

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе установлено, что при пошаговом методе имплантации ионами бора с применением БТО не достигается полное подавление образования нарушений (дислокационных петель) в легированном слое кремния, что объясняется более высокой мгновенной концентрацией междоузельных атомов кремния в слое внедрения при БТО по сравнению с термоотжигом в печи вследствие существенного различия в скоростях нагрева и распада междоузельных комплексов.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Челядинский А. Р., Комаров Ф.Ф.* Дефектно-примесная инженерия в имплантированном кремнии. УФН. 2003. Т. 173. №8. С. 813.
2. *Schrentelkamp R. J.* Pre-amorphization damage in ion-implanted silicon / R. J. Schrentelkamp [et al.] // Mater. Sci. Rep. 1991. Vol. 6. P. 275.
3. *Плебанович И., Белоус А.И., Челядинский А.Р., Оджаяев В.Б.* Создание бездислокационных ионно-легированных слоев кремния. ФТТ, 2008. т.50. в.8. с. 1378-1382.
4. *Киреев П.С.* Физика полупроводников //М., Высшая школа, 1969, 592 с.

СТРУКТУРНЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ В КРИСТАЛЛАХ КРЕМНИЯ, ВЫЗВАННЫЕ ДЕЙСТВИЕМ НИЗКОЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

**Л. П. Стебленко, Л. В. Поперенко, И. В. Юргелевич, П. А. Теселько,
А. К. Мельник¹, А. Н. Курилюк, Ю. Л. Кобзарь,
С. Н. Науменко, Д. В. Калиниченко, А. Н. Криг²**

*Киевский национальный университет им. Тараса Шевченко,
физический факультет, Киев, Украина*

¹Институт сорбции и проблем эндоэкологии НАН Украины, Киев, Украина

²Учебно-научный центр «Физико-химическое материаловедение»

*Киевского национального университета им. Тараса Шевченко и НАН Украины, Киев, Украина
kurylyuk_a2008@ukr.net, uka4ka@ukr.net*

Изучение процессов структурной релаксации в кристаллах кремния *n*- и *p*-типов проводимости после воздействия малодозовых ионизирующих излучений, которые были целью настоящей работы, представляет интерес как для выяснения механизмов влияния радиационных полей на твердотельные объекты, так и для решения практических задач прогнозирования поведения полупроводниковых приборов и интегральных схем при их функционировании в условиях влияния внешних факторов.

В качестве радиационного воздействия использовалось мягкое рентгеновское излучение с энергией квантов $E = 8$ кэВ и экспозиционной дозой $D_1 = 3,7 \times 10^3$ Гр и $D_2 = 7,5 \times 10^3$ Гр. После проведенной рентгеновской обработки (РО) контролировались изменения структурнозависимого фактора Дебая-Валлера $E=e^{-L}$, значения которого определялись с привлечением методики трехкристалльной рентгеновской дифрактометрии (ТКД). На рис.1 в логарифмическом масштабе приведены дифрактометрические кривые, полученные для кристалла Si *n*-типа.

Для различных исследуемых образцов в пределах разброса данных наклон кривых оставался неизменным, однако прямые смещались относительно эталона тем больше, чем несовершеннее был образец.

Как показали результаты расчетов, после рентгеновской обработки в кристаллах кремния *n*- и *p*-типов проводимости наблюдался противоположный по характеру изменения фактора Дебая-Валлера эффект. Так, в кристаллах *Si n*-типа, прошедших РО, имело место возрастание исследуемого параметра. При дозе $D_1 = 3,7 \times 10^3$ Гр эффект увеличения параметра L составлял величину $\Delta L = 0,01$, а при дозе $D_2 = 7,5 \times 10^3$ Гр эффект изменения достигал значения $\Delta L = 0,4$. В то же время для кристаллов *Si p*-типа наблюдалась противоположная тенденция. Рентгеновская обработка кристаллов *Si p*-типа дозой $D_1 = 3,7 \times 10^3$ Гр приводила к уменьшению фактора Дебая-Валлера на величину $\Delta L = 0,25$, а воздействие дозы $D_2 = 7,5 \times 10^3$ Гр вызывало уменьшение параметра L на величину $\Delta L = 0,35$. Таким образом, с увеличением дозы облучения эффекты изменения исследуемого параметра в кристаллах *Si* с различным типом проводимости усиливались. Подобные изменения фактора Дебая-Валлера указывают на то, что вызванная рентгеновским влиянием структурная перестройка по-разному протекает в кристаллах *Si n*- и *p*-типа проводимости. Структура приповерхностного слоя кристаллов *n*-типа после рентгеновской обработки становится более разупорядоченной, а приповерхностный слой в кристаллах *p*-типа приобретает более упорядоченную и более совершенную структуру. Причем с увеличением дозы рентгеновского излучения противоположные по своему характеру тенденции становятся более яркими.

Не исключено, что наблюдаемые изменения связаны с особенностями радиационного дефектообразования в кристаллах *n*- и *p*-типа. Известно, что метастабильная или «близкая» пара Френкеля (которая является первичным радиационным дефектом) представляет собой генетически связанные вакансию и межузельный атом, разделенные некоторым потенциальным барьером. Известно так же, что в условиях радиационного воздействия вероятность аннигиляции и разделения компонентов пар определяется их зарядовым состоянием [1]. В кристаллах *Si p*-типа компоненты пары Френкеля как носители одноименных электрических зарядов, уже при весьма низких температурах распадаются, а в кристаллах *n*-типа разноименно заряженные компоненты существуют длительное время в «связанном» виде. Можно предположить, что в кристаллах *Si p*-типа разделенные после образования пары Френкеля компоненты либо аннигилируют между собой, либо рекомбинируют при выходе на поверхность. Уменьшение количества дефектов за счет процессов аннигиляции и рекомбинации приводит к образованию более совершенного по структуре приповерхностного слоя, и как следствие, к уменьшению фактора Дебая-Валлера. В кристаллах *Si n*-типа существование первичных радиационных дефектов в виде «связанных» комплексов

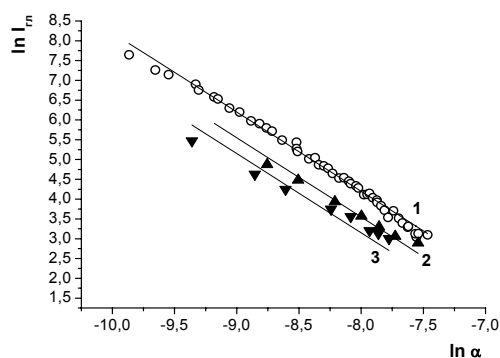


Рис. 1. Зависимость логарифма интенсивности головного пика рентгеновского рассеяния $\ln I_{гд}$ от логарифма угла отклонения от брегговского положения $\ln \alpha$, полученная для кристаллов *Si n*-типа:

- 1 - эталонный кристалл;
- 2 - кристалл *Si* перед проведением РО;
- 3 - кристалл *Si* после осуществления РО

приводит к усилению структурного несовершенства приповерхностного слоя, в результате чего наблюдается увеличение фактора Дебая-Валлера.

Еще одним контролирующим структурные изменения эффектом, который стимулируется рентгеновским излучением, был эффект изменения интенсивности спектров ЭПР. Экспериментальные результаты, полученные в работе, свидетельствуют о том, что рентгеновская обработка кристаллов Si как *n* так и *p*-типа, приводит к уменьшению интенсивности спектральной линии, характеризующей парамагнитные центры (ПЦ) с *g*-фактором 2,0055. Данные ПЦ идентифицируются как оборванные связи. Учитывая то, что дефекты, которые соотносятся с оборванными связями, формируют в кристалле Si зародыши аморфной фазы, можно предположить, что должна существовать некоторая переходная область, при которой структура имеет композитный характер, то есть представляет собой смесь кристаллических и аморфных областей, когда в кристаллической матрице существуют аморфные включения.

Следует отметить, что характер изменений интенсивности спектральных линий соответствующих оборванным связям в кристаллах Si *p*-типа зависел от концентрации носителей заряда, обусловленной количеством легирующей примеси бора. В кристаллах кремния с высоким содержанием бора (и соответственно, большим количеством носителей) количество оборванных связей после РО уменьшалось. В кристаллах Si с меньшим содержанием бора и, соответственно, меньшей концентрацией носителей количество оборванных связей после РО возрастало. Как отмечается в [2] присутствие в кристалле Si радиационных дефектов, имеющих электрическую активность, приводит к уменьшению концентрации носителей заряда и их подвижностей. При этом в [2] наблюдалась более высокая скорость изменения данных параметров в кристаллах с меньшей концентрацией легирующей примеси. Основываясь на выводах работы [2], можно предположить, что в нашем случае при одной и той же дозе излучения концентрация легирующей примеси бора влияет на достижение критической концентрации оборванных связей, формирующих зародыши аморфной фазы. При этом в кристаллах с более низкой концентрацией носителей процесс аморфизации протекает более интенсивно.

Проведенные с привлечением метода эллипсометрии исследования показали, что появление аморфных включений в приповерхностном слое кремния, подвергнутого рентгеновскому воздействию, приводит к уменьшению оптической проводимости, и соответственно, к уменьшению показателя преломления. При эллипсометрических исследованиях был выявлен также эффект небольшого возрастания толщины естественного слоя, присущего поверхности.

Результаты проведенного с привлечением метода АСМ исследования свидетельствуют о значительном (в ~ 5 раз для кристаллов Si *p*-типа и в ~ 3 раза для кристаллов Si *n*-типа) уменьшении параметра шероховатости поверхности Si после рентгеновского влияния. Последнее указывает на то, что, несмотря на наличие аморфных включений, структурные нанообъекты, которые формируются на поверхности кремния после РО, содержат в своем составе преимущественно не аморфные, а кристаллические фазы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Лугаков, П. Ф. Влияние интенсивности облучения на скорость аннигиляции вакансий и междоузлий в кремнии / П. Ф. Лугаков, В. В. Лукьяница // ФТП. 1984. №2. С.345.
2. Сааян, В. А. Влияние облучения на электрофизические свойства монокристаллов кремния. / Сааян, В. А., Ерицян Г.Н. / Известия НАН Армении, физика, 2006. Т.41. №2. С.140.