

Эффект структурного дальнего действия в арсениде галлия при ионной бомбардировке

© Н.А. Берт, И.П. Сошников, М.Г. Степанова

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук,
194021 Санкт-Петербург, Россия

(Поступила в Редакцию 16 октября 1997 г.)

Методом просвечивающей электронной микроскопии исследовано изменение структуры в образцах арсенида галлия после высокодозной бомбардировки ионами аргона с энергией 5 keV. Обнаружено изменение структуры образцов на глубинах, превышающих среднюю глубину проникновения ионов на порядок величины. Предложена модель, объясняющая эффект структурного дальнего действия в арсениде галлия фазовым превращением под действием упругих напряжений в образцах.

В работе [1] при высокодозной бомбардировке ионами аргона с энергией 5 keV наблюдалось изменение состава образцов GaAs на глубинах 100 nm и более, что на порядок больше средней глубины проникновения ионов в мишень. Указанное явление не укладывается в рамки традиционных представлений о формировании измененного слоя при ионной бомбардировке [2,3] и требует углубленного исследования. В данной работе методом просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ) исследовалась структура измененного слоя в образцах GaAs и развита модель его формирования.

Образцы-мишени вырезались из стандартных химически полированных пластин арсенида галлия типа АГЧТ и АГЧО ($n \sim 10^{14} - 10^{16} \text{ cm}^{-3}$). Затем образцы подвергались ионной бомбардировке на специализированной установке, описанной ранее [2], которая давала ионный пучок с энергией 5 keV и плотностью тока $150 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ при диаметре пучка 5 mm. Для исследований методом ПЭМ применялась методика подготовки образцов без использования ионного травления. Поверхность образцов совпадала с кристаллографической плоскостью (100).

Исследования структуры облученных образцов проводилось на просвечивающем электронном микроскопе EM-420 Philips. Исследования показали, что при дозах облучения до $10^{18} \text{ ion}/\text{cm}^2$ измененный слой состоит из аморфизованной области толщиной примерно 15 nm. Появление этой области связано с воздействием каскадного перемешивания. При увеличении дозы, в области $10^{18} - 3.5 \cdot 10^{19} \text{ ion}/\text{cm}^2$, под аморфизованным слоем образуется еще одна область с нарушенной структурой. Рис. 1 показывает, что структура указанной области отличается от структуры приповерхностного аморфизованного слоя.

Характерной чертой второй области является увеличение ее толщины с ростом дозы облучения. Исследования ПЭМ показали, что при дозе $0.9 \cdot 10^{19} \text{ ion}/\text{cm}^2$ нижняя граница измененного слоя находится на глубине около 40 nm, а при дозе $3.5 \cdot 10^{19} \text{ ion}/\text{cm}^2$ — на глубине более 140 nm, значительно превышающей глубину проникновения ионов в мишень. Скорость утолщения измененного слоя составляла примерно $0.15 \text{ nm}/\text{min}$, что согласуется с полученными ранее данными по изменению состава образцов GaAs [1]. В данной работе эффект структурного дальнего действия в GaAs наблюдался впервые.

Полученные результаты не могут быть объяснены в рамках традиционной теории формирования измененного слоя при ионной бомбардировке [3,4]. Теоретическая модель, развитая в данной работе, объясняет образование второй области в измененном слое GaAs фазовым превращением под действием упругих напряжений.

Известно [3,5], что каскадное перемешивание приводит к образованию уплотненной области в мишени. Было показано [5], что благодаря радиационно-усиленной диффузии уплотненная область может распространяться далеко за пределы средней глубины проникновения ионов (рис. 2). Предполагается, что в уплотненной области происходит выпадение фазы с более высокой равновесной плотностью, чем у GaAs. Это предположение позволяет объяснить образование второй нарушенной области и ее аномальную толщину.

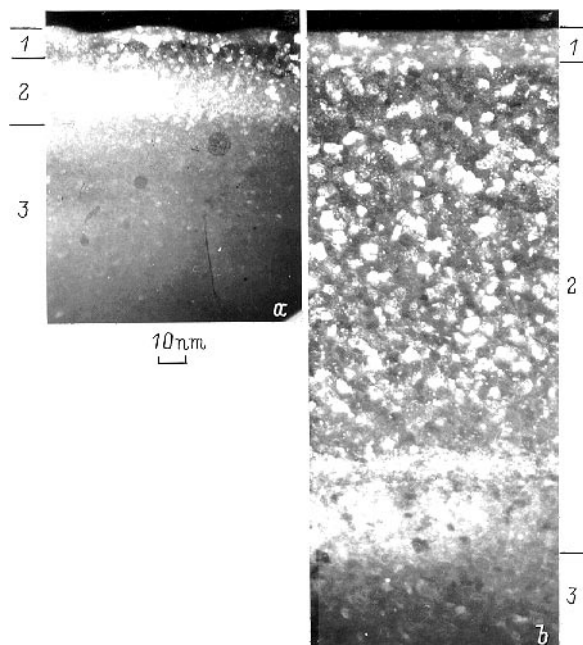


Рис. 1. Темнопольное изображение поперечного сечения образцов, облученных Ar^+ -ионами с энергией 5 keV при дозах $0.9 \cdot 10^{19}$ (a) и $3.5 \cdot 10^{19} \text{ ion}/\text{cm}^2$ (b). 1 — область каскадного перемешивания, 2 — область "структурного дальнего действия", 3 — кристаллический GaAs.

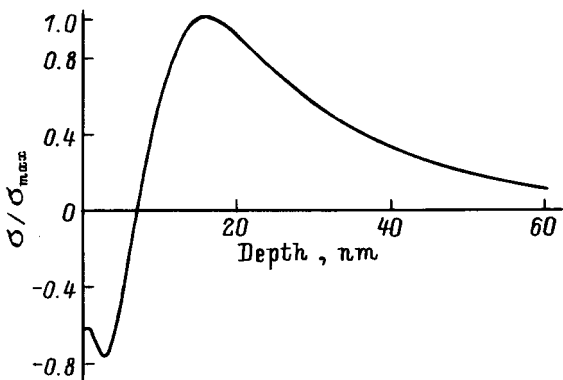


Рис. 2. Зависимость напряжения σ от глубины x в GaAs при бомбардировке Ar^+ -ионами с энергией 5 keV, падающими по нормали (расчет по модели, обсуждавшейся в [5]).

В работе численно моделировалось изменение атомных концентраций Ga и As в кристаллическом GaAs (фаза c) и в новой фазе-преципитате (фаза p), при условиях ионной бомбардировки, идентичных экспериментальным. Так, уравнение для атомной плотности компонентов преципитата, $N_{ic}(x, t)$ ($i = \text{Ga}, \text{As}$), имеет вид

$$\left(\frac{\partial}{\partial t} - V \frac{\partial}{\partial x}\right) N_{ic}(x, t) = K_{cp} N_{ic}(x, t) - \delta(x) J Y_{ic} \Omega N_{ic}(x, t) - \frac{\partial}{\partial x} [J_{ip}^m(x, t) + J_{ip}^d(x, t)], \quad (1)$$

где V — скорость перемещения распыляемой поверхности, Y_{ic} — коэффициент распыления компонента i , $\delta(x)$ — дельта-функция, $J^m(x, t)$ — плотность потока вещества, связанного с каскадным перемешиванием, которая вычислялась в диффузионном приближении, как описано в работе [6], $J^d(x, t)$ — плотность потока вещества, связанного с радиационно-усиленной диффузией [5,6],

$$J_{ip}^d(x, t) = - \frac{D_{ip}^r(x, t)}{kT} N_{ip}(x, t) \Omega_{ip} \frac{\partial}{\partial x} \sigma(x, t) - \frac{\partial}{\partial x} [D_{ip}^d(x, t) N_{ip}(x, t)], \quad (2)$$

где D_{ip}^r, D_{ip}^d — эффективные коэффициенты диффузии, Ω_{ip} — атомный объем, σ — первый инвариант тензора упругих напряжений (зависимость $\sigma(x)$ см. на рис. 2); член $K_{cp} N_{ic}(x, t)$ в уравнении (1) описывает фазовое превращение $c \rightarrow p$ под давлением (в области $\sigma > 0$ на рис. 2), K_{cp} — феноменологический коэффициент.

Было показано, что модель (1) допускает 2 различных режима эволюции профиля концентрации $C_p(x, t)$ фазы преципитата ($C_p(x, t) = (N_{\text{Ga}p}(x, t) + N_{\text{As}p}(x, t)) / \Sigma N$). В первом случае в течении 10–15 min формируется стационарное распределение концентрации $C_p(x)$. Такой режим характерен для формирования измененного слоя при ионной бомбардировке [3,4]. Второй режим состоит в стремительном распространении процесса фазового

превращения $c \rightarrow p$, который захватывает весь образец за считанные минуты. При этом скорость продвижения "фронта" профиля $C_p(x, t)$ может достигать 1 nm/s. Необходимым условием такого режима является автокаталитический характер фазового превращения $c \rightarrow p$ ($K_{cp} = K_0 C_p(x, t)$), а также существенна величина коэффициентов диффузии компонентов в фазе p .

При увеличении величин D_{ip}^r, D_{ip}^d происходит резкий переход от первого ко второму режиму эволюции. В моделировании автокаталитических процессов режим неограниченного распространения фронта фазового превращения (реакции) известен под названием "волна Колмогорова–Петрова–Пискунова" (волна КПП) [7,8].

Поскольку скорость распространения второй измененной области, наблюдавшаяся экспериментально, на два порядка меньше теоретической скорости продвижения фронта фазового превращения в режиме волн КПП, модель (1) была дополнена предположением об изменении величины коэффициентов диффузии D_{ip}^r, D_{ip}^d ($i = \text{Ga}, \text{As}$) в области фронта. Предполагалось, что при превышении концентрацией C_p некоторой условной величины C_{min} перестройка микроструктуры приводит к росту коэффициентов диффузии D (индексы для простоты опустим) от начальной величины D_{min} (при которой реализуется первый режим) до величины D_{max} (когда образуется волна КПП), по закону

$$\tau = \frac{\partial}{\partial x} D(x, t) = D_{\text{max}} - D(x, t) \quad (3)$$

с характерным временем процесса τ . Это позволило описать плавное распространение области фазового распада со скоростью, зависящей от времени запаздывания τ .

На рис. 3 изображено равномерное расширение профиля концентрации фазы преципитата $C_p(x, t)$ в течение 6 h ионной бомбардировки при времени запаздывания $\tau = 100$ s. Расчеты показали также, что скорость продвижения фронта обратно пропорциональна τ .

Таким образом, предлагаемая модель автокаталитического фазового распада с запаздывающей диффузией

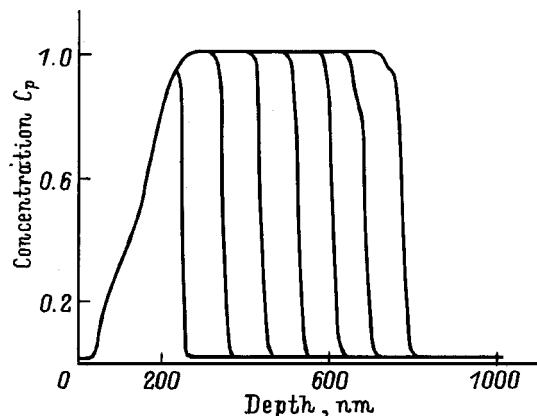


Рис. 3. Профили концентрации $C_p(x, t)$ в моменты времени $t = 1, 2, 3, 4, 5$ и 6 h после начала ионной бомбардировки (расчет по модели (1)–(2)).

позволяет качественно объяснить явление структурного дальнего действия в арсениде галлия при ионной бомбардировке, наблюдавшееся экспериментально, и способна давать скорости утолщения измененного слоя такого порядка, как получено в эксперименте. В теории формирования измененного слоя подобная модель ранее не применялась.

До сих пор возможный характер фазового превращения конкретно не обсуждался, поскольку для качественной теоретической модели этот вопрос имеет второстепенное значение. Одна из возможностей — это распад $\text{GaAs} \rightarrow \text{Ga} + \text{As}$, так как атомная плотность чистых галлия и мышьяка выше, чем у GaAs. Экспериментальная проверка данного предположения представляется важным направлением дальнейших исследований.

Данная работа была поддержана Российским фондом фундаментальных исследований (грант N 95-03-09617a).

Список литературы

- [1] Н.А. Берт, К.Ю. Погребницкий, И.П. Сошников, Ю.Н. Юрьев. ЖТФ **62**, 4, 162 (1992).
- [2] Н.А. Берт, И.П. Сошников. ФТТ **35**, 9, 2501 (1993).
- [3] P. Sigmund, N.Q. Lam. Mat.-Fys. Medd. K. Dan. Vid. Selsk. **43**, 255 (1993).
- [4] Г. Бетц, Г. Венер. В кн.: Распыление твердых тел ионной бомбардировкой / Под ред. Р. Бериша. Мир, М. (1986). Т. 2. С. 60.
- [5] М.Г. Степанова. Изв. РАН. Сер. физ. **56**, 6, 53 (1992).
- [6] M.G. Stepanova. Nucl. Instr. Meth. **B95**, 481 (1995).
- [7] А.Н. Колмогоров, И.Г. Петровский, Н.С. Пискунов. Бюл. МГУ, **1**, 6, 1 (1937).
- [8] Т.С. Ахромеева, С.П. Курдюмов, Г.Г. Малинецкий, А.А. Самарский. Нестационарные структуры и диффузионный хаос. Наука, М. (1992). С. 22.