

ЛИТЕРАТУРА

1. *Gijs A. M.*, Magnetic bead handling on-chip: new opportunities for analytical applications // *Microfluid Nanofluid.* — 2004. — Vol. 1. — P. 22–40.
2. *Розенцвейг Р.* Феррогидродинамика. — М.: Мир, 1989. — 357 с.
3. *Соколов В. В., Толмачев В. В., Эминов П. А.* Гамильтонова форма уравнений феррогидродинамики // Доклады академии наук. — 2009. — Т. 429, № 3. — С. 325–327.
4. *Касаткин С. И., Васильева Н. П., Муравьев А. М.* Биосенсоры на основе тонкопленочных магниторезистивных датчиков // Автоматика и телемеханика. — 2010. — № 1. — С. 174–186.
5. *Физические величины.* Справочник / Под ред. И. С. Григорьева, Е. З. Мейлихова. — М.: Энергоатомиздат, 1991.
6. *Таблицы физических величин.* Справочник / Под ред. И. К. Кикоина. — М.: Атомиздат, 1976.

Татьяна Николаевна Герасименко — аспирант физического факультета Московского государственного университета имени М. В. Ломоносова (МГУ);

☎ (495) 939-14-35

Петр Александрович Поляков — д-р физ.-мат. наук, профессор физического факультета МГУ;

☎ (495) 939-14-35

Сергей Иванович Касаткин — д-р техн. наук, зав. лабораторией Института проблем управления им. В. А. Трапезникова РАН.

☎ (495) 334-75-79

□

УДК 681.586.732.389

ПРОЕКТИРОВАНИЕ И УПРАВЛЕНИЕ МЕТРОЛОГИЧЕСКИМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ НА ОСНОВЕ ПОЛУПРОВОДНИКОВ С МНОГОЗАРЯДНЫМИ ПРИМЕСЯМИ

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

Получены исходные данные для проектирования метрологических характеристик фотоэлектрических полупроводниковых преобразователей (ФЭПП) на основе полупроводников с глубокими многозарядными примесями. Исследованы диапазоны соответствия энергетической характеристики ФЭПП с многозарядными примесями линейному закону. Показано, что за счет подбора вида глубокой многозарядной примеси можно проектировать ФЭПП с заданной полосой пропускания, улучшенным соотношением сигнал/шум и более высокой температурой эксплуатации. Показано, что благодаря сочетанию управляющего и измерительного оптических каналов в одном фотоприемном устройстве реализуется метод управления спектральной чувствительностью ФЭПП в процессе эксплуатации.

Ключевые слова: фотоэлектрический преобразователь, многозарядные примеси, метрологические характеристики.

В последние годы значительное внимание уделяется фотоэлектрическим полупроводниковым преобразователям (ФЭПП) второго поколения, в которых в качестве базового фоточувствительного материала используются высокочистые и совершенные кремний и германий, легированные многозарядными примесями, что позволяет обеспечить высокие фотоэлектрические характеристики и одновременно дешевизну, серийность и долговечность фотоприемных устройств ИК-диапазона [1].

Использование ФЭПП, как правило, осуществляется в усло-

виях работы на линейном участке его энергетической характеристики [2, 3]. При этом предполагается, что имеет место только один линейный участок энергетической характеристики ФЭПП при плотностях мощности излучения, меньших некоторого порогового значения $P_{н}$, определяемого опытным путем.

Метрологические характеристики ФЭПП на основе полупроводников с глубокими многозарядными примесями определяются в основном характером рекомбинационных процессов через уровни примеси. Ранее установлено [4, 5], что время жиз-

ни электронов τ_n и дырок τ_p в полупроводниках с глубокими многозарядными примесями может изменяться на порядки величины в зависимости от плотности мощности оптического излучения. В этих условиях существуют две области линейной рекомбинации, т. е. постоянства τ_n , τ_p . Следовательно, может существовать второй линейный участок энергетической характеристики такого ФЭПП при высоких плотностях мощности оптического излучения P .

Целью работы явилось получение исходных данных для проектирования метрологических

характеристик ФЭПП на основе полупроводников с глубокими многозарядными примесями и разработка методов управления этими характеристиками в процессе эксплуатации. Исследовались ФЭПП, в которых фоточувствительным материалом является германий, легированный медью. Аналогичное рассмотрение справедливо для ФЭПП на основе полупроводников, легированных другими многозарядными примесями.

Время жизни неравновесных носителей заряда и метрологические фотоэлектрические характеристики ФЭПП определяются, в основном, ионами меди в зарядовых состояниях -1 , -2 , -3 , которым соответствуют глубокие энергетические уровни E_1 и E_2 ($E_1 = E_v + 0,32$ [эВ], $E_2 = E_c - 0,26$ [эВ], E_v и E_c — валентная зона и зона проводимости соответственно, эВ).

С использованием неравновесной стационарной статистики рекомбинации [5] система кинетических уравнений, описывающих рекомбинационные процессы в германии, легированном медью, может быть записана в виде:

$$\begin{cases} N\gamma_{n1}((n_0 + \Delta n)F_1 - F_2n_1) = \\ = N\gamma_{p1}((p_0 + \Delta p)F_2 - F_1p_1); \\ N\gamma_{n2}((n_0 + \Delta n)F_2 - F_3n_2) = \\ = N\gamma_{p2}((p_0 + \Delta p)F_3 - F_2p_2); \\ \Delta p = \Delta n + N(F_2 - F_{10}) + \\ + N(F_3 - F_{20}); \\ F_1 + F_2 + F_3 = 1, \end{cases} \quad (1)$$

где N — концентрация многозарядной примеси; γ_{n1} , γ_{p1} , γ_{n2} , γ_{p2} — коэффициенты захвата для электронов и дырок соответственно на уровни E_1 и E_2 ; n_0 , p_0 — равновесные концентрации электронов и дырок; Δn , Δp — неравновесные концентрации электронов и дырок соответственно в зоне проводимости и валентной зоне; F_1 , F_2 , F_3 —

неравновесные функции заполнения, определяющие вероятность нахождения ионов меди в зарядовых состояниях -1 , -2 , -3 соответственно; n_1 , p_1 , n_2 , p_2 — концентрации электронов и дырок соответственно в валентной зоне и зоне проводимости при совпадении уровня Ферми с уровнями E_1 и E_2 ; F_{10} , F_{20} — равновесные функции заполнения уровней многозарядной примеси, имеющие вид:

$$\begin{aligned} F_{10} &= \frac{n_0/n_1}{1 + \frac{n_0}{n_1} + \frac{n_0^2}{n_1n_2}}; \\ F_{20} &= \frac{n_0^2/n_1n_2}{1 + \frac{n_0}{n_1} + \frac{n_0^2}{n_1n_2}}. \end{aligned} \quad (2)$$

Система (1) решалась численными методами относительно F_1 , F_2 , F_3 с использованием численных значений параметров меди в германии, приведенных в таблице (см. стр. 22) [6].

На рис. 1 представлены результаты расчета концентрации ионов меди в различных зарядовых состояниях ($N^{-3} = NF_3$,

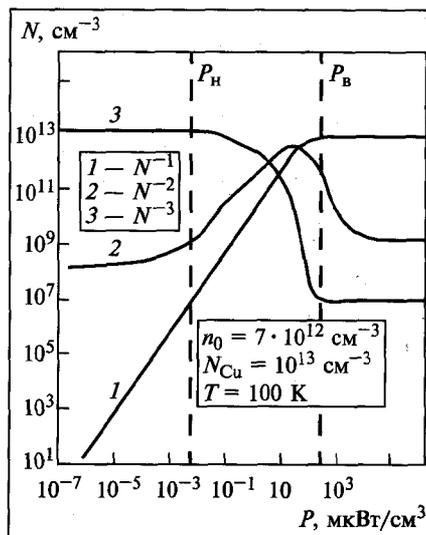


Рис. 1. Зависимости концентрации ионов меди в зарядовых состояниях $(-3) N^{-3}$, $(-2) N^{-2}$, $(-1) N^{-1}$ от плотности мощности оптического излучения P в германии n -типа

$N^{-2} = NF_2$, $N^{-1} = NF_1$, $N_{Cu} = N^{-3} + N^{-2} + N^{-1}$), соответствующих глубоким уровням $E_1 = E_v + 0,32$ эВ и $E_2 = E_c - 0,26$ эВ в германии в зависимости от плотности мощности оптического излучения P из области собственного поглощения ($\lambda = 1,7$ мкм), где P_n , P_b — границы диапазонов соответствия энергетической характеристики ФЭПП с многозарядными примесями линейному участку работы при низких и высоких плотностях мощности оптического излучения соответственно [7, 8].

При рассмотрении полученных зависимостей можно отметить следующие особенности процессов оптической перезарядки многозарядных примесей, определяющие метрологические характеристики ФЭПП.

В области малых плотностей мощности оптического излучения ($P < P_n$), несмотря на то, что наблюдается изменение концентрации примеси в зарядовых состояниях (-1) и (-2) , большинство ионов меди находятся в зарядовом состоянии (-3) , и рекомбинационные процессы, а следовательно и метрологические характеристики ФЭПП, определяются, в основном, ионами меди в зарядовом состоянии (-3) с глубоким энергетическим уровнем E_2 (см. рис. 1). Концентрация ионов меди в зарядовом состоянии (-2) мала, поэтому нижний уровень меди в германии $E_1 = E_v + 0,32$ [эВ] не проявляется при малых плотностях мощности оптического излучения и не влияет на метрологические характеристики ФЭПП.

При высоких плотностях мощности оптического излучения ($P > P_b$) большинство ионов меди находятся в зарядовом состоянии (-1) , и, следовательно, метрологические характеристики ФЭПП определяются глубоким уровнем E_1 . Так, при $P < P_n$ в ФЭПП на основе германия, легированного медью, реализу-

ется уровень ($E_c - 0,26$) эВ, и в таком состоянии ФЭПП будет чувствителен к излучению с длиной волны $\lambda \sim 4,8$ мкм. При $P > P_B$, когда в ФЭПП реализуется уровень ($E_v + 0,32$) эВ, ФЭПП будет чувствителен к излучению с длиной волны $\lambda \sim 3,6$ мкм.

Рассмотренные особенности процессов оптической перезарядки многозарядных примесей могут быть положены в основу создания фотоприемного устройства, сочетающего разнофункциональные оптические каналы — управляющий и измерительный. Изменение уровня мощности оптического излучения из области собственного поглощения, вводимого в управляющий канал, отдельный от измерительного канала, инициирует различные уровни многозарядной примеси в ФЭПП, т. е. реализуется управление чувствительностью ФЭПП к излучению, вводимому в измерительный оптический канал.

На рис. 2, а, представлены рассчитанные согласно [5] и экспериментальные зависимости времени жизни электронов τ_n и дырок τ_p , а также фототока I_{Φ} от плотности мощности излучения P для ФЭПП, изготовленного из германия, легированного медью. На рис. 2, б, показаны расчетные зависимости неравновесной стационарной функции заполнения глубоких уровней меди F от P .

Проводилось аналитическое определение и анализ диапазонов соответствия энергетической характеристики ФЭПП на основе полупроводников с глубокими многозарядными примесями линейному режиму работы при низких и при высоких плотностях мощности оптического излучения.

Анализ расчетных и экспериментальных зависимостей τ_n и τ_p от плотности мощности оптического излучения показывает, что при изменении степени

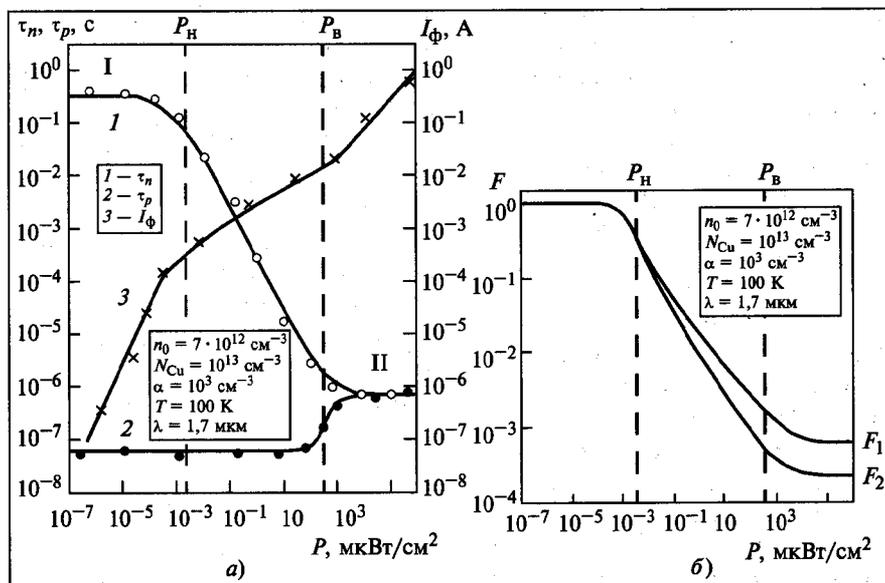


Рис. 2. Экспериментальные и расчетные зависимости времени жизни основных τ_n и неосновных τ_p носителей заряда, фототока I_{Φ} (а) и функции заполнения уровней меди F (б) от плотности мощности излучения P в германии n -типа, легированном медью ($\lambda = 1,7$ мкм — длина волны собственного поглощения)

заполнения глубоких центров на 50 % по отношению к равновесному заполнению или к предельному заполнению, τ_n и τ_p изменяются в пределах от 1 до 3 %. Такое изменение τ_n и τ_p практически не влияет на линейность энергетических характеристик фотоответа ФЭПП на основе полупроводников с глубокими многозарядными примесями, поэтому половинная перезарядка центров может быть выбрана в качестве критерия при определении диапазонов линейности энергетической характеристики таких ФЭПП.

При половинной перезарядке глубоких примесей по отношению к равновесному заполнению, определяемому равновесной функцией Ферми-Дирака F_0 , выполняется соотношение:

$$\frac{F - F_0}{F_0} = \pm 0,5, \quad (3)$$

где $F = (-[\Omega + K\Delta n] + [(\Omega + K\Delta n)^2 + Z + R\Delta n]^{1/2})/L$; $\Omega = \gamma_p(p_0 - NF_0 + p_1) + \gamma_n(n_0 + n)$; $K = \gamma_p + \gamma_n$; $R = 4N\gamma_p\gamma_n$; $Z = 4N\gamma_p(\gamma_n n_0 + \gamma_p p_1)$; $L = 2\gamma_p N$.

Знак “+” в соотношении (3) соответствует примесям акцепторной природы, а знак “-” — донорной. Решая уравнение (3) относительно Δn с учетом выражения для F , получим Δn_H — нижнюю границу диапазона линейности, выраженную через концентрацию неравновесных носителей заряда:

$$\Delta n_H = \frac{\pm 0,5((1-A)NF_0(1 \pm 0,5) + n_0 + (1-A)p_1)}{1 - (1 \pm 0,5)AF_0}, \quad (4)$$

где $A = 1 + \gamma_p/\gamma_n$.

Подставляя выражение (4) для Δn_H в формулу для плотности мощности излучения P , воздействующего на ФЭПП, получим выражение для нижней границы диапазона линейности энергетической характеристики ФЭПП с глубокими примесями:

$$P_H = \frac{\Delta n_H}{hc\lambda\beta\tau(\Delta n_H)\alpha}, \quad (5)$$

где β — квантовый выход внутреннего фотоэффекта, h — постоянная Планка, c — скорость

света, α — коэффициент поглощения

Для глубоких примесей акцепторной природы, когда выполняется условие $\frac{N}{n_0} \cdot \frac{\gamma_p}{\gamma_n} \gg 1$,

соотношение (5) принимает вид:

$$P_H = BN, \quad (6)$$

где B — постоянная, определяемая параметрами примеси.

Верхняя граница диапазона линейности фотоприемников с глубокими примесями P_B при высоких плотностях мощности излучения определяется в предположении, что τ_n и τ_p постоянны и не зависят от плотности мощности излучения, т. е. перезарядка глубоких центров завершилась и заполнение глубоких центров отличается от своего предельного значения не более чем на 50%. В таком случае выполняются соотношения:

$$\frac{F - F_{пр}}{F_{пр}} = \pm 0,5;$$

$$F_{пр} = \frac{\gamma_n}{\gamma_n + \gamma_p}, \quad (7)$$

где $F_{пр}$ — предельное значение неравновесной стационарной функции распределения [5]. Знак “-” соответствует примесям акцепторной природы, а “+” — донорной.

Учитывая выражения для F и $F_{пр}$ [5], решим уравнение (7) относительно Δn . Тогда аналитическое выражение для верхней границы диапазона линейности энергетической характеристики ФЭПП с глубокими примесями будет иметь вид:

$$P_B = \frac{\Delta n_B}{hc\lambda\beta\tau(\Delta n_B)\alpha}, \quad (8)$$

где

$$\Delta n_B = \frac{1}{(1 \pm 0,5)} \left(n_0 + p_1 \frac{(1-A)}{A} \right) - (1-A) \left(A(1 \pm 0,5)N - p_0 - NF_0 + p_1 + \frac{A}{1-A} (n_0 + n_1) \right).$$

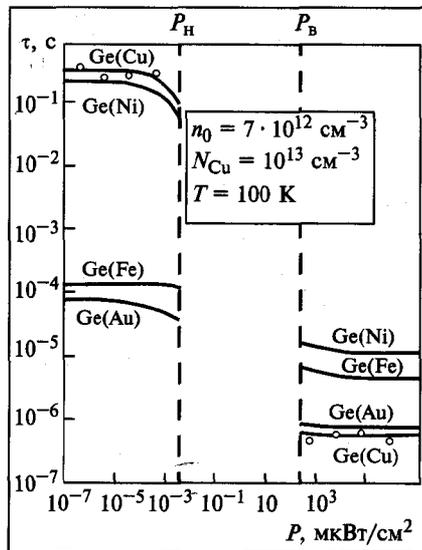


Рис. 3. Экспериментальные (обозначены точками) и расчетные (обозначены сплошными кривыми) зависимости собственной постоянной времени τ от плотности мощности излучения P в ФЭПП на основе германия, легированного медью, никелем, железом, золотом

Для экспериментальной проверки полученных теоретических результатов проводилось измерение собственной постоянной времени ФЭПП фоторезистивного типа на основе германия, легированного медью (равновесная концентрация электронов $n_0 = 7 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-3}$, концентрация меди $N_{Cu} = 10^{13} \text{ см}^{-3}$, размер фоточувствительной площадки $0,05 \times 0,5 \text{ см}^2$) согласно процедуре ГОСТ 17772—88 [2] на линейных участках энергетической характеристики при низких $P < P_H$ и высоких $P > P_B$ плотностях мощности оптического излучения.

На рис. 3 приведены полученные экспериментальная и расчетная зависимости τ от плотности мощности оптического излучения P в ФЭПП на основе германия, легированного медью, а также расчетные зависимости τ от P в ФЭПП на основе германия с никелем, железом, золотом. Численные значения параметров различных многозарядных примесей, используемых в расчетах, приведены в таблице.

Анализ полученных зависимостей показывает, что при работе ФЭПП на основе германия, легированного медью, на втором участке линейности энергетических характеристик (при $P > P_B$) собственная постоянная времени уменьшается на пять порядков в сравнении с τ на первом участке линейности энергетической характеристики, что приводит к увеличению объема информации, передаваемой по каналу за счет увеличения эффективной полосы пропускания ФЭПП. Для ФЭПП на основе германия, легированного железом, на втором участке линейности энергетических характеристик (при $P > P_B$) возможно обеспечение максимально высокого значения фототока за счет расширения динамического диапазона в область больших значений плотности мощности оптического излучения ($P > P_B$). При этом с увеличением соотношения сигнал/шум возможно повышение температуры эксплуатации подобных ФЭПП, и соответственно, улучшение габаритных показателей и

Параметры многозарядных примесей в германии при $T = 100 \text{ K}$

Многозарядная примесь в германии	Параметры примесей					
	$n_0 = 7 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-3}; N = 10^{13} \text{ см}^{-3}$					
	$E_1, \text{ эВ}$	$E_2, \text{ эВ}$	$\gamma_{n1}, \text{ см}^3/\text{с}$	$\gamma_{p1}, \text{ см}^3/\text{с}$	$\gamma_{n2}, \text{ см}^3/\text{с}$	$\gamma_{p2}, \text{ см}^3/\text{с}$
Медь	$E_v + 0,32$	$E_c - 0,26$	$1,2 \cdot 10^{-9}$	$1,7 \cdot 10^{-6}$	$4,1 \cdot 10^{-13}$	$1,4 \cdot 10^{-9}$
Золото	$E_v + 0,15$	$E_c - 0,20$	$1,0 \cdot 10^{-9}$	$5,9 \cdot 10^{-7}$	$3,7 \cdot 10^{-10}$	$4,7 \cdot 10^{-6}$
Никель	$E_v + 0,35$	$E_c - 0,30$	$8,9 \cdot 10^{-9}$	$6,8 \cdot 10^{-6}$	$8,8 \cdot 10^{-14}$	$8,9 \cdot 10^{-7}$
Железо	$E_v + 0,34$	$E_c - 0,27$	$8,9 \cdot 10^{-9}$	$2,7 \cdot 10^{-8}$	$1,7 \cdot 10^{-10}$	$8,9 \cdot 10^{-7}$

увеличение числа элементов в матричных конструкциях. Для ФЭПП на основе германия, легированного никелем, как видно из рис. 3, при работе на втором участке линейности энергетических характеристик при $P > P_B$ значение τ уменьшается на несколько порядков, а значит, увеличивается эффективная полоса пропускания.

Полученные результаты позволяют сделать следующие выводы.

Предложены физические принципы проектирования метрологических характеристик ФЭПП на основе полупроводников с многозарядными примесями (собственная постоянная времени ФЭПП τ , время нарастания $\tau_{0,1-0,9}$ и спада $\tau_{0,9-0,1}$, фототок, динамический диапазон) за счет выбора вида и концентрации многозарядной примеси.

Установлено, что изменение плотности мощности оптического излучения с длиной волны из области собственного поглощения в управляющем оптическом канале активирует различные уровни многозарядной примеси, т. е. реализуется управление спектральной чувствительностью ФЭПП к излучению, вводимому в измерительный оптический канал.

Получены аналитические выражения, определяющие диапазоны соответствия энергетической характеристики ФЭПП с

многозарядными примесями линейному закону (участку) работы при низких ($P < P_B$) и при высоких ($P > P_B$) плотностях мощности излучения, что позволяет проектировать ФЭПП с заданным (расширенным) динамическим диапазоном.

Исследована собственная постоянная времени τ ФЭПП на основе германия, легированного различными многозарядными примесями, в широком диапазоне плотностей мощности оптического излучения. Показано, что благодаря подбору вида глубокой многозарядной примеси можно проектировать ФЭПП с заданной полосой пропускания, улучшенным соотношением сигнал/шум и более высокой температурой эксплуатации.

ЛИТЕРАТУРА

1. Белоконев В. М., Завадский Ю. И., Кузнецов Ю. А., Чернокожин В. В. Кремниевые фотоприемники длинноволнового ИК-диапазона // Электронная промышленность. — 2003. — № 2. — С. 169—175.
2. Приемники излучения полупроводниковые. Фотоэлектрические и фотоприемные устройства: ГОСТ 17772—88. — Введ. 01. 07. 1989. — Москва: Издательство стандартов, 1988.
3. Фотозлементы-измерительные. Основные параметры. Методы измерения основных параметров: ГОСТ 25369—82. — Введ. 01. 07. 1983. — Москва: Издательство стандартов, 1982.
4. Sah, C. T., et al. Computer-aided study of steady-state carrier lifetimes under arbitrary injection conditions // Solid State Electronic — 1979. — Vol. 22. — P. 921—926.
5. Ткачев В. Д., Уренев В. И., Шадуурская Л. И., Явид В. Ю. О неравновесной стационарной статистике рекомбинации в полупроводниках // Физика и техника полупроводников. — 1978. — Т. 12. — № 7. — С. 1393—1396.
6. Глинчук К. Д., Литовенко Н. М. Рекомбинационные характеристики Ge и Si, используемых в полупроводниковом приборостроении // Полупроводниковая техника и микроэлектроника. — 1978. — Вып. 28. — С. 3—22.
7. Гусев О. К., Шадуурская Л. И., Яржембицкая Н. В. Моделирование метрологических характеристик фотоэлектрических преобразователей на основе полупроводников с глубокими примесями // Метрология и приборостроение. — 2008. — № 2. — С. 22—25.
8. Гусев О. К., Свистун А. И., Шадуурская Л. И., Яржембицкая Н. В. Влияние плотности мощности оптического излучения на динамические метрологические характеристики фотоэлектрических полупроводниковых преобразователей с многозарядными примесями // Метрология и приборостроение. — 2009. — № 3. — С. 14—18.

Работа выполнена в Белорусском национальном техническом университете.

Олег Константинович Гусев — д-р техн. наук, профессор, проректор;

☎ + (375 17) 292-75-21

Александр Иванович Свистун — канд. техн. наук, доцент, зам. декана;

☎ + (375 17) 293-96-38

E-mail: aivsistun@bntu.by

Людмила Иосифовна Шадуурская — канд. физ.-мат. наук, доцент;

☎ + (375 17) 292-67-94

Надежда Викторовна Яржембицкая — аспирант. □

**ДАТЧИКИ
СИСТЕМЫ**

Уважаемые читатели!

Если Вы не успели подписаться на журнал "Датчики и системы", напоминаем Вам, что через Редакцию можно оформить льготную подписку в любое время и с любого номера (дешевле, чем через каталоги агентств) или приобрести номера журнала за прошедшие годы.

Можно также заказать электронные версии как необходимого Вам номера журнала, так и отдельных статей.

Позвоните в Редакцию по тел. (495) 330-42-66 или пришлите заказ по электронной почте (E-mail: datchik@ipu.rssi.ru) — и подписка будет оформлена за один день. Расходы по пересылке журнала Редакция берет на себя. Не забудьте указать свой полный почтовый адрес!

Наш адрес: 117997, В-342, ГСП-7, Профсоюзная ул., д. 65, ИПУ РАН, оф. 104.