смещения (не показан);
- фазочастотный детектор (ФЧД);
- зарядно-разрядный блок (Charge Pump);
- емкостной фильтр нижних частот 2-го порядка (ФНЧ): интегрирующая емкость С, демпфирующая цепь С_дR_д;
- генератор частоты (ГУН), управляемый напряжением.

Принцип работы СЧ в основных режимах (PLL_EN = 1, SEL[6:0] = 1...127) основан на использовании механизма ФАПЧ: отрицательная обратная связь (ОС) действует в направлении выравнивания фазы и значения двух поделенных частот на входах ФЧД:

$$CLK_IN / M = f_{ГУН} / (L \times K),$$

где f_{ГУН} – частота управляемого генератора ГУН. Поделенная на К частота ГУН является выходным сигналом ФАПЧ (вывод CLK_OUT):

Таблица 1. Внешние выводы СФ-блока ФАПЧ

Название вывода	Тип цифрового вывода	Назначение вывода
CLK_IN	Вход	Входная частота
PLL_EN	Вход	Разрешение работы PLL
SEL[6 : 0]	Вход	Выбор коэффициента умножения входной частоты
CLK_OUT	Выход	Выходная частота

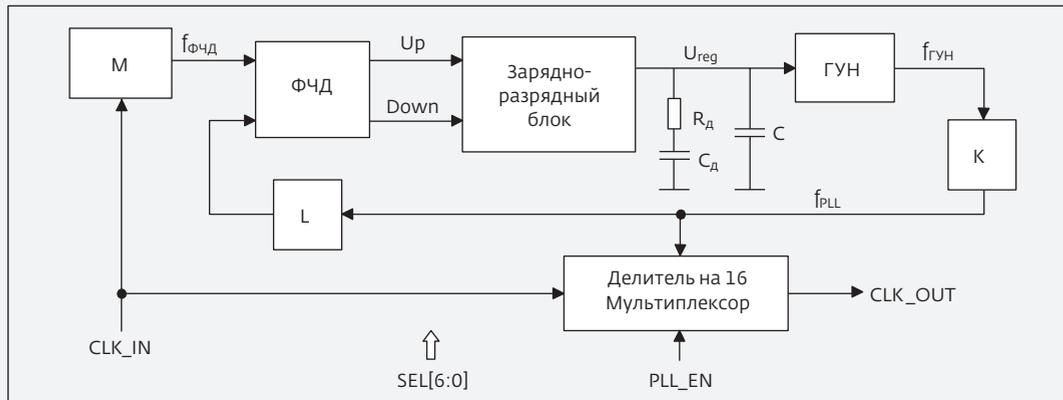


Рис.2. Структурная схема ФАПЧ

$$CLK_OUT = f_{ГУН} / K = CLK_IN \times (L / M).$$

Автоматически поддерживаемое отношение частот

$$CLK_OUT / CLK_IN = L / M$$

представляет запрограммированный коэффициент умножения частоты

ФАПЧ (цифровой код задается сигналом SEL[6 : 0]).

Отклонение от заданного отношения частот или колебания фазы (джиттер) обнаруживаются фазочастотным детектором и являются входным сигналом петли ОС. В зависимости от знака фазового сдвига, ФЧД вырабатывает сигналы Up или Down, управляющие зарядом или разрядом

Таблица 2. Программирование частот и коэффициентов деления (SEL>0)

SEL[6 : 0]	K	K × L	M	f _{PLL} , МГц	f _{ГУН} , МГц	f _{ФЧД} , МГц
127–64	1	508–256	4	762–256	762–256	1–1,5
63–32	2	504–256	4	378–128	756–256	1–1,5
31–16	4	496–256	4	186–64	744–256	1–1,5
15–8	8	480–256	4	90–32	720–256	1–1,5
7–4	16	448–256	4	42–16	672–256	1–1,5
3, 2	32	384, 256	4	18–8	576–256	1–1,5
1	64	256	4	6–4	384–256	1–1,5

емкости C . Зарядно-разрядный блок преобразует импульсы напряжения UP, Down в импульсы тока, заряжающего или разряжающего емкость C . Управляющее напряжение U_{reg} (разность потенциалов на емкости C) и частота $f_{ГУН}$ изменяются в соответствии с сигналом ОС. Параметры ФНЧ соответствуют условиям апериодичности переходных характеристик петли ОС.

Коэффициент умножения частоты не зависит от K . Делитель частоты K программируется так, чтобы компенсировалось влияние коэффициента L на частоту $f_{ГУН}$ и частоту собственного джиттера $f_j \approx 1/\sqrt{K \times L}$ ФАПЧ, что улучшает условия демпфирования колебаний в петле обратной связи. Значение коэффициентов делителей от SEL и соответствующие им частоты приведены в табл.2.

Конструктивные особенности делителя K исключают возможность проникновения высокочастотных помех ("коротких импульсов") на выход CLK_OUT при перепрограммировании ФАПЧ в рабочем режиме [1]. Механизм ФАПЧ не используется при PLL_EN=0 или SEL[6:0]=0 (ГУН отключен: режим минимального энергопотребления). В случае PLL_EN=0 эталонная частота CLK_IN мультиплексируется непосредственно на выход CLK_OUT (CLK_OUT=CLK_IN). В режиме SEL[6:0]=0 эталонная частота CLK_IN мультиплексируется на выход CLK_OUT через делитель частоты на 16 (CLK_OUT=CLK_IN/16).

Особенностью СФ-блока является использование МОП-транзисторов в качестве емкости фильтра низких частот. Благодаря этому занимаемая СФ-блоком на кристалле площадь снижена на 50% по сравнению с вариантом, в котором используются классические металлические емкости.

При проектировании СФ-блока использовались конструктивно-топологические методы радиационно-стойкого проектирования (РСП) [2], направленные на подавление токов утечки паразитных структур и устранение эффекта "зашелкивания":

- обеспечение "жесткой" привязки подложки и карманов в каждом элементе к шинам земли и питания;
- использование охранных p^+ -областей между n -карманом и подложкой (рис.3) и n^+ -областями n -канальных транзисторов (рис.4);
- большие свободные области подложки в СФ-блоке по возможности заполнять заземленной p^+ -охраной.

Для подавления взаимного влияния соседних логических элементов [3] указанные охранные области сформированы в виде кольца, в котором располагать все n -канальные транзисторы. При этом,

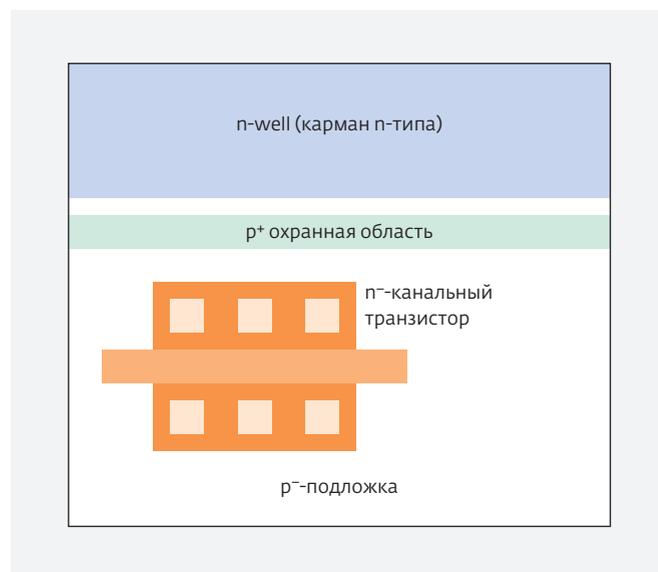


Рис.3. Подавление утечек между карманом n -типа и стоками n -канальных транзисторов с помощью p^+ охранных областей

Таблица 3. Результаты исследований

Дозовое воздействие		Импульсное воздействие		
Параметры-критерии (норма – отклонение на 20%)	Уровень стойкости, ед.	Параметры-критерии (норма – отклонение на 20%)	УПО/УФО, ед./с	КО, ТЭ, ед./с
$P_{\text{вых}}, I_{\text{п}}$	$\geq 10^5$	$P_{\text{вых}}, I_{\text{п}}$	$\geq 1 \times 10^9$	$\geq 2 \times 10^{11}$

топология n-канальных транзисторных структур спроектирована таким образом, чтобы p⁺-области с различными потенциалами

расположены на максимально возможном (в рамках ограничения по занимаемой площади) расстоянии друг от друга. Там, где увеличить расстояние не представлялось возможным, между p⁺-областями с различными потенциалами проложены шины с низким потенциалом, выполненные из металла 1-го уровня (рис.4б). Соседние p⁺-области разделены охранными p⁺-областями (рис.4б). По топологической границе СФ-блок ФАПЧ защищен кольцами аналогового питания и земли.

Общий вид топологии СФ-блока представлен на рис.5. Размеры блока на кристалле 171,12×227,92 мкм², площадь – 39 002 мкм².

Проведенные испытания стойкости СБИС, в которых в качестве источника тактовых импульсов используется разработанный СФ-блок, к различным видам внешних воздействующих факторов [4] не выявили случаев катастрофических отказов и тиристорного эффекта до уровня импульсного воздействия $\approx 2-4 \times 10^{11}$ ед./с. Результаты исследований приведены в табл.3, из которой можно сделать вывод, что схема принадлежит к группе изделий с повышенной радиационной стойкостью (соответствует группам 3Ус, 4Ус).

Подтверждены следующие рабочие характеристики:

- диапазон генерируемых частот 4-762 МГц;

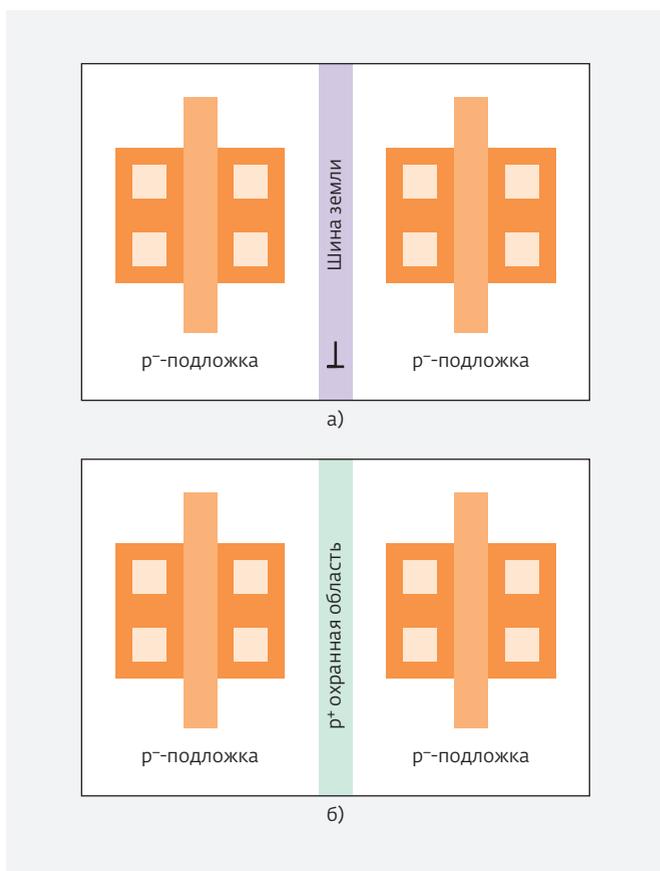


Рис.4. Подавление межприборных утечек: а) ослабление с помощью разделяющих шин земли; б) подавление с помощью p⁺ охранной области

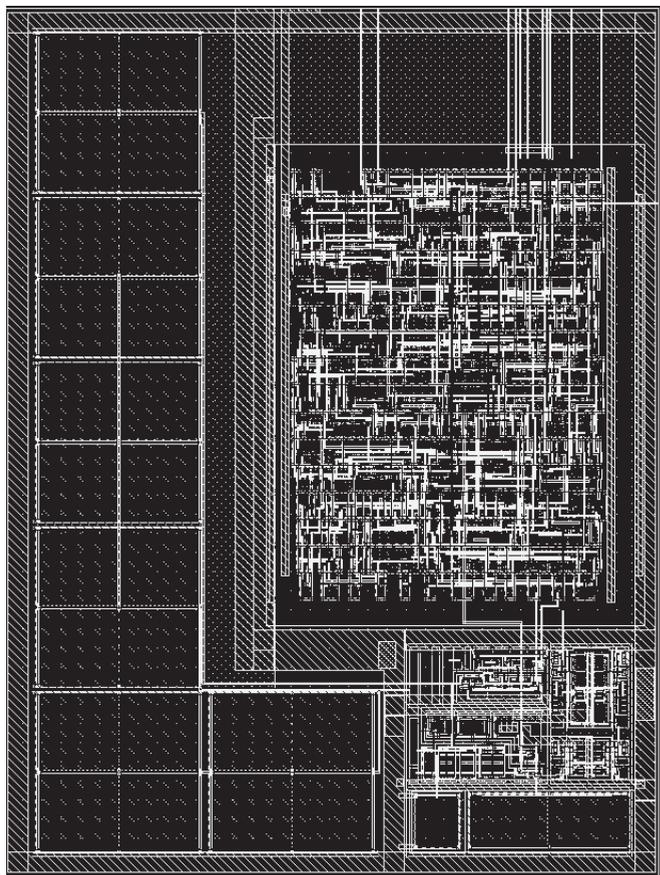


Рис.5. Топология ФАПЧ

- опорная частота 4–6 МГц;
- колебания фазы относительно эталонного сигнала (джиттер) – не более 90 пс;
- время установления запрограммированной частоты – не более 50 мкс;
- потребляемый средний ток при PLL_EN=0 не более 65 мкА;

- потребляемый средний ток при PLL_EN=1 не более 1мА.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гармаш А.А., Рябинин К.А. Исключение появления коротких импульсов на выходе синтезатора частот // Естественные и технические науки, 2011. № 10. С. 33–38.
2. Герасимов Ю.М., Глушков А.В., Григорьев Н.Г., Петричкович Я.Я., Солохина Т.В. Особенности проектирования радиационно-стойких библиотек элементов, СФ-блоков и нано-СБИС СнК // Проблемы разработки перспективных микро- и наноэлектронных систем-2008: сб. трудов / под общ. ред. А.Л.Стемпковского. – М.: ИППМ РАН, 2008. С. 272–275.
3. Герасимов Ю.М., Глушков А.В., Григорьев Н.Г., Солохина Т.В. Библиотека элементов и сложно-функциональных блоков для проектирования радиационно-стойких наноэлектронных КМОП СБИС // VIII Межотраслевая конференция по радиационной стойкости: сб. докладов. – Саров: ФГУП РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2008. С. 31–36.
4. Чумаков А.И. Действие космической радиации на интегральные схемы. – М.: Радио и связь. 2004. 320 с.

РАДИАЦИОННО-СТОЙКИЕ ЭЛЕМЕНТЫ ПАМЯТИ ДЛЯ НАНОМЕТРОВЫХ КМОП СФ-БЛОКОВ И СБИС

► Ю.М.Герасимов, Н.Г.Григорьев, А.В.Кобыляцкий, Я.Я.Петричкович

Проанализированы различные КМОП-элементы памяти, наиболее перспективные для радиационно-стойких применений в составе СФ-блоков ОЗУ для СБИС типа "система-на-кристалле". С использованием методов радиационно-стойкого проектирования для нанометровых КМОП-технологий объемного кремния разработаны и оптимизированы конструктивно-топологические решения этих элементов. Проведено сравнение элементов памяти по основным параметрам, в частности, по параметрам радиационной стойкости. Определены перспективные для данных применений схемотехнические и конструктивно-топологические решения элементов памяти.

Ключевые слова: КМОП-элементы памяти, радиационно-стойкое проектирование, СФ-блоки ОЗУ, СБИС "система-на-кристалле".

RADIATION HARDENED MEMORY CELLS FOR NANOSCALED SRAM IP-BLOCKS AND CHIPS

Yu.M.Gerasimov, N.G.Grigoryev, A.V.Kobylyatskiy, Ya.Ya.Petrichkovich

The most promising CMOS memory cells for radiation tolerant applications as a part of SRAM IP-blocks for 'systems-on-chip' were analyzed. Using RHBD methods in nanoscaled CMOS processes constructive-topological solutions of memory cells were designed and optimized. The comparative analysis of main memory cells parameters, in particular the radiation tolerance, was performed. It was determined the most promising for these applications schematics and constructive-topological solutions of memory cells.

Keywords: CMOS memory cells, Radiation-Hardening-By-Design, SRAM IP-blocks, system-on-chip.

ВВЕДЕНИЕ

Элемент памяти (ЭП) является основным элементом современных КМОП СБИС ОЗУ и сложно-функциональных блоков (СФ-блоков) ОЗУ в составе СБИС типа "система-на-кристалле" (СнК). От параметров ЭП существенно зависят все параметры ОЗУ и, в частности, радиационная стойкость (РС). Традиционно в современных коммерческих КМОП СБИС ОЗУ при разработке конструкции ЭП ориентируются на минимизацию площади кристалла, получение максимального выхода годных, достижение максимального быстродействия и др., то есть руководствуются экономическими и конкурентными соображениями. В результате, эти СБИС ОЗУ обладают низкой радиационной стойкостью.

Имеющиеся в настоящее время технические решения позволяют методами радиационно-стойкого проектирования (РСП) (в зарубежной терминологии: Radiation-Hardening-by-Design – RHBD) [1, 2] по Российским стандартным технологиям объемного кремния (ОК) АО "Микрон" и других предприятий уровня 180–90 нм, а в перспективе и 65 нм, без вмешательства в технологический процесс создавать СФ-блоки и СБИС ОЗУ, удовлетворяющие высоким требованиям по РС для аэрокосмических применений с повышенным сроком активного существования при несущественном снижении быстродействия и увеличения размеров кристалла.

В настоящее время можно считать решенными методами РСП создание КМОП СБИС объемного кремния нечувствительных к эффекту "защелкивания" (Immune Latchup – IL) как при воздействии импульсного облучения высокой мощности дозы $>10^{11}$ Рад/с, так и тяжелых частиц (ТЧ) с ЛПЭ >60 МэВ·см²/мг, и с дозовой стойкостью не менее 300 крад

(в зависимости от мощности дозы) [3]. Однако сбоеустойчивость под действием ТЧ таких ОЗУ низка и пороговое значение LET₀ не превышает (2–3) МэВ·см²/мг.

Поэтому разработка методами РСП радиационно-стойких и сбоеустойчивых статических КМОП ЭП как для СФ-блоков в составе СБИС СнК так и СБИС ОЗУ по российским перспективным наноразмерным технологиям ОК уровня 180–65 нм является актуальной.

КМОП-ЭЛЕМЕНТЫ ПАМЯТИ

В [4, 5] проведен детальный анализ по совокупности параметров трех типов КМОП ЭП, использование которых в настоящее время возможно и целесообразно (в зависимости от требований к параметрам) в РС блоках ОЗУ: классического 6-транзисторного ЭП с транзисторами связи n-типа (6Тn) (рис.1), 8-транзисторного ЭП с транзисторами связи p-типа (8Тр) (рис.2) и сбоеустойчивого 12-транзисторного DICE ЭП с транзисторами связи n-типа (12Тn) (рис.3). На всех рисунках РШ – разрядные шины, АШ – адресная шина, ЗП – столбцовая шина записи.

В подавляющем числе разработок в настоящее время используется ЭП типа 6Тn. В этом

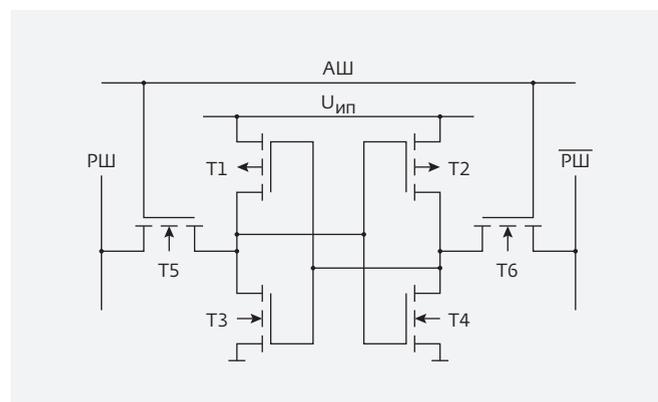


Рис.1. КМОП-элемент памяти 6Тn

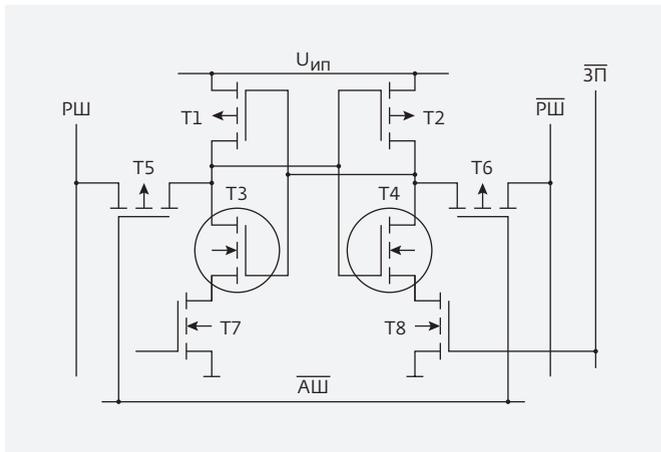


Рис.2. КМОП-элемент памяти 8Т1

ЭП условия записи и неразрушающего считывания накладывают ограничения на соотношение размеров транзисторов как в режиме записи, так и в режиме чтения [4]. Однако для существенного повышения дозовой стойкости ОЗУ (до 1Мрад) использовать такие ЭП с р-канальными (не текущими при облучении) транзисторами связи и транзисторами п-типа кольцевой конфигурации неэффективно: из-за сложности обеспечения условий

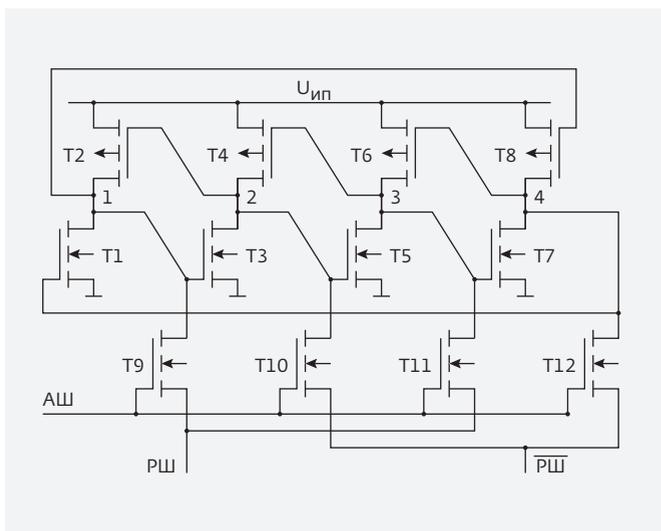


Рис.3. Сбоеустойчивый КМОП DICE ЭП 12Тп

работоспособности в режимах записи и неразрушающего считывания существенно увеличивается площадь ЭП на кристалле.

Для ОЗУ с повышенной дозовой стойкостью перспективным является ЭП типа 8Тр. Особенностью этого ЭП является отсутствие ограничений на соотношение размеров транзисторов в режиме записи и возможность их варьирования в широких пределах, в частности, с целью оптимизации параметров дозовой стойкости и сбоеустойчивости.

В ряде разработок для повышения сбоеустойчивости используется DICE ЭП 12Тп. Однако эти ЭП занимают чрезвычайно большую площадь на кристалле и при переходе на нанометровые технологии в связи с возрастанием множественных сбоев при воздействии тяжелых частиц использование таких ЭП становится неэффективным [6, 7].

ТОПОЛОГИЯ РАДИАЦИОННО-СТОЙКИХ ЭП

С использованием методологии радиационно-стойкого проектирования [2] разработаны конструктивно-топологические решения рассмотренных выше элементов памяти, проведен их анализ. При проектировании топологии РС элементов памяти решалась задача комплексного обеспечения стойкости ЭП к различным радиационным факторам с приоритетом отсутствия катастрофического отказа (эффекта "защелкивания").

Общие принципы, заложенные при разработке топологии РС ЭП:

- обеспечение "жесткой" привязки подложки и "карманов" транзисторов в каждом ЭП к шинам земли и питания;
- использование охранных р⁺-областей между п-карманом и подложкой и п⁺-областями п-канальных транзисторов;

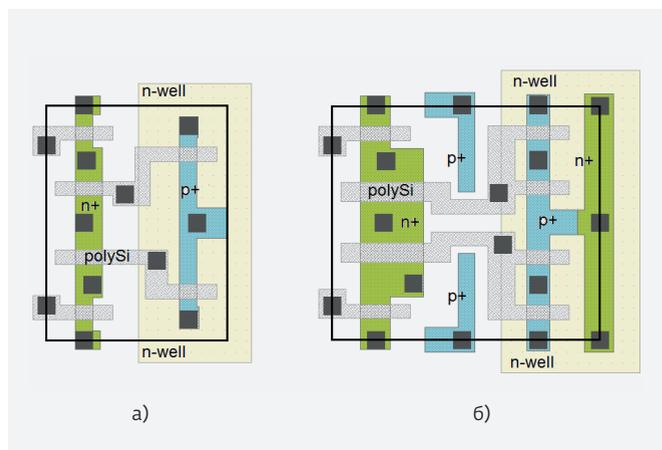


Рис.4. Базовые слои топологии ЭП 6Тn с линейными транзисторами: а) коммерческий – RS, б) радиационно-стойкий – RT

- использование кольцевых транзисторов (КТ) n-типа там, где это необходимо и возможно;
- увеличение эффективного критического заряда в узлах элемента памяти.

На рис.4-6 приведены базовые слои топологии различных вариантов элементов памяти типа 6Тn, 8Тр и 12Тn для технологии 180 нм с использованием линейных (ЛТ) и кольцевых (КТ) транзисторов n-типа. Варианты

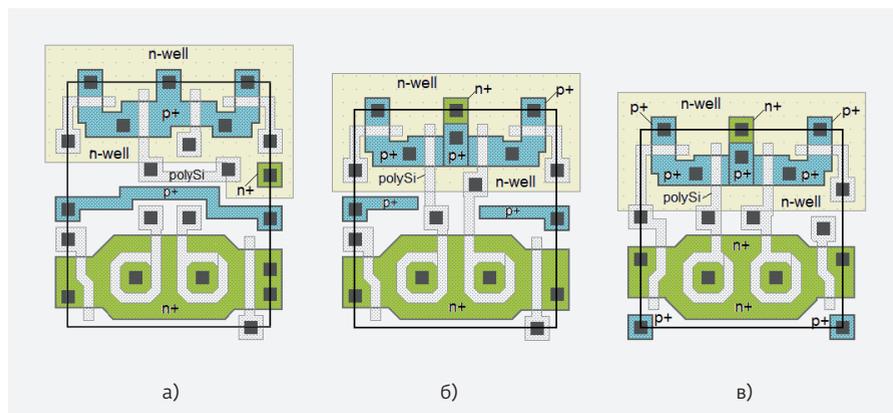


Рис.6. Варианты топологии ЭП 8Тр с кольцевыми n-транзисторами: а) сплошная р⁺-охрана (RH), б) частичная р⁺-охрана (RT), в) без р⁺-охраны (RS)

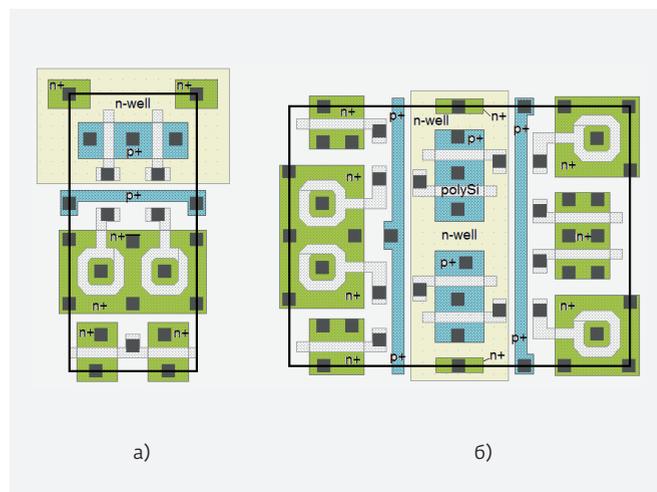


Рис.5. Базовые слои топологии ЭП с кольцевыми транзисторами: а) RH – 6Тn, б) RH – 12Тn (DICE)

конструктивно-топологического исполнения по результатам расчета и эксперимента классифицированы как: "Soft" (RS) – радиационно-нестойкий вариант, "Tolerant" (RT) – радиационно-стойкий вариант, "Hard" (RH) – предельно-стойкий вариант для данной технологии [3].

В табл.1 приведены рассчитанные наиболее важные для сравнения параметры рассмотренных выше ЭП с различными схематехническими и конструктивно-топологическими решениями для технологии уровня 180 нм. Размеры транзисторов во всех ЭП оптимизированы по помехоустойчивости.

В табл.1 приведены следующие собственные параметры ЭП [5]: $S_{ЭП0}$ – площадь на кристалле; I_{XP} – ток хранения данных; $t_{CЧ0}$ – собственное время чтения данных; $t_{ЗП0}$ – собственное время записи.

Таблица 1. Основные параметры КМОП элементов памяти

№ ЭП	Особенности ЭП (вариант)	Собственные параметры				Параметры РС			
		$S_{ЭПО}, \text{мкм}^2$	$I_{ХР}, \text{мкА}$	$t_{счО}, \text{пс/эп}$	$t_{зпо}, \text{пс}$	LT	DT	$Q_{КР}, \text{фФ}$	$K_{СБ}$
1	6Тп-ЛТ (RS)	4,7	20	1,33	55	0	0	7,2	1,55
2	6Тп-ЛТ (RT)	6,5	21	1,28	47	1	0,3	8,2	1,25
3	6Тп-КТ (RH)	10,9	54	0,77	58	1	0,8	20,8	1,9
4	8Тр-КТ 1 (RS)	9,4	64	2,70	158	0	0,3	26,8	2,8
5	8Тр-КТ 2 (RT)	10,3	64	2,70	158	1	0,5	26,8	2,6
6	8Тр-КТ 3 (RH)	11,6	64	2,70	158	1	1	26,8	2,3
7	12Тп-ЛТ (RT)	15,3	30	0,76	52	1	0,3	11,3*	0,75
8	12Тп-КТ (RH)	27,1	68	0,38	52	1	0,8	23,2*	0,85

* По сбою в одном узле.

Параметры, характеризующие радиационную стойкость: $LT = LET/100\text{МэВ}\cdot\text{см}^2/\text{мг}$ – параметр тиристорной защиты (катастрофического отказа); $DT = D0/1\text{Мрад}$ – параметр дозовой стойкости; $Q_{КР} \approx 0,5 \times U_{ИП} \times C_{ЭП} + I_{ХР} \times t_{зпо}$ – эффективный критический заряд в узле триггера ЭП (комплексный параметр сбоеустойчивости при воздействии ТЧ), $S_{ЭП}$ – суммарная узловая емкость.

В последнем столбце табл.1 приведен параметр $K_{СБ} = Q_{КР}/S_{ЭПО}$, характеризующий эффективность использования площади ЭП для повышения сбоеустойчивости.

Анализ данных в табл.1 позволяет заключить, что ЭП в позициях 2, 3 и 6 (выделены серым) являются наиболее эффективными для использования в радиационно-стойких ОЗУ. Выбор того или иного из этих ЭП зависит от требований к другим параметрам и дополнительных ограничений на использование.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ РАДИАЦИОННОЙ СТОЙКОСТИ ЭП

Для оценки эффективности различных конструктивно-топологических решений элементов памяти и их сравнения с коммерческими вариантами для различных технологических уровня 250–130 нм был разработан ряд тестовых кристаллов, один из которых для технологии 180 нм показан на рис.7. Кристалл содержит 5 блоков памяти с различными схемотехническими и конструктивно-топологическими решениями ЭП, в том числе с используемыми в коммерческих компиляторах зарубежных фирм. Количество ячеек в каждом из блоков 128–64 Кбит. Организация тестового кристалла позволяет контролировать токи потребления каждого из накопителей, производить запись и чтение

информации в различных ЭП для контроля сбоев в ЭП.

В табл.2 приведено сравнение статического тока потребления ЭП с различными конструктивно-топологическими решениями после дозового облучения 200 крад. Как видно из табл.2, после облучения ЭП, в которых использовались методы РСП, имеют существенно меньший статический ток потребления по сравнению с коммерческими ЭП. Различие в токе потребления приведенных ЭП существенно зависит как от суммарной дозы облучения, так и от ее мощности и может достигать нескольких порядков. Эффекта "защелкивания" во всех ЭП типа RT и RH не установлено.

Необходимо отметить, что статический ток ЭП (накопителя) существенно зависит как от электрического режима при облучении, так и от режима при его измерении. Наихудшим режимом является облучение накопителя с постоянной информацией. После инвертирования информации в таком накопителе статический ток потребления может увеличиваться на несколько порядков. Указанные в табл.2 значения статического тока потребления ЭП приведены именно для такого случая.

Таблица 2. Сравнение ЭП по параметрам стойкости

№ ЭП	Тип ЭП	Относительная площадь	Ток утечки, нА/бит	Ток утечки, мкА/1 Мбит	"Защелкивание", рад/с
1	6Тп- RS	S0	64	64 000	$<10^8$
2	6Тп- RT	S1=1,4S0	0,043	43	$>10^{11}$
3	8Тр-RS	S2=1,44S1	0,082	82	$<10^9$
4	8Тр-RT	S2=1,57S1	0,003	3	$>10^{11}$
5	8Тр-RH	S2=1,77S1	$<0,00002$	$<0,02$	$>10^{11}$

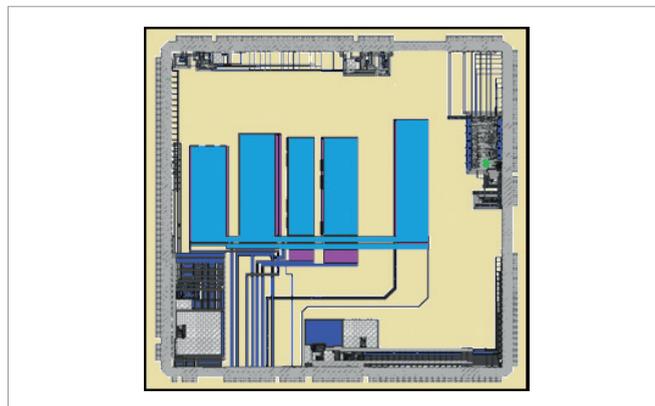


Рис.7. Тестовый кристалл с накопителями на различных ЭП

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Современные технологии объемного кремния уровня 180–90 нм позволяют создавать с использованием методов РСП КМОП радиационно-стойкие СФ-блоки и СБИС ОЗУ, удовлетворяющие высоким требованиям аппаратуры для аэрокосмических применений.
2. Оптимальным для большинства применений является классический 6-транзисторный ЭП n-типа (6Тп), увеличение площади которого в 1,2–2,0 раза (в вариантах RT или RH) позволяет существенно повысить стойкость ко всем радиационным факторам.

3. Элемент памяти типа 8Тр в варианте RH обеспечивает предельные возможности объемной технологии по дозовой стойкости, превышающие 1 Мрад. Он также обладает повышенной сбоеустойчивостью и нечувствителен к эффекту "защелкивания". Однако он имеет меньшее быстродействие и занимает большую площадь на кристалле.
4. Сбоеустойчивые ЭП типа 12Тп занимают значительную площадь на кристалле и могут использоваться только в специализированных блоках небольшого объема в СБИС с проектными нормами до 180–250 нм, где множественные сбои при воздействии тяжелых частиц проявляются редко.
5. Альтернативой ЭП типа 12Тп в СБИС с проектными нормами 130 нм и менее могут стать ЭП с резистивно-емкостной связью между плечами триггера ЭП. При той же площади на кристалле они будут обладать не только высокой сбоеустойчивостью при воздействии ТЧ, но и при мощном импульсном гамма-облучении [8].
6. В разработанных ЭП пороговое ЛПЭ может быть повышено приблизительно в 2–3 раза и доведено до уровня 5–6 МэВ·см²/мг при увеличении площади в 1,5–2,0 раза. Дальнейшее его увеличение необходимо решать архитектурно-схемотехническими методами, как на уровне кристалла, так и системы в целом.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Clark L.T., Mohr K.C., Holbert K.E., Yao X., et al.** Optimizing Radiation Hard by Design SRAM Cells // IEEE Trans. Nucl. Sci., 2007. Vol. 54. №. 6. P. 2028–2036.
2. **Герасимов Ю.М., Глушков А.В., Григорьев Н.Г., Петричкович Я.Я., Солохина Т.В.** Особенности проектирования радиационно-стойких библиотек элементов, СФ-блоков и нано-СБИС СнК // Проблемы разработки перспективных микро- и нанoeлектронных систем-2008: сб. трудов / под общ. ред. А.Л.Стемпковского. – М.: ИППМ РАН, 2008. С. 272–275.
3. **Герасимов Ю.М., Григорьев Н.Г., Гусев В.А., Кобыляцкий А.В., Петричкович Я.Я.** Радиационно-стойкие КМОП СБИС ОЗУ по технологии объемного кремния // Проблемы разработки перспективных микро- и нанoeлектронных систем-2014: сб. трудов / под общ. ред. А.Л.Стемпковского. – М.: ИППМ РАН, 2014. Ч. 3. С. 171–176.
4. **Баринов В.В., Березин А.С., Вернер В.Д., Герасимов Ю.М. и др.** Сверхбольшие интегральные микросхемы оперативных запоминающих устройств / Под ред. В.Д.Вернера. – М.: Радио и связь, 1991. 272 с.
5. **Герасимов Ю.М., Григорьев Н.Г.** Элементы памяти для радиационно-стойких КМОП ОЗУ // Естественные и технические науки / изд. "Спутник+", 2011. № 6. С. 499–504.
6. **Radaelli D., Puchner H., Wong S., Daniel S.** Investigation of Multi-Bit Upset in 150 nm Technology SRAM Device // IEEE Trans. Nucl. Sci., 2005. Vol. 52. № 6. P. 2433–2437.
7. **Giot D., Roche P., Gasiot G., Harboe-Sorensen R.** Multiple-Bit Upset Analysis in 90 nm SRAMs: Heavy Ions Testing and 3D Simulations // IEEE Trans. Nucl. Sci., 2007. Vol. 54. № 4. P. 904–911.
8. **Haddad N.F., Chan E., Doyle S. et al.** The Path and Challenges to 90-nm Radiation-Hardened Technology // IEEE Trans. Nucl. Sci., 2009. Vol. 56. № 4. P. 2077–2082.

АДАПТАЦИЯ LVDS-ПРИЕМОПЕРЕДАТЧИКОВ ДЛЯ ВЫСОКОСКОРОСТНЫХ ПРИЛОЖЕНИЙ

► И. Н. Алексеев, С. В. Кондратенко, Т. В. Солохина

LVDS-приемопередатчики до сих пор составляют конкуренцию приемопередатчикам с более современными типами интерфейсов на физическом уровне на скоростях в несколько сотен Мбит/с благодаря сочетанию таких свойств, как малая потребляемая мощность и высокая помехоустойчивость. В данной статье предлагается вариант адаптации LVDS-приемопередатчиков для высокоскоростных приложений и приводятся результаты моделирования масштабированных схем LVDS передатчика и приемника. Полученные характеристики сравниваются с достигнутыми в последние годы характеристиками высокоскоростных приемопередатчиков.

Ключевые слова: скорость передачи, LVDS-драйвер, масштабирование, глазковая диаграмма, джиттер.

ADAPTATION OF LVDS TRANSCEIVERS FOR HIGH-SPEED APPLICATIONS

I.N.Alekseev, S.V.Kondratenko, T.V.Solokhina

LVDS transceivers still compete for other transceivers with more modern types of physical layer interfaces at speeds of several hundred Mbit/s due to the combination of properties such as low power consumption and high noise immunity. In this paper, we propose a variant of adaptation of LVDS transceivers for high-speed applications and the results of modeling schemes of scaled LVDS transmitter and receiver. The characteristics obtained are compared with the characteristics of high-speed transceivers achieved in recent years.

Keywords: data speed, LVDS driver, scaling, eye diagram, jitter.

Таблица 1. Выражения для установившихся значений сигналов в LVDS-драйверах

Уровни напряжений	Схема LVDS-драйвера		Уровни напряжений с учетом действия внутренней ОС
	исходная (рис.1а)	масштабируемая (рис.1б)	
ΣV_i	$2V_{ds} + 2V_{Ron} + V_{out}$	$2V_{ds} + V_{out}$	–
V^1	$VDD - V_{ds} - V_{Ron}$	$VDD - V_{ds}$	$VDD/2 + V_{out}/2$
V^0	$VDD - V_{ds} - V_{Ron} - V_{out}$	$VDD - V_{ds} - V_{out}$	$VDD/2 - V_{out}/2$
$V_{cm} = (V^1 + V^0)/2$	$VDD - V_{ds} - V_{Ron} - V_{out}/2$	$VDD - V_{ds} - V_{out}/2$	$VDD/2$

ДОСТИГНУТЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ LVDS-ПРИЕМОПЕРЕДАТЧИКОВ

В работе [4] констатируется возможность достижения скорости передачи в LVDS-приемопередатчиках до 3,125 Гбит/с. В работе [5] описывается вариант нестандартного LVDS-приемопередатчика (pseudo-LVDS) со скоростью до 6 Гбит/с. Типовые значения скоростей передачи серийно выпускаемых микросхем LVDS-приемопередатчиков или блоков в составе систем на кристалле, выпускаемых фирмами TI, Altera, Atmel, STMicroelectronics, Xilinx и др. или отдельными группами разработчиков, относительно небольшие – от 200 до 500 Мбит/с с некоторыми исключениями (1,25 Гбит/с [2], 1,6 Гбит/с [3]) в пределах, предписываемых стандартом TIA/EIA-644-A. Это связано с использованием повышенного питания у периферийных частей (обычно не ниже 2,5 В) и, соответственно, относительно медленных

(по сравнению с цифровым ядром) периферийных транзисторов, а также, возможно, и с необходимостью выполнения ряда повышенных требований (по радиационной стойкости, величине допустимой синфазной помехи в канале, напряжению ESD пробоя и т. д.).

Авторами накоплен собственный опыт разработки приемопередатчиков [6–9]. Разработанные и изготовленные по объемным КМОП-технологиям с нормами 0,25/0,18/0,13 мкм LVDS передатчики и приемники обеспечивают скорость передачи не менее 1 Гбит/с.

Более объективным, чем скорость передачи, показателем качества приемопередатчиков является энергия, затрачиваемая на бит передаваемой информации, и равная P_{cons}/V . Для высокоскоростных приемопередатчиков достигнуты значения этого показателя на уровне единиц – долей пДж/бит.

ПРЕОБРАЗОВАНИЕ ИСХОДНОЙ СХЕМЫ LVDS-ДРАЙВЕРА В МАСШТАБИРУЕМУЮ

Упрощенные типовые схемы исходного и масштабируемого LVDS-драйверов в одной из двух фаз управляющих ключами сигналов, зависящих от текущих передаваемых данных, показаны на рис.1. На рис.1а R_{on} – сопротивление открытого ключа, R_{cm} и V_{cm} – элементы высокоомного делителя в цепи ОС и установившееся значение синфазной составляющей сигналов на выходах LVDS-драйвера. Выходной дифференциальный сигнал V_{out} на ближнем конце линии (непосредственно на выходах драйвера) затухает на дальнем конце линии с коэффициентом $\gamma < 1$.

Для того чтобы интерфейсная часть передатчика, включая драйвер, могла масштабироваться вместе с цифровым ядром, то есть имела такое же номинальное питание (возможно, кроме элементов защиты от ESD пробоя), а транзисторы в генераторах тока не выходили из пологой области выходных ВАХ, должны выполняться следующие неравенства для установившихся значений сигналов:

$$\min(VDD) - \max(\Sigma V_i) > 0, \quad \min(V_{ds}) > V_{sat},$$

где $\max(\Sigma V_i)$ – максимальная сумма падений напряжений в ветвях схемы между выводами питания и земли, V_{sat} – напряжение перекрытия канала (граница между крутой и пологой областями). В табл.1 приведены выражения для установившихся значений сигналов в схемах исходного и масштабируемого LVDS-драйверов. Две составляющие (V_{ds} и $V_{Ron} = R_{on} \cdot I_{ref}$) зависят от схемы и могут в определенных пределах регулироваться разработчиком. Две остальные составляющие (VDD и V_{out}) зависят от используемой технологии и требуемого (с учетом запаса на затухание в линии передачи γ) уровня сигнала на выходе драйвера. Обычная практика состоит в выборе величины $V_{out} = 400$ мВ или около того (но, как правило, больше, чем типовые 350 мВ в LVDS-стандарте), чтобы при затухании $\gamma \geq 0,5$ обеспечить надежное срабатывание приемника с типовыми порогами ± 100 мВ. Отличия предлагаемой масштабируемой схемы LVDS-драйвера (рис.1б) от исходной (рис.1а) состоят в следующем.

1. Изменено расположение ключей, коммутирующих эталонный ток I_{ref} в нагрузку,

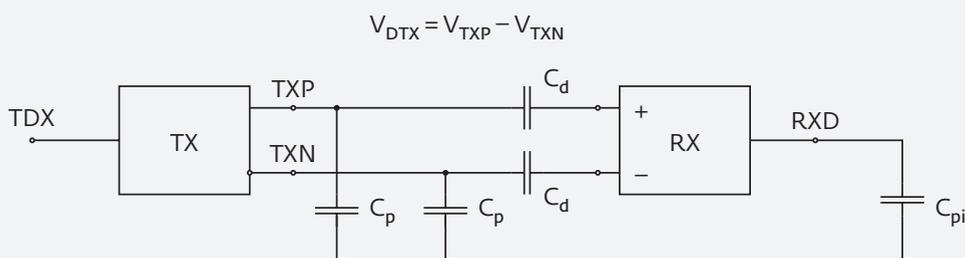


Рис.2. Расчетная схема тракта с обозначениями выводов и сигналов

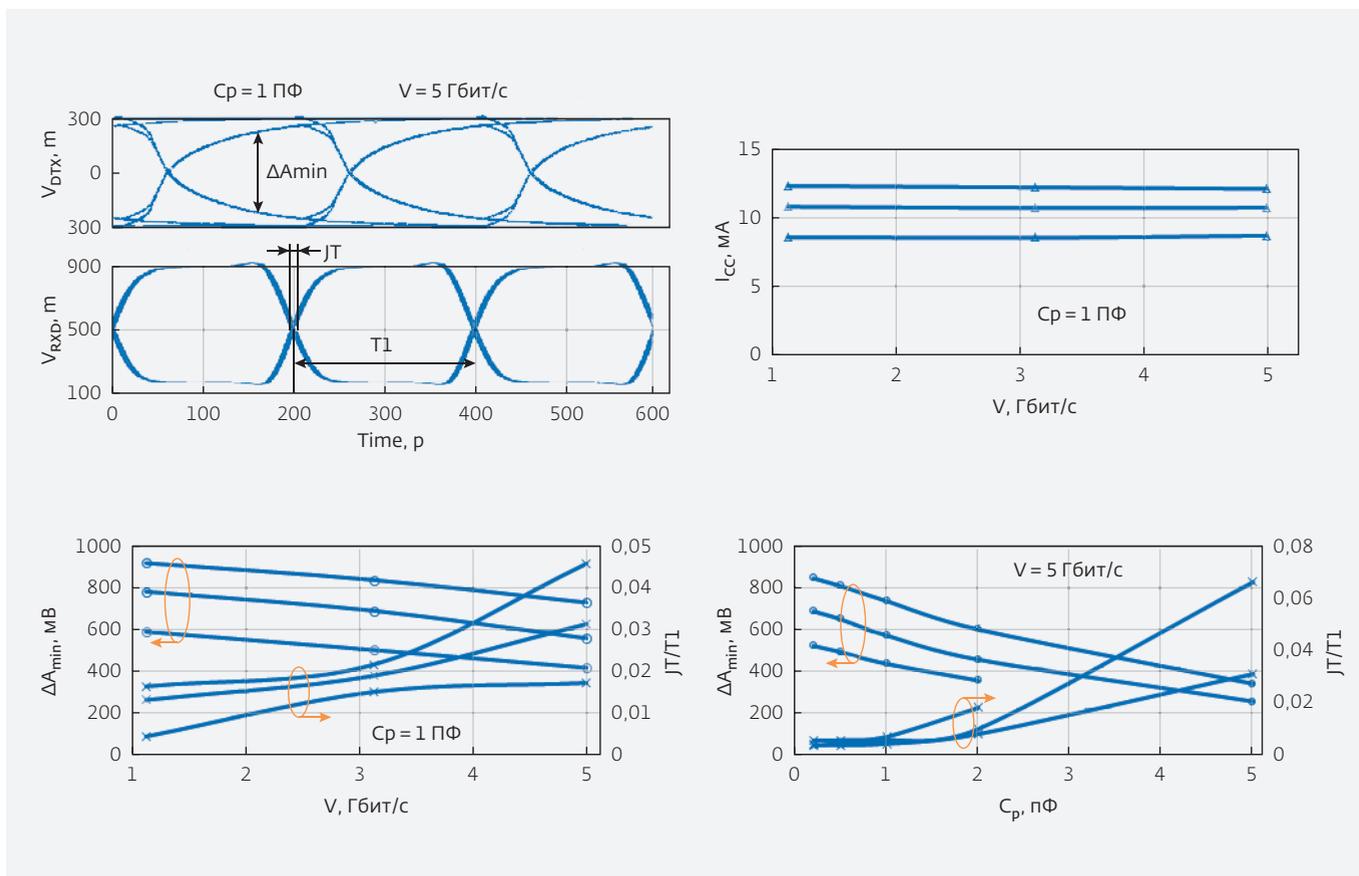


Рис.3. Расчетные зависимости (глазковые диаграммы при типовых условиях, остальные зависимости по результатам корнер-анализа)

относительно этой нагрузки с параллельного на последовательное. В результате критичное для масштабирования значение ΣV_i снижено на $2V_{Ron}$, то есть на несколько сотен мВ.

2. В измененной схеме обязательно использование ключей на комплементарных транзисторах (что условно отображено в обозначениях на рис.1б), чтобы линеаризовать значения сопротивлений R_{on} этих ключей в открытом состоянии.
3. Если в исходной схеме делитель в цепи внутренней ОС, поддерживающей значение синфазной составляющей выходных сигналов на уровне $VDD/2$, высокоомный

($R_{cm} \gg R_L$, где R_L – сопротивление нагрузки с типовым значением $Z_0 = 100 \text{ Ом}$), то в модифицированной схеме он низкоомный, причем для обеспечения условия согласования выходного дифференциального сопротивления драйвера с волновым сопротивлением линии передачи Z_0 должно выполняться условие $2 \cdot (r_c + R_{on}) = Z_0$.

Приняв для оценки с некоторым запасом $V_{ds} = V_{Ron} = 200 \text{ мВ}$, получим минимальное напряжение питания VDD в исходной схеме LVDS-драйвера 1,2 В, а в масштабируемой – 0,8 В. Однако учитывая неизбежные проблемы работы схем при предельно низких

величинах питающих напряжений в сочетании с другими неблагоприятными факторами, проявляющимися при корнер-анализе (PVT), необходимо признать эти оценки заниженными.

РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ МАСШТАБИРОВАННЫХ LVDS-ПРИЕМОПЕРЕДАТЧИКОВ НА ФИЗИЧЕСКОМ УРОВНЕ

Подобно тому, как это было сделано для передатчика, производился анализ возможности и выбор исходной схемы LVDS-приемника, пригодной для глубокого масштабирования. Очевидно, что этому условию удовлетворяют схемы с минимально возможной "ярусностью", которая определяется числом ветвей между шинами питания и земли, а также суммарным падением напряжений в этих ветвях. Для входного каскада приемника, выполненного в виде стандартного типового дифференциального каскада с активными нагрузками, $\Sigma V_i = 3V_{ds}$, то есть заметно меньше, чем аналогичная величина в драйвере. Вместе с тем для масштабированного входного каскада приемника проблемой является обеспечение условий нормальной работы при непосредственной связи с масштабированным драйвером, поскольку средний уровень выходных сигналов драйвера, равный $V_{DD}/2$, оказывается при $V_{DD} < 1,8$ В соизмеримым с пороговым напряжением транзисторов, при котором входной дифференциальный каскад приемника практически неработоспособен. Поэтому при переходе к масштабированным схемам LVDS передатчика и приемника необходимо использовать емкостную развязку между ними.

Следует заметить, что стандартные варианты LVDS-приемопередатчиков предполагают только их непосредственное соединение, что не позволяет снизить влияние разности потенциалов земли между удаленными передатчиком и приемником.

Было выполнено эскизное проектирование масштабируемых LVDS передатчика и приемника с использованием одного из доступных вариантов моделей транзисторов для КМОП-технологии с нормами 90 нм. Расчеты производились в широком диапазоне значений паразитных емкостей на выходах передатчика (от 0,2 до 5 пФ), в то время как для выпускаемых ИМС LVDS-приемопередатчиков характеристики приводятся при их фиксированных значениях. Это позволяет учесть влияние конкретных конструктивных особенностей схем включения (паразитные параметры выводов микросхемы, разъемных соединений и несогласованных частей линий передачи), а также оценить вклад собственно передатчика и приемника в общее быстродействие. Кроме того, с целью наиболее полной и объективной характеристики исследуемых схем в качестве тестового использовался псевдослучайный сигнал в кодировке 8b10b и производился корнер-анализ тракта передатчик – приемник в диапазоне скоростей начиная с 1,25 Гбит/с и кончая предельным значением, которое устанавливалось в ходе расчетов. Расчетная схема тракта с обозначениями выводов и сигналов показана на рис.2. Емкость C_{pi} – паразитная емкость внутреннего соединения интерфейсной части приемника с его цифровой частью, при расчетах принята равной 20 фФ (с запасом). $C_d = 1$ нФ – разделительные емкости.

Основные расчетные зависимости тракта приведены на рис.3. По результатам расчетов можно сделать следующие выводы:

1. Передатчик работоспособен по-крайней мере до скорости 5 Гбит/с при паразитных емкостях на выходах не более 1 пФ и обеспечивает при этом размах выходного дифференциального сигнала (степень раскрытия глазковой диаграммы по вертикали ΔA_{\min}) не менее 400 мВ, в том числе в наихудших условиях.
2. С учетом спада амплитуды сигнала на выходе драйвера в конце единичного интервала $\exp(-T1/\tau)$, $T1=1/V$, по зависимости $\Delta A_{\min}(C_p)$ получена постоянная времени $\tau \approx 65$ пс, соответствующая доминирующему полюсу в передаточной функции драйвера. Это значение согласуется с предыдущей оценкой максимальной скорости ($3\tau \approx 200$ пс = $T1$ при скорости 5 Гбит/с).
3. Критичная для приемопередатчиков типа SerDes величина джиттера $JT/T1$ существенно возрастает при паразитных емкостях на выходах передатчика более 2 пФ, что приводит в наихудших условиях к сбоям на выходе приемника при скорости 5 Гбит/с.
4. Спроектированный приемник имеет порог срабатывания для входного дифференциального сигнала около -30 мВ, слабо меняющийся при корнер-анализе. Это означает, во-первых, повышенную чувствительность приемника по сравнению с типовой и, во-вторых, установление на выходе приемника высокого уровня в особых ситуациях (оборваны или закорочены входы), что является одной из его необходимых опций.
5. Средний потребляемый ток I_{cc} практически не зависит от скорости передачи

во всем исследуемом диапазоне и не превышает 12,5 мА, что при напряжении питания 1,2 В (с учетом его 10%-ного разброса) соответствует потребляемой мощности не более 17 мВт. Потребляемый ток приемника примерно на порядок меньше, чем потребляемый ток передатчика.

При эскизном проектировании не учитывалась возможность существенного улучшения качества работы LVDS-приемопередатчиков за счет использования дополнительных ресурсов (введения предискажений сигналов в передатчике и использования эквалайзера в приемнике), которые позволяют расширить при прочих равных условиях диапазон реализуемых скоростей передачи и снизить чувствительность к паразитным параметрам схем включения, но привязывают полученные результаты к конкретному применению, не позволяя сделать общие выводы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Отмечена целесообразность и возможность адаптации приемопередатчиков с LVDS-интерфейсом для высокоскоростных приложений (со скоростями в несколько Гбит/с), что позволяет распространить на эти приложения преимущества LVDS-интерфейса (малая потребляемая мощность и высокая помехоустойчивость). Предложен способ преобразования исходного LVDS-драйвера в масштабируемый (с питанием ниже 2,5 В). Выполнено эскизное проектирование масштабированных LVDS передатчика и приемника на физическом уровне для объемной КМОП-технологии с нормами 90 нм и напряжением питания, совпадающим по значению с напряжением питания цифрового ядра (1,2 В). Выполнена характеристика тракта

передатчик – приемник в широком диапазоне значений паразитных емкостей на выходах передатчика (0,2–5 пФ), и по результатам корнер-анализа установлено, что достижимая скорость передачи составляет, по крайней мере, 5 Гбит/с. Показатель качества в виде энергии, затрачиваемой на бит передаваемой информации, для разработанных LVDS передатчика и приемника составляет около 3,4 пДж/бит, что соответствует лучшим достигнутым результатам для аналогичных приемопередатчиков.

Предназначенные для соединений типа "точка-точка", масштабируемые LVDS передатчик и приемник предполагают обязательное включение разделительных конденсаторов между ними и не совместимы непосредственно с исходными (стандартными) вариантами этих приемопередатчиков. Кроме того, вследствие включения низкоомной нагрузки непосредственно на выходе масштабируемого LVDS-драйвера, реализующей условие согласования его выходного сопротивления с волновым сопротивлением линии передачи, энергетическая эффективность драйвера снижается как минимум в два раза (но остается тем не менее конкурентоспособной с аналогичными показателями для драйверов с альтернативными интерфейсами). Эти особенности являются неизбежным следствием перехода к масштабируемым высокоскоростным вариантам LVDS-приемопередатчиков.

ЛИТЕРАТУРА

1. Arria V Device Datasheet. – Altera Corp., 2012. 56 p.
2. LogiCORE IP Ethernet 1000BASE-X PCS/PMA or SGMII v14.2 Product Guide / Xilinx Inc., PG047 April 2, 2014. 335 p.
3. Altera Product Catalog Version 14.1. – Altera Corp., 2015. 101 p.
4. Signal Types and Terminations. – Vectron International Applications Note. 6 p.
5. **Kim S., Kong B.S., Lee C.G.** A 6-Gbps/pin 4.2mW/pin half-duplex pseudo-LVDS transceiver Solid-state circuits conference (ESSCIRC 2006), Montreux, Switzerland, p. 484–487, Sept. 2006.
6. **Байков В.Д., Герасимов Ю.М., Кондратенко С.В., Солохина Т.В.** Особенности и результаты проектирования семейства LVDS КМОП 0,25–0,13 мкм передатчиков и приемников // Проблемы разработки перспективных микро- и нанoeлектронных систем (МЭС-2010). – М.: ИППМ РАН, 2010. С. 314–320.
7. **Байков В.Д., Герасимов Ю.М., Кондратенко С.В., Солохина Т.В.** LVDS IP-блоки для высокоскоростной передачи данных в системах SpaceWire // Space Wire-2010: сб. трудов третьей научно-технической конференции. – СПб, 2010. С. 239–242.
8. **Кондратенко С.В., Петричкович Я.Я., Солохина Т.В., Шейнин Ю.Е.** Комплект микросхем "МУЛЬТИБОРТ" второго поколения на базе развития стандартов семейства SpaceWire // Вопросы радиоэлектроники, 2013. Т. 1, № 2. С. 5–16. Серия ОТ.
9. **Кондратенко С.В., Герасимов Ю.М.** Перспективы развития высокоскоростных маломощных КМОП-приемопередатчиков последовательных каналов // Вопросы радиоэлектроники, 2013. Т. 1, № 2. С. 98–106. Серия ОТ.

О ЖИДКОСТНОЙ ХИМИЧЕСКОЙ ОЧИСТКЕ ПЛАСТИН ПЕРЕД ПРОВЕДЕНИЕМ ТЕРМИЧЕСКИХ ОПЕРАЦИЙ

► В.П.Бокарев, Е.С.Горнев, И.В.Кiryushina, С.О.Ранчин, А.А.Трусов

Рассмотрено применение жидкостных химических очисток в технологии микроэлектроники перед проведением термических операций на транзисторном цикле после технологических операций плазмохимического и реактивного ионного травления. Показано, что модернизация процесса жидкостных химических очисток по мере изменения проектных норм от микронного до нанометрового уровня способна обеспечить высокую надежность создаваемых сверхбольших интегральных микросхем.

Ключевые слова: жидкостная химическая очистка, СБИС, проектные нормы.

LIQUID CHEMICAL CLEANING OF WAFERS BEFORE THERMAL TREATMENT

V. P. Bokarev, E. S. Gornev, I. V. Kiryushina, S. O. Ranchin, A. A. Trusov

Usage of liquid chemical cleaning processes in the microelectronic technology before thermal treatments within a transistor cycle following plasmachemical and reactive ion etching has been considered here. It has been demonstrated that an enhancement of liquid chemical cleanings with changing the design scale from micron to nanometer level enables higher reliability of super large scale integration circuits (VLSI) produced.

Keywords: liquid chemical cleaning, VLSI, design scale.

Операции жидкостной химической очистки (ЖХО) поверхности пластин широко применяются в технологии микроэлектроники после проведения большинства технологических операций при изготовлении сверхбольших интегральных микросхем (СБИС) [1]. Причем, по мере уменьшения проектных норм и ужесточения требований к примесям на поверхности пластин, ЖХО приобретает ключевое значение из-за присутствия технологических операций, сопровождающихся генерацией примесей в недопустимо высоких концентрациях [2]. В данной работе рассмотрено применение ЖХО после проведения технологических операций плазмохимического (ПХТ) и реактивного ионного травления (РИТ). Любая плазмохимическая обработка поверхности пластин сопровождается распылением металлов с поверхности реактора и его внутренней оснастки, изготовленных из коррозионно-устойчивых сталей и различных сплавов алюминия, то есть содержащих разнообразные металлы. В общем случае, на поверхности пластин после ПХТ и РИТ содержатся различные органические, неорганические и металлические примеси, которые полностью не удаляются после снятия фоторезистивной маски. Их взаимодействие с кремнием при проведении последующих термических операций приводит к возрастанию концентрации дислокаций и уменьшению надежности СБИС.

В технологии микроэлектроники разработаны требования к оборудованию по максимально допустимым уровням генерации металлических загрязнений (табл.1). Принимая во внимание такие факторы, как генерация металлических загрязнений,

возможность перекрестного загрязнения и его влияние на формируемые структуры, возможность удаления и возможность обнаружения металлических загрязнений, было предложено [3] производственное оборудование разделить на три категории ("чистое", "по умолчанию" – отсутствуют специфические требования, "с металлами"). Для каждой из категорий был определен допустимый уровень загрязнения металлами. Из этих требований следует, что уровни загрязнения металлами пластин, поступающих на обработку в то или иное оборудование, должны находиться в соответствии с требованиями, предъявляемыми к оборудованию. В соответствии с рекомендациями, указанными в табл.1, они должны быть согласованы для каждого процесса при создании маршрута изготовления изделия.

Поэтому перед проведением последующих термических операций проводится ЖХО пластин с целью исключения возможности встраивания примесей металлов в кристаллическую решетку кремния.

Стандартные химические очистки пластин перед проведением термических операций на транзисторном цикле могут включать в себя стадию обработки в HF, например, для удаления слоя естественного оксида кремния, что используется перед первым окислением при запуске пластин в производство. Обработка в HF, как правило, используется при необходимости удаления технологических слоев оксида кремния. Если необходимости в удалении слоев оксида кремния нет, то, как правило, используется RCA очистка, разработанная В. Керном и Д. Путиным в 1965–1970 годах в лаборатории фирмы RCA. Для удаления микрочастиц, слабых органических

Таблица 1. Рекомендации по уровню металлических загрязнений, который допускается при выходе пластин из оборудования

Категория оборудования	Металлы группы 1 (только воздействие на SiO ₂ и границу раздела) Na, Al, Ca, Hf...	Металлы группы 2 (быстродиффундирующие, сильное влияние на время жизни неосновных носителей заряда в Si) Fe, Ru, Au...	Металлы группы 3 (диффузия и/или преципитация в Si или на границе раздела) Cu, Cr, Co, Ta...
Чистое Диффузионные печи и иммерсионные установки жидкостной очистки*	5E10	1E10	1E10
По умолчанию Метрология, литография, некритический отжиг и очистка*, безметальное осаждение, травление и ХМП	5E11**	1E11**	1E11**
С металлами*** Осаждение металла (ов), травление, ХМП	1E13	1E12	1E12

* Уровни после выхода из оборудования жидкостной очистки, то есть считается, что очистка может понижать уровень загрязнения на два порядка по сравнению с исходным уровнем, уровень при входе в оборудование может быть определен в 100 раз выше.

** Нет спецификационных требований для лицевой стороны пластин, входящих в оборудование, работающее при комнатной температуре в камере, а также при отсутствии воздействия на лицевую сторону пластины (например, бесконтактные измерения).

*** За исключением металла (ов), подлежащих обработке в рассматриваемом оборудовании.

соединений, некоторых металлов используется SC-1 (стандартная очистка 1) – обработка в горячем аммиачно-перекисном растворе NH₄OH : H₂O₂ : H₂O = 1 : 1 : 5 при температуре 70–80°C в течение 10 мин.

Для удаления металлических загрязнений используется SC-2 (стандартная очистка 2) – обработка в горячем соляно-перекисном растворе HCl : H₂O₂ : H₂O = 1 : 1 : 5 при температуре 70–80 °C в течение 10 мин. Металлические

Таблица 2. Рецепт очистки "IMEC-clean" для обработки пластин на автоматических установках иммерсионного типа

Шаг 1	H ₂ SO ₄ /O ₃ 3 цикла промывок в стоп-ванне (горячая/холодная)	90°C 60°C / 20°C	5 мин 8 мин
Шаг 2	HF (0,5%) / HCl (0,5 M)	22°C	2 мин
Шаг 3	Окончательная промывка + O ₃ /HCl (мегазвуковая энергия)	20°C	10 мин
Сушка	По методу Марангони (с добавлением HCl)	20°C	8 мин
Общее время очистки:			32 мин

загрязнения удаляются в растворе SC-2 путем их перевода в растворимые соли кислот. Для этого требуется кислая среда ($\text{pH} \ll 7$), что обеспечивается присутствием HCl или HF, а также необходимо присутствие окисляющего агента. С течением времени стандартная RCA-очистка подверглась улучшению: для увеличения эффективности удаления микрочастиц стала применяться интенсификация процесса в виде использования мегазвуковой энергии, а также введение дополнительных операций очистки.

Так перед проведением термических операций, таких как: выращивание гидрофильного оксида кремния, отжиг после эпитаксии, осаждение поликремния и некоторых других, для изделий с проектными нормами не менее 1 мкм, проводят комбинированную очистку кремниевых пластин, включающую их последовательную обработку в растворах SC-1 (NH₄OH) : H₂O₂ : H₂O = 1 : 1 : 5) и SC-2 (1 : 1 : 5 = HCl : H₂O₂ : H₂O).

Однако такая обработка не гарантирует удаление примесей до уровня, допустимого в технологиях с субмикронными

проектными нормами. Поэтому фирмой IMEC был разработан процесс очистки пластин (см. табл.2) "IMEC-clean". Данная очистка успешно применяется в КМОП-технологии уровня 180–130 нм [3, 4].

Для надежной работы СБИС с проектными нормами 90–65 нм необходимо, чтобы поверхностная концентрация примесей металлов (Ca, Ba, Sr, Fe) в узле формирования затвора при подготовке поверхности не превышала уровня $5 \cdot 10^9$ атомов/см² [6].

На рис.1 представлена эффективность очистки поверхности кремниевых пластин после проведения процессов плазмохимического травления (ПХТ) оксида кремния (After oxide etch) от атомов алюминия (Al), железа (Fe) и вольфрама (W) [7]. Из рис.1 следует, что при проведении последовательных обработок в серно-перекисном растворе (SPM), буферном травителе (BOE) и аммиачно-перекисном растворе (SC-1) поверхностная концентрация атомов Al, Fe и W (атомов/см²) снижается более чем на 2 порядка по сравнению с пластинами, не проходившими такую очистку после ПХТ оксида кремния.

Как было показано выше (см. табл.1), уровень концентрации металлов на пластинах после операций ПХТ превышает допустимые уровни примесей более чем на три порядка, что требует эффективных очисток, способных снижать концентрацию металлов до необходимого уровня.

Однако при проектных нормах 180–90 нм, для химической очистки используют менее концентрированные растворы SC-1 (1:2:100) и SC-2 (1:1:50) с предварительной обработкой пластин в 0,5% растворе HF, что снижает эффективность очистки от примесей тяжелых металлов и некоторых их химических соединений. Тем не менее, как это видно из рис.2, такая очистка позволяет удалять примеси железа до уровня $5 \cdot 10^9$ атомов/см². При этом диффузионная длина неосновных носителей заряда может быть повышена до 500 мкм, что приемлемо для таких проектных норм. Данные рис.2 получены после обработки пластин диаметром 200 мм на установке иммерсионного типа FC821L фирмы DNS. Процесс включал следующие стадии: обработка в течение 495 с при комнатной температуре в 0,5% HF, промывка деионизованной водой (ДВ), очистка в SC-1 (NH₄OH:H₂O₂:H₂O=1:2:100 объемных частей) при температуре 50°C и мощностью генератора мегазвуковой энергии 750 Вт, промывка ДВ, очистка в SC-2 (HCl:H₂O₂:H₂O=1:1:50 объемных частей) при 50°C, промывка ДВ, сушка при пониженном давлении в парах изопропилового спирта. Очищенные пластины подверглись высокотемпературной активации в диффузионной печи (окисление 800 Å), после чего были проведены замеры диффузионной длины и объемной концентрации железа на измерительном оборудовании FAaST 230.

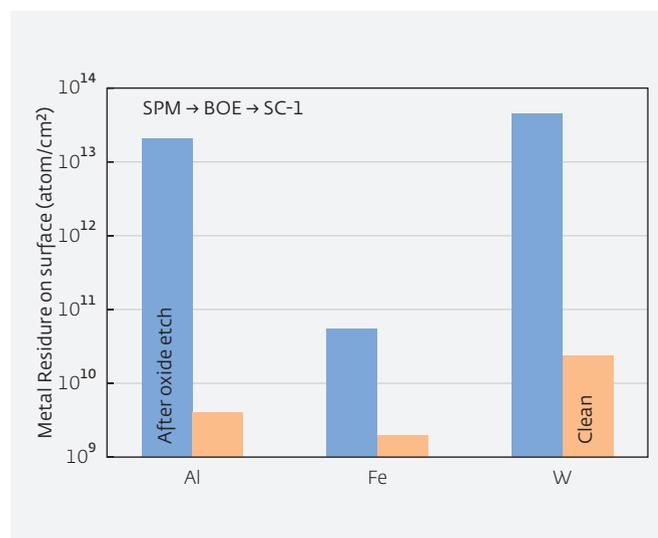


Рис. 1. Эффективность удаления металлических примесей, образованных после ПХТ SiO₂ (SPM – sulphuric-peroxide mixture – серно-перекисный раствор, BOE – buffered oxide enchanths – буферный травитель, SC-1 – standard clean 1 – аммиачно-перекисный раствор)

Результаты полученных измерений представлены на рис.2.

Как видно из рис.2, после проведения процесса жидкостной химической очистки пластин, объемная концентрация Fe составила $1,01 \cdot 10^{10}$ атомов/см³ (требования для технологии с проектными нормами 180 нм предписывают верхнюю контрольную границу (ВКГ) по данному параметру $5 \cdot 10^{10}$ атомов/см³). При этом, диффузионная длина неосновных носителей заряда перед вторичной активацией в измерительной установке составила 559,4 мкм (при требованиях для нижней контрольной границы (НКГ) 450 мкм для технологии 180 мкм).

Дальнейшее повышение надежности СБИС в результате снижения концентрации примесей металлов возможно при дальнейшем улучшении эффективности химической

очистки. Так авторами патента [8] было предложено перед проведением термических операций на цикле изготовления транзисторов дополнительно включать в жидкостную очистку операции обработки в растворе HF : HCl : H₂O = 5 : 2 : 200 с последующей

промывкой в деионизованной воде. Авторами патента было показано, что обработка в растворе HF : HCl : H₂O = 5 : 2 : 200 с последующей промывкой в деионизованной воде, перед очисткой в SC-2 приводит к уменьшению примесей металлов на поверхности пластин

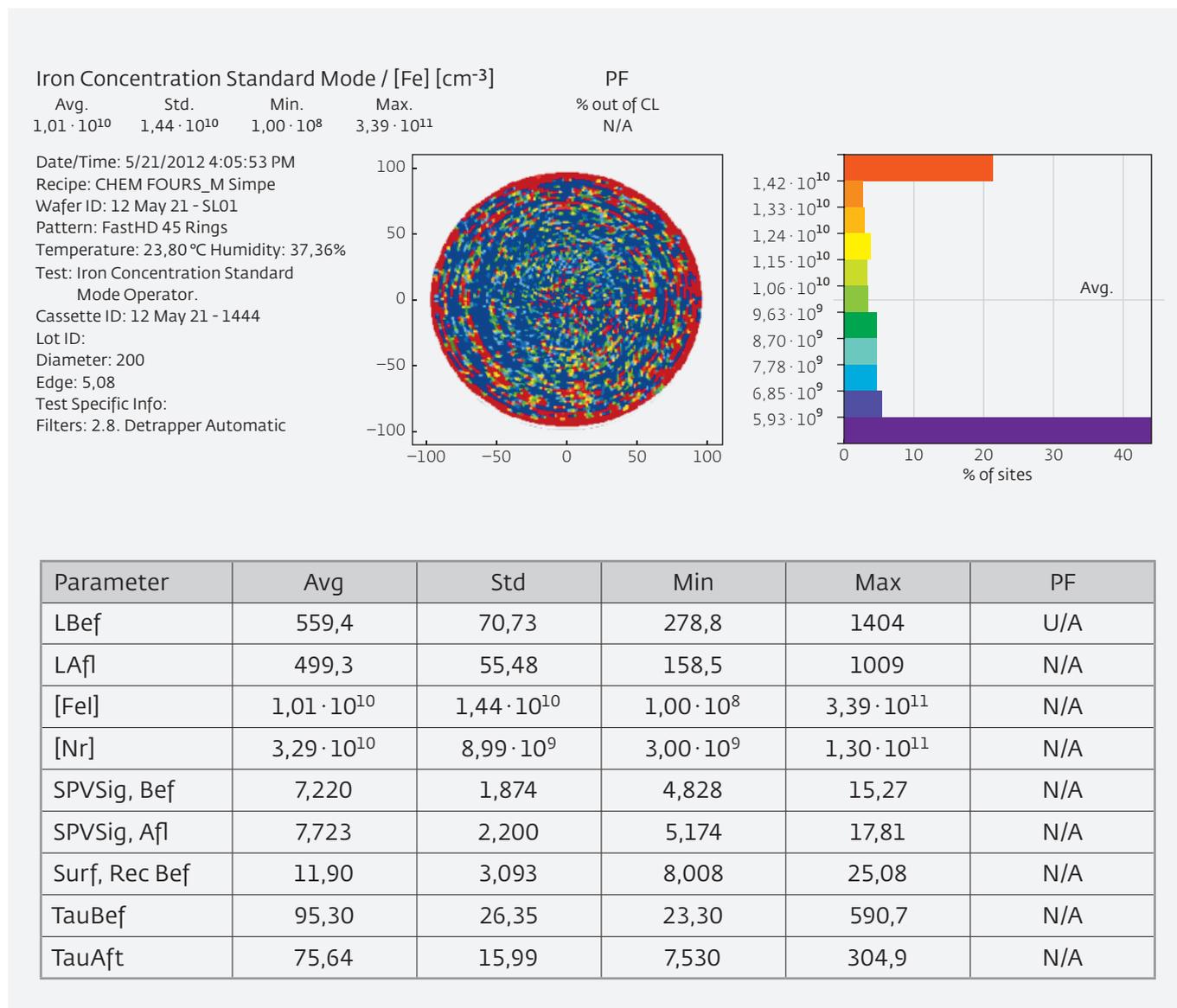


Рис.2. Типичный уровень диффузионной длины и объемной концентрации Fe, полученные на оборудовании FAaST 230 (Film Analysis and Substrate Testing) фирмы SDI (Semiconductor Diagnostic, Inc) методом SPV (Surface Photo Voltage – поверхностной фото-ЭДС) на пластинах 200 мм, обработанных на установке иммерсионного типа FC821L фирмы DNS

до уровня менее 10^9 атомов/см² и увеличению диффузионной длины неосновных носителей практически в два раза (с 500–600 мкм до 800–900 мкм), что объяснялось дополнительной очисткой от атомов тяжелых металлов, порождающих после проведения термических операций винтовые дислокации и дислокационные трубки, по которым происходит мягкий пробой.

Схематически, очистка перед проведением термических операций на цикле изготовления транзисторов по патенту [8] выглядит следующим образом:

Шаг 1: Обработка в растворе SC-1 (1:1:5 = NH₄OH : H₂O₂ : H₂O) с мегазвуковой обработкой при 50°C, 10 мин;

Шаг 2: Промывка в ультрачистой воде 5 мин;

Шаг 3: Обработка в растворе (5:2:200 = HF : HCl : H₂O) без нагрева, 1 мин;

Шаг 4: Промывка в деионизованной воде 5 мин;

Шаг 5: Обработка в растворе SC-2 (1:1:5 = HCl : H₂O₂ : H₂O) 5 мин при 60°C;

Шаг 6: Промывка в ультрачистой воде 5 мин;

Шаг 7: Сушка в течение 10 мин.

Эффективность данной схемы очистки была проверена на кремниевых пластинах r-типа проводимости с удельным сопротивлением 5–20 Ом·см, при проведении операции роста гидрофильного слоя оксида кремния на кремниевой пластине. Было показано, что введение в процесс очистки обработки в растворе HF : HCl : H₂O (шаг 3) с последующей промывкой пластин в деионизованной воде (шаг 4) приводит к уменьшению примесей металлов на поверхности пластин до уровня менее 10^9 атомов/см². В результате чего после последующего за очисткой отжига

в диффузионной печи в атмосфере азота при 600°C в течение 60 мин, диффузионная длина неосновных носителей увеличивается примерно в два раза по сравнению с пластинами, отожженными при 600°C в течение 60 мин после очистки без применения шагов 3 и 4. Однако такая очистка пластин не применима при изготовлении изделий с проектными нормами менее 180 нм из-за высокой концентрации реактивов в растворах SC-1 и SC-2. Но введение дополнительной очистки пластин в растворе 5:2:200 = HF : HCl : H₂O в применяемый при таких проектных нормах стандартный процесс очистки может позволить значительно повысить надежность изготавливаемых микросхем.

Таким образом, введение дополнительной очистки пластин в растворе 5:2:200 = HF : HCl : H₂O, с последующей промывкой пластин в деионизованной воде, перед операцией очистки в SC-2 (HCl : H₂O₂ : H₂O = 1:1:50 объемных частей) при 50°C, на цикле изготовления транзисторов перед всеми операциями окисления и перед отжигом после проведения ионной имплантации позволит без значительных затрат уменьшить концентрацию примесей металлов до уровня менее 10^9 атомов/см² и увеличить диффузионную длину неосновных носителей в 1,5–2 раза, что приведет к увеличению надежности микросхем, создаваемых по технологии с проектными нормами до 32 нм. При этом чистота применяемых реактивов и воды должна обеспечивать отсутствие приносимых примесей при очистке.

ЛИТЕРАТУРА

1. Красников Г.Я., Зайцев Н.А. Физико-технологические основы обеспечения качества СБИС. – М., 1999. Ч. 2, 216 с.

2. **Красников Г.Я., Дягилев В.Н., Сулин А.Д., Шишко В.А., Волк Ч.П.** Решение проблемы планаризации рельефа СБИС при переходе к топологическим нормам менее 1 мкм // *Электронная промышленность*, 1995, № 6. С. 5-7.
3. **Danel A., Renaud D., Besson P., Bigot C., Grouillet A., Joly J.P., Claes M., Bearda T., Frickinger J.** Management of Metallic Contamination in Advanced IC Manufacturing // *Cleaning Technology in Semiconductor Device Manufacturing IX*. The Electrochemical Society, ECStranaction, Penington, New Jersey, USA 2005, vol. 1, № 3. P. 3-10.
4. **Teerlinck I., Mertens P.W., Schmidt H.F., Meuris M. and Heyns M.,** *Electrochem J. Soc.* 143, № 10. P. 3323 (1996).
5. **Teerlinck I., Mertens P., Vos R., Meuris M. and Heyns M.** Proc. 3rd Int'l Symp. on Ultra Clean Processing of Silicon Surfaces UCPSS'96, (Acco, Leuven, 1996). P. 21.
6. The International Technology Roadmap for Semiconductors: FE Process 2004 update. P. 17.
7. *Cleaning and Surface Conditioning Technology in Semiconductor Device Manufacturing 10* // The Electrochemical Society, 2007, Vol 11, № 2. P. 133-142.
8. **Jack H.Linn, Geogrt V.Rouse, Sana Rafie, Roberta R.** Nolan-Lobmeyer, Diana Lenn Hackenberg, Steven T. Slasor, Timothy A.Valade. ASC-2 Based Pre-thermal Treatment Wafer Cleaning Process // Патент США № 5,932,022 от 03.08.1999.

ВАКУУМНЫЕ ФОТОРЕЗИСТОРЫ НА ОСНОВЕ PbS: ХАРАКТЕРИСТИКИ И МОРФОЛОГИЯ

► Б.Н.Мирошников, И.Н.Мирошникова, А.И.Попов, М.Ю.Пресняков

Проанализированы результаты исследований морфологии и характеристик фоторезисторов на основе PbS, полученных методом вакуумного перенапыления.

Ключевые слова: фоточувствительные структуры, сульфид свинца, спектральная плотность мощности шума, сканирующая электронная микроскопия.

VACUUM PHOTORESISTORS BASED ON PbS: CHARACTERISTICS AND MORPHOLOGY

B. N. Miroshnikov, I. N. Miroshnikova, A. I. Popov, M. Yu. Presnjakov

The results of studies of the morphology and characteristics of photoresists based on PbS obtained by vacuum deposition are presented.

Keywords: photosensitive structures, lead sulfide, noise power spectral density, scanning electron microscopy.

Вакуумные фоторезисторы (ФР) на основе PbS широко использовались в середине XX в. в спектрометрах и низкочастотных электронно-оптических импульсных системах, изготовленных в ЛОМО. Впервые эти ФР были созданы АРЛ (Admiralty Research Laboratory) в середине 40-х годов и описаны А.Эллиотом [1].

Основными характеристиками этих фоторезисторов являются чувствительность (S) и удельная обнаружительная способность (D^*).

Вольтовая чувствительность ФР к немонохроматическому излучению определяется формулой:

$$S_U = \frac{U_c}{\Phi_3}, \quad (\text{В} \cdot \text{Вт}^{-1}), \quad (1)$$

где U_c – среднеквадратическое значение напряжения фотосигнала, зависящее от напряжения смещения ФР ($U_{\text{ФР}}$) и частоты измерения f ; Φ_3 – действующее значение потока излучения.

Удельная обнаружительная способность рассчитывается по формуле:

$$D^*(U_{\text{ФР}}, f) = \frac{U_c \sqrt{A_{\text{ЭФФ}} \Delta f}}{\Phi_3 \cdot U_{\text{ш}}}, \quad (2)$$

где $U_{\text{ш}}$ – среднеквадратическое значение напряжения шума, также зависящее от напряжения смещения ФР ($U_{\text{ФР}}$) и частоты измерения f ; $A_{\text{ЭФФ}}$ – фоточувствительная (облучаемая) площадь ФР, см^2 ; Δf – эквивалентная полоса пропускания усилительного устройства, Гц.

Для учета размера ФЧЭ ($A_{\text{ЭФФ}}$) и зависимости параметров от приложенного постоянного напряжения ($U_{\text{ФР}}$) используется понятие приведенной чувствительности, определяемой выражением:

$$S_U^* = \frac{2 \cdot S_U \cdot A_{\text{ЭФФ}}}{U_{\text{ФР}}} \left[\frac{\text{см}^2}{\text{Вт}} \right]. \quad (3)$$

Приведенная чувствительность – величина частотозависимая. Величина чувствительности на частоте f может быть определена по формуле [2]:

$$S_{U_f} = \frac{S_{U_0}}{\sqrt{1 + (\omega \cdot \tau)^2}}, \quad (4)$$

где S_{U_0} – величина чувствительности при малой частоте модуляции (на постоянном токе); τ – время релаксации фотопроводимости, совпадающее с эффективным временем жизни основных носителей тока – дырок ($\tau \approx \tau_p$); ω – круговая частота переменного сигнала от абсолютно черного тела (АЧТ), $\text{рад} \cdot \text{с}^{-1}$.

Шум фоторезисторов обычно характеризуется спектральной плотностью мощности шума (СПМШ – P_u), имеющей несколько составляющих:

- шумом Джонсона-Найквиста, рассчитываемого по формуле:

$$P_{\text{ут}}(f) = \frac{\overline{U_{\text{ш}}^2}}{\Delta f} = 4kT_d R, \quad (5)$$

где k – постоянная Больцмана; T_d – рабочая температура детектора, К; R – эквивалентное электрическое сопротивление $R = (R_{\text{ФР}} \cdot R_{\text{Н}}) / (R_{\text{ФР}} + R_{\text{Н}})$ – сопротивление ФР и нагрузки;

- шумом типа $1/f^\alpha$, который выражается следующим образом:

$$P_{\text{ш}/f}(f) = \frac{\overline{U_{\text{ш}}^2}}{\Delta f} = \frac{A U_{\text{ФР}}^2}{\rho V f^\alpha}, \quad (6)$$

где V – объем исследуемого образца; ρ – концентрация дырок в ФЧЭ; A и α (близко

к единице) – некие коэффициенты, зависящие не столько от метода изготовления, сколько от особенностей технологии;

- генерационно-рекомбинационным шумом (ГРШ), выражающимся следующим образом:

$$P_{\text{шГР}}(f) = \frac{\overline{U_{\text{ш}}^2}}{\Delta f} = \frac{B \cdot U_{\text{ФР}}^2}{p^2 \cdot V} \cdot \frac{\tau_p^2}{1 + \omega^2 \tau_p^2}, \quad (7)$$

где τ_p – эффективное время жизни носителей заряда.

Рассматриваемые вакуумные фоторезисторы – аналоги ФСВ-7АН, ФСВ 12-А, ФСВ-16 АН, также как и "физические" фоторезисторы, характеристики которых разбирались в работах [3, 4], базируются на термически напыленных поликристаллических слоях. В отличие от других ФР на основе PbS их ФЧЭ не формируются самостоятельно, а включаются непосредственно в его конструкцию, которая представляет собой сосуд Дьюара. Такая конструкция позволяет охлаждать фоточувствительный слой с помощью термоохладителя или холодильника Джоуля-Томпсона.

Цель настоящей работы состоит в определении отличия характеристик вакуумных ФР от их аналогов, полученных как физическим напылением с высокотемпературным очувствлением (отжигом) на воздухе, так и химическим осаждением слоя.

Экспериментальные образцы. При изготовлении вакуумных ФР с диаметром ФЧЭ 10 мм используется около 10 мг порошкообразного сернистого свинца особой чистоты, который помещается в полость ФР, изготовленного из высокотемпературного стекла ЛК-5.

Корпус ФР длительное время откачивается высоковакуумной системой при

температуре выше 550°C. Перешедший в паровую фазу PbS осаждается на внутреннюю поверхность, на переднее окно, через которое будет проходить излучение, охлаждаемое струей воздуха. Возгонка происходит в течение нескольких минут.

При этой температуре происходит частичная компенсация PbS с n-типа до p-типа с выделением SO₂, поглощаемым газовой ловушкой. После этого локальным лучевым нагревом в высоком вакууме слой PbS с поверхности переднего окна возгоняется и осаждается на противоположную внутреннюю поверхность баллона, на которую предварительно нанесены графитовые контакты из отожженного аквадага (водной суспензии графита). При этом происходит полная компенсация PbS, контролируемая по максимуму электрического сопротивления R изготавливаемого ФР, превышающего 2-5 МОм.

Толщина осажденного слоя вакуумных фоторезисторов несколько больше 2 мкм, что превышает толщину ФЧЭ, изготовленных другими способами [3]. Принципиальное отличие между "вакуумным" и "физическим" ФЧЭ заключается в том, что вакуумные ФЧЭ формируются при низкой концентрации кислорода. Взаимодействие слоя PbS с подложкой из высокотемпературного стекла отсутствует.

Для оптимизации фотоэлектрических параметров в полость баллона ФР после формирования слоя сульфида свинца подается очищенный воздух при $p = 10^{-3} \dots 10^{-2}$ мм рт. ст. и происходит выдержка ФЧЭ при промежуточных невысоких температурах. При этом могут быть различные вариации добавления в баллон SO₂ и паров воды. После достижения

оптимальных значений R (0,2–1,2 МОм) и достижения заданного изменения проводимости σ при нормированном потоке излучения от постоянного источника, полость ФР откачивается до высокого вакуума и герметизируется.

Сосуд с ФЧЭ монтируется в металлический корпус и обычно снабжается оптическим фильтром, чаще всего из просветленного германия.

Если у фоторезисторов, изготовленных с высокотемпературным нагревом на воздухе, стабилизация параметров продолжается от 3 до 12 месяцев, то стабилизация параметров в вакуумных ФР наблюдается сразу после их герметизации (отпайки).

При отсутствии фотоэлектрического контроля за формированием ФЧЭ даже при соблюдении технологического регламента, наблюдается большой разброс значений темнового сопротивления: в выборке из 16 приборов $R_{ФР}$ изменялось от 50 кОм до 4,3 МОм. При этом низкоомные приборы (47 и 50 кОм) оказываются низкочувствительными. Типичные приборы, изготовленные при контроле параметров, имеют значения удельной обнаружительной способности $D^* \geq 5 \cdot 10^8 \text{ Вт}^{-1} \cdot \text{см} \cdot \text{Гц}^{1/2}$ при частоте модулированного излучения 400 Гц, темновое сопротивление 230–1200 кОм и значение приведенной чувствительности S_U^* 40...45 $\text{см}^2/\text{Вт}$ (при температуре 300°C). Отличительной чертой вакуумных ФР является линейная зависимость напряжения шума в широком интервале напряжения смещения, до 500 В/см.

Спектральная область чувствительности вакуумных ФЧЭ характеризуется следующими параметрами: максимум чувствительности наблюдается при длине волны

$\lambda_{\max} = 2,65 \text{ мкм}$, а длинноволновая граница (по уровню $0,1\lambda_{\max}$) $\lambda'' = 3,1...3,2 \text{ мкм}$. Последняя характеристика существенно отличается от ФЧЭ, полученных традиционным химическим осаждением, у которых $\lambda'' = 2,6 \text{ мкм}$ [2].

Высокоомные ФР (с $R = 2...5 \text{ МОм}$) имеют низкую чувствительность S_U^* , но чрезвычайно низкие значения постоянной времени релаксации (τ) – порядка 10 мкс. Эта характеристика в производстве у ФР обычно не контролируется, так как в используемых оптико-электронных системах (ОЭС) рабочая частота не превышает 200 Гц. Обычно τ серийных вакуумных ФР лежат в диапазоне 100–250 мкс [5].

Постоянная времени τ в вакуумных ФР на несколько порядков выше наблюдаемых в монокристаллах PbS, что обусловлено избирательным захватом в них одного типа нестационарных носителей – электронов. Механизм захвата подробно описан в [6–8]. Формирование уровней прилипания происходит, очевидно, при невысоких температурах – 370–470 К и давлении $p = 10^{-3}...10^{-2} \text{ мм рт. ст. воздуха}$.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ СПМШ ФОТОРЕЗИСТОРОВ

В работе [9] были представлены типичные спектры плотности мощности шума (СПМШ) вакуумных ФР, которые, в отличие от химически осажденных при низкой температуре, не имеют, как правило, области преобладания генерационно-рекомбинационного шума (ГРШ) (рис.1).

Эти спектры близки к наблюдаемым Барбером (Barber) [10]. На приведенных рисунках представлены спектры, измеренные при различных напряжениях

смещения на цепочке (1,5; 10,5 и 30 В), состоящей из исследуемого фоторезистора и нагрузки. Значения нагрузочного (R_H) и темнового (R_T) сопротивлений указаны над графиками.

Сплошная черная линия ($10^{-15} \text{ В}^2/\text{Гц}$) показывает уровень теплового шума Джонсона-Найквиста, рассчитанного по формуле (5). Эта линия фактически определяет достоверный частотный интервал СПМШ.

У небольшого числа ФР частотная характеристика СПМШ имеет излом в диапазоне 200–2000 Гц (как в работе [10]). Можно считать, что у этих ФР СПМШ определяется двумя несвязанными компонентами шума, определяемыми выражениями (6) и (7), обычно именуемыми избыточными, и генерационно-рекомбинационным шумом (ГРШ).

У ФР на основе PbS, полученных химическим осаждением и физическим напылением с высокотемпературным отжигом, наблюдаются существенные обратимые, а иногда и необратимые изменения фотоэлектрических параметров (R_T , S и особенно $U_{ш}$) при длительном воздействии повышенной до 330–340 К температуры при их эксплуатации, за счет десорбции газообразных компонент [11]. Однако у вакуумных приборов при нагреве характер СПМШ остается без изменений. На рис.3 приведены две характеристики типичного вакуумного ФР до и после температурного воздействия.

Вакуумные ФР очень чувствительны к составу атмосферы внутри баллона: при попадании в баллон ФР сухого атмосферного воздуха R_T и S резко падают. Так, например, при разгерметизации ФР № 383-5 (его СПМШ до вскрытия представлены на рис.2а) в осушенном воздухе R_T

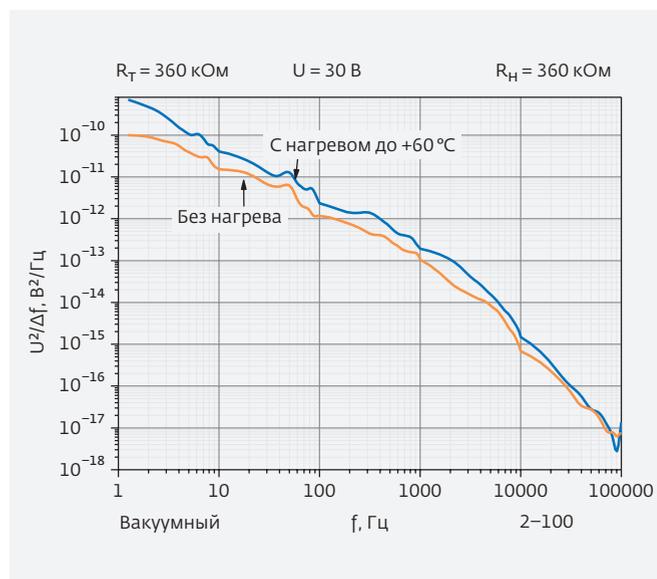


Рис.1. Типичные СПМШ физических "вакуумных" приборов до нагрева и во время нагрева

уменьшается с 1,2 МОм до 2 кОм. Резко, на порядки величин, упали S_{0} и $S_{400 \text{ Гц}}$. На рис.2б представлены кривые для максимального напряжения смещения на цепочке (30 В) до и после вскрытия, на этом же графике пунктиром обозначен уровень теплового шума ($P_u = 3,15 \cdot 10^{-17} \text{ В}^2/\text{Гц}$) ФР после вскрытия. Однако после последующей длительной откачки параметры ФР восстанавливаются без дополнительной термообработки.

Для исследования морфологии и состава пленок было отобрано 3 типичных прибора: 2 ФСВ-12А ($R_{ФР} = 120$ и 380 кОм) и 1 ФСВ 16 АН, изготовленные по вакуумной технологии в различное время.

Проведенное исследование морфологии поверхности вакуумных ФЧЭ с помощью сканирующего электронного микроскопа Helios NanoLab 600 (FEI, США) (рис.3) показало, что ФЧЭ всех трех приборов состоит из чередующихся и соприкасающихся

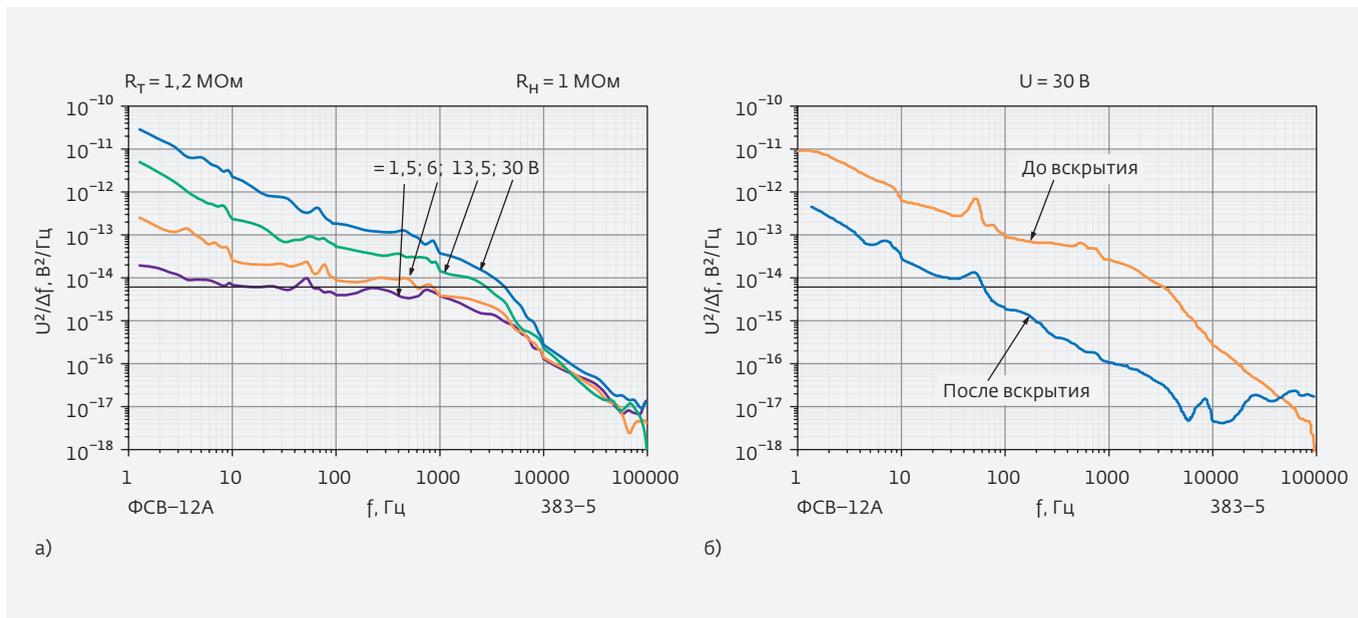


Рис.2. СПМШ "вакуумных" ФР

друг с другом столбообразных кристаллитов, неплотно соединенных со стеклянной подложкой.

Методом энергетического дисперсионного рентгеновского микроанализа показано, что механизм роста пленок колонковый, атомный состав пленки: Рb – (47–52)%, S – (45–50)%, О – (2,5–3)% – близок к стехиометрическому.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Рассмотренная структура вакуумных ФЧЭ резко отличается от неупорядоченной блочной структуры ФЧЭ, полученных вакуумным напылением с последующим высокотемпературным отжигом в воздушной атмосфере, и от структуры ФЧЭ, полученных низкотемпературным методом химического осаждения, особенно при высокой концентрации восстанавливающего агента [3].

У вакуумных ФЧЭ на поверхности нет сплошной окисленной пленки, характерной

для ФЧЭ, нагреваемых до 900 К в воздушной атмосфере. Нет и переходной области у диэлектрической подложки. Но даже при низком давлении воздуха при $T = 300$ К в вакуумных ФЧЭ происходит компенсация типа проводимости (изменение типа проводимости с "n" на "p") за счет диффузии кислородсодержащих примеси (КСП) в объем поликристаллической пленки из окружающей атмосферы. Этот же процесс приводит к росту R_T и τ до 10^{-5} с. Дальнейший рост τ происходит, очевидно, за счет формирования на свободной обширной поверхности столбчатой структуры (рис.3) адсорбированного газового монослоя неясного химического состава. Этот монослой обеспечивает "прилипание" свободных носителей с энергией активации $E_t = E_c - 0,12$ эВ. Одновременно при этом происходит снижение R_T за счет эффективного роста концентрации дырок. Этот процесс роста τ и ρ контролируется на финальной стадии формирования вакуумного ФР: рост

S_U^* при падении R_T , измеренный на постоянном токе при внешней засветке.

Из-за малой концентрации кислорода и других газов в объеме ФР адсорбированный газовый слой занимает малую часть поверхности структуры. При разгерметизации ФР адсорбент захватывает всю поверхность кристаллитов, концентрация свободных электронов уменьшается, что резко снижает R_T и ведет к рассогласованию измерительной цепочки схемы, что фиксируется как исчезновение чувствительности:

$$S_U = C \frac{\tau_p}{p\sqrt{1 + \omega^2\tau_p^2}}, \quad (8)$$

где C – величина, пропорциональная коэффициенту поглощения материала, напряжению смещения, длине волны падающего излучения и квантовому выходу ФР.

При длительной откачке в вакууме адсорбированная пленка частично удаляется, R_T и S_U^* возрастают.

Считается, что ГРШ и шум типа $1/f^\alpha$ имеют различную природу. В обоих выражениях (6 и 7) имеются по крайней мере две величины – A (В) и p , которые не могут быть определены при стандартных методах измерения. Для оценки p можно использовать эффект Холла. Без его использования возможно разделение компонент шума при анализе СПМШ. Но только при определенных значениях τ , когда спектр шума существенно отличен от спектра $1/f$, то есть при малых (менее 50–70 мкс) значениях. Но таких ФР немного.

Производя дополнительную откачку при повышенных до 400 К температурах и наблюдая частотную характеристику шума можно оценить соотношение

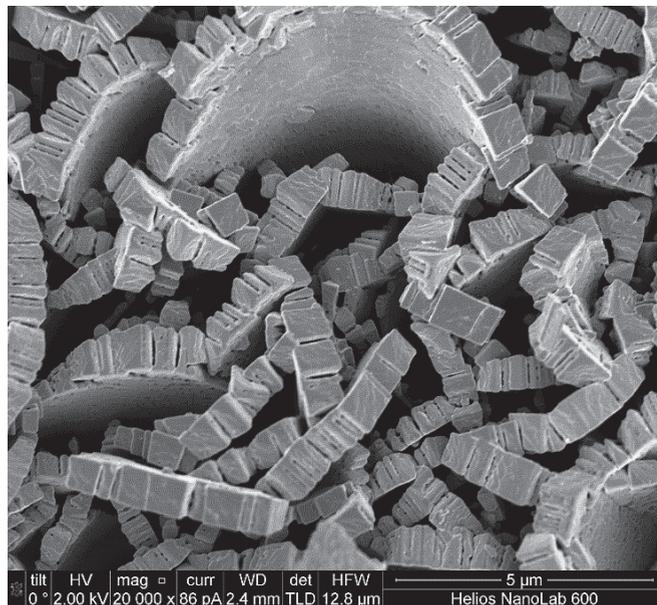


Рис.3. Типичная морфология физических "вакуумных" приборов

компонент шума. Видимо, со снижением адсорбированных молекул КСП относительная роль ГРШ снижается.

При низкой концентрации уровней прилипания вклад в напряжение ГРШ может быть малым, преобладающим будет шум $1/f$, при оптимальных концентрациях ГРШ шумы будут определяющими, что характерно и для серийных химических технологий. При чрезмерно высоких концентрациях адсорбированных атомов КСП (в разгерметизированных вакуумных ФЧЭ) темновая концентрация основных носителей (дырок) становится аномально высокой, как у эпитаксиальных структур, и концентрация избыточных носителей Δp , появляющаяся за счет падающего излучения, становится малой по сравнению с p .

Можно представить, что энергетическая модель фоторезистора на основе PbS содержит помимо уровня, расположенного вблизи уровня Ферми ($E_{GR} = E_C - 0,23$ эВ), определяемого степенью окисления

при высокотемпературном нагреве при $p = 10^{-3} \dots 10^{-2}$ мм рт. ст., мелкие уровни, расположенные вблизи зоны проводимости ($E_t = E_c - 0,12$ эВ). В работе [4] была показана особая роль кислородосодержащей газообразной примеси (КСР), находящейся в газовой фазе (вероятно, связанной с радикалами O_2^- или H^-), и адсорбирующей на поверхности микрокристаллов PbS поликристаллической фоточувствительной пленки, формируя мелкие акцепторные уровни прилипания E_t .

Рекомбинация неравновесных носителей определяется обоими этими уровнями, но соотношение τ/r в них разное. При высокотемпературном нагреве формируются устойчивые соединения (окислы и сульфиды - $PbSO_4$, $Pb(OH)_2$, $PbO \cdot PbSO_4$), которые обеспечивают стабильность $\overline{\Delta p}$ в различных условиях эксплуатации и при длительном хранении.

Авторы благодарят А.Л.Комиссарова за проведение измерений СМШ приборов.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант № 15-57-61001).

ЛИТЕРАТУРА

1. **Эллиот А.** Последние успехи в разработке фотоэлементов для инфракрасного света // Успехи физических наук, 1948. Т. 36. № 9. С. 83-104.
2. **Jones R.C.** A new classification system for radiation detectors // J. Opt. Soc. Am., 1949. V.39. P. 344-356.
3. **Mohamed H.S.H. e.a.** Spectral characteristics and morphology of nanostructured Pb-S-O thin films synthesized via two different methods // J. Materials Science in Semiconductor Processing 2014. V. 27. P. 725-732.
4. **Варлашов И.Б. и др.** Исследование фоточувствительных структур на основе PbS методом оже-электронной спектроскопии. - М.: Вестник МЭИ, 2015. № 2. С. 56-60.
5. **Мирошников Б.Н.** Изменение параметров фоточувствительных элементов // Материалы докладов 44 межд. науч.-метод. семинара "Флуктуационные и деградиационные процессы в полупроводниках" (Москва, 26-27 ноября 2013 г.). - М.: Изд. МЭИ, 2014. С. 139-141.
6. **Смит Р. и др.** Обнаружение и измерение инфракрасного излучения / Пер. с англ. В.И.Алексеева; под ред. В.А.Фабриканта. - М.: Иностранная литература, 1959. 448 с.
7. **Роуз А.** Основы теории фотопроводимости / Пер. с англ. А.А.Рогачева и Р.Ю.Хансеевара; под ред. С.М.Рывкина. - М: Мир, 1966. 192 с.
8. **Бьюб Р.** Фотопроводимость твердых тел / Пер. с англ.; под ред. Т.М.Лившица. - М.: ИЛ, 1962. 558 с.
9. **Комиссаров А.Л.** Исследование электрофизических свойств фоторезисторов на основе PbS: дисс... канд. техн. наук: 01.04.10 / Комиссаров Андрей Леонидович. - М.: МЭИ (ТУ), 2011. 221 с.
10. **Barber D.** Measurements of current noise in lead sulfide at audio frequencies // J. Proc. Phys. Soc., 1955. V. B68. P. 898-907.
11. **Мирошников Б.Н.** Исследование влияния дополнительной термообработки фоточувствительных слоев на основе PbS в осушенных газах и в вакууме // Материалы докладов 44 межд. науч.-метод. семинара "Флуктуационные и деградиационные процессы в полупроводниках" (Москва, 26-27 ноября 2013 г.). - М.: МЭИ, 2014. С. 150-153.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ CAR-РЕЗИСТОВ В ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОЙ ЛИТОГРАФИИ

► Г.Я.Красников, О.П.Гущин, А.Д.Морозов, П.В.Игнатов, Е.С.Горнев, П.А.Каширин,
В.А.Овчинников, Д.В.Базанов, Н.А.Орликовский, В.А.Кальнов

В настоящее время микроэлектроника прилагает большие усилия, чтобы найти менее затратное эффективное альтернативное решение 193 нм фотолитографии с двойным экспонированием и EUV-литографии. Ведутся активные разработки многолучевой электронной литографии и новых электронных резистов для нее с химическим усилением скрытого изображения (CAR), обеспечивающих требуемое разрешение с одновременной поддержкой высокой чувствительности.

В данной работе исследовалась электронно-лучевая литография на базе новых позитивных электронных резистов TOK OEVR CAP 164A3 и TOK OEVR CAP 112PM от фирмы Tokyo Okha.

Ключевые слова: многолучевая электронная литография, резист с химическим усилением скрытого изображения, экспонирование.

USING CAR RESISTS IN ELECTRON – BEAM LITHOGRAPHY

G.Y.Krasnikov, O.P.Gushin, A.D.Morozov, P.V.Ignatov, E.S.Gornev, P.A.Kashirin,
V.A.Ovtchinnikov, D.V.Bazanov, N.A.Orlikovsky, V.A.Kalnov

Currently, microelectronics has made great efforts to find less costly effective alternative 193nm lithography with double exposure and EUV lithography. Under active development of multi-electron-beam lithography and new electronic resists for it with a chemical amplification of the latent image (CAR), providing the required resolution with simultaneous support of high sensitivity.

In this study we investigated the electron – beam lithography based on new positive electron resists TOK OEVR CAP 164A3 and TOK OEVR CAP 112PM from the company Tokyo Okha

Keywords: multibeam electron lithography, resist chemical amplification, latent image exposure.

ВВЕДЕНИЕ

Процессом, который в большей степени определяет уровень технологии производства интегральных схем, является литография. На массовом микроэлектронном производстве с начала истории и до настоящего времени используется фотолитография как метод переноса изображения. За эти годы фотолитография прошла через ряд кардинальных изменений. В настоящее время основным способом формирования изображения является проекционная фотолитография. В проекционных литографах (степперах и сканерах) уменьшенное изображение фотошаблона проецируется на экспонируемую подложку. При этом минимальный размер получаемого изображения определяется соотношением Рэлея:

$$CD = k_1 \frac{\lambda}{NA}, \quad NA = n \cdot \sin(\alpha),$$

где: k_1 – технологический коэффициент, λ – длина волны экспонирующего излучения, NA – числовая апертура объектива, n – показатель преломления среды между подложкой и объективом, α – аппретурный угол (угол между крайним лучом светового пучка на входе (выходе из) оптической системы и ее оптической осью).

На сегодня, мировые лидеры достигли в производстве уровня технологии 22 нм, при этом используется фотолитограф с длиной волны экспонирующего излучения 193 нм и объектив с аномально большой числовой апертурой. Для достижения такого разрешения также разработана техника усиления разрешения RET (resolution enhancement techniques), в которую входят высококонтрастные фоторезисты, антиотражающие покрытия, внеосевое освещение,

фотошаблоны с фазовой коррекцией и коррекцией эффекта оптической близости, а также использование иммерсионной оптики и двойное экспонирование.

Сильной стороной современной проекционной фотолитографии является, кроме высокого разрешения, и производительность на уровне более 100 пластин в час на диаметре пластин 300 мм. Слабой стороной стали чрезвычайно высокая цена и негибкость процесса относительно топологии (каждое новое изделие требует нового комплекта фотошаблонов). Это сделало фотолитографию на уровне 22 нм доступной только фабрикам, выпускающим большие объемы изделий (табл.1).

Все альтернативные решения вопроса литографии до последнего времени имели различные недостатки, в основном связанные с привносимой дефектностью, либо с производительностью. Эти решения подходили для использования в лабораториях или для мелкосерийного производства.

Потенциальное решение данной проблемы лежит в использовании прямой записи на пластину. Это позволит решить основную проблему, связанную с ценой комплекта фотошаблонов (они в данном случае не используются). Низкая производительность является причиной, по которой этот вид литографии до настоящего момента не был массово внедрен в микроэлектронное производство, кроме производства фотомасок. Долгое время по этой же причине инфраструктура для интеграции этого метода в производство также развивалась крайне медленно [1]. Фирма MAPPER смогла показать возможность реализации своей концепции многолучевой электронной литографии, когда общее число лучей достигает 13330 [2].

С этого момента начали свое развитие, как сама технология, так и вся инфраструктура, необходимая для ее освоения. Для внедрения MAPPER в производство стартовала международная программа "IMAGINE" по разработке технологии, оборудования, материалов, программного обеспечения [3]. В настоящий момент продукт MAPPER к выпуску на рынок практически

готов, предполагается, что первые машины будут проданы в начале 2016 года. Но есть уже достаточно большое количество работ в области самого литографа, материалов и технологии, выполненных в лаборатории CEA-Leti (Франция).

Второй фирмой, интенсивно работающей в области создания современного электронно-лучевого оборудования для прямой

Таблица 1. Типичное число проектов и годовая стоимость фотошаблонов критических слоев КМОП-маршрута (по информации фирмы MAPPER)

Архитектура чипа	Количество масок				
	итого	65 нм	40/45 нм	28/32 нм	22 нм
A	5	3	1	1	0
B	10	5	2	2	1
C	15	7	3	3	2
D	20	10	4	4	2
1	25	11	6	5	3

Архитектура чипа	Средняя цена масок, долл.				
	итого	65 нм	40/45 нм	28/32 нм	22 нм
A (5)	4 385 714	1 350 000	1 285 714	1 750 000	–
B (10)	10 571 429	2 250 000	2 571 429	3 500 000	2 250 000
C (15)	16 757 143	3 150 000	3 857 143	5 250 000	4 500 000
D (20)	21 142 857	4 500 000	5 142 857	7 000 000	4 500 000
E (25)	28 164 286	4 950 000	7 714 286	8 750 000	6 750 000



Рис.1. Стек затвора

записи на пластине, является немецкая фирма Vistec, применяющая концепцию изменяемого сечения электронного луча (VISTEC Shaped-beam, VSB). Ее самая современная разработка, представленная в настоящее время, это литограф SB3055, который за счет дополнительной опции "Cell Projection", когда экспонирование осуществляется наиболее часто повторяемой в топологии ячейкой, имеет возможность значительно повысить производительность. Для дальнейшего увеличения производительности фирмой создается многолучевая машина MSB с потенциальной возможностью получения производительности на уровне несколько пластин в час на диаметре до 450 мм [4].

Предприятие ОАО "НИИМЭ и Микрон" является одним из представителей той

ниши разработчиков и производителей, для которых решения, предлагаемые в рамках разрабатываемой многолучевой электронной литографии, стали многообещающими исходя из большого количества разрабатываемых и аттестуемых на фирме проектов. По этой причине ОАО "НИИМЭ и Микрон" рассматривает приобретение многолучевого электронного литографа, как возможное быстрое решение стоящих перед ним задач в разработке и освоении минимальных проектных норм 45–32–28 нм.

ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Целью работы стало изучение новой, для МИКРОНА, электронно-лучевой литографии с прямой записью на пластине, а также изучение свойств совершенно новых электронорезистов (CAR resist), разрабатываемых ведущими поставщиками на базе DUV фоторезистов, чувствительных к длине волны 248 нм (KrF) и использующих технику химического усиления скрытого изображения, что позволяет адаптировать эти материалы под производство КМОП СБИС, используя уже разработанные и имеющиеся на предприятии технологические приемы и оборудование [4].

Конкретно изучались: параметры нанесения электронорезиста на пластину, обработка параметров экспонирования этого резиста путем подбора дозы экспонирования, изучение зависимости дозы от типа линии (негативная, позитивная, плотноупакованная структура), режимов постэкспозиционного отжига.

ЭКСПЕРИМЕНТ

В работе исследовались позитивные резисты ТОК ОЕВР САР 164А3 и ТОК ОЕВР САР 112РМ, с химическим усилением скрытого

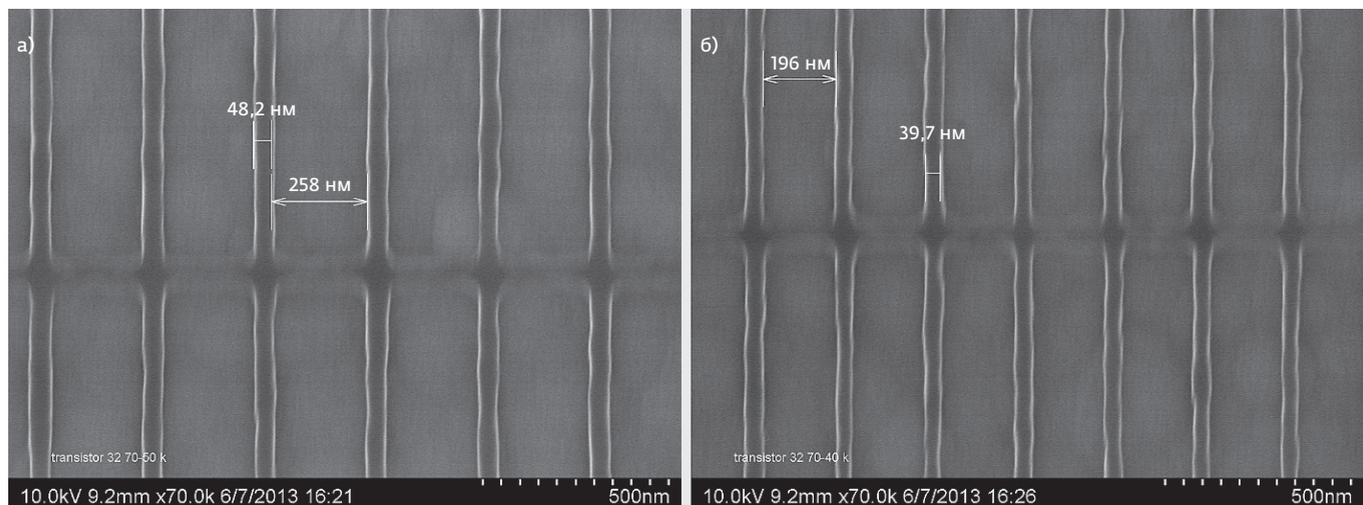


Рис.2. Проработанные негативные элементы с размерами: а) 50 нм, б) 40 нм

изображения, любезно предоставленные компанией Токуо Окха. В основе этих резистов лежат химические соединения, аналогичные химически усиленным резистам, чувствительным к длине волны экспонирующего DUV KrF-излучения 248 нм. Работа велась на кремниевых пластинах диаметром 150 мм со сформированным стеклом затвора с жесткой маской либо из оксида кремния, либо из слоя металлического вольфрама, как показано на рис.1. Резисты наносились на треке DNS, на скорости вращения 3000 об/мин. Перед нанесением резистов пластины обрабатывались промотором адгезии, гексаметилдисилазаном (ГМДС). Сушка осуществлялась при 100°C в течение 60 с на горячей плите. Сформированная пленка резиста имела толщину 60 нм.

Экспонирование проводилось с использованием специально разработанной топологии, содержащей тестовые элементы негативного и позитивного типа и плотноупакованные решетки с размерами 200, 150, 100, 80, 60, 80, 60, 50, 40 нм, с горизонтальной

и вертикальной ориентацией, направленные на выявление максимального разрешения резистов.

Экспонирование резиста CAP 164A3 проводилась на электронно-лучевом литографе Vistec 350SB. При экспонировании ускоряющее напряжение было 50кВ.

Первые пластины экспонировались с целью определения базовой дозы, достаточной для

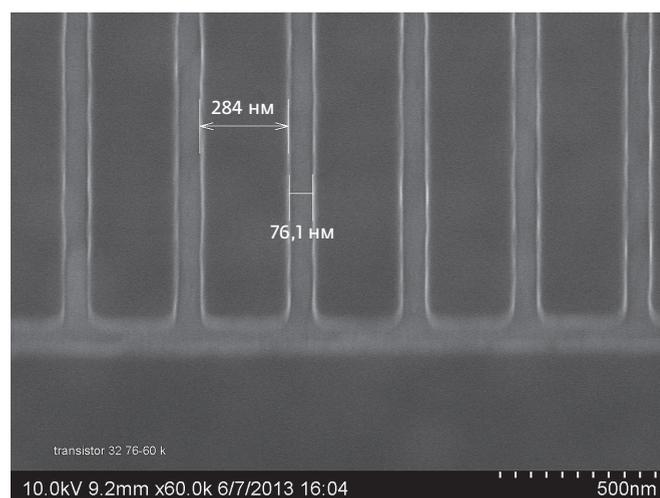


Рис.3. Проработанный позитивный элемент с размерами 75 нм

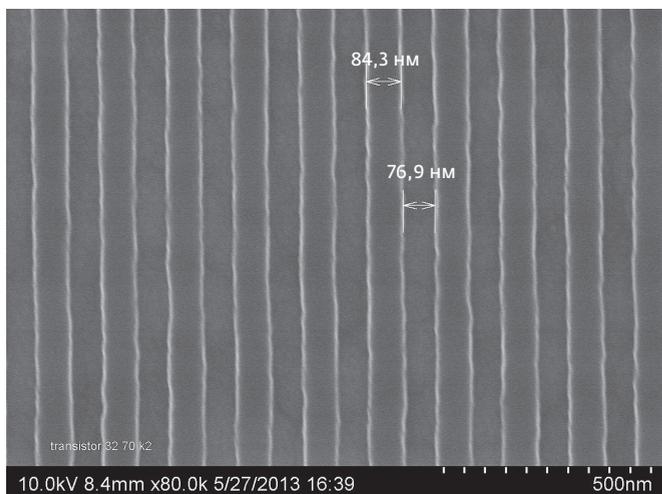


Рис.4. Решетки с полушагом 80 нм и экспонированной дозой 70 мкКл/см²

проявления резиста. При последующих экспонированиях были достигнуты минимальные размеры и определена дозовая зависимость минимального размера для элементов негативного и позитивного типа.

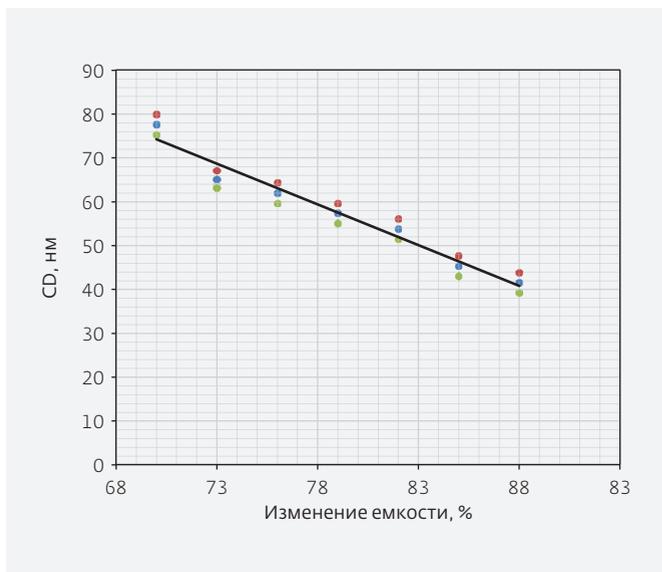


Рис.5. График зависимости полученного критического размера от дозы экспонирования для отдельно стоящего негативного элемента

Постэкспозиционный отжиг проводился при 100°С в течение 60 с на горячей плите. Проявление проводилось в 2,38%-ном растворе тетраметиламмония (ТМАН) с последующей промывкой в деионизованной воде.

Для проведения экспериментов с резистом CAP 112PM использовался электронный литограф Raith 150 с электронной колонной Gemini. Было очевидным, что требуемые параметры структур являются граничными по разрешению для данного резиста. Для чего было выбрано максимальное ускоряющее напряжение в 30 кэВ. Шаг экспонирования по площади равен 2,5 нм и такой же для линий.

Доза менялась от 6 до 18 мкКл/см² для площадей и от 16 до 100 пКл/см. Выбор дозы пал на такой диапазон, чтобы включить все структуры от заведомо непроработанных до перепроявленных.

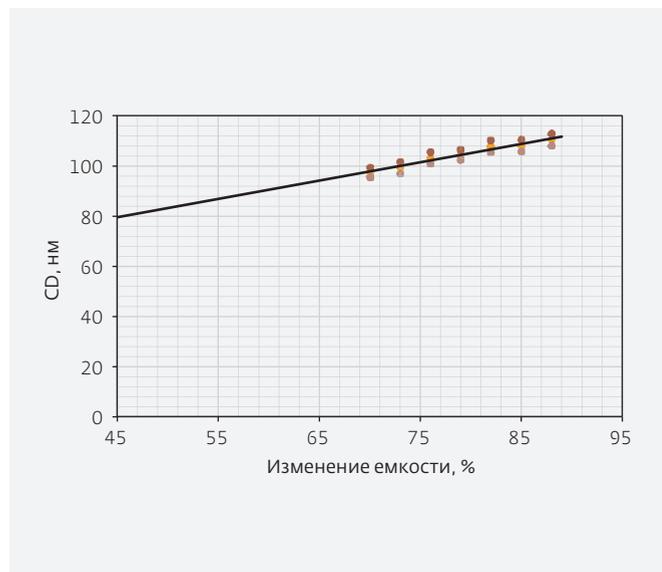


Рис.6. График зависимости полученного критического размера от дозы экспонирования для отдельно стоящего позитивного элемента

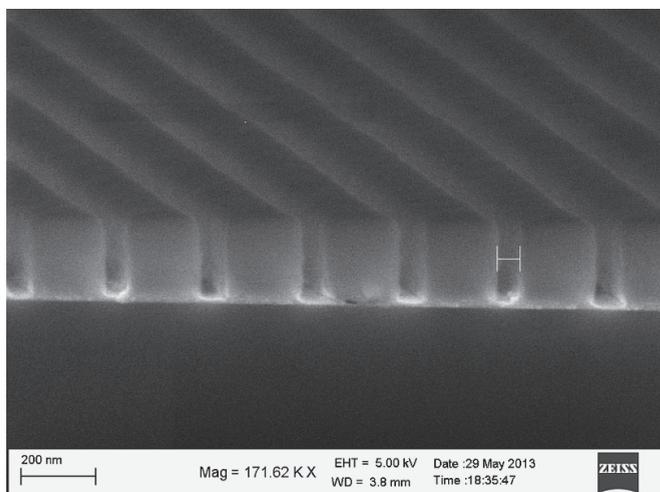


Рис.7. Результат экспонирования ТОК OEVR CAP 112PM

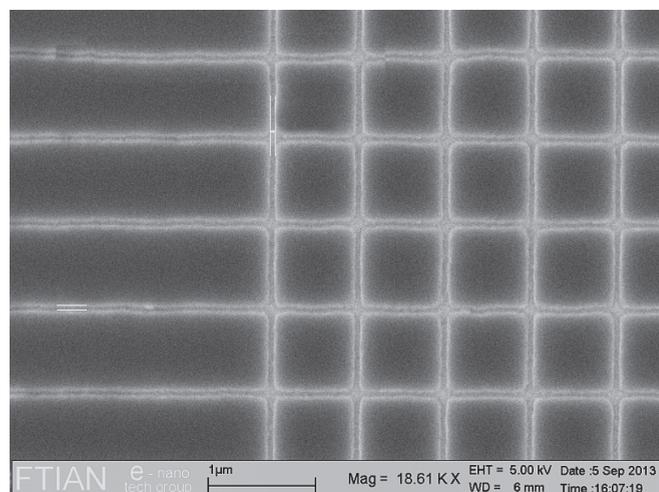


Рис.8. Результат экспонирования ТОК OEVR CAP 112PM

РЕЗУЛЬТАТЫ

1. С электронным резистом ТОК OEVR CAP 164A3

Были получены минимальные размеры на элементах негативного типа в 40 и 50 нм (рис.2). На элементах позитивного типа минимальный размер составил 75 нм (рис.3). В плотноупакованной решетке удалось проработать соотношение 75 к 85 нм (рис.4). Зависимость минимально размера от дозы представлена на рис.5 и 6. Вся метрология проводилась методом растровой электронной микроскопии.

2. С электронным резистом ТОК OEVR CAP 112PM

Оценка результата проводилась в том же приборе Raith 150 в режиме работы электронного микроскопа. Изображения полученных структур с примерами высокого разрешения на данном резисте приведены ниже (рис.7, 8).

Данные исследования показывают, что резист CAP 112PM обладает сверхвысокой

чувствительностью и достаточным разрешением для формирования масок с характеристическими размерами меньше 40–50 нм.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Проведен анализ современного статуса фотолитографии.
2. Показано, что для развития отечественной наноэлектроники в области критических размеров 45–32–28 нм и ниже оптимальным является использование быстро развивающейся многолучевой электронной литографии.
3. Исследованы технологии электронно-лучевой литографии на литографах Vistec 350SB и Raith 150 под критичные слои с минимальными проектными нормами 45 нм с использованием новых позитивных резистов CAP 164A3 и CAP 112PM с химическим усилением скрытого изображения. Были исследованы процессы нанесения, термообработки, электронно-лучевого экспонирования и проявления. Получено разрешение вплоть до 40 нм – для негативных

линий. Такой показатель является достаточным для применения этих материалов для переноса изображения в производстве интегральных схем с топологической нормой вплоть до 45 нм при условии стабильности процесса и достигаемости этого разрешения на всех типах линии.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Ronse K.** E-beam maskless lithography: prospects and challenges // Proc. of SPIE, 2010. Vol. 7637.
2. **Wieland M.J.* , Derks H., Gupta H., Peut T. van de, Postma M, A.H.V. van Veen.** MAPPER Lithography is developing a maskless lithography technology // Lithographic Technologies II / Edited by Daniel J. C. Herr, Proc. of SPIE Vol. 7637 76371Z-1. P. 201.
3. **Pain L., Icard B., Martin M., Constancias C., Tedesco S.** CEA-LETI Proc. SPIE 7970 // Alternative Lithographic Technologies III, 79700Y (April 04, 2011); doi:10.1117/12.881286. Text Size: A A A.
4. **Slodowski Matthias*, Doering Hans-Joachim, Dorl Wolfgang, Stolberg Ines A., et al.** Coulomb Blur Advantage of a Multi Shaped Beam Lithography Approach // Proc. SPIE. 7271-26.
5. **Steenbergen Jan Frederik Van, Ootsuka Noboru, Buch Xavier, Icard Béatrice, et al.** Ultimate Lithographic Performances of Advanced Resists CAR or non-CAR Resist? // Alternative Lithographic Technologies IV / Edited by Tong, William M. Proceedings of the SPIE, 2012. Vol. 8323, article id. 83232M, 8 p.

ИЗОБАРЫ АДСОРБЦИИ ФТОРУГЛЕРОДНЫХ СОЕДИНЕНИЙ, ВЫБРАННЫХ ДЛЯ КРИОГЕННОГО ПЛАЗМЕННОГО ТРАВЛЕНИЯ LOW-K ДИЭЛЕКТРИКОВ

► А. А. Резванов, О. П. Гущин, Е. С. Горнев, Г. Я. Красников, К. П. Могильников, Л. Чанг, Ж.-Ф. де Марнефф, К. Дюссаррат, М. Р. Бакланов

В данной работе описан метод по определению необходимых параметров различных химических веществ, используемых при криогенном травлении, применяя уравнение Антуана, уравнения для расчета температурной зависимости плотности и поверхностного натяжения. В разработанном методе происходит пересчет изотермы адсорбции толуола при комнатной температуре в изобару адсорбции гексафторбензола (C_6F_6) и перфторциклобутана (C_4F_8) при низких температурах, которые выбраны в качестве веществ, конденсирующихся при криогенном травлении в порах low-k диэлектрика. Были проведены сравнения расчетных и экспериментальных изобар. Объяснены различия в полученных результатах, причины возникновения гистерезиса на экспериментальной изобаре адсорбции/десорбции для C_6F_6 и C_4F_8 .

Ключевые слова: микроэлектроника, low-k диэлектрик, пористость, криогенное травление, изобары адсорбции.

ADSORPTION ISOBARS OF FLUOROCARBON COMPOUNDS SELECTED FOR CRYOGENIC PLASMA ETCHING OF LOW-K DIELECTRICS

Askar Rezvanov, Oleg P. Gutshin, Evgeny S. Gornev, Gennady Ya. Krasnikov, Konstantin P. Mogilnikov, Liping Zhang, Jean-Francois de Marneffe, Christian Dussarrat, Mikhail R. Baklanov

In this paper we describe a method for determination the necessary parameters of various chemicals, used for cryogenic etching, using the Antoine's equation, the

equations for calculating the temperature dependence of the density and the surface tension. In developed method we are recalculated adsorption isotherm of toluene at room temperature to adsorption isobar of hexafluorobenzene (C_6F_6) and perfluorocyclobutane (C_4F_8) at low temperatures, that are selected as chemical compounds which condense into the pore of low-k dielectric before cryogenic etching. Comparisons were made between the calculated and experimental isobars. We explained the differences in the obtained results, the causes of the hysteresis in the experimental adsorption / desorption isobar of C_6F_6 and C_4F_8 .

Keywords: microelectronics, dielectric, low-k dielectric, porosity, cryogenic etching, adsorption isobars.

ВВЕДЕНИЕ

В микроэлектронной технологии в настоящее время осваивается возможность внедрения low-k материалов с диэлектрической постоянной меньше, чем 2,5 для суб-10 нм технологических норм. Однако их внедрение встречает значительные трудности, так как пористые low-k диэлектрики деградируют в процессах плазменной обработки. Активные частицы плазмы диффундируют в поры и изменяют структуру стенки пор [1]. В результате, low-k материал становится гидрофильным и значительное диэлектрической постоянной возрастает в связи с адсорбцией воды. Недавно изобретенный метод криогенного травления позволяет защитить стенки пор low-k диэлектрика от значительного повреждения их в процессе плазменного травления [2]. Когда травление происходит при низких температурах, его продукты конденсируются в порах и защищают их от проникновения активных радикалов плазмы [2, 3], но при этом температура процесса составляет около -120°C . Используя этот подход, удалось получить рекордно низкую диэлектрическую постоянную 2,38 в интегрированной структуре при ширине зазора между медными проводниками 23 нм [4]. Исходная диэлектрическая постоянная

диэлектрика составляла 2,31. Однако промышленность нуждается в процессах, совместимых с существующим оборудованием, поэтому необходимо разработать процессы, работающие при существенно более высоких температурах. Для этого была выдвинута идея, проводить конденсацию различных веществ в порах до травления [5]. В этом случае температура может быть любая, только необходимо подобрать нужные химические соединения. Но проблема состоит в том, что для большинства веществ ничего неизвестно кроме критической температуры и температуры плавления. Для решения этой проблемы нами был разработан метод, который позволяет определить необходимые параметры вещества, используя уравнение Антуана для давления паров, а также уравнения для расчета температурной зависимости плотности и поверхностного натяжения. Используя результаты работ по эллипсометрической порометрии [6], и мы можем получить изотермы адсорбции/десорбции толуола или других паров в порах low-k диэлектрика при комнатной температуре. Данные изотермы являются входными данными при расчетах. Мы производим пересчет изотермы адсорбции толуола при комнатной температуре в изобару адсорбции различных

химических соединений при низких температурах. По полученным графикам можно определить температуру, при которой начинается конденсация вещества. Данная температура будет соответствовать температуре образца, в котором происходит конденсация. Однако определение истинной температуры стенки поры является большой проблемой. Образец при травлении охлаждается с одной стороны. Поскольку материал пористый, то в нем возникает большой градиент температур, что влечет за собой сложность измерения температуры пленки практическим методом. Поэтому данный метод позволяет точно и быстро рассчитать истинную температуру пленки, не прибегая к экспериментам. Этот метод был применен для C_6F_6 , C_4F_8 и других веществ для температур в диапазоне $-20...-70^\circ C$ при нескольких постоянных давлениях, используемых для поджига плазмы в ССР- и ИСР-камерах.

МЕТОД

В эллипсометрической порометрии изотерма адсорбции толуола представлена в виде зависимости показателя преломления тонкого слоя от относительного давления паров толуола, а изобары адсорбции мы хотим получить в виде зависимости показателя преломления соответственно от температуры пленки. Рассмотрим сам процесс адсорбции, то есть заполнение пор парами адсорбата. На первом этапе рассмотрим только область мезопор, где их заполнение можно описать уравнением Кельвина [7]. Во всех описаниях этого процесса предполагается, что поры с радиусом меньшим, чем радиус Кельвина, заполнены, а поры большего радиуса – пусты. Таким образом, будем считать, что:

1. адсорбция паров наших адсорбатов при всех температурах описывается уравнением Кельвина;
2. размер пор однозначно связан с радиусом из уравнения Кельвина;
3. эта связь одинакова при разных температурах и для всех наших адсорбатов;
4. размеры пор и общая пористость пленки не зависят от температуры.

Тогда пересчет изотермы в изобару представляет собой простую перенормировку осей координат на экспериментальных графиках. Чтобы превратить изотерму в изобару, на оси абсцисс мы должны поставить вместо относительного давления паров толуола температуру пленки таким образом, чтобы в этой точке у них совпадал радиус Кельвина. То есть мы совмещаем точки на оси X в соответствии с уравнением [7]:

$$\frac{2\gamma_0 V_{m0}}{RT \ln\left(\frac{P}{P_0}\right)} = \frac{2\gamma_1(T_1) V_{m1}(T_1)}{RT_1 \ln\left(\frac{P_s}{P_1(T_1)}\right)}. \quad (1)$$

В формуле (1) левая часть – это радиус Кельвина из изотермы, а правая – из изобары. Как видно из этой формулы, даже при выполнении наших условий 1-4 для пересчета нам надо знать зависимости от температуры поверхностного натяжения $\gamma_1(T_1)$, молярного объема $V_{m1}(T_1)$ и давления паров $P_1(T_1)$. С самого начала у нас есть изотерма адсорбции толуола (рис.1) с проведенной экстраполяцией экспериментальных точек.

Оценить примерный диапазон температур T_1 для наших измерений довольно просто. Если мы собираемся строить изобару для C_6F_6 при давлении 100 мТорр, то нам будут нужны температуры, при которых давление паров, к примеру C_6F_6 , будет

от 100 мТорр и выше, а если для давлений 10 мТорр – то давление паров должно быть выше 10 мТорр. Это следует из физических соображений – если при температуре образца давление паров, например, 5 мТорр, то при 10 мТорр в камере на нем будет происходить неограниченная конденсация. То есть вся та область, где температура ниже предельной, будет служить своеобразным "насосом" для поступающего пара C_6F_6 , и никакого равновесия в камере мы не получим. В расчетах это означает, что $P_s/P_1(T_1)$ всегда должно быть меньше единицы. Верхний предел температуры для расчетов тоже оценить достаточно просто, взглянув на изотерму. Теперь, используя уравнение Антуана, мы можем рассчитать зависимость давления паров от температуры для интересующей нас области. С уменьшением температуры так же изменяется плотность C_6F_6 и C_4F_8 . Расчет плотности производится по формуле (2):

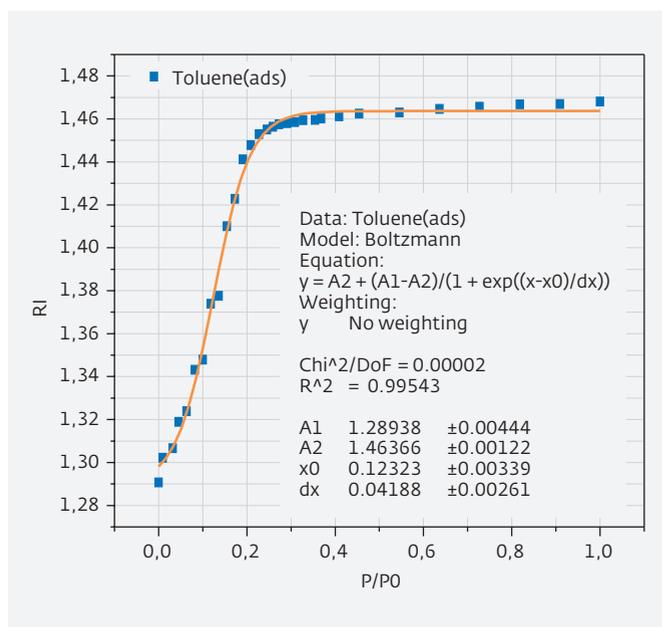


Рис.1. Изотерма адсорбции толуола

Константы Антуана для различных веществ

Вещество	Константы Антуана		
	A	B	C
C_6F_6 [10]	6,432233	943,0724	184,784
C_4F_8 [10]	6,8153	862,49	225,15
C_7F_8 [11]	15,239	3549,981	-42,445
Этанол [9]	8,20417	1642,89	230,3
C_3H_8O [9]	8,00308	1505,52	211,6

$$\rho = \rho_0 \cdot (1 - \alpha(T - T_{mel})), \quad (2)$$

где ρ_0 – постоянная плотность при температуре плавления T_{mel} . Температурный коэффициент α вычисляется по наклону прямой, полученной в результате интерполяции точек зависимости $\rho(T)$ для известной области температур. В первом приближении мы считаем, что плотность меняется линейно, то есть выбранные вещества не претерпевают фазового перехода первого рода. Соответственно, молярный объем вычисляется по простой формуле (3):

$$V_m = \frac{M}{\rho}. \quad (3)$$

Поверхностное натяжение можно посчитать с помощью (4):

$$\gamma_{ml}^{2/3} = k(T_{crit} - T - 6), \quad (4)$$

где T_{crit} – критическая температура, k – постоянный коэффициент [8]. Для веществ, которые присутствуют в базе DDB (DortmundDataBank) [9], плотность вычисляется по формуле (5):

$$\rho = \frac{A}{B^{1+\left(\frac{T}{C}\right)^D}} \quad (5)$$

Поверхностное натяжение по формуле (6):

$$\sigma_1 = A \cdot (1 - T_r)^{B+CT_r+DT_r^2+ET_r^3} \quad (6)$$

Таким образом, мы можем получить относительные значения давления для C_6F_6 и C_4F_8 , переписав формулу (1) в следующем виде:

$$\ln\left(\frac{P}{P_0}\right) = \frac{\gamma_0 V_{m0} T_1 \ln\left(\frac{P_s}{P_1(T_1)}\right)}{T \gamma_1(T_1) V_{m1}(T_1)} \quad (7)$$

где γ_0 , V_{m0} - для толуола при $T = 25^\circ C$.

Для перенормировки оси Y необходимо пересчитать RI_{old} для толуола в RI_{new} для интересующих нас веществ. Для начала будем считать, что поляризуемость пропорциональна плотности (8) [6]:

$$\frac{n^2 - 1}{n^2 + 2} = \frac{4\pi}{3} \left(\frac{\rho N_A}{M} \right) \alpha \quad (8)$$

Для адсорбции можно записать (9):

$$\frac{n^2 - 1}{n^2 + 2} = A_0 N_0 + A_1 N_1 \quad (9)$$

где $A_0 N_0$ - постоянная поляризуемость матрицы, $A_1 N_1$ - растущая поляризуемость адсорбата, так как при адсорбции растет N_1 [6]. Когда N_1 равно нулю (поры пустые), мы имеем $n = n_0$, соответствующее поляризуемости пустой матрицы. Когда поры полностью заполнены, прирост поляризуемости $A_1 N_1$ максимален, а разделив его на поляризуемость толуола, мы получим полный объем пор. Соответственно, если мы будем

заполнять эти поры не толуолом, а C_6F_6 , то для каждого уровня заполнения пор (для каждого изменяющегося n) мы должны текущую поляризуемость толуола заменить на поляризуемость C_6F_6 . Необходимо также учесть, что в отличие от изотермы, для изобары поляризуемость C_6F_6 будет разной для различных температур в соответствии с изменяющейся плотностью. В результате конечная формула для вычисления показателя преломления будет выглядеть так:

$$\frac{n_{eff}^2 - 1}{n_{eff}^2 + 2} = \frac{n_s^2 + 1}{n_s^2 + 2} + V \frac{n_{ads}^2 - 1}{n_{ads}^2 + 2} \quad (10)$$

где n_s - показатель преломления матрицы, n_{ads} - показатель преломления адсорбата.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Для начала была посчитана зависимость давления паров различных веществ от температуры по уравнению Антуана вида (11) для C_6F_6 , C_4F_8 , этанола, C_3H_8O и вида (12) для C_7F_8 (рис.2):

$$\log P(\text{Торр}) = A - \frac{B}{C + T(C)} \quad (11)$$

$$\ln P(\text{Па}) = A - \frac{B}{C + T(K)} \quad (12)$$

Синяя кривая на рис.2 отражает диапазон давлений, при которых осуществляется плазменное травление. Желтая кривая демонстрирует область температур, при которых функционирует существующее оборудование.

На следующем этапе было проведено сравнение теоретически рассчитанных изобар C_6F_6 (рис.3), C_4F_8 (рис.4) с экспериментальными графиками при давлении в камере $P_s = 1$ Па. Экспериментальные изобары

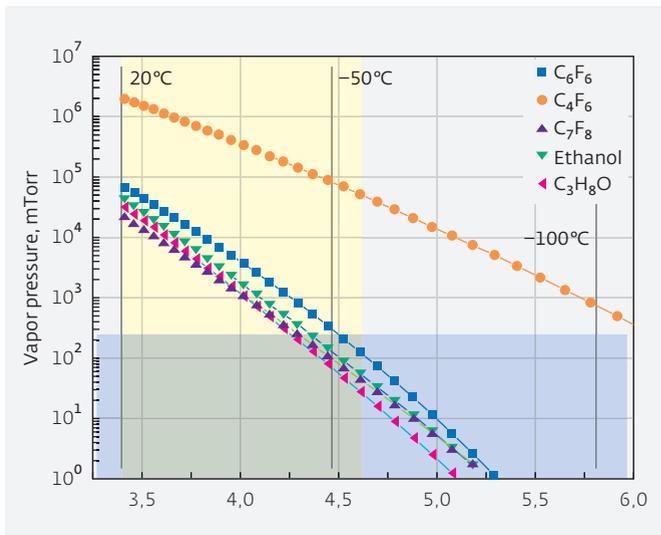


Рис.2. Рассчитанная зависимость давления паров C_6F_6 , C_4F_8 , C_7F_8 , этанола и C_3H_8O от температуры

представляют собой результаты измерения показателя преломления с помощью встроенного (in situ) эллипсометра в ICP плазменной камере.

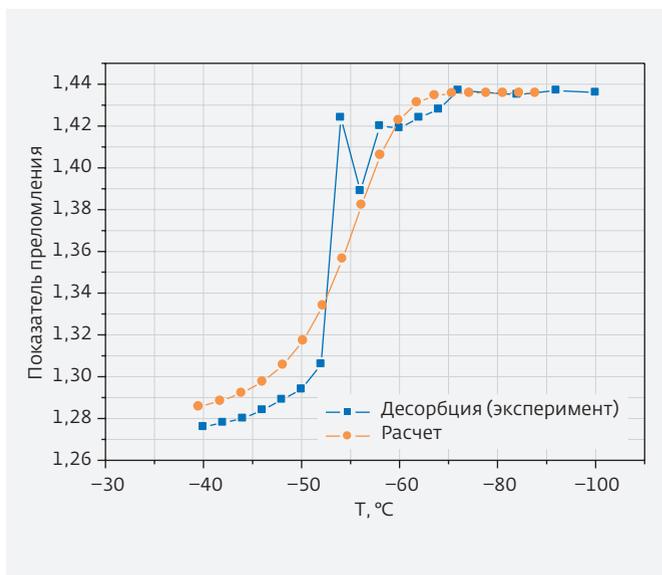


Рис.3. Экспериментальная и расчетная изобара C_6F_6 при $P_s=1$ Па

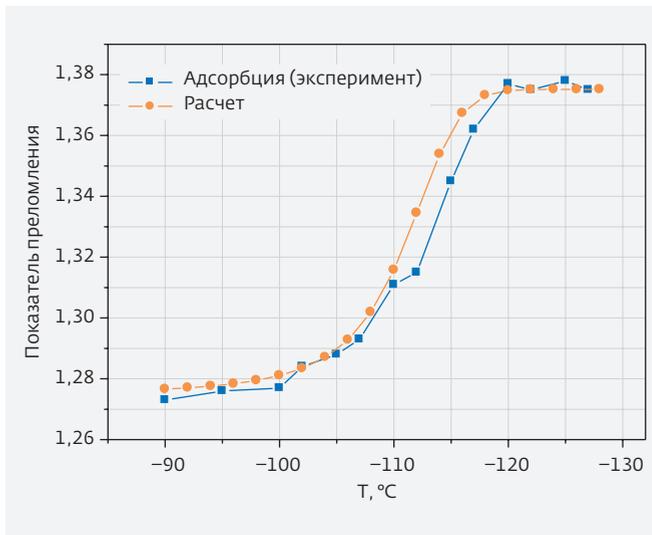


Рис.4. Экспериментальная и расчетная изобара C_4F_8 при $P_s=1$ Па

На полученных графиках отчетливо видны отличия в абсолютных значениях. Это можно объяснить следующим. Во-первых, исходная изотерма могла быть получена на одном образце, а изобара

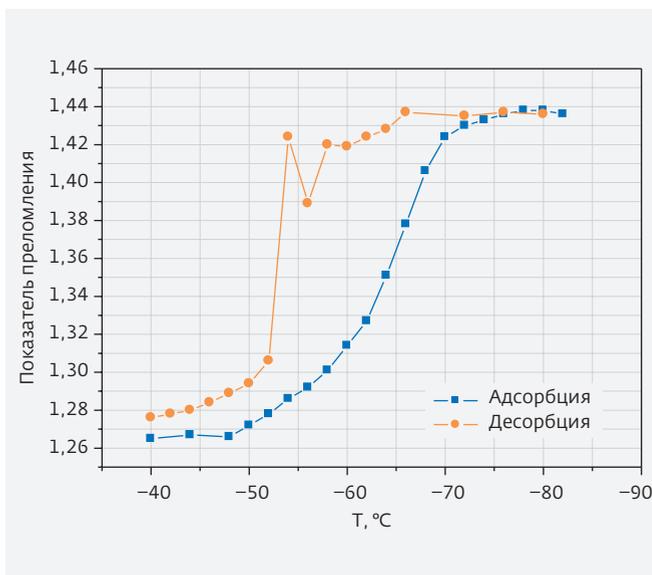


Рис.5. Экспериментальная изобара адс/дес для C_6F_6

на другом. Во-вторых, измерения были проведены на разных установках с различными эллипсометрами, что дает дополнительную разницу в расчетных и экспериментальных данных. Так что расхождения в абсолютных величинах адсорбции вполне объяснимы. Гистерезис на экспериментальной изобаре (рис.5) связан с тем, что пленка не успевает охладиться с той скоростью, с которой понижается температура при адсорбции на изобаре, а вот нагреться ей уже оказывается несколько проще. Поэтому, мы считаем, что для начала это очень хороший результат, тем более при разработке данного метода не использовались никакие подгоночные параметры, все необходимые данные брались из справочников.

На рис.6 приведено сравнение экспериментальных и расчетных данных для C_4F_8 при конденсации в р-OSG при разных температурах. Из данного графика видно, что при температурах $-80\dots-90^\circ C$ конденсации вещества в порах диэлектрика не происходит. Это связано с тем, что в камере не было достигнуто равновесного давления для данных значений температур. Однако при понижении температуры на $10^\circ C$ и ниже, C_4F_8 уже начинает конденсироваться в порах пленки. Полученные расчетные результаты очень хорошо сходятся с экспериментальными данными.

Для подтверждения наших соображений о том, что измерения изотермы и изобары для C_6F_6 проводились на разных образцах были произведены пересчет полученной экспериментальной изобары адс/дес в изотерму и сравнение результатов (рис.7).

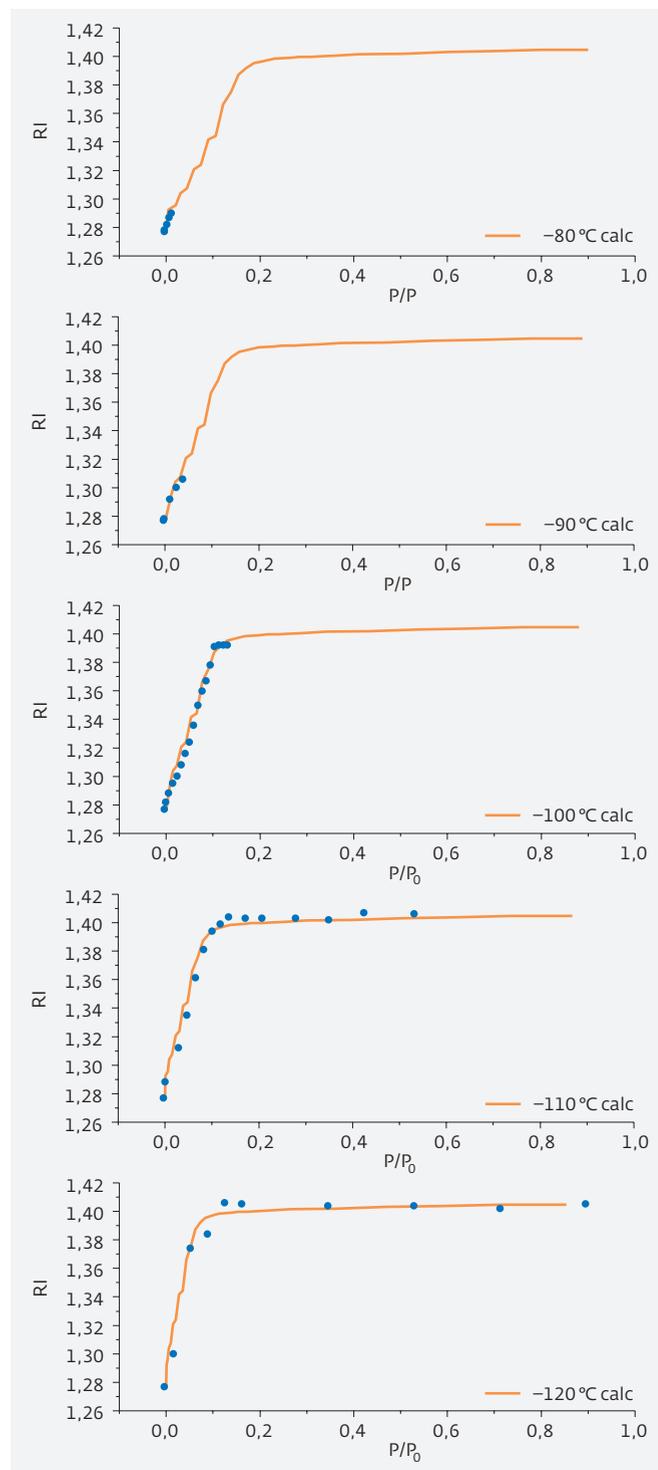


Рис.6. Сравнение экспериментальных и расчетных результатов для C_4F_8 при конденсации в р-OSG (porous organo-silicate glasses) при разных температурах

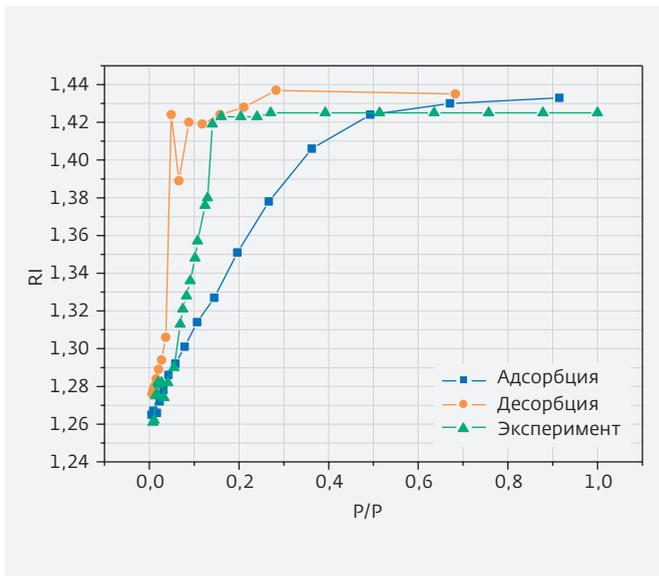


Рис.7. Сравнение экспериментальной изотермы адсорбции C_6F_6 с изотермой, полученной пересчетом из экспериментальной изобары адс/дес C_6F_6

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Нами была проведена работа по разработке метода пересчета изотермы адсорбции толуола при комнатной температуре в изобару адсорбции выбранных химических соединений для криогенного травления. Используя данный метод можно легко и быстро определить истинную температуру стенок пор, необходимые параметры выбранных химических соединений, что позволит снизить затраты на проведение экспериментов и ускорить процесс получения необходимых данных. Из результатов эксперимента видно, что данный метод показывает хорошие результаты, некоторые отличия от экспериментальных данных связаны с практическими трудностями при проведении эксперимента, а также с проведением измерений на разных образцах.

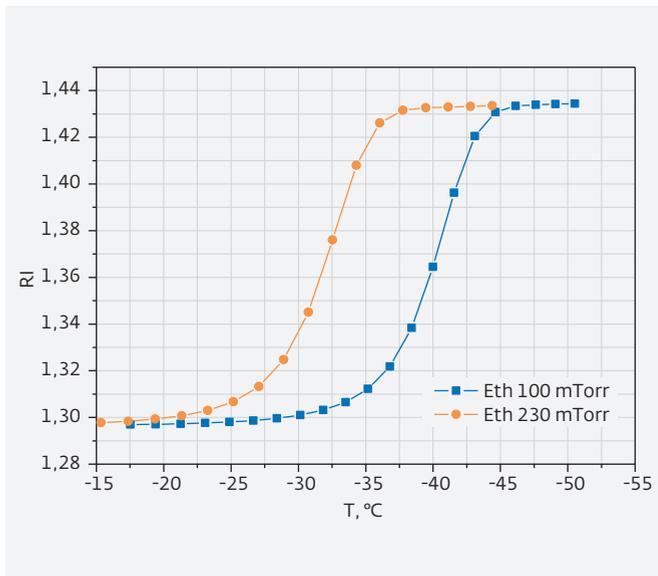


Рис.8. Изобара адсорбции этанола

ПРИЛОЖЕНИЕ

Также был проведен расчет изобар адсорбции для этанола (рис.8) и метанола (рис.9) при давлениях $P_s = 100$ мТорр и $P_s = 230$ мТорр.

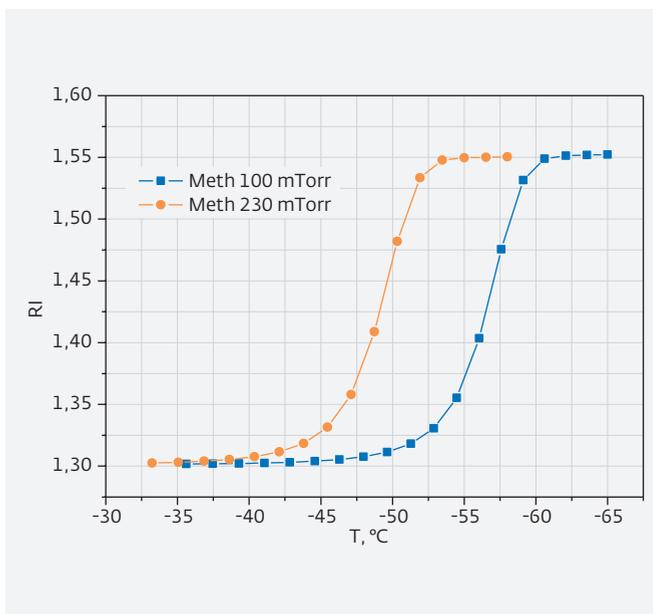


Рис.9. Изобара адсорбции метанола

Данные расчеты были проведены для проверки экспериментально замеченного факта, что при травлении MRAM (ячейки памяти) этанол защищает боковые стенки при $T = -30^{\circ}\text{C}$ ($P_s = 100$ мТорр), а метанол при $T = -50^{\circ}\text{C}$ ($P_s = 100$ мТорр) и что данный эффект связан с конденсацией этих веществ на стенках [12, 13]. По полученным графикам можно с уверенностью судить о наличии данного эффекта.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Shamiryani D., Baklanov M., Vanhaeleetsch S., Maex K. J.** Vac. Sci. Technol. B, 2002. Vol. 20. № 5. P. 1923.
2. **Baklanov M.R., Iacopi F., Vanhaelemeersch S.** PROTECTIVE TREATMENT FOR POROUS MATERIALS, patent US 8,540,890 B2, Sept 24, 2013.
3. **Zhang L., Ljazouli R., Lefaucheu P., Tillocher T., Dussart R., Mankelevich Y.A.** ECS J. Solid State Sci. Technol, 2013. Vol. 2. № 6. N131-N136.
4. **Baklanov M.R., Marneffe J.-F. de, Zhang L., Ciofi I., Tokei Zs.** Solid State Technology, 2014. Vol. 57. № 5. P. 1-4.
5. **Baklanov M.R.** Protection of porous substrates before treatment. Patent US 2015/0076109 A1, Mar 19, 2015.
6. **Mogilnikov K., Polovinkin V., Dultsev F., Baklanov M. J.** Vac. Sci. Technol. B, 2000. Vol. 18. № 3. P. 1385-1391.
7. **Gregg S.J. and Sing.W.** Adsorption surface area and porosity, New York: Academic Press, 1982. P. 312.
8. **Farouq S.Mjallia, Gholamreza Vakili-Nezhaada, Kaveh Shahbazb, Inas M. AlNashefc.** Application of the Eötvös and Guggenheim empirical rules for predicting the density and surface tension of ionic liquids analogues // Thermochemica Acta, 2014. Vol. 575. № 10. P. 40-44.
9. Dortmund Data Bank [Электронный ресурс]. Available: <http://www.ddbst.com>.
10. **Рид Р., Праусниц Дж., Шервуд. Т.** Свойствагазовижидкостей. – Л.: Химия, 1982. С. 534-569.
11. **Dias M.A. Ana, Goncalves M.B. Carla.** Densities and Vapor Pressures of High Fluorinated Compounds // J. Chem. Eng. Data, 2005. Vol. 50. № 4. P. 1328-1333.
12. **Gu Xun, Kikuchi Yoshiyuki, Samukawa Toshihisa Nozawaand Seiji.** A new metallic complex reaction etching for transition metals by a low-temperature neutral beam process // J. Phys. D: Appl. Phys. 47 (2014) 322002 (4pp).
13. **Kim Eun Ho, Lee Tae Young, and Chung Chee Won.** Evolution of Etch Profile of Magnetic Tunnel Junction Stacks Etched in a $\text{CH}_3\text{OH}/\text{Ar}$ Plasma // J. Electrochemical Society, 159 (3) H230-H234 (2012).

ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ПОВЕРХНОСТНОЙ ПРОВОДИМОСТИ ДИОКСИДА ТИТАНА ПРИ АДСОРБЦИИ КИСЛОРОДА

► С. В. Трошин, В. Н. Мурашев, Н. И. Каргин, Н. А. Харламов

Рассмотрены теоретические закономерности изменения поверхностной проводимости и работы выхода электрона с поверхности (110) кристалла диоксида титана при адсорбции молекул кислорода с различной степенью покрытия поверхности подложки. Показано, что использование модели Халдейна-Андерсона и метода модельных гамилтонианов с учетом особенностей электронных обменов между адатомами и полупроводниковой подложкой позволяет установить связь между работой выхода электрона и поверхностной проводимостью.

Предложенная методика расчета параметров полупроводникового субстрата помогла объяснить и предсказать закономерность изменения поверхностной проводимости диоксида титана при адсорбции кислорода. Показано удовлетворительное согласие расчетных и экспериментальных результатов.

THEORETICAL CALCULATION OF THE NEAR-SURFACE ELECTRICAL CONDUCTIVITY OF TITANIUM DIOXIDE SUBJECTED TO OXYGEN ADSORPTION

S.V.Troshin, V.N.Murashev, N.I.Kargin, N.A.Kharlamov

The article describes the theoretical predictability of the changes occurring in the near-surface electrical conductivity and in the electronic work

function of a substrate surface under the influence of adsorbed oxygen molecules, for different amounts of coverage with adsorbed oxygen on a (110) titanium dioxide substrate crystal. It is shown that by using the Haldane-Anderson model and the method of model Hamiltonians and by considering the properties of electron exchange between the adatoms and the semiconductor substrate it is possible to determine how the electronic work function of the substrate surface and the near-surface electrical conductivity of the substrate are connected with each other.

The proposed method used to calculate the parameters of the semiconductor substrate made it possible to explain and to predict changes in the near-surface electrical conductivity of the substrate caused by oxygen adsorption. A satisfactory agreement has been shown between the calculated theoretical data and the experimental results.

ВВЕДЕНИЕ

Оксиды металлов SnO_2 , ZnO , TiO_2 и др. являются перспективными материалами для газочувствительных слоев твердотельных датчиков газов [1]. Газовая чувствительность слоев в первую очередь характеризуется изменением поверхностной проводимости при адсорбции частиц, зависящей от механизма и кинетики обмена электронами между адсорбентом и адсорбатом. Накоплены достаточно значительные экспериментальные результаты по изменению поверхностной проводимости полупроводниковых оксидных материалов в результате адсорбции [2]. Значительные теоретические усилия предпринимаются для установления связи между экспериментальными данными и физическими закономерностями электронных обменных процессов [3-5]. Основным эффектом, вызываемым адсорбцией (как по важности, так и по степени изученности) является изменение работы выхода электрона $\Delta\Phi$

адсорбционной системы. Работа выхода представляет собой сугубо макроскопическую характеристику. При расчете $\Delta\Phi$ необходимо прибегать к микроскопическим моделям. Между работой выхода $\Delta\Phi$ и поверхностной проводимостью ΔG имеется определенная связь, поскольку вследствие электронных переходов между подложкой и адчастицей изменяется поверхностная концентрация носителей заряда. Это проявляется в возникновении (или изменении) приповерхностного изгиба зон в полупроводнике.

Работа посвящена выявлению связи между $\Delta\Phi$ и ΔG на примере адсорбции молекул кислорода на поверхности кристалла TiO_2 с плоскостью (110).

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

Для расчета электронной структуры адатома использовался метод модельных гамильтонианов, а в качестве исходной модели полупроводникового субстрата – модель Халдейна-Андерсона [6].

Рассматриваемым материалом подложки являлся кристалл диоксида титана с поверхностью (110). Кристалл TiO₂ имеет тетрагональную структуру рутила (a₀=4,594 Å и c₀=2,958 Å), причем грань (110) является наиболее стабильной. Эта поверхность не является атомно-гладкой, так как ряды ионов кислорода располагаются выше основной плоскости поверхности, содержащей равное число 5- и 6-координационных катионов.

На основании ранее полученных теоретических результатов по наведенной адсорбцией поверхностной проводимости дверочного полупроводника ΔG_p при отрицательно заряженных адатомах (акцепторах) были проведены расчеты ΔΦ и ΔG в зависимости от степени покрытия поверхности (110) TiO₂ молекулами кислорода [7].

Для расчета изменения работы выхода ΔΦ была использована полученная формула:

$$\Delta\Phi(\Theta) = \Phi\Theta\tilde{Z}_a(\Theta),$$

$$\Phi = 4\pi e^2 N_{ML} \lambda,$$

где Θ – степень заполнения поверхности адатомами и равно N/N_{ML};
 N – общее число мест адсорбции;
 N_{ML} – концентрация частиц в монослое;
 Φ – константа изменения работы выхода;
 \tilde{Z}_a – среднее значение заряда адатома;

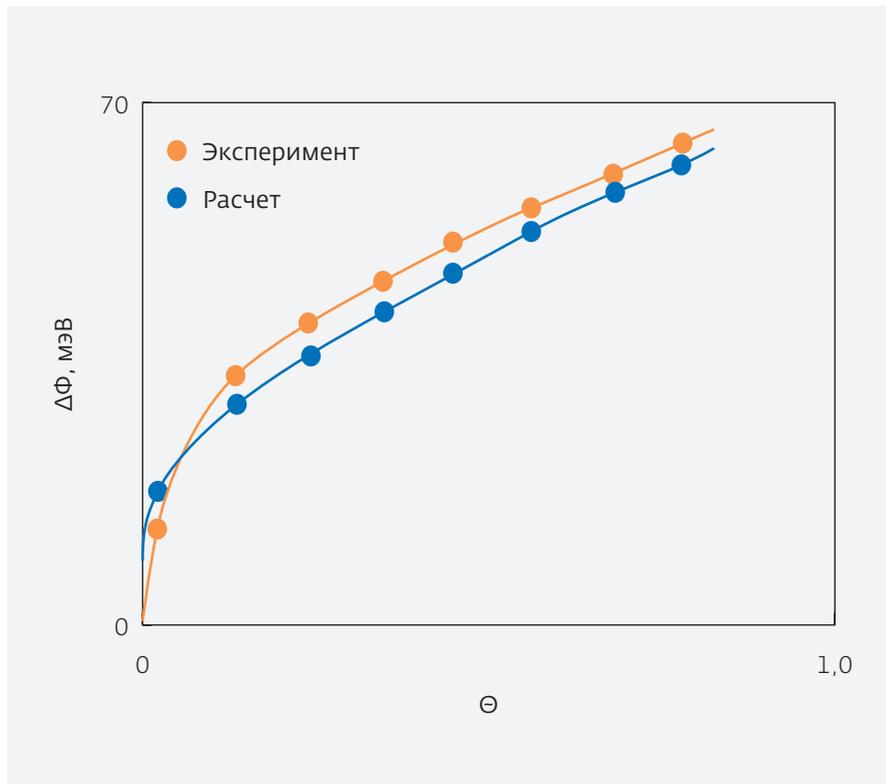


Рис.1. Зависимость величины работы выхода ΔΦ от степени покрытия Θ поверхности TiO₂ (110) молекулами кислорода

λ – плечо поверхностного диполя;
 e – заряд электрона.

$$\tilde{Z}_a(\Theta) = \frac{1}{2} + \frac{1}{\pi} \cdot \arctg \frac{\Omega - \xi \Theta^{3/2} \tilde{Z}_a(\Theta)}{\Gamma};$$

$$\xi = 2e^2 \lambda^2 N_{ML}^{3/2} A;$$

Ω – энергия квазиуровня адатома относительно уровня Ферми полупроводника;

ξ – константа диполя-дипольного отталкивания адатомов;

A-10 – безразмерный коэффициент, слабо зависящий от геометрии расположения адатомов;

г – полуширина квазиуровня изолированного адатома.

Для расчета поверхностной дырочной проводимости DG_p использовалась формула:

$$\Delta G_p = e\mu_p N_{ML} \Theta |Z|,$$

где μ_p - подвижность дырок;
 z - заряд адатома.

Следует отметить важность пропорциональной зависимости ΔG_p от $\Theta|z|$, отмеченная в работе [8]. При адсорбции частиц, захватывающих электроны из подложки p-типа, поверхностная дырочная проводимость увеличивается прямо пропорционально произведению $\Theta|z|$.

РАСЧЕТНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

В случае адсорбции молекулы кислорода электроны с подложки переходят на антисвязывающую (разрыхляющую) π_{2p} - орбиталь молекулы кислорода. При этом заряд адмолекулы $\tilde{Z}_a = -\tilde{n}_a$, где \tilde{n}_a - среднее число электронов, перешедших с подложки на π_{2p} (орбиталь), которое может быть вычислено по формуле:

$$\tilde{n}(\Theta) = \frac{1}{2} - \frac{1}{\pi} \arctg \frac{\Omega + \xi \Theta^{3/2} \tilde{n}(\Theta)}{\Gamma},$$

где \tilde{n} - потенциальное число возможно переходящих электронов.

Для расчетов использовались следующие данные: $\Phi = 2,0$;

$$\xi = 0,47;$$

$$\Gamma = 0,002;$$

$$N_{ML} = 0,006;$$

$$\Omega/\Gamma = 2,6;$$

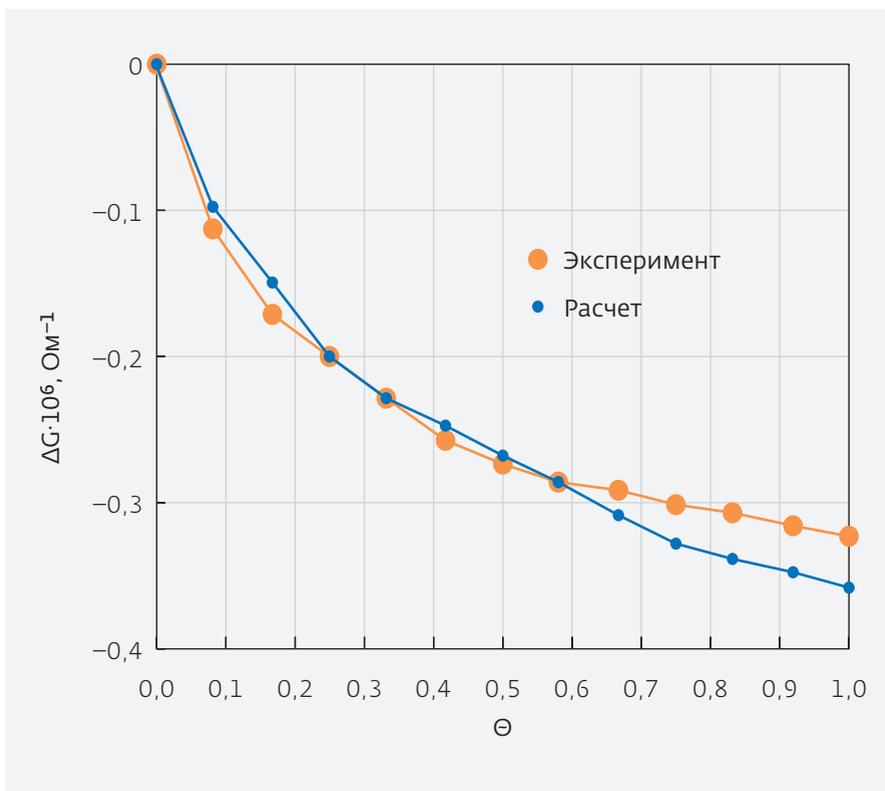


Рис.2. Зависимость величины изменения проводимости ΔG_p от степени покрытия Θ поверхности TiO_2 (110) молекулами кислорода

$$z_0 = -0,102;$$

$$z_{ML} = -0,030.$$

Значения Φ , ξ и Γ даны в эВ. Результаты расчета представлены на рис.1.

Отмечается весьма удовлетворительное согласие расчетных и экспериментальных данных.

При расчете поверхностей проводимости ΔG_p использовалось соотношение:

$$|\Delta G_p(\Theta)/\Delta\Phi(\Theta)| = \epsilon_0 \mu_p / e\lambda = \eta_p,$$

где η_p - среднее значение параметра при различном Θ и составляло $6,0 \cdot 10^{-6} \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{эВ}$;

ϵ_0 - энергия квазиуровня адатома.

Результаты расчета представлены на рис.2.

Отмечается удовлетворительное согласие расчетных и экспериментальных результатов. Результаты расчета относительной ошибки при различной степени покрытия поверхности TiO_2 (110) показали, что она изменяется от 16% при степени заполнения Θ на уровне 0,2 до 8% при $\Theta > 0,8$. Наименьшая расходимость расчетных и экспериментальных результатов наблюдается при $\Theta \approx 0,5$.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Применение модели Халдейна-Андерсона и использование метода модельных гамилтонианов демонстрируют, что расчетные значения поверхностной проводимости и работы выхода электрона удовлетворительно согласуются с имеющимися экспериментальными результатами при адсорбции кислорода на поверхности TiO_2 (110).

Показано, что учет закономерностей электронных переходов между полупроводником дырочного типа проводимости и отрицательно заряженными адатомами (акцепторами) позволяет подтвердить взаимосвязь работы выхода электрона с поверхностной проводимостью. Подтверждено, что вследствие электронных переходов изменяется поверхностная концентрация носителей заряда в полупроводнике. Адсорбция кислорода повышает работу выхода ($\Delta\Phi > 0$) и уменьшает поверхностную проводимость ($\Delta G_p < 0$) оксида титана.

Результаты расчетов показали, что наилучшее согласие теоретических и экспериментальных результатов по поверхностной проводимости и работе выхода в системе TiO_2-O_2 наблюдается при степени покрытия поверхности подложки на уровне 0,5. Для меньшей или большей степени покрытия, что очевидно, необходимо учитывать особенности электронных переходов между адатомами.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Батурин А.И., Габузьян Г.А., Голованов Н.А., Бараненков И.В., Евдокимов А.В. и др.** Полупроводниковые датчики на основе металлооксидных полупроводников // Зарубежная электронная техника, 1983. № 10. С. 3–38.
2. **Давыдов С.Ю., Мошников В.А., Томаев В.В.** Полупроводниковые адсорбционные датчики // Владикавказ: изд-во СОГУ, 1998.
3. **Давыдов С.Ю.** Роль дефектов в формировании локальных состояний, наведенных атомами, адсорбированными на поверхности полупроводников // ФТП, 1997. Т. 31. Вып. 10. С. 1236–1241.
4. **Аньчков Д.Г., Давыдов С.Ю., Трошин С.В.** О влиянии адсорбции на поверхностную проводимость и работу выхода // Письма в ЖТФ, 2007. Т. 33. 13.18. С. 47–53.
5. **Давыдов С.Ю., Трошин С.В.** Адсорбция на металлах и полупроводниках: модели Андерсона-Ньюнса и Халдейна-Андерсона // ФТТ, 2007. Т. 49. Вып.8. С. 1508–1512.
6. **Henrich V.E., Cox P.A.** The Surface Science of Metal Oxides // University Press, Cambridge, 1994.
7. **Аньчков Д.Г., Давыдов С.Ю., Трошин С.В.** Адсорбция атомов водорода и молекул кислорода на оксидах цинка и титана: изменение работы выхода и поверхностной проводимости // Письма в ЖТФ, 2008. Т. 34. Вып.18. С. 54–60.
8. **Давыдов С.Ю., Мошников В.А., Федотов А.А.** Адсорбция газов на полупроводниковых оксидах: изменение работы выхода // Письма в ЖТФ, 2004. Т. 30. Вып.17. С. 39–44.

РАДИАЦИОННО-СТОЙКИЙ СЛОЖНОФУНКЦИОНАЛЬНЫЙ БЛОК ПРОЦЕССОРНОГО СИНТЕЗАТОРА ЧАСТОТ С ФАЗОВОЙ АВТОПОДСТРОЙКОЙ ЧАСТОТЫ

Приведены результаты радиационно-стойкого проектирования (РСП) КМОП СФ-блока синтезатора частот (СЧ) с механизмом фазовой автоподстройки частоты (ФАПЧ). Рассмотрены особенности РСП внутренних блоков синтезатора. Приведены результаты испытаний на стойкость к воздействию специальных факторов и рабочие характеристики.

Ключевые слова: синтезатор частот, фазовая автоподстройка частоты, КМОП микросхемы.

Сведения об авторах

А. А. Гармаш, В. Д. Байков, Национальный исследовательский ядерный университет "МИФИ", Москва

РАДИАЦИОННО-СТОЙКИЕ ЭЛЕМЕНТЫ ПАМЯТИ ДЛЯ НАНОМЕТРОВЫХ КМОП СФ-БЛОКОВ И СБИС

Проанализированы различные КМОП элементы памяти, наиболее перспективные для радиационно-стойких применений в составе СФ-блоков ОЗУ для СБИС типа "система-на-кристалле". С использованием методов радиационно-стойкого проектирования для нанометровых КМОП технологий объемного кремния разработаны и оптимизированы конструктивно-топологические решения этих элементов. Проведено сравнение элементов памяти по основным параметрам, в частности, по параметрам радиационной стойкости. Определены перспективные для данных применений схемотехнические и конструктивно-топологические решения элементов памяти.

Ключевые слова: КМОП элементы памяти, радиационно-стойкое проектирование, СФ-блоки ОЗУ, СБИС "система-на-кристалле".

Сведения об авторах

Герасимов Юрий Михайлович, к.т.н., с.н.с., Национальный исследовательский ядерный университет (НИЯУ) "МИФИ", 115409, г. Москва, Россия, Каширское шоссе, д.31, каф.3.

Тел.: +7 916-600-86-60, E-mail: ymger29@mail.ru.

Григорьев Николай Геннадьевич, к.т.н., Национальный исследовательский ядерный университет (НИЯУ) "МИФИ", 115409, г. Москва, Россия, Каширское шоссе, д.31, каф.3. E-mail: mgnng@mail.ru.

Кобыляцкий Андрей Вадимович, Национальный исследовательский ядерный университет (НИЯУ) "МИФИ", 115409, г. Москва, Россия, Каширское шоссе, д.31, каф.3. E-mail: andreycob91@mail.ru.

Петричкович Ярослав Ярославович, д.т.н., проф., ОАО НПЦ "ЭЛВИС", 124460, г. Москва (Зеленоград), Россия, Южная промышленная зона, проезд 4922, стр.2. E-mail: slava@elnet.msk.ru.

АДАПТАЦИЯ LVDS ПРИЕМОПЕРЕДАТЧИКОВ ДЛЯ ВЫСОКОСКОРОСТНЫХ ПРИЛОЖЕНИЙ

LVDS приемопередатчики до сих пор составляют конкуренцию приемопередатчикам с более современными типами интерфейсов на физическом уровне на скоростях в несколько сотен Мбит/с благодаря сочетанию таких свойств, как малая потребляемая мощность и высокая помехоустойчивость. В данной статье предлагается вариант адаптации LVDS приемопередатчиков для высокоскоростных приложений и приводятся результаты моделирования масштабированных схем LVDS передатчика и приемника. Полученные характеристики сравниваются с достигнутыми в последние годы характеристиками высокоскоростных приемопередатчиков.

Ключевые слова: скорость передачи, LVDS драйвер, масштабирование, глазковая диаграмма, джиттер.

Сведения об авторах

И.Н.Алексеев, ОАО НПЦ "ЭЛВИС"

С.В.Кондратенко, Научно-исследовательский ядерный университет "МИФИ". SVKonratenko@MEPHI.ru

Т.В.Солохина, ОАО НПЦ "ЭЛВИС"

О ЖИДКОСТНОЙ ХИМИЧЕСКОЙ ОЧИСТКЕ ПЛАСТИН ПЕРЕД ПРОВЕДЕНИЕМ ТЕРМИЧЕСКИХ ОПЕРАЦИЙ

Рассмотрено применение жидкостных химических очисток в технологии микроэлектроники перед проведением термических операций на транзисторном цикле после проведение технологических операций плазмохимического и реактивного ионного травления. Показано, что модернизация процесса жидкостных химических очисток по мере изменения проектных норм от микронного до нанометрового уровня способна обеспечить высокую надёжность создаваемых сверхбольших интегральных микросхем.

Ключевые слова: жидкостная химическая очистка, СБИС, проектные нормы.

Сведения об авторах

В.П. Бокарев, Е.С. Горнев, И.В. Кирюшина, С.О. Ранчин, А.А. Трусов

АО "НИИМЭ", ОАО "НИИМЭ и Микрон". 124460, Москва, Зеленоград, 1-й Западный проезд, д.12, стр.1. e-mail: vbokarev@mikron.ru

RADIATION-HARD FREQUENCY SYNTHESIZER WITH PHASE LOCKED LOOP FOR MICROPROCESSOR SYSTEM

In this article results of radiation-hard design of frequency synthesizer with phase locked loop are presented. The features of indoor units of synthesizer are considered. Results of tests of resistance to special factors and characteristics of performance are presented.

Keywords: frequency synthesizer, PLL, CMOS VLSI.

Data of authors

A. A. Garmash, V. D. Baykov, National Research Nuclear University MEPhI, Moscow

RADIATION HARDENED MEMORY CELLS FOR NANOSCALED SRAM IP-BLOCKS AND CHIPS

The most promising CMOS memory cells for radiation tolerant applications as a part of SRAM IP-blocks for 'systems-on-chip' were analyzed. Using RHBD methods in nanoscaled CMOS processes constructive-topological solutions of memory cells were designed and optimized. The comparative analysis of main memory cells parameters, in particular the radiation tolerance, was performed. It was determined the most promising for these applications schematics and constructive-topological solutions of memory cells.

Keywords: CMOS memory cells, Radiation-Hardening-By-Design, SRAM IP-blocks, system-on-chip.

Data of authors

Gerasimov Yuriy Mikhaylovich, Ph.D., Senior Researcher, National Research Nuclear University "MEPhI", Chair of Electronics, 115409, Moscow, Russia, Kashirskoe Shosse, dom 31.

Тел.: +7 916 600 86 60. E-mail: ymger29@mail.ru.

Grigoryev Nikolay Gennadyevich, Ph.D., National Research Nuclear University "MEPhI", Chair of Electronics, 115409, Moscow, Russia, Kashirskoe Shosse, dom 31. E-mail: mgnng@mail.ru.

Kobylatskiy Andrey Vadimovich, National Research Nuclear University "MEPhI", Chair of Electronics, 115409, Moscow, Russia, Kashirskoe Shosse, dom 31.

E-mail: andreycob91@mail.ru.

Petrichkovich Yaroslav Yaroslavovich, Dr. Sci., Prof., OJSC R&D Center "ELVEES", 124460, Moscow (Zelenograd), Russia, Yuzhnaya promyshlennaya zona, proezd 4922, str.2.

E-mail: slava@elnet.msk.ru.

ADAPTATION OF LVDS TRANSCIEVERS FOR HIGH-SPEED APPLICATIONS

LVDS transceivers still compete for other transceivers with more modern types of physical layer interfaces at speeds of several hundred Mbit/s due to the combination of properties such as low power consumption and high noise immunity. In this paper, we propose a variant of adaptation of LVDS transceivers for high-speed applications and the results of modeling schemes of scaled LVDS transmitter and receiver. The characteristics obtained are compared with the characteristics of high-speed transceivers achieved in recent years.

Keywords: data speed, LVDS driver, scaling, eye diagram, jitter.

Data of authors

Alekseev I.N.,

Konratenko S.V.,

Solokhina T.V.

LIQUID CHEMICAL CLEANING OF WAFERS BEFORE THERMAL TREATMENT

Usage of liquid chemical cleaning processes in the microelectronic technology before thermal treatments within a transistor cycle following plasmachemical and reactive ion etching has been considered here. It has been demonstrated that an enhancement of liquid chemical cleanings with changing the design scale from micron to nanometer level enables higher reliability of super large scale integration circuits (VLSI) produced.

Keywords: liquid chemical cleaning, VLSI, design scale.

Data of authors

V.P. Bokarev, E.S. Gornev, I.V. Kiryushina, S.O. Ranchin, A.A. Trusov

Institute of Molecular Electronics, Mikron JSC. 1-st Zapadnyy Proezd, 12, p.1, Zelenograd, Moscow, Russia, 124460. e-mail: vbokarev@mikron.ru

Вакуумные фоторезисторы на основе PbS: характеристики и морфология

Проанализированы результаты исследований морфологии и характеристик фоторезисторов на основе PbS, полученных методом вакуумного переноса пленки.

Ключевые слова: фоточувствительные структуры, сульфид свинца, спектральная плотность мощности шума, сканирующая электронная микроскопия.

Сведения об авторах

Б.Н. Мирошников, И.Н. Мирошникова, А.И. Попов, Национальный исследовательский университет "МЭИ", Москва, Россия, e-mail: MiroshnikovaI@mpei.ru, тел. 9167978142
М.Ю.Пресняков, НИЦ Курчатовский институт", 123182, Москва, пл. Академика Курчатова, 1

Использование CAR-резистов в электронно-лучевой литографии

В настоящее время микроэлектроника прилагает большие усилия, чтобы найти менее затратное эффективное альтернативное решение 193 нм фотолитографии с двойным экспонированием и EUV литографии. Ведутся активные разработки многолучевой электронной литографии и новых электронных резистов для неё с химическим усилением скрытого изображения (CAR), обеспечивающих требуемое разрешение с одновременной поддержкой высокой чувствительности. В данной работе исследовалась электронно-лучевая литография на базе новых позитивных электронных резистов TOK OEBR CAP 164A3 и TOK OEBR CAP 112PM от фирмы Tokyo Ohka.

Ключевые слова: многолучевая электронная литография, резист с химическим усилением скрытого изображения, экспонирование.

Сведения об авторах

Красников Г.Я., Гушин О.П., Морозов А.Д., Игнатов П.В., Горнев Е.С., Каширин П.А., АО "НИИМЭ", Москва, 124460, Россия, e-mail: ogushin@mikron.ru
Овчинников В.А., Базанов Д.В., МИЭТ, Зеленоград, Москва, Россия
Орликовский Н.А., Зкальнов В.А., ФТИАН РАН, Москва, 117218, Россия

Изобары адсорбции фторуглеродных соединений, выбранных для криогенного плазменного травления low-k диэлектриков

В данной работе описан метод по определению необходимых параметров различных химических веществ, применяемых при криогенном травлении, используя уравнение Антуана, уравнение для расчета температурной зависимости плотности и поверхностного натяжения. В разработанном методе происходит пересчет изотермы адсорбции толуола при комнатной температуре в изобару адсорбции гексафторбензола (C6F6) и перфторциклобутана (C4F8) при низких температурах, которые выбраны в качестве веществ, конденсирующихся при криогенном травлении в порах low-k диэлектрика. Были проведены сравнения расчетных и экспериментальных изобар. Объяснены различия в полученных результатах, причины возникновения гистерезиса на экспериментальной изобаре адсорбции/десорбции для C6F6 и C4F8.

Ключевые слова: микроэлектроника, low-k диэлектрик, пористость, криогенное травление, изобары адсорбции

Сведения об авторах

А.А.Резванов, Е.С.Горнев, Г.Я.Красников, НИИ молекулярной электроники, Зеленоград, Москва, Россия; Московский физико-технический институт (государственный университет), Долгопрудный, Россия; e-mail: arezvanov@mikron.ru
О.П.Гушин, НИИ молекулярной электроники, Зеленоград, Москва, Россия;
К.П.Могильников, Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова, Новосибирск, Россия
Л.Чанг, Ж.-Ф.де Марнефф, М.Р.Бакланов, IMEC, Лёвен, Бельгия

Теоретическая оценка поверхностной проводимости диоксида титана при адсорбции кислорода

Рассмотрены теоретические закономерности изменения поверхностной проводимости и работы выхода электрона с поверхности (110) кристалла диоксида титана при адсорбции молекул кислорода с различной степенью покрытия поверхности подложки. Показано, что использование модели Халдейна-Андерсона и метода модельных гамильтонианов с учетом особенностей электронных обменов между адатомами и полупроводниковой подложкой позволяет установить связь между работой выхода электрона и поверхностной проводимостью. Предложенная методика расчета параметров полупроводникового субстрата позволила объяснить и предсказать закономерность изменения поверхностной проводимости диоксида титана при адсорбции кислорода. Показано удовлетворительное согласие расчетных и экспериментальных результатов.

Трошин С.В., Каргин Н.И., ФГОУ ВПО "Национальный исследовательский ядерный университет "МИФИ"

Харламов Н.А., Мурашев В.Н., ФГОУ ВПО "Национальный исследовательский технологический университет "МИСиС"; kharlamov@misis.ru, 8-916-883-41-83.

Vacuum photoresistors based on PbS: characteristics and morphology

The results of studies of the morphology and characteristics of photoresists based on PbS obtained by vacuum deposition are presented.

Keywords: photosensitive structures, lead sulfide, noise power spectral density, scanning electron microscopy.

Data of authors

B.N. Miroshnikov, I.N. Miroshnikova, A.I. Popov, National Research University "Moscow Power Engineering Institute". e-mail: MiroshnikovaI@mpei.ru, +7 916) 797-81-42
M.Yu. Presnjakov, National Research Centre (NRC "Kurchatov Institute").

USING CAR RESISTS IN ELECTRON - BEAM LITHOGRAPHY

Currently, microelectronics has made great efforts to find less costly effective alternative 193nm lithography with double exposure and EUV lithography. Under active development of multi-electron-beam lithography and new electronic resists for it with a chemical amplification of the latent image (CAR), providing the required resolution with simultaneous support of high sensitivity. In this study we investigated the electron - beam lithography based on new positive electron resists TOK OEBR CAP 164A3 and TOK OEBR CAP 112PM from the company Tokyo Ohka

Keywords: multibeam electron lithography, resist chemical amplification, latent image exposure.

Data of authors

Krasnikov G.Y., Gushin O.P., Morozov A.D., Ignatov P.V., Gornev E.S., Kashirin P.A., Institute of Molecular Electronics, Moscow, 103460, Russia, e-mail: ogushin@mikron.ru
Ovtchinnikov V.A., Bazanov D.V., MIET, Moscow, Zelenograd
Orlikovsky N.A., Kalnov V.A., FTIAN RAN, Moscow, 117218, Russia

К.Дюссаррат, AirLiquide, Токио, Япония;

Adsorption isobars of fluorocarbon compounds selected for cryogenic plasma etching of low-k dielectrics

In this paper we describe a method for determination the necessary parameters of various chemicals, used for cryogenic etching, using the Antoine's equation, the equations for calculating the temperature dependence of the density and the surface tension. In developed method we are recalculated adsorption isotherm of toluene at room temperature to adsorption isobar of hexafluorobenzene (C6F6) and perfluorocyclobutane (C4F8) at low temperatures, that are selected as chemical compounds which condense into the pore of low-k dielectric before cryogenic etching. Comparisons were made between the calculated and experimental isobars. We explained the differences in the obtained results, the causes of the hysteresis in the experimental adsorption / desorption isobar of C6F6 and C4F8.

Keywords: microelectronics, dielectric, low-k dielectric, porosity, cryogenic etching, adsorption isobars

Data of authors

Askar Rezvanov, Evgeny S. Gornev, Gennady Ya. Krasnikov, Molecular Electronic Research Institute, Zelenograd, Moscow, Russian Federation; Moscow Institute of Physics and Technology (State University), Dolgoprudny, Moscow, Russian Federation; e-mail: arezvanov@mikron.ru
Oleg P. Gutshin, Molecular Electronic Research Institute, Zelenograd, Moscow, Russian Federation
Konstantin P. Mogilnikov, Rzhanov Institute of Semiconductor Physics, Novosibirsk, Russian Federation.
Liping Zhang, Jean-Francois de Marneffe, Mikhail R. Baklanov, IMEC, Leuven, Belgium
Christian Dussarrat, Air Liquide, Tokyo, Japan

Theoretical calculation of the near-surface electrical conductivity of titanium dioxide subjected to oxygen adsorption

The article describes the theoretical predictability of the changes occurring in the near-surface electrical conductivity and in the electronic work function of a substrate surface under the influence of adsorbed oxygen molecules, for different amounts of coverage with adsorbed oxygen on a (110) titanium dioxide substrate crystal. It is shown that by using the Haldane-Anderson model and the method of model Hamiltonians and by considering the properties of electron exchange between the adatoms and the semiconductor substrate it is possible to determine how the electronic work function of the substrate surface and the near-surface electrical conductivity of the substrate are connected with each other. The proposed method used to calculate the parameters of the semiconductor substrate made it possible to explain and to predict changes in the near-surface electrical conductivity of the substrate caused by oxygen adsorption. A satisfactory agreement has been shown between the calculated theoretical data and the experimental results.

Troshin S.V., Kargin N.I., National Research University / Nuclear University "MEPhI" (31, Kashirskoye Highway, Moscow, 115409, Russian Federation)

Murashev V.N., Kharlamov N.A., The National University of Science and Technology MISIS (119049, Moscow, Leninskiy prospekt 4); kharlamov@misis.ru, 8-916-883-41-83.

МЕЖДУНАРОДНЫЙ ФОРУМ МИКРОЭЛЕКТРОНИКИ МЕЖДУНАРОДНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ "ИНТЕГРАЛЬНЫЕ СХЕМЫ И МИКРОЭЛЕКТРОННЫЕ МОДУЛИ – ПРОЕКТИРОВАНИЕ, ПРОИЗВОДСТВО И ПРИМЕНЕНИЕ"

КРЫМ, АЛУШТА 28.09–03.10.2015

ОРГАНИЗАТОРЫ

- ОАО "НИИМА "Прогресс"
- ОАО "НИИМЭ и Микрон"
- Национальный исследовательский университет "МИЭТ"

ИНФОРМАЦИОННАЯ ПОДДЕРЖКА

- ЗАО РИЦ "Техносфера",
- "Новая Электроника"

Оргкомитет Международной Конференции "Интегральные схемы и микроэлектронные модули – проектирование, производство и применение" приглашает Вас принять участие в работе Конференции.

МЕЖДУНАРОДНЫЙ ОРГКОМИТЕТ

- Президент Международной Конференции академик РАН Г. Я. Красников
- Председатель Оргкомитета д.т.н., проф. В. Г. Немудров.

Сопредседатели:

- Член-корр. РАН Ю. А. Чаплыгин,
- д.т.н., проф. Е. С. Горнев
- Зам. председателя Оргкомитета: к.э.н. В. В. Шпак, к.ф.н. С. Л. Фоттелер

ПРОГРАММНЫЙ КОМИТЕТ

д.т.н., проф. Н. А. Шелепин;
д.т.н., проф. М. Г. Путря;
член-корр. РАН С. Г. Русаков; к.т.н. И. Л. Корнеев;
к.т.н. П. П. Куцько; д.т.н., проф. В. М. Исаев;
к.т.н. М. И. Критенко; д.т.н., проф. С. Е. Власов;
к.т.н. В. Б. Стешенко; д.т.н. Я. Я. Петричкович;
М. И. Павлюк; д.т.н., проф. К. О. Петросянц;
к.т.н. А. К. Ким; В. М. Царев; к.т.н. Ю. Г. Малафеев;
В. В. Бодин; д.т.н., проф. Ю. В. Колковский;
к.т.н. В. И. Эннс; к.т.н. И. И. Мухин; Ю. В. Завалин;
О. А. Казанцева; к.т.н. Г. В. Самарин;
к.х.н. В. П. Бокарев

ТЕМАТИКА КОНФЕРЕНЦИИ, РУКОВОДИТЕЛИ СЕКЦИЙ

Навигационно-связные СБИС и модули

д.т.н., проф. В. Г. Немудров;
к.т.н. И. Л. Корнеев;
к.т.н. Г. В. Самарин

Космическая микроэлектроника

д.т.н., проф. Н. А. Шелепин;
к.т.н. В. Б. Стешенко

Полузаказные СБИС

к.т.н. А. Н. Денисов, Ю. В. Завалин

Разработка полупроводниковых микросхем СВЧ-диапазона

д.т.н., проф. Ю. В. Колковский;
к.т.н. И. И. Мухин

Методы и алгоритмы САПР СБИС

член-корр. РАН С. Г. Русаков

Микросистемная техника

д.т.н., проф. В. Л. Тимошенко;
д.т.н., проф. М. Г. Путря

Материалы микро- и нанотехнологии

д.т.н., проф. В. М. Роцин

Бортовые информационно-управляющие системы

д.т.н., проф. А. Л. Переверзев

ПЛЕНАРНЫЕ ДОКЛАДЫ

1. Г.Я.Красников

Основные тенденции развития микро- и нанотехнологии

2. В.Г.Немудров, И.Л.Корнеев

Перспективы развития навигационно-связных СБИС и модулей.

3. В.Б.Стешенко

Космическая микроэлектроника в России: состояние и перспективы развития.

4. А.Н.Денисов, Ю.В.Завалин, С.А.Цыбин

Отечественные полузаказные СБИС – проблемы и пути их решения.

5. И.И.Мухин

Серия отечественных СВЧ SiGe микросхем.

6. В.П.Тимошенко

Перспективы развития SiGe технологии.

7. С.Г.Русаков

Методы редукции математических моделей в задачах автоматизации схмотехнического проектирования.

8. Ф.М.Путря

Особенности функциональной верификации современных систем на кристалле.

9. А.С.Коротков

Системы радиочастотной идентификации: применение, разработки, развитие.

10. А.Л.Переверзев, А.Н.Якунин

Концепция построения бортовых миниатюрных информационно-управляющих систем.

ВНИМАНИЕ АВТОРОВ ДОКЛАДОВ КОНФЕРЕНЦИИ

Сообщаем, что с Научной электронной библиотекой (НЭБ) заключен договор, по которому материалы конференции будут загружаться в систему РИНЦ (Российский индекс научного цитирования). Свои публикации Вы сможете увидеть на сайте НЭБ (<http://elibrary.ru/>).

В связи с этим к материалам, высылаемым на Конференцию, предъявляются требования такие, как ко всем научным статьям, публикуемым в РИНЦ:

- Сведения об авторах (ФИО-полностью, e-mail, ученое звание, должность, место работы, веб-адрес организации) на русском и англ. языках;
- Сведения о статье (УДК, название – до 6 слов, аннотация – до 4-х строк, ключевые слова – до 10 слов) на русском и английском языках;

- По статье. Грамотность (запяты и падежи) и научность результатов исследований остаются на совести авторов;
- По комплектности. Кроме заявки, статьи и платежного поручения, необходимо выслать в адрес Оргкомитета отсканированный лицензионный договор (согласие авторов на публикацию статьи в открытом доступе).

ПРЕДСТАВЛЕНИЕ ДОКЛАДОВ

Просим вас соблюдать следующие требования:

Формат А4, Шрифт Times New Roman-10, через 1 интервал, с соблюдением полей: по левому краю 20 мм, правому 15 мм, сверху и внизу 15 мм, ориентировочно 95 знаков в строке. Рисунки и схемы необходимо прислать с уже размещенными внутри текста статьи, а также отдельными файлами. Рисунки, выполненные в ворде, присылайте на отдельных страницах.

На первой странице указываются: на русском и английском языках название доклада (не более 6 слов), ФИО авторов (полностью), ученая степень, должность, место работы, аннотация (не более 4 строк), ключевые слова (до 10 слов). Кроме того, следует указать контактные данные каждого автора (телефон, e-mail), сайт организации, почтовый адрес с указанием индекса и УДК статьи. Статья может быть объемом до 10 страниц.

В тексте доклада должна быть указана цель работы, суть обсуждаемой проблемы, предложения, рекомендации и выводы, сделанные автором, список использованной литературы оформляется по ГОСТ Р 7.0.5-2008.

Отдельный раздел должен быть посвящен новизне результатов, полученных авторами. Этот раздел должен начинаться словами: "Авторы считают, что в данной работе новыми являются следующие положения и результаты:...".

ДЛЯ СВЕДЕНИЯ АВТОРОВ

1. Заявки на участие в Конференции направлять по электронной почте Ответственному секретарю Бухман Татьяне Григорьевне (nemudrov@mri-progress.ru) тел. (499) 153-03-21, факс (499) 153-01-61.
2. После получения заявки, директор Конференции направляет участнику Конференции договор и счет на оплату оргвзноса и проживания. Просьба

к участникам – производить оплату только по выставленному счету. В назначении платежа обязательно указывать: "Оргвзнос за участие в Конференции, Ф.И.О. участника".

3. Для публикации докладов в Научной электронной библиотеке участники должны предоставить до 1 сентября 2015 года отсканированные лицензионные договоры с каждым автором и квитанцию об оплате, а также доклады в формате статей, оформленные в соответствии с требованиями к статьям, загружаемым в систему РИНЦ. Доклады участников, приславших полный пакет документов (доклад, лицензионный договор с каждым автором, копию квитанции об оплате оргвзноса) будут изданы в открытом доступе в Научной электронной библиотеке (НЭБ, система РИНЦ). Авторам в обязательном порядке следует получить по электронной почте уведомление о получении докладов Программным комитетом.
4. Грамотность (запятые и падежи, правильность перевода) и научность результатов исследований остаются на совести авторов;
5. К началу Конференции будет издан каталог статей и алфавитный указатель;
6. Предполагается заочное участие – только публикация докладов.

ПАМЯТКА ДЛЯ УЧАСТНИКА

Оргкомитет гарантирует участникам Конференции размещение, при условии, что участник прислал заявку, забронировал свое размещение и оплатил его до 1 сентября 2015 года.

ФИНАНСОВЫЕ УСЛОВИЯ

Оргвзнос для участников 10 000 руб., НДС не облагается.

В оргвзнос входит:

- публикация Программы и Трудов,
- аренда конференц-зала и оргтехники,
- групповой трансфер в дни заезда-отъезда: Симферополь – отель – Симферополь,
- информационные расходы, связь, полиграфия,
- расходы по организации Конференции.

Стоимость пребывания участника в день (размещение и питание):

Размещение + завтрак

- 2-местный номер 1 спальное место 3315 руб. в сутки
 - 2-местный номер улучшенный 7905 руб. в сутки
 - Полулюкс 10 030 руб. в сутки
 - Люкс 13430 руб. в сутки
 - Люкс улучшенный 20 655 руб. в сутки.
- Оплачивается при заселении (наличными).

Питание

- Обед: 1000 руб. на человека (5 дней)
 - Ужин: 1000 руб. на человека (3 дня)
- Оплачивается при заселении (наличными).

РАСЧЕТНЫЙ СЧЕТ ОРГКОМИТЕТА

ООО "Контент Бюро "Продвижение"
ИНН 6316165909 КПП 631601001
Юридический адрес: 443011,
Самарская обл., Самара г,
Академика Павлова ул, дом № 80, кв.1
р/с 40702810300420000425
в САМАРСКИЙ ФИЛИАЛ ОАО АКБ "СВЯЗЬ-БАНК"
к/с 30101810200000000769 БИК 043602769

ПАМЯТКА ДЛЯ УЧАСТНИКА

Оргкомитет гарантирует участникам Конференции размещение при условии, что участник прислал заявку на проживание и питание, оплатил оргвзнос до 1 сентября 2015 года.

КЛЮЧЕВЫЕ ДАТЫ

- До 1 сентября 2015 г. – прием заявок, рассылка счетов на оплату оргвзноса и проживания
- 28 сентября – приезд участников и размещение
- 29 сентября – открытие Конференции в 11:00
- 02 октября – закрытие Конференции в 15:00
- 03 октября – отъезд участников в 10:00

ТЕЛЕФОНЫ ОРГКОМИТЕТА

Председатель Оргкомитета

Немудров Владимир Георгиевич
Тел.: 8 (499) 153-03-21,

e-mail: nemudrov@mri-progress.ru

Зам. председателя оргкомитета:

Фоттелер Станислав Леонидович
моб.: +7 (925) 222-48-38, e-mail: fottler@list.ru

Ответственный секретарь оргкомитета:

Бухман Татьяна Григорьевна
Тел.: (499) 153-03-21,

e-mail: nemudrov@mri-progress.ru

ЗАЯВКА

МЕЖДУНАРОДНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ "МИКРОНАНОЭЛЕКТРОНИКА – ПРОЕКТИРОВАНИЕ, ПРОИЗВОДСТВО И ПРИМЕНЕНИЕ".

Крым, Алушта, 2015 г., с 28 сентября по 03 октября

1. Фамилия, Имя, Отчество

Фамилия	Имя	Отчество

2. Место работы

--

3. Должность, ученая степень

Должность	Ученая степень

4. Контактные телефоны

Код города	Домашний	Рабочий	Мобильный	E-Mail

5. Адрес для переписки

Индекс	Город	Улица	Дом, корп.	Квартира

6. Сведения о докладе

Название доклада

Секция

7. Форма доклада Очная Заочная

8. Сведения о бронировании номеров в отеле Riviera Sunrise Resort SPA г. Алушта

одно место 2-х местного номера 2-х местный номер улучшенный

Полулюкс

Люкс

Люкс улучшенный

9. Питание Обед Ужин

10. Другое

--

Дата заполнения