

Разработка считывающей электроники с детекторов на основе кремниевых фотоумножителей

© Ю.В. Тубольцев, А.А. Богданов, Ю.В. Чичагов

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН,
194021 Санкт-Петербург, Россия
e-mail: tuboltsev46@mail.ru

Поступило в Редакцию 23 апреля 2024 г.
В окончательной редакции 19 июля 2024 г.
Принято к публикации 30 октября 2024 г.

Предложены схемы оптимального считывания сигналов с кремниевых детекторов. Предложены способ увеличения детектирующей площади путем простейшего суммирования сигналов с нескольких детекторов и схема считывания с минимальным потреблением мощности. По разработанным схемам созданы детекторные пиксели на основе кремниевых фотоумножителей MicroFJ-60035 для двух детекторных кластеров, состоящих из 28 пикселей. Проведены испытания пикселя, показавшие возможность регистрации как единичных фотонов, так и потоков фотонов с большой интенсивностью. Разработан и создан опытный модуль прототипа детекторной камеры на базе кремниевых фотоумножителей MicroFC-60035.

Ключевые слова: детекторы, кремниевые фотоумножители, считывающая электроника, схема съема сигнала.

DOI: 10.61011/JTF.2024.12.59236.331-24

В настоящее время кремниевые фотоумножители (SiPM) нашли широкое применение в ряде задач по регистрации световых импульсов во многих областях науки и техники, в том числе регистрации единичных фотонов. Они оказываются более эффективными при в сравнении с вакуумными фотоумножителями [1]. В то же время SiPM, благодаря своему быстродействию, могут использоваться и для регистрации интенсивных потоков фотонов, что обусловило необходимость развития быстрой считывающей электроники для кремниевых фотоумножителей.

В ФТИ им. А.Ф. Иоффе в течение ряда лет разрабатывается проект уникальной высокогорной черенковской гамма-обсерватории ALEGRO [2,3]. В настоящее время осуществляются исследования, направленные на создание новых детекторных кластеров на основе SiPM J-серии (MicroFJ-60035) и прототипа детекторной камеры на базе C-серии (MicroFC-60035) для регистрации черенковских вспышек с интенсивностью от единичных фотонов до нескольких тысяч фотонов. Испытания создаваемой аппаратуры осуществляются на действующем черенковском телескопе TAIGA-IACT [4,5].

Вышеупомянутые SiPM отличаются наличием быстрого выхода, длительность сигнала с которого составляет около 3 ns, а длительность фронта импульса, отражающая время сбора заряда с сработавших лавинных фотодиодов детектора, меньше 1 ns. Для того чтобы длительность импульса на входе предусилителя была соизмерима с длительностью сигнала с быстрого выхода, необходимо обеспечить постоянную времени на таком же уровне (около 1 ns). Постоянная времени при этом равна произведению входного сопротивления предусилителя R_{IN} на емкость быстрого выхода C_{FA} , которая

равна 48 pF и 160 pF для MicroFC-60035 и MicroFJ-60035 соответственно.

Таким образом, величина входного сопротивления R_{IN} должна быть в пределах 6–18 Ω . Очевидно, что при таком сопротивлении амплитуда сигнала, образованного импульсами токов SiPM от единичных фотонов (порядка десятков μA), будет небольшой. Однако малую постоянную времени можно получить за счет малого входного сопротивления, используя активный элемент — повторитель тока.

Простейший вариант повторителя тока — это схема на транзисторе с общей базой, в которой входное сопротивление каскада определяется отношением температурного потенциала φ_T , равного 26 mV при 25 °C, к току эмиттера I_e . Выбрав соответствующий ток, по формуле $R_{IN} = \varphi_T / I_e$ можно получить R_{IN} на уровне 5–10 Ω , тем самым обеспечив малую постоянную времени импульса с „быстрого“ выхода.

При создании пикселей для новых детекторных кластеров необходимо было обеспечить детектирующую площадь, эквивалентную площади вакуумных фотоумножителей, используемых в действующем телескопе TAIGA-IACT.

В работе [6] был представлен детектирующий пиксель, решающий эту задачу. Каждый пиксель содержит конус Уинстона, фокусирующий свет на четыре SiPM, съем сигналов с каждого из них осуществляется предусилителями. Дальнейшая оцифровка и обработка сигналов осуществляется на плате регистрации. Для минимизации числа каналов регистрации используется сумматор сигналов с четырех предусилителей. Недостатком схемы, описанной в работе [6], является высокое энергопотребление (1.5 W), вызванное большим количеством операционных усилителей.

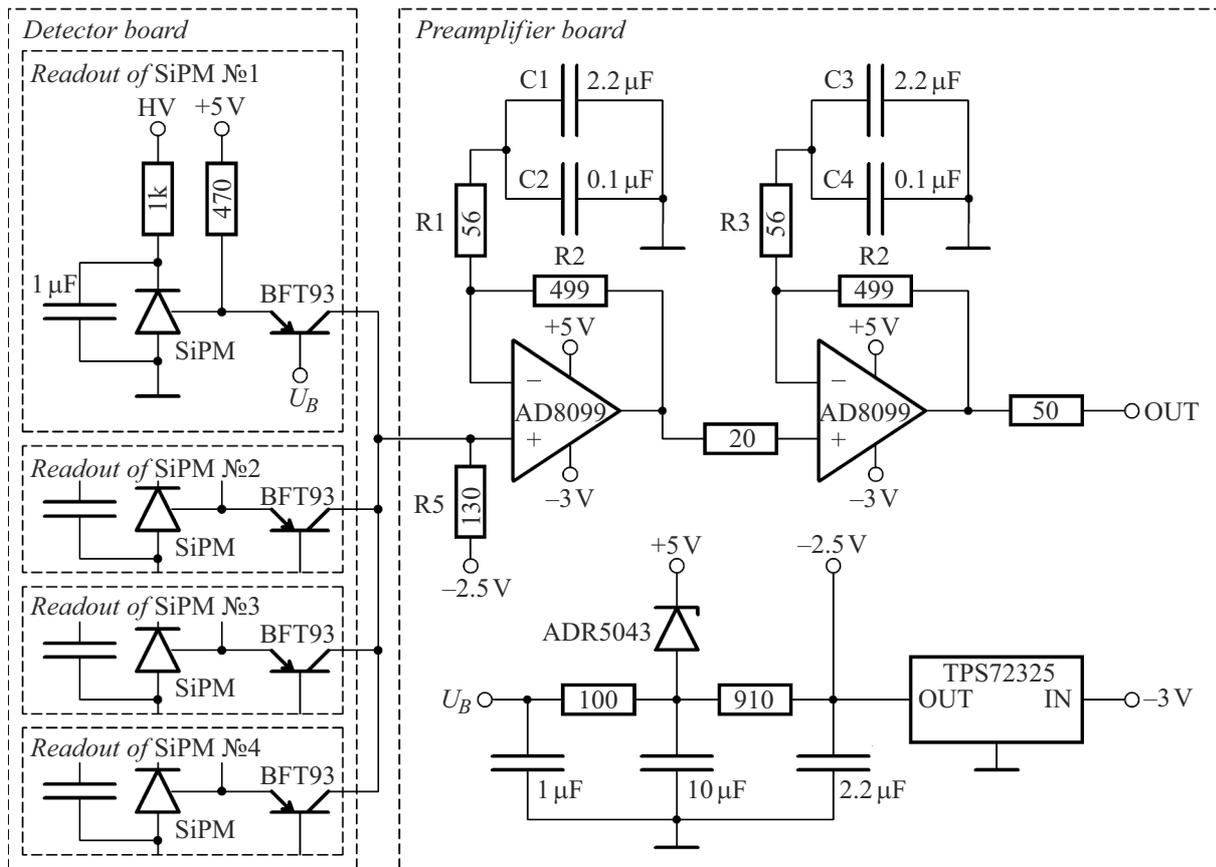


Рис. 1. Упрощенная электрическая схема пикселя.

При этом, учитывая то что в камере телескопа применяется большое количество пикселей, суммарное энергопотребление становится неприемлемым для существующей конструкции детекторной камеры телескопа TAIGA-IACT. Для решения данной проблемы была разработана и реализована альтернативная схема съема сигналов с четырех SiPM, обеспечивающая значительно меньшее потребление (0.45 W) при тех же параметрах (рис. 1). Ключевым моментом в этой схеме стал вариант суммирования сигналов повторителей тока. Для этого были соединены между собой коллекторы транзисторов в повторителях тока на плате детекторов.

Данное решение позволяет использовать одну схему предусилителя для снятия сигнала сразу с четырех SiPM. В результате была разработана схема детектора на четырех MicroFJ-60035 и схема предусилителя, содержащая только два операционных усилителя вместо девяти из работы [6].

На рис. 1 представлена упрощенная схема пикселя. Сигналы с быстрых выходов детекторов суммируются путем соединения коллекторов транзисторов BFT93. Однако при этом суммируются и выходные емкости повторителей тока. Но вследствие их незначительности (около 1 pF) и небольшого входного сопротивления

предусилителя R5, равного 130 Ω, это не оказывает значительного влияния на временные параметры схемы.

При суммировании сигналов детекторов суммируются и токи покоя входных повторителей, сумма которых составляет 20 mA. Это приводит к необходимости смещения входного резистора R5, преобразующего ток в напряжение, от „земли“ к отрицательному напряжению (-2.5 V). Учитывая это, падение напряжения на R5 составит 2.6 V, в результате чего на входе предусилителя образуется смещение постоянного уровня (около 100 mV), являющееся „пьедесталом“ для дальнейшей схемы регистрации.

Постоянный уровень на входе ПУ повторяется на его выходе, так как для постоянного напряжения усилительные каскады имеют коэффициент усиления 1. Однако на высоких частотах каждый каскад имеет коэффициент усиления близкий к 10, что обеспечивается цепями R1-R2-C1-C2 и R3-R4-C3-C4. Каскады усиления выполнены на широкополосных операционных усилителях AD8099 с обратной связью по напряжению, которые отличаются сверхмалой плотностью шумов по напряжению ($0.95 \text{ nV}/\sqrt{\text{Hz}}$) в сочетании с высокой скоростью нарастания ($1350 \text{ V}/\mu\text{s}$). В схеме на рис. 1 для стабилизации потенциала базы (U_B) транзисторных повторителей тока детектора используется прецизионный источник



Рис. 2. Внешний вид пикселя нового детекторного кластера в разборе.

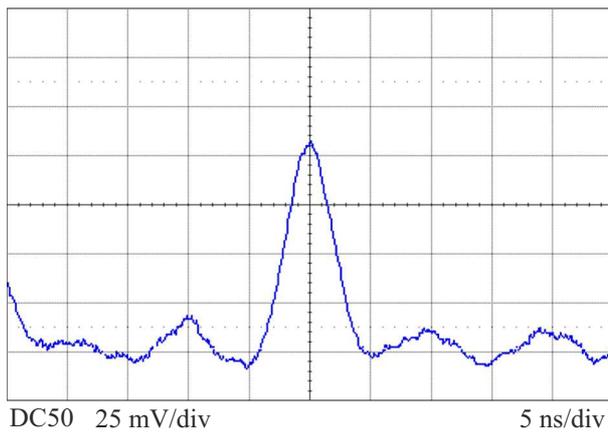


Рис. 3. Осциллограмма сигнала темного счета с пикселя амплитудой 4 фотоэлектрона.

опорного напряжения ADR5043, а также интегральный стабилизатор отрицательного напряжения TPS72325 на -2.5 V . В сочетании с соответствующей стабилизацией цепей питания операционных усилителей ($+5\text{ V}$ и -2.5 V) источник опорного напряжения поддерживает постоянный потенциал на базах транзисторов.

Конструктивно схема съема сигнала с SiPM выполнена в виде двух печатных плат: платы детекторов и платы предусилителей. Платы спаяны вместе под прямым углом и вместе с корпусом образуют пиксель (рис. 2). Плата детекторов содержит четыре SiPM и элементы, указанные на рис. 1 для платы детекторов. Корпус пикселя выполнен в виде цилиндрической алюминиевой трубки с внутренней резьбой на концах, в которые вкручиваются резьбовые кольца, фиксирующие спаянные платы внутри корпуса.

На рис. 3 приведена осциллограмма сигнала темного счета с пикселя амплитудой 4 фотоэлектрона (4 сработавшие микроячейки) при перенапряжении детекторов 4 V . Форма импульса симметричная, фронт и спад имеют длительность около 2 ns , ширина импульса на полувысоте составляет 4 ns .

По разработанным схемам были созданы детекторные пиксели на основе SiPM MicroFJ-60035 для двух детекторных кластеров, состоящие из 28 пикселей каждый. Были проведены лабораторные испытания детекторных кластеров, показавшие возможность регистрации как единичных фотонов, так и фотонов с большой интенсивностью [7]. Один детекторный кластер был успешно испытан на действующем телескопе TAIGA-IACST астрофизического полигона TAIGA в летне-осенний сезон наблюдений 2022 г. Второй детекторный кластер прибыл на полигон вместе со специально разработанным контроллером кластеров для будущих совместных испытаний прототипа камеры ALEGRO. Так же был разработан и создан опытный модуль прототипа детекторной камеры ALEGRO на базе кремниевого фотоумножителя MicroFC-60035.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов

Список литературы

- [1] И. Иванов. Научно-технический журнал „Фотоника“, **6**, 70 (2015).
https://photonics.su/files/article_pdf/4/article_4989_578.pdf
- [2] А.М. Быков, Ф.А. Агаронян, А.М. Красильщиков, Е.Е. Холупенко, П.Н. Аруев, Д.А. Байко, А.А. Богданов, Г.И. Васильев, В.В. Забродский, С.В. Троицкий, Ю.В. Тубольцев, А.А. Кожберов, К.П. Левенфиш, Ю.В. Чичагов. ЖТФ, **87** (6), 803 (2017).
<http://doi.org/10.21883/JTF.2017.06.44501.2117>
[А.М. Bykov, F.A. Aharonian, A.M. Krassilchtchikov, E.E. Kholupenko, P.N. Aruev, D.A. Baiko, A.A. Bogdanov, G.I. Vasilyev, V.V. Zabrodskii, S.V. Troitsky, Yu.V. Tuboltsev, A.A. Kozhberov, K.P. Levenfish, Yu.V. Chichagov. Tech. Phys., **62** (6), 819 (2017).
<http://doi.org/10.1134/S106378421706007X>]
- [3] Е.Е. Холупенко, А.М. Быков, Ф.А. Агаронян, Г.И. Васильев, А.М. Красильщиков, П.Н. Аруев, В.В. Забродский, А.В. Николаев. ЖТФ, **88** (11), 1655 (2018).
<http://doi.org/10.21883/JTF.2018.11.46626.176-18>
[E.E. Kholupenko, A.M. Bykov, F.A. Aharonyan, G.I. Vasilyev, A.M. Krassilchtchikov, P.N. Aruev, V.V. Zabrodskii, A.V. Nikolaev. Tech. Phys., **63** (11), 1603 (2018).
<http://doi.org/10.1134/S1063784218110154>]
- [4] L.A. Kuzmichev, I.I. Astapov, P.A. Bezyazeev, M. Blank, E.A. Bonvech, A.N. Borodin, M. Brueckner, N.M. Budnev, A.V. Bulan, D.V. Chernov, A. Chiavassa, A.N. Dyachok, A.R. Gafarov, A.Yu. Garmash, V.M. Grebenyuk, O.A. Gress, T.I. Gress, A.A. Grinyuk, O.G. Grishin, D. Horns, A.L. Ivanova, N.N. Kalmykov, V.V. Kindin, S.N. Kiryuhin, R.P. Kokoulin, K.G. Kompaniets, E.E. Korosteleva, V.A. Kozhin,

- E.A. Kravchenko, A.P. Kryukov, A.A. Lagutin, M.V. Lavrova, Yu. Lemeshev, B.K. Lubsandorzhev, N.B. Lubsandorzhev, A.D. Lukanov, D. Lukyantsev, R.R. Mirgazov, R. Mirzoyan, R.D. Monkhoev, E.A. Osipova, A.L. Pakhorukov, A. Pan, L.V. Pankov, A.D. Panov, A.A. Petrukhin, D.A. Podgrudkov, V.A. Poleschuk, E.G. Popova, A. Porelli, E.B. Postnikov, V.V. Prosin, V.S. Ptuskin, A.A. Pushnin, R.I. Raikin, A. Razumov, E. Rjabov, G.I. Rubtsov, Y.I. Sagan, V.S. Samoliga, A.Yu. Sidorenkov, A.A. Silaev, A.A. Silaev, Jr., A.V. Skurikhin, M. Slunicka, A.V. Sokolov, Y. Suvorkin, L.G. Sveshnikova, V.A. Tabolenko, A.B. Tanaev, B.A. Tarashansky, M. Ternovoy, L.G. Tkachev, M. Tluczykont, N. Ushakov, A. Vaidyanathan, P.A. Volchugov, N.V. Volkov, D. Voronin, R. Wischnewski, I.I. Yashin, A.V. Zagorodnikov, D.P. Zhurov. *Phys. Atomic Nuclei*, **84** (6), 966 (2021).
<http://doi.org/10.1134/S1063778821130172>
- [5] N.M. Budnev, I.I. Astapov, P.A. Bezyazeev, A.N. Borodin, R. Wischnewski, A.Yu. Garmash, A.R. Gafarov, N.V. Gorbunov, V.M. Grebenyuk, O.A. Gress, T.I. Gress, A.A. Grinyuk, O.G. Grishin, A.N. Dyachok, D.P. Zhurov, A.V. Zagorodnikov, V.L. Zurbanov, A.L. Ivanova, Yu.A. Kazarina, N.N. Kalmykov, N.I. Karpov, V.V. Kindin, P.S. Kirilenko, S.N. Kiryuhin, V.A. Kozhin, R.P. Kokoulin, K.G. Kompaniets, E.E. Korosteleva, E.A. Kravchenko, L.A. Kuzmichev, M. Kunnas, A. Chiavassa, A.A. Lagutin, V.V. Lenok, B.K. Lubsandorzhev, N.B. Lubsandorzhev, R.R. Mirgazov, R. Mirzoyan, R.D. Monkhoev, R. Nakhtigal, E.A. Osipova, M.I. Panasyuk, L.V. Pankov, A.L. Pakhorukov, A.A. Petrukhin, V.A. Poleschuk, M. Popescu, E.G. Popova, A. Porelli, E.B. Postnikov, V.V. Prosin, V.S. Ptuskin, A.A. Pushnin, R.I. Raikin, G.I. Rubtsov, Y.I. Sagan, V.S. Samoliga, L.G. Sveshnikova, A.Yu. Sidorenkov, A.A. Silaev, A.A. Silaev, A.V. Skurikhin, M. Slunicka, A.V. Sokolov, V.P. Sulakov, V.A. Tabolenko, A.B. Tanaev, B.A. Tarashansky, L.G. Tkachev, A.V. Tkachenko, M. Tluczykont, O.L. Fedorov, D. Horns, C. Spiering, I.I. Yashin. *Bull. Russ. Acad. Sci. Phys.*, **83** (8), 951 (2019). <http://doi.org/10.3103/S1062873819080100>
- [6] A.A. Bogdanov, Yu.V. Tuboltsev, Yu.V. Chichagov, A.M. Krassilchtchikov. *J. Phys.: Conf. Ser.*, **2103**, 012026 (2021). <http://doi.org/10.1088/1742-6596/2103/1/012026>
- [7] A.A. Bogdanov, G.A. Repman1, Yu.V. Tuboltsev, Yu.V. Chichagov, E.E. Kholupenko, A.M. Krassilchtchikov. *J. Phys. Mathemat.*, **16** (1.2), 410 (2023).
<https://doi.org/10.18721/JPM.161.262>