

*В. В. Рахманов<sup>1✉</sup>, С. К. Качурин<sup>2</sup>, В. Г. Меледин<sup>1</sup>, Г. В. Бакакин<sup>1</sup>*

## **Исследование температурной зависимости коэффициента усиления микропиксельных лавинных фотоприемников**

<sup>1</sup> Институт теплофизики им. С. С. Кутателадзе СО РАН,  
г. Новосибирск, Российская Федерация

<sup>2</sup> Новосибирский государственный университет, г. Новосибирск, Российская Федерация  
e-mail: rahmanov@inbox.ru

**Аннотация.** В работе исследована температурная зависимость коэффициента усиления кремниевого микропиксельного фотоэлектронного умножителя СРТА 150–30 для трех длин волн регистрируемого излучения: 565 нм, 700 нм и 940 нм. Определена методика и создан экспериментальный стенд для тестирования кремниевых фотоприемников в диапазоне температур от 20 до 75 °С. Результаты измерений температурной зависимости коэффициента усиления показали спад коэффициента усиления кремниевого фотоэлектронного умножителя при нагреве от +20 до +60 °С в 10 раз. Полученные численные зависимости коэффициента усиления фотоприемника для трех длин волн светового потока могут быть использованы для построения схемы компенсации коэффициента усиления от температуры для данного типа фотоумножителей.

**Ключевые слова:** температурная зависимость, коэффициент усиления, кремниевый микропиксельный фотоэлектронный умножитель

*V. V. Rakhmanov<sup>1✉</sup>, S. K. Kachurin<sup>2</sup>, V. G. Meledin<sup>1</sup>, G. V. Bakakin<sup>1</sup>*

## **Investigation of the temperature dependence of the gain coefficient of micropixel avalanche photodetectors**

<sup>1</sup> Kutateladze Institute of Thermophysics SB RAS, Novosibirsk, Russian Federation

<sup>2</sup> Novosibirsk State University, Novosibirsk, Russia Federation  
e-mail: rahmanov@inbox.ru

**Abstract.** The paper studies the temperature dependence of the gain of the silicon micropixel photomultiplier tube CPTA 150–30 for the following wavelengths of registered radiation: 565 nm, 700 nm and 940 nm. A technique is defined and an experimental setup is created for testing silicon photodetectors in the temperature range from 20 to 75 °C. The results of measuring the temperature dependence of the gain showed a 10-fold decrease in the gain of the silicon photomultiplier when heated from +20 to +60 °C. The obtained numerical dependences of the gain of the photodetector for three wavelengths of the light flux can be used to build a gain compensation circuit for the temperature of this type of photomultiplier.

**Keywords:** temperature dependence, gain, silicon micropixel photomultiplier

### ***Введение***

Задача регистрации световых сигналов актуальна в очень широком круге областей современной науки: детектирования частиц в ядерной физике, спектральный анализ, фотометрия, метеорологические лидары и др. [1-2].

Существует различные виды приемников светового излучения, каждый из которых, применяется для решения определенных задач.

Развитие технологии изготовления лавинных фотодиодов привело к появлению нового вида фотоприемников, такого как кремниевый микропиксельный фотоумножитель (Si-PM) [3]. Si-PM обладает высоким коэффициентом усиления ( $\sim 10^6$ ) и существенным быстродействием (время нарастания сигнала составляет 200 – 300 пс). Еще одним преимуществом данного типа фотоэлектронного усилителя (ФЭУ) является низкое, по сравнению с классическим вакуумным ФЭУ, напряжение питания (25 – 60 В). Внешний вид кристалла и структура Si-PM приведена на рис. 1.

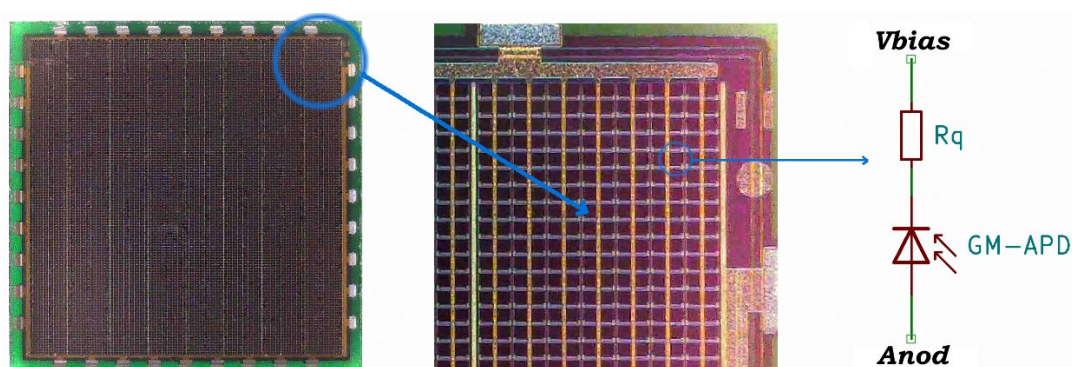


Рис. 1. Внешний вид и упрощенное внутреннее устройство Si-PM

Si-PM является матричной структурой, состоящей из отдельных ячеек (лавинный фотодиод GM-APD и гасящий резистор  $R_q$ ), число которых варьируется в пределах от  $10^3$  до  $10^5$ .

Принцип работы схож с работой лавинного фотодиода, но ток через каждую ячейку ограничен за счет гасящего резистора. Ток каждой ячейки суммируется, и в результате достигается коэффициент усиления  $10^5 - 10^6$ , в зависимости от количества задействованных ячеек. Таким образом коэффициент усиления Si-PM сопоставим с классическими ФЭУ, но при этом габаритные размеры таких устройств значительно меньше, и сторона квадрата составляет несколько миллиметров.

Данный вид ФЭУ все более широко внедряется в современную экспериментальную технику. На текущий момент Si-PM массово используется в научных и бытовых приборах, таких как: детекторы излучения в ядерной физике, астрономии, спектрометрических приборах, измерителях расстояния, датчиках парковки и др. [4-6]

Одним из применений данного типа фотоприемника является использование его в лазерных доплеровских анемометрах (ЛДА) для измерений скорости аэро- и гидродинамических течений. В основном, такие приборы используют классические ФЭУ как приемники оптического излучения. Но в последнее время ведутся работы по внедрению Si-PM в качестве фотоприемника в ЛДА [7-8].

Однако, в отличие от вакуумных ФЭУ, коэффициент умножения кремниевых фотоумножителей существенно изменяется от температуры [9-10], и для таких задач как спектрометрические измерения, лидары и др. необходимо знать температурную зависимость коэффициента усиления для возможности ее компенсации аппаратными или программными способами.

Целью данной работы является создание методики и измерение зависимости коэффициента усиления кремниевого микропиксельного фотоумножителя от температуры в диапазоне от 24 до 75°C.

### *Методика измерений и экспериментальной стенд*

Для измерения зависимости коэффициента усиления Si-PM от температуры необходимо одновременное измерение локальной температуры и уровня выходного сигнала фотоприемника при неизменном уровне освещенности. Кроме того, так как квантовая эффективность преобразования Si-PM зависит от длины волны регистрируемого излучения, то необходимо обеспечить освещение на нескольких длинах волн. В данной работе предлагается использовать источники света трех длин волн, от зеленого до инфракрасного, как наиболее часто используемые в лазерных доплеровских анемометрах.

Общая схема измерительного стенда приведена на рис. 2.

На Si-PM поступает модулированное при помощи генератора импульсного тока  $\Gamma$  оптическое излучение от светодиода СД и одновременно осуществляется локальный нагрев фотоприемника при помощи нагревателя  $R_n$ . Для работы фотоприемника в режиме фотоумножителя с источника Исм на него подается напряжение смещения.

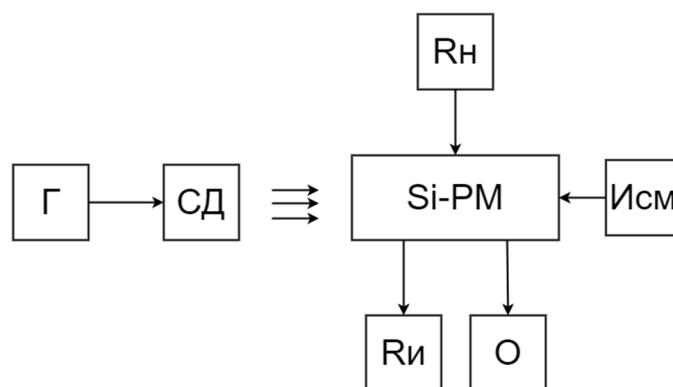


Рис. 2. Схема измерительного стенда:  $\Gamma$  – генератор импульсного тока для светодиода; СД – светодиод; Исм – источник напряжения смещения Si-PM; О – измерительный осциллограф;  $R_i$  – терморезистор и омметр;  $R_n$  – резистор-нагреватель

При помощи заранее откалиброванного терморезистора  $R_i$ , расположенного вплотную к фотоприемнику, и измерителя сопротивления производится измерение текущей температуры Si-PM. Одновременно осуществляется фиксация выходного сигнала с фотоприемника при помощи осциллографа О.

Таким образом, зафиксировав уровень выходного сигнала фотоприемника при комнатной температуре (25,5 °С) при неизменном уровне сигнала генератора и напряжения источника смещения, и регулируя температуру, измеряется зависимость относительного коэффициента усиления Si-PM от температуры.

В качестве источника световых сигналов использовались три светодиода: инфракрасный SFH4545 (940 нм) infr, красный GNL-3014HT (700 нм) red и зеленый GNL-3014GD (565 нм) green. Коммутация между фотодиодами осуществлялась в ручном режиме при помощи тумблеров. Частота генератора выбрана равной 1 кГц ± 10 %. Такая частота генератора позволяет получать неискаженный меандр в световом потоке со светодиодов.

Приемная часть измерительного стенда состоит из фотоприемника и усилителя фототока в виде трансимпедансного усилителя на основе микросхемы с резистором обратной связи 1 МОм.

В качестве фотоприемника использовался кремниевый микропиксельный фотозлектронный множитель СРТА 151–30 с количеством ячеек 796 и коэффициентом усиления ~10<sup>6</sup>. Напряжение смещения для этого фотоумножителя может быть от 25 до 34 В. Для данной работы оно выбрано равным 28,7 В, так как это напряжение позволяет схеме фотоприемника работать в линейном режиме во всем диапазоне температур.

Измерение выходного сигнала фотоприемника осуществлялось посредством осциллографа Tektronix TDS 2014. Измерялось среднеквадратичное значение выходного напряжения с формой сигнала меандр.

Кривая квантовой эффективности в зависимости от длины волны оптического излучения для данного фотоприемника приведена на рис. 3.

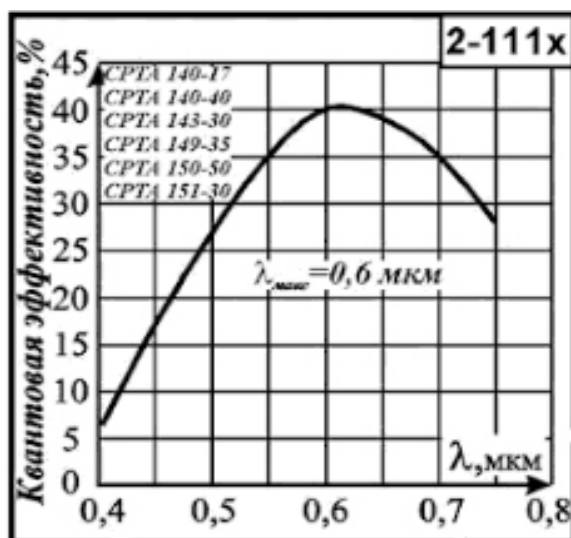


Рис. 3. Квантовая эффективность Si-PM СРТА 150–30 [11]

Максимальная эффективность работы фотоприемника достигается на длине волны оптического излучения 620 нм.

Для нагрева элемента Si-PM использовался резистор с номиналом 10 Ом мощностью 1 Вт, размещенный вплотную к фотоприемнику. Для его нагрева, через него пропусклся ток от внешнего регулируемого источника питания.

Для измерения температуры фотоприемника использовался термистор, размещенный также вплотную к фотоприемнику. В данной работе использовался миниатюрный термистор BS7861-S.

Была выполнена калибровка показаний термистора в диапазоне от 0 до 97 °С (рис. 4). Измерения проводились в емкости с водой с постепенным повышением температуры от нуля (тающий лед) до максимальной. В процессе измерения слои воды постоянно перемешивались при помощи потока пузырей воздуха от компрессора (барботаж) для меньшего температурного градиента в измеряемом объеме.

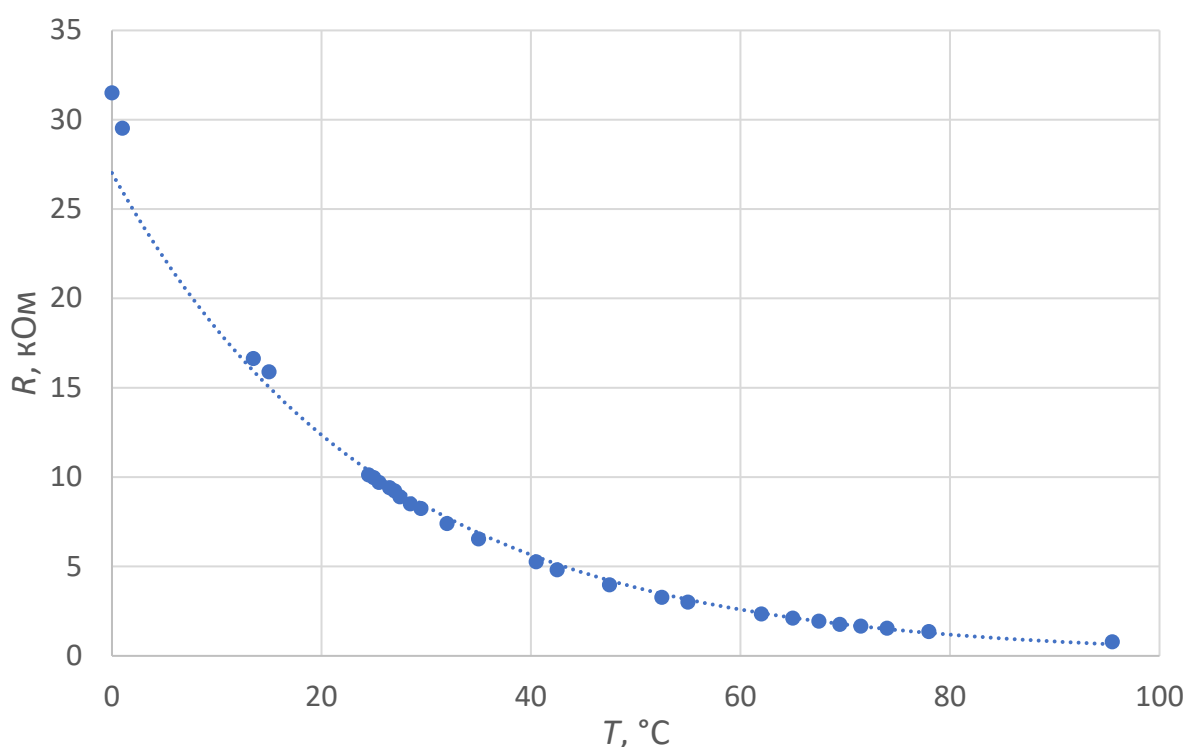


Рис. 3. Зависимость сопротивления  $R$  термистора BS7861-S от температуры  $T$ .

Результатирующая калибровочная характеристика описывается следующей формулой:

$$T = -25,46 \cdot \ln(R) + 84,12,$$

где  $T$  – температура в градусах Цельсия;  $R$  – сопротивление термистора в кОм.

Диапазон измерений температурной зависимости коэффициента усиления Si-PM был от 24 до 75 °С, что является рабочим диапазоном для данного Si-PM.

При каждом значении температуры производилось три измерения для различных светодиодов (зеленый, красный, инфракрасный). Частота в 1 кГц оставалась неизменной на протяжении всего эксперимента, как и напряжение смещения фотоприемника 28,7 В.

### Результаты

В результате измерений были получены экспериментальные данные по зависимости коэффициента усиления кремниевого микропиксельного фотоумножителя от температуры для трех длин волн оптического излучения. Относительный коэффициент усиления  $K$  получен как отношение значения амплитуды сигнала с выхода фотодетектора к амплитуде сигнала при 25,5 °С. На графике (рис. 4) приведена полученная зависимость относительного коэффициента усиления от температуры в процентах.

Все измерения проведены на частоте генератора 1 кГц при напряжении обратного смещения фотодетектора 28,7 В.

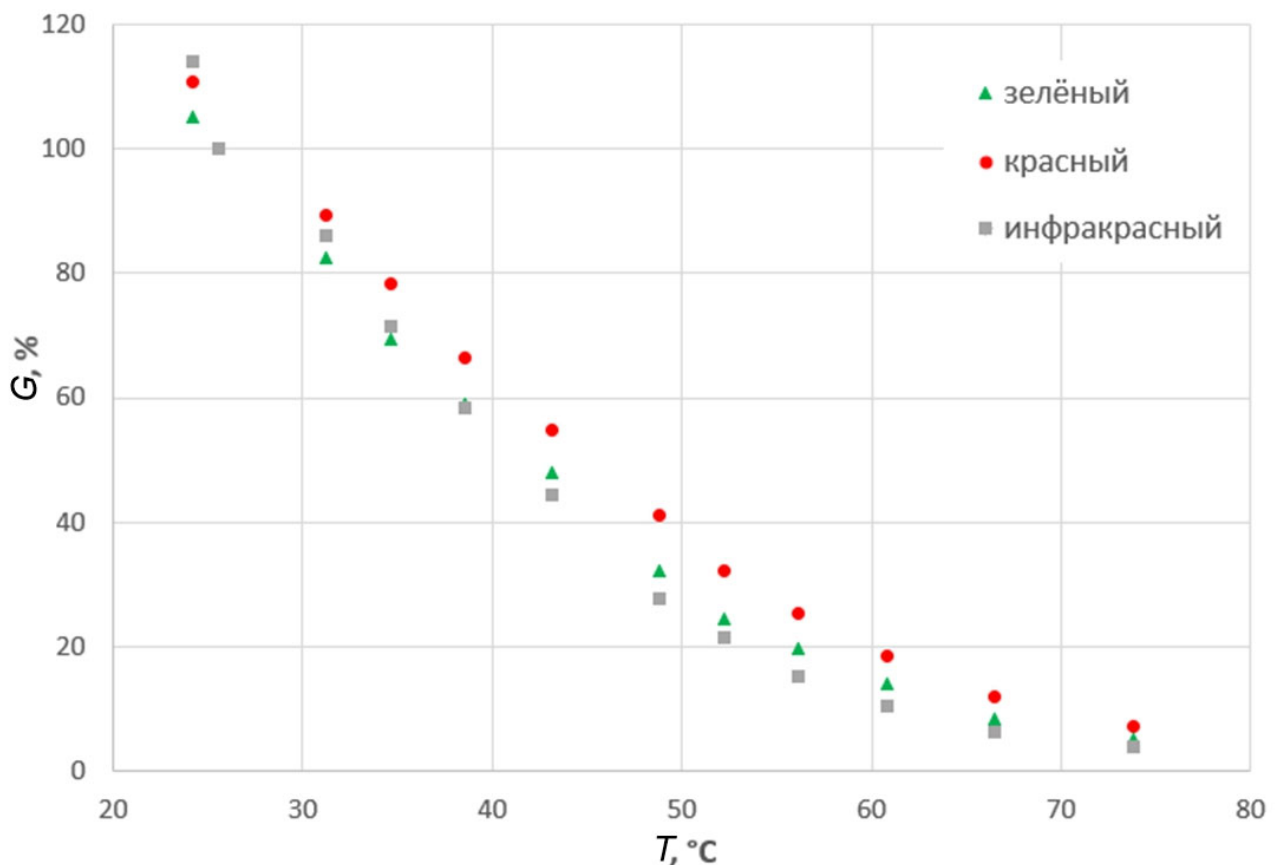


Рис. 4. Зависимость относительного коэффициента усиления  $G$  от температуры  $T$  при разных длинах волн осветителя

Из полученных данных видно, что при повышении температуры коэффициент усиления на измеренных длинах волн снижается. Кривая зависимости может

быть аппроксимирована полиномом 2-й степени с высокой степенью достоверности  $R^2=0,995$ .

Как видно из полученных данных, разница в изменении коэффициента усиления для разных длин волн не превышает 10% во всем диапазоне температур. При этом, для длин волн с максимальной квантовой эффективностью (красный свет) спад коэффициента усиления происходит более плавно.

Из графика видно, что при температуре 65 °С происходит 10-кратный спад коэффициента усиления. Поэтому в реальных условиях работы необходимо обеспечивать термокомпенсацию коэффициента усиления для данного вида фотоприемников.

### *Заключение*

Была разработана методика и создан лабораторный стенд для исследования температурной зависимости коэффициента усиления микропиксельных лавинных фотоприемников.

Выполнена калибровка значений сопротивления термистора В57861-S от температуры в диапазоне от 0 до 97°С.

Выполнено исследование зависимости коэффициента усиления кремниевого фотоумножителя СРТА 151–30 от температуры. Результаты измерений показали значительное (более чем в 10 раз) уменьшение коэффициента усиления Si-PM с нагревом в диапазоне температур от +20 до +75°С.

Получены численные зависимости коэффициента усиления Si-PM для трех длин волн светового потока (940, 700 и 565 нм).

Результаты данной работы позволяют создать схему компенсации коэффициента усиления для данного типа Si-PM или учитывать изменения коэффициента усиления от температуры программными методами в результате последующей обработки данных.

### *Благодарности*

Работа выполнена в рамках государственного задания ИТ СО РАН.

### **БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК**

1. Приемники оптического излучения / Г. Г. Ишанин, В. П. Челибанов; под ред. В. В. Коротаяева. – Санкт-Петербург [и др.]: Лань, 2014. – 303 с.
2. Оптическая и квантовая электроника: учебник для ВУЗов / А. Н. Пихтин – М.: Высшая школа, 2001.
3. Dinu, N. (2016). Silicon photomultipliers (SiPM). <https://doi.org/10.1016/B978-1-78242-445-1.00008-7>.
4. Buzhan P., et al. // Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A, 504 (2003), pp. 48–52.
5. Riu J, Sicard M, Royo S, Comero' n A. Silicon photomultiplier detector for atmospheric lidar applications. Optics Letters 2012;37(7):1229–31.
6. Imando, A.T., Dinu, N., Callier, S., Cuisy, D., Gaspard, M., Pinot, L., et al., 2012. Miniaturized multi-channels SiPM read-out electronics for medical imaging application. In: Proceedings of Science, PoS (PhotoDet2012)049.
7. Рахманов В. В., Кашкарова М. В., Какаулин С. В., Зубанов К. С., Двойнишников С. В. Анализ границ применимости фотоэлектронных умножителей в составе лазерного доплеров-

- ского анемометра. Измерительная техника, 73(6), 32–39 (2024). <https://doi.org/10.32446/0368-1025it.2024-6-32-39>.
8. V V Rakhmanov et al 2021 J. Phys.: Conf. Ser. 2057 012088.
9. Zi, Cg., Chang, Jf., Yang, Mj. et al. A compensation circuit for the gain temperature drift of silicon photomultiplier tube. Radiat Detect Technol Methods 7, 571–577 (2023). <https://doi.org/10.1007/s41605-023-00422-z>.
10. Wolfgang Schmailzl et al 2022 JINST 17 P12009. <https://doi.org/10.1088/1748-0221/17/12/P12009>.
11. Бараночников М. Л. Приемники и детекторы излучений. Справочник. – М.: ДМК Пресс, 2012. – 640 с., табл. 415, ил. 1326.

© В. В. Рахманов, С. К. Качурин, В. Г. Меледин, Г. В. Бакакин, 2025