

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВРЕМЕНИ МЕЖДУЗОННЫХ ПЕРЕХОДОВ В ВАЛЕНТНОЙ ЗОНЕ АРСЕНИДА ГАЛЛИЯ

А.Г.Аронов, Д.Н.Мирлин, Л.П.Никитин,

И.И.Решина, В.Ф.Сапег

В кристалле арсенида галлия n -типа ($1,4 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$) по деполяризации люминесценции в поперечном магнитном поле непосредственно определено время жизни τ_0 дырок в спин-отщепленной зоне. Измеренное значение ($1,3 \cdot 10^{-13}$ сек) определяется процессами перехода между спин-отщепленной зоной и зоной легких дырок и близко к вычисленному значению времени релаксации для такого перехода с испусканием оптического фонона.

Интенсивность полосы люминесценции, возникающей в кристаллах арсенида галлия при переходе между зоной проводимости Γ_6 и отщепленной за счет спин-орбитального взаимодействия подзоной валентной зоны Γ_7 , на 4–5 порядков меньше интенсивности полосы на E_g [1] (схему зонной структуры и обозначения см. на рис. 1). Поскольку вероятности возбуждения электронов из подзон Γ_7 и Γ_8 одинаковы по порядку величины, столь большая разница в интенсивностях связана с разницей во временах жизни дырок в вырожденной зоне Γ_8 и спин-отщепленной Γ_7 . В последнем случае время жизни определяется, по-видимому, идущими с достаточно большой вероятностью переходами $\Gamma_7 - \Gamma_8$ (рис. 1). По причине малости времени жизни дырок в отщепленной зоне в проведенных в [1] экспериментах по оптической ориентации наблюдалась высокая ($\sim 0,9$) степень циркулярной поляризации люминесценции в полосе $E_g + \Delta$ (переходы $\Gamma_6 - \Gamma_7$). Дырки, рожденные вблизи края зоны Γ_7 , не успевают потерять за время жизни первоначальную ориентацию спинов, создаваемую при возбуждении циркулярно-поляризованным светом. Иными словами, время жизни неравновесных дырок в зоне Γ_7 τ_0 оказывается заметно меньше времени их спиновой релаксации τ_s .

В данной статье приводятся предварительные результаты непосредственного определения времени τ_0 . Для определения τ_0 был использован эффект деполяризации люминесценции в поперечном магнитном поле при возбуждении циркулярно поляризованным светом (эффект Ханле). Измерения проводились в полях др 80 кГс, создававшихся в сверхпроводящем соленоиде, температура образца составляла ~ 2 К. Возбуждение люминесценции осуществлялось излучением He - Ne лазера (1,96 эВ). При этом энергия рождающихся в зоне Γ_7 дырок равнялась приблизительно 30 мэВ.

На рис. 2 приведена зависимость степени циркулярной поляризации люминесценции от магнитного поля для образца n -GaAs с концентрацией доноров $1,4 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$. В исследованном диапазоне изменения магнит-

ных полей экспериментальные данные на рис.2 удовлетворительно описываются Лоренцевской формулой $\rho_H/\rho_0 = 1/(1 + (\omega_L T)^2)$, где ρ_H и ρ_0 — степени циркулярной поляризации в поле и без поля соответственно, T — время жизни спина ($T^{-1} = \tau_o^{-1} + \tau_s^{-1}$), ω_L — ларморова частота: $\omega_L = g \mu_B H/\hbar$, где μ_B — магнетон Бора, g — фактор Ланде, принятый равным 4 в соответствии с результатами [2, 3]. Сплошная кривая на рис.2 соответствует $T = 1,3 \cdot 10^{-13}$ сек. Пренебрегая, в силу сказанного выше, τ_s^{-1} по сравнению с τ_o^{-1} , мы отождествляем T с временем жизни дырок у вершины валентной зоны¹⁾.

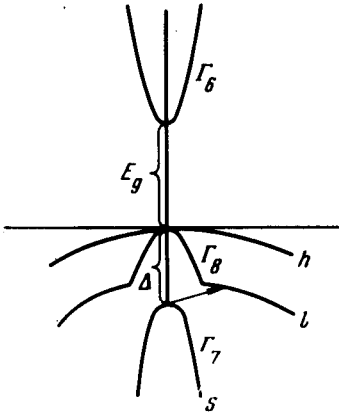


Рис.1. Зонная структура GaAs. Стрелкой показаны переходы между спин-отщепленной зоной и зоной легких дырок.

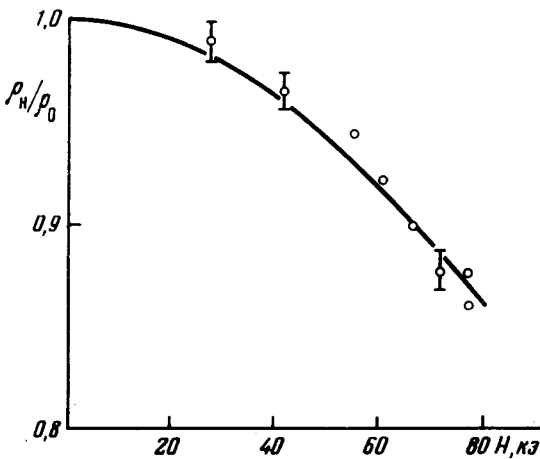


Рис.2. Деполяризация люминесценции в поперечном магнитном поле

¹⁾ В достаточно легированных образцах ($n > 10^{18} \text{ см}^{-3}$) время внутризонной энергетической релаксации дырок τ_1 , за счет дырочно-электронного взаимодействия, как показывают оценки, оказывается меньшим чем 10^{-13} сек. Поэтому при анализе экспериментальных данных мы не учитываем происходящего за это время поворота спина дырок на угол $\omega_L \tau_1$. В общем случае деполяризация люминесценции происходит и на этом "внутризонном" этапе.

Существуют различные механизмы рассеяния, приводящие к переходу дырок $\Gamma_7 - \Gamma_8$ и определяющие тем самым их время жизни: а) переходы с испусканием оптического фонона, б) рассеяние на примесях, в) дырочно-электронное рассеяние, г) акустическое рассеяние. Наибольшую вероятность, как показывают оценки, имеют переходы с испусканием оптического фонона.

Соответствующее выражение при условии $\Delta - 3\hbar\omega_0 \gg (m_s/m_h)^{1/2} \Delta$ имеет вид:

$$1/\tau_{\text{ор}} = \frac{4}{3} a_h \omega_0 \left(\frac{\hbar\omega_0}{\Delta/3 - \hbar\omega_0} \right)^{1/2} \quad (1)$$

Здесь a_h — константа взаимодействия тяжелых дырок с оптическими фононами частоты ω_0 , m_h и m_s — эффективные массы в зоне тяжелых дырок и спин-отщепленной зоне соответственно. Заметим, что выражение (1) соответствует переходам дырок из Γ_7 в подзону легких дырок (переходы в подзону тяжелых дырок запрещены правилами отбора), а то обстоятельство, что в (1) входит константа взаимодействия a_h есть результат сильной непараболичности подзоны легких дырок вблизи энергий $\epsilon \sim \Delta$. Для GaAs $\Delta = 0,34$ эВ; при средней массе тяжелых дырок $m_h = 0,55$ и $\omega_0 = 5,5 \cdot 10^{13}$ сек $^{-1}$, $a_h = 0,22$. Тогда в соответствии с (1) $\tau_{\text{ор}} = 1,1 \cdot 10^{-13}$ сек. В арсениде галлия приведенное выше условие применимости (1) выполняется плохо. Однако, точное выражение для $1/\tau_{\text{ор}}$, полученное без каких-либо предположений о соотношении между массами (мы не приводим здесь его ввиду громоздкости) приводит к не сильно отличающемуся значению $\tau_{\text{ор}} = 2 \cdot 10^{-13}$ сек, что близко к измеренному значению τ_0 .

При оценке времени перехода с рассеянием на примесях необходимо помнить, что, так как переходы $\Gamma_7 - \Gamma_8$ идут с большими передачами импульса, то электронное экранирование несущественно и рассеяние идет практически на ионизованных примесях даже при низких температурах. Соответствующее время перехода при концентрации примесей 10^{18} см $^{-3}$ оказывается на порядок большим $\tau_{\text{ор}}$. Время релаксации при рассеянии на электронах того же порядка, что и для примесного рассеяния, а время релаксации с испусканием акустических фононов еще больше и составляет по приблизительной оценке 10^{-11} сек. Следовательно измеренное значение времени жизни дырок в зоне Γ_7 , определяется, в основном, $\tau_{\text{ор}}$. Измерение эффекта Ханле позволило, таким образом, непосредственно определить вероятность испускания оптического фонона при междузонном переходе. Можно надеяться что аналогичные измерения в менее легированных кристаллах, а также при увеличении начальной энергии дырок позволят измерить и времена внутрizonных процессов энергетической релаксации.

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

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

Поступила в редакцию
23 ноября 1978 г.

Литература

- [1] Б.П.Захарченя, В.И.Земский, Е.Л.Ивченко, Д.Н.Мирлин. Письма в ЖЭТФ, 21, 599, 1975.
- [2] M.Reine, R.L.Aggarwal, B.Lax, C.M.Wolfe. Phys. Rev., B 2, 458, 1970.
- [3] C.Weisbuch, C.Hermann. Phys. Rev., B15, 816, 1977.
-