

Твердотельные детекторы оптических сигналов и радиации

Часть 1.2. Обзор конструкций и характеристик детекторов (продолжение)

В продолжении первой части обзора [1] рассматривается дальнейшая история разработок твердотельных детекторов и особенно 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.

Ключевые слова:

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

С.Л.Виноградов

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

Твердотельные фотодетекторы с пространственным разрешением. Общая цель разработок таких фотодетекторов – достичь максимального пространственного разрешения, обеспечить и большое число пикселей, и большую площадь матрицы, а также быстрое считывание информации со всех пикселей, и все это в сочетании с высокой пороговой чувствительностью.

Приборы с зарядовой связью

Прибор с зарядовой связью – ПЗС или ПЗС-матрица (charge coupled device, CCD) была изобретена в Bell Labs У.С. Бойлом и Г.Е. Смитом в 1969 году [2]. Применение ПЗС в качестве детектора изображений было очевидно, как уже в 1970 году сообщили Томпсетт, Амелио и Смит [3]. Первые ПЗС использовали сильно обедненную МОП-структуру р-типа проводимости и были очень шумными от большого темнового тока из-за

генерации электронов дефектами на границе раздела Si-SiO₂. Поверхностные дефекты были причиной не только темновой генерации, но также захвата и рекомбинации электронов на них в процессе переноса сигнального заряда вдоль поверхности Si-SiO₂.

Чтобы избежать влияния ловушек на интерфейсе Si-SiO₂, особенно на эффективность передачи заряда, в Bell Labs была разработана ПЗС-матрица со скрытым каналом – глубокой диффузией n+ типа в эпитаксиальном слое p-типа, которая сформировала потенциальную яму для электронов на некотором удалении от поверхности Si-SiO₂ [4], как проиллюстрировано на рис. 1.

В ранних ПЗС-матрицах использовалась полнокадровая архитектура. Это означает, что ПЗС-ячейка служит и фотоприемником (в то время как сигналы синхронизации ПЗС-матрицы «замораживаются» во время интегрирования), и областью передачи заряда, через которую проходят сигнальные зарядовые пакеты от других пикселей. Потенциальные ямы, хранящие сигнальные электроны в каждом пикселе, полностью исчерпываются в начале каждого периода интегрирования. Последовательный перенос заряда между ячейками в трехтактном режиме работы ПЗС показан на рис. 1. Далее, в выходном усилителе обычно используется алгоритм коррелированной двойной выборки для подавления шума считывания *kTC*.

Несмотря на множество проблем с темновым шумом и шумом считывания, неэффективностью и задержками переноса заряда, большой площадью нечувствительной области, занятой управляющими металлическими шинами к каждой ячейке матрицы, изобретение ПЗС стало революцией в области электронной визуализации оптических изображений. Невероятно, но эти недостатки были практически устранены в ходе оптимизации конструкций ПЗС с 1980-х по 2000-е гг.

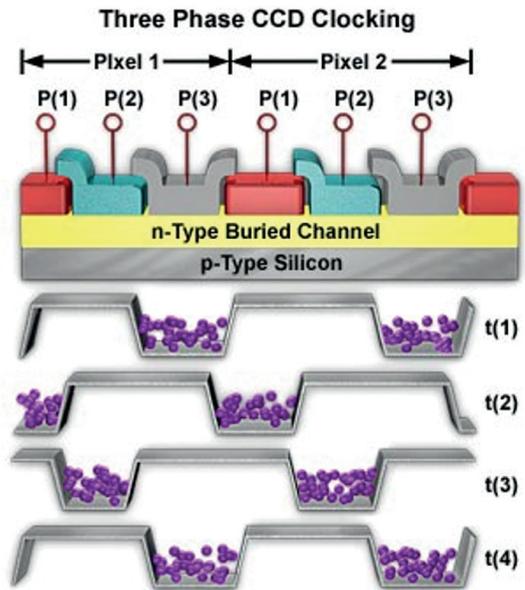


Рис. 1. Конструкция и принцип работы ПЗС (<https://hamamatsu.magnet.fsu.edu/articles/threephase.html>).

Одним из ключевых элементов оптимизации стала конструкция фотодиода с закреплением (фиксацией) уровня Ферми (pinned photodiode, PPD), разработанная Нобукадзу Тераниши с коллегами из компании NEC в 1980 г. [5]. Этот фотодиод служил фоточувствительной ячейкой матрицы изображений, в которой накапливались фотоэлектроны в процессе регистрации света, и он был так встроен в МОП-структуру, что область накопления электронов n-типа была полностью изолирована от поверхности Si-SiO₂ высоколегированным слоем p+ типа (pinning layer), что позволяло полностью блокировать влияние поверхностных дефектов на работу фотодиода. Потенциал в яме накопления также был зафиксирован и не управлялся внешним затвором, а считывание заряда накопленных электронов осуществлялось в электрод стока n+ типа (floating diffusion) при подаче напряжения на полевой затвор переноса (transfer gate), как показано на рис. 2.

Стоит отметить количественный результат этих усилий в понижении темнового шума:

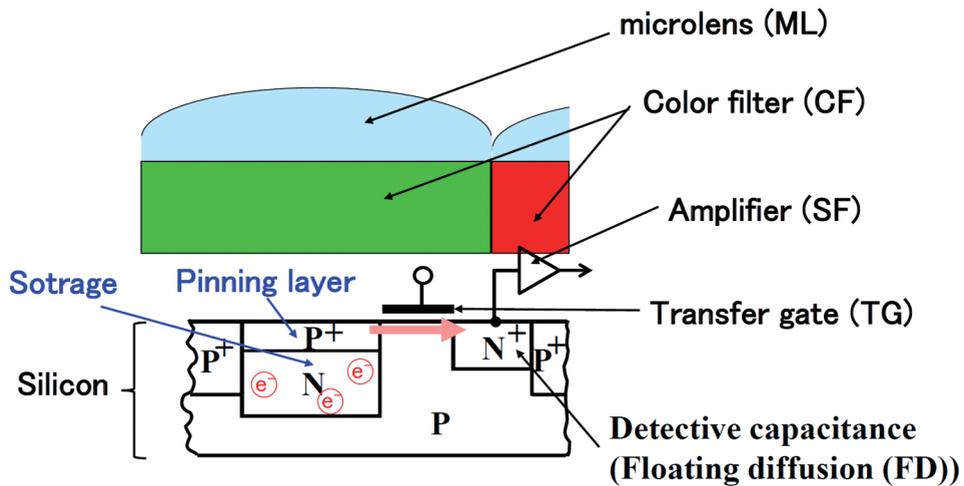


Рис.2. Конструкция КМОП-матрицы изображений на основе фотодиода с закреплением уровня Ферми [5].

если первые ПЗС с поверхностным каналом имели темп темновой генерации около $30 \text{ МГц}/\text{мм}^2$, то ПЗС со скрытым каналом – $0,6 \text{ МГц}/\text{мм}^2$, а ПЗС на основе фотодиода с закреплением уровня Ферми – $25 \text{ кГц}/\text{мм}^2$ [5].

КМОП-матрицы

Современный тип КМОП-матрицы изображений был разработан Эриком Фоссумом с коллегами из NASA Jet Propulsion Laboratory в 1993 г. [6]. В нем удачные разработки прошлых лет – фотодиод с закреплением уровня Ферми и активный усилитель зарядового сигнала на полевых транзисторах (active pixel sensor) – сочетались с использованием новых в тот момент возможностей КМОП-технологии по высокой степени интеграции и плотности элементов больших интегральных схем.

Дальнейшие улучшения параметров относились к одновременному повышению пространственного разрешения (плотности пикселей) и квантовой эффективности матриц.

Размеры пикселей удалось снижать в течение многих лет со средней скоростью около 50% за 3,5 года – от сотен микрон в 1980-х гг. до около 1 мкм в 2010-х гг. благодаря разви-

тию КМОП-технологии. Вместе с размером снижалась и емкость пикселя, и шум считывания $\sim kTC$, в результате этот шум был снижен примерно до среднеквадратичного значения в несколько электронов на пиксель.

Проблема эффективности на малых пикселях сначала была частично решена за счет использования микролинз на фронтальной поверхности матриц (рис.2), что дало повышение эффективности с 30% до 60–80%. Затем – за счет перехода к технологии ввода света с обратной стороны, т. е. со стороны кремниевой подложки, сошлифованной до микронных толщин, что дало повышение геометрической эффективности почти до 100%, при этом квантовая эффективность превысила 90% (рис.3).

Квантовый сенсор изображений

Очевидное понижение шумов пикселя ПЗС и КМОП матрицы с уменьшением размера пикселя и, соответственно, его емкости, до некоторых пор оставалось просто количественным улучшением параметров, пока дело не дошло до уровня шума в единицы электронов в начале 2000-х гг. Вместе с тем, дальнейшее уменьшение пикселей до размеров менее 1,0–1,5 мкм казалось бессмысленным, так как пространственное разрешение такой матрицы

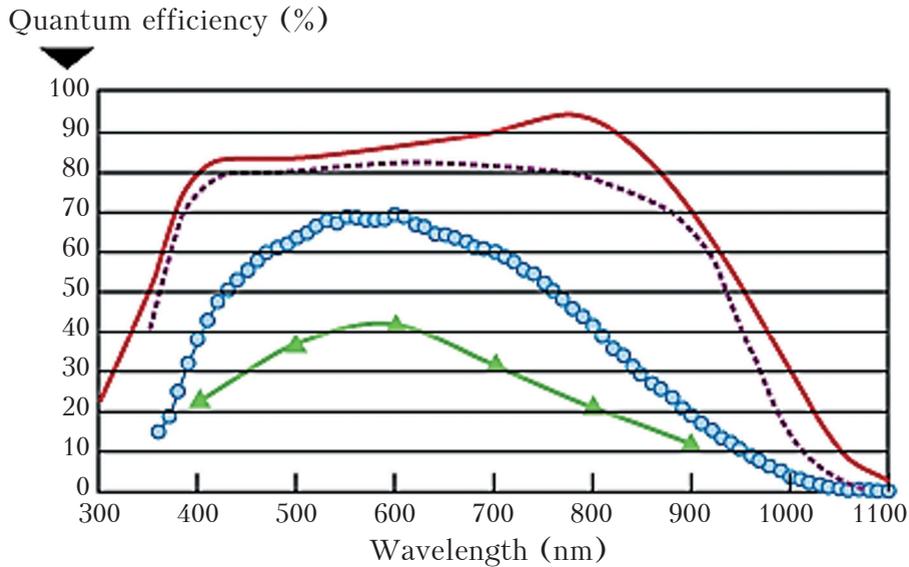


Рис. 3. Квантовая эффективность основных типов КМОП-матриц-изображений в видимом диапазоне спектра (снизу вверх): треугольники – фронтальное освещение без микролинз, круги – фронтальное освещение с микролинзами, пунктирная линия – обратный ввод света со стороны подложки, сплошная линия – конструкция IMES обратным вводом света с рекордной эффективностью [7].

приближалось к ограничению дифракционным пределом оптики для видимого света. Тем не менее, Эрик Фоссум, с его опытом разработки КМОП-сенсоров, признал разработку матрицы пикселей субмикронного размера очень перспективным подходом к получению изображений с разрешением по числу фотонов без усиления. В 2005 г. он предложил концепцию квантового сенсора изображения (quantum image sensor, QIS) [8]. Он предположил, что на горизонте 10–15 лет прогресс в КМОП-технологии позволит создавать пиксели с субдифракционным пределом (так называемые, jots), а прогресс в разработке схем мультиплексирования сигналов КМОП-матриц позволит обеспечить их считывание с достаточной кадровой частотой при допустимом уровне потребляемой мощности. Первые результаты работы матрицы из нескольких пикселей были продемонстрированы в 2015 и 2016 гг. со среднеквадратичным значением шума 0,28 и 0,22 электрона на пиксель, соответственно [9,10], как показано на рис.4.

Однако несмотря на выдающийся успех в прототипировании, разработка квантового сенсора изображений, представляющего практический интерес, является сложнейшей задачей и по технологии, и по системной архитектуре из-за гигапиксельных масштабов матрицы и ее перегруженности металлическими шинами управления пикселями (т. е. с очень низкой геометрической эффективностью). Тем не менее, работы по прототипам с ограниченной функциональностью продолжают. Так, в 2017 году были представлены результаты по матрице 1024×1024 с шагом в 1,1 мкм (Megajot QIS) со среднеквадратичным значением шума ~0,2 электрона на пиксель [11]

ПЗС-матрицы с лавинным умножением

Идея использовать лавинное умножение зарядового пакета в матрицах изображений появилась в ходе работ по оптимизации ПЗС-матриц. Это полностью аналогично переходу от фотодиодов к ЛФД для повышения пороговой чувствительности за счет того, что умноженный сигнал становится выше шума электроники и может быть зарегистрирован (рис.5).

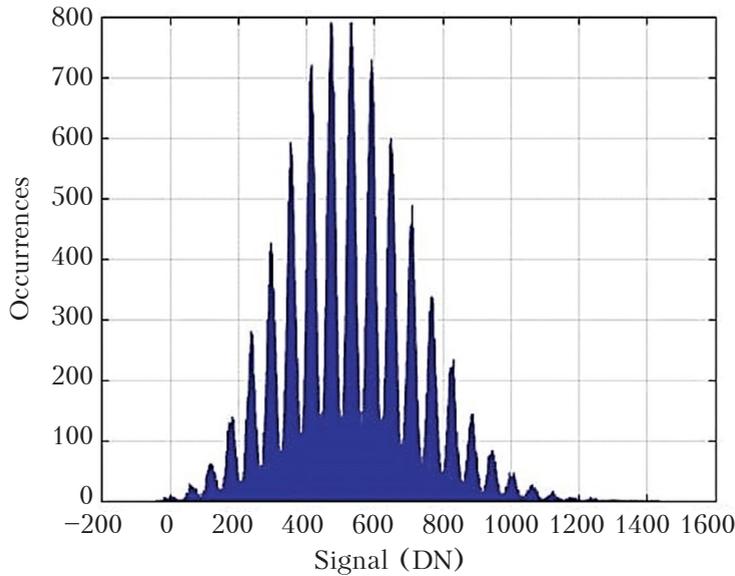


Рис.4. Гистограмма сигнала пикселей (спектр фотоэлектронов) квантового сенсора изображений, работающего без лавинного умножения [10].

Лавинные ПЗС-матрицы (Electron Multiplying CCD, EMCCD) были запатентованы в 1973 г. Дж. Смитом из Bell Laboratories, а разработаны и выпущены на рынок в начале 1990-х гг. компаниями e2v (Великобритания) и Texas Instruments (США). Слабое лавинное умножение при переносе заряда в каждом пикселе, даже с весьма малым коэффициентом и малой вероятностью лавины, оказалось весьма эффективным при большом числе пикселей, порождая в итоге тысячи электронов на

выходе на один первичный фотоэлектрон, что существенно подавило шум считывания [12].

В видеокамерах с охлаждением лавинной ПЗС-матрицы, которые выпускаются, например, компанией Andor Technologies с 2001 г., уровень шума лежит в диапазоне от долей до единиц электронов на пиксель, соответственно, при шуме менее 1 электрона может быть реализован режим однофотонного детектирования, а квантовая эффективность в видимой области спектра составляет от 60% до 95%.

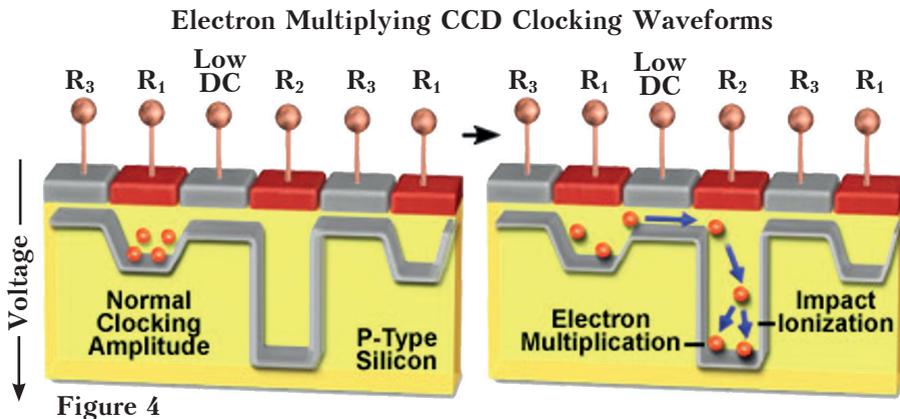


Рис.5. Принцип работы лавинной ПЗС-матрицы (<https://hamamatsu.magnet.fsu.edu/articles/emccds.html>).

Матрицы однофотонных гейгеровских ЛФД (SPAD)

Одноэлементный однофотонный ЛФД может иметь высокую PDE ~75–80% (как обсуждалось ранее на примере Single Photon Counting Module SPCM-AQR Series [19]). Однако при создании матрицы ЛФД возникают проблемы с геометрической эффективностью: активная область каждого пикселя матрицы – однофотонного ЛФД – окружена нечувствительной областью, занятой электроникой для активного гашения гейгеровского пробоя, управления и считывания сигналов этого пикселя (рис.6).

Эта проблема до сих пор окончательно не решена в традиционной технологии 2D-интеграции элементов, хотя создание высокоэффективных матриц однофотонных ЛФД стала приоритетной с 1990-х гг., когда были разработаны одноэлементные ЛФД с хорошими показателями качества.

Надо отметить, что даже в разработках 2010-х гг. геометрическая эффективность редко превышала 10–20%. Поэтому эффективность регистрации фотонов оказывалась очень низкой, например, ~3% в проекте MISPIA (микроэлектронная однофотонная матрица 3D-изображений, разработана Миланским политехническим университетом и институтом микроэлектроники Фраунгофера в Мюнхене, <http://www.everyphotoncounts.com/mispia/>), ~5% в проекте NUV PET (матрица SwissSPAD, разработана лабораторией Aqua Lab, EPFL в Лозанне, <https://aqua.epfl.ch/>).

Заметным успехом в части геометрической эффективности стала разработка цифрового кремниевого умножителя (digital SiPM, фактически это матрица SPAD с особой группировкой и мультиплексированием ЛФД пикселей) Томасом Фрачем с коллегами из компании Philips [20]. Оставаясь в рамках технологии 2D-интеграции, при размерах пикселей

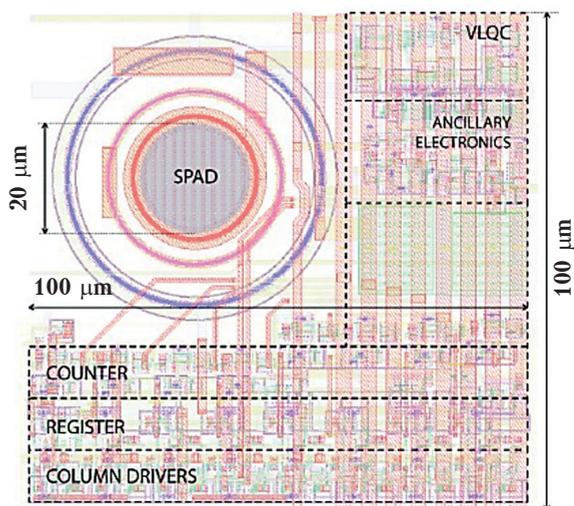


Рис.6. Внешний вид одного элемента матрицы однофотонных ЛФД (SPAD) с геометрической эффективностью 3% [13].

52×30 мкм, они добились геометрической эффективности ~50% и PDE ~30% для синего света.

Позиционно-чувствительные кремниевые фотоумножители

В кремниевых фотоумножителях вместо активного гашения гейгеровского пробоя специальной электронной схемой, размещенной рядом с лавинным пикселем (как в SPAD), применяется пассивное гашение, что почти не ухудшает геометрическую эффективность и дает большие преимущества по PDE, а также перед матрицами ЛФД (если не требуется пространственное разрешение). Однако в обычной конструкции кремниевых фотоумножителей пиксели подключены параллельно в цепь между катодом и анодом, что не позволяет получить информацию о сработавшем пикселе, его координатах. На это обратили внимание ряд разработчиков SiPM и предложили несколько типов позиционно-чувствительных кремниевых фотоумножителей (position-sensitive SiPM, PS SiPM):

- интерполирующий SiPM [14];
- линейно-градиентный SiPM [15];
- PS SiPM с декодированием позиционной чувствительности [16];

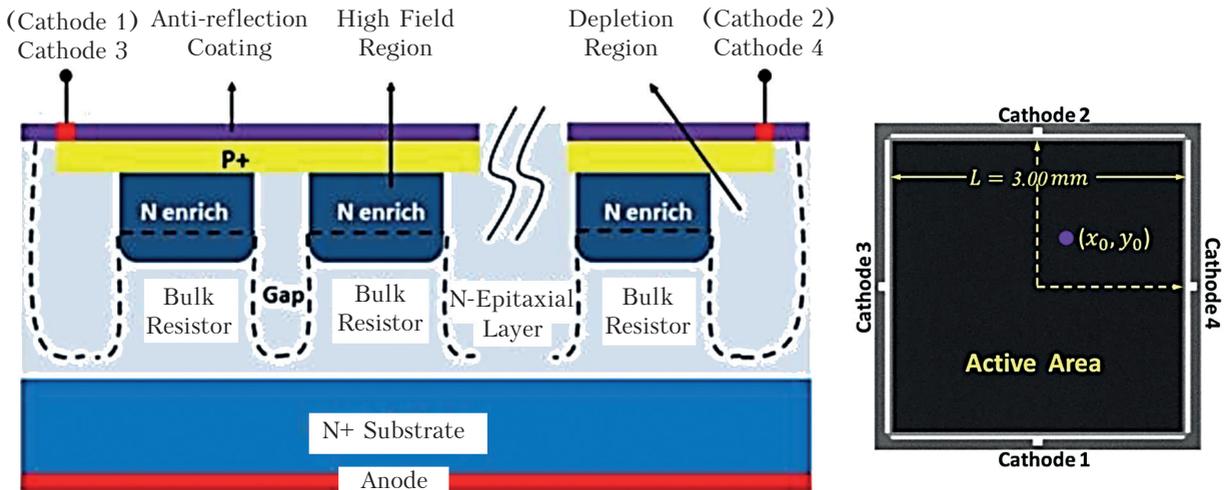
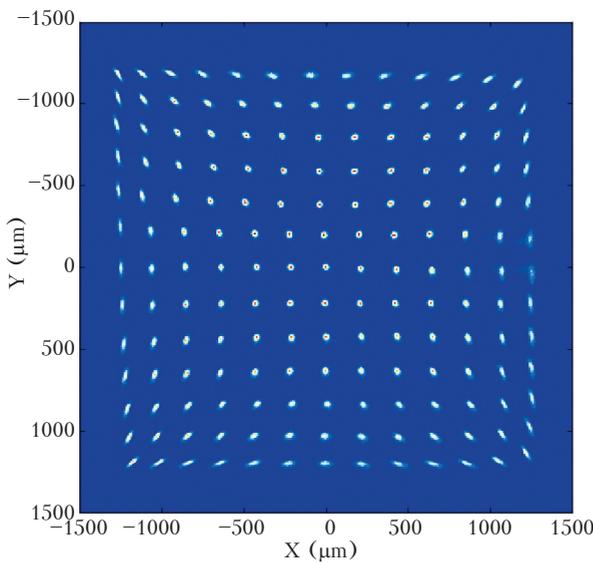


Рис.7. Конструкция позиционно-чувствительных кремниевых фотоумножителей лаборатории NDЛ [21].

• PS SiPM со сплошным резистивным слоем [17].

Большинство из них не дали известного практического результата (возможно, все еще находятся в процессе разработок). Однако



Reconstruction of 13×13 incident light spot positions with MPEN ~15 and the diameter of the light spot is ~80 μm.

$$PR_{\text{System-X}} = 34,9 \pm 10,3 \mu\text{m},$$

$$PR_{\text{System-Y}} = 40,1 \pm 12,7 \mu\text{m}$$

Рис.8. Пространственное разрешение PS SiPM размером 3×3 мм лаборатории NDЛ [18].

разработка лаборатории New Device Laboratory (NDL, Пекин, Китай) оказалась весьма успешной [17,18]. NDЛ разработала новую конструкцию SiPM с эпитаксиальными гасящими резисторами, расположенными непосредственно под пикселями и представляющими собой необходимую часть эпитаксиального слоя. Для позиционной чувствительности пиксели подключены к четырем катодам, расположенным по сторонам SiPM, с помощью сплошного поверхностного резистивного слоя, что дает зарядовое деление сигнала на 4-х электродах (рис.7).

Образцы NDЛ демонстрируют высокое пространственное разрешение (для размеров SiPM 3×3 мм) около 40 мкм при детектировании импульсов света со средним числом фотоэлектронов около 15 в пятне диаметром около 80 мкм (рис.8). Суммарный сигнал со всех катодов, как и сигнал обычных SiPM, обеспечивает очень хорошее разрешение числа фотоэлектронов вплоть до 24-го пика спектра.

Таким образом, кремниевые фотоумножители с позиционной чувствительностью могут быть альтернативой матрицам SPAD по пространственному разрешению, заметно превосходя их по эффективности детектирования фотонов PDE.

Заключение

Развитие различных типов твердотельных фотодетекторов долгое время шло независимо, иногда даже в противоположных направлениях, как например, для линейных ЛФД стремились достичь максимально большой чувствительной площади (сантиметры), а для пикселей ПЗС и КМОП-матриц – минимальной (микроны). Конструкции и технологии по каждому из направлений были доведены до массового выпуска приборов в конкретных прикладных задачах. Естественно, что универсального фотодетектора, решающего любую задачу с высокими показателями качества, разработано не было.

Но стоит отметить, что вместе с развитием функционала и возможностей фотодетекторов

расширялись и области их применения, и при этом более перспективными оказывались не классические типы конструкций, а новые их варианты на основе сочетаний преимуществ разных типов, как, например, ПЗС-матрицы с лавинным умножением, позиционно-чувствительные SiPM. Аналогично, мы видим быстрый прогресс в приближении цифровых SiPM и SPAD-матриц к сенсорам изображений на основе ПЗС и КМОП-матриц.

Тем не менее, мы предполагаем, что аналоговый SiPM еще многие годы будет наиболее востребованным малофотонным твердотельным фотодетектором в крупных экспериментах в физике высоких энергий и астрофизике, медицине, системах безопасности и других.

Литература

1. Виноградов С.Л. Твердотельные детекторы оптических сигналов и радиации. Часть 1.1. Обзор конструкций и характеристик детекторов // АНРИ. 2024. № 4(119). С. 13-27.
2. W.S. Boyle, G.E. Smith, «Charge Coupled Semiconductor Devices», *Bell Syst. Tech. J.*, vol. 49, pp. 587-593, 1970. Doi: 10.1002/j.1538-7305.1970.tb01790.x.
3. M.F. Tompsett, G.F. Amelio, G.E. Smith, «Charge coupled 8-bit shift register», *Appl. Phys. Lett.*, vol. 17, pp. 111-115, 1970. Doi: 10.1063/1.1653327.
4. R.H. Walden, R.H. Rambeck, at all, «The Buried Channel Charge Coupled Device», *Semicond. Devices Pioneer. Pap., World Scientific*, pp. 577-582, 1991. Doi: 10.1142/9789814503464_0075.
5. N. Teranishi, «Recent Progresses of Visible Light Image Sensors», *Cern Detect. Semin.*, 2018. URL: https://indico.cern.ch/event/706286/attachments/1601588/2547606/20180223CERN_ver2.pdf (дата обращения: 9.01.2025).
6. E.R. Fossum, «CMOS image sensors: electronic camera on a chip», *Proc. Int. Electron Devices Meet., IEEE*, pp. 17-25, 1995. Doi: 10.1109/IEDM.1995.497174.
7. Y. Bai, J. Bajaj at all, «Teledyne Imaging Sensors: silicon CMOS imaging technologies for X-ray, UV, visible, and near infrared», *D.A. Dorn, A.D. Holland (Eds.), Proc. SPIE 7021, High Energy, Opt. Infrared Detect. Astron. III*, 16 pp., 2008, 702102. Doi: 10.1117/12.792316.
8. E.R. Fossum, «What to Do with Sub-Diffraction-Limit (SDL) Pixels? – A Proposal for a Gigapixel Digital Film Sensor (DFS)», *ISSCC Dig. Tech. Pap.*, 2005. <http://ci.nii.ac.jp/naid/10017286603/en/> (accessed November 8, 2018).
9. J. Ma, D. Starkey and all, «Characterization of Quanta Image Sensor Pump-Gate Jots With Deep Sub-Electron Read Noise», *IEEE J. Electron Devices Soc.* 3, pp. 472-480, 2015. Doi: 10.1109/JEDS.2015.2480767.
10. E. Fossum, J. Ma, at all, «The Quanta Image Sensor: Every Photon Counts», *Sensors*, vol. 16, 2016. Doi: 10.3390/s16081260.
11. J. Ma, S. Masoodian, at all, «Photon-number-resolving megapixel image sensor at room temperature without avalanche gain», *Optica*, vol. 4, pp. 1474, 2017. Doi: 10.1364/OPTICA.4.001474.

12. N. Smith, C. Coates, et al., «EMCCD technology and its impact on rapid low-light photometry», *Opt. Infrared Detect. Astron.*, vol. 162, pp. 5499, 2004. Doi: 10.1117/12.549789.
13. I. Rech, A. Gulinatti et al., «High-performance silicon single-photon avalanche diode array», *Proc. SPIE.*, vol. 7320, pp. 73200H-73200H-12, 2009. Doi: 10.1117/12.818516.
14. I. Sacco, P. Fischer, A. Gola, C. Piemonte, «Interpolating Silicon Photo-Multiplier: A novel position sensitive device with submillimeter spatial resolution and depth of interaction capability», *IEEE Nucl. Sci. Symp. Med. Imaging Conf., (2013 NSS/MIC), IEEE*, pp. 1-3, 2013. Doi: 10.1109/NSSMIC.2013.6829589.
15. A. Ferri, F. Acerbi, et al., «Characterization of Linearly Graded Position-Sensitive Silicon Photomultipliers», *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, vol. 62, pp. 688-693, 2015. Doi: 10.1109/TNS.2015.2396671.
16. V. Schulz, Y. Berker, et al., «Sensitivity encoded silicon photomultiplier – a new sensor for high-resolution PET-MRI», *Phys. Med. Biol.*, vol. 58, pp. 4733-4748, 2013. Doi: 10.1088/0031-9155/58/14/4733.
17. C. Li, S. Wang, L. Huo et al., «Position Sensitive Silicon Photomultiplier With Intrinsic Continuous Cap Resistive Layer», *IEEE Trans. Electron Devices.*, vol. 61, pp. 3229-3232, 2014. Doi: 10.1109/TED.2014.2336171.
18. Y. Peng, T. Zhao, K. Liang, R. Yang, D. Han, «Characterization of Position Measurement Error, Position Resolution and Photoelectron Number Resolution for Position-Sensitive SiPMs», *Int. Conf. Advan. SiPM, Schwetzingen, Germany, 2018*. URL: <https://indico.gsi.de/event/6990/session/14/contribution/7/material/slides/0.pdf> (дата обращения: 9.01.2025).
19. 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.
20. 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.
21. A.V. Akindinov, A.N. Martemianov, P.A. Polozov, V.M. Golovin, E.A. Grigoriev, «New results on MRS APDs», *Nucl. Instruments Methods Phys. Res. Sect. A Accel. Spectrometers, Detect. Assoc. Equip.* no. 387, pp. 231-234, 1997. Doi: 10.1016/S0168-9002(96)01201-6.

Solid-State Detectors of Optical Signals and Radiation.

Part 1.2. Review of the Detector Designs and Characteristics (Continuation)

Vinogradov Sergey (P.N. Lebedev Physical Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia; Scientific Production Company «Doza», Zelenograd, 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; НПП «Доза», г. Зеленоград

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