

05;10

Аморфизация кристаллов Si ионами He⁺

© В.Ф. Реутов, А.С. Сохацкий

Объединенный институт ядерных исследований,
Лаборатория ядерных реакций им. Г.Н. Флерова, Дубна
E-mail: sohatsky@nrsun.jinr.ru

Поступило в Редакцию 28 февраля 2002 г.

Изучена возможность аморфизации кремния в процессе облучения ионами гелия. Исследование структурных изменений в кремнии вдоль пробега бомбардирующих ионов гелия с $E = 17$ keV проводилось методом просвечивающей электронной микроскопии тонких самонесущих пластинок Si (100), облученных в плоский торец (грань {011}) при комнатной температуре в интервале доз от $3 \cdot 10^{16}$ до $3 \cdot 10^{17}$ см⁻². Установлено, что аморфизация кремния происходит, когда отношение скорости генерации дефектов к скорости введения атомов гелия в Si более 90 (в ед. число смещений/атом He), при флюенсах ионов более 10^{17} см⁻².

Формирование аморфных слоев в кристаллической подложке кремния под действием ионного облучения хорошо известно и широко применяется в технологии. Известно, что кремний достаточно легко аморфизуется ионами средних масс. Согласно Морхеду и Кроудеру [1], наиболее легкими частицами, которыми еще можно аморфизовать Si при комнатной температуре, являются ионы бора.

Подобные экспериментальные факты определили основной механизм радиационно-индуцированной аморфизации полупроводников, а именно формирование аморфных областей в каскадах атом-атомных соударений. Однако эксперименты по облучению Si электронами с энергией 2 MeV при температуре облучения менее 25 K дозой около 5 смещений/атом (сна) показали, что его аморфизация возможна и при образовании точечных радиационных дефектов [2]. Низкая температура облучения обеспечила условия сохранения от взаимной рекомбинации большей доли точечных дефектов, накопление которых способствовало аморфизации Si.

Уменьшение степени рекомбинации точечных радиационных дефектов возможно и при условии захвата (блокирования) одного из типов дефектов, например вакансий примесными атомами. В работах [3–5]

было показано, что атомы примесного гелия эффективно взаимодействуют с вакансиями, сохраняя их от рекомбинации с дефектами междоузельного типа. В этой связи есть основания предполагать, что возможно достичь условий аморфизации кремния при его облучении ионами гелия. Необходимым условием для этого является, по-видимому, получение определенного соотношения между скоростями генерации дефектов (\dot{C}_d) и введения атомов гелия (\dot{N}_{He}) в Si, которое определяется параметром $K = \dot{C}_d / \dot{N}_{\text{He}}$ (в ед. число смещений/атом гелия), естественно, при выполнении достаточного условия — достижения определенного уровня концентрации гелия.

Заметим, что выполнение этих условий в случае ионного облучения возможно только на части пробега ионов, поскольку из-за взаимного пространственного сдвига профилей дефектов и легирования величина K изменяется по глубине в области ионного легирования. При низкоэнергетическом ионном легировании (до 100 keV) ее величина монотонно уменьшается от ~ 150 у бомбардируемой поверхности до нуля в конце пробега ионов. В области пика повреждения K составляет около 70.

Согласно литературным данным по изучению дефектообразования в кремнии, при облучении Si ионами гелия флюенсом до 10^{17} cm^{-2} аморфизация кремния не отмечалась [5]. В то же время авторами работы [6] была отмечена аморфизация тонкой заглавленной области кремния при облучении повышенной дозой $2.5 \cdot 10^{17} \text{ cm}^{-2}$ ионов гелия с $E = 20 \text{ keV}$. Это дает основание полагать, что значение величины K в этой области было, по-видимому, достаточным для формирования в ней дефектов, ответственных за аморфизацию Si, однако для их накопления потребовалась имплантация значительной (до 10 at.%) концентрации атомов гелия.

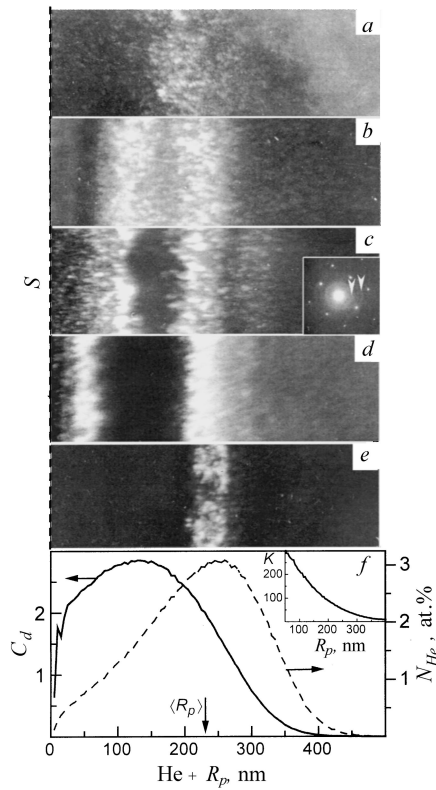
Таким образом, если K действительно управляет образованием этих дефектов, то для аморфизации Si при меньшей дозе облучения необходимо изменить условия эксперимента так, чтобы в области ионного легирования относительная концентрация генерируемых пар Френкеля увеличилась бы по отношению к концентрации атомов гелия. Эти условия, как нам видится, можно реализовать при облучении в торец тонкой кристаллической пластинки кремния [7]. При подобном облучении требуемое увеличение K может быть достигнуто за счет уменьшения потока ионов гелия вдоль пробега из-за их рассеяния из образца.

В настоящей работе для изучения влияния параметра K на аморфизацию кремния низкоэнергетическими ионами He использовалась методика облучения в плоский кристаллографический торец (грань {011}) тонкой самонесущей пластинки Si(100) [7]. Толщины пластинок (t) выбирались в интервале их прозрачности для электронов в просвечивающем электронном микроскопе (ПЭМ) при ускоряющем напряжении 125 keV, т.е. толщиной не более 250 nm. Как показали вычисления с использованием программы SRIM-98 и программы, разработанной для расчета влияния толщины пластинки на образование в ней дефектов и на накопление атомов имплантируемой примеси [7], величина K значительно увеличивается в образцах, соизмеримых по толщине со средним проективным пробегом ионов ($\langle R_p \rangle$). Например, при энергии ионов He⁺ 17 keV на глубине пробега ионов 150 nm, соответствующей области с наибольшей скоростью генерации точечных дефектов в Si, величина K в массивном образце (т.е., когда $t \gg \langle R_p \rangle$) составляет 70 (смещений/атом гелия), в то время как в облучаемой в торец пластинке толщиной $t = 200$ nm $K = 120$, а при $t = 100$ nm $K = 230$.

Особо отметим, что, помимо варьирования K выбором толщины облучаемой пластинки кремния, данная методика позволяет изучать в ПЭМ структурные изменения вдоль всего пробега бомбардирующих ионов непосредственно сразу после облучения.

Для эксперимента использовался масс-сепарированный пучок ионов He⁺ с энергией 17 keV и интенсивностью $2 \cdot 10^{14}$ см⁻² · с⁻¹ из источника ионов DECRIS-14 (ОИЯИ, Дубна). Расчетная температура области повреждения тонкой Si мишени была менее 40°C.

На рисунке приведена иллюстрация характерных структурных изменений в кремнии вдоль пробега ионов He в кремниевой пластинке толщиной 150 nm в зависимости от дозы облучения. Формирование скоплений радиационных дефектов по всей глубине повреждения отмечается при дозе $3 \cdot 10^{16}$ см⁻² (см. рисунок, *a*). При этом область с максимальной концентрацией скоплений дефектов приходится на глубину около 200 nm, что глубже, чем пик расчетного профиля повреждения (140 nm, см. рисунок, *e, f*). С увеличением дозы облучения (до $5 \cdot 10^{16}$ см⁻²) на глубине 170 nm появляется характерный „провал“ в концентрации скоплений радиационных дефектов (см. рисунок, *b*), на месте которого при дозе 10^{17} см⁻² образовался аморфный слой (см. рисунок, *c*). С дальнейшим увеличением дозы облучения до $3 \cdot 10^{17}$ см⁻² ширина этого аморфного слоя увеличивалась до бомбардируемой поверхности (см. рисунок, *d* и *e*).



Дозовая зависимость изменений структуры в пластинке кремния толщиной $t = 150 \text{ nm}$, облучаемой в кристаллографический торец (S), вдоль пути движения ионов He^+ с энергией $E = 17 \text{ keV}$ (ПЭМ-изображения в „темном поле“ при $g = 220$): *a* — формирование скоплений радиационных дефектов при дозе облучения $3 \cdot 10^{16} \text{ cm}^{-2}$; *b* — зона преаморфного состояния Si в области скоплений дефектов при дозе $5 \cdot 10^{16} \text{ cm}^{-2}$; *c* и *d* — „захороненный“ аморфный слой Si при дозах облучения 10^{17} и $1.5 \cdot 10^{17} \text{ cm}^{-2}$, на вставке электронограмма из области повреждения, стрелками отмечены кольца, проходящие через рефлексы Si (111) и (220); *e* — слой аморфного Si включает бомбардируемую поверхность ($3 \cdot 10^{17} \text{ cm}^{-2}$); *f* — расчетные профили концентраций радиационных дефектов (в единицах смещений/атом, сна) и имплантированного гелия для дозы облучения 10^{17} cm^{-2} в масштабе микрофотографий. На вставке показано изменение параметра $K = \dot{C}_d / \dot{N}_{\text{He}}$ (в единицах смещений/атом He) вдоль проективного пробега ионов $\langle R_p \rangle$.

Отметим, что зарождение заглубленного аморфного слоя начинается между пиками расчетного радиационного повреждения и гелиевого легирования (см. рисунок, f), т.е. за аморфизацию Si не отвечают по отдельности ни накопление точечных дефектов, ни накопление примесного гелия. По-видимому, определяющим для аморфизации Si является накопление в нем гелий-вакансионных ($He_n V_m$) комплексов при выполнении необходимого условия: величина K должна быть по крайней мере не меньше 90 смещений/атом гелия — и достаточного условия: концентрация гелия должна быть не менее 1 at.%.

Таким образом, как показали ПЭМ-исследования, аморфизация кремния облучением ионами гелия при комнатной температуре происходит при условии, когда отношение скорости генерации точечных дефектов к скорости накопления в Si атомов He больше, чем 90 смещений/атом He, а флюенс ионов $> 10^{17} \text{ cm}^{-2}$.

Список литературы

- [1] *Morehead F.F., Crowder B.L.* // Rad. Eff. 1970. V. 6. N 1/2. P. 27–32.
- [2] *Takeda S., Yamasaki J.* // Phys. Rev. Lett. 1999. V. 83. P. 320–323.
- [3] *Реутов В.Ф.* // ЖТФ. 1981. Т. 51. С. 2403–2407.
- [4] *Реутов В.Ф., Ждан Г.Т., Ибрагимов Ш.Ш.* // ВАНТ. Сер. ФРП и РМ. 1981. Вып. 2(16). С. 87–89.
- [5] *Raineri V., Coffa S., Szilágyi E., Gyulai J., Rimini E.* // Phys. Rev. B. 2000. V. 61. P. 937–945.
- [6] *Siegele R., Weatherly G.C., Haugen H.K., Lockwood D.J., Howe L.M.* // Appl. Phys. Lett. 1995. V. 66. P. 1319–1321.
- [7] *Реутов В.Ф., Сохацкий А.С.* // Материаловедение. 1998. Т. 10. С. 6–9. Препринт ОИЯИ Р14-97-199. Дубна, 1997.