

ИССЛЕДОВАНИЕ ЗОННЫХ ПАРАМЕТРОВ ТВЕРДЫХ РАСТВОРОВ $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ ПО СПЕКТРАМ ПОГЛОЩЕНИЯ В КВАНТУЮЩИХ МАГНИТНЫХ ПОЛЯХ

Емлин Р. В., Зверев Л. П., Рут О. Э.

Измерены спектры осциллирующего межзонного оптического поглощения образцов твердого раствора $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ в диапазоне концентраций алюминия $0 \leq x \leq 0.18$ при 77 К в полях до 25 Т. Расчет спектров уровней Лаандау проведен методом Пиджена и Брауна с учетом экситонной природы переходов. Получены значения величин ширины запрещенной зоны E_g и гамма-параметров валентной зоны как функция состава. В пределах погрешности эксперимента влияния разупорядоченности не наблюдается, и зависимость параметров зонной структуры имеет линейный характер.

В последние годы широкое применение в технике находят оптические приборы на основе твердых растворов $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$, поэтому знание основных параметров его зонной структуры приобретает большое значение. Изменение численного значения этих параметров в зависимости от концентрации алюминия исследовалось в ряде работ [1-5] оптическими методами (межзонное поглощение и люминесценция, рамановское рассеяние) главным образом с точки зрения изменения ширины запрещенной зоны и характеристик фононного спектра. В [3] из спектров межзонного поглощения и люминесценции рассчитаны зависимости энергии связи экситона и эффективной массы электронов в зоне проводимости как функция состава. Однако эффективная масса электронов получена в этой работе косвенным путем и с недостаточной надежностью. Поэтому нам представлялось необходимым провести измерения спектров межзонного поглощения в квантующих магнитных полях, что могло бы дать более надежные экспериментальные значения эффективных масс зоны проводимости и валентных зон при различных концентрациях алюминия. Подобные измерения в InAs [5], GaAs [6], InP [7] оказались довольно эффективными и позволили получить эти параметры с наибольшей полнотой и достоверностью.

В настоящей работе приводятся результаты измерений спектров осциллирующего магнитопоглощения в полях до 25 Т и рассчитанных из них величин эффективных масс зоны проводимости и γ -параметров валентной зоны. Исследовались образцы твердого раствора $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ n -типа с концентрацией алюминия от 2 до 17 % (молярных), изготовленные методом жидкофазной эпитаксии на полужолирующих подложках из арсенида галлия. Концентрация свободных

Таблица 1

Электрофизические параметры исследованных образцов

Концентрация Al, %	$n \cdot 10^{-16}$, см^{-3}	$\mu \cdot 10^{-3}$, $\text{см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$	Концентрация Al, %	$n \cdot 10^{-16}$, см^{-3}	$\mu \cdot 10^{-3}$, $\text{см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$
0	1.2	4.5	7.3	8	1.9
2	3	2.5	9.3	2.7	1.7
3	4.2	2	15	6.5	2.0
5	3.5	2.2	17.6	4.8	2

носителей и их подвижность определялись из электропроводности и эффекта Холла и для большинства образцов лежат в пределах $n=(3\div 7)\cdot 10^{16}$ см⁻³, $\mu=(1.5\div 3)\cdot 10^8$ см²/В.с при 300 К. Параметры исследованных образцов приведены в табл. 1.

Тонкие образцы для оптических измерений изготавливались следующим образом: после механической полировки алмазной пастой и химической обработки полирующим травителем, содержащим перекись водорода, образец наклеивался подготовленной поверхностью на сапфировую подложку эпоксидной смолой. Вторая поверхность обрабатывалась аналогичным образом. Толщина образцов находилась в пределах 3—5 мкм. Измерения спектров осциллирующего магнитопоглощения проводились в импульсном поле при 77 К в циркулярно поляризованном свете на установке, описанной в [7]. Погрешность определения спектрального положения минимумов пропускания излучения не превышала ± 2 мэВ.

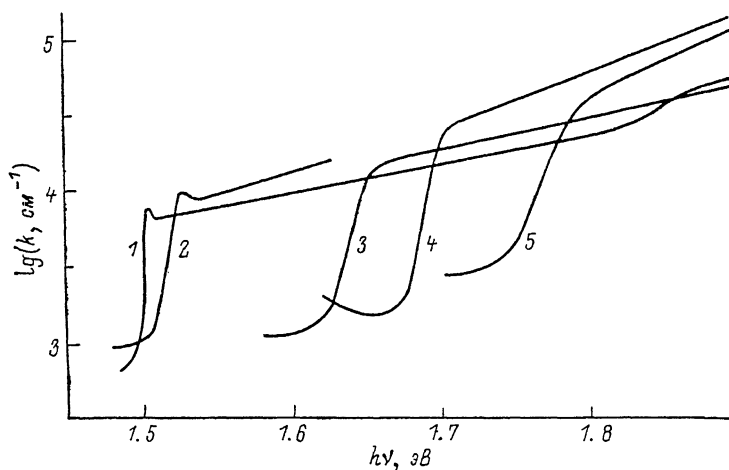


Рис. 1. Спектральная зависимость коэффициента поглощения (в см⁻¹) для образцов Al_xGa_{1-x}As при 77 К.

x , мол%: 1 — 0, 2 — 2, 3 — 7.3, 4 — 9.3, 5 — 17.6.

Спектры поглощения для пяти образцов с концентрациями алюминия 0, 2, 7, 9 и 17.6 мол% при 77 К без магнитного поля изображены на рис. 1. В спектре поглощения образца 1 имеется хорошо выраженный пик экситонного поглощения [4, 6]. В образцах с концентрациями алюминия 7, 9 и 17 мол% экситонный пик не выделяется, а край поглощения значительно более пологий, что можно приписать некоторой неоднородности содержания алюминия по объему образца либо экранирующему действию свободных электронов. В спектрах всех образцов имеется ступень, связанная с переходами из спин-орбитально отщепленной валентной зоны. Величина спин-орбитального отщепления у всех исследованных образцов изменяется незначительно и близка к значению в арсениде галлия ($\Delta=0.33$ эВ).

В магнитном поле при $B > 10$ Т спектры поглощения приобретают осциллирующий характер. Спектральная зависимость отношения $J(B)/J(0)$ для образца с $x=9.3$ мол% алюминия в магнитном поле 20 Т приведена на рис. 2. Зависимость положения пиков в спектрах магнитопоглощения от величины поля приведена на рис. 3. Обращает на себя внимание тот факт, что сдвиг с магнитным полем самого длинноволнового пика поглощения, который в пределе $B=0$ у образца 1 переходит в пик экситонного поглощения, у образцов 2—4 слишком мал, чтобы его можно было интерпретировать как соответствующий переходу между уровнями Ландау валентной зоны и зоны проводимости, несмотря на то что в пределах погрешности эксперимента он близок к линейному. Это заставляет сделать вывод о том, что данные переходы соответствуют механизму поглощения в магнитном поле с образованием диамагнитного эксци-

Таблица 2

Экспериментально полученные энергии переходов в поле 20 Т и значения параметров зонной структуры, использованные в теоретических расчетах. (Погрешность определения положений пиков магнитопоглощения равна ± 2 мэВ)

	Концентрация Al, %													
	2		3		5		7.3		9.3		17.6			
$h\nu_g$ (20 Т), эВ	1.5425	1.543	1.557	1.556	1.610	1.608	1.666	1.662	1.715	1.775	1.779	1.801	1.860	
	1.5845	1.592	1.600	1.597	1.662	1.645	1.703	1.712	1.750	1.8145	1.825	1.837	1.846	
	1.628	1.610	1.645	1.640	1.693	1.678	1.742	1.763	1.787	1.859	1.8335	1.867		
	1.664	1.660	1.669	1.678					1.846		1.873			
	1.697	1.700		1.710										
m_e/m_0	0.068		0.069		0.070		0.070		0.0725		0.078		0.080	
m_{eh}/m_0	0.085		0.086		0.0886		0.090		0.092		0.098		0.100	
m_{hh}/m_0	0.457		0.460		0.470		0.480		0.490		0.520		0.525	
E_g , эВ	1.535		1.530		1.604		1.635		1.665		1.760		1.800	
γ_1	6.62		6.50		6.20		5.95		5.75		5.50		5.51	
γ_2	2.30		2.20		1.95		1.80		1.725		1.85		1.925	

тона [8], в том числе и в образцах, в которых без магнитного поля экситонный пик не наблюдается. Это указывает на необходимость учета экситонной природы всех остальных наблюдаемых переходов, как это делалось в [6, 7].

Из рис. 3 видно, что с ростом процентного содержания алюминия в образце от 0 (чистый арсенид галлия) до 17.6 мол% величина сдвига пиков магнитопоглощения к большим энергиям фотона уменьшается примерно на 15%. Это

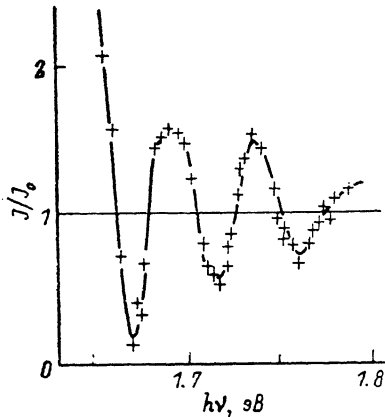


Рис. 2. Относительное пропускание света при 77 К в магнитном поле 20 Т как функция энергии фотона для σ -поляризации образца с $x=7.3$ мол%.

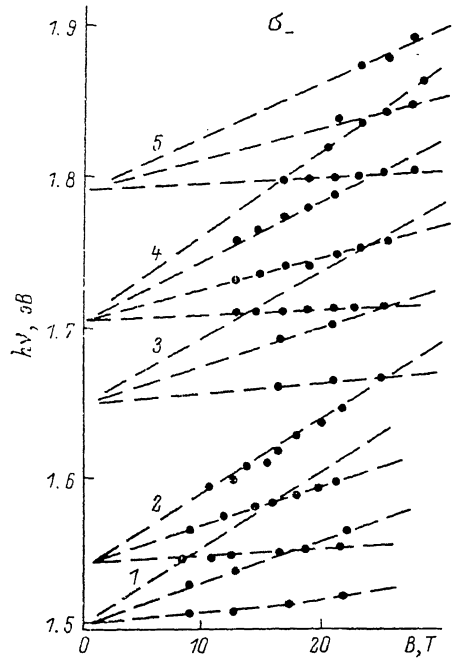


Рис. 3. Зависимость положения пиков поглощения в σ -спектре магнитопоглощения от поля в образцах $Al_xGa_{1-x}As$ при 77 К.

1 — чистый арсенид галлия; x , мол%: 2 — 3, 3 — 7.3, 4 — 9.3, 5 — 17.6.

соответствует такому же увеличению приведенной массы электрона и дырки, участвующих в переходе.

Расчет спектра уровней Ландау для полей 10 и 20 Т был проведен методом Пиджена и Брауна [5] с использованием эффективной массы зоны проводимости,

получаемой линейной аппроксимацией согласно кейновскому соотношению. При этом среднеквадратичное отклонение теоретически полученного спектра от экспериментального меньше средней погрешности измерений, что свидетельствует о допустимости сделанного приближения.

В [9] из измерений рентгеновской фотоэмиссии электронов валентных зон получено, что энергетические зазоры между основными точками валентной зоны $Al_xGa_{1-x}As$ линейно уменьшаются при переходе от чистого арсенида галлия к арсениду алюминия на 6—18 %. Из этого следует, что эффективные массы зон легких и тяжелых дырок действительно могут увеличиваться по крайней мере на величину такого же порядка, т. е. на 3—4 % для $x=18$ мол % Al, что несколько меньше величин, полученных нами. В табл. 2 приведены величины эффективных масс, использованных в теоретических расчетах, а также энергии переходов, полученные экспериментально. Из этих данных следует, что в исследованном интервале концентраций алюминия зависимость эффективных масс носителей в зоне проводимости и валентных зонах близка к линейной.

Л и т е р а т у р а

- [1] Kressel H., Nicoll F. H., Hawrylo F. Z. — J. Appl. Phys., 1970, v. 41, N 11, p. 4692—4696.
- [2] Chadi D. J., Clark A. H., Burnham R. D. — Phys. Rev., 1976, v. B13, N 10, p. 4466—4469.
- [3] Monemar B., Shih K. K., Pettit D. G. — J. Appl. Phys., 1976, v. 47, N 6, p. 2604—2613.
- [4] Sen P. N., Lukowsky G. — Phys. Rev., 1975, v. B12, N 8, p. 2998—3007.
- [5] Pidgeon C. R., Brown R. N. — Phys. Rev., 1966, v. 146, N 2, p. 575—583.
- [6] Van Vechten J. A., Bergstresser T. K. — Phys. Rev., 1970, v. B1, N 8, p. 3351—3358.
- [7] Емлин Р. В., Зверев Л. П., Коровина Н. В., Рут О. Э. Межзонное поглощение света в фосфиде индия в квантующих магнитных полях. — ФТП, 1978, т. 12, в. 11, с. 2081—2084.
- [8] Сейсян Р. П. Спектроскопия диамагнитных экситонов. М., 1984. 272 с.
- [9] Гельмонт Б. Л., Сейсян Р. П., Эфрос Ал. Л., Варфоломеев А. В. Диамагнитные экситоны в полупроводниках с вырожденной валентной зоной и осциллирующее поглощение кристаллов GaSb в магнитном поле. — ФТП, 1977, т. 11, в. 2, с. 238—245.

Уральский государственный
университет им. А. М. Горького
Свердловск

Получена 22.01.1987
Принята к печати 19.06.1987