

ОПТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ЭПИТАКСИАЛЬНЫХ ГЕТЕРОСТРУКТУР AlGaAsSb/GaSb В ИНФРАКРАСНОЙ ОБЛАСТИ СПЕКТРА

Ильин М. А., Карасев П. Ю., Мильвидский М. Г.,
Михайлова Н. Г., Пшеничная А. Н.

Проанализированы возможности метода ИК спектроскопии для определения концентрации свободных электронов в слое $N_{\text{сх}}$ и подложке $N_{\text{подл}}$, а также основных характеристик эпитаксиальных слоев AlGaAsSb .

Эпитаксиальные гетероструктуры AlGaAsSb/GaSb перспективны для изготовления приборов, используемых в ВОЛС [1-4]. При производстве таких приборов особо важную роль приобретает контроль основных физических характеристик гетерокомпозиций. Одной из важнейших характеристик является концентрация свободных электронов N_e в активных слоях приборных структур.

Для определения N_e может быть использован целый ряд методов: метод эффекта Холла, $C-V$ -измерения, метод ИК спектроскопии и др. Однако использование метода эффекта Холла во многих случаях весьма затруднительно (например, в условиях близости значений N_e в слое и подложке). Существует ряд трудностей и для применения $C-V$ -метода.

Настоящая работа посвящена анализу возможностей метода ИК спектроскопии для определения концентрации свободных электронов в слое $N_{\text{сх}}$ и подложке $N_{\text{подл}}$. В ней исследованы спектры отражения эпитаксиальных гетероструктур со слоями n -типа четверного твердого раствора $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}_y\text{Sb}_{1-y}$ ($x \approx 0.06$, $y \approx 0.0054$) на подложках GaSb n -типа с $N_{\text{подл}} = (2 \div 4) \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$ в инфракрасной области спектра ($\lambda = 10-50 \text{ мкм}$).

Как известно, в спектрах ИК отражения свободные носители проявляют себя в виде плазменного или плазмон-фононного (если частоты плазмы и фононов близки) минимума, спектральное положение которого изменяется в зависимости от величины N_e . При этом минимум оказывается тем более резким и отчетливым, чем выше подвижность электронов μ_e . Обработывая экспериментальные спектры ИК отражения с помощью ЭВМ, можно получить значения частоты ω_p и затухания γ_p плазменного колебания, которые легко выражаются через N_e и μ_e . В данном случае имеется два ограничения на минимальную концентрацию свободных носителей, получаемую из спектров ИК отражения. Первое ограничение связано с взаимодействием света с плазмой, которое начинает проявляться в спектрах при $N_e \geq 1 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$. Второе ограничение связано с оптимизационными расчетами спектров отражения гетероструктур на ЭВМ, которые при разумных затратах машинного времени с приемлемой погрешностью позволяют оценивать концентрации $N_e \geq 1 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$. Верхний предел концентраций, определяемых методом ИК отражения, ограничен возможностью легирования полупроводника (в нашем распоряжении имелись слои с значением $N_{\text{сх}}$ вплоть до $2 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$).

Получение эпитаксиальных слоев осуществлялось методом жидкофазной эпитаксии в горизонтальной системе в атмосфере проточного водорода при температуре роста $T = 510 \text{ }^\circ\text{C}$. Процесс проводился в традиционных графитовых контейнерах пенального типа в режимах, предусматривающих принудительное

охлаждение расплавов. Эпитаксиальные слои выращивались на подложках, ориентированных по плоскости (100). Различие в параметрах подложки и слоя, играющее в рассматриваемой гетероструктуре решающую роль при формировании дефектной структуры, не превышало 0.02—0.04 %. Рентгеноспектральный анализ показал, что неоднородность состава четверного твердого раствора по поверхности образца не превышает $\pm 3\%$. Для исключения неоднородности распределения состава по толщине (главным образом по As) использовались увеличенные объемы жидкой фазы и минимальные скорости роста. Слои имели зеркальную морфологию поверхности и не подвергались перед оптическими измерениями никаким обработкам.

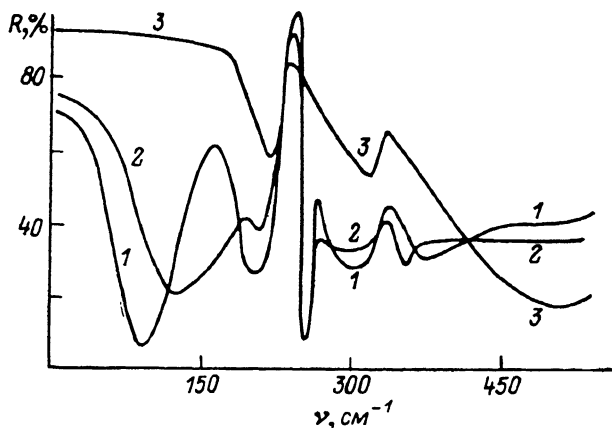


Рис. 1. Спектры ИК отражения типичных эпитаксиальных гетероструктур $n\text{-AlGaAsSb}/n\text{-GaSb}$.

Кривые соответствуют образцам: 1 — 5, 2 — 7, 3 — 9.

Инфракрасное отражение от эпитаксиальных гетероструктур исследовалось на фурье-спектрофотометре «Beckman» в области волновых чисел от 20 до 200 см^{-1} и на спектрофотометре «Perkin-Elmer 225» в области волновых чисел от 200 до 1000 см^{-1} .

На рис. 1 представлены экспериментальные спектры ИК отражения трех типичных эпитаксиальных гетероструктур $n\text{-AlGaAsSb}/n\text{-GaSb}$ с различными $N_{\text{сл}}$ и близкими значениями $N_{\text{подл}}$. Достаточно сложный вид спектров обусловлен тем, что, кроме решеточных и плазменных колебаний в исследуемой области, для не слишком сильно легированных слоев ($N_{\text{сл}} \leq 10^{17}\text{ см}^{-3}$) (кривые 1, 2) наблюдаются интерференционные особенности. Они связаны с различием диэлектрических проницаемостей слоя и подложки. На спектрах всех образцов

Т а б л и ц а 1

Результаты оптимизационных расчетов спектров ИК отражения эпитаксиальных гетероструктур $n\text{-AlGaAsSb}/n\text{-GaSb}$

№ образца	$d_{\text{сл}}^{\text{пол}}$, мкм	$d_{\text{сл}}^{\text{опт}}$, мкм	$N_{\text{сл}}^{\text{опт}}$, см^{-3}	$N_{\text{подл}}^{\text{опт}} \cdot 10^{-17}$, см^{-3}	$\mu_{\text{опт}}$, м ² /В·с	№ образца	$d_{\text{сл}}^{\text{пол}}$, мкм	$d_{\text{сл}}^{\text{опт}}$, мкм	$N_{\text{сл}}^{\text{опт}}$, см^{-3}	$N_{\text{подл}}^{\text{опт}} \cdot 10^{-17}$, см^{-3}	$\mu_{\text{опт}}$, м ² /В·с
1	13.2	9.9	$(2.0 \div 3.5) \times 10^{15}$	1.8	1.32	10	4.6	4.6	$2.7 \cdot 10^{17}$	2.0	0.21
2	4.0	2.8	$2.6 \cdot 10^{16}$	3.5	1.0	11	9.7	9.8	$1.4 \cdot 10^{18}$	2.1	0.12
3	4.6	4.5	$3.2 \cdot 10^{16}$	2.6	0.87	12	8.9	8.2	$1.5 \cdot 10^{18}$	2.4	0.10
4	8.9	5.9	$1.6 \cdot 10^{16}$	2.1	0.41	13	6.6	9.0	$7.6 \cdot 10^{17}$	2.4	0.14
5	6.0	4.7	$1.3 \cdot 10^{16}$	2.0	0.85	14	9.7	9.7	$1.5 \cdot 10^{18}$	2.4	0.12
6	4.6	5.0	$6.8 \cdot 10^{16}$	2.2	0.29	15	5.4	5.4	$1.2 \cdot 10^{17}$	2.4	0.32
7	6.3	4.3	$1.4 \cdot 10^{17}$	2.5	0.24	16	10.2	6.7	$1.2 \cdot 10^{18}$	2.0	0.11
8	4.6	4.4	$1.2 \cdot 10^{17}$	2.4	0.32	17	11.7	11.8	$1.5 \cdot 10^{18}$	2.4	0.12
9	7.1	6.3	$1.3 \cdot 10^{18}$	2.5	0.12	18	10.0	10.5	$1.7 \cdot 10^{18}$	4.3	0.11

отчетливо видны колебательные моды GaSb (226.2 см^{-1}) и AlSb (312.0 см^{-1}). Колебательные моды GaAs и AlAs на спектрах не проявляются ввиду малой концентрации As. В спектрах сильно легированных образцов (кривая 3) хорошо виден плазменный минимум. По мере уменьшения концентрации свободных электронов этот минимум смещается в длинноволновую область спектра и непосредственно его не удается наблюдать ввиду взаимодействия плазменной моды с интерференционными и фононными модами (кривые 1, 2).

Хорошо известно [5, 6], что анализ спектров ИК отражения с помощью ЭВМ позволяет с разумной точностью оценивать как характеристики фононов

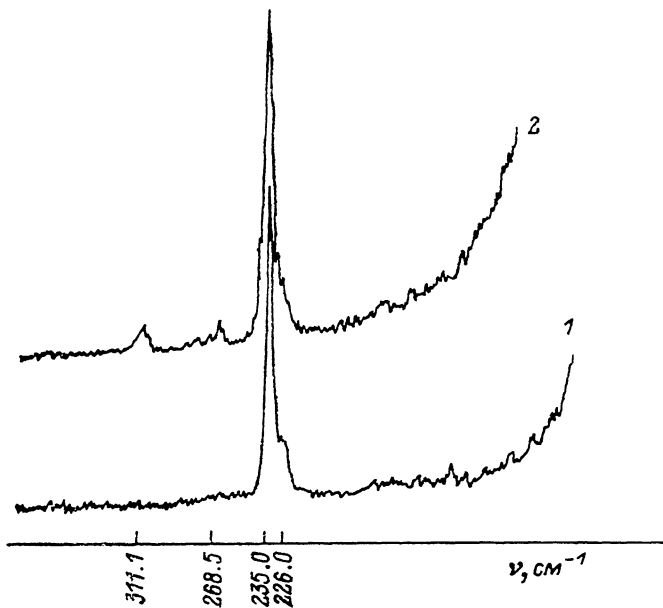


Рис. 2. Спектры комбинационного рассеяния эпитаксиальной гетероструктуры $n\text{-AlGaAsSb}/n\text{-GaSb}$, измеренные со стороны слоя (2) и подложки (1) ($d_{\text{сх}}=9.8 \text{ мкм}$, $N_{\text{сх}}=3.9 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$).

(собственные частоты ω_{TO} , ω_{LO} , силы осцилляторов $4\pi\rho$), так и частоты и затухание плазменных колебаний и, следовательно, концентрации и подвижности свободных носителей. Мы проводили такую обработку имеющихся спектров отражения для всех исследованных гетероструктур (табл. 1) на ЭВМ ЕС-1022 и ЕС-1060.

Собственные частоты и силы осцилляторов фононов, полученные путем проведения оптимизационных расчетов спектров ИК отражения гетероструктур со слабо легированными слоями, мы сравнивали с соответствующими значениями, полученными теоретически и с помощью метода комбинационного рассеяния. Для получения теоретических значений частот и сил осцилляторов решеточных колебаний твердых растворов Зингером и Рыскиным был развит ячеечный вариант метода однородных смещений [5]. Совместно с Мельником по методике, изложенной в работе [7], мы провели измерения нескольких типичных

Таблица 2

Результаты теоретических расчетов характеристик фононов и измерений методами ИК спектроскопии и комбинационного рассеяния типичных гетероструктур

Гетероструктура	$\omega_{TO}, \text{ см}^{-1}$			$\omega_{LO}, \text{ см}^{-1}$			$4\pi\rho$		
	теория	ИК отражение	КР	теория	ИК отражение	КР	теория	ИК отражение	КР
GaSb	226.4	226.2	226.0	234.0	—	235.0	0.0728	0.0878	—
AlSb	307.3	312.0	—	309.0	—	311.0	0.010	0.013	—
GaAs	263.5	262.5	—	264.5	—	268.5	0.0064	0.0170	—
AlAs	360.4	363.0	—	—	—	—	0.0010	0.0044	—

эпитаксиальных гетероструктур с концентрацией электронов в слоях $N_{ст} \geq 10^{16} \text{ см}^{-3}$ методом комбинационного рассеяния (КР). Спектры КР получились значительно менее выраженными, чем это было, например, в случае гетероструктур InGaAsP/InP, что может быть связано с недостаточно качествен-

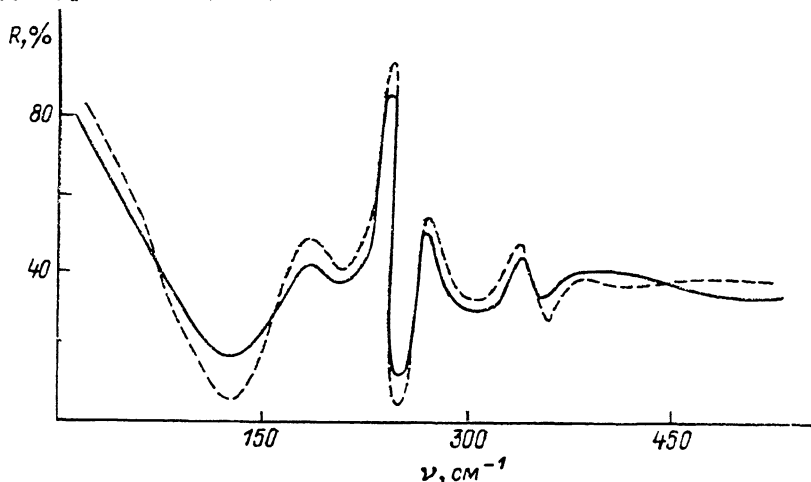


Рис. 3. Экспериментальный (сплошные кривые) и расчетный (пунктирные) спектры типичной гетероструктуры $n\text{-AlGaAsSb}/n\text{-GaSb}$ (образец 8).

ной морфологией исследованных гетероструктур. Однако, поскольку нам вообще не известны литературные данные, где бы методом КР исследовались гетероструктуры AlGaAsSb/GaSb, мы все же решили привести два рисунка, иллюстрирующие результаты этих измерений. На первом из них (рис. 2) показаны спектры КР, измеренные со стороны подложки (кривая 1) и слоя (кривая 2).

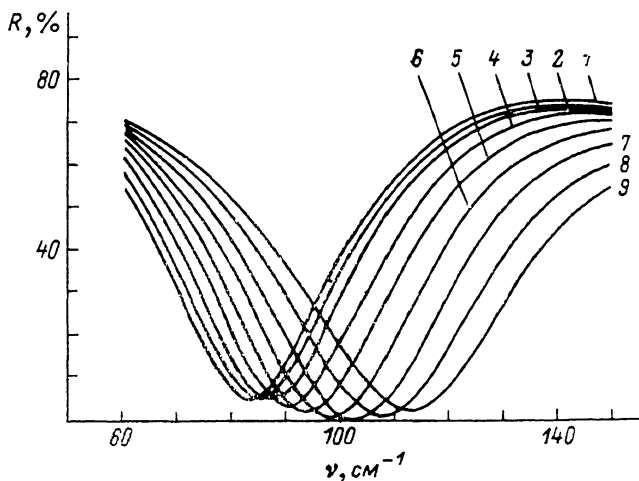


Рис. 4. Спектры эпитаксиальных гетероструктур $n\text{-AlGaAsSb}/n\text{-GaSb}$ в области плазменного отражения, рассчитанные для $N_{подл} = 2 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$.

$N_{ст}, \text{ см}^{-3}$: 1 — $8.0 \cdot 10^{14}$, 2 — $3.2 \cdot 10^{15}$, 3 — $7.2 \cdot 10^{15}$, 4 — $1.3 \cdot 10^{16}$, 5 — $2.0 \cdot 10^{16}$, 6 — $2.9 \cdot 10^{16}$, 7 — $3.9 \cdot 10^{16}$, 8 — $5.1 \cdot 10^{16}$, 9 — $6.5 \cdot 10^{16}$.

На кривой 1 видны особенности, связанные с фононами ω_{TO} и ω_{LO} (GaSb). На кривой 2 проявляются особенности, связанные с фононами ω_{TO} и ω_{LO} (GaSb), ω_{LO} (AlSb) и ω_{LO} (GaAs).

Важно отметить, что результаты анализа спектров КР (табл. 2), как и данные измерений спектров оптического отражения, дают хорошее согласие с частотами фононов. Это свидетельствует как о правильности используемой теоретической модели, так и о корректности обработки экспериментальных данных.

Анализ экспериментальных спектров отражения требует учета трех видов мод: интерференционной, плазменной и фононных. Непосредственная процедура обработки экспериментальных спектров отражения заключалась в том, что последовательно подвергались оптимизации и постоптимизационному анализу следующие параметры: $d_{с.л.}$; диэлектрическая проницаемость слоя и подложки; константы затухания и плазменные частоты носителей слоя и подложки. Такая последовательность параметров соответствует их вкладу в расчетный спектр. На рис. 3 представлено сопоставление типичных расчетного и экспериментального спектров. Для того чтобы перейти от получаемого в результате расчета значения плазменной частоты к значению концентрации электронов методом интерполяции, была проведена оценка для данного четвертого твердого раствора эффективной массы: $m^* = 0.048m_0$.

В табл. 1 приведены результаты оптимизационных расчетов по 18 образцам эпитаксиальных гетероструктур. В табл. 1 значение толщины слоя, полученное из оптических измерений, сравнивается с толщиной, измеренной по сколу на микроскопе. Видно, что для подавляющего большинства гетероструктур совпадение вполне удовлетворительное. Величины $N_{под.л.}$, полученные с помощью оптимизационной процедуры, неплохо коррелируют с результатами холловских измерений $(2 \div 4) \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$, проведенных до выращивания эпитаксиальных слоев. Значения $N_{с.л.}$, $\mu_{с.л.}$ колеблются в широких пределах ($2 \cdot 10^{15} - 2 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$, $0.1 - 1.3 \text{ м}^2/\text{В} \cdot \text{с}$) и совпадают по порядку величины с ожидаемыми из условий выращивания. Значение $2 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$, полученное для $N_{с.л.}$ образца 1, оказалось близким к нижнему теоретическому пределу оптического метода $N_{кр.}$. Для оценки $N_{кр.}$ были проведены специальные расчеты $R(\nu)$ гетероструктур с различными значениями $d_{с.л.}$. Некоторые результаты этих расчетов (для $N_{под.л.} = 2 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$ и $d_{с.л.} = 5 \text{ мкм}$) представлены на рис. 4. Видно, что $N_{кр.} \approx 1 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$.

Погрешность определения значений $N_{с.л.}$ из анализа спектров ИК отражения зависит от $N_{с.л.}$: при $N_{с.л.} = 1 \cdot 10^{17} - 1 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ она составляет 10 %, при $N_{с.л.} = 1 \cdot 10^{15} - 1 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ она растет и составляет величину порядка нескольких десятков процентов.

Из всего сказанного можно заключить, что метод ИК спектроскопии может быть с успехом применен для определения основных характеристик эпитаксиальных слоев AlGaAsSb (прежде всего $d_{с.л.}$, $N_{с.л.}$ и $\mu_{с.л.}$). Значения $N_{с.л.}$, в частности, определяются с вполне приемлемой погрешностью в диапазоне от $1 \cdot 10^{16}$ до $2 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$.

Авторы выражают благодарность Е. А. Виноградову за участие в обсуждении результатов работы и М. А. Тарасову за измерение состава методом рентгеноспектрального анализа.

Список литературы

- [1] Елисеев П. Г. Введение в физику инжекционных лазеров. М., 1983. 380 с.
- [2] Кейси Х., Папш М. Лазеры на гетероструктурах. М., 1982. 366 с.
- [3] Chin K., Hill C. M. // Appl. Phys. Lett. 1982. V. 40. N 4. P. 332—334.
- [4] Корольков В. И., Михайлова М. П. // ФТП. 1983. Т. 17. В. 4. С. 569—582.
- [5] Зингер Г. М., Ипатова И. П., Рыскин А. И. // ФТП. 1984. Т. 18. В. 1. С. 24—42.
- [6] Nehl K., Wesch W. // Phys. St. Sol. (a). 1980. V. 58. P. 181—188.
- [7] Abstreiter G., Bauser E., Fischer A., Ploog K. // Appl. Phys. 1978. V. 16. P. 345—352.

Государственный научно-исследовательский
и проектный институт
редкометаллической промышленности
Москва

Получена 7.04.1989
Принята к печати 20.12.1989