

ИЗМЕНЕНИЕ СТРУКТУРНОГО СОСТОЯНИЯ ПРИПОВЕРХНОСТНЫХ СЛОЕВ КРИСТАЛЛОВ КРЕМНИЯ ПРИ КОМБИНИРОВАННОМ ВОЗДЕЙСТВИИ МАЛОДОЗОВОГО РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ И СЛАБОГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ

В. А. Макара, Л. П. Стебленко, Д. В. Калиниченко, П. П. Когутюк

*Киевский национальный университет имени Тараса Шевченко,
Украина, kdv3d@ukr.net*

Кремний играет исключительную роль в микроэлектронике. Кроме того, он является важным конструкционным материалом. На его основе изготавливаются сенсоры микро- и нано- электромеханические системы, различные устройства нанотехнологий. В связи с этим даже незначительные изменения его свойств под действием радиационного излучения становятся существенными, а их изучение актуальными. В условиях облучения ключевую роль в формировании свойств играет качественный и количественный состав радиационных дефектов (РД), определяющих степень совершенства приповерхностного слоя, облучаемого материала [1, 2].

Следует отметить, что закономерности дефектообразования в кристаллах полупроводников при малых дозах облучения, в частности рентгеновского облучения, остаются малоизученными. Существуют лишь единичные работы, посвященные исследованию данной проблемы [1–4].

В последние годы в качестве метода, способного вызвать процессы структурной релаксации и, соответственно, повлиять на структурно-зависимые свойства полупроводниковых материалов рассматривается метод магнитной обработки (МО) полупроводников в магнитных полях различного происхождения [5–8].

Важно отметить, что в настоящее время особое внимание привлечено к вопросам, связанным с исследованием структуры и структурно-зависимых свойств полупроводниковых материалов при комбинированных внешних воздействиях. Ведь именно в таких условиях часто функционируют приборы, изготовленные на основе полупроводниковых структур.

Несмотря на научную и практическую значимость исследований комбинированных явлений, они практически отсутствуют в литературе.

В связи с этим, целью данной работы было изучение изменений в структуре кремния, обусловленных, как комбинированным влиянием малодозового рентгеновского излучения и слабого магнитного поля, так и самостоятельным рентгеновским воздействием.

Откликом на используемую в работе рентгеновскую и магнитную обработку кристаллов Si выступали дифрактометрические зависимости (кривые качания) и фиксируемый на их основе параметр $\omega(C)$, соответствующий полуширине кривой качания.

Рентгеновская обработка (РО) кристаллов Si проводилась в диапазоне доз рентгеновского излучения $D = (1\div 8) \cdot 10^4 \text{ Р}$. Магнитная обработка (МО) кремния осуществлялась в переменном магнитном поле с индукцией $B = 0,33 \text{ Тл}$. Время магнитной обработки варьировалось в диапазоне $t_{\text{МО}} = (5\div 360) \text{ минут}$. Комбинирование используемых в работе обработок проводилось в последовательности, при которой магнитная обработка предшествовала рентгеновской обработке, то есть в последовательности «МО+РО»

Проведенные исследования позволили получить зависимость параметра $\omega(C)$ от накопительной дозы рентгеновского облучения (рис. 1, кривая 1).

Полученный результат свидетельствует о том, что с увеличением дозы рентгеновского облучения параметр $\omega(C)$ уменьшается. Выявленный эффект может быть связан с релаксацией внутренних напряжений в приповерхностных слоях кремния, подвергшихся рентгеновской обработке. Последнее указывает на уменьшение внутренних напряжений и на повышение степени упорядочения приповерхностного слоя. Было установлено, что при некоторой дозе ($D = 2 \cdot 10^4$ Р) обнаруженный эффект упорядочения насыщается.

Вполне вероятно, что в наших экспериментальных условиях, а именно в условиях действия на кристаллы кремния малодозового низкоэнергетического рентгеновского излучения, (энергия $\text{Cu K}\alpha_1$ линии составляла $W = 8$ кэВ), происходит процесс радиационного дефектообразования.

Как известно из литературных источников [1], в условиях низкоэнергетического излучения действует примесно-ионизационный механизм радиационного дефектообразования. Можно предположить, что в наших исследованиях действие рентгеновского облучения дозой 10^4 Р, сопряжено с образованием изолированных первичных РД (вакансий и межузельных атомов или пар Френкеля). Эти РД являются неустойчивыми метастабильными дефектами, которые распадаются и отжигаются при комнатных температурах. Вероятен вариант аннигиляции этих дефектов между собой или при взаимодействии их с поверхностью. Процесс аннигиляции сопровождается уменьшением концентрации вакансий и межузельных атомов. В свою очередь, уменьшение концентрации указанных дефектов сопровождается уменьшением, связанных с этими дефектами, зон сжатия, и приводит к уменьшению внутренних напряжений в приповерхностных слоях Si, и соответственно, к уменьшению параметра $\omega(C)$. Вероятно, определенный вклад в обнаруженные эффекты вносят не только изолированные первичные радиационные дефекты, но и образованные на их основе различные комплексы первичных дефектов (Si_iO_i , C_iC_s , P_sC_i) [2], (индекс i – соответствует межузельным атомам, индекс s – положениям атомов в узлах). Связывание межузельных атомов в комплексы также может сопровождаться уменьшением зон сжатия. Первичные РД, в частности вакансии (V), могут также взаимодействовать с имеющимися в кремнии остаточными примесями [1]. Следствием этого взаимодействия является образование комплексов V-Au, V-Zn, V-Pt и т. д. Связывание

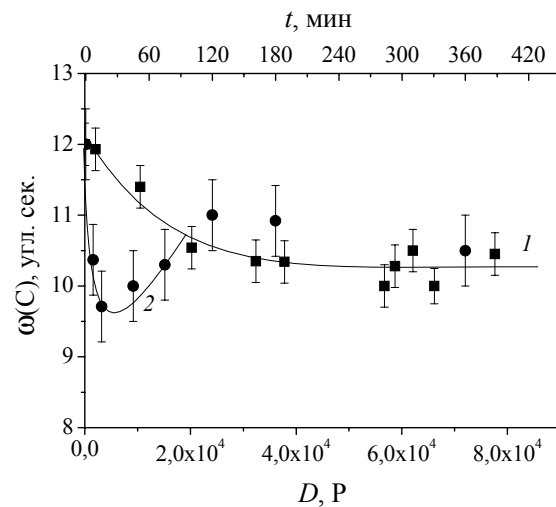


Рис. 1. Зависимость параметра $\omega(C)$ от накопительной дозы рентгеновского облучения кристаллов кремния при самостоятельном рентгеновском воздействии (1) и от времени магнитного влияния при комбинированной обработке «МО+РО» (2)

вакансий в комплексы также может обуславливать уменьшение внутренних напряжений.

Когда процесс междефектных преобразований исчерпывается, эффект изменения параметра $\omega(C)$ насыщается.

Вышеперечисленные комплексы точечных дефектов, образованные в ходе междефектных реакций являются метастабильными [2], и распадаются как метастабильные образования при комнатной температуре. Можно предположить, что это приводит к восстановлению в приповерхностных слоях начальной концентрации вакансий и межузельных атомов.

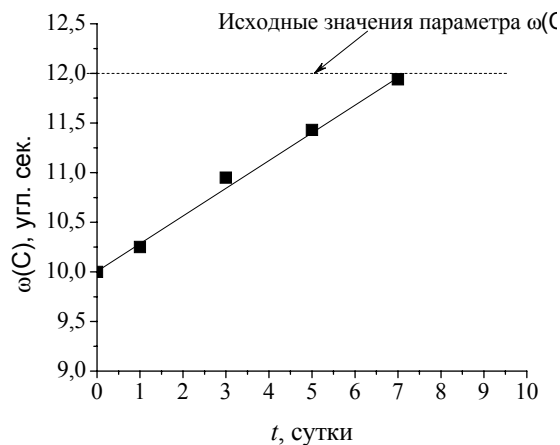


Рис. 2. Изменение параметра $\omega(C)$ в зависимости от времени, прошедшего после завершения РО

В высказанному предположению было найдено экспериментальное подтверждение. В работе было выявлено (см. рис. 2), что параметр $\omega(C)$, который в результате действия малых доз РО, первоначально уменьшился, через определенное время (7 суток) возвращается к исходным значениям. Итак, обнаруженный эффект изменения внутренних напряжений имеет обратимый характер.

Экспериментальные результаты, полученные при комбинированном воздействии магнитного поля и рентгеновского излучения, представлены

на рис. 1 (кривая 2). Как видно из рисунка 1, эффект изменения параметра $\omega(C)$ при комбинированной обработке типа «МО+РО» имеет немонотонный характер. Последнее может быть связано с немонотонным характером междефектных превращений, протекающих в приповерхностных слоях кристаллов Si после соответствующих обработок.

Остановимся на рассмотрении данного вопроса подробнее. МО кристаллов Si, в соответствии с распространенными в литературе молелярными представлениями [5, 6] сопровождается образованием метастабильных кислородно-вакансионных (O-V) комплексов, которые получили в литературе название A-подобных дефектов. Можно предположить, что при комбинированной обработке кристаллов, типа «МО+РО» имеют место твердотельные реакции между дефектами, которые образуются при магнитном и радиационном влиянии на кристаллы кремния. Такие реакции становятся возможными благодаря следующему факту. В соответствии с литературными данными [6] одним из следствий магнитного влияния на слабомагнитные материалы является химическая активация поверхности.

Не исключено, что на магнитоактивированной поверхности, образованные в результате МО кислородно-вакансионные комплексы (O-V) [5–6] и образованные при РО первичные радиационные дефекты (вакансии и межузельные атомы, в частности межузельные атомы кислорода) вступают в междефектные реакции. Вероятным результатом этих реакций является формирование новых комплексов точечных дефектов (КТД) таких, как O-V₂, V₂-O₂, O-V₃, V₃-O₂ и других. При этом в связанное состояние переходит дополнительное количество изолируемых вакансий и межузловых

атомов кислорода. Последнее приводит к компенсации связанных с данными дефектами зон сжатия, содействует снижению внутренних микронапряжений, и, тем самым приводит к уменьшению параметра $\omega(C)$ при малых временах МО ($t_{MO} \leq 30$ мин). При временах МО $t_{MO} \geq 30$ мин эффект изменения параметра $\omega(C)$ при комбинированной обработке «МО+РО» не отличается от эффекта изменения параметра $\omega(C)$ при самостоятельном действии РО. Таким образом, в определенных экспериментальных условиях рентгеновское влияние доминирует, а поэтому и нивелирует влияние магнитного поля на эволюцию структуры. В соответствии с литературными данными [9], вторичные РД (А-, Е-, К-дефекты) формируют состояния с магнитным упорядочением кооперативного типа. Возможно, что образованные при дозах $D \geq 2 \cdot 10^4$ Р комплексы (Si_iO_i , C_iC_s , P_sC_i) являются магнитоупорядоченными. Именно по этой причине, образованные при РО комплексы, не способны принимать участие в реакциях с дефектами, образованными при МО. Вследствие этого при дозах $D \geq 2 \cdot 10^4$ Р не формируется новая модифицированная структура, как это происходит при дозах $D \leq 2 \cdot 10^4$ Р. В результате эффект от комбинированной обработки «МО+РО» совпадает с эффектом от самостоятельной РО, а эффект от МО нивелируется.

ЛИТЕРАТУРА

1. Вавилов, В. С. Действие излучений на полупроводники: Учеб. Руководство / В. С. Вавилов, Н. П. Кекелидзе, Л. С. Смирнов. М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. Лит. 1988. 192 с.
2. Вавилов, В. С. Дефекты в кремнии и на его поверхности / В. С. Вавилов, В. Ф. Киселев, Б. Н. Мукашев. М.: Наука. 1990. 212 с.
3. Кулиш, Н. П. // ФТТ. 1998. Т. 40. № 7. С. 1257.
4. Альшиц, В. И. О движении дислокаций в кристаллах $NaCl$ под действием постоянного магнитного поля / В. И. Альшиц, Е. В. Даринская, Т. М. Перекалина, А. А. Урусовская // ФТТ. 1987. Т. 29. № 2. С. 467.
5. Левин, М. Н. Воздействие импульсных магнитных полей на кристаллы $Cz-Si$ / М. Н. Левин, Б. А. Зон // ЖЭТФ. 1997. Т. 111. № 4. С. 1373.
6. Косцов, А. М. Метод контроля адсорбции на поверхности твердых тел по микроволновым спектрам отражения / А. М. Косцов, О. М. Косцова, М. Н. Левин // Вестник ВГУ, серия: физика, математика. 2001. № 2. С. 21.
7. Головин, Ю. И. Магнитопластичность твердых тел / Ю. И. Головин // ФТТ. 2004. Т. 46. № 5. С. 769.
8. Моргунов, Р. Б. Спиновая механика в физике пластичности / Р. Б. Моргунов // УФН. 2004. Т. 174. № 2. С. 131.
9. Неймаш, В. Б. Процеси трансформації станів домішки кисню в монокристалах кремнію при високоенергетичному опроміненні та термообробках / В. Б. Неймаш // Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора фізико-математичних наук. Київ. 2007.