

УДК 621.383.4, 621.382.2/.3

**ВОССТАНОВЛЕНИЕ ВРЕМЕННОЙ ЗАВИСИМОСТИ
ИНТЕНСИВНОСТИ СВЕТА, ЧАСТОТА МОДУЛЯЦИИ КОТОРОЙ
БОЛЬШЕ ГРАНИЧНОЙ ЧАСТОТЫ ФОТОПРИЕМНИКА,
ИЗГОТОВЛЕННОГО НА ОСНОВЕ КРЕМНИЯ С ГЛУБОКИМИ
РЕКОМБИНАЦИОННЫМИ ЦЕНТРАМИ**

Е. В. Никишин, С. В. Базеев, В. О. Пиксайкина

**Национальный исследовательский Мордовский государственный университет
им. Н. П. Огарёва, 430005, Саранск, ул. Большевикская, 68**

Статья поступила в редакцию 24 января 2018 г.

Аннотация. Получена область частот, для которой справедлив способ восстановления зависимости интенсивности возбуждающих систему импульсов от времени по отклику системы. Исследован случай модулированных оптических импульсов, частота которых больше граничной частоты фоторезистора. Форма, частота и интенсивность импульсов изменяются произвольным образом. Моделирование проведено для фоторезистора, параметры которого характерны для кристаллического кремния. При расчетах учтена рекомбинация через глубокие примесные центры, Оже-рекомбинация и межзонная рекомбинация.

Ключевые слова: высокочастотное импульсное возбуждение, механизмы рекомбинации, кинетика фотопроводимости, частотные искажения, нелинейные искажения, фазовые искажения, восстановление импульса.

Abstract. At high light intensity modulation frequencies, the photodetector measures the integral energy of the pulsed radiation. In this case, the photoconductivity kinetics depends mainly on the rate of generation of charge carriers. Mechanisms of recombination of electrons and holes have little effect on the photocurrent. The article defines the conditions under which a photoresistor can be used to reconstruct the time shape of an optical signal. The shape, frequency and intensity of the pulses vary in an arbitrary way. The method of reconstructing the shape of an optical signal is applicable if the intensity varies with frequency ω more than the inverse lifetime of

the main charge carriers. That is, the frequency of the modulated optical pulses is higher than the limit frequency of the photodetector. The dependence of the light intensity on time is obtained from the dependence of the current strength on time. Parameters characteristic of a photodetector fabricated on the basis of Si with In, Ag and Au recombination centers are used in the calculations. Theoretical studies of distortions emerging upon the detection of modulated optical signals are performed. A region of frequencies is obtained for which the method of obtaining the dependence of the intensity of the exciting pulses on time is applicable. Increasing the modulation frequency reduces the magnitude of nonlinear, frequency and phase distortion.

Keywords: impulse excitation, mechanisms of recombination, kinetics of photoconductivity, linear distortion, nonlinear distortion, phase distortion, pulse recovery.

1. Введение

Для квазистационарного режима, когда свойствами инерции резистора можно пренебречь, зависимость фототока ($j(t)$) и интенсивности возбуждающего излучения от времени ($J(t)$), как правило, описываются одинаковыми функциями. Кроме того, необходима линейность функции скорости рекомбинации электронов ($R(n)$) и дырок ($R(p)$): $R(n) = (n-n_0/\tau_n)$, $R(p) = (p-p_0/\tau_p)$. Здесь n и p – неравновесные концентрации, n_0 и p_0 – равновесные концентрации, τ_n и τ_p – времена жизни электронов и дырок соответственно.

При увеличении частоты или сложном виде закона рекомбинации зависимость интенсивности возбуждающего света от времени отличается от временной зависимости фототока вне зависимости от вида функции скорости рекомбинации. Кинетика фотопроводимости определяется темпом генерации и механизмами рекомбинации электронов и дырок.

При дальнейшем увеличении частоты, когда частота модуляции интенсивности света, возбуждающего фоторезистор, больше граничной частоты фоторезистора ($\omega\tau > 1$) зависимость интенсивности возбуждающего

света от времени также отличается от временной зависимости фототока. В этом случае фотоприемник измеряет интегральную энергию импульсного излучения [1 – 2]. Кинетика фотопроводимости будет зависеть в основном от темпа генерации и в малой степени зависит от механизмов рекомбинации электронов и дырок [2, 3].

2. Постановка задачи

В представленной ниже работе исследована возможность применения фоторезисторов на основе кремния с различными рекомбинационными примесями в качестве скоростных фотоприемников высокочастотного импульсного излучения (до 10 ГГц).

Кинетика фотопроводимости в полупроводниках с примесными центрами при фотовозбуждении описываются следующими кинетическими уравнениями [4 – 6]:

$$\frac{dn}{dt} = g(\omega t) - R_n(n, p), \quad (1)$$

$$\frac{dp}{dt} = g(\omega t) - R_p(n, p), \quad (2)$$

$$\frac{df_j}{dt} = c_{nj}(n(1 - f_j) - n_{1j}f_j) - c_{pj}(pf_j - p_{1j}(1 - f_j)). \quad (3)$$

$$j = e(\mu_n n + \mu_p p)E. \quad (4)$$

Здесь:

$$R_n(n, p) = A(pn - n_i^2) + B_n n(np - n_i^2) + B_p p(np - n_i^2) + \sum_j [N_j c_{nj}(n(1 - f_j) - n_{1j}f_j)],$$

$$R_p(n, p) = A(pn - n_i^2) + B_n n(np - n_i^2) + B_p p(np - n_i^2) + \sum_j [N_j c_{pj}(pf_j - p_{1j}(1 - f_j))],$$

n_{1j} и p_{1j} - параметры, определяющиеся положением примесных центров j – типа с концентрацией N_j в запрещенной зоне; c_{nj} и c_{pj} – скорости захвата электронов и дырок примесными центрами; f_j – вероятность нахождения на примесном центре электрона; A – коэффициент межзонной рекомбинации; B_n , B_p – коэффициенты Оже-рекомбинации.

3. Искажения, возникающие при использовании фоторезистора, изготовленного на основе кристаллического кремния, легированного индием и золотом

Представленная выше математическая модель использована для расчета тока, возникающего в фотодатчиках с параметрами, характерными для кристаллического кремния, с рекомбинационными центрами индия и золота. Цель исследования: определение области частот, в которых возможно восстановление зависимости интенсивности света от времени $J=f(\omega t)$ по зависимости фототока от времени $j=\varphi(\omega t)$ и оценка искажений, возникающих в этой области частот. Золото – хорошо изученная амфотерная примесь в кремнии. Она образует в запрещенной зоне глубокие уровни: донорный ($E_v + 0.35$ эВ; (0/+)) и акцепторный ($E_c - 0.55$ эВ; (-/0)) [4, 7], концентрации которых N_d и N_a соответственно. В кремнии n-типа за эти уровни отвечают разные центры. В частности, акцепторный уровень является следствием образования пар с мелкими донорами. Скорости захвата электронов и дырок соответственно равны: $c_{na}= 1,65*10^{-9}$ см³с⁻¹, $c_{pa}= 1,15*10^{-7}$ см³с⁻¹, $c_{nd}=6,3*10^{-8}$ см³с⁻¹, $c_{pd}= 2,40*10^{-8}$ см³с⁻¹ [4]. При моделировании использованы параметры уровней, соответствующие донорным ($E_v + 0.35$ эВ; (0/+)) центрам золота. Индий в кремнии является моноэнергетическим акцепторным центром. глубина залегания которого отсчитанная от края валентной зоны равна 0,156 эВ ($E_v+0,156$ эВ; (-/0)) [4]. Скорости захвата электронов и дырок через примесный центр индия оценивались по данным, приведенным в [4].

Ввиду многообразия и сложности механизмов рекомбинации (в частности, при освещении будет изменяться вероятность нахождения на j центре электрона f_j , как следствие изменяется скорость рекомбинации неравновесных носителей; может происходить высвобождение электронов и дырок с глубоких центров). Анализ системы нелинейных дифференциальных уравнений проведен численными методами. Это позволило выявить следующие особенности. Если концентрация рекомбинационных центров золота менее чем на порядок превышает концентрацию центров индия, рабочая

область частот, в которой применим способ восстановления оптического сигнала определяется, в основном, концентрацией центров индия. Предельная величина растворимости золота в виде электрически активных центров составляют величину около 10^{17} см⁻³ [4]. Если $N_{In} = 10^{16} - 10^{17}$ см⁻³ способ восстановления применим при частотах $\omega > \omega_{min}$, $\omega_{min} = 2$ МГц. При этом выполняется условие $\max(\omega\tau_n, \omega\tau_p) > 1$. Уменьшения глубины модуляции (M) с увеличением частоты в области исследуемых концентраций рекомбинационных центров индия и золота приводит к ограничению максимальной частоты. Для расчета M использовалось соотношение $M = (j_{max} - j_{min}) / (j_{max} + j_{min})$. Способ восстановления может применяться до частот не менее 100 МГц ($\omega_{max} \approx 100$ МГц).

Для оценки линейных (частотных) искажений рассчитывался коэффициент $Y(\omega_i)$, равный отношению амплитуды восстановленного сигнала для фиксированной частоты $j'_t(\omega_i)$ к максимальной амплитуде восстановленного сигнала $\max(j'_t)$ в рабочей области частот ω :

$$Y(\omega_i) = \max |j'_t(\omega_i \cdot t)| / \max [j'_t(\omega \cdot t)], \quad \omega_i \in [\omega_{min}, \omega_{max}] \quad (5)$$

Частотные искажения при $\omega > \omega_{min}$ составляют величину менее 5% (рис. 1); сдвиг фаз между возбуждающим импульсом света и восстановленным импульсом составляет величину не более 0,04 рад (рис. 2).

Если концентрация рекомбинационных центров золота более чем на порядок превышает концентрацию центров индия ($N_{Ag} > 10N_{In}$), использовать фоторезистор для восстановления временной зависимости оптического импульса не представляется возможным из-за существенных нелинейных, частотных и фазовых искажений.

На рис. 3 представлены зависимости коэффициента нелинейных искажений от частоты при различных значениях концентраций центров индия. Коэффициент нелинейных искажений – один из наиболее важных параметров, отвечающих за качество восстановленных импульсов [8]. Он формирует представление о гармониках, появившихся в результате возбуждения

фотоприёмника импульсами, переменная составляющая которых подчиняется гармоническому закону.

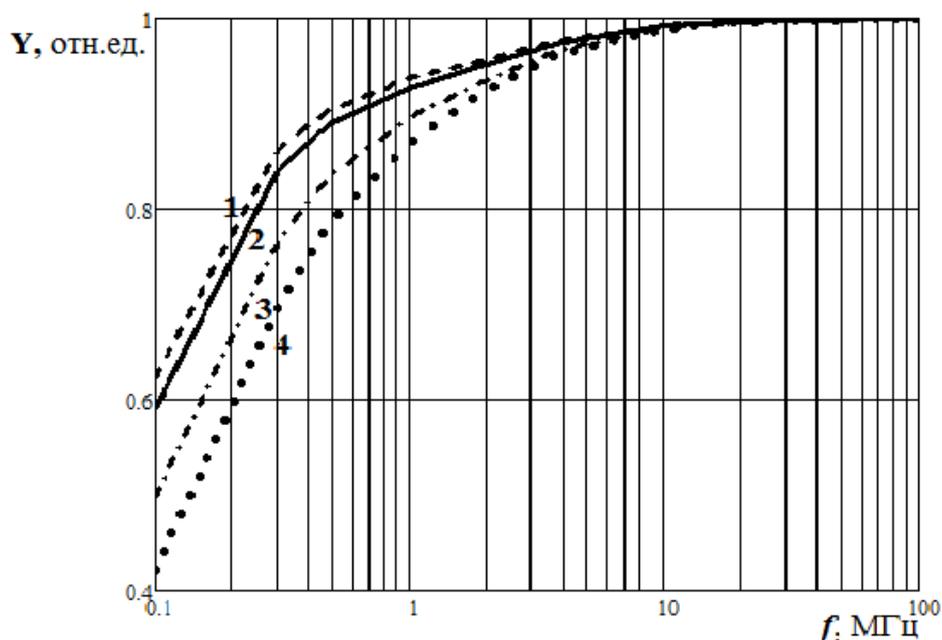


Рис.1. Зависимость коэффициента частотных искажений оптического сигнала, от частоты следования гармонических импульсов света:
 $N_{Au} = 10^{17} \text{ см}^{-3}$. 1 – $N_{In} = 10^{17} \text{ см}^{-3}$, 2 – $N_{In} = 8 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$, 3 – $N_{In} = 4 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$,
 4 – $N_{In} = 2 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$.

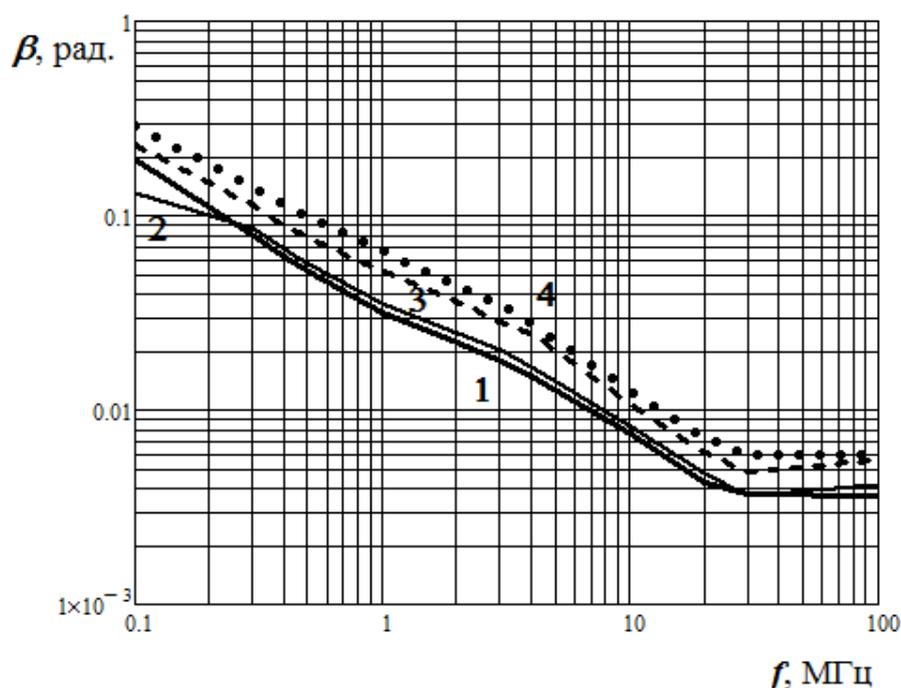


Рис. 2. Зависимость угла сдвига фаз восстановленного сигнала от частоты следования гармонических импульсов света: $N_{Au} = 10^{17} \text{ см}^{-3}$.
 1 – $N_{In} = 10^{17} \text{ см}^{-3}$, 2 – $N_{In} = 8 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$, 3 – $N_{In} = 4 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$, 4 – $N_{In} = 2 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$.

Для расчета коэффициента использовалось соотношение:

$$K = \frac{1}{|c_1|} \sqrt{\sum_i |c_{k+1}|^2}, \text{ здесь } c_k = \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} \frac{dj(\tau)}{d\tau} \cdot e^{-i \cdot k \cdot \omega \cdot \tau} d\tau, \quad (6)$$

здесь $k = 1, 2, 3 \dots$ – номер гармоник.

Наличие двух глубоко лежащих центров рекомбинации приводит к тому, что зависимости $K=K(\nu)$ носят сложный характер; на кривых присутствуют точки перегиба и экстремумы. Величина концентрации донорных центров золота существенно влияют на величину коэффициента нелинейных искажений. При некоторых значениях N_{In} и N_{Au} в диапазоне рабочих частот от 2 МГц до 100 МГц нельзя пренебречь воздействием нелинейных искажений на форму восстановленного импульса (кривая 3, рис3).

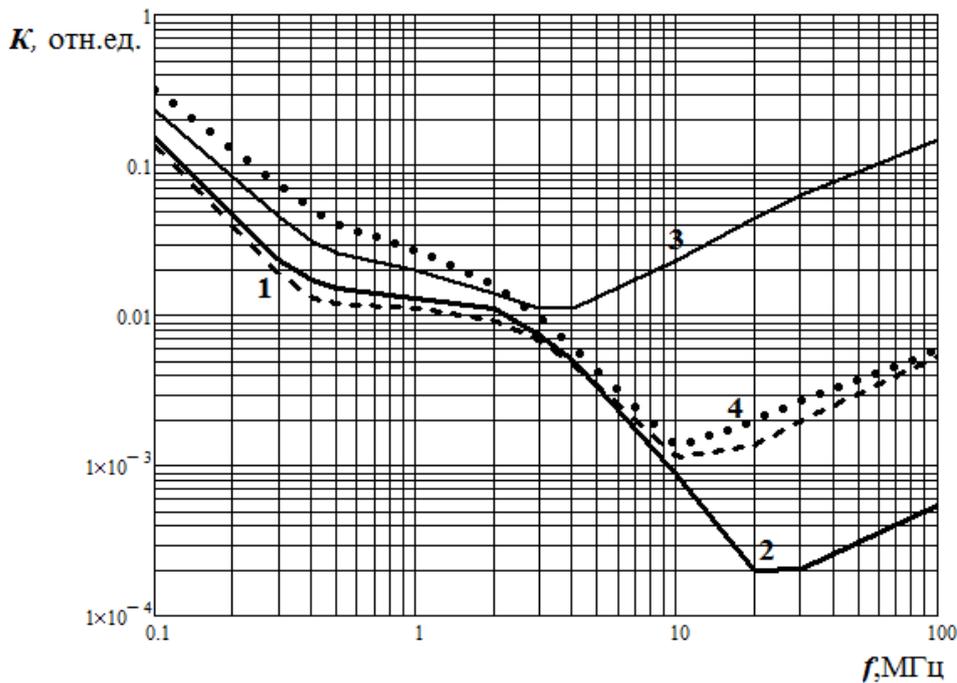


Рис.3. Зависимости коэффициента нелинейных искажений от частоты:
 $N_{Au} = 10^{17} \text{ см}^{-3}$. 1 – $N_{In} = 10^{17} \text{ см}^{-3}$, 2 – $N_{In} = 8 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$, 3 – $N_{In} = 4 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$,
 4 – $N_{In} = 2 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$.

4. Искажения, возникающие при использовании фоторезистора, изготовленного на основе кристаллического кремния, легированного индием и серебром

Также численными методами проведен анализ модели фотодатчика, параметры которого, характерны для кристаллического кремния, с рекомбинационными центрами индия и серебра. Серебро, как и индий, формирует акцепторный уровень ($E_c - 0.29 \text{ eV}$) [4]. Компенсация осуществлялась мелкими примесными центрами (уровни прилипания) не участвующими в процессах рекомбинации и не подверженные перезарядке при фотовозбуждении. Исследования проведены для различных концентраций рекомбинационных центров In и Ag. Показано, что фотодатчик, изготовленный на основе кристаллического кремния, с рекомбинационными центрами индия и серебра, можно использовать для восстановления временной зависимости интенсивности оптических импульсов, частота следования которых лежит в области от 0,1 до 10 МГц. Результаты расчетов приведены на рис. 4 – 6.

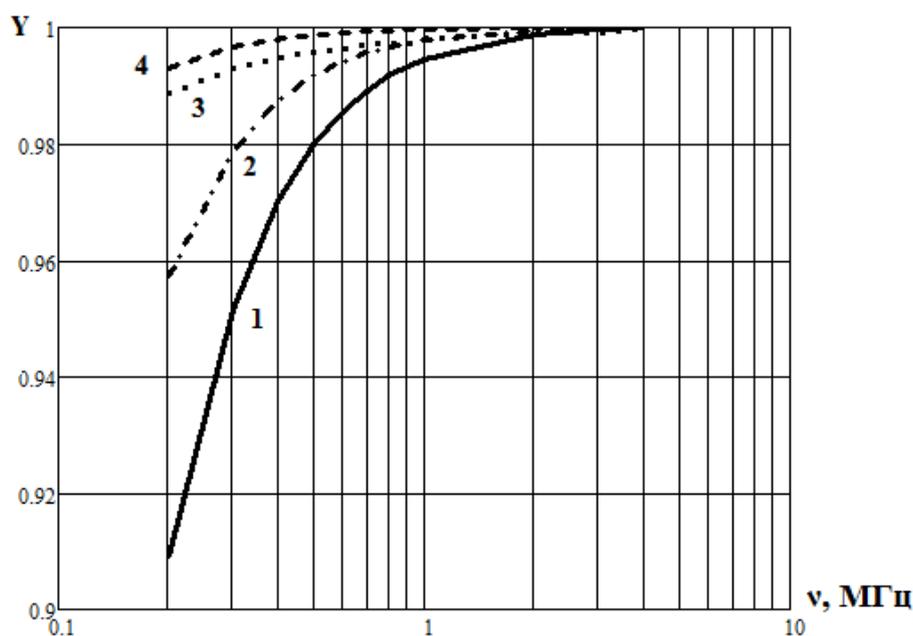


Рис.4. Зависимость коэффициента частотных искажений оптического сигнала, от частоты следования гармонических импульсов света:

$$N_{Au}=10^{17} \text{ см}^{-3}. \quad 1 - N_{In1}=10^{17} \text{ см}^{-3}; \quad 2 - N_{In2}=10^{16} \text{ см}^{-3}; \quad 3 - N_{In3}=10^{15} \text{ см}^{-3}; \\ 4 - N_{In4}=10^{14} \text{ см}^{-3}.$$

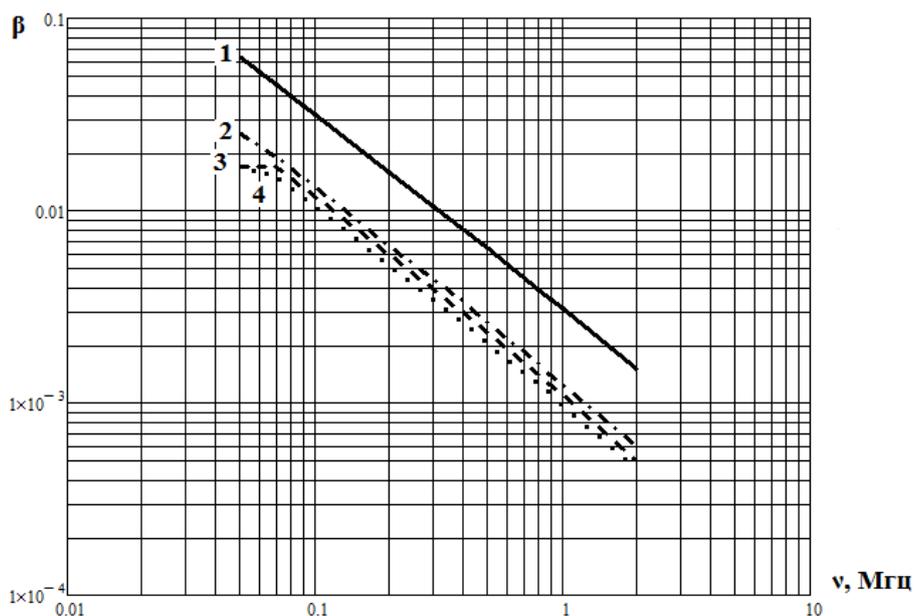


Рис. 5. Зависимость угла сдвига фаз восстановленного сигнала от частоты следования гармонических импульсов света: $N_{In} = 1 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$.
 1 – $N_{Ag1} = 5 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$; 2 – $N_{Ag2} = 10^{16} \text{ см}^{-3}$; 3 – $N_{Ag3} = 5 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$; 4 – $N_{Ag4} = 0 \text{ см}^{-3}$.

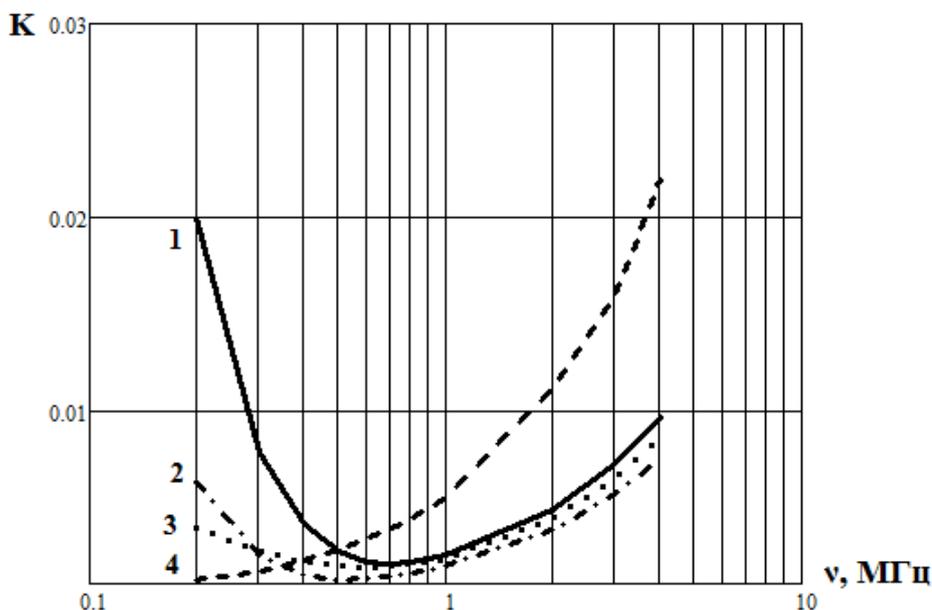


Рис. 6 Зависимость коэффициента частотных искажений оптического сигнала, от частоты следования гармонических импульсов света:
 $N_{Ag} = 10^{17} \text{ см}^{-3}$. 1 – $N_{In1} = 10^{17} \text{ см}^{-3}$; 2 – $N_{In2} = 10^{16} \text{ см}^{-3}$; 3 – $N_{In3} = 10^{15} \text{ см}^{-3}$;
 4 – $N_{In4} = 10^{14} \text{ см}^{-3}$

5. Заключение

Фотодатчик, изготовленный на основе кристаллического кремния с рекомбинационными центрами индия и золота ($N_{In} = 10^{16} - 10^{17} \text{ см}^{-3}$), можно

использовать для восстановления оптического сигнала в области частот модуляции интенсивности от 2 до 100 МГц.

Если концентрация рекомбинационных центров золота менее, чем на порядок, превышает концентрацию центров индия, рабочая область частот, в которой применим способ восстановления оптического сигнала, определяется, в основном, концентрацией центров индия. С ростом концентрации рекомбинационных центров индия рабочая область фотоприемника, предназначенного для восстановления временной зависимости интенсивности света, сдвигается в сторону больших частот.

Литература

[1]. Мхитарян В. М., Партамян Х. В. Скоростные фотоприемники импульсного излучения на основе «инерционных» фоторезисторов и фотодиодов. ЖТФ, 1982, т. 52, № 9, с. 1900 – 1902.

[2]. Nikishin E. V. On the Applicability Boundaries of the Restoration Method for the Temporal Shape of Modulated Optical Signals with a Frequency Higher than the Boundary Frequency of a Photoresistor. Semiconductors, 2014, Vol. 48, No. 11, p.p. 1526–1529.

[3]. Никишин Е. В., Гришаев В. Я.. Восстановление временной зависимости интенсивности быстро изменяющихся импульсов произвольной формы по отклику системы. Журнал радиоэлектроники: электронный журнал. 2017. №9. URL: <http://jre.cplire.ru/jre/sep17/3/text.pdf>

[4]. Милнс А. Примеси с глубокими уровнями в полупроводниках. М.: Мир, 1977. 568 с.

[5]. Смит Р. Полупроводники: пер. с англ. М.: Мир, 1982. 560 с.

[6]. Горюнов В.А., Гришаев В.Я., Никишин Е.В. Об изменении времен жизни носителей заряда при импульсном фотовозбуждении в кремнии с глубокими примесными центрами. Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Физико-математические науки, 2011, №4, с. 118 – 126.

[7]. D.V. Lang, H.G. Grimmeiss, E. Meijer, and M. Jaros, Complex nature of goldrelated deep levels in silicon, Phys. Rev., 1980, v. 22, p.p. 3917–3925.

[8]. Никишин Е.В., Пескова Е.Е. Нелинейные искажения, возникающие при восстановлении высокочастотных оптических импульсов. Журнал радиоэлектроники: электронный журнал. 2015. №9. URL: <http://jre.cplire.ru/jre/sep15/3/text.html>.

Ссылка на статью:

Е. В. Никишин, С. В. Базеев, В. О. Пиксайкина. Восстановление временной зависимости интенсивности света, частота модуляции которой больше граничной частоты фотоприемника, изготовленного на основе кремния с глубокими рекомбинационными центрами. Журнал радиоэлектроники [электронный журнал]. 2018. №2. Режим доступа: <http://jre.cplire.ru/jre/feb18/3/text.pdf>