

ПЕРЕРАСПРЕДЕЛЕНИЕ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ
ПРИ ПРОФИЛИРОВАНИИ ПОДЛОЖЕК
В СТРУКТУРАХ $InGaSbAs/GaSb$

Б.Ж. Кушкимбаева, Б.А. Матвеев,
Г.Н. Талалакин, А.С. Филиппенко,
Е.И. Чайкина

Использование профилированных подложек для выращивания эпитаксиальных структур позволяет менять радиус кривизны и плотность дислокаций в пределах одного образца [1, 2]. Это может быть использовано при проведении исследований (например, при изучении влияния деформации на свойства полупроводников или приборов на их основе). Для правильной интерпретации результатов необходимо знать величину и знак деформации в подобных структурах.

В данной работе приводится модель перераспределения упругих напряжений в структурах $InGaSbAs/GaSb$ с подложкой, профилированной в виде "швеллера", и экспериментальные результаты измерений спектральной зависимости степени линейной поляризации излучения (СЗСЛПИ), качественно подтверждающие эту модель.

Образцы, аналогичные описанным в [2], получали кристаллизацией из расплава на подложках $p-GaSb$ (Ш) ($p=1-2 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$) площадью $10 \times 12 \text{ мм}^2$ при температуре пластичности $GaSb$ ($580-620 \text{ }^\circ\text{C}$). Толщины подложек составляли $\sim 200 \text{ мкм}$, эпитаксиальных слоев (ЭС) $\sim 8 \text{ мкм}$. Твердый раствор на границе раздела имел состав $In_{0.13}Ga_{0.87}Sb_{0.89}As_{0.11}$, на поверхности структуры $In_{0.13}Ga_{0.87}Sb_{0.925}As_{0.075}$. На границе раздела (ГР) периоды решетки ЭС и $GaSb$, согласно интерполяционной оценке, имели близкие значения ($\Delta a \rightarrow 0.003 \text{ \AA}$), на поверхности период решетки слоя был больше периода решетки подложки на 0.015 \AA . Ширина запрещенной зоны E_g убывала от ГР к поверхности с градиентом $\sim 2 \text{ мэВ/мкм}$. Твердый раствор специально не легировался и имел p -тип проводимости.

Фотолуминесценция возбуждалась лазером с длиной волны $\lambda = 0.48 \text{ мкм}$. Измерения проводились при температуре жидкого азота. Сигнал регистрировался с поверхности структуры в направлении нормали к ГР фотосопротивлением из PbS .

Измерения СЗСЛПИ проводились при возбуждении центральной области ЭС или подложки сфокусированным до 1 мм^2 лазерным пучком. В исходном состоянии поляризация излучения слоя и подложки отсутствовала. Для создания профиля толщины в середине образца со стороны подложки по всей длине по направлению $[1\bar{1}0]$ вытравливалась канавка глубиной 120 мкм и шириной 4 мм (см. вставку к рис. 1). По завершении первой серии измерений канавка в подложке углублялась так, что толщина оставшегося $GaSb$ составляла $\sim 25 \text{ мкм}$, после чего измерения СЗСЛПИ возобновлялись.

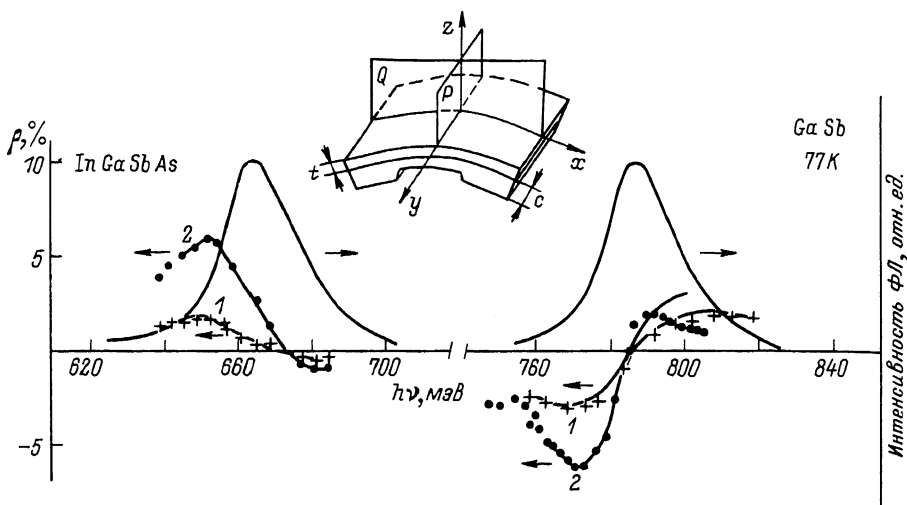


Рис. 1. Спектральная зависимость степени линейной поляризации (ρ) (кривые 1, 2) и интенсивности фотолюминесценции ЭС и подложки для двух значений толщины $GaSb$ в области канавки: $c_1=71$ и $c_2=25$ мкм. На вставке – схематическое изображение профилированной гетероструктуры.

При измерении поляризации за ось деформации принималось направление, параллельное оси канавки (направление Y).

На рис. 1 приведены результаты измерений. Видно, что степень поляризации излучения как слоя, так и подложки зависит от длины волны и возрастает с увеличением глубины канавки. СЗСЛПИ $GaSb$ и ЭС имеют противоположные знаки: коротковолновая область полосы излучения подложки поляризована положительно, а ЭС – отрицательно. Аналогично длинноволновая часть спектра $GaSb$ имеет отрицательное поляризованное соотношение, а ЭС – положительное. Поляризация излучения для областей, смежных с канавкой, отсутствовала.

Подобные приведенным на рис. 1 зависимости СЗСЛПИ наблюдаются для полупроводников при приложении к кристаллу одноосной деформации [3]. В гетероструктурах такая деформация возникает вследствие несоответствия периодов решетки ЭС и подложки, при этом поляризовано излучение, распространяющееся параллельно ГР. В нашем случае поляризовано излучение, распространяющееся в направлении, перпендикулярном ГР. Это свидетельствует об анизотропии деформации на поверхности структуры в области канавки.

Для анализа полученных зависимостей СЗСЛПИ рассмотрим перераспределение внутренних напряжений структуры при локальном изменении толщины подложки. На рис. 2 приведены рассчитанные нами по формуле [4]

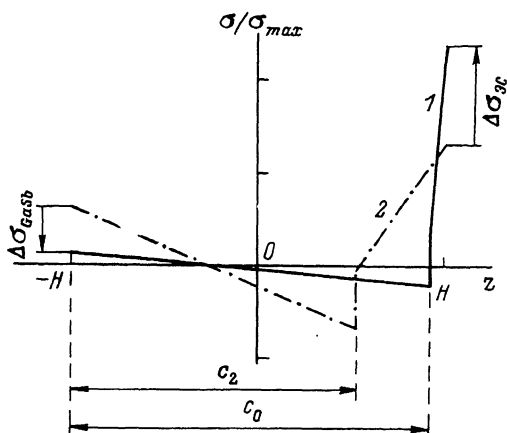


Рис. 2. Распределение упругих напряжений по толщине градиентной структуры $InGaSbAs/GaSb$ при двух значениях толщины подложки: $c_0=191$ мкм (кривая 1) и $c_2=25$ мкм (кривая 2). Толщина ЭС в обоих случаях составляла 8 мкм.

$$\sigma(z) = \frac{E}{1-\nu} \left\{ \frac{\Delta\alpha(z)}{\alpha} - \frac{1}{2H} \int_{-H}^H \frac{\Delta\alpha(z) dz}{\alpha} - \frac{3z}{2H^3} \int_{-H}^H \frac{\Delta\alpha(z) \cdot z \cdot dz}{\alpha} \right\}$$

(E – модуль Юнга, ν – коэффициент Пуассона, $2H$ – общая толщина структуры, равная сумме толщин подложки и слоя $2H=z+c$, $\Delta\alpha(z)$ – несоответствие периодов решеток градиентного ЭС и подложки в точке с координатой z , α – период решетки подложки) распределения упругих напряжений по толщине образцов для двух значений толщины подложки. Значения $\Delta\alpha(z)$ взяты из интерполяционного расчета периода решетки с использованием количественного состава твердого раствора.

Видно, что в подложке имеется нейтраль, разделяющая области сжатия ($\sigma > 0$) на поверхности ($z = -H$) и растяжения ($\sigma < 0$) вблизи ГР. В ЭС в исходном состоянии нейтраль отсутствует, а наибольшее сжатие имеет место на его поверхности ($z = H$). Деформация вблизи поверхности ЭС и подложки имеет положительные значения. Важно отметить, что при утонении подложки деформация вблизи поверхности подложки возрастает, а в ЭС – уменьшается. Аналогичное перераспределение напряжений имеет место и в структуре с профилированной подложкой. Однако из-за наличия крайних широких областей с большей толщиной, выполняющих роль ребер жесткости, такое перераспределение происходит только в плоскости, перпендикулярной оси канавки (плоскость Q на рис. 1). В плоскости параллельной ребрам (пл. P) изменения упругих напряжений практически не происходит, и они распределяются толщиной подложки в ребрах жесткости. При

этом перераспределения напряжений в ребрах жесткости не происходит (поляризация излучения отсутствует). Следовательно, можно считать, что в плоскости, параллельной ГР, внутренняя деформация приобретает "квазиодноосный" характер и эквивалентна действию напряжений $\Delta\sigma = \sigma(\zeta_0) - \sigma(\zeta_i)$ вдоль оси Y, где ζ_0 и ζ_i - толщина подложки в области ребер жесткости и в области канавки соответственно. Указанная анизотропия приводит к поляризации излучения, выходящего с поверхности структуры.

Согласно приведенной модели перераспределения внутренних напряжений, степень поляризации излучения должна возрасти при углублении канавки, т. е. при увеличении $\Delta\sigma$, что имеет место в эксперименте. В рамках этой модели находит объяснение противоположность знаков СЗСПИ ЭС и подложки: эффективная деформация на поверхности слоя положительна ($\Delta\sigma_x > 0$), а подложки - отрицательна ($\Delta\sigma_{\alpha\beta} < 0$). Показано, что внутренняя деформация в структурах с подложкой, имеющей профиль толщины типа "швеллер", носит квазиодноосный характер, что может быть использовано для исследования и определения внутренних напряжений в гетероструктурах.

Л и т е р а т у р а

- [1] М а т в е е в Б.А., П е т р о в В.И., С т у с ь Н.М., Т а л а л а к и н Г.Н., Ш а б а л и н А.В. - Поверхность. Физика, химия, механика, 1986, № 7, с. 41-44.
- [2] К у ш к и м б а е в а Б.Ж., М а т в е е в Б.А., С т у с ь Н.М., Т а л а л а к и н Г.Н., Ф и л и п ч е н к о А.С., Ч а й к и н а Е.И. - ФТП, 1987, т. 21, в. 10, с. 1914-1915.
- [3] В е к у а В.Л., Д ж и о е в Р.И., З а х а р ч е н я Б.П., И в ч е н к о Е.Л., Ф л е й ш е р В.Г. - ФТТ, т. 17, в. 4, 1975, с. 1096-1103.
- [4] М и л ь в и д с к и й М.Г., О с в е н с к и й В.Б. Структурные дефекты в эпитаксиальных слоях полупроводников, М.: Металлургия, 1985, с. 160.

Физико-технический институт
им. А.Ф. Иоффе АН СССР,
Ленинград

Поступило в Редакцию
23 ноября 1987 г.

Письма в ЖТФ, том 14, вып. 3

12 февраля 1988 г.

О ВОЗМОЖНОСТИ САМОФОКУСИРОВКИ ПУЧКА ЧАСТИЦ В КРИСТАЛЛЕ

М.А. К у м а х о в

При падении пучка положительно заряженных частиц на кристалл вблизи кристаллографической плоскости и плотноупакованных атомных рядов происходит разделение пучка на каналированную и неканали-