

КРЕМНИЕВЫЕ ФОТОЭЛЕКТРОННЫЕ УМНОЖИТЕЛИ КАК ОСНОВА ДЛЯ СОЗДАНИЯ КОМБИНИРОВАННЫХ ДАТЧИКОВ

И. Р. Гулаков, А. О. ЗЕНЕВИЧ, О. В. КОЧЕРГИНА, Е. В. НОВИКОВ

*Белорусская государственная академия связи, 220114, Минск, Беларусь
E-mail: o.kochergina@bsac.by*

Проанализирована возможность построения комбинированных датчиков на основе кремниевых фотоэлектронных умножителей. Исследовано влияние температуры и напряжения питания кремниевых фотоэлектронных умножителей (Si-ФЭУ) на изменение темнового тока, чувствительности к оптическому излучению и критической освещенности. Предложена установка для проведения исследований. В качестве объектов изучения использованы опытные образцы фотоэлектронных умножителей со структурой $p^+ - p - n^+$ производства ОАО „Интеграл“ (Республика Беларусь), а также серийно выпускаемые кремниевые фотоэлектронные умножители Кетек РМ 3325 и ON Semi FC 30035. Показано, что зависимость темнового тока от температуры для этих Si-ФЭУ имеет линейный вид. Установлено, что увеличение температуры приводит к уменьшению чувствительности кремниевых фотоэлектронных умножителей к оптическому излучению. Показано, что с ростом температуры значение критической освещенности Si-ФЭУ увеличивается. С учетом результатов исследований предложена структура комбинированного датчика на основе кремниевого фотоэлектронного умножителя, который позволяет одновременно контролировать два параметра: температуру и освещенность. Определены основные характеристики датчика.

Ключевые слова: комбинированный датчик, кремниевый фотоэлектронный умножитель, темновой ток, критическая освещенность, температура

Введение. В настоящее время находят широкое применение интеллектуальные системы управления, которые направлены на автоматизацию и согласованную работу всех устройств, обеспечивающих жизнедеятельность и безопасность человека [1—5]. К таким системам управления можно отнести системы „Умный дом“ и „Умный город“ [6—11], основной особенностью которых является объединение отдельных устройств в единый управляемый комплекс. В условиях большого объема управляемого пространства, значительного количества контролируемых параметров и уже существующих коммуникаций при разработке и внедрении указанных систем следует уменьшать количество датчиков. Поэтому в таких системах целесообразно применять комбинированные датчики, регистрирующие одновременно два и более параметра.

В качестве чувствительного элемента в комбинированном датчике температуры и освещенности предлагается кремниевый фотоэлектронный умножитель (Si-ФЭУ), напряжение пробоя которого имеет линейную зависимость от температуры [12], что можно использовать для измерения температуры. С другой стороны, Si-ФЭУ применяются для регистрации оптического излучения естественного и искусственного происхождения.

Необходимо отметить, что использование Si-ФЭУ в комбинированном датчике такого типа имеет преимущества по сравнению с другими типами фотоприемников, в которых существует зависимость напряжения пробоя от температуры. Одно из преимуществ заключается в том, что спектральный диапазон чувствительности Si-ФЭУ практически полностью находится в видимом диапазоне спектра, а другое — в том, что Si-ФЭУ работают при напряжениях питания, превышающих напряжение их пробоя. Именно такое напряжение необходимо

применять для измерения температуры. Для других фотоприемников эти напряжения являются экстремальными и могут привести к значительному сокращению срока их службы.

Таким образом, цель настоящей статьи — определение возможности использования Si-ФЭУ для создания комбинированного датчика, одновременно измеряющего температуру и осуществляющего контроль освещенности.

Также следует отметить, что Si-ФЭУ являются достаточно новым типом приборов, сфера применения и характеристики которых не изучены в полном объеме, что обуславливает актуальность настоящего исследования.

Описание установки и методики эксперимента. В качестве объектов исследования были использованы опытные образцы Si-ФЭУ со структурой $p^+ - p - n^+$ производства ОАО „Интеграл“ (Республика Беларусь), а также серийно выпускаемые кремниевые фотоэлектронные умножители Кетек РМ 3325 и ON Semi FC 30035.

Структурная схема экспериментальной установки, на которой проводились исследования, представлена на рис. 1, где ИП — источник питания, А — амперметр, В — вольтметр, R_n — резистор нагрузки, КТХ — камера тепла и холода. Л — люксметр, СНК — светонепроницаемая камера, ИС — источник белого света, ПЗ — полупрозрачное зеркало, Н — набор нейтральных светофильтров.

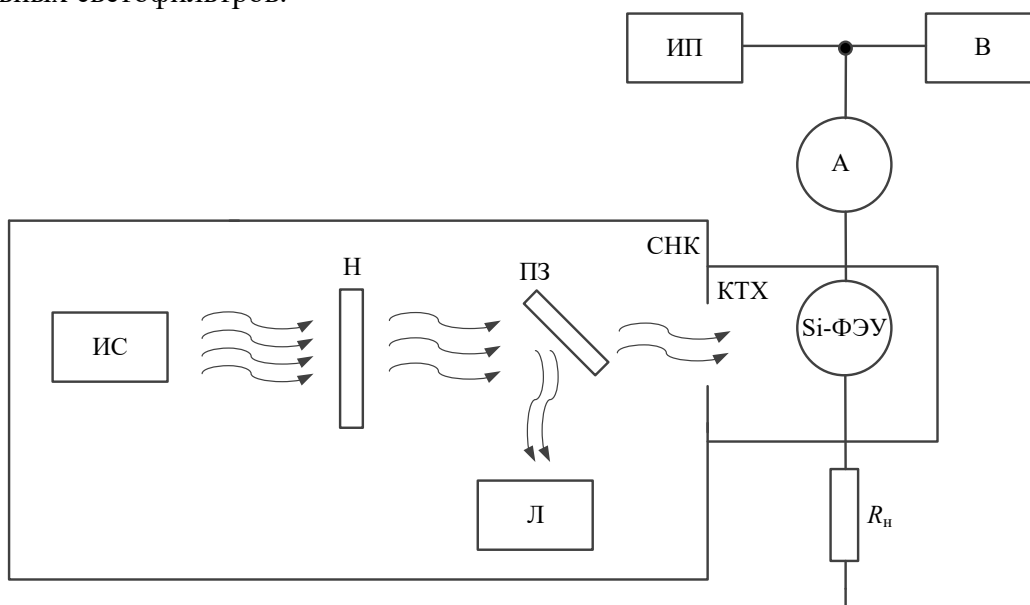


Рис. 1

От источника белого света через набор нейтральных светофильтров оптическое излучение подавалось на полупрозрачное зеркало, которое разделяло его на два потока одинаковой интенсивности, один из которых поступал на люксметр, а второй — на Si-ФЭУ. Люксметр использовался для измерения освещенности кремниевого фотоумножителя.

Источник белого света, полупрозрачное зеркало и люксметр помещены в светонепроницаемую камеру, что позволяет исключить воздействие на Si-ФЭУ внешней фоновой за светки. Si-ФЭУ помещен в камеру тепла и холода, обеспечивающую стабильную температуру Si-ФЭУ в диапазоне от 243 до 313 К.

Питание Si-ФЭУ осуществлялось от источника постоянного напряжения и контролировалось вольтметром. Для регистрации протекающего через кремниевый фотоумножитель электрического тока использовался амперметр, который в отсутствие оптического излучения регистрировал темновой ток I_T Si-ФЭУ. При подаче излучения от ИС амперметр регистрировал общий ток I_{Σ} . Значение фототока I_{Φ} определялось как разность общего и темнового токов: $I_{\Phi} = I_{\Sigma} - I_T$.

Для оценки возможности использования Si-ФЭУ в качестве комбинированного датчика необходима информация о зависимости фототока от освещенности E . Для получения этой зависимости устанавливалось такое значение освещенности, при котором фототок в два раза превышал темновой ток, затем циклически повторялась процедура увеличения освещенности на фиксированное значение и регистрировалось соответствующее значение фототока. По полученным данным строилась зависимость I_{ϕ} от E и определялось значение критической освещенности излучения $E_{кр}$. Под критической освещенностью понимается такое ее значение, для которого отклонение зависимости фототока $I_{\phi}(E)$ от линейного закона составляет 20 %, аналогично тому, как это принято для мощности оптического излучения по ГОСТ 17772-88.

Для линейного участка зависимости фототока Si-ФЭУ от освещенности чувствительность к световому потоку определялась по формуле

$$S = \Delta I_{\phi} / \Delta E, \quad (1)$$

где ΔI_{ϕ} — изменение фототока, ΔE — изменение освещенности.

Напряжение пробоя $U_{пр}$ устанавливалось по вольт-амперной характеристике согласно методике, описанной в работе [13]. Коэффициент (k) линейной зависимости напряжения пробоя Si-ФЭУ от температуры определялся как отношение изменения напряжения $\Delta U_{пр}$ к изменению температуры ΔT .

Результаты измерений и их обсуждение. При изменении температуры для всех видов исследуемых фотоприемников напряжение пробоя $U_{пр}$ изменялось. Увеличение температуры приводило к увеличению напряжения пробоя. Данная зависимость имеет линейный характер, значения коэффициентов k приведены в табл. 1.

Таблица 1

Тип Si-ФЭУ	$U_{пр}, \text{В}$		$k, \text{В/К}$
	$T = 243 \text{ К}$	$T = 313 \text{ К}$	
Кетек РМ 3325	26,1	27,2	0,010
ON Semi FC 30035	23,8	24,9	0,014
Si-ФЭУ производства ОАО „Интеграл“	36,9	37,7	0,017

При постоянном значении напряжения питания $U_{п}$ изменение температуры T вызывает изменение темнового тока $I_{т}$. Представленные на рис. 2 зависимости получены для соответствующих температуре 240 К начальных значений перенапряжения $\Delta U = U_{п} - U_{пр}$ Si-ФЭУ производства ОАО „Интеграл“; кривая 1 соответствует $\Delta U = 0,5 \text{ В}$; 2 — $\Delta U = 1,0 \text{ В}$; 3 — $\Delta U = 1,4 \text{ В}$. Для других фотоприемников такие зависимости были аналогичными. Каждая из полученных зависимостей имеет линейный участок, протяженность которого с ростом ΔU увеличивается. Так, при $\Delta U \geq 0,5 \text{ В}$ для Кетек РМ 3325, $\Delta U \geq 0,8 \text{ В}$ для ON Semi FC 30035 и $\Delta U \geq 1,2 \text{ В}$ для Si-ФЭУ производства ОАО „Интеграл“ наблюдалась линейная зависимость темнового тока от температуры во всем исследуемом интервале температур.

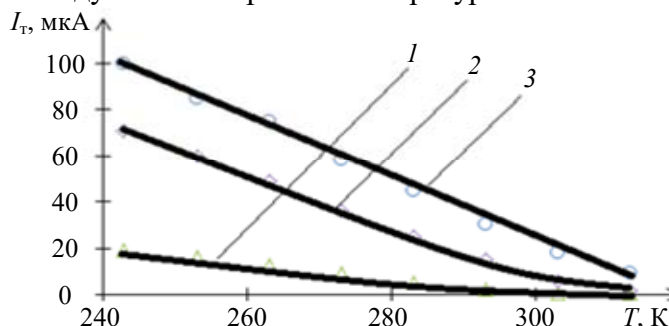


Рис. 2

Отметим, что напряжения питания, для которых наблюдается линейная зависимость $I_{т}$ от T , соответствовали тому участку вольт-амперной характеристики Si-ФЭУ, на котором дифференциальное сопротивление остается постоянным.

На рис. 3 представлены зависимости чувствительности к световому потоку от температуры для различных Si-ФЭУ (1 — Si-ФЭУ производства ОАО „Интеграл“; 2 — ON Semi FC 30035; 3 — Кетек РМ 3325) при напряжениях питания, при которых во всем исследуемом диапазоне температур зависимость I_T от T была линейной. Эти зависимости получены для значений U_p , равных 28,6 В для Кетек РМ 3325, 26,2 В для ON Semi FC 30035 и 40,6 В для Si-ФЭУ производства ОАО „Интеграл“. Выбранные значения напряжения питания соответствуют минимальным перенапряжениям, при которых зависимость темнового тока от температуры линейна. Как показывает анализ полученных зависимостей, увеличение температуры приводит к уменьшению чувствительности к световому потоку. При $T = 243$ К чувствительность S составляет 1000 мкА/лк для Кетек РМ 3325, 900 мкА/лк для ON Semi FC 30035 и 163 мкА/лк для Si-ФЭУ производства ОАО „Интеграл“; при $T = 313$ К чувствительность составляет 182, 150 и 43 мкА/лк для Кетек РМ 3325, ON Semi FC 30035 и Si-ФЭУ производства ОАО „Интеграл“ соответственно.

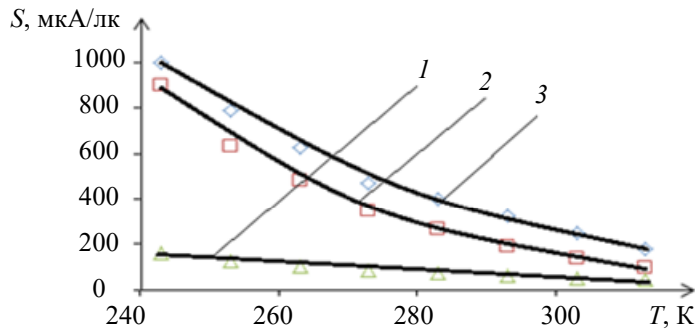


Рис. 3

Для оценки зависимости чувствительности к световому потоку от температуры использовалась величина $\Delta S/\Delta T$, где ΔS — изменение чувствительности при изменении температуры ΔT . Так, было получено, что отношение $\Delta S/\Delta T$ равно 10,2 мкА/(лк·К) для Кетек РМ 3325, 6,9 мкА/(лк·К) для ON Semi FC 30035 и 1,5 мкА/(лк·К) для Si-ФЭУ производства ОАО „Интеграл“. Таким образом, наиболее слабая зависимость S от T наблюдалась для Si-ФЭУ производства ОАО „Интеграл“, а наиболее сильная — для Кетек РМ 3325.

Зависимости критической освещенности $E_{кр}$ от температуры при постоянных значениях напряжения питания исследуемых Si-ФЭУ представлены на рис. 4; обозначения кривых 1—3 соответствуют принятым для рис. 3. Значения U_p были выбраны такими, чтобы для них во всем исследуемом диапазоне температур наблюдалась линейная зависимость I_T от T . Данные зависимости получены для значений U_p , принятых для рис. 3.

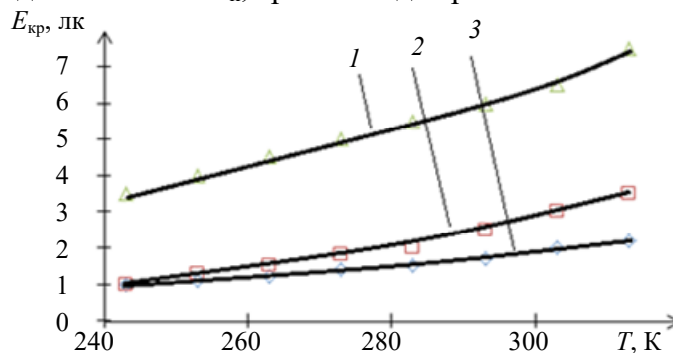


Рис. 4

С ростом температуры значение критической освещенности увеличивается, что можно объяснить уменьшением чувствительности фотоприемников к оптическому излучению с увеличением температуры. Наименьшее значение $E_{кр}$ соответствует температуре 243 К и составляет 1,0 лк для ON Semi FC 30035 и Кетек РМ 3325, для Si-ФЭУ производства ОАО „Интеграл“ $E_{кр} = 3,5$ лк; наибольшее значение $E_{кр}$ соответствует температуре 313 К и составляет 3,5 лк

для ON Semi FC 30035, 2,2 лк для Кетек РМ 3325 и 7,5 Лк для Si-ФЭУ производства ОАО „Интеграл“.

Для оценки зависимости критической освещенности от температуры применялась величина $\Delta E_{кр}/\Delta T$, где $\Delta E_{кр}$ — изменение критической освещенности при изменении температуры ΔT . Наиболее сильная зависимость $E_{кр}$ от T наблюдалась у Si-ФЭУ производства ОАО „Интеграл“: $\Delta E_{кр}/\Delta T = 50$ млк/К, а наиболее слабая $\Delta E_{кр}/\Delta T = 15$ млк/К — у Кетек РМ 3325.

Устройство комбинированного датчика. С учетом полученных результатов предложен комбинированный датчик на основе Si-ФЭУ, который контролирует одновременно два параметра: температуру и освещенность. Структурная схема датчика приведена на рис. 5, где НС — нейтральный светофильтр, М — модулятор, Г — генератор, АЦП — аналого-цифровой преобразователь, Рг1 и Рг2 — регистры, ИП — источник питания, R_n — резистор нагрузки, Д — дисплей, ЦК — цифровой компаратор. Датчик работает следующим образом. Чувствительным элементом является Si-ФЭУ. При этом температура окружающей среды и уровень освещенности преобразуются в электрический ток Si-ФЭУ. Световой поток поступает на чувствительный элемент через нейтральный светофильтр и модулятор. Ток, протекающий от источника питания через Si-ФЭУ, создает на нагрузочном резисторе R_n падение напряжения, значение которого измеряется аналого-цифровым преобразователем.

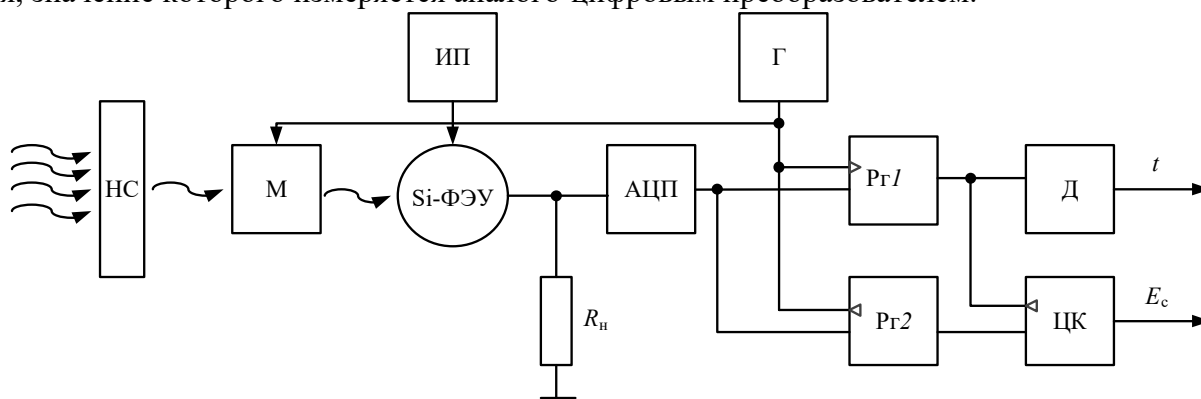


Рис. 5

Генератор прямоугольных импульсов управляет модулятором светового потока и двумя регистрами Рг1 и Рг2, в которых фиксируются результаты измерений. Генератор формирует сигнал в форме меандра, который, поступая на управляющий вход модулятора, периодически перекрывает световой поток, падающий на Si-ФЭУ. Интервал времени, в течение которого подается оптическое излучение на кремниевый фотоэлектронный умножитель, равен интервалу, в течение которого оно перекрывается. Нейтральный светофильтр ослабляет световой поток в заданное число раз.

С работой модулятора синхронизированы моменты записи информации в регистры. Пока сигнал генератора имеет нулевое значение, модулятор закрыт, световой поток на Si-ФЭУ не поступает и уровень напряжения на нагрузочном резисторе определяется темновым током чувствительного элемента. Значение темнового тока преобразуется аналого-цифровым преобразователем в цифровой код, который фиксируется в регистре Рг1 в момент перехода сигнала генератора из нулевого состояния в единичное. С этого момента модулятор открывается, разрешая поступление ослабленного светофильтром светового потока на фотоприемник. По окончании цикла измерения общего тока Si-ФЭУ в момент изменения уровня напряжения на управляющем входе регистра Рг2 с высокого на низкий происходит запись данных в этот регистр.

Как показано выше, значение темнового тока пропорционально температуре окружающей среды, поэтому содержимое регистра Рг1 направляется на дисплей, обеспечивающий соответствующую перекодировку и отображение в единицах измерения температуры.

Цифровой компаратор обеспечивает формирование порогового сигнала о превышении установленного уровня освещенности — для этого он определяет разность значений кодов на выходах регистров и, если эта разность превышает заданное значение, то формирует управляющий сигнал „освещение“. Последний может быть использован, например, для управления системой освещения помещения. В простейшем случае разность можно задать путем смещения разрядов сравниваемых кодов относительно друг друга.

В табл. 2 представлены характеристики комбинированного датчика при использовании в нем различных кремниевых фотоэлектронных умножителей: температурный диапазон (ΔT), в котором может эксплуатироваться датчик, погрешность измерения температуры (σ_T) и минимальное значение освещенности (E_{\min}) Si-ФЭУ, при котором происходит включение освещения. Данное значение освещенности определялось после нейтрального светофильтра.

Таблица 2

Тип Si-ФЭУ	ΔT , К	σ_T , %	E_{\min} , лк
Кетек РМ 3325	243 ÷ 313	4	3,5
ON Semi FC 30035		5	3,5
Si-ФЭУ производства ОАО „Интеграл“		6	1,0

Заключение. По результатам исследования получено, что напряжения питания Si-ФЭУ, при которых наблюдается линейная зависимость темнового тока от температуры, соответствуют участку вольт-амперной характеристики, для которого дифференциальное сопротивление остается постоянным. Установлено, что увеличение температуры приводит к уменьшению чувствительности Si-ФЭУ к оптическому излучению, а значение критической освещенности увеличивается.

Предложено устройство комбинированного датчика на основе кремниевого фотоэлектронного умножителя, который позволяет контролировать одновременно два параметра — температуру и освещенность. Определены характеристики этого датчика.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Иванов В. М. Интеллектуальные системы. Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2015. 92 с.
2. Остроух А. В., Суркова Н. Е. Интеллектуальные информационные системы и технологии. Красноярск: Научно-инновационный центр, 2015. – 370 с.
3. Davidović B., Labus A. A smart home system based on sensor technology // Facta Universitatis, Ser. Electronics and Energetics. 2016. Vol. 29, N 3. P. 451—460. DOI: 10.2298/FUEE1603451D.
4. Teddy Surya Gunawan, Intan Rahmihul Husna Yaldi, Mira Kartiwi, Nanang Ismail, Nor Farahidah Za'bah, Hasmah Mansor, Anis Nurashikin Nordin. Prototype design of smart home system using Internet of things // Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science. 2017. Vol. 7, N 1. P. 107—115. DOI: 10.11591/ijeecs.v7.i1.pp107—115.
5. Рычкова В. А. Надежность системы „Умный дом“ как основного критерия эффективности функционирования объекта // Вестник науки и образования. 2019. № 4(58). Ч. 2. С. 31—34.
6. Нгуен Суан Мань, Попов Г. А. Система сбора данных по параметрам конструкций интеллектуального здания на основе волоконно-оптических датчиков // Инженерный вестник Дона. 2015. № 3.
7. Байгозин Д. В., Первухин Д. Н., Захарова Г. Б. Разработка принципов интеллектуального управления инженерным оборудованием в системе „Умный дом“ // Изв. Томск. политехн. ун-та. 2008. Т. 313, № 5. С. 168—172.
8. Мясоедов Ю. В., Савина Н. В. Интеллектуализация систем электроснабжения городов. Благовещенск: Изд-во АмГУ, 2017. 164 с.
9. Ricquebourg V., Menga D., Durand D., Marhic B., Delahoche L., Logé C. The smart home concept: our immediate future // ICELIE: Conf. Paper Jan. 2007, IEEE Xplore. DOI: 10.1109/ICELIE.2006.347206.

10. Hancke G. P., de Carvalho e Silva B., Hancke G. P. Jr. The role of advanced sensing in smart cities // *Sensors*. 2013. N 13. P. 393—425. DOI:10.3390/s130100393.
11. Berntzen L., Johannessen M. R., Florea A. Sensors and the Smart City. Creating a research design for sensor-based smart city projects // SMART — 2016. IARIA.
12. Асаёнок М. А., Зеневич А. О., Кочергина О. В., Новиков Е. В. Исследование шумовых характеристик кремниевых фотоэлектронных умножителей при регистрации оптических импульсов // *Проблемы инфокоммуникаций*. 2020. № 2(12). С. 41—46.
13. Гулаков И. Р., Зеневич А. О. Фотоприемники квантовых систем: Монография. Минск: ВГКС, 2012. 276 с.

Сведения об авторах

- | | |
|-------------------------------------|--|
| Иван Романович Гулаков | — д-р физ.-мат. наук, профессор; Белорусская государственная академия связи, кафедра математики и физики; E-mail: gulakov@bsu.by |
| Андрей Олегович Зеневич | — д-р техн. наук, профессор; Белорусская государственная академия связи; ректор; E-mail: a.zenevich@bsac.by |
| Ольга Викторовна Кочергина | — аспирант; Белорусская государственная академия связи, кафедра математики и физики; E-mail: o.kochergina@bsac.by |
| Евгений Владимирович Новиков | — канд. техн. наук, доцент; Белорусская государственная академия связи, Институт современных технологий связи; директор; E-mail: e.novikov@bsac.by |

Поступила в редакцию
06.06.2021 г.

Ссылка для цитирования: Гулаков И. Р., Зеневич А. О., Кочергина О. В., Новиков Е. В. Кремниевые фотоэлектронные умножители как основа для создания комбинированных датчиков // *Изв. вузов. Приборостроение*. 2021. Т. 64, № 11. С. 941—948.

SILICON PHOTOELECTRONIC MULTIPLIERS AS A BASIS FOR CREATING COMBINED SENSORS

I. R. Gulakov, A. O. Zenevich, O. V. Kochergina, E. V. Novikov

Belarusian State Academy of Communications, 220114, Minsk, Republic of Belarus
E-mail: o.kochergina@bsac.by

The possibility of constructing combined sensors based on silicon photoelectronic multipliers is analyzed. The influence of temperature and supply voltage of silicon photoelectronic multipliers on changes in dark current, sensitivity to optical radiation and critical illumination is investigated. An installation for carrying out the research under consideration is proposed. Experimental samples of Si-photomultiplier tubes (Si-PMTs) with a p+-p-n+ structure produced by JSC Integral (Republic of Belarus), as well as serially produced silicon photomultipliers Ketek PM 3325 and ON Semi FC 30035 are studied. It is shown that the temperature dependence of the dark current for these Si-PMTs has a linear form. The temperature increase is found to decrease the sensitivity of silicon photomultiplier tubes to optical radiation. The value of the critical illumination for Si-PMT is shown to increase with increasing temperature. Based on results of the performed studies, a structure of combined sensor based on silicon photomultiplier tube is proposed, allowing for simultaneous control over the two parameters, temperature and illumination. Main characteristics of this sensor are evaluated.

Keywords: combined sensor, silicon photomultiplier tube, dark current, critical illumination, temperature

REFERENCES

1. Ivanov V.M. *Intellektual'nyye sistemy* (Intelligent Systems), Ekaterinburg, 2015, 92 p. (in Russ.)
2. Ostroukh A.V., Surkova N.E. *Intellektual'nyye informatsionnyye sistemy i tekhnologii* (Intelligent Information Systems and Technologies), Krasnoyarsk, 2015, 370 p. (in Russ.)
3. Davidović B., Labus A. *Electronics and Energetics*, 2016, no. 3(29), pp. 451–460, DOI: 10.2298/FUEE1603451D.
4. Gunawan T.S., Yaldi I.R.H., Kartiwi M., Ismail N., Za'bah N.F., Mansor H., Nordin A.N. *Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science*, 2017, no. 1(7), pp. 107–115, DOI: 10.11591/ijeecs.v7.i1.pp107-115.
5. Rychkova V.A. *Herald of Science and Education*, 2019, no. 4(58), pt. 2, pp. 31–34. (in Russ.)
6. Nguyen Xuan Manh, Popov G.A. *Engineering Journal of Don*, 2015, no. 3(37), pp. 31. (in Russ.)
7. Baigozin D.V., Pervukhin D.N., Zakharova G.B. *Bulletin of The Tomsk Polytechnic University*, 2008,

- no. 5(313), pp. 168–172. (in Russ.)
8. Myasoedov Yu.V., Savina N.V. *Intellektualizatsiya sistem elektrosnabzheniya gorodov* (Intellectualization of City Power Supply Systems), Blagoveshchensk, 2017, 164 p. (in Russ.)
 9. Ricquebourg V., Menga D., Durand D., Marhic B., Delahoche L. and Loge C. *2006 1ST IEEE International Conference on E-Learning in Industrial Electronics*, 2006, pp. 23–28, DOI: 10.1109/ICELIE.2006.347206.
 10. Hancke G.P., de Carvalho e Silva B. and Hancke G.P. Jr. *Sensors*, 2013, vol. 13, pp. 393–425, DOI:10.3390/s130100393.
 11. Berntzen L., Johannessen M.R., Florea A. *The 5th International Conference on Smart Cities, Systems, Devices and Technologies*, 2016, pp. 31–36.
 12. Asayonak M.A., Zenevich A.O., Kochergina O.V., Novikov E.V. *Problemy infokommunikatsiy*, 2020, no. 2(12), pp. 41–46. (in Russ.)
 13. Gulakov I.R., Zenevich A.O. *Fotopriyemniki kvantovykh system* (Photodetectors of Quantum Systems), Minsk, 2012, 276 p. (in Russ.)

Data on authors

- Ivan R. Gulakov** — Dr. Sci., Professor; Belarusian State Academy of Communications, Department of Mathematics and Physics; E-mail: gulakov@bsu.by
- Andrey O. Zenevich** — Dr. Sci., Professor; Belarusian State Academy of Communications; Rector of the Academy; E-mail: a.zenevich@bsac.by
- Olga V. Kochergina** — Post-Graduate Student; Belarusian State Academy of Communications, Department of Mathematics and Physics; E-mail: o.kochergina@bsac.by
- Evgeny V. Novikov** — PhD, Associate Professor; Belarusian State Academy of Communications, Director of the Institute of Modern Communication Technologies; E-mail: e.novikov@bsac.by

For citation: Gulakov I. R., Zenevich A. O., Kochergina O. V., Novikov E. V. Silicon photoelectronic multipliers as a basis for creating combined sensors. *Journal of Instrument Engineering*. 2021. Vol. 64, N 11. P. 941–948 (in Russian).

DOI: 10.17586/0021-3454-2021-64-11-941-948