

ЭЛЕКТРОННЫЙ ПАРАМАГНИТНЫЙ РЕЗОНАНС ДИСЛОКАЦИЙ В КРЕМНИИ, ОБЛУЧЕННОМ ВЫСОКОЭНЕРГЕТИЧНЫМИ ИОНАМИ

В.С.Вариченко, Н.А.Дроздов, Н.М.Лапчук, Е.Н.Шумская

Белорусский государственный университет, 220050 Минск, пр. Ф.Скорины, 4

тел: 2265894, e-mail: heii@phys.bsu.unibel.by

Исследовался электронный парамагнитный резонанс кремния, облученного высокоэнергетичными ионами Kr^+ и He^+ . Обнаружено магнитное упорядочение парамагнитных центров, дающих линию ЭПР с $g \approx 2,3$. Изучена угловая зависимость магнитного поля насыщения для трех ориентаций вектора магнитного поля относительно кристаллических осей образца. Проведено исследование профиля распределения парамагнитных центров по глубине облученной области. Проанализированы результаты изохронного отжига кремния, облученного ионами Kr^+ , в интервале температур 100...1000°C. Сделан вывод о присутствии дислокационных образований нового типа, возникающих после облучения кремния высокоэнергетичными ионами инертных газов.

I Введение

В течение последних лет широко исследуется вопрос о структурных нарушениях, инициируемых в матрице кремния высокоэнергетичной ионной имплантацией. Однако подавляющее большинство работ посвящено изучению треков, точечных дефектов и аморфной фазы, создаваемых ионами в кристалле. На сегодняшний день в литературе не имеется достаточных сведений о направленном исследовании методом электронного парамагнитного резонанса (ЭПР) дислокаций, возникающих в кристалле в процессе высокоэнергетичной ионной имплантации.

Обращает на себя внимание определенная схожесть условий, необходимых для введения дислокаций в кремний при пластической деформации, и условий, возникающих в процессе высокоэнергетичной ионной имплантации. Такими условиями является наличие достаточно высоких механических напряжений и температур. Отличие этих процессов в том, что при пластической деформации температурные и упругие поля имеют макроразмеры, сравнимые с размером образца, и в этом случае дислокационная структура и геометрия возникающих дислокаций определяется взаимной ориентацией упругого поля и кристаллографических плоскостей скольжения дислокаций. При ионной имплантации упругие и температурные поля возникают как результат движения иона в решетке и его торможения и носят локальный характер. В этом случае геометрия возникающих дислокаций тесно связана с геометрией ионного пучка и ориентацией кристалла.

Целью нашей работы было обнаружить в исследуемых образцах кремния с помощью метода ЭПР проявления дефектов дислокационного типа.

II. Образцы и методика

Методом ЭПР исследовались образцы p-Si

"RadioPAN SE/X-2643" в X-диапазоне при комнатной температуре.

Послойное удаление образца кремния, облученного ионами He^+ ($E=5.68$ ГэВ; $D=5 \times 10^{13}$ см⁻²), осуществлялось со стороны имплантации методом механической шлифовки с помощью алмазной пасты с величиной зерна не превышающей 1 мкм.

Для исследования термостабильности дефектной структуры кремния, облученного ионами Kr^+ ($E=210$ МэВ; $D=3 \times 10^{14}$ см⁻²), проводился 20 минутный изохронный отжиг в интервале температур 100...1000°C.

III. Результаты эксперимента и их обсуждение

Впервые было обнаружено, что в обоих случаях имплантации кроме спектра точечных дефектов появляется интенсивная анизотропная линия ЭПР с $g \approx 2,3$ и шириной ΔH , равной 300 Гс и 200 Гс для ионов Kr^+ и He^+ соответственно. При регистрации спектров ЭПР, т.е. при помещении образца в постоянное магнитное поле с одновременным воздействием СВЧ интенсивность сигнала ЭПР уменьшалась вплоть до его полного исчезновения в течение нескольких дней. Кроме того, существовало некоторое отклонение между прямым и обратным ходом спектров при сканировании магнитного поля.

После обнаружения таких эффектов возникло предположение о возможном намагничивании и размагничивании дефектной системы, появившейся в образце после имплантации, поскольку во время экспериментов предпринимались меры, предотвращающие возможность тривиального ферромагнитного загрязнения исследуемых образцов извне.

Для определения анизотропии парамагнитных центров был проведен эксперимент по изучению угловой зависимости значения порога сигнала ЭПР, при котором дефектная система

This document has been edited with Infix PDF Editor - free for non-commercial use.

To remove this notice, visit: www.kentik.com/unlock.htm

ЭПР для угла Θ определялось соответствующее значение поля насыщения. Такие угловые зависимости были построены для трех ориентаций вектора магнитного поля относительно кристаллических плоскостей образца: $H \parallel (100)$, $H \parallel (110)$ и $H \parallel (111)$ (рис.1).

Для определения профиля распределения парамагнитных центров по глубине нарушенной области был проведен эксперимент по послойному удалению образца кремния, облученного ионами Xe^+ .

Полное представление о поведении амплитуды линии ЭПР с $g \approx 2,3$ в зависимости от толщины снятого слоя дает рис.2а. На рисунке приводится относительная амплитуда линии, нормированная на амплитуду сигнала эталона (рубина). Линия была достаточно интенсивна в

приповерхностных слоях, но затем ее амплитуда уменьшилась. По пути пробега иона в регистрируемых спектрах ЭПР линия возникала несколько раз, и, наконец, в конце пробега наблюдается резкий пик амплитуды исследуемой линии. Указанный факт свидетельствует о том, что в образце имеются структуры, которые первоначально не давая сигнала ЭПР, в процессе шлифовки материала переходят в парамагнитное состояние.

Особое внимание привлекает аномальное поведение амплитуды сигнала эталона при послойном удалении образца (рис.2б). Сигнал эталона позволяет судить о добротности резонатора. Значение добротности понижается, когда образец с высокой СВЧ-проводимостью помещается в резонатор и попадает в области, в которых существует заметное электрическое микроволновое поле [1]. При послойном удалении образца логично ожидать увеличения добротности, и следовательно, сигнала эталона, которые до этого "гасились" исследуемым образцом. Послойное удаление аналогично постепенному извлечению образца из резонатора, что приводит к восстановлению добротности. Однако в нашем случае при удалении образца от поверхности до полной сошлифовки амплитуда сигнала эталона уменьшилась почти в 2 раза. Значит, дефектные структуры, существующие в образце, обладают высокой СВЧ-проводимостью и распределены по всему объему образца, а не только до конца пробега ионов.

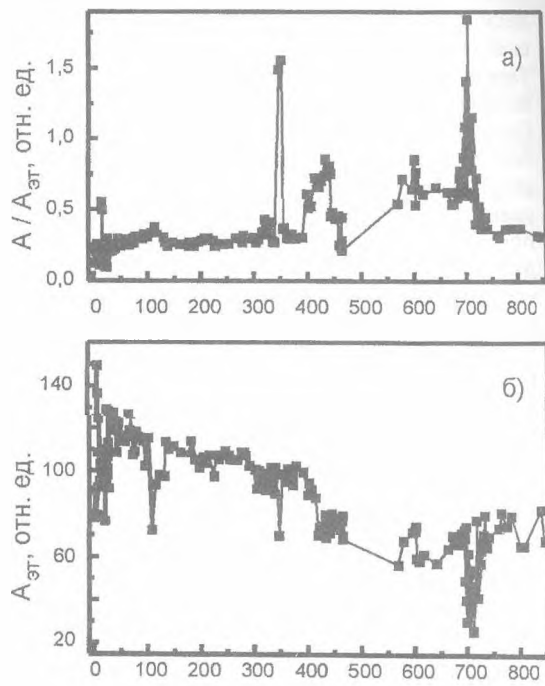
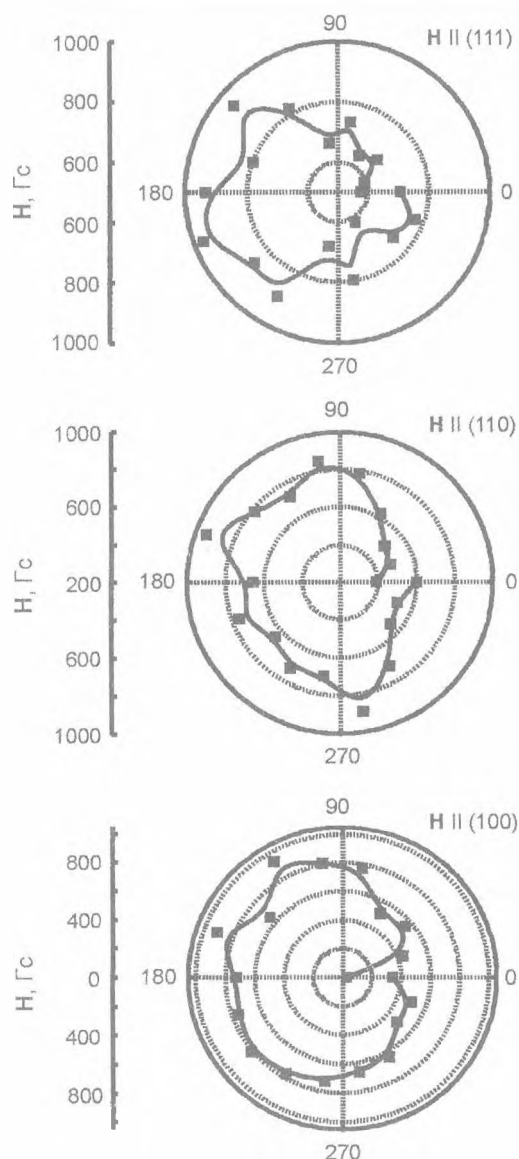


Рис. 2. Распределение амплитуды сигнала ЭПР удаленного слоя для образца кремния, облученного ионами Xe^+ с энергией 5,68 МэВ. а) — амплитуда сигнала ЭПР с $g \approx 2,3$; б) — амплитуда сигнала эталона (рубина).

Ионный отжиг кремния, облученного Kr^+ , позволил получить следующие результаты. Описываемая линия с $g \approx 2,3$, появлявшаяся после неоднократных регистраций спектра ЭПР, отсутствовала в интервале отжига от $100^\circ C$ до $500^\circ C$. После отжига при $600^\circ C$ появилась линия с теми же g -фактором и шириной. В процессе отжига при $700, 800$ и $900^\circ C$ она не наблюдалась. И, наконец, отжиг при $1000^\circ C$ вновь вызвал появление изучаемой линии. Угловая зависимость g -фактора линии, появляющейся при $600^\circ C$ и $1000^\circ C$, свидетельствует, что она является анизотропной. К тому же, дефектная система после отжига не потеряла своих магнитных свойств. Так же, как и при отжиге, прямой и обратный ход при записи спектра ($g \approx 2,3$) не совпадали, т.е. существовала зависимость значений резонансного поля при прямом и обратном сканировании линии.

Таким образом, результаты экспериментов показывают, что описываемая дефектная структура обладает рядом характерных особенностей. Во-первых, она является анизотропной. Во-вторых, дефектная структура обладает магнитным упорядочением и высокой СВЧ-проводимостью, причем скопление дефектов распределено по всему объему образца, а не только от поверхности до конца пробега ионов. И, наконец, структура не разрушается отжигом вплоть до $1000^\circ C$. Более того, дефектная система в отожженном образце по-прежнему обладает магнитным упорядочением.

Таковыми характерными свойствами могут обладать дислокационные образования нового типа, возникающие в кремнии после высокоэнергетической имплантации. Внедрение тяжелых ионов приводит к возникновению внутренних напряжений в матрице кремния. В процессе пробега ионов Kr^+ и He^+ в треке развиваются температуры, превышающие температуру плавления материала [2]. Сочетание таких факторов приводит к зарождению

дислокационных петель и дислокаций.

Наличие дислокаций в кристаллах кремния вызывает резкое увеличение СВЧ проводимости $\sigma(\omega)$ по сравнению с проводимостью тех же кристаллов при $\omega=0$ [3]. Авторы [3] делают вывод, что высокая СВЧ проводимость в деформированных кристаллах связана с проводимостью вдоль ядер дислокаций.

Кроме того, существуют работы [4], в которых показано, что магнитные свойства кремния могут сильно изменяться в результате пластической деформации при введении в кристалл дислокаций. Одним из следствий этого является возникновение аномальной для парамагнетиков зависимости магнитной восприимчивости от напряженности магнитного поля, свойственной лишь магнитно-упорядоченным материалам.

IV. Заключение

Анализ полученных экспериментальных и приведенных литературных данных подтверждает нашу модель, объясняющую нетривиальные эффекты в кристаллах кремния, облученного высокоэнергетическими ионами инертных газов, присутствием дислокаций, возникших после имплантации. Однако пока остается неясным вопрос о природе парамагнетизма центров, связанных с дислокационными образованиями нового типа.

Список литературы

1. Вертц Дж., Болтон Дж. Теория и практические приложения метода ЭПР. - М.: Мир, 1975. - 548 с.
2. Adawi M.A., Didyk A.Yu., Varichenko V.S., Zaitsev A.M. // Rad. Phys. and Chem. - 1998. - V.53. - P.577.
3. Кведер В.В., Осипьян Ю.А. // Изв. АН СССР. Сер. физ. - 1987. - Т.51. - №4. - С.626.
4. Вывенко О.Ф., Нищев К.Н., Ткачева Т.М. // Свойства и структ. дислокаций в полупроводниках: Сб. докл. V Междунар. конф. - Черногоровка, 1989. - С.74

ELECTRON SPIN RESONANCE OF DISLOCATIONS IN SILICON IRRADIATED WITH HIGH ENERGY IONS

V.S.Varichenko, N.A.Drozдов, N.M.Lapchuk, E.N.Shumskaya
Belarussian State University, Scorina Av., 220050 Minsk, Belarus
tel: 2265894, e-mail: heii@phys.bsu.unibel.by

P-type (111) oriented silicon samples of $10 \text{ Ohm} \times \text{cm}$ irradiated with krypton ions ($E=210 \text{ MeV}$, $D=1 \times 10^{12} \dots 3 \times 10^{14} \text{ cm}^{-2}$) and xenon ions ($E=5,68 \text{ GeV}$, $D=5 \times 10^{11} \dots 5 \times 10^{13} \text{ cm}^{-2}$) have been investigated by ESR.

Both irradiations have caused intensive anisotropic lines with the $g \approx 2,3$ and the widths ΔH of 300 G and 200 G for Kr^+ and Xe^+ ions respectively. It was proved the magnetic ordering of paramagnetic centers giving the line with the $g \approx 2,3$ exists. The investigation of the angular dependencies of the saturation magnetic field was carried out. The paramagnetic center distribution along the disturbed region was studied.

The layer removal of silicon irradiated with Xe^+ ions showed the anomalous behavior of the standard signal amplitude. It is explained by the presence of SHF conductive defect structures. It is concluded that the high energy implantation with ions stimulates a new kind of dislocations.

This document has been
edited with Infix PDF Editor
- free for non-commercial use.

To remove this notice, visit:
www.iceni.com/unlock.htm