

обогащенной никелем лицевой приповерхностной области солнечных элементов. Эти результаты открывают новые перспективы для разработки более эффективных солнечных элементов.

Также следует утверждать, что легирование кремния никелем не только позволяет повысить эффективность СЭ, но и такой метод может быть широко использован практически во всех электронных приборах на основе кремния.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ССЫЛКИ

1. Solar cell efficiency tables (version 58) / Green M. [et al.] // Prog. Photovolt. Res. Appl. – 2021. – V. 29. – P. 657–667.
2. Чистохин, И.Б. Влияние условий формирования геттера в высокоомном кремнии на характеристики PIN-фотодиодов / И.Б. Чистохин, К.Б. Фрицлер // Письма в ЖТФ. – 2020. – Т. 46, № 21. – С. 11–13.
3. Influence of Nickel Impurity on the Operating Parameters of a Silicon Solar Cell / Kenzhaev, Z.T. [et al.] // Russ. Microelectron. – 2024. – V. 53, – P. 105–116.
4. Bakhadyrkhanov, M.K. Optimal Conditions for Nickel Doping to Improve the Efficiency of Silicon Photoelectric Cells / M.K. Bakhadyrkhanov, Z.T. Kenzhaev // Tech. Phys. – 2021. – Vol. 66, № 6. – P. 949–954.
5. Nickel: A very fast diffuser in silicon / J. Lindroos [et al.] // J. Appl. Phys. – 2013. – Vol. 113. – P. 204906:1–7.
6. McHugo, S.A. Gettering of metallic impurities in photovoltaic silicon / S.A. McHugo, H. Hieslmair, E.R. Weber // Appl. Phys. A. – 1997. – Vol. 64. – P. 127–137.
7. The Physical mechanisms of gettering properties of nickel clusters in silicon solar cells / Z.T. Kenzhaev [et. al.] / Physical Sciences and Technology. – 2024, – Vol. 11, № 1–2. P. 13–22.

ПОГЛОЩЕНИЕ ИК-ИЗЛУЧЕНИЯ ПЕРФОРИРОВАННЫМИ СТРУКТУРАМИ $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{Ti}/\text{Si}_3\text{N}_4$

С. В. Козодоев^{1,2}, А. И. Мухаммад¹, П. И. Гайдук¹

¹⁾ *Белорусский государственный университет, пр. Независимости, 4, 220030 Минск, Беларусь, e-mail: serikoz12345@gmail.com*

²⁾ *ОАО «Интеграл» - управляющая компания холдинга «Интеграл», ул. Казинца, 121А, 220108 Минск, Беларусь*

Методом конечных разностей во временной области рассчитаны спектры поглощения инфракрасного излучения структур $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{Ti}/\text{Si}_3\text{N}_4$ в зависимости от размеров их перфорации. Обнаружено, что для всех структур уровень поглощения составляет более 75 % во всём исследуемом диапазоне длин волн. Показан нелинейный характер зависимости уровня поглощения от диаметра цилиндрической перфорации. Установлено, что модификация профилированных структур $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{Ti}/\text{Si}_3\text{N}_4$ перфорацией может усиливать поглощение в диапазоне 8–8.4 мкм независимо от размера перфорации. Обнаружено, что усиление поглощения в диапазоне 11.2–13.2 мкм происходит в структурах с перфорацией диаметром 1 мкм.

Ключевые слова: перфорированные структуры; плазмонное поглощение; спектр поглощения.

IR ABSORPTION BY PERFORATED STRUCTURES $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{Ti}/\text{Si}_3\text{N}_4$

S. V. Kozodoev^{1,2}, A. I. Mukhammad¹, P. I. Gaiduk¹

¹⁾ Belarusian State University, Nezavisimosti av. 4, 220030 Minsk, Belarus,

²⁾ JSC «INTEGRAL» – «INTEGRAL» Holding Managing Company, 121A Kazintsy Street, 220108, Minsk, Belarus

Corresponding author: S. V. Kozodoev (serikoz12345@gmail.com)

The effect of cylindrical perforation size on infrared absorption spectra of $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{Ti}/\text{Si}_3\text{N}_4$ structures obtained by finite difference time domain spectroscopy is investigated. It is found that for all structures the absorption level is higher than 75 % in the entire studied wavelength range. Nonlinear dependence of absorption level on perforation diameter is shown. It is found that modification of profiled $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{Ti}/\text{Si}_3\text{N}_4$ structures by perforation can enhance absorption in the range of 8–8.4 μm regardless of perforation size. It is found that absorption enhancement in the range of 11.2–13.2 μm occurs in structures with perforation diameter of 1 μm .

Key words: perforated structures; plasmonic absorption; absorption spectrum.

ВВЕДЕНИЕ

Один из ключевых аспектов инфракрасных сенсоров – это способность эффективно поглощать излучение в инфракрасной области оптического спектра [1]. Благодаря внедрению микро- и наноразмерных металлических слоёв, расположенных в непосредственном контакте с диэлектрическими слоями, поглощение падающего излучения может быть усилено [2]. В таких структурах возникают плазмонные колебания, способствующие усилению поглощения в инфракрасном диапазоне [3]. Формируя металлические структуры с разной топологией, можно изменять вид и интенсивность кривых поглощения. Дополнительным методом модификации структур с целью улучшения поглощательной способности может служить формирование в них перфораций (отверстий), которые позволяют уменьшить отражение структур и тем самым усилить поглощение. В ходе теоретического исследования с использованием метода конечных разностей во временной области были изучены спектры поглощения перфорированных структур $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{Ti}/\text{Si}_3\text{N}_4$ и проанализировано влияние размера перфорации на уровень поглощения инфракрасного излучения в них.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

На рисунке 1 приведена схема исследованных в настоящей работе структур $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{Ti}/\text{Si}_3\text{N}_4$. Между слоями Si_3N_4 расположен слой Ti, выполненный в виде квадратных рамок размера L . Области внутри структур были заполнены Si_3N_4 , за исключением перфорированных областей, которые представляют собой цилиндрические отверстия в слоях Si_3N_4 , расположенные в центре рамок. Перфорированные структуры располагались на высоте 2.5 мкм над зеркально-отражающим слоем толщиной 0.1 мкм. В настоящей работе исследованы структуры со следующими параметрами: $H = 50$ нм, $h = 50$ нм, $L = 6$ мкм, $d = 1$ мкм, $D = 1,5$ мкм. Диаметр перфорации r составлял 1, 1.5 и 2 мкм.

Моделирование проводилось методом конечных разностей во временной области с использованием программного обеспечения FDTD Solutions [4]. Поглощающая

способность оценивалась как $I(\lambda) = 1 - R(\lambda) - T(\lambda)$, где $R(\lambda)$ доля отражённого излучения, а $T(\lambda)$ – доля прошедшего излучения. Оптические характеристики кремния, нитрида кремния, золота и титана были взяты из [5, 6]. Расчёты проводились с применением периодических граничных условий в плоскостях XZ и YZ, а в плоскости XY использовались поглощающие идеально согласованные слои (PML). Размер сетки в области структур составлял 10 нм, в области зеркальной поверхности – 50 нм, а во всех остальных областях – 100 нм. Излучение поступало перпендикулярно поверхности структур.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

На рисунке 2 приведены спектры поглощения структур $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{Ti}/\text{Si}_3\text{N}_4$ в зависимости от диаметра перфорации. Для сравнения приведен спектр поглощения структур без перфорации. Также на вставке рисунка 2 приведено распределение интенсивности поля для структур с перфорацией диаметром 1 мкм.

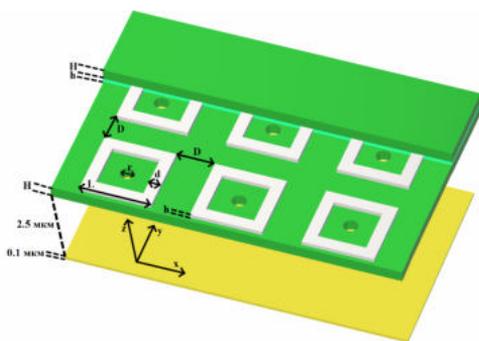


Рис. 1. Схема исследуемой структуры

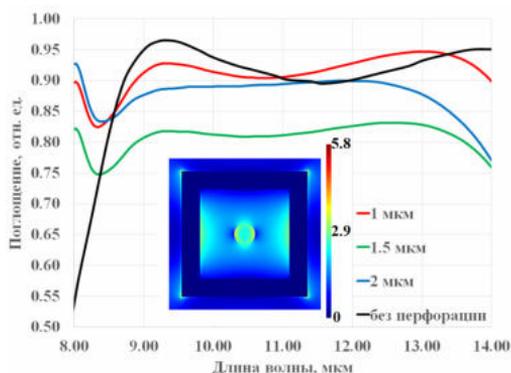


Рис. 2. Спектры поглощения структур $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{Ti}/\text{Si}_3\text{N}_4$ в зависимости от диаметра перфорации

Видно, что структуры обладают схожим поглощением с достаточно высокой интенсивностью ($> 75\%$) при отсутствии ярко выраженного пика поглощения. Наибольшим уровнем поглощения обладают структуры с диаметром перфорации 1 мкм, за исключением диапазона 8–8.5 мкм, в котором наибольшая интенсивность поглощения у структур с r равным 2 мкм. Увеличение диаметра перфорации с 1 до 1.5 мкм приводит к уменьшению интенсивности поглощения на 10–15% во всём исследуемом диапазоне, что можно объяснить уменьшением доли поглощенного излучения непосредственно в Si_3N_4 . Однако при большем диаметре отверстия ($r = 2$ мкм) наблюдается обратный эффект. Относительно 1.5 мкм перфорации уровень поглощения выше в среднем на 10%. Мы предполагаем, что подобный эффект может быть обусловлен взаимодействием поля, локализованного в отверстии с полем на внутренних сторонах рамок.

Можно наблюдать что перфорирование структур приводит к существенному (20–40%) росту поглощения в диапазоне 8–8.4 мкм относительно структуры без перфорирования. Подобный эффект может быть связан с уменьшением общей площади Si_3N_4 для которого характерно увеличение отражения в данном диапазоне [6].

Также интенсивность поглощения структур с перфорацией несколько выше (3–4 %) в случае $r = 1$ мкм в диапазоне 11.2–13.2 мкм. Это может быть связано с локализацией поля в отверстии, что и приводит к росту поглощения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, в работе представлены спектры поглощения перфорированных структур $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{Ti}/\text{Si}_3\text{N}_4$ рассчитанные методом конечных разностей во временной области. Показано что подобные структуры обладают высоким (> 75%) уровнем поглощения во всём исследованном диапазоне длин волн. Показано что наибольшим средним уровнем поглощения обладают структуры с диаметром перфорации 1 мкм. Установлено что интенсивность поглощения зависит от радиуса перфорации нелинейно. Установлено, что наличие перфорации увеличивает интенсивность поглощения в диапазоне 8–8.4 мкм.

Исследования выполнены в рамках проекта Государственной программы научных исследований «Фотоника и электроника для инноваций» (проект 3.1.2, № ГР 20212702).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ССЫЛКИ

1. Liu, Xiaochuan. (2022). Recent Progress on Infrared Detectors: Materials and Applications. Highlights in Science, Engineering and Technology. 27. 191–200.
2. Kebapci, Basak & Dervisoglu, Ozgecan & Battal, Enes & Okyay, Ali & Akin, Tayfun. (2014). Broadband absorption enhancement in an uncooled microbolometer infrared detector. Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering.
3. Erturk, O., Battal, E., Kucuk, S. E., Okyay, A. K. and Akin, T., “A plasmonically enhanced pixel structure for uncooled microbolometer detectors,” Proc. of SPIE 8704, 87041E (2013).
4. Nanophotonic FDTD Simulation Software [Electronic resource], Lumerical FDTD – Mode of access, <https://www.lumerical.com/products/fdtd>, Date of access: 04.2024.
5. K. Luke, Y. Okawachi, M. R. E. Lamont, A. L. Gaeta, M. Lipson. Opt. Lett., 40, N 21 (2015) 4823–4826.
6. E. D. Palik. Handbook of Optical Constants of Solids, 2, Academic Press (1985).

МОДИФИКАЦИЯ ФОТОЛЮМИНЕСЦЕНТНЫХ СВОЙСТВ ИОННО-СИНТЕЗИРОВАННЫХ НАНОКРИСТАЛЛОВ ОКСИДА ГАЛЛИЯ ПРИ ДОПОЛНИТЕЛЬНОМ ОБЛУЧЕНИИ ИОНАМИ

**Д. С. Королев, К. С. Матюнина, А. А. Никольская, Р. Н. Крюков,
А. А. Сушков, Д. И. Тетельбаум**

*Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского, пр. Гагарина, 23,
603022 Нижний Новгород, Россия, e-mail: dmkorolev@phys.unn.ru*

Исследованы структура и фотолюминесцентные свойства нанокристаллов оксида галлия, ионно-синтезированных в матрице SiO_2/Si . Показано, что светоизлучающие свойства определяются режимами ионного облучения и постимплантационного отжига. Исследование влияния дополнительного ионного облучения и последующего отжига продемонстрировало возможность управления светоизлучающих свойств путем вариации условий облучения и отжига.

Ключевые слова: оксид галлия; ионный синтез; ионное облучение; фотолюминесценция.