

Спектральные характеристики кремниевых фотоэлектронных умножителей

И. Р. Гулаков, А. О. Зеневич, О. В. Кочергина

Исследовано влияние температуры окружающей среды и напряжения питания на спектральную чувствительность и динамический диапазон опытных образцов кремниевых фотоумножителей производства ОАО «Интеграл» (Республика Беларусь) и серийно выпускаемых фотоумножителей Кетек РМ 3325 и ON Semi FC 30035. Определено, что максимум спектральной чувствительности кремниевых фотоумножителей сдвинут в коротковолновую область и соответствует длине волны оптического излучения 470 нм. Показано, что увеличение напряжения питания приводит к увеличению чувствительности исследуемых фотоприемников, а зависимость чувствительности от температуры по-разному проявляется при воздействии оптическим излучением разной длины волны.

Ключевые слова: кремниевый фотоэлектронный умножитель, динамический диапазон, спектральная чувствительность.

DOI: 10.51368/2307-4469-2021-9-2-164-171

Введение

В последнее время для регистрации оптического излучения часто используются многопиксельные лавинные фотоприемники, получившие название кремниевых фотоумножителей (*Si-ФЭУ*) [1]. Отличительными особенностями этих фотоприемников от лавинных фотодиодов являются большая площадь фоточувствительной поверхности и более высокий коэффициент

усиления фототока. Фоточувствительной поверхностью *Si-ФЭУ* является матрица отдельных *p-n*-переходов (пикселей), каждый из которых представляет собой лавинный фотодиод. Эти *p-n*-переходы включены параллельно друг другу и имеют общую нагрузку. Принцип работы *Si-ФЭУ* заключается в том, что при одновременном поглощении нескольких фотонов в разных пикселях в каждом из них возникает импульс фототока, в результате чего на выходе *Si-ФЭУ* появляется сигнал, который представляет собой суммарный импульс фототока всех пикселей.

Наиболее важными характеристиками лавинного фотоприемника является спектральная чувствительность и динамический диапазон [1–3]. Однако в литературе отсутствуют подробные сведения о влиянии на спектральную чувствительность и динамический диапазон таких факторов

Гулаков Иван Романович, профессор, д.ф.-м.н.
Зеневич Андрей Олегович, ректор, профессор,
д.т.н.

Кочергина Ольга Викторовна, аспирант.
E-mail: o.kochergina@bsac.by
Белорусская государственная академия связи.
Беларусь, 220114, г. Минск, ул. Ф. Скорины, 8/2.

Статья поступила в редакцию 12 января 2021 г.

© Гулаков И. Р., Зеневич А. О., Кочергина О. В.,
2021

как температура окружающей среды и напряжение питания *Si-ФЭУ* [4–7]. Поэтому целью данной статьи являлось установление зависимостей динамического диапазона и спектральной чувствительности кремниевого фотоумножителя от температуры окружающей среды и напряжения питания *Si-ФЭУ*.

Экспериментальная установка и методика исследований

В качестве объектов для проведения исследований использовались опытные образцы *Si-ФЭУ* со структурой $p^+ - p - n^+$ производства ОАО «Интеграл» (Республика Беларусь), а также серийно выпускаемые кремниевые фотоумножители *Кетек РМ 3325* и *ON Semi FC 30035*. Фотоприемники имели разную площадь фоточувствительной поверхности. Так, для *Si-ФЭУ* производства ОАО «Интеграл» она составляла $1,56 \text{ мм}^2$ ($1,25 \times 1,25 \text{ мм}^2$), а для *Кетек РМ 3325* и *ON Semi FC 30035* имела значение 9 мм^2 ($3 \times 3 \text{ мм}^2$). Число пикселей составляет 13920 для *Кетек РМ 3325*, 4774

для *ON Semi FC 30035* и 1858 для *Si-ФЭУ* производства ОАО «Интеграл».

На рис. 1 приведена структурная схема экспериментальной установки, на которой были выполнены исследования. В качестве источников оптического излучения в установке был использован набор светодиодов *L* с длинами волн излучения 380, 470, 560, 580, 650, 850 и 940 нм. Выбор этих длин волн обусловлен диапазоном спектральной чувствительности кремния. Для питания светодиодов использовался источник постоянного напряжения *P1*. От одного из светодиодов оптическое излучение последовательно через набор нейтральных светофильтров, полупрозрачное зеркало *Z* и диафрагму *D* поступало на *Si-ФЭУ*. Набор нейтральных светофильтров *N* использовался для ослабления оптического излучения в интервале интенсивностей от 10^{-10} до 10^{-5} Вт/см^2 . Полупрозрачное зеркало *Z* применяется для разделения оптического излучения на две части с равными интенсивностями, одна из которых поступала на лазерный дозиметр *LD*, а другая подавалась, как уже отмечено выше, на *Si-ФЭУ*.

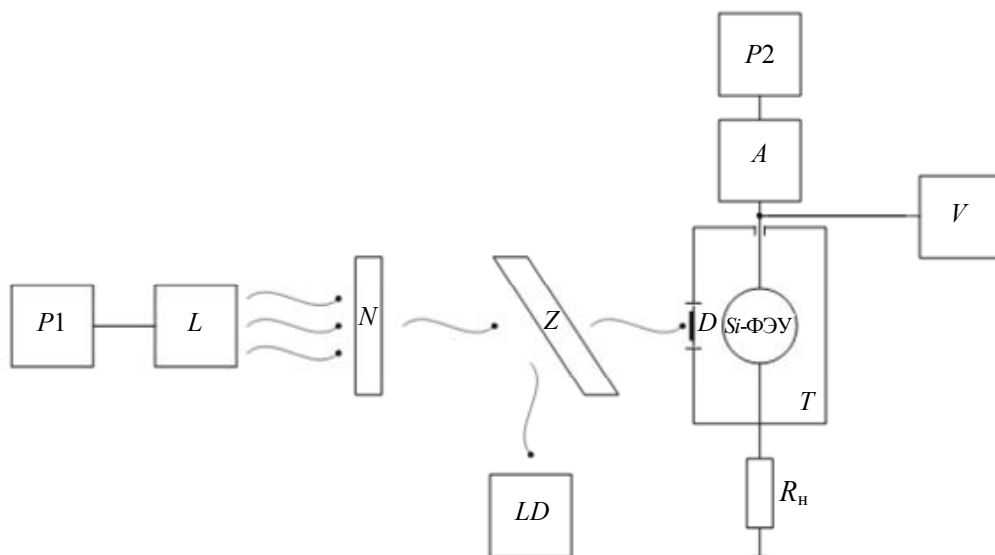


Рис. 1. Блок-схема экспериментальной установки: *P1* – источник постоянного напряжения; *P2* – регулируемый источник питания; *L* – набор светодиодов; *N* – набор нейтральных светофильтров; *Z* – полупрозрачное зеркало; *LD* – лазерный дозиметр; *D* – диафрагма; *T* – камера тепла и холода; *A* – амперметр; *V* – вольтметр; *R_н* – резистор нагрузки.

Si-ФЭУ помещался в камеру тепла и холода T , обеспечивающую регулирование и стабилизацию температуры от 243 до 313 К. Выбор температурного диапазона связан с условиями, при которых наиболее часто эксплуатируются *Si-ФЭУ*.

Напряжение питания на *Si-ФЭУ* подавалось от регулируемого источника питания $P2$ и контролировалось вольтметром V . Для измерения электрического тока, протекающего через *Si-ФЭУ*, использовался амперметр A . Последовательно с *Si-ФЭУ* подключался нагрузочный резистор $R_n = 1$ кОм, ограничивающий электрический ток, протекающий через *Si-ФЭУ*.

В случае, когда диафрагма D была закрыта, на *Si-ФЭУ* не поступает оптическое излучение и амперметр регистрирует только темновой ток I_T . Если диафрагма D была открыта, то на *Si-ФЭУ* поступает оптическое излучение и амперметр регистрирует фототок и темновой ток I_{Tc} .

Чувствительность S определялась, согласно [2], по следующей формуле:

$$S = \frac{I_\phi}{J}, \quad (1)$$

где J – интенсивность оптического излучения, поступающего на *Si-ФЭУ*; I_ϕ – фототок; $I_\phi = I_{Tc} - I_T$.

Чувствительность определялась для линейного участка зависимости I_ϕ от J . Абсолютная токовая чувствительность [2] выражается формулой:

$$S_A = I_\phi A/J, \quad (2)$$

где A – площадь фоточувствительной площадки фотоприемника.

Величина динамического диапазона D находится формуле [2]:

$$D = \frac{J_k}{J_n} \quad (3)$$

где J_k и J_n – критическая и пороговая интенсивности излучения. Под критической

интенсивностью понимается такая интенсивность, для которой отклонение фототока от линейного закона зависимости I_ϕ от J соответствует 20 % [2]. Под пороговой интенсивностью понимается минимальная интенсивность оптического излучения, которую может зарегистрировать *Si-ФЭУ*. Эта интенсивность вычислялась по следующей формуле:

$$J_n = \frac{I_{ш}}{I_\phi}, \quad (4)$$

где $I_{ш}$ – ток шума; I_ϕ – фототок, соответствующий J .

Напряжение пробоя *Si-ФЭУ* определялось по обратной ветви его вольт-амперной характеристики по методике, описанной в [1]. Поскольку исследуемые *Si-ФЭУ* имеют различные напряжения пробоя $U_{пр}$, то при сравнении их характеристик между собой применяют величину перенапряжения $\Delta U = U_n - U_{пр}$, где U_n – напряжение питания *Si-ФЭУ*.

Исследование проводилось в диапазоне перенапряжений $\Delta U = -0,5 \div 0,8$ В, что обусловлено характером исследуемых зависимостей.

Напряжения пробоя для данных *Si-ФЭУ* при комнатной температуре $T = 297$ К составляло следующие значения: $U_{пр} = 27,0$ В для *Ketek PM 3325*, $U_{пр} = 24,7$ В для *ON Semi FC 30035* и $U_{пр} = 37,5$ В для *Si-ФЭУ* производства ОАО «Интеграл». При увеличении температуры окружающей среды напряжение пробоя повышается, а при уменьшении – $U_{пр}$ понижается. Такое поведение напряжения пробоя *Si-ФЭУ* от температуры учитывалось при определении ΔU для каждого конкретного исследуемого значения T .

Результаты измерения и их обсуждение

Выполненные исследования зависимости чувствительности *Si-ФЭУ* от длины

волны регистрируемого оптического излучения представлены на рис. 2. Данные зависимости получены при комнатной температуре $T = 297$ К и перенапряжении $\Delta U = 0,4$ В для всех исследуемых фотоприемников.

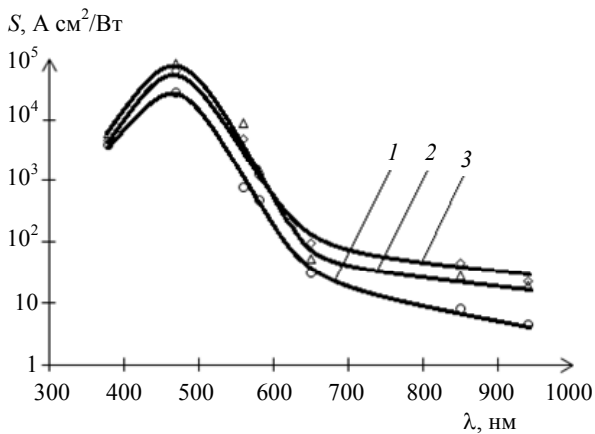


Рис. 2. Зависимости чувствительности от длины волны оптического излучения для фотоприемников: 1 – Si-ФЭУ производства ОАО «Интеграл»; 2 – ON Semi FC 30035; 3 – Кетек РМ 3325.

Как видно из рис. 2, все зависимости $S(\lambda)$ имеют примерно одинаковую форму и четко выраженный максимум, который соответствует длине волны 470 нм. Для перенапряжений $\Delta U \geq 0,0$ В смещение максимума зависимости S от λ не происходило. Максимальные значения чувствительности для данной длины волны при этой температуре и $\Delta U = 0,4$ В составляли следующие значения: для Si-ФЭУ производства ОАО «Интеграл» $S = 2,7 \times 10^4$ А см²/Вт, для Кетек РМ 3325 $S = 6,0 \times 10^4$ А см²/Вт, для ON Semi FC 30035 $S = 8,1 \times 10^4$ А см²/Вт, а абсолютные чувствительности имели значения: $S_A = 1,73 \times 10^6$ А/Вт; $S_A = 0,67 \times 10^6$ А/Вт; $S_A = 0,90 \times 10^6$ А/Вт соответственно для Si-ФЭУ производства ОАО «Интеграл», Кетек РМ 3325 и ON Semi FC 30035.

Поскольку поглощение оптического излучения в кремнии зависит от длины волны, то для эффективной регистрации излучения с различными длинами волн используют фотоприемники, имеющие полупроводниковые структуры с разным расположением слоев, а именно: для $\lambda =$

$= 500\text{--}750$ нм с расположением чувствительного слоя в глубине, а для $\lambda = 400\text{--}550$ нм – с чувствительным слоем, максимально приближенным к поверхности фотоприемника [7]. Исследуемые Si-ФЭУ предназначены для работы в блоках сцинтилляционных счетчиков, поэтому имеют максимум чувствительности в коротковолновой области, где расположены максимумы спектров излучения большинства сцинтилляторов.

При температуре $T = 297$ К и перенапряжении $\Delta U = 0,4$ В на длине волны излучения 940 нм чувствительность была наименьшей, а именно: $S = 4,5$ А см²/Вт для Si-ФЭУ производства ОАО «Интеграл», $S = 22,5$ А см²/Вт для Кетек РМ 3325 и $S = 18,6$ А см²/Вт для ON Semi FC 30035. Таким образом, при заданных условиях максимальная чувствительность превосходила наименьшее значение S более чем 2×10^3 раз. При увеличении перенапряжения выше 0,0 В для всех исследуемых Si-ФЭУ наблюдалось уменьшение отношения между максимальной и минимальной чувствительностью. Уменьшение температуры влекло уменьшение отношения между максимальной и минимальной чувствительностью.

На рис. 3 показаны типичные зависимости $S(\Delta U)$ для исследуемых Si-ФЭУ. Данные зависимости получены для длины волны оптического излучения 650 нм и температуры $T = 297$ К. Для других длин волн и температур эти зависимости были аналогичными.

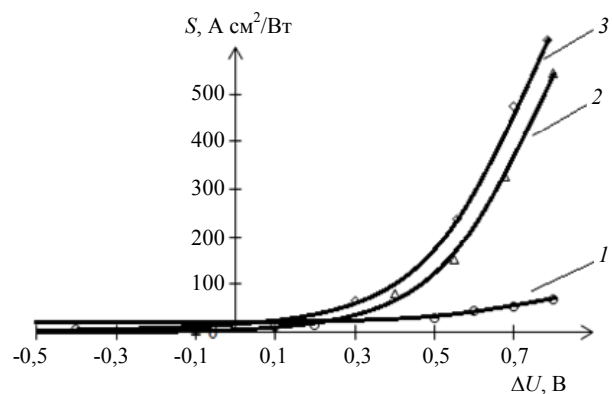


Рис. 3. Зависимость чувствительности от перенапряжения: 1 – Si-ФЭУ производства ОАО «Интеграл»; 2 – ON Semi FC 30035; 3 – Кетек РМ 3325.

Как видно, рост перенапряжения приводил к увеличению чувствительности. Это можно объяснить тем, что с повышением перенапряжения увеличивается напряженность электрического поля в области умножения носителей заряда p - n -переходов Si -ФЭУ. Рост напряженности электрического поля приводит к увеличению коэффициента усиления фототока и повышению квантовой эффективности регистрации Si -ФЭУ [1]. Повышение квантовой эффективности регистрации и усиления фототока приводит к увеличению чувствительности Si -ФЭУ.

Из полученных зависимостей (рис. 3) видно, что в диапазоне перенапряжений $\Delta U = -0,5 \div 0,0$ В значения чувствительности исследуемых Si -ФЭУ практически не изменялись и не превышали $8,0 \text{ А см}^2/\text{Вт}$. В этом диапазоне перенапряжений наибольшую чувствительность имели Si -ФЭУ производства ОАО «Интеграл», а наименьшее – *ON Semi FC 30035*. При значениях $\Delta U > 0,0$ В наблюдается рост чувствительности Si -ФЭУ. Наиболее сильная зависимость между S и ΔU наблюдается для интервала перенапряжений от $0,5$ до $0,8$ В. Так величина $\Delta S/\Delta U_{\text{п}}$ (где ΔS – изменение чувствительности фотоприемника при изменении перенапряжения $\Delta U_{\text{п}}$) для этого интервала перенапряжений имела следующие значения: для *ON Semi FC 30035* $\Delta S/\Delta U_{\text{п}} = 1300 \text{ А см}^2/(\text{Вт В})$; для *Kemtek PM 3325* $\Delta S/\Delta U_{\text{п}} = 1350 \text{ А см}^2/(\text{Вт В})$; для Si -ФЭУ производства ОАО «Интеграл» $\Delta S/\Delta U_{\text{п}} = 130 \text{ А см}^2/(\text{Вт В})$; в то время как для интервала перенапряжений от $0,0$ до $0,5$ В была $\Delta S/\Delta U_{\text{п}} = 300 \text{ А см}^2/(\text{Вт В})$ для *ON Semi FC 30035*, $\Delta S/\Delta U_{\text{п}} = 390 \text{ А см}^2/(\text{Вт В})$ для *Kemtek PM 3325*, $\Delta S/\Delta U_{\text{п}} = 40 \text{ А см}^2/(\text{Вт В})$ для Si -ФЭУ производства ОАО «Интеграл». Из оценки зависимостей $S(\Delta U)$ следует, что для поддержания постоянной спектральной чувствительности кремниевых фотоумножителей, необходимо использовать для их питания источники высокостабильного напряжения.

Необходимо отметить, что в исследуемом диапазоне перенапряжений наибольшую чувствительность имеют Si -ФЭУ производства ОАО «Интеграл» для перенапряжений $\Delta U < 0,0$ В, а наименьшую – *ON Semi FC 30035*. При $\Delta U > 0,0$ В чувствительность фотоприемников *ON Semi FC* и *Kemtek PM 3325* начинает превосходить чувствительность Si -ФЭУ производства ОАО «Интеграл». При этом наибольшее значение S имели *Kemtek PM 3325* для всех длин волн оптического излучения. Такое поведение кремниевых фотоумножителей связано с тем, что для $\Delta U > 0,0$ В фотоприемники *ON Semi FC* и *Kemtek PM 3325* имели более высокие значения коэффициента усиления фототока и квантовой эффективности регистрации, чем Si -ФЭУ производства ОАО «Интеграл».

Выполненные исследования чувствительности кремниевых фотоэлектронных умножителей от температуры показали, что изменение температуры T при постоянной величине перенапряжения ΔU не приводит к смещению максимума зависимости $S(\lambda)$. Также для всех исследуемых длин волн и Si -ФЭУ зависимости $S(T)$ имеют вид, близкий к линейному, а уменьшение температуры приводило к росту спектральной чувствительности. Такое поведение зависимости $S(T)$ можно объяснить тем, что с понижением температуры увеличивается квантовая эффективность регистрации Si -ФЭУ и коэффициент усиления его фототока.

На рис. 4 представлена зависимость отношения изменения ΔS спектральной чувствительности к изменению температуры ΔT от длины волны оптического излучения. Поскольку величина $\Delta S/\Delta T$ является отрицательной, то для сравнения и анализа этой величины для различных Si -ФЭУ будем использовать модуль этой величины.

Полученные зависимости $|\Delta S/\Delta T|$ от λ имеют максимум, соответствующий 470 нм . Более сильную зависимость указанной ве-

личины на этой длине волны имеют фотоприемники *Кетек РМ 3325* $|\Delta S/\Delta T| = 1000 \text{ А см}^2/(\text{Вт К})$, а наименьшую *Si-ФЭУ* производства ОАО «Интеграл» $|\Delta S/\Delta T| = 130 \text{ А см}^2/(\text{Вт К})$. На длине волны 380 нм наименьшее значение имеют фотоприемники *Si-ФЭУ* производства ОАО «Интеграл» $|\Delta S/\Delta T| = 25 \text{ А см}^2/(\text{Вт К})$, а наибольшее *Кетек РМ 3325* $|\Delta S/\Delta T| = 800 \text{ А см}^2/(\text{Вт К})$. На длине волны 940 нм также наименьшее значение имеют фотоприемники *Si-ФЭУ* производства ОАО «Интеграл» $|\Delta S/\Delta T| = 0,1 \text{ А см}^2/(\text{Вт К})$, а наибольшее *Кетек РМ 3325* $|\Delta S/\Delta T| = 0,8 \text{ А см}^2/(\text{Вт К})$. Наиболее сильно зависимость чувствительности от температуры окружающей среды наблюдается для λ находящихся в интервале от 380 до 580 нм, по сравнению с длинами волн 650 нм и более.

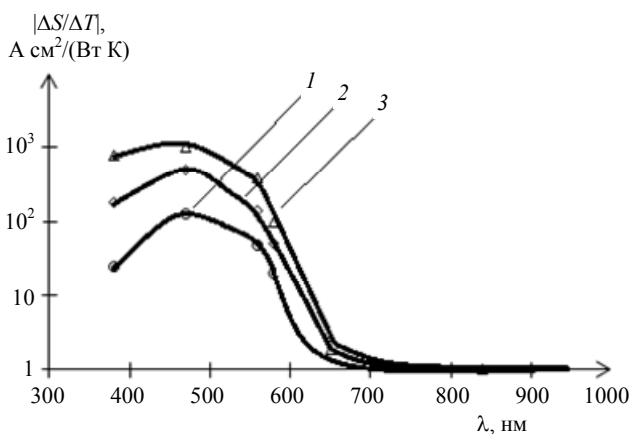


Рис. 4. Зависимость величины $\Delta S/\Delta T$ от длины волны оптического излучения: 1 – *Si-ФЭУ* производства ОАО «Интеграл»; 2 – *ON Semi FC 30035*; 3 – *Кетек РМ 3325*.

Среди исследуемых фотоприемников, наиболее сильно зависимость чувствительности от температуры при изменении длины волны оптического излучения проявляется у *Кетек РМ 3325*, а наименее у *Si-ФЭУ* производства ОАО «Интеграл». Это связано с различной внутренней структурой данных фотоприемников. Таким образом, более высокая стабилизация температуры требуется при регистрации излучения с длиной волны 470 нм, при чем

для *Кетек РМ 3325* для обеспечения постоянства чувствительности с погрешностью в 1 % требуется стабилизация температуры с $\Delta T < 0,5 \text{ К}$, в то время как для *Si-ФЭУ* производства ОАО «Интеграл» – достаточно $\Delta T < 2 \text{ К}$. Таким образом, для достижения стабильной спектральной чувствительности необходимо поддерживать работу кремниевых фотоумножителей при постоянной температуре или подстраивать напряжение их питания в соответствии с изменением рабочей температуры.

На рис. 5, а представлены типичные зависимости динамического диапазона от длины волны регистрируемого оптического излучения, полученные при перенапряжении $\Delta U = 0,4 \text{ В}$ и температуре 297 К. Такие же зависимости для других температур являются аналогичными.

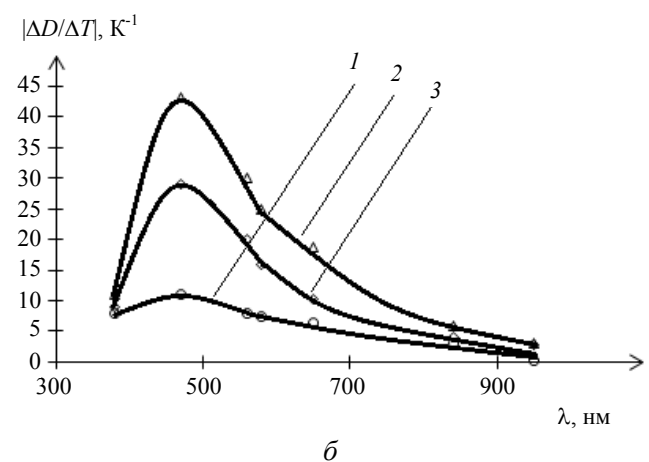
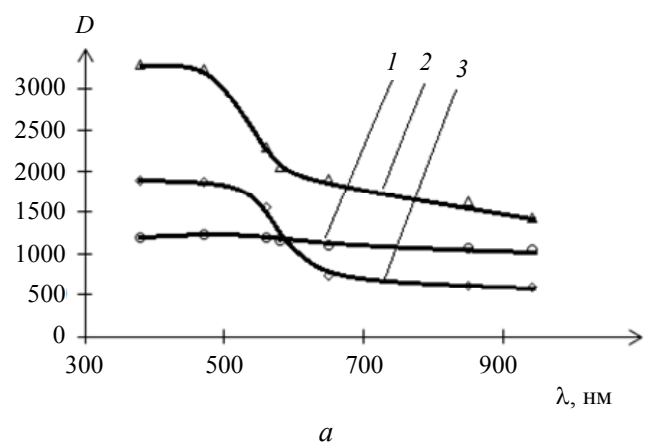


Рис. 5. Зависимость динамического диапазона (а) и величины $|\Delta D/\Delta T|$ от длины волны оптического излучения (б): 1 – *Si-ФЭУ* производства ОАО «Интеграл»; 2 – *Кетек РМ 3325*; 3 – *ON Semi FC 30035*.

Как видно из рис. 5, а, наибольшие значения динамического диапазона соответствуют коротким длинам волн 380 и 470 нм. Так его величина для этих длин волн составила для *Si-ФЭУ* производства ОАО «Интеграл» $D \approx 1200$, для *Ketek PM 3325* $D \approx 3200$, для *ON Semi FC 30035* $D \approx 1900$. Увеличение длины волны оптического излучения приводит к уменьшению динамического диапазона. При длине волны оптического излучения 940 нм для фотоприемника *Si-ФЭУ* производства ОАО «Интеграл» $D = 1000$, для *Ketek PM 3325* $D = 1400$, для *ON Semi FC 30035* $D = 600$. Наибольшее значение динамического диапазона во всем исследуемом диапазоне длин волн имели фотоприемники *Ketek PM 3325*.

Зависимость динамического диапазона от температуры имеет линейный характер для всех исследуемых длин волн. Для анализа зависимости изменения динамического диапазона ΔD при изменении температуры ΔT от длины волны оптического излучения используем величину $|\Delta D/\Delta T|$. Такие зависимости (рис. 5, б) имеют максимум, соответствующий длине волны оптического излучения 470 нм. Наибольшие значения величины $|\Delta D/\Delta T|$ наблюдались для длины волны 470 нм для *Ketek PM 3325* и составляли $|\Delta D/\Delta T| = 43 \text{ K}^{-1}$, для *Si-ФЭУ* производства ОАО «Интеграл» $|\Delta D/\Delta T| = 11 \text{ K}^{-1}$ и для *ON Semi FC 30035* $|\Delta D/\Delta T| = 29 \text{ K}^{-1}$. Наибольшей зависимостью $|\Delta D/\Delta T|$ от длины волны оптического излучения обладают *Ketek PM 3325* для всех исследуемых длин волн, а наименьшей *Si-ФЭУ* производства ОАО «Интеграл». Для $\lambda = 470 \text{ нм}$ требуется более высокая стабилизация температуры, чем для других длин волн.

Заключение

Исследовано влияние температуры и напряжения питания на спектральную

чувствительность и динамический диапазон опытных образцов кремниевых фотомножителей производства ОАО «Интеграл» (Республика Беларусь) и серийно выпускаемых фотомножителей *Ketek PM 3325* и *ON Semi FC 30035*.

Определено, что максимум спектральной чувствительности кремниевых *Si-ФЭУ* сдвинут в коротковолновую область, где расположены максимумы спектров излучения большинства сцинтилляторов, и соответствует длине волны оптического излучения 470 нм.

Показано, что увеличение напряжения питания приводит к увеличению чувствительности исследуемых фотоприемников. Наиболее сильно зависимость проявляется при перенапряжении $\Delta U > 0,0 \text{ В}$.

Определено, что рост температуры приводит к снижению чувствительности фотоприемников. При этом зависимость чувствительности от температуры по-разному проявляется при воздействии оптическим излучением разной длины волны.

Наибольшее значение динамического диапазона во всем исследуемом диапазоне длин волн, а также наибольшую зависимость динамического диапазона и $|\Delta D/\Delta T|$ от длины волны оптического излучения имеет *Ketek PM 3325*.

Более высокая стабилизация температуры необходима для регистрации оптического излучения на длине волны 470 нм. *Ketek PM 3325* требуется большая стабилизация температуры, чем для других фотоприемников.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гулаков И. Р., Зеневич А.О. Фотоприемники квантовых систем. – Минск: УО ВГКС, 2012. – 276 с.
2. Приемники излучения полупроводниковые фотоэлектрические и фотоприёмные устройства. Методы измерения фотоэлектрических параметров и определения характеристик: ГОСТ 17772–88. – М.: Издательство стандартов, 1988. С. 7, 31.
3. Van Dam H., Seifert S., Vinke R., Dendooven P., Löhner H., Beekman F. J., Schaart D. R. //

Transactions on nuclear science. 2010. Vol. 57. No. 4. P. 2254.

4. Modi M. N., Daie K., Turner G. C., Podgorski K. // Optics Express. 2019. Vol. 27. No. 24/25. P. 35830.

5. Асаёнок М. А., Горбадей О. Ю., Зеневич А. О. // Доклады БГУИР. 2018. Т. 112. № 2. С. 54.

6. Гулаков И. Р., Залесский В. Б., Зеневич А. О. и др. // Проблемы инфокоммуникаций. 2019. № 2 (10). С. 5.

7. Гулаков И. Р. Регистрация гамма- и рентгеновского излучений. – Минск: Белорусская государственная академия связи, 2018. – 324 с.

PACS: 85.60.-q

Investigation of the spectral characteristics of silicon photomultiplier tubes

I. R. Gulakov, A. O. Zenevich, and O. V. Kochergina

Belarusian State Academy of Communications
8/2 F. Skorina st., Minsk, 220114, Belarus
E-mail: o.kochergina@bsac.by

Received January 12, 2021

Recently multipixel avalanche photodetectors, called silicon photomultipliers are often used to record optical radiation. The influence of ambient temperature and supply voltage on the spectral sensitivity and dynamic range of prototypes of silicon photomultipliers manufactured by JSC "Integral" (Republic of Belarus) and commercially available photomultipliers KetekRM 3325 and ON Semi FC 30035 has been investigated in this article. It was determined that the spectral sensitivity maximum of silicon photomultipliers is shifted to the short-wavelength region and corresponds to the wavelength of optical radiation of 470 nm. It is shown that an increase in the supply voltage leads to an increase in the sensitivity of the investigated photodetectors, and the dependence of the sensitivity on temperature manifests itself in different ways when exposed to optical radiation of different wavelengths.

Keywords: silicon photomultiplier, spectral sensitivity, dynamic range.

DOI: 10.51368/2307-4469-2021-9-2-164-171

REFERENCES

1. I. R. Gulakov and A. O. Zenevich. *PhotoReceivers of quantum systems* (Minsk, UO VGKS Publ., 2012. – 276 p.) [in Russian].

2. *Semiconducting photoelectric detectors and receiving photoelectric devices. Methods of measuring photoelectric parameters and determining characteristics.* State standard 17772–88 (Moscow: Standards publishing house, 1988) [in Russian].

3. H. T. van Dam, S. Seifert, R. Vinke, P. Denooven, H. Löhner, F. J. Beekman, and D. R. Schaart, Transactions on nuclear science **57** (4), 2254–2266 (2010).

4. M. N. Modi, K. Daie, G. C. Turner, and K. Podgorski, Optics Express **27** (24/25), 35830–35841 (2019).

5. M. A. Asayonak, O. Yu. Gorbadey, and A. O. Zenevich, Doklady BGUIR. **112** (2), 54–58 (2018) [in Russian].

6. I. R. Gulakov, V. B. Zalessky, A. O. Zenevich et al., Problemy infokommunikatsiy, No. 2(10), 5–11 (2019) [in Russian].

7. I. R. Gulakov, *Registration of gamma and X-ray radiation* (Minsk, Belarusian State Academy of Communications, 2018. – 324 p.) [in Russian].