

МЕХАНИЗМ СНИЖЕНИЯ ПЛОТНОСТИ ДИСЛОКАЦИЙ ПРИ ИЗОВАЛЕНТНОМ ЛЕГИРОВАНИИ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ СОЕДИНЕНИЙ $A^{III}B^V$

Мартисов М. Ю.

Исследован механизм снижения плотности дислокаций при изовалентном легировании полупроводниковых соединений $A^{III}B^V$ и показано, что в изовалентно легированных слоях дислокации могут выходить за пределы образца. Получено выражение для вероятности выхода дислокации за пределы образца и показано, что данный технологический прием эффективен при малой плотности дислокаций ($N_d \sim 10^4 \text{ см}^{-2}$, $A^{III}B^V/A^{III}B^V$) и неэффективен при большой плотности дислокаций ($N_d \sim 10^6 - 10^8 \text{ см}^{-2}$, $A^{III}B^V/\text{Si}$).

В последнее время сильно возрос интерес к изовалентному легированию соединений $A^{III}B^V$ [1]. Помимо снижения фоновой концентрации легирующих примесей [2], снижения концентрации глубоких центров [3] и связанного с этим улучшения параметров арсенид-галлиевых транзисторов и тиристоров [4], данный технологический прием приводит к снижению плотности наклонных дислокаций [5], проникающих из подложки в эпитаксиальный слой и при определенных условиях определяющих электрофизические параметры данного материала, а также параметры полупроводниковых приборов, выполненных на его основе. В работе [6] отмечалось резкое (с 10^4 до 10^2 см^{-2}) снижение плотности дислокаций в слоях арсенида галлия, получаемого по методу Чохральского, при превышении некоторого уровня легирования как изовалентными, так и мелкими примесями. Автор работы [7] утверждает, что вследствие изовалентного легирования на поверхности эпитаксиального слоя «запираются» источники дислокаций, что препятствует их генерации, но в данной работе вообще не рассматриваются дислокации, выходящие из подложки, и механизм снижения их плотности.

В настоящей работе исследован механизм снижения плотности наклонных дислокаций, который состоит в следующем. Под действием механической силы (силы Пича—Келера), вызванной несоответствием постоянных решетки в подложке и изовалентно легированном эпитаксиальном слое, дислокация начинает загибаться на границе подложка—эпитаксиальный слой и, снимая несоответствие, проходит некоторое расстояние. Если расстояние, проходимое отрезком дислокации, сравнимо с характерным размером (радиусом) подложки, то данный отрезок может выйти за пределы образца, образуя дислокацию несоответствия, что приводит к снижению плотности наклонных дислокаций.

Для количественного описания эффекта снижения плотности наклонных дислокаций рассмотрим подложку и напряженный эпитаксиальный слой с несоответствием f , в который из подложки проникают дислокации с плотностью N_d . Будем считать дислокацию 60-градусной, вектор Бюргера равным

$$\mathbf{b} = \frac{b}{2}(101),$$

где b — постоянная решетки, а линия дислокации

$$\tau = \frac{1}{\sqrt{2}}(011).$$

Расположения осей, вектора Бюргерса и линии дислокации показано на рисунке. Отметим, что подобные вектор Бюргерса и линия дислокации действительно наблюдались в работе [8].

Под действием силы Пича—Келера, возникающей в напряженном слое, дислокация загибается на границе подложка—эпитаксиальный слой и скользит в своей плоскости скольжения. Для проекции силы Пича—Келера на плоскость скольжения можно получить

$$F_1 = \frac{G}{2} \frac{1 + \nu}{1 - \nu} b \varepsilon_{xx} h, \quad (1)$$

где G — модуль сдвига, ν — коэффициент Пуассона, ε_{xx} — компонента тензора деформации в эпитаксиальном слое, h — толщина эпитаксиального слоя.

Второй силой, действующей на дислокацию, является сила линейного натяжения дислокации несоответствия (или ее энергия на единицу длины), которая с учетом взаимодействия со свободной поверхностью равна [9]

$$F_2 = 3 \frac{Gb^2}{32\pi(1-\nu)} \ln \left(2e^{1/2} \frac{h}{b} \right) + \frac{Gb^2}{32\pi} \ln \left(\frac{e}{2} \frac{h}{b} \right). \quad (2)$$

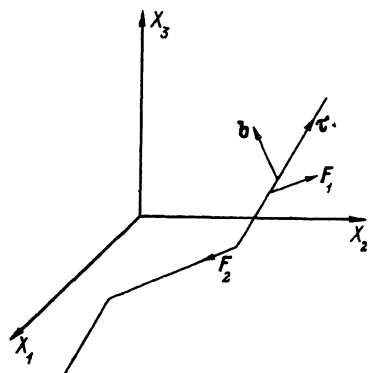
Если сила Пича—Келера, действующая на дислокацию, больше силы линейного натяжения дислокации несоответствия, отрезок дислокации может при этом скользить, снимая часть несоответствия. Скольжение отрезка наклонной дислокации прекращается, если силы F_1 и F_2 уравниваются друг друга. Выражая ε_{xx} через f и δf , где δf — снимаемое в процессе скольжения несоответствие, можно получить условие равенства сил F_1 и F_2 , аналогичное полученному в работе [9] для движения дислокации в поле механических напряжений напряженной сверхрешетки:

$$(f - \delta f) h = \frac{b}{16\pi(1+\nu)} \left(3 \ln \left(2e^{1/2} \frac{h}{b} \right) + (1 - \nu) \ln \left(\frac{e}{2} \frac{h}{b} \right) \right). \quad (3)$$

Приняв, что все отрезки наклонных дислокаций в процессе релаксации проходят одинаковое расстояние L , и учитывая, что в зависимости от направления вектора Бюргерса и линии дислокации отрезки могут скользить в двух взаимно перпендикулярных направлениях, получаем, что величина снимаемого несоответствия равна

$$\delta f = N_d L b_{\perp} / 2, \quad (4)$$

где b_{\perp} — составляющая вектора Бюргерса, параллельная свободной поверхности и равная $b_{\perp} = b/2\sqrt{2}$, а N_d — плотность наклонных дислокаций. Отсюда находим, что расстояние, пройденное отрезком наклонной дислокации, равно



Дислокация, скользящая в изовалентно легированном эпитаксиальном слое под действием силы Пича—Келера.

$$L = \frac{4\sqrt{2}}{N_d b} \left[f - \frac{b}{16\pi(1+\nu)h} \left(3 \ln \left(2e^{\nu/2} \frac{h}{b} \right) + (1-\nu) \ln \left(\frac{e}{2} \frac{h}{b} \right) \right) \right]. \quad (5)$$

Аналогичное выражение для расстояния, проходимого отрезком наклонной дислокации, было получено в [9]. Зная расстояние, проходимое отрезком дислокации, можно оценить W — вероятность выхода дислокации за границу образца.

Полагая, что дислокации случайно распределены по плоскому образцу радиусом R (образец предполагается круглым), получаем выражение для W :

$$W = \frac{2\theta + \sin 2\theta}{\pi}, \quad (6)$$

где $\theta = \arcsin(L/2R)$, если $L < 2R$, и $W = 1$, если $L \geq 2R$.

Обсудим полученные формулы (5) и (6).

1. Как и следовало ожидать, формула (6) приводит к тому, что вероятность ухода дислокации из образца существенна, если длина пробега дислокации L сравнима с радиусом образца R . Подставив в выражение (5) характерные численные значения $h = 5$ мкм, $N_d = 10^4$ см⁻², $b = 5.65 \cdot 10^{-8}$ см, $f = 2 \cdot 10^{-4}$ (доля In в GaAs составляет 0.3%), получаем $L \approx 1.5$ см, что сравнимо с радиусом подложки.

2. При заданном несоответствии f с ростом толщины эпитаксиального слоя h , начиная с некоторой критической h_c , при которой второй член в формуле (5) становится меньше первого, длина скольжения дислокации L , а следовательно, и вероятность выхода отрезка дислокации за пределы образца W будут увеличиваться до тех пор, пока второй член в формуле (5) не будет много меньше первого. Для нашей оценки подобная толщина примерно равна 15 мкм.

3. Длина скольжения дислокации L возрастает с уменьшением N_d — плотности наклонных дислокаций, выходящих из подложки в эпитаксиальный слой. Поэтому изовалентное легирование эффективно в эпитаксиальных слоях с малой плотностью дислокаций ($N_d \sim 10^4$ см⁻², A^{III}B^V/A^{III}B^V) и неэффективно в слоях с большой плотностью дислокаций ($N_d \sim 10^6$ – 10^8 см⁻², A^{III}B^V/Si).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Шмарцев Ю. В. // Препринт ФТИ им. А. Ф. Иоффе АН СССР. Л., 1990.
- [2] Гермогенов В. П., Отман Я. И., Чалдышев В. В., Шмарцев Ю. В., Эпитектова Л. Е. // ФТП. 1990. Т. 24. В. 6. С. 1095–1100.
- [3] Lawrenti J. P., Wolter K., Roentgen P., Seibert K., Kurz H., Camassel J. // Phys. Rev. B. 1989. V. 29. N 9. P. 5934–5946.
- [4] Kim H. K., Schlesinger T. E., Milnes A. G. // J. Vac. Sci. Techn. B. 1990. V. 8. N 2. P. 374–378.
- [5] Кольченко Т. И., Ломако В. М., Родионов А. В., Свешников Ю. Н. // ФТП. 1989. Т. 23. В. 4. С. 626–629.
- [6] Степанцова И. В., Марков А. В., Освенский В. Б., Анастасьева Н. А. // Кристаллография. 1989. Т. 34. В. 6. С. 1518–1523.
- [7] Walukiewicz W. // Appl. Phys. Lett. 1989. V. 54. N 20. P. 2009–2011.
- [8] El-Masry N. E., Tarn J. C., Karam N. H. // J. Appl. Phys. 1988. V. 64. N 7. P. 3672–3677.
- [9] Мартисов М. Ю., Романов А. Е. // ФТТ. 1990. Т. 32. В. 6. С. 1885–1887.

Физико-технический институт
им. А. Ф. Иоффе РАН
Санкт-Петербург

Получена 2.07.1991
Принята к печати 14.11.1991