

УДК 621.383.4, 621.382.2.3

Искажения, возникающие при восстановлении высокочастотных оптических импульсов фотоприемником, изготовленным на основе кристаллического кремния, легированного индием

© Е. В. Никишин¹, С. М. Мурюмин², Е. Е. Пескова³

Аннотация. В статье проведены теоретические исследования искажений восстановленного по фототоку высокочастотного оптического сигнала. Расчеты сделаны для фоторезистора с рекомбинационными центрами индия (In). Используются параметры характерные для кристаллического кремния. Определены условия, при которых частотные и фазовые искажения малы.

Ключевые слова: механизмы рекомбинации, фотопроводимость, кремний, индий, периодическое возбуждение, частотные искажения, фазовые искажения

При освещении резистора (фотодиода) вид отклика на возбуждение, проявляющийся в виде изменения концентрации носителей заряда (электронов и дырок), как правило, не повторяет форму падающего излучения. То есть зависимости интенсивности возбуждающего излучения ($J = J(t)$) и зависимости концентраций неравновесных носителей (КНН) заряда ($\Delta n = \Delta n(t)$, $\Delta p = \Delta p(t)$) представляются разными функциями. В работах [1–4] изложена методика восстановления временной зависимости высокочастотных возбуждающих импульсов по зависимостям тока от времени при подаче постоянного напряжения на фоторезистор. Методика восстановления серии импульсов реализуется, если их средняя длительность τ сравнима или меньше времени жизни основных носителей заряда $\max(\tau_n, \tau_p)$. Кинетика фотопроводимости в этом случае практически не зависит от времен жизни электронов и дырок и определяется в основном зависимостью величины темпа генерации от времени (или интенсивности).

При использовании метода восстановления оптического сигнала возникают различного рода искажения: частотные, фазовые, нелинейные. В работе проведено исследование искажений, возникающих при использовании фотоприемника, изготовленного на основе кристаллического кремния с рекомбинационными центрами индия. Учитывалась межзонная и Оже - рекомбинация. Уравнения для нахождения зависимостей концентраций электронов и дырок имеют вид [5–7]:

$$\frac{dn}{dt} = k\beta(1-R)J(\omega \cdot t) - A(pn - n_i^2) - B_n n(np - n_i^2) - B_p p(np - n_i^2) - N_r \sigma_n (n(1-f) - n_1 f), \quad (1.1)$$

$$\frac{dp}{dt} = k\beta(1-R)J(\omega \cdot t) - A(pn - n_i^2) - B_n n(np - n_i^2) - B_p p(np - n_i^2) - N_r \sigma_p (pf - p_1(1-f)), \quad (1.2)$$

$$\frac{df}{dt} = \sigma_n (n(1-f) - n_1 f) - \sigma_p (pf - p_1(1-f)), \quad (1.3)$$

¹ Доцент кафедры экспериментальной физики, Мордовский государственный университет имени Н. П. Огарева, г. Саранск; nikishin57@mail.ru.

² Доцент кафедры прикладной математики, дифференциальных уравнений и теоретической механики, Мордовский государственный университет имени Н. П. Огарева, г. Саранск; korspa@yandex.ru

³ Ассистент кафедры прикладной математики, дифференциальных уравнений и теоретической механики, Мордовский государственный университет имени Н. П. Огарева, г. Саранск; lizanika@mail.ru.

здесь n_1 и p_1 численно равны концентрации электронов и дырок, когда уровень Ферми совпадает с положением рекомбинационного центра индия в запрещенной зоне; N_r — концентрация рекомбинационных центров индия; σ_p и σ_n — вероятности захвата дырок и электронов примесными центрами индия; f — вероятность нахождения электрона на рекомбинационном центре; A — коэффициент межзонной рекомбинации; B_n, B_p — коэффициенты Оже-рекомбинации.

В работе [5] проведены исследования искажений при различных интенсивностях возбуждающего излучения. В данной работе исследовано влияние концентрации центров индия на искажения оптического импульса восстановленного по электрическому импульсу. Методика расчета аналогична той, которая применялась в работе [5], поэтому здесь не приводится.

Нелинейные искажения, которые связаны с нелинейностью процессов при обработке и передаче сигнала, в нашем случае связаны, в основном, с нелинейными законами рекомбинации электронов и дырок, которые в общем случае достаточно сложны [6–9]. При выполнении неравенства $\max(\tau_n\omega, \tau_p\omega) > 1$ составляет величину менее 1%. Коэффициент нелинейных искажений в этой области частот уменьшается с ростом концентрации центров индия. Таким образом, в области частот, где можно использовать метод восстановления оптического импульса (импульсов) влиянием нелинейных искажений можно пренебречь. Это обусловлено тем, что при больших частотах оптического сигнала система дифференциальных уравнений (1.1–1.3) линеаризуется [2].

При восстановлении формы оптических импульсов амплитуда восстановленного сигнала будет зависеть от частоты, с которой изменяется интенсивность падающего на фотодатчик света. Под коэффициентом, определяющим частотные искажения ($Y(\omega_i)$), будем понимать отношение амплитуды интенсивности восстановленного сигнала для фиксированной частоты ($J(\omega_i)$) к максимальной амплитуде интенсивности восстановленного сигнала ($\max(J(\omega))$) в рабочей области частот ω [5]. Так как в предложенном методе интенсивность пропорциональна производной от плотности тока через фоторезистор ($J(\omega_i) \approx \text{const} \cdot j'_t(\omega_i)$) и $\max(J(\omega) \approx \text{const} \cdot \max(j'_t))$, то для $Y(\omega_i)$ получаем:

$$Y(\omega_i) = \max |j'_t(\omega_i \cdot t)| / \max [j'_t(\omega \cdot t)]. \quad (1.4)$$

При больших частотах функция зависимости интенсивности света от времени отличается от зависимости фототока от времени. В первую очередь это связано с частотными искажениями, во вторую с фазовыми искажениями. При увеличении частоты и неизменной амплитуде интенсивности падающего на фоторезистор света, переменная составляющая которой меняется по гармоническому закону, амплитуда переменной составляющей фототока уменьшается обратно пропорционально частоте. Коэффициенты разложения произвольной периодической функции интенсивности света от времени $c_k(j)$ и соответствующие коэффициенты разложения функции фототока $c_k(j)$ связаны соотношением: $\omega \cdot c_k(j) \approx \text{const} \cdot c_k(J)$.

На рис. 1 представлены зависимости $Y = Y(\omega)$ при различных значениях концентраций рекомбинационных центров. Расчеты приведены в широкой области частот. При увеличении концентрации центров рекомбинации коэффициент частотных искажений для фиксированной частоты уменьшается. При частотах, где выполняется условие $\max(\tau_n\omega, \tau_p\omega) > 1$, $Y(\omega)$ составляет величину менее 1% и не зависит от концентрации рекомбинационных центров индия. Функция $Y = Y(\omega)$ имеет экстремум, что обусловлено вкладом дырочной проводимости, доля которой увеличивается с увеличением частоты. При больших частотах значение Y приближается к единице.

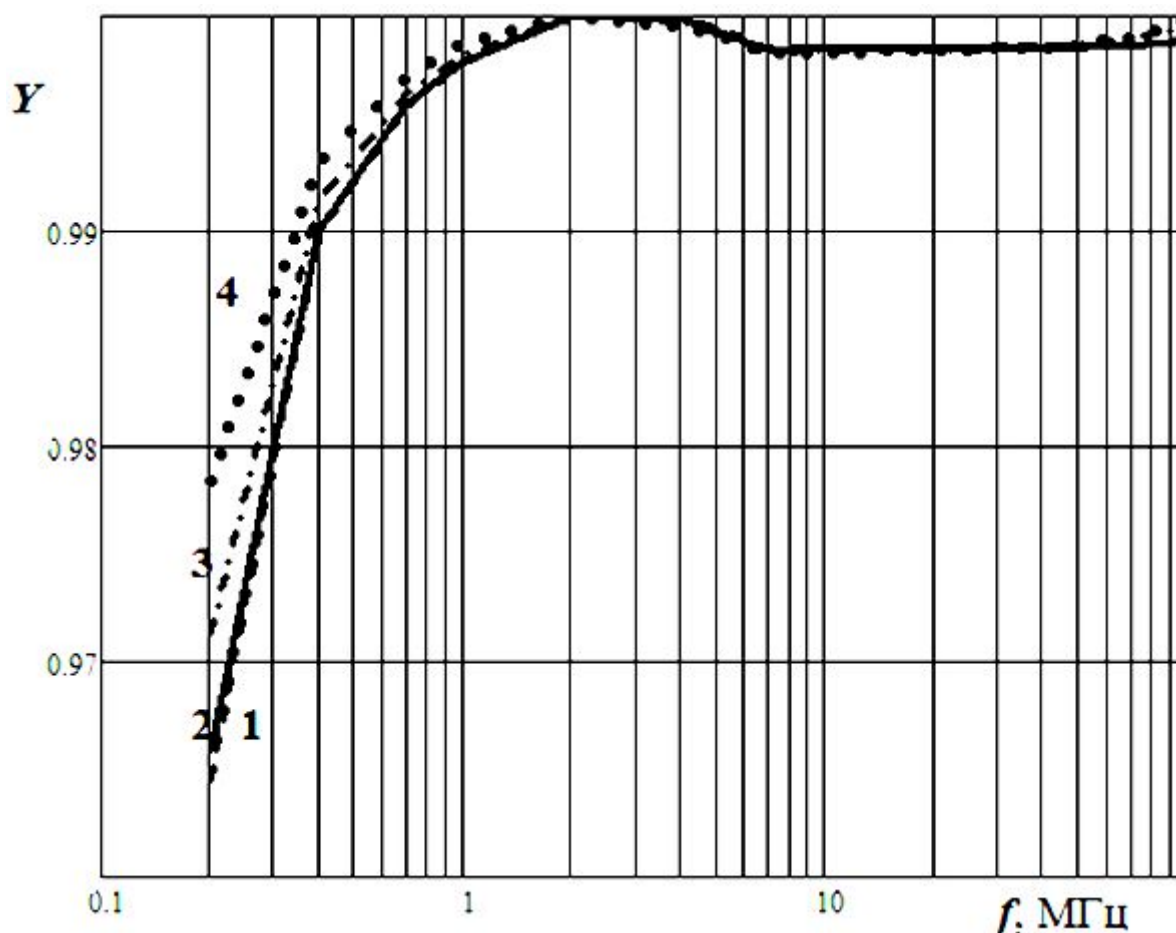


Рис. 1. Зависимости коэффициента частотных искажений от концентрации рекомбинационных центров при $Q = 10^{20} \text{ см}^{-3} \text{ с}^{-1}$, $n = 10^{11} \text{ см}^{-3}$: 1 – $N_a = 10^{17} \text{ см}^{-3} \text{ с}^{-1}$; 2 – $N_a = 8 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3} \text{ с}^{-1}$; 3 – $N_a = 4 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3} \text{ с}^{-1}$; 4 – $N_a = 2 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3} \text{ с}^{-1}$.

На рис. 2 представлены зависимости сдвига фаз между импульсом возбуждения, переменная составляющая которого меняется по гармоническому закону, и восстановленного, который по форме близок к гармоническому импульсу, что связано с малостью коэффициента нелинейных искажений. Восстановленный импульс отстает по фазе от возбуждающего импульса. Экстремум функции связан с относительным (по сравнению с концентрацией электронов) увеличением концентрации дырок. При больших частотах $\Delta n = \Delta p$. При выполнении неравенства $\max(\tau_n \omega, \tau_p \omega) > 1$, $Y(\omega)$ составляет величину менее 1%. Зависимость сдвига фаз от концентрации рекомбинационных центров индия существенна при малых частотах, где метод не работает. В области рабочих частот ($\max(\tau_n \omega, \tau_p \omega) > 1$) ϕ увеличивается при уменьшении концентрации.

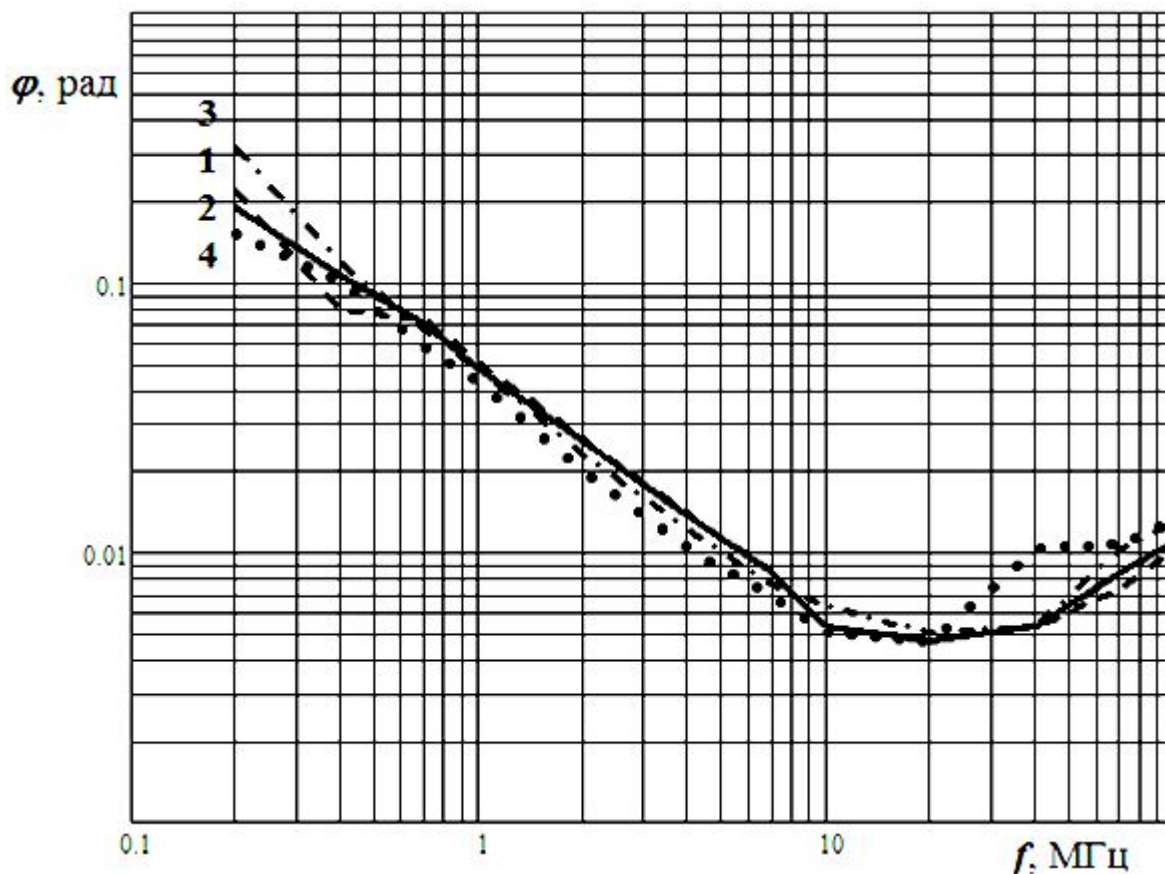


Рис. 2. Зависимости сдвига фаз от концентрации рекомбинационных центров при $Q = 10^{20} \text{см}^{-3} \text{с}^{-1}$, $n = 10^{11} \text{см}^{-3}$: 1 – $N_a = 10^{17} \text{см}^{-3} \text{с}^{-1}$; 2 – $N_a = 8 \cdot 10^{16} \text{см}^{-3} \text{с}^{-1}$; 3 – $N_a = 4 \cdot 10^{16} \text{см}^{-3} \text{с}^{-1}$; 4 – $N_a = 2 \cdot 10^{16} \text{см}^{-3} \text{с}^{-1}$.

Для качественного восстановления зависимости интенсивности света от времени по зависимости фототока от времени необходимо получить достаточно большую глубину амплитудной модуляции фототока [5]. Расчеты показывают, что ее величина практически не зависит от концентрации рекомбинационных центров и по величине достаточна для восстановления оптических сигналов до частот вплоть до 1 ГГц. Глубину амплитудной модуляции фототока уменьшает с увеличением частоты (рис. 3).

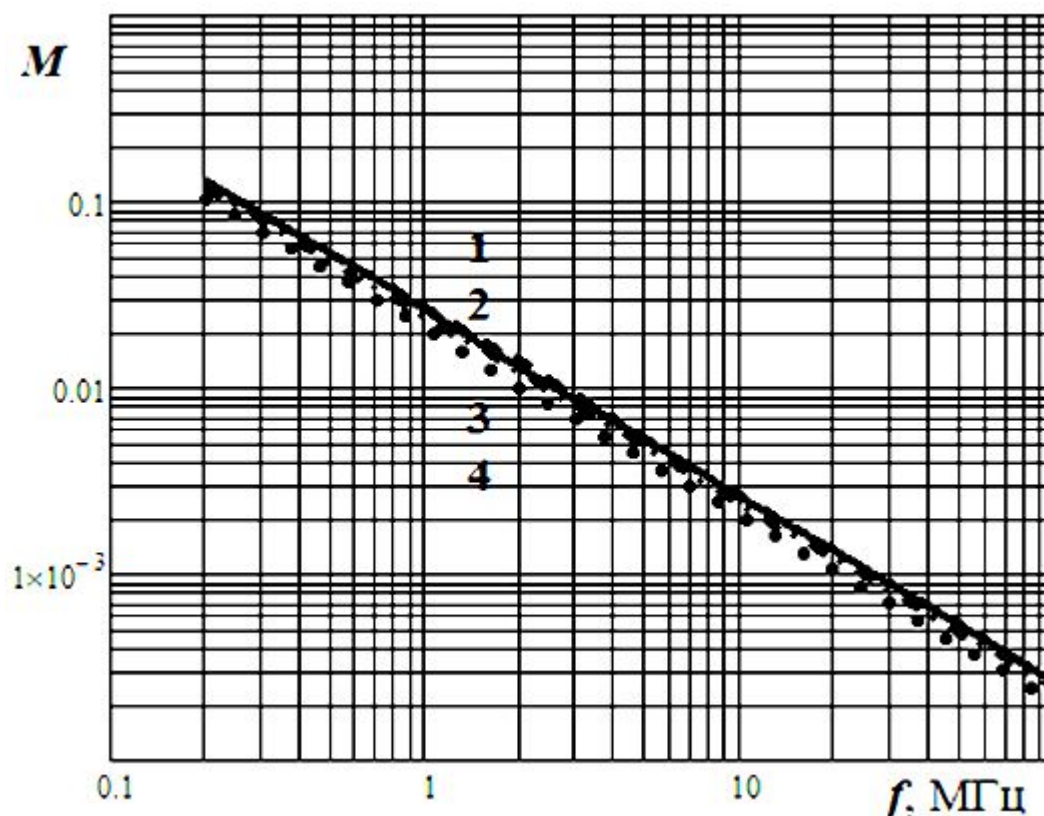


Рис. 3. Зависимости глубины модуляции от концентрации рекомбинационных центров при $Q = 10^{20} \text{ см}^{-3} \text{ с}^{-1}$, $n = 10^{11} \text{ см}^{-3}$: 1 – $N_a = 10^{17} \text{ см}^{-3} \text{ с}^{-1}$; 2 – $N_a = 8 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3} \text{ с}^{-1}$; 3 – $N_a = 4 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3} \text{ с}^{-1}$; 4 – $N_a = 2 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3} \text{ с}^{-1}$.

Таким образом, фотодатчик, изготовленный на основе кристаллического кремния с рекомбинационными центрами индия, может быть использован для восстановления периодического оптического сигнала, основная частота и гармоники которого лежат в области частот от 1 МГц до 1 ГГц.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Мхитарян В. М., Партамян Х. В., “Скоростные фотоприемники импульсного излучения на основе “инерционных” фоторезисторов и фотодиодов”, *ЖТФ*, **52**:9 (1982), 1900–1902.
2. 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.
3. Гришаев В. Я., Никишин Е. В., “Фотоэлектрический преобразователь высокочастотного оптического сигнала”, *патент на полезную модель — RUS 132287*, 24.12.2012.
4. Мурюмин С. М., Никишина А. Е., Никишин Е. В., “Использование кремния легированного золотом для определения формы оптического сигнала”, *Журнал Средневолжского математического общества*, **16**:1 (2014), 140–144.

5. Никишин Е. В., “О границах применимости способа восстановления временной формы модулированных оптических сигналов с частотой выше граничной частоты фоторезистора”, *Физика и техника полупроводников*, **48:11** (2014), 1526–1529.
6. Милнс А., *Примеси с глубокими уровнями в полупроводниках*, Мир, М., 1977, 568 с.
7. Смит Р., *Полупроводники: пер. с англ.*, Мир, М., 1982, 560 с.
8. 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, 118–126.
9. Denisov B. N., Nikishin E. V., “Investigations of the Kinetics of Nonequilibrium Carriers in a Semiconductor by the Average Value of the Photoconductivity under Periodic Optical Excitation”, *Semiconductors*, **48:2** (2014), 163–166.

Distortion that occurs when you restore a high-frequency optical pulses (silicon doped with indium)

© E. V. Nikishin⁴, S. M. Muryumin⁵, E. E. Peskova⁶

Abstract. In the article theoretical study of the nonlinear distortion of the restored high frequency optical signal. The calculations made for the photoresistor with recombination centers indium (In). Used parameters typical for crystalline silicon. Found conditions under which the frequency and phase distortion is small.

Key Words: mechanisms of recombination, photoconductivity, silicon, indium, periodic excitation, frequency distortion, phase distortion

⁴ Associate Professor in the Department of experimental physics, Mordovian State University after N.P. Ogarev, Saransk; nikishin57@mail.ru.

⁵ Associate Professor of applied mathematics, differential equations and theoretical mechanics, Mordovian State University after N.P. Ogarev, Saransk; korspa@yandex.ru

⁶ Assistant Professor of applied mathematics, differential equations and theoretical mechanics, Mordovian State University after N.P. Ogarev, Saransk; lizanika@mail.ru.