

УДК 621.315

## ЯВЛЕНИЕ ДАЛЬНОДЕЙСТВИЯ В ТВЕРДЫХ ТЕЛАХ ПРИ РАДИАЦИОННОМ ОБЛУЧЕНИИ

Н.Т. КВАСОВ, Л.В. СОЛОГУБ

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники  
П. Бровка, 6, Минск, 220013, Беларусь*

*Поступила в редакцию 12 марта 2009*

Экспериментально установлено образование дислокационных скоплений и аномально глубокое распределение примеси при радиационном облучении за пределами зоны торможения ионов. Предложены механизмы влияния динамических эффектов в решетке твердого тела на эволюцию дефектно-примесной системы.

*Ключевые слова:* дефектно-примесная система, зона торможения ионов, доза легирования, дислокационные скопления, градиент термоупругих напряжений.

### Введение

До начала 1970-х гг. практически все экспериментальные исследования были направлены на выяснение структуры и свойств ионно-легированного слоя. Такая направленность исследований и соответственно полученные результаты послужили основанием для утверждения, что область нарушенной структуры находится в пределах пробега ионов. Однако начиная с 1972 г. стали появляться сообщения, что изменения структуры кристалла при ионной имплантации примеси происходят также далеко за пределами зоны торможения ионов. Это явление получило название эффекта дальнего действия.

Специфические особенности формирования дефектно-примесной системы при радиационном облучении не укладываются в рамки традиционных представлений физики твердого тела и требуют рассмотрения влияния динамических эффектов в решетке на эволюцию дефектно-примесной системы.

Проявление эффекта дальнего действия при ионном облучении может найти объяснение лишь при условии возникновения в твердом теле особого состояния дефектности, способствующего передаче структурной информации практически мгновенно во всем объеме.

Применение методик рентгеновской топографии, рефрактометрии, декорирования медью, избирательного химического травления позволило исследователям обнаружить проявление эффекта дальнего действия в смещении дислокаций от царапины, в перемещении дислокационных сеток в сильнолегированных диффузионных слоях, наведенных вблизи необлученной стороны [1–3]. Кроме того, на больших расстояниях наблюдалось изменение упругих характеристик полупроводников после их легирования. Величина и характер изменения постоянной решетки на больших расстояниях пропорциональны исходной дефектности решетки и связываются с релаксацией напряжений, обусловленных дефектами. Идея о влиянии напряжений на аномально глубокое проникновение дефектов развивается также в работах [4, 5], где анализируются процессы образования, диффузии и отжига собственных дефектов за пределами нарушенного слоя. В работах [1, 2] эксперимент по

определению профиля дефектов структуры проводили, используя дифракцию света на светоиндуцированных решетках и дифракцию света на ультразвуке в кристалле.

Из легированной бором пластины кремния вырезались полоски, которые ступенчато травились. Измеряемый сигнал сравнивался с таким же сигналом для нелегированного образца (проводилось вычитание). Для дозы  $700 \text{ мкКл/см}^2$  и энергии  $40 \text{ кэВ}$  на расстоянии  $z=40 \text{ мкм}$  от поверхности концентрация дефектов распределялась в соответствии с формулой, описывающей ударную модель [1]:

$$N_d z = 3,28 \cdot 10^{-5} z^{-0,97}.$$

Эффективным методом исследования в физике твердого тела является изучение распространения высокочастотных упругих волн в реальных кристаллах. Последние достижения, как в технике эксперимента, так и в понимании механизмов потерь упругих волн показали целесообразность применения ультразвуковых методов в исследовании локальных изменений упругих свойств твердого тела, что было использовано в настоящей работе.

### Методика проведения эксперимента и образцы

Экспериментальное исследование распределения дефектов по глубине проводилось методом неразрушающей линзовой акустической микроскопии в частотном диапазоне  $100 \text{ МГц} - 2,0 \text{ ГГц}$  с локальностью  $0,6 - 15,0 \text{ мкм}$ , возможностью сканирования по глубине до  $200 \text{ мкм}$  с шагом по глубине  $0,1 \text{ мкм}$  всех оптически прозрачных и непрозрачных материалов. Распределение концентрации примеси по глубине определялось методом вторично-ионной масс-спектрометрии (ВИМС) с разрешением по глубине  $0,1 \text{ мкм}$  и чувствительностью  $10^{-5} - 10^{-6} \text{ ат.}\%$ .

В качестве образцов использовались:

1) пластины кремния ориентации (100) диаметром  $100 \text{ мм}$ , легированные фосфором дозой  $300 \text{ мкКл/см}^2$ , энергией  $150 \text{ кэВ}$  и бором —  $150 \text{ мкКл/см}^2$ , энергией  $150 \text{ кэВ}$ . После ионного легирования пластины отжигались в атмосфере сухого кислорода при температуре  $960^\circ\text{C}$  в течение  $25 \text{ мин}$ . Для снижения влияния собственной дефектности в качестве исходных отбирались предварительно исследованные пластины кремния, не содержащие нарушений структуры по глубине образца;

2) пластины  $\alpha\text{-Fe}$  размером  $10 \cdot 10 \text{ мм}^2$  толщиной  $1 \text{ мм}$ . Пластины легировали азотом методом плазменной ионно-иммерсионной имплантации. Доза легирования составляла  $3 \cdot 10^4 \text{ мкКл/см}^2$ .

### Результаты исследования и их обсуждение

Профиль распределения плотности дефектов при имплантации фосфора и бора по глубине образца, полученный на основании послойного неразрушающего ультразвукового контроля, приведен на рис. 1.

Анализ зависимостей показывает существование двух областей с максимальной плотностью дефектных скоплений. Наличие первого максимума на глубине  $1,0 \text{ мкм}$  от поверхности для ионов бора и  $0,75 \text{ мкм}$  — для ионов фосфора связано с каскадными процессами дефектообразования при радиационном облучении.

В основу ударной модели положено явление генерации упругих волн в кристаллической решетке и взаимодействие их с исходными нарушениями структуры. Результатом этого является образование вторичных точечных дефектов.



Рис. 1. Профиль нарушений в кремнии, легированном ионами бора и фосфора

Одним из механизмов генерации упругих волн является дилатация кристаллической решетки в области неустойчивой френкелевской пары. Кроме того, релаксация поля статических напряжений приводит к скачкообразному образованию дефектов большой размерности (микротрещин, пор и т.д.) и излучению короткого акустического импульса.

Вторичные процессы в полупроводнике при радиационном облучении приводят к появлению на кривой второго максимума на глубине 10 мкм для ионов фосфора и 15 мкм для ионов бора (рис. 1). Дефекты, обусловленные вторичными процессами, представляют собой произвольно ориентированные образования, состоящие из дислокационных петель и дефектов упаковки, расположенных в окрестности линейных дислокаций. Линейные размеры дефектных областей в плоскости горизонтального сечения образца составляют до 50 мкм.

Наличие дефектных скоплений в объеме кремния на глубине от 10 до 15 мкм также обнаружены РЭМ-анализом с предварительным послойным травлением ионным пучком.

При ионной имплантации примеси в металлические образцы обнаружено явление, родственное эффекту дальнего действия и заключающееся в аномально глубоком проникновении примеси за пределы зоны торможения ионов.

На рис. 2 представлен профиль распределения примеси азота, полученный методом вторично-ионной масс-спектрометрии.

Как показывает анализ этой зависимости, ее характер и глубина проникновения примеси, как и в случае ионного легирования полупроводника, не могут быть интерпретированы в рамках традиционного диффузионного механизма. Для объяснения этого явления можно предложить два механизма.

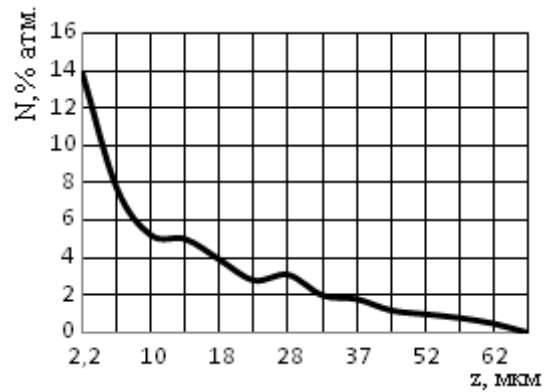


Рис. 2. Профиль примеси азота в железе

1. Перемещение  $z(t)$  в поле волн упругих возмущений солитонного типа, генерируемых при взаимодействии ионов с атомами решетки:

$$z(t) = l_s [1 - \exp(-2\alpha t)],$$

где  $l_s = v\delta_s \Delta\tau W / 2\pi\tau_m R_0 E_d$ ,  $v$  — средняя скорость движения атома в решетке;  $\delta_s$  — сечение рассеяния упругого возмущения на атоме примеси;  $\tau_m$  — время максимального удаления атома от узла решетки в радиусе зоны неустойчивости  $R_0$ ;  $\Delta\tau$  — интервал времени на упругом импульсе, где  $P\delta_s > 2U_a$  ( $P$  — давление упругого импульса,  $U_a$  — энергия активации дефекта);  $W$  — энергия ускоренных ионов;  $E_d$  — пороговая энергия дефектообразования.

За время  $\Theta$  действия импульса тока ионов атом примеси испытывает в среднем  $\theta(2jW/em)^{1/3}$  взаимодействий от идущих из зоны торможения ионов упругих импульсов,  $\alpha = \xi r_0/m$ ;  $\xi$  — коэффициент внутрискристаллического трения;  $r_0$  — ковалентный радиус атома,  $m$  — масса атома;  $j$  — плотность тока ионов;  $e$  — заряд электрона.

2. Захват примеси перегибами на движущихся в поле термоупругих напряжений  $\sigma$   $\bar{r}, t$  дислокациях.

В рамках этой модели общая глубина проникновения примеси  $L$  может быть описана следующей формулой:

$$L \sim \left\{ \theta_s \left[ D + \frac{\mathfrak{Z}(t_2 - t_1)}{\theta} \right] \right\}^{1/2},$$

где  $\theta_s$  — общее время обработки;  $D$  — коэффициент термической диффузии атомов примеси.

Транспортный коэффициент миграции  $\mathfrak{Z}$  определяется из формулы:

$$\mathfrak{S} = \frac{\rho ab\sigma \bar{r}, t}{4N^2 H},$$

где  $\rho$  — плотность дислокаций;  $a$  — постоянная решетки;  $b$  — длина вектора Бюргерса;  $N$  — концентрация перегибов на линии дислокаций;  $H$  — коэффициент динамического торможения;  $t_1, t_2$  — временные координаты на профиле термоупругих напряжений  $\sigma \bar{r}, t$ , между которыми  $\sigma \bar{r}, t \geq \sigma_p$  ( $\sigma_p$  — напряжение Пайерлса при данной температуре).

При исследовании других ионно-легированных металлов (Fe, Cu, Mo) также обнаружены скопления дислокаций на расстоянии 10–15 мкм. В этих экспериментах легирование производилось как в непрерывном, так и в частотно-импульсном режимах на ионных ускорителях. Обнаруженные дислокационные структуры аналогичны комплексам дислокаций, формируемых при деформации образцов. Формирование слоев дислокаций на расстоянии 10 – 15 мкм от поверхности, как в полупроводниках, так и в металлах находит удовлетворительное объяснение в рамках модели, учитывающей генерацию и перемещение дислокаций в поле термоупругих напряжений. На это, в частности, указывает деформационно-пластическая структура и характер взаимодействия дислокаций в дислокационных слоях. Скопления дислокаций, обладающих дальнедействующими полями упругих напряжений, могут приводить к сильному ослаблению связей с основной частью подложки.

### Заключение

Формирование дислокационных скоплений за пределами зоны торможения ионов и аномально глубокое проникновение примеси могут быть удовлетворительно интерпретированы в рамках модели миграции дислокаций из области их генерации вглубь образца в поле термоупругих напряжений при плазменной ионной имплантации. На это указывает высокий уровень термоупругих напряжений и их градиентов, что обеспечивает указанные процессы. При традиционной же ионной имплантации такое объяснение дальнедействия становится проблематичным, так как при очень малых плотностях ионного тока соответствующие термоупругие напряжения и их градиенты недостаточны для обеспечения вышеуказанных эффектов.

Следует отметить также, что в рамках ударной модели не находят должного объяснения ряд экспериментально обнаруженных явлений в твердых телах.

В связи с этим для интерпретации явления дальнедействия как особого явления в радиационной физике необходимо рассматривать весь комплекс физических процессов, сопровождающих внедрение ускоренных ионов в кристалл. Сюда необходимо в первую очередь отнести:

1. Генерацию волн упругих колебаний различной природы и их взаимодействие с исходными нарушениями структуры.
2. Формирование термоупругого состояния в процессе легирования.
3. Формирование статического напряженно-деформированного состояния, обусловленного дефектно-примесной системой.
4. Генерацию и миграцию дислокаций в поле термоупругих и статических упругих напряжений.
5. Формирование скоплений дислокаций, имеющих дальнедействующие поля упругих напряжений.
6. Генерацию точечных дефектов в окрестности исходных нарушений структуры в поле упругих волн и термоупругих напряжений.
7. Коллективные эффекты в системе взаимодействующих дефектов, когда дефектная область при определенных условиях может мигрировать как единое целое.
8. Общую деформацию образца и связанное с этим изменение дефектной структуры по всему объему кристалла.
9. Свойство кристалла (связанной системы) как единого целого, в рамках которого изменение термодинамического состояния некоторой его части должно с необходимостью приводить к определенному изменению всей структуры в целом.

# EFFECT OF MODIFICATIONS THE FIELD OF DEPOSITION DEFECTS IN THE SOLID STATES DURING ION RADIATION

N.T. KVASOV, L.V. SOLOGUB

## Abstract

Experimental have been obtained the defects notching and anomaly propagation doping materials after ion implantation. Has been looked dynamic effects in the crystal lattice of the solid state. As a result of the researches the correlation between the conditions of the investigation object and its elastic properties has been determinate.

## Литература

1. Квасов Н.Т., Будкус В., Вайткус Ю., Ярашюнас К. // Ионная имплантация в полупроводниках и других материалах. Вильнюс. 1983. С/ 67–68.
2. Квасов Н.Т., Ионикас Л., Ярашюнас К. // ФТП. 1988. Т. 22, № 5.
3. Квасов Н.Т., Ярашюнас К., Спижук С.Ф. // ФХОМ. 1990, № 5.
4. Шаркеев Ю.П., Колупаева С.Н., Гирсова Н.В. и др. // Металлы. 1998, № 1. С. 109–115.
5. Диденко А.Н., Шаркеев Ю.П., Козлов Э.В. и др. // Металлы. 1993. № 3. С. 122–129.