

Актуальные проблемы развития требуемой номенклатуры силовых полупроводниковых приборов и модулей на их основе на ФГУП «НПП «Пульсар»

Васильев А. Г., Крымко М. М.

Представлены современное состояние по разработке и производству изделий силовой электроники на ФГУП «НПП «Пульсар» и достижения по созданию силовых МДП и БТИЗ транзисторов, диодов Шоттки, быстровосстанавливающихся диодов, транзисторных и диодных сборок, интегральных схем силовой электроники, силовых модулей.

Приведены их основные параметры и конструктивное исполнение.

ФГУП «НПП «Пульсар» - многопрофильное, динамично развивающееся предприятие.

Разработки и поставки предприятием ведутся по следующим направлениям:

- мощные биполярные кремниевые транзисторы ВЧ и СВЧ диапазонов длин волн;
- мощные полевые кремниевые МДП транзисторы ВЧ и СВЧ диапазонов длин волн, а также мощные переключательные кремниевые МДП и БТИЗ транзисторы;
- полевые арсенид-галлиевые транзисторы СВЧ и КВЧ диапазонов длин волн и транзисторы на основе широкозонных полупроводников;
- фоточувствительные линейные и матричные приборы с зарядовой связью и быстродействующие фотоприёмные устройства на основе р-і-n фотодиодов;
 - быстродействующие цифровые и аналоговые микросхемы;
 - твердотельные узлы, блоки и модули для аппаратуры радиолокации, связи, коммутации и электропитания.

В последние два десятилетия в устройствах силовой электроники наблюдается тенденция вытеснения мощных биполярных кремниевых переключающих транзисторов мощными кремниевыми транзисторами с полевым управлением (МДП и БТИЗ).

В 1978 г. в НИИ «Пульсар» было впервые 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 [1]. На предприятии разработаны 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 практической потребности в них из-за большого сопротивления открытого транзистора. Для МДП транзисторов считается практически целесообразным диапазон рабочих напряжений до 600-1000 В и в отдельных случаях до 1500 В. На напряжения свыше 600 В более перспективным считается новый класс полупроводниковых приборов - биполярные транзисторы с изолированным затвором (БТИЗ, в английской транскрипции - IGBT), преодолевший в настоящее время рубеж в 4500 В. Эти приборы сочетают высокие рабочие напряжения и в 5-7 раз более высокую плотность тока, чем в МДП

транзисторах при сравнимых величинах падения напряжения на открытом приборе. Конструктивная и технологическая сложности их обусловлены многофакторным и зачастую противоречивым характером связей между основными параметрами приборов, такими как пробивное напряжение коллектора, падение напряжения на открытом приборе, времена включения и выключения и др., и электрофизическими и геометрическими характеристиками областей приборов. Например, факторы, увеличивающие пробивное напряжение коллектора, ухудшают (улучшают) времена включения и выключения и падение напряжения на открытом приборе, факторы, уменьшающие время жизни основных носителей в базе прибора (т. е. уменьшающие время выключения), увеличивают падение напряжения на открытом БТИЗ и т. д. Ввиду противоречивого действия одних и тех же электрофизических и геометрических факторов на разные электрические параметры прибор с технически и коммерчески оптимальным сочетанием электрических параметров должен быть предварительно рассчитан, для чего необходима отсутствующая на тот период адекватная физико-математическая модель приборов. Технологическая сложность БТИЗ определяется необходимостью точно реализовать в структуре прибора рассчитанные электрофизические и геометрические характеристики областей прибора.

Найдены решения научных и технических задач по созданию БТИЗ и разработаны БТИЗ 2Е701 (напряжение 500-700 В и ток 25 А), 2Е702 (напряжение 1000 В и ток 25 А), 2Е712 (напряжение 1200 В и ток 50 А) с параметрами, аналогичными подобным приборам инофирм. Устойчивое серийное производство уже разработанных БТИЗ на напряжения до 1200 В и продвижение в область более высоких напряжений требуют серьезной работы над основным материалом для этих приборов - двухслойными $p^+p^+r^+$ - эпитаксиальными структурами с высокой точностью сопротивлений и толщин слоёв. Устойчивое рентабельное производство БТИЗ общепромышленного назначения требует эпитаксиальных структур с точностью сопротивлений и толщин p^+ и p не хуже $\pm 5\%$. Работы по разработке требований к эпитаксиальным структурам для БТИЗ проводятся предприятием совместно с высококвалифицированным в РФ изготовителем эпитаксиальных структур - ЗАО «ЭПИЭЛ». Фактически достигнутые в «ЭПИЭЛ», но не закреплённые пока документально значения разбросов сопротивлений и толщин слоёв в эпитаксиальной структуре позволили решить вопрос о производстве БТИЗ с напряжениями до 1200 В главным образом для спецтехники.

Продвижение в область более высоких рабочих напряжений БТИЗ сегодня имеет альтернативные варианты:

- работа на эпитаксиальных структурах;
- использование технологии на тонких монокристаллических пластинах.

Эта альтернатива существует, прежде всего, для наиболее массовых БТИЗ с рабочим напряжением 1200-1500 В, где достоинствам или недостаткам каждого из решений могут быть противопоставлены достоинства или недостатки другого. Например, высокой цене толстых прецизионных эпитаксиальных структур - хрупкость и повышенный уровень технологических потерь из-за боя тонких монокристаллических пластин, сложности и высокой цене оборудования для прецизионной эпитаксии - необходимость дополнительного оборудования для работы с тонкими монокристаллическими пластинами и т. д. Не существует сегодня альтернативных вариантов для низковольтных БТИЗ,

где основой пока остаются эпитаксиальные структуры, и для высоковольтных 2500 В и выше, где очевидны преимущества работы с однородными монокристаллическими пластинами. То есть для развития и производства БТИЗ на весь спектр диапазонов рабочих напряжений и областей применения необходимо овладение технологиями как на основе эпитаксиальных структур, так и на основе однородных монокристаллических пластин кремния. Овладение этими технологиями и организация серийного производства БТИЗ, самого перспективного сегодня прибора силовой электроники, представляются нам важнейшей задачей.

Номенклатура разрабатываемых и серийно выпускаемых на предприятии силовых полупроводниковых приборов не ограничивается только транзисторами с полевым управлением, в последние годы к ним прибавились транзисторные сборки, быстросостанавливающиеся диоды, диоды типа БВД, диоды Шоттки, диодные сборки.

Значительное количество разработанных ФГУП «НПП «Пульсар» силовых приборов выпускается ФГУП «ГЗ «Пульсар». Основной перечень таких приборов показан в таблице 1.

Таблица 1

Силовые полупроводниковые приборы

Приборы	Серия	Основные параметры
Мощный БТИЗ (IGBT) транзистор	KE702, 2E712 2E712	$U_{п} = 500-1200 \text{ В}$ $I = 20-50 \text{ А}$
Мощный МДП транзистор с п-каналом	2П816, 2П701 2П762, 2П7118 2П712	$U_{п} = 30-1000 \text{ В}$ $I = 2,5-40 \text{ А}$
Сборки транзисторные	2П7190АР1, БР1, ВР1 2П7190ГР1, ДР, ЕР 2П7190ЖР1, ИР, КР	$U_{п} = 30, 100, 200 \text{ В}, I = 10-25 \text{ А}$ $U_{п} = 30, 100, 200 \text{ В}, I = 10-25 \text{ А}$ $U_{п} = 30, 100, 200 \text{ В}, I = 10-25 \text{ А}$
Мощный диод	2Д2992 2Д237	$U_{п} = 200 \text{ В}, I = 30 \text{ А}$ $U_{п} = 100 \text{ В}, I = 1 \text{ А}$
Диод Шоттки	2ДШ680АС9	$U_{п} = 40 \text{ В}, I = 40 \text{ А}$
Диод типа БВД	2ДШ680АС	$U_{п} = 400 \text{ В}, I = 10 \text{ А}$
Диодная сборка	2Д2136АС 2Д2137АС	$U_{п} = 600 \text{ В}, I = 5-30 \text{ А}$ $U_{п} = 1000 \text{ В}, I = 5-30 \text{ А}$

Современная силовая электроника невозможна без интегральных схем, обеспечивающих управление мощными полупроводниковыми приборами, их защиту, преобразование и коммутирование энергии [2].

В таблице 2 представлена номенклатура разработанных и выпускаемых изделий.

ИС силовой электроники ФГУП «НПП «Пульсар»

№ n/n	Интегральная схема	Номер
1	2	3
1	Драйверы для управления силовыми транзисторными ключами	1474XX3, 1474АП1Т
2	Микросхемы защиты силовых транзисторных ключей	1474XX1Т
3	Микросхемы преобразования уровней	1119ПУ2, 1119ПУ6
4	Микросхемы для управления диодными нагрузками	A1211
5	Микросхемы для стабилизации и преобразования напряжений и токов	286ЕП1, 286ЕП2, 286ЕП3, 286ЕП4, 286ЕП5
6	Микросхемы для управления силовыми модулями источников электропитания	1308ЕУ1У, 1308ЕУ2Т, 1308ЕУ3У, 1308ЕУ4У, 1308ЕУ5У

В основу технологического процесса изготовления ИМС в «Пульсаре» положена планарно-эпитаксиальная технология с изоляцией элементов обратносмещённым р-п-переходом [3]. Ряд технических решений, направленных, в частности, на уменьшение паразитных ёмкостей р-п-переходов C_k , C_o , C_n , обеспечение низкого сопротивления тела коллектора r_k интегральных транзисторных структур, представляет собой «ноу-хау». К основным технологическим особенностям разработанных ИМС следует отнести:

- использование в качестве примеси для создания n^+ скрытых слоёв сурьмы, обеспечивающей меньшее «размытие» границы «скрытый слой-эпитаксиальная плёнка» (по сравнению с мышьяком) за счёт автолегирования, поскольку коэффициент вхождения η , характеризующий отношение количества атомов примеси к количеству атомов кремния в плёнке (при одинаковой концентрации примеси в газовой фазе), для сурьмы равен - 0,03, а для мышьяка -1;

- относительно малые глубины залегания р-п-переходов, что (при соответствующей геометрии ИТС) обеспечило величину граничной частоты усиления по току f_{tr} порядка 2,5 ГГц;

- малые размеры элементов, в наибольшей степени влияющих на быстродействие ИМС;

- использование двухуровневой металлизации на основе алюминия, легированного кремнием (порядка 1%). В качестве межслойного диэлектрика применяется плёнка 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:

- п-р-п-транзисторные структуры, в том числе с диодами Шоттки, диапазон

рабочих токов коллектора I_c которых составляет от долей единиц мА в статическом режиме до 1,5 А - в импульсном;

- р-п-р торцевые транзисторы ($I_c \ll 1$ -ИЮ мА);
- диоды с барьером Шоттки.

В качестве пассивных элементов использованы резисторы, номиналы которых составляют от единиц до нескольких сот кОм. Они создаются как одновременно с диффузией базовой примеси (бора), так и с использованием отдельного процесса ионного легирования.

Конструктивное исполнение силовых приборов и интегральных схем представлено на рис. 1.

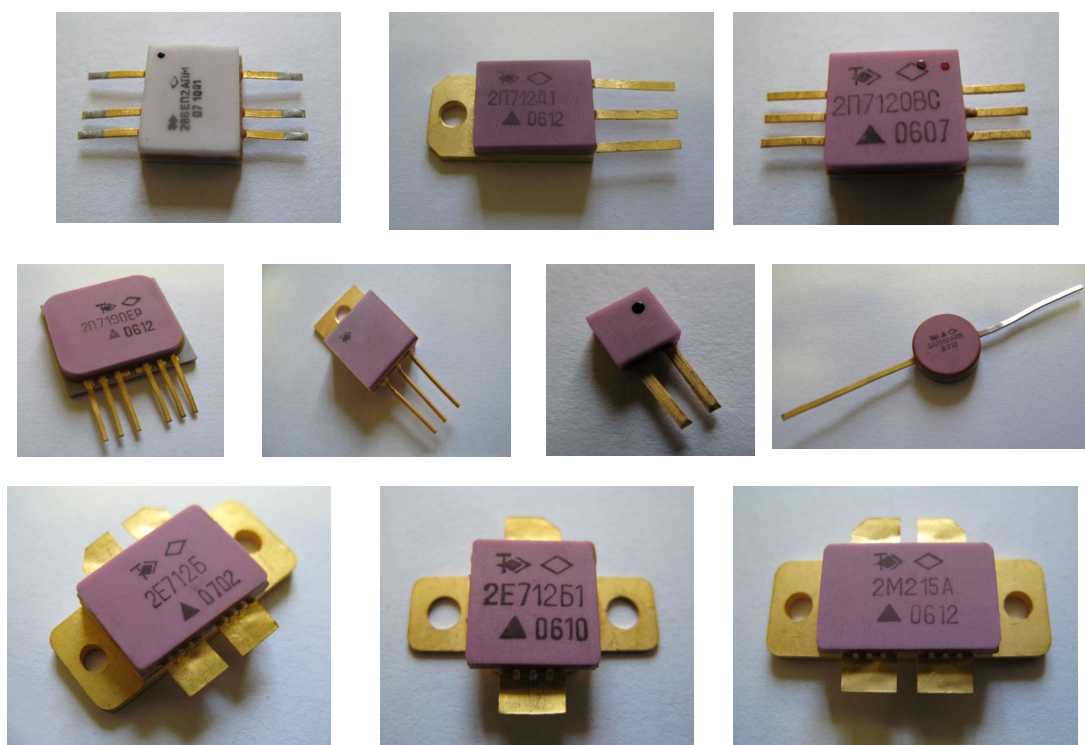


Рис. 1.

Разработки силовых транзисторов, диодов и ИМС ФГУП «НПП «Пульсар»

Требование времени и логика развития силовой электроники потребовали от ФГУП «НПП «Пульсар» начать разработку силовых модулей как переключающих, так и «разумных».

В таблице 3 представлена номенклатура силовых модулей, разработанных и выпускаемых ФГУП «НПП «Пульсар».

Значительные достижения предприятия в этой области обусловлены наличием опыта по разработке мощных полупроводниковых приборов и интегральных схем и возможностью оперативной доработки на собственной производственной базе в случае необходимости с учётом требований силовых модулей.

Приведённые в таблице 3 приборы не имеют аналогов в Российской Федерации. При создании силовых модулей были решены три основные технологические задачи:

- сложение кристаллов мощных силовых полупроводниковых приборов более 20 шт. в одном конструктиве;
- разработка конструкции и технологии изготовления металлокерамических корпусов силовых модулей, отвечающих требованиям ОПК;
- разработка гибридной многокристальной технологии силовых модулей.

Таблица 3

Разработки модулей силовой электроники ФГУП "НПП "Пульсар"

Модули	Серия	Основные параметры
Силовой модуль	2М215	$U_n = 200-300 \text{ В}$ $I = 50-200 \text{ А}$
Силовой модуль СМ1-300-10 электропитания	БКВП.436237.001	$R_{\text{вых}} = 300 \text{ Вт}$ Частота преобразования = 1 МГц КПД модуля = 85%
Силовой модуль СМ2-75-5 электропитания	БКВП.436234.001	$R_{\text{вых}} = 75 \text{ Вт}$ Частота преобразования = 1 МГц КПД модуля = 85%
Модуль стабилизатора напряжения	БКВП.435153.015	$R_{\text{вых}} = 150 \text{ Вт}$ КПД преобразования = 94% КПД модуля = 83%
Модуль зарядного устройства	БКВП.435153.016	$I_{\text{вых макс}} = 1 \text{ А}, 2 \text{ А}, 4 \text{ А}$ КПД преобразования = 94% КПД модуля = 84%

Таблица 4

Приборы силовой электроники

2007 г. (отечественный уровень)					После реализации инвестиционного проекта		
Тип прибора	Максимальное напряжение	Проектная норма (мкм)	Размер кристалла (мм x мм)	Ром Уэк нас.	Проектная норма (мкм)	Размер кристалла (мм x мм)	Ром Уэк нас.
МДП-транзисторы	Уси макс = 30 В	0,8 - 1	13 x 13	0,003 Ом	0,35 - 0,5	20 x 20	0,0008 Ом
	Уси макс = 200 В	0,8 - 1	13 x 13	0,05 Ом	0,35 - 0,5	20 x 20	0,012 Ом
	Уси макс = 1200 В	0,8 - 1	13 x 13	1,2 Ом	0,5 - 0,8	25 x 25	0,3 Ом
БТИЗ	Уэк макс = 600 В	1,2	15 x 15	2,2 В	0,5 - 0,8	25 x 25	1,8 - 1,7 В
	Уэк макс = 1200 В	1,2	15 x 15	2,5 В	0,5 - 0,8	25 x 25	1,7 - 2,2 В
	Уэк макс = 1700 В	1,2	15 x 15	3 В	0,5 - 0,8	25 x 25	2 - 2,3 В
	Уэк макс = 2500 В	В разработке			0,5 - 0,8	25 x 25	2,7 - 3,3 В

Конструктивное исполнение силовых модулей представлено на рис. 2, 3, 4.

Создание приборов силовой электроники невозможно одним предприятием, даже обладающим большими знаниями и опытом в этой области.

Кооперация ФГУП «НПП «Пульсар» представлена на рис. 5.

Несмотря на значительные объёмы выпускаемой и поставляемой продукции силовой электроники, следует отметить, что потребности ОПК значительно выше. В связи с необходимостью увеличения номенклатуры приборов принципиальным становится вопрос о реализации инвестиционных проектов по техническому перевооружению кристалльного производства.

Такие проекты реализуются на нашем предприятии.

Реализация проектов позволит существенно улучшить параметры выпускаемых приборов силовой электроники (см. таблицу 4), а также приступить к разработке приборов экстремальной электроники и решить ряд принципиальных задач: улучшение основных эксплуатационных параметров (коммутируемой мощности, КПД, быстродействия), повышение надёжности и живучести, минимизация массогабаритных характеристик блоков и модулей, снижение расходов при длительной эксплуатации.

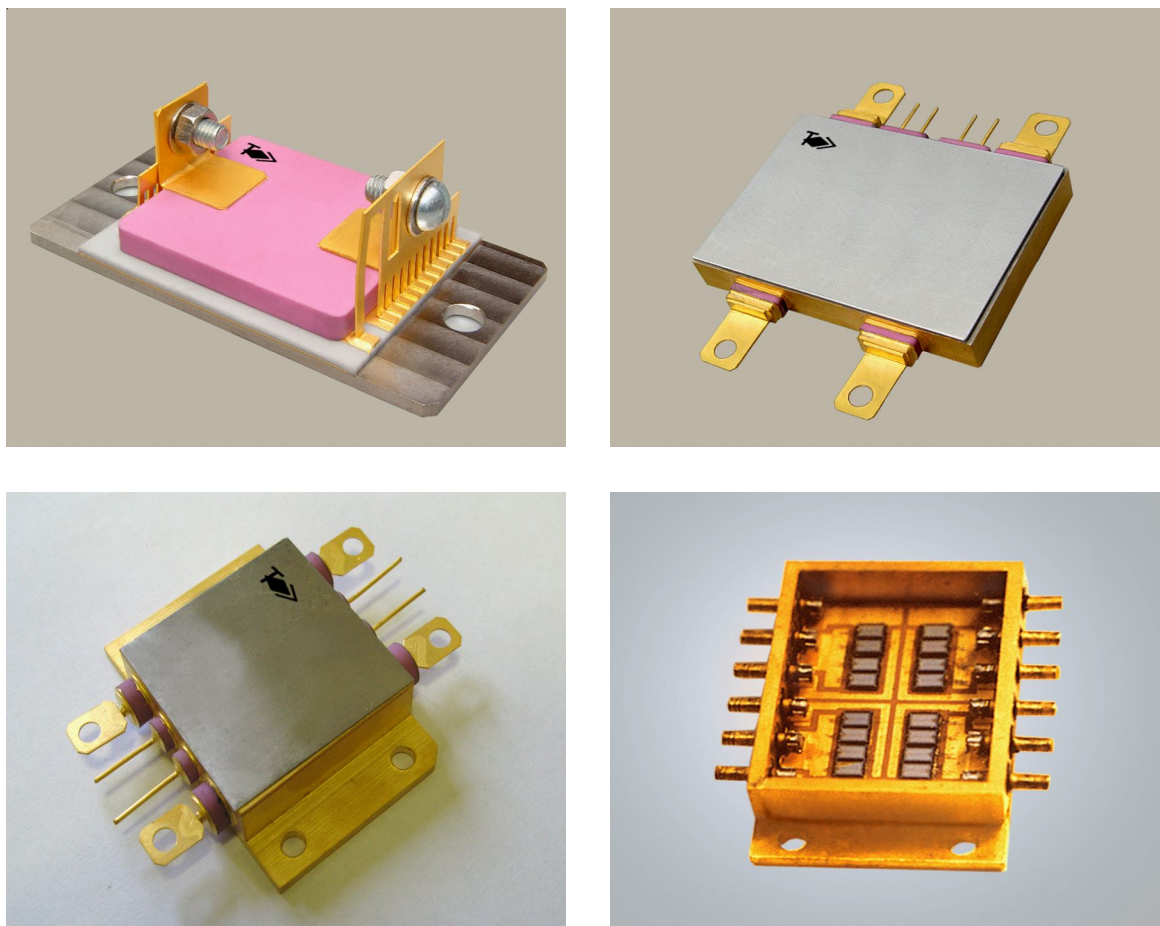


Рис. 2.

Разработки силовых модулей ФГУП «НПП «Пульсар»



Рис. 3.

Силовой модуль электропитания SM1-300-10

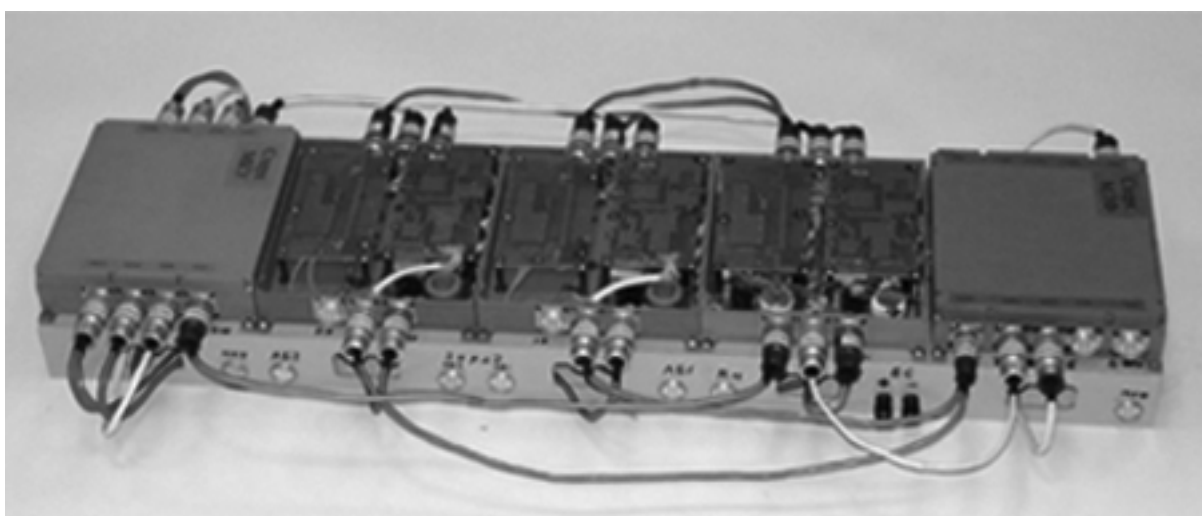


Рис. 4.

Комплекс автоматики и стабилизации электропитания МКА

Для решения поставленных задач необходимо обеспечить:

- внутреннюю оптимизацию активных приборов, ИС управления и защиты, пассивной ЭКБ (в узлах, блоках и модулях);
- повышение КПД и надёжности за счёт использования технологий микроэлектроники, устранение лишних соединений и элементов настройки;
- переход к созданию функционально законченных интеллектуальных силовых модулей в виде «система в корпусе».

Таким образом, нам представляется, что дальнейшее развитие силовой электроники на “Пульсар” связано с решением следующих задач:

1. наиболее перспективным направлением силовой электроники является разработка и создание функционально законченных интеллектуальных силовых модулей в виде «системы в корпусе», требующих применения технологий микроэлектроники и современных надёжностно ориентированных методов проектирования;

2. для разработки и создания современных изделий силовой полупроводниковой электроники, удовлетворяющих требованиям ОПК, необходимо скорейшее завершение инвестиционных проектов ФГУП «НПП «Пульсар», что позволит уменьшить минимальные топологические размеры элементов для повышения удельной плотности тока до значений 500 A/мм^2 ;

3. важнейшей проблемой при разработке и создании изделий силовой электроники является создание программно-аппаратных метрологических и испытательных комплексов, имитирующих режимы и условия эксплуатации. Вопросы метрологии, испытаний почему-то выпадают из внимания наших руководителей. Вопросы важнейшие, без решения которых развитие отрасли невозможно;

4. для обеспечения требований ОПК по разработке перспективных образцов новой техники в области силовой электроники необходима постановка комплекса работ по созданию изделий силовой электроники на основе широкозонных полупроводников.

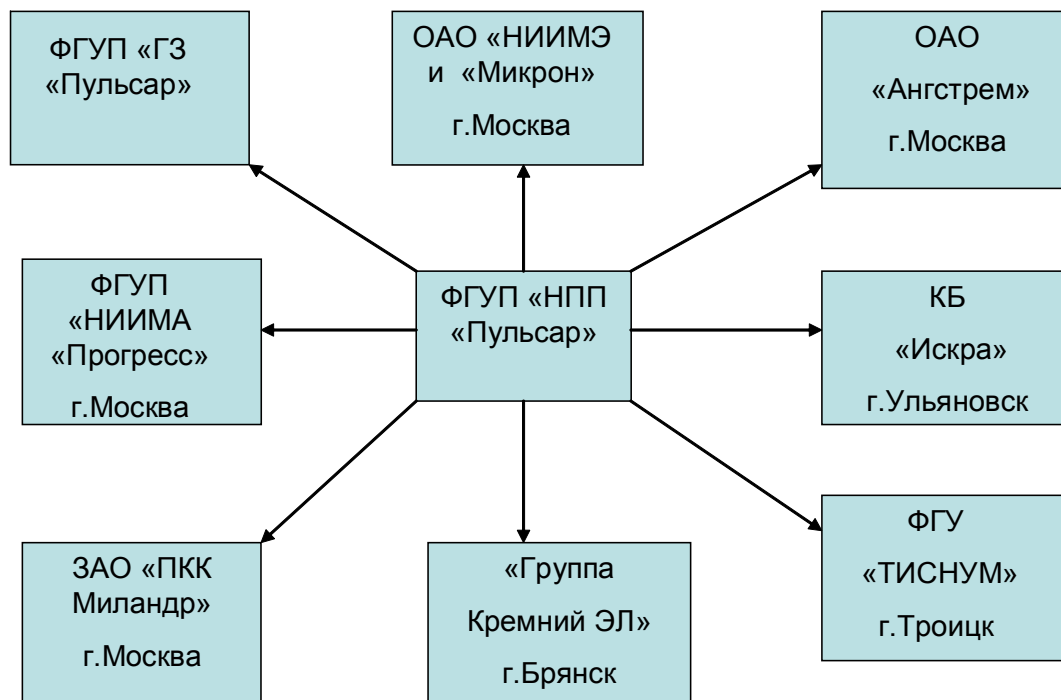


Рис. 5.

Кооперационные связи ФГУП “НПП “Пульсар” в области разработки и производства изделий силовой электроники

Литература

1. О. В. Сопов, В. В. Бачурин, В. М. Ногин, М. М. Крымко. Кремниевые полевые транзисторы: становление и прогресс. - *Электронная промышленность*, №2, 2003, с.176-192.

2. А. И. Гольдшер, П. А. Дик, М. М. Крымко, В. Р. Кучерский, В. С. Машкова, Д. А. Шевцов. Интегральные микросхемы управления и защиты силовых транзисторных ключей. - *Chip-News*, №8, 2006, с. 18-27.

3. Р. Н. Виноградов, С. В. Корнеев, Д. Л. Ксенофонтов. Быстродействующие аналоговые микросхемы на базе высокочастотной комплементарной биполярной технологии. - *Электронная промышленность*, № 2, 2003, с. 120-123.

К 55-летию ФГУП «НПП «Пульсар»

вышла в свет книга

«Пульсар». Прошлое ... настоящее ... будущее»

Очерки об истории полупроводниковой электроники

55 лет назад вышло Постановление Совета министров СССР № 1402/563, в соответствии с которым был основан НИИ-35 с Опытным заводом – ныне Федеральное государственное унитарное предприятие «Научно-производственное предприятие «Пульсар» и Государственный завод «Пульсар». ФГУП «НПП «Пульсар» стал одним из первых научных центров по созданию отечественной полупроводниковой промышленности для развития народного хозяйства и повышения обороноспособности страны. Инициаторами создания предприятия были видные ученые и руководители промышленности А. И. Берг, А. Ф. Иоффе, Б. М. Вул, М. Г. Первухин, А. И. Шокин.

В своем поздравлении в связи с пятидесятилетием «Пульсара» лауреат Нобелевской премии академик Ж. И. Алферов писал: «Уже в начале 50-х годов совместно с институтами академии наук СССР в стенах «Пульсара» под руководством А. В. Красилова были разработаны и внедрены в производство вначале первые промышленные образцы германиевых точечных и плоскостных транзисторов, а затем и первые образцы кремниевых транзисторов. В НИИ «Пульсар» совместно с НПП «Исток» были созданы и выпускались серийно лавинно-пролетные диоды. Здесь впервые в СССР были проведены разработки и освоены серийный выпуск полевых транзисторов, микромодульных сборок, интегральных микросхем, приборов с зарядовой связью».

Предприятие «Пульсар» стало базовым в полупроводниковой отрасли, его вклад в становление отечественной полупроводниковой промышленности огромен. Более 1000 типов разработанных институтом транзисторов многомиллионными сериями выпускались заводами Российской Федерации, Украины, Белоруссии, Латвии, Молдавии, Узбекистана и других республик бывшего Советского Союза. Это производство способствовало созданию первых отечественных образцов электронно-вычислительной техники, функционированию оборонного, в том числе, ракетно-космического комплекса. Предприятие внесло решающий вклад в создание отечественных твердотельных радиолокационных станций различного назначения. Эти достижения отмечены Орденами Ленина и Трудового Красного Знамени, двумя Ленинскими и многими Государственными премиями СССР и Российской Федерации.

В книге ведущие ученые и разработчики «Пульсара» дали динамику разработок транзисторов от первых точечных до современных мощных высокочастотных биполярных и полевых. С 1954 по 1972 г.г. предприятием было выпущено более 500 млн. германиевых транзисторов. С 1956 г. было разработано более 1000 типов кремниевых приборов, которые выпускались на заводе «Пульсар», а также на серийных заводах отрасли миллионными сериями. Было выпущено свыше 7 миллиардов транзисторов КТ 315.

Впервые были разработаны в «Пульсаре» планарная технология на германии, причём раньше, чем за рубежом, и планарно-эпитаксиальная технология на кремнии. Впервые были разработаны и выпускались серийно часы с электронной цифровой светодиодной индикацией, были созданы приборы с зарядовой связью – сначала линейки, а затем матрицы. Были разработаны разные типы фоточувствительных приборов, работающих в УФ, видимой и ИК областях спектра. Спектрозональные линейки использовались для получения картины местности в спутниках типа «Ресурс».

«Пульсар» принимал самое непосредственное участие в разработках по созданию полупроводниковых материалов – германия и кремния. Были созданы промышленные установки для измерения удельного сопротивления, эффекта Холла, времени жизни и диффузионной длины неравновесных носителей заряда. Этими установками были оснащены заводы, выпускающие полупроводниковые материалы, и лаборатории входного контроля заводов, выпускающих полупроводниковые приборы. Была создана и большими сериями выпускалась аппаратура для резки, шлифовки и полировки германия и кремния, аппаратура для контроля параметров эпитаксиальных и диэлектрических слоёв, причём, например, лазерные эллипсометры были разработаны на 10 лет раньше аналогичных зарубежных приборов. В 50-60-е годы большими объёмами выпускалась аппаратура для контроля параметров транзисторов. Совместно с предприятием «Карл Цейс, Йена» были разработаны и выпускались установки для проведения процессов фотолитографии для заводов отрасли.

Отдельные статьи посвящены истории разработок комплексированных изделий: твердотельных радиолокационных станций, систем государственного опознавания.
