

УДК 621.375; 551.51

PACS: 68.65.Fg, 73.21.Fg,
73.40.Cg, 81.07.St

Гибридные фотоэлектронные приборы (обзор)

М. Р. Айнбунд, Д. Е. Миронов, В. И. Зубков

Представлен обзор разработки гибридных фотоэлектронных приборов и современное состояние отечественных работ в области гибридных приборов, представляющих собой объединенные в единый вакуумный объем фотокатод и линейку $p-i-n$ -диодов либо электронно-чувствительную матрицу прибора с переносом заряда (ППЗ). Отражена роль АО «ЦНИИ «Электрон» в разработке и производстве номенклатуры отечественных гибридных фотоэлектронных приборов, предназначенных для работы в разных областях электромагнитного спектра, причём с разными системами обработки сигнала. Детально изложены результаты разработки нового фотокатода на основе гетероструктуры $InP/InGaAs/InP$ для ближнего ИК-диапазона 0,95–1,6 мкм. Анализируются преимущества гибридных телевизионных приборов перед сочлененными приборами, изготовленными на базе ЭОПов. Подробное внимание уделено особенностям дизайна ЭЧ ППЗ с точки зрения легирования примеси и создания оптимального профиля тянущего электрического поля.

Ключевые слова: гибридный фотоэлектронный прибор, гибридный телевизионный прибор, ЭОП, электронно-чувствительная ППЗ, гетероструктура $InP/InGaAs/InP$.

Ссылка: Айнбунд М. Р., Миронов Д. Е., Зубков В. И. // Успехи прикладной физики. 2018. Т. 6. № 5. С. 401.

Reference: M. R. Ainbund, D. E. Mironov, and V. I. Zubkov, Usp. Prikl. Fiz. 6 (5), 401 (2018).

Введение

Гибридными фотоэлектронными приборами принято называть вакуумные приборы с фотокатодом, внутри вакуумной оболочки которых помещен полупроводниковый электронный прибор, как правило, функционально достаточный, в том числе и для самостоятельного применения.

Первые гибридные приборы как сочетание фотокатода и твердотельного элемента в одном вакуумном объеме появились в 60-е годы прошлого столетия. Например, в работе [1] описан фотоэлектронный множитель (ФЭУ), в котором для усиления потока электронов вместо системы диодов использован планарно-диффузионный диод. Подобное направление развивалось во ВНИИ ЭЛП

(ныне АО «ЦНИИ «Электрон») в 70-е годы, а в 1996 году на конференции в Беаупе (Франция) [2] было доложено о создании ФЭУ с $p-i-n$ -диодом на выходе с усилением более 1500. Другим вариантом гибридных ФЭУ являются так называемые Si-ФЭУ с лавинными фотодиодами, работающими в режиме счетчика Гейгера [3, 4].

Коэффициент усиления гибридных ФЭУ существенно меньше усиления стандартных ФЭУ, достигающего и превосходящего 10^6 (например, ФЭУ-189 и ФЭУ-202 производства АО «ЦНИИ «Электрон» [5]). Но при этом гибридный ФЭУ обеспечивает лучшее быстродействие, а также одно- и многоэлектронное разрешение, что позволяет детектировать отдельные фотоны в слабых потоках излучения. Кроме того, эти приборы менее чувствительны к магнитным полям.

Дальнейший прогресс в области гибридных фотоэлектронных приборов связан с визуализацией детектируемого изображения, что в настоящее время обеспечивается на принципах накопления сигнала в многоэлементных («матричных») регистрирующих устройствах и получения цифрового телевизионного выхода.

В настоящей статье представлен обзор разработки гибридных фотоэлектронных приборов и современное состояние отечественных работ в области гибридных фотоэлектронных (телевизи-

Айнбунд Михаил Рувимович¹, нач. лаб., к.т.н.

Миронов Денис Евгеньевич¹, в.н.с.

Зубков Василий Иванович², профессор, д.ф.-м.н.

¹ АО «ЦНИИ «Электрон».

Россия, 194223, Санкт-Петербург, пр. Тореза, 68, лит. Р.

E-mail: m.ainbund@mail.ru, 918@mail.ru

² Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ».

Россия, 197376, Санкт-Петербург, ул. Профессора Попова, 5.

E-mail: vzubkovspb@mail.ru

Статья поступила в редакцию 9 июля 2018 г.

онных) приборов, представляющих собой объединенные в единый вакуумный объем фотокатод и линейку $p-i-n$ -диодов либо электронно-чувствительную матрицу прибора с переносом заряда (ЭЧ ППЗ – Electron Bombarded CCD). Отражена роль АО «ЦНИИ «Электрон» в разработке и производстве номенклатуры отечественных гибридных фотоэлектронных приборов для работы в разных областях электромагнитного спектра. Особое внимание уделяется гибридным телевизионным приборам, создаваемым на основе ЭЧ ППЗ. Такие приборы обеспечивают непосредственное формирование ТВ-сигнала и фактически являются передающими телевизионными трубками.

Гибридные ФЭУ. Разработки АО «ЦНИИ «Электрон»

В настоящее время в АО «ЦНИИ «Электрон» выполнена разработка гибридного ФЭУ с линейкой диодов для регистрации излучения в области 1–1,7 мкм. Общий вид прибора представлен на рис. 1.



Рис. 1. Фото макета гибридного ФЭУ с линейкой диодов.

Конструкция разработанного ФЭУ представляет собой вакуумный прибор, состоящий из облучаемого светом полупрозрачного фотокатода и расположенного на небольшом расстоянии от него твердотельного детектора электронов в виде линейки из 12 кремниевых диодов. Эмитированные фотокатодом электроны разгоняются электрическим полем до энергий в несколько кэВ и далее тормозятся в твердотельном детекторе. При торможении приблизительно на каждые 3,6 эВ энергии фотоэлектрона в кремнии генерируется новая пара свободных носителей заряда, а именно, электрон и дырка. Таким образом, происходит усиление первичного фотоэмиссионного тока от нескольких сотен до тысячи и более раз.

Фотокатод в приборе чувствителен в ближнем ИК-диапазоне 0,95–1,7 мкм и разработан на основе эффекта междолинного переноса электронов под действием тянущего электрического поля [6] с использованием изопериодных гетероструктур $\text{InP}/\text{In}_{0,53}\text{Ga}_{0,47}\text{As}/\text{InP}$ [7, 8]. Выращивание этих структур выполнено в АО «НИИ «Полус» им. М. Ф. Стельмаха». Состав слоя «поглотителя» InGaAs обусловлен необходимостью согласования постоянных решеток слоев двойной гетероструктуры. Ширина запрещенной зоны $\text{In}_{0,53}\text{Ga}_{0,47}\text{As}$ составляет 0,75 эВ, что определяет красную границу фотоэффекта 1,65 мкм. Коротковолновую границу 0,95 мкм определяет оптическое поглощение в подложке. Такие узкозонные материалы («поглотители») сами по себе не могут быть эффективными фотокатодами. Но они идеально согласуются по решётке с InP (эмиттером электронов, генерированных в поглотителе), который позволяет получить на его поверхности эффективное состояние отрицательного электронного сродства. Это достигается путем нанесения на его поверхность ультратонкого слоя цезия.

По литературным данным, в области спектра 1–1,55 мкм на рассматриваемой гетеропаре достигнут наибольший в ИК-диапазоне квантовый выход – более 20 % (прибор LIVAR M506 компании INTEVAC, USA [9]). В иностранной литературе такие катоды называются Transferred Electron (TE) Photocathode.

Для подачи напряжения смещения нами разработана технология нанесения методом фотолитографии металлической сетки-электрода на поверхность эмиттера InP гетероструктуры. Квантовый выход фотокатодов изготовленных образцов приборов составил 1,8–2,8 % в диапазоне длин волн 1,0–1,5 мкм (спектральная чувствительность 18–29 мА/Вт).

Линейки $p-i-n$ -диодов были разработаны и изготовлены в ФТИ им. А. Ф. Иоффе РАН. Они позволили обеспечить регистрацию сигнала с временным разрешением в единицы нс при рабочих напряжениях обратного смещения на линейке 150–400 В. При этом темновые токи диодов находились в диапазоне от единиц до сотен нА.

Спектральные зависимости чувствительности S двух образцов датчиков, измеренные на выходе отдельных диодов линейки, представлены на рис. 2. Здесь U_d – напряжение на диодах линейки, U_{cm} – напряжение на фотокатоде, которое прикладывается между подложкой фотокатода и тонким металлическим электродом на его поверхности, при этом плюсом к электроду, $U_{фк}$ – напряжение между фотокатодом и линейкой диодов.

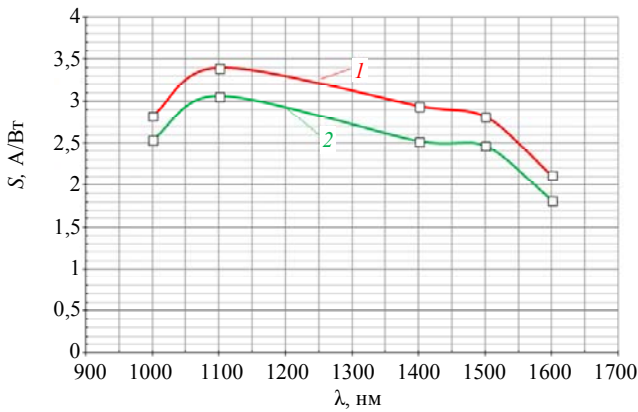


Рис. 2. Спектральные чувствительности S датчиков: 1 – образец № 1: диод 3 при $U_{фк} = -4$ кВ, $U_0 = -60$ В, $U_{см} = 3,5$ В; 2 – образец № 2: диод 11 при $U_{фк} = -2$ кВ, $U_0 = -105$ В, $U_{см} = 2,4$ В.

Исследование чувствительности всех диодов датчика было проведено на специально созданном стенде многоканальных измерений, в котором было реализовано одновременное измерение фототока всех 12 диодов при равномерной засветке всей площади фотокатода. На рис. 3 показаны чувствительности всех элементов линейки для одного из образцов датчика. На нем были также измерены и рассчитаны значения сигналов при различных напряжениях смещения $U_{см}$. Зелёным цветом выделен диод, на котором было измерено абсолютное значение чувствительности.

В результате проведенной работы созданы образцы уникального 12-ти канального приёмника излучения для спектрального диапазона 1–1,6 мкм с чувствительностью канала лучше 1 А/Вт и фронтом импульсной характеристики менее 10 нс. Размер чувствительной области прибора – 24×0,2 мм, размер одного элемента линейки – 2×0,2 мм, габариты прибора: диаметр – 58 мм, высота – 23 мм.

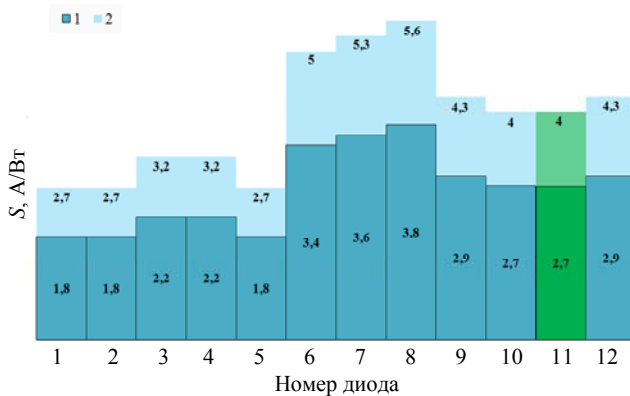


Рис. 3. Чувствительность S на длине волны $\lambda = 1100$ нм на диодах образца № 2 при $U_{фк} = -2$ кВ, $U_0 = -105$ В при различных напряжениях смещения $U_{см}$; 1 – $U_{см} = 2,4$ В, 2 – $U_{см} = 2,8$ В.

От вакуумных электронно-оптических преобразователей – к гибридным телевизионным приборам

Задача визуализации изображения, регистрируемого фотоприемным устройством, традиционно достигалась применением люминофорного преобразователя. Такой вакуумный прибор для преобразования слабого или невидимого для человеческого глаза изображения в видимое и усиления изображения по яркости, как известно, называется электронно-оптическим преобразователем (ЭОП).

В настоящее время широко применяется преобразование видимого изображения с люминофора ЭОПа в электрический (телевизионный) сигнал с помощью фоточувствительного прибора с переносом заряда (ФППЗ), присоединенного к экрану ЭОПа через волоконно-оптические пластины. Согласно отечественной классификации ЭОПов по состоянию на 1999 г., сформулированной специалистами НПО «Орион» [10], такой сочлененный (составной) прибор из ЭОПа и ФППЗ называют ЭОПом 4-ого поколения или, корректнее, 4-м поколением приборов ночного видения.

АО «ЦНИИ «Электрон» выпускает целый ряд сочлененных приборов. Это ФМТП 1-1, ФМТП 1-2, ФМТП 3-1, ФМТП 3-2, ФПУ-4А, ФПУ-4П, ФПМ-УФ, ФПМ-ВИД, ФПМ-ИК, различающиеся числом ЭОПов (1 или 2 шт.), их спектральными характеристиками (в диапазоне от 230 до 1080 нм) и типами ФППЗ [5].

В последние десятилетия развивается новое перспективное направление по объединению в одном вакуумном объеме фотокатода и электронно-чувствительной матрицы прибора с переносом заряда (ЭЧ ППЗ). Такой прибор обеспечивает непосредственное формирование ТВ-сигнала, что принципиально отличает его от предыдущих конструкций ЭОПов «прямого видения». Его можно характеризовать как ЭОП 5-го поколения. В то же время, в терминологии ведущих мировых производителей, он уже получил название гибридного прибора. Фактически такой прибор представляет собой передающую телевизионную трубку – гибридный телевизионный прибор.

Гибридные телевизионные приборы и их достоинства

Гибридные телевизионные приборы (ГТП) представляют собой современный класс высокочувствительных и прецизионных приборов оптоэлектроники, обеспечивающих преобразование слабого входного оптического сигнала в телевизионное изображение высокого качества. Они явля-

ются результатом многолетнего развития вакуумной фотоприемной техники и твердотельной электроники.

Первые ГТП, созданные в ЦНИИ «Электрон» еще в 80-е годы прошлого столетия [11, 12], были разработаны на основе конструкций 1-го поколения модульных ЭОПов с электростатической фокусировкой изображения и многощелочным фотокатодом для видимого диапазона. При этом матрица ЭЧ ППЗ располагалась после фокусирующего электрода на месте люминофора. Естественно, эти приборы имели присущие ЭОПам с электростатической фокусировкой недостатки: геометрические искажения и ухудшение разрешения на периферии.

В настоящее время разработки ГТП ведутся на основе конструкций приборов с плоскопараллельным переносом изображения (бипланарная система), что полностью устранило геометрические искажения и обеспечило постоянство разрешения по площади.

В разработках ГТП определились два принципиальных направления. Ведущим и основным направлением является разработка ГТП в конструкции, в которой внутри вакуумного объема вблизи и параллельно фотокатоду размещается специально модифицированная ППЗ. Предварительно в этой ППЗ обратная поверхность утоняется до 10–15 мкм, и именно этой поверхностью матрица ППЗ (backside CCD) обращена к фотокатоду (см. рис. 4). При бомбардировке кремниевой матрицы фотоэлектронами с энергией выше 2–3 кэВ наблюдается эффективное размножение электронно-дырочных пар в кремнии, обеспечивающее докоммутационное усиление сигнала фотоэлектронов в несколько сотен раз. Таковую матрицу ППЗ называют электронно-чувствительной матрицей прибора с переносом заряда (ЭЧ ППЗ – Electron Bombarded CCD). Именно по такому направлению разработаны ГТП в США (фирма INTEVAC [9]) и ведутся разработки в АО «ЦНИИ «Электрон» [13].

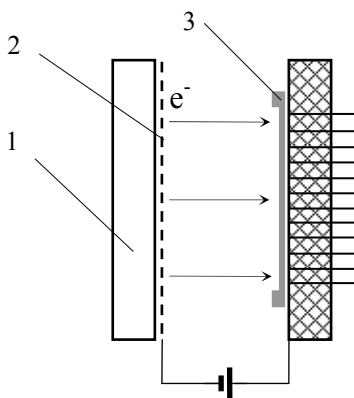


Рис. 4. Схема гибридного прибора: 1 – входное окно, 2 – полупрозрачный фотокатод, 3 – ЭЧ ППЗ.

ГТП с ЭЧ ППЗ имеет ряд существенных преимуществ, выгодно отличающих его от составных телевизионных приборов (иногда также называемых гибридными), состоящих из ЭОПа и ФППЗ, соединенных через волоконно-оптический преобразователь (ВОП). Перечислим основные.

1. Размножение электронно-дырочных пар в кремнии при его бомбардировке высокоэнергетичными электронами (свыше 3 кэВ) дает усиление несколько меньшее, чем микроканальная пластина (МКП), но зато с меньшими потерями качества. Утоненная ППЗ-матрица, в отличие от МКП, полностью преобразует сигнальный поток фотоэлектронов. В ней отсутствуют флуктуации усиления по полю зрения. Поэтому установка ЭЧ ППЗ-матрицы внутри вакуумного объема ГТП взамен МКП и экранного узла, содержащихся в ЭОПе, резко улучшает отношение сигнал/шум фотоэлектронного прибора.

Дело в том, что площадь входных отверстий каналов в МКП не превышает 60 % ее поверхности. Вследствие этого не более 70–75 % фотоэлектронов, вылетевших с фотокатода ЭОПа, эффективно умножаются в каналах МКП. Это означает, что эффективный квантовый выход оказывается только 0,7–0,75 от квантового выхода фотокатода ЭОПа. По этой причине, а также из-за статистического характера процесса умножения в МКП фактор шума составного прибора составляет 1,6–2,0. В ГТП таких потерь фотоэлектронов нет, и фактор шума оценивается как 1,09–1,1 [14, 15]. Следовательно, при регистрации излучений отношение сигнал/шум на выходе составного прибора ухудшается в 1,6–2 раза, а гибридного – только в 1,1 раза по сравнению с отношением сигнал/шум на входе (на фотокатодах) фотоприемников.

2. В гибридном приборе отсутствует люминофор и связанная с этим инерционность. Устранение эффекта затягивания сигнала, связанного с послесвечением люминофорного экрана ЭОП, обеспечивает высокое быстродействие прибора с ЭЧ ППЗ.

3. Отсутствует ВОП, что повышает радиационную стойкость.

4. Как результат, уменьшаются общие габариты фотоприемного устройства.

Другое направление разработки ГТП – внутри вакуумного объема устанавливается практически стандартная матрица ППЗ, которая используется фактически только для регистрации электронного потока (без его усиления). В этом случае между фотокатодом и ППЗ для усиления потока фотоэлектронов приходится располагать МКП [16]. Это ликвидирует главное достоинство, присущее ГТП с ЭЧ ППЗ, – низкий фактор шума.

Особенности гибридных телевизионных приборов с ЭЧ ППЗ

К матрице ППЗ в гибридном приборе предъявляются особые требования:

- в качестве облучаемой (рабочей) поверхности используется обратная сторона матрицы ППЗ;
- матрица накапливает сигнал фотоэлектронов, а не фотонов;
- необходимо проводить утонение матрицы;
- необходимо дополнительное легирование обратной стороны матрицы;
- толщина и процесс легирования матрицы должны быть оптимизированы для обеспечения возможности регистрации фотоэлектронов с энергией в несколько кэВ и усиления полезного сигнала.

Утонение ППЗ

ЭЧ ППЗ получают путем утонения области ППЗ со стороны подложки до 10–20 мкм. Основная сложность утонения заключается в том, чтобы получить утоненную часть (мембрану) равномерной по толщине. В настоящее время в АО «ЦНИИ «Электрон» разрабатываются разные варианты операций утонения (с помощью химических реактивов, шлифовки и сочетания этих процессов).

Оптимальное легирование ЭЧ ППЗ

Усиление сигнала в гибридном приборе достигается за счет бомбардировки утоненной поверхности ЭЧ ППЗ высокоэнергетичными фотоэлектронами (до 10 кэВ). При электронной бомбардировке фотоэлектроны, попадая в кремний, генерируют электронно-дырочные пары. Средняя энергия, необходимая для образования одной электронно-дырочной пары, равна 3,6 эВ. Таким образом, при энергии бомбардирующих электронов от 3 до 10 кэВ в кремнии может рождаться от 800 до 2700 пар носителей заряда. При этом следует отметить, что даже электроны с энергией 10 кэВ проникают в объем кремния в среднем на глубину порядка 1 мкм, а электронно-дырочные пары образуются на всем пути бомбардирующего электрона.

Сгенерированные электронной бомбардировкой носители заряда образуются в приповерхностной области мембраны, обращенной к фотокатоду, в то время как потенциальные ямы ячеек ЭЧ ППЗ находятся с противоположной стороны полупроводника. Поэтому важнейшей задачей является «транспортировка» образовавшихся в результате облучения дырок в потенциальные ямы под затворами ЭЧ ППЗ. Для этого в мембране создается встроенное тянущее электрическое поле, которое обеспечивает ток образованных электронной бомбардировкой дырок в потенциальные ямы ячеек

ЭЧ ППЗ. Для создания тянущего поля у входной стороны мембраны p -типа методом ионной имплантации формируется тонкий p^+ -слой, обеспечивающий требуемый градиент концентрации основных носителей заряда (ОНЗ).

Для формирования повышенной концентрации носителей заряда нами проводилась имплантация примеси бора в приповерхностную область матрицы ЭЧ ППЗ. В результате имплантации образуется область с p^+ -проводимостью, концентрация ОНЗ в которой на несколько порядков выше, чем в мембране. Профиль распределения имплантируемой примеси в неоптимизированном случае имеет максимум концентрации на некотором удалении от входной поверхности мембраны (порядка 50 нм), поэтому между этой поверхностью и максимумом концентрации градиент концентрации носителей имеет противоположное направление. В результате там образуется так называемый «мертвый» слой, в котором электронно-дырочные пары вытягиваются на поверхность, где и рекомбинируют. Следовательно, сгенерированные дырки не попадают из этой области в область тянущего поля и далее в подзатворные потенциальные ямы ячеек, не давая, таким образом, вклада в усиление сигнала.

Фотоэлектроны будут давать усиление сигнала с ППЗ лишь тогда, когда глубина их проникновения в мембрану превысит толщину «мертвого» слоя. Таким образом, следующей важной задачей при изготовлении ЭЧ ППЗ является уменьшение толщины «мертвого» слоя, для чего необходимо «сдвинуть» максимум концентрации легирующей примеси как можно ближе к поверхности мембраны.

Форма профиля распределения легирующей примеси зависит от ее дозы и энергии бомбардирующих ионов. Для выбора оптимального режима ионного легирования проводились исследования профилей концентрации ОНЗ в p^+ -слое для имплантации с различной энергией пучка методом электрохимического вольт-фарадного (ECV) профилирования на автоматизированной установке ECV-Pro компании Nanometrics [17].

На рис. 5 изображены профили концентрации ОНЗ, измеренные методом ECV для различных энергий имплантации. По полученным профилям видно, что по мере уменьшения энергии внедряемых ионов профили ОНЗ смещаются к поверхности образцов, что ведет к уменьшению толщины «мертвого» слоя, а, следовательно, к росту коэффициента усиления электронной бомбардировки. По результатам исследований была проведена корректировка процесса ионного легирования: энергия пучка ионов при легировании была снижена с 25 до 13 кэВ.

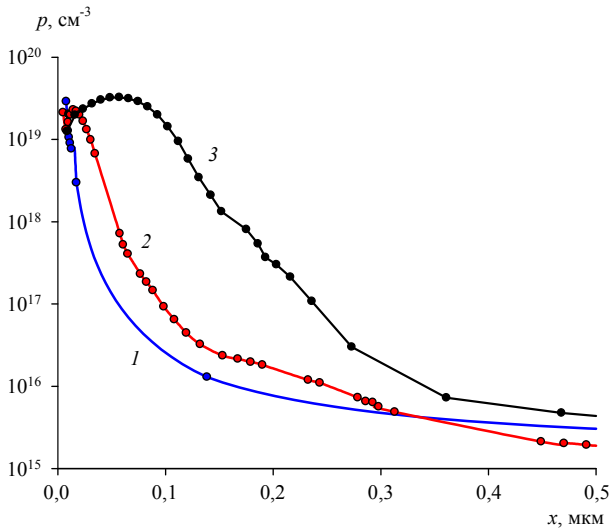


Рис. 5. Профили концентрации ОНЗ, измеренные методом ECV для различных энергий имплантации бора в Si. Кр. 1 – эксперимент 10 кэВ; кр. 2 – эксперимент 15 кэВ; кр. 3 – эксперимент 20 кэВ.

Современные разработки гибридных телевизионных приборов в АО «ЦНИИ «Электрон»

Гибридные вакуумные приборы могут создаваться с различными типами фотокатодов для регистрации излучений в диапазоне от вакуумного ультрафиолета до ближнего ИК-диапазона.

На сегодняшний день разработан практически солнечно-слепой ГТП с теллур-цезиевым фотокатодом (рис. 6) для регистрации УФ-излучения в области 220–290 нм [13].

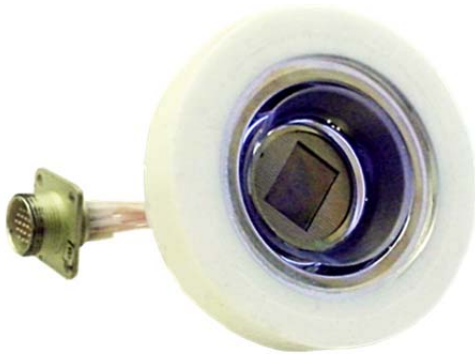


Рис. 6. Внешний вид ГТП с теллур-цезиевым фотокатодом.

Достигнута высокая чувствительность фотокатода на окне из кварца, превышающая 40 мА/Вт в максимуме спектральной чувствительности, при этом максимальный квантовый выход фотокатода достигает 17–22 % при $\lambda = 210\text{--}260$ нм. Обеспечивается высокая «солнечная слепота» без применения каких-либо светофильтров: чувствительность

снижается вдвое к излучению с длиной волны 300 нм и в 10 раз к излучению с длиной волны более 330 нм (рис. 7). В настоящее время проводятся испытания на долговечность: при облученности 3×10^{-8} Вт/см² прибор наработал уже более 2500 ч.

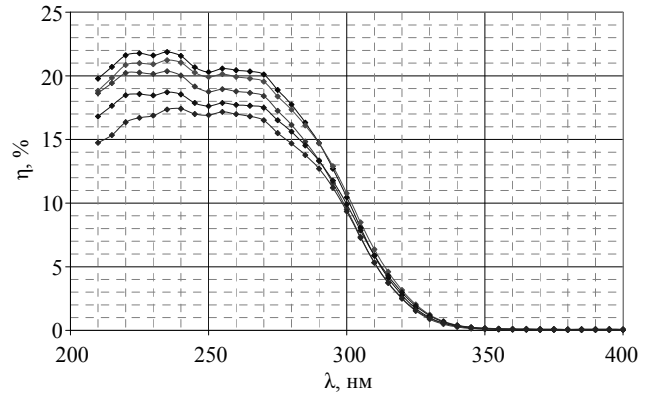


Рис. 7. Квантовый выход η фотокатодов в пяти экспериментальных образцах прибора.

На рис. 8 приведена абсолютная спектральная чувствительность образца ГТП (с квантовым выходом фотокатода 15 % в максимуме) при ускоряющем напряжении 4,7 кВ между фотокатодом и матрицей ЭЧ ППЗ. Прибор позволяет в больших пределах регулировать чувствительность в УФ-области путём изменения напряжения между фотокатодом и матрицей, что обуславливает повышенный динамический диапазон по облученности (до пяти порядков).

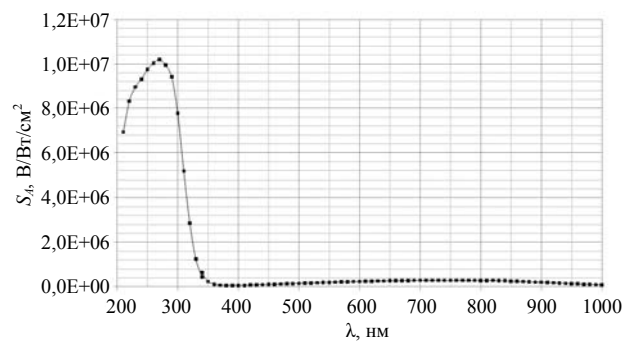


Рис. 8. Абсолютная спектральная чувствительность S_d образца ГТП.

На базе такого ГТП создан образец телевизионной камеры (рис. 9). Основные параметры камеры: число элементов матрицы – 768×580 шт.; размер элемента 34×17 мкм; размер изображения ~13×10 мм. Благодаря тому, что фактор шума гибридного прибора невелик ($\leq 1,1$) и темновой ток и шумы Cs₂Te фотокатода очень малы, пороговая облученность камеры в основном определяется шумами регистрирующей аппаратуры, что обуславливает высокие к ней требования. Разрабо-

танная камера оснащена блоком электронной обработки сигнала с собственным шумом не более 6,5 мВ и коэффициентом усиления 12. В результате при отношении сигнал-шум 2,5–3,0 пороговая облученность камеры на $\lambda = 280$ нм составляет 8×10^{-11} Вт/см². Размер ФПУ и объектива (рис. 9): 140×80×80 мм и 120×Ø65 мм, масса 940 и 460 г соответственно.



Рис. 9. УФ ТВ-камера (ФПУ с объективом).

В настоящее время в ЦНИИ «Электрон» проводится разработка ГТП для регистрации ближнего ИК-излучения в области 0,95–1,7 мкм. В нем применен фотокатод с тянущим полем на основе двойной гетероструктуры InP/InGaAs/InP, который аналогичен вышеописанному в гибридном приборе с линейкой pin-диодов. Следует заметить, что данный фотокатод имеет относительно большую величину термоэмиссии. Вследствие этого создание ЭОПов с МКП с этим фотокатодом и сочлененных телевизионных приборов нецелесообразно.

Заключение

Гибридные фотоэлектронные приборы (ГФП) сочетают преимущества традиционной вакуумной электроники и большие потенциальные возможности полупроводниковых приборов. В настоящей статье дан краткий обзор основных этапов развития гибридных фотоэлектронных приборов от ФЭУ к гибридным телевизионным приборам. Представлены основные разработки АО «ЦНИИ «Электрон» в данной области, даны характеристики изготовленных приборов.

В настоящее время ведутся исследовательские работы и математическое моделирование, направленные на оптимизацию толщины полупроводниковых слоев и концентрации легирующей примеси в них с целью увеличения внешнего квантового выхода ИК-фотокатода ГФП.

Дальнейшее развитие гибридных фотоэлектронных приборов в АО «ЦНИИ «Электрон» идет по созданию гибридного многоканального ФЭУ с матрицей диодов (5×5 и более) и созданию гибридного телевизионного прибора для ближнего ИК-диапазона с повышенной чувствительностью фотокатода, а также по созданию модификаций этих приборов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Kalibjian R. // IEEE Trans. Nucl. Sci. 1965. Vol. NS-12. No. 4. P. 367.
2. Lukyanov V. N., Ainbund M. R., Beylin A. F., Levina E. E., Mamaeva G. A., Palts T. N., Rusanova T. A., Mironov A. I., Frusin M. Z. // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research. 1997. Vol. A 387. P. 38.
3. Barbarino G., Asmundis R., Rosa G., Fiorillo G., Gallo V., Russo S. // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research. 2008. Vol. A 594. P. 326.
4. Клемин С., Кузнецов Ю., Филатов Л., Бужан П., Долгошеин Б., Ильин А., Попова Е. // Электроника: НТБ. 2007. Т. 8. С. 80.
5. <http://www.electron.spb.ru/nomenkl.htm>.
6. Bell R. L., James L. W., Moon R. L. // APL. 1974. Vol. 25. No. 11. P. 645.
7. Паушук А. В., Фурсенко Т. А. // ПТЭ. 1994. Т. 37. № 2. С. 112.
8. Айнбунд М. Р., Васильев И. С., Гомин И. Н., Кудряшова С. Н., Левина Е. Е., Паушук А. В. / Тезисы докладов XX Международной научно-технической конференции по фотоэлектронике и приборам ночного видения (ФГУП «НПО «Орион», М. 2008). С. 218.
9. <http://www.intevac.com/intevacphotonics>.
10. Безугчев В. П., Чанкевич А. Л., Филачев А. М. // Прикладная физика. 1999. № 2. С. 132.
11. Bryukhnevich G. I., Dalinenko I. N., Kuz'min G. A., Libenson B. N., Malyarov A. V., Moskalev B. B., Postovalov V. E., Prokhorov A. M., Schelev M. Y. / Proc. SPIE 1358. 19th Int. Congress on High-Speed Photography and Photonics, (1 April 1991), pp. 739–749.
12. Далиненко И. Н., Маляров А. В., Вишневский Г. И., Выдревич М. Г., Жук А. А., Коссов В. Г., Козлов В. Н., Лазовский Л. Ю. // Оптический журнал. 1996. № 12. С. 70.
13. Айнбунд М. Р., Альмов О. В., Андреева Е. Б., Васильев И. С., Левина Е. Е., Паушук А. В., Плахов С. А., Свищёв И. А., Чернова О. В. / Труды XXIII Международной научно-технической конференции по фотоэлектронике и приборам ночного видения (ОАО «НПО «Орион», М., 2014). С. 232.
14. Dussault D., Hoess P. / in Proc. SPIE 5563. Infrared Systems and Photoelectronic Technology (21 October 2004), pp. 195–204.
15. Williams Jr. G. M., Reinheimer A. L., Aebi V. W., Costello K. A. / Proc. SPIE 2415. Charge-Coupled Devices and Solid State Optical Sensors V, (10 April 1995), pp. 211–235.
16. Константинов П. Б., Костюков Е. В., Скрылёв А. С., Чернокожин В. В. // Электронная техника, серия 2: Полупроводниковые приборы. 2013. Т. 1. № 230. С. 26.
17. Яковлев Г. Е., Фролов Д. С., Зубкова А. В., Левина Е. Е., Зубков В. И., Соломонов А. В., Стерлядкин О. К., Сорочкин С. А. // ФТП. 2016. Т. 50. № 3. С. 324.

Hybrid photoelectronic devices (a review)

M. R. Ainbund¹, D. E. Mironov¹, and V. I. Zubkov²

¹ NRI “Electron”, JSC
68 Toreza av., St. Petersburg, 194223, Russia
E-mail: m.ainbund@mail.ru, 918@mail.ru

² Saint Petersburg State Electrotechnical University “LETI”
5 Professor Popov str., St. Petersburg, 197376, Russia
E-mail: vzubkovspb@mail.ru

Received July 9, 2018

A brief sketch and up-to-day state of the art of Russian research and technological activities in the field of design and practical application of hybrid photoelectric devices has been done. This class of devices comprises a semiconductor photocathode and a stripe of pin-diodes or a back-side electron bombarded CCD matrix combined within unite vacuum tube. The nomenclature of hybrid devices produced by NRI “Electron” for different spectral regions is presented and the near future perspectives of the devices are been described. The results of developments of new heterostructure photocathode for the near IR region of 0.95–1.6 μm are shown in details. The advantages of hybrid TV devices over the image intensifier devices are analyzed. The especial attention is paid to the impurity doping and creating the optimal profile of electric field in back-side electron bombarded CCD matrix.

Keywords: hybrid photoelectronic device, hybrid TV device, image intensifier tube, electron-bombarded charge-coupled device.

REFERENCES

1. R. Kalibjian, IEEE Trans. Nucl. Sci. **NS-12** (4), 367 (1965).
2. V. N. Lukyanov, M. R. Ainbund, A. F. Beylin, E. E. Levina, G. A. Mamaeva, T. N. Palts, T. A. Rusanova, A. I. Mironov, and M. Z. Frusin, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research **A 387**, 38 (1997).
3. G. Barbarino, R. Asmundis, G. Rosa, G. Fiorillo, V. Gallo, and S. Russo, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research **A 594**, 326 (2008).
4. S. Klemin, Iu. Kuznetsov, L. Filatov, P. Buzhan, B. Dolgoshein, A. Il'in, and E. Popova, Electronics: STB **8**, 80 (2007).
5. <http://www.electron.spb.ru/nomenkl.htm>.
6. R. L. Bell, L. W. James, and R. L. Moon, APL **25** (11), 645 (1974).
7. A. V. Pashuk and T. A. Fursenko, Instruments and Experimental Techniques **37** (2), 112 (1994).
8. M. R. Ainbund, I. S. Vasil'ev, I. N. Gomin, S. N. Kudriashova, E. E. Levina, and A. V. Pashuk, in *Proc. XX Intern. Scientific-technical Conf. on Photoelectronics and Night Vision Devices* (NPO “Orion”, Moscow, 2008), p. 218.
9. <http://www.intevac.com/intevacphotonics>.
10. V. P. Beguchev, A. L. Chapkevich, A. M. Filachev, Prikl. Fiz., No. 2, 132 (1999).
11. G. I. Bryukhnevich, I. N. Dalinenko, G. A. Kuz'min, B. N. Libenson, A. V. Malyarov, B. B. Moskalev, V. E. Postova-
lov, A. M. Prokhorov, and M. Y. Schelev, in *Proc. SPIE 1358. 19th Int. Congress on High-Speed Photography and Photonics*, (1 April 1991), pp. 739–749.
12. I. N. Dalinenko, A. V. Malyarov, G. I. Vishnevskij, M. G. Vydrevich, A. A. Zhuk, V. G. Kossov, V. N. Kozlov, and L. Yu. Lazovskij, Journal of Optical Technology **12**, 70 (1996).
13. M. R. Ainbund, O. V. Alymov, E. B. Andreeva, I. S. Vasilev, E. E. Levina, A. V. Pashuk, S. A. Plakhov, I. A. Svishchev, and O. V. Chernova, in *Proc. XXIII Intern. Scientific-technical Conf. on Photoelectronics and Night Vision Devices* (NPO «Orion», Moscow, 2014), pp. 232–234.
14. D. Dussault and P. Hoess, in *Proc. SPIE 5563. Infrared Systems and Photoelectronic Technology* (21 October 2004), pp. 195–204.
15. G. M. Williams Jr., A. L. Reinheimer, V. W. Aebi, and K. A. Costello, in *Proc. SPIE 2415. Charge-Coupled Devices and Solid State Optical Sensors V*, (10 April 1995), pp. 211–235.
16. P. B. Konstantinov, E. V. Kostjukov, A. S. Skrylev, and V. V. Chernokozhin, Electronic engineering. Series 2. Semiconductor devices **1** (230), 26 (2013).
17. G. E. Yakovlev, D. S. Frolov, A. V. Zubkova, E. E. Levina, V. I. Zubkov, A. V. Solomonov, O. K. Sterlyadkin, and S. A. Sorokin, Semiconductors **50**, 320 (2016).