

# Твердотельные детекторы оптических сигналов и радиации

## Часть 1.1. Обзор конструкций и характеристик детекторов

В первой части обзора рассматривается история разработок твердотельных детекторов и особенности их конструкций. Основное внимание уделяется лавинным фотодиодам и кремниевым фотоумножителям, которые являются наиболее чувствительными и потому наиболее востребованными твердотельными детекторами малофотонных оптических сигналов и радиации.

### С.Л.Виноградов

Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН,  
г. Москва  
НПП «Доза», г. Зеленоград

В современном мире твердотельные детекторы оптических сигналов окружают нас практически во всех сферах научно-технической деятельности, на производстве и в быту. Сложно перечислить даже наиболее важные области их применений: системы волоконно-оптической связи современного интернета и компьютерных кластеров на основе гигагерцовых фотодиодов, системы автономной навигации с лазерными дальномерами (лидарами) на основе лавинных фотодиодов и матриц, системы микроскопии, мультиспектральной астрономии, аэрофотосъемки и космической картографии на основе матричных фотоприемников большой площади с высоким пространственным разрешением, а также разнообразные электронные устройства для повседневной жизни от датчиков задымления и ИК-пультов до смартфонов с несколькими матричными фотосенсорами и однофотонными лидарными детекторами автофокуса.

#### Ключевые слова:

*фотоэффект, фотодиод, лавинный фотодиод (ЛФД), гейгеровский ЛФД, однофотонный ЛФД, кремниевый фотоумножитель.*

Однако кроме непосредственного детектирования сигналов оптического диапазона от ультрафиолетовой до дальней ИК области, твердотельные детекторы широко применяются для регистрации радиационных потоков и частиц высоких энергий в диапазоне от 10 эВ мягкого рентгена до  $10^{20}$  эВ (Экзо-эВ) космических частиц. При этом фотодетектор обычно работает в паре со сцинтиллятором, в котором частица вызывает вспышку света с числом фотонов пропорциональным ее энергии. Таким образом решаются основные задачи радиационных измерений: радиометрии (измерение активности, т. е. интенсивности потока радиации) и калориметрии (измерение энергии частиц), а также проводятся времяпролетные измерения. Кроме того, для идентификации заряженных частиц высокочувствительные матричные фотодетекторы используются в паре с радиатором, в материале которого возникает Черенковское излучение.

В первой части обзора рассматривается история разработок твердотельных детекторов с акцентом на лавинные фотодиоды и кремниевые фотоумножители – наиболее чувствительные и потому наиболее востребованные детекторы малофотонных оптических сигналов и радиации.

Во второй части обзора планируется рассмотреть основные параметры фотодетекторов, обобщенные критерии качества и эффективности детектирования (отношение сигнал/шум), а также конкурентность разных типов детекторов на основе этих критериев.

В третьей части обзора планируется обсудить современное состояние дел по твердотельным детекторам, проблемы, возникающие при разработке, а также решения, тенденции и перспективы развития, примеры сопоставления конкретных детекторов по критериям качества.

В четвертой части обзора планируется рассмотреть ряд практических примеров примене-

ния фотодетекторов, в первую очередь, кремниевых фотоумножителей, в системах ядерной медицины и радиационных измерениях.

## История разработок твердотельных фотодетекторов

*Фотопроводимость, фотоэффект, фотодиод (начальный период до 1960-х годов)*

Первые твердотельные фотодетекторы появились около 150 лет назад. В 1873 году Уиллоуби Смит обнаружил эффект фотопроводимости (зависимость сопротивления образца от освещения) в сером селене – полупроводнике р-типа с шириной запрещенной зоны 1,8 эВ. В 1877 году У.Г. Адамсом и Р.Е. Деем были опубликованы результаты исследований этого эффекта [1]. Вскоре Вернер фон Сименс разработал первые коммерческие фотодатчики – селеновые фоторезисторы. Уже в 1878 Александр Белл предложил, а в 1880 году разработал «фотофон» для воспроизведения звука путем модуляции света от вибрирующего зеркала на селеновом фоторезисторе, что можно считать рождением систем оптической связи на основе фотодетекторов.

Исследования фотоэффекта, начиная с его открытия в 1887 году А.Г. Столетовым, и, независимо, Генрихом Герцем и квантово-механического объяснения Альбертом Эйнштейном в 1905 году, заложили фундамент для последующих разработок основных типов как вакуумных, так и полупроводниковых фотодетекторов.

По истории и физике этих разработок много подробной и интересной литературы, в частности, по вакуумным фотоэлектронным умножителям (ФЭУ) можно порекомендовать статьи Б.К. Лубсандоржиева [2,3], а по лавинным фотодиодам – обзоры Эдуарда Фишера [4], Дитера Ренкера [5], В.Э. Шубина и Д.А. Шушакова [6], а также монографию З.Я. Садыгова [7].

С 1940-х годов начались активные разработки ключевых типов полупроводниковых фотодетекторов, когда было установлено, что кремний и германий являются предпочтительными материалами с точки зрения фотоэлектрических свойств и качества материала. Для них были разработаны процессы легирования примесями и создания положительных (р-типа) и отрицательных (n-типа) областей проводимости.

Наиболее известны успехи компании Bell Laboratories, в первую очередь связанные с изобретением и разработкой кремниевого транзистора в 1947 г. Однако одновременно там шли разработки и фотоэлектрических приборов: в 1941 г. Расселом Олем было изобретено «светочувствительное электрическое устройство» – кремниевый фотодиод на основе плоского р-n-перехода, а в 1948 г. Джон Шив, изучая транзистор, изобрел фототранзистор.

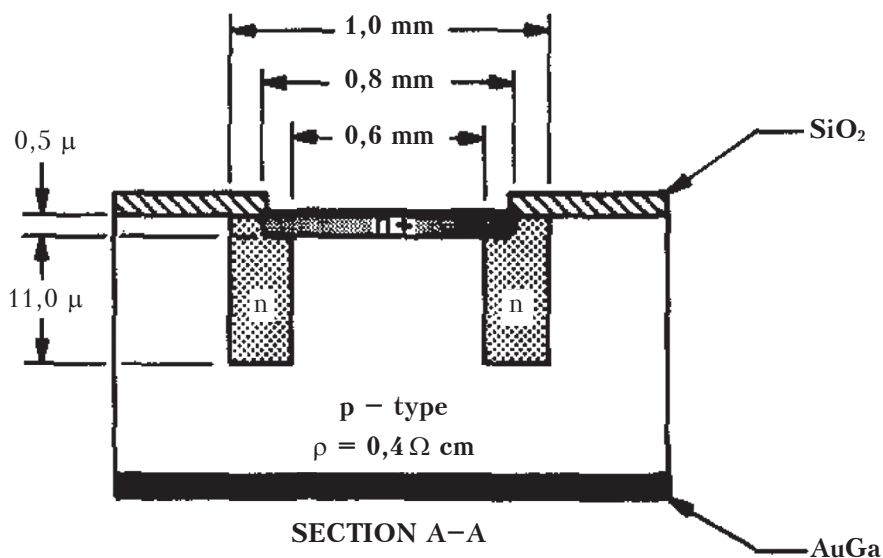
В 1950-х годах фотодиоды различных конструкций изучались при высоких обратных напряжениях, и удалось обнаружить ряд

сильнополевых эффектов, включая лавинное умножение носителей заряда. Это привело к изобретению лавинного фотодиода (ЛФД) Дзюньити Нишизавой в 1952 году [8].

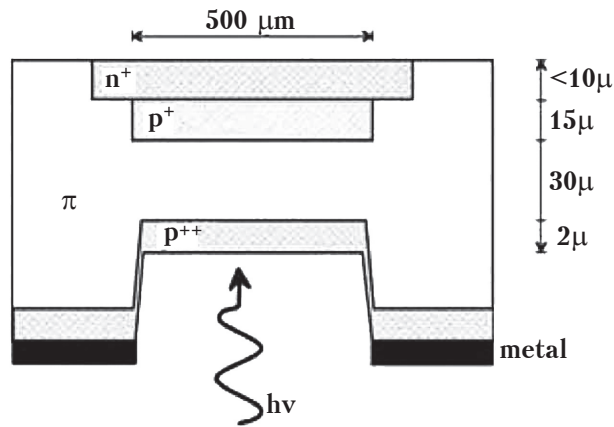
Следующие два раздела посвящены истории разработок полупроводниковых, в первую очередь, кремниевых детекторов, использующих эффект лавинного умножения носителей заряда. Общая цель этих работ – достичь максимальной пороговой чувствительности, возможности детектировать как малофотонные импульсы света, так и отдельные фотоны и, более того, разрешать число фотонов в импульсе.

#### *Разработки лавинных фотодиодов 1960–1990-х годов*

Главной проблемой при разработке ЛФД была необходимость обеспечить наиболее равномерный лавинный пробой в его активной области, иначе на неоднородностях легирования и дефектах, неизбежных при имевшемся технологическом уровне, возникал пробой микроплазменного типа, часто ведущий к выгоранию этой области.



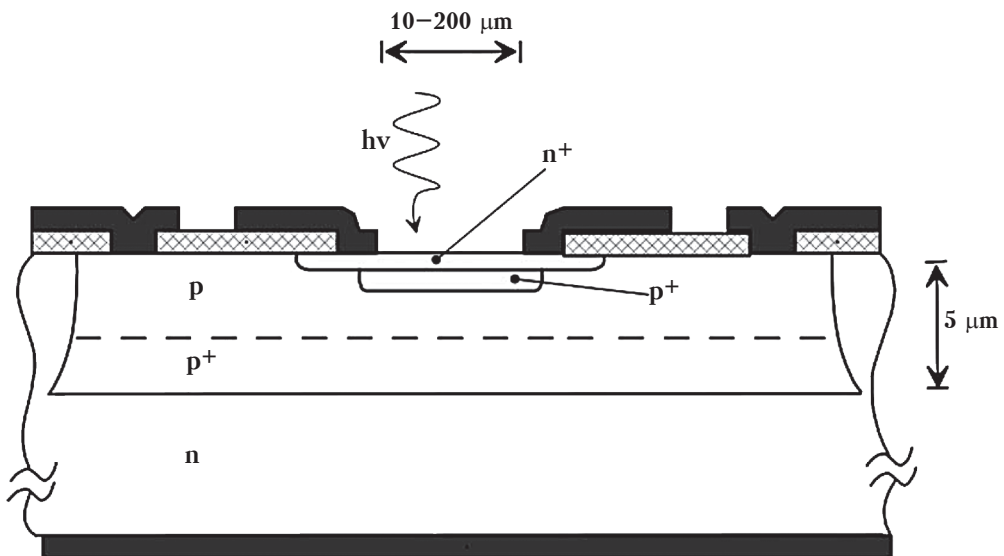
**Рис. 1.** Первая конструкция ЛФД с охранным кольцом, известная как ЛФД Р. Хайтца [10].



**Рис.2.** Первая конструкция ЛФД с проникновением поля, известная как ЛФД Р. Макинтайра [13].

Первой успешной конструкцией ЛФД с однородным пробоем стала планарная диодная структура с мелкой диффузией фосфора по центру, которая образует лавинный р-п-переход в подложке р-типа и с глубокой диффузией фосфора по краям, которая образует защитное кольцо, как показано на рис.1. Такой ЛФД был разработан Рональдом Хайтцем с коллегами в 1963 г. [9,10]. С тех пор планарная конструкция стала основой большинства разработок ЛФД вплоть до настоящего времени.

Главными направлениями разработок кремниевых ЛФД начального периода были повышение их пороговой чувствительности вплоть до однофотонной, что требовало повышения коэффициента лавинного умножения, а также общее повышение квантовой эффективности с расширением спектрального диапазона чувствительности, особенно в ИК область, для чего требовалось увеличение толщины активного слоя, ответственного за поглощение фотонов и сбориение рожденных светом электронов и дырок.

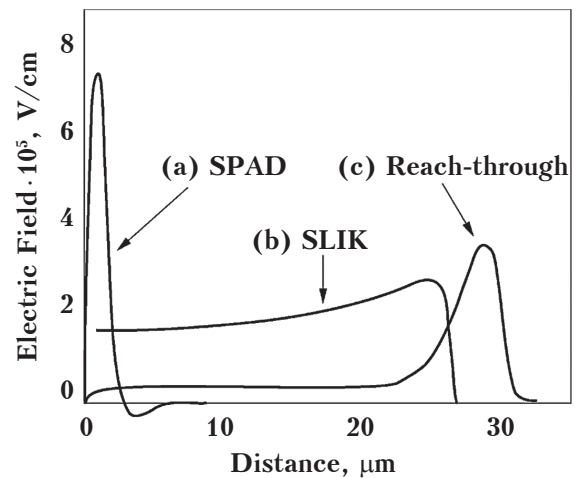


**Рис.3.** Конструкция ЛФД с мелким р-п-переходом, известная как ЛФД С. Ковы, а также как однофотонный ЛФД (Single Photon APD, SPAD) [15].

Эти цели были достигнуты в другой планарной конструкции, известной как ЛФД с проникновением поля. Она была разработана в начале 1970-х годов в компании Radio Corporation of America (RCA) Робертом Макинтайром, Яном Конради и Полом Уэббом [11-13]. Вместо защитного кольца краевой пробой подавлялся частичным перекрытием приповерхностных слоев  $n^+$  и  $p^+$ , образуя лавинную область только в зоне их перекрытия. Область поглощения света имела большую толщину (около 50 мкм и более), которая обеспечивала высокую квантовую эффективность ЛФД, особенно в видимом и ближнем ИК-диапазоне (рис.2).

Эта конструкция ЛФД, работающая в Гейгеровском режиме с активным гашением пробоя, стала универсальным однофотонным детектором за счет широкого спектрального диапазона (практически максимальный для кремния) и рекордной эффективности детектирования  $\sim 75\%$  (на длине волны максимальной чувствительности 630 нм). На основе этой конструкции с улучшенным профилем поля (известная как SLIK APD) компаниями EG&G, Perkin-Elmer и Excelitas последовательно, как наследниками RCA, более 30 лет выпускался очень востребованный на мировом рынке счетчик фотонов Single Photon Counting Module SPCM-AQR Series [14].

Серьезным конкурентом SLIK APD стала разработка Серджио Ковы и его группы в Миланском политехническом университете, в которой на подложке  $n$ -типа выращивался тонкий эпитаксиальный слой  $p$ -типа толщиной несколько микрон, лавинный переход был максимально приближен к фронтальной поверхности, а для подавления краевого пробоя было использовано частичное перекрытие слоев  $p^+$  и  $n^+$ , как в ЛФД Макинтайра (рис.3). Эта конструкция, широко известная как однофотонный ЛФД (Single Photon APD, SPAD), обеспечила намного более высокое однофо-

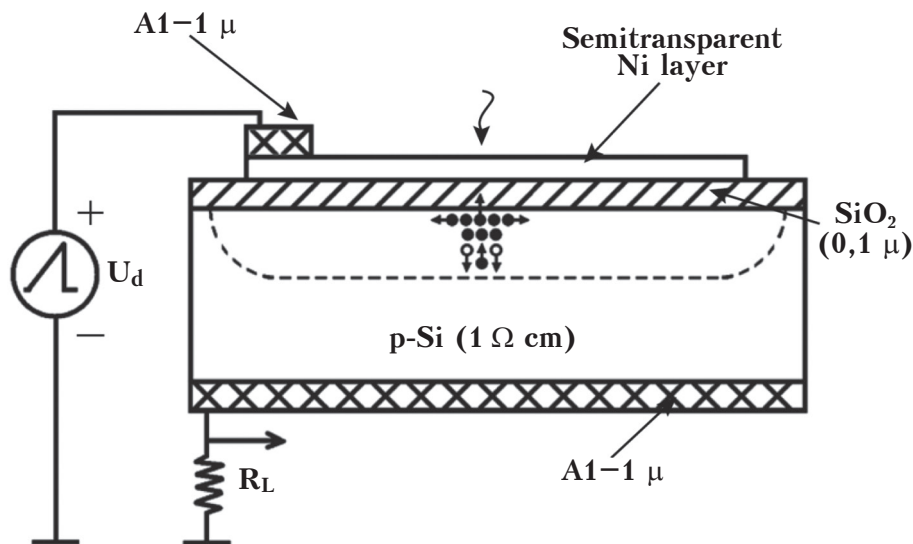


**Рис.4.** Профиль электрического поля в конструкциях ЛФД: а) SPAD, б) SLIK, в) ЛФД с проникновением поля (Reach-through) [14].

тонное временное разрешение (менее 100 пс по сравнению с более 500 пс для SLIK APD) и малое напряжение пробоя (около 30 В по сравнению с  $\sim 150$ – $200$  В для SLIK APD) за счет малой толщины активного слоя, а также более высокую чувствительность в синем диапазоне спектра за счет особенностей профиля легирования имплантационного  $p$ - $n$ -перехода у фронтальной поверхности.

Главные фотодетекторные свойства ЛФД в части процессов поглощения фотонов, собирания и лавинного умножения электронов и дырок характеризуются распределением электрического поля по глубине ЛФД от фронтальной поверхности в центральной зоне активной области, как представлено на рис.4.

Как уже отмечалось, начальные разработки ЛФД 1970-х годов были направлены на повышение коэффициента лавинного умножения, что требовало подавления как краевого пробоя, так и неоднородностей легирования и разнообразных структурных дефектов типа дислокаций, из-за которых возникали лавинные пробои микроплазменного типа при пониженном напряжении. Такие неоднородности и дефекты не позволяли создавать ЛФД с размерами чувствительной площадки более



**Рис.5.** Конструкция МОП ЛФД на основе структуры металл-диэлектрик (окисел)-полупроводник (как представлено в обзоре [17] по материалам статей [16,21]).

500 мкм. Неожиданное решение этой проблемы было найдено за счет отказа от р-п-перехода в качестве лавинной области. В 1973 году Норманом Фоссом и Самуэлем Вардом был разработан новый тип ЛФД [16], в котором «впервые было предложено использовать кремниевую структуру MOS (металл-оксид-полупроводник) в качестве альтернативы ЛФД с р-п-переходом. Было выдвинуто предположение, что наличие слоя диоксида кремния с достаточно высоким сопротивлением позволит эффективно стабилизировать (или ограничить) коэффициент умножения лавинного процесса в областях микро неоднородностей полупроводника за счет накопления в таких областях умноженных носителей заряда» [17]. Действительно, такие МОП-ЛФД имели активную площадь до  $5 \text{ см}^2$ , коэффициент усиления более 20 и отличались от ЛФД на основе р-п-переходов очень равномерной чувствительностью по площади, высокой стабильностью и воспроизводимостью [16].

Вскоре, развивая это направление, в Физическом институте АН СССР начали исследования лавинных процессов в МОП-структурах [18,19]. Был проведен анализ особенностей

лавинного умножения носителей заряда в условиях сильной отрицательной обратной связи, которая возникает за счет накопления лавинного заряда на границе раздела Si-SiO<sub>2</sub>. Удалось показать, что отрицательная обратная связь обеспечивает самостабилизирующийся лавинный процесс с коэффициентом умножения  $10^3 - 10^5$ , что позволяет создавать МОП-ЛФД большой площади, а также многоэлементные матрицы на их основе [20].

К середине 1990-х годов теоретические и экспериментальные исследования группы В.Э. Шубина в ФИАН сосредоточились на особенностях одноэлектронного лавинного процесса с отрицательной обратной связью. Были обнаружены и измерены одноэлектронные импульсы, разработана вероятностная модель процесса и сформулирована концепция твердотельного фотоумножителя [22-24].

Стоит также отметить особый подход к обеспечению однородности лавинного умножения планарных ЛФД, который применили в компании Advanced Photonix. Они смогли достичь максимально возможной однородности пространственного распределения легирующей примеси п-типа, используя облучение

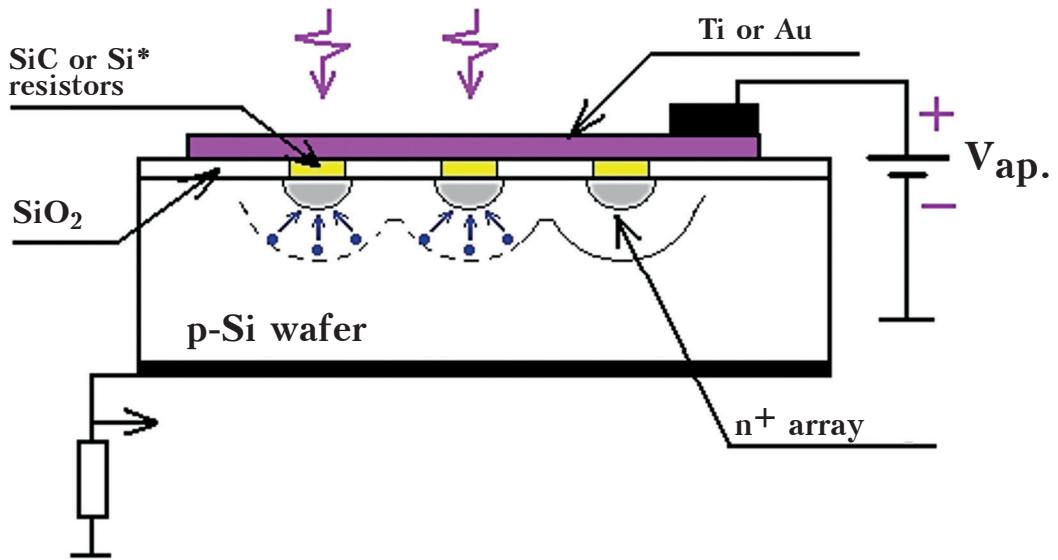


Рис.6. Конструкция МРП ЛФД на основе структуры металл-резистор-полупроводник [31].

кремниевых пластин потоком нейтронов таким образом, что в процессе нейтронной трансмутации атом кремния превращается в атом фосфора и становится донором. В 1992 году

они успешно разработали ЛФД большой площади (LAAPD) диаметром более 0,5 дюймов [25,26]. В настоящее время Advanced Photonix выпускает самые большие ЛФД на рынке, работающие в пропорциональном (линейном) режиме с коэффициентом усиления до 300.

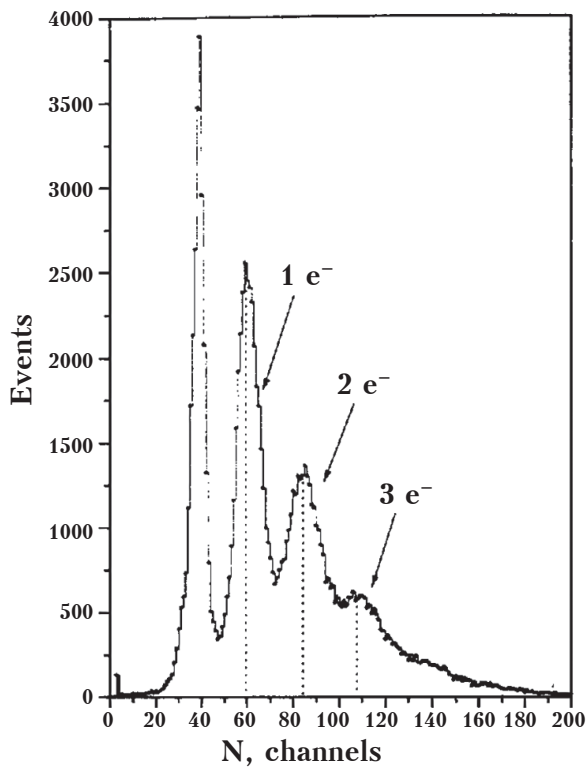


Рис.7. Гистограмма выходного сигнала (спектр фотоэлектронов) МРП ЛФД при детектировании малофотонного светового импульса с разрешением числа фотоэлектронов [32].

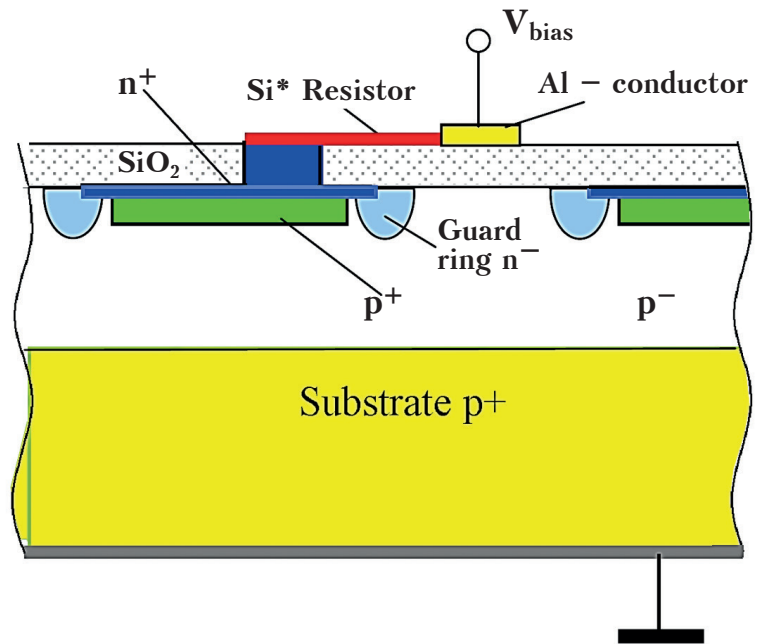
#### Разработки кремниевых фотоумножителей 1980–2000-х годов

Вернемся к теме МОП ЛФД и ее развитию в 1980-е годы. МОП ЛФД были способны обнаруживать световой импульс только в течение короткого времени после подачи напряжения смещения, поскольку ток проводимости в них блокировался окислом. Поэтому они могли работать только в режиме запуска от внешнего триггера, синхронизирующего приход светового сигнала и момент нестационарного обеднения приповерхностной области пространственного заряда (ОПЗ) МОП структуры. За микросекунды обеднение ОПЗ переходило в инверсию за счет световой (или темновой) генерации и умножения неосновных носителей (электронов), МОП ЛФД терял чувствительность, и напряжение на нем надо было сбросить для перезапуска процесса детектирования (мертвое время – около миллисекунды).

Этот недостаток был устранен в структуре металл-резистор-полупроводник – МРП ЛФД (MRS APD), разработанной Э.Я. Садыговым, В.М. Головиным и их коллегами из ИЯИ и МЭЛЗ. Эта структура могла работать с постоянной чувствительностью при постоянном напряжении смещения, как и все другие типы ЛФД. В первых MRS APD блокирующий слой окисла SiO<sub>2</sub> был заменен на резистивный слой широкозонного полупроводника SiC [27]. Таким образом, MRS APD представлял собой такую же планарную конструкцию, как MOS APD, показанный на рис.5.

Второе поколение MRS APD получило весьма оригинальную, принципиально непланарную конструкцию, сильно контрастирующую с установившемся в то время подходом к электрофизической конфигурации лавинных структур с однородным лавинным пробоем. Она была разработана в виде матрицы разделенных p-n-переходов, играющих роль микро-неоднородностей, точек локализации лавин, образованных n<sup>+</sup> диффузионными зонами размером в несколько микрон в подложке p-типа, чтобы сфокусировать лавинный пробой в этих точках и предотвратить распространение накопленного лавинного заряда вдоль границы раздела Si-SiC [28-31].

MRS APD обладали высоким коэффициентом умножения  $\sim 5 \cdot 10^4 - 5 \cdot 10^5$ , низким уровнем шумов умножения  $\sim 30\%$ , быстрым откликом (несколько наносекунд) и могли быть сделаны с большой активной площадью (до 10 мм<sup>2</sup>). Более того, они обеспечивали детектирование слабых световых сигналов с разрешением числа фотонов, как показано на рис.7, то



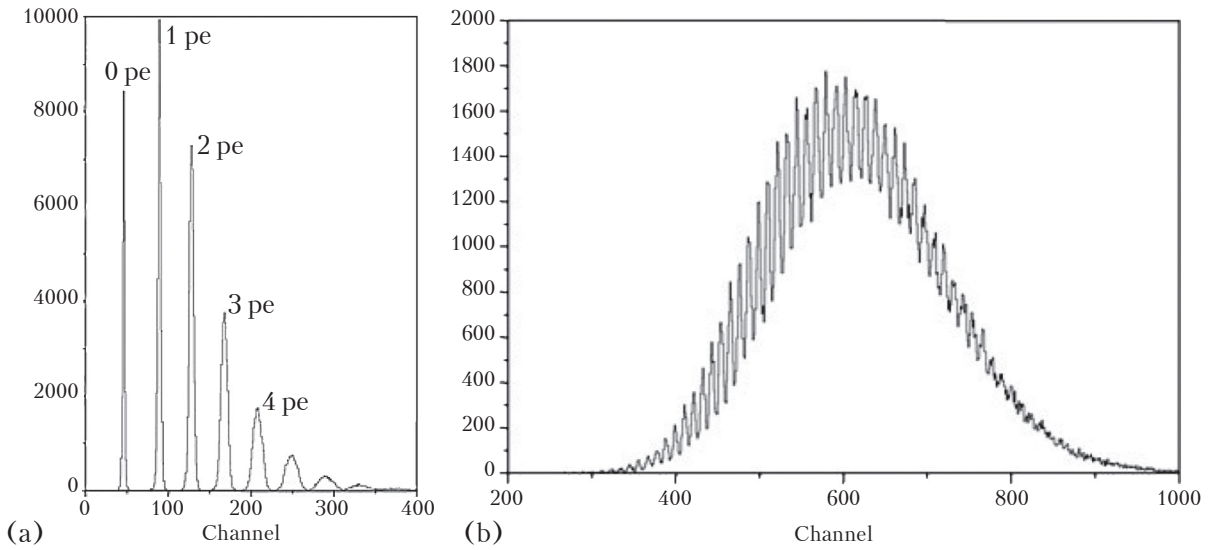
**Рис.8.** Конструкция кремниевого фотумножителя (SiPM) МИФИ/Пульсар [35].

есть работали как пропорциональные ЛФД с невероятной для таких приборов пороговой чувствительностью [32,33]. Именно эта возможность привела к широкой известности MRS APD как перспективных фотодетекторов малофотонных импульсов света, в том числе сцинтилляций от радиационных потоков и частиц высоких энергий.

Производство MRS APD в 1990-х годах было освоено Центром перспективных технологий и аппаратов (ЦПТА, Москва) под руководством В.М. Головина. Они выпускались малыми сериями и считались перспективной заменой вакуумным ФЭУ для некоторых международных экспериментов по физике высоких энергий, в первую очередь, в составе сцинтилляторных тайлов для калориметров высокого разрешения в DESY [33,34].

Несмотря на хорошие параметры лавинного умножения, MRS APD имели низкую эффективность детектирования фотонов (photon detection efficiency, PDE), составляющую около 3% [17], и в 2000-х годах работы по этой конструкции в ЦПТА прекратились.



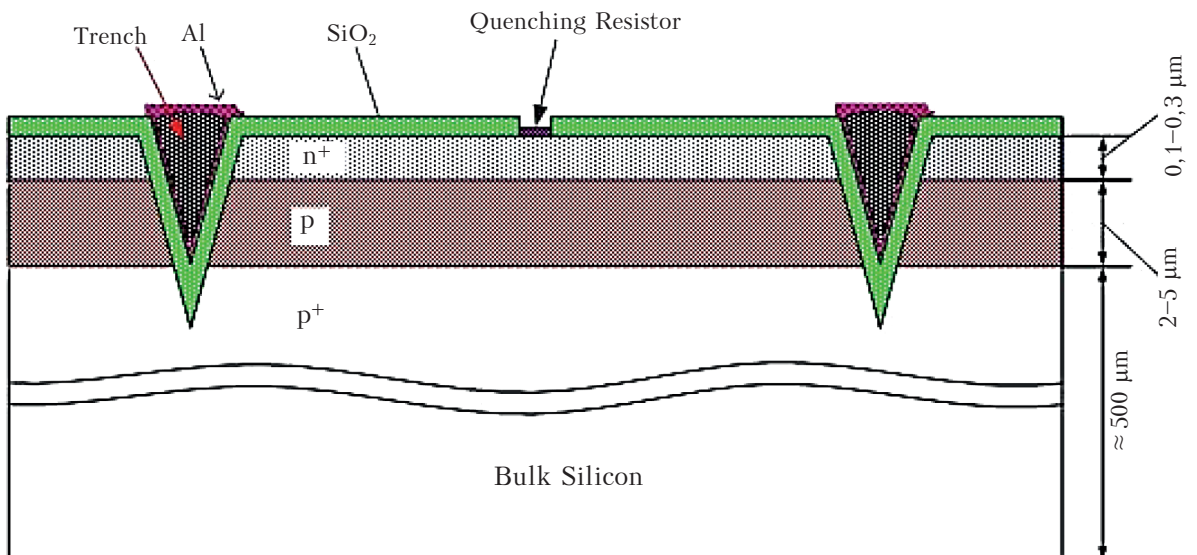


**Рис.9.** Гистограмма выходного сигнала (спектр фотоэлектронов) SiPM при комнатной температуре: а) разрешение сигнала со средним числом фотоэлектронов около 1; б) разрешение сигнала со средним числом фотоэлектронов около 46 [36].

По результатам исследований [24,30,32,33] было видно, что каждый  $n^+$  лавинный участок или пиксель MRS APD работает в гейгеровском режиме с пассивным гашением пробоя независимо от других пикселей, что аналогично работе однофотонных гейгеровских ЛФД (SPAD) в составе матриц SPAD. Они отличаются активным гашением пробоя с помощью особой электроники управления напряжением

на пикселе, но их лавинная область оптимизирована под решение тех же задач эффективно-го собирания и умножения фотоэлектронов.

Конструкция лавинного детектора, в которой лавинная область была комбинацией планарного  $p$ - $n$ -перехода с заглубленными участками повышенного легирования (аналог диффузионных областей  $n^+$  типа MRS APD), а слой с широкозонного полупроводника типа



**Рис.10.** Конструкция SSPM с тренчами между ячейками, разработанная ЦПТА [39].

SiC был заменен тонкопленочным поверхностным резистором для гашения пробоя, была запатентована З.Я. Садыговым в 1996 году [17,31].

На основе этой конструкции и конструкции SPAD с мелким р-п-переходом С. Ковы (рис.3) командой Б.А. Долгошеина в сотрудничестве МИФИ с НПО «Пульсар» в начале 2000-х годов был разработан первый планарный ЛФД, известный как кремниевый фотоумножитель (silicon photomultiplier, SiPM) [35-37].

В нем диффузионные зоны  $n^+$  были заменены отдельными APD-ячейками, основанными на планарных р-п-переходах. Планарный р-п-переход был дважды защищен от краевого пробоя: охранным кольцом  $n$ -типа и частичным перекрытием слоев имплантаций  $n^+$  и  $p^+$  типов. Лавинные пиксели (ячейки) были подключены к общему электроду через отдельные поликремниевые поверхностные резисторы и работали в ограниченном гейгеровском режиме независимо друг от друга. В качестве поверхностного резистора был нанесен высокоомный слой поликристаллического кремния (рис.8).

Эта конструкция SiPM показала существенно более высокие характеристики, чем MRS APD по коэффициенту умножения (около  $10^6$ ), эффективности детектирования (около 15% в видимой области спектра) и по разрешению числа фотонов (рис.9), а также оказалась практичной с технологической точки зрения, воспроизводимой, стабильной и надежной. С середины 2000-х годов такой кремниевый фотоумножитель – SiPM – был признан во всем мире как фотодетектор нового типа с разрешением числа фотонов при комнатной температуре [38].

В 2000-х годах В.М. Головин (ЦПТА в сотрудничестве с компанией Photonique SA) также разработал планарный вариант гейгеровского ЛФД с названием «твердотельный

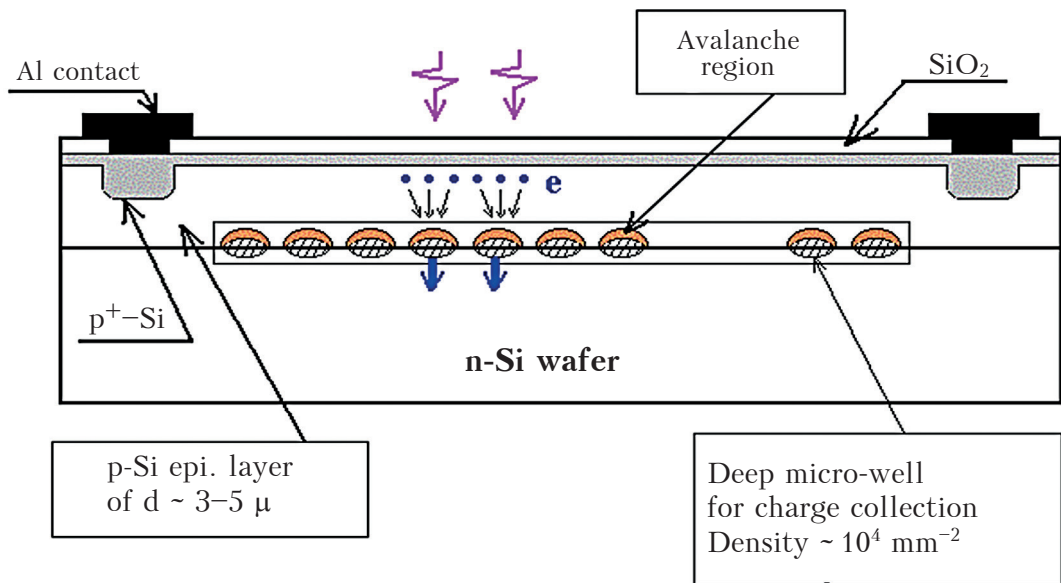
фотоумножитель» (solid state photomultiplier, SSPM) [39]. В нем впервые плоские р-п-переходы на лицевой поверхности были разделены глубокими канавками анизотропного травления кремния (трэнчами) для подавления оптических перекрестных помех (кросстолка) между пикселями (рис.10). Эти же канавки выполняли функцию подавления краевого пробоя вместо охранных колец.

К 2007 году оптимизация параметров конструкции SSPM позволила достичь эффективности детектирования фотонов 40% в максимуме чувствительности на длинах волн 550–570 нм при низком напряжении пробоя около 17 В и рабочем напряжении около 25 В, а вероятность кросстолка составляла около 3%.

Однако несмотря на успехи разработок планарных SiPM и SSPM, работы по непланарным конструкциям в развитие подходов, заложенных в MRS APD, продолжались еще до начала 2010-х годов.

Так, ЛФД с дискретным усилением (discrete amplification APD, DAPD) был разработан в группе В.Э. Шубина (ФИАН) в сотрудничестве с компанией Amplification Technologies [40-42]. В них была реализована концепция многоканального ЛФД, работающего в гейгеровском режиме с отрицательной обратной связью на одноэлектронном уровне, как было сформулировано ранее в работе [23]. Каналы лавинного усиления были реализованы в виде пространственно разделенных р-п-переходов микронного размера, аналогично MRS APD [43]. DAPD имели высокую эффективность детектирования фотонов (около 40% в видимой области спектра), высокое быстродействие (ширина одноэлектронного импульса около 1,5 нс) и широкий динамический диапазон (около 4000 пикселей на  $мм^2$ ) [42].

Интересно отметить, что в 2009 году компанией Amplification Technologies был создан



**Рис.11.** Конструкция микропиксельного ЛФД с заглубленными пикселями [31].

первый твердотельный фотоумножитель для ближнего инфракрасного диапазона (NIR DAPD) на основе гетероструктур InGaAs/InP непланарной конструкции. И практически одновременно с этим компанией Princeton Lightwave был разработан планарный InGaAs/InP ЛФД с отрицательной обратной связью за счет поверхностного резистора гашения гейгеровского пробоя (negative feedback APD, NFAD) [44].

В то же время, чтобы превзойти MRS APD и планарные конструкции по эффективности детектирования, З.Я. Садыгов изобрел и разработал (в сотрудничестве с компанией Zecotek) другую оригинальную конструкцию – микропиксельного (МП) ЛФД с заглубленными пикселями [31,45,46]. В ней с фронтальной поверхности были устранены металлические шины и гасящие резисторы, которые занимали много места и блокировали прохождение света внутрь кремния. В результате в этой конструкции обеспечилась геометрическая эффективность почти 100%, а квантовая эффективность в фотодиодном режиме (до лавинного умножения) около 80%. Лавинные области были сформированы из n+ пикселей

размером в несколько микрон, заглубленных в эпитаксиальный слой p-типа (рис.11). Эти пиксели усиливают и фокусируют электрическое поле вокруг себя, создавая условия для локального лавинного пробоя, подобно полусферическим n+ диффузионным точкам на поверхности MRS APD. Более того, эти пиксели одновременно являются потенциальными ямами – ловушками для электронов. В этих ямах умноженные электроны накапливаются и удерживаются, а их суммарный заряд уменьшает электрическое поле и подавляет лавинный пробой около данного пикселя.

Небольшой размер (несколько микрон) и, соответственно, высокая плотность пикселей (до  $10^4$  шт./мм<sup>2</sup>) обеспечили очень широкий динамический диапазон детектирования световых импульсов. Действительно, в измерениях на коротких световых импульсах была показана рекордная линейность и ширина динамического диапазона МП APD [47]. Однако пиковое значение PDE в максимуме чувствительности, составляющее около 35%, оказалось примерно в два раза ниже ожидаемого при квантовой эффективности 80%. Кроме того, МП ЛФД показали длительное время

восстановления пикселей – около 300 мкс – из-за медленного процесса ре-эмиссии заряда, захваченного в пикселях – потенциальных ямах, что создает проблему детектирования длинных световых импульсов и постоянных потоков света [47].

Пионерские разработки по MRS APD, выдающиеся показатели эффективности и малофотонного разрешения планарных конструкций SiPM и SSPM, первый опыт успешного применения этих детекторов в физике высоких энергий дали мощный импульс к разработке планарных конструкций кремниевых фотоумножителей в зарубежных центрах и компаниях по оптоэлектронике и к массовому освоению этой технологии детектирования в международных научных коллаборациях.

Зарубежные работы по SiPM продвигались очень активно, и, начиная с 2006 года, публикации по ним представили такие организации, как:

- НТЦ Foundation Bruno Kessler (FBK), Италия – 2006 г. [48];
- Компания Hamamatsu Photonics, Япония – 2007 г. [49];

- Компания SensL, Ирландия – 2008 г. [50];
- Компания ST Microelectronics, Италия – 2008 г. [51,52];
- Компания Radiation Monitoring Devices, США – 2008 г. [53]
- Компания Philips, Германия – 2009 г. (digital SiPM) [54];
- Компания Excelitas (EG&G, Perkin-Elmer), Канада – 2011 г. [55];
- Компания КЕТЕК, Германия – 2012 г. [56].

По результатам разработок в середине 2010-х годов ведущие места на рынке SiPM заняли детекторы Hamamatsu (под названием multipixel photon counter, MPPC), SensL и КЕТЕК. Технологический центр FBK, занимаясь новыми разработками, передал выпуск и продажу в компанию AdvanSiD, которая не стала заметным участником рынка и исчезла. Компании ST Microelectronics, Radiation Monitoring Devices и Excelitas не стали организовывать массовый выпуск детекторов на продажу. Компания Philips стала производить SiPM только для установки в свои позитронно-эмиссионные томографы.

## Литература

1. W.G. Adams, R.E. Day, «The action of light on selenium», *Proc. R. Soc. London*, no. 25, pp. 113-117, 1877. doi: 10.1098/rspl.1876.0024.
2. В.К. Lubsandorzhev, «On the history of photomultiplier tube invention», *Nucl. Instruments Methods Phys. Res. Sect. A Accel. Spectrometers, Detect. Assoc. Equip.*, vol. 567, pp. 236–238, 2006. doi: 10.1016/j.nima.2006.05.221.
3. В.К. Lubsandorzhev, «Evolution of ideas in photon detection», *Phys. Part. Nucl.*, vol. 47, pp. 957–967, 2016. doi: 10.1134/S1063779616060150.
4. E.M.D. Fisher, «Principles and Early Historical Development of Silicon Avalanche and Geiger-Mode Photodiodes», in: *Phot. Count. - Fundam. Appl.: InTech*, p. 37, 2018. doi: 10.5772/intechopen.72148.
5. D. Renker, «Geiger-mode avalanche photodiodes, history, properties and problems», *Nucl. Instruments Methods Phys. Res. Sect. A Accel. Spectrometers, Detect. Assoc. Equip.*, vol. 567, pp. 48–56, 2006. doi: 10.1016/j.nima.2006.05.060.
6. V.E. Shubin, D.A. Shushakov, «Photodetectors Avalanche», in: *Encycl. Opt. Photonic Eng.*, Second Ed., CRC Press, pp. 1–22, 2015. doi: 10.1081/E-EOE2-120047097.
7. Садыгов З.Я., Физика твердотельных фотоэлектронных умножителей, ОИЯИ, Дубна, 2023. URL: <http://www1.jinr.ru/Books/Sadygov.pdf>. (дата обращения: 14.12.2024).
8. J. Nishizawa, P-I-N Photo-Diode, Japan Patent JP1955-8969A, 1952.
9. R.H. Haitz, A. Goetzberger, R.M. Scarlett, W. Shockley, «Avalanche Effects in Silicon p-n Junctions. I. Localized Photomultiplication Studies on Microplasmas», *J. Appl. Phys.*, vol. 34, pp. 1581–1590, 1963. doi: 10.1063/1.1702639.
10. A. Goetzberger, B. McDonald, R.H. Haitz, R.M. Scarlett, «Avalanche Effects in Silicon p-n Junctions. II. Structurally Perfect Junctions», *J. Appl. Phys.*, vol. 34, pp. 1591–1600, 1963. doi: 10.1063/1.1702640.
11. R.J. McIntyre, «The distribution of gains in uniformly multiplying avalanche photodiodes: Theory», *IEEE Trans. Electron Devices*, vol. 19, pp. 703–713, 1972. doi: 10.1109/T-ED.1972.17485.

12. J. Conradi, «The distribution of gains in uniformly multiplying avalanche photodiodes: Experimental», *IEEE Trans. Electron Devices*, vol. 19, pp. 713–718, 1972. doi: 10.1109/T-ED.1972.17486.
13. P.P. Webb, R.J. McIntyre, J. Conradi, «Properties of avalanche photodiodes», *RCA Rev.* 35, pp. 234–278, 1974.
14. H. Dautet, P. Deschamps, B. Dion et al, «Photon counting techniques with silicon avalanche photodiodes», *Appl. Opt.* vol. 32, pp. 38–94, 1993. doi: 10.1364/ao.32.003894.
15. M. Ghioni, A. Gulinatti, I. Rech et al, «Progress in Silicon Single-Photon Avalanche Diodes», *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electronics*, vol. 13, pp. 852–862, 2007. doi: 10.1109/JSTQE.2007.902088.
16. N.A. Foss, S.A. Ward, «Large area metal oxide semiconductor avalanche photodiodes», *J. Appl. Phys.*, vol. 44, pp. 728–731, 1973. doi: 10.1063/1.1662252.
17. Z. Sadygov, A. Sadigov, S. Khorev, «Silicon Photomultipliers: Status and Prospects», *Phys. Part. Nucl. Lett.*, vol. 17, pp. 160–176, 2020. doi: 10.1134/S154747712002017X.
18. N.I. Gol'braikh, A.F. Plotnikov, V.E. Shubin, «Pulse avalanche photodetector based on a metal-insulator-semiconductor structure», *Sov. J. Quantum Electron.*, vol. 5, pp. 1435–1436, 1975. doi: 10.1070/QE1975v005n12ABEH012167.
19. A.B. Kravchenko, A.F. Plotnikov, V.E. Shubin, «Feasibility of construction of a pulsed avalanche photodetector based on an MIS structure with stable internal amplification», *Sov. J. Quantum Electron.*, vol. 8, pp. 1086–1089, 1978. doi: 10.1070/QE1978v008n09ABEH010725.
20. N.G. Basov, A.B. Kravchenko, A.F. Plotnikov, V.E. Shubin, «Self-stabilized avalanche process in a metal-dielectric-semiconductor (MDS) structure. Avalanche MDS photodetectors», *Uspekhi Fiz. Nauk.*, vol. 134, pp. 748–750, 1981. doi: 10.3367/UFNr.0134.1981081.0748.
21. A.B. Kravchenko, A.F. Plotnikov, Y.M. Popov, V.E. Shubin, «Detection of light with an MIS structure operating under avalanche multiplication conditions», *Sov. J. Quantum Electron.* vol. 11, pp. 473–477, 1981. doi: 10.1070/QE1981v011n04ABEH006850.
22. S. Bogdanov, V. Shubin, D. Shushakov, «The influence of electric field nonstationarity on a process of unit carrier multiplication», *KSF.* vol. 58, pp. 3–10, 1994.
23. D.A. Shushakov, V.E. Shubin, «New solid state photomultiplier» in: M. Razeghi, Y.-S. Park, G.L. Witt (Eds.), *SPIE Optoelectron. Integr. Circuit Mater. Physics, Devices*, SPIE, p. 544, 1995. doi: 10.1117/12.206900.
24. D.A. Shushakov, V.E. Shubin, «New avalanche device with an ability of few-photon light pulse detection in analog mode», in: G.S. Mecherle (Ed.), *Free. Laser Commun. Technol. VIII, SPIE*, pp. 173–183, 1996. doi: 10.1117/12.238418.
25. G. Szecsenyi-Nagy, «The Avalanche Photodiode – A Promising Low Light Level Detector for Astronomical Photometry», *Int. Astron. Union Colloq.*, vol. 136, pp. 160–168, 1993. doi: 10.1017/S025292110000751X.
26. D. Renker, E. Lorenz, «Advances in solid state photon detectors», *J. Instrum.*, vol. 4, pp. 04004. doi: 10.1088/1748-0221/4/04/P04004.
27. A. Gasanov, V. Golovin, Z. Sadygov, N. Yusipov, «An avalanche detector on the basis of metal-resistive layer-semiconductor», *Sov. Tech. Phys. Lett.* vol. 14, p. 313, 1988. URL: <https://journals.ioffe.ru/articles/viewPDF/31222>. (дата обращения: 14.12.2024).
28. A. Gasanov, V. Golovin, Z. Sadygov, N. Yusipov, «Effect of local inhomogeneities in a semiconductor substrate on the characteristics of avalanche photodetectors», *Sov. Tech. Phys. Lett.* vol. 16, p. 14. URL: <https://journals.ioffe.ru/articles/25162> (дата обращения: 14.12.2024).
29. Z.Y. Sadygov, A.G. Gasanov, N.Y. Yusipov et al, «Investigation of the possibility of creating a multichannel photodetector based on the avalanche MRS-structure», in: A.L. Mikaelian (Ed.), *SPIE Proc. Opt. Mem. Neural Networks*, pp. 158–168, 1991. doi: 10.1117/12.50424.
30. Z.Y. Sadygov, I.M. Zheleznykh, N.A. Malakhov et al, «Avalanche semiconductor radiation detectors» in: *Third Eur. Conf. Radiat. Its Eff. Components Syst.*, IEEE, pp. 460–464, 1996. doi: 10.1109/RADECS.1995.509820.
31. Z. Sadygov, A. Olshevski, I. Chirikov et al, «Three advanced designs of micro-pixel avalanche photodiodes: Their present status, maximum possibilities and limitations», *Nucl. Instruments Methods Phys. Res. Sect. A Accel. Spectrometers, Detect. Assoc. Equip.* vol. 567, pp. 70–73, 2006. doi: 10.1016/j.nima.2006.05.215.
32. A.V. Akindinov, A.N. Martemianov, P.A. Polozov et al, «New results on MRS APDs», *Nucl. Instruments Methods Phys. Res. Sect. A Accel. Spectrometers, Detect. Assoc. Equip.*, vol. 387, pp. 231–234, 1997. doi: 10.1016/S0168-9002(96)01201-6.
33. G. Bondarenko, B. Dolgoshein, V. Golovin et al, «Limited Geiger-mode silicon photodiode with very high gain», *Nucl. Phys. B – Proc. Suppl.*, vol. 61, pp. 347–352, 1998. doi: 10.1016/S0920-5632(97)00585-9.

34. A. Akindinov, G. Bondarenko, V. Golovin et al, «Scintillation counter with MRS APD light readout», *Nucl. Instruments Methods Phys. Res. Sect. A Accel. Spectrometers, Detect. Assoc. Equip.* vol. 539, pp. 172–176, 2005. doi: 10.1016/j.nima.2004.10.026.
35. P. Buzhan, B. Dolgoshein, A. Ilyin et al, «An advanced study of silicon photomultiplier», in: *ICFA Instrum. Bull.*, 2001, pp. 28–41. URL: <http://inspirehep.net/record/572187?ln=en> (accessed December 10, 2014) (дата обращения: 14.12.2024).
36. P. Buzhan, B. Dolgoshein, L. Filatov et al, «Silicon photomultiplier and its possible applications», *Nucl. Instruments Methods Phys. Res. Sect. A Accel. Spectrometers, Detect. Assoc. Equip.* vol. 504, pp. 48–52, 2003. doi: 10.1016/S0168-9002(03)00749-6.
37. V. Andreev, V. Balagura, B. Bobchenko et al, «A high-granularity scintillator calorimeter readout with silicon photomultipliers», *Nucl. Instruments Methods Phys. Res. Sect. A Accel. Spectrometers, Detect. Assoc. Equip.* vol. 540, pp. 368–380, 2005. doi: 10.1016/j.nima.2004.12.002.
38. R. Mirzoyan, P. Buzhan, B. Dolgoshein et al, «SiPM: on the Way at Becoming an Ideal Low Light Level Sensor» in: *Talk given IEEE Nucl. Sci. Symp. Med. Imaging Conf., Knoxville, USA, Knoxville, USA, 2010.*
39. D. McNally, V. Golovin, «Review of solid state photomultiplier developments by CPTA and photonique SA», *Nucl. Instruments Methods Phys. Res. Sect. A Accel. Spectrometers, Detect. Assoc. Equip.*, vol. 610, pp. 150–153, 2009. doi: 10.1016/j.nima.2009.05.140.
40. K. Linga, E. Godik, J. Krutov et al, «Novel sensor for ultrasensitive and single-molecule detection», in: J. Enderlein, Z.K. Gryczynski (Eds.), *Prog. Biomed. Opt. Imaging – Proc. SPIE*, p. 60920X, 2006. doi: 10.1117/12.647150.
41. K. Linga, E. Godik, J. Krutov et al, «Solid state photomultiplier: noise parameters of photodetectors with internal discrete amplification» in: M.J. Cohen, E.L. Dereniak (Eds.), *Proc. SPIE*, p. 61190K, 2006. doi: 10.1117/12.648755.
42. E. Levin, E. Shelegeda, V.E. Shubin et al, «Advances in the development of solid state photomultipliers for medical imaging» in: J. Hsieh, E. Samei (Eds.), *Med. Imaging 2008 Phys. Med. Imaging, Pts 1-3, SPIE*, p. 69130J, 2008. doi: 10.1117/12.772213.
43. H.N. Becker, W.H. Farr, D.Q. Zhu, «Radiation Response of Emerging High Gain, Low Noise Detectors», *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, vol. 54, pp. 1129–1135, 2007. doi: 10.1109/TNS.2007.894179.
44. M.A. Itzler, X. Jiang, B. Nyman, K. Slomkowski, «InP-based negative feedback avalanche diodes» in: M. Razeghi, R. Sudharsanan, G.J. Brown (Eds.), *Proc. SPIE*, p. 72221K, 2009. doi: 10.1117/12.814669.
45. Z. Sadygov, A.F. Zerrouk, A. Ariffin et al, «Performance of new Micro-pixel Avalanche Photodiodes from Zecotek Photonics», *Nucl. Instruments Methods Phys. Res. Sect. A Accel. Spectrometers, Detect. Assoc. Equip.* vol. 610, pp. 381–383, 2009. doi: 10.1016/j.nima.2009.05.123.
46. N. Anfimov, I. Chirikov-Zorin, A. Dovlatov et al, «Novel micropixel avalanche photodiodes (MAPD) with super high pixel density», *Nucl. Instruments Methods Phys. Res. Sect. A Accel. Spectrometers, Detect. Assoc. Equip.* vol. 628, pp. 369–371, 2011. doi: 10.1016/j.nima.2010.07.003.
47. Y. Musienko, A. Heering, «Studies of large dynamic range silicon photomultipliers for the CMS HCAL upgrade» in: *New Dev. Photodetection (NDIP 11)*, Lyon, Fr. 4–8 July 2011, URL: [http://ndip.in2p3.fr/ndip11/AGENDA/AGENDA-by-DAY/Presentations/5Friday/PM/ID83\\_Musienko.pdf](http://ndip.in2p3.fr/ndip11/AGENDA/AGENDA-by-DAY/Presentations/5Friday/PM/ID83_Musienko.pdf) (дата обращения: 14.12.2024).
48. C. Piemonte, «A new Silicon Photomultiplier structure for blue light detection», *Nucl. Instruments Methods Phys. Res. Sect. A Accel. Spectrometers, Detect. Assoc. Equip.* vol. 568, pp. 224–232, 2006. doi: 10.1016/j.nima.2006.07.018.
49. K. Yamamoto, K. Yamamura, K. Sato, «Development of Multi-Pixel Photon Counter (MPPC)», in: *2007 IEEE Nucl. Sci. Symp. Conf. Rec.*, IEEE, pp. 1511–1515, 2007. doi: 10.1109/NSSMIC.2007.4437286.
50. A.G. Stewart, V. Saveliev, S.J. Bellis et al, «Performance of 1 mm<sup>2</sup> Silicon Photomultiplier», *IEEE J. Quantum Electron.* vol. 44, pp. 157–164, 2008. doi: 10.1109/JQE.2007.910940.
51. P. Finocchiaro, A. Pappalardo, L. Cosentino et al, «Characterization of a Novel 100-Channel Silicon Photomultiplier – Part I: Noise», *IEEE Trans. Electron Devices.*, vol. 55, pp. 2757–2764, 2008. doi: 10.1109/TED.2008.2003996.
52. P. Finocchiaro, A. Pappalardo, L. Cosentino et al, «Characterization of a Novel 100-Channel Silicon Photomultiplier – Part II: Charge and Time», *IEEE Trans. Electron Devices.* vol. 55, pp. 2765–2773, 2008. doi: 10.1109/TED.2008.2003235.
53. E.B. Johnson, C.J. Stapels, M. McClish et al, «New developments for CMOS SSPMs», *2008 IEEE Nucl. Sci. Symp. Conf. Rec.* pp. 1516–1522, 2008. doi: 10.1109/NSSMIC.2008.4774701.

54. C. Dege, G. Prescher, T. Frach et al, «The digital Silicon Photomultiplier; A novel sensor for the detection of scintillation light» in: *IEEE Nucl. Sci. Symp. Conf. Rec.*, IEEE, 2009: pp. 2383–2386, 2009. doi: 10.1109/NSSMIC.2009.5402190.
55. P. Berard, M. Couture, P. Deschamps et al, «Performance measurement for a new low dark count UV-SiPM» in: *2011 IEEE Nucl. Sci. Symp. Conf. Rec.*, IEEE, 2011: pp. 544–547. doi: 10.1109/NSSMIC.2011.6154109.
56. C. Dietzinger, T.R. Ganka, W. Gebauer et al, «Silicon Photomultipliers with enhanced Blue-Light Sensitivity, Photodet», pp. 1–20, 2012. URL: <https://indico.cern.ch/event/164917/session/0/contribution/18/material/slides/0.pdf>.

## Solid-State Detectors of Optical Signals and Radiation. Part 1. Review of the Detector Designs and Characteristics

Vinogradov Sergey (P.N. Lebedev Physical Institute of the Russian Academy of Sciences,  
Moscow, Russia)

**Abstract.** The first part of the review presents the history of the development of solid-state detectors and the features of their designs. The main attention is paid to avalanche photodiodes and silicon photomultipliers, the most sensitive and therefore the most demanded solid-state detectors of low-photon optical signals and radiation.

**Keywords:** *photoelectric effect, photodiode, avalanche photodiode, APD, Geiger-mode APD, single-photon APD, silicon photomultiplier, SiPM.*

*С.Л.Виноградов (с.н.с., к.ф.-м.н.) – Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН,  
г. Москва*

*Контакты: тел. +7 499 132-62-86; [vinogradovsl@lebedev.ru](mailto:vinogradovsl@lebedev.ru)*