

УДК 517.9

Искажения высокочастотных оптических сигналов фотоприемниками, изготовленными на основе кремния легированного золотом

© Е. В. Никишин¹, Е. Е. Пескова²

Аннотация. В статье проведены теоретические исследования искажений восстановленного высокочастотного оптического сигнала. Расчеты сделаны для фотоприемников, изготовленных на основе кремния, легированного золотом. Определены условия, при которых нелинейных искажения малы.

Ключевые слова: кинетика фотопроводимости, кремний, легированный золотом, рекомбинационные центры, времена жизни электронов и дырок, восстановление сигналов

Принципиальная возможность восстановления зависимости интенсивности высокочастотных импульсов возбуждающего излучения ($J = J(\omega t)$) по зависимости от времени фототока ($j = j(\omega t)$), возникающего в фотоприемнике, исследована в работах [1 - 3]. В [4] показано, что предложенный метод может быть осуществлен при использовании фотоприемников со сложными механизмами рекомбинации, наличие которых приводит к значительным нелинейностям в кинетических уравнениях [5 - 9]. Необходимым условием является большая частота изменения интенсивности света ω , а именно: $\omega \gg \max(\tau_n^{-1}, \tau_p^{-1})$. В работе [10] исследованы искажения, возникающие при использовании фоторезистора, изготовленного на основе кристаллического кремния с рекомбинационными центрами индия, для восстановления высокочастотных оптических сигналов.

Цель данной работы: исследование искажений, возникающих при восстановлении временной зависимости интенсивности возбуждающего света, при использовании для этого кремния легированного золотом. Контактными и поверхностными явлениями пренебрегаем. Параметры рекомбинационных центров приведены в [5], уравнения, описывающие кинетику неравновесных носителей заряда — в работе [4]. Соответствующие уравнения решались численными методами.

Ниже приведены результаты исследований нелинейных, частотных и фазовых искажения функции. Соответствующие коэффициенты, рассчитывались аналогично тому, как это делалось в работе [10]. Коэффициент нелинейных искажений:

$$K = \frac{1}{|c_1|} \sqrt{\sum_i |c_k|^2}, \text{ здесь } c_k = \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} \frac{dj(\tau)}{d\tau} \cdot e^{-i \cdot k \cdot \omega \cdot \tau} d\tau, \quad (1.1)$$

Коэффициент частотных искажений $Y(\omega_i)$:

$$Y(\omega_i) = \max |j'_t(\omega_i \cdot t)| / \max [j'_t(\omega \cdot t)], \quad \omega_i \in [\omega_{\min}, \omega_{\max}] \quad (1.2)$$

здесь: $j'_t(\omega_i)$ — амплитуда восстановленного оптического сигнала для фиксированной частоты ω в относительных единицах; $\max(j'_t)$ — максимальная амплитуда восстановленного сигнала в относительных единицах в рабочей области частот.

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

² Ассистент кафедры прикладной математики, дифференциальных уравнений и теоретической механики, Мордовский государственный университет имени Н. П. Огарева, г. Саранск; lizanika@mail.ru.

Фазовые искажения характеризуются групповым временем запаздывания τ в исследуемой полосе частот:

$$\tau_{gp} = d\phi/d\omega \quad (1.3)$$

ϕ — сдвиг фаз между восстановленным и возбуждающим импульсами.

Кроме малости искажений, использование фотоприемника для восстановления оптических импульсов предполагает относительно большую глубину модуляции, которая рассчитывалась по формуле:

$$K = (j_{\max} - j_{\min}) / (j_{\max} + j_{\min}) \quad (1.4)$$

Проведено исследование искажений при различных концентрациях донорных центров. Результаты численных расчетов приведены на рис. 1–4. Для кривых 1–4 рис. 1–4 использованы следующие параметры полупроводника и внешнего возбуждения: концентрация равновесных электронов — $n = 10^{11} \text{ см}^{-3}$; темп генерации — $g(\omega t) = 10^{20}(1 - \cos \omega t) \text{ см}^{-3} \text{ с}^{-1}$; концентрация рекомбинационных (акцепторных) центров золота — $N_a = 8 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$. Для кривой 1 рис. 1–4 концентрация донорных центров золота равна $N_\delta = 0 \text{ см}^{-3}$; для кривой 2 — $N_\delta = 10^{14} \text{ см}^{-3}$; для кривой 3 — $N_\delta = 10^{15} \text{ см}^{-3}$; для кривой 4 — $N_\delta = 10^{16} \text{ см}^{-3}$.

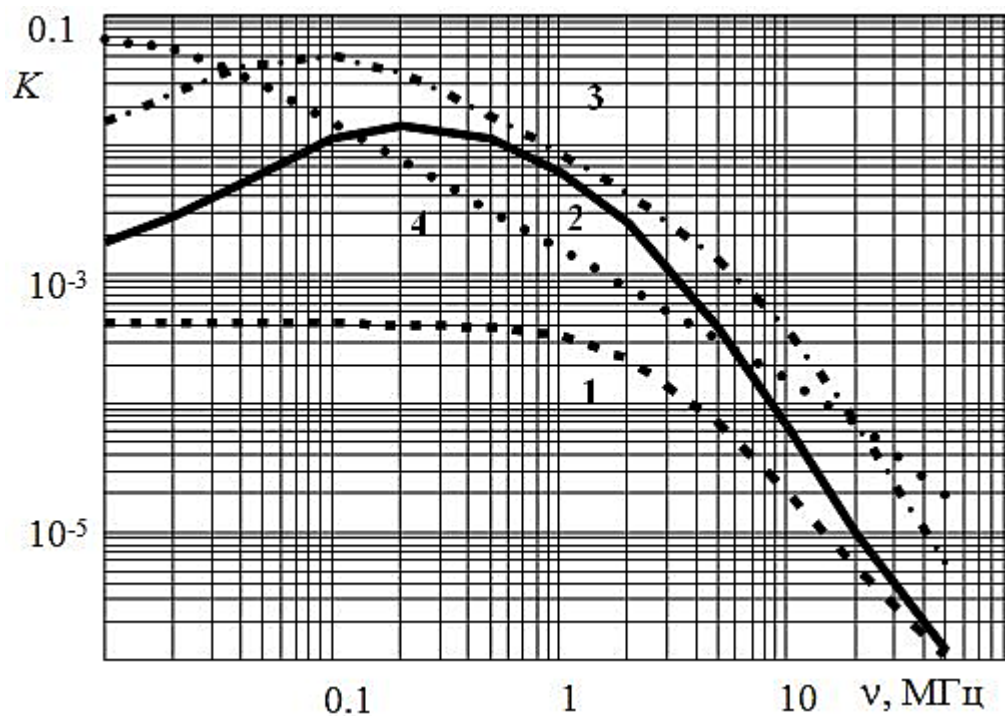


Рис. 1. Зависимости коэффициента нелинейных искажений от частоты.

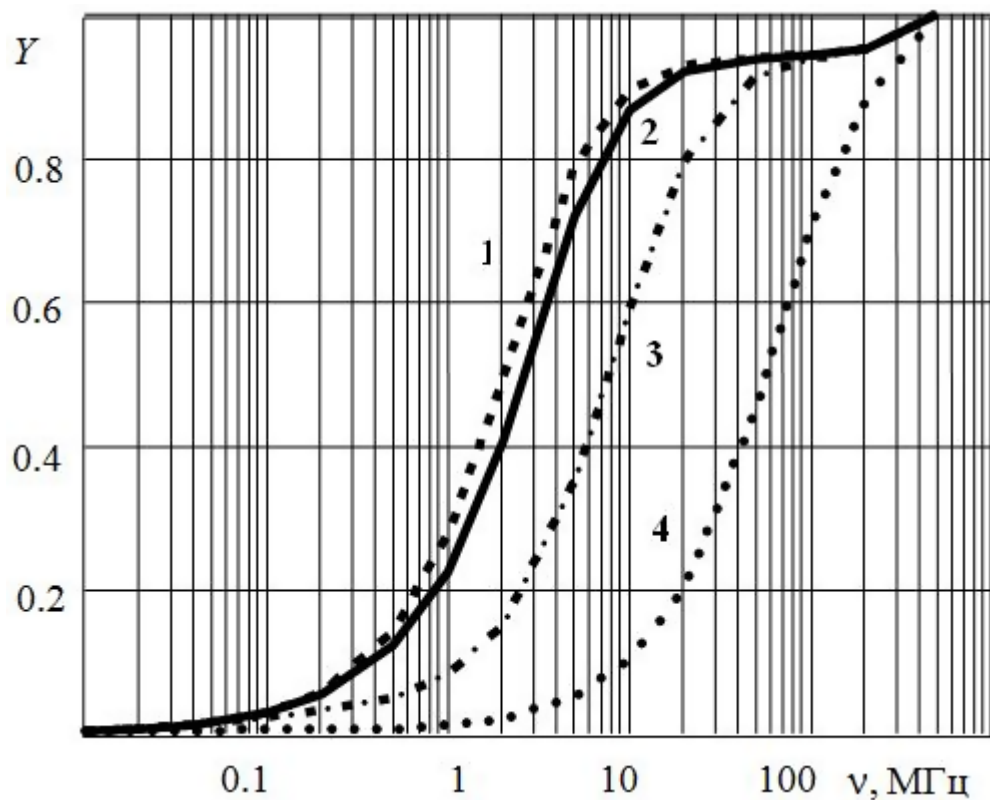


Рис. 2. Зависимость коэффициента Y , характеризующего частотные искажения оптического сигнала, от частоты следования гармонических импульсов света

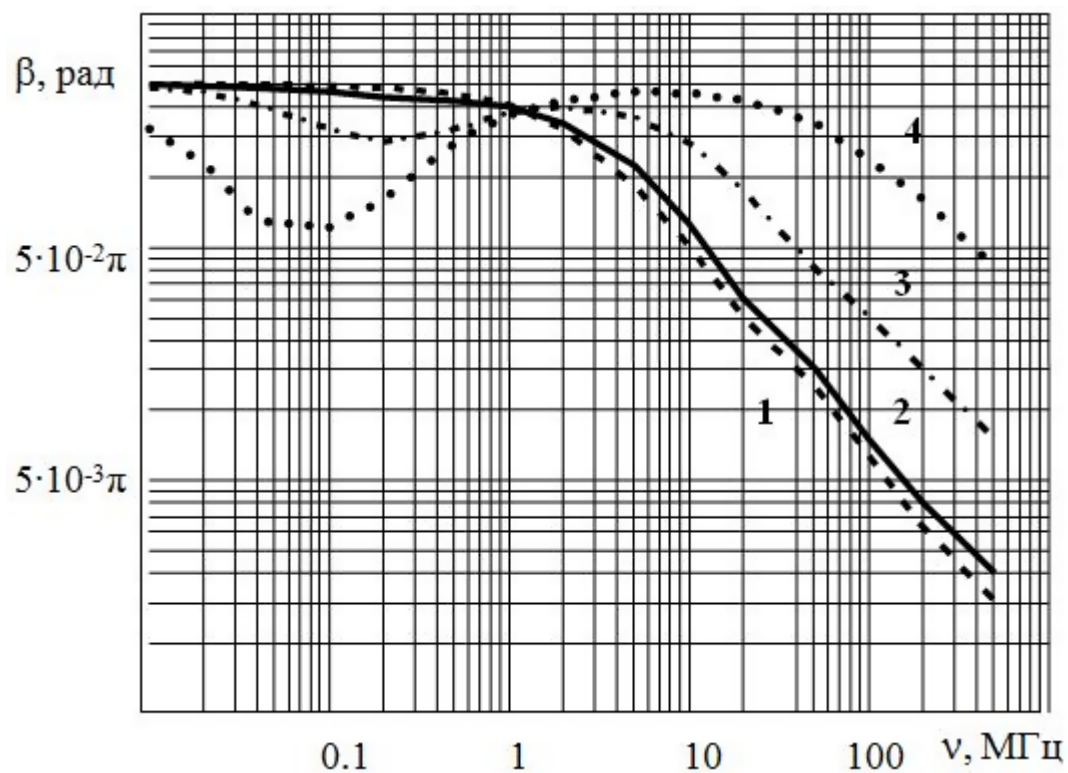


Рис. 3. Зависимость угла сдвига фаз восстановленного сигнала от частоты следования гармонических импульсов света.

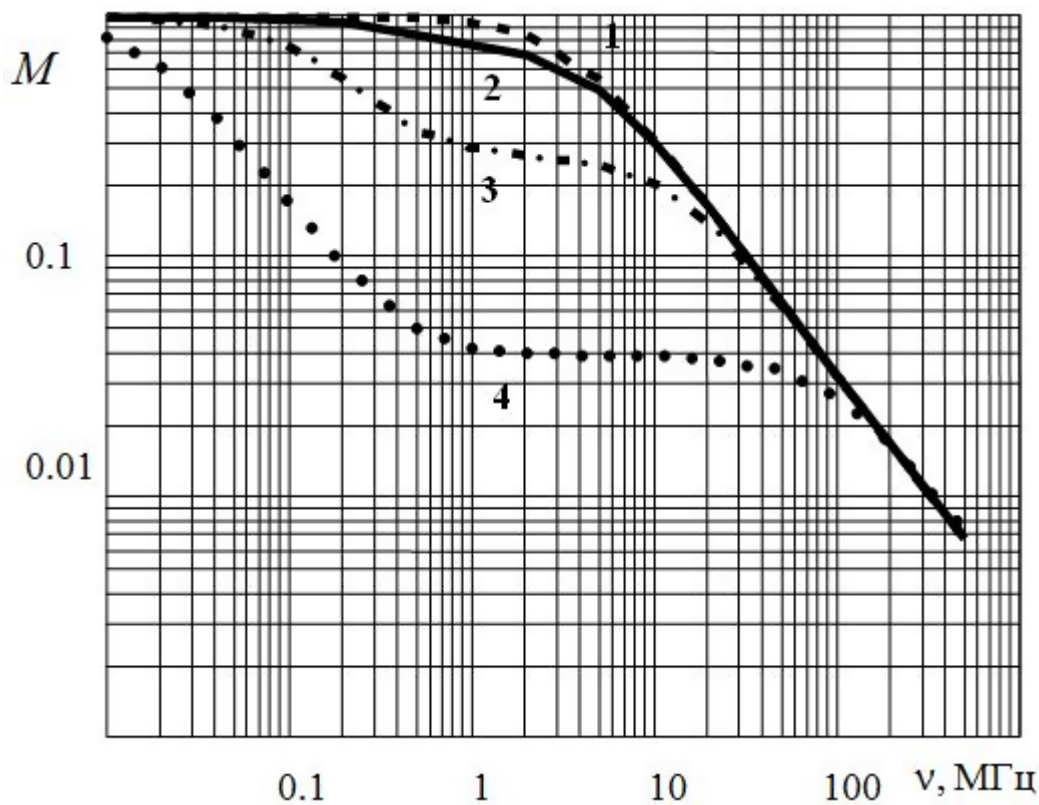


Рис. 4. Зависимость глубины модуляции электрического сигнала от частоты следования гармонических импульсов света.

Анализ полученных результатов показывает, что увеличение концентрации донорных примесей ухудшает параметры фотоприемника, предназначенного для восстановления высокочастотных возбуждающих импульсов. При частоте большей 100 МГц, то есть при $\omega \gg \max(\tau_n^{-1}, \tau_p^{-1})$ в независимости от концентрации донорных центров искажениями можно пренебречь.

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*, 24.12.2012.

4. Мурюмин С. М., Никишина А. Е., Никишин Е. В., “Использование кремния легированного золотом для определения формы оптического сигнала”, *Журнал Средне-волжского математического общества*, **16**:1 (2014), 140–144.
5. Милнс А., *Примеси с глубокими уровнями в полупроводниках*, Мир, М., 1977, 568 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, 118–126.
7. Lang D. V., Grimmeis H. G., Meijer E., Jaros M., *Phys. Rev. B.*, **22**:7 (1980), 3917.
8. Аут И., *Фотоэлектрические явления*, Мир, М., 1980, 208 с.
9. Денисов Б. Н., Никишин Е. В., “Исследование кинетики неравновесных носителей в полупроводнике по среднему значению фотопроводимости при периодическом оптическом возбуждении”, *ФТП*, **48**:2 (2014), 175–178.
10. Никишин Е. В., “О границах применимости способа восстановления временной формы модулированных оптических сигналов с частотой выше граничной частоты фоторезистора”, *ФТП*, **48**:11 (2014), 1526–1529.

Distortion of high frequency optical signals photodetectors fabricated on silicon doped with gold.

© E. V. Nikishin³, E. E. Peskova⁴

Abstract. In the article theoretical study of the distortions of the reconstructed high-frequency optical signal. Calculations are made for photo detectors fabricated on silicon doped with gold. The conditions under which nonlinear distortion is small.

Key Words: photoconductivity kinetics, silicon doped with gold, recombination centers, lifetimes of electrons and holes, signal reconstruction

³ Associate Professor in the Department of experimental physics, Mordovian State University after N.P. Ogarev, Saransk; nikishin57@mail.ru.

⁴ Assistant Professor of applied mathematics, differential equations and theoretical mechanics, Mordovian State University after N.P. Ogarev, Saransk; lizanika@mail.ru.