

Влияние поглощения на свободных носителях заряда на параметры кремниевых фотодиодов

Е. А. Климанов, Р. В. Давлетшин

Приведен расчет фоточувствительности кремниевых фотодиодов с учетом поглощения на свободных носителях в диффузионных слоях, позволяющий определить требования к их параметрам для снижения этого эффекта.

Показано, что величина пропускания длинноволнового излучения в кремниевых структурах может также уменьшаться за счет поглощения на свободных носителях в диффузионных слоях.

Ключевые слова: многоспектральные фотоприемные устройства, кремниевые фотодиоды, легированные слои, поглощение на свободных носителях.

DOI: 10.51368/1996-0948-2022-5-38-41

Введение

Известно, что поглощение на свободных носителях заряда может значительно ухудшать параметры ИК фотоприемников за счет поглощения части потока падающих фотонов в сильнолегированных слоях, в частности контактных слоях поликремния в ПЗС структурах [1].

Целью настоящей работы является оценка влияния параметров легированных слоев, сформированных диффузией или ионной имплантацией легирующих примесей, на чувствительность кремниевых фотодиодов в их спектральном диапазоне и на величину пропускания длинноволнового излучения в этих структурах, что имеет значение при изготовлении многоспектральных фотоприемных устройств.

Влияние поглощения в диффузионных слоях на фоточувствительность кремниевых фотодиодов

Структура большинства кремниевых фотодиодов (ФД) содержит n^+ и p^+ слои, один из которых образует p - n -переход, а другой область контакта к подложке. Слои формируются термодиффузией или ионной имплантацией. Поэтому следует рассматривать суммарное поглощение в этих слоях.

Коэффициент поглощения на свободных носителях излучения с длиной волны λ для объемного материала выражается следующим соотношением [1]:

$$\alpha = 1,54 \times 10^{-17} \frac{\lambda^2 p}{\mu (m^* / m)^2}, \text{ см}^{-1}, \quad (1)$$

где p – концентрация носителей в см^{-3} , μ – подвижность носителей в $\frac{\text{см}^2}{\text{В} \cdot \text{с}}$, λ в микронах.

Коэффициент пропускания сильнолегированного слоя толщиной x_n с переменной концентрацией носителей:

$$T = \exp \left[- \int_0^{x_n} \alpha(x) dx \right]. \quad (2)$$

Климанов Евгений Алексеевич^{1,2}, гл.н.с., профессор, д.т.н.

Давлетшин Ренат Валиевич¹, инженер 1 кат.

¹ АО «НПО «Орион».

Россия, 111538, Москва, ул. Косинская, 9.

E-mail: orion@orion-ir.ru

² МИРЭА – Российский технологический университет (РТУ МИРЭА).

Россия, 119454, Москва, просп. Вернадского, 78.

Статья поступила в редакцию 26 сентября 2022 г.

© Климанов Е. А., Давлетшин Р. В., 2022

Используя для кремния следующие значения постоянных: $m_n^*/m = 0,28$ и $m_p^*/m = 0,37$ [2], $\mu_n = 100 \frac{\text{см}^2}{\text{В}\cdot\text{с}}$, $\mu_p = 50 \frac{\text{см}^2}{\text{В}\cdot\text{с}}$ [3] можно получить следующие выражения для коэффициентов пропускания n^+ и p^+ слоев [1]:

$$\begin{aligned} T_n &= \exp(-k_n \lambda^2 / q \mu_n Rsn) \\ T_p &= \exp(-k_p \lambda^2 / q \mu_p Rsp), \end{aligned} \quad (3)$$

где $k_n = 2 \times 10^{-18}$, $k_p = 1,5 \times 10^{-18}$, $Rsn = \left(q \int_0^{x_d} \mu_n n(x) dx \right)^{-1}$ – поверхностное сопротивление легированного слоя.

На рис. 1 приведены зависимости коэффициентов пропускания n^+ и p^+ слоев в зависимости от их поверхностного сопротивления для излучения с длиной волны 0,9 и 1,06 мкм, показывающие значительные потери излучения (> 5 %) при $Rsn, Rsp < 5$ Ом.

Используя приведенные соотношения, можно получить выражение для чувствительности фотодиода S , учитывающее поглощение в диффузионных слоях и многократное отражение от передней и тыльной поверхности образца:

$$S = 0,806 \lambda \frac{(1 - R_1)(1 - e^{-\alpha d})(1 + K_2^* e^{-\alpha d})}{1 - R_1^* R_2^* e^{-2\alpha d}} \times \left(\frac{R_1^*}{K_1} \right)^{\frac{1}{2}}, \quad (4)$$

где α – поглощение излучения в объеме кремниевого ФД, R_1 – коэффициент отражения от передней поверхности; R_1^* , R_2^* – эффективные коэффициенты отражения от передней и тыльной поверхности образца с учетом поглощения на свободных носителях в диффузионных слоях:

$$\begin{aligned} R_1^* &= R_1 \exp(-2k_n \lambda^2 / q \mu_n Rsn) \\ R_2^* &= R_2 \exp(-2k_p \lambda^2 / q \mu_p Rsp). \end{aligned} \quad (5)$$

На рис. 2 приведен расчет относительной чувствительности фотодиода S/S_m на длине волны 1,06 мкм от величины Rsn при Rsp в качестве параметра при падении излучения со стороны n^+ слоя. Коэффициенты отражения на освещаемой и обратной поверхностях полагались равными $R_1 = 0,1$, $R_2 = 1$. Видно, что при $Rsn > 10$ Ом и $Rsp > 40$ Ом потери меньше 3 %.

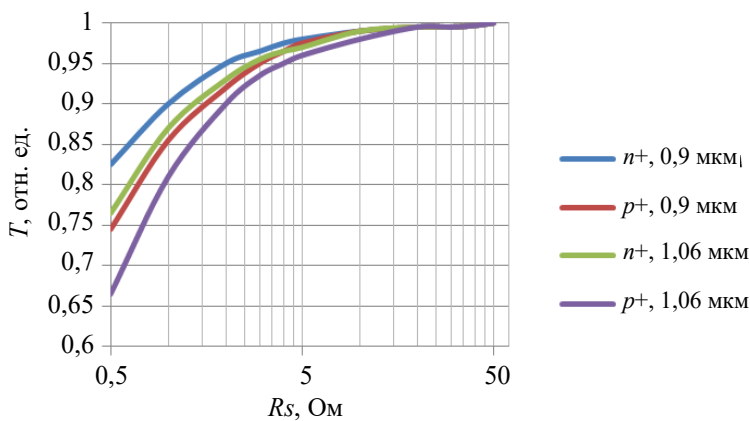


Рис. 1. Зависимости коэффициентов пропускания n^+ и p^+ слоев в зависимости от их поверхностного сопротивления для излучения с длиной волны 0,9 и 1,06 мкм

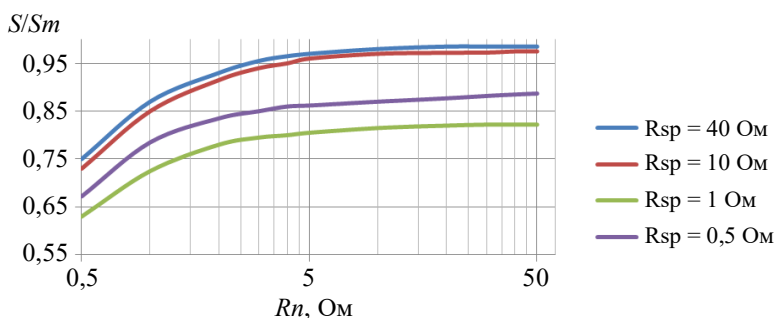


Рис. 2. Зависимость относительной чувствительности фотодиода S/S_m на длине волны 1,06 мкм от величины Rsn при Rsp в качестве параметра

Экспериментальные результаты качественно согласуются с расчетными: при уменьшении R_{sp} от 10 до 1–2 Ом при $R_{sn} \sim 40$ Ом наблюдалось снижение фоточувствительности ФД на длине волны $\lambda = 1,06$ мкм на ~ 30 %.

Влияние поглощения в диффузионных слоях на пропускание образцов в длинноволновой области

На рис. 3 представлен спектр пропускания образца с n^+ и p^+ диффузионными слоями ($R_{sp} \sim 30$ Ом и $R_{sn} \sim 10$ Ом) и покрытием SiO_2 на передней и обратной стороне образца (кривая 1). Излучение направлено со стороны p^+ слоя. Наблюдается резкий спад пропускания для излучения с волновыми числами менее 3000 см^{-1} ($\lambda \sim 3,3$ мкм).

Сравнение n^+ слоя (кривая 2) приводит к существенному увеличению пропускания в длинноволновой области. Нанесение просветляющего покрытия на потравленную поверхность приводит к увеличению пропускания во всем измеренном диапазоне длин волн (кривая 3).

На рис. 4 приведено сравнение экспериментального спектра пропускания с расчетом, учитывающим поглощение на свободных носителях с использованием выражений (3) при условиях: $R_{sp} \sim 30$ Ом, $R_{sn} \sim 10$ Ом и коэффициентов отражения на передней и задней поверхностях образца $R_1, R_2 = 0,2$. Наблюдается удовлетворительное согласование расчетных и экспериментальных данных, подтверждающее основное влияние на уменьшение пропускания поглощения на свободных носителях в n^+ слое.

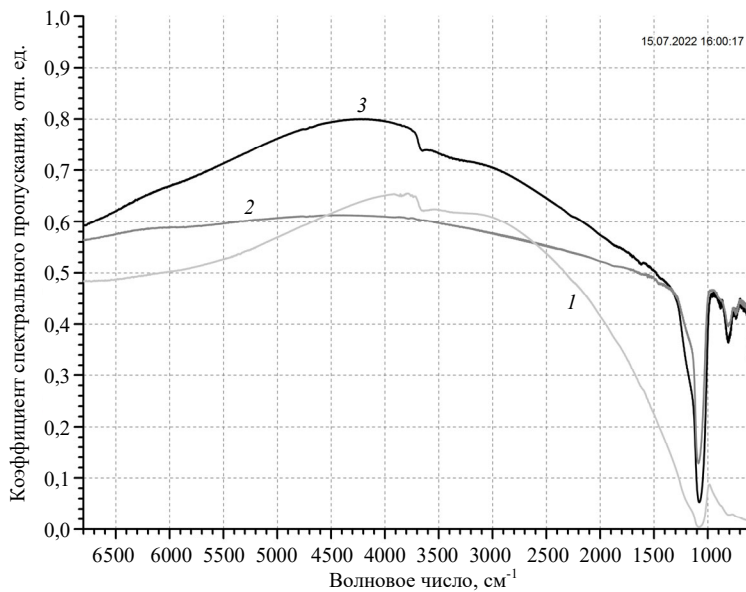


Рис. 3. Образец с p^+ и n^+ слоями, 2- n^+ удален, 3- n^+ удален и нанесено просветляющее покрытие

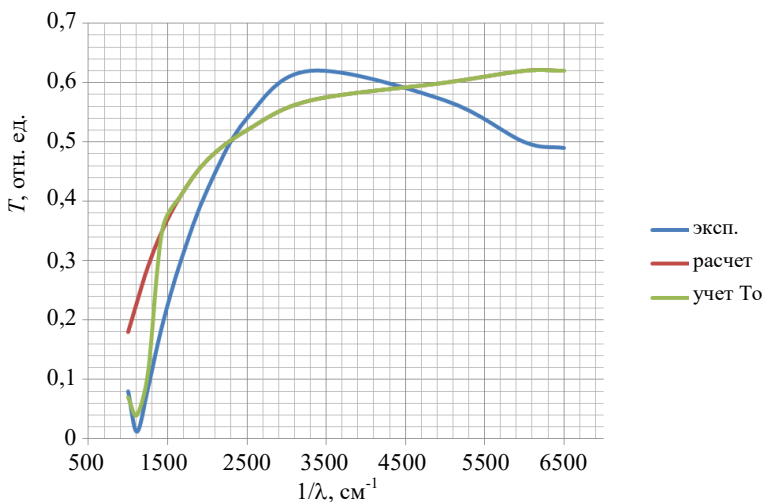


Рис. 4. Сравнение экспериментального спектра пропускания излучения с расчетом, учитывающим поглощение на свободных носителях

Следует отметить, что во всех спектрах пропускания наблюдается сильное поглощение в области 1100 см^{-1} , что можно связать с поглощением на атомах растворенного в решетке кремния кислорода [4]. Учет этого пика поглощения (кривая T_0 на рис. 4) улучшает согласование экспериментальных и расчетных данных.

Выводы

1. Расчет зависимости чувствительности кремниевых фотодиодов с учетом поглощения излучения на свободных носителях в диффузионных слоях позволяет определить требования к величине поверхностного сопротивления этих слоев, обеспечивающие минимальные потери в фоточувствительности: при поверхностных сопротивлениях n^+ слоя $R_{sn} > 10 \text{ Ом}$ и p^+ слоя $R_{sp} > 40 \text{ Ом}$ потери

меньше 3 %. Экспериментальные данные по фоточувствительности ФД качественно согласуются с расчетными.

2. Сравнение расчетных и экспериментальных данных по спектрам пропускания кремниевых структур с легированными слоями в длинноволновой части спектра ($\lambda > 2,5 \text{ мкм}$) подтверждает основное влияние на пропускание поглощения на свободных носителях в диффузионных областях.

ЛИТЕРАТУРА

1. Schroder K., Thovas R. N., Swarts J. C. // JEEE Transaction on electron devices. 1978. Vol. ED-25. № 2. P. 254.
2. Schumann P. A., Phillips R. P. // Solid-State Electronics. 1967. Vol. 10. P. 943.
3. Jacoboni C., Canali C., Ottaviani G., Qaranta A. A. // Solid-State Electronics. 1977. Vol. 20. P. 77.
4. OMara W. C. // SPIE. 1985. Vol. 524. P. 61.

PACS: 85.60.-q

Effect of absorption by free carriers on the parameters of silicon photodiodes

E. A. Klimanov^{1,2} and R. V. Davletshin¹

¹ Orion R&P Association, JSC
9 Kosinskaya st., Moscow, 111538, Russia

² MIREA – Russian Technological University (RTU MIREA)
78 Vernadsky Ave., Moscow, 119454, Russia

Received September 26, 2022

The calculation results predicts the transmissivity of heavily doped diffusion layers as function of their sheet resistance and wavelength of radiation with accounting free carrier absorption in diffused layers.

Its gives requirements to this layers parameters for reduce this effect on sensitivity silicon photodiodes.

It is shown also, that silicon structure transmissivity over 2.5 microns' wavelength is strong dependent on free carrier absorption in in diffused layers.

Keywords: multispectral photodetectors, silicon photodiodes, doped layers, CCD structures.

DOI: 10.51368/1996-0948-2022-5-38-41

REFERENCES

1. K. Schroder, R. N. Thovas, and J. C. Swarts, JEEE Transaction on electron devices **ED-25** (2), 254 (1978).
2. P. A. Schumann and R. P. Phillips, Solid-State Electronics **10**, 943 (1967).
3. C. Jacoboni, C. Canali, G. Ottaviani, and A. A. Qaranta, Solid-State Electronics **20**, 77 (1977).
4. W. C. OMara, SPIE **524**, 61 (1985).