

Влияние ионного облучения на проводимость пленок кремния

К. Д. Кушкина, А. В. Назаров, А. А. Шемухин, А. П. Евсеев

В работе проводилось облучение плёнок кремния ионами кремния с энергией 200–230 кэВ в температурном диапазоне от температуры жидкого азота до комнатной. Показано, что с помощью спектроскопии комбинационного рассеяния света можно проводить интегральный анализ качества кристаллической структуры после облучения, что значительно сокращает время исследования. Изучено влияние ионного облучения на проводимость пленки кремния.

Ключевые слова: ионная имплантация, дефектообразование, комбинационное рассеяние света.

Введение

Обычно пленки кремния на сапфире (КНС) создаются методом эпитаксиального газофазного осаждения кремния на монокристаллические сапфировые подложки. Однако в начальный момент времени наблюдается так называемый «островковый рост». Поэтому на сегодняшний день промышленностью налажен выпуск пленок кремния с толщиной эпитаксиального слоя 300 нм. Для изготовления электронных приборов с высоким быстродействием по технологии кремний на сапфире толщина кремниевого слоя должна быть не более 100 нм. В ряде работ показано [1–4], что улучшить качество кристаллической структуры 300 нм пленки можно с помощью ионной имплантации и последующей твердофазной рекристаллизации от тонкой приповерхностной пленки, не разрушенной облучением. Оптимальная толщина такой пленки составляет 30 нм [5]. При этом чаще всего облучение проводят при температуре жидкого азота. Однако при последующем нагреве до комнатных температур в таких пленках могут возникать структурные напряжения, которые могут негативно сказываться

на электрофизических характеристиках [6]. В работе [7] показано, что пленку кремния можно получить и при комнатных температурах. Для этого необходимо увеличить энергию имплантации и разрушить границу раздела кремний-сапфир, для того чтобы исключить рекристаллизацию от сапфировой подложки. Отметим, что образование дефектов, возникающих в массивном кремнии под действием ионного облучения, изучено достаточно хорошо. Однако в процессе образования дефектов в пленках кремния на сапфире могут наблюдаться некоторые особенности, связанные как с наличием резкой границы раздела между пленкой кремния и сапфира, так и с профилем внедренных частиц.

В данной работе исследовалось влияние ионного облучения на кристаллическую структуру пленки кремния и ее удельное сопротивление после ионного облучения. При этом особое внимание уделено методам анализа качества кристаллической структуры для оптимального подбора параметров имплантации.

Эксперимент

Облучение КНС-структур ионами Si^+ проводили на ускорителе HVЕЕ-500 [8]. Для предотвращения эффекта каналирования пучок ионов был разориентирован на угол $\alpha = 7^\circ$ от нормали к поверхности образца. Остаточное давление в камере не превышало 2×10^{-4} Па. Облучение производили ионами Si^+ с энергиями от 200 до 230 кэВ. Доза имплантации (флюенс) составляла 10^{15} ион/см². Равномерность имплантации обеспечивалась сканированием ионного пучка в двух взаимноперпендикулярных направлениях. Для точного определения дозы имплантации использовалась система диафрагм, позволявшая подавить ток вторичных электронов.

Кушкина Ксения Дмитриевна, магистр.
Назаров Антон Викторович, младший научный сотрудник.
Шемухин Андрей Александрович, старший научный сотрудник.
Евсеев Александр Павлович, программист.
Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова,
Научно-исследовательский институт ядерной физики имени Д. В. Скобельцына (НИИЯФ МГУ).
Россия, 119991, ГСП-1, Москва, Ленинские горы, дом 1, строение 2.
Тел. +7 (495) 393-37-70.
E-mail: av.nazarov@physics.msu.ru

Статья поступила в редакцию 21 декабря 2016 г.

© Кушкина К. Д., Назаров А. В., Шемухин А. А., Евсеев А. П., 2017

После имплантации проводился двухстадийный отжиг образцов в атмосфере азота при температурах 600–950 °С.

Исследование образования дефектов проводилось с помощью КР-спектрометра Ntegra Spectra (длина лазерного излучения 632 нм, интенсивность 10 мВт/см², диаметр лазерного пятна 1 мкм). Для сравнения было изучено качество кристалличности с помощью метода резерфордского обратного рассеяния (РОР) [9]. Запись спектров РОР проводилась с использованием ионов He⁺ с энергией 1–1,5 МэВ на ускорителе HVEE AN-2500. Пучок ионов падал вдоль нормали к поверхности образца, угол рассеяния составлял $\theta = 120$. Каждый образец был исследован в двух режимах: при падении пучка параллельно кристаллографической оси (каналирование), а также в направлении, не содержащем открытых каналов. Направление каналирования в кристалле определялось согласно измерению выхода обратнорассеянных ионов при изменении положения образца относительно пучка. Для этого образец устанавливался таким образом, чтобы нормаль к поверхности образца и направление распространения пучка отличались на небольшой угол около 2–4 градусов. Затем на образец направлялось определенное количество анализирующих частиц, и регистрировался сигнал с детектора. Образец на гониометрической системе отклонялся на малый угол около 0,1–0,2 градусов, и снова производился процесс облучения с заданной дозой и регистрацией обратно рассеянных частиц. Отклонение образца на малые углы с последующим облучением производилось до тех пор, пока не была получена характерная кривая зависимости выхода обратнорассеянных частиц от угла между нормалью к поверхности образца и направлением распространения пучка. Сканирование

производилось в двух взаимноперпендикулярных плоскостях. Положение образца, в котором наблюдается наибольший минимум на кривой зависимости выхода обратнорассеянных частиц, соответствует распространению пучка вдоль главной кристаллографической оси.

Результаты и обсуждение

На первом этапе работы изучалось влияние температуры мишени на образовавшиеся дефекты при облучении ионами Si⁺ с энергией 200 кэВ. В таблице приведены зависимости отношения кристаллической и аморфной фаз от температуры, полученные с помощью комбинационного рассеяния света и резерфордского обратного рассеяния. Параметр I_c/I_a показывает интегральное отношение полученное с помощью комбинационного рассеяния света (I_c – соответствует кристаллической фазе, I_a – аморфной). Спектры раскладывались на комбинацию гауссовских и лоренцовских контуров с помощью пакета Origin 9.1. Параметр аморфизации по РОР показывает отношение интегрального сигнала обратнорассеянных ионов от кремниевой пленки, полученного в направлении каналирования, к направлению, не содержащему открытые каналы. Чем выше это отношение, тем больше кристаллической фазы осталось после ионного облучения. Из таблицы видно, что облучение при пониженных температурах ведет к полному разрушению структуры. С увеличением температуры, при которой происходит облучение, неразрушенной ионным облучением фазы остается больше. Отметим следующее: несмотря на то, что метод резерфордского обратного рассеяния дает более точное отношение фаз, метод КРС значительно сокращает время анализа.

Таблица

Соотношение аморфной и кристаллической фаз в пленках кремния после облучения ионами кремния при различных температурах

Температура, °С	I_c/I_a (КРС)	Параметр аморфизации по РОР	Удельное сопротивление, Ом·см
23	2,6	0,28	33
0	2,1	0,22	33
–10	1,8	0,15	31
–18	Не удалось разделить пики	0,08	12
–150	Не удалось разделить пики	0	2

После проведения высокотемпературного отжига с помощью метода Метод Ван-дер-Пау определялось удельное сопротивление пленок кремния. Удельное сопротивление структуры, неподвергнутой облучению, составляло 33 Ом см. После облучения при низких температурах происходит резкое уменьшение удельного сопротивления. Вероятно, это говорит о сильном перемешивании

границы раздела и значительном проникновении алюминия из диэлектрической подложки в пленку кремния. При этом видно, что при температурах от –10 до 23 °С удельное сопротивление практически не меняется.

Отметим, что с помощью методики КРС после отжига не видно никаких различий между образцами, облученных при различных температурах.

Однако, по данным РОР, наилучшие результаты при этих параметрах облучения наблюдаются при 0 °С.

В работе [3] показано, что для улучшения качества кристалличности пленки кремния при комнатных температурах необходимо увеличить энергию ионного пучка. Поэтому дальнейшие эксперименты были проведены при энергиях 200–230 кэВ. На рис. 1 приведены спектры структур, полученных после имплантации при различных энергиях ионов, но при фиксированной дозе и температуре –10 °С. На рисунке видны широкие спектры на частоте 480 см⁻¹, что соответствует аморфному кремнию и небольшой пик вблизи 520 см⁻¹ – соответствующий кристаллической фа-

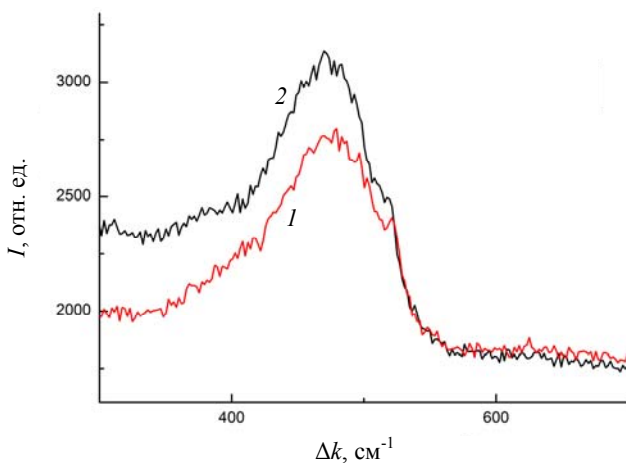


Рис. 1. Интенсивность I спектра комбинационного рассеяния света, полученного от пленок кремния после облучения ионами кремния с энергией: кривая 1 (красная) – 200 кэВ; кривая 2 (черная) – 215 кэВ; всё при –10 °С. По горизонтальной оси отложен рамановский сдвиг Δk .

Заключение

После облучения пленок кремния ионами кремния с энергией 200 кэВ и дозой (флюенсом) 10¹⁵ ион/см² при низких температурах происходит резкое уменьшение удельного сопротивления после проведения последующего высокотемпературного отжига. Это говорит о сильном перемещении границы раздела и значительном проникновении алюминия из диэлектрической подложки в пленку кремния. При облучении в диапазоне температур от –10 до 23 °С удельное сопротивление после высокотемпературного отжига практически не меняется. При увеличении энергии облучения до 215 кэВ после высокотемпературного отжига наблюдается значительное улучшение качества кристалличности, при этом удельное сопротивление не меняется.

При более высокой температуре (см. рис. 2) при энергии имплантации 200 и 215 кэВ наблюдается более четкий пик 520 см⁻¹, соответствующий кристаллическому кремнию. Объяснить это можно следующим образом: при более высокой температуре структура «восстанавливается», образуя химические связи за счет существования тепловых колебаний. Получить спектры при большей энергии ионов (230 кэВ) с помощью метода КРС не удалось. При этом удельное сопротивление на всех образцах после высокотемпературного отжига менялось незначительно. Однако качество кристалличности по РОР вблизи границы раздела значительно улучшилось.

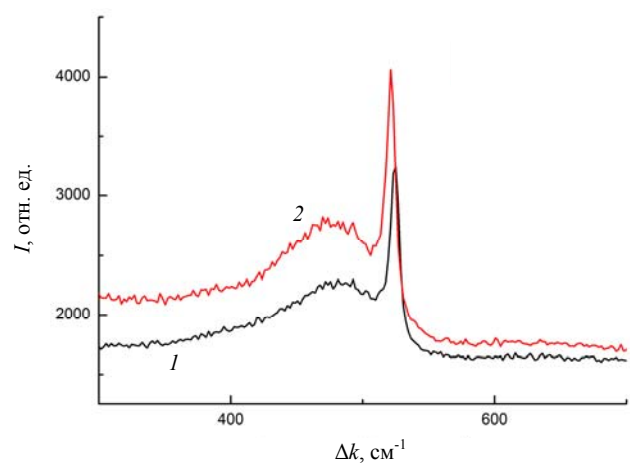


Рис. 2. Интенсивность спектра I комбинационного рассеяния света, полученного от пленок кремния после облучения ионами с энергией: кривая 1 (черная) – 200 кэВ, кривая 2 (красная) – 215 кэВ; всё при 0 °С.

В работе показано, что с помощью метода комбинационного рассеяния света можно проводить интегральный сравнительный экспресс-анализ качества кристалличности структуры серии образцов. При этом не требуется никакой подготовки образцов и вакуумных условий, что значительно сокращает время анализа.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № НК 15-07-99656/15 от 28 января 2015.

ЛИТЕРАТУРА

1. Golecki R. L., Maddox K. M., Stika // J. Electron. Mater. 1984. Vol. 13. No. 2. P. 373.
2. Nakamura T., Matsuhashi H., Nagatomo Y. // Oki Techn. Rev., 2004. Vol. 71. No. 4. P. 66.

3. Wang Q., Zan Y., Wang J., Yu Y. // Materials Science and Engineering, 1995. Vol. B29. P. 43.

4. Qi-Yuan Wang, Ji-Ping Nie, Fang Yu, Zhong-Li Liu, Yuan-Huan Yu. // Materials Science and Engineering, 2000. Vol. B72. P. 189.

5. Шемухин А. А., Балакшин Ю. В., Черных В. С. и др. // Письма в ЖТФ. 2012. Т. 38. № 19. С. 83.

6. Pramanik A., Zhang L. C. Residual // Journal of Solids and Structures, 2011. Vol. 48. P. 1290.

7. Shemukhin A. A., Nazarov A. V., Balakshin Yu. V., Chernysh V. S. // Nucl. Instruments and Methods in Physics Research, Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms. 2015. Vol. 354. P. 274.

8. Шемухин А. А., Балакшин Ю. В., Черных П. Н., Черных В. С. // Прикладная физика. 2013. № 5. С. 59.

9. Шемухин А. А., Балакшин Ю. В., Черных П. Н., Черных В. С. // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. 2013. № 4. С. 25.

PACS: 29.27.-a

The influence of ion irradiation on the conductivity of silicon films

K. D. Kushkina, A. V. Nazarov, A. A. Shemukhin, and A. P. Evseev

M. V. Lomonosov Moscow State University, Skobeltsyn Institute of Nuclear Physics (SINP MSU)
1(2) Leninskie gory, Moscow, 119991, Russia
E-mail: av.nazarov@physics.msu.ru

Received December 21, 2016

Silicon films were irradiated with the 200–230 keV Si⁺ ions at the target temperature varied from the liquid nitrogen to a room temperature. It was shown that the integrated analysis of the lattice quality after irradiation can be performed using Raman spectroscopy, which significantly reduces the time of the research. The influence of ion irradiation on the conductivity of the silicon films was studied.

Keywords: ion implantation, formation of defects, Raman scattering.

REFERENCES

1. R. L. Golecki, K. M. Maddox, and Stika, J. Electron. Mater. **13** (2), 373 (1984).
2. T. Nakamura, H. Matsushashi, and Y. Nagatomo, Oki Techn. Rev., **71** (4), 66 (2004).
3. Q. Wang, Y. Zan, J. Wang, and Y. Yu, Materials Science and Engineering **B29**, 43 (1995).
4. Qi-Yuan Wang, Ji-Ping Nie, Yu Fang, Liu Zhong-Li, and Yu Yuan-Huan, Materials Science and Engineering **B72**, 189 (2000).
5. A. A. Shemukhin, Yu. V. Balakshin, V. S. Chernysh, et. al., Tech. Phys. Lett. **38** (10), 907 (2012).
6. A. Pramanik and L. C. Zhang, Journal of Solids and Structures **48**, 1290 (2011).
7. A. A. Shemukhin, A. V. Nazarov, Yu. V. Balakshin and V. S. Chernysh, Nucl. Instruments and Methods in Physics Research, Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms **354**, 274 (2015).
8. A. A. Shemukhin, P. N. Chernykh, V. S. Chernysh, Y. V. Balakshin, and A. V. Nazarov, Prikl. Fiz., No. 5, 59 (2013).
9. A. A. Shemukhin, Y. V. Balakshin, P. N. Chernykh, and V. S. Chernysh, Surface Investigation X-Ray, Synchrotron and Neutron Techniques. **7**, 318 (2013).