

## РАЗВИТИЕ СИЛОВЫХ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПРИБОРОВ И МОДУЛЕЙ

### АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ

ФГУП "НПП "Пульсар" – многопрофильное, динамично развивающееся предприятие. Одно из основных направлений его работ – создание мощных полупроводниковых приборов: кремниевых биполярных и полевых МДП-транзисторов, переключательных МДП-транзисторов и биполярных транзисторов с изолированным затвором (БТИЗ), а также диодов Шоттки, быстровостанавливающихся диодов, транзисторных и диодных сборок, микросхем силовой электроники, силовых модулей [1]. Каково же современное состояние и дальнейшие пути развития в области разработки и производства изделий силовой электроники ФГУП "НПП "Пульсар" и частично ФГУП "ГЗ "Пульсар"?

В течение последних лет происходит стабильное увеличение объемов выполняемых ФГУП "НПП "Пульсар" НИОКР и поставок изделий для комплектации радиоэлектронной аппаратуры различного назначения, сопровождаемое ростом средней заработной платы и удельным ростом объемов выполняемых работ в пересчете на одного работающего (рис.1–3). Эти показатели говорят об устойчивости экономического положения предприятия, о росте заказов на НИОКР и поставки модернизируемой и вновь разрабатываемой электронной техники и изделий, о возможности привлечения молодых специалистов и решения задачи обновления кадров (что было проблематичным в предыдущие годы), о ясных перспективах развития предприятия на ближайшие годы.

Следует отметить, что основной заказчик научно-технической продукции НПП "Пульсар" – оборонно-промышленный комплекс (ОПК): доля работ предприятия в интересах ОПК составляет 75–80%. Анализ показателей за 2005–2007 годы подтверждает заинтересованность ОПК в новых разработках, в том числе приборов и модулей силовой электроники.

В последние 20 лет наблюдается тенденция вытеснения мощных биполярных переключательных транзисторов в изделиях силовой электроники мощными кремниевыми МДП-

А.Васильев, д.ф.-м.н., М.Крымко, к.т.н.

транзисторами и БТИЗ. В 1978 году в НИИ "Пульсар" впервые было экспериментально показано, что мощные МДП-транзисторы обладают уникальными импульсными свойствами. В их основе лежит сформулированный и реализованный принцип сочетания короткого канала и высоких пробивных напряжений [2]. С 1984 года на предприятии разработано свыше 20 типов переключательных МДП-транзисторов на рабочие напряжения до 1500 В, обеспечивших потребности промышленности и военной техники. На более высокие напряжения МДП-транзисторы не разрабатывались в связи с отсутствием потребности в них, а также из-за их большого сопротивления в открытом состоянии.

На напряжение свыше 600 В более перспективным считается новый класс полупроводниковых приборов – БТИЗ, которые преодолели рубеж в 4500 В. Эти приборы сочетают высокое рабочее напряжение с высокой плотностью тока, которая в пять-семь раз больше, чем у МДП-транзисторов, при сравнимых значениях падения напряжения на открытом приборе. БТИЗ отличаются противоречивым характером связей между основными характеристиками (такими как пробивное напряжение коллектора, падение напряжения прибора в открытом состоянии, значения времени включения/выключения и другими), и их электрофизическими и геометрическими параметрами. Например, факторы, приводящие к увеличению пробивного напряжения коллектора, вызывают увеличение значений времени включения/выключения и падения напряжения на открытом приборе, факторы, уменьшающие время жизни основных носителей в базе прибора (т.е. уменьшающие время выключе-

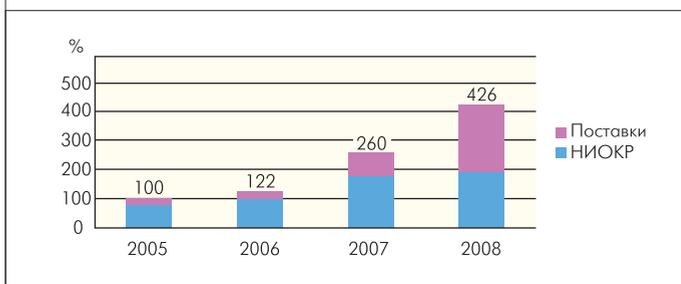
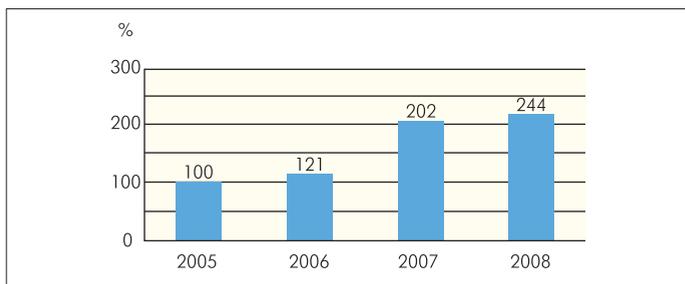
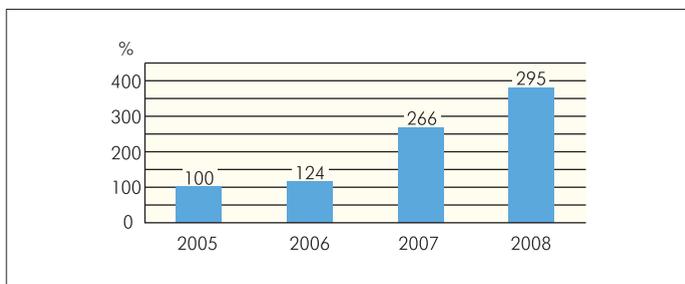


Рис. 1. Изменение объемов НТП



**Рис.2. Динамика изменения заработной платы на предприятии НПП "Пульсар"**



**Рис.3. Рост выпуска продукции на одного работающего**

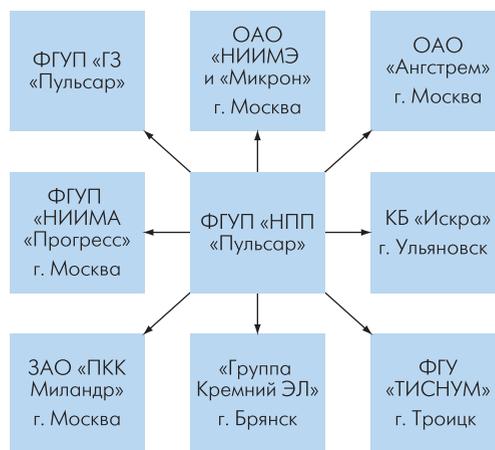
нения), увеличивают падение напряжения БТИЗ в открытом состоянии и т.п. Вследствие противоречивого действия одних и тех же электрофизических и геометрических факторов на различные электрические параметры необходима физико-математическая модель расчета прибора с технически и коммерчески оптимальными сочетаниями электрических параметров. Но, как правило, такая адекватная модель в период разработки отсутствует. Необходимость точной реализации рассчитанных электрофизических и геометрических характеристик БТИЗ приводит к технологической сложности его изготовления.

Несмотря на трудности, обусловленные десятилетним экономическим кризисом, НПП "Пульсар" успешно решило научные и технические задачи создания БТИЗ, не уступающих по своим характеристикам приборам зарубежных фирм. Это – БТИЗ типа 2Е 701 на напряжение 500–700 В и ток 25 А, 2Е 702 на 1000 В и ток 25 А, 2Е 712 на 1200 В и 50 А. Устойчивое серийное производство уже разработанных БТИЗ на напряжения до 1200 В и продвижение в об-

ласть более высоких напряжений требуют серьезной работы над основным материалом, необходимым для изготовления этих приборов, – двухслойными  $n^-n^+p^+$ -эпитаксиальными структурами с чрезвычайно малым разбросом значений сопротивления и толщины слоев. Для обеспечения устойчивого рентабельного производства БТИЗ промышленного назначения необходимы эпитаксиальные структуры, у которых разброс значений удельного сопротивления и толщины  $n^-$ - и  $n^+$ -слоев не превышает  $\pm 5\%$ .

Создание приборов силовой электроники невозможно без кооперации многих предприятий (рис.4), какими бы большими знаниями и опытом ни обладал основной разработчик. Поэтому работы по выработке требований к эпитаксиальным структурам для БТИЗ проводятся НПП "Пульсар" совместно с наиболее квалифицированным в РФ изготовителем эпитаксиальных структур – ЗАО "ЭПИЭЛ". Фактически достигнутые в "ЭПИЭЛ", но не закреплённые пока документально, разбросы значений сопротивления и толщины слоев эпитаксиальной структуры позволили наладить производство БТИЗ на напряжение до 1000 В. Эти транзисторы предназначены, главным образом, для средств спецтехники.

Для продвижения в область более высоких рабочих напряжений необходимо либо дальнейшее совершенствова-



**Рис.4. Кооперационные связи ФГУП "НПП "Пульсар" в области разработки и производства изделий силовой электроники**

**Таблица 1. Силовые полупроводниковые приборы, разработанные НПП "Пульсар"**

Приборы	Серия	Напряжение $U_{н}, В$	Ток, А
Мощный БТИЗ (IGBT)	KE702, 2E712, 2E712	500-1200	20–50
Мощный n-канальный МДП-транзистор	2П816, 2П701, 2П762, 2П7118, 2П712	30–1000	2,5–40
Транзисторные сборки	2П7190АР1, БР1, БР1 2П7190ГР1, ДР, ЕР 2П7190ЖР1, ИР, КР	30, 100, 200 30, 100, 200 30, 100, 200	10–25
Мощные диоды	2Д2992 2Д237	200 100	30 1
Диод Шоттки	2ДШ680АС9	40	40
Диод типа БВД	2ДШ680АС	400	10
Диодные сборки	2Д2136АС 2Д2137АС	600 1000	5–30

ние эпитаксиальных структур, либо освоение технологии изготовления транзисторов на тонких монокристаллических кремниевых пластинах. Обе технологии, прежде всего, приемлемы для производства БТИЗ на рабочее напряжение 1200–1500 В, пользующихся сейчас наибольшим спросом на рынке. Для таких приборов достоинствами и недостатками одной технологии могут быть противопоставлены достоинства и недостатки другой. Например, высокой цене относительно "толстых" прецизионных эпитаксиальных структур можно противопоставить хрупкость и повышенный уровень технологических потерь из-за боя тонких монокристаллических пластин, а сложности и высокой стоимости оборудования прецизионной эпитаксии – необходимость дополнительного оборудования для работы с тонкими монокристаллическими пластинами и т.п. Для процессов изготовления БТИЗ на относительно низкие напряжения сегодня пока приемлемы лишь эпитаксиальные структуры, а для изготовления высоковольтных транзисторов (2500 В и выше) предпочтительно применять однородные монокристаллические пластины. Таким образом, для дальнейшего развития БТИЗ на весь диапазон рабочих напряжений и для всех областей применения необходимо овладеть технологиями как на основе эпитаксиальных структур, так и на основе однородных монокристаллических пластин кремния. Освоение этих технологий и организация серийного производства БТИЗ – самого перспективного на сегодняшний день прибора силовой электроники – важная задача НПП "Пульсар".

Номенклатура разрабатываемых и серийно выпускаемых на предприятии силовых полупроводниковых приборов не ограничивается только БТИЗ. В последние годы к ним прибавились транзисторные сборки, быстровосстанавливающиеся диоды (БВД), диоды типа БВД, диоды Шоттки, диодные сборки (табл.1). Значительное число разработанных ФГУП "НПП "Пульсар" силовых приборов производит ФГУП "ГЗ "Пульсар". В 2007 году завод выпустил 235 тыс. силовых приборов. Помимо серийной продукции, выпускаемой "ГЗ

"Пульсар", часть приборов и модулей поставляется заказчикам научными подразделениями при поддержке завода.

Современная силовая электроника невозможна без микросхем, обеспечивающих управление мощными полупроводниковыми приборами, их защиту, преобразование и коммутацию энергии. В настоящее время ФГУП "НПП "Пульсар" разработаны и выпускаются совместно с "ГЗ "Пульсар" интегральные микросхемы (ИМС) драйверов силовых транзисторных ключей (1474ХХ3, 1474АП1Т); микросхемы защиты силовых транзисторных ключей (1474ХХ1Т), преобразования уровней (1119ПУ2, 1119ПУ6), управления диодными нагрузками (А1211), микросхемы стабилизации и преобразования напряжений и токов (286ЕП1, 286ЕП2, 286ЕП3, 286ЕП4, 286ЕП5), микросхемы управления силовыми модулями источников питания (1308ЕУ1У, 1308ЕУ2Т, 1308ЕУ3У, 1308ЕУ4У, 1308ЕУ5У) [2].

Основа технологического процесса изготовления интегральных микросхем – планарно-эпитаксиальная технология с изоляцией элементов обратносмещенным р-п-переходом [3]. Ряд технических решений, направленных, в частности, на уменьшение паразитных емкостей р-п-переходов  $C_{к}$ ,  $C_{э}$ ,  $C_{и}$  и обеспечение низкого сопротивления тела коллектора интегральных транзисторных структур, представляют собой "ноу-хау". К основным технологическим особенностям изготовления ИМС относятся:

- использование сурьмы в качестве примеси при создании скрытых  $n^+$ -слоев. Для сурьмы коэффициент вхождения атомов примеси к концентрации атомов кремния в пленке, равен 0,03 против 1 для мышьяка (при одинаковой концентрации примеси в газовой фазе). Благодаря этому за счет автолегирования "размытие" границы скрытый слой–эпитаксиальная пленка при легировании сурьмой меньше, чем при легировании мышьяком;
- относительно малые глубины залегания р-п-переходов, что (при соответствующей геометрии интегральной транзисторной структуры) обеспечивает значение граничной частоты усиления по току  $f_{гр}$  порядка 2,5 ГГц;
- малые размеры элементов, что в наибольшей степени определяет быстродействие ИМС;
- применение двухуровневой металлизации на основе алюминия, легированного кремнием (порядка 1%). В качестве межслойного диэлектрика используется пленка диоксида кремния  $SiO_2$  толщиной 0,8 мкм, из которых 0,4 мкм легируются  $P_2O_5$ .

Компьютерное моделирование позволило определить требования к элементам ИМС, основными из которых являются р-р-п-транзисторные структуры, в том числе с диодами Шоттки (диапазон рабочего тока коллектора  $I_c$  – от долей миллиампера в статическом режиме до 1,5 А в импульсном); р-п-р-торцевые транзисторы; диоды Шоттки. Пассив-



**Рис.5. Конструктивное исполнение силовых транзисторов, диодов и ИМС, разработанных ФГУП "НПП "Пульсар"**

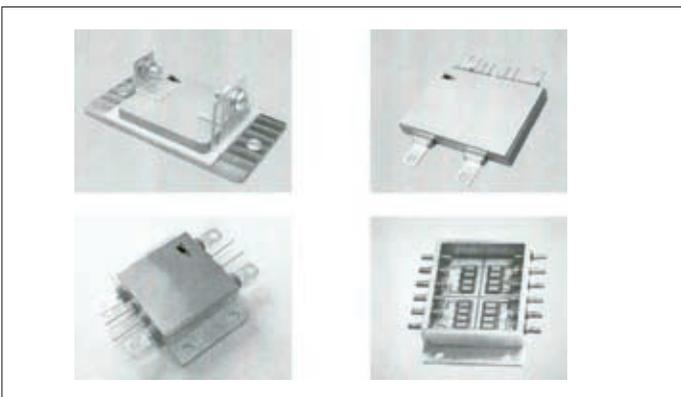
ные элементы – резисторы на номиналы от единиц до нескольких сот килоом – формируются одновременно с диффузией базовой примеси (бора) и самостоятельно методом ионного легирования. Конструктивное исполнение силовых приборов и интегральных схем представлено на рис.5.

Логика развития силовой электроники потребовала от ФГУП "НПП "Пульсар" начать разработку силовых модулей как переключающих, так и "разумных". К изделиям предприятия этого класса относятся:

- силовой модуль 2М215 на напряжение 200–300 В и ток 50–200 А;
- силовые модули электропитания СМ1-300-10 и СМ2-75-5 серий БКВП.436237.001 и БКВП.436234.001 (рис.6) с выходной мощностью 300 и 75 Вт, соответственно. Частота преобразования модулей составляет 1 МГц, КПД – 85%;
- модуль стабилизатора напряжения БКВП.435153.015 с выходной мощностью 130 Вт, КПД – 83% и КПД преобразования – 94%;
- модуль зарядного устройства БКВП.435153.016, максимальный выходной ток которого составляет 1; 2; 4 А, КПД – 84% и КПД преобразования – 94%.

Необходимо отметить, что опыт в области разработки мощных полупроводниковых приборов и ИМС, а также возможность их оперативной доработки в соответствии с требованиями заказчика позволили НПП "Пульсар" добиться значительных успехов в этой области техники и создать приборы, не имеющие аналогов в Российской Федерации. При создании силовых модулей были решены следующие три основные технологические задачи:

- размещение более 20 кристаллов мощных силовых полупроводниковых приборов в одном конструктиве;

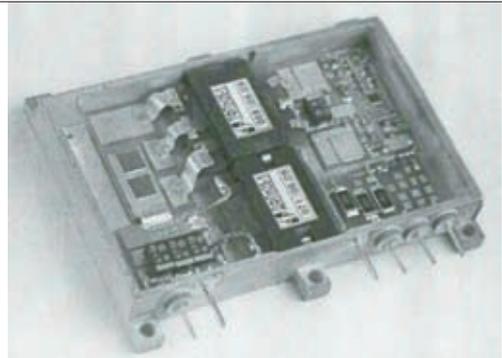


**Рис.6. Конструктивное исполнение силовых модулей созданных ФГУП "НПП "Пульсар"**

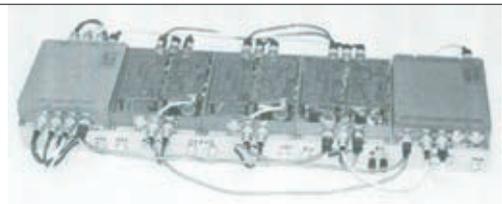
- разработка конструкции и технологии изготовления металлокерамических корпусов силовых модулей, отвечающих требованиям ОПК;
- разработка гибридной многокристальной технологии силовых модулей.

Конструктивное исполнение силовых модулей представлено на рис.6–8.

Несмотря на значительные объемы выпускаемой и поставляемой продукции силовой электроники, следует отметить, что потребности ОПК значительно выше. В связи с необходимостью увеличения номенклатуры приборов принципиальным становится вопрос об инвестиционных проектах.



**Рис.7. Силовой модуль электропитания СМ1-300-10**



**Рис.8. Комплекс автоматки и стабилизации электропитания МКА**

Такие проекты реализуются НПП "Пульсар", хотя пока недостаточно интенсивно. Сроки их выполнения велики, а финансирование недостаточно. Малое число НИР говорит о том, что принципиально новых, заделных приборов и технологий пока ждать не следует.

Первый проект, выполняемый на основе решения РАСУ от 05 ноября 2001 года №36/2, – "Создание производс-

**Таблица 2. Параметры современных и разрабатываемых отечественных силовых приборов**

Тип прибора	Параметры приборов						
	по состоянию на 2007 год				после реализации инвестиционного проекта		
	Максимальное напряжение $U_{\text{макс}}$ , В	Проектная норма, мкм	Размер кристалла, мм	$R_{\text{оп}}$ , Ом ( $U_{\text{экив}}$ , В)	Проектная норма, мкм	Размер кристалла, мм	$R_{\text{оп}}$ , Ом ( $U_{\text{экив}}$ , В)
МДП-транзисторы	30*	0,8–1	13×13	0,003	0,35–0,5	20×20	0,0008
	200*	0,8–1	13×13	0,05	0,35–0,5	20×20	0,012
	1200*	0,8–1	13×13	1,2	0,5–0,8	25×25	0,3
БТИЗ	600**	1,2	15×15	(2,2)	0,5–0,8	25×25	(1,8–1,7)
	1200**	1,2	15×15	(2,5)	0,5–0,8	25×25	(1,7–2,2)
	1700**	1,2	15×15	(3)	0,5 – 0,8	25×25	(2–2,3)
	2500**	В разработке			0,5–0,8	25×25	(2,7–3,3)

\*  $U_{\text{си}}$ , \*\*  $U_{\text{эк}}$

твенных мощностей по выпуску кремниевых СВЧ- и силовых транзисторов и выпуску СВЧ-модулей на их основе” – предусматривает выпуск 100 тыс. мощных транзисторов и 10 тыс. СВЧ-модулей, выполняемых с проектными нормами 0,35–0,5 мкм. В ходе программы планируется ввести в строй цех производства кристаллов кремниевых СВЧ- и силовых транзисторов площадью 1000 м<sup>2</sup> с чистыми зонами класса 100–1000.

На начало 2008 года по проекту освоено 241,6 млн. руб. Закончено строительство помещения для технического и энергетического обеспечения цеха, построено 450 м<sup>2</sup> чистых помещений для участков теххимии, контактной и проекционной фотолитографии, производства деионизованной воды. Введены в строй помещения диспетчерского пункта и пункта переоборудования персонала. Установлено инженерное оборудование для поддержания микроклимата технологических чистых помещений. В ходе выполнения проекта приобретены кластерная система обработки фоторезиста для микролитографии на платформе GAMMA Microlithography Cluster, две установки реактивного ионного травления JIR220, JIR263 и установки осаждения диэлектрических слоев HCVD53, HCVD54, а также радиоизмерительная техника.

Реализация проекта позволит существенно улучшить параметры выпускаемых приборов силовой электроники (табл.2).

Второй "Проект технического перевооружения и реконструкции производства СВЧ-полупроводниковых приборов и МИС на основе широкозонных полупроводниковых материалов", проводимый в соответствии с соглашением РС/07/526/НТБ от 03 сентября 2007 года, предусматривает выпуск 250 тыс. мощных СВЧ-транзисторов, 250 тыс. малошумящих СВЧ-транзисторов и 500 тыс. МИС на их основе. Сметная стоимость проекта (в текущих ценах) – 1730 млн. руб. Планируется ввести в строй цех обработки пластин с чистыми зонами класса 10–100, сборочный цех полупроводниковых приборов и МИС, а также центр проектирования на 20 рабочих мест. На начало 2008 года по этому проекту освоено 310 млн. руб. Проведены работы по реконструкции

корпусов № 2 и 15 ФГУП "НПП "Пульсар", включая демонтаж старого оборудования и строительство новых помещений. Приобретены:

- средства проектирования СВЧ-приборов;
- средства технологического моделирования и верификации технологии аналоговых и цифроаналоговых СБИС, экстракции Spice-параметров;
- оборудование для измерения и функционального контроля полупроводниковых приборов на пластинах;
- универсальный технологический комплекс для технического перевооружения производства полупроводниковых СВЧ-приборов и МИС на основе широкозонных полупроводниковых материалов;
- оборудование системы охлаждения, в том числе ротационные спиральные компрессоры, адсорбционная, холодильная и приточная установки; промышленные кондиционеры.

Реализация второго проекта позволит приступить к разработке приборов для электронных систем, работающих в экстремальных условиях, и решить ряд принципиальных задач, поставленных заказчиком, в том числе улучшить основные эксплуатационные параметры (коммутируемую мощность, КПД, быстродействие), повысить надежность и живучесть, минимизировать массогабаритные показатели блоков и модулей, сократить расходы при длительной эксплуатации. Пути решения этих задач:

- комплексная оптимизация параметров активных приборов микросхем управления и защиты пассивной ЭКБ в узлах, блоках и модулях;
- повышение КПД и надежности за счет устранения лишних соединений и элементов настройки;
- переход к созданию функционально законченных интеллектуальных силовых модулей в виде системы в корпусе.

Таким образом, для разработки и создания современных изделий силовой полупроводниковой электроники, отвечающих требованиям ОПК, необходимо в кратчайшие сроки завершить инвестиционные проекты ФГУП "НПП "Пульсар".



Это позволит уменьшить минимальные топологические размеры элементов и увеличить удельную плотность тока силовых приборов до 500 А/см<sup>2</sup>. При этом необходимо располагать программно-аппаратными метрологическими и испытательными комплексами, имитирующими режимы и условия эксплуатации. Это важнейшие вопросы, без решения которых развитие отрасли невозможно.

Из вышесказанного следует, что наиболее перспективное направление развития силовой электроники – разработка и создание функционально законченных интеллектуальных силовых модулей в виде системы в корпусе с помощью технологий микроэлектроники и с применением современных надежно-ориентированных методов проектирования. Для обеспечения требований ОПК по разработке перспективных образцов новой техники необходимо проводить работы по созданию изделий силовой электроники на основе широкозонных полупроводников. В связи с этим на предприятии исследуются новые материалы: GaN, SiC, SiGe, монокристаллический и поликристаллический алмаз и новые технологии по созданию активных приборов на указанных материалах. Готовится технологическая линия по произ-

водству полупроводниковых приборов на основе гетероструктур AlGaN, SiGe и га монокристаллическом алмазе.

#### **ЛИТЕРАТУРА**

1. **Васильев А.Г.** Интегрированная база СВЧ-, силовой и фотоэлектроники. НПП "Пульсар" в борьбе за рынок высоких технологий.– ЭЛЕКТРОНИКА: НТБ, 2008, №3, с.70–75.
2. **Сопов О.В., Бачурин В.В., Ногин В.М., Крымко М.М.** Кремниевые полевые транзисторы: становление и прогресс.– Электронная промышленность, 2003, №2, с.176–192.
3. **Гольдшер А.И., Дик П.А., Крымко М.М., Кучерский В.Р., Машкова В.С., Шевцов Д.А.** Интегральные микросхемы управления и защиты силовых транзисторных ключей. – Chip-News, 2006, №8, с.18–27.
4. **Виноградов Р.Н., Корнеев С.В., Ксенофонов Д.Л.** Быстродействующие аналоговые микросхемы на базе высокочастотной комплементарной биполярной технологии.– Электронная промышленность, 2003, № 2, с.120–123.