

УДК 621.315.592

## Использование кремния легированного золотом для определения формы оптического сигнала

© С. М. Мурюмин<sup>1</sup>, А. Е. Никишина<sup>2</sup>, Е. В. Никишин<sup>3</sup>

**Аннотация.** В статье приведены результаты численных исследований кинетики фотопроводимости при возбуждении полупроводника высокочастотными импульсами света произвольной формы. Кинетика фотопроводимости при выполнении условий  $\tau_j \omega \gg 1$  определяется зависимостью величины темпа генерации от времени и не зависит от времен жизни электронов и дырок. Это позволяет восстановить временную форму высокочастотного импульса света

**Ключевые слова:** Кинетика фотопроводимости, рекомбинационные центры, времена жизни электронов и дырок, восстановление сигналов

В работах [1, 2] исследована возможность восстановления зависимости интенсивности возбуждающего света от времени при освещении полупроводникового фотоприемника светом, интенсивность  $J$  которого меняется периодически с частотой  $\omega$  ( $J = J(\omega t)$ ). Необходимым условием является большая частота изменения интенсивности света  $\omega$ , а именно:  $\omega \gg \max(\tau_n^{-1}, \tau_p^{-1})$ . Моделирование было проведено для кремния легированного индием, через который при рассматриваемых уровнях инжекции осуществляется рекомбинация неравновесных носителей заряда.

В данной работе показано, что предложенный метод может быть осуществлен и при использовании фотоприемников с более сложными механизмами рекомбинации. При математическом моделировании кинетических процессов мы встречаемся с существенными нелинейностями в уравнениях (1.6) - (1.8). Нами рассмотрен случай рекомбинации электронов  $n$  и дырок  $p$  через глубокие центры, образующиеся при легировании кремния золотом. Золото в кремнии является амфотерной примесью. При рекомбинации через глубокие центры возникает необходимость учитывать их разные зарядовые состояния и разную глубину залегания в запрещенной зоне. Золото формирует донорный ( $E_v + 0.35$  eV; (0/+)) и акцепторный ( $E_c - 0.55$  eV; (-/0)) глубокие уровни [4], концентрации которых  $N_d$  и  $N_a$  соответственно. В работе [5] показано, что в кремнии  $n$ -типа за эти уровни отвечают разные центры. При освещении будет изменяться функция  $f_j$ , определяющая вероятность нахождения на  $j$  центре электрона. При этом изменяется скорость рекомбинации неравновесных носителей; может происходить высвобождение электронов и дырок

<sup>1</sup> Доцент кафедры прикладной математики, Мордовский государственный университет имени Н. П. Огарева, г. Саранск.

<sup>2</sup> Аспирант кафедры прикладной математики, Мордовский государственный университет имени Н. П. Огарева, г. Саранск; annikishina@yandex.ru.

<sup>3</sup> Доцент кафедры экспериментальной физики, Мордовский государственный университет имени Н. П. Огарева, г. Саранск; nikishin57@mail.ru.

с глубоких центров.

Исследовались кинетические уравнения:

$$\begin{aligned} \frac{dn}{dt} = & g(\omega t) - N_a \sigma_{na} (n(1 - f_a^-) - n_{1a} f_a^-) - \\ & - N_d \sigma_{nd} (n(1 - f_d^0) - n_{1d} f_d^0) - N_d \sigma_{nd}^m (n f_d^0 - n_{1d} f_d^-) - \\ & - A(np - n_i^2) - B_n n(np - n_i^2) - B_p p(np - n_i^2) \end{aligned} \quad (1.1)$$

$$\begin{aligned} \frac{dp}{dt} = & g(\omega t) - N_a \sigma_{pa} (p f_a^- - p_{1a} (1 - f_a^-)) - \\ & - N_d \sigma_{pd} (p f_d^0 - p_{1d} (1 - f_d^0)) - N_d \sigma_{pd}^m p f_d^- - \\ & A(np - n_i^2) - B_n n(np - n_i^2) - B_p p(np - n_i^2) \end{aligned} \quad (1.2)$$

здесь  $g(\omega t)$  - темп генерации носителей заряда;  $n_{1j}$  и  $p_{1j}$  численно равны концентрации электронов и дырок, когда уровень Ферми совпадает с уровнем ловушки;  $N_j$  - концентрация примесных центров  $j$  - типа;  $\sigma_{nj}$  и  $\sigma_{pj}$  - вероятности захвата электронов и дырок примесными центрами;  $A$  - коэффициент межзонной рекомбинации;  $B_n$ ,  $B_p$  - коэффициенты Оже-рекомбинации. Темп генерации связан с интенсивностью:

$$g(\omega \cdot t) = k \cdot \beta \cdot (1 - R) \cdot J(\omega \cdot t) \quad (1.3)$$

$\beta$  - квантовый выход;  $k$  и  $R$  - коэффициенты поглощения и отражения света соответственно. В соотношении (1.1) первое слагаемое правой части описывает скорость межзонной генерации электронов при возбуждении полупроводника светом, интенсивность которого периодически меняется периодическими: второе и третье слагаемые описывают изменение концентрации электронов в зоне проводимости, обусловленное акцепторными и донорными центрами, соответственно. Четвертое слагаемое соответствует медленной реакции захвата электронов незаряженными донорными центрами. Учет данного механизма рекомбинации необходим при длительном возбуждении полупроводника светом. Пятое, шестое и седьмое слагаемые описывают межзонную рекомбинацию и межзонную Оже-рекомбинацию, роль которых становится существенной при больших уровнях возбуждения. Аналогичные слагаемые для дырок присутствуют в уравнении (1.2).

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

$$\frac{df_a^-}{dt} = \sigma_{na} (n(1 - f_a^-) - n_{1a} f_a^-) - \sigma_{pa} (p f_a^- - p_{1a} (1 - f_a^-)), \quad (1.4)$$

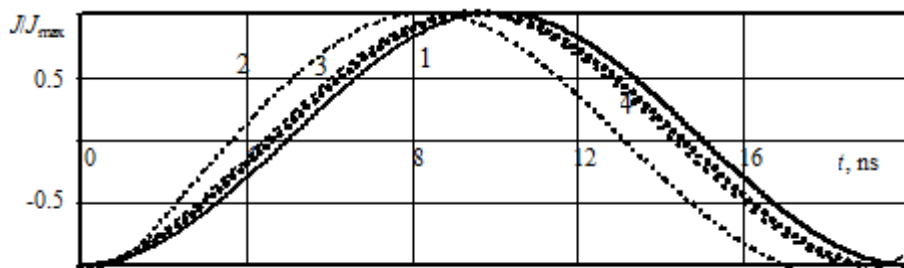
$$\begin{aligned} \frac{df_d^0}{dt} = & \sigma_{nd} (n(1 - f_d^0) - n_{1d} f_d^0) - \sigma_{pd} (p f_d^0 - p_{1d} (1 - f_d^0)) - \\ & - \sigma_{nd}^m (n f_d^0 - n_{1d} f_d^-) + \sigma_{pd}^m p f_d^- \end{aligned} \quad (1.5)$$

$$\frac{df_d^-}{dt} = \sigma_{nd}^m (n f_d^0 - n_{1d} f_d^-) - \sigma_{pd}^m p f_d^- \quad (1.6)$$

Восстановление вида функции оптического сигнала осуществлялось по методике, описанной в работах [1, 2]. При больших частотах производная от проводимости пропорциональна переменной составляющей интенсивности света  $\tilde{J}(\omega \cdot t)$ , падающего на фоторезистор [1]:

$$\frac{d}{dt} j(\omega \cdot t) \approx e \cdot k \cdot \beta \cdot (1 - R) \cdot \tilde{J}(\omega \cdot t) \cdot (\mu_n + \mu_p) \cdot E, \quad (1.7)$$

Интенсивность падающего света представлена в виде  $J(\omega \cdot t) = \langle J \rangle + \tilde{J}(\omega \cdot t)$ , здесь  $\langle J \rangle = \frac{1}{T} \int_t^{t+T} J(\omega \cdot t) dt$  – среднее значение интенсивности света за период  $T$ . Уравнения (1.1) - (1.7) анализировались численными методами. На рис. 1 представлены зависимости восстановленного по зависимости силы тока от времени оптического сигнала (кривые 2 - 5). Кривая 1 соответствует темпу генерации  $g(\omega t)$ , представленному в относительных единицах, величина которого  $g(\omega t) = 1020(1 - \cos(\omega t))$ . Концентрация донорных центров золота  $Nd = 1015 \text{ см}^{-3}$ , концентрация равновесных электронов  $n = 109 \text{ см}^{-3}$ . Для кривой 2 концентрация акцепторных центров золота равна  $Na = 1017 \text{ см}^{-3}$ , для кривой 3 –  $Na = 1016 \text{ см}^{-3}$ , для кривой 4 –  $Na = 1015 \text{ см}^{-3}$ , для кривой 5 –  $Na = 1014 \text{ см}^{-3}$ .



Р и с у н о к 1.1

Рис.1 Зависимости интенсивности света от времени: 1 - возбуждающий импульс; 2 - 4 - импульсы, восстановленные по зависимостям тока от времени

Область применимости предложенного метода характеризуется коэффициентом нелинейных искажений, величина которого рассчитывается по формулам:

$$K = \frac{1}{|c_1|} \sqrt{\sum_i |c_k|^2}, c_k = \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} i'_t(\tau) \cdot e^{-i \cdot k \cdot \omega \cdot \tau} d\tau, \quad (1.8)$$

Для кривой 2  $K = 0.10$ , что недопустимо много; для кривой 3 и 4  $K = 0.0084$  и  $K = 0.0047$  соответственно, что приводит к незначительным искажениям.

Анализ показывает, что для кривых 3 и 4 справедливы неравенства  $\tau_n\omega > 1$  и  $\tau_p\omega > 1$ , для кривой 1 выполняются соотношения  $\tau_n\omega \approx 1$  и  $\tau_p\omega \approx 1$ .

Таким образом, усложнение рекомбинационных процессов неравновесных носителей заряда в фоторезисторе принципиально не изменяет правило выбора частотных границ применимости метода восстановления формы оптического сигнала, предложенного в работах 1, 2.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Горюнов В.А., Гришаев В.Я., Никишин Е.В., “Кинетика фотопроводимости при возбуждении высокочастотными импульсами”, *Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Физико-математические науки.*, 2012, № 4, 242 - 250.
2. Гришаев В.Я., Никишин Е.В., Пескова Е.Е., “Способ восстановления формы оптических сигналов с длительностью меньшей постоянной времени фотоприемника”, *Труды первой Российско-Белорусской научно-технической конф. (Нижний Новгород, Россия).*, **1** (2013), 42 - 45.
3. Милнс А., *Примеси с глубокими уровнями в полупроводниках*, Мир, М., 1977, 568 с.
4. Lang D.V., H.G. Grimmeiss H.G., Meijer E., Jaros M., “Complex nature of gold-related deep levels in silicon”, *Phys. Rev.*, **22** (1980), 3917 - 3925.
5. Каражанов С. Ж., “Свойства точно компенсированных полупроводников”, *ФТП*, **34(8)** (2000), 909 - 916.
6. Савченко А.В., Горбань А.П., Костылев В.П., Соколовский И.О., “Квадратичная рекомбинация в кремнии и ее влияние на объемное время жизни”, *ФТП*, **41(3)** (2007), 290 - 294.
7. Денисов Б.Н., Никишин Е.В., “Исследования кинетики неравновесных носителей в полупроводнике по среднему значению фотопроводимости при периодическом оптическом возбуждении”, *ФТП*, **48:52** (2014), 175 - 178.

## The use of silicon alloyed with gold, to determine the shape of the optical signal

© S.M. Murjumin<sup>4</sup>, A.E. Nikishina<sup>5</sup>, E.V. Nikishin<sup>6</sup>

**Abstract.** In the article the results of numerical investigations of photoconductivity kinetics under the excitation of semiconductor by high-frequency pulses of arbitrary-shaped light are presented. The kinetics of photoconductivity under the conditions  $\tau_j\omega \gg 1$  is determined by the dependency of the value of the generate rate on time. It does not depend on the lifetimes of electrons and holes. It allows to reconstruct the time waveform of high-frequency pulse of light

**Key Words:** Photoconductivity kinetics, recombination centers, lifetimes of electrons and holes, signal reconstruction

---

<sup>4</sup> Associate professor of Applied Mathematics Chair, Mordovian State University after N.P.Ogarev, Saransk.

<sup>5</sup> Graduate student of Applied Mathematics Chair, Mordovian State University after N.P.Ogarev, Saransk; annikishina@yandex.ru.

<sup>6</sup> Associate professor of Experimental Physics Chair, Mordovian State University after N.P.Ogarev, Saransk; nikishin57@mail.ru.