

УДК 535.343.2

ПЛАЗМОННОЕ ПОГЛОЩЕНИЕ ИНФРАКРАСНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В ПЕРИОДИЧЕСКИХ СТРУКТУРАХ Si/Si₃N₄/SiO₂/Si/Al С ОКОШЕЧНЫМ ПОВЕРХНОСТНЫМ СЛОЕМ

А. И. МУХАММАД¹⁾, О. Ю. НАЛИВАЙКО²⁾, В. В. КОЛОС²⁾, П. И. ГАЙДУК¹⁾

¹⁾Белорусский государственный университет, пр. Независимости, 4, 220030, г. Минск, Беларусь

²⁾«Интеграл» – управляющая компания холдинга «Интеграл»,
ул. Казинца, 121а, 220108, г. Минск, Беларусь

Методом инфракрасной фурье-спектрометрии получены спектры пропускания и отражения периодических структур Si/Si₃N₄/SiO₂/Si и Si/Si₃N₄/SiO₂/Si/Al с окошечным поверхностным слоем до и после проведения термического отжига. Экспериментальные спектры пропускания и поглощения исследованы в сравнении с теоретическими спектрами, рассчитанными с помощью метода конечных разностей во временной области. Отмечена хорошая

Образец цитирования:

Мухаммад АИ, Наливайко ОЮ, Колос ВВ, Гайдук ПИ. Плазмонное поглощение инфракрасного излучения в периодических структурах Si/Si₃N₄/SiO₂/Si/Al с окошечным поверхностным слоем. *Журнал Белорусского государственного университета. Физика*. 2024;1:49–56.
EDN: BTVMYJ

For citation:

Mukhammad AI, Nalivaiko OYu, Kolos VV, Gaiduk PI. Plasmon absorption of infrared radiation in periodic structures Si/Si₃N₄/SiO₂/Si/Al with window surface layer. *Journal of the Belarusian State University. Physics*. 2024;1:49–56. Russian.
EDN: BTVMYJ

Авторы:

Асия Имрановна Мухаммад – аспирантка кафедры физической электроники и нанотехнологий факультета радиоп физики и компьютерных технологий. Научный руководитель – П. И. Гайдук.

Олег Юрьевич Наливайко – кандидат технических наук; заместитель главного технолога.

Владимир Владимирович Колос – кандидат физико-математических наук; заместитель заведующего отраслевой лабораторией новых технологий и материалов.

Петр Иванович Гайдук – доктор физико-математических наук, доцент; профессор кафедры физической электроники и нанотехнологий факультета радиоп физики и компьютерных технологий.

Authors:

Asiya I. Mukhammad, postgraduate student at the department of physical electronics and nanotechnologies, faculty of radio-physics and computer technologies.

rect.muhammadail@bsu.by

Oleg Yu. Nalivaiko, PhD (engineering); deputy chief technologist.

onalivaiko@integral.by

Vladimir V. Kolos, PhD (physics and mathematics); deputy head of the laboratory of new technologies and materials.

vvkolos@integral.by

Peter I. Gaiduk, doctor of science (physics and mathematics), docent; professor at the department of physical electronics and nanotechnologies, faculty of radiophysics and computer technologies.

gaiduk@bsu.by

корреляция теоретических и экспериментальных спектров пропускания. Обнаружено, что после проведения термического отжига коэффициент пропускания структур снижается на 5–20 %. Продемонстрировано, что осаждение на обратную сторону структуры пленки алюминия толщиной 90 нм не влияет на коэффициент пропускания неотожженной структуры, но более чем на 20 % уменьшает коэффициент пропускания отоженной структуры. Показано, что интенсивность поглощения структуры n^+ -Si/poly-Si/Si₃N₄/SiO₂/Si/Al не опускается ниже 70 % в диапазоне длин волн 2,5–9,0 мкм, при этом интенсивность пика поглощения на длине волны 4,3 мкм составляет 87 %. Установлено, что появление в спектрах поглощения отоженной структуры пиков поглощения на длинах волн 4,3 и 8,0 мкм может быть связано с возникновением плазмонных эффектов из-за периодичности структуры.

Ключевые слова: плазмонное поглощение; периодические структуры; спектры поглощения; фурье-спектроскопия; легированный кремний.

Благодарность. Работа выполнена при финансовой поддержке Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований (грант № T22-030).

PLASMON ABSORPTION OF INFRARED RADIATION IN PERIODIC STRUCTURES Si/Si₃N₄/SiO₂/Si/Al WITH WINDOW SURFACE LAYER

A. I. MUKHAMMAD^a, O. Yu. NALIVAICO^b, V. V. KOLOS^b, P. I. GAIDUK^a

^aBelarusian State University, 4 Niezaliezhnasci Avenue, Minsk 220030, Belarus

^b«Integral» – Holding Management Company, 121a Kazinca Street, Minsk 220108, Belarus

Corresponding author: A. I. Mukhammad (rct.muhammadai1@bsu.by)

Transmission and reflection spectra of periodic window structures Si/Si₃N₄/SiO₂/Si and Si/Si₃N₄/SiO₂/Si/Al before and after thermal annealing were obtained using Fourier transform infrared spectrometry. Experimental transmission and absorption spectra were studied in comparison with theoretical ones. Theoretical spectra were calculated using the finite difference time domain method. The theoretical transmission spectra are in good correlation with the experimental ones. It was found that after thermal annealing, the transmission level of the structure drops by 5–20 %. It has been shown that deposition of a 90 nm thick aluminium film on the back side of the structure does not affect the transmission level of the structure without annealing, but reduces the transmission level of the annealed structure by more than 20 %. It was noted that the absorption intensity of the n^+ -Si/poly-Si/Si₃N₄/SiO₂/Si/Al structure does not fall below 70 % in the wavelength range of 2.5–9.0 μm. In this case, the intensity of the absorption peak at a wavelength of 4.3 μm is 87 %. It has been established that the appearance of absorption peaks at wavelengths of 4.3 and 8.0 μm in the absorption spectra of the annealed structure can be associated with the manifestation of plasmonic effects arising due to the periodicity of the structure.

Keywords: plasmonic absorption; periodic structures; absorption spectra; Fourier spectroscopy; doped silicon.

Acknowledgements. This work was carried out with financial support of the Belarusian Republican Foundation for Fundamental Research (grant No. T22-030).

Введение

Недорогое производство поглотителей излучения в среднем и дальнем инфракрасных диапазонах имеет важное значение для изготовления различных устройств – от тепловизоров до инфракрасных датчиков [1]. В последние годы были предложены материалы и структуры, эффективно поглощающие излучение в инфракрасной области спектра. Среди них особый интерес представляют метаматериалы, которые могут быть спроектированы как совершенные поглотители [2; 3]. В этом случае отражение и пропускание практически полностью подавляются, что приводит к почти идеальному поглощению [4]. Кроме того, поглотители из метаматериалов обычно имеют толщину в диапазоне 0,5–3,0 мкм, что дает возможность изготавливать тонкие и легкие неохлаждаемые микроболометры [2; 4]. Для повышения эффективности поглощения используются поверхностные или локализованные плазмоны [2; 5; 6]. Такие поглотители обычно состоят из трех слоев: периодически структурированного проводящего (металлического) поверхностного слоя, диэлектрического промежуточного слоя и сплошного проводящего (металлического) слоя. Решающее значение при проектировании поглотителя имеет структурированный поверхностный слой, поскольку его можно настроить таким образом, чтобы он обеспечивал практически нулевое отражение в нужном диапазоне длин волн [5]. Поверхностный слой может представлять собой

периодически расположенные островки как тривиальной (квадратной, цилиндрической), так и сложной (например, дендритоподобной или пирамидальной) формы, а также вытравленные в сплошном слое окошки указанных форм [2–6]. Влияние периода расположения окошек (островков) поверхностного слоя на спектр поглощения структуры было предметом исследования разных авторских групп [2; 5; 6], но в большинстве схожих структур период расположения окошек (островков) сопоставим с исследуемым диапазоном длин волн. Промежуточный слой диэлектрика используется для создания двух отдельных границ раздела проводящий слой – диэлектрик, на которых могут поддерживаться плазмонные колебания [5].

В области ближнего и среднего инфракрасных диапазонов как проводящие слои в поглощающих структурах могут использоваться слои высоколегированных полупроводников, например кремния [1; 2; 5–8]. Применение сильнолегированного кремния ($1 \cdot 10^{19} - 1 \cdot 10^{21} \text{ см}^{-3}$) в качестве плазмонного материала было исследовано разными авторами, которые подтвердили его плазмонные свойства в инфракрасной области спектра [5–8]. Изменяя уровень легирования кремния, можно изменять его плазменную частоту и за счет этого настраивать частоту плазмонного резонанса в нужном диапазоне длин волн [7; 8]. Сплошной проводящий слой используется как для минимизации уровня пропускания всей поглощающей структуры, так и для увеличения уровня ее поглощения благодаря поверхностным плазмонам, которые распространяются на границе раздела с диэлектрическим слоем.

В настоящей работе методом инфракрасной фурье-спектроскопии исследованы спектры пропускания, отражения и поглощения периодических структур $\text{Si}/\text{Si}_3\text{N}_4/\text{SiO}_2/\text{Si}$ и $\text{Si}/\text{Si}_3\text{N}_4/\text{SiO}_2/\text{Si}/\text{Al}$ с окошечным поверхностным слоем, а также рассчитаны теоретические спектры пропускания и поглощения этих структур.

Материалы и методы исследования

В качестве исходных подложек использовались пластины монокристаллического кремния марки КДБ-10. После стандартной операции химической очистки в смеси Каро и перекисно-аммиачном растворе методом пиролитического окисления на подложке был выращен слой диоксида кремния (SiO_2) толщиной 160 нм. Затем методом химического осаждения из газовой фазы при активации индуктивно связанной плазмой на установке STE ICP200D (*SemiTEq*, Россия) последовательно наносились слои нитрида кремния (Si_3N_4) толщиной 150 нм и слой поликристаллического кремния (poly-Si) толщиной 840 нм. Легирование слоя поликристаллического кремния проводилось путем имплантации ионов мышьяка с энергией 60 кэВ до концентрации $3,1 \cdot 10^{15}$ ионов на 1 см^2 . Для формирования периодической структуры применялась технология традиционной фотолитографии с последующим плазмохимическим травлением. В поверхностном слое кремния до слоя Si_3N_4 вытравливались квадратные окошки размером $a = 4 \text{ мкм}$ с периодом расположения $P = 8 \text{ мкм}$. После этого подложка образцов стравливалась с одной стороны в смеси азотной и плавиковой кислот до толщины около 1500 нм. Модель структуры после осаждения всех слоев и фотолитографии представлена на рис. 1, а. На рис. 1, б, приведена микрофотография поверхностного слоя сформированной структуры с размером окошек 2 мкм и периодом их расположения 6 мкм, полученная с помощью растрового электронного микроскопа (РЭМ). Для активации примеси и кристаллизации аморфизированного слоя кремния образцы исследуемых структур подвергались термическому отжигу в атмосфере азота при температуре 1000 °С в течение 10 мин. На обратную сторону части образцов методом термического осаждения на вакуумном посту ВУП-5 (*Selmi*, Украина) наносилась пленка алюминия толщиной 90 нм.

Спектры пропускания и отражения образцов исследуемых структур $\text{Si}/\text{Si}_3\text{N}_4/\text{SiO}_2/\text{Si}$ и $\text{Si}/\text{Si}_3\text{N}_4/\text{SiO}_2/\text{Si}/\text{Al}$ измерялись в диапазоне длин волн 2–25 мкм с помощью инфракрасного фурье-спектрометра Spectrum-3 Optica (*PerkinElmer*, США). Спектры пропускания снимались с диафрагмой 2 мм, накоплением 1 мин и разрешением 4 см^{-1} . Для регистрации спектров отражения применялась приставка зеркального отражения с углом падения луча 80°. Спектры отражения снимались с диафрагмой 2 мм, накоплением 2 мин и разрешением 4 см^{-1} . Экспериментальные спектры поглощения рассчитывались на основе измеренных спектров отражения и пропускания по формуле $A(\lambda) = 100 - R(\lambda) - T(\lambda)$, где $A(\lambda)$, $R(\lambda)$, $T(\lambda)$ – доля (в процентах) поглощенного, отраженного и прошедшего излучений соответственно.

Теоретические спектры пропускания, отражения и поглощения были получены с применением метода конечных разностей во временной области (*finite difference time domain*, FDTD) в программе *FDTD Solution*¹ [9; 10]. В процессе моделирования над и под структурой использовались граничные условия идеально согласованных слоев (*perfectly matched layer*, PML). Такие слои поглощают все падающее на них излучение, что позволяет избежать появления отраженного излучения, связанного с наличием границ. В остальных случаях использовались периодические граничные условия, поскольку исследуемая структура имела периодический поверхностный слой, в процессе моделирования проводился расчет спектров пропускания, отражения и поглощения для одного периода² [10]. Моделирование выполнялось

¹Lumerical FDTD Solutions // Lumerical Solutions Inc. : website. Vancouver, 2003–2020. URL: <https://www.lumerical.com/products/fdtd/> (date of access: 05.01.2020).

²Ibid.

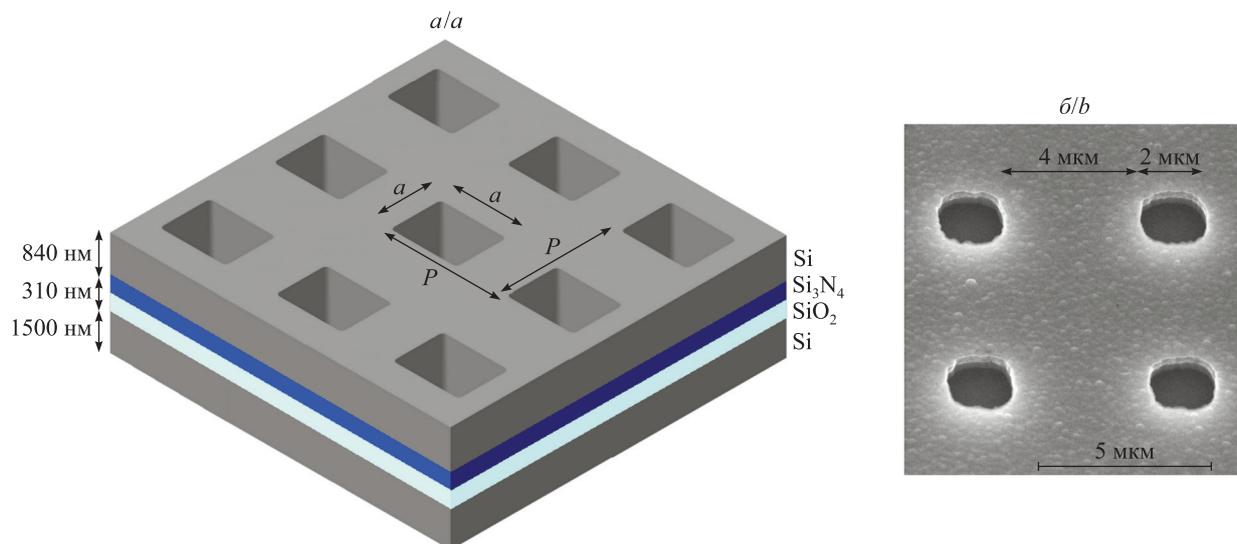


Рис. 1. Модель исследуемой структуры (а) и РЭМ-изображение поверхности структуры Si/Si₃N₄/SiO₂/Si с размером окошек 2 мкм и периодом их расположения 6 мкм (б)

Fig. 1. Model of the simulated structure (a) and scanning electron microscopy image of the surface of the Si/Si₃N₄/SiO₂/Si structure with a window size of 2 μm and a window period of 6 μm (b)

в диапазоне длин волн 2,5–25,0 мкм, шаг сетки в области структуры составлял 5 нм. Области, прилегающие к структуре, считались заполненными воздухом. Шаг сетки в этих областях составлял 50 нм. Интенсивность поглощения рассчитывалась в соответствии с соотношением $A(\lambda) + R(\lambda) + T(\lambda) = 1$, где $A(\lambda)$, $R(\lambda)$, $T(\lambda)$ – доля поглощенного, отраженного и прошедшего излучений соответственно. Коэффициент преломления и коэффициент экстинкции аморфного и поликристаллического кремния, нитрида и диоксида кремния взяты в работах [11; 12]. Диэлектрическая проницаемость слоев кремния с различной степенью легирования рассчитана с помощью модели Друде – Лоренца, описывающей поведение свободных электронов в металле или полупроводнике [7–9].

Результаты и их обсуждение

На рис. 2 приведено сравнение экспериментальных и теоретических спектров пропускания структур Si/Si₃N₄/SiO₂/Si до и после термического отжига. Поскольку ионная имплантация приводит к аморфизации приповерхностного слоя [13], окошечный поверхностный слой структуры до термического отжига состоял из двух подслоев: подслоя poly-Si толщиной около 690 нм и подслоя *a*-Si толщиной около 150 нм (см. рис. 2, а). При проведении термического отжига происходят рекристаллизация аморфного слоя и электрическая активация имплантированной примеси [13]. Поверхностный слой структуры после отжига включал подслой *n*⁺-Si толщиной около 740 нм и подслой poly-Si толщиной около 100 нм (см. рис. 2, б).

На рис. 2, а, б, заметна хорошая корреляция теоретических и экспериментальных спектров пропускания исследуемых структур. Некоторые расхождения наблюдаются в диапазоне длин волн около 2,5–7,0 мкм: коэффициент пропускания в теоретических спектрах на 5–15 % больше, чем в экспериментальных. Несмотря на расхождение в интенсивности, положение пиков пропускания и полос поглощения для теоретических и экспериментальных кривых пропускания, приведенных на рис. 2, совпадает. В диапазоне длин волн 7–25 мкм экспериментальные и теоретические спектры пропускания как отожженной, так и неотожженной структуры ведут себя практически идентично. В диапазоне длин волн 8,5–10,0 мкм в спектрах пропускания как отожженной, так и неотожженной структуры наблюдается резкое уменьшение коэффициента пропускания, при этом в спектре пропускания структуры после термического отжига это уменьшение более заметно. Вероятно, расхождения наблюдаются из-за того, что фотолитография может обеспечить результаты только с некоторой точностью. Например, при травлении углы скруляются (см. рис. 1, б), при этом точно предсказать форму полученных окошек практически невозможно [2]. Из-за неидеальности формы окошек после травления их размер может отличаться на десятки нанометров, что в ряде случаев приводит к уширению некоторых пиков пропускания и полос поглощения. После травления подложки в смеси кислот толщина оставшегося слоя Si также может отличаться.

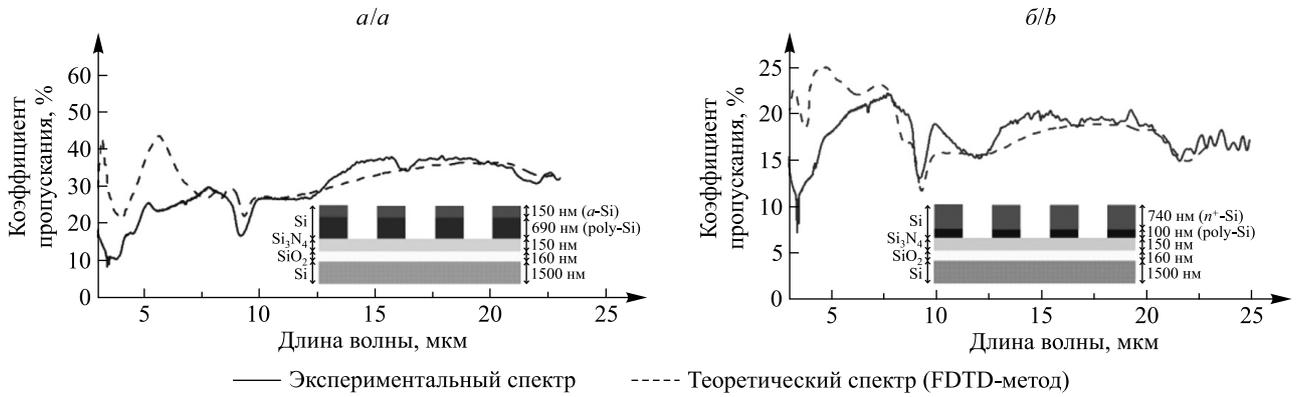


Рис. 2. Сравнение экспериментальных и теоретических спектров пропускания структур a -Si/poly-Si/Si₃N₄/SiO₂/Si (a) и n^+ -Si/poly-Si/Si₃N₄/SiO₂/Si (b)

Fig. 2. Comparison of experimental and theoretical transmission spectra of the structures a -Si/poly-Si/Si₃N₄/SiO₂/Si (a) and n^+ -Si/poly-Si/Si₃N₄/SiO₂/Si (b)

На рис. 3 представлены экспериментальные спектры пропускания структур Si/Si₃N₄/SiO₂/Si и Si/Si₃N₄/SiO₂/Si/Al до и после термического отжига (пленка алюминия осаждалась уже после отжига исходной структуры). Из рис. 3 видно, что неотожженные структуры (a -Si/poly-Si/Si₃N₄/SiO₂/Si и a -Si/poly-Si/Si₃N₄/SiO₂/Si/Al) пропускают в среднем на 10–20 % больше, чем отожженные структуры (n^+ -Si/poly-Si/Si₃N₄/SiO₂/Si и n^+ -Si/poly-Si/Si₃N₄/SiO₂/Si/Al), практически во всем исследованном диапазоне длин волн. Различий между спектрами пропускания структур a -Si/poly-Si/Si₃N₄/SiO₂/Si и a -Si/poly-Si/Si₃N₄/SiO₂/Si/Al не выявлено. Коэффициент пропускания для обеих структур возрастает с 10 % на длине волны 3,5 мкм до 35 % на длине волны 20 мкм с небольшими провалами на длинах волн 9,5; 12,5; 16,5 мкм.

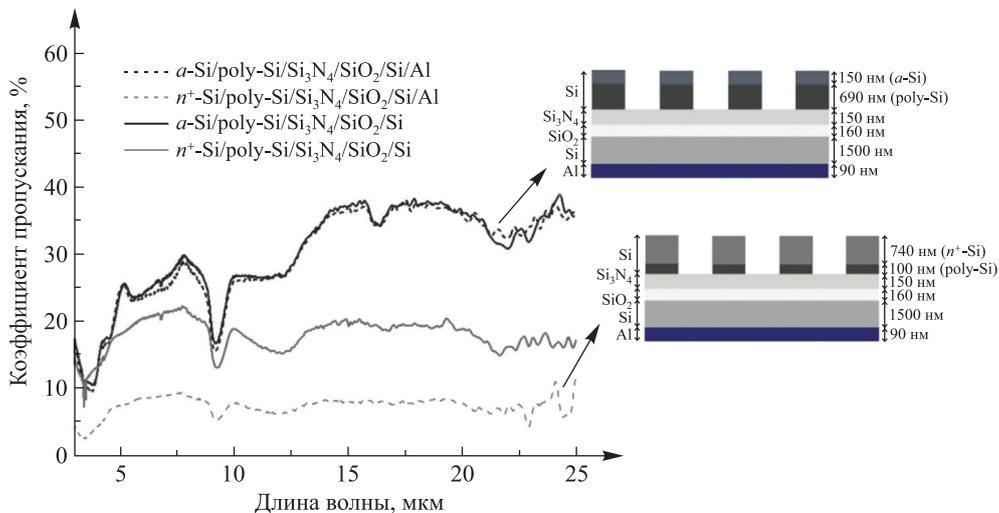


Рис. 3. Экспериментальные спектры пропускания структур Si/Si₃N₄/SiO₂/Si и Si/Si₃N₄/SiO₂/Si/Al до и после термического отжига

Fig. 3. Experimental transmission spectra of the structures Si/Si₃N₄/SiO₂/Si and Si/Si₃N₄/SiO₂/Si/Al before and after thermal annealing

Кривая поглощения структуры n^+ -Si/poly-Si/Si₃N₄/SiO₂/Si ведет себя схожим образом с кривой поглощения структуры a -Si/poly-Si/Si₃N₄/SiO₂/Si, но пропускает меньше, чем структура до проведения термического отжига: различие между ними в диапазоне длин волн 5–10 мкм составляет в среднем 5 %, а в диапазоне длин волн 10–25 мкм увеличивается до 15–20 %. Несколько иначе ведет себя структура n^+ -Si/poly-Si/Si₃N₄/SiO₂/Si/Al, коэффициент пропускания которой практически во всем исследованном диапазоне длин волн находится в пределах около 7–8 %, за исключением небольших провалов на длинах волн 3,0; 9,5; 12,5 мкм. Кривая поглощения этой структуры значительно отличается от рассмотренных выше кривых.

На рис. 4 представлены экспериментальные спектры поглощения структур Si/Si₃N₄/SiO₂/Si и Si/Si₃N₄/SiO₂/Si/Al после проведения термического отжига. На выносном рисунке приведены экспе-

риментальный и теоретический спектры поглощения структуры $\text{Si}/\text{Si}_3\text{N}_4/\text{SiO}_2/\text{Si}/\text{Al}$ после термического отжига, а также экспериментальные спектры пропускания и отражения этой структуры. Кривая пропускания после небольшого подъема до 15 % в диапазоне длин волн 2–3 мкм остается на уровне 3–9 % во всем исследованном диапазоне длин волн. Кривая отражения не поднимается выше 30 %, а на длине волны 5 мкм наблюдается провал до 7 %.

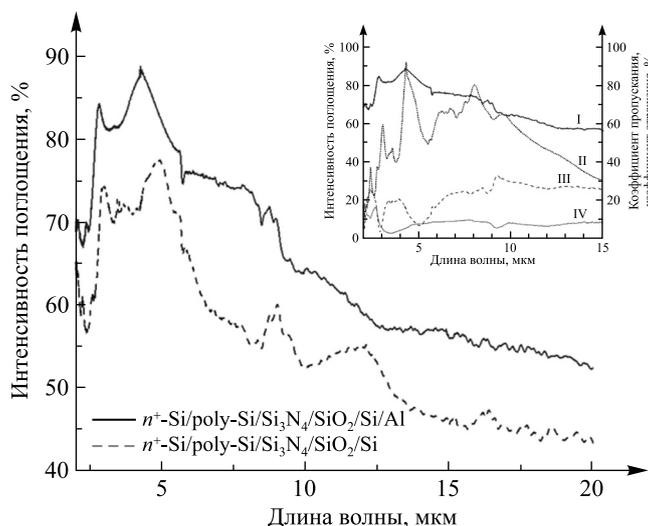


Рис. 4. Экспериментальные спектры поглощения структур $\text{Si}/\text{Si}_3\text{N}_4/\text{SiO}_2/\text{Si}$ и $\text{Si}/\text{Si}_3\text{N}_4/\text{SiO}_2/\text{Si}/\text{Al}$ после термического отжига. На выносном рисунке приведены экспериментальный (I) и теоретический (II) спектры поглощения структуры $\text{Si}/\text{Si}_3\text{N}_4/\text{SiO}_2/\text{Si}/\text{Al}$, а также экспериментальные спектры отражения (III) и пропускания (IV) этой структуры

Fig. 4. Experimental absorption spectra of the structures $\text{Si}/\text{Si}_3\text{N}_4/\text{SiO}_2/\text{Si}$ and $\text{Si}/\text{Si}_3\text{N}_4/\text{SiO}_2/\text{Si}/\text{Al}$ after thermal annealing. External figure shows experimental (I) and theoretical (II) absorption spectra of the $\text{Si}/\text{Si}_3\text{N}_4/\text{SiO}_2/\text{Si}/\text{Al}$ structure, as experimental reflection (III) and transmission (IV) spectra of this structure

Кривые поглощения, представленные на рис. 4, ведут себя схожим образом, при этом структура с дополнительным слоем алюминия поглощает в среднем на 10 % больше во всем исследованном диапазоне длин волн. Для обоих спектров характерен пик поглощения небольшой интенсивности на длине волны 2,8–3,2 мкм. В диапазоне длин волн 2–3 мкм наблюдается резкий рост интенсивности поглощения (практически на 20 %): с 57 до 73 % для структуры $n^+\text{-Si/poly-Si/Si}_3\text{N}_4/\text{SiO}_2/\text{Si}$ и с 67 до 84 % для структуры $n^+\text{-Si/poly-Si/Si}_3\text{N}_4/\text{SiO}_2/\text{Si}/\text{Al}$. В спектре поглощения структуры $n^+\text{-Si/poly-Si/Si}_3\text{N}_4/\text{SiO}_2/\text{Si}/\text{Al}$ основной пик поглощения расположен в диапазоне длин волн 3,5–5,0 мкм. Этот пик имеет симметричную треугольную форму и достигает наибольшей интенсивности (87 %) на длине волны 4,3 мкм, после чего интенсивность поглощения падает до 75 % на длине волны 6 мкм. На длине волны около 8 мкм наблюдается широкая полоса поглощения с небольшой интенсивностью (75 %). Затем кривая поглощения медленно убывает до интенсивности 55 % на длине волны 20 мкм, кроме диапазона длин волн 8,5–9,5 мкм, где интенсивность поглощения возрастает до 74 %. В целом интенсивность поглощения структуры $n^+\text{-Si/poly-Si/Si}_3\text{N}_4/\text{SiO}_2/\text{Si}/\text{Al}$ не опускается ниже 80 % в диапазоне длин волн 2,6–5,3 мкм и 70 % в диапазоне длин волн 2,5–9,0 мкм.

Основной пик в спектре поглощения структуры $n^+\text{-Si/poly-Si/Si}_3\text{N}_4/\text{SiO}_2/\text{Si}$ немного сдвинут в более длинноволновую область относительно основного пика в спектре поглощения структуры $n^+\text{-Si/poly-Si/Si}_3\text{N}_4/\text{SiO}_2/\text{Si}/\text{Al}$. Он располагается в диапазоне длин волн 4,3–5,5 мкм и достигает наибольшей интенсивности (75 %) на длине волны 5 мкм. После этого интенсивность поглощения резко падает до 55 % на длине волны 8 мкм. Как и в спектре поглощения структуры $n^+\text{-Si/poly-Si/Si}_3\text{N}_4/\text{SiO}_2/\text{Si}/\text{Al}$, в диапазоне длин волн 8,5–9,5 мкм присутствует полоса поглощения с максимальной интенсивностью 60 % на длине волны 9 мкм. Также полоса поглощения с небольшой интенсивностью имеется в диапазоне длин волн 10–13 мкм, что не наблюдается в спектре поглощения структуры $n^+\text{-Si/poly-Si/Si}_3\text{N}_4/\text{SiO}_2/\text{Si}/\text{Al}$.

Сравнительный анализ теоретического и экспериментального спектров поглощения структуры $n^+\text{-Si/poly-Si/Si}_3\text{N}_4/\text{SiO}_2/\text{Si}/\text{Al}$ (см. рис. 4, выносной рисунок) показывает неплохую корреляцию положений пиков поглощения. Однако интенсивность поглощения в теоретическом спектре меньше практически во всем исследованном диапазоне длин волн. Это может быть связано с методикой травления, при которой подложка стравливается неравномерно, что и увеличивает интенсивность поглощения. В теоретическом спектре поглощения структуры $n^+\text{-Si/poly-Si/Si}_3\text{N}_4/\text{SiO}_2/\text{Si}/\text{Al}$ также хорошо заметны

пики поглощения на длинах волн 3,0; 4,3; 8,0 мкм, при этом пик поглощения в диапазоне длин волн 7,5–8,5 мкм более выражен, чем полоса поглощения в данном диапазоне в экспериментальном спектре: его интенсивность достигает практически 80 % на длине волны 8 мкм.

Часть пиков кривых пропускания и полос поглощения в спектрах пропускания, представленных на рис. 3, вероятнее всего, объясняются наличием в структуре диэлектрических слоев диоксида и нитрида кремния. Для всех приведенных выше спектров поглощения характерно наличие полосы поглощения в диапазоне длин волн 9,0–9,5 мкм. В этом диапазоне проявляется поглощение в слое диоксида кремния [8; 14]. На длине волны 12,5 мкм наблюдаются колебания мостиковых групп Si—O—Si [14]. Во всех приведенных на рис. 3 спектрах пропускания можно увидеть провал в данном диапазоне. Однако наиболее заметно поглощение в районе 12,5 мкм в спектре поглощения структуры n^+ -Si/poly-Si/Si₃N₄/SiO₂/Si, приведенном на рис. 4. Полочки на длине волны 11,5 мкм в спектрах пропускания, представленных на рис. 2 и 3, могут быть связаны с валентными колебаниями связей Si—N в слое нитрида кремния [15].

Уменьшение коэффициента пропускания в структуре после отжига (n^+ -Si/poly-Si/Si₃N₄/SiO₂/Si) по сравнению со структурой до отжига, вероятно, можно объяснить появлением в поверхностном слое сильнопроводящего подслоя. Поскольку термический отжиг после ионной имплантации приводит к уменьшению слоевого сопротивления, а следовательно, к увеличению удельной проводимости, авторы настоящей статьи предполагают, что в окошечном поверхностном слое структур n^+ -Si/poly-Si/Si₃N₄/SiO₂/Si и n^+ -Si/poly-Si/Si₃N₄/SiO₂/Si/Al могут возникать плазмонные колебания, которые в совокупности с поглощением на свободных носителях уменьшают уровень пропускания [2; 6; 8; 9; 16; 17]. Заметное уменьшение коэффициента пропускания структуры n^+ -Si/poly-Si/Si₃N₄/SiO₂/Si после осаждения слоя алюминия можно связать с отражением волн от этого слоя, как от зеркала [4; 5].

Поскольку размер окошек поверхностного слоя составляет 4 мкм, резкое уменьшение коэффициента пропускания на длине волны около 3–5 мкм для всех исследованных структур может быть связано с возникновением плазмонных колебаний в этих окошках [6; 8]. Также на длине волны, равной периоду расположения окошек поверхностного слоя, у отожженных структур, в отличие от неотожженных, наблюдается небольшая полочка в кривой пропускания. В спектрах поглощения, приведенных на рис. 4, пик поглощения с наибольшей интенсивностью находится на длине волны 4,3 мкм для структуры после термического отжига и на длине волны 5 мкм для структуры до термического отжига. Этот пик, вероятнее всего, связан с возникновением плазмонных колебаний в вытравленных окошках [6; 16]. Пик поглощения на длине волны 8 мкм, интенсивность которого в теоретическом спектре поглощения больше, чем в экспериментальном, также, по-видимому, связан с возникновением в окошечном поверхностном слое плазмонных колебаний из-за периодичности структуры [8; 9; 15; 16].

Заключение

Таким образом, в работе были исследованы экспериментальные спектры пропускания, отражения и поглощения периодических структур Si/Si₃N₄/SiO₂/Si и Si/Si₃N₄/SiO₂/Si/Al с окошечным поверхностным слоем до и после термического отжига. Показано, что теоретические спектры пропускания, рассчитанные с помощью FDTD-метода, демонстрируют хорошую корреляцию с экспериментальными спектрами. После проведения термического отжига коэффициент пропускания структуры падает на 5–20 %, при этом поведение спектров пропускания изменяется несильно. Осаждение на обратную сторону структуры пленки алюминия не влияет на коэффициент пропускания неотожженной структуры и в то же время значительно (более чем на 20 %) уменьшает коэффициент пропускания отожженной структуры, что может быть связано с возникновением в поверхностном слое специфических плазмонных колебаний. Отмечено, что интенсивность поглощения структуры n^+ -Si/poly-Si/Si₃N₄/SiO₂/Si/Al не опускается ниже 70 % в диапазоне шириной около 7 мкм (2,5–9,0 мкм), при этом интенсивность пика поглощения на длине волны 4,3 мкм составляет 87 %. Установлено, что появление в спектрах поглощения отожженной структуры пиков поглощения на длинах волн 4,3 и 8,0 мкм может быть связано с возникновением плазмонных эффектов из-за периодичности структуры.

Библиографические ссылки

1. Chen Cheng, Liu Yanhua, Jiang Zhou-ying, Shen Chong, Zhang Ye, Zhong Fan, et al. Large-area long-wave infrared broadband all-dielectric metasurface absorber based on maskless laser direct writing lithography. *Optics Express*. 2022;30(8):13391–13403. DOI: 10.1364/OE.447783.
2. Wang Ben-Xin, Xu Chongyang, Duan Guiyuan, Xu Wei, Pi Fuwei. Review of broadband metamaterial absorbers: from principles, design strategies, and tunable properties to functional applications. *Advanced Functional Materials*. 2023;33(14):2213818. DOI: 10.1002/adfm.202213818.
3. Ogawa S, Kimata M. Metal-insulator-metal-based plasmonic metamaterial absorbers at visible and infrared wavelengths: a review. *Materials*. 2018;11(3):458. DOI: 10.3390/ma11030458.
4. Zhou Y, Qin Z, Liang Z, Meng D, Xu H, Smith DR, et al. Ultra-broadband metamaterial absorbers from long to very long infrared regime. *Light: Science and Applications*. 2021;10:138. DOI: 10.1038/s41377-021-00577-8.

5. Yu P, Besteiro LV, Huang Y, Wu J, Fu L, Tan HH, et al. Broadband metamaterial absorbers. *Advanced Optical Materials*. 2019; 7(3):1800995. DOI: 10.1002/adom.201800995.
6. Desouky M, Mahmoud AM, Swillam MA. Silicon based mid-IR super absorber using hyperbolic metamaterial. *Scientific Reports*. 2018;8:2036. DOI: 10.1038/s41598-017-18737-5.
7. Taliercio T, Biagioni P. Semiconductor infrared plasmonics. *Nanophotonics*. 2019;8(6):949–990. DOI: 10.1515/nanoph-2019-0077.
8. Мухаммад АИ, Гайдук ПИ. Влияние толщины *n*-Si подложки и уровня ее легирования на поглощающие свойства кремниевых плазмонных структур в инфракрасном диапазоне. *Журнал прикладной спектроскопии*. 2021;88(6):887–894. DOI: 10.47612/0514-7506-2021-88-6-887-894.
9. Mukhammad AI, Chizh KV, Plotnichenko VG, Yuryev VA, Gaiduk PI. Plasmonic-enhanced light absorption in periodic silicon structures: the effect of inter-island distance. *Semiconductors*. 2020;54(14):1889–1892. DOI: 10.1134/S1063782620140201.
10. Кошелев ИР, Мухаммад АИ, Гайдук ПИ. Моделирование плазмонного резонанса в периодических многослойных структурах на основе хрома с поверхностным островковым слоем. *Журнал Белорусского государственного университета. Физика*. 2021;1:26–32. DOI: 10.33581/2520-2243-2021-1-26-32.
11. Palik ED, editor. *Handbook of optical constants of solids. Volume 2*. Boston: Academic Press; 1991. XX, 1096 p. (Academic Press handbook series).
12. Kischkat J, Peters S, Gruska B, Semtsiv M, Chashnikova M, Klinkmüller M, et al. Mid-infrared optical properties of thin films of aluminum oxide, titanium dioxide, silicon dioxide, aluminum nitride, and silicon nitride. *Applied Optics*. 2012;51(28):6789–6798. DOI: 10.1364/AO.51.006789.
13. Мейер Дж, Эрикссон Л, Дэвис Дж. *Ионное легирование полупроводников (кремний и германий)*. Гусев ВМ, редактор. Москва: Мир; 1973. 296 с.
14. Kitamura R, Pilon L, Jonasz M. Optical constants of silica glass from extreme ultraviolet to far infrared at near room temperature. *Applied Optics*. 2007;46(33):8118–8133. DOI: 10.1364/AO.46.008118.
15. Busca G, Lorenzelli V, Porcile G, Baraton MI, Quintard P, Marchand R. FT-IR study of the surface properties of silicon nitride. *Materials Chemistry and Physics*. 1986;14(2):123–140. DOI: 10.1016/0254-0584(86)90077-5.
16. Майер СА. *Плазмоника: теория и приложения*. Нечаева ТС, Колесниченко ЮВ, переводчики; Савинский СС, редактор. Москва: Регулярная и хаотическая динамика; 2011. 296 с.
17. Gorgulu K, Gok A, Yilmaz M, Topalli K, Biyikli N, Okyay AK. All-silicon ultra-broadband infrared light absorbers. *Scientific Reports*. 2016;6:38589. DOI: 10.1038/srep38589.

References

1. Chen Cheng, Liu Yanhua, Jiang Zhou-ying, Shen Chong, Zhang Ye, Zhong Fan, et al. Large-area long-wave infrared broadband all-dielectric metasurface absorber based on maskless laser direct writing lithography. *Optics Express*. 2022;30(8):13391–13403. DOI: 10.1364/OE.447783.
2. Wang Ben-Xin, Xu Chongyang, Duan Guiyuan, Xu Wei, Pi Fuwei. Review of broadband metamaterial absorbers: from principles, design strategies, and tunable properties to functional applications. *Advanced Functional Materials*. 2023;33(14):2213818. DOI: 10.1002/adfm.202213818.
3. Ogawa S, Kimata M. Metal-insulator-metal-based plasmonic metamaterial absorbers at visible and infrared wavelengths: a review. *Materials*. 2018;11(3):458. DOI: 10.3390/ma11030458.
4. Zhou Y, Qin Z, Liang Z, Meng D, Xu H, Smith DR, et al. Ultra-broadband metamaterial absorbers from long to very long infrared regime. *Light: Science and Applications*. 2021;10:138. DOI: 10.1038/s41377-021-00577-8.
5. Yu P, Besteiro LV, Huang Y, Wu J, Fu L, Tan HH, et al. Broadband metamaterial absorbers. *Advanced Optical Materials*. 2019; 7(3):1800995. DOI: 10.1002/adom.201800995.
6. Desouky M, Mahmoud AM, Swillam MA. Silicon based mid-IR super absorber using hyperbolic metamaterial. *Scientific Reports*. 2018;8:2036. DOI: 10.1038/s41598-017-18737-5.
7. Taliercio T, Biagioni P. Semiconductor infrared plasmonics. *Nanophotonics*. 2019;8(6):949–990. DOI: 10.1515/nanoph-2019-0077.
8. Mukhammad AI, Gaiduk PI. Influence of the thickness of the *n*-Si substrate and its doping level on the absorbing properties of silicon plasmon structures in the infrared range. *Zhurnal prikladnoii spektroskopii*. 2021;88(6):887–894. Russian. DOI: 10.47612/0514-7506-2021-88-6-887-894.
9. Mukhammad AI, Chizh KV, Plotnichenko VG, Yuryev VA, Gaiduk PI. Plasmonic-enhanced light absorption in periodic silicon structures: the effect of inter-island distance. *Semiconductors*. 2020;54(14):1889–1892. DOI: 10.1134/S1063782620140201.
10. Koshelev IR, Mukhammad AI, Gaiduk PI. Modeling of plasmon resonance in periodic multilayer structures based on chromium with a surface island layer. *Journal of the Belarusian State University. Physics*. 2021;1:26–32. Russian. DOI: 10.33581/2520-2243-2021-1-26-32.
11. Palik ED, editor. *Handbook of optical constants of solids. Volume 2*. Boston: Academic Press; 1991. XX, 1096 p. (Academic Press handbook series).
12. Kischkat J, Peters S, Gruska B, Semtsiv M, Chashnikova M, Klinkmüller M, et al. Mid-infrared optical properties of thin films of aluminum oxide, titanium dioxide, silicon dioxide, aluminum nitride, and silicon nitride. *Applied Optics*. 2012;51(28):6789–6798. DOI: 10.1364/AO.51.006789.
13. Mayer JW, Eriksson L, Davies JA. *Ion implantation in semiconductors: silicon and germanium*. New York: Academic Press; 1970. XIII, 280 p.
Russian edition: Mayer J, Eriksson L, Davies J. *Ионное легирование полупроводников (кремний и германий)*. Гусев ВМ, редактор. Москва: Мир; 1973. 296 p.
14. Kitamura R, Pilon L, Jonasz M. Optical constants of silica glass from extreme ultraviolet to far infrared at near room temperature. *Applied Optics*. 2007;46(33):8118–8133. DOI: 10.1364/AO.46.008118.
15. Busca G, Lorenzelli V, Porcile G, Baraton MI, Quintard P, Marchand R. FT-IR study of the surface properties of silicon nitride. *Materials Chemistry and Physics*. 1986;14(2):123–140. DOI: 10.1016/0254-0584(86)90077-5.
16. Maier SA. *Plasmonics: fundamentals and applications*. New York: Springer Science + Business Media; 2007. XXV, 223 p.
Russian edition: Maier SA. *Плазмоника: теория и приложения*. Нечаева ТС, Колесниченко ЮВ, переводчики; Савинский СС, редактор. Москва: R & C Dynamics; 2011. 296 p.
17. Gorgulu K, Gok A, Yilmaz M, Topalli K, Biyikli N, Okyay AK. All-silicon ultra-broadband infrared light absorbers. *Scientific Reports*. 2016;6:38589. DOI: 10.1038/srep38589.