

И. Р. Гулаков¹, А. О. Зеневич¹, О. В. Кочергина¹, А. М. Лемешевская², С. А. Сорока³

¹Белорусская государственная академия связи, Минск, Республика Беларусь

²Филиал НТЦ «Белмикросистемы» ОАО «ИНТЕГРАЛ» – управляющая компания холдинга «ИНТЕГРАЛ», Минск, Республика Беларусь

³ГНПО «Оптика, оптоэлектроника и лазерная техника» Национальной академии наук Беларуси, Минск, Республика Беларусь

ЗАВИСИМОСТИ ХАРАКТЕРИСТИК КРЕМНИЕВЫХ ФОТОУМНОЖИТЕЛЕЙ ОТ ТЕМПЕРАТУРЫ

Аннотация. Изучены зависимости характеристик от температуры окружающей среды трех типов кремниевых фотоумножителей. В качестве объектов исследования использовались опытные образцы Si-ФЭУ со структурой p^+-p-n^+ производства ОАО «Интеграл» (Республика Беларусь), серийно выпускаемые Si-ФЭУ КЕТЕК PM3325 и ON Semi FC 30035. Приведена схема установки и методика исследования. Выполнены измерения величины фототока от интенсивности засветки, расчеты критической и пороговой интенсивности, динамического диапазона регистрируемого оптического излучения. Представлены зависимости фототока от интенсивности засветки при разных температурах окружающей среды. Установлено, что данные зависимости имеют линейный участок, длина которого характеризует значение критической интенсивности излучения, а угол наклона линейного участка к оси интенсивности – чувствительность Si-ФЭУ к оптическому излучению. Определено, что рост температуры приводит к росту величины критической интенсивности и снижению чувствительности. Представлены зависимости пороговой интенсивности излучения от перенапряжения при разных температурах окружающей среды. Наиболее сильно зависимость пороговой интенсивности от перенапряжения проявляется при напряжении питания ниже напряжения пробоя. Установлено, что пороговая интенсивность излучения повышается с ростом температуры и зависимость пороговой интенсивности от температуры одинакова для всех исследуемых Si-ФЭУ. Определено, что значение динамического диапазона с ростом температуры уменьшается, что вызвано более значительным изменением пороговой интенсивности по сравнению с критической. Результаты исследований могут найти применение при разработке и конструировании приборов и устройств для регистрации оптического излучения на основе Si-ФЭУ.

Ключевые слова: кремниевый фотоумножитель, динамический диапазон, критическая и пороговая интенсивность

Для цитирования: Зависимости характеристик кремниевых фотоумножителей от температуры / И. Р. Гулаков [и др.] // Вес. Нац. акад. наук Беларуси. Сер. физ.-техн. наук. – 2021. – Т. 66, №2. – С. 234–240. <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2021-66-2-234-240>

Ivan R. Gulakov¹, Andrey O. Zenevich¹, Olga V. Kochergina¹, Alla M. Lemeshevskaya², Syargey A. Saroka³

¹Belarusian State Academy of Communications, Minsk, Republic of Belarus

²Branch of STC “Belmikrosystems” OJSC “INTEGRAL” – Managing Company of the Holding “INTEGRAL”, Republic of Belarus

³State Scientific and Practical Association “Optics, Optoelectronics and Laser Technology” of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Republic of Belarus

CHARACTERISTICS DEPENDENCE OF THE SILICON PHOTOELECTRONIC MULTIPLIERS ON TEMPERATURE

Abstract. The characteristics dependence on the ambient temperature for three types of silicon photoelectronic multipliers have been studied in this research. The prototypes of Si-photoelectronic multipliers with a p^+-p-n^+ structure produced by JSC Integral (Republic of Belarus), serially produced silicon photoelectronic multipliers KETEK PM3325 and ON Semi FC 30035 have been used as objects of research. We present the setup diagram and research technique. Measurements of the photocurrent magnitude versus the illumination intensity, calculations of the critical and threshold intensities, and the dynamic range have been performed. We also present the photocurrent dependences on the illumination intensity at different ambient temperatures. As it was found, these dependences have a linear section, the length of which characterizes the critical intensity value, and the inclination angle of the linear section to the intensity axis characterizes the photodetector sensitivity to optical radiation. It has been determined that the temperature increase leads to an increase in the critical intensity value and to a decrease in the sensitivity value. We present the dependences of the threshold intensity on the overvoltage at different ambient temperatures. The dependence of the threshold intensity – overvoltage is most strongly pronounced when the supply

voltage is below the breakdown voltage. It was found that the threshold intensity is increased with the temperature increase and the threshold intensity dependence on the temperature is the same for all investigated photodetectors. It was found that the dynamic range value is decreased with the temperature increase, which is caused by a more significant change in the threshold intensity as compared to the critical one. The results given in this article can be applied when developing and designing the tools and devices for recording optical radiation based on silicon photoelectronic multipliers.

Keywords: silicon photoelectronic multiplier, dynamic range, critical and threshold intensity

For citation: Gulakov I. R., Zenevich A. O., Kochergina O. V., Lemeshevskaya A. M., Saroka S. A. Characteristics dependence of the silicon photoelectronic multipliers on temperature. *Vestsi Natsyyanal'nai akademii navuk Belarusi. Seryya fizika-technichnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series*, 2021, vol. 66, no. 2, pp. 234–240 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2021-66-2-234-240>

Введение. Наиболее часто для регистрации оптического излучения малой интенсивности используются электровакуумные фотоэлектронные умножители и одноэлементные лавинные фотоприемники [1]. В последние годы для детектирования оптического излучения начинают применяться многоэлементные лавинные фотоприемники, которые получили название кремниевые фотоумножители (Si-ФЭУ). Эти фотоприемники по сравнению с электровакуумными фотоэлектронными умножителями имеют более низкое напряжение питания и высокую чувствительность в видимой и ближней инфракрасной области спектра, обладают достаточно хорошей механической прочностью. В отличие от одноэлементных лавинных фотоприемников Si-ФЭУ имеет большую площадь фоточувствительной поверхности, а также более высокий коэффициент усиления фототока. Структура Si-ФЭУ – это матрица $p-n$ -переходов, каждый из которых является лавинным фотодиодом. Все $p-n$ -переходы подключены параллельно друг к другу и к общей нагрузке [1]. При одновременном поглощении нескольких фотонов в разных $p-n$ -переходах в каждом из них формируется импульс тока. В результате сигнал на выходе Si-ФЭУ представляет собой суммарный импульс тока всех $p-n$ -переходов.

Одной из наиболее важных характеристик лавинного фотоприемника является динамический диапазон (ГОСТ 17772–88 «Приемники излучения полупроводниковые фотоэлектрические и фотоприемные устройства. Методы измерения фотоэлектрических параметров и определения характеристик»). Однако несмотря на большое количество публикаций по изучению характеристик Si-ФЭУ [2–5], отсутствуют сведения о влиянии на величину их динамического диапазона, пороговую и критическую интенсивность такого фактора, как температура. Поэтому *цель исследования* – изучение зависимости характеристик Si-ФЭУ от температуры окружающей среды.

Экспериментальная установка и методика исследований. В качестве объектов исследования были использованы опытные образцы Si-ФЭУ со структурой p^+-p-n^+ производства ОАО «Интеграл» (Республика Беларусь), серийно выпускаемые кремниевые фотоумножители КЕТЕК РМ3325 и ON Semi FC 30035.

На рис. 1 представлена структурная схема экспериментальной установки, на которой выполнялись исследования. В качестве источника оптического излучения используется светодиод С с длиной волны излучения 650 нм. Данная длина волны оптического излучения соответствует максимуму спектральной чувствительности исследуемых Si-ФЭУ. Оптическое излучение от светодиода С через оптическое волокно ОВ направляется к аттенюатору АТ. Аттенюатор ослабляет интенсивность излучения, распространяющегося по оптическому волокну, в интервале от 10^{-10} до 10^{-5} Вт/см². Выход аттенюатора соединен оптическим волокном с входом модулятора М. Работой модулятора управляет устройство управления УП. В случае, когда на управляющий вход модулятора от устройства управления подается напряжение, соответствующее логическому нулю, излучение не проходит через модулятор в оптическое волокно и не поступает на Si-ФЭУ. Когда на управляющий вход модулятора от устройства управления подается напряжение, соответствующее логической единице, оптическое излучение проходит через модулятор и поступает в оптическое волокно и на Si-ФЭУ.

Si-ФЭУ помещен в камеру тепла и холода КТХ, которая позволяет изменять температуру среды от 243 до 313 К. Выбранный температурный диапазон определяется условиями, при которых наиболее часто эксплуатируются Si-ФЭУ. Отметим, что в этом диапазоне температур физические свойства используемого оптического волокна не изменялись.

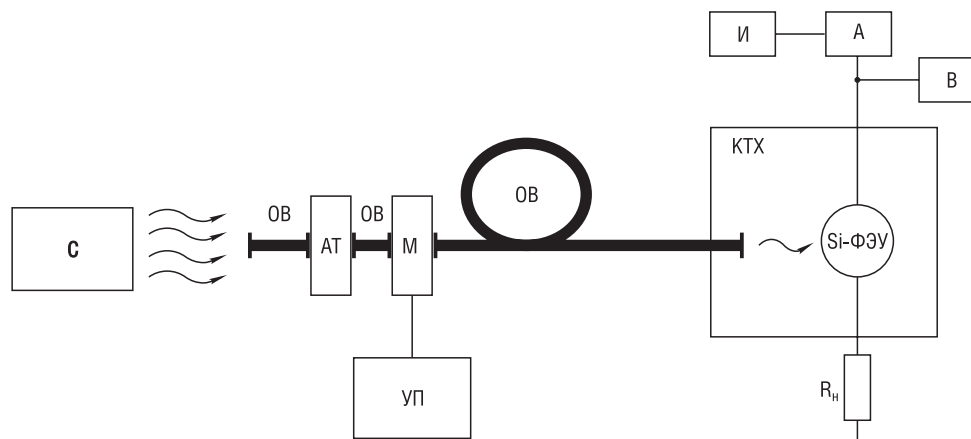


Рис. 1. Структурная схема экспериментальной установки: И – источник постоянного напряжения, С – светодиод, АТ – аттенюатор, ОБ – оптическое волокно, А – амперметр, В – вольтметр, УП – устройство управления, М – модулятор, R_н – резистор нагрузки, КТХ – камера тепла и холода

Fig. 1. Structural diagram of the experimental setup: И – DC power supply, С – light-emitting diode, АТ – attenuator, ОБ – optical fibre, А – ammeter, В – voltmeters, УП – control device, М – modulator, R_н – load resistor, КТХ – heat and cold chamber

Напряжение на Si-ФЭУ подавалось от источника питания И и контролировалось вольтметром В. Амперметр А использовался для измерения величины электрического тока, протекающего через Si-ФЭУ. Последовательно с Si-ФЭУ был подключен нагрузочный резистор R_н = 1 кОм, ограничивающий ток, протекающий через Si-ФЭУ.

В случае, когда на управляющий вход модулятора подавалось напряжение, соответствующее логическому нулю, амперметр регистрировал темновой ток I_т, протекающий через Si-ФЭУ в отсутствие падающего на него оптического излучения. Если на управляющий вход модулятора подавалось напряжение, соответствующее логической единице, то амперметр регистрировал общий ток I_{тс} = I_ф + I_т, протекающий через Si-ФЭУ при воздействии на него оптического излучения.

Согласно ГОСТ 17772–88, для измерения динамического диапазона устанавливается начальное значение интенсивности оптического излучения, при котором фототок в 2 раза больше, чем темновой ток. Измеряют соответствующую величину интенсивности излучения J и значение фототока. После чего интенсивность оптического излучения повышают на фиксированное значение, и вновь измеряют соответствующие величины фототока и интенсивности излучения. Затем опять повышают интенсивность на такое же фиксированное значение и повторяют измерение. Фиксированное значение интенсивности излучения подбиралось так, чтобы количество этих измерений было равно десяти. По результатам измерений определялась зависимость фототока от интенсивности оптического излучения: I_ф = f(J).

На основании энергетической характеристики I_ф = f(J) установлена критическая интенсивность излучения J_к, для которой отклонение фототока от линейного закона зависимости I_ф = f(J) соответствует 20 % (ГОСТ 17772–88).

При определении пороговой интенсивности J_п использовалась следующая формула:

$$J_{п} = \frac{J_1 I_{ш}}{I_{1ф}}, \quad (1)$$

где J₁ – среднее квадратическое отклонение величины интенсивности излучения; I_ш – ток шума; I_{1ф} – фототок, соответствующий J₁ [2]. Пороговая интенсивность – это минимальная интенсивность оптического излучения, которую может зарегистрировать Si-ФЭУ.

Величина динамического диапазона D находилась следующим образом [2]:

$$D = \frac{J_{к}}{J_{п}}. \quad (2)$$

Напряжение пробоя фотоприемников устанавливалось по вольтамперной характеристике согласно методике, описанной в [1]. Исследуемые Si-ФЭУ имеют различные напряжения пробоя $U_{пр}$, поэтому при сравнении их характеристик использовали величину перенапряжения, определяемую следующим образом: $\Delta U = U_{п} - U_{пр}$, где $U_{п}$ – напряжение питания Si-ФЭУ.

Результаты измерения и их обсуждение. Напряжение пробоя для данных Si-ФЭУ составляло:

$U_{пр} = 27,0$ В – для КЕТЕК РМ3325;

$U_{пр} = 24,7$ В – для ON Semi FC 30035;

$U_{пр} = 37,5$ В – для Si-ФЭУ производства ОАО «Интеграл».

На рис. 2 представлены типичные зависимости фототока от интенсивности оптической засветки, полученные для фотоприемника ON Semi FC 30035 при перенапряжении $\Delta U = 0$ В и длине волны оптического излучения 650 нм для разных температур окружающей среды. Отметим, что остальные виды фотоприемников имели аналогичные зависимости.

Из полученных зависимостей (см. рис. 2) следует, что при одинаковых значениях интенсивности регистрируемого оптического излучения увеличение температуры приводит к уменьшению значения фототока. Это обусловлено тем, что с понижением температуры уменьшается вероятность рассеяния свободных носителей заряда на колебаниях кристаллической решетки в полупроводниковой структуре фотоприемника. В результате увеличивается вероятность того, что в области лавинного умножения носитель заряда приобретет энергию, необходимую для ударной ионизации. Это приводит к увеличению коэффициента усиления и фототока. Также с уменьшением температуры наблюдается рост квантовой эффективности регистрации Si-ФЭУ.

Возрастание температуры приводит к увеличению критической интенсивности излучения. Так, для фотоприемника ON Semi FC 30035 при $\Delta U = 0$ В и $T = 243$ К величина $J_k = 7,5 \cdot 10^{-6}$ Вт/см², а при том же значении перенапряжения и температуре 313 К $J_k = 11,0 \cdot 10^{-6}$ Вт/см². При $\Delta U = 0$ В и температурах 243 К и 313 К для КЕТЕК РМ3325 критические значения интенсивности составляли $J_k = 4,0 \cdot 10^{-6}$ Вт/см² и $J_k = 6,0 \cdot 10^{-6}$ Вт/см² соответственно. Для того же значения перенапряжения критические интенсивности Si-ФЭУ производства ОАО «Интеграл» составляли $J_k = 12,0 \cdot 10^{-6}$ Вт/см² при $T = 243$ К и $J_k = 13,6 \cdot 10^{-6}$ Вт/см² при $T = 313$ К. Наибольшие значения критической интенсивности характерны для Si-ФЭУ производства ОАО «Интеграл», наименьшие – для КЕТЕК РМ3325.

В исследуемом интервале температур зависимость J_k от T является линейной. Для оценки этой зависимости использовали отношение $\Delta J_k / \Delta T$, где ΔJ_k – изменение критической интенсивности, соответствующее изменению температуры ΔT . Так, величина $\Delta J_k / \Delta T$ в исследуемом диапазоне температур при $\Delta U = 0$ В имела следующие значения:

$\Delta J_k / \Delta T = 4,3 \cdot 10^{-9}$ Вт/(см²·К) – для ON Semi FC 30035,

$\Delta J_k / \Delta T = 2,9 \cdot 10^{-9}$ Вт/(см²·К) – для КЕТЕК РМ3325,

$\Delta J_k / \Delta T = 2,0 \cdot 10^{-9}$ Вт/(см²·К) – для Si-ФЭУ производства ОАО «Интеграл».

Таким образом, наиболее сильная зависимость J_k от T наблюдается для ON Semi FC 30035, а наименьшая зависимость – для Si-ФЭУ производства ОАО «Интеграл». Как следует из полученных значений $\Delta J_k / \Delta T$, для поддержания постоянного значения критической интенсивности излучения при $\Delta U = 0$ В для ON Semi FC 30035 требуется более высокая стабилизация температуры, чем для других Si-ФЭУ.

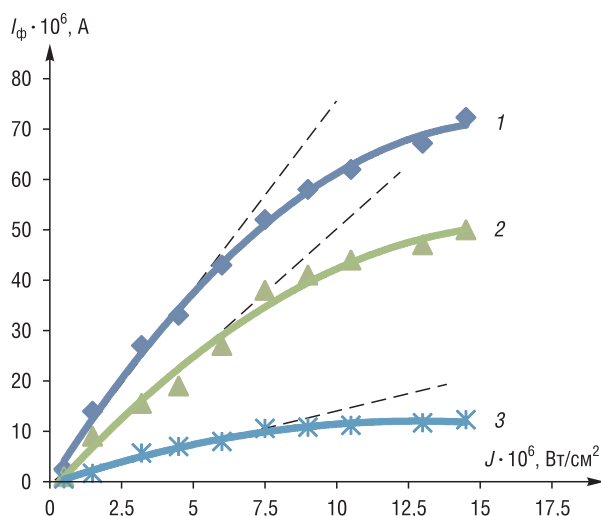


Рис. 2. Типичные зависимости фототока от интенсивности засветки: 1 – при температуре 243 К, 2 – при температуре 278 К, 3 – при температуре 313 К

Fig. 2. Typical dependences of the photocurrent on the illumination intensity: 1 – for temperature 243 K, 2 – for temperature 278 K, 3 – for temperature 313 K

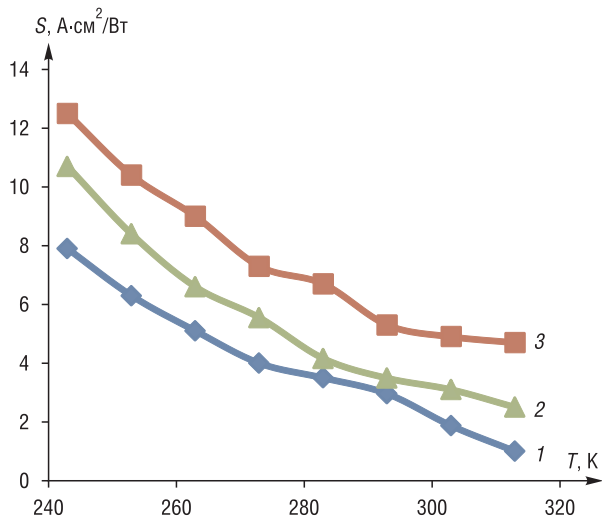


Рис. 3. Зависимость чувствительности от температуры: 1 – ON Semi FC 30035, 2 – КЕТЕК РМ 3325, 3 – Si-ФЭУ производства ОАО «Интеграл»

Fig. 3. Dependence of sensitivity on temperature: 1 – ON Semi FC 30035, 2 – KETEK PM 3325, 3 – Si-PEM OJSC “INTEGRAL”

пряжения критические интенсивности Si-ФЭУ производства ОАО «Интеграл» составляли $S = 12,5 \text{ A} \cdot \text{cm}^2/\text{Вт}$ при $T = 243 \text{ K}$, $S = 4,7 \text{ A} \cdot \text{cm}^2/\text{Вт}$ при $T = 313 \text{ K}$ и имели наибольшие значения во всем исследуемом интервале температур по сравнению с другими Si-ФЭУ.

На рис. 4 представлены зависимости пороговой интенсивности излучения от перенапряжения для фотоприемника ON Semi FC 30035 при разных температурах окружающей среды. Для других Si-ФЭУ данные зависимости были аналогичными. Наиболее сильная зависимость $J_{\text{п}}$ от ΔU

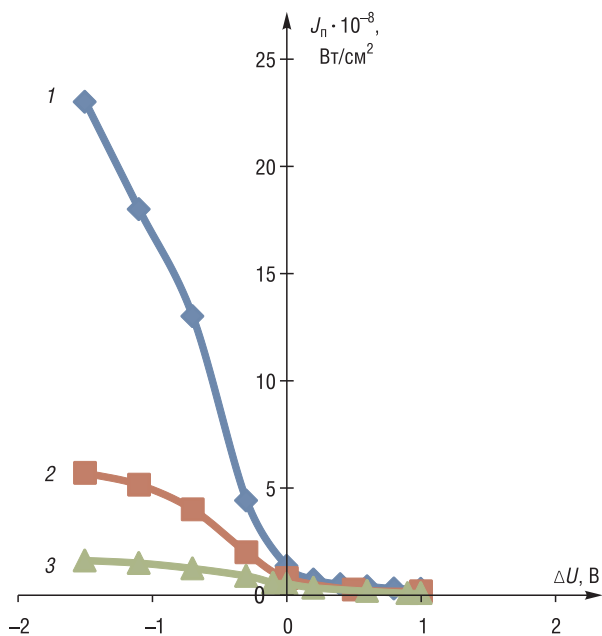


Рис. 4. Типичные зависимости пороговой интенсивности излучения от перенапряжения фотоприемника для различных температур: 1 – 313 К, 2 – 278 К, 3 – 243 К

Fig. 4. Typical dependence of the threshold intensity of the surge of the photodetector for different temperatures: 1 – 313 K, 2 – 278 K, 3 – 243 K

Все зависимости, показанные на рис. 2, имеют разный угол наклона линейного участка к оси J , что говорит о том, что изменение температуры влечет изменение чувствительности фотоприемника к оптическому излучению. Под чувствительностью понимается величина $S = \Delta I_{\text{ф}}/\Delta J$, где $\Delta I_{\text{ф}}$ – изменение фототока, соответствующее изменению интенсивности ΔJ . Зависимость чувствительности от температуры при $\Delta U = 0 \text{ В}$ представлена на рис. 3.

Как следует из представленных зависимостей, при уменьшении температуры увеличивается чувствительность у всех исследуемых Si-ФЭУ. Например, для фотоприемника ON Semi FC 30035 при $\Delta U = 0 \text{ В}$ и $T = 243 \text{ K}$ чувствительность составляет $S = 8,0 \text{ A} \cdot \text{cm}^2/\text{Вт}$, а при том же значении перенапряжения и температуре $T = 313 \text{ K}$ $S = 1,0 \text{ A} \cdot \text{cm}^2/\text{Вт}$. При $\Delta U = 0 \text{ В}$ и температурах 243 К и 313 К для КЕТЕК РМ3325 значения чувствительности составляли $S = 10,7 \text{ A} \cdot \text{cm}^2/\text{Вт}$ и $S = 2,5 \text{ A} \cdot \text{cm}^2/\text{Вт}$ соответственно. Для того же значения перенапряжения критические интенсивности Si-ФЭУ производства ОАО «Интеграл» составляли $S = 12,5 \text{ A} \cdot \text{cm}^2/\text{Вт}$ при $T = 243 \text{ K}$, $S = 4,7 \text{ A} \cdot \text{cm}^2/\text{Вт}$ при $T = 313 \text{ K}$ и имели наибольшие значения во всем исследуемом интервале температур по сравнению с другими Si-ФЭУ. Данная оценка показала, что с понижением температуры величина $\Delta J_{\text{п}}/\Delta U_{\text{п}}$ уменьшается. Так, эти величины для диапазона перенапряжений $\Delta U = -1,5 \div 0 \text{ В}$ имеют следующие значения:

для фотоприемника ON Semi FC 30035 – при температуре 243 К $\Delta J_{\text{п}}/\Delta U_{\text{п}} = 1,0 \cdot 10^{-8} \text{ Вт}/(\text{cm}^2 \cdot \text{В})$, при 313 К $\Delta J_{\text{п}}/\Delta U_{\text{п}} = 25,9 \cdot 10^{-8} \text{ Вт}/(\text{cm}^2 \cdot \text{В})$;

для фотоприемника КЕТЕК РМ3325 – при температуре 243 К $\Delta J_{\text{п}}/\Delta U_{\text{п}} = 1,3 \cdot 10^{-8} \text{ Вт}/(\text{cm}^2 \cdot \text{В})$, при 313 К $\Delta J_{\text{п}}/\Delta U_{\text{п}} = 2,9 \cdot 10^{-8} \text{ Вт}/(\text{cm}^2 \cdot \text{В})$;

для Si-ФЭУ производства ОАО «Интеграл» – при температуре 243 К $\Delta J_{\text{п}}/\Delta U_{\text{п}} = 1,8 \cdot 10^{-8} \text{ Вт}/(\text{cm}^2 \cdot \text{В})$, при 313 К $\Delta J_{\text{п}}/\Delta U_{\text{п}} = 7,0 \cdot 10^{-8} \text{ Вт}/(\text{cm}^2 \cdot \text{В})$.

Таким образом, из полученных результатов следует, что с повышением температуры для обеспечения постоянства значения $J_{\text{п}}$

в этом диапазоне перенапряжений необходимо предъявлять более высокие требования к стабильности напряжения питания Si-ФЭУ.

Авторами установлено, что в исследуемом интервале температур зависимость пороговой интенсивности излучения от температуры является линейной для всех исследуемых Si-ФЭУ. Для оценки зависимости пороговой интенсивности излучения от температуры окружающей среды использовалась величина, равная отношению изменения пороговой интенсивности $\Delta J_{п}$ к соответствующему изменению температуры ΔT . Величина $\Delta J_{п}/\Delta T = 1,1 \cdot 10^{-10}$ Вт/(см²·К) для всех исследуемых фотоприемников при $\Delta U = 0$ В, то есть зависимость пороговой интенсивности от температуры у всех исследуемых фотоприемников была одинаковой при этом перенапряжении.

На рис. 5 показаны типичные зависимости динамического диапазона от перенапряжения при разных температурах Si-ФЭУ. Все представленные характеристики имеют ярко выраженный максимум, соответствующий напряжению пробоя. Появление данного максимума обусловлено поведением критической и пороговой интенсивностей. При изменении температуры тенденции сохраняются для всех исследуемых видов фотоприемников, а именно динамический диапазон также имеет максимум, соответствующий напряжению пробоя, и с ростом температуры величина динамического диапазона уменьшается.

Зависимости динамического диапазона регистрируемого оптического излучения от температуры имеют линейный характер. Наиболее сильная зависимость динамического диапазона от температуры наблюдается у КЕТЕК РМ3325, а слабая – у Si-ФЭУ производства ОАО «Интеграл». Так, значения отношения изменения величин динамического диапазона ΔD и температуры окружающей среды ΔT при $\Delta U = 0$ В для исследуемых фотоприемников равны:

для КЕТЕК РМ3325 $\Delta D/\Delta T = -17,9$ К⁻¹,

для ON Semi FC 30035 $\Delta D/\Delta T = -9,7$ К⁻¹,

для Si-ФЭУ производства ОАО «Интеграл» $\Delta D/\Delta T = -5,6$ К⁻¹.

Как следует из полученных значений $\Delta D/\Delta T$, для поддержания постоянной величины динамического диапазона при $\Delta U = 0$ В для КЕТЕК РМ3325 требуется более высокая стабилизация температуры, чем для других Si-ФЭУ.

Заключение. Исследования характеристик Si-ФЭУ показали, что рост температуры приводит к увеличению критической и пороговой интенсивностей регистрируемого оптического излучения. Зависимость пороговой интенсивности от температуры для всех исследуемых фотоумножителей одинакова. Наиболее сильная зависимость критической интенсивности от температуры наблюдается для Si-ФЭУ ON Semi FC 30035, а слабая – для Si-ФЭУ производства ОАО «Интеграл».

Величина динамического диапазона с ростом температуры уменьшается. Наиболее сильная зависимость динамического диапазона от температуры наблюдается у Si-ФЭУ КЕТЕК РМ3325, а слабая – у Si-ФЭУ производства ОАО «Интеграл».

Рост температуры приводит к уменьшению чувствительности Si-ФЭУ. Наибольшие значения чувствительности во всем исследуемом интервале температур наблюдались у Si-ФЭУ производства ОАО «Интеграл», а наименьшие – у ON Semi FC 30035.

Полученные результаты могут быть использованы при разработке и конструировании приборов и устройств для регистрации оптического излучения на основе Si-ФЭУ.

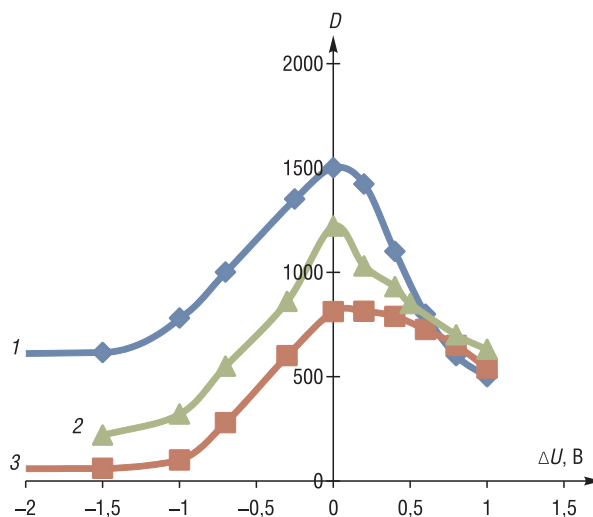


Рис. 5. Типичная зависимость динамического диапазона от перенапряжения для разных температур на примере фотоприемника ON Semi FC 30035: 1 – 243 К, 2 – 278 К, 3 – 313 К

Fig. 5. Typical dependence of the dynamic range on overvoltage for different temperatures on the example of a photodetector ON Semi FC 30035: 1 – 243 К, 2 – 278 К, 3 – 313 К

Список использованных источников

1. Гулаков, И. Р. Фотоприемники квантовых систем / И. Р. Гулаков, А. О. Зеневич. – Минск: УО ВГКС, 2012. – 276 с.
2. Влияние параметров оптического излучения на амплитудные характеристики кремниевых фотоэлектронных умножителей / М. А. Асаенок [и др.] // Вес. Нац. акад. Навук Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. – 2020. – Т. 65, № 1. – С. 104–109. <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2020-65-1-104-109>
3. Comprehensive Model of the Response of Silicon Photomultipliers / H. T. van Dam [et al.] // IEEE Transactions on Nuclear Science. – 2010. – Vol. 57, iss. 4. – P. 2254–2266. <https://doi.org/10.1109/TNS.2010.2053048>
4. Two-photon imaging with silicon photomultipliers / M. N. Modi [et al.] // Optics Express. – 2019. – Vol. 27, iss. 24. – P. 35830–35841. <https://doi.org/10.1364/OE.27.035830>
5. Асаенок, М. А. Температурные характеристики кремниевых фотоэлектронных умножителей / М. А. Асаенок, О. Ю. Горбадей, А. О. Зеневич // Доклады БГУИР. – 2018. – № 2. – С. 54–58.

References

1. Gulakov I. R., Zenevich A. O. *Photodetectors of Quantum Systems*. Minsk, VGKS Publ., 2012. 276 p. (in Russian).
2. Asayonak M. A., Zenevich A. O., Novikau Ya. V., Saroca S. A. Influence of optical radiation parameters on the amplitude characteristics of silicon photoelectron multipliers. *Vestsi Natsyynal'най akademii navuk Belarusi. Seryya fizika-technichnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series*, 2020, vol. 65, no. 1, pp. 104–109 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2020-65-1-104-109>
3. Dam H. T. van, Seifert S., Vinke R., Dendooven P., Löhner H., Beekman F. J., Schaart D. R. A Comprehensive Model of the Response of Silicon Photomultipliers. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 2010, vol. 57, iss. 4, pp. 2254–2266. <https://doi.org/10.1109/TNS.2010.2053048>
4. Modi M., Daie K., Turner G. C., Podgorski K. Two-photon imaging with silicon photomultipliers. *Optics Express*, 2019, vol. 27, iss. 24, pp. 35830–35841. <https://doi.org/10.1364/OE.27.035830>
5. Asayonak M. A., Gorbadey O. Yu., Zenevich A. O. Temperature characteristics of silicon photoelectronic multipliers. *Doklady BGUIR*, 2018, no. 2, pp. 54–58 (in Russian).

Информация об авторах

Гулаков Иван Романович – доктор физико-математических наук, профессор кафедры математики и физики, Белорусская государственная академия связи (ул. Ф. Скорины, 8/2, 220114, Минск, Республика Беларусь). E-mail: gulakov@bsu.by

Зеневич Андрей Олегович – доктор технических наук, профессор, ректор Белорусской государственной академии связи (ул. Ф. Скорины, 8/2, 220114, Минск, Республика Беларусь). E-mail: a.zenevich@bsac.by

Кочергина Ольга Викторовна – аспирант кафедры математики и физики, Белорусская государственная академия связи (ул. Ф. Скорины, 8/2, 220114, Минск, Республика Беларусь). E-mail: o.kochergina@bsac.by

Лемешевская Алла Михайловна – заместитель начальника отдела, филиал НТЦ «Белмикросистемы» ОАО «ИНТЕГРАЛ» – управляющая компания холдинга «ИНТЕГРАЛ» (ул. Казинца, 121А, 220108, Минск, Республика Беларусь).

Сорока Сергей Александрович – ведущий инженер ГНПО «Оптика, оптоэлектроника и лазерная техника» Национальной академии наук Беларуси (Логойский тракт, 22, 220090, Минск, Республика Беларусь). E-mail: soroca@oelt.basnet.by

Information about the authors

Ivan R. Gulakov – D. Sc. (Physics and Mathematics), Professor of the Mathematics and Physics Department, Belarusian State Academy of Communications (8/2, F. Skorina Str., 220114, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: gulakov@bsu.by

Andrey O. Zenevich – D. Sc. (Engineering), Professor, Rector of the Belarusian State Academy of Communications (8/2, F. Skorina Str., 220114, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: a.zenevich@bsac.by

Olga V. Kochergina – Postgraduate Student of the Mathematics and Physics Department, Belarusian State Academy of Communications (8/2, F. Skorina Str., 220114, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: o.kochergina@bsac.by

Alla M. Lemeshevskaya – Deputy Head of the Department Branch of STC “Belmikrosystems” OJSC “INTEGRAL” – Managing Company of the Holding “INTEGRAL” (121a, Kazinets Str., 220108, Republic of Belarus).

Syargey A. Saroka – Leading Engineer, State Scientific Production Association “Optics, Optoelectronics and Laser Technology” of the National Academy of Sciences of Belarus (22, Logoiskij tract, 220090, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: soroca@oelt.basnet.by