

## ИНТЕГРИРОВАННАЯ ЭЛЕМЕНТНАЯ БАЗА СВЧ-, СИЛОВОЙ И ФОТОЭЛЕКТРОНИКИ ФГУП НПП "ПУЛЬСАР" В БОРЬБЕ ЗА РЫНОК ВЫСОКИХ ТЕХНОЛОГИЙ

Коллектив ФГУП "НПП "Пульсар" формировался в процессе становления и развития отечественной полупроводниковой электроники – новой отрасли науки, техники и технологии, которая, начиная со второй половины XX века, фактически определяла и определяет темпы современного научно-технического прогресса. Как в годы интенсивного развития и подъема радиоэлектронной отрасли, так и в непростой период ее выживания, основой жизнедеятельности НПП "Пульсар" было умение адаптироваться к изменяющимся условиям жизни, рационально воспринимать и успешно применять все полезные для предприятия научно-производственные и организационно-технические инновации. Постоянное стремление к обновлению в сочетании со здоровым консерватизмом привело к формированию стабильного коллектива профессионалов. Способность к воспроизводству на базе собственной научной школы, тончайшая интеллектуальная работа, глубокий внутренний драматизм, характерные для истинно творческих коллективов, позволили предприятию достичь выдающихся научно-производственных результатов в области разработки и выпуска элементной базы для радиоэлектронной аппаратуры различного назначения.

Безусловно, сейчас важнейшая задача для ФГУП "НПП "Пульсар" – создание условий для динамичного движения вперед. Очевидно, эти условия могут быть реализованы только при наличии таких обязательных составляющих, как сбалансированный работоспособный коллектив, современное оборудование и адекватная система управления. Администрация предприятия начала работу по созданию гибкой высокорентабельной системы технического функционирования и финансово-экономического управления, способной обеспечить в условиях жесткой конкурентной борьбы мировой уровень научно-технологического развития и оплаты труда.

А.Васильев, д.ф-м.н.

В настоящее время ФГУП "НПП "Пульсар" – многопрофильное предприятие, каждое из направлений деятельности которого имеет вполне определенную программу развития. В последние годы приоритетным стало развитие СВЧ-твердотельной электроники. Наряду с традиционной для предприятия разработкой элементной базы активно развиваются работы по созданию и производству комплексированных изделий. Сегодня коллектив предприятия способен решать самые сложные задачи по разработке и производству мощных кремниевых биполярных и полевых транзисторов со структурой металл–диэлектрик–полупроводник (МДП) ВЧ- и СВЧ-диапазонов; мощных переключательных кремниевых МДП-транзисторов и БТИЗ; арсенидгаллиевых полевых транзисторов СВЧ- и КВЧ-диапазонов; фоточувствительных линейных и матричных приборов с зарядовой связью (ПЗС), а также быстродействующих фотоприемных устройств на основе р-і-п-фотодиодов; быстродействующих цифровых и аналоговых микросхем; твердотельных узлов, блоков и модулей для аппаратуры радиолокации, связи, электропитания и других СВЧ-устройств. Выход на рынок твердотельных СВЧ-блоков и модулей для "НПП "Пульсар" не случаен. Он продиктован постоянным усложнением, по требованию заказчика, функциональных параметров СВЧ-блоков и модулей, что и определило необходимость комплексного, сквозного подхода к созданию составных частей аппаратуры.

Этапы разработки мощных транзисторов, внедрения их в производство, создания и изготовления блоков и модулей на их основе синхронизированы во времени и проводятся в едином технологическом цикле. В результате основной электронной компонентной базы на "Пульсаре" стали сложные интегрированные функциональные блоки. И если первоначально это были в основном СВЧ-изделия, то сегодня это уже и модули силовой электроники и фотоэлектроники. Таким образом, предприятие отошло от традиционной схемы: создание транзисторов в полупроводниковом НИИ – внедрение их в производство на полупроводниковом заводе – разработка на их основе в приборостроительном НИИ составных блоков (например, модуля усилителя мощности) – доработка по за-



мечаниям системотехников – внедрение в производство на радиотехническом заводе. При таком подходе на каждом этапе происходят неизбежные объективные и субъективные потери времени и средств, снижение достигаемого технического уровня. Новый подход позволяет не только гибко согласовывать требования к обеспечению необходимых тактико-технических характеристик разрабатываемых комплексов и требования к составным блокам (приемо-передающим модулям, усилителям мощности передатчиков), но и практически в два–три раза сократить сроки их разработок.

Переход к интегрированной элементной базе потребовал структурных изменений процессов разработки и производства изделий СВЧ-электроники. Была проведена реорганизация ФГУП "НПП "Пульсар", направленная на создание единого цикла разработки, производства и испытаний полупроводниковых приборов и устройств на их основе с обеспечением единой инфраструктуры и гибкого управления. Появились участки сборки конечной продукции и проведен комплекс работ для их аттестации. Для обеспечения качества разрабатываемых и выпускаемых изделий твердотельной электроники на предприятии внедрена и действует система управления качеством в соответствии с требованиями "процессного подхода".

Важный фактор, способствовавший созданию современной системы организации разработки и производства новой техники, – совершенствование таких подразделений предприятия, как Испытательный центр и Центр проектирования. В Испытательном центре проводятся механические и климатические испытания, специспытания и испытания на надежность. Средства испытаний и измерений в соответствии с аккредитацией центра отвечают требованиям нормативных документов на методы испытаний. Помещения для проведения испытаний соответствуют установленным требованиям, а профессиональная подготовка и квалификация персонала обеспечивают проведение испытаний полупроводниковых приборов, монолитных интегральных схем (МИС) и СВЧ-модулей на соответствие требованиям современных стандартов. Исходя из технического состояния Испытательного центра и перспектив развития твердотельной электроники, можно констатировать, что одна из важных задач НПП "Пульсар" – планомерное переоснащение центра новым современным высокопроизводительным оборудованием.

Не менее важно и развитие Центра проектирования. Современные средства проектирования позволяют сократить сроки разработки и ускорить освоение изделий. В последние годы на предприятии заложены основы для формирования и развития необходимых комплексов проектирования полупроводниковых приборов, МИС, СВЧ-модулей и устройств на их основе, а также комплексов разработки технологии, документации и технологической оснастки для изготовления комплексированных изделий, расчета их термодинамических харак-



**Рис. 1** Сверхширокополосный четырехканальный приемо-передающий модуль L-диапазона

теристик. Вместе с тем существует потребность в оснащении предприятия современными высокопроизводительными программно-аппаратными средствами для моделирования и проектирования разрабатываемых изделий.

Сегодня ФГУП "НПП "Пульсар" создает изделия, отвечающие самым высоким требованиям. К ним относятся:

- не имеющий аналогов, сверхширокополосный четырехканальный приемо-передающий модуль L-диапазона (1–1,5 ГГц) с выходной мощностью 200 Вт на канал для РЛС с активной фазированной антенной решеткой (АФАР), объединяющий функции госопознавания, международного опознавания и обзорной РЛС и размещаемый в крыле самолета (рис.1). Модуль отличается рекордно малыми габаритами и характеризуется высоким отношением выходной СВЧ-мощности к объему (2 кВт/л). Он позволит поднять энерговооруженность перспективных РЛС с АФАР, предназначенных для самолетов пятого поколения;
- усилительные модули S-диапазона на основе длинноимпульсных мощных СВЧ-транзисторов для обзорных РЛС, работающих с импульсами большой длительности. Модули позволят реализовать твердотельные РЛС с рекордной дальностью действия при высоких значениях эксплуатационного ресурса и надежности;
- усилительные транзисторные модули для передатчиков РЛС.

Вместе с тем принципиальным для дальнейшего развития предприятия является реализация двух инвестиционных проектов. Первый из них предусматривает ввод в строй цеха площадью ~1000 м<sup>2</sup> по производству кремниевых СВЧ- и силовых транзисторов с минимальными топологическими нормами 0,35–0,5 мкм в чистых комнатах класса 100–1000. Проект позволит улучшить энергетические и частотные свойства разрабатываемых и изготавливаемых транзисторов и существенно повысить стабильность их параметров при производстве. Реализация инвестиционного проекта по строительству цеха и производству твердотельных модулей приведет к созданию новых устройств с тактико-техническими характеристиками, не уступающими лучшему зарубежному уровню.

Второй проект направлен на техническое перевооружение и реконструкцию технической базы производства мощных маломощных СВЧ-транзисторов и других изделий твердотельной электроники на основе широкозонных полупроводниковых материалов. Предусматривается создание цеха с чистыми зонами класса 10–100 и сборочного цеха полупроводниковых приборов и МИС, оснащенного современным автоматизированным оборудованием, системами контроля и испытаний.

Освоение новых технологических возможностей обеспечивает решение не только специальных задач, но и создание конкурентоспособных изделий для товаров народного потребления. Планируется выпуск дешевых транзисторов для изделий гражданского назначения, таких как твердотельные СВЧ-печи, способные работать в тяжелых условиях эксплуатации (например, в большегрузных автомобилях, на морских яхтах и т.п.), или медицинская аппаратура для СВЧ-терапии.

За последние годы по основным направлениям деятельности ФГУП "НПП "Пульсар" получены достаточно интересные результаты.

### КРЕМНИЕВЫЕ СВЧ-ТРАНЗИСТОРЫ

Мощный СВЧ-транзистор – основной элемент, определяющий эксплуатационные характеристики современных твердотельных РЛС, в том числе и РЛС с АФАР. Для систем связи, навигации, радиолокации необходимо постоянно совершенствовать мощные кремниевые биполярные транзисторы метрового, дециметрового и сантиметрового диапазонов длин волн. Достигнутый на предприятии технический уровень таких транзисторов приближается к мировому, и разрабатываемые приборы конкурентоспособны по соотношению "цена – уровень параметров".

Для передатчиков радиолокаторов на предприятии разрабатываются серии мощных кремниевых импульсных СВЧ-транзисторов L- и S-диапазонов частот. Для этих транзисто-

ров в зависимости от поставленной задачи существует несколько режимов работы с длительностью 10, 100, 500 мкс и скважностью 100, 10 и 6, соответственно. Так, для целей вторичной радиолокации и опознавания используется короткоимпульсный режим с большой скважностью. В этом случае типовой режим работы транзисторов: длительность импульса – 10 мкс и скважность – 100. Рассматривается возможность создания транзисторов для станции дальнего обнаружения с длительностью радиоимпульса до 3 мс.

Мощность транзисторов L-диапазона при длительности импульса до 10 мкс составляет 500 Вт, при длительности до 100 мкс – 250 Вт, до 500 мкс – 150 Вт. В S-диапазоне при длительностях радиоимпульса до 100 мкс мощность составляет 75 Вт, при 300 мкс – 40 Вт.

Разработаны транзисторы P-диапазона (400 МГц) с мощностью 60 Вт в непрерывном режиме и рекордным КПД, превышающим 70%. Транзисторы предназначены для применения в станциях дальнего обнаружения.

Перспективным представляются и кремниевые МДП-транзисторы для генерации и усиления мощности. В настоящее время во ФГУП "НПП "Пульсар" освоены технологии изготовления ВЧ- и СВЧ-генераторных МДП-транзисторов с продольной МОП-структурой (LMOS, LDMOS), вертикальной МОП-структурой с V-образной канавкой (VVMOS), с двухдиффузионной вертикальной МОП-структурой (VDMOS).

На базе технологии изготовления комплементарных СВЧ биполярных n-p-n- и p-n-p-транзисторов с граничными частотами до 3 ГГц создан ряд аналоговых широкополосных быстродействующих усилителей с рекордными для отечественных микросхем динамическими параметрами. На сегодняшний день микросхемы серий 1432 и 1481, выпускаемые ФГУП "НПП "Пульсар" и поставляемые, в том числе и с приемкой заказчика, позволили закрыть потребность отечественных предприятий-разработчиков РЭА в микросхемах операционных усилителей, буферных усилителей и компараторов СВЧ-диапазона.

### СВЧ-МОДУЛИ И БЛОКИ

Фундаментальная проблема современных СВЧ-усилителей мощности для твердотельных РЛС, уровень излучаемой импульсной мощности которых лежит в пределах от 10 до 40 кВт, – сложение мощностей многих транзисторных каскадов. Использование сумматоров типа "бегущей волны" обеспечивает суммарную импульсную мощность 3,0 кВт на частотах 1–1,3 ГГц и 800 Вт на частоте 2,7–2,9 ГГц в результате эффективного сложения до 16 каскадов, смонтированных в одном корпусе модуля. В НПП "Пульсар" разработаны и выпускаются модули L-диапазона с выходной мощностью 1,5 кВт с жидкостным охлаждением. Предназначены модули для трассовых и аэродромных РЛС УВД. В настоящее время они используются в шести станциях "УТЕС-Т".

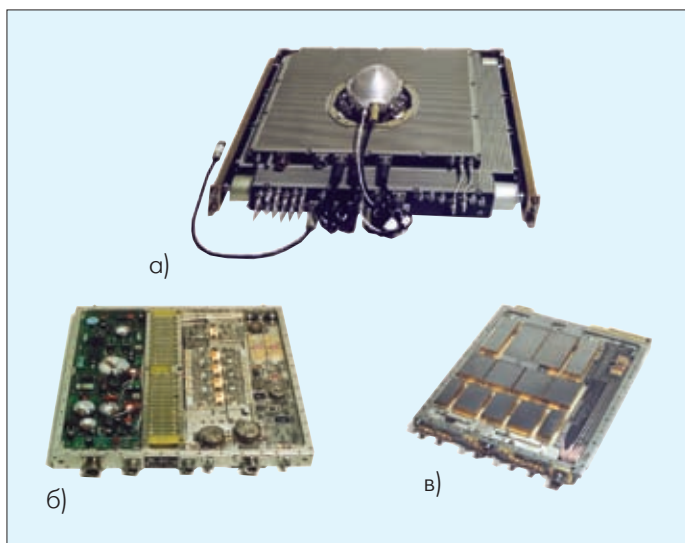


Рис. 2. Модули формирователя сигнала гетеродина и передатчика (а); выходного усилителя мощности (б); примеопередатчика (в)



Изготовлены несколько десятков передатчиков вторичных радиолокаторов с выходной мощностью до 3 кВт. Разработаны и начато серийное производство следующих модулей:

- передатчика команд для модернизированного комплекса "Печора-2М" с выходной мощностью до 2,5 кВт;
- модуля для передатчиков корабельной РЛС;
- комплектов передающих модулей S-диапазона для АФАР зенитно-ракетного комплекса (ЗРК) "Панцирь" (рис.2);
- четырехканального приемо-передающего модуля для опытного образца подвижного радиолокационного комплекса с АФАР и выходной мощностью в каждом канале 100 Вт и длительностью импульса 500 мкс.

Ведется работа по созданию восьмиканальных передающих модулей S-диапазона для опытного образца подвижного радиолокационного комплекса с АФАР и выходной мощностью 50 Вт в каждом канале. Разрабатываются твердотельные модули для РЛС двойного назначения и для передатчика с выходной мощностью 800 Вт и длительностью импульса 300 мкс, которые обеспечат требуемые энергетические характеристики РЛС.

В ближайшее время ФГУП "НПП "Пульсар" сможет удовлетворить потребности рынка и выпускать до нескольких тысяч кремниевых СВЧ-модулей в год.

### **СВЧ-ПРИБОРЫ, МИС, БЛОКИ И МОДУЛИ НА ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ СОЕДИНЕНИЯХ А<sup>3</sup>В<sup>5</sup>**

НПП "Пульсар" успешно освоена технология производства приборов на арсениде галлия и нитриде галлия. На основе GaAs разработан ряд изделий для приемо-передающих модулей АФАР и твердотельных СВЧ-усилителей X-диапазона. Эти изделия являются компонентной базой широкого применения. В первую очередь можно отметить следующие наиболее важные разработки:

- МИС защиты приемника с потерями 0,2–0,3 дБ в диапазоне 1–18 ГГц и  $P_{\text{вх}} = 10$  Вт при  $P_{\text{вх}} = 10$  мВт;
- МИС фазостабильного усилителя с управляемым коэффициентом передачи на рабочую частоту 10 ГГц;
- МИС шестиразрядного фазовращателя на диапазон частот 9,5–10,5 ГГц;
- полевой транзистор с барьером Шоттки (ПТБШ) для предварительного усилителя с выходной мощностью 1 Вт и внутрисогласованный транзистор с выходной мощностью 10 Вт на частоте 10 ГГц;
- переключающие СВЧ-диоды А569-5, позволяющие коммутировать импульсы мощностью до 400 Вт и скважностью 20 при длительности 130 мкс.

Ведется разработка приборов на основе pHEMT-структур и гетероструктур AlGaIn/GaN, а также маломощных СВЧ-транзисторов на сапфировых подложках, обеспечивающих на частоте 10 ГГц коэффициент шума не более 2,7 дБ и коэффициент усиления не менее 10 дБ, а также обладающих высоким уровнем ус-

тойчивости к ионизирующему воздействию. Созданные на предприятии СВЧ-транзисторы выдерживают на входе уровень СВЧ-мощности более 30 Вт, что позволяет использовать их в приемо-передатчиках АФАР без дополнительных устройств защиты. Применение маломощных антенных усилителей без устройств защиты весьма выигрышно для модулей АФАР вследствие жестких ограничений на габаритные размеры усилителей.

Созданные транзисторные GaN-структуры на сапфировой подложке с длиной активной области 300 нм и шириной затвора 0,06; 0,5; 1,5 и 5,6 мм уже сейчас могут найти применение в радиолокационных системах, работающих в короткоимпульсном режиме. Средняя мощность в непрерывном режиме транзисторного кристалла с шириной затвора 0,5 мм достигает 500 мВт. На базе кристалла, содержащего транзистор с шириной затвора 5,6 мм, разработаны четырех- и восьмикристалльные приборы. При длительности радиоимпульсного сигнала менее 200 нс и периоде повторения 200 мкс значение пиковой мощности достигает 350 Вт. СВЧ-транзисторы, работающие в короткоимпульсном режиме, могут найти применение в твердотельных АФАР нового поколения для систем ПВО, ПРО, в авиационных системах и системах морского базирования, работающих с наносекундными зондирующими импульсами и предназначенных для разрешения близко летящих объектов.



9 июня 2008 года Андрею Георгиевичу Васильеву – доктору физико-математических наук, профессору, генеральному директору ФГУП "НПП "Пульсар", исполняется 50 лет.

Коллектив ФГУП "НПП "Пульсар", научно-технический совет предприятия и редакция журнала "ЭЛЕКТРОНИКА: НТБ" сердечно поздравляют Андрея Георгиевича с 50-летием, желают юбиляру здоровья, личного счастья и творческих успехов в работе!

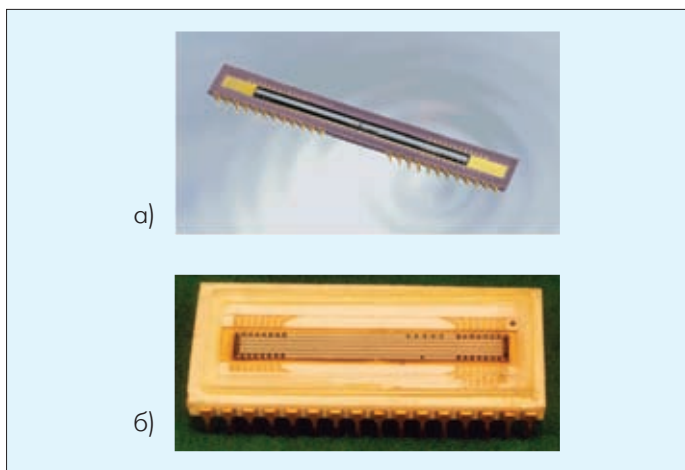


Рис.3. Однострочный (а) и спектрозональный (б) линейные ЛПТ

Разработанные на предприятии GaN-структуры на подложках карбида кремния позволят реализовать СВЧ-транзисторы с непрерывной мощностью 200 Вт в С-диапазоне и не менее 80 Вт в Х-диапазоне. В сочетании с SiGe МИС, обеспечивающими адаптивное фазирование активных транзисторных структур, такие устройства смогут заменить электровакуумные СВЧ-приборы в передатчиках современных РЛС ЗРК и обеспечить твердотельными СВЧ-приемопределяющими модулями вновь разрабатываемые АФАР.

На основе широкозонных транзисторов и МИС на предприятии созданы и выпускаются передающие СВЧ-модули С- и Х-диапазонов, СВЧ-приемники и формирователи сигналов, в том числе для РЛС морского базирования и РЛС ЗРК "Панцирь". Разрабатываются твердотельные СВЧ-передатчики со сложением мощности в волноводном тракте С-диапазона (уровень средней мощности до 3 кВт, суммирование 64 твердотельных модулей) и Х-диапазона (уровень средней мощности до 800 Вт, суммирование 64 твердотельных модулей).

В СВЧ-приемниках S- и Х-диапазонов и в СВЧ-модулях формирователей сигналов импортируемые монолитные интегральные схемы заменены разработанными и выпускаемыми НПП "Пульсар" SiGe-микросхемами.

Таким образом, в последнее время в области разработки и производства СВЧ-транзисторов, МИС, СВЧ-блоков и модулей ФГУП "НПП "Пульсар" провел комплекс организационно-технических мероприятий, направленных на расширение возможностей предприятия по созданию новых изделий.

Но не СВЧ-приборами едиными жив ФГУП "НПП "Пульсар".

### СИЛОВАЯ ЭЛЕКТРОНИКА

Изделия силовой электроники, схемы управления и обработки сигналов – составная часть СВЧ-модулей. ФГУП "НПП "Пульсар" владеет всеми технологиями создания приборов силовой электроники: биполярных и МДП-транзисторов, быстродействующих диодов, IGBT на напряжение от 30 до 1200 В.

Предприятию удалось сохранить комплекс конструктивно-исполнения силовых приборов, все типы металлостеклянных и металлокерамических корпусов, все операции сборки и испытаний. В результате в кратчайшие сроки разработаны и освоены в производстве мощные микросхемы типа 281ЕП1 и 288ЕП7, силовые транзисторы 2Т9113, мощные диоды 2Д2992. Вместо диода в пластмассовом корпусе предложено новое конструктивное решение быстродействующего диода 2Д237 в металлокерамическом корпусе.

Применение силовых приборов собственного производства позволило улучшить характеристики блоков питания, которые разрабатываются на предприятии для собственной аппаратуры, такой как СВЧ-модули РЛС, комплекс автоматики и стабилизации напряжения электропитания малых космических аппаратов (МКА) и других. На предприятии создана серия силовых МДП-транзисторов и модулей на ток до 200 А и напряжение до 1200 В. Для модулей на ток 200 А найдено перспективное конструктивное решение – сборка в плоский металлокерамический корпус. В процессе создания этого модуля также решены многие задачи сборки многокристалльных приборов для специальной техники, которые существенно отличаются от приборов промышленного назначения. Найденные решения приняты за основу при создании модулей на токи до 2 кА, в том числе высоковольтных, необходимость в которых выявлена в ходе контактов с представителями РАО ЕЭС, ОАО РЖД и др.

### ФОТОЭЛЕКТРОНИКА

Основная продукция ФГУП "НПП "Пульсар" в области фотоэлектроники – интегрированные блоки, включающие фотоприемник, схемы управления и обработки сигнала. Накопленный за более чем 35 лет багаж знаний позволяет разрабатывать новые технологии твердотельных фотоприемников широкого спектрального диапазона (включая УФ-, видимый и дальний ИК-диапазоны), отвечающих требованиям и вызовам времени и не уступающих по своим характеристикам лучшим зарубежным образцам. К ним относятся линейные ПЗС с числом элементов 12288×1, матричные ПЗС с временной задержкой и накоплением, размером пиксела 6×6 мкм и разрешением более 2048×128 пикселей; мультиплексоры и ИК-фотоприемники формата 2×256, а также специализированные ПЗС для решения задач оптико-электронной локации. На рис.3 приведены фотографии однострочного и спектрозонального линейных ПЗС.

С помощью глубокого ориентированного травления кремния созданы мембранные структуры и МЭМС-системы на их основе. Для широкоформатных фокальных плоскостей разработаны ИК-приемники на основе примесного кремния. Разработаны технологии тепловидения высокой четкости; формирования гетероструктур на основе широкозонных материалов (алмаза, нитрида галлия-алюминия); солнечно-слепых УФ-фотоприемников; гибридных схем на основе объединения ПЗС, мультиплексоров на базе комплементарных МДП-транзисторов и ИК-фотоприемни-



ков на индиевых столбиках. Для приборов ночного видения нового поколения созданы полноформатные электронно-чувствительные ПЗС, встраиваемые в вакуумный объем ЭОПов.

Освоение производства изделий фотоэлектроники на кремниевых пластинах диаметром 150 мм с минимальным размером 0,35 мкм позволяет изготавливать заказные фотоприемники и мультиплексоры на ПЗС и КМДП-структурах, а также унифицированные оптико-электронные модули на их основе с рекордными параметрами, сопоставимыми с характеристиками лучших мировых образцов. К ним относятся:

- линейные однострочные и спектрональные многоканальные фотоприемники, формирующие черно-белое и цветное изображения с разрешением 15000–18000 пикселей в строке и размером пиксела 3–2,5 мкм;
- матричные фотоприемники с кадровым переносом формата, размером ячейки до 2,5×2,5 мкм и разрешением до 8192×8192 пикселей, а также матричные фотоприемники с межстрочным переносом формата с размером ячейки 5×5 мкм и разрешением 4196×4196 пикселей;
- электронно-чувствительные матричные ПЗС с разрешением 1024×1024 пикселей и оптическим форматом один дюйм;
- мультиплексоры и полноформатные ИК-фотоприемники формата 512×640 и сканируемые ИК-фотоприемники формата 8×960 для систем тепловидения высокой четкости.

Решая текущие проблемы, мы постоянно помним, что ФГУП "НПП "Пульсар" всегда был и остается флагманом отечественной полупроводниковой электроники. Стремительное развитие техники и технологии побуждает предприятие быть готовым к очередным инновациям. Не за горами переход к следующему поколению элементной базы твердотельной СВЧ- и силовой электроники – функционально-законченным СВЧ-модулям в виде гибридных интегральных схем, интеллектуальным силовым модулям в виде "система в корпусе".

Убежден, впереди у "Пульсара" еще не одна творческая победа. У нас есть основания для оптимизма. Страна повернулась в сторону производителей наукоемкой продукции, крепнет осознание необходимости построения современного хорошо оснащенного научно-производственного центра по разработке и производству современной элементной базы твердотельной электроники. ФГУП "НПП "Пульсар" сохранил выдающуюся школу разработчиков полупроводниковой элементной базы, встал на путь омоложения кадров и приступил к кардинальному техническому перевооружению.

Все это позволит обеспечить в ближайшие годы в России разработку и производство элементной базы СВЧ-, силовой и фотоэлектроники мирового уровня. ○