

- [4] L e m k e A.S. - Phys. Stat. Sol. (a), 1981, v. 64, p. 215-219.
- [5] B a l a s u b r a m a n y a m N., R u m a r V. Phys. Stat. Sol. (a), 1987, v. 100, N 1, p. 293-244.
- [6] W e r e p D.A. A magnetic resonance study of 3d transition metals and thermal donors in silicon. Amsterdam, 1986. 128 p.
- [7] M u l l e r S.H. An EPR study on clustering of iron and oxygen in silicon. Amsterdam, 1969. 96 p.

Поступило в Редакцию
1 августа 1988 г.

Письма в ЖТФ, том 14, вып. 22

26 ноября 1988 г.

К ВОПРОСУ О МЕХАНИЗМЕ ЭФФЕКТА ДАЛЬНОДЕЙСТВИЯ
В КРЕМНИИ ПРИ ОБЛУЧЕНИИ
НИЗКОЭНЕРГЕТИЧЕСКИМИ ИОНАМИ

В.И. П а ш к о в, Т.Ю. Ч и г и р и н с к а я,
Ю.И. Ч и г и р и н с к и й

Возникновение структурных изменений в кремнии вблизи стороны пластины, противоположной облучаемой ионами средних энергий, в настоящее время является хорошо установленным фактом [1] и уже находит практическое применение [2]. Предложен также и ряд объяснений явления, базирующихся на аномально глубоком диффузионном проникновении точечных дефектов из радиационной зоны, а также генерацией их в объеме кристалла акустическими импульсами от бомбадирующих ионов [3]. Отмечено также [4], что и обработка низкоэнергетической плазмой может привести к увеличению глубины залегания р-п-перехода вблизи обратной стороны пластины. Предлагаемое авторами объяснение аналогично уже отмеченным. В настоящем сообщении обсуждается возможность принципиально иного механизма низкотемпературной миграции примесей в *Si* при радиационной обработке, в том числе низкоэнергетической плазмой.

В [5] нами показано, что в условиях пересыщения диффузионной зоны избытком точечных дефектов, обусловленного термическим окислением и радиационной обработкой *Si* в приповерхностной зоне возможно возникновение пространственно регулярных слоев микродефектных нарушений, период которых зависит от ориентации [9]. Для ориентаций [001], [011] и [111] он равен 0,25, 0,18 и 0,29 мкм соответственно. Внутри указанных интервалов возможно появление менее выраженных слоев, составляющих 1/3 от основного периода [6, 7]. Вследствие геттирирующих свойств регу-

лярных слоев микродефектов, а также внесение ими в объем моно-кристалла ускоренных путей массопереноса, процесс диффузионной миграции вглубь кристалла оказывается немонотонным, кроме этого, коэффициент диффузии бора становится зависящим от ориентации [8, 9]. Последний факт свидетельствует о том, что возникающая пространственная регулярность микродефектных нарушений, как дополнительного канала массопереноса, не обладает симметрией кубической ячейки.

Возникновение слоистости в расположении микродефектов и стимулированная этим анизотропная скорость диффузии бора на стороне, противоположной термически окисляемой, описан нами в сообщении [9]. В излагаемом далее эксперименте решался вопрос: в состоянии ли инжекция точечных дефектов в глубь кристалла кремния, обусловленная обработкой низкоэнергетической плазмой при низких температурах, вызвать регулярность в расположении микродефектов, подобную возникающей при термическом окислении?

Эксперимент состоял в следующем. В пластины кремния КЭФ-1 толщиной 300 мкм методом ионной имплантации вводился бор ($E = 40$ кэВ, $\Phi = 6.25 \cdot 10^{14}$ см⁻²). Активационный отжиг проводился при 800 °С в течение 30 минут в атмосфере аргона. Глубина залегания р-р-перехода, измеренная по стандартной методике [4], составляла 0.51 мкм для ориентаций (001), (111) и 0.71 мкм для (011), что обусловлено каналированием имплантированных ионов в последнем случае. Далее образцы по группам, включающим все три ориентации, подвергались ионноплазменной обработке ($E = 4 \div 6$ кэВ, $\Phi = 1 \div 2$ мА/см²) с нелегированной стороны в различных режимах, включающие как облучение при комантной температуре, так и подогрев их до 500 °С с длительностью от 30 до 150 минут. Результаты опыта следующие. Для ориентаций (001) и (011) смещение перехода после ионно-плазменной обработки практически отсутствовало, а для ориентации (111) имело место подтягивание его к глубине 0.48 мкм (длительность облучения 30 минут) и 0.38 мкм (длительность облучения 90 минут). Увеличение длительности облучения не вызывало дополнительного смещения перехода. Облучение пластин кремния с ориентацией (111), не подвергавшихся активационному отжигу (без подогрева их до 500 °С), независимо от длительности облучения приводило к появлению р-р-перехода на глубине, близкой к 0.29 мкм.

Изложенные экспериментальные факты не находят объяснения в рамках представлений, развиваемых в [4]. С другой стороны, они естественно интерпретируются при допущении, что ионно-плазменная обработка, как и термическое окисление [9], стимулирует вблизи обратной стороны пластины образование регулярных слоев микродефектных нарушений.

Таким образом, можно заключить, что причиной смещения глубины залегания р-р-перехода в кремнии вблизи стороны, противоположной облучаемой низкоэнергетической плазмой, наряду с возможным увеличением диффузионной подвижности примесей [4], является возникновение вблизи обратной стороны регулярных микро

дефектных структур. Отметим, что понимание реального механизма эффекта дальнедействия рассмотренного здесь типа имеет непосредственную практическую ценность как для повышения радиационной стойкости, так и для управления глубиной залегания р-п-переходов в субмикронном диапазоне.

Действительно, возникающие на указанных ранее глубинах слои микродефектов, вследствие их геттерирующих свойств, будут вызывать смещение в положении р-п-перехода к ближайшему их слою. Для ориентаций (001) и (011) глубина залегания перехода после активационного отжига практически совпадает с положением слоя микродефектов (для (011) - $2 \cdot 0.25 \approx 0.51$ мкм; для (011) - $4 \cdot 0.18 \approx 0.71$ мкм) и, естественно, эффекта смещения перехода при облучении плазмой не наблюдается. Для ориентации (111) положение р-п-перехода оказывается в промежутке между $2 \cdot 0.29 = 0.58$ мкм и $1.67 \cdot 0.29 = 0.48$ мкм. Поэтому радиационная обработка и стимулирует подтягивание перехода сначала к 0.48 мкм, а потом и к $1.33 \cdot 0.29 = 0.38$ мкм. Возникновение перехода в образцах, не проходивших активационного отжига после облучения плазмой, точно соответствует положению первого слоя микродефектов (0.29 мкм). Понятна и устойчивость его при облучении различной длительности.

Л и т е р а т у р а

- [1] Павлов П.В., Пашков В.И., Генкин В.М., Камаева Г.В. и др. - ФТТ, 1973, т. 15, № 11, с. 2857-2859.
- [2] Камаева Г.В., Пашков В.И. В сб.: Активируемые процессы технологии микроэлектроники, Таганрог, 1978, с. 42-46.
- [3] Семин Ю.А., Скупов В.Д., Тетельбаум Д.И. - Письма в ЖТФ, 1988, т. 14, в. 3, с. 273-276.
- [4] Борисенко В.Е., Ершов С.Н., Калинин Ю.Л., Пантелеев В.А. - Письма в ЖТФ, 1982, т. 8, в. 9, с. 559-561.
- [5] Павлов П.В., Пашков В.И., Туловчиков В.С., Чигиринская Т.Ю. - ФТП, 1977, т. 11, в. 2, с. 314-318.
- [6] Pavlov P.V., Zorin E.Y., Tetel'baum V.J., Varanova A.S., Vasil'ev V.K. - Radiation effects, 1972, v. 13, p. 153-155.
- [7] Успенская Г.И., Тетельбаум Д.И., Пашков В.И., Павлов П.В. - Тез. докл. Ш Всес. конф. по физико-химическим основам легирования полупроводниковых материалов, М., 1975, с. 178-179.
- [8] Masetti J., Solmy S., Sonani J. - Solid st. commun., 1973, N 12, p. 1299-1302.

[9] Павлов П.В., Пашков В.И., Чигринская Т.Ю. Тез. докл. Всес. сов. Высокотемпературные физико-химические процессы на границе раздела твердое тело - газ, Звенигород, 30.10 - 2.11.1984 г., М., Наука, 1984, с. 68-70.

Поступило в Редакцию
28 июля 1988 г.

Письма в ЖТФ, том 14, вып. 22

26 ноября 1988 г.

НАБЛЮДЕНИЕ ЯДЕРНЫХ КВАДРУПОЛЬНЫХ МАКСИМУМОВ
В ДИФРАКЦИИ МЕССБАУЭРОВСКОГО
 γ -ИЗЛУЧЕНИЯ НА КРИСТАЛЛЕ Fe_3BO_6

И.Г. Толпекин, В.Г. Лабушкин,
Е.Н. Овчинникова, Е.В. Смирнов

Уникальной особенностью дифракции мессбауэровского γ -излучения на кристаллах по сравнению с другими видами излучений является возможность существования ядерных квадрупольных максимумов, обусловленная зависимостью амплитуды резонансного рассеяния от ориентации градиентов электрических полей (ГЭП) на мессбауэровских ядрах [1]. К настоящему времени ядерные квадрупольные максимумы в мессбауэровской дифракции наблюдались на двух кристаллах: натриевом нитропруссиде [2] и теллуре [3], структура ГЭП которых была заранее известна. В данной работе сообщается об обнаружении и исследовании ядерных квадрупольных максимумов на кристалле бората железа Fe_3BO_6 , обладающем достаточно сложной структурой ГЭП, однозначная информация о которой в настоящее время отсутствует. Показано, что вид энергетического спектра дифрагировавшего γ -излучения содержит важную информацию о структуре ГЭП кристалла Fe_3BO_6 .

Чисто ядерное рассеяние мессбауэровского γ -излучения на кристалле Fe_3BO_6 при температуре ниже точки Нееля $T = 508K$ наблюдавшееся в работах [4, 5], было обусловлено наличием в кристалле магнитного упорядочения, а также комбинированным характером сверхтонкого взаимодействия. При $T > T_N$ кристалл находится в парамагнитном состоянии, и возможность чисто ядерного рассеяния мессбауэровского излучения определяется только квадрупольным сверхтонким взаимодействием, в частности характером упорядочения осей ГЭП на мессбауэровских ядрах.

Амплитуда когерентного рассеяния мессбауэровского γ -излучения элементарной ячейкой кристалла в общем случае имеет вид

$$F = \sum_j f_j^{(R)} \hat{E} e^{iHr_j} + \sum_q \hat{f}^{(M)} e^{iHr_q}, \quad (1)$$