

В. А. Горюнов, В. Я. Гришаев, Е. В. Никишин

ОБ ИЗМЕНЕНИИ ВРЕМЕН ЖИЗНИ НОСИТЕЛЕЙ ЗАРЯДА ПРИ ИМПУЛЬСНОМ ФОТОВОЗБУЖДЕНИИ В КРЕМНИИ С ГЛУБОКИМИ ПРИМЕСНЫМИ ЦЕНТРАМИ

Аннотация. Приведены результаты численных исследований кинетики фотопроводимости в кремнии с двумя рекомбинационными центрами. Показано, что времена жизни носителей заряда зависят от значений их равновесных концентраций. Времена жизни при снятии фотозвуждения за счет эмиссии электронов с донорных центров увеличиваются на несколько порядков. Это приводит к наличию на релаксационных кривых концентраций электронов и дырок участков «быстрого» и «медленного спада».

Ключевые слова: кремний, кинетика фотопроводимости, рекомбинационные центры, эмиссия электронов, времена жизни электронов и дырок.

Abstract. The article adduces the results of numerical studies of photoconductivity kinetics in silicon with two recombination centers. It is shown that the lifetimes of charge carriers depend on the values of their equilibrium concentrations. The lifetimes increase significantly as a result of photoexcitation removal by electron emission from donor centers. This leads to the presence of electron and hole concentrations at "fast" and "slow decline" areas on the relaxation curves.

Key words: silicon, photoconductivity kinetics, recombination centers, electron emission, lifetimes of electrons and holes.

Введение

Кинетика фотопроводимости в кремнии определяется различными механизмами рекомбинации: рекомбинацией Шокли – Рида, межзонной рекомбинацией, безызлучательной экситонной рекомбинацией, межзонной Оже-рекомбинацией [1–6]. Необходимость учета того или иного механизма связана в первую очередь с наличием уровней захвата и рекомбинации в полупроводнике и уровнями возбуждения. При лазерных возбуждениях проявляется нелинейная рекомбинация, обусловленная межзонной излучательной и межзонной безызлучательной Оже-рекомбинацией [5–6]. В рамках такого рода представлений обычно не учитывается перезарядка рекомбинационных центров, которая при определенных темпах генерации может приводить к существенному изменению времен жизни свободных носителей заряда. Это связано с тем, что изменяется функция распределения электронов на донорных уровнях и дырок на акцепторных, что приводит к изменению темпа рекомбинации избыточных носителей заряда. Следует ожидать, что при освещении полупроводника и при снятии возбуждения светом времена жизни электронов и дырок будут изменяться при переходе к стационарному и равновесному состояниям соответственно [7].

1. Физическая модель фотопроводимости в кремнии при средних уровнях инжекции

Исследована кинетика фотопроводимости при возбуждении полупроводника импульсами света прямоугольной формы длительностью τ : $g = g_0$ при $0 < t < \tau$ и $g = 0$ при $t > \tau$ (g – темп межзонной генерации носителей заря-

да). Рассмотрен полупроводник с глубокими донорными и акцепторными центрами, концентрации которых соответственно равны N_d и N_a . Наряду с указанными центрами в полупроводнике присутствуют мелкие ионизированные уровни с концентрацией N_t^+ и N_t^- (уровни прилипания), концентрации которых влияют на концентрации темновых электронов и дырок. При моделировании использованы параметры уровней, соответствующие примесным центрам золота. Золото в кремнии является амфотерной примесью, т.е. формирует донорный ($E_c - 0,35$ eV; (0/+)) и акцепторный ($E_v + 0,55$ eV; (-/0)) глубокие уровни [8]. В работе [1] показано, что в кремнии n -типа за эти уровни отвечают разные центры. В частности, акцепторный уровень является следствием образования пар с мелкими донорами. Вероятности захвата электронов и дырок соответственно равны: $\sigma_{na} = 1,7 \cdot 10^{-9} \text{ см}^3 \text{ с}^{-1}$, $\sigma_{pa} = 1,1 \cdot 10^{-7} \text{ см}^3 \text{ с}^{-1}$, $\sigma_{nd} = 6,3 \cdot 10^{-8} \text{ см}^3 \text{ с}^{-1}$, $\sigma_{pd} = 2,4 \cdot 10^{-8} \text{ см}^3 \text{ с}^{-1}$ [8]. Существует также достаточно медленная реакция захвата электрона нейтральным донорным центром золота [9].

При концентрациях избыточных носителей заряда меньших 10^{15} – 10^{16} см^{-3} и больших уровнях легирования кинетика фотопроводимости при возбуждении импульсами света прямоугольной формы будет определяться в основном параметрами рекомбинационных центров. Исследовались кинетические уравнения:

$$\begin{aligned} \frac{dn}{dt} = & g - N_a \sigma_{na} \left(n(1 - f_a^-) - n_{1a} f_a^- \right) - \\ & - N_d \sigma_{nd} \left(n(1 - f_d^0) - n_{1d} f_d^0 \right) - N_d \sigma_{nd}^m \left(n f_d^0 - n_{1d} f_d^- \right); \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \frac{dp}{dt} = & g - N_a \sigma_{pa} \left(p f_a^- - p_{1a} (1 - f_a^-) \right) - \\ & - N_d \sigma_{pd} \left(p f_d^0 - p_{1d} (1 - f_d^0) \right) - N_d \sigma_{pd}^m p f_d^- . \end{aligned} \quad (2)$$

В соотношении (1) второе и третье слагаемые правой части описывают изменение концентрации электронов в зоне проводимости, обусловленное акцепторными и донорными центрами соответственно. Четвертое слагаемое описывает медленную реакцию захвата электронов незаряженными донорными центрами. Учет данного механизма рекомбинации необходим при длительном возбуждении полупроводника светом. Аналогичные слагаемые для дырок присутствуют в уравнении (2).

Вероятности нахождения акцепторного центра золота в состоянии Au^- и донорного в состояниях Au^0 и Au^- описываются уравнениями:

$$\frac{df_a^-}{dt} = \sigma_{na} \left(n(1 - f_a^-) - n_{1a} f_a^- \right) - \sigma_{pa} \left(p f_a^- - p_{1a} (1 - f_a^-) \right); \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \frac{df_d^0}{dt} = & \sigma_{nd} \left(n(1 - f_d^0) - n_{1d} f_d^0 \right) - \\ & - \sigma_{pd} \left(p f_d^0 - p_{1d} (1 - f_d^0) \right) - \sigma_{nd}^m \left(n f_d^0 - n_{1d} f_d^- \right) + \sigma_{pd}^m p f_d^- ; \end{aligned} \quad (4)$$

$$\frac{df_d^-}{dt} = \sigma_{nd}^m (nf_d^0 - n_{1d} f_d^-) - \sigma_{pd}^m p f_d^- . \quad (5)$$

Уравнения (1)–(5) анализировались численными методами.

2. Влияние концентраций примесных центров золота на времена жизни свободных носителей заряда в кремнии n -типа

В работе проведено исследование влияния концентраций акцепторных и донорных уровней на времена жизни электронов и дырок кристаллического кремния. На рис. 1 приведены зависимости τ_n и τ_p от концентрации акцепторных центров при различных значениях концентраций донорных центров для полупроводника n -типа ($n_0 = 10^{11} \text{ см}^{-3}$).

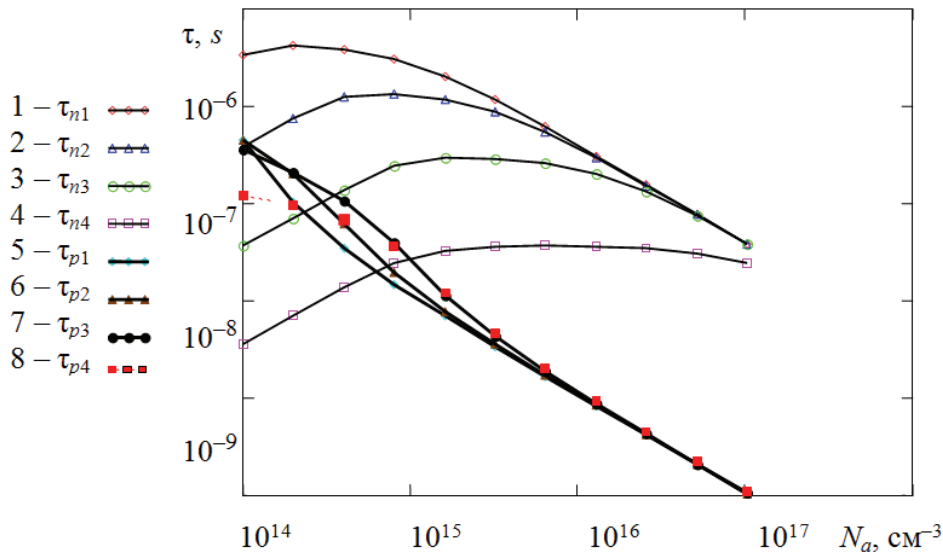


Рис. 1. Зависимости времен жизни избыточных носителей заряда от концентрации акцепторной примеси при фотовозбуждении зона-зона для кремния n -типа ($n_0 = 10^{11} \text{ см}^{-3}$, $Q = 10^{19} \text{ см}^{-3} \text{ с}^{-1}$): 1 и 5 при $N_d = 10^{14} \text{ см}^{-3}$; 2 и 6 – $N_d = 10^{15} \text{ см}^{-3}$; 3 и 7 – $N_d = 10^{16} \text{ см}^{-3}$; 4 и 8 – $N_d = 10^{17} \text{ см}^{-3}$

При увеличении концентрации акцепторных центров время жизни основных носителей заряда (дырок) уменьшается и достигает величины около 10^{-10} с (кривые 5–8 на рис. 1). При выполнении условия $N_a > N_d$ времена жизни неравновесных носителей заряда определяются в основном рекомбинацией через акцепторные центры. Увеличение концентраций рекомбинационных центров не обязательно приводит к увеличению времени жизни основных носителей заряда (электронов). Это связано с тем, что при освещении происходит увеличение функции f_a^- (рис. 2), поскольку в этом случае большая часть акцепторных центров захватывает генерированные излучением электроны. При $N_a > 10^{15} \text{ см}^{-3}$ $f_a^- \approx 0,85$. Следовательно, уменьшается вероятность захвата электрона на акцепторный центр, а значит, уменьшается темп рекомбинации электронов и их время жизни. Величина f_a^- при $N_a > 10^{15} \text{ см}^{-3}$ в полупроводнике n -типа при освещении увеличивается на порядок и более.

На кривых зависимости времени жизни электронов от концентрации акцепторных центров при $N_d > 10^{14} \text{ см}^{-3}$ (кривые 1–4) наблюдается максимум. Увеличение концентрации донорных уровней приводит к смещению экстремума функции $\tau_n = \tau_n(N_a)$ в сторону больших концентраций N_a . Степень заполнения акцепторных и донорных центров электронами как в равновесном, так и в стационарном состоянии зависит от n_0 и N_d .

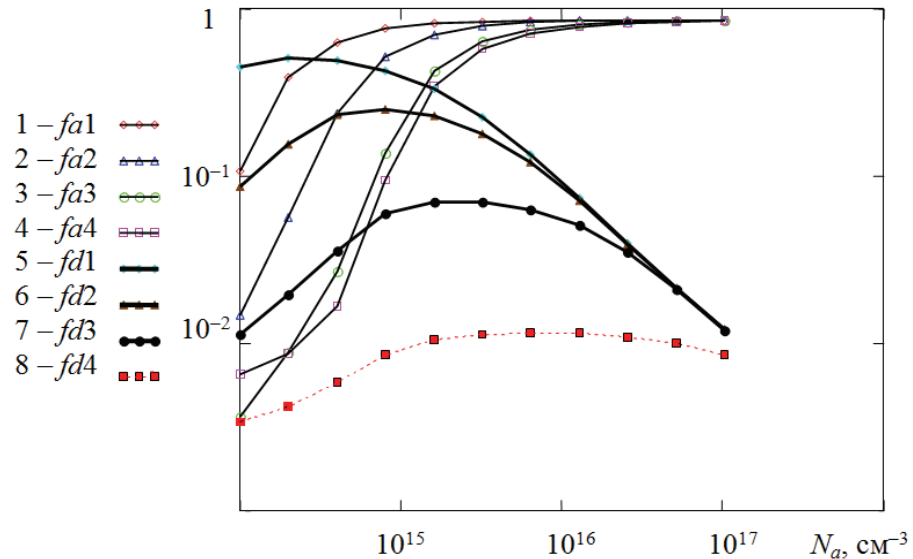


Рис. 2. Зависимости вероятности нахождения электронов на донорных и акцепторных центрах от концентрации акцепторной примеси при фотовозбуждении зона-зона для кремния n -типа ($n_0 = 10^{11} \text{ см}^{-3}$, $Q = 10^{19} \text{ см}^{-3} \text{ с}^{-1}$): 1 и 5 при $N_d = 10^{14} \text{ см}^{-3}$; 2 и 6 — $N_d = 10^{15} \text{ см}^{-3}$; 3 и 7 — $N_d = 10^{16} \text{ см}^{-3}$; 4 и 8 — $N_d = 10^{17} \text{ см}^{-3}$

3. Фотопроводимость кремния n -типа, легированного золотом, при возбуждении импульсами света прямоугольной формы

Исследуем изменение времен жизни носителей заряда в кремнии n -типа при возбуждении импульсом света прямоугольной формы и в процессе релаксации концентраций электронов и дырок к равновесным состояниям. Степень заполнения акцепторных и донорных центров электронами (f_a^- , f_d^0) у полупроводника, для которого выполняется условие $N_a > N_d$, изменяется при освещении существенно. Функция f_d^0 увеличивается, f_a^- — уменьшается. Стационарные времена жизни (τ_{nq} и τ_{pq}) представлены в табл. 1. При снятии возбуждения значения функций f_a^- и f_d^0 релаксируют к равновесному состоянию. Времена жизни носителей заряда τ_n и τ_p при этом увеличиваются (рис. 3). При $f_a^- \approx f_{a0}^-$ и $f_d^0 \approx f_{d0}^0$ они достигают постоянных значений τ_{n0} и τ_{p0} , причем $\tau_{n0} \gg \tau_{nq}$, $\tau_{p0} \gg \tau_{pq}$. Уменьшение концентрации дырок при $p > 6 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-3}$ связано с их захватом акцепторными центрами с последующей рекомбинацией с электронами, захваченными из зоны проводимости. Рекомбинация электронов осуществляется через акцепторные центры, причем рекомбинация через акцепторы R_{na} на два порядка превышает общий темп рекомбинации электронов R_n . Это обусловлено эмиссией электронов с донорных центров в зону проводимости. Вследствие эмиссии время жизни электронов возрастает

ет на несколько порядков в течение малого интервала времени (рис. 3). На кривых затухания $n = n(t)$ и $p = p(t)$ наблюдается область быстрого уменьшения концентраций электронов и дырок (рис. 4). Эта область характеризуется временами жизни, изменяющимися от τ_{nq} и τ_{pq} до τ_{n0} и τ_{p0} за время Δt_n и Δt_p соответственно (табл. 1). Значения Δt_n и Δt_p уменьшаются с уменьшением величины темновой концентрации электронов и слабо зависят от величины темпа генерации. Это объясняется тем, что равновесные концентрации n_0 влияют на равновесные функции f_{a0}^- , f_d^0 , на стационарные значения функций f_a^- , f_d^0 , а следовательно, и на скорость их изменения при наличии и снятии фотовозбуждения. Функция f_a^- , в свою очередь, определяет темп рекомбинации электронов $R_{na}(t)$ и дырок $R_{pa}(t)$, а f_d^0 – эмиссию электронов в зону проводимости.

Таблица 1

Влияние темпа генерации и темновой концентрации электронов на времена жизни электронов и дырок (τ_{nq} , τ_{pq} , τ_{n0} , τ_{p0})

N_d, N_a , см^{-3}	g , $\text{см}^{-3}\text{с}$	n_0 , см^{-3}	τ_{nq} , с	τ_{pq} , с	τ_{n0} , с	τ_{p0} , с	Δt_n , с	Δt_p , с
$N_a=6 \cdot 10^{16}$ $N_d=10^{15}$	$10^{16} \ 10^{20}$	$\sim 3 \cdot 10^{10}$	$\sim 10^{-8}$	$\sim 5 \cdot 10^{-10}$	$\sim 8 \cdot 10^{-7}$	$\sim 8 \cdot 10^{-7}$	$\sim 10^{-6}$	$\sim 10^{-10}$
		$\sim 10^{11}$	$\sim 3 \cdot 10^{-8}$	$\sim 2 \cdot 10^{-10}$	$\sim 2 \cdot 10^{-6}$	$\sim 2 \cdot 10^{-6}$	$\sim 5 \cdot 10^{-6}$	$\sim 6 \cdot 10^{-10}$
		$\sim 10^{12}$	$\sim 5 \cdot 10^{-7}$	$\sim 2 \cdot 10^{-10}$	$\sim 10^{-5}$	$\sim 10^{-5}$	$\sim 2 \cdot 10^{-5}$	$\sim 8 \cdot 10^{-10}$
$N_d=6 \cdot 10^{16}$ $N_a=10^{15}$	10^{20}	$\sim 10^{11}$	$\sim 6 \cdot 10^{-9}$	$\sim 4 \cdot 10^{-8}$	$\sim 2 \cdot 10^{-3}$	$\sim 2 \cdot 10^{-3}$	$\sim 3 \cdot 10^{-3}$	$\sim 2 \cdot 10^{-7}$
	10^{18}		$\sim 2 \cdot 10^{-7}$	$\sim 2 \cdot 10^{-8}$			$\sim 4 \cdot 10^{-3}$	$\sim 8 \cdot 10^{-4}$
	10^{16}		$\sim 3 \cdot 10^{-7}$	$\sim 10^{-8}$			$\sim 5 \cdot 10^{-3}$	$\sim 4 \cdot 10^{-3}$

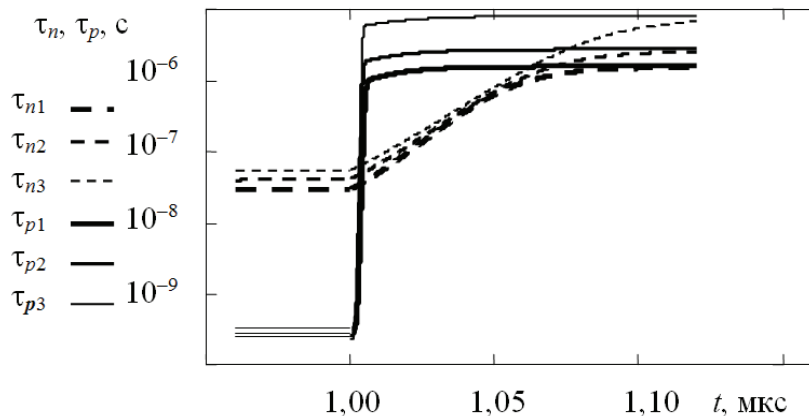


Рис. 3. Зависимости времен жизни избыточных носителей заряда от времени при фотовозбуждении зона-зона ($N_a=4 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$, $N_d=10^{15} \text{ см}^{-3}$, $Q=10^{20} \text{ см}^{-3}\text{с}^{-1}$):
1 и 4 – $n_0=4 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-3}$; 2 и 5 – $n_0=10^{11} \text{ см}^{-3}$; 3 и 6 – $n_0=4 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-3}$

Для полупроводника, в котором концентрация донорных центров превышает концентрацию акцепторов $N_a < N_d$, времена жизни носителей заряда τ_{nq} и τ_{pq} существенно зависят от темпа генерации (табл. 1). С увеличением g величины τ_{nq} и τ_{pq} уменьшаются. Для объяснения кинетики носителей заряда был проведен анализ зависимостей $R_n = R_n(t)$, $R_p = R_p(t)$, $R_{ap} = R_{ap}(t)$, $R_{nd} = R_{nd}(t)$, $R_{pd} = R_{pd}(t)$, $R_{na} = R_{na}(t)$, $R_{pa} = R_{pa}(t)$, $f_a = f_a(t)$, $f_d = f_d(t)$. При освещении через

время $\tau \sim 5 \cdot 10^{-5}$ с концентрации избыточных носителей заряда функции f_a^- и f_d^0 принимают значения, соответствующие стационарным. Происходит существенное изменение функций f_a^- и f_d^0 ; акцепторные центры захватывают дырки, донорные – электроны. В частности, для полупроводника с параметрами $N_d = 6 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$, $N_a = 10^{15} \text{ см}^{-3}$, $n_0 = 4 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-3}$, $N_t = 5,84 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ при $g = 10^{20} \text{ см}^{-3}\text{с}^{-1}$ получено: $f_{a0}^- = 0,96$, $f_{d0}^0 = 1,0 \cdot 10^{-2}$, $f_a^- = 8,6 \cdot 10^{-3}$, $f_d^0 = 2,6 \cdot 10^{-2}$. При фотовозбуждении необходимо учитывать рекомбинацию носителей заряда как через акцепторные, так и через донорные центры. При снятии внешнего возбуждения эмиссия электронов с донорных центров существенно изменяет времена жизни электронов и дырок: τ_n и τ_p увеличиваются на несколько порядков (табл. 1). При концентрациях электронов $n < n_{1d}$ влияние эмиссии является преобладающим. Рекомбинация дырок происходит в основном через донорные центры.

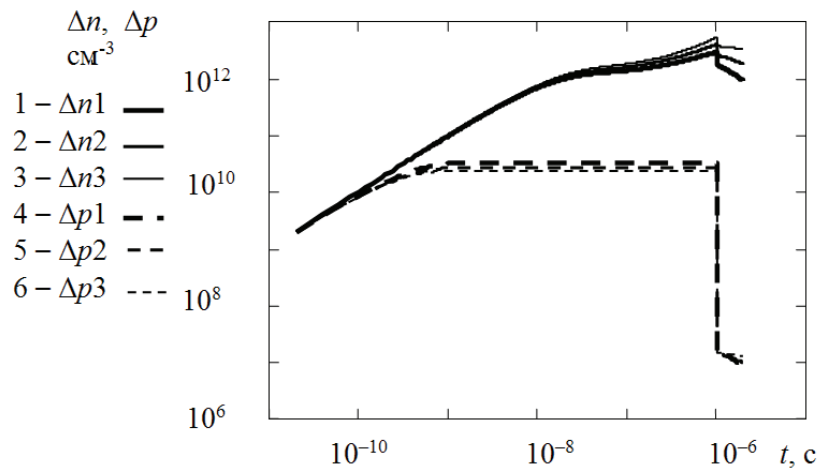


Рис. 4. Зависимости концентраций избыточных носителей заряда от времени при фотовозбуждении зона-зона ($N_a = 4 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$, $N_d = 10^{15} \text{ см}^{-3}$, $Q = 10^{20} \text{ см}^{-3}\text{с}^{-1}$):
1 и 4 – $n_0 = 4 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-3}$; 2 и 5 – $n_0 = 10^{11} \text{ см}^{-3}$; 3 и 6 – $n_0 = 4 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-3}$

Заключение

Таким образом, можно утверждать, что времена жизни носителей заряда и кинетика концентраций избыточных носителей заряда определяются не только концентрациями рекомбинационных центров N_d и N_a , но и равновесными концентрациями электронов и дырок. При заданных концентрациях рекомбинационных центров путем выбора равновесных концентраций электронов и дырок можно существенно изменить чувствительность полупроводника к свету и времена жизни носителей заряда. Эмиссия электронов, захваченных глубокими донорными центрами при освещении, увеличивает времена жизни носителей заряда при переходе к равновесному состоянию на несколько порядков (при снятии внешнего возбуждения полупроводника светом). Это приводит к наличию на релаксационных кривых концентраций электронов и дырок участков «быстрого» и «медленного спада». Участок «быстрого спада» определяет быстродействие фоторезистора при возбуждении импульсами света, имеющими высокие частоты.

Список литературы

1. **Lang, D. V.** Complex nature of gold-related deep levels in silicon / D. V. Lang, H. G. Grimmeiss, E. Meijer and M. Jaros // Phys. Rev. – 1980. – В. 22. – Р. 3917–3925.
2. **Холоднов, В. Ф.** Характер зависимости времен жизни электронов и дырок от концентрации основной рекомбинационной примеси при наличии побочных центров захвата носителей / В. Ф. Холоднов, П. С. Серебряков // Письма в ЖТФ. – 1997. – Т. 23 (24). – С. 58–63.
3. **Каражанов, С. Ж.** Свойства точно компенсированных полупроводников / С. Ж. Каражанов // ФТП. – 2000. – Т. 34 (8). – С. 909–916.
4. **Яшин, А. Н.** Применимость упрощенной модели Шокли – Рида – Холла для полупроводников с различными видами дефектов / А. Н. Яшин // ФТП. – 2005. – Т. 35 (11). – С. 1332–1335.
5. **Савченко, А. В.** Квадратичная рекомбинация в кремнии и ее влияние на объемное время жизни / А. В. Савченко, А. П. Горбань, В. П. Костылев, И. О. Соколовский // ФТП. – 2007. – Т. 41 (3) – С. 290–294.
6. **Бородовский, П. А.** Аномальная релаксация фотопроводимости в кремнии при высоких уровнях инжекции / П. А. Бородовский, А. Ф. Булдыгин, С. В. Голод // ФТП. – 2009. – Т. 43 (3). – С. 329–331.
7. **Кирюхин, А. Д.** Форма сигналов нестационарной проводимости в кремнии, легированном золотом или серой / А. Д. Кирюхин, В. В. Григорьев, А. В. Зуев, В. В. Зуев, Н. А. Королев // ФТП. – 2007. – Т. 41 (3). – С. 269–272.
8. **Милнс, А.** Примеси с глубокими уровнями в полупроводниках / А. Милнс. – М.: Мир, 1977. – 568 с.
9. **Баграев, Н. Т.** Туннельные центры с отрицательным U и фотостимулированные реакции в полупроводниках / П. А. Бородовский, А. Ф. Булдыгин, С. В. Голод // Письма в ЖЭТФ. – 1984. – Т. 39(5). – С. 211–213.

Горюнов Владимир Александрович

доктор физико-математических наук,
профессор, кафедра экспериментальной
физики, Мордовский государственный
университет им. Н. П. Огарева
(г. Саранск)

E-mail: gorval1934@mail.ru

Goryunov Vladimir Alexandrovich

Doctor of physical and mathematical
sciences, professor, sub-department
of experimental physics, Mordovia
State University named
after N. P. Ogarev (Saransk)

Гришаев Владимир Яковлевич

кандидат физико-математических наук,
доцент, кафедра экспериментальной
физики, Мордовский государственный
университет им. Н. П. Огарева
(г. Саранск)

E-mail: grishaev53@mail.ru

Grishaev Vladimir Yakovlevich

Candidate of physico-mathematical sciences
associate professor, Sub-department
of experimental physics, Mordovia State
University named after N. P. Ogarev

Никишин Евгений Васильевич

кандидат физико-математических наук,
доцент, кафедра экспериментальной
физики, Мордовский государственный
университет им. Н. П. Огарева
(г. Саранск)

E-mail: nikishin57@mail.ru

Nikishin Evgeny Vasilyevich

Candidate of physico-mathematical sciences
associate professor, Sub-department
of experimental physics, Mordovia State
University named after N. P. Ogarev

УДК 621.315.592

Горюнов, В. А.

Об изменении времен жизни носителей заряда при импульсном фотовозбуждении в кремнии с глубокими примесными центрами / В. А. Горюнов, В. Я. Гришаев, Е. В. Никишин // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Физико-математические науки. – 2011. – № 4 (20). – С. 119–126.