

Д. т. н. В. В. БАРАНОВ

Республика Беларусь, г. Минск, Белорусский
гос. ун-т информатики и радиоэлектроники
E-mail: vvb@bsuir.unibel.by

Дата поступления в редакцию
11.04 2005 г.

Оппонент к. ф.-м. н. Н. С. БОЛТОВЕЦ
(НИИ "Орион", г. Киев)

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРЕДПОСЫЛКИ СОЗДАНИЯ МОП-СТРУКТУР С МАЛЫМИ ПРОЕКТНЫМИ НОРМАМИ

Показаны возможности повышения технологичности МОП-транзисторов, а также создания ДМОП-транзисторов с вертикальной структурой, перспективной для мощных полупроводниковых приборов.

Как известно, для интегральных схем большой степени интеграции (БИС) и средней степени интеграции (СИС) на базе МОП-структур характерны следующие функциональные и потребительские особенности: высокая плотность элементов, малая мощность рассеяния, высокая помехоустойчивость и низкая стоимость. Основное применение МОП БИС и СИС — микропроцессоры и ЗУ.

По технологии МОП-структур в составе БИС и СИС их можно разделить на три класса:

- с каналом *n*-типа;
- с каналом *p*-типа;
- комплементарные МОП БИС (в них между источником питания и корпусом последовательно включены МОП-транзисторы с каналами *p*- и *n*-типа, располагаемые в электрически изолированных от остальных участков пластины областях, называемых карманами,).

Основными задачами настоящего исследования явились: анализ физико-технологических ограничений при формировании твердотельной структуры

МОП-транзисторов и обоснование технологических методов, обеспечивающих создание структур с малыми проектными нормами для БИС, а также для дискретных, в том числе мощных, полупроводниковых приборов.

Одним из перспективных процессов создания изоляции карманов в технологии БИС является так называемый LOCOS-процесс, получивший наибольшее применение в технологии МОП БИС [1, с. 194]. Процесс основан на локальном окислении кремниевых пластин (100) через маску Si_3N_4 (рис. 1), позволяет частично планаризовать рельеф кристалла, что, в свою очередь, дает возможность:

- уменьшить вероятность разрыва токоведущих дорожек на ступеньках сложного рельефа кристалла БИС;
- повысить пороговое напряжение «паразитных» транзисторов путем увеличения толщины SiO_2 ;
- увеличить плотность размещения элементов на кристалле.

Вследствие малой толщины диэлектрика (SiO_2) под затвором ($\approx 300\text{...}400 \text{ \AA}$) в современных твердотельных структурах образуются несколько паразитных емкостей, ограничивающих частотные свойства вентилей на их основе [2, с. 352].

В LOCOS-процессе особое значение имеет операция синтеза Si_3N_4 . Одним из прогрессивных методов синтеза Si_3N_4 является метод, основанный на использовании реакторов низкого давления. В качестве реагентов используются хлорсиланы и аммиак. Этим

методом могут быть получены пленки Si_3N_4 с высокой однородностью по толщине (на уровне $\pm 2,5\%$). По производительности и себестоимости процесс синтеза Si_3N_4 приближается к окислительно-диффузионным процессам планарной технологии. Скорость роста Si_3N_4 при температуре $T=850\text{...}900^\circ\text{C}$ составляет $\approx 10\text{...}20 \text{ \AA/с}$.

Следует отметить, что в процессе формирования твердотельных структур размеры областей, например проводящего канала МОП-транзистора, могут изменяться по отноше-

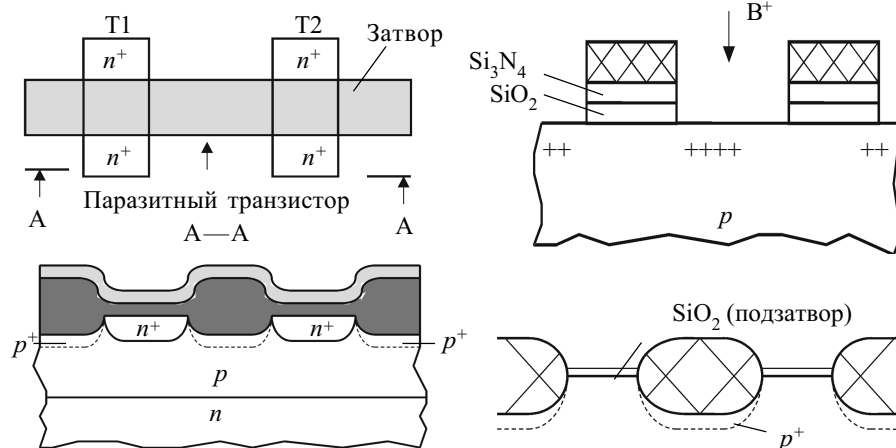


Рис. 1. Стадии процесса создания локальной изоляции МОП-структур в составе БИС (LOCOS-процесс), поясняющие образование некоторой непланарности рельефа

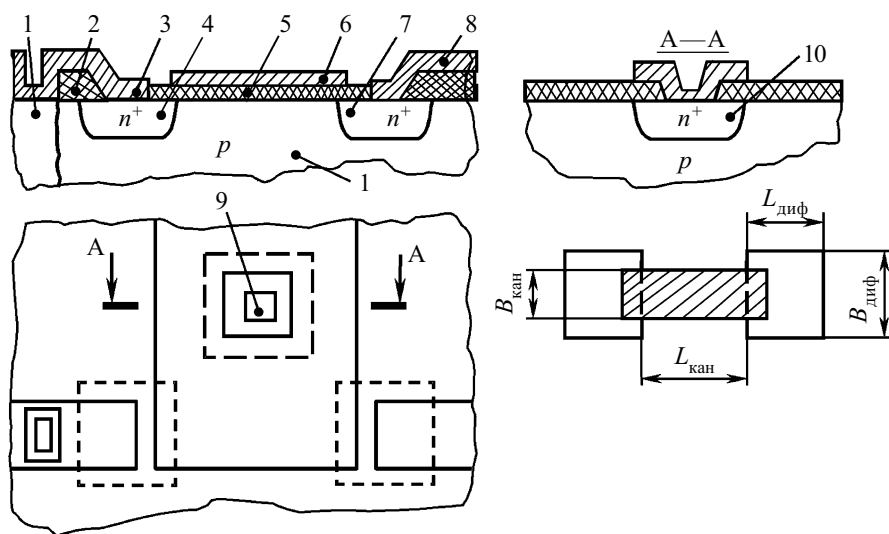


Рис. 2. Фрагмент твердотельной структуры МОП-транзистора: 1 — кремниевая подложка *p*-типа; 2 — относительно толстый слой SiO₂ (пассивирующий диэлектрик); 3, 8 — металлизация истока и стока, соответственно; 4, 7 — диффузионные *n*-области истока и стока; 5 — тонкий слой SiO₂ (подзатворный диэлектрик); 6 — затвор; 9 — защитный диод; 10 — *n*-область защитного диода; $L_{\text{диф}}$, $B_{\text{диф}}$ — топологические размеры областей истока и стока, формируемых диффузией или ионной имплантацией

нию к размерам, задаваемым фотошаблоном. Данное положение иллюстрируется рис. 2.

Действительно, под материалом затвора находится относительно тонкий слой оксида кремния $d_{\text{SiO}_2} = 0,03 \dots 0,1$ мкм. За пределами активных областей МОП-транзистора Si-подложка покрыта относительно толстым слоем SiO₂ ($d_{\text{SiO}_2} = 0,8 \dots 1,2$ мкм). Такое отличие в толщине оксидных слоев обусловлено задачами уменьшения паразитной емкости сигнальных шин, снижения брака из-за проколов в оксиде, повышения порогового напряжения паразитных транзисторов.

Топология МОП-транзистора в процессе изготовления схемы изменяется в соответствии со значениями, указанными ниже:

$$L_{\text{кан}} = L_{\text{кан}} - 2x_{\text{ф}} - 1,6x_{p-n}; \quad B_{\text{кан}} = B_{\text{кант}} + 2x_{\text{ф}},$$

где $L_{\text{кан}}$, $B_{\text{кан}}$ — реальные значения длины и ширины области канала на пластине;

$L_{\text{кант}}$, $B_{\text{кант}}$ — топологические размеры канала, задаваемые фотошаблоном;

$x_{\text{ф}}$ — изменение размера на операциях фотолитографии и травления;

x_{p-n} — глубина *p-n*-перехода диффузионных областей стока и истока ($0,8x_{p-n}$ — глубина боковой диффузии).

Длина затвора делается несколько большей, чем длина промежутка "исток-сток", для уверенного формирования канала по длине всего этого промежутка. При этом в областях взаимного перекрытия $l_{\text{пер}}$ затвора с истоком и стоком образуются паразитные емкости $C_{\text{зи}}$ и $C_{\text{зс}}$. Наибольшее влияние на быстродействие прибора оказывает переходная емкость $C_{\text{зс}}$, которая играет роль элемента параллельной обратной связи в транзисторном инверторе.

Для уменьшения емкостей $C_{\text{зи}}$ и $C_{\text{зс}}$ используются конструкции с самосовмещенным затвором относительно внутренних границ истока и стока. В таких структурах затворы изготавливают из поликристаллического кремния (ПКК), тугоплавких металлов, например Mo, или силицидов на их основе, например MoSi₂, TiSi₂ и др. ПКК, Mo, MoSi₂, TiSi₂ — это высокотемпературные материалы, способные при определенных технологических условиях выполнять

функции защитной маски при диффузии ($T > 1100^\circ\text{C}$) или ионной имплантации примесей. В этом случае диффузия примесей в Si ограничена со стороны затвора слоем ПКК, Mo, MoSi₂ или TiSi₂. Длина диффузионной области под затвором определяется толщиной диффузионного слоя. Относительно малый уход примесей под край затвора имеет место при ионном легировании.

Характерные структуры МОП-транзисторов с ПКК- и Mo-затворами показаны на рис. 3, 4.

МОП-транзисторы с самосовмещенными затворами имеют следующие преимущества по сравнению с традиционными затворами, например из Al:

- более высокое быстродействие;
- малые размеры, что позволяет повысить плотность компоновки и процент выхода годных БИС;
- низкие пороговые напряжения, что позволяет снизить напряжение питания, потребляемую мощность, повысить быстродействие БИС;
- сочетать биполярные и МОП-транзисторы на одном кристалле.

Вместе с тем формирование таких структур сопряжено с целым рядом физико-химических ограничений, которые необходимо учитывать в технологическом маршруте и при проведении отдельных опера-

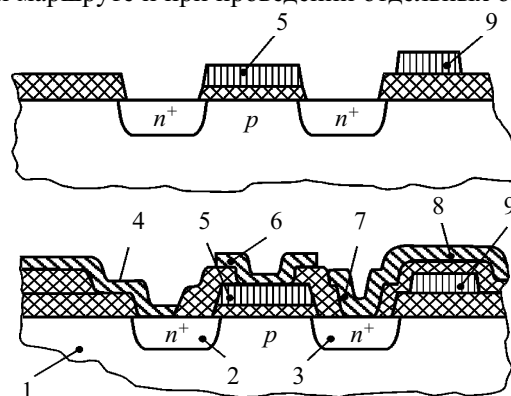


Рис. 3. Структура МОП-транзистора с ПКК-затвором: 1 — подложка *p*-типа; 2, 3 — области стока и истока; 4, 6, 7 — Al-выводы от областей истока, стока и затвора; 5 — ПКК-затвор; 8 — Al-шина (2-й уровень разводки); 9 — поликремниевая сигнальная шина (1-й уровень разводки)

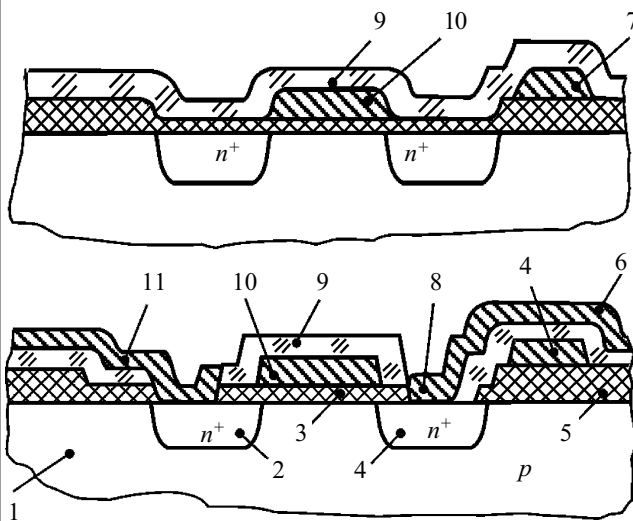


Рис. 4. Структура МОП-транзистора с затвором из тугоплавкого металла (*Me*), например *Mo*:
 1 — подложка; 2, 4 — области стока и истока; 3, 5 — тонкий и толстый слой SiO_2 ; 6 — *Al*-шина (2-й уровень разводки); 7 — *Me*-шина (1-й уровень разводки); 8, 11 — *Al*-выводы истока и стока; 9 — боросиликатное стекло; 10 — *Me*-затвор

ций. Связано это, главным образом, с кинетикой роста фаз силицидов по механизму твердофазных реакций *Si* с переходным металлом при термообработках.

С целью самосовмещения областей истока и стока по отношению к затвору из ПКК и снижения удельного сопротивления пленки затвора (что важно для словарных шин большой протяженности в цифровых МОП БИС) на структуру (со вскрытыми областями истока и стока, а также со сформированным топологическим рисунком затвора из ПКК на поверхности относительно тонкого слоя SiO_2) наносят пленку переходного металла, например *Ti*, и проводят высокотемпературную термообработку. Образующаяся в областях контакта с кремнием в результате твердофазной реакции новая фаза силицида титана труднорастворима во многих реактивах на основе кислот, в которых, однако, хорошо растворяется исходный металл [3, с. 68, 69]. Это обстоятельство используют при удалении травлением остатков непрореагировавшего металла, в том числе на участках, где металлическая пленка расположена на слое SiO_2 , включая слои, отделяющие области стока и истока от затвора из ПКК.

Исследование процессов формирования самосовмещенных пленочных структур на основе имеющего низкое удельное сопротивление дисилицида титана по методу твердофазных реакций с помощью модуля ИК-излучения, встроенного в вакуумную установку и позволяющего проводить импульсную термообработку *in situ*, показало, что на границе раздела *Si/Ti* возможно образование двух фаз — TiSi_2 и Ti_5Si_3 [4]. При этом также следует учитывать «боковой рост» силицида, что ограничивает возможности формирования структур с минимальными проектными нормами.

Как технологический метод существенного подавления бокового роста пленки силицида в [5] предложено использовать отжиг в среде азота при пониженном давлении (порядка 0,26 Па). Метод основан на

том, что насыщенный азотом металл обладает пониженной скоростью образования силицида при взаимодействии с кремнием [3, с. 105]. Это позволяет повысить технологичность МОП-структур и имеет важное практическое значение при формировании затворов КМОП БИС (например в словарной шине микронной ширины).

При поиске оптимальных технологических режимов проведения процессов термообработки следует, однако, учитывать возможное перераспределение примеси в зоне срастания «пленка—подложка». При этом полагается, что кинетика роста синтезируемой фазы на границе раздела описывается параболическим законом, если процесс ограничивается диффузией компонентов, и линейным законом — если ограничивающим фактором является скорость химических реакций образования нового соединения.

Толщина образующихся слоев x_i как функция времени t в процессе изотермического отжига оценивается из уравнений $x_i^2 = Ut$, $x_i = Vt$, где U и V — параболическая и линейная скорости, представляемые в арениусовской аппроксимации с соответствующими множителями U_0 , V_0 и энергией активации E_a . Выбор одного из уравнений определяется температурной областью, в которой проводится термообработка, и некоторыми другими параметрами процесса.

Для определения толщины указанных выше слоев в [6] получены аналитические выражения для случая импульсного отжига структур, а на примере контактной пары *Si/Ti* изучены основные закономерности процесса образования силицидов в переходном слое при проведении импульсного отжига. Одно из основных отличий такой технологии термообработки по сравнению с процессом изотермического отжига заключается в смещении температурного интервала, при котором совместно сосуществуют несколько фаз, в более высокотемпературную область.

В частности, показано, что однофазный состав переходного слоя TiSi_2 может быть получен при секундной ИК-термообработке лишь при достижении температуры на поверхности пленок порядка 800°C и выше. Использование исходных пленок *Ti* толщиной более 0,1 мкм приводит к тому, что фазовые превращения после проведения импульсного ИК-отжига остаются незавершенными даже при достижении температур 700–750°C. Полученные нами количественные результаты характеризуют кинетические закономерности процесса образования силицидов в переходном слое контактных структур в процессах изотермической термообработки и импульсного отжига при воздействии плотных потоков ИК-излучения.

Еще более значительного снижения величины $E_{сз}$ удастся достигнуть при использовании твердотельных структур типа V-МОП и ДМОП. Первая показана на рис. 5, а структура планарно-эпитаксиального ДМОП-транзистора в составе БИС имеет вид, показанный на рис. 6.

При изготовлении V-МОП-транзисторов используют V-каналы (V-образные канавки) в полупроводниковой подложке, поверхность которых покрыта слоем диоксида кремния. Длина канала $L_{кан}$ определяется толщиной эпитаксиальной пленки *p*-типа. Зат-

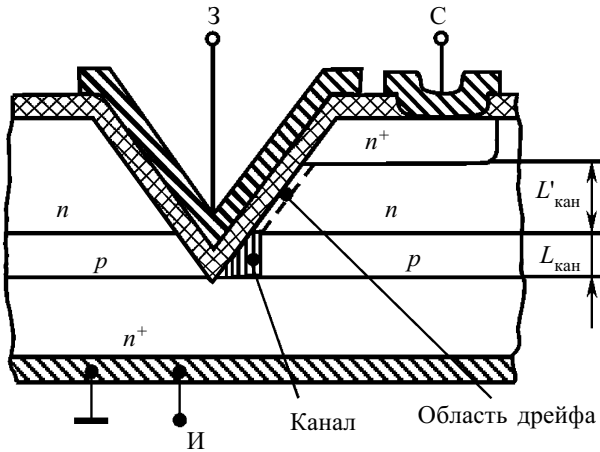


Рис. 5. Структура V-МОП-транзистора

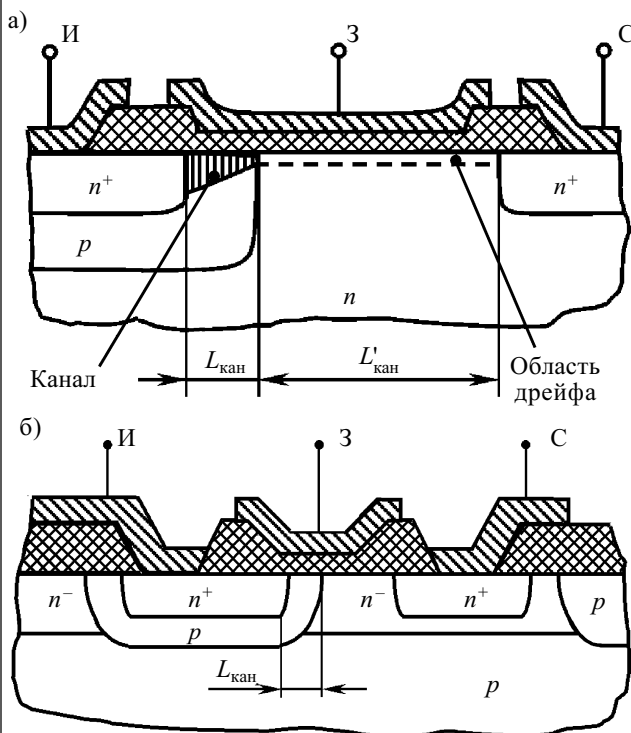


Рис. 6. Фрагмент в области затвора (а) и полная структура (б) ДМОП-транзистора в составе БИС

вор V-МОП-транзистора расположен в V-канале, покрытом тонкой пленкой SiO₂. V-МОП-транзисторы имеют высокую крутизну и быстродействие, занимают малую площадь на поверхности подложки (благодаря использованию вертикальной конструкции). В БИС все V-МОП-транзисторы имеют общий исток, роль которого выполняет подложка n⁺-типа.

В твердотельной структуре ДМОП-транзистора область p-типа и область истока n⁺-типа формируются двойной диффузией акцепторной и донорной примесей в одно и то же окно окисной пленки. Процесс основан на том, что скорость диффузии в кремнии примеси p-типа, например бора, выше, чем примеси n-типа, например фосфора [7, с. 70]. Толщина p-области практически равна толщине базы биполярного транзистора ($L_{\text{кан}}=0,4...2$ мкм), что иллюстрируется рис. 6, а.

Активная область канала с длиной $L_{\text{кан}}$ образуется из границы раздела p-области и подзатворного оксида. При нормальных смещениях электроны инжектируются из короткого канала в пристокковую область пространственного разряда и из-за дрейфа в электрическом поле переносятся в n⁺-область стока.

Отличительной особенностью ДМОП-транзистора является то, что затвор не совмещается с n⁺-областью стока. Поэтому такая конструкция имеет малую емкость $C_{\text{зс}}$ и высокое рабочее напряжение. Короткий канал и малая величина $C_{\text{зс}}$ позволяют увеличить быстродействие БИС на ДМОП-транзисторах приблизительно в 5 раз при технологических ограничениях, характерных для БИС и СИС на обычных МОП-транзисторах.

Рассмотренные планарные твердотельные структуры МОП-транзисторов могут (при необходимости) трансформироваться в такие, у которых области истока и стока располагаются вертикально. Тогда при получении областей, расположенных на планарной стороне кристалла, например области истока, можно использовать имеющиеся для рассмотренных МОП-структур подходы проектирования, тестирования и контроля, а также базовые технологические процессы их формирования [6]. В то же время технологические процессы формирования области стока на непланарной стороне кристалла могут быть заимствованы из арсенала технологии дискретных полупроводниковых приборов, таких как биполярные транзисторы, мощные диоды Шоттки и др. Эти процессы, однако, отличаются использованием повышенных температур, например, напайки кристаллов на основание корпуса или выводную рамку, а это означает необходимость адаптации процессов формирования планарных областей и оптимизации характеристик кристаллов МОП-транзисторов с вертикальной структурой с учетом изменения их физико-топологических характеристик, как это было показано выше.

ДМОП-транзисторы с вертикальной структурой, как правило, относятся к классу мощных приборов. Поэтому можно констатировать, что для формирования твердотельных структур мощных приборов, в принципе, могут быть использованы те технологические методы, которые получили применение при изготовлении маломощных изделий полупроводниковой электроники (цифровых БИС и СИС), если провести адаптацию этих методов к данным структурам. Разумеется, чтобы получить параметры мощных ДМОП-транзисторов на уровне, позволяющем конкурировать на мировых рынках с продукцией мировых лидеров по производству приборов силовой электроники, необходимо также оптимизировать физико-топологические характеристики таких твердотельных структур и условия реализации технологических методов, заимствованных из технологии БИС.

Исследовательские работы в данном направлении являются перспективными, поскольку в технологии мощных ДМОП-транзисторов достижение предельно малых топологических размеров не является критичным, что позволяет использовать в их производстве имеющееся литографическое оборудование под проектными нормами на уровне 1 мкм.

В Беларуси эти работы проводятся в НПО «Интеграл» и в Белорусском государственном университете информатики и радиоэлектроники — в частности, силами таких специалистов как Л. П. Ануфриев, И. И. Рубцевич, П. М. Шишло, А. М. Алиев, М. М. Кречко. Полученные результаты позволили в последние годы разработать и освоить производство серии мощных *n*-канальных ДМОП-транзисторов, например КП732, КП728, КП750 и др.

Выводы

На основе проведенного анализа физико-технологических ограничений при создании твердотельных структур МОП-транзисторов показаны возможности повышения их технологичности на основе самосовмещенной технологии, в том числе при использовании твердофазных реакций тугоплавких переходных металлов с кремнием, протекающих в условиях изотермической и импульсной термообработки, а также создания ДМОП-транзисторов с вертикальной струк-

турой, перспективной для мощных полупроводниковых приборов.

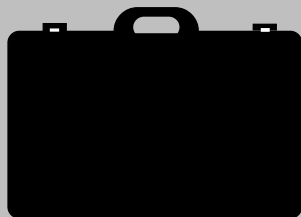
ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Степаненко И. П. Основы микроэлектроники. — М.: Лаборатория базовых знаний, 2003.
2. МОП-СБИС. Моделирование элементов и технологических процессов / Под ред. Р. А. Сурица. — М.: Радио и связь, 1988.
3. Мюрарка Ш. Силициды для СБИС. — М.: Мир, 1986.
4. Баранов В. В. Материалы и процессы формирования самосовмещенных пленочных структур изделий твердотельной электроники и микроэлектроники // Докл. Белорус. гос. ун-та информатики и радиоэлектроники. — 2004. — № 3. — С. 102—117.
5. Baranow W. W., Sawilow A. W., Miljaew W. A., Schirkow A. W. Selektive bildung von titandisilizidchichten unter anwendung des stufenformigen tempers // IHR 32 Int. Wissenschaft-liches Kolloquium. — Immenau, DDR. — 1987. — В 32. — S. L15—L18.
6. Баранов В. В., Костюкевич А. А. Исследование процесса селективного формирования пленок силицидов титана в структурах СБИС // Изв. Белорус. инженерной академии. — 2003. — № 1(15)/4. — С. 92—94.
7. Зи С. Физика полупроводниковых приборов. Кн. 2. — М.: Мир, 1984.

в портфеле редакции в портфеле редакции в портфеле редакции в портфеле редакции

в портфеле редакции в портфеле редакции в портфеле редакции в портфеле редакции

- Основные положения и задачи государственной программы развития техники и технологий сверхвысоких частот на 2005—2009 годы в Украине. (Украина, г. Киев)
- Разработка программно-аппаратных средств для кодирования и декодирования кодов Рида-Соломона на основе вычисления особых продолжений ганкелевых (теплицевых) матриц и синдромов. (Россия, г. С.-Петербург)
- Зависимость теплопроводности диодного кристалла от ориентации *p-n*-перехода. (Украина, г. Киев)
- Оптоэлектронный датчик пересечения плоскости движущимися телами. (Украина, г. Черновцы)
- Выращивание крупногабаритных монокристаллов вольфрамата кадмия с высокой оптической однородностью. (Украина, г. Львов)
- Автоматизированные системы распознавания образов на основе многоуровневой оптической памяти. (Украина, г. Донецк)
- Обработка сигнала в многофункциональных сенсорах на основе твердых растворов $Si_{1-x}Ge_x$. (Украина, г. Львов)
- Автоматизация фотометрического контроля скорости травления тонких диэлектрических пленок. (Россия, г. Рыбинск)
- Разработка и создание низкотемпературных наноэлектронных устройств для регистрации сигналов сверхвысоких частот и измерение их параметров. (Украина, г. Киев)
- Проблема прочности в радиоэлектронике и работы хмельницких ученых. (Украина, г. Хмельницкий)
- Теоретический подход к моделированию кинетических процессов формирования газовой фазы методом химических газотранспортных реакций. (Украина, г. Львов)
- Пассивная локация движущегося транспорта для автоматической регулировки транспортных потоков в условиях современного города. (Украина, г. Киев)
- СВЧ-плазмохимическое осаждение планарных волноводных структур на основе кварцевого стекла, легированного фтором. (Россия, г. Фрязино)
- Создание высокостабильных источников напряжения на основе Джоузефсоновских сверхпроводниковых решеток. (Украина, г. Киев; Германия, г. Брауншвейг)
- Газочувствительные поверхностно-барьерные структуры "силицид кобальта-пористый кремний-кремний". (Украина, г. Киев)
- Осветительный канал цифрового оптического микроскопа на базе диффузного излучателя. (Украина, г. Киев)



в портфеле редакции в портфеле редакции в портфеле редакции в портфеле редакции

в портфеле редакции в портфеле редакции в портфеле редакции в портфеле редакции