

ПОЛЯРИЗАЦИЯ ФОТОЛЮМИНЕСЦЕНЦИИ С ПОВЕРХНОСТИ ГЕТЕРОСТРУКТУРЫ А^{III}В^V С ПРОФИЛИРОВАННОЙ ПОДЛОЖКОЙ

Аверкиев Н. С., Кущкимбаева Б. Ш., Кютт Р. Н.,
Матвеев Б. А., Стусь Н. М., Талалакин Г. Н., Чайкина Е. И.

На основе представлений о квазиодноосном характере деформации в гетероструктуре с подложкой, профилированной в виде швеллера, экспериментально и теоретически изучено распределение деформации в неизопериодных гетероструктурах InGaSbAs/GaSb и InAsSbP/InAs. Получено соответствие величин остаточных деформаций, определенных из измерений поляризации фотолюминесценции и брэгговского асимметричного отражения.

1. В работе [1] было показано, что профилирование подложки в виде швеллера с осью в направлении [112] в структурах InGaSbAs/GaSb (111) приводит к появлению квазиодноосного характера анизотропии деформации на поверхности образца и к поляризации люминесцентного излучения, регистрируемого с поверхности структуры. Величина и знак поляризации люминесцентного излучения зависят от несоответствия периодов решеток эпитаксиального слоя (ЭС) и подложки, что может быть использовано для исследования деформированного состояния неизопериодных структур, в том числе градиентных. Однако ранее было проведено лишь качественное рассмотрение проблемы, позволяющее определить только знак деформации кристалла.

2. Для получения зависимости степени линейной поляризации излучения полупроводника p -типа проводимости (ρ) от деформации необходимо знать волновые функции и спектр состояния акцептора в зависимости от шести независимых компонент тензора деформации \mathcal{E}_{ij} . В общем виде для кристаллов кубической симметрии решение этой задачи приведено в [2]. Для получения СЭСЛПИ $[\rho(h\nu) = (J_{11} - J_1)/(J_{11} + J_1)]$, выходящего с поверхности структуры, выражение для интенсивности излучения необходимо преобразовать применительно к системе координат, привязанной к исследуемой структуре, изображенной на вставке к рис. 1, где ось X направлена параллельно плоскости [112], Y — [110], Z — [111].

В новой системе координат компоненты тензора деформации выражаются через диагональные члены \mathcal{E}_{ii} , и выражение для степени линейной поляризации имеет следующий вид:

$$\rho(h\nu) = A + 4\Delta \left(\frac{1}{kT} - \gamma + \frac{d \ln J(h\nu)}{d h\nu} \right) B, \quad (1)$$

$$A = \frac{J_y(\Delta) - J_x(\Delta) + J_y(-\Delta) - J_x(-\Delta)}{J_y(\Delta) + J_x(\Delta) + J_y(-\Delta) + J_x(-\Delta)}, \quad (1a)$$

$$B = \frac{J_x(-\Delta) J_y(\Delta) - J_y(-\Delta) J_x(\Delta)}{J_x(\Delta) + J_y(\Delta) + J_x(-\Delta) + J_y(-\Delta)^2}, \quad (1б)$$

$$J_x(\Delta) = \frac{3(\Delta + \sqrt[3]{2}b\delta)^2 + 2d^2\mathcal{E}_0^2 + d^2(\mathcal{E}_0 + \sqrt[3]{3}\delta)^2 + \frac{2}{\sqrt{3}}(\Delta + \sqrt[3]{2}b\delta)(\sqrt[3]{3}\delta - 3\mathcal{E}_0)d}{\Delta(\Delta + \sqrt[3]{2}b\delta)}, \quad (1в)$$

$$J_y(\Delta) = \frac{(\Delta + \sqrt{3/2}b\delta)^2 + 6d^2\mathcal{E}_0^2 + 3d^2(\mathcal{E}_0 + \sqrt{2/3}\delta)^2 + \frac{6}{\sqrt{3}}(\Delta + \sqrt{3/2}b\delta)(\sqrt{2/3}\delta - 3\mathcal{E}_0)d}{\Delta(\Delta + \sqrt{3/2}b\delta)}, \quad (1г)$$

$$\Delta = \sqrt{\sqrt{3/4}b^2\delta^2 + 2\delta^2\mathcal{E}_0 + d^2(\mathcal{E}_0 + \sqrt{2/3}\delta)^2}, \quad (1д)$$

$$\delta = \frac{\mathcal{E}_{xx} - \mathcal{E}_{yy}}{3}, \quad \mathcal{E}_0 = \frac{\mathcal{E}_{zz} - \mathcal{E}_{xx}}{3},$$

b, d — константы деформационного потенциала акцептора,

$$\gamma = (f_{3/2}^2 - f_{1/2}^2) f_{3/2}^2,$$

$f_{m,j}$ — медленно меняющаяся функция в представлении волновой функции дырок в методе эффективных масс.

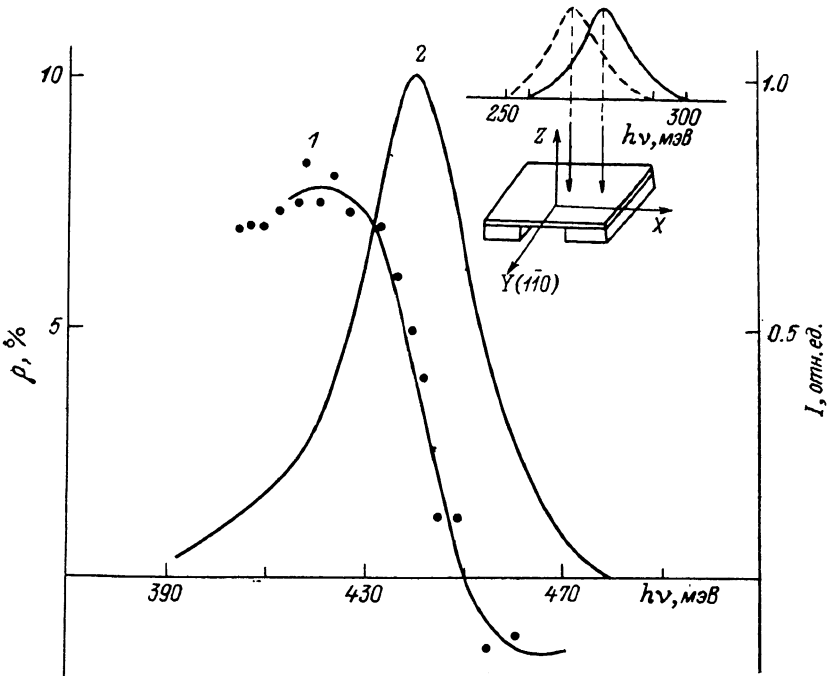


Рис. 1. Спектральная зависимость степени линейной поляризации (1) и интенсивности фотолюминесценции (2) ЭС гетероструктуры InAsSbP/InAs, сопряженного с канавкой ($T=77$ К).

На вставке — схема образца, стрелками показаны области измерения спектров ФЛ.

Величина ρ , как видно из полученного выражения, определяется искажением решетки ($\mathcal{E}_{xx} - \mathcal{E}_{yy}$), т. е. анизотропной деформации в плоскости, параллельной ГР. Для непрофилированной структуры ($\mathcal{E}_{xx} = \mathcal{E}_{yy}$) формула (1д) определяет расщепление акцепторного уровня при одноосной деформации в направлении $[111]$ [3]

$$4\Delta = \sqrt{3}d\mathcal{E}_0.$$

Результатом появления анизотропии деформации в плоскости (111) профилированной структуры должно являться также изменение ширины запрещенной зоны, поскольку при этом меняется объем элементарной ячейки кристалла [2]:

$$\Delta E_g = (\mathcal{E}_H + a)(\text{Sp } \mathcal{E}^{H_i} - \text{Sp } \mathcal{E}^{H_0}), \quad (2)$$

где \mathcal{E}^{H_0} — тензор деформации непрофилированной структуры, \mathcal{E}^{H_i} — тензор деформации профилированной структуры в области с измененной толщиной подложки [$H_i = (t_i + c_i)/2$, где t — толщина ЭС, c_i — толщина подложки, на ребрах жесткости $i=0$, в области канавки $i \geq 1$].

В первом приближении можно считать, что в гетероструктуре типа швеллера деформация кристалла в направлении Y сохраняется, т. е. $\mathcal{E}_{yy}^{H_0}(z) = \mathcal{E}_{yy}^{H_i}(z)$,

$$\mathcal{E}_{yy}^{H_i}(z) = \frac{\Delta a(z)}{a} - \frac{1}{H_i} \int_{-H_i}^{H_i} \frac{\Delta a(z) dz}{a} - \frac{3z}{2H_i^3} \int_{-H_i}^{H_i} \frac{\Delta a(z) z dz}{a}, \quad (3)$$

$\Delta a(z)$ — несоответствие периодов решеток ЭС и InAs.

При полном удалении подложки в канавке ($H_i = t/2$) деформация ЭС в области, сопряженной с канавкой в плоскости, параллельной ГР, является одноосной:

$$\mathcal{E}_{zz}^{H_i}(z) = \mathcal{E}_{xx}^{H_i}(z) = -\nu \mathcal{E}_{yy}^{H_i}(z), \quad (3a)$$

ν — коэффициент Пуассона.

При частичном удалении подложки в области канавки ($H_i > t/2$) компоненты тензора деформации определяются линейной интерполяцией

$$\mathcal{E}_{xx}^{H_i}(z) = -\nu \mathcal{E}_{yy}^{H_0}(z) + (1 + \nu) \mathcal{E}_{yy}^{H_i}(z), \quad (3б)$$

$$\mathcal{E}_{zz} = -\frac{\nu}{1 - \nu} (\mathcal{E}_{xx} + \mathcal{E}_{yy}),$$

$i=1, 2, \dots$, а совокупностью соотношений (1)–(1д) и (3б) описывается зависимость ρ от Δa .

3. Исследовалась эпитаксиальная структура $\text{InAs}_{1-x}\text{Sb}_x\text{InAs}$ (111) с составом на гетерогранице $x=0.06$ и 0.096 на поверхности и толщинами слоя и подложки 90 и 350 мкм соответственно. В образце площадью 10×12 мм химическим травлением удалялась часть подложки в виде полоски шириной 3 мм, направленной вдоль оси [110] (см. вставку на рис. 1).

Для оценки компонент деформации \mathcal{E}_{ii} использовались рентгенодифракционные измерения брэгговского асимметричного отражения (531) на CuK_α -излучении, что обеспечивало глубину проникновения ~ 2 мкм. На трехкристальном спектрометре с помощью анализатора определялась разница углов отражения $\Delta(2Q_\beta) = 2Q_\beta - 2Q_\beta$ для двух положений образца, различающихся или положением рабочей точки на поверхности, или углом азимутального поворота. Величина $\Delta(2Q_\beta)$ обусловлена относительной разностью $\frac{1}{2}$ межплоскостных расстояний d_{531} , связанных в свою очередь с компонентами тензора деформации \mathcal{E}_{ii} . Для случая, когда плоскость рассеяния совпадает с плоскостью (211), параллельной оси канавки для двух точек на поверхности, в области канавки в центре образца (i) и вне ее (0)

$$\frac{d_{531}^i - d_{531}^0}{d_{531}^0} = (\mathcal{E}_{xx}^i - \mathcal{E}_{xx}^0) \cos^2 \varphi + (\mathcal{E}_{yy}^i - \mathcal{E}_{yy}^0) \sin^2 \varphi, \quad (4)$$

где φ — угол между плоскостями (531) и поверхностью (111). Разница компонент деформации \mathcal{E}_{xx} определялась по симметричному брэгговскому отражению (333): $\mathcal{E}_{xx}^i - \mathcal{E}_{xx}^0 = (2.7 \pm 0.3) \cdot 10^{-4}$. Тогда различие величин \mathcal{E}_{yy} в области канавки и вне ее равно $\mathcal{E}_{yy}^i - \mathcal{E}_{yy}^0 \sim (1 \div 3) \cdot 10^{-4}$. При аналогичных измерениях асимметричного отражения взаимно перпендикулярных азимутальных положений образца в области канавки получено $\mathcal{E}_{xx}^i - \mathcal{E}_{yy}^0 = 1 \cdot 10^{-3}$.

Таким образом, рентгенодифракционные измерения показывают, что создание профиля толщины подложки с геометрией, описанной выше, действительно приводит к появлению квазиодноосной деформации в плоскости, параллельной ГР, при сохранении компонент \mathcal{E}_{yy} .

4. Исследовались эпитаксиальные структуры $p\text{-InAsSbP}/n\text{-InAs}$ (111) и $p\text{-InGaSbAs}/\text{GaSb}$, выращенные методом ЖФЭ, аналогично [1, 4].

Фотолюминесценция регистрировалась с поверхности структуры с профилированной подложкой в направлении нормали к границе раздела. Фотолюминесценция возбуждалась лазером с $\lambda = 0.48$ мкм в центральной части ЭС и регистрировалась фотосопротивлением из PbS ($\lambda < 2$ мкм) или фотодиодом на основе $\text{InAsSbP}/\text{InAs}$ ($\lambda < 3.5$ мкм) [5].

Профилирование подложки в гетероструктурах вплоть до полного ее уда-

ления в области канавки осуществлялось селективным химическим травлением. На рис. 1 представлены спектральные зависимости интенсивности ФЛ и степени линейной поляризации излучения $\rho(\hbar\nu)$ ЭС профилированной структуры $p\text{-InAsSbP}/n\text{-InAs}$ (111) ($p \sim n \sim 10^{16} \text{ см}^{-3}$), подложка в которой в области канавки была полностью вытравлена. Излучение обусловлено переходами зона проводимости—акцептор [6]. Толщина подложки в ребрах жесткости составляла $c_0=285 \text{ мкм}$, ЭС $t=24 \text{ мкм}$. Состав ЭС $\text{InAs}_{1-x}\text{Sb}_x\text{P}_y$ на границе раздела $x=0.049$, $y=0.124$, на поверхности слоя $x=0.051$, $y=0.100$. Период решетки

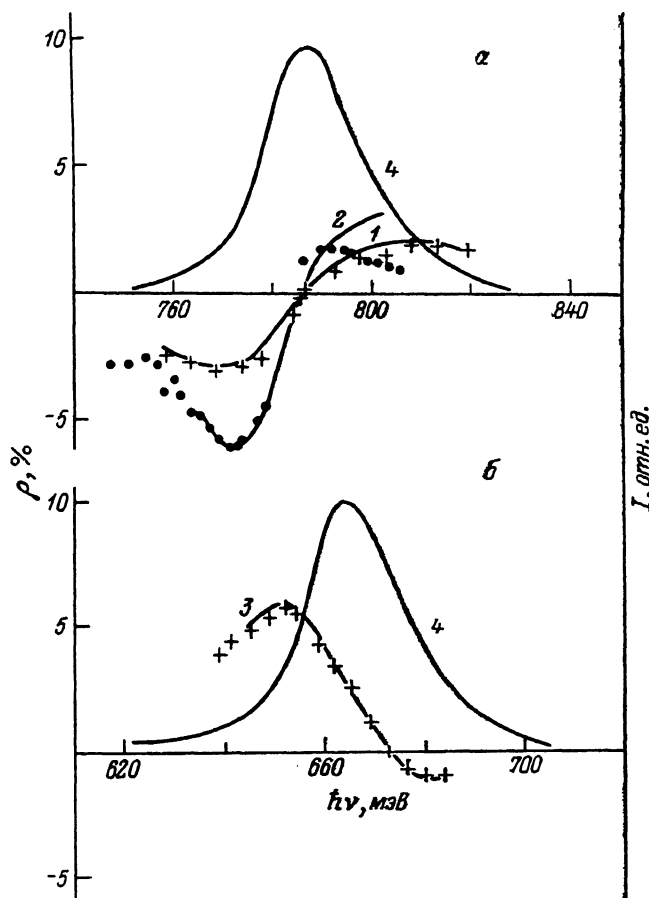


Рис. 2. Спектральные зависимости степени линейной поляризации ($I-\beta$) и интенсивности фотолуминесценции (4) подложки GaSb ($T=77 \text{ K}$) (а) и ЭС гетероструктуры InGaAsSb (б) для двух значений толщины GaSb и области канавки $-c_1=80$ (1) и $c_2=25 \text{ мкм}$ (2, 3).

ЭС, согласно интерполяционной оценке, возрастал от 6.026 на ГР до 6.082 Å на поверхности. Из наилучшего согласия экспериментальной $\rho^s(\hbar\nu)$ (рис. 1) и теоретической $\rho^r(\hbar\nu)$ [формулы (1)–(1д)] зависимостей был определен варьируемый параметр $(\beta\Delta)=0.12 \text{ мэВ}$. С использованием формул (1)–(1д) определено значение остаточной упругой деформации на поверхности ЭС $(\mathcal{E}_{yy}^0)_x=0.464 \cdot 10^{-3}$. Была также вычислена величина начальной деформации на поверхности ЭС $(\mathcal{E}_{yy}^0)=0.408 \cdot 10^{-3}$ в предположении линейного изменения постоянной решетки в направлении роста ЭС ($\text{grad } a=\text{const}$). Использовались интерполяционные значения $\Delta a(x, y)$ и формула (3) для определения деформации в структуре с сопоставимыми толщинами слоя и подложки. Хорошее соответствие между величинами $(\mathcal{E}_{yy}^0)_r$ и $(\mathcal{E}_{yy}^0)_f$ свидетельствует о малой степени пластической деформации в данной структуре ($\mathcal{E}_p \rightarrow 0$) и согласуется с тем, что при деформациях меньше критической $(\mathcal{E})_f < 0.2 \%$ дислокации несоответствия в материалах $\text{A}^{\text{III}}\text{B}^{\text{V}}$ не образуются или снимают малую часть начальной деформации [7].

Отметим, что на рентгеновской топограмме ЭС были видны лишь отдельные дислокации несоответствия, разделенные областями без сеток дислокаций.

5. На рис. 2 представлены спектр фотолюминесценции и спектральная зависимость степени линейной поляризации излучения $\rho^s(h\nu)$ с поверхности ЭС $\text{Ga}_{1-x}\text{In}_x\text{Sb}_{1-y}\text{As}_y$ и подложки GaSb(Ge) при ее поэтапном профилировании. Спектр ФЛ в обоих случаях представляет собой одну линию, соответствующую переходам зона проводимости—акцептор в GaSb(Ge) и зона—зона для ЭС. Толщина подложки 200 мкм, эпитаксиального слоя — 8 мкм. Состав твердого раствора на ГР $x=0.130$, $y=0.110$, на поверхности ЭС $x=0.130$, $y=0.075$. Согласно интерполяционной оценке, на ГР и на поверхности слоя несоответствия периодов решетки составляли $\Delta a_1=0.0024$ и $\Delta a=0.021$ Å. Наилучшее согласие экспериментальной зависимости $\rho^s(h\nu)$ с расчетной имеет место при $(B\Delta)_{i_1}^s=0.081$ мэВ (спектр подложки при толщине GaSb в области канавки $c_1=80$ мкм), $(B\Delta)_{i_2}^s=0.053$ мэВ (спектр ЭС) и $(B\Delta)_{i_2}^s=0.121$ мэВ (при толщине GaSb в области канавки $c_2=25$ мкм), индекс $i=1, 2, \dots$ в величине $(B\Delta)_{i,k}^s$ определяет порядковый номер числа травлений, $k=1, 2$ — индекс слоя и подложки соответственно.

Возможная ошибка при использовании полученной формулы в случае перехода зона—зона связана с частотной зависимостью γ , которая будет определяться в этом случае частотной зависимостью волновых функций свободных дырок. Однако наши оценки и результаты работы [8] показывают, что изменением γ с $h\nu$ можно пренебречь.

Полученные экспериментальные значения $(B\Delta)_{i,k}^s$ позволили составить систему уравнений $(B\Delta)_{i,k}^s - (B\Delta)_{i,k}^t = 0$, решение которой с использованием формул (1)—(1д), (3) и предположения $\text{grad } a = \text{const}$ дает значения несоответствия периодов решетки $\Delta a_1=0.0007$ и $\Delta a_2=0.008$ Å. Отметим, что Δa_1 и Δa_2 для $\text{Ga}_{1-x}\text{In}_x\text{Sb}_{1-y}\text{As}_y$, полученные из эксперимента, оказались в 3 раза меньше, чем Δa , полученные интерполяционным расчетом. Это свидетельствует о пластической релаксации большей (~70 %) части напряжений несоответствия. Действительно, значение начальной деформации на поверхности ЭС ($\varepsilon_f^0 \sim 0.35$ %) превышает величину предельной упругой деформации материалов InAsSbP , что приводит к генерации сетки 60-градусных дислокаций, аккомодирующих несоответствие периодов решетки и хорошо различимых на рентгеновских топограммах ЭС. Аналогичные результаты были получены на структурах $\text{InAsSbP}/\text{InAs}$, где $\varepsilon_f^0 \approx 0.7$ % [9].

6. Таким образом, профилирование подложки в виде швеллера приводит к одноосной деформации в плоскости, параллельной ГР, что подтверждается рентгенодифракционными и поляризационными измерениями на профилированных гетероструктурах.

Результаты поляризационных измерений и использование полученного в данной работе аналитического выражения для степени линейной поляризации позволяют определить несоответствие периодов решеток и распределение внутренних деформаций в градиентных структурах.

Список литературы

- [1] Кушкимбаева Б. Ж., Матвеев Б. А., Талалакин Г. Н. и др. // Письма ЖТФ. 1988. Т. 14. В. 3. С. 247—250.
- [2] Бир Г. Л., Пикус Г. Е. Симметрия и деформационные эффекты в полупроводниках. М., 1972. 584 с.
- [3] Берг Н. А., Гореленок А. Т., Дзигасов А. Г. и др. // ФТП. 1982. Т. 16. В. 1. С. 60—67.
- [4] Матвеев Б. А., Стусь Н. М., Талалакин Г. Н. // Кристаллография. 1988. Т. 32. В. 1. С. 326—221.
- [5] Андрушко А. П., Салихов Х. М., Слободчиков С. В. и др. // ФТП. 1986. Т. 20. В. 12. С. 2195—2198.
- [6] Есина Н. П., Зотова Н. В., Матвеев Б. А. и др. // Письма ЖТФ. 1983. Т. 9. В. 7. С. 391—394.
- [7] Olsen G. H., Nuese C. J., Smith R. T. // J. Appl. Phys. 1978. V. 49. N 11. P. 5523—5529.
- [8] Аверкиев Н. С., Гореленок А. Т., Тарасов И. П. // ФТП. 1983. Т. 17. В. 6. С. 997—1002.
- [9] Кушкимбаева Б. Ж., Матвеев Б. А., Стусь Н. М. и др. // Письма ЖТФ. 1988. Т. 14. В. 22. С. 2044—2048.