

ОБРАЗОВАНИЕ СЛОИСТЫХ СТРУКТУР В КРЕМНИИ, ОБЛУЧЕННОМ ВЫСОКОЭНЕРГЕТИЧЕСКИМИ ИОНАМИ ГЕЛИЯ

В.И. Варнина, Л.С. Марченко, М.Б. Пинковская, М.И. Старчик, Г.Г. Шматко
Институт ядерных исследований НАН Украины
пр. Науки, 47, Киев, 03680, Украина, myrglory@yahoo.com, lpo@kinr.kiev.ua

Показана возможность периодического структурообразования в кремнии в условиях высокоэнергетической и высокодозовой имплантации ионами гелия. Представлены результаты исследования структурных и оптических свойств монокристаллического кремния, облученного ионами гелия с энергией 27.2 МэВ при варьировании тока пучка. При флюенсах $\Phi \geq 10^{16}$ см⁻² наблюдается образование слоев перпендикулярно направлению пучка ионов. При токах ~ 0.25-0.45 мкА линейные структуры наблюдались как в пробежной для ионов части Si, так и в запробежной. С ростом тока пучка до ~ 1 мкА линейные структуры, состоящие из пустот, наблюдались только в области пробега ионов. Для объяснения наблюдаемого распространения упорядоченных структур в запробежную для ионов гелия части кремния привлекается понятие мобильных солитонов. Образование периодических структур из пустот связывается с движением фронта рекристаллизации от аморфных слоев, образовавшихся вследствие высокоэнергетического и высокодозового облучения кремния ионами гелия.

Полученные результаты имеют фундаментальное значение для более углубленного понимания природы взаимодействия облучения с веществом в условиях большой концентрации дефектов.

Введение

Накопленные к настоящему времени в радиационной физике твердого тела теоретические и экспериментальные данные указывают на возможность самоорганизации в ансамбле радиационных дефектов в условиях ионной имплантации [1-2]. Интерес к поведению гелия, имплантируемого в кремний, возник в связи с образованием пустот при больших флюенсах облучения [3-4]. Гелий слабо растворим в Si. В процессе облучения он собирается в газонаполненные вакансионные комплексы. При нагреве кремния выше $T \geq 400$ °С эти комплексы растут, гелий из них освобождается, оставляя пустоты. Поверхность пустот остается чистой, что делает их местами возможного геттерирования примесей из окружающей матрицы, а также центрами релаксации напряжений в решетке кремния.

В работе представлены результаты исследования структурных и оптических свойств монокристаллического кремния, облученного ионами гелия с энергией 27.2 МэВ флюенсом $\Phi \geq 5 \cdot 10^{16}$ см⁻² при варьировании тока пучка.

Цель работы – получение информации о природе и параметрах нарушенной структуры, оптических свойствах облученного кремния.

Эксперимент и методы исследований

Монокристаллический Si (FZ и Cz) облучался ионами гелия с энергией 27.2 МэВ $\Phi = 5 \cdot 10^{16} - 10^{17}$ см⁻² при варьировании тока пучка 0.25-1.0 мкА на циклотроне У-120 ИЯИ НАНУ. Проекционная длина пробега ионов данной энергии составляет ~ 360 мкм. Образцы в процессе облучения охлаждались проточной водой. Облученные образцы разрезались вдоль направления облучения, что позволяло изучать свойства кремния в области пробега ионов, торможения и в запробежной части.

Использовался ряд оптических и структурных методов: рентгеновская топография (РТ), избирательное травление (ИТ) и металлография (МГ), растровая электронная (РЭМ) и атомная силовая

(АСМ) микроскопия, микропрофилография (МП), а также ИК-спектроскопия.

Результаты эксперимента

Рентгеновская топография облученного образца кремния, снятая после обработки поверхности, показала значительные нарушения структуры в области торможения ионов на глубине ~ 360 мкм.

На микрофотографиях поверхности Si, облученного ионами гелия ($\Phi = 3.5 \cdot 10^{17}$ см⁻², ток пучка ~ 0.3 мкА), полученных в РЭМ (рис. 1), видны линии напряжений.

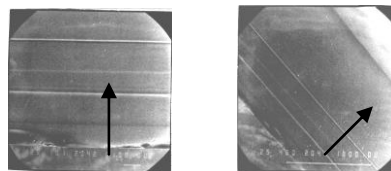


Рис. 1. Микрофотографии поверхности кремния после облучения ($\Phi = 3.5 \cdot 10^{17}$ см⁻², ток пучка ~ 0.3 мкА).

Расстояния линий от облучаемой поверхности представлены в таблице. Линии (III-IV) связаны с концом пробега ионов гелия.

№ стенок	Расстояние "стенок" дефектов от поверхности Si, мкм			
	МГ	РЭМ		
		# 1	# 2	# 3
I	132	150	145	140
II	242	282		
III	341	362	337	327
IV	380	385	380	352
V	423			441
VI	627	636	666	637
VII	720	674		
VIII	764			
		865	839	

Другие линии проявляются как в пробежной, так и в запробежной части образца (эффект дальнего действия). С увеличением тока пучка до ~ 1 мкА линии напряжений наблюдались только в

области пробега ионов. Эффект дальнего действия не проявлялся. Число линий напряжений в пробежной части образца (ток пучка ~ 1 мкА) определялось, скорее всего, градиентом температуры по облучаемой поверхности, так как уменьшалось от центра образца к краю, где охлаждение максимально (рис. 2).

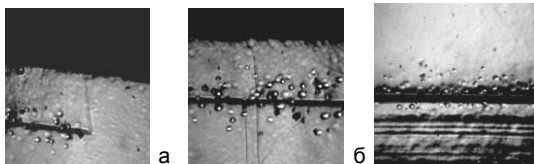


Рис. 2. Картина избирательного травления поверхности облученного Si, $\Phi=10^{17}$ см $^{-2}$, ток пучка ~ 1 мкА (а, б - край, в - центр образца). Увеличение $\times 137$.

Данные металлографии образца Si, облученного $\sim 10^{17}$ см $^{-2}$ при токе пучка ионов ~ 1 мкА после избирательного травления показали, что в пробежной для ионов части образца линии напряжений представляют собой слои, состоящие из пустот разной формы и размеров (рис. 3).

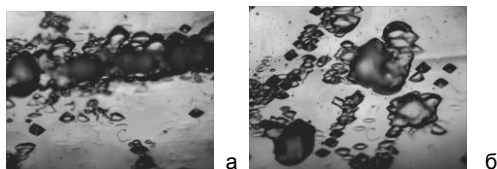


Рис. 3. Картина избирательного травления поверхности кремния (пустоты и ямки травления). Увеличение $\times 700$.

Пустоты наблюдались как изолированно друг от друга, так и в виде слоев. Кроме пустот вблизи слоев наблюдались дефекты упаковки и дислокации.

Микропрофилограмма поверхности образца показала распухание Si в области пробега ионов гелия. Разница в профиле облученной и необлученной части образца ~ 8 мкм. АСМ изображение подтверждает распухание Si: в области пробега гелия шершавость облученной поверхности по сравнению с необлученной значительно возрастает (рис. 4).

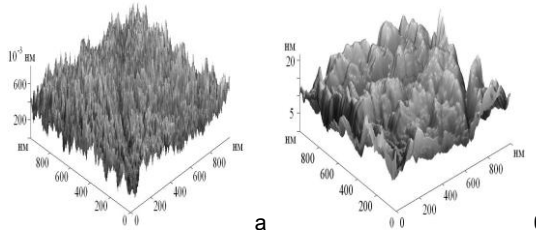


Рис. 4. АСМ фотография поверхности Si: до облучения (а), облучение ионами гелия 10^{17} см $^{-2}$ (б).

На спектрах ИК-поглощения облученного кремния, полученных на Фурье-спектрометре FIS-113V со спектральным разрешением 1.0 см $^{-1}$ при $T_{\text{ком}}$ в спектральной области $5000-400$ см $^{-1}$, дополнительного поглощения, связанного с облучением, не наблюдалось (рис. 5).

Обсуждение результатов

Известно [4], что в кремнии, облученном иона-

ми кэВ-ной энергии $\Phi \geq 10^{16}$ см $^{-2}$ при комнатной температуре в области торможения ионов образуется аморфный слой с центром в области с максимальным числом смещенных атомов. Толщина слоя растет с увеличением флюенса облучения. Избежать аморфизации можно повышением T облучения ≥ 250 °С. Это способствует рекристаллизации аморфного слоя и освобождению газа из вакансионных комплексов, после чего остаются пустоты.

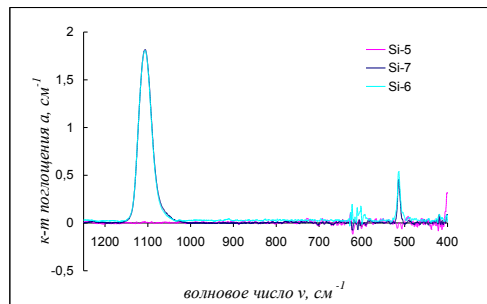


Рис. 5. Дифференциальные спектры поглощения кремния, облученного ионами гелия: Si-5 - $\Phi = 5 \cdot 10^{16}$ см $^{-2}$; Si-6 - $\Phi = 1 \cdot 10^{17}$ см $^{-2}$; Si-7 - $\Phi = 0$.

Образование вакансионных комплексов возможно при наличии высокой концентрации вакансий, которая определяется концентрацией распавшихся пар Френкеля. При используемых в настоящей работе МэВ-ных энергиях ионов гелия, эти условия выполняются лучше, чем при кэВ-ных энергиях.

Кластерирование вакансий в случае облучения кремния ионами гелия проявляется в виде образования газовакансионных комплексов, а избыточные междоузельные атомы образуют протяженные дефекты (дефекты упаковки, стержнеобразные и лентоподобные) [5].

Считается, что пороговым флюенсом ионов для образования газовакансионных комплексов в кремнии является флюенс $\Phi \geq 10^{16}$ см $^{-2}$. Более точная величина флюенса определяется температурой имплантации, энергией и массой ионов. При отжиге облученного кремния при 800 °С происходит восстановление структуры через эпитаксиальную рекристаллизацию по обе стороны образовавшегося аморфного слоя [6]. Начинается процесс на границе аморфного слоя и матрицы Si. Рекристаллизация способствует ускорению сегрегации газа, восстановлению нарушенной структуры (аморфного слоя) и образованию поликристаллического слоя.

Кроме этого, в случае больших флюенсов облучения в ионнооблученных материалах наблюдалось образование периодических структур [7-8].

Мы наблюдали (I пучка ~ 1 мкА, $\Phi \sim 10^{17}$ см $^{-2}$) два сильно нарушенных слоя, состоящие из пустот: 1 - в области торможения ионов на глубине ~ 360 мкм; 2 - ближе к облучаемой поверхности. В пробежной части кремния такие дефекты не обнаруживались. При уменьшении тока пучка до $0.25-0.45$ мкА наблюдались линии напряжений как в пробежной для ионов части кремния, так и за ее пределом. Это дает возможность путем

изменения тока пучка ионов (интенсивности облучения) получать разную слоистую картину распределения дефектов.

В работе [3] предполагается, что при отжиге кремния, облученного ионами гелия кэВ-ной энергии, заполненные гелием вакансионные комплексы двигаются в сторону облучаемой поверхности, после достижения которой гелий уходит из них, оставляя вблизи поверхности большие пустые «карманы» из пустот. Авторы работы [4] объясняют такое движение эффектом реструктуризации, которая обусловлена движением фронта рекристаллизации через аморфный материал. Двигаемые фронтами рекристаллизации с обеих сторон аморфного слоя, вакансионные кластеры собираются в его середине, коалесцируют и образуют пустоты. Именно при комбинации высокоэнергетической и высокодозовой имплантации гелия может образоваться многослойная структура из пустот в кремнии, наблюдаемая нами.

При отжиге ~ 800 °С кремния, облученного ионами гелия кэВ-ной энергии, аморфная область в конце пробега ионов рекристаллизуется, образуя поликристаллическую область с дефектами упаковки и дислокациями [3].

Высокоэнергетическое ионное облучение путем варьирования тока пучка (интенсивности облучения) приводит к структурированию дефектов, т.е. образованию обогащенных или обедненных дефектами областей.

Механизмы аморфизации и рекристаллизации при ионном облучении кремния пока обсуждаются. Из-за отсутствия надежных данных о природе, параметрах измененных слоев невозможно точное определение порогового флюенса облучения, периода и размеров образующихся подобных сверхструктур.

Для объяснения наблюдаемого нами распространения упорядоченных структур в запробежную для ионов гелия части кремния в случае токов 0.25 -0.45 мкА и флюенсов $\Phi \geq 10^{16}$ см⁻² в данное время можно использовать понятие мобильных солитонов [8], зарождающихся в плоскостях каскадов смещений атомов и распространяющихся вдоль плотно упакованных направлений в кристалле. Они термостабильны и вводятся фокусирующими столкновениями атомов. Дефектами, которые составляют данные структуры, скорее всего, являются междоузельные атомы.

FORMATION OF PERIODIC STRUCTURE IN SILICON IRRADIATED WITH HIGH ENERGY HELIUM IONS

Valentina Varnina, Larysa Marchenko, Myroslava Pinkovska, Margaryta Starchyk, Halyna Shmatko
Institute for Nuclear Research National Academy of Science of Ukraine,
Prospect Nauky, 47, Kyiv, 03680, Ukraine, myrglory@yahoo.com; lpo@kinr.kiev.ua

It has been shown the possibility of periodic structure formation under high energy and high dose ion irradiation. While studying optical and structural properties of silicon irradiated with 27,2 MeV helium ions ($\Phi \geq 10^{16}$ см⁻²) we observed the formation of linear structures in the region of ion path as well as behind them. Number of structures depends on the intensity of irradiation (beam current). At currents $\sim 0.25 \div 0.45$ μ кА linear structures are observed in ion path of the Si, and behind it. With increasing the beam current to ~ 1 μ кА linear structures consisting of voids were observed only in the path of the ions.

In order to explain the propagation of order structures behind ion's path the soliton concept is proposed. The formation of the "lattice" from the pores is associated with the movement of the recrystallization front from amorphous layers, formed as a result of high-energy and high-dose ion irradiation of silicon. Further research is needed in order to understand these processes and to control them.

The authors are grateful to professor Vladimir I. Sugakov for a fruitful discussion.

Заклучение

Облучение монокристаллического кремния ионами гелия с энергией 27.2 МэВ при флюенсах $\Phi \geq 10^{16}$ см⁻² приводит к образованию линейных структур. Количество структур зависит от интенсивности облучения (тока пучка). При токах ~ 0.25 - 0.45 мкА линейные структуры наблюдались как в пробежной для ионов части Si, так и в запробежной. С ростом тока пучка до ~ 1 мкА линейные структуры, состоящие из пустот, наблюдались только в области пробега ионов.

Предполагается, что распространение влияния высокоэнергетического и высокодозового ($\Phi \geq 10^{16}$ см⁻²) облучения за область пробега ионов связано с солитонами, зарождающихся в плоскостях каскадов смещений атомов. В настоящее время пока нет других объяснений механизмов упорядочения пор, т.е. образования сверхрешетки из них. Особенно это касается «усыхания» или сжатия пор за ее пределами. Предполагается, что для тех пор, которые находятся вдоль пути распространения солитонов, должны создаваться условия упорядочения вплоть до создания из них «решетки»; для всех иных - сжатие и «выметание».

Образование «решетки» из пор и приводит к распуханию материала. Для понимания этих процессов и управления ими необходимы дальнейшие исследования.

Список литературы

1. Селищев П.А. Самоорганизация в радиационной физике. К.: Аспект – Поліграф. 2004. 239 с.
2. Суяков В.И. // Ядерная физика и энергетика. 2009. № 10. С. 395.
3. Vishniakov M., Donnelly S.E., Rousselet S., David M.A., Barbot, J.F. Carter G. // Appl. Phys. 2003. V. 94. P. 238.
4. Oliviero E., Peripolli S., Amaral B. // J. Appl. Phys. 2006. V. 100. P. 0435505.
5. Beufor M. F., Donnelly S. E. // Nucl. Inst. And Meth. In Phys. Research. 2006. B242. P.565.
6. Nord J., Nordlund K., Keinonen J. // Phys. Rev. B. 2002. V. 65. P. 165329.
7. Мясников А.М., Ободников В.И. // Физ. техн. полупроводников. 1997. Т. 31. С. 338.
8. Dubinko V.I., Gudla A.C., Donnelly S. E. // Nucl. Inst. And Meth. In Phys. Research. 2011. B269. P.1634.