

ОПТИЧЕСКОЕ ОТРАЖЕНИЕ И ОПРЕДЕЛЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ЭПИТАКСИАЛЬНЫХ СТРУКТУР $\text{InAs}_{1-x-y}\text{Sb}_x\text{P}_y/\text{InAs}$

Баранов А. Н., Васильев В. А., Копылов А. А., Шерстнев В. В.

Исследовано оптическое отражение эпитаксиальных слоев твердого раствора $\text{InAs}_{1-x-y}\text{Sb}_x\text{P}_y$, полученных методом жидкофазной эпитаксии на подложках $n\text{-InAs}$. Исследовались нелегированные слои n -типа проводимости, слои n -типа, легированные Sn, и p -типа, легированные Zn. Состав твердого раствора варьировался в пределах $x=0.1-0.12, y=0.2-0.25$. Измерения проводились при комнатной температуре в диапазоне $10-650 \text{ см}^{-1}$ с использованием фурье-спектрометра ЛФС-1000. Для расчета спектров отражения использовался матричный формализм. Градиентные слои рассматривались в приближении гиперболического распределения показателя преломления $n(z) = n_1 n_2 / [n_1 - (n_1 - n_2) z/h]$. Показано, что учет градиентных слоев позволяет улучшить количественное согласие между теорией и экспериментом.

Измерение оптического отражения в длинноволновой ИК области спектра достаточно часто используется для исследования эпитаксиальных полупроводниковых структур, в том числе слоев многокомпонентных твердых растворов (см. обзор [1]). Такие измерения можно использовать как неразрушающий метод определения параметров эпитаксиальных структур, таких как толщина слоев, концентрация носителей заряда, состав твердого раствора. Однако имеющиеся работы ограничиваются рассмотрением простейших структур с однородными по толщине слоями, в то время как на практике часто используются слои, имеющие градиент состава или концентрации свободных носителей заряда, которые могут быть обусловлены особенностями эпитаксиального роста, процессов диффузии или созданы намеренно для обеспечения требуемых характеристик структуры.

Нами было исследовано оптическое отражение эпитаксиальных слоев твердого раствора $\text{InAs}_{1-x-y}\text{Sb}_x\text{P}_y$, полученных методом жидкофазной эпитаксии на подложках $n\text{-InAs}$ с ориентацией (100). Слои согласовывались по периоду решетки, толщина слоев варьировалась в пределах $0.8-20 \text{ мкм}$. Использовались подложки, полученные из стехиометрического расплава методом Чохральского, толщина $\sim 350 \text{ мкм}$. Концентрация и подвижность электронов в подложке при комнатной температуре составляли соответственно $n \approx 2 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ и $\mu \approx 20 \text{ 000 см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$. Исследовались нелегированные слои n -типа проводимости, а также слои n -типа, легированные Sn, и p -типа, легированные Zn. Легирование осуществлялось в процессе роста. Состав твердого раствора варьировался в пределах $x=0.1-0.12, y=0.2-0.25$.

Все измерения проводились при комнатной температуре в диапазоне $10-650 \text{ см}^{-1}$ с помощью фурье-спектрометра ЛФС-1000 [2]. Для уменьшения влияния отражения от задней поверхности образцы устанавливались на основании в форме клина, выполненном из высокоомного кремния ($n \sim 10^{14} \text{ см}^{-3}$). Соединение образца с основанием осуществлялось с помощью прозрачного (в исследуемом диапазоне длин волн) связующего вещества с достаточно высоким коэффициентом преломления (20 % плицейна и 80 % порошка SiC МЗ). С целью уменьшения отражения от задней поверхности основания она грубо шлифовалась.

Примеры полученных спектров показаны на рис. 1. Первые оптические свойства твердого раствора $\text{InAs}_{1-x-y}\text{Sb}_x\text{P}_y$ по спектрам отражения исследовались только в работе [3] на образцах с малым содержанием фосфора $y=0.02$ и 0.05 . Однако, как отмечалось в [4], в слоях $\text{InAs}_{1-x-y}\text{Sb}_x\text{P}_y$, полученных жидкофазной эпитаксией, наблюдается градиент состава по толщине, и содержание P на поверхности слоев толщиной 15–20 мкм может падать практически до нуля.

Для расчета спектров отражения нами использовался матричный формализм [5], который в отличие от метода Кабалеро [6] позволяет рассматривать неоднородные слои. Для градиентных слоев использовалось гиперболическое распределение показателя преломления

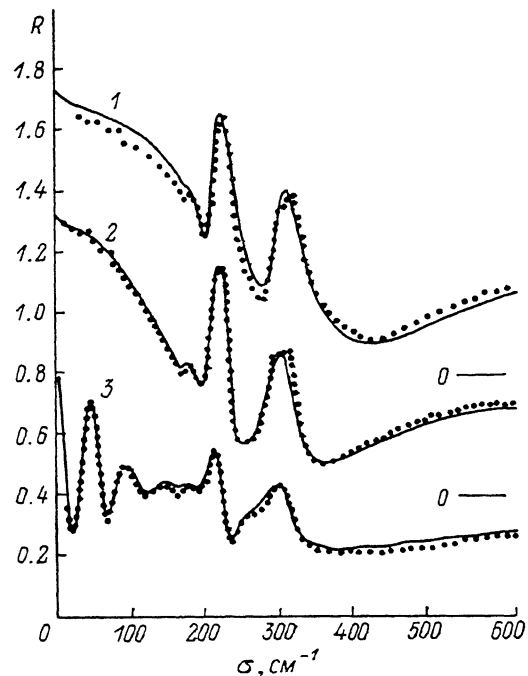


Рис. 1. Спектры оптического отражения эпитаксиальных структур $\text{InAs}_{0.63}\text{Sb}_{0.12}\text{P}_{0.25}/n\text{-InAs}$.

Точки — эксперимент, $T=300$ К; линия — расчет. Спектры 1 и 2 сдвинуты по вертикали, начало отсчета для каждого спектра отмечено справа. Характеристика структур и использованных моделей: 1 — нелегированный слой n -типа, однослойная модель с однородным слоем $h=2.2$ мкм; 2 — слой n -типа, легированный Zn, однослойная модель с однородным слоем $h=2.4$ мкм; 3 — слой p -типа, легированный Zn, двухслойная модель с градиентными слоями $h_1=2.3$, $h_2=18.2$ мкм (профиль ω_p показан на вставке к рис. 2).

$$n(z) = n_1 n_2 / [n_1 - (n_1 - n_2) z/h], \quad (1)$$

где n_1 и n_2 — значения показателя преломления на границах слоя, h — его толщина. Данное распределение удобно тем, что при малых $(n_1 - n_2)/n$ оно практически линейно и позволяет записать матрицу слоя в аналитическом виде [5]

$$M = \begin{bmatrix} \left(\frac{n_1}{n_2}\right)^{1/2} \left(\cos \alpha + \frac{1}{2m} \sin \alpha\right) i\beta \frac{(n_1 n_2)^{1/2}}{m(n_1 - n_2)} \sin \alpha \\ i\beta \frac{(n_1 n_2)^{3/2}}{m(n_1 - n_2)} \sin \alpha \left(\frac{n_1}{n_2}\right)^{1/2} \left(\cos \alpha - \frac{1}{2m} \sin \alpha\right) \end{bmatrix}, \quad (2)$$

где $\alpha = m \ln(n_2/n_1)$, $m^2 = [\beta n_1 n_2 / (n_1 - n_2)]^2 - 1/4$, $\beta = 2\pi \sigma h$, σ — волновое число. В случае однородного слоя ($n_1 = n_2$), чтобы избежать расхождений, матрица использовалась в виде

$$M = \begin{bmatrix} \cos \beta n_1 - \frac{i}{n_1} \sin \beta n_1 \\ -i n_1 \sin \beta n_1 \cos \beta n_1 \end{bmatrix}, \quad (3)$$

Коэффициент преломления рассчитывался в предположении многомодового поведения фононного спектра с учетом вклада свободных носителей заряда

$$n(\omega) = \left[\epsilon_\infty - \frac{\epsilon_\infty \omega_p^2}{\omega(\omega + i/\tau)} + \sum_j \frac{s_j \omega_{Tj}^2}{\omega_{Tj}^2 - \omega^2 - i\omega\gamma_j} \right]^{1/2}, \quad (4)$$

где ϵ_∞ — высокочастотная диэлектрическая проницаемость; ω_p и τ — плазменная частота и время релаксации свободных носителей заряда; s_j , γ_j и ω_{Tj} —

силы осциллятора, параметр затухания и частоты мод поперечного оптического фонона, $s_j = (\epsilon_{\infty j} - \epsilon_{sj})x_j$, где ϵ_{sj} — статическая диэлектрическая проницаемость, x_j — мольная доля компонента. Значение ϵ_{∞} для твердого раствора определялось линейной интерполяцией между соответствующими значениями для бинарных соединений InAs, InSb и InP. Основные параметры, использованные в расчете, приведены в таблице.

Нами использовались однослойные и многослойные модели. Полученные аппроксимации экспериментальных спектров показаны на рис. 1 вместе с экспериментальными спектрами. Учет градиентных слоев позволяет, как правило, улучшить количественное согласие между теорией и экспериментом. Это особенно наглядно проявляется в случае более сложных структур. На рис. 2 на при-

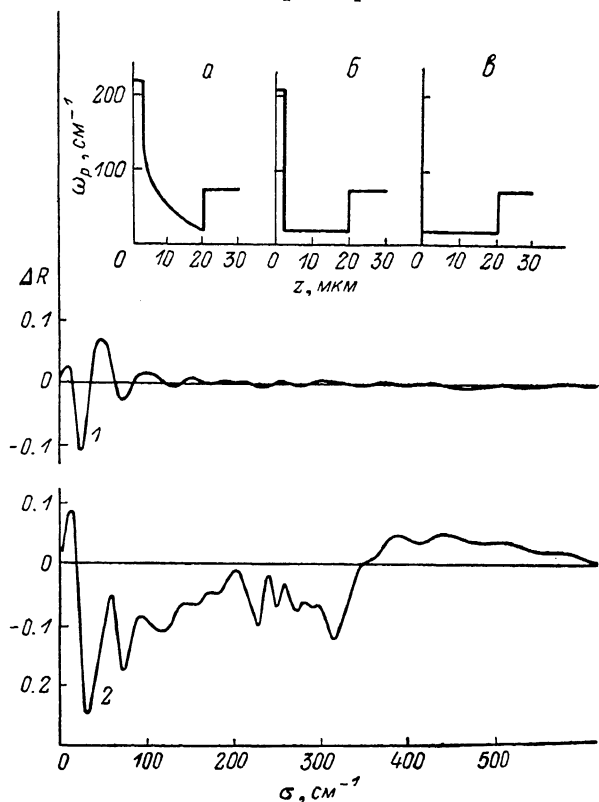


Рис. 2. Сравнение расчетных моделей на примере структуры $p\text{-InAs}_{0.63}\text{Sb}_{0.12}\text{P}_{0.25}:\text{Zn}/n\text{-InAs}$.

Разность коэффициентов отражения рассчитывалась с использованием в качестве базы двухслойной модели с градиентными слоями: 1 — модели а и б; 2 — модели а и в. На вставке показаны профили ω_p для использованных моделей: а — двухслойная с градиентными слоями; б — двухслойная с однородными слоями; в — однослойная с однородным слоем.

мере эпитаксиальных слоев $\text{InAs}_{1-x-y}\text{Sb}_x\text{P}_y$, легированных Zn, показаны отклонения расчетных спектров для различных приближений от наиболее точной аппроксимации (двухслойная модель с градиентными слоями). Видно, что однослойная модель дает лишь грубое описание наблюдаемого спектра. Двухслойная модель с однородными слоями дает достаточно хорошее описание, однако резкие границы между слоями приводят к завышенному значению амплитуды интерференционных осцилляций в области частот ниже 100 см^{-1} . Заметим, что первый от поверхности слой ($\sim 2\text{ мкм}$) представляет собой твердый раствор, а второй слой ($\sim 18\text{ мкм}$) образован в подложке за счет диффузии Zn.

Список литературы

- [1] Зингер Г. М., Ипатова И. П., Рыскин А. И. // ФТП. 1984. Т. 18. В. 1. С. 24—42.
- [2] Васильев В. А., Дышловенко П. Е., Кошлыов А. А., Холодилов А. Н. // ПТЭ. 1990. № 8. С. 100—103.
- [3] Белов А. Г., Зингер Г. М., Ильин М. А., Корчагин Ю. Н., Рашевская Е. П., Рыскин А. И. // ФТТ. 1980. Т. 22. В. 5. С. 1439—1443.
- [4] Долгинов Л. М., Корчагин Ю. Н., Крюкова И. В., Лескович В. И., Матвеев Е. В., Мильвидский М. Г., Степанов Б. М. // Письма ЖТФ. 1978. Т. 4. В. 23. С. 1434—1438.
- [5] Якобсон Р. // Физика тонких пленок. Т. 8 / Под ред. Г. Хасса, М. Франкомба и Р. Гофмана. М., 1978. С. 61—105.
- [6] Бернинг П. Х. // Физика тонких пленок. Т. 1 / Под ред. Г. Хасса. М., 1967. С. 91—151.