

06.2;12

©1993

ИССЛЕДОВАНИЕ ПОВЕРХНОСТНОЙ НЕОДНОРОДНОСТИ ДЕФОРМАЦИИ В ЭПИТАКСИАЛЬНОЙ СТРУКТУРЕ $\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x\text{P}/(111)\text{GaAs}$

В.А.Бушуев, Ю.П.Ханачев, В.В.Лидер

Эпитаксиальные структуры широко используются в полупроводниковой электронике [1]. Электрофизические свойства приборов на основе гетеропереходов в значительной мере зависят от совершенства структуры эпитаксиальных пленок [2]. Весьма перспективными являются изопериодные малодислокационные гетероструктуры на основе тройных твердых растворов соединений $A^{\text{III}}B^{\text{V}}$, выращенные на подложках из бинарных соединений, не являющихся составной частью твердого раствора (например, структура $\text{In}_{0.49}\text{Ga}_{0.51}\text{P}/\text{GaAs}$) [1].

Изменение состава в процессе выращивания гетерослоя приводит к появлению градиента деформации по глубине, что вызывает изменение электрофизических свойств полупроводниковых приборов. В связи с этим для оценки эффективности и оптимизации условий роста гетероструктур важным является определение изменения деформации как по глубине, так и вдоль поверхности эпитаксиальной пленки.

Целью работы является рентгенодифрактометрическое определение профилей деформации $\varepsilon(z)$ по глубине в различных точках поверхности гетероэпитаксиальной структуры $\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x\text{P}/(111)\text{GaAs}$. Использовались методы обработки данных, развитые в работах [3,4]. В [3] предложен простой способ получения $\varepsilon(z)$ непосредственно из кривых дифракционного отражения (КДО). Второй метод [4] основан на анализе приближенных аналитических выражений, полученных в предположении о линейном изменении деформации с глубиной.

Исследовалась эпитаксиальная структура $\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x\text{P}/(111)\text{GaAs}$ ($x \approx 0.5$), выращенная методом жидкофазной эпитаксии на подложке GaAs с ориентацией поверхности (111). Измерения КДО проводились на двухкристальном дифрактометре в геометрии Брэгга для симметричного рефлекса (222) в семи точках образца размером

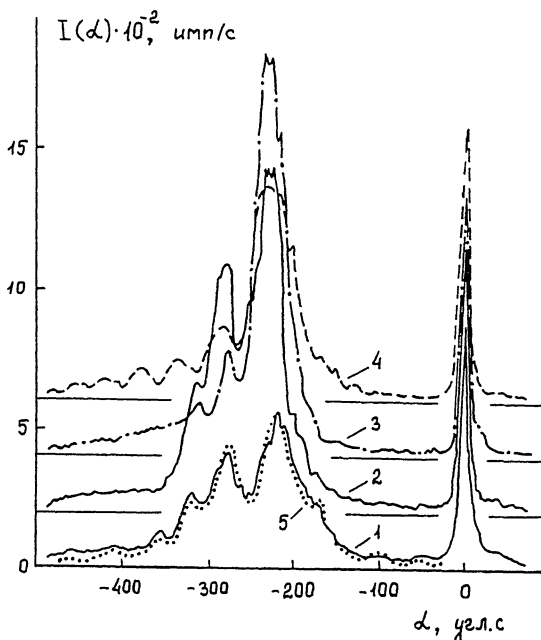


Рис. 1. Кривые дифракционного отражения (222) $\text{CuK}\alpha_1$ -излучения от гетероструктуры $\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x\text{P}/(111)\text{GaAs}$ в точках поверхности l (мм): 1 — 2, 2 — 4, 3 — 6, 4 — 8; 5 — теоретическая КДО с профилем деформации, определенным по методу [3].

$10 \times 10 \times 0.5$ мм при его горизонтальном смещении l с шагом 1 мм. В качестве монохроматора использовался совершенный кремний с ориентацией поверхности (100) и асимметричным отражением (311) $\text{CuK}\alpha_1$ — излучения. Интенсивность рентгеновского пучка $I_0 = 6.7 \cdot 10^4$ имп/с, его размеры на поверхности образца составляли 0.4 мм в плоскости дифракции и 1 мм в вертикальной плоскости.

На рис. 1 приведены КДО $I(\alpha)$, измеренные в точках $l = 2, 4, 6$ и 8 мм. Некоторое отличие между КДО в области отражения от пленки ($\alpha < 0$) указывает на неоднородность пленки в плоскости гетерограницы. Так как рефлекс (222) для GaAs почти запрещен, то отражение от подложки сильно ослаблено, поэтому кривые на рис. 1 представляют собой почти собственные КДО от пленки. Характерные особенности КДО состоят в следующем: почти полное отсутствие интенсивности в области между пиками отражения от подложки и от пленки; отражение от пленки лежит в области $\alpha < 0$ и достаточно далеко отстоит от пика подложки; КДО от пленки имеет ряд интерференционных максимумов, интенсивность которых быстро спадает в сторону отрицатель-

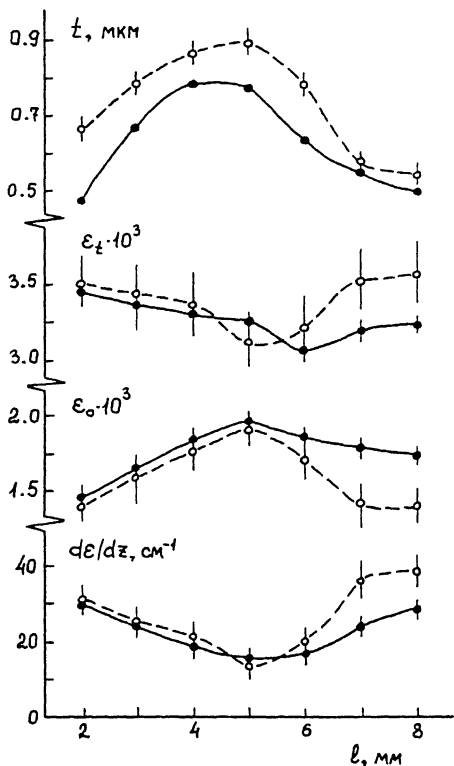


Рис. 2. Толщина пленки t , амплитуды деформации ε_0 и $\varepsilon_t = \varepsilon(t)$ на поверхности и на гетерогранице соответственно и средний градиент деформации $d\varepsilon/dz$, полученные по формулам (1) [3] (темные точки) и (2) [4] (светлые точки).

ных углов α . Перечисленное выше вкупе с результатами [4,5] свидетельствует о том, что деформация $\varepsilon(z)$ всюду положительна, монотонно возрастает с глубиной и ее амплитуда на поверхности $\varepsilon_0 = \varepsilon(0)$ отлична от нуля.

Именно для такого типа кривых наиболее эффективен метод обработки КДО, предложенный в [3]. Профиль деформации $\varepsilon(z)$ определяется из соотношений

$$z(\alpha) = t - \Phi(\alpha), \quad \Phi(\alpha) = (2\Lambda/\pi\Delta\vartheta_B) \int_{\alpha_1}^{\alpha} R(\alpha') d\alpha', \quad (1)$$

где $R(\alpha) = I(\alpha)/I_0$, Λ — глубина экстинкции, $\Delta\vartheta_B$ — собственная ширина брэгговского пика, t — толщина пленки, определяемая из условия $t = \Phi(\alpha_2)$. Углы α_1 и $\alpha_2 > \alpha_1$ вы-

бираются на границах области отражения от пленки после вычитания фона и пика подложки. Преобразование функции $z(\alpha)$ в $\varepsilon(z)$ осуществляется посредством простой связи $\varepsilon = -\alpha \operatorname{ctg} \vartheta_B$.

Расчет профилей $\varepsilon(z)$ проводился по формуле (1) с учетом свертки и обеих состояний поляризации. Кривые $\varepsilon(z)$ монотонно возрастают с небольшими плавными осцилляциями и весьма близки к линейному закону $\varepsilon_n(z) = \varepsilon_0 + (\Delta\varepsilon/t)z$. Отклонение $\varepsilon(z)$ от ε_n в среднем не более 5–10%. Наибольшее отличие (до 20%) наблюдается вблизи гетерограницы для кривых с $l = 7$ и 8 мм. Соответствующие параметры профилей деформации приведены на рис. 2 темными точками. Прямые расчеты КДО по формулам динамической теории с использованием найденных функций $\varepsilon(z)$ показали удовлетворительное согласие (см. кривые 1 и 5 на рис. 1). В результате варьирования профиля $\varepsilon(z)$ вблизи $z = t$ получено, что толщина переходного слоя в области гетерограницы не превышает 0.03 мкм.

В отличие от [3], в методе [4] не требуется измерение абсолютной интенсивности отражения, достаточно знать лишь угловые положения α_i интерференционных максимумов КДО от пленки. При этом, однако, в качестве исходной принята модель кристалла с линейным изменением деформации $\varepsilon_n(z)$. В случае симметричного отражения

$$\varepsilon_0 = [\alpha_{0i} - \alpha_{ij}(\psi_{0i})] \operatorname{ctg} \vartheta_B, \quad (2)$$

$$\Delta\varepsilon/t = (8 \operatorname{ctg}^2 \vartheta_B / d) (\alpha_{ij} / \psi_{ij})^2,$$

где d — межплоскостные расстояния, $\alpha_{ij} = \alpha_i - \alpha_j$, ψ_{ij} — расстояния между интерференционными максимумами, нормированные на угловой интервал $\lambda/2t \cos \vartheta_B$ между соседними максимумами для однородной пленки толщиной t (λ — длина волны). В случае градиентной пленки с величиной статического фактора Дебая=Валлера $f = 1$ $\psi_{01} = 2.44$, $\psi_{12} = 2.26$, $\psi_{23} = 1.46$, $\psi_{34} = 1.18$ [4]. Для дальних максимумов величины ψ_{ij} практически не зависят от f и близки к единице. Результаты расчетов параметров профилей приведены на рис. 2 светлыми точками. Ошибки связаны как с погрешностями в измерении α_{ij} , так и с разбросом параметров, определенных по различным парам интерференционных максимумов. Наиболее корректными следует считать величины $\Delta\varepsilon$, определенные по α_{23} и α_{13} [4].

Из рис. 2 видно, что результаты, полученные двумя методами, в целом хорошо согласуются. Заметные отличия в толщинах пленки связаны с тем, что в (1) не учтена частичная аморфизация пленки из-за наличия дефектов, тогда как

в методе [4] толщина t , определенная по дальним максимумам, не зависит от f . Из сравнения толщин t следует, что средний по слою статфактор меняется от $f = 0.84 \pm 0.04$ при $l = 2$ мм до $f = 0.98 \pm 0.05$ в случае $l = 7$ мм. Основным типом дефектов в подобных гетероструктурах являются дислокации несоответствия, вызванные напряжениями несоответствия [1,2].

Исследуемый образец достаточно неоднороден в плоскости гетерограницы. Вариации t и ε_0 достигают 30 и 20% соответственно. Характерно, что участкам с большей толщиной пленки отвечают большие амплитуды деформации ε_0 на поверхности и меньшие значения ε_t на гетерогранице. По-видимому, это вызвано зависимостью скорости обеднения твердого раствора фосфором в процессе выращивания гетероэпитаксиальной пленки от ее толщины. Наибольшее отличие амплитуд и градиента деформации, рассчитанных двумя методами, наблюдается для точек $l = 7$ и 8 мм. Как уже отмечалось, именно для этих точек поверхности профиль $\varepsilon(z)$ наиболее заметно отличается от линейного, в связи с чем расчеты по формулам (2) не вполне корректны.

В заключение отметим, что обработка КДО сильно градиентных гетероструктур методами [3] и [4] является взаимодополняющей. Метод [3] дает более высокую точность определения профиля деформации и проще позволяет автоматизировать процесс экспрессной (менее минуты) обработки данных на ЭВМ. При этом толщину пленки следует определять по угловому положению дальних интерференционных максимумов на кривой дифракционного отражения рентгеновских лучей от эпитаксиального слоя.

Список литературы

- [1] Мильвидский М.Г. Полупроводниковые материалы в современной электронике. М.: наука, 1986. 144 с.
- [2] Хапачев Ю.П., Чуховский Ф.Н. // Кристаллография. 1989. Т. 34. № 3. С. 776-800.
- [3] Кон В.Г., Прилепский М.В., Суходрева И.М. // Поверхность. 1984. № 11. С. 122-128.
- [4] Лидер В.В., Чуховский Ф.Н., Хапачев Ю.П., Барашев М.Н. // ФТТ. 1989. Т. 31. № 4. С. 74-81.
- [5] Колпаков А.В. Дифракция рентгеновских лучей в кристаллах с одномерным изменением периода решетки. М.: МГУ, 1988. 127 с.

Кабардино-Балкарский
государственный университет
Нальчик

Поступило в Редакцию
12 сентября 1993 г.