

# Фотоэлектроника

УДК.621.383/4

## Достижения твёрдотельной фотоэлектроники (обзор)

А. М. Филачёв, И. И. Таубкин, М. А. Тришенков

*Параметры традиционных полупроводниковых фотоприёмников приблизились к своим теоретическим пределам. Лавинные фотодиоды позволяют проводить счёт единичных фотонов не только в режиме Гейгера, но и в линейном режиме, обладающем рядом важных преимуществ. Разработаны фотодиоды даже с «нешумящей» лавиной, что ранее считалось невозможным. Предложены новые фоточувствительные структуры, в том числе структуры с электронным переносом и структуры с энергетическим барьером для основных носителей. Выдающиеся успехи достигнуты в разработке матричных фотоприёмных устройств. Освоены все актуальные спектральные диапазоны — от ультрафиолетового до дальнего инфракрасного. В диапазоне 8—10 мкм получено рекордное значение эквивалентной шуму разности температур 1—2 мК.*

PACS: 85.60.-q

*Ключевые слова:* фотоэлектроника, фотодиод, лавинный фотодиод, матрица, эквивалентная шуму разность температур.

### Введение

Твёрдотельная фотоэлектроника — стремительно развивающаяся отрасль современных физики и техники. В последние десятилетия непрерывно возникают новые тенденции её развития и идеи создания принципиально новых или более совершенных фотоэлектронных приборов.

В настоящее время разработки новых фотоприёмников и фотоприёмных устройств проводятся, как правило, с целью создания фокальных матриц для формирователей сигналов изображения с новыми свойствами либо для обеспечения высокоскоростных оптических линий связи. При этом к традиционным основным направлениям развития полупроводниковой фотоэлектроники (а это — разработка новых методов приёма и регистрации излучений, расширение номенклатуры используе-

мых полупроводниковых материалов и создание микроэлектронных фотоприёмных устройств) добавилось новое направление, использующее возможности современных нанотехнологий. Это — разработка квантово-размерных фоточувствительных гетероструктур и эпитаксиальных методов их получения. В квантово-размерных фотоприёмниках используются и принципиально новый физический метод приёма излучения и принципиально новый класс материалов.

Далее в обзоре более подробно рассмотрены основные достижения твёрдотельной фотоэлектроники с использованием материалов [1—26].

### Фотодиоды

Значительные успехи были достигнуты в последние годы и в рамках традиционных направлений развития полупроводниковой фотоэлектроники.

Наиболее распространёнными твёрдотельными фотоэлектронными изделиями, предназначенными для преобразования оптических сигналов в электрические, стали **полупроводниковые фотодиоды**. По механизму действия и параметрам они приближаются к идеальным преобразователям фотонов в электроны и обладают значительными преимуществами перед другими типами фотоприёмников. Это близкий к единице квантовый выход, огромный (до 8—9 порядков) динамический диапазон, малая инерционность, неограниченная временем жизни носителей заряда в полупровод-

**Филачёв Анатолий Михайлович**, генеральный директор.

АО «НПО «Орион».

Россия, 111538, Москва, ул. Косинская, 9.

Тел. 8 (499) 374-84-00. E-mail: orion@orion-ig.ru

**Таубкин Игорь Исаакович**, профессор.

Московский физико-технический институт (МФТИ).

Россия, 141700, г. Долгопрудный МО, Институтский пер., 9.

**Тришенков Михаил Алексеевич**, профессор.

Московский институт радиотехники, электроники

и автоматики (МИРЭА).

Россия, 119454, Москва, просп. Вернадского, 78.

Статья поступила в редакцию 17 февраля 2015 г.

© Филачёв А. М., Таубкин И. И., Тришенков М. А., 2015

никах, возможность использования лавинного умножения фототока и, наконец, возможность изготовления матричных структур и стыковки их (механической, электрической и теплофизической) с кремниевыми интегральными мультиплексорами. Фотодиоды практически вытеснили другие типы полупроводниковых фотоприёмников в фото- и киноаппаратуре, в оптико-электронных системах для приёма лазерного излучения, в оптических линиях связи, в монолитных и гибридных матричных формирователях сигналов видимого и инфракрасного изображений и во многих других применениях.

Вместе с тем бурное развитие фотодиодов продолжается. Разработаны новые типы фотодиодов (например, гетерофотодиоды с электронным переносом и повышенным динамическим диапазоном для аналоговых волоконно-оптических линий связи). Разработаны и освоены в производстве фотоприёмники, не содержащие  $p-n$ -переходов, но по механизму действия сходные с фотодиодами (фотоприёмники со структурой «металл — диэлектрик — полупроводник», включая линейные и матричные фотоприёмники с зарядовой связью, фотоприёмники с энергетическим барьером для основных носителей — так называемые « $nBn$ -структуры», квантово-каскадные фотоприёмники и инфракрасные фотоприёмники с блокированной примесной зоной).

В последние годы резко активизировались работы по *лавинным фотодиодам*. Разработаны высокочастотные малощумящие лавинные фотодиоды безопасного для зрения спектрального диапазона 1,3—1,55 мкм на основе гетеропереходов индий-галлий-мышьяк/фосфид индия  $\text{InGaAs|InP}$  и  $\text{AlInAs|InGaAs|InP}$ , в которых область поглощения излучения из сравнительно узкозонного  $\text{InGaAs}$  зарядово связана с малощумящими областями лавинного умножения дырок в  $\text{InP}$  или электронов в тройном соединении алюминий-индий-мышьяк  $\text{AlInAs}$ .

Налажен выпуск мозаичных кремниевых лавинных фотодиодов, работающих в режиме Гейгера, — их часто называют твердотельными аналогами вакуумных фотоэлектронных умножителей.

Обнаружено, что в сильных электрических полях шумы лавинных фотодиодов зависят от протяжённости «мёртвых» зон для носителей заряда, что привело к качественным сдвигам в понимании физики лавинного умножения. В результате изготовлены практически «нешумящие» фотодиоды, лавинное умножение фотоносителей в которых не сопровождается возникновением избыточных шумов. Приборы изготавливаются из кадмий-ртуть-теллура  $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$  и сверхрешёток  $\text{InAs|GaSb}$  с субмикронной областью ударной

ионизации (в таких фотодиодах при рабочих смещениях самопроизвольно формируется каскадная структура, когда узкие области лавинного умножения разделяются «мёртвыми» зонами), а также «нешумящие» лавинные фотодиоды на основе эпитаксиально выращенных многокаскадных гетероструктур. А ведь ещё десять-пятнадцать лет назад создание «нешумящих» лавинных фотодиодов казалось нереальным!

С помощью лавинных фотодиодов осуществлён счёт единичных фотонов не только в режиме Гейгера (как это было ранее), но и в обладающем значительными преимуществами линейном режиме.

Использование же электронно-умножающих выходных регистров существенно улучшило пороговые характеристики фоточувствительных приборов с зарядовой связью.

Серийно выпускается и большая номенклатура традиционных *полупроводниковых фоторезисторов*, как правило, для комплектации оптико-электронных систем автоматики и военной аппаратуры.

Специального рассмотрения заслуживают солнечные элементы.

### Солнечные элементы

Потребность мирового сообщества в альтернативных и экологически чистых источниках энергии постоянно растёт. Однако, по мнению экологов, земная цивилизация перестанет губить себя, только когда научится существовать за счёт прямого преобразования солнечной энергии. Подсчитано, что запасы водорода для поддержания термоядерной реакции на Солнце не будут исчерпаны в течение  $10^{10}$  лет.

Сегодня человечество живет за счёт невозобновляемых источников энергии, основной такой источник — нефть. Теоретически можно «заменить» нефть солнечным излучением, если использовать всего 1/30000 часть от его мощности, падающей на Землю. Для этого надо круглосуточно собирать энергию с площади, равной площади мегаполиса (около  $65 \times 65$  кв. км), и преобразовывать её в электрическую энергию с коэффициентом полезного действия (КПД) не меньшим, чем у тепловых электростанций.

Для изготовления *солнечных элементов* часто используется кремний (ширина запрещённой зоны  $E_g = 1,07$  эВ) как основной и относительно недорогой материал электроники с отработанной за полвека технологией. Используются также фосфид индия ( $E_g = 1,26$  эВ) и арсенид галлия (1,43 эВ) — материалы с более подходящей шириной запрещённой зоны (оптимальное для солнечных элементов на основе гомопереходов значение

$E_g = 1,35$  эВ). Сообщается об изготовлении солнечных элементов из материалов с ещё большей запрещенной зоной: теллурида кадмия (1,5 эВ), антимонида алюминия (1,6 эВ). В серийных преобразователях из этих материалов обеспечивается КПД 10—15 %.

Большие площади солнечных батарей заставляют разработчиков применять для их изготовления также поликристаллические, аморфные и органические плёнки.

Выявлены два магистральных направления дальнейшего повышения КПД солнечных элементов. Первое из них — использование оптических концентраторов для повышения интенсивности излучения. При увеличении интенсивности излучения форма вольтамперной характеристики у облучённых солнечных элементов приближается к прямоугольной. И, как следствие этого, растёт их КПД. КПД солнечных элементов из кремния и арсенида галлия при облучённости, в тысячу раз превышающей солнечную облучённость, достигает 20—25 %.

И второе направление — солнечное излучение разбивают на несколько относительно узких спектральных диапазонов — ведь предельное значение КПД может быть получено только при монохроматическом излучении! А излучение каждого спектрального диапазона (квазимонохроматическое) должно преобразовываться с помощью элемента с шириной запрещенной зоны, соответствующей энергии фотонов в этом диапазоне,  $E_g \approx h\nu$ . Для спектрального разложения солнечного излучения используются либо оптические цветоделители, либо полупроводниковые гетеропереходы.

Замечательные результаты получают при использовании одновременно и концентрации излучения, и спектрального разложения. При 1000-кратной концентрации и делении излучения всего на два спектральных диапазона можно получить КПД  $\geq 50$  %, а на три — даже 60—70 %. А это уже весьма и весьма впечатляющие значения: ведь для тепловых электростанций значения КПД  $\sim 40$  %.

Производство и применения солнечных элементов с каждым годом увеличиваются. Разработки солнечных элементов и термопреобразователей представляют собой самостоятельное научно-техническое направление силовой твердотельной фотоэлектроники и поэтому здесь далее не обсуждаются.

### Фотоприёмные устройства

Бурное развитие микроэлектроники (разработка микросхемных гибридных и кремниевых интегральных усилителей, включая малошумящие, глубокоохлаждаемые и операционные, мультип-

лексоров, а затем и сверхбольших интегральных схем) обеспечило возможность конструктивного объединения фотоприёмника (вернее, его фоточувствительных элементов) с малошумящими предварительными усилителями. Предварительные усилители обычно используются и для выделения фотосигналов из их смеси с шумами — для формирования частотной характеристики, близкой к оптимальной. Такие изделия стали называть **фотоприёмными устройствами** (ФПУ).

Чувствительный элемент фотоприёмного устройства может быть любого типа (фоторезистор, фотодиод, болометр...) и может быть изготовлен из любого материала, применяемого в фотоэлектронике.

Объединение фоточувствительного элемента и микроэлектронного тракта в едином корпусе привело к уменьшению габаритов, к снижению паразитных ёмкостей и к улучшенной экранировке от внешних наводок, то есть к улучшению пороговых и эксплуатационных характеристик оптоэлектронной аппаратуры. Кроме того, такое объединение позволило обеспечить транспортабельность выходного сигнала от фотоприёмных устройств и существенно упростить следующие за ними электронные тракты.

Функциональные возможности фотоприёмных устройств удалось кардинально расширить при включении в их состав дополнительных микроэлектронных компонентов. Вторичные источники питания (в том числе поддерживающие рабочее напряжение на фотоприёмнике при изменении внешних условий), пороговые устройства, счётчики импульсов, аналогово-цифровые преобразователи — все это далеко не полный перечень микроэлектронных компонентов современного фотоприёмного устройства. В состав фотоприёмных устройств при необходимости включаются и термоэлектрические охладители или микрокриогенные охлаждающие устройства.

### Матрицы

Разработка матричных фотоприёмных устройств для «смотрящих» оптоэлектронных систем ознаменовала очередной качественный скачок в развитии твердотельной фотоэлектроники. Крупноформатные (с числом пикселей  $10^3 \times 10^3$  и более) матрицы фактически являются техническими аналогами сетчатки в органах зрения и обеспечивают не только существенное расширение спектрального диапазона зрения, но и реализацию оптоэлектронных систем с предельно достижимыми значениями пороговой чувствительности, инерционности и информационной ёмкости.

Высокочувствительные матричные фотоприёмные устройства в принципе не могут быть выполнены без таких микроэлектронных компонентов, как накопители заряда в каждом пикселе, устройств выборки и хранения и мультиплексоров. Такие матричные фотоприёмные устройства, обеспечивающие последовательное считывание фотосигналов, накопленных в фоточувствительных каналах за время кадра, и позволяющие строить оптико-электронные системы без механического сканирования, называют уже **формирователями сигналов изображения**.

Фоточувствительные матрицы, как правило, поставляются потребителям в составе монолитных или гибридных формирователей сигналов изображения. Обычно в состав формирователей сигналов изображения включают также сдвиговые регистры, тактовые генераторы, аналогово-цифровые преобразователи, блоки для прецизионной корректировки неоднородности пикселей, блоки для замены фотосигналов от неработающих элементов, блоки для вычитания фоновой составляющей сигнала. В их состав могут войти и электронные устройства, обеспечивающие высокочастотное считывание фрагментов изображения, а также устройства для интеграции двух или более цветов (если фоточувствительные элементы обладают чувствительностью в двух или более спектральных диапазонах), устройства для кодировки изображений в условные цвета и др.

Создание крупноформатных матричных формирователей сигналов изображения, особенно гибридных и охлаждаемых, потребовало решения комплекса научных и технологических проблем, связанных со структурой и технологией фоточувствительной матрицы, особенностями схемотехники микроэлектронных узлов, необходимостью попиксельной стыковки фоточувствительной матрицы с микроэлектронным мультиплексором, конструктивным исполнением фотоприёмного устройства в целом и его оптического и микрокриогенного блоков.

Только один пример. Электрическая ёмкость традиционных накопительных МДП- и ПЗС-ячеек в современных матричных фотоприёмных устройствах на основе квантовых фотоприёмников ограничена. В ячейках кремниевых КМОП-схем считывания с шагом 20 мкм обычно удаётся накопить порядка  $10^7$  носителей, что достаточно для накопления фонового заряда в приборах ночного видения и тепловизорах, чувствительных в спектральном диапазоне до 4—5 мкм и работающих при кадровых частотах более 60—120 Гц. Однако из-за переполнения ёмкости в системах дневного видения и в тепловизорах на диапазон 8—14 мкм время накопления приходится поддерживать мень-

шим, чем время кадра. Это приводит к потерям в чувствительности и эквивалентной шуму разности температур соответственно.

В этой связи отметим недавнее замечательное достижение специалистов по микроэлектронике, сумевших разместить в каждом пикселе схемы считывания (шаг 25 мкм, формат 320×256) аналогово-цифровые преобразователи и, таким образом, обеспечить увеличение эквивалентной ёмкости накопления на два порядка и более — до  $3 \times 10^9$  электронов. Фотодиодные **матрицы из кадмий-ртуть-теллура**, чувствительные в спектральном диапазоне 8—10 мкм и укомплектованные этими схемами считывания, имели рекордные значения эквивалентной шуму разности температур 1—2 мК. Полученная разность температур на порядок лучше ранее опубликованных значений и при реальных апертурных и спектральных ограничениях фона близка к принципиальному пределу, обусловленному шумами фонового излучения.

Выдающимся достижением полупроводниковой науки и техники, базирующимся на использовании гетеропереходов и эпитаксиальных нанотехнологий, явилось создание инфракрасных охлаждаемых **фотоприёмников, в том числе матричных, на основе квантово-размерных структур**. Такие фотоприёмники изготавливаются из освоенных промышленностью широкозонных полупроводников, однако обладают чувствительностью в среднем или длинноволновом инфракрасном диапазоне спектра и пригодны для создания матриц с форматами более 1К×1К (или  $10^3 \times 10^3$  пикселей), в том числе двухдиапазонных матриц.

В настоящее время наиболее отработанными квантово-размерными фотоприёмниками являются фоторезисторы на основе структур с множественными композиционными квантовыми ямами из полупроводников, образующих гетеропереходы типа I, фоторезисторы на основе квантовых точек (в том числе размещённых в квантовых ямах), а также уже упомянутые ранее фотодиоды и «*nVn*-структуры» на основе композиционных короткопериодных сверхрешёток из полупроводников, образующих гетеропереходы типа II. Перечисленные квантово-размерные фотоприёмники, в том числе в матричном исполнении, уже выпускаются серийно. Опубликованы прогнозы, согласно которым через 10—15 лет фокальные матрицы фоторезисторов с квантовыми точками, размещёнными в квантовых ямах, и предельной чувствительностью в спектральном диапазоне 8—12 мкм будут доступны в форматах до 4К×4К.

Выдающимся достижением инфракрасной твердотельной фотоэлектроники явилось также создание неохлаждаемых и относительно дешёвых

**микроболометрических матриц**, интегрированных с кремниевыми мультиплексорами. Такие матрицы изготавливаются с форматами вплоть до телевизионных и выше и с эквивалентной шуму разностью температур менее 30—50 мК. С появлением микроболометрических матриц началось крупносерийное производство тепловизионной техники.

Количество всех выпущенных к началу 2015 года неохлаждаемых матричных формирователей сигналов изображения из кремния уже исчисляется миллиардами штук. Налажен также промышленный выпуск матричных формирователей для ультрафиолетового, видимого, ближнего, среднего и дальнего инфракрасных диапазонов с форматами порядка  $10^3 \times 10^3$  пикселей и более, в том числе одно- и двухдиапазонных (а в видимом диапазоне и трёхцветных). Для систем дневного, ночного и теплового видения выпускаются неохлаждаемые матрицы на основе кремния, арсенида галлия-индия и микроболометров, охлаждаемые гибридные инфракрасные матрицы из кадмий-ртуть-теллура, антимионид индия, примесного кремния и других полупроводников и квантово-размерных структур.

Уже изготовлены **фокальные матрицы лавинных фотодиодов** на гетеропереходах индий-галлий-мышьяк/фосфид индия и формирователи сигналов изображения на их основе для активных (лазерных, в том числе и моноимпульсных) систем распознавания удалённых целей и формирования трёхмерных изображений. На основе полупроводниковых гетеропереходов из кадмий-ртуть-теллура изготовлены также фокальные матрицы лавинных фотодиодов с переключаемым рабочим напряжением, работающие или в режиме приёма импульсного лазерного излучения на длинах волн 1,3 и 1,55 мкм, или в нелавинном режиме формирования тепловизионного изображения в спектральном диапазоне 3—5 мкм.

Активно ведутся разработки матричных лавинных фотодиодов, чувствительных в ультрафиолетовой области спектра.

Разработка и промышленное освоение мозаичных и матричных лавинных фотодиодов (фактически представляющих собой твердотельные аналоги вакуумных фотоэлектронных умножителей и электронно-оптических преобразователей) является одним из завершающих этапов глобального процесса перехода от вакуумной электроники к полупроводниковой, начавшегося в середине прошлого века с вытеснения вакуумных электронных ламп и фотоэлементов полупроводниковыми диодами, транзисторами и фотоприёмниками.

Таким образом, беспрецедентное расширение областей применения твердотельной фотоэлектро-

ники (темпы роста фотоэлектронной продукции в США в конце 20-го века в 3—5 раз превышали средние показатели по промышленности) обусловлено и значительными научными и техническими достижениями самой фотоэлектроники (созданием принципиально новых фотоэлектронных изделий с уникальными свойствами), и гибкостью фотоэлектронных методов и изделий — возможностью их оптимизации для решения самых разнообразных задач. Так, практически неограниченными возможностями применения обладают технические системы искусственного зрения, которые по спектральному диапазону и малоинерционности уже превзошли зрение человека.

### Заключение

В обзоре рассмотрены основные научные и технические достижения, определяющие мировой уровень развития твердотельной фотоэлектроники. И стремительное развитие фотоэлектроники продолжается.

*Работа выполнена по гранту Президента Российской Федерации НШ-2787.2014.9*

*Авторы выражают благодарность доктору физико-математических наук профессору В. П. Пономаренко за полезные обсуждения.*

### ЛИТЕРАТУРА

1. Rein M. B., Lamarre P., Hairston A. // Compound Semiconductors. 2006. No. 6. P. 27.
2. Turner D. G. et al. The development of and applications for extended response (from 0,7 to 1,7 micron) InGaAs FPA's // Proc. SPIE. 2008. V. 6940. P. 694037.
3. <http://www.raytheon.com>.
4. Mizraki U. et al. New features and development directions in SCD's microbolometer technology // Proc. SPIE. 2008. V. 6940. P. 694020.
5. Black S. RVS uncooled sensor development for tactical applications // Proc. SPIE. 2008. V. 6940. P. 694022.
6. Little J. W. et al. Thin active region type-II superlattice photodiode arrays // J. Applied Physics Letters. 2007. V. 101. No. 14. P. 044514.
7. Delauney P. Y. et al. Substrate removal for high quantum efficiency back side // J. Applied Physics Letters. 2007. V. 91. No. 23. P. 231106.
8. Choi K. K. et al. Optimization of corrugated QWIPs for large format, high quantum efficiency and multi-color FPAs // Infrared Physics and Technology. 2007. V. 50. No. (2-3). P. 124.
9. Becker L. A review of advances in EO/IR FPA technology for Space System Applications // Proc. SPIE. 2006. V. 6294. P. 6294OR.
10. Chioni V., Gulininatti A., Rech I., et al. Progress in Silicon Single-Photon Avalanche Diodes // IEEE J. of Selected Topics in Quantum Electronics. 2007. V. 13. No. 4. P. 852.

11. Stewart A. G. et al. Performance of 1mm<sup>2</sup> Photomultiplier // IEEE J. of Quantum Electronics. 2008. V. 44. No. 2. P.157.
12. Tosi A., Mora A. D., Zappa F., et al. InGaAs/InP single photon avalanche diodes show low dark counts and require moderate cooling // Proc. SPIE. 2009. V. 7222. P. 722221.
13. Tosi A., Cove S., et al. Ge and InGaAs/InP SPADs for single photon detection in the near infrared // Proc. SPIE. 2008. V. 6771. P. 6771OP.
14. Bai Y., Bajaj J., Belitic J. W., et al. Teledyne Imaging Sensors: CMOS imaging technologies for x — ray, UV, visible and near infrared // Proc. SPIE. 2008. V. 7021. P. 702101.
15. Niclass C. et al. A single Photon Avalanche Photodiode implemented in 130-nm CMOS-Technology // IEEE J. of Selected Topics in Quantum Electronics. 2007. V. 13. No. 4. P. 863.
16. Robbins M. S., Hadwen B. J. The Noise Performance of Electron Multiplying Charge Coupled Devices // IEEE Trans. 2002. V. T-ED. P. 1488R.
17. Aina L., Fathimulla A., Hier H. et al. Non- Geiger-mode single-photon counting APDs with high detection probability and afterpulse-free performance // Proc. SPIE. 2007. V. 6771. P. 6771OR.
18. Verghese S., Donnelly J. P., Duerr E. K., et al. Arrays of InP-based Avalanche Photodiodes for Photon Counting // IEEE J. of Selected Topics in Quantum Electronics. 2007. V. 13. No. 4. P. 870.
19. Derelle S., Bernhard S., Haidar R., et al. Experimental performance and Monte Carlo modeling of LWIR CdHgTe avalanche photodiodes // Proc. SPIE. 2009. V. 7356. P. 735627.
20. Asbrock J., Bailey S., Baley D., et al. Ultra-High Sensitivity APD based 3D LADAR Sensors: linear mode photon counting LADAR camera for the Ultra-Sensitivity Detector Program // Proc. SPIE. 2008. V. 6940. P. 69402.
21. Price J. P. G., Jones C. L., Hipwood L. G. Dual-Band MW/LW IRFPAs made from HgCdTe grown by MOVPE // Proc. SPIE. 2008. V. 7113. P. 7113OG.
22. Huntington A. S., Compton M. A., Williams G. Linear-mode single-photon APD detectors // Proc. SPIE. 2007. V. 6771. P. 6771OQ.
23. Chem J., Sun J. Ultrahigh speed uni-travelling-carrier photodiodes based on materials of short carrier lifetime. // Proc. SPIE. 2009. V. 7279. P. 7279IR.
24. Klipstein P. XBN barrier photodetectors for high sensitivity and high operating temperature IR sensors. // Proc. SPIE. 2008. V. 6940. P. 69402U.
25. Aqua J. N., Berbezler I., Favre L. // Physics Report. 2013. V. 522.
26. Lozovoy K. A., Voitsekhovskiy A. V., Kokhanenko A. P. // Opto-Electronics Review. 2014. V. 22. No. 3.

## A review on advances in the solid-state photoelectronics

*A. M. Filachov<sup>1</sup>, I. I. Taubkin<sup>2</sup>, and M. A. Trishenkov<sup>3</sup>*

<sup>1</sup>Orion R&P Association, Inc.  
9 Kosinskaya str., Moscow, 111538, Russia  
E-mail: orion@orion-ir.ru

<sup>2</sup>Moscow Physicotechnical Institute (State University)  
9 Institute al., Dolgoprudny, Moscow Region, 141700, Russia

<sup>3</sup>Moscow Institute of Radio Electronics and Automatics (MIREA)  
78 Vernadsky av., Moscow, 119454, Russia

*Received February 17, 2015*

***The parameters of traditional photoreceivers have practically reached their supposed limits. The avalanche photodiodes make it possible to count single photons not only in Geiger-, but also in line regimes, which have a couple of important advantages. Some devices even with non-noisy avalanche have been derived, that previously was considered impossible. New structures with electronic transfer are proposed, with energy barrier for the main mediums. Extraordinary success has been achieved in the area of matrix photoreceivers. All the actual spectral diapasons are mastered, starting with the ultraviolet and till the distant infrared. A record number of the difference of temperatures 1—2 mK equivalent to the noise has been received in the diapason of 8—10 mkm.***

PACS: 85.60.-q

**Keywords:** photoelectronics, photodiode, avalanche photodiode, matrix, noise equivalent temperature difference.

### REFERENCES

1. M. B. Rein, P. Lamarre, and A. Hairston, Compound Semiconductors, No. 6, 27 (2006).
2. D. G. Turner, et al., *The development of and applications for extended response (from 0,7 to 1,7 micron) InGaAs FPA's*. Proc. SPIE **6940**, 694037 (2008).
3. <http://www.raytheon.com>.

4. U. Mizraki, et al., *New features and development directions in SCD's microbolometer technology*. Proc. SPIE **6940**, 694020 (2008).
5. S. Black, *RVS uncooled sensor development for tactical applications*, Proc. SPIE **6940**, 694022 (2008).
6. J. W. Little, et al., *Thin active region type-II superlattice photodiode arrays*. J. Applied Physics Letters **101** (14), 044514 (2007).
7. P. Y. Delauney, et al., *Substrate removal for high quantum efficiency back side*. J. Applied Physics Letters **91** (23), 231106 (2007).
8. K. K. Choi, et al., *Optimization of corrugated QWIPs for large format, high quantum efficiency and multi-color FPAs*. Infrared Physics and Technology **50** (2-3), 124 (2007).
9. L. Becker, *A review of advances in EO/IR FPA technology for Space System Applications*. Proc. SPIE **6294**, 6294OR (2006).
10. V. Chioni, A. Gulininatti, I. Rech, et al., *Progress in Silicon Single-Photon Avalanche Diodes*. IEEE J. of Selected Topics in Quantum Electronics **13** (4), 852 (2007).
11. A. G. Stewart, et al., *Performance of 1mm<sup>2</sup> Photomultiplier*. IEEE J. of Quantum Electronics **44** (2), 157 (2008).
12. A. Tosi, A. D. Mora, F. Zappa, et al., *InGaAs/InP single photon avalanche diodes show low dark counts and require moderate cooling*. Proc. SPIE **7222**, 722221 (2009).
13. A. Tosi, S. Cove et al., *Ge and InGaAs/InP SPADs for single photon detection in the near infrared*. Proc. SPIE **6771**, 6771OP (2008).
14. Y. Bai, J. Bajaj, J. W. Belitic, et al., *Teledyne Imaging Sensors: CMOS imaging technologies for x — ray, UV, visible and near infrared*. Proc. SPIE **7021**, 702101 (2008).
15. C. Niclass, et al., *A single Photon Avalanche Photodiode implemented in 130-nm CMOS-Technology*. IEEE J. of Selected Topics in Quantum Electronics **13** (4), 863 (2007).
16. M. S. Robbins and B. J. Hadwen, *The Noise Performance of Electron Multiplying Charge Coupled Devices*. IEEE Trans. **T-ED**, 1488R (2002).
17. L. Aina, A. Fathimulla, H. Hier, et al., *Non-Geiger-mode single-photon counting APDs with high detection probability and afterpulse-free performance*. Proc. SPIE **6771**, 6771OR (2007).
18. S. Verghese, J. P. Donnelly, E. K. Duerr, et al., *Arrays of InP-based Avalanche Photodiodes for Photon Counting*. IEEE J. of Selected Topics in Quantum Electronics **13** (4), 870 (2007).
19. S. Derelle, S. Bernhard, R. Haidar, et al., *Experimental performance and Monte Carlo modeling of LWIR CdHgTe avalanche photodiodes*. Proc. SPIE **7356**, 735627 (2009).
20. J. Asbrock, S. Bailey, D. Baley, et al., *Ultra-High Sensitivity APD based 3D LADAR Sensors: linear mode photon counting LADAR camera for the Ultra-Sensitivity Detector Program*. Proc. SPIE **6940**, 69402 (2008).
21. J. P. G. Price, C. L. Jones, and L. G. Hipwood, *Dual-Band MW/LW IRFPAs made from HgCdTe grown by MOVPE*. Proc. SPIE **7113**, 7113OG (2008).
22. A. S. Huntington, M. A. Compton, and G. Williams, *Linear-mode single-photon APD detectors*. Proc. SPIE **6771**, 6771OQ (2007).
23. J. Chem and J. Sun, *Ultra-high speed uni-travelling-carrier photodiodes based on materials of short carrier lifetime*. Proc. SPIE **7279**, 7279IR (2009).
24. P. Klipstein *XBN barrier photodetectors for high sensitivity and high operating temperature IR sensors*. Proc. SPIE **6940**, 69402U (2008).
25. J. N. Aqua, I. Berbezler, and L. Favre, *Physics Report* **522**, (2013).
26. K. A. Lozovoy, A. V. Voitsekhovskiy, and A. P. Kokhanenko. *Opto-Electronics Review* **22**, No. 3 (2014).