

УДК 621.383

Новые фотокатоды УФ- и ИК-диапазонов для перспективных фотоприемных устройств

М. Р. Айнбунд, И. С. Васильев, Е. Г. Вилькин, Л. Г. Забелина, Е. Е. Левина,
А. В. Пащук, А. С. Петров, Т. А. Русанова, Р. М. Степанов, И. Н. Суриков

ОАО «ЦНИИ "Электрон"», С.-Петербург, Россия

Рассмотрены возможности повышения чувствительности фотокатодов в УФ- и ИК-диапазонах для расширения функциональных возможностей аппаратуры на их основе.

Улучшение характеристик аппаратуры, использующей фотодетекторы, связано в первую очередь с повышением чувствительности фотокатодов и освоением новых областей спектра.

УФ-диапазон

В последние годы для решения ряда важнейших научных, прикладных и специальных задач нашли применение системы, работающие в ближней области УФ-диапазона (0,2—0,4 мкм). За рубежом УФ-аппаратура получила широкое распространение для наблюдения астрономических объектов, полярных сияний, космических объектов для обнаружения пламени факелов и других целей. Например, в УФ-системах СОИ на Шаттле используются УФ-спектрометры, УФ-радиометры для сбора информации по МБР. УФ-системы применяются в аппаратах переднего обзора, авиационных головках самонаведения. В отдельных случаях УФ-канал дополняет ИК-канал, что позволяет осуществлять селекцию целей и исключать ложные цели. Особенно широкое использование получили приемники УФ-диапазона в УФ-пеленгаторах обнаружения пусков атакующих ракет классов "земля—воздух" и "воздух—воздух" по излучению факелов двигателей ракет. Оптотелевизионные системы строятся на различных классах фотозлектронных приборов как с внешним, так и с внутренним фотоэффектом.

Так, в бортовой аппаратуре ИСЗ "Viking", аппаратуре ASC, системе счета фотонов "Foton", камере "Mosaic" и HST применяются ФППЗ-матрицы или линейки, сочлененные с МКП или усилителями яркости с CsTe- и CsI-фотокатодами. Широко используются также координатно-чувствительные детекторы с МКП. Для таких приемников дополнительным требованием является точность определения координаты падения фотона.

Использование того или иного класса приборов выявляется в первую очередь требованиями системы и потенциальными возможностями приборов.

Потенциальные возможности УФ-приемников изображения определяются целым рядом факторов. Это в первую очередь спектральный диапазон работы системы, во-вторых, квантовая эффективность преобразования фотокатодов или фоточувствительных слоев, а также коэффициент усиления фотоприемника, его бы-

стродействие, уровень шумов преобразования или считывания и др.

Приемники УФ-излучения на базе фотокатодов имеют ряд преимуществ перед твердотельными: очень высокое быстродействие, низкий уровень собственных шумов, позволяющий строить одноэлектронные приборы. Практически любой из известных эффективных фотокатодов может быть использован в той или иной части УФ-области спектра при соответствующем выборе входного окна. Однако применение фотокатодов, имеющих длинноволновую границу, значительно сдвинутую от регистрируемого диапазона, оказывается крайне нежелательным, поскольку при этом возрастает критичность к фоновым излучениям, а также растут темновые токи.

Для спектрального диапазона 280—350 нм нашел применение бищелочной фотокатод K_2CsSb , имеющий красную границу около 650 нм. Последнее предопределяет необходимость использования специальных интерференционных фильтров. В диапазоне 200—290 нм используют так называемые солнечно-слепые фотокатоды CS_2Te и Rb_2Te , спектральные характеристики которых близки (их отличия в литературе фактически определяются предпочтениями производителей приборов).

С точки зрения задачи регистрации сигналов УФ-излучения на фоне солнечной засветки главными недостатками известных фотокатодов являются их невысокая чувствительность в рабочем диапазоне и недостаточный крутой спад чувствительности за пределами требуемой рабочей зоны. Так, например, бищелочной фотокатод имеет длинноволновую границу чувствительности около 650 нм, т. е. сдвинутую почти на 300 нм от требуемого рабочего диапазона.

Поэтому естественным было стремление разработать для УФ-диапазона фотокатоды на основе эмиттеров с отрицательным электронным сродством (ОЭС-фотокатоды) из элементов группы A_3B_5 по аналогии с известными фотокатодами $GaAs(Cs)$ и $GaAsP(Cs)$, разработанными для видимого спектра. Отличительная особенность этих фотокатодов, наряду с высокой чувствительностью, — резкий спад границы чувствительности в длинноволновой области: спад чувствительности в 10—100 раз от чувствительности, составляющей 70 % максимальной, происходит при изменении длины волны излучения примерно на 40—100

нм, тогда как у многощелочного фотокатода это составляет более 200—300 нм. Крутой спад чувствительности является характерной особенностью фотокатодов на основе элементов группы A_3B_5 , обладающих отрицательным электронным сродством. Поэтому создание подобных фотокатодов для УФ-диапазона должно обеспечить как повышение чувствительности, так и резкое улучшение солнечной слепоты.

Для разработки высокочувствительных приемников УФ-диапазона с ОЭС-фотокатодами перспективными являются полупроводниковые нитриды галлия и алюминия и твердые растворы на основе этих соединений. Квантовый выход таких фотокатодов может достигать 50 %, а теоретический предел квантового выхода фотокатода на GaN — 90 %. GaN и AlN образуют непрерывный ряд твердых растворов во всем диапазоне составов. Изменяя состав твердого раствора, можно получать материал с длинноволновой границей fotocувствительности от 350 до 200 нм. Твердые растворы характеризуются резким спадом поглощения на длинноволновой границе, что характерно для прямозонных полупроводников. Такой характер поглощения дает возможность использовать данные твердые растворы для разработки на их основе солнечно-слепых фотоприемников, работающих без дополнительных фильтров, ограничивающих fotocувствительность в видимой и ИК-областях спектра. При этом чувствительность на длинноволновой границе в соответствии со спектральной зависимостью собственного поглощения может уменьшаться на порядок при изменении длины волны на 15—20 нм. Но создание таких фотокатодов — сложная технологическая задача, на сегодня до конца не решенная.

Современная технологическая база, в том числе имеющаяся в России, позволяет уже сегодня приступить к работам по созданию фотокатода на основе GaN. Полученные к настоящему времени гетероструктуры GaN на сапфировых подложках характеризуются концентрацией основных носителей заряда — дырок до 10^{18} см^{-3} и диффузионной длиной электронов до 1 мкм, что соответствует требованиям, предъявляемым к материалу для создания ОЭС-фотокатода. Применительно к этому материалу требуется отработать методику активировки поверхности гетероструктуры до состояния ОЭС, включая термическую очистку поверхности и нанесение монокристаллических слоев Cs и Cs—O. Но имея в виду опыт активировки поверхности, накопленный для других соединений A_3B_5 (в первую очередь арсенида галлия), можно надеяться, что эта задача будет успешно решена. Фотокатод на основе GaN должен иметь длинноволновую границу чувствительности, близкую к 350 нм.

Сдвиг границы fotocувствительности в коротковолновую область спектра до значений 320—330 нм возможен только при использовании гетероструктур AlGaIn с содержанием AlN до 0,1 мол. доли. При этом возникают проблемы с легированием твердого раствора акцепторными примесями. Уже получены структуры с составом 0,1 и концентрацией дырок до 10^{17} см^{-3} . Эта концентрация дырок ниже оптимальной с точки зрения достижения состояния ОЭС. Тем не менее, учитывая большое значение ширины запрещенной зоны твердого

раствора, можно рассчитывать на достижение состояния ОЭС.

Получение фотокатодов с длинноволновой границей чувствительности 280 нм потребует разработки принципиально новых типов гетероструктур. Использование твердого раствора AlGaIn с содержанием AlN 0,4 мол. доли и более, характеризующегося границей собственного поглощения, близкой к указанному значению, вряд ли осуществимо из-за невозможности получения в этом диапазоне составов образцов *p*-типа проводимости.

Проблема легирования может быть решена путем использования в качестве материала фотокатода короткопериодных сверхрешеток AlGaIn|GaIn или AlGaIn|AlInN. Но до начала разработки такого материала необходимо проведение теоретических и экспериментальных работ по определению параметров сверхрешеток, пригодных с точки зрения зонной структуры для работы в качестве ОЭС-фотокатодов.

Нами исследовалась возможность получения фотокатода на основе структуры GaN, выращенной в ФТИ им. А. Ф. Иоффе РАН методом газовой эпитаксии из металлоорганических соединений на подложке сапфира (0001). Слой *p*-GaN был легирован Mg и имел концентрацию дырок $(1-5) \cdot 10^{18}$ см^{-3} . Толщина активного слоя GaN составляла около 0,5 мкм.

Исследование фотоэмиссии GaN проводилось в вакуумной камере, имеющей предельное давление $8 \cdot 10^{-10}$ мм рт. ст. Измерение фотоэмиссии осуществлялось при фронтальном освещении образца с помощью оптической системы, созданной на основе дейтериево-аргоновой лампы ДНМ-100. Оптическая система позволяла производить освещение фотокатода в вакуумной камере излучением с длинами волн от 200 нм, для чего камера была оснащена сапфировым окном. Абсолютные измерения чувствительности фотокатода производились на длине волны 275 ± 15 нм посредством интерференционного УФ-фильтра, изготовленного в ЦНИИ "Электрон" [1] и на длине волны 591 нм с помощью светодиода.

Калибровочные измерения мощности излучения на выходе оптической системы и фильтра проводили с помощью фотодиода КДФ105А и двух фотоэлементов с Cs₂Te-фотокатодами с известными спектральными характеристиками. Максимально достигнутая спектральная чувствительность (в вакуумной камере) $S(\lambda)$ на $\lambda = 275$ нм составила $S(275) = 30$ мА/Вт, что соответствует квантовому выходу $Y(275) = 13$ % и находится на уровне лучших Cs₂Te- и Rb₂Te-фотокатодов. Достигнутые значения чувствительности не являются предельно возможными для фотокатодов на основе GaN. Полагаем, что снижение предельного давления в вакуумной камере до 10^{-10} — 10^{-11} мм рт. ст. и дальнейшая отработка технологии позволят существенно увеличить квантовый выход.

Измерения показали, что чувствительность GaN-фотокатода на $\lambda = 591$ нм составляет $1 \cdot 10^{-5}$ мА/Вт, т. е. перепад чувствительности составляет более шести порядков. Возможно, наличие у GaN фотокатода некоторой чувствительности на $\lambda = 591$ нм вызвано примесной фотоэмиссией. Получение слоев GaN с меньшей концентрацией остаточных примесей,

по-видимому, позволит увеличить отношение чувствительности на длинах волн 275 и 591 нм.

С GaN- и GaAlN-фотокатодами намечено провести разработки планарных преобразователей изображения для создания гибридных высокочувствительных приборов и координатно-чувствительных ФЭУ с усилением на МКП.

Практически до последнего времени в литературе приводились значения квантового выхода GaN-фотокатода в 30—50 % для длин волн 200 нм и короче, на 270—280 нм квантовый выход составлял 10—12 %, а спад чувствительности на длинных волнах был пологий [2]. В [3] появилось сообщение о получении квантового выхода около 30 % в диапазоне 270—280 нм и резком спаде чувствительности при $\lambda = 370—390$ нм.

ИК-диапазон

Достигнутые значения чувствительности многощелочного и арсенидгаллиевого фотокатодов близки к теоретически возможным, и дальнейшие улучшения параметров ЭОПов и приборов ночного видения (ПНВ) за счет повышения чувствительности фотокатода практически невозможно. Улучшение параметров ПНВ возможно за счет расширения диапазона чувствительности в ближнюю ИК-область спектра.

Преимущества работы в ближнем ИК-диапазоне особенно отчетливо проявляются в самое темное время суток в отсутствие Луны. Естественная спектральная освещенность в отсутствие последней в диапазоне 1,4—1,8 мкм составляет $(1,5—2) \cdot 10^{-7}$ Вт/см²·мкм, что на два порядка выше освещенности в области чувствительности многощелочного катода, составляющей $(1,5—3) \cdot 10^{-9}$ Вт/см²·мкм. Прозрачность атмосферы также растет при переходе в ближнюю ИК-область спектра. При метеорологической дальности видимости $S_m = 10$ км пропускание толщи атмосферы в 1 км на длине волны 0,6 мкм составляет 0,72, а в диапазоне 1,4—1,8 мкм — 0,93. Яркость атмосферной дымки снижается более чем на порядок в области 1,4—1,8 мкм по сравнению с видимой областью спектра [4].

Весьма результативно использование ПНВ, работающих в области спектра 1,4—1,8 мкм, для обнаружения закамуфлированных объектов. По данным работы [5], отношение между коэффициентом отражения камуфляжной одежды и земной растительностью в диапазоне 0,4—0,7 мкм практически равно 1, в то время как на длине волны 1,0 мкм оно равно 0,9 для камуфляжа российского образца и 0,7 — для американского, на длине волны 1,6 мкм, соответственно, 1,75 и 0,75.

Таким образом, работа в диапазоне 1,4—1,8 мкм позволяет не только обнаруживать закамуфлированные объекты, но и по величине контраста "объект наблюдения—фон" определять принадлежность объекта по признаку "свой—чужой".

Приборы ночного видения, работающие в диапазоне 1,4—1,8 мкм, имеют преимущества и по сравнению с тепловизорами диапазонов 3—5 и 8—12 мкм. В ИК-

диапазоне детекторы реагируют на разность температур или тепловое излучение объектов, поэтому непригодны для обнаружения объектов, нагретых до одинаковой температуры с фоном. Тепловизоры неработоспособны также в сложных метеорологических условиях: дождь, туман и т. п. ПНВ, работающий в диапазоне 1,4—1,8 мкм, может быть использован для решения тех же задач, что и тепловизоры, работа в составе системы наблюдения активного типа с лазерной подсветкой на длине волны 1,54 мкм, абсолютно безопасной для человеческого глаза. В этом случае дальность обнаружения и распознавания человеческой фигуры может достигать 3 км, а зданий и сооружений — 28 км, что в 3—7 раз больше, чем у лучших обзорных систем диапазонов 3—5 и 8—12 мкм [6].

Суммируя вышесказанное, можно сделать вывод, что ПНВ диапазона 1,4—1,8 мкм будут иметь дальность действия, в несколько раз большую по сравнению с лучшими современными образцами ПНВ видимого диапазона и с тепловизорами диапазонов 3—5 и 8—12 мкм.

Для продвижения в ИК-область проводятся работы по созданию фотокатодов с тянущим полем (с междолинным переносом электронов) на основе структур InP—InGaAs. На этих фотокатодах ожидается получение квантовой эффективности 5—10 % и более (до 25—30 %) в диапазоне 0,95—1,6 мкм. Опытный образец камеры, чувствительной в диапазоне до 1,6 мкм, разработан фирмой Intevac (США) [5]. Основными элементами камеры являются высокоэффективный фотокатод на основе соединения InGaAsP и электронно-чувствительная матрица ПЗС. Камера работает в составе системы наблюдения активного типа LIVAR с подсветкой от импульсного лазера на длине волны 1,54 мкм.

Нами были проведены эксперименты по изготовлению фотокатодов с междолинным переносом электронов (МПЭ-ФК), чувствительных в диапазоне 950—1600 нм. Эксперименты проводились в камере сверхвысоковакуумной установки Riberg при вакууме $4 \cdot 10^{-10}$ Торр, образцы представляли собой фотокатодные гетероструктуры InP (подложка)—InGaAs(поглощающий слой)—InP (эмиттер), изготовленные ФГУП НИИ "Полус", и монокристаллы *p*-InP(111), легированные цинком до $6 \cdot 10^{16}$ см⁻³. Для создания омического контакта использовался сплав In+2 %Zn. Монокристаллические образцы применялись для отработки методик измерения, режимов термической очистки и режимов нанесения серебряных пленок.

Перед постановкой в камеру образцы химически травились. После термической очистки структуры на поверхность эмиттерного слоя InP были нанесены пленки серебра в виде кружков диаметром 4 мм. Толщина серебряных пленок в наших экспериментах составила

60—100 Å. Площадь образцов позволяла формировать на них несколько Шоттки-барьеров (Ш-б). Для электрических измерений использовался подвижный контакт, прижимаемый к поверхности серебряной пленки.

Исследование типичных вольт-амперных характеристик (ВАХ), сформированных нами Ш-б, показало, что качество диода хорошее, коэффициент усиления составляет 10^3 . Это в свою очередь подтверждает, что уровень легирования эмиттерного слоя, процедуры химической обработки и термической очистки поверхности близки к требуемым.

Исследование вольт-фарадных характеристик (ВФХ) Ш-б показало, что высота барьеров составляет 0,75—1,15 эВ, что согласуется с литературными данными для p -InP—Ag. Обработка поверхности серебряной пленки поочередно цезием и кислородом производилась при освещении белым светом от источника "А" до максимума фототока в режиме "на отражение".

На рис. 1 показана зависимость фототока от напряжения смещения для одного из образцов при освещении белым светом. Эксперименты проводились при комнатной температуре без охлаждения фотокатодных структур. Темновые токи при указанных напряжениях смещения составили более 10^{-11} А.

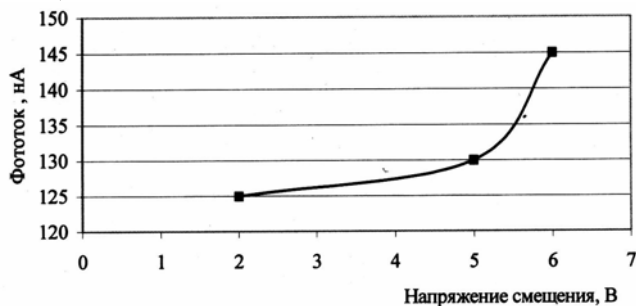


Рис. 1. Зависимость фототока от напряжения смещения (образец 4—4)

Спектральная зависимость квантового выхода другого образца при напряжении смещения 3 В приведена на рис. 2.

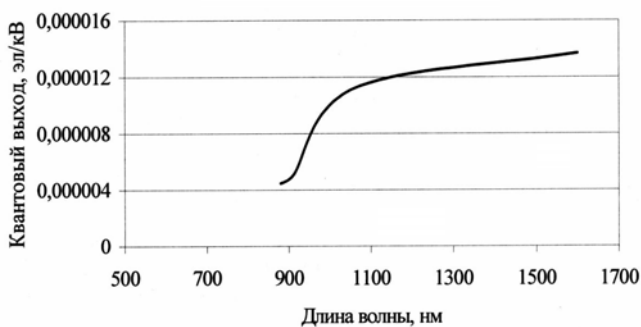


Рис. 2. Спектральная характеристика (образец 4—5)

Приложение поля продвигает спектральную чувствительность фотокатода до 1,6 мкм.

Полученное абсолютное значение квантового выхода МПЭ-ФК невелико и составляет доли процента. В продолжение работы усилия будут направлены на оптимизацию гетероструктур по их составу, на улучшение качества предварительной подготовки структур перед их постановкой в камеру и на контроль толщины серебряных пленок во время их осаждения. Параллельно с отработкой технологических приемов изготовления МПЭ-ФК проводятся работы по конструированию приборов с такими фотокатодами, а также оборудования для их изготовления.

При современном состоянии уровня технологии структур InP—InGaAsP темновой ток МПЭ-ФК на семь порядков выше, чем темновой ток GaAs-фотокатодов. Даже при охлаждении МПЭ-ФК до -30 °С темновой ток в 1000 раз выше, чем требуется для пассивного прибора ночного видения. Необходимое охлаждение фотокатода может быть получено при использовании термоэлектрического холодильника. Существенно уменьшить темновой ток можно только за счет улучшения качества и контроля легирования структур InGaAs. Применение МПЭ-ФК в фотоприемниках изображения целесообразно при их работе в импульсном режиме, используя подсветку объектов изображения лазером. В качестве анода для приборов с МПЭ-ФК наилучшим представляется использование электронно-возбуждаемой утоньшенной ПЗС-матрицы, так как при этом шум-фактор уменьшается по крайней мере втрое по сравнению с ЭОПом. Именно такие приемники при работе с лазерной подсветкой способны обнаруживать и идентифицировать цели на расстоянии до 20 км.

Литература

1. Дворкина М., Лапушкина Л. В., Суриков И. Н. и др. Интерференционные фильтры для ультрафиолетовой области спектра: Тез. докл. XII науч.-техн. конф. "Пути развития телевизионных фотоэлектронных приборов и устройств на их основе". — С.-Петербург. 2001. С. 195—196.
2. Siegmund O. H. W. Advances in Microchannel Plate Detectors For UV/Visible Astronomy// SPIE. 2003. V. 4854. P. 181—190.
3. www.stsci.edu/stsci/meetings/nhst/talks/OswaldSiegmund.pdf (April 11, 2003).
4. Коцавцев Н. Ф., Коцавцев А. Н., Федорова С. Ф. Анализ перспектив развития приборов ночного видения// Прикладная физика. 1999. № 3. С. 66.
5. Eitenbery M. H., Cohen M. J., Olsen G. H., Kennedy J. J. InGaAs Focal Plane Arrays and Cameras for man-Portable Near Infrared Imaging// SPIE. 1999. V. 3701. P. 225.
6. Aebi V., Vallianos P. Laser-illuminated viewing provides long-range detail Laser// Focus World, Sept. 2000. P. 147.

Статья поступила в редакцию 23 ноября 2004 г.

New photocathodes of UV and IR ranges for perspective photodetective devices

M. R. Ainbund, I. S. Vasil'ev, E. G. Vilkin, L. G. Zabelina, E. E. Levina,
A. V. Pashuk, A. S. Petrov, T. A. Rusanova, P. M. Stepanov, I. N. Surikov
The Electron Central Research Institute, Inc., St.-Petersburg, Russia

Surveyed are the opportunities of sensitization of photocathodes in the UV and IR ranges for expansion of functional capabilities of devices on their basis.