

ЭФФЕКТЫ САМООРГАНИЗАЦИИ РАДИАЦИОННЫХ ДЕФЕКТОВ В КРЕМНИИ, ОБЛУЧЕННОМ ВЫСОКОЭНЕРГЕТИЧЕСКИМИ ЛЕГКИМИ ИОНАМИ

В.И. Варнина, А.А. Гроза, П.Г. Литовченко, Л.С. Марченко, М.И. Старчик, Г.Г. Шматко
Институт ядерных исследований НАН Украины, пр. Науки 47, 03680, Киев, Украина,
тел. (00 44) 525 52 38, факс: (00 44) 525 37 44, e-mail: plitov@kinr.kiev.ua; aagroza0@gmail.com

Исследовались монокристаллы кремния, облученные протонами с энергией $E = 6,8$ МэВ ($\Phi = (1 \div 3) \cdot 10^{17} \text{ см}^{-2}$) и альфа-частицами с энергией $E = 27,2$ МэВ ($\Phi = 1 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-2}$). ИК-спектрометрическими исследованиями выявлена немонотонная зависимость от флюенса протонов степени разупорядочения монокристаллов, образования дивакансий и центров, в состав которых входит водород, локализованный на разорванных связях радиационных дефектов. При увеличении флюенса протонов до $3 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-2}$ и при облучении альфа-частицами в ИК-спектрах признаков разупорядочения монокристаллов не выявлено. Металлографическими исследованиями в пробежной для альфа-частиц части кремния обнаружено образование дефектной структуры в виде «стенок дефектов», перпендикулярных направлению движения ионного пучка. Обнаруженные эффекты объясняются процессом самоорганизации собственных радиационных дефектов, следствием которого стало образование «сверхрешетки» в дефектной подсистеме кристалла.

Введение

Исследование кремния и материалов на его основе является главным в электронном материаловедении, поскольку они на протяжении многих лет остаются исходными материалами применяемыми в микро- и наноэлектронике, нанофотонике и т. п. для создания квантово-размерных электронных устройств. Для создания таких устройств требуются новые технологические подходы. Накопленные к настоящему времени экспериментальные факты создали необходимую базу для обобщения и поиска подходов для их теоретического описания. Для описания закономерностей поведения открытых неравновесных систем, процессов их структурного изменения с самоорганизацией различных структур используются методы и принципы синергетики [1]. В последнее время делаются попытки применения синергетических подходов в различных областях электронного материаловедения. В радиационной физике облучаемый образец является типичной открытой системой потокового типа [2].

В последние годы получен ряд экспериментально обнаруженных явлений в полупроводниках, связанных с самоорганизацией дефектов при облучении кристаллов частицами высоких энергий. Радиационно-стимулированное самоупорядочение приводит к формированию двух- или трёхмерных периодических структур, фазовых превращений, сверхрешёток. Всё это, в свою очередь, даёт возможность модифицировать оптические, электрофизические и другие свойства кристаллов, снимать упругие напряжения в кристаллах, приводить последние в более равновесное состояние [3]. При радиационных воздействиях особую роль играют процессы спонтанных фазовых переходов, например, радиационно-стимулированной кристаллизации аморфных либо аморфизованных слоёв. Это, так называемый, эффект больших доз (ЭБД) [4, 5]. Этот эффект был зарегистрирован в монокристаллическом кремнии, имплантированном ионами водорода, фосфора, бора, железа и кремния. Энергии ионов составляли при этом несколько десятков кэВ. Наши исследования процессов самоорганизации при использовании высокоэнерге-

тических лёгких ионов ($E \sim 10 - 30$ МэВ) могут оказаться полезными для разработки, систематизации и применения теоретических методов в науке о дефектах и дефектной инженерии.

Эксперимент

Облучение монокристаллов кремния проводилось протонами с энергией $E = 6,8$ МэВ ($\Phi = 1 \div 3 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-2}$) и альфа-частицами с энергией $E = 27,2$ МэВ ($\Phi = 1 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-2}$) на ускорителе У-120 Института ядерных исследований НАН Украины. Температура образцов при облучении не превышала 100°C . Проекционная глубина проникновения (R_p) в кремний для ионов обоих видов составляла 360 мкм.

Для исследования спектров ИК-поглощения использовался Фурье спектрометр FIS-113V. Измерения проводились при комнатной температуре со спектральным разрешением $1,0 \text{ см}^{-1}$.

Для получения топографического изображения дефектной структуры кремния образец разрезался вдоль направления облучения на пластинки, которые после механической и химической обработок поверхности исследовались на микроскопе МИМ-8. Поперечные сечения облучённых образцов исследовались также методом рентгеновской топографии по Лангу на просвет.

Результаты эксперимента и их обсуждение

На рисунке 1 приведены дифференциальные спектры поглощения кремния, облучённого протонами. Из спектров облучённых образцов кремния, выращенного как методом Чохральского (Si-Cz), так и зонной плавки (Si-FZ) вычитался спектр поглощения необлучённого зонного кремния высокой очистки.

Как видно из рисунка, в спектре кремния, облучённого протонами флюенсом $\Phi = 1,9 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-2}$ (кривая 2) наблюдается ряд полос в спектральной области поглощения локальными колебаниями Si-H центров: деформационными (рис. 1 а) и валентными (рис. 1 б); интенсивное поглощение дивакансиями и областями разупорядочения (рис. 1 в). Принимая во внимание более ранние

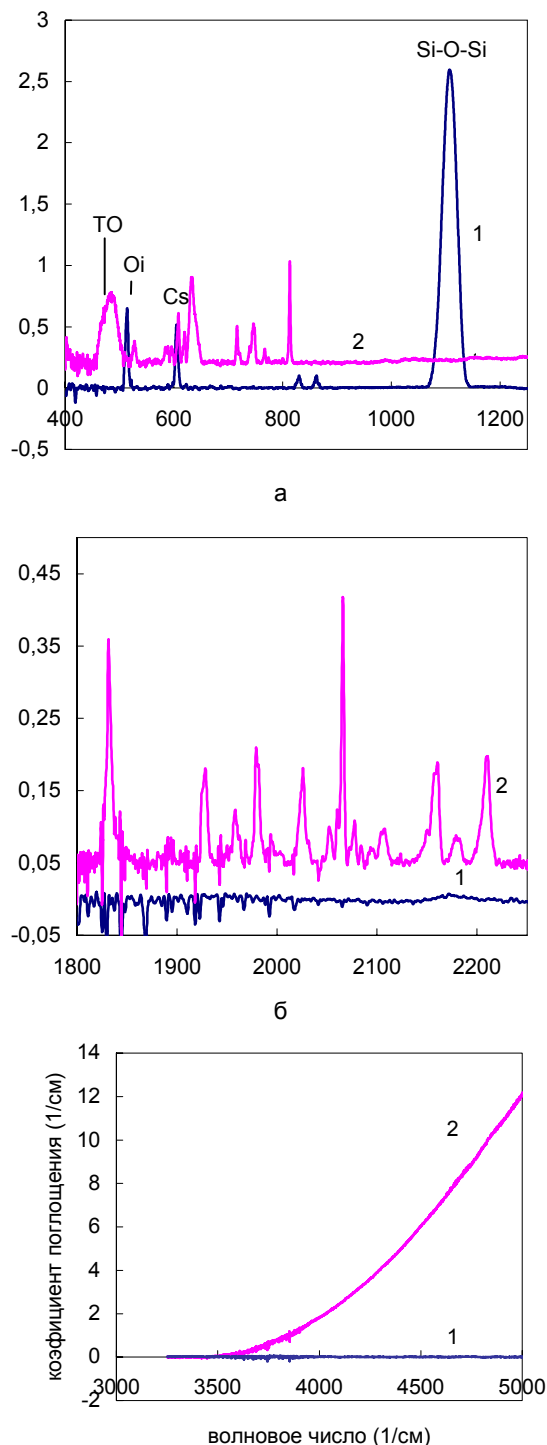


Рис. 1. Зависимость коэффициента поглощения от волнового числа для кремния (1 - Si-Gz, 2 - Si-FZ), облученного протонами ($E = 6,8$ МэВ) по сравнению с необлученным Si-FZ: а, б, – дифференциальные спектры в спектральной области поглощения локальными колебаниями Si-H связей деформационными и валентными, соответственно, в – дивакансиями и областями разупорядочения; кривые 1, 2 – для флюенсов облучения $3 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-2}$ и $1,9 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-2}$, соответственно. Кривые сдвинуты по оси ординат для наглядности.

наши исследования кремния, облученного протонами флюенсом $\Phi = 1 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-2}$ ($E = 6,8$ МэВ) [6], можно заключить, что Si-H связи образовывались при наличии областей разупорядочения дивакансионного типа. Колебательные структуры ($\circ$) SiH и ($\circ$) SiH₂ расположены, вероятнее всего, на дивакансиях, потому что возникали в тех кристаллах, в которых дивакансии были основными радиационными дефектами. Об особенно сильном разупорядочении образца кремния, облученного флюенсом $\Phi = 1,9 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-2}$, свидетельствует появление однофононного поглощения (поперечный оптический фонон TO при 477 см^{-1} на рис. 1 а), запрещенного в кристаллах кремния условиями симметрии.

В спектре кремния, облученного $3 \cdot 10^{17} \text{ р}^+/\text{см}^2$ (см. кривая 1 рис. 1 а) действие облучения обнаруживалось лишь по двум слабым полосам поглощения примесно-дефектными центрами C_iO_i и $\text{O}_i\text{-V}$ (А-центр). В спектрах кремния, облученного альфа-частицами во всей исследованной спектральной области ($400 \div 5000 \text{ см}^{-1}$) дополнительного поглощения, связанного с облучением, не наблюдалось.

Вероятно, в последних двух случаях ионного облучения при определенном энерговыделении во время облучения (и превышении предела разупорядочения, вплоть до аморфизации) в дефектной подсистеме кристалла создались условия для самоорганизации собственных радиационных дефектов.

Структурными методами протоннооблученный кремний исследовался нами ранее [6]. В данной работе мы приводим данные по исследованию монокристаллов кремния, облученного альфа-частицами. Кремний, выращенный методом Чохральского, перед облучением альфа-частицами прошел высокотемпературную обработку для растворения ростовых кислородных микропреципитов (1250°C в течение 2-х часов).

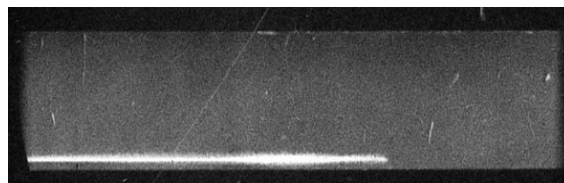


Рис. 2. Рентгеновская топограмма кремния, облученного альфа-частицами с энергией 27,2 МэВ, $\Phi = 1 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-2}$.

На рентгеновских топограммах кремния (рис. 2) в облученной части образца четко проявляется область страгглинга (чёрно-белый контраст, характерный для напряжений в кристаллической решётке на глубине R_p (360 мкм).

Металлографические исследования структуры кремния, облученного альфа-частицами, приведены на рис. 3, который показывает распределение дефектов вдоль направления облучения.

В области торможения альфа-частиц наблюдаются наибольшие напряжения решетки кремния. Вокруг этой области методом избирательного травления выявлены ямки, которые, возможно,

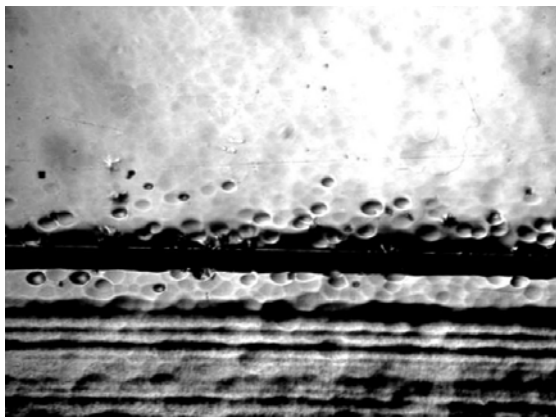


Рис. 3. Картина избирательного травления кремния, облученного альфа-частицами, ($E = 27,2$ МэВ, $\Phi = 1 \cdot 10^{17}$ см $^{-2}$).

связаны с накопленным гелием. Приведенная для центрального облученного участка образца картина (рис. 3) демонстрирует "стенки дефектов", расположенные параллельно плоскости торможения альфа-частиц. "Стенки" четче в центре облученной части образца, т.е. проявляется зависимость их образования от величины выделения энергии в определенной части образца во время облучения. Структура кремния в пробежной для альфа-частиц и необлученной части кристалла не отличалась.

Ранее мы обнаруживали в кремнии, облученном альфа-частицами, образование периодической дефектной структуры в виде стенок дефектов [7], которая распространялась и в пробежную для ионов часть кристалла – "эффект дальнего действия". Образование периодической дефектной структуры мы связывали с процессом самоорганизации, а распространение радиационного воздействия – с солитонным механизмом. Тот факт, что сейчас мы наблюдали образование "стенок дефектов" только в пробежной для ионов части кристалла может быть связан с различной степенью совершенства исходного материала.

Заключение

Выявлена немонотонная зависимость от флюенса облучения протонами: разупорядочения монокристалла, образование дивакансий и центров, в состав которых входит водород, локализованный на разорванных связях радиационных дефектов в кремнии – «эффект больших доз»?

Металлографическими исследованиями в пробежной для альфа-частиц части кремния обнаружено образование дефектной структуры в виде «стенок дефектов», перпендикулярных направлению движения ионного пучка.

Комплексные исследования воздействия высокоэнергетического облучения легкими ионами показывают, что при большом энерговыделении в тонком слое кристалла во время облучения могут создаваться условия для самоорганизации собственных радиационных дефектов, следствием которого может быть образование в дефектной подсистеме кристалла «сверхрешётки» в виде "стенок дефектов", расположенных перпендикулярно направлению облучения.

Авторы благодарны Хируненко Л.И. за предоставленную возможность использования Фурье спектрометра.

Список литературы

1. Сузакон В.И. Основы синергетики. – К.: В-во „Обереги“. 2001. – 287 с.
2. Селищев П.А. Самоорганизация в радиационной физике. – К.: ООО „Вид-во“ Аспект – Полиграф“. 2004. – 239 с.
3. Герасименко Н.Н., Пархоменко Ю.Н. Кремний — материал наноэлектроники. – М.: Техносфера, 2007. – 352 с.
4. Зацепин Д.А., Яценкова Е.С., Курмаев Э.З. и др. // ФТТ - 2006. – 48. – С. 204.
5. Ovsyannikov S.V., Shchennikov Jr V.V., Shchennikov V.V., Ponomov Y.S., Antonova I.V., Smirnov S.V. // Physica B – 2008. – 403. – P. 3424.
6. Гроза А.А., Литовченко П.Г., Старчик М.И. Эффекты радиации в инфракрасном поглощении та структурі кремнію. – К.: Наукова думка. 2006. – 124 с.
7. Groza A.A., Litovchenko P.G., Starchik M.I., Khivrich V.I., Shmatko G.G. // Ukr. J. Phys. – 2010. – 55. – P. 699.

EFFECTS OF SELF-ORGANIZATION OF RADIATION DEFECTS IN SILICON IRRADIATED WITH HIGH ENERGY LIGHT IONS

V.I. Varnina, A.A. Groza, P.G. Litovchenko, L.S. Marchenko, M.I. Starchik, G.G. Shmatko
Institute for Nuclear Research National Academy of Sciences of Ukraine 03680, Ukraine; Kyiv, prospect Nauky, 47, phone: (00 44) 525 52 38, факс: (00 44) 525 37 44, e-mail: plitov@kinr.kiev.ua; aagroza0@gmail.com

Silicon single crystals irradiated by 6,8 MeV protons ($F = (1 \div 3) \cdot 10^{17}$ cm $^{-2}$) and 27,2 MeV alpha particles ($F = 1 \cdot 10^{17}$ cm $^{-2}$) were studied. IR spectroscopic researches have revealed a nonmonotonic dependence of the degree of disorder in crystals on proton fluence, and formation of divacancies and centers, which include hydrogen localized on the dangling bonds of radiation defects. With increasing proton fluence up to $3 \cdot 10^{17}$ cm $^{-2}$ and for alpha-particles irradiated crystals no signs of disorder were discovered in infrared spectra. Metallographic studies of silicon irradiated by alpha particles have revealed the formation of defect structure in the form of a "wall defects" perpendicular to the direction of ion motion. We explain these effects as the process of self-organization of intrinsic radiation defects, resulting in formation of a "superlattice" in the defect subsystem of the crystal.