

ДЕФОРМАЦИОННОЕ РАСЩЕПЛЕНИЕ L -ДОЛИН ЗОНЫ ПРОВОДИМОСТИ И МЕЖДОЛИННОЕ РАССЕЙЯНИЕ В GaAs

И.Я.Карлик, Р.Катилус, Д.Н.Мирлин, В.Ф.Санага

В спектрах горячей фотолуминесценции одноосно деформированных кристаллов GaAs наблюдалось снятие вырождения L -долин зоны проводимости. Из анализа спектров определены константы междолинного взаимодействия $D_{LL} = (5 \pm 1) \cdot 10^8$ эВ·см⁻¹, а также сдвигового деформационного потенциала $\Xi_u^L = 15 \pm 1,5$ эВ.

В одноосно-деформированных кристаллах GaAs исследовались спектры горячей фотолуминесценции (ГФЛ) в области частот, соответствующих положению вырожденных нижних боковых долин зоны проводимости. Прямые спектроскопические измерения, как показано ниже, позволяют с хорошей точностью определить величину деформационного расщепления и, соответственно, деформационного потенциала. Таким методом, разумеется, совершенно однозначно определяется и симметрия экстремумов. Из анализа интенсивностей в спектрах ГФЛ оказалось возможным впервые экспериментально определить вероятность рассеяния между эквивалентными долинами в GaAs.

Возбуждение люминесценции в кристаллах p -GaAs, легированных Zn ($2 \cdot 10^{17}$ см⁻³), осуществлялось при $T = 2$ К излучением Ar-лазера (2,54 эВ). При этом энергия рождающихся электронов (при забросе из зоны тяжелых дырок) близка к 0,8 эВ. На рис. 1 представлены спектры ГФЛ для трех значений напряжения P , приложенного по оси [111]. В отсутствие одноосной деформации (спектр 1 на рис. 1) спектр ГФЛ формируется в результате излучательной рекомбинации на уровень акцептора электронов, попавших в Γ долину из четырех эквивалентных L -долин вследствие испускания "междолинного" фонона с $q \sim \pi/a$. При одноосном сжатии по [111] происходит частичное снятие вырождения четырехкратно вырожденных L -долин. В спектрах 2 – 4, рис. 1 это проявляется в виде двух систем максимумов (схема переходов показана на врезке). Серия максимумов, соответствующая меньшим энергиям, обусловлена переходами из L -долины, ориентированной вдоль направления сжатия. Серия максимумов с большими энергиями, соответствует переходам из остальных вырожденных $3L$ -долин.

Из полученной зависимости расщепления ΔE от напряжения P (рис. 2) ΔE (мэВ) = $(11 \pm 1)P$ (кбар) в соответствии с соотношением $\Delta E = 4/9 \Xi_u s_{44} P^2$ при $s_{44} = 1,63 \cdot 10^{-3}$ кбар⁻¹ ³ определяется константа деформационного потенциала $\Xi_u = 15 \pm 1,5$ эВ. Это несколько меньше значений, полученных из измерений пьезосопротивления: $19,6 \pm 3$ эВ ⁴ 22 ± 7 эВ ⁵. Отметим, что в данной работе в отличие от ^{4, 5} величина Ξ_u получается непосредственно из расщепления в спектре без использования других зонных параметров. При деформации по [100] расщепление в спектре отсутствует, что подтверждает вывод ⁴ о том, что нижние боковые долины в GaAs лежат на осях $\langle 111 \rangle$.

Наряду с расщеплением в спектре наблюдается изменение соотношения интенсивностей двух серий максимумов, т. е. заселенностей L -долин, в зависимости от деформации. В отсутствие междолинной $L \rightarrow L$ релаксации следовало ожидать соотношения интенсивностей 3 : 1 в соответствии с кратностью вырождения. Это и наблюдалось на опыте пока ΔE оставалось меньше $\hbar\omega_{iv}$ – энергии "междолинного" фонона (≈ 30 мэВ). С увеличением ΔE процессы междолинной релаксации изменяют это соотношение в пользу нижней (невырожденной) долины.

Наличие резкого высокочастотного порога в спектрах рис. 1 свидетельствует о том, что переходы в самих боковых долинах часты по сравнению с переходами в Γ -долину (электроны накапливаются вблизи дна долин). Поэтому кинетику переходов между долинами можно описывать в терминах заселенностей долин (не обращаясь к распределению по энергиям внутри долин) и вероятностей междолинных переходов. Обозначая через n_3 суммар-

ную заселенность трижды вырожденных долин, через n_1 — заселенность невырожденной долины, через w_{30} и w_{10} — вероятности переходов в центральный Γ -минимум, через w_{31} — вероятность междолинных $3L \rightarrow L$ переходов, имеем

$$\frac{w_{31}}{w_{30}} = \frac{1}{4} \left(3 \frac{n_1 w_{10}}{n_3 w_{30}} - 1 \right). \quad (1)$$

С помощью (1) мы получили отношение вероятностей двух типов междолинных переходов $w_{31}/w_{30} \equiv \tau_{L\Gamma}/\tau_{LL}$. Отношение заселенностей n_1/n_3 определялось из эксперимента по отношению интенсивностей двух серий в спектре. Величина w_{10}/w_{30} близка к единице и отличается от нее в меру разницы в плотности конечных состояний в Γ -долине при переходах $L \rightarrow \Gamma$ и $3L \rightarrow \Gamma$ соответственно (вычисления проводились для кейновского закона дисперсии). Полученные таким образом значения отношений w_{31}/w_{30} (рис. 3) оказываются пропорциональными плотности конечных состояний для $3L \rightarrow L$ переходов $(\Delta E - \hbar\omega_{iv})^{1/2}$. (Величина w_{30} должна очень слабо зависеть от деформации, поскольку положение дна трехкратно вырожденной долины $3L$ относительно точки Γ меняется мало).

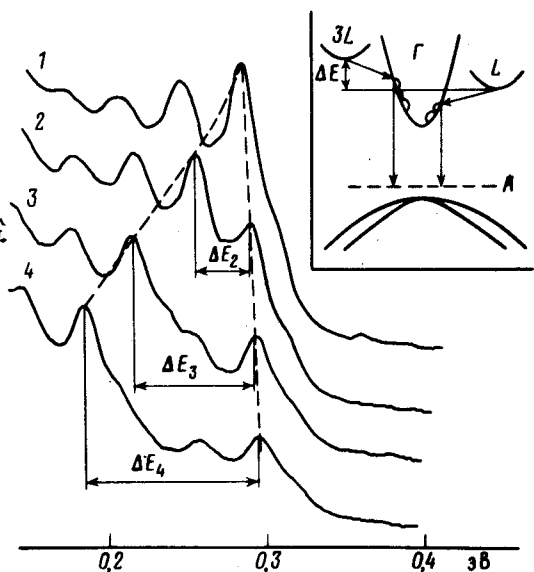


Рис. 1. Спектры ГФЛ в зависимости от энергии рекомбинирующих электронов: 1 — $P = 0$; 2 — $P = 3,7$ кбар; 3 — $P = 7,5$ кбар; 4 — $P = 10,7$ кбар. Пунктирные линии соединяют первые (высокочастотные) пики двух серий максимумов, отвечающие рекомбинации электронов из точки прихода в Γ -долину после $3L \rightarrow \Gamma$ и $L \rightarrow \Gamma$ переходов (схему переходов см. на врезке). Показаны величины расщепления ΔE при различных напряжениях

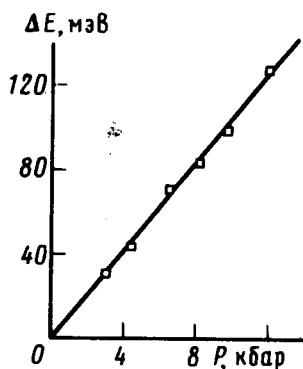


Рис. 2. Зависимость деформационного расщепления L -долин от напряжения

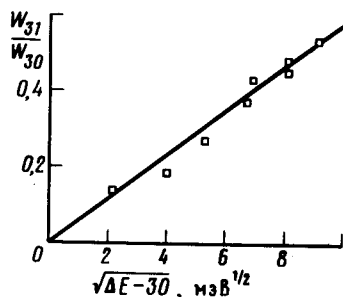


Рис. 3. Зависимость вероятности $3L \rightarrow L$ переходов от деформационного расщепления

В частности, при $\Delta E = 75$ мэВ $\tau_{L\Gamma}/\tau_{LL} = 0,4$. Из сопоставления этого результата с ранее ⁶ измеренными значениями τ_{GL} — времени ухода из Γ в L долину электронов с энергией 0,38 эВ ($\tau_{GL} = 0,25$ пс) можно получить соотношение между константами междолинной связи: $D_{LL} = 0,6 D_{GL}$. Используя полученное в ⁶ значение $D_{GL} = 8 \cdot 10^8$ эВ·см⁻¹ ¹⁾, имеем для D_{LL} оценку $(5 \pm 1) \cdot 10^8$ эВ·см⁻¹.

Авторы признательны Б.П.Захарчене за обсуждение результатов работы.

¹⁾ Результаты недавних прямых фемтосекундных измерений времен ухода электронов в GaAs ⁷ были удовлетворительно объяснены с помощью близкого значения $D_{GL} = 10^9$ эВ·см⁻¹.

Литература

1. *Мирлин Д.Н., Карлик И.Я., Никитин Л.П., Решина И.И., Сапега В.Ф.* Письма в ЖЭТФ, 1980, 32, 34.
2. *Balslev I.* Phys. Rev., 1966, 143, 636.
3. *Буренков Ю.А., Бурдуков Ю.М., Давыдов С.Ю., Никаноров С.П.* ФТТ, 1973, 15, 1757.
4. *Aspnes D.E., Cardona M.* Phys. Rev. B, 1978, 17, 741.
5. *Pickering C., Adams A.R.* J. Phys. C., 1977, 10, 3115.
6. *Дымников В.Д., Мирлин Д.Н., Никитин Л.П., Перель В.И., Решина И.И., Сапега В.Ф.* ЖЭТФ, 1981, 80, 1766.
7. *Erskine D.J., Taylor A.J., Lang C.L.* Appl. Phys. Lett., 1984, 45, 54.

Физико-технический институт
им. А.Ф.Иоффе
Академии наук СССР

Поступила в редакцию
27 декабря 1985 г.