

ИК-ПРОЗРАЧНОСТЬ ОСТРОВКОВЫХ СТРУКТУР Si/SiO₂/Si₃N₄/Si, СФОРМИРОВАННЫХ МЕТОДОМ СЕЛЕКТИВНОГО ЛАЗЕРНОГО ОТЖИГА

А. И. Мухаммад^{1*}, П. И. Гайдук¹, О. Ю. Наливайко², В. В. Колос²

УДК 621.375.826

<https://doi.org/10.47612/0514-7506-2022-89-4-511-518>

¹ Белорусский государственный университет, Минск, Беларусь; e-mail: mukhammad@bsu.by

² ОАО “ИНТЕГРАЛ” — управляющая компания холдинга “ИНТЕГРАЛ”, Минск, Беларусь

(Поступила 3 июня 2022)

Методом селективного лазерного отжига сформированы периодические структуры Si/SiO₂/Si₃N₄/Si с островковым поверхностным слоем. Исследование методом ИК-Фурье-спектрометрии показало уменьшение коэффициента пропускания островковой структуры, сформированной методом селективного лазерного отжига, по сравнению со структурой без отжига практически во всем исследуемом диапазоне (2—25 мкм). Уменьшение коэффициента пропускания может быть связано с наличием в поверхностном слое высоколегированных областей рекристаллизованного кремния. Анализ дисперсионных кривых, полученных методом конечных разностей во временной области, показал, что колебания в диапазоне 5—20 ТГц могут поддерживаться в слое периодических высоколегированных островков кремния в слое нелегированного кремния. Результаты исследования интерпретированы с учетом предположения о возникновении в структуре с островковым поверхностным слоем плазмоноподобных колебаний (“мнимых” поверхностных плазмонов).

Ключевые слова: многослойные структуры, лазерный отжиг, спектр пропускания, легированный кремний, дисперсионные кривые.

Periodic Si/SiO₂/Si₃N₄/Si structures with an insular surface layer were formed by selective laser annealing. The study by infrared Fourier spectrometry showed a decrease in the transmittance of the island structure formed by selective laser annealing compared to the structure without annealing in range 2–25 microns. It is shown that the decrease in the transmittance value may be due to the presence of highly alloyed regions of recrystallized silicon in the surface layer. Analysis of dispersion curves obtained by FDTD modeling showed that plasma-like oscillations were detected in the range of 5–20 THz, which can support in layers of periodic high-alloyed silicon islands in a layer of unalloyed silicon. The results of the study are interpreted considering the assumption of the occurrence of “spoof” surface plasmons in a structure with an insular surface layer.

Keywords: multilayer structures, laser annealing, transmission spectra, doped silicon, dispersion curves.

Введение. Слои и локальные области сильнолегированного кремния используются в современной электронике, в частности, при разработке инфракрасных (ИК) фотодетекторов [1]. Для легирования кремния обычно применяется метод ионной имплантации, который позволяет вводить любую примесь контролируемым образом и в высокой концентрации [2]. Вместе с тем при имплантации больших доз примеси происходит формирование радиационных дефектов вплоть до аморфизации поверхностного слоя. Для устранения дефектов, рекристаллизации аморфного слоя и электрической активации примеси используется отжиг в равновесных (термический отжиг) или неравновесных (импульсный лазерный отжиг) условиях [2]. Импульсный лазерный отжиг (ЛО) имеет локальный харак-

IR TRANSMITTANCE OF Si/SiO₂/Si₃N₄/Si ISLAND STRUCTURES FORMED BY SELECTIVE LASER ANNEALING

A. I. Mukhammad^{1*}, P. I. Gaiduk¹, O. Yu. Nalivaiko², V. V. Kolos² (¹ Belarusian State University, Minsk, Belarus; e-mail: mukhammad@bsu.by; ² JSC “INTEGRAL” — “INTEGRAL” Holding Managing Company, Minsk, Belarus)

тер, следовательно, позволяет модифицировать отдельные микроучастки, не затрагивая смежные области [3]. При этом ЛО в наносекундном диапазоне импульсов позволяет получать локальные области с концентрацией легирующей примеси в положении замещения и, соответственно, носителей заряда, существенно превышающей предел равновесной растворимости ($\geq 1 \cdot 10^{21} \text{ см}^{-3}$) [4].

Высокий уровень легирования позволяет использовать кремний в качестве плазмонного материала в ближней ИК-области [1], при этом субволновая модификация поверхности может сопровождаться генерацией плазмонных колебаний, что в свою очередь приводит к дополнительному поглощению фотонов. Это позволяет увеличить чувствительность структуры к ИК-излучению, а значит, и чувствительность фотодетекторов на основе таких структур [1]. Для повышения чувствительности структуры и усиления связи между падающей волной и плазмонными колебаниями могут использоваться многослойные структуры с периодически структурированным поверхностным слоем [1, 5].

В настоящей работе предложен и апробирован оригинальный метод субволновой модификации путем формирования поверхностных структур с островками высоколегированного кремния, окруженными аморфным материалом. Оптические характеристики таких структур исследованы методом ИК-Фурье-спектроскопии, теоретически получены дисперсионные соотношения для колебаний, возникающих в таких структурах.

Эксперимент. В качестве исходных подложек использовали (111)-ориентированные пластины монокристаллического кремния диаметром 100 мм марки КДБ-10. После стандартной операции химической очистки последовательно осаждали слои SiO_2 и Si_3N_4 толщиной 165 нм, а также поликристаллического кремния толщиной 500 нм. На рис. 1, а представлена схема структуры после осаждения слоев. Легирование поверхностного слоя поликристаллического кремния проводилось с помощью имплантации ионов мышьяка с энергией 60 кэВ до дозы $3.1 \cdot 10^{15} \text{ ион/см}^2$. Наряду с введением легирующей примеси ионная имплантация мышьяка в указанных режимах приводит к аморфизации приповерхностного слоя. Для формирования массива периодически распределенных локальных областей высоколегированного кристаллического кремния в диэлектрическом окружении аморфного кремния разработан оригинальный метод селективного ЛО аморфного слоя через маску металлической (медной) сетки. Метод заключается в том, что имплантированная поверхность структуры $\text{Si/SiO}_2/\text{Si}_3\text{N}_4/\text{Si}$ вплотную накрывается медной сеткой, через окна которой лазерное излучение попадает на аморфный слой, что приводит к нагреву, плавлению и рекристаллизации открытых для лазерного излучения областей. В то же время в областях, затененных сеткой, условия рекристаллизации не достигаются, и они остаются в аморфном состоянии. После облучения через сетку получают отожженные области (островки высоколегированного проводящего кремния), окруженные непроводящим материалом аморфного кремния.

В настоящей работе для импульсного отжига использован рубиновый лазер с длиной волны 0.69 мкм и длительностью импульса 70 нс. Плотность энергии 1.4—2.0 Дж/см², что удовлетворяет условиям рекристаллизации аморфного слоя на всю глубину имплантации. Таким образом после лазерного облучения через сеточную маску сформированы поверхностные слои в виде периодически расположенных квадратных островков высоколегированного кремния, окруженных диэлектрическим материалом аморфного кремния (рис. 1, б). Период расположения островков ~100 мкм, размер

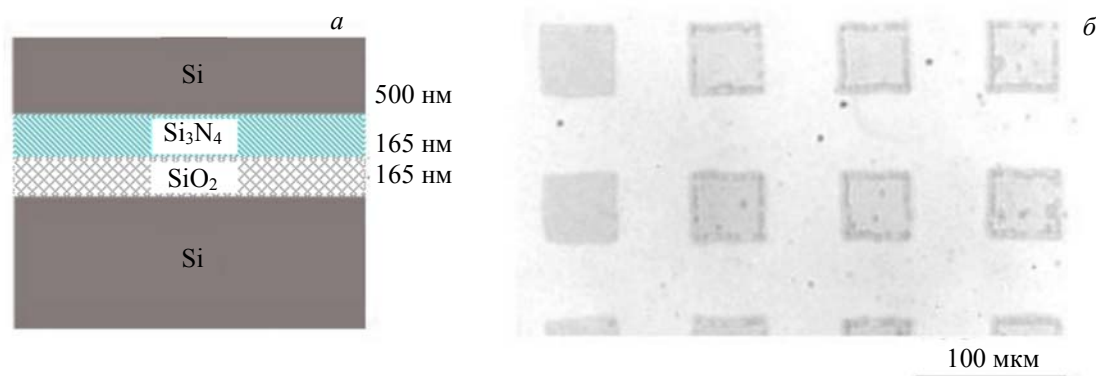


Рис. 1. Структура $\text{Si/SiO}_2/\text{Si}_3\text{N}_4/\text{Si}$ до селективного лазерного отжига (а) и поверхностный слой структуры $\text{Si/SiO}_2/\text{Si}_3\text{N}_4/\text{Si}$, сформированной методом селективного лазерного отжига (б)

островков 50 мкм. Для сравнения в ряде случаев проведен импульсный ЛО структур без применения сеточного маскирования поверхности (сплошной отжиг) при идентичных режимах.

Спектры пропускания образцов островковой структуры Si/SiO₂/Si₃N₄/Si, сформированной методом селективного ЛО, измерены в диапазоне 2—25 мкм с помощью ИК-Фурье-спектрометра Spectrum 3 Optica (Perkin Elmer). Спектры зарегистрированы с диафрагмой 2 мм, накоплением 1 мин и разрешением 4 см⁻¹. Исследование морфологии поверхности проведено с использованием оптического микроскопа Olympus BH-2 методом светлого поля (увеличение 200×). Профили распределения имплантированных ионов и дефектов по глубине рассчитаны с помощью программы SRIM (The Stopping and Range of Ions in Matter) [6].

Теоретически рассчитанные дисперсионные соотношения (зависимость волнового вектора от частоты) получены с помощью метода конечных разностей во временной области (Finite Difference Time Domain, FDTD) в программе FDTD Solution [7]. В процессе моделирования над и под структурой использовались граничные условия идеально согласованных слоев (PML), в остальных случаях — граничные условия Блоха. Диапазон моделирования 0—300 ТГц, шаг сетки в области моделирования 0.25 нм. Оптические характеристики аморфного и поликристаллического кремния, нитрида и диоксида кремния взяты из [8, 9], диэлектрическая проницаемость легированного кремния рассчитана с помощью модели Друде, описывающей поведение свободных электронов в металле или полупроводнике [10].

Результаты и их обсуждение. На рис. 2, а приведены экспериментальные спектры пропускания периодических структур Si/SiO₂/Si₃N₄/Si с островковым поверхностным слоем, сформированным методом селективного ЛО с плотностями энергии 1.4, 1.7 и 2.0 Дж/см², а также спектр пропускания структуры Si/SiO₂/Si₃N₄/Si без отжига. Уровень пропускания структуры без отжига ~45 %. При этом в диапазоне 2—4 мкм наблюдается подъем кривой пропускания до 75 %, после чего она опускается до 30 % на $\lambda = 5$ мкм. Далее до 15 мкм наблюдается медленный практически линейный рост до узкого провала (полосы поглощения) в диапазоне 16—18 мкм. Коэффициент пропускания структур, сформированных методом селективного ЛО, значительно уменьшается по сравнению со структурой без отжига практически во всем исследуемом диапазоне. Уровень пропускания островковой структуры, сформированной селективным ЛО с плотностью энергии 2.0 Дж/см², в среднем ~25 %. В целом спектры пропускания структур без отжига и островковых структур, сформированных методом селективного ЛО, схожи. В частности, сохраняется максимум пропускания в диапазоне 2—5 мкм, а также полосы поглощения в диапазонах 8—10, 10.5—14 и 16—18 мкм. В диапазоне 22—25 мкм проявляются небольшие пики, не характерные для структуры без отжига. Средний уровень пропускания структур Si/SiO₂/Si₃N₄/Si, сформированных методом селективного ЛО с плотностями энергии 1.4 и 1.7 Дж/см², ~35—37 %. В спектрах пропускания этих структур на $\lambda = 2.5$ —3.0 мкм также наблюдается максимум с интенсивностью ~65 %. Этот пик в диапазоне 2—5 мкм (рис. 2, а), характерный для спектров пропускания всех исследуемых структур, может быть связан с интерференцией в поверхностном слое кремния и слоях диэлектрика [11].

На рис. 2, б показаны экспериментальные спектры пропускания структуры Si/SiO₂/Si₃N₄/Si без отжига, структуры Si/SiO₂/Si₃N₄/Si, отожженной лазерным импульсом с плотностью энергии 2.0 Дж/см² (сплошной отжиг), и островковой структуры, сформированной методом селективного ЛО с плотностью энергии 2.0 Дж/см². Наименьший уровень пропускания в диапазоне 2—23 мкм наблюдается для структуры после сплошного ЛО, в диапазоне 23—25 мкм уровень пропускания структур со сплошным и селективным ЛО ~25 %. Уровень пропускания структуры без отжига во всем исследуемом диапазоне фактически в два раза больше, чем у отожженных структур. Для всех спектров пропускания характерно наличие полос поглощения в диапазонах 8—10, 10.5—14 и 16—18 мкм, а также максимум пропускания в диапазоне 2—5 мкм, который может быть связан с интерференцией [11].

На рис. 2, в представлены схемы поперечного сечения поверхностного слоя структур, экспериментальные спектры пропускания которых приведены на рис. 2, б. Толщина аморфизированного слоя определялась как полная ширина при половине высоты максимума профиля имплантированных ионов, рассчитанного с помощью программы SRIM [6]. При указанных выше параметрах имплантации толщина аморфизированного слоя ~150 нм, концентрация примеси $\sim 2 \cdot 10^{21}$ см⁻³, что более чем в 10 раз выше предела равновесной растворимости атомов мышьяка в кремнии [12]. Поскольку толщина поверхностного слоя поликристаллического кремния 500 нм, после имплантации получена структура Si/SiO₂/Si₃N₄/poly-Si/a-Si с толщиной слоя поликристаллического кремния ~350 нм и толщиной слоя аморфного кремния 150 нм (рис. 2, в). Ширина профилей распределения концентрации

носителей после ЛО в значительной степени зависит от плотности энергии ЛО, что связано с различной глубиной проплавления [2]. Согласно профилям имплантированных ионов после ЛО в [12], при указанных плотностях энергии аморфизированный слой должен полностью рекристаллизироваться. После ЛО структуры Si/SiO₂/Si₃N₄/poly-Si/a-Si с плотностью энергии лазерных импульсов 2 Дж/см² толщина слоя poly-Si уменьшается до 100 нм, появляется сплошной слой *n*-Si <As> толщиной ~400 нм с концентрацией носителей заряда $\sim 6 \cdot 10^{20}$ см⁻³. После селективного ЛО с плотностью энергии лазерных импульсов 2 Дж/см² в аморфизированном слое кремния образуются высоколегированные кристаллические области. Глубина проплавления при такой плотности энергии превышает толщину аморфизированного слоя, следовательно, периодически расположенные высоколегированные области находятся и в слое поликристаллического кремния (рис. 2, в). Слой аморфного кремния толщиной 150 нм и слой poly-Si толщиной 350 нм остаются в областях, затененных сеткой. В областях с “окошком” сетки возникает область *n*-Si <As> толщиной 400 нм и слой poly-Si толщиной 100 нм. Согласно [2, 12], вся примесь в условиях ЛО электрически активируется и отдает электроны в зону проводимости.

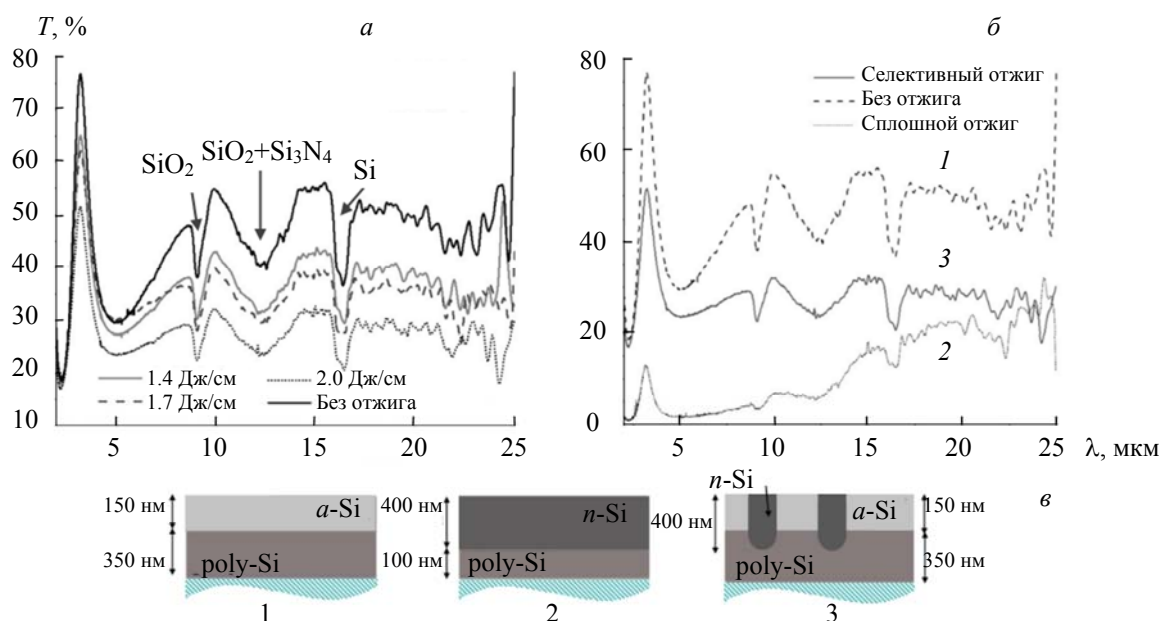


Рис. 2. Экспериментальные спектры пропускания структур Si/SiO₂/Si₃N₄/Si после селективного ЛО (а); спектры пропускания структуры Si/SiO₂/Si₃N₄/Si без отжига (1), со сплошным ЛО (2), с селективным ЛО (3) (б); конфигурация поверхностного слоя структур в зависимости от типа отжига (в)

На рис. 3, а приведены полученные методом FDTD-моделирования [7] дисперсионные соотношения колебаний, возникающих в структуре Si/SiO₂/Si₃N₄/Si с поверхностным слоем, полностью рекристаллизованным ЛО, на рис. 3, б — колебаний, возникающих в структурах Si/SiO₂/Si₃N₄/Si, сформированных методом селективного ЛО, выделена область частот 1—60 ТГц. Диэлектрические проницаемости аморфного и поликристаллического кремния комплексные, поэтому дисперсионные кривые пересекают линию света, распространяющегося в воздухе. Справа от линии света в воздухе на рис. 3, а видны яркие широкие полосы, а на рис. 3, б — лишь одна. Еще одна прямая линия — более пологая, чем линия света в воздухе, является, вероятно, линией света, распространяющегося в кремниевой подложке. В диапазоне <50 ТГц наблюдаются две широкие яркие полосы, в диапазоне 5—20 ТГц — яркая полоса, которая отсутствует на рис. 3, а. Яркость этой полосы уменьшается с увеличением действительной части волнового вектора, и полоса загибается вверх.

На рис. 4 приведены дисперсионные соотношения колебаний, возникающих в поверхностном слое Si структуры Si/SiO₂/Si₃N₄/Si, сформированном разными методами. На рис. 4, а показаны дисперсионные соотношения колебаний, возникающих в островковом слое Si толщиной 400 нм (островки рекристаллизованного кремния в аморфном слое), на рис. 4, б — колебаний, возникающих в структуре состоящей из островкового слоя Si толщиной 400 нм, а также слоя нелегированного

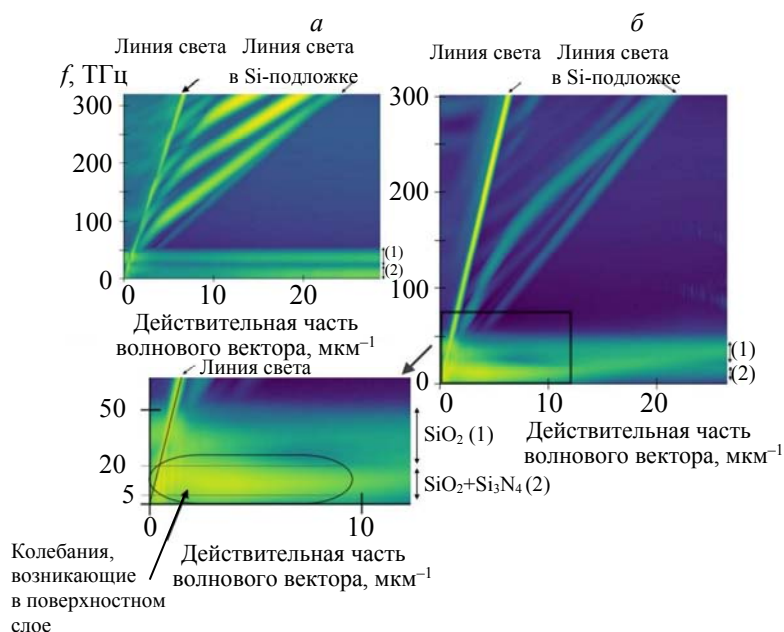


Рис. 3. Теоретически рассчитанные дисперсионные соотношения колебаний, возникающих в структуре Si/SiO₂/Si₃N₄/Si после сплошного лазерного отжига (а), и в структуре, сформированной методом селективного лазерного отжига (б)

полукристаллического кремния толщиной 100 нм (см. рис. 3, в), на рис. 4, в — колебаний в слое аморфного кремния толщиной 150 нм, на рис. 4, г — колебаний в структуре из слоя аморфного кремния толщиной 150 нм и слоя легированного полукристаллического кремния 350 нм (рис. 3, в). Видна линия света, распространяющегося в воздухе, слева от нее — слабо различимые кривые, асимптотически приближающиеся к линии света, на рис. 4, г эти линии немного ярче. Кривые, расположенные справа от линии света в воздухе, наблюдаются только на рис. 4, б и г, где присутствует слой poly-Si, и если на рис. 4, б такая кривая только одна, то для структуры poly-Si/*a*-Si (рис. 4, г) — целое семейство кривых в диапазоне 50—300 ТГц. В диапазоне <50 ТГц наблюдается широкая полоса, однако на рис. 4, в и г она более слабая и размытая. Для дисперсионных соотношений колебаний, возникающих в poly-Si/островок-Si (рис. 4, б), характерна яркая широкая полоса в диапазоне 5—20 ТГц. На рис. 4, а эта полоса также заметна, но отличается меньшей яркостью для действительной части волнового вектора от 0 до 10 мкм⁻¹. При увеличении действительной части волнового вектора полоса смещается до 50 ТГц. В этом же диапазоне на рис. 3, б присутствует более размытая полоса.

Полосы поглощения на экспериментальных спектрах пропускания (рис. 2) подтверждают результаты теоретических расчетов дисперсионных соотношений колебаний в структурах, сформированных методом селективного ЛО. Часть пиков пропускания и полос поглощения в спектрах пропус-

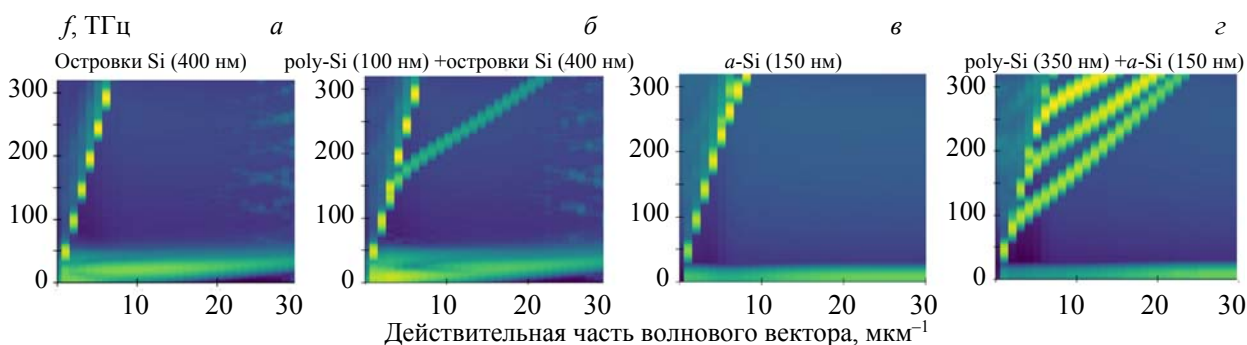


Рис. 4. Теоретические дисперсионные соотношения колебаний, возникающих в поверхностном слое сформированных структур

кания, приведенных на рис. 2, *а* и *б*, можно объяснить наличием в структуре диэлектрических слоев диоксида кремния и нитрида кремния. В диапазоне 9.0—9.5 мкм проявляется поглощение в диоксиде кремния, а на $\lambda = 12.5$ мкм наблюдаются колебания мостиковых групп Si-O-Si [13]. Плато на $\lambda = 11.5$ мкм и небольшой провал на $\lambda = 21.5$ мкм могут быть связаны с наличием слоя нитрида и валентными колебаниями связей Si-N, антисимметричными и симметричными соответственно [14]. Колебания мостиковых групп Si-O-Si и валентных связей Si-N проявляются и на рис. 3. Две достаточно широкие полосы в диапазоне <50 ТГц возникают, вероятно, из-за колебаний связей в диэлектрических слоях, полосы в диапазонах ~30 и 14 ТГц — из-за колебаний связей в слое SiO₂. В диапазоне ~26 ТГц проявляются колебания связей в слое Si₃N₄ [13, 14].

Полоса поглощения ~16 мкм (рис. 2, *а*), вероятно, связана с фоновыми колебаниями решетки кремния [15]. Соответствующую полосу колебаний можно обнаружить и на рис. 3, *а* и *б* — размытая полоса в диапазоне 5—20 ТГц. Яркие широкие кривые справа от линии света (рис. 3, *а*) возникают из-за наличия сплошного слоя высоколегированного поликристаллического кремния, а также границы раздела легированного и нелегированного кремния [15]. Линия света, распространяющегося в кремниевой подложке, представляет собой прямую, как и линия распространения света в воздухе, поскольку диэлектрическая проницаемость кремния, легированного до $1.5 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$, слабо изменяется в ИК-диапазоне и может считаться константой [15].

Уменьшение коэффициента пропускания в исследуемых структурах после отжига можно объяснить появлением в поверхностном слое сильнопроводящих областей [15]. На уменьшение коэффициента пропускания структур, сформированных методом селективного ЛО, по сравнению со структурой до отжига практически во всем исследуемом диапазоне также наиболее вероятно влияет появление островкового поверхностного слоя в виде периодически расположенных проводящих областей в непроводящем слое. Анализ дисперсионных кривых, полученных методом FDTD-моделирования, показывает наличие колебаний в диапазоне 5—20 ТГц. Эти колебания поддерживаются поверхностным слоем периодических высоколегированных островков кремния в слое аморфизированного кремния [5, 16]. В работах [16—21] теоретически и экспериментально исследованы схожие многослойные структуры. Обнаруженные колебания в ИК- и ТГц-областях называются плазмонными (плазмоноподобными), в работах [22—24] схожие колебания — “мнимыми” плазмонами (“spoof plasmon”).

Плазмонные эффекты в среднем ИК-диапазоне наблюдаются в структурах на основе легированного кремния с островковым поверхностным слоем с размером островков порядка единиц микрометров [1, 5, 16]. В [24] показано, что в структурах со значительно большими размерами островков (10—100 мкм) возможно появление поверхностных волн, похожих на поверхностные плазмоны, но возникающих в дальнем ИК- (ТГц) диапазоне. Такие волны называют “мнимыми” плазмонами. В ТГц-диапазоне из-за дисперсионных свойств металлов поверхностные плазмоны существовать не могут, поэтому для возникновения плазмоноподобных мод необходимо использовать искусственно созданные метаматериалы со знакопеременными диэлектрическими проницаемостями (например, гиперболические метаматериалы), для таких структур характерна крайняя анизотропия [20]. Впервые на возможность появления плазмоноподобных колебаний в дальней ИК-области указано в [23], где структура представляет собой насквозь перфорированный тонкий слой металла с размером отверстий меньше длины волны. В большинстве современных исследований структуры, поддерживающие плазмоноподобные колебания в дальней ИК-области, представляют собой чередующиеся слои проводящих и непроводящих материалов или массив проводящих островков разной конфигурации в непроводящем слое [16—24]. При этом важно, чтобы толщины слоев или размеры островков имели субволновый размер, благодаря чему можно настраивать диапазон возникновения колебаний от видимого до терагерцового (микроволновый в [25, 26]) [24].

В поверхностном слое сформированной в настоящей работе островковой структуры слабопроводящие области не облученного лазером поверхностного слоя кремния чередуются с сильнопроводящими. Предполагаем, что в такой структуре также могут возникать плазмоноподобные моды в диапазоне 25—100 мкм. Частично это подтверждает появление колебаний в диапазоне 5—20 ТГц (15—60 мкм) в теоретически рассчитанных дисперсионных соотношениях для структур с островковым поверхностным слоем.

Заключение. Разработана и апробирована методика создания массива высоколегированных островков кремния микрометрового размера в слое нелегированного кремния селективным наносекундным лазерным отжигом, сформированы структуры Si/SiO₂/Si₃N₄/Si с островковым поверхностным слоем. Исследование методом ИК-Фурье-спектроскопии показало уменьшение коэффициента

пропускания структуры, сформированной методом селективного лазерного отжига, по сравнению со структурой без отжига практически во всем исследуемом диапазоне (2—25 мкм). Уменьшение коэффициента пропускания может быть связано с наличием в поверхностном слое высоколегированных областей рекристаллизованного кремния. Установлено, что поглощение света в сформированных структурах в области 2—20 мкм происходит из-за суперпозиции поглощения свободными носителями, а также колебательных резонансов в слоях SiO₂ и Si₃N₄ в различных частях ИК-диапазона. Показано, что различия в спектрах пропускания структуры без отжига и островковой структуры, сформированной методом селективного лазерного отжига, проявляются в дальнем ИК-диапазоне (после 20 мкм).

Анализ дисперсионных кривых, полученных методом моделирования конечных разностей во временной области, показывает, что в структурах Si/SiO₂/Si₃N₄/Si с поверхностным слоем в виде массива островков высоколегированного кремния в нелегированном кремнии в диапазоне 5—25 ТГц возникают колебания, не характерные для других структур. Полученные экспериментальные результаты интерпретированы с учетом предположения о возникновении в структуре с островковым поверхностным слоем плазмоноподобных колебаний.

Авторы выражают благодарность Г. Д. Ивлеву за помощь в проведении лазерного отжига.

Работа проведена при финансовой поддержке Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований (грант № Т-22-030).

- [1] **C. L. Tan, H. Mohseni.** *Nanophotonics*, **8** (2018) 169—197
- [2] **Ф. Ф. Комаров.** Ионная и фотонная обработка материалов, Минск, БГУ (1998)
- [3] **Г. А. Качурин, С. Г. Черкова, В. А. Володин, Д. В. Марин, M. Deutschmann.** *ФТП*, **42**, № 2 (2008) 181—186
- [4] **В. П. Воронков, Г. А. Гурченко.** *ФТП*, **24**, № 10 (1990) 1831—1884
- [5] **A. I. Mukhammad, K. V. Chizh, V. G. Plotnichenko, V. A. Yuryev, P. I. Gaiduk.** *Semiconductors*, **54**, N 14 (2020) 1889—1892
- [6] The Stopping and Range of Ions in Matter Software [Electronic resource], SRIM — Mode of access: <http://www.srim.org/>, date of access: 10.2021
- [7] Nanophotonic FDTD Simulation Software [Electronic resource], Lumerical FDTD — Mode of access: <https://www.lumerical.com/products/fdtd/>, date of access: 01.2020
- [8] **E. D. Palik.** *Handbook of Optical Constants of Solids*, **2**, Academic Press (1985)
- [9] **J. Kischkat, S. Peters, B. Gruska, M. Semtsiv, M. Chashnikova, M. Klinkmüller, O. Fedosenko, S. Machulik, A. Aleksandrova, G. Monastyrskiy, Y. Flores, W.T. Masselink.** *Appl. Opt.*, **51**, N 28 (2012) 6789—6798
- [10] **С. А. Майер.** *Плазмоника: теория и приложения*, Ижевск, НИЦ “Регулярная и хаотическая динамика” (2011)
- [11] **B. Luk’yanchuk, N. I. Zheludev, S. A. Maier, N. J. Halas, P. Nordlander, H. Giessen, C. T. Chong.** *Nature Mater.*, **9** (2010) 707—715
- [12] **А. В. Двуреченский, Г. А. Качурин, Е. В. Нидаев, Л. С. Смирнов.** *Импульсный отжиг полупроводниковых материалов*, Москва, Наука (1982)
- [13] **R. Kitamura, L. Pilon, M. Jonasz.** *Appl. Opt.*, **46**, N 33 (2007) 8118—8133
- [14] **G. Busca, V. Lorenzelli, G. Porcile, M. I. Baraton, P. Quintard, R. Marchand.** *Mater. Chem. Phys.*, **14**, N 2 (1986) 123—140
- [15] **S. C. Shen, M. Cardona.** *J. Phys. Colloque*, **42**, N C4 (1981) 349—351
- [16] **M. Desouky, A. M. Mahmoud, M. A. Swillam.** *Sci. Rep.*, **8** (2018) 2036
- [17] **F. Peragut, L. Cerutti, A. Baranov, J. P. Hugonin, T. Taliercio, Y. De Wilde, J. J. Greffet.** *Optica*, **4**, N 11 (2017) 1409—1415
- [18] **Y. Ra’di, C. R. Simovski, S. A. Tretyakov.** *Phys. Rev. Appl.*, **3** (2015) 03700
- [19] **Y. Chang, D. Hasan, B. Dong, J. Wei, Y. Ma, G. Zhou, K. Wee Ang, C. Lee.** *ACS Appl. Mater. Interfaces*, **10** (2018) 38272—38279
- [20] **Mahmoud A. A. Abouelatta, Muhammad A. Othman, M. Desouky, A. M. Mahmoud, Mohamed A. Swillam.** *Opt. Express*, **29**, N 25 (2021) 41447—41456
- [21] **X. Zhao, C. Chen, A. Li, G. Duan, X. Zhang.** *Opt. Express*, **27**, N 2 (2019) 1727—1739

-
- [22] **A. Pors, E. Moreno, L. Martín-Moreno, J. B. Pendry, F. J. Garcia-Vidal.** Phys. Rev. Lett., **108** (2012) 223905
 - [23] **J. B. Pendry, L. Martín-Moreno, F. J. Garcia-Vidal.** Science, **305** (2004) 847
 - [24] **P. Huidobro, A. Fernández-Domínguez, J. Pendry, L. Martín-Moreno, F. García-Vidal.** MRS Bull., **45** (2020) 318
 - [25] **A. Kianinejad, Z. N. Chen, C. Qiu.** IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, **63**, N 6 (2015) 1817—1825
 - [26] **A. Aigner, J. M. Dawes, S. A. Maier, H. Ren.** Light Sci. Appl., **11**, N 9 (2022)