

УДК 53.083

EDN: OKFHXX

PACS: 06.90.+v, 85.60.Gz



## Влияние распределения освещенности в пятне рассеяния оптического зонда на измерение коэффициента фотоэлектрической связи ФПУ второго поколения

Н. А. Семенченко

*Исследовано влияние распределения освещенности в пятне рассеяния на измерение коэффициента фотоэлектрической связи (ФЭС) фотоприемных устройств (ФПУ) второго поколения. Проведены теоретические исследования путем математического моделирования для форм освещенности различных по структуре, а также для различных соотношений шага ФПУ к эффективному размеру фоточувствительной площадки. Получена формула для расчета коэффициента фотоэлектрической связи при известном распределении чувствительности по фоточувствительному элементу (ФЧЭ). Сформулированы основные условия, оказывающие влияние на достоверность полученных результатов смоделированного процесса измерения.*

*Ключевые слова:* фотоприемное устройство, измерение параметров, методики измерения, фотоэлектрическая связь, коэффициент фотоэлектрической связи, неравномерность чувствительности.

DOI: 10.51368/2307-4469-2023-11-3-273-278

### Введение

В соответствии с [1] коэффициент фотоэлектрической связи определяется как отношение напряжения сигнала с необлученного элемента в многоэлементном ФЭПП к напряжению фотосигнала с облученного элемента, определяемого на линейном участке энергетической характеристики. Измерение коэффициента ФЭС ФПУ второго и последующих поколений, работающих в ультрафиолетовом и видимом диапазоне спектра, прямой засветкой центрального пикселя не вызывает затруднений. Чего нельзя сказать об инфракрасном

диапазоне спектра, где начинает сказываться соотношение размера пятна рассеяния оптического зонда и размера фоточувствительной площадки из-за теоретически обусловленного предела наименьшего диаметра функции рассеяния точки оптического зонда [2]. Для диапазона (3–5) мкм при относительном отверстии  $D/f' = 1:4$  радиус кружка Эйри составляет порядка 20 мкм, а для диапазона (8–12) мкм при относительном отверстии  $D/f' = 1:2$  – порядка 25 мкм, что для пикселей меньшего размера нарушает требование для проведения измерения коэффициента ФЭС прямой засветкой центрального пикселя, в соответствии с которым геометрический размер пятна рассеяния по уровню концентрации энергии в пятне 90 % не должен превышать размера измеряемой площадки. Кроме того, пятно рассеивания является сверткой ФРТ оптического зонда и функции, описывающей форму диафрагмы, ограничивающей поток излучения, что приводит к перераспределению энергии и увеличе-

Семенченко Наталья Александровна, инженер 1 кат.  
E-mail: orion@orion-ir.ru, nafara@mail.ru  
АО «НПО «Орион».  
Россия, 111538, Москва, ул. Косинская, 9.

Статья поступила в редакцию 25.04.2023  
Принята к публикации 2.05.2023

© Семенченко Н. А., 2023

нию пятна рассеяния из-за конечных размеров диафрагмы.

В связи с вышеуказанным измерения как коэффициента ФЭС, так и фотоэлектрической площади ИК ФПУ второго поколения требуется проводить принципиально другими способами. Ряд методов измерения описан в [3]. Наиболее предпочтительным, хоть и трудоемким, является метод измерения путем сканирования области фоточувствительных элементов и определения распределения чувствительности исследуемого ФЧЭ путем восстановления с помощью преобразования Фурье. Определение распределения чувствительности по ФЧЭ является обязательным этапом при характеристике исследуемого ФПУ, поскольку используется и как для определения эффективной площади ФЧЭ, так и для определения коэффициента ФЭС [4].

На настоящий момент времени исследования в области влияния распределения освещенности в пятне рассеяния на погрешность измерения коэффициента ФЭС не проводились. В связи с этим появилась потребность в разработке алгоритма расчета коэффициента ФЭС с учетом характера пятна рассеяния при известном распределении чувствительности по ФЧЭ.

### Математическая модель

Для изучения зависимости значения коэффициента ФЭС от распределения освещенности была разработана математическая модель, отображающая процесс измерения коэффициента ФЭС на основе известного распределения чувствительности по ФЧЭ и распределения освещенности в пятне рассеяния, а также определена систематическая погрешность измерения.

При расчетах в качестве функции концентрации энергии в пятне рассеяния оптического зонда вместо гауссоиды использовалась свертка функции рассеяния точки оптического

зонда и функции, описывающей форму тест-объекта. В данной математической модели в качестве тест-объекта использовалась круглая диафрагма. В этом случае распределение энергии в пятне рассеяния описывается интегралом

$$E(x, y) = \iint_{-\infty}^{+\infty} PSF(x', y') \times circ(x - x', y - y') dx' dy' \quad (1)$$

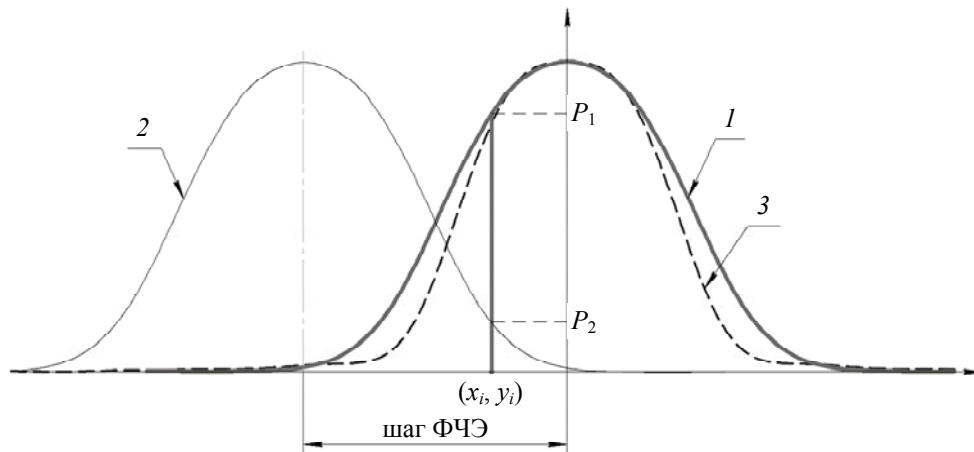
где  $E(x, y)$  – функция распределения энергии в пятне рассеяния;  $PSF(x', y')$  – функция рассеяния точки оптической системы;  $circ(x - x', y - y')$  – функция изображения диафрагмы.

$$PSF(x, y) = \frac{2 \times J_1(a \times \sqrt{x^2 + y^2})}{a \times \sqrt{x^2 + y^2}} \quad (2)$$

где  $J_1(\dots)$  – функция Бесселя первого порядка;  $a$  – масштабный коэффициент.

Согласно данным ведущего производителя ФПУ на основе InSb – компании SCD (Израиль) [5], приведенным в [6], распределение чувствительности по поверхности ФЧЭ неравномерно. В качестве распределения чувствительности по ФЧЭ использовалась куполообразная функция, характеризующаяся «скоростью» убывания чувствительности по краям, обусловленная в основном длиной свободного пробега электронов [7], и размером области с равномерной чувствительностью в центре ФЧЭ. Границы применимости стандартной методики измерения эффективной фоточувствительной площади относительно влияния диффузионной длины, при которых возможно проведение измерений, приведены в [8].

Для определения зависимости между коэффициентом ФЭС, распределением чувствительности по поверхности ФЧЭ и распределением освещенности в пятне рассеяния рассмотрим сигнал в узкой выделенной области с координатами  $(x_i, y_i)$  (рис. 1).



**Рис. 1.** Схема для пояснения расчета коэффициента ФЭС: 1 – распределение чувствительности освещенного ФЧЭ; 2 – распределение чувствительности неосвещенного ФЧЭ; 3 – распределение энергии в пятне рассеяния оптического зонда

В рассматриваемую область поступает количество фотонов, пропорциональное освещенности в данной области  $E(x_i, y_i)$ , при этом пусть поглотится  $K$  фотонов. В этом случае вероятность поглощения фотонов освещенным ФЧЭ составит

$$P_1 = \frac{SF_1(x_i, y_i)}{SF_1(x_i, y_i) + SF_2(x_i, y_i)}, \quad (3)$$

где  $SF_1(x_i, y_i)$  – значение чувствительности освещенного ФЧЭ в точке  $(x_i, y_i)$ , пропорциональное количеству поглощенных фотонов освещенным ФЧЭ;  $SF_2(x_i, y_i)$  – значение чувствительности неосвещенного ФЧЭ в точке  $(x_i, y_i)$ , пропорциональное количеству поглощенных фотонов неосвещенным ФЧЭ.

Для большей наглядности здесь показан случай только с непосредственно примыкающим соседним пикселем к освещенному ФЧЭ несмотря на то, что в общем случае из-за «хвостов» распределения чувствительности, носители заряда могут поглощаться и через 1–2 ФЧЭ.

Для неосвещенного ФЧЭ вероятность поглощения фотонов составит

$$P_2 = \frac{SF_2(x_i, y_i)}{SF_1(x_i, y_i) + SF_2(x_i, y_i)}. \quad (4)$$

Сигнал с ФЧЭ  $S_{ФЧЭ}$  с учетом вероятности поглощения фотонов  $P_{ФЧЭ}$  в общем случае можно рассчитать по следующей формуле

$$S_{ФЧЭ} = \iint_A E(x, y) \times P_{ФЧЭ} \times SF_{ФЧЭ}(x, y) dx dy. \quad (5)$$

Сигналы  $S_1$  и  $S_k$  с освещенного и любого соседнего с ним неосвещенного ФЧЭ можно рассчитать соответственно по формулам:

$$S_1 = \iint_A E(x, y) \frac{SF_1(x, y)^2}{\sum_{i=1}^N SF_i(x, y)} dx dy, \quad (6)$$

$$S_k = \iint_A E(x, y) \frac{SF_k(x, y)^2}{\sum_{i=1}^N SF_i(x, y)} dx dy, \quad (7)$$

где  $E(x, y)$  – распределение освещенности в пятне рассеяния оптического зонда по поверхности ФЧЭ;  $SF_1(x, y)$  – распределение чувствительности по поверхности освещенного ФЧЭ;  $N$  – количество ФЧЭ, окружающих освещенный ФЧЭ;  $SF_k(x, y)$  – распределение чувствительности по поверхности  $k$ -го неосвещенного ФЧЭ.

Коэффициент ФЭС между освещенным ФЧЭ и  $k$ -м неосвещенным ФЧЭ в соответствии с определением и вышеприведенными формулами следует вычислять по формуле

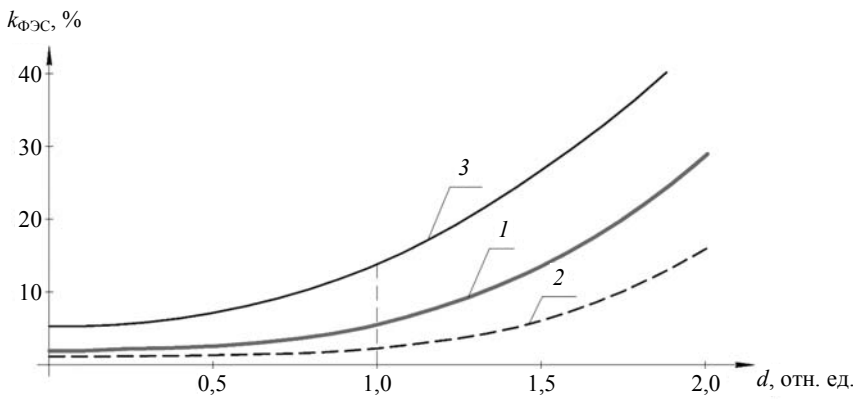
$$k_{ФЭС} = \frac{\iint_A E(x, y) \frac{SF_k(x, y)^2}{\sum_{i=1}^N SF_i(x, y)} dx dy}{\iint_A E(x, y) \frac{SF_1(x, y)^2}{\sum_{i=1}^N SF_i(x, y)} dx dy}. \quad (8)$$

**Результаты исследования**

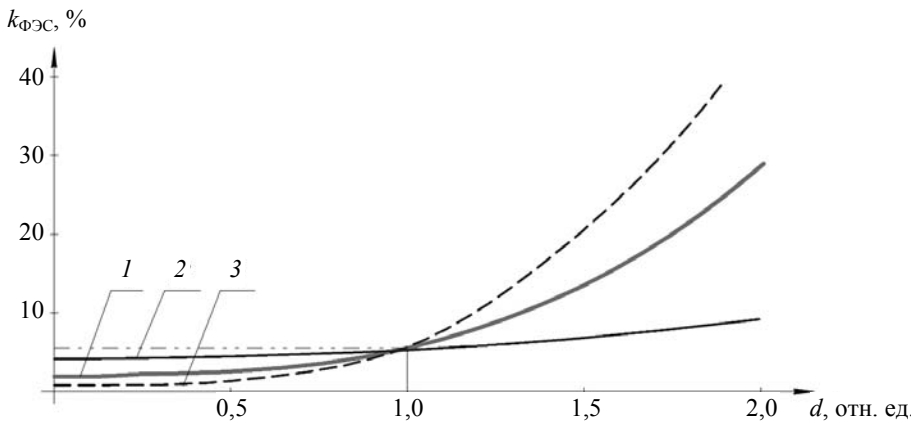
На рисунке 2 приведены зависимости коэффициента ФЭС от отношения эффективного размера площадки к шагу в относительных единицах (размер пикселя, соответствующий эффективной фотоэлектрической площади, принят за «1») при одной и той же эффективной фотоэлектрической площади и распределении энергии в пятне рассеяния оптического зонда. По оси абсцисс откладывается диаметр пятна рассеяния по отношению к размеру пикселя, при этом единице соответствует

диаметр пятна рассеяния, при котором 90 % энергии попадает на область эффективной фотоэлектрической площади ФЧЭ.

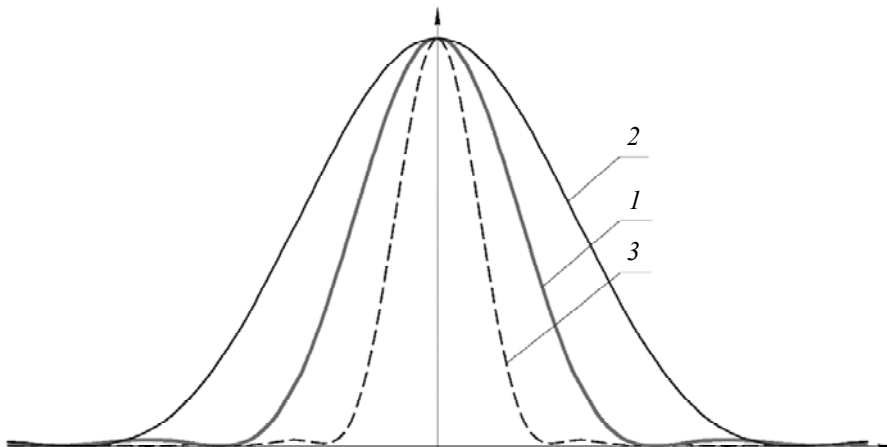
На рисунке 3 приведены зависимости коэффициента ФЭС от диаметра пятна рассеяния оптического зонда в относительных единицах (размер пикселя, соответствующий эффективной фотоэлектрической площади, принят за «1») для различных распределений энергии в пятне рассеяния оптического зонда (рис. 4) при соотношении эффективного размера площадки к шагу 1:1 ( $p = d_{эфф}$ ).



*Рис. 2. График зависимости коэффициента ФЭС от отношения шага  $p$  к эффективному размеру площадки  $d_{эфф}$ : 1)  $p = d_{эфф}$ ; 2)  $p = 1,2 \times d_{эфф}$ ; 3)  $p = 0,8 \times d_{эфф}$*



*Рис. 3. График зависимости коэффициента ФЭС от диаметра пятна рассеяния оптического зонда для различных распределений энергии в пятне рассеяния оптического зонда (нумерация на рисунках 3 и 4 соответствует)*



*Рис. 4. Распределения энергии в пятне рассеяния оптического зонда*

По графику на рис. 2 видно, что от соотношения эффективного размера площадки к шагу зависит величина коэффициента ФЭС, при этом значение, измеренное с помощью пятна рассеяния при 90 % энергии на ФЧЭ, превышает в 2–3 раза значение, соответствующее теоретическому случаю, когда ФЧЭ засвечено идеальной  $\delta$ -функцией. Как видно из графика на рис. 3, коэффициент ФЭС, измеренный с помощью пятна рассеяния при 90 % энергии на ФЧЭ, значительно превышает значение, соответствующее теоретическому случаю, когда ФЧЭ засвечено идеальной  $\delta$ -функцией, при этом чем более пологие края имеет пятно рассеяния, тем больше значение коэффициента ФЭС. Случай, когда  $d \rightarrow 0$ , соответствует засветке идеальной  $\delta$ -функцией, что отвечает требованию определения коэффициента ФЭС, что должен засвечиваться только центральный пиксель. В действительности же, из-за «хвостов» пятна рассеяния помимо влияния ФЭС появляется дополнительный сигнал на соседних пикселях из-за засветки.

Исследование данного явления показало, что при соотношении размера пятна рассеяния и ФЧЭ 1:1 значения коэффициента ФЭС завышаются в 1,5–3 раза в зависимости от формы распределения чувствительности по ФЧЭ и распределения энергии в пятне рассеяния, при этом чем меньше ФЭС, тем больше относительная погрешность.

### Заключение

В результате исследования влияния распределения освещенности в пятне рассеяния на измерение коэффициента ФЭС была выведена формула, связывающая показатель с известным распределением чувствительности по ФЧЭ. С помощью математического моделирования были получены значения коэффициента ФЭС для различных форм распределения чувствительности ФЧЭ, энергии в пятне рассеяния оптического зонда, а также для различных

соотношений шага и эффективного размера фоточувствительной площадки. Обобщены полученные результаты, по итогам которых можно сказать, что значение коэффициента ФЭС, измеренное с помощью пятна рассеяния, совпадающего по уровню 90 % энергии с фотозлектрической площадью, завышается в 1,5–3 раза по отношению к значению, соответствующему теоретическому случаю, когда ФЧЭ засвечено идеальной  $\delta$ -функцией. Как итог проведенных исследований следует указать, что для согласованности получаемых значений коэффициента ФЭС ФПУ на сопряженных предприятиях-изготовителях требуется паспортизация параметров пятна рассеивания, с помощью которого проходили приемосдаточные испытания ФПУ, иначе при входном контроле на последующих этапах возможны существенные расхождения в измеренных значениях.

### ЛИТЕРАТУРА

1. ГОСТ 59605-2021. Оптика и фотоника. Приемники излучения полупроводниковые фотозлектрические и фотоприемные устройства. Термины и определения. – М.: Российский институт стандартизации, 2021. – 46 с.
2. Борн М., Вольф Э. Основы оптики. – М.: Наука, 1973.
3. ГОСТ 59606-2021 Оптика и фотоника. Устройства фотоприемные второго и последующих поколений. Методы измерений фотозлектрических параметров и определения характеристик. – М.: Российский институт стандартизации, 2021. – 90 с.
4. Полесский А. В. / Успехи прикладной физики. 2017. Т. 5. № 6. С. 568–573.
5. Semi Conductor Devices (SCD). [Электронный ресурс]. URL: <http://www.scd.co.il> (дата обращения: 20.04.2023).
6. Itay Shtrichman, Tal Fishman, Udi Mizrahi, Vered Nahum, Zippora Calahorra, Yoram Aron / Proceeding of SPIE – The International Society for Optical Engineering. 2007. Vol. 6542.
7. Sir (Don) B. Rafol, Sarath D. Gunapala, Sam A. Keo, David Z. Ting / Infrared Physics and Technology. 2019. Vol. 96. P. 251–261.
8. Полесский А. В., Семенченко Н. А., Тресак В. К., Фирсенкова Ю. А. / Успехи прикладной физики. 2019. Т. 7. № 2. С. 142–154.

## Influence by illumination distribution in the optical scattering spot on the measurement of the photoelectric coupling coefficient of a photodetector devices of second-generation

N. A. Semenchenko

Orion R&P Association, JSC  
9 Kosinskaya st., Moscow, 111538, Russia  
E-mail: orion@orion-ir.ru; nafara@mail.ru

Received 25.04.2023; accepted 2.05.2023

*The article is devoted to the study of the influence by illumination distribution in the scattering spot on the measurement of the photoelectric coupling coefficient of the second-generation photodetector devices. Theoretical studies were carried out by mathematical modeling means for illumination forms different in structure, as well as for various photodetector step ratios to the effective size of the photosensitive area. A formula is obtained for calculating the photoelectric coupling coefficient with a known photodetector sensitivity distribution. The main conditions that affect the reliability of the obtained simulated measurement process results are described. The established pattern should be considered in physical measurements.*

*Keywords:* photodetector, parameters measurement, methods, photoelectric coupling, photoelectric coupling coefficient, irregularity sensitivity.

DOI: 10.51368/2307-4469-2023-11-3-273-278

### REFERENCES

1. GOST 59605-2021. Russian Standardization Institute, Moscow, 2021 [in Russian].
2. Max Born & Emil Wolf, Principles of Optics. 4th.ed. Pergamon Press, 1970.
3. GOST 59606-2021. Russian Standardization Institute, Moscow, 2021 [in Russian].
4. Polesskiy A. V., Usp. Prikl. Fiz. **5** (6), 568–573 (2017) [in Russian].
5. Semi Conductor Devices (SCD). URL: <http://www.scd.co.il> (20.04.2023).
6. Itay Shtrichman, Tal Fishman, Udi Mizrahi, Vered Nahum, Zippora Calahorra, Yoram Aron, Proceeding of SPIE – The International Society for Optical Engineering **6542** (2007).
7. Sir (Don) B. Rafol, Sarath D. Gunapala, Sam A. Keo, David Z. Ting, Infrared Physics and Technology **96**, 251–261 (2019).
8. Polesskiy A. V., Semenchenko N. A., Tresak V. K. and Firsenkova Yu. A., Usp. Prikl. Fiz. **7** (2), 142–154 (2019) [in Russian].