

05

РЕШЕТКА МИКРОДЕФЕКТОВ В КРЕМНИИ

П.В. Павлов, В.И. Пашков,
Т.Ю. Чигиринская

Возникновение пространственно регулярных дефектных структур, как проявление общих закономерностей самоорганизации в ансамблях дефектов структуры твердых тел, хорошо известное явление в физике пластичности и разрушения [1, 2]. Однако в поликристаллических объектах в силу их гетерогенности и многофазности не удастся получить точное количественное описание регулярных дефектных структур (РДС) [1]. Последнего недостатка лишены монокристаллы, в частности полупроводниковые, отличающиеся низким уровнем ростовой дефектности. Тем не менее сведения о РДС в монокристаллических объектах в литературе весьма скупы. Цель настоящего сообщения – привлечь внимание исследователей к некоторым особенностям РДС в монокристаллах кремния, возникновение которых способно в ряде случаев существенно модифицировать свойства материала.

Типичной причиной, стимулирующей возникновение в монокристалле пространственно регулярных дефектных структур, является инжекция в его объем избыточного количества собственных точечных дефектов (СТД), например путем интенсивной радиационной обработки. Впервые это было продемонстрировано при облучении монокристаллов молибдена ионами азота в работе [3], где наблюдалось возникновение решетки пор с пространственной симметрией аналогичной симметрии решетки матрицы и периодом 22 нм. Данный экспериментальный факт привлек широкое внимание исследователей, в частности в связи с хорошо известным явлением радиационного свеллинга материалов. Теоретически вопрос о возникновении РДС в кристаллах в настоящее время достаточно разработан [4]. Отметим, что возникновение РДС в монокристаллическом объекте, в случае отсутствия в его объеме эффективных стоков для инжектируемого избытка СТД, является типичной реакцией материала на интенсивные внешние воздействия.

Наглядной иллюстрацией сказанному является появление решетки микродефектов в монокристаллах кремния с низким уровнем ростовой дефектности. Микродефектные нарушения в кремнии, являющиеся по существу кластерами СТД, основной тип дефектов структуры в бездислокационных монокристаллах полупроводников [5]. Им свойственна большая подвижность, высокая чувствительность к вариациям концентрации вакансий и междоузельных атомов, к наличию даже незначительных внутренних и внешних механических полей. Типичным представителем микродефектов в кремнии, обладающим всеми отмеченными свойствами, являются дислокационные петли полностью

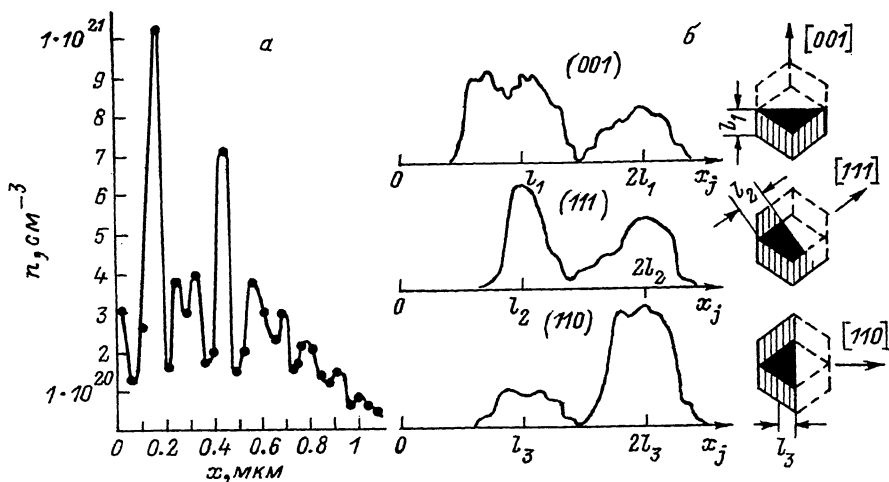


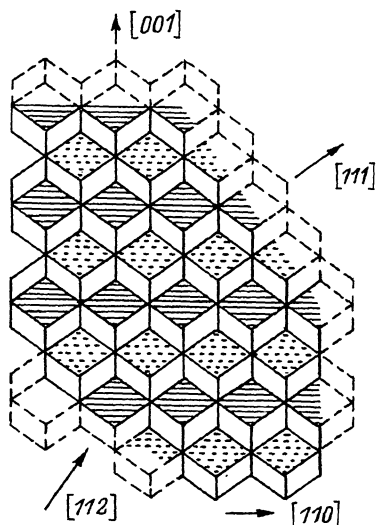
Рис. 1. а) Немонотонности диффузионного профиля ρ в Si [6]. б) Гистограмма глубин залегания переходов (x_j) для основных кристаллографических направлений и их интерпретация. $l_1 = 0.249 \text{ мкм}$, $l_2 = (2/\sqrt{3}) l_1$, $l_3 = (1/\sqrt{2}) l_1$.

краевого типа с радиусом порядка десятых долей микрона. В условиях внешних воздействий, инжектирующих в объем кристалла избыток STD (ионно-лучевая обработка, термическое окисление, химическое травление, эпитаксиальный рост и т.д.), и при наличии градиентов внутренних механических полей, подобных возникающим в диффузионных слоях бора и фосфора в кремнии, микродефектные нарушения располагаются слоями в плоскостях, нормальных направлению градиента механических напряжений. В типичных экспериментальных ситуациях это плоскости, параллельные поверхности образца.

Вследствие гетерирующих свойств микродефектов слоистое распределение их приводит к появлению всплесков концентрации на диффузионных профилях примесей, введенных в кристалл ионной имплантацией, а также при диффузионных отжигах в окисляющей среде. На рис. 1, а показано наличие регулярных неоднородностей в распределении фосфора в кремнии, возникающих при отжигах предварительно имплантированной примеси (рисунок взят из работы [6]).

Пространственно регулярное распределение микродефектов (решетка микродефектов) приводит к однородной фрагментации объема кристалла плотной упаковкой ромбических додекаэдров с гранью $\{011\}$ (см. рис. 2). Эффективным способом выявления решетки микродефектов является декорирование слоев микродефектов легирующими примесями, как это следует из рис. 1, а. Для кремния это бор, фосфор, мышьяк [7]. Возникающие в результате гомогенной фрагментации объема кристалла (рис. 2) для различных кристалло-

Рис. 2. Схема фрагментации объема кремния плотной упаковкой ромбических додекаэдров и пересечения поверхности кристалла. Сплошная штриховка – грань (110) верхнего слоя додекаэдров, точечная – нижнего.



графических направлений слоистое распределение микродефектов, расположенных на гранях додекаэдра, изменяют скорость массопереноса диффундирующей примеси. Величина этого изменения для первого и второго слоя микродефектов зависит от угла наклона соответствующих граней додекаэдров к фронту диффузии. Следовательно, по относитель-

ной интенсивности пиков гистограммы глубин залегания р-п переходов на первом и втором слоях микродефектов (детали методики изложены в [7]) можно сделать заключение о характере пересечения поверхностным слоем додекаэдров границы кристалла. Экспериментальные результаты и их интерпретация представлены на рис. 1, б, а также учтены при построении общей схемы на рис. 2. При построении рис. 1, б использованы данные по диффузии бора в кремнии в окисляющей среде из сообщения [8].

Общей особенностью явления гомогенной фрагментации, как проявление самоорганизации в ансамблях дефектов структуры монокристаллов, является независимость периодов слоистости в расположении микродефектов от типа легирующей примеси и температуры процесса. Качественное объяснение этого факта предложено в [2]. Возникновение РДС в кристалле обусловлено равенством энергии взаимодействия между отдельными дефектами и энергии внешнего воздействия. Поскольку обе величины определяются набором одних и тех же собственных параметров материала (упругих, диффузионных и т. д.), при их равенстве индивидуальность атомного состава кристалла и температуры процесса нивелируются.

Другая важная особенность решетки микродефектов в кремнии, как это следует из рис. 1, б, состоит в том, что ее пространственная симметрия более низкая, чем у решетки матрицы, в отличие от решетки пор в молибдене [3]. Это непосредственно иллюстрируется анизотропией диффузионного переноса бора в кремнии при отжигах в окислительной среде. Последний факт свидетельствует, что при термическом окислении кремния наряду с обычной миграцией примеси по узлам атомарной решетки присутствует и другой канал массопереноса, имеющий по симметрии пространственную регулярность более низкую, чем кубическая [8].

Отметим, что именно с возникновением решетки микродефектов, как дополнительного канала массо- и энергопереноса следует связать проявление так называемого „дальнодействия“ при ионно-лучевой обработке монокристаллов кремния [9], что отмечено нами в недавнем сообщении [10].

С п и с о к л и т е р а т у р ы

- [1] Сб.: Вопросы теории дефектов в кристаллах / Под ред. В.С.Вонсовского и М.А. Кривоглаза. Л.: Наука, 1987. 176 с.
- [2] Рыбин В.В. Большие пластические деформации и разрушение металлов. М.: Metallurgia. 1986. 224 с.
- [3] Evans J.H. // Nature. 1971. V. 229. N 5284. P. 403-404.
- [4] Сугаков В.Н., Селищев А.А. // ФТТ. 1986. Т. 28. В. 10. С. 2921-2927.
- [5] ДеКоск А.Д. // Phil. Res. Reports. Supl. 1. 1973. С. 105.
- [6] Pavlov P.V., Zorin E.L., Tetel'baum D.I., Varanova A.S., Vasil'ev V.K. rad. effects. 1972. V. 13. P. 153-155.
- [7] Павлов П.В., Пашков В.И., Туловчиков В.С., Чигиринская Т.Ю. // ФТП. 1977. Т. 11. В. 2. С. 314-318.
- [8] Павлов П.В., Пашков В.И., Чигиринская Т.Ю. - Тез. докладов Всесоюзного совещания Высокотемпературные физико-химические процессы на границе раздела твердое тело - газ, Звенигород, 30.10. - 2.11. 1984. М.: Наука. 1984. С. 68-70.
- [9] Павлов П.В., Пашков В.И. и др. // ФТТ. 1973. Т. 15. В. 11. С. 2857-2859.
- [10] Пашков В.И., Чигиринская Т.Ю., Чигиринский Ю.К. // Письма в ЖТФ. 1988. Т. 14. В. 22. С. 2021-2024.

Горьковский
государственный
университет
им. Н.И. Лобачевского

Поступило в Редакцию
20 апреля 1989 г.