

## АРХИТЕКТУРА ГИБРИДНОГО МАТРИЧНОГО ВЫСОКОСКОРОСТНОГО ДЕТЕКТОРА ФОРМАТА $32 \times 32$ ДЛЯ СПЕКТРАЛЬНОГО ДИАПАЗОНА ВАКУУМНЫЙ УЛЬТРАФИОЛЕТ–ЖЕСТКИЙ РЕНТГЕН

© 2021 г. П. Н. Аруев<sup>a,\*</sup>, С. В. Бобашев<sup>a</sup>, А. М. Красильщиков<sup>a</sup>,  
А. В. Николаев<sup>a,\*\*</sup>, Д. Ю. Петров<sup>b</sup>, Е. В. Шерстнев<sup>a</sup>

<sup>a</sup> Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН  
Россия, 194021, Санкт-Петербург, Политехническая ул., 26

<sup>b</sup> ООО «Авиационные Исследования Разработки Технологии»  
Россия, 195009, Санкт-Петербург, ул. Комсомола, 1–3 литер аи

\*e-mail: sildet@mail.ioffe.ru

\*\*e-mail: a.v.nikolaev@mail.ioffe.ru

Поступила в редакцию 27.04.2020 г.

После доработки 22.06.2020 г.

Принята к публикации 23.06.2020 г.

Представлена усовершенствованная архитектура гибридного матричного детектора, работающего в диапазоне вакуумный ультрафиолет–жесткий рентген формата  $32 \times 32$  для высокоскоростной регистрации профиля излучения высокотемпературной плазмы с энергией фотонов  $E_{ph} = 1–10000$  эВ. Детектор включает кремниевые фотодиоды, предусилители, систему оцифровки и передачи информации при времени кадра 2 мкс и непрерывной записи до 4 с. При разработке учтен опыт применения предыдущей модели гибридного матричного детектора формата  $16 \times 16$  в токамаках Т-11М и “Глобус-М”. Представлены результаты абсолютных калибровок чувствительности фотодиодов в диапазоне энергий 1–60000 эВ. Продемонстрирован функционирующий прототип submodule формата  $1 \times 32$ .

DOI: 10.31857/S003281622006018X

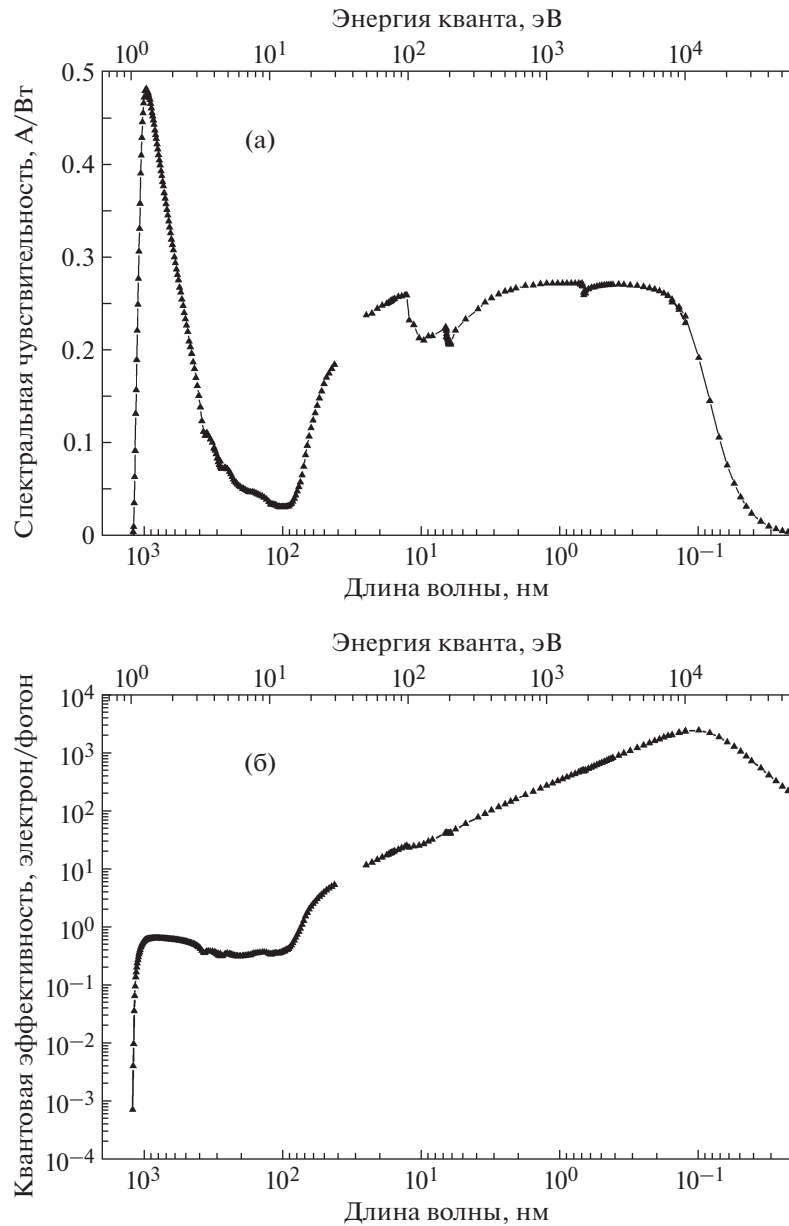
Актуальность разработки систем прямой ультрабыстрой визуализации радиационных потерь высокотемпературной плазмы обусловлена необходимостью изучения развития магнитогиродинамических неустойчивостей. Отсутствие прозрачных материалов для излучения в спектральных диапазонах вакуумного ультрафиолета, мягкого и жесткого рентгена [1] не позволяет проводить прямую визуализацию быстрых процессов в плазме без использования детекторов, размещенных непосредственно внутри рабочей камеры токамака.

Для непрямой визуализации излучения плазмы применяются микроканальные пластины, люминесцентные экраны, световоды, зеркала и быстрые внешние камеры [2]. В основном применяются промышленно выпускаемые высокоскоростные камеры для не вакуумного спектрального диапазона [3–6], регистрирующие вторичное излучение. Такой подход не позволяет проводить прямое наблюдение внутри вакуумной камеры, а также имеет ограничение по предельной чувствительности и минимальному времени быстрого действия конверторов излучения в оптический диапазон ( $\lambda = 450–950$  нм).

Для прямой регистрации излучения плазмы используют фотодиодные линейки, размещенные непосредственно внутри токамака [7–9]. Вакуумные требования к работе токамаков не позволяют использовать конструкционные материалы, влияющие на уровень вакуума в рабочей камере. Кроме того, объекты, размещенные внутри токамака, должны выдерживать вакуумный нагрев как минимум до  $150–180^\circ\text{C}$  для периодической дегазации.

В работе [10] представлены результаты по прямой визуализации динамики плазмы в токамаке Т-11М с использованием гибридного матричного детектора (г.м.д.)  $16 \times 16$ , разработанного в ФТИ им. Иоффе. Эта система обеспечивает прямую ультрабыструю визуализацию плазмы с временем кадра  $\sim 1$  мкс, возможностью непрерывной записи в течение нескольких секунд, коэффициентом заполнения активной области  $\sim 25\%$  и форматом  $16 \times 16$  пикселей.

Основной задачей данной работы является создание г.м.д. формата  $32 \times 32$  для прямой ультрабыстрой визуализации высокотемпературной плазмы с учетом предыдущего опыта создания и использования г.м.д.  $16 \times 16$  [11, 12]. Г.м.д. формата



**Рис. 1.** Типовые спектральные характеристики SPD-фотодиодов: **а** – измеренная квантовая чувствительность; **б** – расчетная квантовая эффективность.

16 × 16 представляет собой комбинацию камеры-обскуры, расположенной внутри рабочей камеры токамака, и блока управления, находящегося вне токамака на расстоянии ~10 м.

Камера-обскура содержит 8 модулей детекторов формата 2 × 16, выполненных на керамических платах и собранных в матрицу формата 16 × 16 с коэффициентом заполнения ~25% при фронтальном размере матричного детектора 31 × 1 мм. Каждый submodule формата 2 × 16 состоит из монолитной линейки SPD (Silicon Precision Detector) [13] фотодиодов с чувствительной областью 0.88 × 1.22 мм, 32 трансимпедансных усилителей с

полосой пропускания ~0.2 МГц. Опрос всех каналов за время кадра ~1 мкс обеспечивают 4 быстрых 8-канальных мультиплексора. Передача сигналов от 256 детекторов осуществляется через 50-штырьковый вакуумный разъем к внешнему 32-канальному 12-битному аналого-цифровому преобразователю (а.ц.п.) с модулем управления и синхронизации, выполняющим оцифровку аналогового сигнала и запись результатов в бортовую память.

Данная конфигурация обеспечивает квазипараллельный опрос 256 фотодиодов за полное время кадра до ~1 мкс при максимальном времени опроса до 3.2 с. В г.м.д. 16 × 16 используются со-

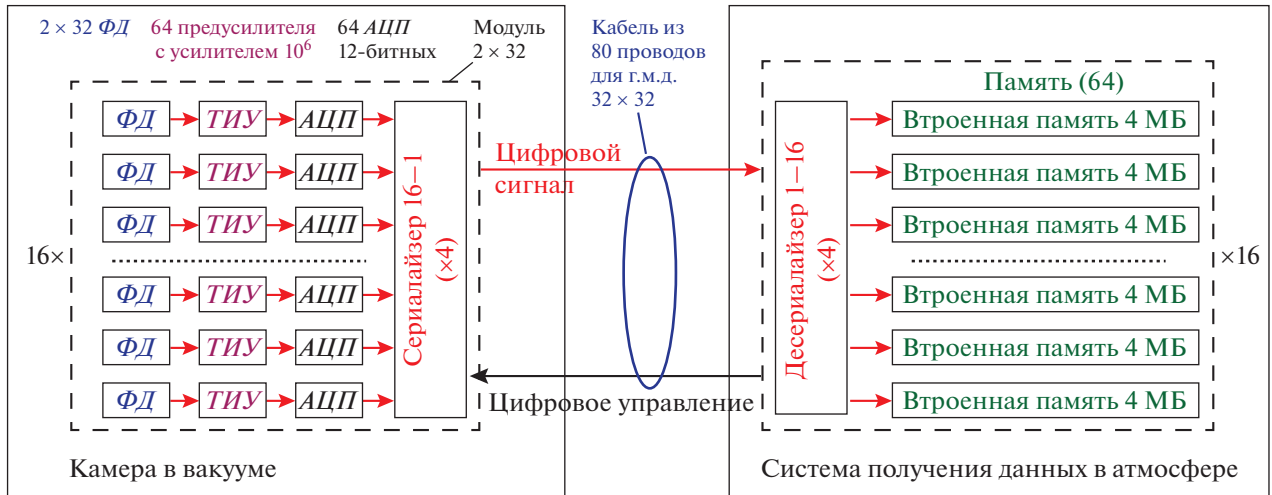


Рис. 2. Структурная схема гибридного матричного детектора формата  $32 \times 32$ . ФД – фотодиод, ТИУ – трансимпедансный усилитель, АЦП – аналого-цифровой преобразователь, МБ – Мегабайт.

данные в ФТИ им. Иоффе SPD-фотодиоды на основе мелкозалегающего (30 нм) сильно несимметричного  $p^+ - n$ -перехода [13–15].

Типовые спектральные зависимости измеренной чувствительности и расчетной квантовой эффективности SPD-фотодиодов представлены на рис. 1. Измерения чувствительности (рис. 1а) в диапазоне длин волн  $\lambda = 0.021 - 400$  нм ( $E_{ph} = 60000 - 3.1$  эВ) были выполнены в Институте метрологии РТВ (г. Берлин) [16–18]. Измерения чувствительности в диапазоне длин волн  $\lambda = 300 - 1200$  нм ( $E_{ph} = 4.1 - 1.03$  эВ) были выполнены в ФТИ им. Иоффе. Расчет квантовой эффективности  $QE(\lambda)$  (рис. 1б) проводился на основе данных измеренной чувствительности с использованием выражения:

$$QE(\lambda) = (S(\lambda)hc)/(\lambda q), \quad (1)$$

где  $S(\lambda)$  – абсолютная чувствительность фотодиода,  $\lambda$  – длина волны,  $q$  – заряд электрона,  $h$  – постоянная Планка,  $c$  – скорость света в вакууме.

Необходимость повышения разрешения гибридного матричного детектора  $16 \times 16$  до  $32 \times 32$  усложняет задачу вывода информации к блоку управления, дальнейшее наращивание числа выходов мультиплексоров (аналогично архитектуре г.м.д. формата  $16 \times 16$ ) привело бы к росту числа сигнальных проводов с 32 до 128. Другой недостаток разработанной ранее системы – аналоговый выходной сигнал с детекторов, подверженный сильному электромагнитным помехам в момент разряда токамака.

Для устранения обозначенных недостатков разработан прототип гибридного модуля детекторов формата  $1 \times 32$ , содержащий 32 фотодиода, 32 трансимпедансных усилителя, 32 12-битных а.ц.п., а также систему передачи оцифрованных

данных от 16 а.ц.п. по одному проводу при времени кадра 2 мкс. Данная конфигурация submodule детекторов г.м.д.  $32 \times 32$  позволяет уменьшить число проводов для передачи данных с 128 до 64. Кроме того, при передаче по проводам цифровой сигнал более устойчив к воздействию мощных электромагнитных помех при разряде в токамаке, чем аналоговый.

В прототипе submodule детекторов формата  $1 \times 32$  вместо монолитной линейки фотодиодов применены дискретные фотодиоды. Это позволяет создать конструкцию модуля таким образом, чтобы вход усилителей соединялся с базой фотодиода (неосвещенный контакт), в то время как активная область фотодиода заземлена или находится под отрицательным напряжением смещения порядка нескольких вольт. Данный подход позволяет устранить вклад внешнего фотоэффекта в фототок.

Структурная схема г.м.д. формата  $32 \times 32$  представлена на рис. 2. Предполагаемая ширина керамических плат вакуумных аналоговых и цифровых частей г.м.д. формата  $32 \times 32$  составляет 55 мм.

Для апробации представленного выше подхода был изготовлен прототип модуля XUV (Extreme ultraviolet)-детекторов, состоящий из 32 дискретных SPD-фотодиодов с активной областью  $\sim 1$  мм<sup>2</sup>, 32 трансимпедансных усилителей с резисторной обратной связи 1 МОм, 32 12-битных а.ц.п., 2 сериялайзеров и одного микроконтроллера. Аналоговая часть выполнена на керамической ( $Al_2O_3$ ) плате, цифровая часть – на стеклотекстолите.

Таким образом, в данной работе представлена архитектура гибридного матричного детектора  $32 \times 32$  (г.м.д.  $32 \times 32$ ) с улучшенными системами оцифровки и передачи информации для непрерывной записи в течение 4 с при времени кадра 2 мкс.

Используемые в разработке SPD-фотодиоды обладают широкой спектральной характеристикой и высокой квантовой эффективностью в диапазоне энергий фотонов ( $E_{ph} = 1-60000$  эВ). Помимо исследования плазмы в токамаках, г.м.д.  $32 \times 32$  может быть использован для визуализации динамики быстрых радиационных процессов в инфракрасном, видимом, ультрафиолетовом, вакуумном ультрафиолетовом, рентгеновском диапазонах электромагнитного спектра в научных и промышленных установках.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ISO 21348 Definitions of Solar Irradiance Spectral Categories.
2. *Bush C.E., Stratton B.C., Robinson J., Zakharov L.E., Fredrickson E.D., Stutman D., Tritz K.* // Rev. Sci. Instrum. 2008. V. 79. P. 10E928-1. <https://doi.org/10.1063/1.2968219>
3. *Yu J.H., Van Zeeland M.A., Chu M.S., Izso V.A., La Haye R.J.* // Phys. Plasmas. 2009. V. 16. P. 056114-1. <https://doi.org/10.1063/1.3118626>
4. *Ding Y.H., Zhuang G., Zhang X.Q., Zhang J., Ba W.G., Wang Z.J., Pan Y.* // Nucl. Instrum. and Methods in Phys. Res. A. 2009. V. 606. P. 743. <https://doi.org/10.1016/j.nima.2009.05.012>
5. *Wang Z.J., Ming T.F., Gao X., Du X.D., Ohdachi S.* // Rev. Sci. Instrum. 2016. V. 87. P. 11E307-1. <https://doi.org/10.1063/1.4959951>
6. *Odstrcil T., Odstrcil M., Grover O., Svoboda V., Āuran I., Mlynář J.* // Rev. Sci. Instrum. 2012. V. 83. P. 10E505-1. <https://doi.org/10.1063/1.4731003>
7. *Shafer M.W., Battaglia D.J., Unterberg E.A., Evans T.E., Hillis D.L., Maingi R.* // Rev. Sci. Instrum. 2010. V. 81. P. 10E534-1. <https://doi.org/10.1063/1.3481166>
8. *Tal B., Labit B., Nagy D., Chavan R., Duval B., Veres G.* // Rev. Sci. Instrum. 2013. V. 84. P. 123508-1. <https://doi.org/10.1063/1.4848155>
9. *Bernert M., Eich T., Burckhart A., Fuchs J.C., Giannone L., Kallenbach A., McDermott R.M., Sieglin B.* // Rev. Sci. Instrum. 2014. V. 85. P. 033503-1. <https://doi.org/10.1063/1.4867662>
10. *Алексеев А.Г., Белов А.М., Забродский В.В.* // ПТЭ. 2010. № 2. С. 58.
11. *Sladkomedova A.D., Alekseev A.G., Bakharev N.N., Gusev V.K., Khromov N.A., Kurskiev G.S., Minaev V.B., Patrov M.I., Petrov Yu.V., Sakharov N.V., Shchegolev P.B., Solokha V.V., Telnova A.Yu., Tolstyakov S.Yu., Zabrodsky V.V.* // Rev. Sci. Instrum. 2018. V. 89. P. 083509-1. <https://doi.org/10.1063/1.5039801>
12. *Sladkomedova A.D., Voronin A.N., Alekseev A.G., Gusev V.K., Kurskiev G.S., Petrov Yu.V., Sakharov N.V., Tolstyakov S.Yu., Zabrodsky V.V.* // Phys. Scr. 2018. V. 93. P. 105601. <https://doi.org/10.1088/1402-4896/aadb85>
13. *Aruev P.N., Kolokolnikov Yu.M., Kovalenko N.V., Legkodymov A.A., Lyakh V.V., Nikolenko A.D., Pindyurin V.F., Sukhanov V.L., Zabrodsky V.V.* // Nucl. Instrum. and Methods Phys. Res. A. 2009. V. 603. P. 58. <https://doi.org/10.1134/S1027451010010167>
14. *Scholze F., Klein R., Müller R.* // Metrologia. 2006. V. 43. P. 6. <https://doi.org/10.1088/0026-1394/43/2/S02>
15. *Goldberg Yu.A., Zabrodsky V.V., Obolensky O.I., Petelina T.V., Suhanov V.L.* // Semiconductors. 1999. V. 33. № 3. P. 343. <https://doi.org/10.1134/1.1187691>
16. *Gottwald A., Kroth U., Richter M., Schoppe H., Ulm G.* // Meas. Sci. Technol. 2010. V. 21. P. 125101. <https://doi.org/10.1088/0957-0233/21/12/125101>
17. *Krumrey M., Ulm G.* // Nucl. Instrum. and Methods A. 2001. V. 467-468. P. 1175. [https://doi.org/10.1016/S0168-9002\(01\)00598-8](https://doi.org/10.1016/S0168-9002(01)00598-8)
18. *Scholze F., Tümmeler J., Ulm G.* // Metrologia. 2003. V. 40. P. 224. <https://doi.org/10.1088/0026-1394/40/1/352>