

АНАЛИЗ ПОВЕРХНОСТИ КРЕМНИЯ, ИМПЛАНТИРОВАННОГО ИОНАМИ КИСЛОРОДА И ГЕЛИЯ, МЕТОДОМ СПЕКТРАЛЬНОЙ ЭЛЛИПСОМЕТРИИ**В. В. Базаров^{*}, В. И. Нуждин, В. Ф. Валеев, Н. М. Лядов**

УДК 543.42:546.28

Казанский физико-технический институт им Е. К. Завойского, обособленное структурное подразделение ФИЦ КазНЦ РАН, 420029, Казань, Сибирский тракт, 10/7, Россия; e-mail: vbazarov1@gmail.com; nuzhdin@kfti.knc.ru; valeev@kfti.knc.ru; nik061287@mail.ru

(Поступила 26 июня 2018)

Представлены результаты исследований методом спектральной эллипсометрии поверхности кремния, имплантированного ионами кислорода в интервале доз $7.5 \cdot 10^{14}$ — $3.7 \cdot 10^{16}$ ион/см² и ионами гелия в интервале доз $6 \cdot 10^{16}$ — $6 \cdot 10^{17}$ ион/см² с энергией 40 кэВ при постоянной плотности тока в ионном пучке 2 мкА/см² и комнатной температуре облучаемых подложек. Получены зависимости толщины имплантированного слоя в облученных пластинах и степени его аморфизации от дозы ионной имплантации.

Ключевые слова: аморфный кремний, ионная имплантация, спектральная эллипсометрия.

The results of studies by the method of spectral ellipsometry of a surface of silicon implanted with oxygen ions in the dose range of 7.5×10^{14} — 3.7×10^{16} ion/cm² and helium ions in a dose range of 6×10^{16} — 6×10^{17} ion/cm² with an energy of 40 keV at constant ion current density 2 μ A/cm² and room temperature of the irradiated substrates are presented. Dependences of the thickness of the implanted layer in irradiated plates and the degree of its amorphization on the dose of ion implantation are obtained.

Keywords: amorphous silicon, ion implantation, spectral ellipsometry.

Ионная имплантация — один из наиболее широко используемых способов направленного изменения поверхностных свойств полупроводниковых материалов. Известно, что низкоэнергетическая высокодозная ионная имплантация в кремнии сопровождается его аморфизацией, которая начинается почти сразу после начала имплантации. Как показано ранее на примере монокристаллического кремния (с-Si), имплантированного различными типами ионов в широком интервале энергий (см. [1—7] и ссылки там), спектральная эллипсометрия (СЭ) является информативным методом изучения частично аморфизованных полупроводниковых слоев. Этот метод достаточно эффективен на практике, поскольку оптические константы α -Si и с-Si существенно различаются в видимом диапазоне длин волн.

Для экспериментального описания концентрации радиационных дефектов, генерируемых при ионной имплантации, и оценки их распределения по глубине обычно используется метод спектроскопии обратного резерфордского рассеяния (ОРР) [8, 9]. Однако глубина проникновения ионов с энергиями ~40 кэВ сравнительно невелика (десятки нанометров), поэтому для характеристики таких тонких слоев метод ОРР малоинформативен. Исключение составляет спектроскопия ОРР с высоким разрешением [10, 11], но такой специфический метод трудно реализуем на практике.

В настоящей работе представлены результаты исследования постепенной аморфизации с-Si при его имплантации высокими дозами легких ионов O⁺ и He⁺ с низкой энергией 40 кэВ методом СЭ.

SPECTROSCOPIC ELLIPSOMETRY STUDY OF SILICON SURFACE IMPLANTED BY THE OXYGEN AND HELIUM IONS

V. V. Bazarov^{*}, V. I. Nuzhdin, V. F. Valeev, N. M. Lyadov (E. K. Zavoisky Kazan Physical-Technical Institute (KPhTI), 10/7 Sibirsky Trakt, Kazan, 420029, Russia; e-mail: vbazarov1@gmail.com, nuzhdin@kfti.knc.ru, valeev@kfti.knc.ru, nik061287@mail.ru)

Объектами экспериментов СЭ служили монокристаллические *c*-Si-подложки с ориентацией (100), имплантированные ионами $^{16}\text{O}^+$ в интервале доз $D = 7.5 \cdot 10^{14} \text{—} 3.7 \cdot 10^{16}$ ион/см² и $^4\text{He}^+$ в интервале доз $10^{17} \text{—} 6 \cdot 10^{17}$ ион/см² с энергией $E = 40$ кэВ и плотностью тока в ионном пучке $1 \text{—} 2$ мкА/см². Имплантация проводилась на ускорителе ионов ИЛУ-3 при остаточном вакууме 10^{-5} Торр.

Оптический анализ имплантированных слоев кремния выполнен с помощью спектроскопического эллипсометра ES-2 с бинарной модуляцией поляризации на длинах волн 380—820 нм (спектральное разрешение 6 нм, шаг измерений 10 нм, угол падения светового луча $\Psi = 70^\circ$). Особенности работы эллипсометра ES-2 описаны в [12].

Электронно-микроскопические снимки получены на сканирующем электронном микроскопе (СЭМ) высокого разрешения Carl Zeiss EVO 50XVP.

Для анализа экспериментальных спектральных зависимостей образцов, имплантированных ионами O^+ , выбрана оптическая модель изотропной гомогенной тонкой пленки, состоящей из смеси кристаллической (*c*-Si) и аморфной (α -Si) фаз на монокристаллической подложке *c*-Si. Подгоночными параметрами в рамках этой модели служили толщина имплантированного слоя (d_{exp}) и содержание аморфной фазы α -Si в имплантированном слое (фактор заполнения f и толщина слоя естественного окисла SiO_2 на поверхности образца d_{SiO_2}). Определение оптических констант (показателей преломления n и коэффициента экстинкции k) имплантированного слоя в зависимости от содержания фазы α -Si проведено в соответствии с приближением эффективной среды по модели Бруггемана. Вычисленные спектральные зависимости эллипсометрических углов $\Psi_{\text{th}}(\lambda)$ и $\Delta_{\text{th}}(\lambda)$, полученные путем вариации переменных d_{exp} , d_{SiO_2} и f , сопоставлены с экспериментальными значениями $\Psi_{\text{exp}}(\lambda)$ и $\Delta_{\text{exp}}(\lambda)$ для получения наилучшего их совпадения. На рис. 1 приведены дисперсионные зависимости эллипсометрических углов для необлученного образца и двух образцов, имплантированных ионами O^+ дозами $7.5 \cdot 10^{14}$ и $7.5 \cdot 10^{15}$ ион/см².

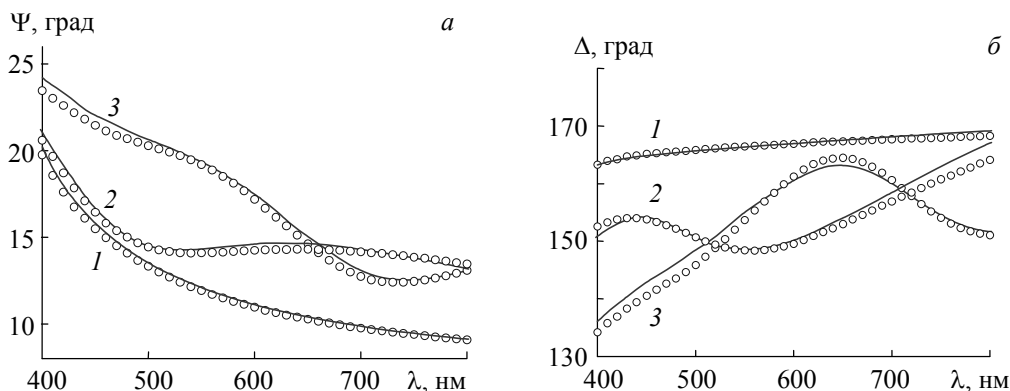


Рис. 1. Экспериментальные (точки) и рассчитанные (линии) дисперсионные зависимости эллипсометрических углов $\Psi(\lambda)$ (а) и $\Delta(\lambda)$ (б) для необлученного образца (1) и образцов, имплантированных ионами O^+ дозами $7.5 \cdot 10^{14}$ (2) и $7.5 \cdot 10^{15}$ ион/см² (3)

Установлено, что для всех имплантированных ионами O^+ образцов $d_{\text{SiO}_2} \approx 1 \text{—} 4$ нм. Анализ зависимостей для образцов, имплантированных ионами He^+ , показывает, что удовлетворительного совпадения экспериментальных и расчетных спектральных зависимостей эллипсометрических углов можно добиться только в случае больших доз имплантации, при которых приповерхностная область практически полностью аморфизована. Таким образом, в качестве подгоночных параметров модели выбраны толщина аморфизованного слоя (d_{exp}) и толщина поверхностного слоя, содержащего смесь естественного окисла SiO_2 и аморфной фазы кремния (d_{SiO_2}). Установлено, что поверхностный слой толщиной ~ 30 нм состоит на $\sim 30\%$ из SiO_2 и на $\sim 70\%$ из α -Si.

Для первоначальной оценки толщины имплантированного слоя проведены расчеты в программе компьютерного моделирования торможения ионов в веществе SRIM-2011 [13]. Моделирование показывает, что в начальный период облучения атомы O накапливаются вблизи поверхности Si с максимумом статистического распределения Гаусса на глубине $R_p \sim 100$ нм и среднеквадратичным отклонением $\Delta_{R_p} \sim 38$ нм. В случае имплантации ионов He^+ $R_p \sim 353$ нм, $\Delta_{R_p} \sim 97$ нм.

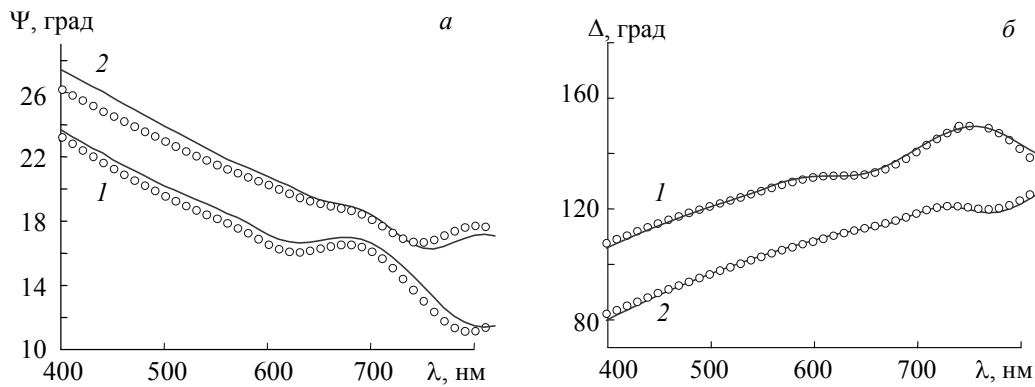


Рис. 2. Измеренные (точки) и рассчитанные (линии) дисперсионные зависимости эллипсометрических углов $\Psi(\lambda)$ (а) и $\Delta(\lambda)$ (б) для образцов, имплантированных ионами He^+ дозами $3 \cdot 10^{17}$ (1) и $6 \cdot 10^{17}$ ион/см² (2)

Исследование методом СЭ аморфизации кремния при имплантации ионов кислорода O^+ с энергией 40 кэВ в интервале доз $7.5 \cdot 10^{14}$ — $3.7 \cdot 10^{16}$ ион/см² (рис. 2, а) показывает, что при дозе имплантации $7.5 \cdot 10^{14}$ ион/см² на поверхности кремния образуется частично аморфизованный слой толщиной ~50 нм с содержанием аморфной фазы 40%. При повышении дозы облучения до $3.7 \cdot 10^{16}$ ион/см² происходит монотонное увеличение толщины этого слоя до ~100 нм.

Результаты исследований пластин кремния, имплантированных ионами гелия дозами $3.1 \cdot 10^{17}$ и $6.2 \cdot 10^{17}$ ион/см², представлены на рис. 3, б. Первые признаки аморфизации слоя появляются при дозе имплантации $6 \cdot 10^{16}$ ион/см². Полной аморфизации слоя не происходит и при достаточно высокой дозе имплантации $1 \cdot 10^{17}$ ион/см².

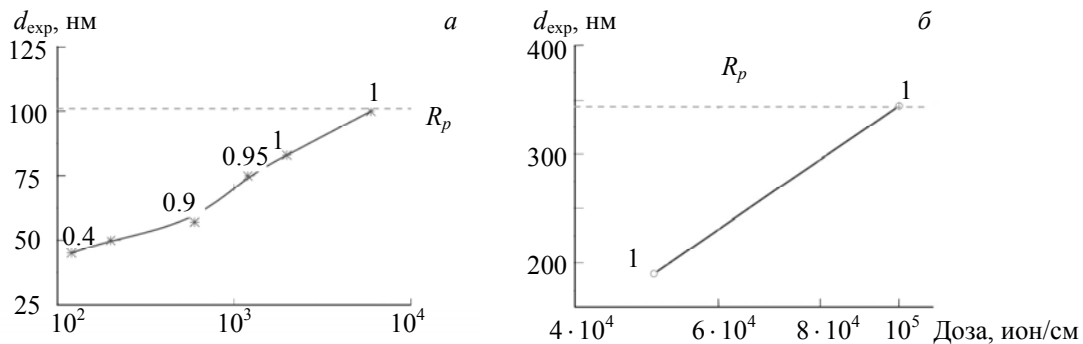


Рис. 3. Зависимость толщины имплантированного слоя (d) кремния от дозы имплантации ионов O^+ (а) и He^+ (б) с энергией 40 кэВ по данным СЭ; указано содержание аморфной фазы кремния в имплантированном слое, определяемое при моделировании спектров СЭ

Для объяснения некоторого превышения расчетных значений R_p над полученными экспериментально толщинами аморфизованного слоя необходимо принять во внимание следующие обстоятельства. Массы падающих ионов $^4\text{He}^+$ и $^{16}\text{O}^+$ заметно меньше массы атома кремния ^{28}Si . В этом случае разупорядоченный слой формируется по гомогенному механизму в результате постепенного накопления точечных дефектов во всей приповерхностной области с неравномерным распределением по глубине, близким к гауссову. При этом, как показано ранее ([13] и ссылки там), максимум энергетических потерь (функции энерговыделения) расположен на глубине $0.8R_p$, следовательно, на этой глубине должно быть максимальное содержание аморфной фазы. Отметим, что использование прямоугольного распределения концентрации дефектов по глубине вместо гауссова в расчетах по методике СЭ дает достаточно хорошее согласие с расчетами по алгоритму SRIM. Близкое к прямоугольному распределение структурных нарушений по глубине при имплантации в кремний ионов PF_4^+ описано в [9] и подтверждено при исследовании имплантированных образцов на СЭМ.

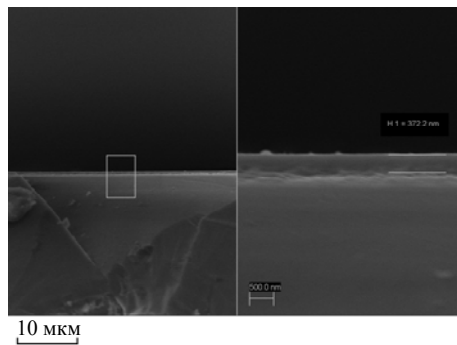


Рис. 4. Электронно-микроскопический снимок скола пластины кремния, облученной ионами He^+ дозой $6 \cdot 10^{17}$ ион/см²

На рис. 4 видно, что толщина светлой пленки (предположительно аморфизованный слой) примерно соответствует толщине имплантированного слоя, полученной по результатам исследований методом СЭ. На обратной стороне образца такой слой отсутствует.

Таким образом, методом СЭ осуществлен структурный анализ поверхностных слоев кремния, имплантированных легкими ионами O^+ и He^+ . Показано, что при дозе имплантации $7.5 \cdot 10^{14}$ ион/см² на поверхности кремния образуется частично аморфизованный слой толщиной ~ 50 нм. При дальнейшем повышении дозы облучения до $3.7 \cdot 10^{16}$ ион/см² происходят полная аморфизация слоя и монотонное увеличение его толщины до ~ 100 нм. При высокодозной имплантации ионов He^+ метод спектральной эллипсометрии также позволяет успешно оценить толщину имплантированного слоя. Приведенные примеры демонстрируют эффективность использования методики спектральной эллипсометрии для характеристики имплантированных образцов.

- [1] P. Petrik, O. Polga, M. Fried, T. Lohner, N. Q. Khanh, J. Gyulai. *J. App. Phys.*, **93** (2003) 1987—1990
- [2] D. Shamiryan, D. V. Likhachev. *Ion Implantation*, Ed. M. Goorsky, InTech (2012) 89—104
- [3] V. V. Bazarov, V. F. Valeev, V. I. Nuzhdin, Y. N. Osin, G. G. Gumarov, A. L. Stepanov. *Solid State Phenom.*, **233-234** (2015) 526—529
- [4] В. В. Базаров, В. И. Нуждин, В. Ф. Валеев, В. В. Воробьев, Ю. Н. Осин, А. Л. Степанов. *Журн. прикл. спектр.*, **83**, № 1 (2016) 55—59 [V. V. Bazarov, V. I. Nuzhdin, V. F. Valeev, V. V. Vorobev, Yu. N. Osin, A. L. Stepanov. *J. Appl. Spectr.*, **83** (2016) 47—50]
- [5] V. V. Bazarov, V. I. Nuzhdin, V. F. Valeev, A. L. Stepanov. *Vacuum*, **148** (2018) 254—257
- [6] K. Tsunoda, S. Adachi, M. Takahashi. *J. Appl. Phys.*, **91** (2002) 2936—2941
- [7] K. Kurihara, S. Hikino, S. Adachi. *J. Appl. Phys.*, **96** (2004) 3247—3254
- [8] К. В. Карабешкин, П. А. Карасёв, А. И. Титов. *ФТП*, **47**, № 2 (2013) 206—210 [K. V. Karabeshkin, P. A. Karaseov, A. I. Titov. *Semiconductors*, **47** (2013) 242—246]
- [9] К. В. Карабешкин, П. А. Карасёв, А. И. Титов. *ФТП*, **50**, № 8 (2016) 1009—1015 [K. V. Karabeshkin, P. A. Karaseov, A. I. Titov. *Semiconductors*, **12** (2016) 989—995]
- [10] K. Kimura, Y. Oota, K. Nakajima, M. Suzuki, T. Aoki, J. Matsuo, A. Agarwal, B. Freer, A. Stevenson, M. Ameen. *Nucl. Instr. Method Phys. Res. B*, **211** (2003) 206—210
- [11] K. Kimura, S. Joumori, Y. Oota, K. Nakajima, M. Suzuki. *Nucl. Instr. Method Phys. Res. B*, **219-220** (2004) 351—357
- [12] A. V. Khomich, V. I. Kovalev, E. V. Zavedeev, R. A. Khmelnskiy, A. A. Gippius. *Vacuum*, **78** (2005) 583—587
- [13] J. F. Ziegler, J. P. Biersack, M. D. Ziegler. *SRIM. The Stopping and Range of Ions in Matter*, SRIM Company (2008)