

УДК 621.383

# Фотоприемники и фотоприемные устройства на основе поликристаллических и эпитаксиальных слоев халькогенидов свинца

В. Г. Буткевич, В. Д. Бочков, Е. Р. Глобус

Государственное Унитарное Предприятие «НПО «ОРИОН», Москва, Россия

*В статье приводится краткий обзор проведенных в НПО «Орион» (НИИПФ) исследований и разработок фотоприемников (ФП) на основе фоточувствительных поликристаллических и монокристаллических слоев сульфида и селенида свинца, фотоприемных устройств (ФПУ) и технологий их изготовления, выполненных в период 1960—2000 г.*

## 1. Введение

Фотоэлектрические приемники излучения для спектрального диапазона 1—6 мкм из сернистого и селенистого свинца известны уже более 50 лет.

Однако, несмотря на появление в последующие годы большого разнообразия ФП из других полупроводниковых материалов, пленочные ФП из халькогенидов свинца не теряют своей актуальности благодаря высокому уровню фотоэлектрических параметров в спектральных диапазонах 1—3 и 3—5 мкм, отсутствию необходимости глубокого охлаждения и сравнительно низкой стоимости.

Начало развития техники изготовления фотоприемников из халькогенидов свинца следует отнести к первой половине 30-х годов XX столетия, когда немецким исследователем Кутцшером было открыто явление фотопроводимости в естественных кристаллах сульфида свинца (галенит). Обнаруженная им относительно высокая чувствительность этих кристаллов в ближней ИК—области спектра вызвала значительный интерес.

Интенсивное развитие методов изготовления тонких фоточувствительных слоев (ФЧС) PbS происходило в годы 2-ой мировой войны в Германии, а затем (с 1944 г) в Англии и США.

В США высокочувствительные фоторезисторы (ФР) были изготовлены Кэшменом путем перегонки слоя PbS в запаянной ампуле в среде разреженного кислорода. Аналогичные ФР, изготавливавшиеся в Англии, были описаны Сосновским, Старкевичем и Симпсоном в 1946 и 1947 г. [1].

Первые ФР из селенистого свинца были изготовлены методом испарения в вакууме на стеклянные подложки Симпсоном [2] и Моссом и Чесмером [3]. Эти ФР обладали относительно высокой чувствительностью при температуре ниже 195К.

Не останавливаясь далее на истории развития работ по ФП на основе PbS и PbSe (прекрасный обзор Л. Н. Курбатова [4], посвященный этому вопросу был недавно опубликован), следует отметить, что все последующие годы на многочисленных зарубежных фирмах велись интенсивные работы

по созданию более совершенных технологий изготовления таких фотоприемников.

Так, согласно аналитическому отчету фирмы Frost and Sullivan за 1995 г., посвященному анализу мирового рынка в области инфракрасной техники, количество выпущенных в США различных систем с использованием ФР из PbS и PbSe, составило в 1994 г. 32400 единиц. К 2001 году ожидалось увеличение выпуска до 82700 единиц. Для сравнения — аналогичные показатели для фотоприемников из КРТ составляют 4100 и 6600, а для ФП из InSb—2800 и 5800 соответственно. Это объясняется тем, что ФР на основе PbS и PbSe применяются в сравнительно массовой продукции как военного (тепловые головки самонаведения, противотанковые системы и др.), так и гражданского назначения (противопожарные и охранные системы, приборы для спектрального анализа и др.), отличающейся относительно низкой стоимостью.

В последние годы в США и других странах непрерывно возрастает объем финансирования разработок новых технологий, конструкций и микроэлектроники, направленных на создание многоэлементных и матричных фотоприемников и фотоприемных устройств для различных систем тепловидения, как военного, так и гражданского применения. В связи с этим многие разработки фотоприемников направлены на создание технологий, совместимых с промышленной технологией кремниевых микроэлектронных схем, что позволяет создавать монолитные и гибридные фотоприемные устройства (ФПУ), содержащие наряду с фоточувствительными структурами микроэлектронные устройства обработки и считывания информации, воспринимаемой фотоприемником.

В качестве примера можно привести работу I. M. Martin, I. L. Hernandez и др. [5], в которой на современном оборудовании методом термического испарения в вакууме, изготавливались многоэлементные линейчатые структуры PbSe на высокоомном окисленном кремнии с последующей активацией в строго контролируемом потоке  $O_2 + I_2$ .

Разделение сплошного слоя PbSe на отдельные элементы осуществлялось фотолитографией или ионным травлением. Пассивация поверхности ФР производилась напылением пленки  $SiO_2$ , которая помимо защитных функций выполняла роль просветляющего покрытия.

Интересные данные по разработке матричных фотоприемников PbS и PbSe на кремниевых подложках представлены в работе Г. А. Агранова и др. [6]. Авторами описываются технология, конструкция и схемотехника матричного фотоприемника для тепловизионной аппаратуры.

За счет получения и использования достаточно высокоомных слоев PbS и PbSe авторы предложили изготавливать фоторезистивные матрицы со сплошным фоточувствительным слоем с общим числом элементов десятки и сотни тысяч, определяемым лишь возможностями фотолитографического процесса при формировании системы проводящих электродов.

Опрос элементов матрицы производится в этом случае по схеме с  $x-u$  адресацией, выполненной на основе кремниевых чипов многоканальных аналоговых микромошных мультиплексоров.

Значительные успехи в области технологии позволили к настоящему времени создать фотоприемники на основе PbS и PbSe, обнаружительная способность которых при неглубоком охлаждении близка к теоретическому пределу.

Изделия с указанными параметрами были в частности представлены фирмой Textron на выставке в Орландо (США) в 1998 году. В каталоге фирмы и в техническом описании (technical notes № 109) указывается, что лучшие образцы фотоприемников PbSe (или лучшие элементы многоэлементных ФР) при рабочей температуре минус 80°C и частоте модуляции 8000 Гц достигают значений  $D^*(\lambda, f_M, 1) = 1 \cdot 10^{11}$  см·Гц<sup>1/2</sup>·Вт<sup>-1</sup> при  $\lambda = 5$  мкм, что отличается от значения  $D^*(\lambda, f_M, 1)$  для идеального фоторезистора всего в 1,3 раза.

При этом делается вывод, что для диапазона спектра 3—5 мкм ФР из PbSe являются наиболее предпочтительными для большинства решаемых с помощью фотоприемников задач.

В Советском Союзе разработки ФР из халькогенидов свинца (PbS, PbSe и PbTe) были начаты в 1944—1946 г. в нескольких организациях. Работы проводились в ГОИ им. С. И. Вавилова в лаборатории С. П. Тибилова, в ФТИ АН СССР им. А. Ф. Иоффе в лаборатории Б. Т. Коломийца, в НИИ РЭ МСП в лаборатории А. С. Егорова-Кузьмина, в НИИПФ МОП в лаборатории Н. С. Хлебникова и в ВЭИ им. В. Ленина в лаборатории К. А. Юматова.

Острая необходимость существенного усовершенствования PbS — фоторезисторов и организации их серийного производства возникла в нашей стране в 1958 г., когда решением правительства перед разработчиками была поставлена задача создания в короткие сроки фоторезисторов для авиационной тепловой головки самонаведения и неконтактного оптического взрывателя. Эта работа была поручена НИИПФ, но на начальном ее этапе в ней приняли участие практически все организации Союза, имевшие опыт разработки фоторезисторов из сернистого свинца.

Разработанные к этому времени методики позволяли изготавливать не охлаждаемые фоторезисторы с обнаружительной способностью в 2—2,5 раза хуже требуемой при весьма низкой воспроизводимости технологических процессов.

В процессе работы были подвергнуты детальному анализу все известные методы изготовления поликристаллических слоев PbS и разработаны программы их усовершенствования. Для решения поставленных задач в НИИПФ в 1959 г. были организованы две специализированные лаборатории, руководство которыми было поручено В. Г. Буткевичу — разработка технологии на базе методов изготовления фоточувствительных слоев испарением

## 2. Технология изготовления фоточувствительных слоев PbS

Физический метод изготовления фоточувствительных слоев PbS и PbSe предусматривает испарение из тигля в вакууме исходного продукта (PbS и PbSe) на стеклянную или кварцевую подложку до образования тонкого ( $h \approx 0,5$ —2,0 мкм) поликристаллического слоя. Эти слои затем подвергаются высокотемпературному (400—600°C) прогреву в атмосфере, содержащей кислород, после чего на них термическим испарением в вакууме наносятся тонкопленочные контакты из золота.

Слои, полученные испарением в вакууме, имеют мелкокристаллическую структуру с размером зерен порядка сотых долей мкм и практически не обладают фоточувствительностью.

В процессе активации происходит собирательная рекристаллизация, размеры индивидуальных микрокристаллитов увеличиваются до долей и единиц микрон, совершенствуется структура слоя, резко возрастает время жизни основных носителей тока, возникает заметная фоточувствительность.

Воспроизводимость изготовления слоев PbS с требуемым уровнем фоточувствительности на начальном этапе разработки ( $D^*(573, 400, 1, 2\pi) \geq 7 \cdot 10^8$ ) была крайне низкой. Это было связано с тем, что структура и свойства тонкой поликристаллической полупроводниковой пленки определяются множеством влияющих на них технологических факторов. К ним в частности относятся:

- чистота и стехиометрический состав исходного вещества;
- материал и физико-химические свойства поверхности подложки;
- материал тигля, его температура, скорость испарения вещества и стехиометрический состав вещества в пленке;
- температура подложки в процессе конденсации пленки;
- толщина, плотность и структура образовавшейся пленки;
- температурный режим активации и состав окружающей среды.

В течение 60—70-х г. был проведен большой комплекс работ по усовершенствованию технологического оборудования и методов контроля технологических процессов.

Процесс нанесения слоев PbS стал проводиться в более высоком и чистом вакууме, были разработаны специальные тигли и устройства, позволяющие более точно воспроизводить стехиометрический состав пленки; исходный продукт подвергался дополнительной перегонке и легированию с последующим анализом содержания основных компонентов и примесей. Перед процессом активации проверялась оптическая плотность и толщина слоев, что позволяло корректировать температурный режим активации.

Для активации стали использоваться муфельные печи, укомплектованные рядом устройств, обеспечивающих точный контроль температуры и ее равномерность в зоне расположения слоев. Был введен также непрерывный контроль изменения сопротивления слоев в процессе активации с параллельным исследованием структурных, электрофизических и микрокристаллических характеристик слоев, что позволило отработать температурно-временные режимы активации и связать их с исходными характеристиками слоев. Проведенные исследования и разработки позволили создать технологию, обеспечившую достижение требуемых параметров и характеристик фоточувствительных слоев с последующей организацией серийного производства изделий на заводе «Сапфир».

Химический метод изготовления слоев PbS впервые был описан в статье Брюкмана, предусматривающей осаждение слоев PbS на подложку из ванны, содержащей ацетат свинца, тиомочевину и гидроокись натрия. Образование слоя PbS происходит в результате реакции взаимодействия между растворимой солью свинца Pb  $(\text{CH}_3\text{COO})_2$  и тиомочевинной  $(\text{NH}_2)_2\text{CS}$ , протекающей в щелочной среде. На поверхности подложки происходит рост кристаллитов из первоначально образовавшихся центров кристаллизации.

К моменту окончания процесса микрокристаллиты образуют тонкую, сплошную поликристаллическую пленку, прочно сцепленную с подложкой. В состав пленки кроме сульфида свинца входят примесные фазы — кислотосодержащие соли свинца.

Существует множество вариантов процесса осаждения пленок PbS из ванн указанного состава. Варьируя начальные условия процесса — концентрацию реагентов, порядок их смешения, температуру и др., можно получать пленки, различные по толщине, структуре, составу и физическим свойствам.

Значительным преимуществом метода химического осаждения является его относительная простота, отсутствие необходимости применения сложного и дорогостоящего оборудования, малые энергозатраты и др.

Первоначально известные методики химического осаждения, как и в случае физического метода, не позволяли изготавливать ФЧС с требуемым уровнем фотоэлектрических параметров и отличались низкой воспроизводимостью.

В 1958 г. в ГОИ им. С. И. Вавилова, под руководством С. П. Тибилова, М. С. Давыдова и Л. Н. Курбатова была начата интенсивная работа по созданию новой методики химического осаждения, которая базировалась на способе, описанном в 1956 г. голландским исследователем Блоэмом. Вместо гидроокиси натрия им было предложено ввести в раствор гидразин-гидрат. Гидразин, являющийся сильным восстановителем, способствует образованию такого состава и структуры пленки, которые, в отличие от предыдущих методик, не требуют проведения последующей высокотемпературной активации. Равные части водных растворов гидразин-гидрата и ацетата свинца с тиомочевинной смешивались при комнатной температуре, в него погружалась стеклянная или кварцевая пластина-подложка и раствор нагревался до 100°C в водяной бане.

Высаженные на подложку слои PbS имели довольно высокое сопротивление и электронный тип проводимости. На воздухе слои быстро меняли тип проводимости на дырочный и приобретали при этом достаточно высокую фоточувствительность. На основе этого способа в ГОИ им. С. И. Вавилова была разработана методика изготовления ФЧС для неохлаждаемых фоторезисторов типа 04АН, параметры и характеристики которых удовлетворяли заданным требованиям по обнаружительной способности ( $D^* (573,400,1,2\pi) = 7,0 \cdot 10^8 \text{ Вт}^{-1} \cdot \text{см} \cdot \text{Гц}^{1/2}$ ).

Дальнейшее усовершенствование этой методики и разработка на ее основе промышленной технологии изготовления различных неохлаждаемых PbS-фоторезисторов проводились в лаборатории Е. А. Красовского А. А. Гольденвейзером, Е. Р. Глобусом, Л. Н. Залевской и др.

Однако, необходимый уровень обнаружительной способности для охлаждаемых ( $T_r = 195\text{К}$ ) эта технология не обеспечивала.

Кроме того, существенными недостатками этой технологии являлись токсичность гидразина и его пожароопасность.

Стремление создать процесс без использования гидразина или гидразин-гидрата явилось стимулом для проведения новых разработок, выполнявшихся в лаборатории А. А. Гольденвейзера под руководством Л. Н. Залевской.

За основу был взят процесс осаждения, проводившийся в сильнощелочной среде, создававшейся NaOH. В ванну вводились также добавки в виде солей сульфокислот, обладающих сильным восстановительным действием. Неотъемлемым элементом этих новых процессов явилось использование подложек с развитым микрорельефом поверхности, который, как правило, создавался механическим матированием.

Исследования в этом направлении позволили получить два принципиально важных результата. Во-первых, была создана технология получения слоев PbS для неохлаждаемых фотоприемников, обладающих высоким уровнем  $D^*$  и в то же время предельно малой для таких фотоприемников инерционностью ( $\tau < 100$  мкс). Во-вторых, была разработана технология изготовления слоев PbS, оптимизированных для использования при неглубоком охлаждении, с обнаружительной способностью, близкой к пределу, ограниченному флуктуациями фона. В обоих процессах осаждение проводится при комнатной температуре, в условиях, приближающихся к равновесным.

Эти технологические процессы были в дальнейшем использованы, в частности, при выполнении ответственных разработок многоэлементных фотоприемников и фотоприемных устройств для космических тепlopеленгаторов.

Исходя из большого разнообразия требований к фотоприемникам разработчиков различной аппаратуры, важным направлением дальнейших работ являлась разработка способов управления характеристиками и параметрами слоев PbS путем целенаправленного варьирования составом ванн и условиями их осаждения. Прогресс в этом направлении стал возможен благодаря детальному изучению реакции, протекающей между солью свинца и тиомочевинной в щелочной среде, выполненному в Уральском Политехническом институте под руководством проф. Г. А. Китаева. Было показано, что, целенаправленно изменяя условия проведения процесса осаждения — состав ванны и, следовательно, пересыщения по PbS и другим твердофазным продуктам реакции, характер обработки подложки и, следовательно, поверхностную плотность центров кристаллизации, продолжительность и число осадений на одну подложку, количество и силу добавляемого восстановителя и тем самым степень компенсации материала, составляющего внутренний объем кристаллитов, можно выработать методы управления составом, структурой и фотоэлектрическими характеристиками слоев PbS.

Следует заметить, что изменять любую характеристику слоя, не изменяя остальные, невозможно. Однако, в большинстве случаев, обоснованно выбирая условия проведения процесса, можно свести неблагоприятные изменения к минимуму. Проведенные исследования позволили практически реализовать возможности управления характеристиками осаждаемых слоев PbS при использовании сильнощелочной ванны с добавкой сульфокислот.

При рабочей температуре  $T_p = 293$  К и условии, что обнаружительная способность изготавливаемых слоев  $D^*(\lambda_{max})$  не должна быть ниже  $5,0 \cdot 10^{10}$  см $\cdot$ Вт $^{-1}$ ·Гц $^{1/2}$  (обычный интервал  $[5,0—15,0] \cdot 10^{10}$  см $\cdot$ Вт $^{-1}$ ·Гц $^{1/2}$ ), возможная вариация отдельных параметров имеет следующие значения:

— темновое сопротивление, R, кОм	100–2000
— постоянная времени, $\tau$ , мкс	50–400
— длинноволновая граница спектральной характеристики, $\lambda_{max}$ , мкм	2,2–2,7.

### 3. Технология изготовления фоточувствительных слоев PbSe

Фоточувствительные слои PbSe, как и PbS, изготавливаются как методом испарения в вакууме (физический метод), так и осаждением из растворов (химический метод).

В период с 1947 г. по 1963 г. в Советском Союзе изготовление фотоприемников на основе слоев PbSe производилось физическим методом в ЛФТИ АН СССР им. А. Ф. Иоффе, в НИИ «Гириконд», а также в НИИПФ С. А. Кауфманом и А. Е. Меламидом в лаборатории Н. С. Хлебникова.

Разработанная в НИИПФ методика позволяла изготавливать охлаждаемые до 77К фоторезисторы с величиной  $D^* \{100, 400, 1, 2\pi\} \approx 1 \cdot 10^9 \text{ Вт}^{-1} \cdot \text{см} \cdot \text{Гц}^{1/2}$ , чувствительные в диапазоне длин волн 2—6 мкм. В своих основных чертах метод изготовления слоев PbSe был близок к физическому методу изготовления слоев PbS.

Методика химического осаждения слоев PbSe разрабатывалась в 70-х годах в ГОИ им. С. И. Вавилова М. С. Давыдовым в лаборатории С. П. Тибилова. В основу разработки была положена появившаяся публикация о разработанной фирмой SBRC (США) рецептуре изготовления как охлаждаемых PbSe (LTO типа для 77 К и ITO типа для 195 К), так и неохлаждаемых (ATO-типа).

В основе методов SBRC и ГОИ лежит реакция, протекающая в растворе между солью свинца и селеномочевинной в присутствии соединений, содержащих ион йода  $I^-$ .

Активация слоев, предназначенных для работы при 77 К, производится прогревом в атмосфере воздуха при температуре 350—400°C. Слои, предназначенные для работы при охлаждении до 195К и неохлаждаемые, помимо обычной активации, дополнительно обрабатываются в парах галогена — брома или иода.

Получаемые параметры слоев PbSe LTO типа приведены в табл. 1.

Таблица 1

$D^* (573, 400, 1, 2\pi)$ $\text{Вт}^{-1} \cdot \text{см} \cdot \text{Гц}^{1/2}$	$D^* (\lambda_{\text{max}})$ , $\text{Вт}^{-1} \cdot \text{см} \cdot \text{Гц}^{1/2}$	$\lambda_{\text{max}}$ , мкм	$\lambda_{0,1}$ , мкм	$\tau$ , мкс
$\sim 3 \cdot 10^9$	$(2-3) \cdot 10^{10}$	$3,6 \div 4,0$	$5,6 \div 5,8$	$\leq 50$

Получить высокие фотоэлектрические параметры для слоев ITO и ATO-типов по методике ГОИ не удавалось.

Недостатками методов SBRC являлись необходимость введения чрезвычайно сложной и трудноконтролируемой операции обработки слоев в парах галогенов и трудность осуществления сложного во времени температурного режима осаждения.

Методика, предложенная ГОИ, позволила частично преодолеть эти трудности за счет изменения состава ванны, в которую были дополнительно введены ацетат аммония, этилендиамин и иодистый калий. Кроме того, для улучшения адгезии слоев PbSe к подложке на них предварительно наносится тонкий подслой  $\text{TiO}_2$ .

В начале 70-х годов, в связи с остро возникшей потребностью в малогабаритных неохлаждаемых и охлаждаемых с помощью миниатюрных термоэлектрических охладителей (ТЭО) фотоприемниках на основе PbSe, в

НИИПФ был развернут соответствующий комплекс работ в лаборатории, руководимой В. Г. Буткевичем. Разработка соответствующей методики химического осаждения слоев PbSe выполнялась группой под руководством И. В. Корнеевой.

За основу разрабатываемой в НИИПФ технологии изготовления неохлаждаемых и охлаждаемых до промежуточных температур слоев PbSe был взят метод ГОИ.

В результате проведения ряда научно-исследовательских работ, в которых приняли участие и сотрудники ГОИ, были изучены процесс формирования слоев, влияние состава ванны и условий осаждения на микрокристаллическую структуру. Состав ванны был скорректирован в сторону понижения концентрации основных реагентов.

Кроме того, в состав ванны было дополнительно введено хлористое олово. Это позволило получать слои с более упорядоченной кристаллической структурой, более плотные и однородные, с лучшей адгезией к подложке без применения подслоя  $TiO_2$ . Добавка раствора соли хлористого олова в соляной кислоте вводилась в смесь ацетата свинца, ацетата аммония и этилендиамина до погружения в раствор подложки. При этом в условиях  $pH \approx 9,0$  происходит гидролиз хлористого олова с образованием гидроокиси олова. Зерна гидроокиси, конденсируясь на подложке, становятся центрами кристаллизации, на которых после введения в раствор селеномочевины происходит наращивание слоев селенида свинца. Кроме того, соли двухвалентного олова, являясь сильными восстановителями, предотвращают окисление селеномочевины и уменьшают вероятность попадания в слой элементарного селена. Слои, получаемые из этой ванны, имеют практически одинаковый внешний вид, равномерны по толщине ( $0,5 \div 0,6$  мкм) и по темновому сопротивлению.

Для нагревания смеси первоначально использовался специально сконструированный электронагревательный элемент, погружавшийся в раствор. Позднее аппаратура для осаждения была усовершенствована с введением внешнего источника нагрева — инфракрасной лампы.

Учитывая особую роль иода в процессе формирования пленки, была разработана специальная методика количественного определения его содержания в слоях, осажденных из разных ванн, до и после их активации. Результаты анализа показали, что слабо-щелочная ванна, предложенная ГОИ, обеспечивает на порядок более высокую концентрацию иода в пленках, по сравнению с ванной SBRC, что объясняет более высокую степень их компенсации, установленную холловскими измерениями. Было также показано, что при активации содержание иода в пленках уменьшается, вероятно, за счет термической диссоциации иод-содержащих соединений с выделением элементарного иода из пленки. Это привело к мысли создать при активации условия, препятствующие быстрому удалению иода из сферы реакции. Такие условия можно создать, проводя активацию в замкнутом (запаянная ампула) или ограниченном (бюкс) объеме. Выделяющийся в этих условиях иод при повышенной температуре может повторно вступать в реакцию с материалом, что по существу равноценно дополнительной обработке пленки в парах галогена. В этой связи была проведена большая работа с целью установления оптимальных условий активации пленок в

ограниченном объеме. Было установлено, что заметная фоточувствительность начинает появляться при достижении температуры активации  $320^{\circ}\text{C}$ . После прогрева до температуры  $360^{\circ}\text{C}$  фоточувствительность падает. Электрофизические измерения, проведенные в лаборатории физических измерений, руководимой С. Н. Федоровым, показали, что неактивированные слои, осажденные с иодом и оловом, во всех случаях имеют проводимость  $n$ -типа и весьма низкую подвижность (меньше единицы). Это, по-видимому, объясняется особенностями осаждения слоя из раствора, при котором в состав слоя входит большое количество плохо проводящих окисных фаз типа основных ацетатов и карбонатов свинца. Все активированные слои обладают проводимостью  $p$ -типа, причем предназначенные для охлаждения до  $77\text{ K}$  обладают более высокой концентрацией основных носителей тока  $p = (2 \div 8) \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$  и подвижностью носителей тока  $(30 \div 40 \text{ см}^2\text{В}^{-1}\text{с}^{-1})$ , чем неохлаждаемые слои, у которых  $p \approx (15 \div 20) \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$  и  $\approx (10 \div 30) \text{ см}^2\text{В}^{-1}\text{с}^{-1}$ .

Проведенные исследования процессов осаждения и активации пленок  $\text{PbSe}$  показали, что из ванны одинакового состава можно получать слои с высокими фотоэлектрическими параметрами, как для неохлаждаемых приборов, так и предназначенных для работы при  $195\text{ K}$  и  $77\text{ K}$ . При изготовлении слоев для охлаждаемых до  $77\text{ K}$  фотоприемников активацию следует проводить в открытом объеме печи при температуре нагрева до  $330^{\circ}\text{C}$ . Для изготовления неохлаждаемых и охлаждаемых до  $195\text{ K}$  приборов их активация проводится в замкнутом объеме с нагревом до температуры  $360^{\circ}\text{C}$ .

Уровень параметров слоев  $\text{PbSe}$ , изготавливаемых по разработанной технологии, представлен в табл. 2.

Таблица 2

Основные параметры химических слоев  $\text{PbSe}$ 

Парамстр	Ед. измерения	Рабочая температура		
		77K	195K	293K
$D(573,1200,1,2\pi)$	$\text{см}\cdot\text{Гц}^{-1/2}\cdot\text{ВТ}^{-1}$	$(3\div 9)\cdot 10^9$	$(4 \div 10)\cdot 10^9$	$(3 \div 10)\cdot 10^8$
$D(\lambda_{\text{max}})$	---/---	$(1,5\div 4)\cdot 10^{10}$	$(2 \div 55)\cdot 10^{10}$	$(2 \div 7)\cdot 10^9$
$R_T$	МОм	$1,0 \pm 10,0$	$1,0 \pm 20,0$	$0,3 \pm 1,0$
$\tau$	мкс	$50 \div 120$	$< 30$	$< 5$
$\lambda_{\text{max}}$	мкм	$4,2 \div 4,6$	$4,0 \div 4,4$	$3,5 \div 3,8$
$\lambda_{0,1}$	мкм	$5,7 \div 6,0$	$5,1 \div 5,5$	$4,5 \div 4,8$

Разработанная в НИИПФ методика изготовления фоточувствительных слоев  $\text{PbSe}$ , предназначенных как для охлаждаемых, так и неохлаждаемых приборов, явилась основой последующего создания технологии производства различных фотоприемников.

В акте Государственной комиссии по приемке разработанной технологии для промышленного производства было отмечено, что «она обеспечивает достижение фотоэлектрических параметров на уровне лучших зарубежных, отличается достаточно хорошей воспроизводимостью и высоким процентом выхода годных элементов при простоте используемого оборудования и малой длительности технологического цикла».

Разработанная технология была освоена в серийном производстве на заводе «Кварц» в г. Черновцы, где впоследствии осуществлялся промышленный выпуск разработанных в НИИПФ изделий «Комар-А», «Бурт»,  $36\text{T2}$  и др.

Естественно, процесс изготовления фоторезисторов не исчерпывается изготовлением слоя. Другие технологические операции также активно совершенствовались, причем это было связано с разработкой конкретных фотоприемников. В связи с этим результаты отработки этих операций будут далее излагаться применительно к описанию различных фотоприемников.

#### 4. Одноэлементные неохлаждаемые фотоприемники на основе PbS

Выше упоминалось, что первые серийные фотоприемники на основе PbS — 6АН и 0,4АН были одновременно созданы в начале 60-х г. для системы К-13.

Для изготовления фоторезистора 6АН — (главный конструктор В. Г. Буткевич) был выбран физический метод изготовления ФЧС. Разработанный прибор представлял собой герметичную головку с размерами  $\varnothing 12,6\text{мм} \times 3,2\text{мм}$ , внутри которой на керамическом вкладыше помещался ФЧС с размером приемной площадки  $6 \times 6 \text{мм}^2$ . Внешние выводы от ФЧС осуществлялись гибким гироскопным кабелем. Входным окном прибора является просветленный диск из германия, герметично впаянный в оправу головки.

Типичные значения основных параметров ФР 6АН приведены в табл. 3.

Таблица 3

$R_T$ , МОм	$D^*(573,400,1,2\pi)$ , $\text{Вт}^{-1}\cdot\text{см}\cdot\text{Гц}^{1/2}$	$S_u$ , $\text{В}\cdot\text{Вт}^{-1}$	$U_{\text{раб}}$ , В	$\tau$ , мкс
0,2 – 1	$(6,7 \pm 10) \cdot 10^8$	$(8 \pm 20) \cdot 10^2$	15	150 – 200

Контроль за приборами, находившимися на хранении в течение 10 лет, показал, что изменение их параметров за это время не превышает  $10 \div 20\%$ .

НИИПФ была поручена сходная разработка фоторезистора 3АН с рабочей приемной площадкой  $3 \times 3 \text{мм}^2$ . Кроме отличного от 6АН размера рабочей площадки требовалось обеспечить значение постоянной времени  $\leq 100\text{мкс}$ . Требования к остальным параметрам оставались теми же.

Проведенные экспериментальные работы показали, что значения  $\tau$  могут быть уменьшены (при сохранении требования по  $D^* \geq 6,7 \cdot 10^8 \text{Вт}^{-1}\cdot\text{см}\cdot\text{Гц}^{1/2}$ ) путем дополнительной технологической обработки готовых ФЧС, которая заключается в непродолжительном прогреве их в вакууме при температуре  $\sim 100^\circ\text{C}$  с последующим нанесением (без выноса на воздух) на поверхность PbS тонкой пленки халькогенидного стекла типа ХГ-23. Конструкция прибора незначительно отличалась от конструкции 6АН.

Фоторезистор 0,4АН (главный конструктор Е. А. Красовский) изготавливался на химически осажденных слоях с использованием гидразинной технологии. Чувствительные элементы с размером действующей площадки  $0,4 \times 0,7 \text{мм}^2$  формировались на кварцевых подложках размером  $24 \times 24,5 \text{мм}^2$  с дальнейшим нанесением парафиновых масок, травлением участков слоя, не защищенных парафином, катодным золочением и резкой подложек на отдельные элементы. Используемая таким образом групповая технология изготовления элементов позволила резко увеличить производительность процесса. Требования к габаритным размерам фотоприемника не позволяли разместить его в герметичном корпусе. Для обеспечения стабильности работы фото-

приемника в жестких условиях эксплуатации (температура  $-60^{\circ} \div +50^{\circ}\text{C}$ , относительная влажность до 98 %) была использована полимерная герметизация ФЧС специально разработанным компаундом КЧ-5 (смесь синтетического воска и бутилкаучука). Этим компаундом к поверхности ФЧС приклеивался герметизирующий кварцевый диск. Испытания подтвердили устойчивость фотоприемника к внешним воздействиям. Технология изготовления ФР 0,4АН была передана ряду предприятий, где он выпускался десятками тысяч штук до конца 70-х г. Эта технология стала базовой для последующих разработок фотоприемников на основе химически осажденных слоев PbS. Отметим, что периодически проводимый контроль за характеристиками фоторезисторов 04АН, изготовленных в 1960—1961 гг., хранящихся в лабораторных условиях уже в течение 40 лет, не выявляет деструктивных процессов, которые приводили бы к принципиальному ухудшению характеристик фотоприемников.

С 1962 г. в НИИПФ началась разработка фоторезисторов для головок самонаведения (ГСН) зенитных комплексов, которая стала основным направлением работ по неохлаждаемым фотоприемникам на основе PbS. Работы в этой области в течение длительного периода времени возглавлялись Е. А. Красовским, а с 1973 г. — А. А. Гольденвейзером вплоть до его безвременной кончины в 1996 г.

Первая разработка ФП для ГСН комплекса «Стрела-2» была завершена в 1967 году. При создании фоторезистора ФС-9Э42 был использован опыт, накопленный к этому времени при разработке фоторезисторов для системы К-13. В частности, были применены гидразинная технология химического осаждения, обеспечившая необходимый уровень параметров фотоприемника, и полимерная герметизация чувствительного элемента, которая обеспечивала стабильность характеристик в жестких условиях эксплуатации. В дальнейшем работа по усовершенствованию ГСН комплекса «Стрела-2» потребовала модернизации фотоприемника. Был создан более высокочувствительный иммерсионный фотоприемник ФС-9Э46. Его серийное производство началось в 1972 году и продолжалось до начала 90-х г. За это время было выпущено не менее 50 тыс. изделий.

Параллельно велась разработка фотоприемника для ГСН другого комплекса — «Стрела-1». Принцип действия этой ГСН — регистрация темной точки по контрасту с излучением неба — требовал от фотоприемника высокой чувствительности не только в ближнем инфракрасном, но и в видимом диапазоне. Эксперименты показали перспективность использования и в этом случае сернисто-свинцовых фоторезисторов. Чувствительность пленок, осажденных по гидразинной технологии, в сочетании с использованием иммерсии обеспечила выполнение требований, предъявляемых к ГСН. Разработанный фотоприемник ФС-9Э41 также выпускался серийно в течение 20 лет. Государственной премией за участие в создании комплекса «Стрела-1» был отмечен научный руководитель института Л. Н. Курбатов, вклад которого в работы по созданию фотоприемников на халькогенидах свинца трудно переоценить.

Завершенные к началу 70-х г. работы по созданию фотоприемников для ГСН систем «Стрела-1» и «Стрела-2» в сильной степени стимулировали развитие работ по усовершенствованию технологических процессов изготовления фоторезисторов из сернистого свинца. Уместно отметить основные направления этого усовершенствования.

#### 1. Технология процесса химического осаждения.

Работы велись как в части модернизации гидразинной технологии, так и по созданию новых методик осаждения пленок из сильнощелочных ванн с применением сильных восстановителей на основе сульфоксисоединений. Работы были направлены на повышение процента выхода годных фоточувствительных элементов серийно выпускаемых приборов и на достижение оптимальных параметров фоторезисторов, работающих при неглубоком охлаждении.

#### 2. Технология формирования фоточувствительных структур.

Были отработаны фотолитографические методы выделения чувствительных площадок, а также технология получения более надежных многослойных пленочных контактных соединений типа Cr-Au и др. В этих работах широко использовался опыт, накопленный при создании других фотоприемников на халькогенидах свинца.

3. Технология полимерной герметизации усовершенствовалась с целью обеспечения сохранности фоточувствительных пленок в течение всего цикла изготовления фотоприемника, а также для обеспечения надежной и длительной работы приборов при климатических воздействиях во время эксплуатации. Полимерные материалы должны были также служить оптическими клеями для приклейки иммерсионных линз или других оптических элементов к поверхности фоточувствительных пленок. Группой под руководством М. А. Антиповой были опробованы десятки полимерных композиций, относящихся к множеству классов органических соединений.

Основным результатом работы явилось создание группы полисилоксануретановых компаундов (УК-1, УК-2 и др.), сочетающих оптическую прозрачность в диапазоне работы фоторезисторов из сернистого свинца с высокими адгезионными характеристиками в широком интервале рабочих температур и нейтральностью по отношению к характеристикам пленок. Эти клеи нашли широкое применение в технологических процессах изготовления фотоприемников (и не только на основе PbS). Их применение, в частности, позволило обеспечить длительную сохраняемость параметров фоторезисторов (не менее 15 лет).

#### 4. Методы высокоточной сборки.

Было отработано множество методов сборки фоторезисторов с одновременной юстировкой чувствительных площадок и оптических элементов относительно посадочных поверхностей. Это позволило обеспечивать высокие требования к точности сборки, связанные с рассмотрением фотоприемника как части оптической системы ГСН.

#### 5. Методы измерений параметров фотоприемников.

Под руководством Л. Б. Солоноуца были разработаны и внедрены в серийное производство установки для измерения основных параметров фотоприемников К.04.420, а позднее — более совершенные установки К.54.410, которые и в настоящее время широко используются в метрике различных фотоприемников.

Технические решения, о которых сказано выше, были востребованы, когда в середине 70-х г. начались работы по созданию нового поколения ГСН зенитных комплексов, которые должны были отличаться более широким спектральным диапазоном работы и при этом обладать защищенностью от естественных и искусственных помех.

Реализация принципа спектральной селекции цели и помехи потребовала разработки соответствующих фотоприемников. При этом выявилась целесообразность использования для обнаружения целей наряду с PbS — фотоприемниками, фоторезисторов и фотодиодов из антимонида индия в тепловых ГСН и кремниевых фотодиодов — в фотоконтрастных. Фоторезисторы же из PbS, благодаря широкой спектральной характеристике, оказались наилучшими индикаторами искусственных помех, которые стали активно применяться после создания зенитных комплексов с ГСН.

Первым двухдиапазонным фотоприемником, разработанным в 1971—1974 гг. для ГСН комплекса «Стрела 10СВ», стал фоторезистор ФС-9Э47 («Вираз»). В конструкцию фотоприемника входят 2 чувствительных элемента (InSb, PbS), для работы соответственно в каналах регистрации цели по тепловому излучению и по фотоконтрасту. Оба чувствительных элемента жестко связаны конструктивно; деление излучения по спектру осуществляется с помощью специального фильтра. Основные проблемы, которые пришлось решать при создании ФС-9Э47, относились к охлаждаемому фоторезистору и к обеспечению жестких требований по точности сборки изделия в целом. Фотоприемник «Вираз» был освоен в серийном производстве на заводе «Сапфир».

Более глубокая модернизация фотоприемника для ГСН, потребовавшаяся в связи с развитием комплекса «Стрела-1», была выполнена уже в 80-е годы в рамках разработки трехдиапазонной ГСН. К двум каналам — фотоконтрастному с кремниевым фотодиодом и инфракрасному с фотодиодом из InSb — был добавлен третий канал — регистрации помехи — с фоторезистором из PbS. Оптическая схема фотоприемника предусматривала последовательное размещение фоточувствительных элементов, что позволяло применить единую систему модуляции потока в трех диапазонах. Отсюда возникло весьма нестандартное требование к «прозрачности» двухцветного оптического блока (PbS+Si) в диапазоне работы фотоприемника из InSb. Меры, принятые для увеличения прозрачности и, следовательно, повышения чувствительности InSb, включали, в частности, осаждение PbS на сапфировые подложки, выбор оптимальной (решетчатой) конфигурации площадки PbS, отработку технологии получения клеевых пленок предельно малой толщины. Конструктивно вся трехцветная система была выполнена в виде двух фотоприемников: неохлаждаемого (PbS+Si) и охлаждаемого (InSb). Фотоприемник ФПН-28Н в течение ряда лет (1987—1991 г.) выпускался на нашем предприятии.

В 1980 г. была завершена разработка неохлаждаемого фоторезистора ФР—183, предназначенного специально для использования в канале обнаружения помех ГСН комплекса «Игла».

В соответствии с техническим заданием, выданным ЦКБ ЛОМО, был создан малогабаритный фотоприемник в герметичном корпусе, с размером площадки  $0,15 \times 0,50$  мм<sup>2</sup>. В конструкцию фотоприемника входят интерференционный фильтр, формирующий интегральный диапазон чувствительности  $\lambda = 1,8 \div 2,5$  мкм, и специальная маска-анализатор, располагающаяся в фокальной плоскости оптической системы ГСН.

Наряду с этим потребовалась предельно малая для фоторезистора из PbS инерционность (при  $t = -60^\circ\text{C}$   $\tau$  должна быть меньше 500 мкс), естественно, при высоком уровне обнаружительной способности. Эта проблема

была решена путем применения принципиально новой, «дитионитной» технологии осаждения фоточувствительных пленок PbS, которая была разработана Л.Н. Залевской и ее сотрудниками. Технология изготовления фоторезистора ФР—183 была передана заводу «Кварц» (г. Черновцы, Украина), где он успешно выпускался в течение 10 лет. Всего было выпущено более 50 тыс. изделий. После прекращения производства фоторезистора на заводе «Кварц», его изготовление с 1995 года было вновь возобновлено на нашем предприятии.

В 90—е годы была выполнена новая разработка датчика для ГСН — ФПУ ДР-93, которое должно было заменить фоторезистор ФС-9Э46 в ГСН зенитных комплексов, поставляемых на экспорт. В процессе работы удалось обеспечить жесткие требования к габаритам и точностям сборки для устройства, в состав которого вошли фоторезистор из PbS и Si- фотодиод с преусилителем. В течение 1996—1999 гг. было изготовлено более 1000 таких ФПУ.

Конструкция основных фотоприемников для ГСН ЗРК показана на рис. 1. Над созданием этих фотоприемников в течение многих лет работал большой коллектив сотрудников, из которых в первую очередь следует упомянуть Сидорову Г. Д., Залевскую Л. Н., Антипову М. А., Жеребкова А. Н., Сорокину Ю. Н., Нестерову Л. И., Бутрова Ю. П., Борисову Т. И. и многих других.

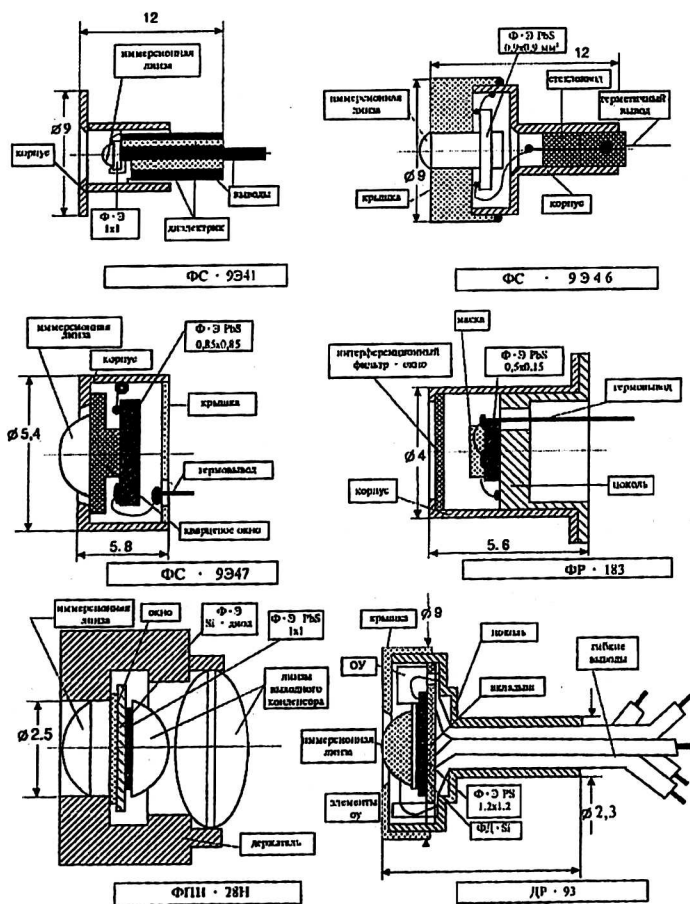


Рис. 1. Фотоприемники для ГСН

## 5. Одноэлементные охлаждаемые фотоприемники на основе PbS

Первые охлаждаемые фотоприемники на основе PbS разрабатывались и изготавливались нашим предприятием для различных видов астрономической аппаратуры. С помощью этих ФП в ГАИ им. Штернберга и ИКИ АН СССР были получены спектры излучения планет солнечной системы в диапазонах  $1\div 4$  мкм и  $1\div 2,5$  мкм.

Спектры использовались для получения данных о составе атмосфер Марса, Венеры, Юпитера, Сатурна, данных о составе марсианского грунта, облачного слоя Венеры и др. Разрабатывались и изготавливались фоторезисторы для работы в составе оптических ИК приборов, устанавливаемых на борту орбитальных космических аппаратов. Так на объекте М-71 (Марс-3) в 1971—1972 г. были выполнены измерения содержания водяного пара в атмосфере Марса по полосе поглощения  $1,4$  мкм и проведены измерения количества  $\text{CO}_2$  в вертикальном столбе атмосфере вдоль трассы полета. На объекте М-73 («Марс-57») в 1974 г. были повторно проведены указанные измерения в других областях планеты и обнаружены значительные различия в содержании паров  $\text{H}_2\text{O}$  в разных областях. На том же объекте с фотоприемником из селенида свинца, охлаждаемым радиационным холодильником, была проведена спектрофотометрия Марса в области  $1,7\div 5,0$  мкм с записью около 500 спектров марсианской поверхности.

Один из образцов фотоприемников типа СР-2/320, эксплуатировавшихся в составе спектрофотометра космической станции «Марс-1» в аппаратуре «Зонд-3», имел две приемные площадки с размерами  $1\times 3$  мм<sup>2</sup>. Порог чувствительности в диапазоне рабочих температур —  $80\div 120^\circ\text{C}$  на частоте модуляции  $400$  Гц составлял  $\sim 7\cdot 10^{-12}$  Вт·Гц<sup>-1/2</sup>. Жесткие требования предъявлялись к стабильности фотоэлектрических параметров, в том числе при эксплуатации в открытом космосе.

Разработка этих приборов проводилась в лаборатории, а затем с 1966 г. в отделе, руководимом В. Г. Буткевичем. Фоторезисторы разрабатывались Ю. А. Малюгиным (PbS), Г. А. Казанцевым (PbSe) с сотрудниками. Разработка конструкций приборов проводилась С. И. Васильевым.

В 1968 г. была начата разработка одноэлементного охлаждаемого фоторезистора «Иней» — аналога фоторезистора, выпускавшегося в США для ТГС «Сайдуиндер-1С». Его отличительными особенностями являлись наличие иммерсионной линзы из титаната стронция ( $\text{SrTiO}_3$ ) на слое PbS, микроохладителя с терморегулированием и входной менисковой линзой из сапфира. Эта разработка потребовала решения большого числа сложных технологических и конструкторских задач. Конструкция фоторезистора приведена на рис. 2.

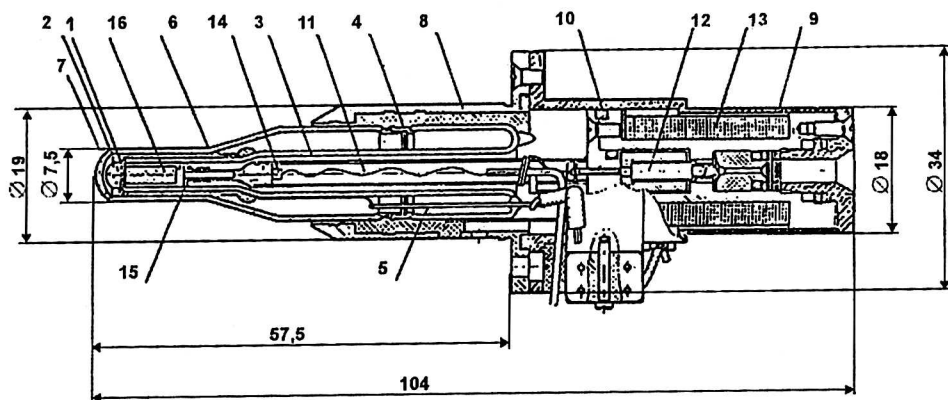


Рис. 2. Конструкция фоторезистора «Иней»

Фоточувствительный элемент (1) с размером приемной площадки  $1,8 \times 1,8 \text{ мм}^2$  с приклеенной иммерсионной линзой (2) укреплен на плоском сапфировом доньшке стеклянной подложки (3), внутренний канал которой является посадочным для микроохладителя и к допускам на его размеры предъявляются жесткие требования ( $\Phi 5 \pm_{0,01}^{0,02}$ ). Для обеспечения этих требо-

ваний ножка изготавливалась методом вакуумной формовки на точном металлическом стержне, имеющем больший, чем у стекла, КТР.

Внутренний канал ножки покрывается слоем серебра и тонким слоем мелкодисперсного акводага для стекания зарядов, образующихся из-за электростатического воздействия струи сжатого азота, истекающего из дюзы микроохладителя.

Колпачок (6), являющийся наружной частью дюэаровского сосуда, представляет собой стеклянный баллончик с приваренной менисковой линзой из сапфира.

Внутренняя поверхность колпачка покрывается тонким зеркальным слоем серебра, а наружная слоем меди и серебра, служащим электростатическим экраном. Взаимная центровка линз и расстояние между ними ( $0,25 \pm 0,05 \text{ мм}$ ) обеспечиваются специальным приспособлением при соединении (пайкой) соединительных колец ножки и колпачка. Баллон после сборки вакуумируется, отпаяется по штенгелю и устанавливается в металлическом корпусе (8) с помощью компаунда. Между корпусом и баллоном остаются при заливке компаундом три узких щелевых паза, через которые отработанный сухой азот обдувает боковую поверхность и менисковую линзу баллона.

Микроохладитель состоит из корпуса (9) теплообменника (11), запорного клапана (12), электромагнитной катушки (13) и терморезистора (14).

Теплообменник изготавливается из медно-никелевой трубки  $d = 0,36 \times 0,05 \text{ мм}$ , намотанной на тонкостенный цилиндрический палец из нержавеющей стали. Оконечная часть теплообменника наматывается по латунному золоченому наконечнику (15) и заканчивается дюзой-трубкой с отверстием  $d = 0,22 \text{ мм}$ . К основанию наконечника приклеивается германиевый терморезистор (14). Перед дюзой устанавливается цилиндр из

прессованного войлока (16), служащий накопителем жидкого азота. Сопротивление терморезистора, изменяющееся с изменением температуры, управляет схемой регулирования подачи азота, открывая и запирая запорный клапан с помощью электромагнитной катушки.

В течение непрерывной продувки расход газа при давлении на входе 200 атм. составляет около 20 нл/мин и обеспечивает холодопроизводительность микроохладителя 7,5 Вт.

В циклическом режиме работы расход азота уменьшается до 6,0 нл/мин, что позволяет эксплуатировать прибор от 8 литрового баллона с начальным давлением 350 атм. в течение 2 часов непрерывной работы.

В разработке (ОКР), проводившейся под руководством главного конструктора В. Г. Буткевича, принимал участие большой коллектив сотрудников — Ю. А. Малюгин, Г. А. Казанцев, Е. Б. Калинина, В. Н. Лебедев, В. Г. Огнева, А. Г. Глазунов, С. Н. Федоров, Ю. А. Алмазов и др. Разработка конструкции проводилась под руководством зам. гл. конструктора С. И. Васильева.

В 1971 г. ОКР «Иней» была принята Государственной комиссией, и последующий серийный выпуск изделия осуществлялся московским заводом «Сапфир».

Фотоэлектрические параметры ФР «Иней» и представлены в табл. 4.

Таблица № 4

$\Phi_{II}$ АЧТ 300°C $f_M=400$ Гц при $T_p=77$ К. $\text{Вт}\cdot\text{Гц}^{-1/2}\cdot\text{см}^{-1}$	$\Phi_{II}$ $T_p=300$ К $\text{Вт}\cdot\text{Гц}^{-1/2}\cdot\text{см}^{-1}$	$S_{II}$ При $f_M=400$ Гц $T_p=77$ К, В/Вт	RT При 77 К, МОм	$T_{\text{вых}}$ на раб. режим при $T_{\text{окр}}=60^\circ\text{C}$ , мин	Ресурс, Час	Число включ.
$\leq 3 \cdot 10^{-10}$	$\leq 3 \cdot 10^{-9}$	$\geq 12 \cdot 10^3$	$\leq 1,0$	$\leq 2,5$	$\geq 100$	$\geq 250$

Значения  $\Phi_{II}$  в таблице приведены без учета влияния менисковой и иммерсионной линзы. Их учет приводит к уменьшению  $\Phi_{II}$  в 3,9 раз.

В 1973 г. в целях улучшения эксплуатационных характеристик изделия «Иней», обеспечивающих увеличение полетного времени до 3 часов от одной заправки 8-литрового баллона, в НИИПФ была поставлена НИР «Иней 1М» по изысканию путей снижения среднего расхода газа — хладагента до значения 3,5 нл/мин. Такое значение расхода в принципе достигалось, если баллон с фоточувствительным элементом PbS откачивался до высокого вакуума. Однако в этом случае наблюдалось постепенное изменение фотоэлектрических параметров в процессе длительного хранения приборов. Кроме того, и сохранность высокого вакуума трудно было обеспечить, т. к. в присутствии фоточувствительного элемента нельзя было проводить длительное обезгаживание объема прибора при температурах выше 100°C.

Разнообразные поиски привели к решению задачи за счет применения в конструкции специальных сорбентов, которые позволяли обеспечить необходимый вакуум в приборе при его охлаждении микрохолодильником в процессе эксплуатации и сохранение необходимой атмосферы, обеспечивающей стабильность, в нерабочем состоянии.

Поиски и исследования различных адсорбентов привели к разработке весьма эффективного материала — угольной нити АУН, обладающей сорбционной емкостью при 80К до 210 см<sup>3</sup> воздуха при нормальном давлении на 1 г материала.

Внесение в баллончик прибора 50 мг указанного адсорбента позволило решить поставленную задачу.

Доработанные таким образом фоторезисторы «Иней» («Иней 1М») об- ладали в условиях эксплуатации расходом газа 2—3 нл/мин. Эта разработ- ка также была передана на завод «Сапфир».

### 6. Одноэлементные фотоприемники на основе PbSe

Большой интерес со стороны разработчиков различной аппаратуры был проявлен к фотоприемникам, охлаждаемым термоэлектрическими микро- охладителями. К их достоинствам относятся малые веса и габариты, отсут- ствие необходимости иметь запас хладагента. К числу недостатков — отно- сительно низкий КПД охладителя, сравнительно большие токи питания термобатареи, зависимость температуры охлаждения от температуры окру- жающей среды, необходимость предусматривать в конструкции отвод тепла от горячего спая термобатареи.

Разработка конкретного фотоприсмника с однокаскадным ТЭС (ОКР «Комар-А») для малогабаритной ТГС была задана институту Поста- новлением Правительства в 1973 г.

Главным конструктором разработки был назначен начальник отдела № 1 В. Г. Буткевич, заместителями гл. конструктора Г. А. Казанцев, С. И. Васильев и В. С. Зиновьев.

Фоточувствительные элементы изготавливались из селенида свинца с размером приемной площадки  $1,2 \times 1,2 \text{ мм}^2$ . Обнаружительная способность фотоприемников при  $T_{окр} = 60 \text{ }^\circ\text{C}$  в области спектра  $3 \div 5 \text{ мкм}$  должна была быть не хуже  $D^* (573, 1200, 1,2\pi) = 5 \cdot 10^8 \text{ Вт}^{-1} \cdot \text{см} \cdot \text{Гц}^{1/2}$ .

Технология и конструкция ТЭО для ФП «Комар-А» разрабатывалась Одесским технологическим институтом холодильной промышленности (под руководством проф. В.А. Найера) совместно с отделом В. С. Зиновьева в НИИПФ.

В качестве материала для ТЭО использовались сплавы  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$  с присад- ками. Разработанная конструкция фотоприемника изображена на рис. 3.

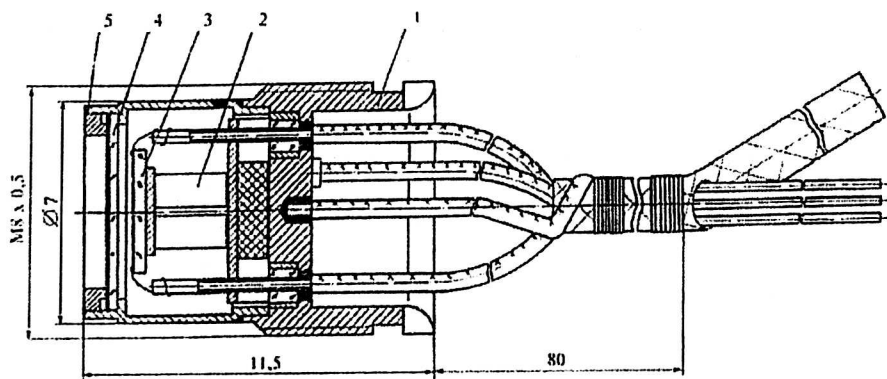


Рис. 3. Конструкция фоторезистора «Комар»

Прибор состоит из корпуса (5) с входным окном из сапфира (4), на ко- торое нанесено многослойное интерференционное покрытие, выполняющее

роль оптического фильтра с резкой коротковолновой границей пропускания  $\lambda \phi = 2,8$  мкм. Поверх фильтра устанавливается тонкий модулирующий растр. Корпус на мягком припое соединяется с коваровым цоколем (1), к которому через теплопроводящую керамическую подложку припаяна термобатарея (2). К холодному спаю термобатареи в виде тонкой медной пластинки приклеивается ФЧЭ PbSe (3). Выводы от ФЧЭ подпаиваются к жестким трубчатым коваровым выводам, герметично вваренным в цоколь через стеклянные изоляторы. Внешний гибкий кабель из провода ПМГ в экранирующей оплетке подсоединяется к коваровым выводам и закрепляется специальным вкладышем.

Внутренний объем прибора заполняется ксеноном, что снижало тепловую нагрузку от корпуса на ФЧЭ и позволяло понизить его температуру на  $6-8^\circ\text{C}$  по сравнению прибором, заполненным воздухом. Включение ТЭО обеспечивало понижение температуры ФЧЭ в установившемся режиме на  $40^\circ\text{C}$ .

Характер динамики процесса установления температуры и фотоэлектрических параметров при  $T_{окр} = 60^\circ\text{C}$  представлял собой резкий рост  $R_T$ ,  $U_c$  и  $D^*$  (приблизительно в 3—5 раз) в течение первой минуты после включения ТЭО и затем сравнительно медленное падение ( $\sim$  в 1,5 раза).

Основные параметры фотоприемников «Комар –А» представлены в табл. 5.

Таблица 5

Параметры		20°C	60°C
$T_{окр}$			
$R_T$ (МОм)	(ТЭО отключен)	0,25 – 0,7	0,15 – 0,4
	(ТЭО включен)	0,5 – 1,2	0,3 – 0,6
$S_u$ (В/Вт)	(ТЭО отключен)	300 – 600	15 – 250
	(ТЭО включен)	700 – 1300	350 – 700
$D^*$ (573,1200,2π) Вт <sup>-1</sup> ·см·Гц <sup>1/2</sup> ×10 <sup>-8</sup>	— (ТЭО отключен)	5,0 – 9,2	1,6 – 4,0
	— (ТЭО включен)	11,3 – 13,1	5,0 – 7,5

ОКР «Комар –А» была принята Государственной комиссией в 1975 г. и освоена в производстве на заводе «Кварц» в г. Черновцы.

Большой вклад в разработку этих изделий, помимо указанных выше, внесли сотрудники отделения № 1 и других подразделений института — И. В. Корнеева, В. А. Сапрыкина, Л. И. Кондакова и др.

Среди других одноэлементных фотоприемников на PbSe следует упомянуть фоторезистор с двухкаскадным ТЭО «Конкурс-Р» и неохлаждаемый фоторезистор «Тайга», охлаждаемый микрохолодильником Джоуля-Томпсона фоторезистор и «Кубрик» и др.

## 7. Технология изготовления многоэлементных фоточувствительных структур PbS и PbSe

Уже в начале 70-х г. перед разработчиками фотоприемников, исходя из задач усовершенствования и создания новых аппаратурных комплексов в целях увеличения их дальности действия, помехозащищенности, быстродействия, полей зрения и др., были сформулированы требования к разработке

многоэлементных фотоприемников на основе фоточувствительных слоев PbS и PbSe.

При разработке технологии изготовления многоэлементных фоточувствительных структур необходимо было обеспечить решение следующих основных задач:

- сохранение удельного уровня фотоэлектрических параметров исходного слоя при его разделении на элементы;
- совпадение геометрических размеров элементов с фотоэлектрическими (минимальное влияние краевых эффектов);
- минимально допустимые величины оптической и электрической взаимосвязи между элементами структуры;
- однородность фотоэлектрических параметров элементов структуры;
- надежность фотоприемников с многоэлементными фоточувствительными структурами в жестких условиях эксплуатации и недопущение при этом выхода из строя более  $(1 \div 2)$  % элементов ФЧ структуры.

Совокупность этих требований говорит о том, что создание многоэлементных ФП представляло собой сложную конструкторско-технологическую задачу.

До конца 70-х годов при формировании многоэлементных ФЧ структур применялись следующие методы и их комбинации:

- напыление контактных материалов в вакууме через металлические маски;
- разрезание ФЧ слоя и контактного материала алмазным резцом;
- разрезание лазерным лучом.

Многоэлементные структуры формировались также химическим травлением через парафиновую маску, полученную распылением парафина в вакууме через обратную металлическую маску.

Следует отметить, что выделение многоэлементных фоточувствительных линейчатых структур путем нанесения в вакууме на сплошную пленку PbS или PbSe золотых электродов через экранирующую маску, осуществленное еще в 70-х годах, с успехом используется еще и сегодня. Так, сконструированная в то время ведущим инженером В. А. Елесиним и изготовленная слесарем Г. А. Чинновым специальная кассета с экранирующим «ножом» в виде вольфрамовой струны, позволяет выделять фоточувствительные линейки с зазором между электродами 60 мкм при длине линейки до 100 мм, которые затем разделяются на индивидуальные элементы алмазным резцом или лучом лазера. Этими же разработчиками была создана уникальная кассета с перемещающейся призмой, которая двумя последовательными нанесениями золотой пленки на фоточувствительную поверхность позволяла выделять фоточувствительные площадки с зазорами между ними до 10 мкм.

Выделение площадок в многоэлементной структуре на неактивированных слоях показало, что это возможно лишь для размеров до  $0,5 \times 0,5$  мм<sup>2</sup>. На меньших размерах становится заметной роль окисления по границам, что существенно снижает  $D^*$ .

Для изготовления многоэлементных линеек использовались также алмазные резцы со специальной заточкой. Эта методика позволяла получать зазоры между элементами до 10 мкм, но обладала сравнительно большой трудоемкостью. Недостаток этого метода проявлялся также в том, что раз-

резание контактного растра при использовании хромового подслоя под золотом происходит с большим трудом, резцы часто выходят из строя и между некоторыми элементами структуры остаются электрические связи. В то же время хромовый подслой существенно укрепляет электрод, позволяя осуществлять надежную микросварку тонкого золотого проводника с электродом ФЧС. При этом следует отметить, что при возникших задачах изготовления многоэлементных линейчатых структур с малыми размерами приемных площадок ( $50 \div 100$  мкм), весьма остро встал вопрос о прочности и надежности таких сварных соединений. Чистая пленка золота, нанесенная на подложку, часто не выдерживала операции приварки или происходило нарушение контакта в процессе испытаний или эксплуатации прибора. Многочисленные исследования и эксперименты, проводившиеся сотрудниками отдела № 1 В. А. Елесиным, В. Н. Лебедевым и др., привели в конечном итоге к разработке многослойного контактного покрытия Cr-Pd-Au, хорошая адгезия которого к стеклянной подложке и надежное соединение с фоточувствительной пленкой PbS или PbSe, обеспечили решение возникшей задачи.

Относительно лучшие результаты разделения фоточувствительной линейки на элементы были получены с помощью лазерной резки, для чего была сконструирована А. Н. Свиридовым и изготовлена опытным производством НИИПФ специальная установка лазерной резки «Лента». Установка работала на длине волны генерации 0,337 мкм с пиковой мощностью  $10^3$ — $10^4$  Вт при длительности импульса  $10^{-8}$  сек и частоте повторения 500 Гц. Ширина реза могла варьироваться в пределах 10—50 мкм.

Объект устанавливался на специальном столике, точность перемещения которого составляла  $\sim 5$  мкм. Система перемещения столика была оснащена программным устройством, позволяющим осуществлять его перемещение в двух координатах по заданной программе.

Применительно к структурам со сложной геометрией расположения чувствительных элементов и тем более для изготовления матриц наиболее подходящим является метод фотолитографии. Разработка фотолитографических процессов изготовления многоэлементных структур проводилась в отделе под руководством начальника сектора Л. К. Бодряковой с участием В. А. Елесина, Л. Я. Лебедевой и др.

Необходимо было найти фоторезисты, технологический процесс работы с которыми не приводил бы к заметному ухудшению параметров ФЧЭ. Исследовав и испытав большую группу фоторезистов, мы остановились на двух основных типах:

- 1 — негативный фоторезист на основе поливинилцианамата (ПВЦ);
- 2 — позитивный фоторезист (продукт-30), состоящий из нафтохинондиазида, наволоочной смолы и диоксана.

Пленки фоторезиста наносились на поверхность ФЧС методом центрифугирования.

Толщины пленок ПВЦ составляли 0,8—1,0 мкм, продукта 30 —  $0,6 \div 0,8$  мкм. При меньших толщинах не обеспечивалась надлежащая защита ФЧС. Экспонирование проводилось через специальные шаблоны или маски. Экспериментально было установлено, что наиболее быстрое и чистое проявление пленок ПВЦ происходит в растворе трихлорэтилена в течение 20—30 с. Проявление пленок позитивного фоторезиста проводилось в 2 % растворе

тринатрийфосфата в течение 1 мин. Эксперименты показали также, что пленки указанных фоторезистов могут быть хорошими защитными покрытиями для ФЧС PbS и PbSe после их термообработки (задубливания) при  $\sim 200^\circ\text{C}$  в течение 1 часа для ПВЦ и  $\sim 230^\circ\text{C}$  в течение 30 мин для позитивного фоторезиста. В качестве травителей слоев PbS и PbSe использовались фермеровский ослабитель (10% растворы железосинеродистого калия и гипосульфита натрия в объемном отношении 1:1) и травитель на основе хлористого кальция и соляной кислоты. Снятие задублированной пленки фоторезиста ПВЦ проводилось в растворе трихлорэтилена в течение 20 мин, а позитивного фоторезиста в растворе диоксана в течение 10 мин.

Статистический анализ всех стадий фотолитографического процесса показал, что для ФЧС PbS применимы оба фоторезиста, причем их исходные параметры изменяются незначительно.

Для ФЧС PbSe более предпочтительным является позитивный фоторезист. С негативным фоторезистом пленки PbSe ухудшали значения  $D^*$  и  $S_{\text{н}}$  на операции экспонирования от ультрафиолетовой засветки ( $\sim$  на 15%).

Однако, применительно к многоэлементным фоточувствительным структурам с малыми размерами приемных площадок и зазоров между ними, разработанные фотолитографические методики не полностью удовлетворяли требованиям воспроизведения заданной геометрии и сохранности фотоэлектрических параметров. Недостатки были связаны с подтравливанием фоточувствительной пленки по краям защитной пленки и с отсутствием удовлетворительного негативного фоторезиста для пленок PbSe. В связи с этим, в середине 80-х годов, в соответствии с согласованным между Минобороны и АН СССР координационным планом, было организовано проведение совместных разработок НИИПФ и НИИОХ СО АН СССР (г. Новосибирск). В результате была разработана серия новых фоторезистов ФСН, светочувствительных к видимой области спектра и не требующих экспонирования под ультрафиолетом. Руководили этими разработками со стороны НИИОХ Е. П. Фокин, со стороны НИИПФ Л. К. Бодрякова. Разработанные новые полимерные композиции позволили использовать их как позитивно-негативные фоторезисты, герметики и клеи.

Радикальное решение задачи исключения операции химического травления при изготовлении мелкоструктурных линейчатых и особенно матричных фотоприемников, было найдено применением ионного травления через фотолитографическую маску с использованием специализированного вакуумного оборудования.

Использование ионного травления в фотолитографии позволило устранить брак по геометрии, уменьшить зазор между ФЧ площадками и значительно увеличить производительность процесса.

При этом много сил было потрачено А. А. Гольденвейзером на приобретение современного импортного оборудования и отечественных откачных постов с крупногабаритными вакуумными камерами, В. А. Елесиным, В. В. Фирсовым, К. Г. Астаповым на разработку и изготовление подколпачного устройства, Л. К. Бодряковой, В. В. Фирсовым, Л. Я. Лаенко на изучение влияния и отработку режимов ионного травления ФЧ слоев PbS и PbSe через защитные фотолитографические маски.

Следует также отметить Н. А. Водоморина, В. И. Коханкина, В. И. Пескова, Т. А. Жабину — наших основных помощников в части изготовления

прецизионных фотошаблонов с большими габаритами при малых размерах элементов, с повышенными требованиями к допускам неровности края, изготовление которых находилось на пределе технических возможностей аппаратуры, имевшейся в их распоряжении.

В результате была создана базовая технология формирования многоэлементных, малоразмерных, плотноупакованных фоточувствительных структур на слоях сульфида и селенида свинца.

По разработанной технологии изготавливались фоточувствительные элементы фоторезисторов «Арык-2К», «Гранат-32» и др., проводятся разработки матричных структур с форматом 64x64, 128x128.

Значительный объем исследований был посвящен изучению микронеоднородностей фотоэлектрических свойств пленок сульфида и селенида свинца по площади их поверхности и основным причинам, порождающих эти микронеоднородности. Исследования проводились Ю. А. Малюгиным в рамках темы его диссертационной работы. Для проведения исследований была создана уникальная установка с оптическим зондом размером до 10 мкм, относительно которого исследуемый объект мог перемещаться и устанавливаться с точностью положения в несколько микрон. Установка имела специально разработанный зеркальный объектив, а источником излучения служил силитовый нагреватель с температурой 1400°C.

Исследования проводились на фоточувствительных слоях, изготовленных на стеклянных подложках с предварительно нанесенными тонкими рисками алмазным резцом. Риски служили координатной сеткой, позволявшей в дальнейшем анализировать и сопоставлять фоточувствительность и характер структуры на локальных участках слоя при исследовании на электронном микроскопе.

Сопоставление кривых распределения относительной локальной чувствительности по линии сканирования оптическим зондом с размерами микрориски на тех же участках показало, что максимальная чувствительность наблюдается на участках слоя с размерами микрориски 0,8÷1,2 мкм (см. рис. 4).

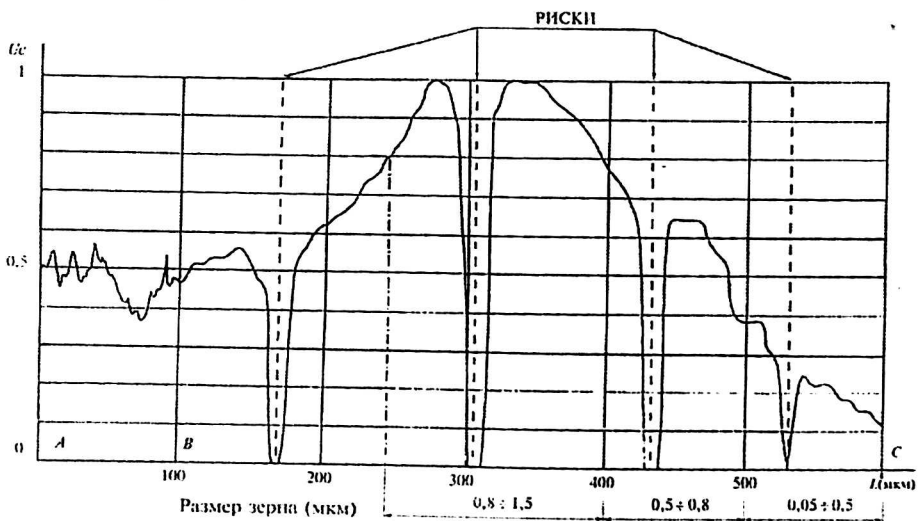


Рис. 4. Кривые распределения чувствительных вдоль пленки PbS

Относительно большой разброс в размерах микрокристаллитов, составляющих ФЧ слой, предположительно был связан с физико-химическими неоднородностями поверхности подложки, формирующими ее потенциальный рельеф (локальные неоднородности состава, механические дефекты и др.), которые определяют характер распределения центров зарождения на поверхности подложки и процессы миграции атомов конденсируемого вещества в процессе кристаллизации слоя.

Экспериментальным подтверждением этого вывода явились результаты исследования кривых распределения чувствительности по слою, повторно изготовленному на одной и той же подложке после смыва, предварительно осажденному и исследованному (рис. 5). Эти исследования подтвердили, что относительный характер распределения чувствительности по поверхности слоя определяется подложкой и слабо зависит от большого числа различных технологических факторов, оказывающих, в свою очередь, решающее значение на абсолютный уровень чувствительности.

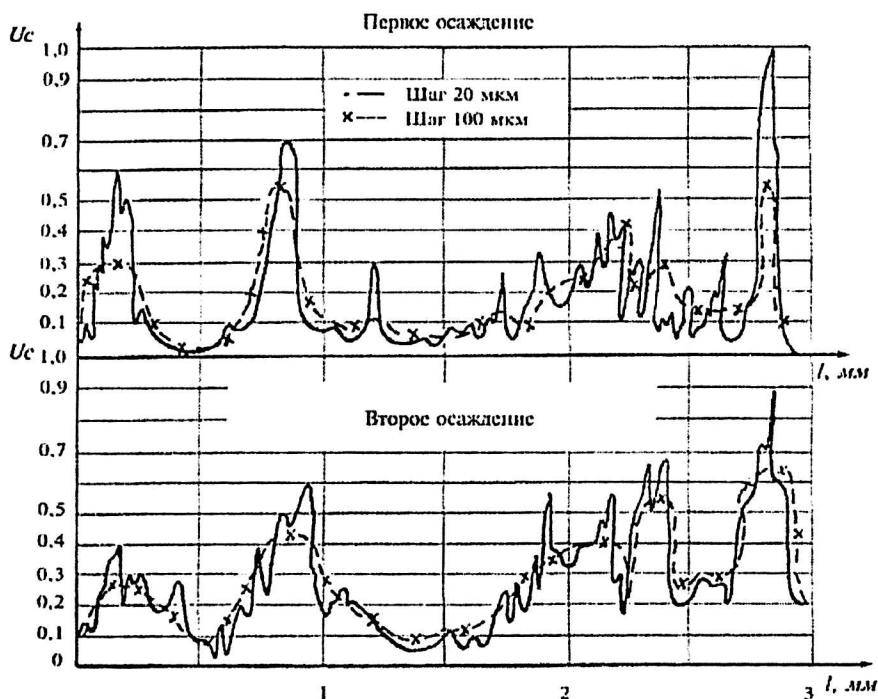


Рис. 5. Распределение чувствительности при двукратном нанесении слоя PbS на подложку

Дальнейшие исследования были направлены на разработку способов, позволяющих уменьшить воздействие неоднородного потенциального рельефа на поверхности подложки с целью получения более однородного распределения зародышевых центров по поверхности на начальном этапе осаждения слоя.

Исследовалось влияние имплантации различных ионов, микрометрирование поверхности подложек, материала подложек, нанесения тонких подслоев. Существенно более однородные структуры слоев PbS были получены при облучении стеклянных и кварцевых подложек ионами аргона и серы с энергиями 140—150 кэВ при дозах  $10^8 + 10^{12} \text{ см}^{-2}$ . Микрометрирование кварце-

вых подложек позволило изготавливать достаточно однородные по чувствительности слои PbS, получаемые химическим осаждением (с разбросом по чувствительности 10—20% для размеров ФЧ площадок 50x50 мкм<sup>2</sup>).

Положительные результаты были получены для слоев PbSe, осажденных на кремниевые подложки с подслоем SiO<sup>2</sup>.

В результате проведенных исследований и разработок была создана базовая технология формирования многоэлементных линейчатых структур PbS и PbSe, что позволило изготавливать различные многоэлементные фотоприемники с числом ФЧЭ от нескольких единиц до нескольких тысяч.

Первые матричные структуры начали разрабатываться нами еще в 1962 г. Как интересный исторический факт можно отметить найденное тогда решение поставленной перед нами задачи создания матричного приемника PbS с числом элементов — 100 (10x10) с размерами индивидуальных элементов 1x1 мм<sup>2</sup>.

На сплошной фоточувствительный слой PbS или PbSe испарением в вакууме через маску наносились узкие (~50 мкм) параллельные золотые полоски. Затем слой разрезался алмазным резцом или лучом лазера в перпендикулярном направлении с образованием десяти изолированных друг от друга параллельных фоточувствительных линеек с системой индивидуальных контактов. Повторным золочением формировался общий электрод в виде системы параллельных золотых полосок, так чтобы индивидуальные электроды располагались строго посередине между ними (рис. 6).

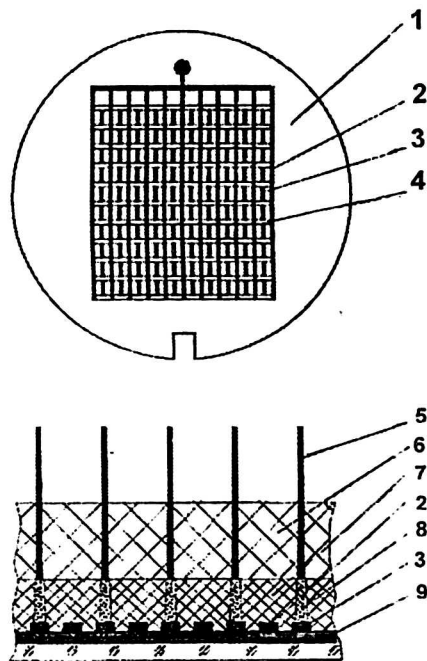


Рис. 6. Схематическое изображение разреза матричного фотоприемника

Для соединения полученной матрицы с внешними выводами нами был предложен относительно простой и оригинальный способ.

Заранее изготавливалась стеклянная контактная колодка с впаянными в нее тонкими коваровыми проводниками, геометрия расположения которых строго повторяла геометрию расположения индивидуальных электродов

матрицы. Поверхность колодки шлифовалась, полировалась и на торцы проводников гальваническим методом наносились тонкие слои золота.

Электрическое соединение контактов матрицы с электродами колодки осуществлялось путем их склейки полимеризующимся компундом (УК-1) с наполнителем — мелкодисперсным электролитическим позолоченным никелевым микропорошком. Полимеризация компаунда производилась при  $70^{\circ}\text{C}$  в продольном магнитном поле с напряженностью  $800\div 1000$  эрстед. Микрочастицы никелевого порошка при этом выстраивались в направлении поля, концентрируясь между контактами колодки и индивидуальными электродами матрицы, надежно замыкая их между собой. В поперечном направлении такая среда остается хорошим диэлектриком. Изготовленные таким способом фотоприемники оказались достаточно надежными, выдерживали многочисленные климатические и механические испытания, а сохранившиеся образцы сохраняют свою работоспособность до настоящего времени.

На сегодняшний день, когда требования к матричным фотоприемникам предусматривают форматы  $64\times 64$ ,  $128\times 128$ ,  $256\times 256$  и более, их изготовление основывается на создании гибридных и монокристаллических структур, сочетающих в себе как собственно фоточувствительные матрицы, так и специальные кремниевые микросхемы, обеспечивающие преобразование и считывание информации с фоточувствительной структуры.

Основные полученные результаты разработки матричных ФПУ приводятся ниже.

## 8. Многоэлементные фоторезисторы и фотоприемные устройства на основе PbS и PbSe

Первые в Советском Союзе разработки многоэлементных фоторезисторов на основе сульфида и селенида свинца были проведены в НИИПФ в 1959—1961 г. по темам НИР «Вихрь» и ОКР «Ячейка».

Фоторезисторы имели 12 независимых ФЧЭ с размерами  $1\times 1$  мм<sup>2</sup>, восемь из которых располагались по окружности диаметром 6,2 мм и четыре в центре по диаметру 2,7 мм.

Основное требование заключалось в достижении пороговой чувствительности ФП  $1\cdot 10^{-9}$  Вт от АЧТ  $100^{\circ}\text{C}$  при  $f_m = 400$  Гц и  $\Delta f = 150$  Гц при температуре охлаждения  $77\text{K}$ .

ФЧС изготавливались из селенида свинца физическим методом.

Конструкция фотоприемника была выполнена в виде вакуумного сосуда Дьюара, охлаждение осуществлялось микрохолодильником типа Джоуля-Томпсона.

В последующие годы была разработана большая группа охлаждаемых и неохлаждаемых многоэлементных фотоприемников (более 50 типов) с числом фотоприемных площадок от нескольких единиц до сотен, с размерами индивидуальных элементов от  $1\times 1$  мм<sup>2</sup> до  $0,05\times 0,05$  мм<sup>2</sup> в разнообразных конструкциях применительно к различным аппаратным требованиям. Некоторые из этих приборов выпускались небольшими партиями (до 30—50 шт.), некоторые передавались на заводы отрасли и выпускались в течение длительного времени.

Один из таких приборов — 75-площадочный PbS- фоторезистор «Гранат-1» представлен на рис. 7.

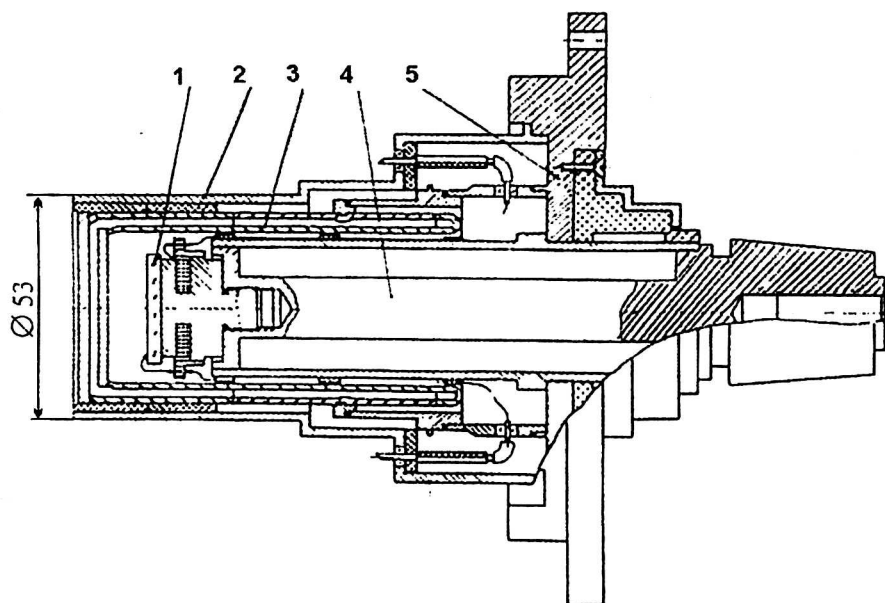


Рис. 7. 75-площадочный фоторезистор «Гранат-1»

Прибор разрабатывался в 1970—1973 г. по Постановлению правительства (ОКР «Гранат-1»). Главным конструктором ОКР был назначен В. Г. Буткевич, заместителями гл. конструктора — Ю. А. Малюгин и В. С. Зиновьев. Предназначался прибор для работы в открытом космосе в составе ИК тепlopеленгатора. Охлаждение прибора осуществлялось от специального радиатора, находящегося в открытом космосе.

Основными узлами прибора являются фоточувствительный элемент (1), теплоизолирующий сосуд Дьюара (3) с просветленными кремниевыми окнами, посадочный фланец (5) с контактными кольцами с изолированными выводами и внешний защитный кожух (2). ФЧС закреплен на медном хладопроводе (4). Хладопровод связан с фланцем (5) и держателем ФЧС тонкостенным цилиндром из нержавеющей стали, обеспечивающим достаточно высокое тепловое сопротивление между фланцем и хладопроводом. Конструкция фоторезистора обеспечивает относительно малые теплопритоки к фоточувствительному элементу (при  $T_{окр} = 40^{\circ}\text{C} \sim 2 \text{ Вт}$ ) и необходимую механическую прочность, требования к которой задаются, исходя из условий выведения прибора в составе комплекса на орбиту спутника Земли. ФЧС представляет собой линейную структуру с размерами ФЧЭ  $0,2 \times 0,2 \text{ мм}^2$ , зазорами между ними  $10\text{—}15 \text{ мкм}$  и золотым контактными растром от ФЧЭ до периферии подложки.

Институтом было выпущено более 40 экспериментальных и опытных образцов 75-элементных фоторезисторов типа «Гранат-1», которые успешно прошли испытания и эксплуатировались в составе космического тепlopеленгатора.

Другими интересными и важными представителями серии разработанных многоэлементных фотоприемников являлись 48- и 64-элементные фотоприемники из селенида свинца, охлаждаемые термоэлектрическими микрохолодильниками. Разработка и изготовление таких фотоприемников начали проводиться с начала 80-х годов по соответствующим Постановлениям правительства. Приборы предназначались главным образом для легких, носимых тепловизионных приборов ночного видения, хотя возможная область их применения значительно шире. За рубежом подобные фотоприемники с успехом используются в медицинских приборах наблюдения (термография), в аппаратуре для снятия тепловых карт местности, определения утечек тепла в промышленных и жилых зданиях и помещениях, поиска мест утечки на газовых магистралях при их облете, в научных исследованиях и др. Значительное расширение областей применения подобных фотоприемников наблюдается в последние годы и у нас в стране.

48- («Арык») и 64- («Арык-2») элементные фотоприемники разрабатывались в отделении № 1 под руководством Г. А. Казанцева — главного конструктора ОКР «Арык» и «Арык-2К». Заместителями главного конструктора назначались И. В. Корнеева, В. Т. Попова и Г. А. Аракелов — в части ТЭО.

Конструкция ФП «Арык» представлена на рис. 8. Фоточувствительный элемент ФП «Арык» расположен на прямоугольной стеклянной подложке толщиной 0,3 мм. Размеры приемных площадок ФЧЭ  $0,125 \times 0,14$  мм<sup>2</sup>. Общая длина ФЧ линейки  $7,2 \pm 0,1$  мм.

Зазоры между ФЧ площадками 20 мкм. Индивидуальные выводы от каждой площадки, в виде тонкопленочного золотого раstra разведены на периферию длинных сторон подложки, по 24 на каждую сторону.

Размеры приемных площадок в ФП «Арык-2К»  $0,05 \times 0,05$  мм<sup>2</sup>. Фоточувствительный элемент приклеен к медной посадочной поверхности холодного спая ТЭО, а электроды от его контактного раstra разводятся тонкими платиновыми проводниками на стеклометаллическое кольцо с герметично сваренными коваровыми выводами. Входное окно прибора представляет собой сапфировый диск с размерами  $\varnothing 16 \times 0,6$  мм, обе полированные стороны которого просветлены на длину волны 4,2 мкм путем нанесения тонкой пленки ZnS методом распыления в плазме аргона. Пропускание такого окна на длине волны 4,2 мкм составляет 95—97 %. Внутри прибора размещен геттер типа ПНТ-2, как дополнительное средство поддержания необходимого вакуума в процессе эксплуатации. Фотоприемник после окончательной сборки подвергается длительной (многосуточной) откачке при температуре прогрева  $\sim 60$  °С до давления  $10^{-5}$  мм. рт. ст. После достижения устойчивого вакуума при указанном давлении, прибор отпаивается пештенгелю. Принятый режим откачки и наличие геттера обеспечивает малую тепловую нагрузку на ТЭО и, соответственно, возможность длительной эксплуатации прибора с сохранением заданной температуры охлаждения и фотоэлектрических параметров.

Разработка и мелкосерийный выпуск ТЭО проводились институтом термоэлектричества при ЧГУ г. Черновцы под руководством Л. И. Анатыхука.

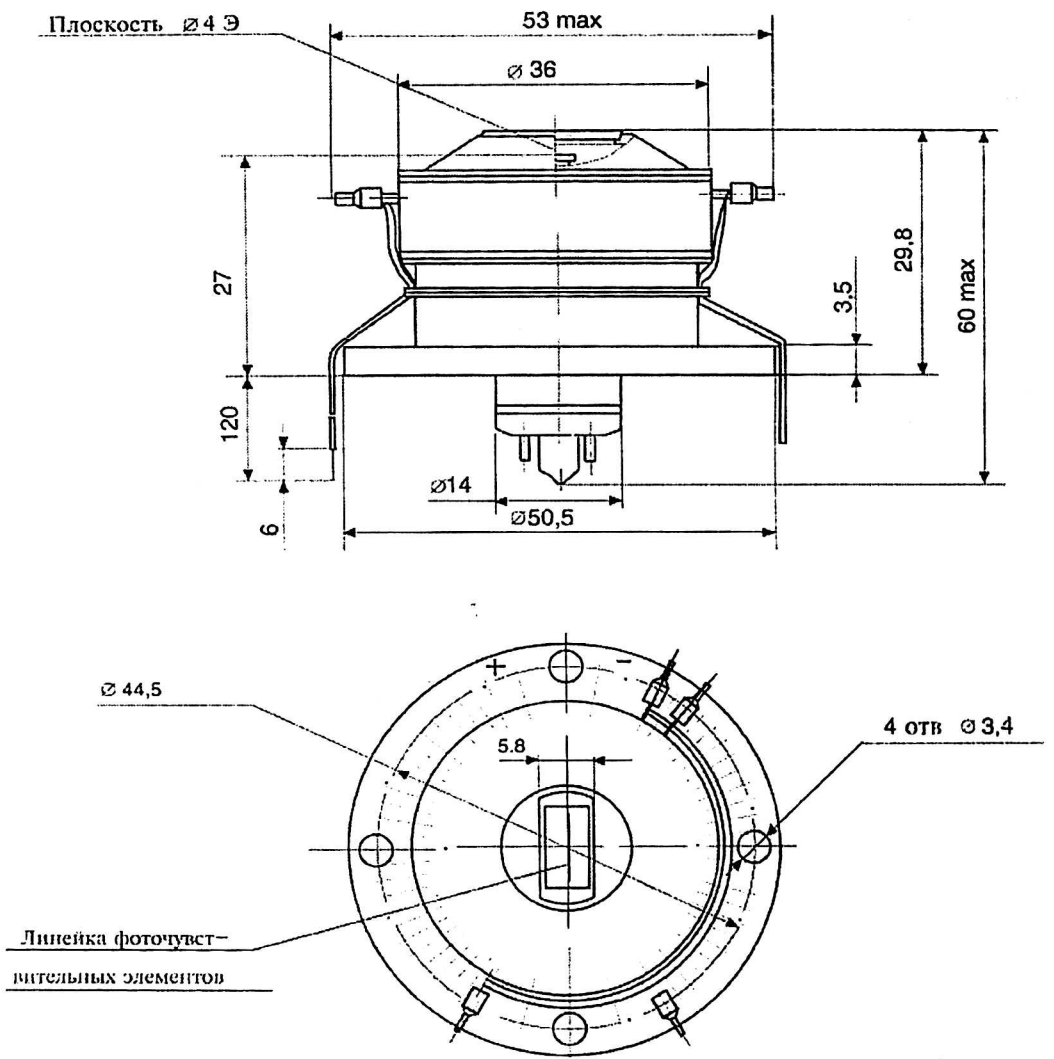


Рис. 8. Конструкция фотоприемного устройства «Арык»

Реально достигнутый уровень параметров разработанных 4-х каскадных ТЭО характеризуется следующими данными:

- |  |           |
|--|-----------|
| — температура охлаждения ФЧЭ при $T$ цоколя = 300К | — 196 К   |
| — холодопроизводительность, Вт, не менее           | — 0,1     |
| — потребляемая мощность, Вт, не более              | — 6,0     |
| — напряжение питания, В                            | — 5,4–6,0 |
| — время выхода на режим, мин, не более             | — 2       |

Усредненные значения основных параметров фотоприемников «Арык» и «Арык-2К» имеют следующие величины:

- |   |                      |
|---|----------------------|
| — спектральный диапазон чувствительности, мкм   | — 1,0–5,5            |
| — длина волны в максимуме чувствительности, мкм   | — 4,2                |
| — обнаружительная способность, $D^*$ ( $573,400,1,2\pi$ ) $\text{Вт}^{-1}\text{см}^2\text{ГцS}$ | — $(3,0-4,5)10^{10}$ |
| — темновое сопротивление, МОм   | — 1,0–15,0           |
| — постоянная времени $\tau$ , мкс   | — 25–50              |

Длительные натурные испытания фотоприемников и примененные методы ускоренных испытаний подтвердили высокую надежность приборов, сохраняемость их фотоэлектрических параметров в течение 12-летнего гарантируемого срока сохраняемости при времени безотказной работы не менее 600 часов.

Развитие фотоприемных устройств и электроники для них хорошо прослеживается на примере работ по созданию ФПУ для космической аппаратуры. До начала 80-х годов институт разрабатывал и выпускал в этом направлении его деятельности только разнообразные фотоприемники. Электронные блоки обработки и передачи информации разрабатывались и изготавливались организациями — разработчиками аппаратуры. Такое разделение функций неизбежно приводило к резкому возрастанию веса аппаратуры, потребляемой мощности и к неполной возможности реализации параметров фотоприемников. В этой связи, в 1976 г. на совещании у министра оборонной промышленности С. А. Зверева, было принято принципиальное решение о дополнительном включении в тематику института направления микроэлектроники с целью создания электронных узлов и блоков ФПУ. Вскоре, по решению правительства, НИИПФ была поручена разработка ФПУ «Гранат-2» для теплопеленгатора космической аппаратуры 74В6, которая должна была прийти на смену аппаратуре 105К с использовавшимся в ней фотоприемником «Гранат-1».

ФПУ «Гранат-2» должен был содержать 200 каналов и к нему предъявлялись следующие требования:

— область спектральной чувствительности, мкм	2,6—3,2
— число ФЧЭ,	200
— размеры ФЧЭ, мм <sup>2</sup>	0,15x0,15
— зазоры между ФЧЭ, мм, не более	0,015
— температура охлаждения, К	195±5
— обнаружительная способность $D^*(573,400,1,2\pi)$ ,	$5 \cdot 10^9$ Вт <sup>-1</sup> ·см·Гц <sup>1/2</sup>
при среднем значении $D^*$ по всем каналам	$9 \cdot 10^9$ Вт <sup>-1</sup> ·см·Гц <sup>1/2</sup>
— границы частотной характеристики каждого канала по уровню 0,7,	
$f_{\text{ниж}}$ , Гц	15
$f_{\text{верхн}}$ , Гц	600
— выходное сопротивление каждого канала, кОм	1,0
— питание ФПУ от 5 источников напряжения, В	— 30±1
и от 5 источников напряжения, В	— 60±3
— динамический диапазон каналов ФПУ от уровня порогового сигнала, дБ	50
— напряжение шума на выходе, мВ	1—2
— разброс значений напряжения шума между каналами, не более	±30%
— оптическая и электрическая взаимосвязь между любыми каналами в диапазоне температур 15°С—40°С,	0,2%
между соседними	1,0%

— конструкция ФПУ должна представлять собой законченный герметичный блок, включающий многоэлементный фоторезистор, блоки предусилителей, стабилизированные источники питания, датчики давления и температуры и узел стыка с бортовой системой охлаждения.

— защитные окна фоторезистора ФПУ должны быть выполнены из просветленного сапфира.

— Вес ФПУ не более, кг

13,0

Этот далеко не полный перечень требований к ФПУ наглядно показывает резко возрастающую трудоемкости разработки и изготовления таких приборов по сравнению с разработкой и изготовлением фоторезисторов.

Потребовалось также разработать, изготовить и укомплектовать современной вычислительной техникой большой комплекс технологического и испытательного оборудования, без которого было бы невозможно изготавливать, проводить измерения многочисленных характеристик, испытания и оперативно обрабатывать результаты. В исследованиях и разработке этих ФПУ принимал участие большой коллектив института и ряд предприятий других министерств и ведомств. Главным конструктором этой работы был назначен В. Г. Буткевич, заместителями гл. конструктора Ю. А. Малюгин, В. Д. Бочков и А. А. Тимофеев.

Разработанная конструкция ФПУ представлена на рис 9.

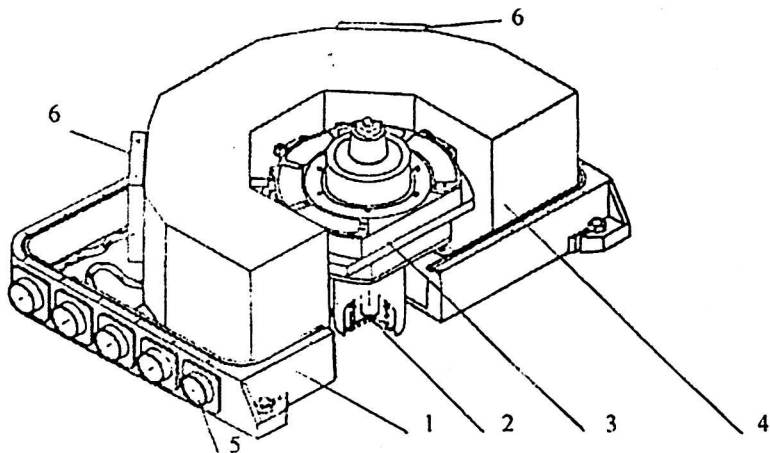


Рис. 9. Конструкция фотоприемного устройства «Гранат-2»

В герметичном объеме ФПУ располагается 200-элементный фоторезистор (3), многоканальный блок предварительных усилителей (БПУ) (4), стабилизаторы источников питания (6) и датчик давления, объединенные системой кабельных соединений в единый прибор. Подключение к прибору производится через 10 многоштырьковых, герметично установленных разъемов типа РСГС-50 (5). Корпус ФПУ для уменьшения веса изготовлен из магниевого сплава. На его основании закрепляется инваровый цилиндр с фланцем, к которому крепится фоторезистор.

Охлаждение фоторезистора осуществляется через медный хладопровод, стыкуемый с бортовой радиационной системой охлаждения. Для контроля температуры ФЧЭ на хладопроводе расположен проволочный термометр сопротивления. Электрические выводы от ФЧЭ выполнены в виде плоского многожильного кабеля. Конструкция БПУ представляет собой единый блок, выполненный в виде полукольца, охватывающего фоторезистор. БПУ имеет 210 каналов усиления, разделенных на 5 независимых секций, каждая из которых содержит 7 печатных плат с 42 усилителями. Печатные платы

крепятся к специальным основаниям — радиаторам, отводящим выделяемую усилителями

мощность на корпус БПУ. Стабилизаторы напряжения выполнены в виде двух отдельных конструктивных сборок. Каждый канал усиления состоит из нагрузочного резистора  $R_n$ , включенного последовательно с соответствующей площадкой фоторезистора  $R_f$  и предусилителя В2-1. Предусилитель В2-1 выполнен в виде микросхемы, изготовленной по гибридно-пленочной технологии с использованием навесных бескорпусных транзисторов и конденсаторов.

Каналы БПУ имеют следующие параметры:

— коэффициент усиления	$45 \pm 15\%$
— средне-квадратич. напряжение шума, приведенное к входу усилителя, мкВ	12,0
— входное сопротивление, $R_{вх}$ , Ом	$2 \cdot 10^6$
— выходное сопротивление $R_{вых}$ , Ом	$10^3$
— $f$ верхн. полосы пропускания, Гц	300–600
— $f$ ниж. полосы пропускания, Гц	20
— взаимное влияние каналов	0,1%
— мощность потребления БПУ в целом, Вт	3,0
— допустимое напряжение пульсаций источников питания, мВ	10,0

Достигнутые эксплуатационные характеристики разработанного ФПУ наглядно подтвердили преимущества концепции создания единой конструкции, объединяющей многоэлементные фоторезисторы и электронные блоки преобразования информации.

Институтом было выпущено более 20 шт. образцов ФПУ «Гранат-2». После чего к их промышленному выпуску приступил московский завод «Сапфир», который выпускал эти изделия до 1995 г.

Фотоэлектрические и эксплуатационные параметры этих изделий, как правило, соответствовали требованиям ЧТУ. Усредненная по каналам обнаружительная способность при температуре  $-80^\circ\text{C}$  находилась в пределах  $(11,7—18,6) \cdot 10^9$  при норме  $9 \cdot 10^9$ , причем у поставлявшихся заказчику образцов число отдельных каналов со значениями  $D^* < 5 \cdot 10^9$  не превышало 5.

В 1980 г. перед нашим институтом, в связи с принятым решением о создании более совершенной системы СПРН, решением правительства была поставлена задача создания ФПУ нового поколения («Гранат-32»), содержащего 3072 канала обнаружения в спектральном диапазоне 2,7 — 3,1 мкм.

ФПУ, согласно предъявленным требованиям, должно было содержать два охлаждаемых 1536-элементных фоторезистора на основе PbS, блоки обработки, преобразования и считывания информации, выполненные в микронэлектронном исполнении, с передачей этой информации по 12 параллельно работающим информационным выходам.

Регистрируемые фоточувствительными элементами ФПУ сигналы от источников излучения, при заданных размерах ФЧЭ  $60 \times 60 \text{ мкм}^2$  и скоростях сканирования приемным зеркалом объектива, представляют собой импульсы длительностью 2 мс на уровне 0,5 амплитуды, близкие к синусоидальной форме. Было определено, что для обнаружения таких импульсов от реальных источников излучения при заданных дальностях и выбранном

объективе, пороговая чувствительность для 95% каналов ФПУ должна быть не более  $6 \cdot 10^{-13}$  Вт/эл при температуре охлаждения минус  $80^\circ\text{C}$ .

Разработанная схема ФПУ «Гранат-32» (ФПУ81Г6Ф) представлена на рис. 10.

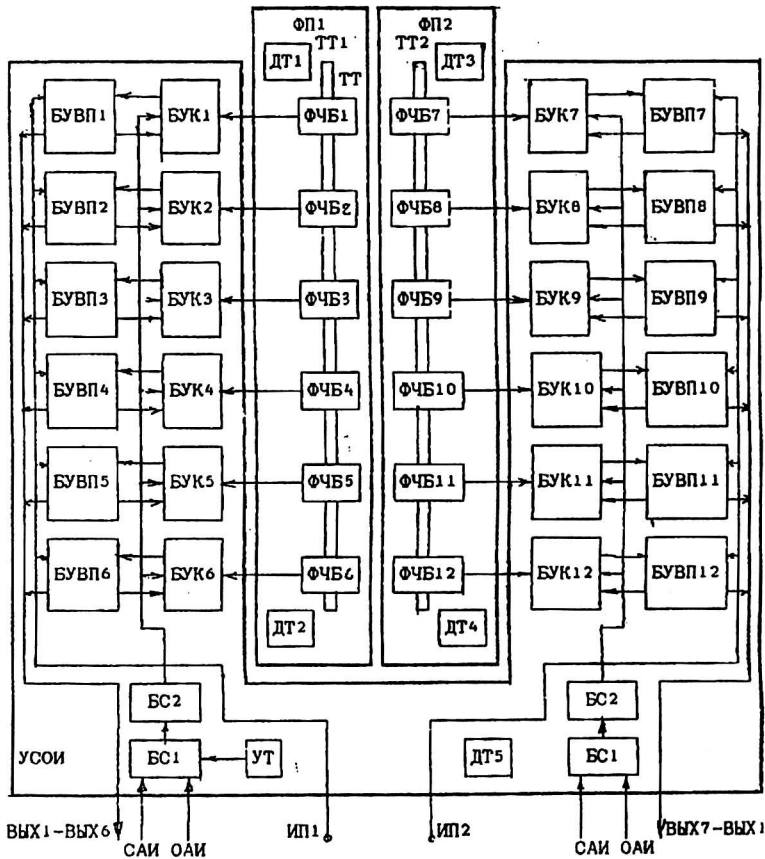


Рис. 10. Структурная схема фотоприемного устройства 81Г6Ф

ФПУ содержит два параллельно расположенных 1536-элементных фотоприемника и электронное устройство съема и обработки информации (УСОИ), включающее 256-канальные блоки усиления и коммутации (БУК1-БУК12), блоки усиления и вторичного питания (БУВП1-БУВП12), блоки синхронизации (БС1, БС2), устройство телеметрии (УТ) датчики температуры (ДТ1-ДТ5).

Каждый ФП состоит из шести идентичных 256-канальных фоточувствительных блоков (ФЧБ1-ФЧБ6, ФЧБ7-ФЧБ12), тепловой трубы (ТТ1-ТТ2) для охлаждения ФЧБ, датчиков температуры (ДТ1-ДТ4) для контроля температуры охлаждения ФП.

В свою очередь, каждый ФЧБ сопрягается с одним из двенадцати идентичных БУКов. В состав БУКа входят шестнадцать 16-ти канальных модулей предварительной обработки информации (МПО), микросборка коммутатора второй ступени (МК), включающая два коммутатора (К2-1, К2-2) и буферный усилитель. МПО включает шестнадцать схем предварительной обработки (СПО), обеспечивающих оптимальное согласование с фоторези-

стивными элементами ФЧБ, усиление сигналов с них, формирование требуемой частотной характеристики и 16-канальный коммутатор аналоговых сигналов (коммутатор первой ступени), осуществляющий пространственно-временное преобразование усиленных сигналов. МК обеспечивает коммутацию сигналов с выходов МПО на один выход БУК.

Блоки усиления и вторичного питания осуществляют согласование фотоприемного устройства с внешней нагрузкой, защиту его от коротких замыканий на общий вывод, питание ФЧБ и БУК.

Устройство телеметрии предназначено для контроля уровня спецвоздействий, наличия импульсов ОАИ и САИ на входе ФПУ и выдачи соответствующей информации в телеметрическую систему аппаратуры.

Кроме того, в ФПУ установлены два датчика давления для контроля герметичности каждого из 2 его герметичных отсеков.

Такой принцип построения ФПУ обеспечивает независимую работу, питание и управление каждым ФЧБ, съем и обработку информации — по двенадцати параллельно работающим выходам (Вых 1—Вых 12) и высокий уровень унификации. Все это позволяет легко провести замену любого блока ФПУ при его сборке и испытаниях.

Конструкция фотоприемника представляет собой герметичное устройство с окном из просветленной сапфировой пластины и гибкими выводами в виде плоских многожильных кабелей на полиамидной основе.

Внутри каждого фотоприемника установлены по шесть ФЧБ, которые через переходные колодки развариваются на гибкие выходные кабели.

Фоточувствительные блоки юстируются и закрепляются на посадочной площади держателя, выполненной с точностью 0,0025 мм на длине 110 мм.

Непосредственно под посадочной плоскостью в держателе имеется цилиндрическая полость для установки тепловой трубы системы охлаждения. Для устранения паразитных засветок, снижения уровня фона и обеспечения заданного апертурного угла над ФЧ линейкой установлена специальная диафрагма с антиотражающим покрытием с шестью прорезями, расположенными над каждым ФЧ блоком.

Выходные гибкие кабели соединяют ФЧ блоки фотоприемников с 256-канальными БУК.

Буферный усилитель используется для согласования работы коммутаторов первой (К1) и второй (К2-1) ступеней и для существенного снижения погрешностей, связанных с электрическими взаимосвязями между каналами и «геометрическим шумом».

Коммутатор К2-2 обеспечивает замыкание выходов буферных усилителей на землю после окончания работы коммутаторов первой ступени К1.

Режимы и последовательность работы коммутаторов первой и второй ступени выбраны такими, чтобы практически исключить коммутационные помехи при считывании сигналов.

Реализация такого принципа построения БУК и ФПУ потребовала создания новой малогабаритной, с низким уровнем потребления микроэлементной базы усилителя и коммутатора.

С этой целью был специально разработан 16-канальный коммутатор по технологии КМОП структур на сапфировых подложках (КНС). В результа-

те, за счет снижения паразитных емкостей МОП-транзисторов (на порядок величины по сравнению с обычной МОП-технологией) существенно уменьшены заряды переключения и мощность потребления.

На этой основе был разработан 256-канальный двухступенчатый коммутатор с погрешностью коммутации и соответствующей ей структурной погрешностью, приведенной к входу, не более 0,3 мВ на частоте коммутации 200 кГц.

Схема предварительной обработки (СПО) построена на основе специально разработанного бескорпусного операционного усилителя типа Б 140УД12, отличительной особенностью которого является наличие динамической нагрузки, обеспечивающей режим оптимального согласования с ФЧЭ фотоприемника ( $R_{фп} = R_n$ ) при изменении сопротивлений ФЧЭ в широких пределах (от 100 кОм до 10 МОм).

Конструкция ФПУ схематично представлена на рис. 11. Она выполнена в виде двухобъемного герметичного изделия. В первом объеме располагаются два фотоприемника, 12 БУКов и датчик давления. Во втором объеме установлены 12 блоков вторичного усиления, которые через герморазъемы стыкуются с БУКАми в первом объеме, блоки питания, синхронизации и телеметрии.

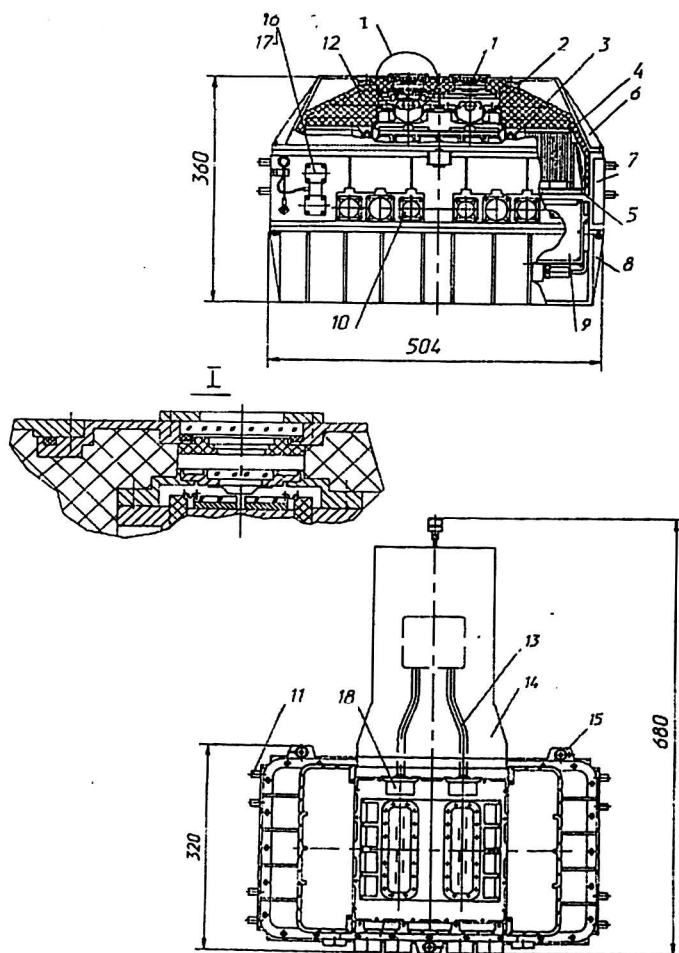


Рис. 11. Конструкция ФПУ 81Г6Ф

Основание сверху и снизу герметично закрывается крышками.

В верхней крышке установлен узел входных окон и два сильфонных узла, через которые вводятся тепловые трубы системы охлаждения. Все корпусные элементы конструкции изготавливаются из магниевого сплава для уменьшения веса изделия. Внутренний свободный объем корпуса заполнен теплоизоляционным материалом и газом — ксеноном для снижения тепловой нагрузки на систему охлаждения. В НИИПФ (впоследствии НПО «Орион») было изготовлено и поставлено заказчику 12 изделий «Гранат-32». Типичный уровень достигнутых основных параметров и характеристик этих изделий и нормативные требования к ним представлены в табл. 6.

Таблица 6

Наименование параметра	Требования ТУ	Фактическое значение
Среднее по каналу значение порогового потока, Вт/эл при температуре охлаждения		
— минус 80°C	$\leq 6 \cdot 10^{-13}$	$(3 - 5) \cdot 10^{-13}$
— минус 100°C	-	$(2,5 - 3,5) \cdot 10^{-13}$
Коэффициент фотоэлектрической связи, %		
- между соседними каналами	$\leq 5$	2 - 3
- через один	$\leq 2$	0,3 - 0,5
- остальные	$\leq 1$	0,2 - 0,3

В разработке и изготовлении ФПУ «Гранат-32» принимал участие большой коллектив сотрудников отделения № 1 и других подразделений института с участием ряда предприятий электронной, химической промышленности и др. Работа проводилась под руководством главного конструктора В. Г. Буткевича, заместителей гл. конструктора В. Д. Бочкова, Ю. А. Малюгина, А. А. Гольденвейзера, А. А. Тимофеева. Большой вклад в разработку и выпуск этих изделий внесли Л. Н. Залевская, Е. Б. Калинина, В. А. Елесин, Л. К. Бодрякова, Е. Р. Глобус, Ю. В. Уваров, Э. И. Кафтаненко, М. Л. Храпунов, М. У. Карпейкин, Г. М. Катенев, С. Н. Федоров, С. Г. Кин, В. Ф. Семенюк и др.

В последние годы, наряду с разработкой многоэлементных фотоприемников и ФПУ на основе фоточувствительных слоев сульфида и селенида свинца, нами были начаты разработки матричных ФПУ.

С учетом литературных данных [7] и результатов, отмеченных выше, были рассмотрены несколько вариантов топологии и конструкции матричных ФПУ. В результате мы остановились на двух:

— гибридный вариант для малоформатных матриц, в котором фоточувствительная структура изготавливается на обычных подложках из стекла или кварца, а за ее пределами располагаются микроэлектронные устройства управления, преобразования и считывания информации,

— монолитный вариант, при котором фоточувствительная структура формируется непосредственно на поверхности заранее изготовленной кремниевой матричной микросхемы, содержащей микроэлектронные элементы преобразования и считывания информации.

В обоих вариантах топология матричной фоточувствительной структуры формируется под схему с X-Y адресацией.

Схема считывания сигналов с фоторезистивной матрицы с X-Y адресацией приведена на рис 12. Съем информации с матричного ФП осуществляет-

ся путем подключения напряжения смещения  $E_{см}$  к участку слоя, находящемуся на пересечении двух выбранных строк и столбцов и регистрации протекающего через него тока.

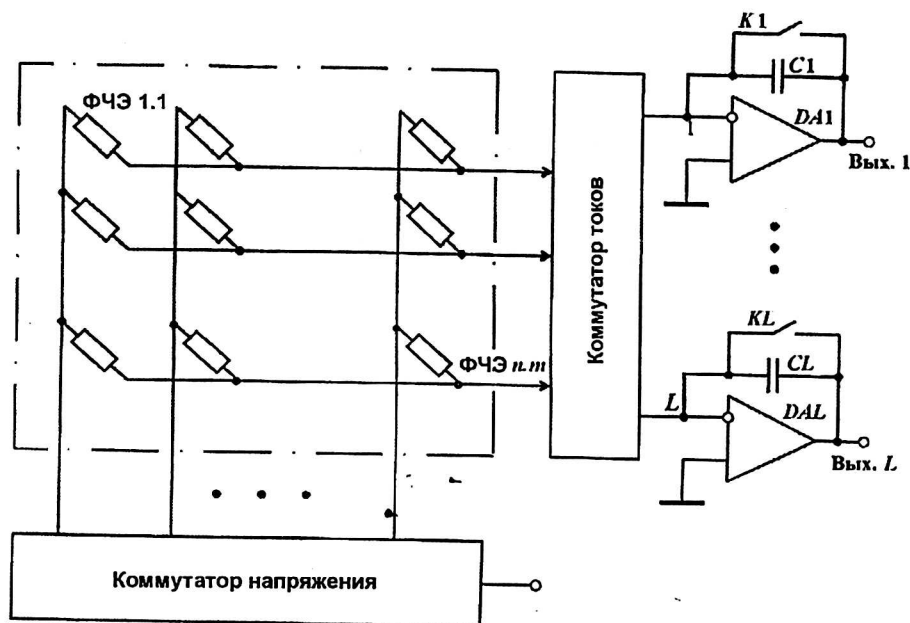


Рис. 12. Схема считывания сигналов с фоторезистивной матрицы с X-Y адресацией формата  $n \times m$

При последовательном опросе на шинѣ столбцов последовательно, с частотой строк, подаются импульсы напряжения смещения  $E_{см}$ , а шины строк, также последовательно с более высокой частотой подключаются к входам стробируемых интеграторов на основе операционных усилителей  $DA1 \dots DAL$ .

С целью уменьшения перекрестных искажений все строки и столбцы, кроме двух выбранных, подключаются на это время к общей шине.

Таким образом, в отличие от ФПУ, в которых организовано покадровое или построчное накопление, в схеме, приведенной на рис. 12, накопление возможно только при подключении одной из строк  $l$   $m$ , к входу одного из  $L$  интеграторов. Это время в  $m/L$  раз меньше, чем время накопления по строке в обычном ФПУ, в котором непосредственно к каждому интегратору (интегрирующей емкости) подключается каждая строка.

Приведенная идеология построения ФПУ на слоях халькогенидов свинца ориентирована на то, что накопление преобразованной энергии падающего излучения происходит в материале фоточувствительного слоя за счет больших величин «эффективного времени жизни» носителей.

Проведенные расчеты показали, что схема рис. 12 может являться достаточно эффективной для форматов матрицы  $64 \times 64$  и  $128 \times 128$ .

Технология изготовления ФЧ матричной структуры включает большое число технологических операций с применением современных методов фотолитографии, ионного травления, нанесения в вакууме металлических и диэлектрических покрытий, полимерной защиты и др.

Первые матричные ФПУ со слоями PbSe были разработаны и изготовлены в соответствии с требованиями заказчика в 1995 году. Структурная схема такого ФПУ приведена на рис. 13. В состав ФПУ входят: матрица ФЧЭ (МФ 8x8), термоэлектрический охладитель (ТЭО), датчик температуры (ДТ), устройства предварительной обработки (УПО1- УПО8), коммутатор распределитель (М1<sup>x</sup> 8), устройства двойной коррелированной выборки (ДКВ1-ДКВ8), 16-канальный коммутатор (М16<sup>x</sup> 1), выходной усилитель (ВУ), стабилизатор питания (СП), устройства контроля температуры (УКТ) и синхронизации (УС), устройства стабилизации питания (УСП), усилитель мощности (УМ). Конструкция ФПУ выполнена в виде герметичной прямоугольной коробки с радиатором в габаритах 190 x 150 x 30 мм.

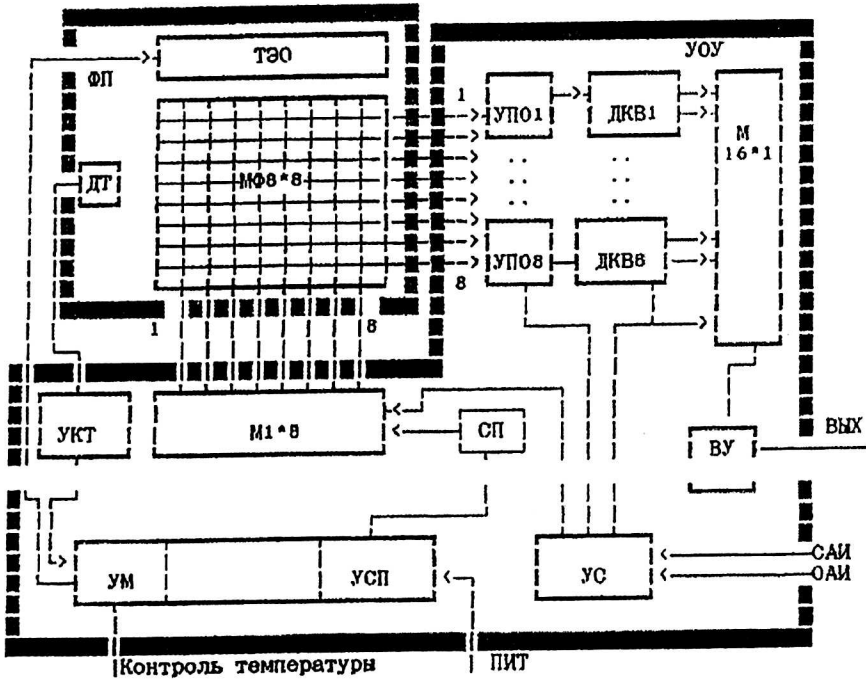


Рис. 13. Структурная схема матричного фотоприемного устройства

Основные характеристики образцов ФПУ имели следующие значения:

- Интегральный пороговый поток от АЧТ 573К, не более, Вт
  - при  $T_{фчс} = 0^{\circ}\text{C}$   $2 \cdot 10^{-8}$
  - при  $T_{фчс} = -20^{\circ}\text{C}$   $1 \cdot 10^{-8}$
- Мощность энергопотребления, Вт, не более
  - при  $T_{фчс} = 0^{\circ}\text{C}$  8,6
  - при  $T_{фчс} = -20^{\circ}\text{C}$  12,5
- Время опроса одного канала, мкс 7,8
- Время считывания кадра, мс 0,64
- Время выхода на режим (с ТЭО), мин, не более 3
- Коэффициент фотоэлектрической связи, %, не более
  - между соседними каналами 2,9
  - через один 0,3
  - между остальными 0,05

Питание ФПУ осуществлялось от внешних источников постоянного напряжения 5В, 6,3 В, минус 6,3В. Управление ФПУ обеспечивается импульсами синхронизации (САИ) и опроса (ОАИ).

В настоящее время проводится разработка матричных ФПУ формата 128x128 и 256x256 в монокристаллическом варианте. Разработана технология изготовления фоточувствительных слоев PbS и PbSe на поверхности окисленного кремния со сформированной системой электродов, являющихся входными контактами кремниевой матричной микросхемы. Разработана схемотехника и топология матричной микросхемы. Ведется отработка измерительно-испытательного оборудования для оценки и контроля разнообразных характеристик и параметров как фоточувствительных структур и кремниевых микросхем, так и ФПУ в целом.

Проведенные нами расчеты величины эквивалентной шуму разности температур  $T_n$ , которая может быть зарегистрирована с помощью ФПУ формата 256x256 в составе тепловизионного прибора с объективом, имеющим  $D/f=1$  и пропускание  $\tau_{об}=0,7$ , показывают, что для ФПУ, охлаждаемого двухкаскадным ТЭО,  $T_n \approx 0,5\text{К}$ , при  $T_{охл}=77\text{К}$   $T_n \approx 0,1\text{К}$ . Эти значения указывают на перспективность использования матричных ФПУ на основе PbSe для тепловизионных приборов с широкой областью применения.

### 9. Фотоприемники на основе твердых растворов соединений $A^IVB^VI$

Для ряда практически важных задач представляют интерес фотоприемники, у которых относительная спектральная характеристика располагается между аналогичными характеристиками фотоприемников из PbS и PbSe. Было известно, что PbS и PbSe образуют непрерывный ряд твердых растворов  $PbS_{1-x}Se_x$ , где  $x$  может изменяться от 0 до 1.

Зависимость ширины запрещенной зоны  $E_g$  от значения  $x$  в монокристаллах  $PbS_{1-x}Se_x$  при температуре 90 К исследовалась Л. Н. Курбатовым и А. Д. Бритовым. Было показано, что  $E_g = f(x)$  в пределах точности определения состава является линейной с наклоном прямой  $1,3 \cdot 10^{-3}$  эВ/К.

В лаборатории проф. Б. Т. Коломийца в ЛФТИ АН СССР им. Иоффе изготавливались пленки из заранее синтезированных монокристаллов и твердых растворов. Однако возникали существенные трудности с переносом исходного вещества в пленку при его испарении в вакууме, вследствие процессов диссоциации.

Нами была разработана методика изготовления фоточувствительных поликристаллических слоев таких соединений путем испарения в вакууме из тигля механической смеси PbS и PbSe на подогретую до  $\sim 200^\circ\text{C}$  стеклянную подложку. Полученные пленки затем активировались в муфельных печах при температуре около  $600^\circ\text{C}$ . Условия нанесения и активации отрабатывались с параллельным проведением рентгеноструктурных анализов как активированных, так и неактивированных слоев для подтверждения образования именно твердого раствора, а не механической смеси. Содержание селенида свинца в слоях оценивалось по известной зависимости параметра элементарной ячейки  $a_0$  от состава. Состав продуктов окисления слоя определялся с помощью таблиц из американского стандарта ASTM. Исследова-

ния показали, что в слое образуется твердый раствор состава, незначительно отличающегося от состава исходной шихты. В процессе активации происходит незначительное обогащение состава  $PbS_{1-x}Se_x$  селенидом свинца.

Разработанные технологические режимы позволили изготавливать слои различных составов с хорошим уровнем фотоэлектрических параметров. В диапазоне  $\lambda_{0,5}$  ( $3,7 \div 6,3$ ) мкм и соответствующей  $\lambda_{max}$  ( $3,3 \div 4,8$ ) мкм,  $D^*(573,400,1,2\pi)$  лежит в пределах  $(0,5 \div 6,0) \cdot 10^{10}$  Вт<sup>-1</sup>·см·Гц<sup>1/2</sup> при температуре 77К. На рис. 14 приведены спектральные характеристики слоев  $PbS_{1-x}Se_x$  при различных значениях  $x$  и  $T = 77К$ .

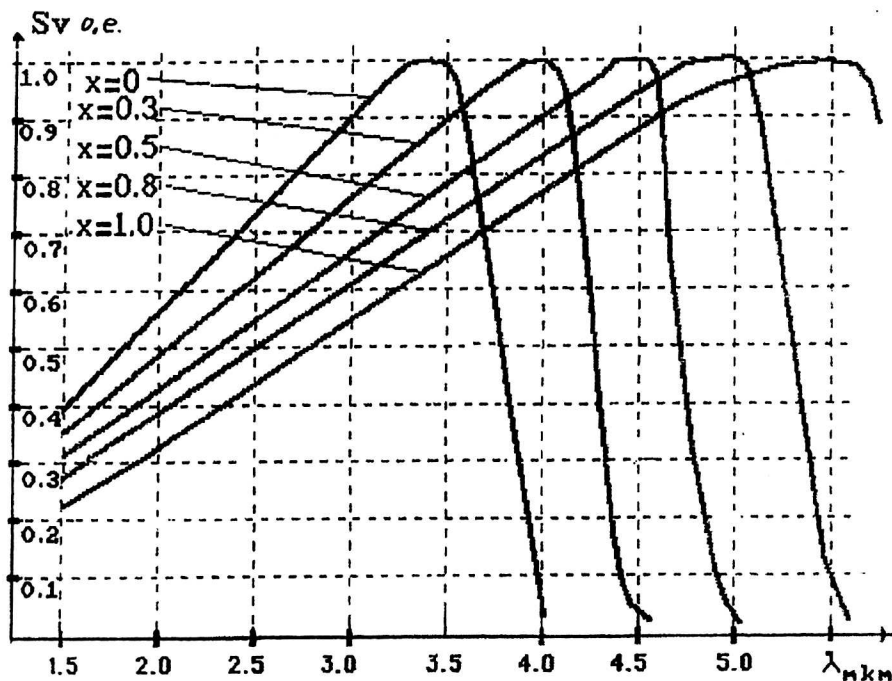


Рис. 14. Спектральные характеристики фотоприемников состава  $PbS_{1-x}Se_x$ .

На основе слоев состава  $PbS_{0,7}Se_{0,3}$  были разработаны и выпускались охлаждаемые фоторезисторы «Кубрик» для авиационных спектрометров и радиометров.

В последующие годы работы были направлены на разработку технологии изготовления монокристаллических пленок тройных соединений с целью создания фотодиодов, обладающих по своим характеристикам рядом преимуществ по сравнению с фоторезисторами. На основе таких пленок были разработаны и узкополосные инжекционные излучатели.

В отличие от поликристаллических фоторезисторов, в спектре шума которых обычно присутствует заметная составляющая со спектральным распределением мощности вида  $1/f$ , в фотодиодах наблюдается главным образом генерационно-рекомбинационный шум. При достаточно низких температурах, когда тепловая составляющая Г-Р шума становится относительно малой, обнаружительная способность фотодиодов может достигать практически предельного уровня, ограниченного лишь случайными флук-

туациями излучения окружающего фона. Известны ряд публикаций зарубежных фирм (Ford Motor, Perkin Elmer, L.N.V., США и др.) по разработкам одно- и многоэлементных фотоприемников на фотодиодных структурах PbS, PbTe,  $PbS_{1-x}Se_x$ , PbSnTe и др. для областей спектра  $2\div 5$  и  $8\div 14$  мкм. На лабораторных образцах PbS и  $PbS_{1-x}Se_x$  была достигнута обнаружительная способность почти предельно достижимого уровня  $D^*(\lambda_{max}) = 10^{12} \text{ Вт}^{-1} \cdot \text{см} \cdot \text{Гц}^{1/2}$  при  $\lambda_{\text{мкх}} = 3,7$  мкм и инерционности  $100\div 200$  мкс.

Для изготовления фотодиодов необходимо было разработать технологию изготовления качественных эпитаксиальных пленок PbS и тройных твердых растворов. В качестве подложек использовались пластинки фтористого бария, который по своим физическим свойствам (типу кристаллической решетки, параметру решетки ( $a_0 = 6,2$  А), коэффициенту термического расширения) наиболее близок к сульфиду свинца. Эпитаксиальные пленки PbS изготавливались испарением в вакууме исходного материала (шихты) на подложки, имеющие температуру  $300\text{—}400^\circ\text{C}$  при температуре испарителя  $730\text{—}740^\circ\text{C}$ . Полученные пленки имели проводимость  $n$ -типа при концентрации и подвижности основных носителей при 80 К  $(2\text{—}5) \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$  и  $(1\text{—}3) \cdot 10^3 \text{ см}^2 \cdot \text{В}^{-1} \cdot \text{с}^{-1}$  соответственно. Для получения пленок  $p$ -типа, необходимых для изготовления фотодиодов, изготовленные пленки  $n$ -типа подвергались изотермическому отжигу в квазизамкнутом объеме в парах серы при  $200^\circ\text{C}$  в течение 2 часов. В результате получались пленки  $p$ -типа с концентрацией и подвижностью при 80К  $(1\text{—}2) \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$  и  $(2\text{—}5) \cdot 10^3 \text{ см}^2 \cdot \text{В}^{-1} \cdot \text{с}^{-1}$ . Однако воспроизводимость результатов по такой методике была недостаточно высокой и была предпринята попытка получения пленок  $p$ -типа введением легирующих примесей в шихту. Было найдено, что устойчивый  $p$ -тип проводимости получается в случае легирования натрием ( $\text{Na}_2\text{S}$ ) при содержании натрия в шихте  $0,5\text{—}1,0$  ат. %. Комплексные исследования электрофизических свойств легированных эпитаксиальных пленок: температурные зависимости коэффициента Холла, подвижности, удельного сопротивления, спектров пропускания, отражения, фотолюминесценции, не обнаружили каких-либо особенностей, связанных с наличием примесных уровней.

Эпитаксиальные пленки твердых растворов PbS-CdS, PbS-PbSe, PbS-SnS также изготавливались путем испарения шихты в вакууме на горячую подложку из одного источника (тигля). Шихта для получения пленок PbS-PbSe готовилась из измельченных кристаллов PbS и PbSe с последующим тщательным перемешиванием. Исследования показали, что незначительное различие в давлении паров ( $\lg P_{\text{PbS}} = -1,07$ ,  $\lg P_{\text{PbSe}} = -1,00$ ) не приводит к изменению состава пленки в процессе ее роста. В шихту также вводился Na ( $1\% \text{ Na}_2\text{S}$ ) и пленки получались  $p$ -типа. Концентрация и подвижность дырок при 77К имели значения  $(1\text{—}2) \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$  и  $(2\text{—}5) \cdot 10^3 \text{ см}^2 \cdot \text{В}^{-1} \cdot \text{с}^{-1}$  практически для всех составов. Пленки состава PbS-SnS, при описанном способе испарения получались в процессе роста неоднородными по составу из-за большого различия давления пара ( $\lg P_{\text{PbS}} = -1,07$ ,  $\lg P_{\text{SnS}} = -0,45$  при  $740^\circ\text{C}$ ). Похожая ситуация наблюдалась и для случая PbS - CdS. Однородные по толщине пленки удалось получить путем специальной подготовки шихты. Слиток ( $99\% \text{ PbS} + 1\% \text{ Na}_2\text{S}$ ) измельчался до зерен с размерами  $\sim 100$  мкм, тщатель-

но перемешивался с порошком CdS и прессовался в таблетки при давлении  $\sim 5 \text{ т/см}^2$ . Пленки, полученные из таких таблеток, получались однородными по составу. Ширина запрещенной зоны при содержании кадмия  $5 \div 8\%$  составляла  $(0,4 \div 0,46) \text{ эВ}$ .

Разработанные методы получения качественных эпитаксиальных пленок PbS и тройных соединений позволили приступить к отработке методов изготовления фотодиодных структур. Для формирования p-n перехода, на одну из половин чистой подложки  $\text{BaF}_2$  наносилась испарением в вакууме тонкая металлическая пленка галлия или индия. Затем на всю поверхность подложки наносилась полупроводниковая пленка. Во время выращивания эпитаксиальной пленки PbS или тройного соединения при температуре подложки  $390\text{--}400^\circ\text{C}$ , происходит диффузия металла в сульфид свинца или его твердый раствор, и эта часть пленки приобретает проводимость n-типа. Таким методом были изготовлены структуры с поперечными p-n переходами и лабораторные образцы одноэлементных, 4- и 8- элементных фотодиодов с площадками  $150 \times 70 \text{ мкм}^2$  и  $350 \times 70 \text{ мкм}^2$  и с зазорами между элементами  $\sim 50 \text{ мкм}$ . Обнаружительная способность этих фотодиодов  $D^*(\lambda_{\text{max}})$  при рабочей температуре  $80\text{--}120\text{K}$  составляет  $(1,5 \div 2) \cdot 10^{11} \text{ Вт}^{-1} \cdot \text{см} \cdot \text{Гц}^{1/2}$ ,  $\lambda_{\text{max}} - 3,5 \div 3,6 \text{ мкм}$ , постоянная времени  $100\text{--}200 \text{ мкс}$ . В случае применения просветляющих покрытий значение  $D^*$  может возрасти на  $30 \div 40\%$ . Указанный уровень  $D^*$  реализуется с операционным усилителем на базе серийной микросхемы типа 744 УД1А, с сопротивлением в цепи обратной связи  $10^8 \text{ Ом}$  при уровне шума  $\sim 1,5 \cdot 10^{-14} \text{ В} \cdot \text{Гц}^{-1/2}$ .

В зависимости от использованного материала длинноволновая граница чувствительности может существенно изменяться. Например, для состава  $\text{Pb}_{0,95}\text{Cd}_{0,05}\text{S}$   $\lambda_{\text{ep}} = 2,5 \text{ мкм}$ , для p-n переходов на пленках  $\text{PbS}_{0,6}\text{Se}_{0,4}$  и  $\text{Pb}_{0,95}\text{Cd}_{0,05}\text{S}$   $\lambda_{\text{ep}} = 5,5 \text{ мкм}$ , для PbS  $- 3,8 \text{ мкм}$ . В таблице № 7 приведены значения фототока (тока короткого замыкания —  $I_{\text{кз}}$ ), шумового тока и обнаружительной способности изготовленных образцов фотодиодов различного состава при облучении равновесным фоном  $300\text{K}$ , в условиях вымороженного фона и с просветляющим покрытием.

Таблица № 7

$\lambda_{\text{max}}$ , мкм	$I_{\text{фонный}}$ , А	$I_{\text{ш}}$ , А ( $\Delta f = 200 \text{ Гц}$ ) $\times 10^{12}$	$I_{\text{ш}}$ , А С охл. фильтром $\times 10^{12}$	$D^*$ , $\text{Вт}^{-1} \cdot \text{см} \cdot \text{Гц}^{1/2}$ $\times 10^{-11}$	$D^*$ с просветл. покрытием и охл. фильтром, $\text{Вт}^{-1} \cdot \text{см} \cdot \text{Гц}^{1/2}$ $\times 10^{-11}$
2,8	$1,5 \cdot 10^{-8}$	1,23	0,72	2,3	5,5
3,0	$1,2 \cdot 10^{-8}$	2,00	1,40	2,0	4,3
3,5	$1,9 \cdot 10^{-7}$	5,4	3,60	1,75	4,1
4,0	$0,8 \cdot 10^{-7}$	11,00	6,10	1,1	3,0
4,5	$1,0 \cdot 10^{-6}$	14,00	6,10	0,8	2,7

Изготовленные образцы 8-элементных линеек фотодиодов на основе PbS с размерами индивидуальных элементов  $150 \times 150 \text{ мкм}$  имели средние значения  $D^*(\lambda_{\text{max}})(800, 2\pi, 1) \sim 2,5 \cdot 10^{11} \text{ Вт}^{-1} \cdot \text{см} \cdot \text{Гц}^{1/2}$  при окружающем фоне  $300\text{K}$  и рабочей температуре  $120\text{K}$ . При вымораживании фона ( $T\phi \sim 200\text{K}$ ),

их обнаружительная способность становилась  $D^*(\lambda_{\text{мик}}) \sim 4,0 \cdot 10^{11} \text{ Вт}^{-1} \cdot \text{см} \cdot \text{Гц}^{1/2}$ . Разброс значений электрических и фотоэлектрических параметров в пределах одной линейки составлял 15—20%.

Постоянные времена  $\tau$ , определенные из частотных зависимостей сигнала, лежали в пределах 150—200 мкс.

Фактически измеренные значения фоновых токов находятся в хорошем соответствии с расчетными, что свидетельствует о реализации фотодиодами режима работы, ограниченного фоном.

Разработка поликристаллических фоточувствительных слоев и эпитаксиальных пленок бинарных и тройных соединений  $A^4B^6$ , фоторезисторов и фотодиодов на их основе проводилась под руководством И. А. Дрозда. В 1996 г. по этой тематике им была успешно защищена докторская диссертация.

К сожалению, в 1997 г. из-за резкого сокращения финансирования, работы в этом весьма перспективном направлении практически полностью прекратились.

## 10. Электроника для фотоприемников из халькогенидов свинца

Основные проблемы развития электроники для фотоприемников возникли и обострились с появлением фотоприемных устройств (ФПУ), в состав которых наряду с фотоприемниками стали входить малошумящие предусилители ПУ, устройства формирования оптимальных частотных характеристик, схемы питания и другие устройства.

Эти проблемы были связаны, главным образом, с необходимостью снижения габаритов, весов и потребляемой мощности, а значит и с повышением уровня интеграции изделий микроэлектроники. При этом наряду с совершенствованием схемотехнических способов построения изделий постоянно улучшались конструкция и технология их изготовления.

Существенное обострение проблем создания микроэлектроники для ФПУ произошло с необходимостью создания многоэлементных ФПУ для космических систем раннего предупреждения о ракетном нападении СПРН, история развития которых, начиная с 1970 г., наиболее ярко иллюстрирует развитие микроэлектроники для ФПУ на основе халькогенидов свинца.

Первое фотоприемное устройство, выполненное на базе фотоприемника «Гранат-1», где фоточувствительный элемент ФЧЭ содержал 75 фоточувствительных площадок, было разработано в НПО «Геофизика» в 1970 г. В состав ФПУ входили 75 предварительных усилителей, выполненных на дискретных транзисторах на печатных платах. Каждый такой ПУ был заключен в специальный стальной корпус.

Следующее фотоприемное устройство было разработано в НИИ прикладной физики и включало в себя уже 200-канальный блок предусилителей, где наряду с малошумящими ПУ были разработаны и малошумящие источники питания. Предусилители были выполнены в виде микросборок с применением бескорпусной элементной базы микроэлектроники (полевые и биполярные транзисторы, керамические конденсаторы) и по гибридно-пленочной технологии, где монтаж навесных элементов проводился на подложках из ситалла, на которых были сформированы система контактов,

межсоединений и пленочных резисторов. Конструктивно ПУ были заключены в серийные корпуса типа «Терек».

Дальнейшее развитие этой техники было связано с необходимостью существенного увеличения числа фоточувствительных площадок, которое в разрабатываемом с 1980 г. ФПУ «Гранат-32» достигло 3072 (256x12).

Создание микроэлектронных устройств для этой задачи потребовало решения ряда новых научно-технических проблем, совершенствования схемотехники, элементной базы микроэлектроники, конструкции и технологии изготовления микроэлектронных узлов и блоков.

Необходимость разработки новой схемотехники исходила из требований существенного повышения уровня интеграции микроэлектронных узлов и блоков и введения в их состав многоканальных коммутаторов, обеспечивающих вывод мультиплексированных сигналов с каждого 256-элементного блока. Для решения этой задачи были выполнены следующие разработки:

1. Разработана оригинальная схема предусилителя на основе специально разработанного для решения этой задачи микромощного операционного усилителя ОУ типа Б140УД12-1. В схеме ПУ вместо традиционно применяемого для фоторезисторов резистора нагрузки, который обычно подбирался равным темновому сопротивлению фоторезистора, применена управляемая с помощью ОУ динамическая нагрузка, в качестве которой использован полевой транзистор. В такой схеме соотношение между сопротивлением фоторезистора и сопротивлением динамической нагрузки остается практически неизменным в широком диапазоне изменения сопротивлений фоторезистора (от 0,1 МОм до 10 МОм), при поддерживаемом неизменным напряжении на фоторезисторе. Это позволило выполнить требования к стабильности фотозлектрических параметров и минимальному разбросу вольтовой чувствительности.

2. Выполнены исследования структуры погрешностей и выбор варианта схемотехники многоканального коммутатора слабых аналоговых сигналов сочетанием погрешности и быстродействия, близким к предельному.

3. Сформулированы требования и разработана в ПО «Кристалл» г. Киев микросхема 16-канального коммутатора типа Б1104КН1-2 по КМОП технологии на КНС структурах.

4. Разработана конструкция и технология изготовления БГИС 16 канальных микросборок, на основе которых выполнены 256 канальные блоки предварительного усиления и коммутации сигналов фоторезисторов.

5. Выполнены исследования радиационной стойкости и расчеты надежности, которые позволили разработать конструкцию и технологию ФПУ, обеспечивающие непрерывную эксплуатацию ФПУ в открытом космическом пространстве в течение 3 лет (27 тыс. часов). В процессе летных испытаний один из образцов успешно эксплуатировался более 5 лет.

Основные показатели микроэлектронных узлов и их внешний вид представлены на рис. 15.

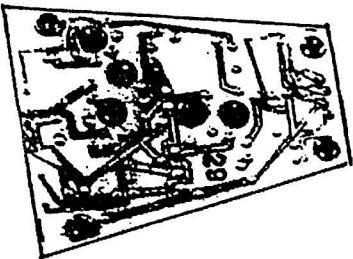
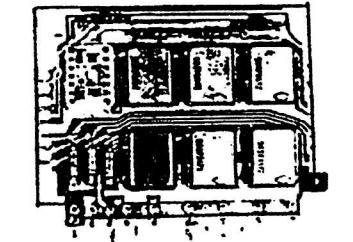
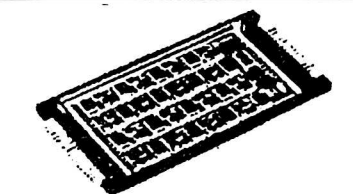
	изделие	число каналов	объем на канал, см <sup>3</sup>	всс на канал, г	потребление мощности на канал, мВт	элементная база
предусилитель изд. 105К	105К 1970-1972 г.	75	24	85	200	корпусные ЭРЭ
	74В6Ф 1975-1983 г.	200	15	17	50	гибридно-плночные ИС В21 на бескорпус. ЭРЭ
плата с предусилителем изд. 105К 74В6Ф	81Г6Ф 1984-1986 г.	3072	3,2	3	4	ИС «Кимono» БИС «Континст-Б» в бескорпусном исполнении
	81Г6Ф М 1984-1986 г.	3072	0,27	0,15	0,2	СБИС коммутатор ПЗС с ПУ в бескорпусном исполнении
микроблок предварительной обработки изд. 81Г6Ф						

Рис. 15. Развитие микроэлектронных блоков для фотоприемных устройств типа «Гранат»

Не умаляя достигнутых успехов в направлении создания таких фотоприемных устройств, необходимо отметить, что ФПУ такого класса отличались высокой трудоемкостью и обеспечить их систематический выпуск в современных условиях оказалось крайне сложно. В связи с этим с целью модернизации ФПУ в 1993—1996 г. были выполнены разработки новой элементной базы микроэлектроники, проводимые совместно с НИИ «Пульсар».

Эти усилия привели к созданию нового класса микросхем ПЗС-мультиплексоров, разработанных в рамках ОКР «Пространство» и «Романс», которые представляли собой 64 канальные схемы, включающие в себя 64 предусилителя, непосредственно сопрягаемые с фоторезисторами из PbS и PbSe, и ПЗС-регистры, обеспечивающие считывание мультиплексированных сигналов на один выход.

Характерной особенностью схмотехнического сопряжения фоторезистора ФР с предусилителем ПУ является применение схемы включения фоторезистора в исток полевого транзистора, включенного по схеме с общим затвором. Напряжение питания на фоторезистор поступает с истока транзистора и задается от напряжения, устанавливаемого на затворе.

Входное сопротивление такой схемы много меньше темнового сопротивления фоторезистора. Приращение тока через цепочку ФР — транзистор

с общим истоком — транзисторная динамическая нагрузка приводит к появлению на выходе схемы выходного сигнала.

Наряду с работами по созданию ФПУ для системы СПРН в это же время проведены разработки микроэлектронных элементов и узлов для ФПУ, предназначенных для головок самонаведения и системы прицеливания таких, как 36Т2 и «Бурт».

В ФПУ 36Т2 успешно применена схмотехника предусилителя ФПУ «Гранат-32».

Среди разработок последних лет (1996 – 1997 гг.) необходимо отметить разработку матричного ФПУ формата 8x8 на область спектра 3–5 мкм (PbSe), где фоточувствительный элемент выполнен по схеме с «X-Y» адресацией.

Здесь впервые была реализована схема, обеспечивающая режим термостабилизации фотоприемника с точностью 0,5 °С в диапазоне температур окружающей среды  $\pm 50^\circ\text{C}$ . Здесь также была реализована дискретно-аналоговая схмотехника считывания фотоэлектрических сигналов и формирования мультиплексированного выходного сигнала в гибридно-пленочном исполнении. Дискретно-аналоговая электроника обеспечивала соотношение между «геометрическим шумом» и среднеквадратическим значением шума фотоприемника около 1.

Работы по созданию матричных ФПУ на основе фоточувствительных пленок халькогенидов свинца и микроэлектроники для них продолжают и в настоящее время и являются одним из приоритетных направлений деятельности коллектива разработчиков.

В настоящем обзоре представлены основные направления деятельности одного из подразделений института в части исследований и разработок фотоприемников и фотоприемных устройств на основе халькогенидов свинца. Организованные в 1959 г. две лаборатории в последующие годы по мере возрастания объема тематики последовательно реорганизовывались в отдел № 1, в отделение № 1 и с 1998 года в НТЦ ОЭП — научно-технический центр оптико-электронных приборов. В пик своего развития (1966—1975 г.) состав отделения № 1 насчитывал более 20 лабораторий, секторов и экспериментально-производственных участков с численностью сотрудников более 1000 человек, что позволило проводить как глубокие научные исследования, так и вести опытно-конструкторские разработки с изготовлением и выпуском большой номенклатуры различных изделий.

За прошедший период сотрудниками отделения № 1 опубликовано около 500 научных работ, получено более 200 авторских свидетельств на изобретения, разработаны и выпускались более сотни разнообразных типов фотоприемников и фотоприемных устройств.

Целый ряд проведенных разработок и научно-экспериментальных исследований получили высокую государственную оценку. Разработки изделий «Комар», «Стрела-1», «Стрела-2», «Вираз», «Гранат-2», «Гранат-32», специальные фотоприемники из сернистого кадмия для систем ориентации в космосе, цикл работ по физике фоточувствительных поликристаллических пленок и разработка промышленной технологии их изготовления были удостоены Государственных премий.

Ряд разработок по комплексам К-13 (ФП 6АН, 04АН), К-13М («Иней», «Иней-1М»), «Игла» были отмечены награждением ряда сотруд-

ников института орденами и медалями. В связи с принятием в эксплуатацию системы с ФПУ «Гранат-32» 20-ти сотрудникам института присвоены почетные звания «Заслуженный конструктор РФ», «Заслуженный деятель науки РФ», «Заслуженный метролог РФ» и 10 работников награждены орденами и медалями.

Потенциал в области создания фотоприемников на основе халькогенидов свинца, накопленный к концу 80-х годов, позволял и дальше развивать это направление. Изменение экономической ситуации не могло, однако, не повлиять и в данном случае. Уменьшение финансирования, снижение объема государственных заказов привело к резкому сокращению численности работающих и к свертыванию ряда направлений научно-технической деятельности, уменьшению используемых ресурсов. Тем не менее, удалось избежать прекращения работ по созданию новых фотоприемников и сохранить действующие технологические линейки по фотоприемникам как PbS, так и PbSe.

Основные направления деятельности НТЦ ОЭП в настоящее время направлены на разработку более совершенных многоканальных линейчатых и матричных ФПУ для тепловизионных приборов, тепlopеленгационной аппаратуры космических аппаратов, а также на создание и выпуск сравнительно простых и дешевых фотоприемников для разнообразного применения в промышленных системах автоматики и в гражданском приборостроении.

#### Л и т е р а т у р а

1. *Sosnowsky L., Starkiewicz J., Simpson O.* Lead Sulfide Photoconductive Cells. *Nature. Lond.*, 1947. V. 159. P. 818.
2. *Simpson O.* Conductivity of Evaporated Films of PbSe. *Nature. Lond.*, 1948, V. 159, P. 818.
3. *Moss T. S., Chasmar R. P.* Spectral Response of PbSe. *Nature. Lond.*, 1948, V. 161, P. 244.
4. *Курбатов Л. Н.* Очерк истории приемников инфракрасного излучения на основе халькогенидов свинца // Вопросы оборонной техники, Сер.11, 1995. Вып. 3(146)—4(147). С. 3; 1996. Вып.1—2. С. 3.
5. *Martin Y. M., Hernandez Y. L.* Arrays of thermally evaporated PbSe infrared photodetectors deposited on Si substrates operating at room temperature // *Semicond. Sci. Technol.*, 1996. V. 11. P. 1740—1744.
6. *Азранов Г. А., Дакш А. М., Нестеров В. К., Новоселов С. К.* Особенности получения и обработки ИК-изображений в матричных фотоприемниках с координатной адресацией на основе халькогенидов свинца // *Оптический журнал*, 1996. № 9. С. 53—57
7. *Хряпов В. Т., Пономаренко В. П., Буткевич В. Г., Таубкин И. И., Стафеев В. И., Попов С. А., Осипов В. В.* Пороговые характеристики и матрицы ИК-диапазона // *Оптический журнал*, 1992. № 12. С. 33—34.

## Photodetectors and photodetective assemblies on the basis of polycrystalline and acting epilayers of lead chalcogenide

*V. G. Butkevich, V. D. Bochkov, E. P. Globus*  
The ORION R&P Association, Moscow, Russia

*Development and production of photodetectors and photodetector assemblies based on photosensitive polycrystalline and epitaxial lead sulphide and selenide layers, what has been carried out in "Orion", since 1960 are described.*