
СРЕДСТВА ИЗМЕРЕНИЙ

УДК 621.382

СРЕДСТВА РЕГИСТРАЦИИ ИМПУЛЬСНОГО ВИДИМОГО ИЗЛУЧЕНИЯ МАЛОЙ ИНТЕНСИВНОСТИ.

ЧАСТЬ 1. ОСОБЕННОСТИ И ВОЗМОЖНОСТИ МНОГОКАНАЛЬНЫХ ФОТОПРИЕМНИКОВ С ВНУТРЕННИМ УСИЛЕНИЕМ. ОБЗОР

Дворников О.В.¹, Чеховский В.А.², Дятлов В.Л.¹

¹ Минский научно-исследовательский приборостроительный институт, г. Минск, Республика Беларусь

² Национальный научно-учебный центр физики частиц и высоких энергий БГУ,
г. Минск, Республика Беларусь

*Проанализированы основные типы современных фотоприемников, применяемых для регистрации импульсного оптического излучения видимой области спектра. Сделан вывод о том, что для создания многоканальных оптико-электронных систем с однофотонным разрешением целесообразно использовать кремниевые фотоэлектронные умножители.
(E-mail: oleg_dvornikov@tut.by)*

Ключевые слова: кремниевый фотоэлектронный умножитель, лавинный фотодиод, однофотонное разрешение.

Введение

При создании различных оптико-электронных приборов возникает проблема регистрации видимого излучения малой интенсивности, которая обычно решается как путем совершенствования фотоприемников, преобразующих фотоны в электрический сигнал, так и аналоговых устройств, осуществляющих предварительную обработку сигналов фотоприемников (преобразование ток-напряжение, усиление, фильтрацию и др.).

Ранее в качестве фотоприемников в основном применялись вакуумные фотоэлектронные умножители (*Vacuum Photo-Multiplier, VPM*) и *p-i-n* фотодиоды [1, 2].

Преимуществами *p-i-n* фотодиодов являются высокое быстродействие и надежность, малые габариты и стоимость, работоспособность в магнитном поле, однако низкий уровень их выходного сигнала не позволяет фиксировать импульсы малой интенсивности. Кро-

ме того, разрешающая способность *p-i-n* фотодиодов ухудшается при воздействии проникающей радиации.

VPM обладают усилением и быстродействием, достаточными для регистрации отдельных фотонов, так называемым однофотонным разрешением. В то же время *VPM* характеризуются высокими стоимостью и уровнем напряжения питания, вплоть до 20 кВ, чувствительностью к магнитному полю.

В последнее время появился ряд областей: медицинская интроскопия, в том числе позитронно-эмиссионная томография, аппаратура экспериментальной и астрофизики, в которых необходимо с большой пространственной и временной точностью фиксировать отдельные фотоны с энергиями, соответствующими видимой области оптического спектра. К таким устройствам предъявляются следующие требования:

- однофотонное разрешение;
- большое количество регистрирующих каналов;

– малые габариты, потребляемая мощность, стоимость каждого канала;

– сохранение работоспособности при воздействии проникающей радиации (радиационная стойкость) и магнитного поля;

– для применения в качестве источников фотонов некоторых типов сцинтилляторов – высокая чувствительность в синей области спектра [3].

p-i-n фотодиоды и *VPM* не удовлетворяют в полной степени всем указанным требованиям [4, 5].

Целью цикла статей является комплексное изучение средств регистрации импульсного оптического излучения видимой области спектра, в том числе: анализ современных фотоприемников и считывающей электроники; рассмотрение схемотехнических особенностей и параметров разработанного комплекта специализированных интегральных микросхем (ИС) и оптико-электронных устройств, включающих фотоприемники и созданные ИС.

В первой статье цикла приведен аналитический обзор по конструктивным особенностям и параметрам фотоприемников с внутренним усилением.

Лавинные фотодиоды

Увеличение радиационной стойкости, многоканальности, нечувствительности к магнитному полю может быть достигнуто при совершенствовании как вакуумных (мульти-

анодных и гибридных *VPM*), так и полупроводниковых фотоприемников [6]. Наиболее перспективными среди них являются такие фотоприемники с внутренним усилением, как лавинные фотодиоды (*Avalanche Photo Diode, APD*), гибридные лавинные фотодетекторы (*Hybrid Avalanche Photo Detector, HAPD*), кремниевые фотоумножители (*Silicon Photo-multiplier, SiPM*).

В *APD* усиление генерируемого фототока происходит за счет ударной (лавинной) ионизации носителей заряда в сильном электрическом поле внутри области пространственного заряда (ОПЗ) *p-n* перехода. Преимуществами *APD* являются высокое быстродействие, широкий динамический диапазон, более низкое, чем в *VPM*, напряжение питания (смещения), малые размеры, низкая чувствительность к воздействию магнитного поля и радиации. Коэффициент усиления *APD*, работающих в пропорциональном режиме, в котором выходной сигнал пропорционален интенсивности регистрируемого излучения, составляет от 10^2 до 10^3 . К сожалению, дальнейшее увеличение усиления *APD* чрезмерно затруднено из-за наступления пробоя *p-n* перехода (лавинного умножения носителей заряда в ОПЗ при отсутствии регистрируемого излучения). Таким образом, хотя *APD* и называются «лавинными», их напряжение смещения (V_{BIAS}) не должно превышать напряжение лавинного пробоя используемого *p-n* перехода. Типовые параметры различных *APD* приведены в таблице 1.

Таблица 1

Основные параметры *APD* при $G = 50$ и $T = 18\text{ }^\circ\text{C}$ [7]

Фирма изготовитель	Параметры лавинных фотодиодов							
	C_D , пФ	V_{BIAS} , В	I_{DARK} , нА	F	QE , % ($\lambda=480$ нА)	S_D , см ²	$\frac{1}{G} \frac{dG}{dV_{BIAS}}$, %/В	$\frac{1}{G} \frac{dG}{dT}$, %/°C
<i>HPK</i>	120 ÷ 30	200 ÷ 215	4 ÷ 10	2	80 ÷ 85	0,2	6–7	–3
<i>HPK</i>	110 ÷ 120	350 ÷ 400	0,2	2	85	0,2	3	–2,5
<i>EG&G</i>	20 ÷ 30	300	30	2,2	80	0,25	1,5	–3

Условные обозначения и сокращения: *HPK* – *Hamamatsu Photonics K.K.*; *EG&G* – *EG&G Optoelectronics*; G – коэффициент усиления; T – температура; C_D – емкость фотодетектора; I_{DARK} – темновой ток; F – коэффициент избыточного шума; QE – квантовая эффективность фотодетектора (вероятность генерации фотоном свободного но-

сителя, который достигнет область умножения); λ – длина волны излучения; S_D – площадь фотодетектора.

Коэффициент избыточного шума F описывает шум лавинного фотодиода, появляющийся вследствие флуктуаций коэффициента усиления G [8]:

$$I_{NPH} = \sqrt{\int_{f_1}^{f_2} S_{NPH}^2 df}, \quad (1)$$

$$S_{NPH}^2 = 2qI_{PH0}G^2(V_{BIAS})F(V_{BIAS}), \quad (2)$$

$$G(V_{BIAS}) = \frac{I_{PH}(V_{BIAS})}{I_{PH0}}, \quad (3)$$

где I_{NPH} – среднеквадратическое значение тока шумов в полосе пропускания (от f_1 до f_2) считывающей электроники, соединенной с фотопри-

емником; S_{NPH} – спектральная плотность шума фототока; f – частота; q – заряд электрона; I_{PH} – величина фототока; I_{PH0} – величина фототока в области малого напряжения смещения, в которой отсутствует зависимость $I_{PH} = f(V_{BIAS})$ (рисунок 1).

Наиболее важные зависимости параметров от режимов и условий работы иллюстрируют рисунки 1–6 [8] для APD типа S5345 фирмы Hamamatsu с большой (обозначен на рисунках HC) и малой (LC) емкостью и C30626E фирмы EG&G.

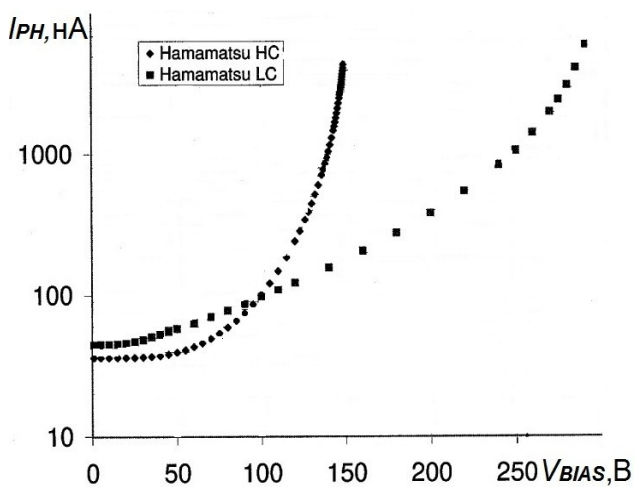


Рисунок 1 – Зависимость фототока от напряжения смещения

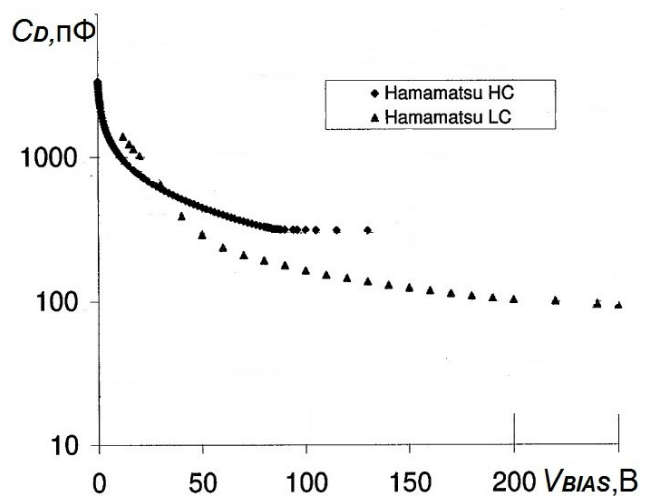


Рисунок 2 – Зависимость емкости от напряжения смещения

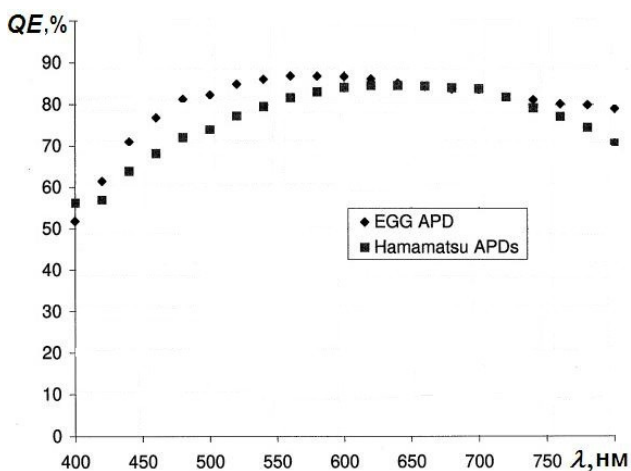


Рисунок 3 – Зависимость квантовой эффективности от длины волны излучения

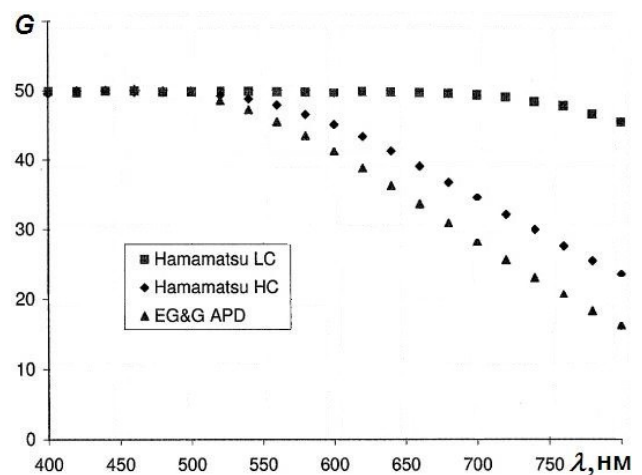


Рисунок 4 – Зависимость коэффициента усиления от длины волны излучения

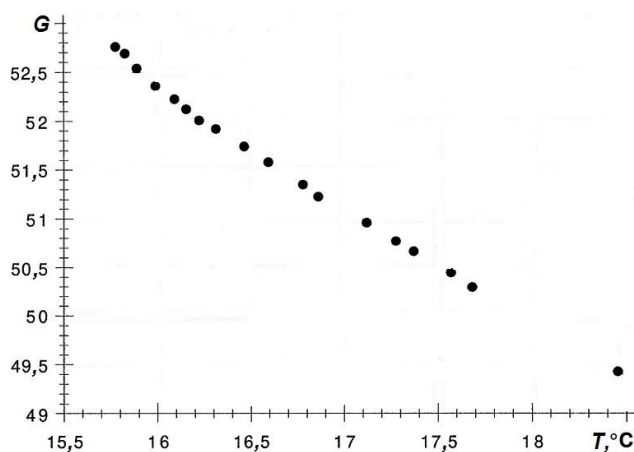


Рисунок 5 – Зависимость коэффициента усиления от температуры

Важным условием повышения квантовой эффективности полупроводникового фотодиода является формирования на его поверхности просветляющего покрытия, уменьшающего коэффициент отражения излучения, и обеспечение толщины полупроводниковой области, в которой происходит фотоэлектронное преобразование, большей, чем длина поглощения излучения. В связи с тем, что длина поглощения и коэффициент отражения зависят от длины волны регистрируемого излучения [4], то квантовая эффективность отличается на разных участках спектра видимого излучения (рисунок 3). Для увеличения QE в голубой области спектра активные области фотодиода должны иметь небольшую глубину залегания, а толщина ОПЗ в рабочем режиме – быть немного больше длины поглощения излучения [4].

Как следует из рисунка 1 и соотношения (3), коэффициент усиления G существенно возрастает при увеличении напряжения смещения, при этом также увеличивается коэффициент избыточного шума, температурная и режимная нестабильность усиления и допустимый технологический разброс величины G . Таким образом, для регистрации излучения малой интенсивности с помощью APD необходимо либо выбирать их режим работы с большим усилением (около 1000) и разрабатывать сложные схемы режимной и температурной стабилизации, либо устанавливать меньшую величину G (50–100), но совершенствовать схемы обработки сигналов. К сожалению, требуемые параметры опикоэлектронных приборов в ряде случаев достигаются только путем применения шумоподавляющих фильтров и уменьшения температуры са-

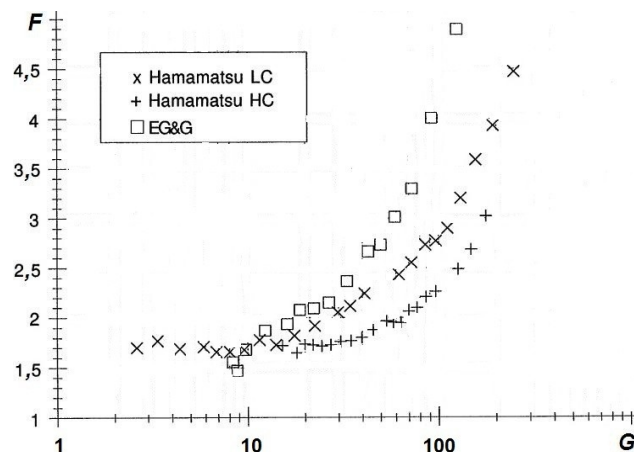


Рисунок 6 – Зависимость коэффициента избыточного шума от усиления

мого APD [9] и головного транзистора предварительного усилителя, например, с помощью термоэлектрического охлаждения как в микросхеме $A250CF$ фирмы *Amptek*. Такие малошумящие устройства характеризуются большими габаритами и потребляемой мощностью, относительно высокой ценой и низким быстродействием.

Гибридные лавинные фотодетекторы [5], [10]

Гибридный лавинный фотодетектор (рисунок 7) состоит из прозрачного окна, совмещенного с фотокатодом, вакуумного промежутка и APD , заменяющего набор динодов обычного фотоумножителя. Фотоэлектрон, появившийся в результате взаимодействия фотона с фотокатодом, после ускорения под действием электрического поля, созданного высоковольтным (до 20 кВ) напряжением в вакуумном промежутке, теряет полученную энергию в ОПЗ APD и генерирует электронно-дырочные пары. При дополнительном лавинном усилении, достигающем 100, общее усиление $HAPD$ превышает $3 \cdot 10^5$. По основным характеристикам (потребляемая мощность, величина высоковольтного напряжения питания, усиление, быстродействие и др.) $HAPD$ близки к традиционным VPM , однако благодаря более простой конструкции цена $HAPD$ значительно ниже. Кроме того, конструкция $HAPD$ допускает реализацию многоканального фотоприемника и сдвиг максимума QE в голубую область спектра.

Так, в $HAPD$ фирмы *Hamamatsu*, показанном на рисунке 7, в качестве фотодетекторов использовано 4 сегмента, каждый из которых

содержит матрицу 6×6 лавинных фотодиодов площадью 5×5 мм²; таким образом один гибридный фотодетектор имеет 144 регистрирующих излучение канала.

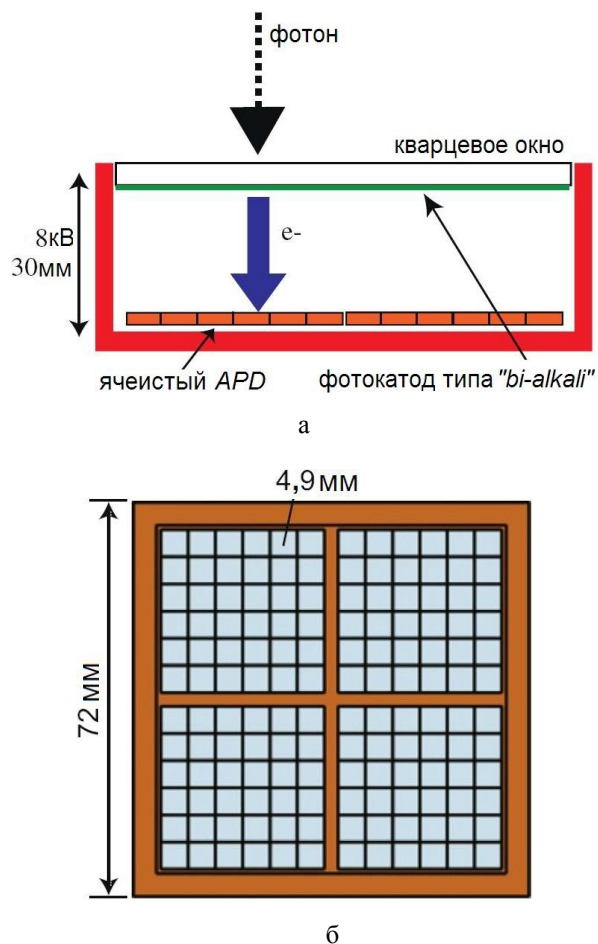


Рисунок 7 – HAPD фирмы Hamamatsu [5, 11]: а – упрощенный вид конструкции; б – вид сверху

Применение разных типов фотокатодов (обыкновенного и улучшенного) позволяет получить разную квантовую эффективность при отличающейся стоимости HAPD. Измеренное значение усиления HAPD фирмы Hamamatsu составляет $9,1 \cdot 10^4$, отношение сигнал/шум – 16,4 при напряжении питания 8 кВ. Фотодетектор сохраняет однофотонное разрешение после воздействия потока нейтронов $5 \cdot 10^{11}$ см⁻² с энергией 370 кэВ.

Таким образом, современные HAPD обеспечивают многоканальность, высокое усиление и быстродействие, достаточные для регистрации отдельных фотонов в голубой области спектра. К их недостаткам можно отнести необходимость применения высоковольтного (от 7 до 20 кВ) напряжения питания и чув-

ствительность к сильным магнитным полям, ориентировочно превышающим 2 Тл.

Кремниевые фотоумножители

Актуальным направлением улучшения фотоприемников с внутренним усилением является использование *p-n* перехода, работающего при напряжении выше пробивного, т.е. в режиме гейгеровского разряда. Такие устройства, названные однофотонными лавинными фотодиодами (*Single Photon Avalanche Diode, SPAD*), способны регистрировать одиночные фотоны с высокой эффективностью [11]. В гейгеровском режиме работы сигнал от одного фотона, поступающий на 50-омную нагрузку, может составлять несколько вольт. Для регистрации следующего фотона необходимо погасить образовавшуюся лавину, причем для предотвращения деградации параметров фотодетектора восстановление исходного состояния после регистрации фотона необходимо выполнить максимально быстро. Чаще всего гейгеровский разряд гасится с помощью резистора (пассивное гашение) или электронных схем гашения лавины и восстановления рабочего напряжения на *p-n* переходе (активное гашение) [3]. Недостаток SPAD – фиксированная амплитуда выходного сигнала, независимая от величины внешнего воздействия, нечувствительность детектора к внешнему воздействию в период после срабатывания и до момента восстановления, высокая величина темнового тока, прямо пропорциональная площади *p-n* перехода [11].

Указанные недостатки SPAD в большей степени устранены в кремниевом фотоумножителе (*SiPM*; другие названия – многопиксельный счетчик фотонов, микропиксельный лавинный фотодиод). Он представляет собой фотоприемник, содержащий на одной кремниевой подложке матрицу ячеек, каждая из которых включает SPAD и резистор с сопротивлением от 0,2 до 2 МОм (рисунок 8) [4, 11].

SiPM содержит от сотен до десятков тысяч параллельно соединенных ячеек с размером сторон от единиц до десятков микрометров и 2 внешних вывода, с помощью которых устанавливается напряжение смещения и снимается токовый сигнал. Напряжение всех ячеек одинаково и на несколько вольт превышает напряжение пробоя *p-n* перехода (V_{BR}). Некоторые конструкции ячеек показаны на рисунках 9, 10 [4, 12].

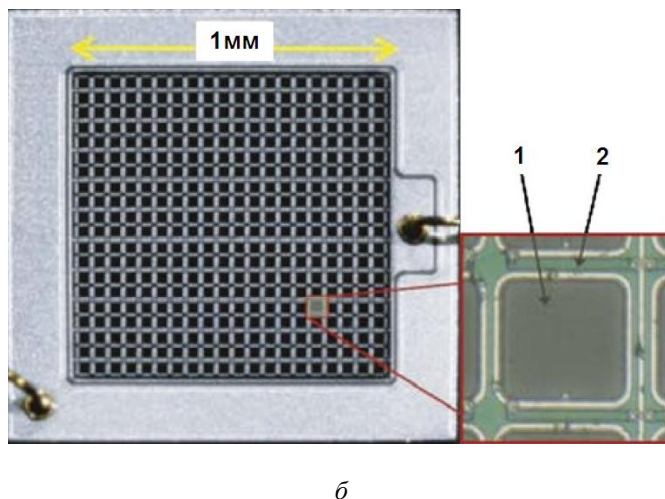
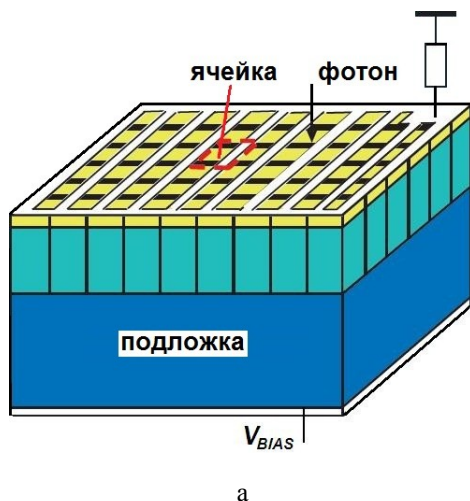


Рисунок 8 – Конструкция SiPM: а – упрощенный вид [11]; б – фотография кристалла и отдельной ячейки [4]; 1 – лавинный фотодиод; 2 – гасящий резистор

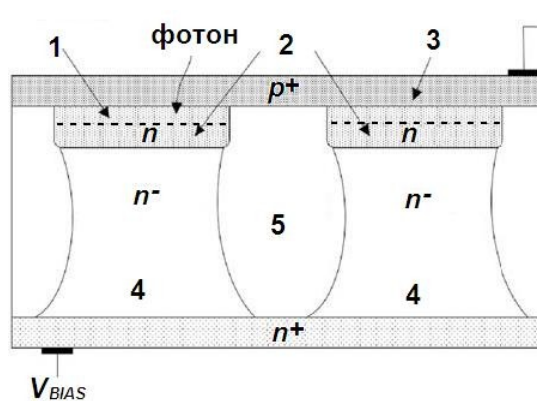
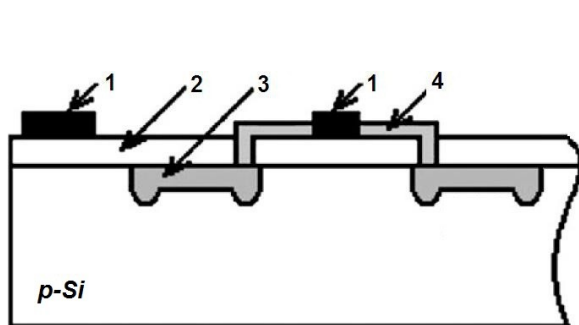


Рисунок 9 – Конструкция ячейки SiPM с пленочным гасящим резистором [4]: 1 – металлический электрод, 2 – окисел кремния, 3 – p-n переход ячейки, 4 – гасящий резистор

Рисунок 10 – Конструкция ячейки SiPM с полупроводниковым гасящим резистором [12]: 1 – ОПЗ, 2 – катоды, 3 – общий анод, 4 – гасящий резистор, 5 – изоляция

Поглощение фотона вызывает генерацию носителей и их лавинное умножение в отдельной ячейке. В процессе развития лавины растет ток, падение напряжение на резисторе и, следовательно, уменьшается падение напряжения на p-n переходе. Таким образом, резистор гасит лавинное умножение заряда за счет отрицательной обратной связи по напряжению. При дальнейшем уменьшении тока лавины напряжение на диоде возвращается к начальному значению V_{BIAS} и ячейка готова к следующему циклу заряд-разряд. Заметим, что сигнал каждой ячейки логический и не зависит от числа поглощенных фотонов, однако выходной сигнал SiPM представляет собой сумму одинаковых сигналов ячеек и пропорцио-

нален количеству фотонов, попавших в активную область прибора, а сам SiPM является аналоговым детектором излучения.

Качество SiPM обычно описывается следующими параметрами: эффективностью регистрации фотонов (*photon detection efficiency, PDE*), коэффициентом усиления, темновым током, временем срабатывания, динамическим диапазоном и линейностью [11]:

$$PDE = \frac{N_S}{N_{PH}} = QE \cdot FF \cdot GE, \quad (4)$$

$$G = \frac{C_{CELL}(V_{BIAS} - V_{BR})}{q}, \quad (5)$$

где N_S – среднее число сработавших ячеек, в которых возникла лавина; N_{PH} – среднее число фотонов во вспышке; FF – коэффициент заполнения (*fill factor*) – отношение активной области к общей площади *SiPM*; GE – вероятность возникновения гейгеровского разряда (*Geiger efficiency*), зависящая от величины превышения напряжения пробоя ($V_{BIAS}-V_{BR}$) и существенно большая для электронов (GE_N), чем дырок (GE_P), при небольшой напряженности электрического поля, $GE_N/GE_P > 2$ при напряженности электрического поля менее $6 \cdot 10^5$ В/см; C_{CELL} – емкость ячейки.

Отметим следующие особенности конструкции и параметров [11]:

- коэффициент заполнения зависит от размеров ячейки и ее топологии, снижается с уменьшением размера ячейки и составляет от 30 до 80 % для ячеек с размером от 30×30 до 100×100 мкм;

- в отличие от *APD* (рисунок 1) коэффициент усиления *SiPM* почти линейно зависит от превышения напряжения пробоя [13, 14], поэтому требования к стабильности напряжения смещения *SiPM* менее жесткие;

- технологический разброс коэффициента усиления, обусловленный разбросом емкости ячейки и пробивного напряжения, обычно не превышает 10 % и может быть скомпенсирован подстройкой величины напряжения смещения;

- на величину выходного сигнала *SiPM* влияют эффекты последействия, вызывающие появление вторичных токовых импульсов, и паразитного оптического взаимодействия между ячейками [11]. Паразитное оптическое взаимодействие наступает в том случае, когда релаксация «горячего» носителя заряда, появившегося в ячейке благодаря действию сильного электрического поля, происходит с эмиссией фотона, который достигает соседней ячейки и порождает в ней лавину. Наличие паразитного оптического взаимодействия можно определить по присутствию в темновом токе нескольких составляющих с кратной амплитудой. Для минимизации указанного эффекта обычно осуществляют оптическую экранировку ячеек разделением их канавками различной формы с непрозрачным материалом [12, 15, 16] или уменьшают напряжение смещения [13, 14]. Вторичные импульсы последействия обусловлены зарядами лавинного процесса, которые временно захватываются ловушками и освобождаются до затухания первичной лавины. По форме вторичные паразитные импульсы практически не отличаются от первичных, а их ампли-

туда зависит от динамических характеристик ячейки и времени освобождения ловушек [6];

- тепловая генерация носителей заряда в ОПЗ приводит к появлению выходного сигнала (темнового тока) *SiPM* при отсутствии излучения. Величина темнового тока определяется качеством кремния (временем жизни неосновных носителей заряда), шириной ОПЗ и напряженностью электрического поля в ней (величиной напряжения смещения). Так как темновой ток и коэффициент усиления *SiPM* пропорциональны напряжению смещения, то при выборе рабочей точки *SiPM* необходим поиск компромиссного сочетания параметров. К увеличению темнового тока приводят эффекты последействия и паразитного оптического взаимодействия;

- выходной сигнал *SiPM* пропорционален интенсивности излучения до тех пор, пока срабатывание каждой ячейки преимущественно будет вызвано одним фотоном. В связи с указанным, диапазон линейной зависимости выходного сигнала от количества фотонов определяется числом ячеек [4]:

$$N_S = N_{CELL} \left(1 - \exp \left(- \frac{PDE \cdot N_{PH}}{N_{CELL}} \right) \right), \quad (6)$$

где N_{CELL} – число ячеек фотодетектора.

При высокой интенсивности вспышки наступает насыщение выходного сигнала *SiPM*:

- время восстановления исходного состояния ячейки после образования лавины зависит от величины емкости ячейки и сопротивления гасящего резистора, последнее не может быть выбрано малым и поэтому время восстановления ячейки (длительность фронта спада выходного сигнала) может превышать 100 нс. Для продолжительного импульса излучения ячейки могут срабатывать несколько раз и возникает зависимость выходного сигнала от формы импульса излучения [4];

- воздействие проникающей радиации (протонов, нейтронов, быстрых электронов) на *SiPM* вызывает, как и в других полупроводниковых приборах, появление дефектов кристаллической решетки и, следовательно, увеличение темнового тока и вероятности возникновения импульсов последействия.

Типовые параметры современных *SiPM* приведены в таблице 2, а наиболее важные зависимости параметров от режимов и условий эксплуатации иллюстрируют рисунки 11,

12 для трех фотодетекторов, отличающихся размером ячейки [17]. Закрашенные круги на рисунках соответствуют данным, получен-

ным при отсутствии магнитного поля, а пустые – при наличии магнитного поля, величиной 7 Тл.

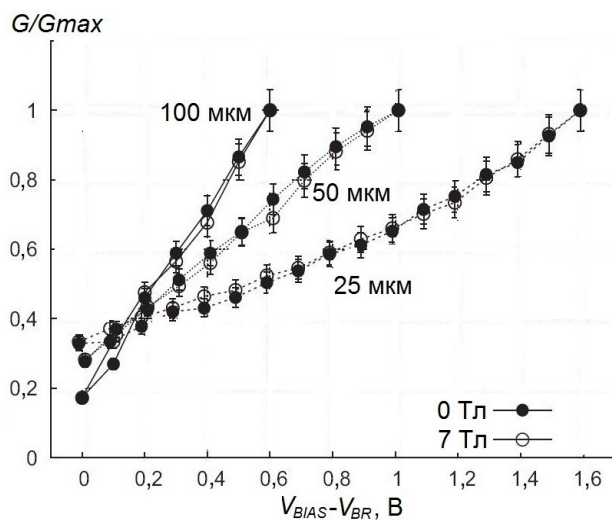


Рисунок 11 – Относительное изменение усиления в зависимости от превышения напряжения пробоя для SiPM таблицы 2 [17]

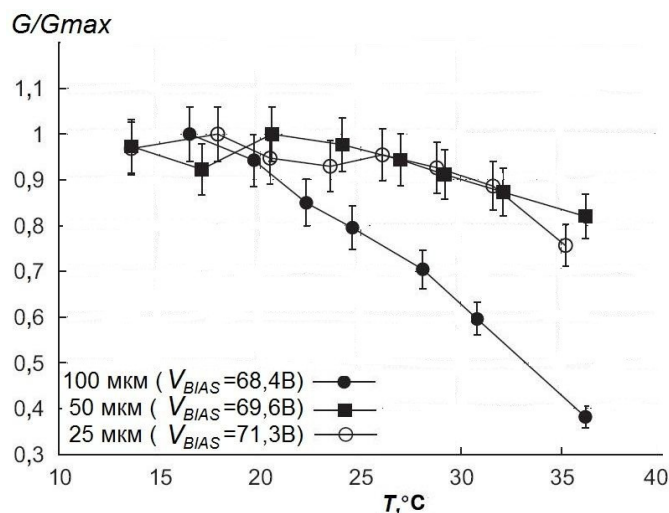


Рисунок 12 – Относительное изменение усиления в зависимости от температуры для SiPM таблицы 2 [17]

Таблица 2

Основные параметры SiPM [17]

Тип	Параметры								
	$S_D, \text{мм}^2$	N_{CELL}	Размер ячейки, мкм	$FF, \%$	$PDE, \%$	V_{BIAS}, V		$\frac{1}{G} \frac{dG}{dV_{BIAS}}, \%/V$	$\frac{1}{G} \frac{dG}{dT}, \%/^{\circ}C$
						минимальное	максимальное		
S10362-11-100P	1x1	100	100	78,5	65	68,1	68,7	230	-2,7
S10362-11-050P	1x1	400	50	61,5	50	68,6	69,6	110	-0,7
S10362-11-025P	1x1	1600	25	30,8	25	70,3	71,9	70	-1,0
MPPC-33-2x2-50 5900	6x6 (матрица 2x2)	3600x4	50	61,5	50	68,5	71,5	-	-

Таким образом, преимуществами SiPM являются высокая квантовая эффективность, однофотонное разрешение, нечувствительность к магнитному полю, компактность, низкое напряжение смещения. К недостаткам можно отнести температурную зависимость темнового тока и усиления, недостаточную для некоторых применений радиационную стойкость. Из-за невозможности создания SiPM с наилучшим сочетанием всех па-

раметров их оптимизация выполняется с учетом конкретной области применения. Так, от детекторов черенковского излучения главным образом требуется регистрация одиночных фотонов, для чего SiPM должны содержать небольшое количество ячеек большой площади [12]. В то же время для позитронно-эмиссионной томографии необходимы детекторы с широким динамическим диапазоном и для этих применений проектируют

SiPM с максимальным количеством ячеек минимальных топологических размеров [18].

Заключение

На основе анализа конструкций и параметров фотоприемников, применяемых для регистрации импульсного оптического излучения видимой области спектра, установлено, что реализация нечувствительных к магнитному полю опико-электронных систем целесообразна на основе:

– кремниевых фотоэлектронных умножителей для одно- и многоканальных устройств с однофотонным разрешением;

– охлаждаемых лавинных фотодиодов и головных элементов считывающей электроники для малоканальных устройств, регистрирующих десятки фотонов.

Список использованных источников

1. Фотоприемники видимого и ИК диапазонов / Р.Д. Киес [и др.] ; пер. с англ. – М. : Радио и связь, 1985. – 328 с.
2. Полупроводниковые фотоприемники: Ультрафиолетовый, видимый и ближний инфракрасный диапазоны спектра / И.Д. Анисимова [и др.]. – М. : Радио и связь, 1984. – 216 с.
3. *Spanoudaki, V.C.* Photo-Detectors for Time of Flight Positron Emission Tomography (ToF-PET) / V.C. Spanoudaki, C.S. Levin. – <http://www.mdpi.com/1424-8220/10/11/10484>.
4. *Korpar, S.* Status and perspectives of solid state photon detectors / S. Korpar // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research. – 2011. – Vol. A639. – P. 88–93.
5. *Toru, I.* Status and perspectives of vacuum-based photon detectors / I. Toru // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research. – 2011. – Vol. A639. – P. 137–143.
6. *Danilov, M.* Novel photo-detectors and photo-detector systems / M. Danilov // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research. – 2009. – Vol. A604. – P. 183–189.
7. *Cavallari, F.* Progress on avalanche photodiodes for the CMS electromagnetic calorimeter / F. Cavallari // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research. – 1998. – Vol. 409. – P. 564–569.
8. *Karar, A.* Characterization of avalanche photodiodes for calorimetry applications / A. Karar, Y. Musienko, J.C. Vanel // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research. – 1999. – Vol. 428. – P. 413–431.
9. Application of avalanche photodiodes as a readout for scintillator tile-fiber systems / C. Cheshkov [et al.] // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research. – 2000. – Vol. 440. – P. 38–45.
10. Study of a 144 channel multi-anode hybrid avalanche photo-detector for the Belle II RICH counter / I. Adachi [et al.] // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research. – 2011. – Vol. A639. – P. 103–106.
11. Кремниевый фотоэлектронный умножитель. Новые возможности / С. Клемин [и др.] // Электроника: Наука. Технология. Бизнес. – 2007. – № 8. – С. 80–86.
12. *Miyamoto, H.* SiPM development for the imaging Cherenkov and fluorescence telescopes / H. Miyamoto, M. Teshima // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research. – 2010. – Vol. A623. – P. 198–200.
13. Test of micropixel avalanche photodiodes / N. Anfimov [et al.] // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research. – 2007. – Vol. A572. – P. 413–415.
14. Beam test of Shashlyk EM calorimeter prototypes readout by novel MAPD with super high linearity / N. Anfimov [et al.] // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research. – 2010. – Vol. 617. – P. 78–80.
15. Demonstration of a silicon photomultiplier with bulk integrated quenching resistors on epitaxial silicon / G.Q. Zhang [et al.] // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research. – 2010. – Vol. A621. – P. 116–120.
16. Studies on multiplication effect of noises of PPD and a proposal of a new structure to improve the performance / H. Oide [et al.] // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research. – 2010. – Vol. A623. – P. 324–326.
17. Performance evaluation of SiPM photodetectors for PET imaging in the presence of magnetic fields / S. Espan [et al.] // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research. – 2010. – Vol. A613. – P. 308–316.
18. Advantages and pitfalls of the silicon photomultiplier (SiPM) as photo detector for the next generation of PET scanners / A.D. Guerra [et al.] // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research. – 2010. – Vol. 617. – P. 223–226.

Dvornikov O.V., Tchekhovski V.A., Diatlov V.L.

Equipments to single photon registration. Part 1. Features and possibilities of multi-channel photodetectors with intrinsic amplification. (Review)

The main types of the modern photo detectors applied to single photon registration are analyzed. It is offered to use silicon photomultipliers for production of multi-channel optoelectronic systems with the single photon resolution. (E-mail: oleg_dvornikov@tut.by)

Key words: silicon photomultiplier, avalanche photo diode, single photon resolution.

Поступила в редакцию 06.10.12.