

УДК 621.383.52

PACS: 85.60.-q

DOI: 10.51368/1996-0948-2023-6-41-44

EDN: MJHXEZ



Поглощение ИК-излучения в диффузионных слоях структур на основе кремния

Д. С. Конорев, Е. А. Климанов, Р. В. Давлетшин, Э. А. Макарова

Приведены экспериментальные зависимости спектров пропускания в кремниевых образцах с диффузионными слоями от поверхностного сопротивления слоев и длины волны излучения. Показано, что величина пропускания длинноволнового излучения в кремниевых структурах удовлетворительно согласуется с расчетом для поглощения на свободных носителях в диффузионных слоях при учете сильной зависимости подвижности носителей от концентрации легирующей примеси.

Ключевые слова: Si, кремний, ИК-излучение, свободные носители, концентрация электронов, поверхностное сопротивление.

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], в многоспектральных фотоприемниках.

В работе [2] приведена расчетная оценка влияния параметров легированных слоев, сформированных диффузией или ионной имплантацией легирующих примесей на чувствительность кремниевых фотодиодов в их спектральном диапазоне (0,9 и 1,06 мкм) и на величину пропускания длинноволнового излучения в этих структурах.

Целью настоящей работы является получение экспериментальных зависимостей пропускания излучения различных длин волн кремниевыми структурами с диффузионными слоями от параметров этих слоев.

Эксперимент

В работе были использованы кремниевые пластины марки БКЭФ 100–250 (100) с относительно низкой концентрацией легирующих примесей (10^{14} см⁻³) для исключения поглощения излучения в объеме образцов.

Диффузионные слои n^+ -типа с различным поверхностным сопротивлением (R_{sn}) в диапазоне 3–50 Ом/□ формировались диффузией фосфора из жидкого источника POCl₃. Пропускание излучения через образцы измерялось на спектрофотометре Vertex 70/80 в диапазоне длин волн $\sim 1,25$ –5 мкм.

Результаты и их обсуждение

Коэффициент поглощения на свободных носителях излучения с длиной волны λ для объемного материала выражается следующим соотношением [3]:

$$\alpha = \frac{q^3 \lambda^2 p}{4\pi^2 \epsilon_0 c^3 n m^* \mu}, \quad (1)$$

Конорев Дмитрий Сергеевич^{1,2}, студент, инженер.

Климанов Евгений Алексеевич², гл.н.с., д.т.н.

E-mail: klimanov3@mail.ru

Давлетшин Ренат Валиевич², инженер 1 кат.

Макарова Элина Алексеевна², инженер 2 кат.

¹ НИТУ «МИСиС».

Россия, 119049, Москва, Ленинский просп., 4, стр. 1.

² АО «НПО «Орион».

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

Статья поступила в редакцию 7.11.2023

После доработки 23.11.2023

Принята к публикации 28.11.2023

где p – концентрация носителей в см^{-3} ; μ – подвижность носителей в $\frac{\text{см}^2}{\text{В} \cdot \text{с}}$; λ – длина волны излучения в микронах; n – коэффициент преломления; m^* – эффективная масса.

Подставляя численные значения, можно записать для электронов:

$$\alpha = k_n(\mu)\lambda^2 n,$$

где $k_n(\mu)$ – постоянная, включающая один переменный параметр – подвижность μ_n , остальные величины представляют собой известные константы.

Коэффициент пропускания сильнолегированного слоя с переменной концентрацией носителей с учетом слабого поглощения излучения в объеме образца можно записать [2]:

$$T = (1 - R)^2 \exp\left[-\int_0^{x_n} \alpha(x) dx\right]. \quad (2)$$

Используя выражение для поверхностного сопротивления легированного слоя

$$R_{sn} = \left(q \int_0^{x_d} \mu_n n(x) dx\right)^{-1}, \quad (3)$$

можно получить следующее выражение для доли прошедшего через n^+ -слой излучения:

$$T_n = \exp\left(-k_n(\mu)\lambda^2 / q\mu_n R_{sn}\right). \quad (4)$$

На рисунке 1 приведены экспериментальные зависимости величины пропускания излучения T от поверхностного сопротивления для трех длин волн $\lambda = 1,25$; 2 и 5 мкм, демонстрирующие увеличение поглощения с возрастанием концентрации электронов (снижением величины R_{sn}) и увеличением длины волны излучения. Из полученных данных следует, что значительное поглощение излучения наблюдается в диффузионных слоях n^+ -типа при $R_{sn} < 20 \text{ Ом}/\square$.

На рисунке 2 приведены экспериментальные зависимости нормированной величины пропускания $T_n/(1 - R)^2/2$ от длины волны излучения для образцов с различными R_{sn} . Коэффициент $1/2$ учитывает наличие диффузионных слоев с двух сторон образца. Полученные результаты сравнивались с расчетными, полученными с использованием выражения (4). Проведенное сравнение показало, что зависимость (4) достаточно хорошо описывает экспериментальные данные, но с использованием для расчета различных значений коэффициента k_n и подвижности μ_n для образцов с разными значениями R_{sn} (таблица).

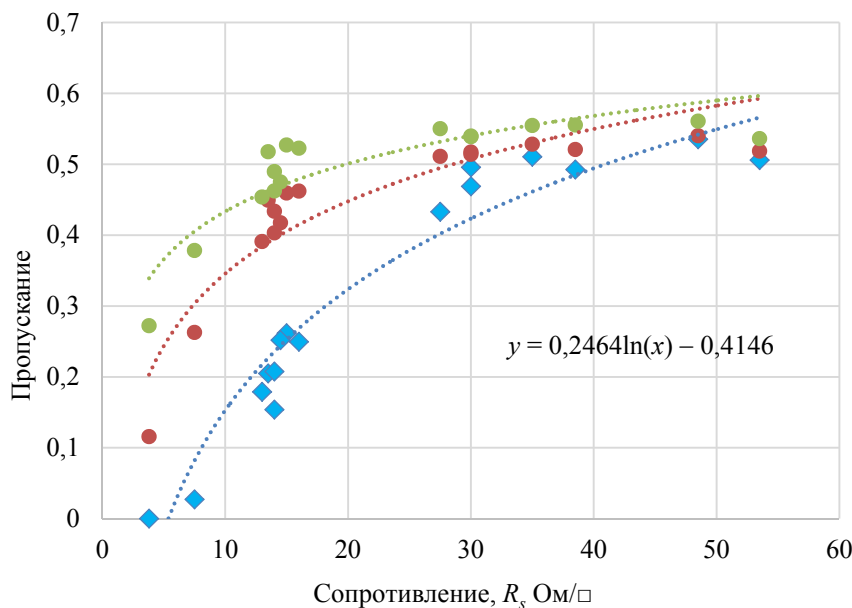


Рис. 1. Зависимости нормированных коэффициентов пропускания n^+ -слоев от их поверхностного сопротивления для излучения с длиной волны 1,33; 2 и 5 мкм

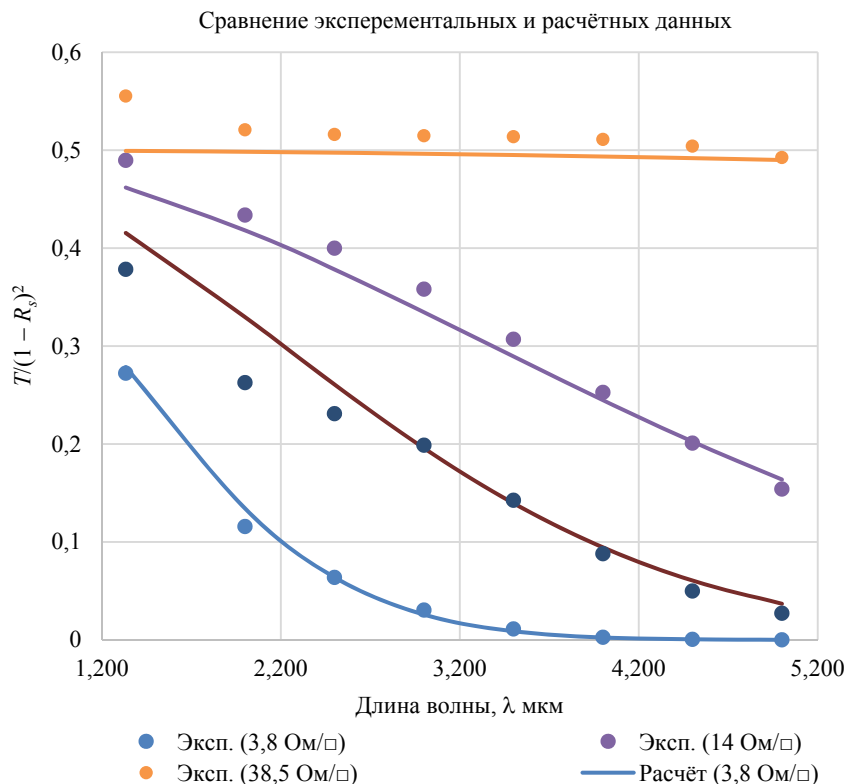


Рис. 2. Зависимости нормированных коэффициентов пропускания p^+ -слоев от длины волны излучения для образцов с поверхностным сопротивлением 3,8; 7,5; 14 и 38,5 Ом/□

Таблица

R_{sn} , Ом/□	n_s , см ⁻³	k_n	μ_n , см ² /В·с	μ_n , см ² /В·с, [6]
3,8	10^{21}	5×10^{-18}	25	20
7,5	$3,5 \times 10^{20}$	5×10^{-18}	40	40
14	10^{20}	5×10^{-18}	50	70
38,5	4×10^{19}	1×10^{-18}	200	90–100

Полученные данные для относительно высоких значений $R_{sn} > 38,5$ Ом/□ удовлетворительно согласуются с расчетом с использованием выражения (4) и результатами работы [2], в которой для расчета использовалось выражение (4) при постоянных значениях $k_n = 2,4 \times 10^{-18}$ и $\mu_n = 100$ см²/В·с для диапазона R_{sn} от 5 до 400 Ом/□. Однако, для низких значений R_{sn} для совпадения расчетных и экспериментальных данных необходимо использовать более низкие значения подвижности, что отмечается и в работе [2].

Данный результат можно объяснить резким снижением подвижности при увеличении концентрации фосфора в диапазоне 10^{20} – 10^{21} см⁻³ до 25–50 см²/В·с. Указанный диапазон концентраций соответствует поверхностным сопротивлениям $R_{sn} < 14$ Ом/□, что сле-

дует из приведенных в таблице данных для поверхностных концентраций n_s , полученных из графиков Ирвина [5] для распределения примеси при диффузии из неограниченного источника на глубину 3 мкм.

Большинство имеющихся литературных данных по подвижности в кремнии распространяются на концентрации до 10^{20} см⁻³ [4], что недостаточно для оценки значений подвижности в диффузионных слоях в нашем случае. Однако в работе [6] приведены расчетные и экспериментальные значения подвижности для диапазона концентраций 10^{19} – 5×10^{21} см⁻³, достаточно близкие к используемым в нашем расчете (таблица), что подтверждает обоснованность использования выражения (4) и принятых в расчетах значений подвижности для расчетов поглощения излучения в диффузионных слоях.

Выводы

1. Полученные экспериментальные зависимости пропускания кремниевых пластин с n^+ -слоями от величины поверхностного сопротивления в диапазоне 1,25–5 мкм качественно согласуются с теоретическими зависимостями для поглощения излучения на свободных носителях.

2. Значительное влияние поглощения в n^+ -слоях наблюдается при поверхностных сопротивлениях слоев менее 20 Ом/□.

3. Экспериментальные зависимости пропускания кремниевых пластин с заданным поверхностным сопротивлением n^+ -слоя от длины волны в диапазоне 1,25–5 мкм удовлетворительно описываются соотношением $T_n = \exp[-k_n(\mu_n)\lambda^2/R_{sn}]$ с переменным значени-

ем коэффициента $k_n(\mu_n)$, что свидетельствует о сильной зависимости подвижности в диффузионном слое от концентрации легирующей примеси в диапазоне концентраций 10^{20} – 10^{21} см⁻³.

ЛИТЕРАТУРА

1. Schroder K., Thovas R. N., Swarts J. C. / IEEE Transaction on electron devices. 1978. Vol. ED-25. № 2. P. 254–261.
2. Климанов Е. А., Давлетшин Р. В. / Прикладная физика. 2022. № 5. С. 38.
3. Смит Р. Полупроводники. – М.: Мир, 1982.
4. Bennett H. S. / Solid-State electronics. 1983. Vol. 26. P. 1157.
5. Irvin J. C. / Bell Syst. Tech. J. 1962. Vol. 41. P. 387–410.
6. Masetti G., Severi M., Solmi S. / IEEE Transaction on electron devices. 1983. Vol. TD-30. № 7. P. 764.

PACS: 85.60.-q

Absorption of IR radiation in silicon-based diffusion layers

D. S. Konorev¹, E. A. Klimanov², R. V. Davletshin² and E. A. Makarova²

¹ National University of Science and Technology “MISiS”
Bd. 1, 4 Leninsky Ave., Moscow, 119049, Russia

² Orion R&P Association, JSC
9 Kosinskaya st., Moscow, 111538, Russia

Received 7.11.2023; revised 23.11.2023; accepted 28.11.2023

The experimental data on transmissivity of heavily doped diffusion layers as function of there sheet resistance and wavelength of radiation with accounting free carrier absorbtion in in diffused layers are given. Its gives requirements to this layers parameters for reduce this effect on transmissivity. It is shown also, that silicon structure transmissivity data over 1.25 microns wavelength agree with theoretical results with accounting strong dependent free carrier mobilities on concentration doping impurities.

Keywords: Si, silicon, spectral transmission, free carriers, electron concentration, surface resistance.

DOI: 10.51368/1996-0948-2023-6-41-44

REFERENCES

1. Schroder K., Thovas R. N. and Swarts J. C., IEEE Transaction on electron devices **ED-25** (2), 254–261 (1978).
2. Klimanov E. A. and Davletshin R. V., Applied Physics, № 5, 38 (2022) [in Russian].
3. Smit R., Poluprovodniki, Moscow, Mir, 1982.
4. Bennett H. S., Solid-State electronics **26**, 1157 (1983).
5. Irvin J. C., Bell Syst. Tech. J. **41**, 387–410 (1962).
6. Masetti G., Severi M. and Solmi S., IEEE Transaction on electron devices **TD-30** (7), 764 (1983).