

УДК 538.958

ВЛИЯНИЕ РЕЖИМОВ ИМПУЛЬСНОГО ЛАЗЕРНОГО ОТЖИГА НА ОПТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА КРЕМНИЯ, ГИПЕРДОПИРОВАННОГО СЕЛЕНОМ, ДЛЯ ФОТОДЕТЕКТОРОВ ВИДИМОГО И ИК-ДИАПАЗОНОВ

Комаров Ф.Ф.¹, Пархоменко И.Н.², Мильчанин О.В.¹, Моховиков М.А.¹, Ивлев Г.Д.², Власукова Л.А.², Альжанова А.Е.³, Ван Тин²

¹НИУ «Институт прикладных физических проблем имени А.Н.Севченко» БГУ

²Белорусский государственный университет
Минск, Республика Беларусь

³Евразийский национальный университет имени Л.Н. Гумилева
Астана, Казахстан

Аннотация. Слои кремния, легированные селеном до концентраций $(4-6) \cdot 10^{20} \text{ см}^{-3}$, что на 4 порядка величины превышает предел равновесной растворимости этой примеси, получены ионной имплантацией с последующим импульсным лазерным отжигом (ИЛО) при плотностях энергии в импульсе $W = 0,55; 0,8; 1,0; 1,5; 2,0$ и $2,5 \text{ Дж/см}^2$. Методом обратного резерфордского рассеяния ионов гелия показано, что до 60–70 % внедренной примеси находится в позиции замещения в решетке кремния. Слои, гипердопированные селеном, проявляют существенное поглощение (36–40 %) в области длин волн 1100–2400 нм.

Ключевые слова: кремний, имплантация селена, лазерный отжиг, примесная подзона, поглощение света.

EFFECT OF PULSED LASER ANNEALING ON OPTICAL PROPERTIES OF SELENIUM-HYPERDOPED SILICON FOR VISIBLE AND IR PHOTODETECTORS

Komarov F. F.¹, Parkhomenko I.², Mil'chanin O.¹, Makhavikou M.¹, Ivlev G. D.², Vlasukova L. A.², Alzhanova A. E.³, Wang Ting²

¹A.N. Sevchenko Institute of Applied Physics Problems, Belarusian State University

²Belarusian State University
Minsk, Republic of Belarus

³Eurasian National University named L.N. Gymbilov
Astana, Kazakhstan

Abstract. Layers of selenium-hyperdoped silicon with dopant concentration of up to $(4-6) \cdot 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ that exceeds the limit of equilibrium solubility of this impurity by 4 orders of magnitude were obtained using ion implantation followed by pulsed laser annealing (PLA) at pulse energy densities of $W = 0.55, 0.8, 1.0, 1.5, 2.0$ and 2.5 J/cm^2 . Rutherford back scattering of helium ions demonstrated that up to 60–70 % of introduced impurity occupied silicon lattice sites. Selenium-hyperdoped layers exhibited substantial absorption (36–40 %) in the wavelength range of 1100–2400 nm.

Key words: silicon, selenium implantation, laser annealing, impurity subband, light absorption.

Адрес для переписки: Комаров Ф.Ф., ул. Курчатова, 7, Минск 220045, Республика Беларусь
e-mail: Komarovf@bsu.by

Введение. В интегрированных приборах кремниевой фотоники для телекоммуникационных систем детекторы должны обладать способностью регистрировать фотоны с длиной волны более, чем 1,1 мкм, которые могут распространяться с минимумом потерь внутри оптоволокна или иных волноводных сред. Для таких фотонов кремний является прозрачным материалом.

В данной работе исследовались структурные и оптические свойства кремния, гипердопированного селеном методом ионной имплантации с последующим импульсным лазерным отжигом (ИЛО). На выявлении оптимальных условий лазерного отжига и сфокусированы рассматриваемые исследования.

Методика эксперимента. Образцы, вырезанные из пластин Si *p*-типа с удельным сопротивлением $\rho = 10 \text{ Ом} \cdot \text{см}$ с термически выращенным слоем SiO₂ толщиной 60 нм, имплантировались ионами Se⁺ при комнатной температуре в полиэнергетическом режиме. Энергия и флюенс ионов

на первом и втором этапах имплантации составляли соответственно 220 кэВ и $1,45 \cdot 10^{16} \text{ ион/см}^2$ и 100 кэВ, $5,12 \cdot 10^{15} \text{ ион/см}^2$. ИЛО исследуемых образцов SiO₂/Si:Se⁺ проводился при значениях плотности энергии $W = 0,55; 0,8; 1,0; 1,5; 2$ и $2,5 \text{ Дж/см}^2$ в наносекундном (75 нс) импульсе излучения рубинового лазера ($\lambda = 694 \text{ нм}$).

Анализ распределения концентрации атомов внедренной примеси по глубине, доли атомов селена в узлах кристаллической решетки кремния и степени кристалличности имплантированных слоев проводился методом регистрации спектров РОР ионов He⁺ с энергией 1,5 МэВ в режиме каналирования (channeling) и без него (random). Информация о распределении концентрации атомов селена по глубине получена путем обработки спектров РОР с использованием программного комплекса SIMNRA [1].

Результаты и обсуждение. Оптическая диагностика процессов, происходящих в приповерхностной области кремния при воздействии ИЛО,

производилась *in situ*. Толщина расплавленного слоя (глубина проплавления d_m) увеличивается с ростом плотности поглощенной энергии. Последующий эпитаксиальный процесс $l\text{-Si} \rightarrow c\text{-Si}$ в ситуации с ИЛО системы $\text{SiO}_2/\text{Si}:\text{Se}^+$ реализуется, если d_m превышает исходную толщину d_a ионно-аморфизированного слоя подложки.

Последовательное уменьшение задаваемого значения W приводит к сокращению времени существования жидкой фазы τ_m до 0,6 мкс (2 Дж/см^2), 0,4 мкс ($1,5 \text{ Дж/см}^2$) и 0,35 мкс (1 Дж/см^2). Понижение W до 0,8 и $0,55 \text{ Дж/см}^2$ приводит к сокращению длительности фазовых переходов до 0,2 и 0,1 мкс, соответственно, и их локализации в имплантированном слое ($d_m < d_a$).

После ИЛО наблюдается заметное перераспределение атомов примеси на глубины $d > 300 \text{ нм}$ с резким экспоненциальным спадом концентрации (рис. 1). В случае ИЛО с плотностями энергии $1,5\text{--}2,5 \text{ Дж/см}^2$ на глубинах $30\text{--}150 \text{ нм}$ формируется платообразное распределение селена в диапазоне концентраций $(9\text{--}8) \cdot 10^{20} \text{ ат./см}^3$.

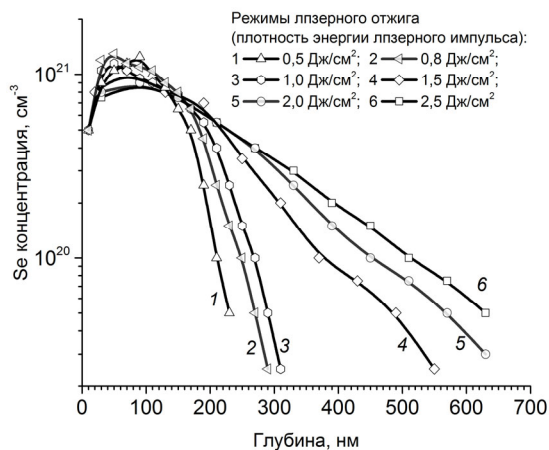
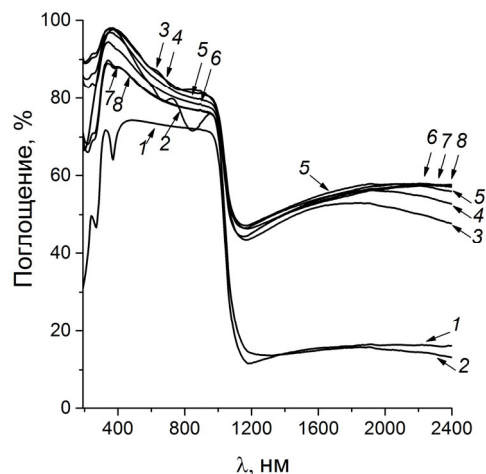


Рисунок 1 – Концентрационные профили атомов селена в слоях кремния после двойной ионной имплантации и лазерного отжига

Для оценки степени кристалличности легированного слоя кремния и определения доли атомов Se в узлах кристаллической решетки Si использованы величины χ^{Si} и χ^{Se} , извлекаемые из спектров РОР, снятых в режиме каналирования [2]. Данные величины представляют собой интегральные отношения отсчетов каналированного к случайному спектру в каналах, связанных со слоем имплантированного Si и Se соответственно. Как следует из полученных данных, только при плотностях энергии ИЛО $\geq 0,8 \text{ Дж/см}^2$ наблюдается заметное восстановление кристаллической решетки и достаточно высокая неравновесная растворимость атомов селена в кремнии (44,6 %). Оптимальной с позиции структурного совершенства (91,6 %) и

максимальной концентрации Se в замещающем положении в решетке Si (65,6 %) является плотность энергии $W = 2 \text{ Дж/см}^2$. Высокая концентрация примесных атомов, занимающих узловые положения, играет ключевую роль в оптическом поглощении как в видимом, так и ИК-диапазонах.

На рис. 2 представлены спектры поглощения до и после ИЛО. Как видно на рис. 2, а, лазерный отжиг приводит к увеличению ИК поглощения имплантированного слоя на 36–40 %. Наибольшим поглощением характеризуется образец после ИЛО при $W = 1 \text{ Дж/см}^2$.



1 – SiO_2/Si , 2 – $\text{SiO}_2/\text{Si}:\text{Se}^+$, 3 – $0,55 \text{ Дж/см}^2$, 4 – $0,8 \text{ Дж/см}^2$, 5 – $1,0 \text{ Дж/см}^2$, 6 – $1,5 \text{ Дж/см}^2$, 7 – $2,0 \text{ Дж/см}^2$, 8 – $2,5 \text{ Дж/см}^2$.

Рисунок 2 – Спектры поглощения до и после имплантации и ИЛО при разных плотностях энергии импульса

Наибольшим коэффициентом поглощения характеризуются слои, отожженные при плотностях энергии $0,55\text{--}1,5 \text{ Дж/см}^2$.

Закключение. Таким образом, в случае слоев кремния, гиперпересыщенных атомами селена (до концентраций $10^{21} \text{ атомов/см}^3$), регистрируется поглощение в ИК диапазоне на уровне 45–55 %.

Благодарности. Работа выполнялась в рамках заданий 3.8.1 и 3.8.2 Государственной программы научных исследований «Фотоника и электроника для инноваций», а также гранта молодых ученых по проекту «Жас галым» на 2022–2024 гг. МОН РК и РН объекта: AP14972733.

Литература

1. Mayer, M. SIMNRA User's Guide. Max-Planck-Institut für Plasmaphysik / M. Mayer. – Garching, 1997. – 62 p.
2. Feldman, L. C. Materials analysis by ion channeling: Submicron crystallography / L. C. Feldman, W. Mayer, S. T. Picraux. – New York: Academic Press, 1982. – 356 p.