

УДК 621.383

## Состояние и перспективы микрофотоэлектронного комплекса в Черновицком регионе Украины

В. Н. Годованюк, Ю. Г. Добровольский  
ОАО «ЦКБ «Ритм»», Черновцы, Украина

С. Э. Остапов, И. М. Раренко  
Черновицкий национальный университет, Черновцы, Украина

В. Д. Фотий  
ОАО «Кварц», Черновцы, Украина

*Представлены результаты работы предприятий микрофотоэлектронного комплекса в Черновицком регионе Украины на примере Черновицкого национального университета, ОАО «ЦКБ «Ритм»». Приведены характеристики лучших изделий, среди которых фоторезисторы, фотодиоды, фотоприемные устройства и оптопары, которые по чувствительности перекрывают спектральный диапазон оптического излучения от 0,2 до 14 мкм, а также измерительное и испытательное оборудование для исследования разрабатываемых изделий.*

Изменения в политической карте Советского Союза в начале 90-х годов прошлого столетия привели к глубочайшему экономическому кризису на этой территории. В области фундаментальной и прикладной науки были утрачены лидирующие позиции. Такое положение характерно для многих отраслей прикладной науки в странах бывшего СССР. Не явилась исключением и прикладная наука Украины.

Научно-технические центры по развитию микрофотоэлектроники существуют в различных частях Украины. Основная же производственная база по разработке и серийному изготовлению фотоприемников ультрафиолетового, видимого и ближнего инфракрасного диапазонов спектра, как и ранее, находится в г. Черновцы. Это ОАО «ЦКБ «Ритм»» и ОАО «Кварц». Научная база микрофотоэлектроники в нашем регионе представлена кафедрой микроэлектроники Черновицкого национального университета (КМЭ ЧНУ) и ОАО «ЦКБ «Ритм»».

Микрофотоэлектроника на Украине в последние годы переживает период восстановления и развития. Это обусловлено общим состоянием экономики страны, которая в течение последних лет имеет тенденцию к устойчивому подъему. Например, объем выпуска продукции ОАО «ЦКБ «Ритм»» в 2001 г. сравнялся с объемом выпуска в 1991 г., при этом максимальный спад производства наблюдался в 1995—1996 гг. Следует отметить, что за прошедшие 10 лет наблюдалась тенденция к снижению объемов НИОКР в общем балансе предприятия, наименьший объем НИОКР приходится на 1997—1998 гг. В следующие годы (1999—2001) начинается рост

НИОКР в основном за счет собственных средств акционерного общества.

Описанные тенденции характерны для многих предприятий Украины, отличающихся наукоемким производством.

На Украине, в частности, в Черновицком регионе, существует научно-технологическая база по разработке новых серийных фотоприемников широкого применения на основе кремния, германия, халькогенидов свинца, фосфида галлия, КРТ и других полупроводниковых материалов (табл. 1).

Таблица 1

### РАЗРАБОТКА НОВЫХ СЕРИЙНЫХ ФОТОПРИЕМНИКОВ

Материалы микрофотоэлектроники	Спектральный диапазон фотоприемников, мкм	Наличие	
		опыта конструкторско-технологических разработок	промышленной технологии
Кремний (Si)	0,4—1,1	ОАО «ЦКБ «Ритм»»	ОАО «ЦКБ «Ритм»», ОАО «Кварц»
Германий (Ge)	0,7—1,8	То же	То же
Сульфид свинца (PbS)	0,7—5,2	ОАО «ЦКБ «Ритм»», КМЭ ЧНУ	«
Селенид свинца (PbSe)	0,7—3,2	То же	«
Соединения на основе твердых растворов $A_2B_6$ и $A_3B_5$	0,8—15,0	Институт физики полупроводников (г. Киев), КМЭ ЧНУ, ОАО «ЦКБ «Ритм»»	ОАО «ЦКБ «Ритм»»
Фосфид галлия (GaP)	0,2—0,5	ОАО «ЦКБ «Ритм»»	То же

Наметившийся рост микрофотоэлектронного производства в Черновицком регионе обусловлен, кроме того, активной научно-исследовательской работой, проводимой в Черновицком национальном университете на кафедре микроэлектроники (зав. кафедрой И. М. Раренко). В настоящее время на кафедре в тесном взаимодействии с ОАО «ЦКБ «Ритм»» достигнуты новые результаты в развитии теории и практики твердых растворов узкозонных полупроводников групп  $A_2B_6$  и  $A_3B_5$ , а также фотоприемников на их основе. Здесь разработаны новые полупроводниковые материалы с добавками  $3d$  элементов, чувствительные в спектральном диапазоне 3–12 мкм. Кристаллы и слои характеризуются стабильностью кристаллической решетки, а экспериментальные образцы фотоприемников (на  $p$ - $n$ -переходах и барьерах Шоттки) на их основе отличаются повышенной надежностью. Коллектив ученых и разработчиков работает в тесном сотрудничестве с коллегами из известных научных центров мира (России, Китая, Индии), оказывая необходимую поддержку вышеупомянутым производственным комплексам.

Для детектирования инфракрасного излучения в спектральной области 8–14 мкм обычно используются диодные структуры на основе  $Hg_{1-x}Cd_xTe$  ( $x \approx 0,2$ ) с  $p$ - $n$ -переходом, содержащим сильнолегированную  $n$ -область, т. е. с  $p$ - $n$ -переходом [1]. Такие структуры наиболее пригодны при использовании других полупроводников, в частности, твердого раствора  $Hg_{1-x}Mn_xTe$  ( $x \approx 0,1$ ), обладающих большей «стабильностью» решетки и поверхностью кристалла [2]. Модифицированным методом зонной плавки были получены крупноблочные монокристаллы твердого раствора  $Hg_{1-x}Mn_xTe$  ( $0,04 \leq x \leq 0,2$ ) с осевой однородностью на 60 % длины слитка. Эффективный коэффициент сегрегации в данных условиях роста в системе  $Hg$ - $Mn$ - $Te$  в 1,5–2 раза меньше, чем в системе  $Hg$ - $Cd$ - $Te$ , и составляет величину  $K \approx 1,2$ – $2,2$  для  $0,04 \leq x \leq 0,2$ . По данным рентгенографических исследований, кристаллы  $Hg_{1-x}Mn_xTe$  обладают более совершенной структурой, чем кристаллы  $Hg_{1-x}Cd_xTe$  и  $CdTe$  [3]. Решение уравнения, описывающего процесс зонной плавки халькогенидов кадмия—ртути и марганца—ртути с переменным коэффициентом распределения, позволило разработать методы управления составом слитка в процессе роста [4]. Исследования показали, что по мере замещения кадмия атомами марганца сегрегация компонентов в процессе выращивания слитков

уменьшается. Это является одной из причин более высокого структурного совершенства кристаллов, содержащих марганец, по сравнению с КРТ. Примеси замещения  $Mn^{2+}$  в КРТ обладают невырожденными орбитальными состояниями и взаимодействуют с только полносимметричными колебаниями решетки. Такое поведение примеси замещения приводит к релаксации атомов окружения дефектов, при этом симметрия кристалла не нарушается. Поэтому при легировании образцов КРТ марганцем число центров с нарушенной симметрией уменьшается, и получается материал с более совершенной кристаллической структурой.

Расчетными методами оценена ширина запрещенной зоны, предложены простые формулы для расчета концентрации собственных носителей заряда [5].

Изготовлены фотодиодные структуры на основе монокристаллов  $Hg_{1-x}Mn_xTe$ , выращенных модифицированным методом зонной плавки. Кристаллы имели  $p$ -тип проводимости с концентрацией дырок  $p = (2-5) \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ . Ширина запрещенной зоны полупроводника составляла 0,09–0,1 эВ при 77 К, что соответствует содержанию марганца около 9,5–10 % [2].

Диодная структура создавалась бомбардировкой  $p$ - $Hg_{1-x}Mn_xTe$  ионами  $Ar$  (ионным травлением) с энергией 500–1000 эВ [6]. Для защиты поверхности полупроводника на пластине  $Hg_{1-x}Mn_xTe$  выращивался слой фторидов, поверх которого наносилась пленка  $ZnS$  [7]. В этом пассивирующем покрытии, выполняющем функцию антиотражающего покрытия, вскрывались окна, в которые производилась бомбардировка ионов. Омические контакты выполнены палладированием с последующим вакуумным напылением золота с подслоем хрома. На рис. 1 приведены поперечная структурная схема фотодиода и вольт-амперные характеристики его  $n^+$ - $p$ -перехода, измеренные при температуре 80 К и сопротивлении нагрузки 275 Ом.

Анализ показывает, что обратный ток фотодиода обусловлен туннелированием, на которое при напряжениях выше 0,3 В может накладываться лавинное умножение, в то же время наблюдается резкая зависимость дифференциального сопротивления  $Hg_{1-x}Mn_xTe$   $n^+$ - $p$ -диода (при нулевом смещении) от температуры [6]. Емкость таких диодов очень слабо меняется при приложении напряжения, что не согласуется с моделью резкого асимметричного  $n^+$ - $p$ -перехода.

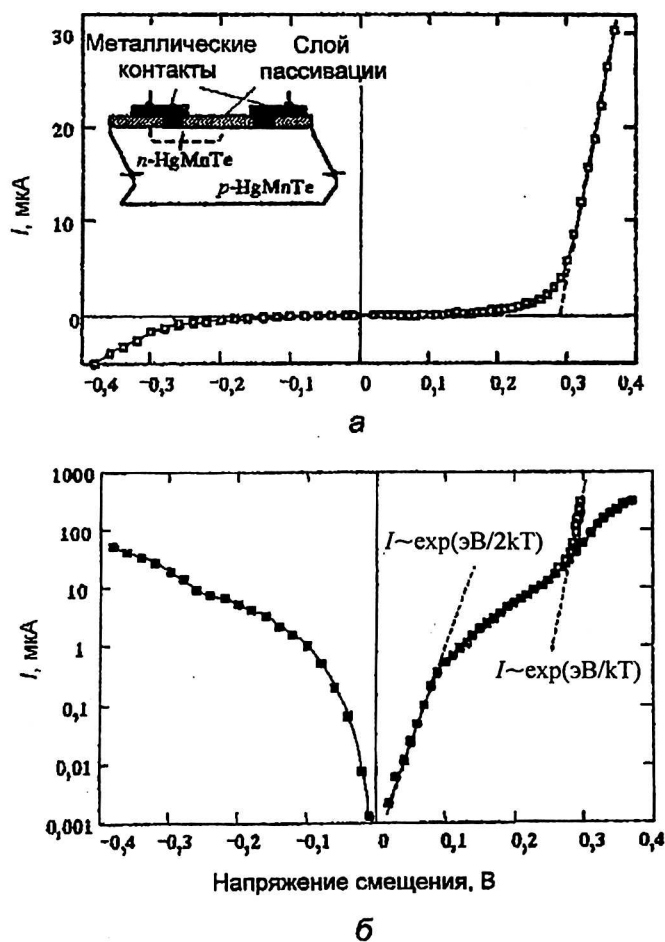


Рис. 1. Поперечная структурная схема фотодиода на основе  $\text{HgMnTe}$  и вольт-амперные характеристики его  $n^+ - p$ -перехода, измеренные при 80 К и сопротивлении нагрузки 275 Ом

Экспериментальные исследования  $\text{Hg}_{1-x}\text{Mn}_x\text{Te}$  ( $E_g \approx 0,1$  эВ)  $n^+ - p$ -переходов выявляют особенности рекомбинационного, диффузионного и туннельного механизмов переноса заряда, емкостных и температурных характеристик диодов, не укладывающиеся в известные модели происходящих процессов. Решение уравнения Пуассона показывает, что на распределение электрического поля и потенциала в  $n^+ - p$ -переходах существенное влияние оказывают свободные носители, особенно вырождение электронов, обусловленное их малой эффективной массой ( $m_e = 0,01 m_H$ ). Учет этих факторов позволяет объяснить в рамках теории Саа—Нойса—Шокли наблюдаемое отклонение ВАХ рекомбинационного тока от напряжения характерной зависимостью  $I \sim \exp(-eV/2kT)$ , а также преобладание дырочной (а не электронной) компоненты диффузионного тока при больших прямых смещениях. Объемный заряд, создаваемый электронами в слое  $p$ -области, прилегающем к границе раздела, приводит к заметному увеличению туннельного тока. Тем не менее последовательное

рассмотрение туннелирования (в ВКБ-приближении) показывает, что обычно используемые выражения дают сильно завышенные значения токов при низких смещениях, а значит, сниженное значение  $R_0A$  произведения, определяющего детектирующую способность  $n^+ - p$ -перехода. Учет влияния свободных носителей на объемный заряд позволяет также объяснить наблюдаемые особенности вольт-фарядных характеристик исследуемых переходов без привлечения влияния глубоких примесей.

На основе кристаллов  $\text{Hg}_{1-x}\text{Mn}_x\text{Te}$  были созданы диоды Шоттки, которые работают в дальнем ИК-диапазоне. Кристаллы  $p$ -типа проводимости с концентрацией носителей  $(2-5) \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$  были выращены на кафедре полупроводниковой микроэлектроники и имели ширину запрещенной зоны около 0,1 эВ при  $T = 77$  К. Диоды Шоттки получались напылением алюминия на тщательно обработанную поверхность кристаллов. Перед напылением поверхность обрабатывалась в бром-метаноле и отмывалась в деионизированной воде. Непосредственно перед формированием барьера поверхность кристалла травилась аргоном в течение  $\sim 10$  мин. Созданные таким образом диоды демонстрировали зависимость электрических свойств от работы выхода металла. Металлы с большой работой выхода — Au, Ni — образовывали с кристаллом омический контакт. Металлы с меньшей работой выхода (например Al) показывали нелинейную вольт-амперную характеристику с очень слабым выпрямлением при  $T = 300$  К и практически без выпрямления при азотных температурах (рис. 2).

Решение уравнения Пуассона для барьера металл—полупроводник позволяет адекватно описать и объяснить особенности токопереноса через барьер Шоттки. Указанные особенности могут быть объяснены малой шириной запрещенной зоны и большой разницей эффективных масс электронов и дырок. Кроме того, большую роль в данном случае, как и в случае  $n^+ - p$ -перехода, играют свободные носители, влияние которых нужно непременно учитывать для правильного объяснения поведения ВАХ изготовленных диодов.

Вместе с тем изготовленные образцы диодов Шоттки обладают неплохими фотоэлектрическими характеристиками. Исследования показали, что при  $T = 77$  К они обладают обнаружительной способностью  $D^* = 2 \cdot 10^{10} \text{ см}^2 \text{ Гц}^{1/2} \cdot \text{Вт}^{-1}$ , т. е. работают в режиме ограничения фоном.

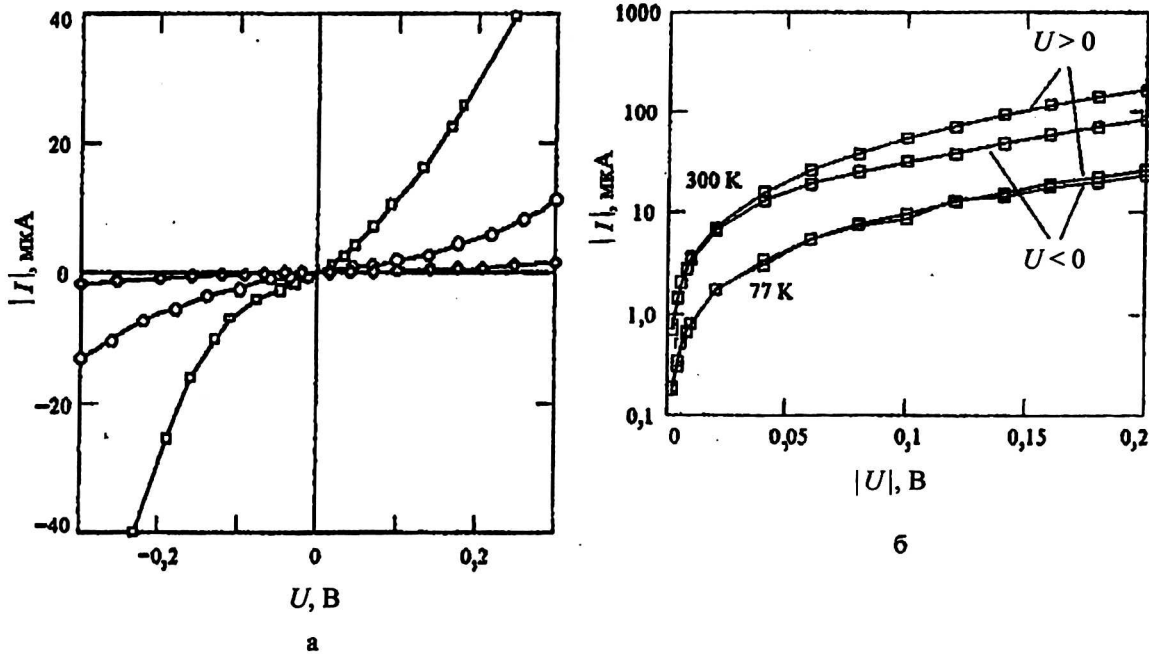


Рис. 2. Вольт-амперные характеристики Al-HgMnTe диодов Шоттки при:  
а — 77 К; б — 77 и 300 К

ОАО «Центральное конструкторское бюро «Ритм» — ведущее предприятие Украины по разработке фотоприемников. Сегодня специализация предприятия заключается в разработке и серийном изготовлении фотоприемников (ФП), фотоприемных устройств (ФПУ), оптопар [8]. Все эти изделия изготавливаются на основе таких полупроводниковых материалов, как кремний, германий, халькогениды свинца, соединения  $A_2B_6$ ,  $A_3B_5$ ,  $A_4B_6$ , что позволяет этим изделиям охватывать диапазон длин волн оптического излучения от ультрафиолетовой (0,2 мкм) до инфракрасной (5,0 мкм) областей спектра электромагнитного излучения. Фотоприемники разрабатываются как в неохлаждаемом, так и в охлаждаемом исполнении с помощью твердотельных термоэлектрических холодильников на основе эффекта Пельтье. Кроме того, предприятие занимается выращиванием монокристаллических соединений CdTe, CdZnTe, InSb и очисткой материалов.

За период 25-летней работы выполнено более 250 НИР и ОКР, в серийное производство передано более 100 изделий, которые имеют широкое применение в метрологии, автоматизации и телемеханике, медицинской технике, волоконно-оптических сетях связи, кинофототехнике, во многих видах военной техники и вооружения. Общая номенклатура изделий, выпускаемых ОАО «ЦКБ «Ритм», составляет свыше 200 наименований.

Предприятие имеет полный замкнутый технологический цикл изготовления ФП, ФПУ и оптопар, в состав которого входят:

- замкнутый технологический комплекс для изготовления фоточувствительных структур с использованием планарно-диффузионной технологии (фотодиодные структуры);
- участок осаждения полупроводниковых фоточувствительных слоев (для изготовления фоторезисторов) и сложных интерференционных фильтров;
- участок выращивания монокристаллических полупроводниковых материалов;
- участок сборки ФП, ФПУ и оптопар;
- комплекс по изготовлению корпусных деталей, обработке полупроводниковых материалов;
- комплекс по изготовлению нестандартного технологического, измерительного, испытательного оборудования;
- аттестованный комплекс для измерения фотоэлектрических параметров ФП, ФПУ, оптопар и полупроводниковых материалов;
- аттестованный комплекс для механических, климатических испытаний и испытаний на надежность ФП, ФПУ и оптопар.

Среди всего перечня фотоприемников можно выделить фотодиоды и фотоприемные устройства на основе кремния. Среди них фотодиоды (ФД), чувствительные в коротковолновой и видимой частях спектра [9].

Создание кремниевого ФД с высокой чувствительностью в УФ-области спектра требует решения сложного комплекса конструкторско-технологических проблем, связанных с особенностями поглощения УФ-излучения в кремнии,

генерации носителей заряда поглощенным излучением, рекомбинации носителей на поверхности кристалла и в его объеме [10, 11].

Генерационно-рекомбинационные процессы, происходящие в приповерхностной области кремниевого УФ-фотодиода, проиллюстрированы моделью ее зонной структуры, схематически изображенной на рис. 3.

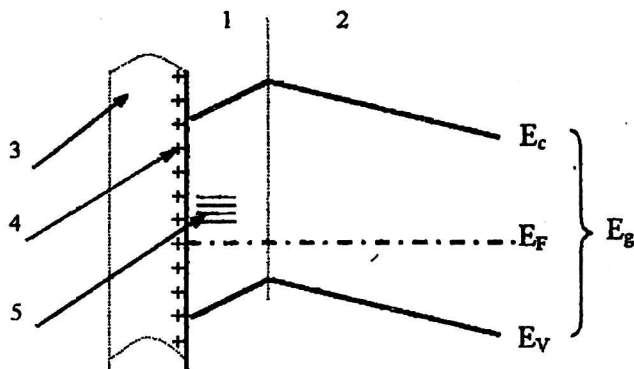


Рис. 3. Зонная структура приповерхностной диффузионной области ( $p^+$ -типа) кремниевого УФ-фотодиода:

- 1 — приповерхностный барьерный слой; 2 — участок тянущего поля; 3 — просветляющее покрытие ( $\text{SiO}_2$  — двуокись кремния); 4 — положительный заряд в двуокиси кремния; 5 — поверхностные рекомбинационные уровни;  
 $E_c$  — дно зоны проводимости;  $E_F$  — уровень Ферми;  
 $E_v$  — граница валентной зоны;  $E_g$  — запрещенная зона

Приповерхностная область представлена слоем  $p^+$ -типа проводимости, полученного диффузией бора в поддержку  $n$ -типа проводимости для формирования  $p$ - $n$ -перехода. Если оптическое излучение поглощается в  $p^+$ -области, то одна часть фотогенерированных неосновных носителей диффундирует к  $p$ - $n$ -переходу, разделяется им и создает фототок. Другая часть диффундирует к поверхности и рекомбинирует через поверхностные уровни, что приводит к уменьшению коэффициента собирания. При наличии тянущего поля 2 в  $p^+$ -области, обусловленного наличием градиента концентрации легирующей примеси (см. рис. 3), более предпочтительным для неосновных носителей в  $p^+$ -области является движение к  $p$ - $n$ -переходу. При этом происходит повышение коэффициента собирания. Для электронов, генерированных в барьерном слое 1  $p^+$ -области, коэффициент собирания носителей уменьшается. Это связано с тем, что им необходимо преодолевать потенциальный барьер возле поверхности. Наличие барьера обусловлено положительным зарядом в окисле и понижением концентрации бора вследствие частичного вытеснения его кристаллической решеткой в слой двуокиси кремния при термическом выращивании просветляющего покрытия.

Задача повышения коэффициента собирания фотогенерированных носителей заряда сводится к уменьшению рекомбинации носителей через рекомбинационные уровни на поверхности и в  $p^+$ -области. Это связано с тем, что поглощение УФ-излучения в кремниевом кристалле происходит на очень малой глубине, непосредственно возле его поверхности.

Для длинноволновой границы УФ-излучения ( $\lambda = 380$  нм) коэффициент поглощения равен  $1,9 \cdot 10^5 \text{ см}^{-1}$ , и уменьшение интенсивности в  $e$  раз, согласно [2], происходит на глубине  $x_1 = 50$  нм. На глубине до 240 нм 99 % этого излучения поглощается. С уменьшением длины волны излучения коэффициент поглощения увеличивается, и, например, для  $\lambda = 300$  нм 99 % излучения поглощается на глубине до 50 нм [12].

Уменьшение рекомбинации носителей заряда на поверхности кристалла и в приповерхностном слое, в котором происходит поглощение УФ-излучения, достигается в общем известными способами, оптимизированными для данного типа фотоприемника. Для обеспечения максимального сбора фотогенерированных носителей заряда уменьшена толщина барьерного слоя 1, а  $p$ - $n$ -переход приближен к поверхности кристалла ФД на 0,2 мкм.

Расширение области спектральной чувствительности ФД “Квант” и ФД “Квант-1” до 190 нм достигнуто повышением концентрации бора в легированной  $p^+$ -области. Это позволило значительно уменьшить толщину нежелательного барьерного слоя 1 (см. рис. 3). Кроме того, для уменьшения рекомбинации носителей заряда в  $p^+$ -области у ФД “Квант” и ФД “Квант-1” глубина залегания  $p$ - $n$ -перехода уменьшена по сравнению с ФД-288 и ФД-307. При этом у первых двух ФД участок тянущего поля 2 более крутой, что также способствует уменьшению рекомбинации в нем. Уменьшение рекомбинации в  $p^+$ -области для ФД 288 достигается путем минимизации концентрации дефектов в ней.

По уровню чувствительности в УФ-области спектра ФД “Квант” и ФД “Квант-1” соответствуют аналогичным ФД фирм “Hamamatsu” (Япония) [13], EG&G (Канада) [14], UDT (США). При этом цена отечественных фотодиодов значительно ниже.

Характеристики упомянутых и некоторых других фотодиодов, чувствительных в УФ- и видимой областях спектра оптического излучения, приведены в табл. 2, спектральные характеристики чувствительности — на рис. 4.

Таблица 2

ХАРАКТЕРИСТИКИ ФОТОДИОДОВ

Тип ФД	$A, \text{мм}^2$	$\lambda_p, \text{нм}$	$S_{\Lambda_p}, \text{А/Вт}$	$I_p, \text{нА}$ ( $U = 10 \text{ мВ}$ )	$C, \text{пФ}$ ( $U = 0 \text{ В}$ )	Примечание
ФД-288А	100,0	300	0,06	0,5	11300,0	1, 2
ФД-288Б	100,0	300	0,06	0,5	11300,0	1, 2, 3
ФД-288В	100,0	300	0,09	0,2	11300,0	1, 2
ФД-307	38,0	300	0,06	0,1	4700,0	4
ФД "Квант"	100,0	200	0,1	0,2	11300,0	1, 5
ФД "Квант-1"	100,0	200	0,1	0,5	1300,0	1, 5
ФД-337А	100,0	628	0,35	10 (10 В)	180 (10 В)	4
УФД01	100,0	0,628	0,28	10 (10 В)	170 (10 В)	4
ФД "Порог"	100,0	0,628	0,35	1	130 (10 В)	4

Примечания: 1 — герметичный металлостеклянный корпус; 2 — лейкосапфировое входное окно; 3 — при поставке потребителям прилагается относительная спектральная характеристика чувствительности конкретного ФД; 4 — выполнен на ситалловой подложке; 5 — кварцевое входное окно.

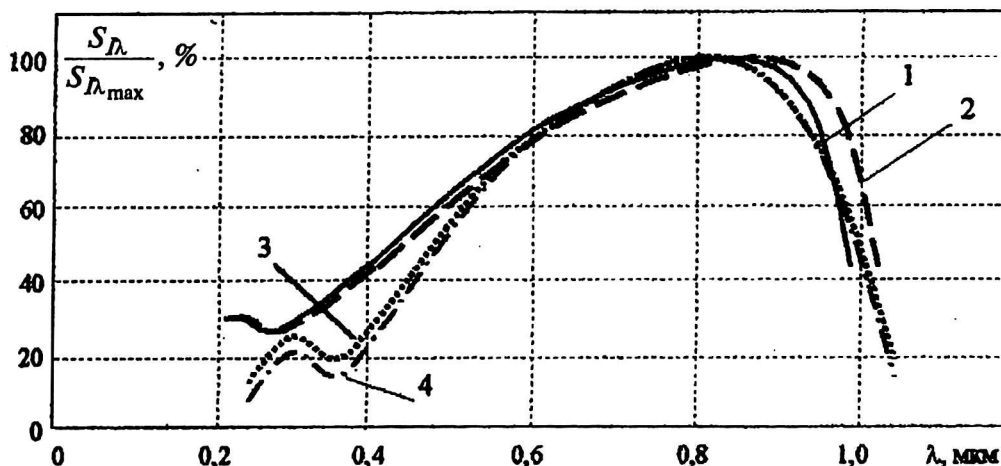


Рис. 4. Относительные спектральные характеристики чувствительности кремниевых УФ ФД: 1 — ФД "Квант"; 2 — ФД "Квант-1"; 3 — ФД-288В, ФД-337А, УФД01, "Порог"; 4 — ФД-288А, Б, ФД-307

Другая группа фотоприемников — так называемые кремниевые *p-i-n*-фотодиоды и германиевые фотодиоды, чувствительные в ближней инфракрасной области спектра оптического излучения. Поскольку основным параметром фотодиодов является их обнаружительная способность, а определяют ее шумовые характеристики, то большое внимание уделялось уменьшению темновых токов, которые в основном определяют величину шума фотодиодов.

При изготовлении *p-i-n*-фотодиодов [15] наблюдался эффект уменьшения темнового тока при увеличении толщины слоя, который расположен с тыльной стороны кристалла фотодиода и является изотипным ему. Основное назначение этого слоя — уменьшить сопротивление на контакте полупроводник—металл. Для достиже-

ния этой цели достаточно толщины слоя 1—2 мкм. Для увеличения гетерирующего эффекта на тыльной стороне кремниевой пластины формируется слой *p*<sup>+</sup>-типа проводимости с большей толщиной.

*p-i-n*-фотодиоды, о которых идет речь, работают при напряжениях 100—200 В, при этом увеличивается вероятность генерации поверхностных токов утечки на границе раздела кремний—окисел кремния и на периферии кристалла, которые способны существенно увеличить темновой ток фоточувствительного элемента. Поэтому фоточувствительный элемент окружают охранительным кольцом [16], которое также выполняет роль дополнительного фоточувствительного элемента. Для защиты охранительного

кольца от влияния упомянутых токов утечки формируется область ограничения каналов утечки, изотипная к материалу кремниевой подложки. При этом удаленность указанной области от охранительного кольца может быть не меньше отношения рабочего напряжения к напряженности пробоя [17, 18].

Кроме того, для устранения влияния торцевой части кристалла фотодиода на темновые токи (как поверхностную составляющую, так и генерационную) предложено легировать эту поверхность кристалла бором [19].

Разработанные подходы к конструированию и изготовлению кристаллов *p-i-n*-фотодиодов на основе кремния позволили получить удельный уровень темновых токов до 30–70 нА/см<sup>2</sup> при рабочем напряжении 120 В. Сравнительные зависимости усредненных удельных значений темнового тока разработанных *p-i-n*-фотодиодов и серийных фотодиодов ФДК-142-01 от температуры при рабочем напряжении 120 В приведены на рис. 5.

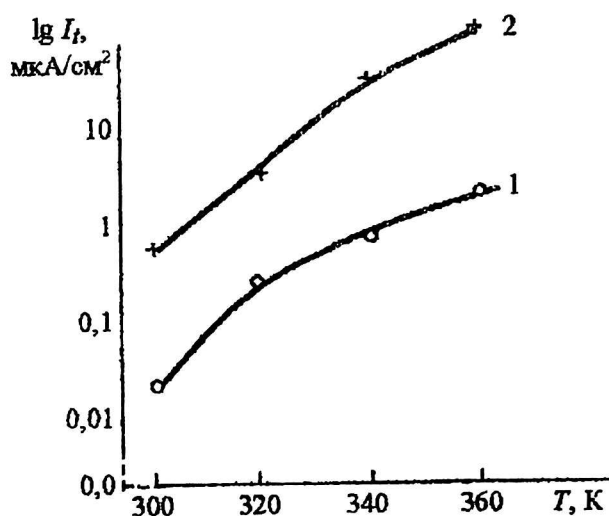


Рис. 5. Сравнительные зависимости средних удельных значений темнового тока разработанных *p-i-n*-фотодиодов (1) и серийных ФДК-142-01 (2) от температуры при рабочем напряжении 120 В

Германиевые фотодиоды разрабатываются в настоящее время в основном под специальные заказы. Так, разработан германиевый фотодиод с термоэлектрическим охлаждением для комплектации тестеров оптического излучения, которые используются при наладке и техническом обслуживании волоконно-оптических линий систем связи, которые оптимизированы на диапазон длин волн оптического излучения 0,9–1,75 мкм (табл. 3).

Таблица 3

### ХАРАКТЕРИСТИКИ ГЕРМАНИЕВОГО ФОТОДИОДА С ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИМ ОХЛАЖДЕНИЕМ

Наименование параметра	Норма по ТУ	Среднеизм. параметры
Рабочее напряжение, мВ, не более	10	10
Темновой ток, А, не более	$4 \cdot 10^{-6}$	$1 \cdot 10^{-8}$
Пороговый поток, Вт·Гц <sup>1/2</sup> , не более	$1 \cdot 10^{-12}$	$6 \cdot 10^{-13}$
Рабочий ток термоэлектрического холодильника при рабочем напряжении не более 0,5 В, А, не более	0,5	0,5
Динамический диапазон, порядок, не менее	$10^6$	$10^8$
Нелинейность энергетической характеристики при мощности падающего излучения, %, не более:	$10^{-6}$ – $10^{-3}$ Вт,	1
	$10^{-3}$ – $3 \cdot 10^{-3}$ Вт	2
		2

Конструктивно фотодиод выполнен в металлокерамическом корпусе. Термохолодильник обеспечивает рабочую температуру от 0 до –10 °С; мощность, которую он потребляет, не превышает 0,25 Вт при токе 0,4 А. В корпус фотодиода встроен датчик температуры на базе транзистора КТС 395А (или его аналога КТ-129) в диодном включении. Выводы всех элементов устройства изолированы друг от друга и от корпуса. Минимальная наработка на отказ разработанных фотодиодов составляет не менее 1000 ч [20].

Одними из наиболее распространенных видов фотоприемников, которые мы представляем, являются фоторезисторы на основе халькогенидов свинца (PbS, PbSe). Основные работы в настоящее время ведутся над повышением надежности изготавливаемых фоторезисторов в плане увеличения длительности их наработки и улучшения параметров. Одним из таких приборов является высокочувствительный фоторезистор на основе селенида свинца, снабженный встроенным датчиком температуры и включающий 2-каскадный термоэлектрический охладитель (ТЭО) [21].

ТЭО постоянно находится в рабочем режиме, поддерживая температуру фоточувствительного слоя на 40–70 °С ниже температуры окружающей среды, обеспечивая таким образом более высокую его чувствительность.

После введения и отработки дополнительных технологических и конструктивных усовершенствований было впервые на изделиях этого класса достигнуто время наработки на отказ ~10 000 ч. Изделия в составе измерительных комплексов, эксплуатируются на железных дорогах Украины.

В табл. 4 приведены параметры и характеристики лучших из серийно выпускаемых фоторезисторов, таких как фоторезисторы на основе селенида свинца ФР-127 (снабжен термоэлектрическим охладителем), фоторезистор на основе селенида свинца ФР-188 и фоторезистор на основе сульфида свинца ФР-193.

чения чувствительности  $p-n$ -переход выполнен в виде гетероструктуры [24]. На рис. 6 приведена спектральная характеристика разработанного фотодиода, а на рис. 7 его световая вольт-амперная характеристика, на которой представлена зависимость тока короткого замыкания  $J_{sc}$  от напряжения холостого хода  $U_{oc}$  фоточувствительного элемента.

Таблица 4

ПАРАМЕТРЫ СЕРИЙНО ВЫПУСКАЕМЫХ ФОТОРЕЗИСТОРОВ

Обозначение ФП	$A_{эфф.}$ мм <sup>2</sup>	$\Delta\lambda$ мкм	$\lambda_p$ мкм	$R_p$ МОм $T = 20^\circ C$	$D^*$ см <sup>2</sup> Гц <sup>1/2</sup> Вт <sup>-1</sup> не менее	$J_{нас}$ Гц	$\tau_{0.1-0.9}$ мкс. не более	$U_p$ В
ФР-127А	0,25	3,0—4,8	3,7	0,2—3,5	$10^9$	1200	<15	10
ФР-188Д	0,18x0,18	1,8—4,4	3,7	<1	$4 \cdot 10^8$	400	<15	3
ФР-193Д	0,18x0,18	0,8—3,3	2,5	<1,2	$2 \cdot 10^9$	400	<300	3

На основе перечисленных фотоприемников разработан целый ряд фотоприемных устройств. Лучшие из них, пользующиеся спросом, в последнее время усовершенствованы. К ним относятся фотоприемное пороговое устройство УФУР4 на базе кремниевого  $p-i-n$ -фотодиода, регистрирующее импульсное оптическое излучение, термостабилизированное, имеющее ВАРУ и линейный выход — аналог ФУЛ-113; ФУО-136 — импульсное ФПУ на основе барьерного фотодиода, имеющее линейный выход; ФПУ "Планета" — на основе 128-элементной фоторезисторной линейки (PbSe), имеющее 16 параллельных сигнальных каналов, рабочую температуру 200 К.

Успешно развивается новое для предприятия направление — разработка и производство оптопар. Среди них наибольшим спросом пользуется транзисторная оптопара УАОТ05, которая используется для счета семян.

На предприятии успешно разрабатываются фотодиоды на основе фосфида галлия, предназначенные для регистрации ультрафиолетового излучения в диапазоне 0,2—0,5 мкм с максимумом спектральной характеристики в области 0,44 мкм. Использование в качестве активного электрода полупрозрачных слоев металлов не позволяет создавать фотоприемники с высокой квантовой эффективностью вследствие значительного поглощения оптического излучения в слое металла [12, 22]. Как показано в [23], коэффициент пропускания пленки золота толщиной 0,1 нм, напыленной на фосфид галлия, находится в пределах 35—45 % в спектральном диапазоне 300—500 нм.

Более перспективным является использование в качестве активного электрода проводящего слоя окисла металла [23]. Поэтому нами изготавливались поверхностно-барьерные фотодиоды на эпитаксиальных  $n-n^+$ -структурах. Для увели-

ченного элемента. В качестве источника излучения использовался полупроводниковый излучающий диод с максимумом излучения на длине волны 470 нм. Здесь же приведены рассчитанные значения плотности обратного тока насыщения  $J_0$  и диодного коэффициента А. Удельные значения темнового тока разработанного фотодиода при  $U = 0,01$  В составляют не более 15 нА/см<sup>2</sup>. Статическая токовая монохроматическая чувствительность на длине волны 0,44 мкм составляет 0,25 А/Вт, а на длине волны 0,25 мкм — 0,09 А/Вт.

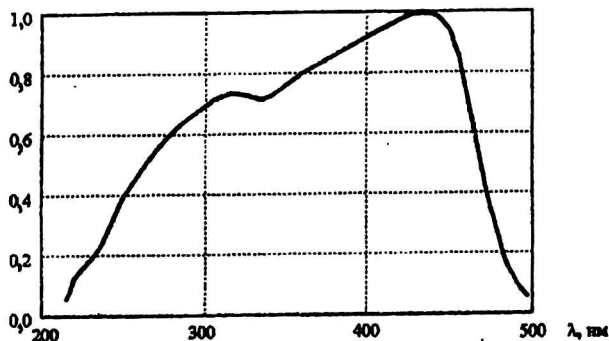


Рис. 6. Типовая спектральная характеристика кристалла фотодиода на основе фосфида галлия

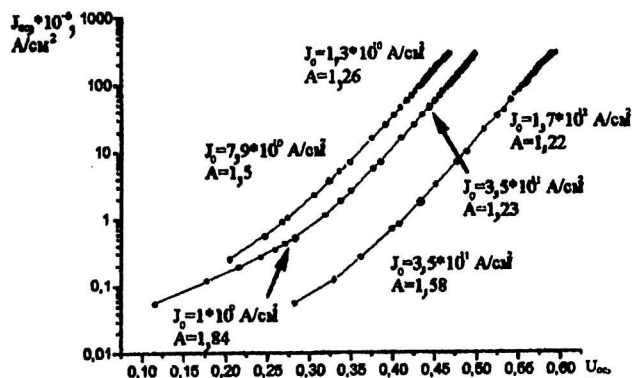


Рис. 7. Световая вольт-амперная характеристика фоточувствительного элемента фотодиода на основе фосфида галлия

Фотоприемники, разработанные в ОАО «ЦКБ «Ритм»» серийно выпускаются ОАО «Кварц» — одним из основных изготовителей фотоприемников в бывшем СССР. Предприятие занято производством фоторезисторов, *p-n*-, *p-i-n* и лавинных фотодиодов, фотоприемных устройств, имитаторов лазерного излучения (серия ПГС) на длину волны 0,63; 0,85; 1,06, абсолютно черного тела. Предприятие имеет полный замкнутый технологический цикл изготовления упомянутых фотоприемников, а также испытательную базу, кроме того, разрабатывает измерительные комплексы для фотометрии и оборудование для испытаний фотоприемников. Общая номенклатура изделий составляет более 100 наименований [25].

ОАО «Кварц» обладает замкнутым технологическим циклом изготовления полупроводниковых приемников и преобразователей оптического излучения. На предприятии существуют технологические участки, на которых осуществляются изготовление кремниевых фоточувствительных элементов, в том числе химическая и механическая обработка полупроводниковых пластин, изготовление *p-n*-переходов методами термической диффузии, изготовление *p-n*-переходов методами ионной имплантации, проведение фотолитографии, вакуумного нанесения материалов, в том числе контактной металлизации, скрайбирования (разделения) полупровод-

никовых пластин на фоточувствительные элементы.

Сегодня ОАО «Кварц» обладает достаточным научно-техническим потенциалом для решения задач изготовления фотоприемников различной конфигурации как по габаритным требованиям, так и по фотоэлектрическим параметрам.

Одними из лучших приборов производства ОАО «Кварц» являются так называемые *p-i-n*-фотодиоды ФДК-146, ФДК-141, кремниевые лавинные фотодиоды типа ФД-311Л, фотодиоды широкого применения ФД-256 и его аналоги в пластмассовых корпусах [26], разработанные ЦКБ завода, впоследствии ставшего ОАО «ЦКБ «Ритм»».

На основе кремниевых фотодиодов ОАО «Кварц» выпускаются фотоприемные устройства, которые применяются в лазерных дальномерах. К этим фотоприемникам относятся ФУО-113, которое представляет собой одноэлементный кремниевый *p-i-n*-фотодиод с предшествующим усилителем, и фотоприемное устройство ФУО-119, сформированное на базе одноэлементного лавинного фотодиода с предварительным усилителем.

Некоторые из параметров и характеристик разработанных фотоприемников приведены в табл. 5 и 6.

Таблица 5

## ПАРАМЕТРЫ ФОТОПРИЕМНИКОВ

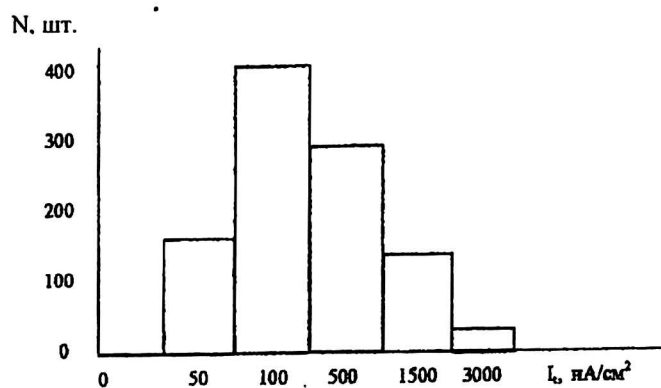
Наименование ФПП	Эффективная площадь ФЧЕ, мм <sup>2</sup>	Рабочее напряжение ФПП, В	Ток потребления ФПП, мА	Напряжение питания фотодиода, В	Особенности
ФУЛ-113	0,58 17,74	12,0	0,5	-200	8 каналов, импульсный, ключи, линейный выход
УФУР-01	0,58 17,74	12,0	0,5	-200	То же
ФУО-113	3,14	12,0	35	-250	Импульсный, пороговый, ВАРА, ключи, линейный выход

Таблица 6

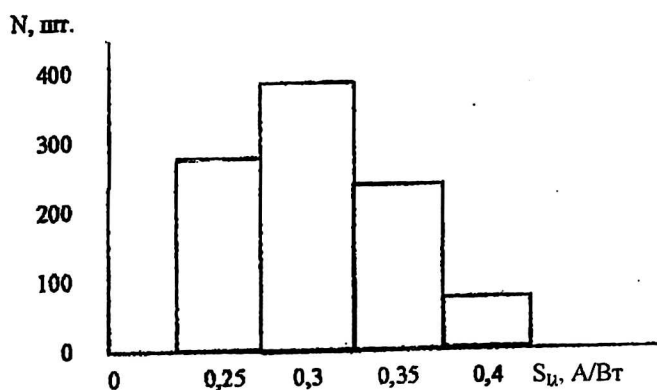
## ХАРАКТЕРИСТИКИ ФОТОПРИЕМНИКОВ

Наименование фотодиода	Количество ФЧЕ, шт.	Площадь ФЧЕ, шт.	Максимум спектральной характеристики ( $\lambda_{\text{пик}}$ ), мкм	Токовая монохр. (интегральная) чувствительность на $\lambda_{\text{пик}}$ , А/Вт (мкА/лк)	Темновой ток, мкА	Емкость, пФ	Рабочее напряжение, В
ФДК-146	4	37	0,92	0,55	<3	<15	135
ФДК-141	4	37	0,92	0,57	<1	<15	135
ФД-256	1	1,37	0,8—0,9	(0,02)	<0,005	<20	10
ФД-311Л	1	0,3	0,8—0,9	>18	—	<3	70—400

Как было сказано выше, весь комплекс приведенных изделий изготавливается на основе кремниевых *p-i-n*-фотодиодов, главными характеристиками которых являются токовая монохроматическая чувствительность и темновой ток. Именно эти две характеристики определяют пороговые характеристики фотодиода и ФПУ, в котором расположен фотодиод. Реальные удельные значения темнового тока на фотодиодах такого класса находятся в диапазоне от десятков до нескольких сотен нА/см<sup>2</sup> при рабочем напряжении 135 В. Максимальные значения чувствительности в импульсном режиме работы достигают 0,35–0,4 А/Вт. Гистограммы распределения удельных значений темнового тока при 135 В и чувствительности приведены на рис. 8, а, б. Отбор сделан с 1000 кристаллов фотодиодов, изготовленных на протяжении пяти лет.



а



б

Рис. 8. Гистограмма распределения кремниевых *p-i-n*-фотодиодов по:

а — удельным значениям темнового тока при рабочем напряжении 135 В; б — значениям токовой импульсной монохроматической чувствительности

Значения чувствительности лавинных фотодиодов достигают 50–80 А/Вт при оптимальном соотношении рабочее напряжение — шум фотодиода.

Как упоминалось выше, ОАО “Кварц” продолжает разрабатывать и осуществлять серийный выпуск измерительного и испытательного оборудования, которое приводится ниже.

Полный излучатель К21.532 предназначен для применения в качестве имитатора излучения абсолютно черного тела при измерении параметров фотоприемников и фотоприемных устройств. Излучатель выполнен в виде переносного блока, позволяющего использовать его в различных контрольно-измерительных устройствах специального назначения. Для автоматической регулировки температуры полного излучателя К21.532 используется блок регулировки температуры К22.742, обеспечивающий нагрев излучателя в диапазоне температур 50–1000 °С.

Камера тепла и холода АДБ7.0002.00.00 предназначена для проведения испытаний фотодиодов и фотоприемных устройств на воздействие на них температур в пределах  $-60 \pm -85$  °С; изготавливается в четырех вариантах — с тремя приставками-манипуляторами, которые имеют вводы для рук, смотровое окно и дверку в передней части камеры и позволяют производить различные манипуляции внутри камеры руками во время работы камеры, и с приставкой загрузочной, которая имеет только одну дверку со смотровым окном. В дне камеры предусмотрены отверстия для работы камеры с измерительными установками типа К54.410.

Осветитель АДБ 136.00 предназначен для измерения фотоэлектрических параметров фотоприемников в диапазоне освещенностей от  $1 \cdot 10^{-2}$  до  $1 \cdot 10^4$  лк от источника с цветовой температурой  $T_k = (2850 \pm 100)$  К.

Полупроводниковые генераторы световых сигналов ПГС-15; ПГС-11; ПГС-11А; ПГС-11К; ПГС-11М; ПГС-13. Прибор ПГС является импульсным малогабаритным неохлаждаемым полупроводниковым источником монохроматического излучения мощностью от 1,5 до 80 мВт, длительностью импульса от 15 до 50 нс (табл. 7).

ПАРАМЕТРЫ СЕМЕЙСТВА ПГС

Основные техниче- ские характеристики	Режим работы	ПГС-15		ПГС-11	ПГС-11А	ПГС-11К	ПГС-11М	ПГС-13
		внутр. запуск	внешн. запуск					
Импульсная мощность излучения в конусе 60°, мВт, не менее	Фиксир. длитель- ность	1,5		3,5	40	80	80	15
Длительность импульса излучения, нс	РФД РПД	15±5 2000±500	— 300÷6000	50±5 300÷6000	50±5 300÷6000	50±5 20÷6000	50±5 20÷6000	15±5 300÷6000
Частота повторения, Гц	РФД РПД	500±50 500±50	5÷10 <sup>4</sup> 5÷500	50÷10 <sup>4</sup> 6÷500	10÷10 <sup>4</sup> 10÷500	До 10 <sup>3</sup> До 500	До 10 <sup>3</sup> До 500	5÷10 <sup>4</sup> 6÷500
Ток через светодиод, А	РФД РПД	10±2 5±0,5	— 0÷6	20±2 0÷6	20±2 0÷6	40±5 0÷5	40±5 0÷5	10±2 0÷6
Ток потребления, мА, не более		800		100	100	150	150	100
Напряжение питания, В		27±1		90±5	90±5	27-1	27-1	27-1
Время непрерывной рабо- ты, ч, не более	РФД РПД	8 8	8 8	8 0,5	8 0,5	4 0,5	4 0,5	8 0,5

Примечание. РФД — режим фиксированной длительности; РПД — режим переменной длительности.

Фотометр-радиометр “Кварц-01” АДБ 7.0164.00.00 предназначен для измерения освещенности и потока монохроматического излучения в спектральном диапазоне от 0,25 до 1,05 мкм и обеспечивает измерение:

освещенности, создаваемой источниками непрерывного излучения при углах падения на фоточувствительный элемент, отличающихся от нормали не более чем на 5°, методом непосредственной оценки;

потока монохроматического излучения в спектральном диапазоне 0,25—1,05 мкм.

Фотометр-спектрометр состоит из отдельного блока и трех сменных измерительных головок, соединяемых с ним кабелем.

### Заключение

Черновицкий регион современной Украины обладает всеми необходимыми для развития отечественной микрофотоэлектроники качествами и мощностями. Здесь созданы и развиваются условия для успешных научных исследований, разработки, внедрения и серийного производства таких изделий микрофотоэлектроники, как фоторезисторы, оптопары, фотодиоды различных конструкций от одноэлементных до матричных, фотоприемные устройства на их основе, излучатели-имитаторы лазерного излучения и весь комплекс измерительного и испытательного оборудования. Изделия микрофотоэлектроники, разрабатываемые в регионе, имеют высокий технический уровень и не уступают лучшим ми-

ровым аналогам, а по соотношению цена—качество, как правило, превосходят их.

### Литература

1. Rogalski A.// Infr. Phys. 1988. № 28. P. 139.
2. Rogalski A.// Ibid. 1991. № 31. P. 117.
3. Боднарук О. А., Горбатюк И. Н., Раранко И. М. и др. Кристаллическая структура и электрофизические параметры кристаллов  $Mn_xHg_{1-x}Te$ // Неорганические материалы. 1992. Т. 28. № 2. С. 335—339.
4. Боднарук О. А., Горбатюк И. Н., Раранко И. М. и др. Исследование процессов выращивания и структурного совершенства халькогенидов кадмия—ртути и марганца—ртути// Там же. 1995. Т. 31. № 10. С. 1347—1350.
5. Остапов С. Э., Боднарук О. А., Раранко И. М. Ширина забороненої зони та концентрація власних носіїв заряду у  $HgCdMnTe$ // Український фізичний журнал. 1998. Т. 43. № 4. С. 463—466.
6. Kosyachenko L. V., Rarenko I. M., Weiguo Sun, Xiong lu Zheng// Solid-State Electron. 2000. № 44. P. 1197.
7. Weiguo Sun, Kosyachenko L. V., Rarenko I. M.// J. Vac. Sci. A15. 1997. P. 2202.
8. Добровольский Ю. Г., Рюхтин В. В., Шевчук В. В., Биксей М. П. Фотоприемники для электронной аппаратуры. Тематическая подборка и материалы Первой промышленной междунар. науч.-техн. конф. “Эффективность реализации научного, ресурсного и промышленного потенциала в современных условиях”. — П. Славское— Киев: УИЦ “Наука. Техника. Технологія”. 2001. С. 175.
9. Рюхтин В. В., Добровольский Ю. Г., Шимановский А. Б. Кремниевые p-n-фотодиоды для ультрафиолетовой области спектра// ТКЭА. 2001. № 4—5. С. 44—46.
10. Quchi H., Mikai T., Kaamei T., Okamura M.// Photo diodes sensitive to ultraviolet radiation// LEEE. 1979. V. ED-26. № 12. P. 1965—1969.
11. Verdebout J., Booker R. L.// Degradation of native oxide passivated silicon photodiodes by repeated oxide bias// J. Appl. Phys. 1984. Jan. V. 55. № 2. P. 406—412.
12. Зи С. Физика полупроводниковых приборов. — М.: Мир. 1981. Т. 1. С. 177 с.

13. Hamamatsu Photodiodes/ Cat. № KPD0001E06. Dec. 1997.
14. EG&G Optoelectronics: Short Form Catalog Emitters and Detectors. 1996. Issue 1.
15. *Ascheulov A. A., Godovanjuk V. M., Dobrovolsky Yu. G.* and oth. Silicon *p-i-n*-photodiode with little value of dark proceed// SPIE. 1999. 3890. P. 119—124.
16. *Астахов В. П., Гиндин Д. А., Картов В. В., Сорокин К. В.* О влиянии сопротивления поверхностного канала на темновой ток квадрантных *p-i-n*-фотодиодов на кремнии// Прикладная физика. 1999. № 2. С. 79—85.
17. *Добровольский Ю. Г.* *p-i-n*-фотодиод на основе кремния с низким уровнем темнового тока// НТС “Электроника и связь”. — Киев, КПИ. 1998. Вып. 4. Ч. 3. С. 443.
18. *Ащеулов А. А., Годованюк В. Н., Добровольский Ю. Г.* и др. Оптимизация надежности кремниевых *p-i-n*-фотодиодов по темновому току// ТКЭА, 1999. № 1—2. С. 18—21.
19. *Годованюк В. М., Добровольский Ю. Г., Ащеулов А. А.* Высоконадежный кремниевый *p-i-n*-фотодиод// Научный вестник Черновицкого университета. 1999. Вып. 66. С. 9—13.
20. *Рюхтин В. В., Добровольский Ю. Г.* Германиевый фотодиод с термоэлектрическим охлаждением для волоконно-оптических систем связи: Тез. докл. VII междунар. науч.-техн. конф. “Волоконная оптика в системах связи, промышленной автоматике и медицине”. — Запорожье. 2001. С. 57—58.
21. *Степанушкин А. Г., Шевчук В. В., Омелянчук В. П.* Высоконадежный фотоприемник для контроля температуры на железнодорожном транспорте: Тр. третьей междунар. науч.-практ. конф. “Современные информационные и электронные технологии”. — СИЭТ-2002”. — Одесса, 2002. С. 221.
22. *Малик А. И., Грушка Г. Г.* Оптоэлектронные свойства гетеропереходов окисел металла—фосфид галлия// Физика и техника полупроводников. 1991. Т. 25. Вып. 10. С. 1891—1695.
23. *Бутенко В. К., Годованюк В. М., Докторович І. О., Юр’єв В. Г.* Установка для вимірювання динамічного діапазону фотоприймачів//Науковий вісник Чернівецького університету. 2001. Вип. 112. Фізика. Електроніка.
24. *Годованюк В. Н., Добровольский Ю. Г., Биксей М. П., Комаров Е. Ф.* Фотоприемник для ультрафиолетового диапазона спектра на основе фосфида галлия: Тр. третьей междунар. науч.-практ. конф. “Современные информационные и электронные технологии”. — СИЭТ-2002”. — Одесса, 2002. С. 222.
25. *Кадельник Д. В., Фотий В. Д.* Проблемы рынка фотоэлектроники: Тематическая подборка и материалы первой промышленной междунар. науч.-техн. конф. “Эффективность реализации научного, ресурсного и промышленного потенциала в современных условиях”. — П. Славское—Киев: УИЦ “Наука, Техника, Технология”. 2001. С. 176—177.
26. *Фотий В. Д.* Фотоприемники для метрологии: Материалы 9-го междунар. семинара-выставки “Современные методы неразрушающего контроля и технической диагностики”. — Ялта, 2001. С. 73—74.

## Status and prospects microphotoelectronic complex in Chernovitsy region of Ukraine

*V. N. Godovanjuk, Yu. G. Dobrovolskiy*  
Phythm Optoelectronics Inc., Chernovitsy, Ukraine

*S. E. Ostapov, I. M. Rarenko*  
Chernovitsy National Yu. Fedkovych University, Chernovitsy, Ukraine

*V. D. Fotiy*  
Quartz Electronics Engineering Corp., Chernovitsy, Ukraine

*Is submitted result robots of the enterprises microphotoelectronic complex in Chernovitsy region of Ukraine on an example of Chernovitsy National university, “CKB Rhythm” Inc. and “Quartz” Inc. The characteristics of the best products are given, among which photoresistors, photodiodes, photodetector preamplifier modules and optoelectronic couplers, which on sensitivity block a spectral range of optical radiation from 0,2 microns up to 14 microns, and as the measuring and test equipment for research of developed products.*

\* \* \*