

**АЛГОРИТМ ОПРЕДЕЛЕНИЯ МЕТРОЛОГИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ШИРОКОДИАПАЗОННЫХ ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ С МНОГОЗАРЯДНЫМИ ПРИМЕСЯМИ**

*Гусев О.К., Свистун А.И., Шадурская Л.И., Яржембицкая Н.В.*

Белорусский национальный технический университет, г. Минск, Республика Беларусь

*Исследованы метрологические особенности фотоэлектрических полупроводниковых преобразователей (ФЭПП) на основе полупроводников с многозарядными примесями в широком диапазоне плотностей мощности оптического излучения, обусловленные процессами нелинейной рекомбинации. Предложен алгоритм процедуры определения метрологических характеристик таких ФЭПП не только при малых плотностях мощности оптического излучения, но и при высоких, учитывающий границы области нелинейной рекомбинации. Проведена оценка погрешности определения метрологических характеристик ФЭПП на основе полупроводников с многозарядными примесями с учетом перехода в область нелинейной рекомбинации. (E-mail: minskhome@tut.by)*

**Ключевые слова:** фотоэлектрические полупроводниковые преобразователи, метрологические характеристики, многозарядные примеси.

**Введение**

Фотоэлектрические полупроводниковые преобразователи (ФЭПП) на основе полупроводников с многозарядными примесями используются для создания матричных приборов и систем обнаружения в диапазонах длин волн 1,5–5 мкм и 8–12 мкм, для волоконно-оптических линий передачи информации [1, 2]. Повышение плотности мощности оптического излучения, а также расширение спектрального диапазона источников оптического излучения актуально с точки зрения совершенствования волоконно-оптических линий передачи информации, создания фотоэлектрических полупроводниковых преобразователей 2-го поколения на основе германия и кремния с многозарядными примесями (медь, золото, никель, галлий) в качестве элементной базы, обеспечивающей соответствие метрологических характеристик современным требованиям и одновременно невысокую стоимость, серийноспособность, высокую надежность и долговечность фотоприемных устройств инфракрасного диапазона [3].

Особенностью ФЭПП на основе полупроводников с многозарядными примесями является то, что метрологические характеристики таких приборов определяются рекомбинационными процессами с участием глубоких многозарядных примесей и, следовательно, таким

параметром полупроводников, как время жизни неравновесных носителей заряда  $\tau$ .

Исследование ФЭПП на основе полупроводников с многозарядными примесями показало, что существуют 2 диапазона линейности энергетических характеристик таких приборов – при малых плотностях мощности оптического излучения и высоких [4, 5, 6]. Причем границы области нелинейной рекомбинации существенно зависят от концентрации многозарядной примеси и ее параметров. Известно, что даже в одной партии ФЭПП на основе полупроводников с многозарядными примесями в силу технологических особенностей легирования полупроводникового материала согласно нормативным документам допускается определенный разброс концентрации многозарядной примеси (~20 %). Следовательно, с точки зрения метрологии при реализации базовой измерительной процедуры ГОСТа 17772-88 [7] при одной и той же плотности мощности оптического излучения для ФЭПП, незначительно отличающихся концентрацией многозарядной примеси за счет перехода в область нелинейной рекомбинации, может изменяться связь между метрологическими характеристиками ФЭПП на основе полупроводников с многозарядными примесями и измерительными воздействиями, при этом изменяется функция преобразования базовых измерительных сигналов, т. е. должна

быть изменена модель такого ФЭПП, учитывающая переход в область нелинейной рекомбинации. Использование для определения метрологических характеристик ФЭПП на основе полупроводников с многозарядными примесями базовых моделей, учитывающих линейную рекомбинацию только при малых плотностях мощности оптического излучения и потому не являющихся адекватными состоянию таких ФЭПП, приводит к методическим погрешностям, превосходящим допустимые значения и в ряде случаев проявляющихся как грубые погрешности (или метрологические ошибки).

Цель данной работы – анализ возможности проведения исследований метрологических характеристик ФЭПП в широком диапазоне плотностей мощности оптического излучения, разработка адекватных моделей и алгоритмов процедуры определения метрологических характеристик, включая оценку погрешностей измерений в различных диапазонах.

**Особенности метрологических характеристик широкодиапазонных ФЭПП на основе полупроводников с многозарядными примесями**

Физическим эффектом, который проявляется при определении метрологических характеристик ФЭПП на основе полупроводников с многозарядными примесями и доминирует при обеспечении безошибочности результатов измерения, является нелинейная рекомбинация, определяемая концентрацией и параметрами примеси, а также плотностью мощности оптического излучения  $P$ .

В работе рассмотрен метод испытаний ФЭПП на основе полупроводников с многозарядными примесями в широком диапазоне плотностей мощности оптического излучения с учетом границ области нелинейной рекомбинации. При разработке методов испытаний таких ФЭПП использовались результаты моделирования метрологических характеристик данных приборов в широком диапазоне плотностей мощности оптического излучения.

На рисунке 1 приведены зависимости времени жизни электронов  $\tau_n$  и дырок  $\tau_p$ , а также фототока  $i_\phi$  ФЭПП на основе германия  $n$ -типа, легированного золотом, в зависимости от плотности мощности оптического излучения. Из зависимостей, приведенных на рисунке 1, следует, что линейная рекомбинация неравновес-

ных носителей заряда (то есть постоянство  $\tau_n$  и  $\tau_p$ ) имеет место при низких плотностях мощности оптического излучения  $P < P_n$  и высоких  $P > P_b$ , что соответствует двум диапазонам линейности фототока  $i_\phi$  при малых  $P < P_n$  и высоких плотностях мощности оптического излучения  $P > P_b$  ФЭПП на основе германия  $n$ -типа, легированного золотом.

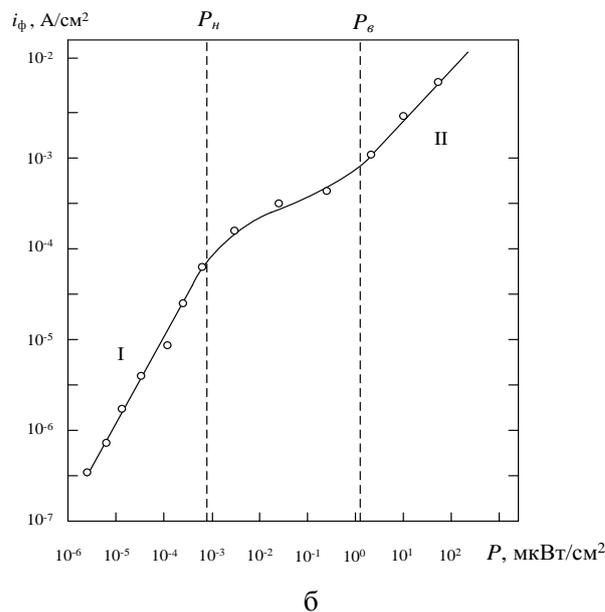
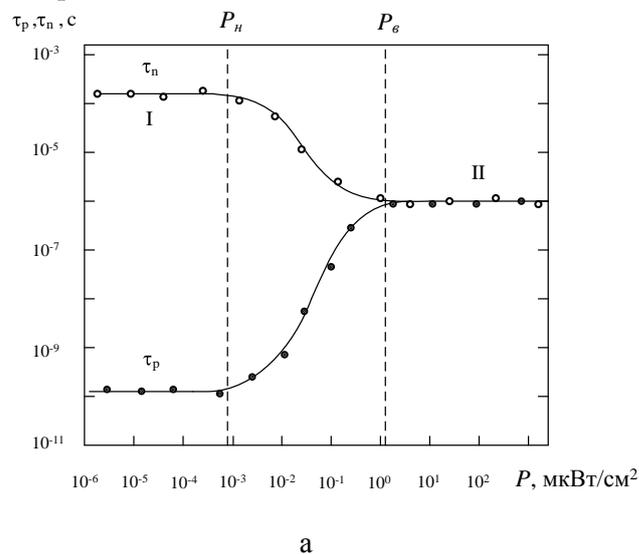


Рисунок 1 – Экспериментальные и расчетные зависимости времени жизни основных ( $\tau_n$ ) и неосновных ( $\tau_p$ ) носителей заряда (а) и фототока  $i_\phi$  (б) от плотности мощности оптического излучения  $P$  в ФЭПП на основе германия  $n$ -типа, легированного золотом;  $P_n$  и  $P_b$  – нижняя и верхняя границы диапазона линейности энергетических характеристик ФЭПП на основе полупроводников с многозарядными примесями

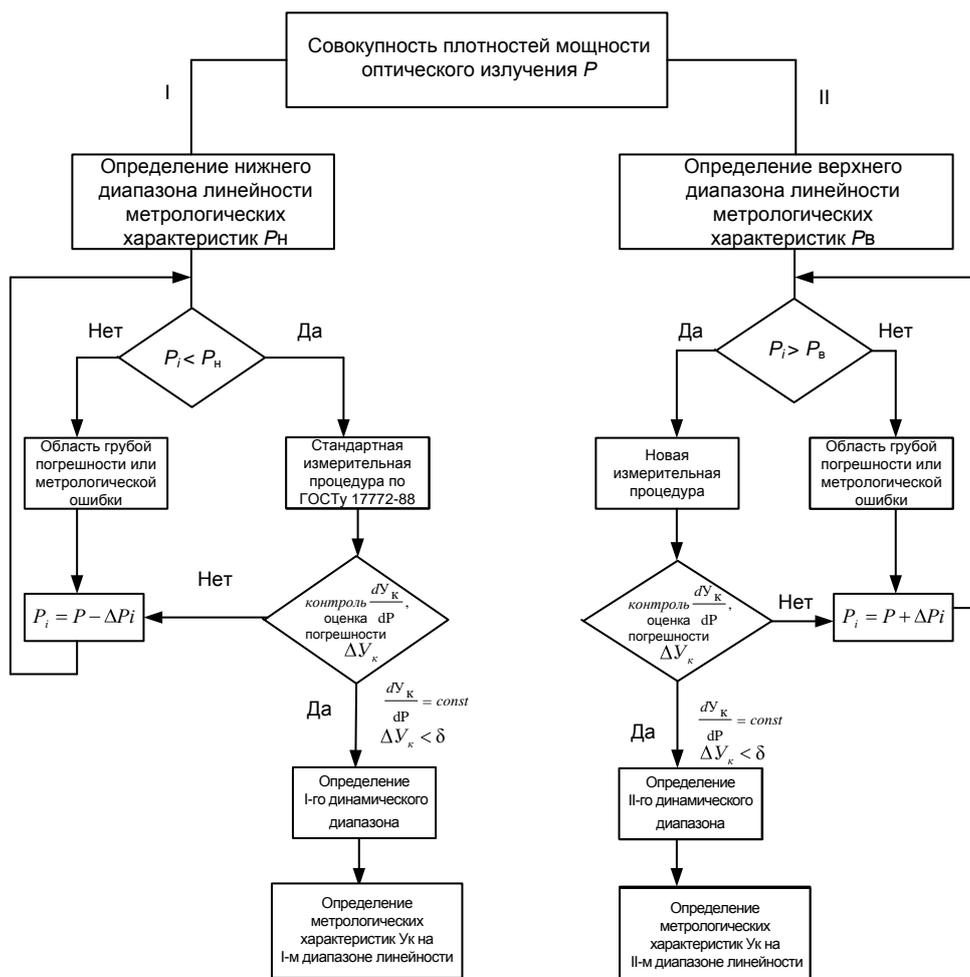


Рисунок 2 – Алгоритм процедуры определения метрологических характеристик ФЭПП на основе полупроводников с многозарядными примесями в широком диапазоне плотностей мощности оптического излучения ( $\delta$  – допустимое значение погрешности;  $\Delta P_i$  – приращение плотности мощности)

Алгоритм процедуры определения метрологических характеристик ФЭПП на основе полупроводников с многозарядными примесями в широком диапазоне плотностей мощности оптического излучения показан на рисунке 2.

Формирование погрешности определения метрологических характеристик ФЭПП на основе полупроводников с многозарядными примесями  $\Delta U_{к\text{ исп.}}$  иллюстрируется на примере измерения фототока  $i_{\phi}$  (рисунок 3). Погрешность определения характеристик таких приборов выражается степенью отличия результата испытания от истинного значения контролируемого метрологического параметра  $U_{к}$  (например, фототока  $i_{\phi}$ ), т. е. того,

которое он имел бы при отсутствии погрешности измерения  $\Delta U_{к\text{ изм.}}$  (т. е.  $\Delta i_{\phi\text{ изм.}}$ ) и погрешности задания плотности мощности оптического излучения  $\Delta P$  (рисунок 3):

$$\Delta U_{к\text{ исп.}} = U_{к\text{ изм.}} - U_{к\text{ ист.}}, \Delta i_{\phi\text{ исп.}} = i_{\phi\text{ исп.}} - i_{\phi\text{ ист.}} \quad (1)$$

При определении метрологических характеристик ФЭПП на основе полупроводников с многозарядными примесями актуальным с практической точки зрения является измерение истинного значения контролируемого метрологического параметра  $U_{к\text{ ист.}}$  (в нашем примере  $i_{\phi\text{ ист.}}$ ) в условиях, характеризуемых номинальным значением испытательного воздействия, т. е. плотности мощности оптического излучения  $P_{\text{ном.}}$

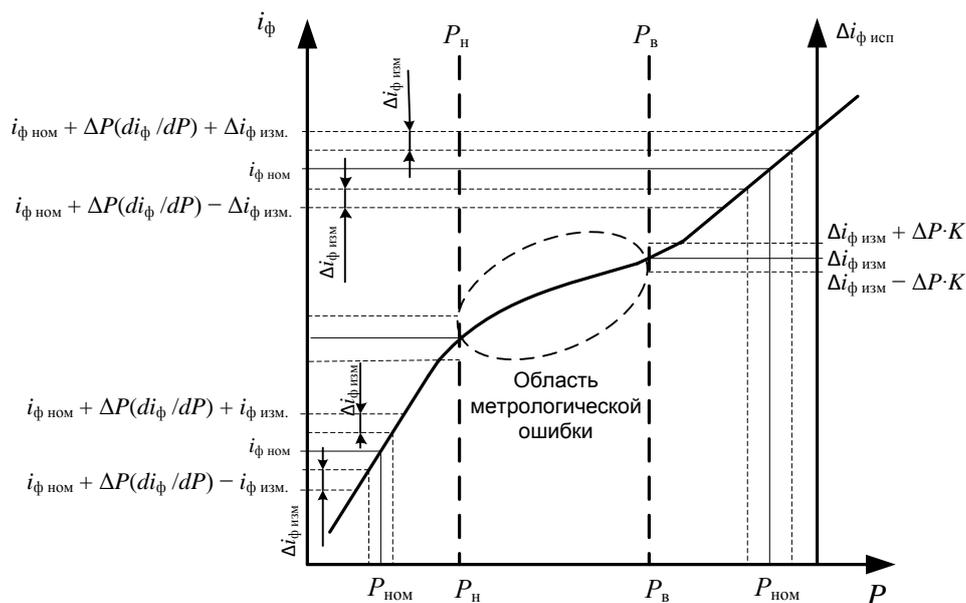


Рисунок 3 – Зависимость фототока  $i_\phi$  и погрешности определения характеристик от плотности мощности оптического излучения  $P$  ФЭПП с многозарядными примесями ( $K = \frac{di_\phi}{dP}$ )

Погрешность измерения контролируемого метрологического параметра задается значением приборной составляющей погрешности  $\Delta Y_{к\text{ изм.}}$  (в нашем примере  $\Delta i_{\phi\text{ изм.}}$ ) и точностью задания плотности мощности оптического излучения  $\Delta P$  (рисунок 3). Если бы погрешность измерения контролируемого метрологического параметра  $\Delta Y_{\text{изм.}}$  ( $\Delta i_{\phi\text{ изм.}}$ ) отсутствовала, то возможный результат испытаний находился бы в пределах  $\pm \Delta P \frac{dY_{к}}{dP}$  ( $\pm \Delta P \frac{di_\phi}{dP}$ ). Наличие погрешности измерения контролируемого метрологического параметра  $\Delta Y_{к\text{ изм.}}$  (в нашем примере  $\Delta i_{\phi\text{ изм.}}$ ), как видно из рисунка 3, приводит к расширению интервала неопределенности результата испытания. С учетом погрешности  $\Delta i_{\phi\text{ изм.}}$  контроль фототока с наибольшим по абсолютной величине значением погрешности определения характеристики определяется соотношением:

$$\begin{aligned} \Delta i_{\phi\text{ исп}} &= \Delta i_{\phi\text{ изм.}} + \Delta P \frac{di_\phi}{dP}, i_\phi = i_{\phi\text{ изм.}} \pm \Delta i_{\phi\text{ исп}} = \\ &= i_{\phi\text{ изм.}} \pm \Delta i_{\phi\text{ изм.}} + \Delta P \frac{di_\phi}{dP}. \end{aligned} \quad (2)$$

Полученные соотношения, а также зависимость  $i_\phi = f(P)$  показывают, что при попадании плотности мощности оптического излучения в

область нелинейной рекомбинации  $P_n < P < P_b$ , производная  $\frac{di_\phi}{dP}$  ( $\frac{di_\phi}{dP} \sim \frac{d\tau_n}{dP}, \frac{d\tau_p}{dP}$ ) зависит от  $P$  и, следовательно изменяется погрешность определения характеристики, что не исключает перехода в область метрологической ошибки. Результаты моделирования погрешности испытаний  $\Delta i_{\phi\text{ исп}}$  для ФЭПП на основе полупроводников с многозарядными примесями приведены на рисунке 3. При плотности мощности оптического излучения  $P_n < P < P_b$ , соответствующей области грубой погрешности (или метрологической ошибки), использовать данные ФЭПП не представляется возможным.

### Заключение

На основании приведенных результатов можно сделать следующие выводы:

- показана возможность нормирования метрологических характеристик ФЭПП с многозарядными примесями в широком диапазоне плотностей мощности оптического излучения ( $10^{-6} - 10^3$  мкВ/см<sup>2</sup>), основанного на адекватной модели формирования областей низкой и высокой чувствительности, переключения между ними и оценки метрологических характеристик в этих поддиапазонах;

– предложен алгоритм процедуры измерений метрологических характеристик ФЭПП на основе полупроводников с многозарядными примесями, отличающийся от стандартной измерительной процедуры выявлением области линейности выходных характеристик, грубой метрологической ошибки и позволяющий уменьшить интервал неопределенности при попадании мощности оптического излучения в область нелинейной рекомбинации или при переходе от одного поддиапазона чувствительности к другому.

### Список использованных источников

1. Арутюнов, В.А. Перспективы разработок монолитных охлаждаемых матричных ИК-приборов для комплексированных многоспектральных систем обнаружения в диапазонах 1,5–5 и 8–12 мкм / В.А. Арутюнов [и др.] // Прикладная физика. – 2005. – Вып. 5. – С. 84–91.
2. Semiconductor and integrate optoelectronics. Conference, Cardiff 2005. – IEEE Proc. Optoelectron. 2006. – № 1. – 146 p.
3. Ермаков, О.Н. Прикладная оптоэлектроника / О.Н. Ермаков. – М. : Техносфера, 2004. – 416 с.
4. Гусев, О.К. Моделирование метрологических характеристик фотоэлектрических преобразователей на основе полупроводников с глубокими примесями / О.К. Гусев, Л.И. Шадурская, Н.В. Яржембицкая // Метрология и приборостроение. – 2008. – № 2. – С. 22–25.
5. Гусев, О.К. Влияние плотности мощности оптического излучения на динамические метрологические характеристики фотоэлектрических полупроводниковых преобразователей с многозарядными примесями / О.К. Гусев [и др.] // Метрология и приборостроение. – 2009. – № 3. – С. 13–16.
6. Гусев, О.К. Проектирование и управление метрологическими характеристиками фотоэлектрических преобразователей на основе полупроводников с многозарядными примесями / О.К. Гусев [и др.] // Датчики и системы. – 2011. – № 1. – С. 19–24.
7. ГОСТ 17772-88. Приемники излучения полупроводниковые. Фотоэлектрические и фотоприемные устройства.

---

Gusev O.K., Svistun A.I., Shadurskaya L.I., Yarjembitskaya N.V.

### The identification algorithm of metrological characteristics of wide-range photovoltaic semiconductor converters with multiply impurities

Metrological features of photovoltaic semiconductor converters (PSC) based on semiconductors with the multiple-charge impurities are investigated in a wide range of power densities of optical radiation. The algorithm of the measurement procedure of the metrological characteristics of PSC is introduced not only at low densities of optical power, but at high, taking into account the boundary of nonlinear recombination. The estimation of accuracy of feature finding of the metrological characteristics PSC based on semiconductors with the multiple-charge impurities, is carried out, taking into consideration the area of nonlinear recombination. (E-mail: minskhome@tut.by)

**Key Words:** photovoltaic semiconductor converters, metrological characteristics, multiple-charge impurities.

*Поступила в редакцию 03.10.2011.*