

ИК прозрачность структур с островковым поверхностным слоем, сформированным методом селективного лазерного отжига

А. И. Мухаммад¹, В. О. Наливайко¹, И. Р. Кошелев¹, Г. Д. Ивлев¹, П. И. Гайдук¹,
О. Ю. Наливайко², В. В. Колос²

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

²ОАО “Интеграл”, Минск, Беларусь

Предложен оригинальный метод селективного лазерного отжига многослойной структуры a-Si/SiO₂/Si₃N₄/Si, с помощью которого были сформированы периодические структуры с поверхностным слоем в виде рекристаллизованных островков поликристаллического кремния с высоким уровнем легирования. Обнаружено, что формирование островкового слоя приводит к двукратному уменьшению коэффициент пропускания оптического излучения в инфракрасном диапазоне спектра. Показано, что основные отличия в поведении спектров пропускания исходной и структуры с островковым поверхностным слоем наблюдаются в дальней инфракрасной области (≥ 20 мкм). Результаты исследования интерпретированы с учетом предположения о возникновении в структуре с островковым поверхностным слоем, “мнимых” поверхностных плазмонов в терагерцовом диапазоне.

Ключевые слова: кремниевые структуры; Фурье-спектрометрия; спектры пропускания инфракрасного излучения; лазерный отжиг

Введение

Высоколегированный кремний является важным материалом в современной электронике, используемым в том числе при разработке инфракрасных (ИК) фотодетекторов [1]. Для легирования кремния обычно используют метод ионной имплантации, который позволяет вводить любую примесь контролируемым образом и в высокой концентрации. 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 используют отжиг в равновесных (термический отжиг) или неравновесных (импульсный лазерный отжиг) условиях. В частности, лазерный отжиг в наносекундном диапазоне импульсов позволяет получать области с концентрацией легирующей примеси выше предела равновесной растворимости ($1 \cdot 10^{21}$ см⁻³ и выше) [2]. Такой высокий уровень легирования позволяет использовать кремний в качестве плазмонного материала в ближней ИК области [1]. Возникновение плазмонных колебаний увеличивает чувствительность структуры к инфракрасному излучению, а значит и чувствительность фотодетекторов на основе таких структур [3]. Для усиления связи между падающей волной и возникающими плазмонными колебаниями также используются метаматериалы с периодически структурированным (субволновым) поверхностным слоем [1].

В настоящей работе предложен и апробирован оригинальный метод формирования поверхностных структур с островками высоколегированного кремния, окруженными аморфным материалом. Оптические характеристики таких структур исследованы методом инфракрасной Фурье-спектрометрии.

Материалы и методы

Для формирования островкового поверхностного слоя была разработана методика селективного лазерного отжига. На рисунке 1а представлена схема исходной структуры. На подложку из монокристаллического кремния марки КДБ-10 (111) осаждались слои SiO₂ и Si₃N₄ толщиной 165 нм каждый. На слое Si₃N₄ был выращен слой поликристаллического кремния толщиной 500 нм. Поверхностный слой был легирован

ионами мышьяка с дозой 500 мкКл/см^2 и энергией 60 кЭв . На рис. 1, б приведена схема селективного лазерного наносекундного отжига, которая была использована для формирования высоколегированных областей в поверхностном слое. При проведении селективного лазерного отжига использовался рубиновый лазер с длительностью импульса 70 нс и плотностью энергии 2.0 Дж/см^2 . Для получения периодически расположенных высоколегированных островков на поверхностном аморфизированном слое исследуемой структуры была использована медная сетка с периодом около 100 мкм . Образец с прикрепленной вплотную сеткой облучали лазером. Таким образом получали отожженную область (островок) там, где у сетки было “окошко” и слабопроводящий аморфный слой под сеткой. В итоге был сформирован поверхностный слой в виде периодически расположенных квадратных островков легированного кремния в слое нелегированного кремния. Период расположения островков около 100 мкм , размер островков около 50 мкм .

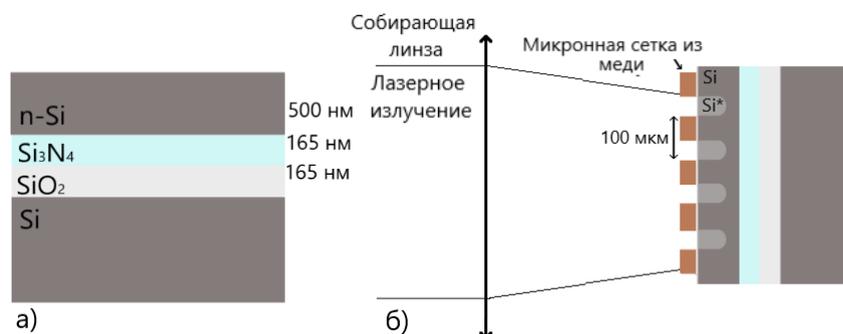


Рис. 1. – а) Исходная структура, б) Методика формирования островкового поверхностного слоя.

Спектры пропускания образцов измерялись в диапазоне $2 \div 25 \text{ мкм}$ с помощью инфракрасного Фурье-спектрометра Spectrum 3 Optica (Perkin Elmer). Спектры снимались с диафрагмой 2 мм , накоплением 1 мин и разрешением 4 см^{-1} .

Результаты и их обсуждение

На рис. 2 приведены экспериментальные спектры пропускания исходной структуры и структуры со сформированным островковым поверхностным слоем. Уровень пропускания исходной структуры в среднем составляет около 45% . При этом в диапазоне $2 \div 5 \text{ мкм}$ наблюдается максимум пропускания с интенсивностью 75% . После чего кривая пропускания опускается до 30% на длине волны 5 мкм . Далее до 15 мкм наблюдается медленный практически линейный рост кривой пропускания. В диапазоне $16 \div 18 \text{ мкм}$ наблюдается узкий провал (полоса поглощения) до 35% . После лазерного отжига и формирования высоколегированных островков коэффициент пропускания структуры уменьшается практически в два раза во всем исследованном диапазоне. Уровень пропускания островковой структуры в среднем составляет 25% . При этом сохраняется пик пропускания в диапазоне $2 \div 5 \text{ мкм}$, но по сравнению с исходной структурой его интенсивность уменьшается и составляет около 50% . Также сохраняются полосы поглощения в диапазонах $8 \div 10 \text{ мкм}$, $10.5 \div 14 \text{ мкм}$ и $16 \div 18 \text{ мкм}$, характерные и для исходной структуры. В целом кривые пропускания исходной и островковой структур ведут себя схожим образом, различается лишь интенсивность некоторых пиков. Отличия наблюдаются в диапазоне $20 \div 25 \text{ мкм}$, где у островковой структуры проявляются небольшие пики, не характерные для исходной структуры.

Часть пиков кривой пропускания и полос поглощения в спектрах пропускания можно объяснить наличием в структуре диэлектрических слоев диоксида кремния и нитрида кремния. В диапазоне $9 \div 9.5 \text{ мкм}$ проявляется поглощение в диоксиде кремния,

как и на длине волны 12.5 мкм, где наблюдаются колебания мостиковых групп Si-O-Si [4]. Полочка на длине волны 11.5 мкм и небольшой провал на длине волны 21.5 мкм могут быть связаны с наличием слоя нитрида и валентными колебаниями связей Si-N антисимметричными и симметричными соответственно [5]. Пик пропускания в диапазоне 2÷5 мкм скорее всего связан с интерференцией в поверхностном слое кремния [1]. Полоса поглощения около 16 мкм вероятно связана с фононными колебаниями решетки кремния [6]. Уменьшение коэффициента пропускания островковой структуры по сравнению с исходной практически во всем исследованном диапазоне наиболее вероятно может быть связано с появлением проводящих областей, сформированных методом селективного лазерного отжига.

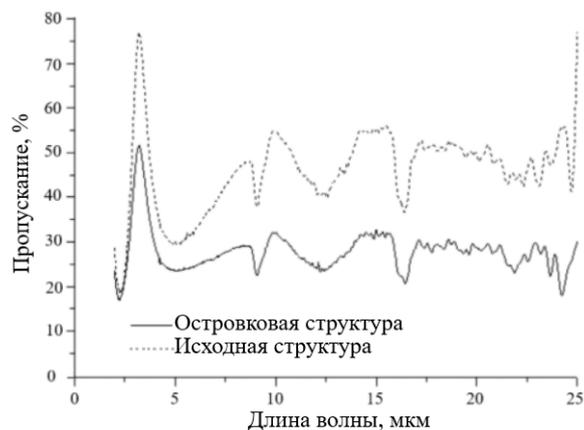


Рис. 2. – Спектры пропускания исходной структуры, а также структуры со сформированным островковым поверхностным слоем.

Плазмонные эффекты в среднем ИК диапазоне наблюдаются в кремниевых структурах с островковым поверхностным слоем, если размер островков не превышает 10 мкм [1, 3]. Однако в [3, 7] показывается, что в структурах со значительно большими размерами островков (10÷100 мкм) возможно появление поверхностных волн весьма похожих на поверхностные плазмоны, но возникающих в дальнем инфракрасном (терагерцовом) диапазоне. Такие волны называют “мнимыми” плазмонами (“spoof plasmon”) [3, 7]. В терагерцовом 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 [7]. В большей части современных исследований по этой теме такие метаматериалы представляют собой перфорированную (насквозь или частично) металлическую поверхность [7]. Сформированная в настоящей работе островковая структура не имеет отверстий, однако в поверхностном слое слабопроводящие области не облученного лазером поверхностного слоя кремния чередуются с сильнопроводящими областями. Мы предполагаем, что в такой структуре также могут возникать плазмоноподобные моды в диапазоне 25÷100 мкм, что будет исследовано в дальнейших работах.

Заключение

Таким образом, методом селективного лазерного отжига были сформированы периодические структуры с островковым поверхностным слоем. Исследование методом инфракрасной Фурье-спектрометрии показало уменьшение коэффициента пропускания островковой структуры по сравнению с исходной практически во всем исследованном диапазоне. Установлено, что пик пропускания, возникающий в диапазоне 2÷5 мкм,

характерный для обеих структур, связан с интерференцией в поверхностном и диэлектрических слоях. Показано, что различия в спектрах пропускания исходной и островковой структур начинают проявляться в дальнем инфракрасном диапазоне (после 20 мкм). Результаты исследования интерпретированы с учетом предположения о возникновении в структуре с островковым поверхностным слоем, “мнимых” поверхностных плазмонов.

Благодарности

Исследования проводились при финансовой поддержке БРФФИ (проект № Т18Р-190), проекта ГПНИ (№ ГР 20212702), а также гранта Министерства образования, финансовый номер № 728/12.

Литература

1. Tan C.L., Mohseni H. Emerging technologies for high performance infrared detectors. *Nanophotonics*. 2018. Vol. 8. P. 169–197.
2. Воронков В. П., Гурченко Г. А. Диффузия примеси в полупроводниках при импульсном лазерном отжиге. *ФТП*. 1990. Т. 24, № 10. С. 1831–1884.
3. Pendry J. B., Martín-Moreno L., Garcia-Vidal F. J. Mimicking Surface Plasmons with Structured Surfaces. *Science*. 2004. Vol. 305. P. 847.
4. Kitamura R., Pilon L., Jonasz M. Optical constants of silica glass from extreme ultraviolet to far infrared at near room temperature. *Applied Optics*. 2007. Vol. 46. No. 33. P. 8118–8133.
5. Busca G., Lorenzelli V., Porcile G., Baraton M.I., Quintard P., Marchand R. FT-IR study of the surface properties of silicon nitride. *Materials Chemistry and Physics*. 1986. Vol. 14. No. 2. P. 123-140.
6. Shen S., Cardona M. Infrared and far infrared absorption of B- and P-doped amorphous Si. *Journal de Physique Colloque*. 1981. Vol. 42 (C4). P. 349–351.
7. Tang W. X., Zhang H. C., Ma H. F., Jiang W. X., Cui T. J. Concept, Theory, Design, and Applications of Spoof Surface Plasmon Polaritons at Microwave Frequencies. *Advanced Optical Materials*. 2018. 1800421.

IR transparency of structures with an island surface layer formed by selective laser annealing

A.I. Mukhammad¹, V.O. Nalivaiko¹, I.R. Koshelev¹, G.D. Ivlev¹, P.I. Gaiduk¹,
O.Yu. Nalivaiko², V.V. Kolos²

¹ *Belarusian State University, Minsk; e-mail: mukhammad@bsu.by*

² *JSC "Integral", Minsk, Belarus*

Periodic structures with an insular surface layer were formed on the basis of a multilayer silicon structure by selective laser annealing. It is found that the transmission coefficient of infrared radiation of a structure with an insular surface layer is less than that of the original structure. It is established that the occurrence of transmission peaks in the range of 2–5 microns is associated with interference in the surface and dielectric layers. It is shown that the main differences in the behavior of the transmission spectra of the initial structure and the structure with an insular surface layer are observed in the far infrared region (≥ 20 microns). The results of the study are interpreted taking into account the assumption that “spoof” surface plasmons occur in structures with an insular surface layer.

Keywords: silicon structures; Fourier spectrometry; transmission spectra of infrared radiation; laser annealing