

НАБЛЮДЕНИЕ ОПТИЧЕСКОЙ ОРИЕНТАЦИИ ДЫРОК В ПОЛУПРОВОДНИКАХ

*Б.П.Захарченя, В.И.Земский, Е.Л.Ивченко,
Д.Н.Мирлин*

В кристаллах n -GaAs наблюдается полоса люминесценции около 1,86 эв, обусловленная электронными переходами из зоны проводимости в отщепленную валентную зону. Наличие циркулярно поляризованной люминесценции при циркулярно поляризованной накачке свидетельствует об оптической ориентации по спину дырок в отщепленной зоне.

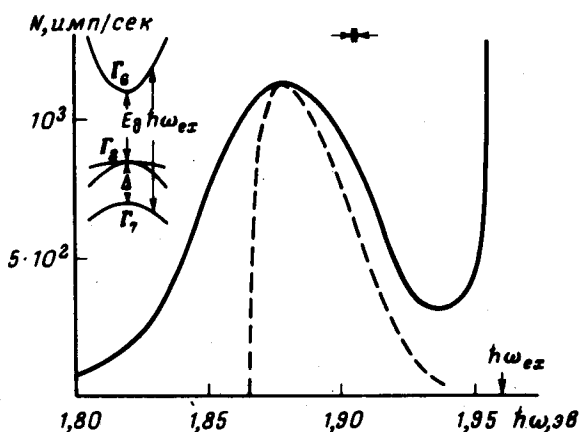
В настоящей статье приведены предварительные результаты исследования спектра и поляризации фотолюминесценции, обусловленной переходами электронов в кристалле GaAs в отщепленную из-за спин-орбитального взаимодействия валентную зону Γ_7 (см. рисунок). Люминесценция возбуждалась в кристаллах GaAs n -типа излучением He – Ne-лазера ($\hbar\omega_{ex} = 1,96$ эв, 40 мвт) и регистрировалась с помощью спектрометра ДФС-24 и системы счета фотонов. Измерения проводились как на эпитаксиальных пленках с $n \approx 10^{14}$ см $^{-3}$, так и на легированных кристаллах с концентрацией электронов от $2 \cdot 10^{17}$ до $2 \cdot 10^{18}$ см $^{-3}$ при 90К. На рисунке приведен экспериментальный спектр люминесценции для образца с $n = 6,7 \cdot 10^{17}$ см $^{-3}$, а также спектр, рассчитанный по формуле:

$$I(\epsilon) = A\epsilon^{1/2} \frac{\exp\left(-\frac{m_c}{m_c + m_{sh}} \frac{\epsilon}{kT}\right)}{1 + \exp\left(\frac{m_{sh}}{m_c + m_{sh}} \frac{\epsilon - \mu}{kT}\right)} \quad (1)$$

Здесь $\epsilon = \hbar\omega - (E_g + \Delta)$, m_c и m_{sh} – эффективные массы электронов в зоне проводимости и дырок в зоне Γ_7 соответственно, μ – химпотенциал электронов. Предположено, что фотовозбужденные дырки в зоне Γ_7 подчиняются статистике Больцмана, а спектр люминесценции определяется прямыми переходами. Расчетная кривая строилась при значениях $m_{sh}/m_c = 3$, $m_c = 0,07 m_0$. Совмещение максимумов расчетной и экспериментальной кривых приводит к величине $E_g + \Delta = 1,865$ эв, что соответствует известным из других экспериментов значениям E_g и Δ [1].

В образцах с $n \approx 10^{18}$ см $^{-3}$ интенсивность исследованной люминесценции меньше интенсивности краевой люминесценции $\Gamma_6 \rightarrow \Gamma_8$ примерно в 10^5 раз. С уменьшением концентрации электронов интенсивность люминесценции уменьшается, полоса сужается и сдвигается в сторону

низких частот, при $n < 10^{15} \text{ см}^{-3}$ люминесценция в полосе $\Gamma_6 \rightarrow \Gamma_7$ практически отсутствует. Отметим, что экспериментальные спектры заметно затянуты по сравнению с расчетными не только в сторону низких, но и в сторону высоких частот. Последнее обстоятельство свидетельствует о том, что функция распределения дырок, возбужденных светом в зоне Γ_7 , является неравновесной, т. е. в этом смысле наблюдавшаяся люминесценция является "горячей".



Спектр люминесценции в области переходов $\Gamma_6 \rightarrow \Gamma_7$ в кристалле GaAs ($n = 6,7 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$, $T = 90\text{K}$). Сплошная кривая — эксперимент, штриховая — расчет по формуле (1) при $m_s \hbar / m_c = 3$; $m_c = 0,07 m_0$ [4]. Рост интенсивности при $h\omega \sim 1,95 \text{ эв}$ обусловлен "хвостом" возбуждающей линии. В левом верхнем углу — схема зонной структуры GaAs в окрестности $k = 0$

Можно было ожидать, что люминесценция в полосе $\Gamma_6 \rightarrow \Gamma_7$ окажется удобной для наблюдения оптической ориентации свободных дырок. В экспериментах по оптической ориентации свободных носителей тока в полупроводниках до сих пор удавалось наблюдать лишь ориентацию спинов электронов в зоне проводимости [2]. Вследствие спин-орбитального взаимодействия в вырожденной в точке $k = 0$ зоне Γ_8 время спиновой релаксации дырок τ_s существенно меньше их времени жизни τ_0 . Поэтому эффект оптической ориентации дырок в зоне Γ_8 , пропорциональный величине $\tau_s (\tau_s + \tau_0)^{-1}$ пренебрежимо мал [3]. Иная ситуация может иметь место для дырок в отщепленной зоне Γ_7 . Действительно, в этом случае время жизни τ_0 определяется в основном относительно большой вероятностью переходов $\Gamma_7 \rightarrow \Gamma_8$ между подзонами валентной зоны и может быть весьма малым. Поэтому дырки, рожденные в зоне Γ_7 при возбуждении циркулярно-поляризованным светом не успевают за время τ_0 потерять свой направленный момент, а, следовательно, люминесценция, обусловленная переходами $\Gamma_6 \rightarrow \Gamma_7$, окажется в значительной мере циркулярно-поляризованной.

Действительно, при циркулярно-поляризованном возбуждении наблюдалась циркулярная поляризация люминесценции в полосе $\Gamma_6 \rightarrow \Gamma_7$. Измерения в максимуме полосы для образца с $n = 1,6 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ (около 6500 \AA) дали степень циркулярной поляризации $\rho = 0,90 \pm 0,02$. Близкие значения ρ получены и для других образцов. В то же время для краевой люминесценции $\Gamma_6 \rightarrow \Gamma_8$, ρ близко к нулю. Это обстоятельство свидетельствует о том, что в исследованном случае ориентация по спину основных носителей — электронов пренебрежимо мала и наблюдавшаяся циркулярно-поляризованная люминесценция $\Gamma_6 \rightarrow \Gamma_7$ обусловлена ориентированными по спину дырками в зоне Γ_7 . Для переходов $\Gamma_6 \rightarrow \Gamma_7$ аналогично [3] степень циркулярной поляризации излучения в направлении, противоположном направлению возбуждающего света:

$$\rho = -P_{sh} \exp(-\Phi) \tau_s (\tau_s + \tau_o)^{-1}, \quad (2)$$

где P_{sh} — степень спиновой поляризации дырок в момент рождения, τ_o — время жизни дырок в зоне Γ_7 , τ_s — время их спиновой релаксации вблизи экстремума, множитель $\exp(-\Phi)$ учитывает потери направленного спина дырок при их термализации внутри зоны Γ_7 . Можно показать, что величина P_{sh} совпадает в точности со степенью спиновой поляризации электронов P_c , возбуждаемых циркулярно-поляризованным светом из зоны Γ_7 и рассчитанной в [3]. Оценка показывает, что в условиях данного эксперимента $P_{sh} = 0,99$. Используя измеренное на опыте значение ρ , находим согласно (2) оценку для величины $\exp(-\Phi) \tau_s (\tau_o + \tau_s)^{-1} \approx 0,9$, откуда следует, что $\tau_s / \tau_o \gtrsim 10$.

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

Поступила в редакцию
3 февраля 1975 г.
17 апреля 1975 г.

Литература

- [1] С. Hilsum. Progr. in Semicond., 9, 136. 1965.
- [2] G. Lampel. Proc. 12-th Intern. Conf., Phys. Semicond., Stuttgart 1974, p. 743.
- [3] М.И. Дьяконов, В.И. Перель. ЖЭТФ, 60, 1954, 1971.
- [4] М. Кардона. Сб. "Оптические свойства полупроводников", М., изд. Мир, 1970, стр. 162.