

ЭФФЕКТ ОПТИЧЕСКОЙ ОРИЕНТАЦИИ ЭЛЕКТРОННЫХ СПИНОВ В КРИСТАЛЛЕ GaAs

Б.П.Захарченя, В.Г.Флейшер, Р.И.Джиоев,
Ю.П.Вещунов, И.Б.Русанов

Электронные спины в зоне проводимости кристалла можно ориентировать циркулярно поляризованным светом. Возникновение такой ориентации в кубических кристаллах, например, связано с различием вероятностей междузонных переходов $4\Gamma_8 \rightarrow 2\Gamma_6$ (рис. 1) из зоны тяжелых дырок ($l = 3/2$) и зоны легких дырок ($l = 1/2$). Так, при возбуждении σ^\pm -светом вероятности переходов $\mp 3/2 \rightarrow \mp 1/2$ и $\mp 1/2 \rightarrow \pm 1/2$ относятся как 3:1 [1]. Это приводит к возникновению преимущественной ориентации электронных спинов в направлении, противоположном моменту количества движения возбуждающего света \mathbf{M} . Максимальная степень ориентации $P_{\text{макс}} = (n_- - n_+) / (n_- + n_+) = 50\%$, где n_+ и n_- — числа возбужденных электронов со спинами в направлении по и против \mathbf{M} . Первыми наблюдали возникновение такой ориентации Лампель [2], по сигналу ядерного резонанса в кремнии, и Парсонс [3], по поляризации люминесценции в GaSb.

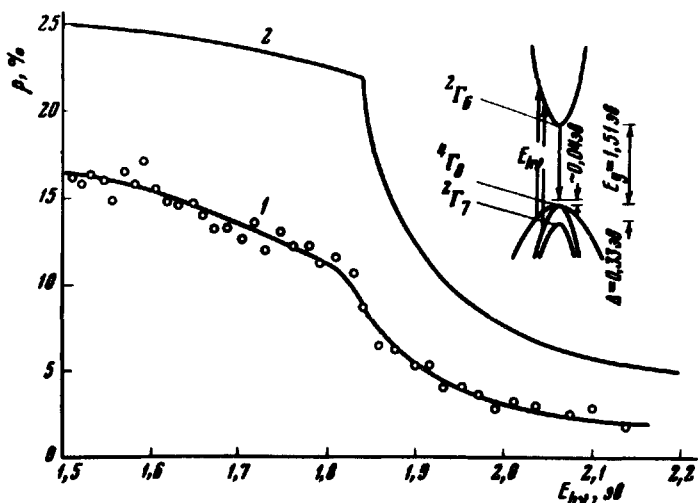


Рис. 1. Зависимость степени поляризации люминесценции в GaAs от энергии фотона циркулярно поляризованного возбуждающего света: 1 — экспериментальная кривая, 2 — теоретическая кривая

Недавно сообщалось о наблюдении циркулярной поляризации люминесценции в твердом растворе $\text{Ga}_x\text{Al}_{1-x}\text{As}$ [4]. Причем, как в работе [3], так и в [4] возбуждение осуществлялось монохроматическим светом вблизи точки $k = 0$. Ниже приводятся результаты исследования эффекта спиновой ориентации, обнаруженного в кристалле GaAs для широкого диапазона длин волн возбуждающего света. Измерения проводились на кристалле p -типа с концентрацией дырок равной $2 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$. Степень спиновой ориентации измерялась по степени поляризации p люминесценции на длине волны $\lambda = 8475 \text{ \AA}$, аналогично [3]. Эффект идентифицировался по изменению на 180° фазы сигнала циркулярной поляризации

люминесценции при переходе от σ^- к σ^+ возбуждающему свету и наоборот. Кроме того, наблюдалась деполаризация люминесценции под действием магнитного поля в результате прецессии электронных спинов до момента высвечивания (аналогично хорошо известному для газов эффекту Ханле).

На рис. 1 приведена зависимость ρ от энергии $E_{h\nu}$ квантов возбуждающего света при 77°K , полученная при возбуждении через монохроматор. Ширина на полувысоте линии возбуждающего света составляла примерно 100 \AA . На рис. 1 приведена также теоретическая кривая, рассчитанная для GaAs М.И. Дьяконовым и В.И. Перелем. Кривая соответствует случаю, когда время спин-решеточной релаксации $\tau_s \gg \tau$, где τ — время жизни электронов в зоне проводимости. Излом на теоретической кривой при $E_{h\nu} = 1,84 \text{ эв}$ связан с включением в оптические переходы зоны $^2\Gamma_7$, сдвинутой относительно $^4\Gamma_8$ на величину спинорбитального расщепления $\Delta = 0,33 \text{ эв}$. Поскольку переходы $^2\Gamma_7 \rightarrow ^2\Gamma_6$ создают преимущественную ориентацию электронных спинов в направлении \mathbf{M} , результирующая степень ориентации P уменьшается с ростом $E_{h\nu}$. Соответственно должно наблюдаться уменьшение ρ . Максимальная величина $\rho = 25\%$ соответствует возбуждению при $k = 0$ и люминесценции в результате междузонного электронного перехода $^2\Gamma_6 \rightarrow ^4\Gamma_8$. Если ориентация была создана σ^\pm -светом в люминесценции наблюдается также σ^\pm -поляризация, поскольку вероятности переходов $\mp 1/2 \rightarrow \mp 3/2$ и $\pm 1/2 \rightarrow \mp 1/2$ относятся как 3:1. Как видно из рис. 1, изменение ρ при увеличении $E_{h\nu}$ полученное экспериментально, качественно согласуется с предсказанным теорией. Однако, во всем диапазоне $E_{h\nu}$ $\rho_{\text{эксп}} < \rho_{\text{теор}}$. Такое несоответствие может быть вызвано двумя причинами: 1) влиянием спин-решеточной релаксации, 2) наблюдаемая на опыте люминесценция соответствует не междузонному переходу, а переходам из зоны проводимости на акцепторные уровни.

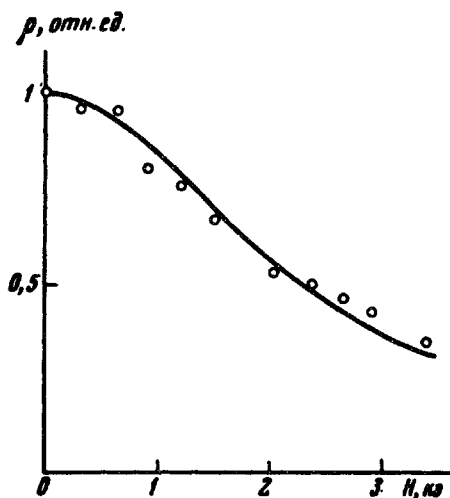


Рис. 2. Деполаризация люминесценции GaAs в магнитном поле при $E_{h\nu} = 1,55 \text{ эв}$. Степень поляризации ρ дана в произвольных единицах

В нашем случае акцепторы можно считать достаточно мелкой примесью, так как уровни этой примеси отстоят от $^4\Gamma_8$ примерно на $0,1 \Delta$. Волновые функции такой примеси совпадают с волновыми функциями верхней валентной зоны $^4\Gamma_8$. В этом случае наблюдаемое на опыте уменьшение величины ρ по сравнению с теоретическим следует приписать влиянию спиновой релаксации. Учет этой релаксации приводит к уменьшению ρ в $\tau_s / (\tau_s + \tau)$ раз, что становится заметным, если τ_s сравнимо с τ . Более быстрый спад $\rho_{\text{эксп}}$ по сравнению

нию с $\rho_{\text{теор}}$, по-видимому, указывает на возрастание r_s при увеличении $E_{h\nu}$. По дефициту $\Delta\rho = \rho_{\text{теор}} - \rho_{\text{эксп}}$ можно оценить r_s , если известно r .

Наблюдение деполяризации люминесценции под действием магнитного поля H позволяет получить второе уравнение, связывающее r и r_s и, таким образом, определить обе эти величины. На рис. 2 представлены полученные экспериментально точки зависимости $\rho(H)$. Сплошная кривая описывается лоренцевской функцией $1/[1 + (\omega T)^2]$, где ω — частота прецессии, а $L/T = 1/r_s + 1/r$ [3]. Величина T , найденная из экспериментальной зависимости, определена с точностью до g -фактора ($\hbar\omega = g\mu_B H$, где μ_B — магнетон Бора) и составляет $(4,9 \pm 0,4) \cdot 10^{-11} \text{сек/г}$. Если в качестве g -фактора взять величину равную $0,5228 \pm 0,0001$, полученную по измерению ЭПР GaAs n -типа [5], то $T = (9,4 \pm 0,8) \cdot 10^{-11} \text{сек}$. При этом $r_s = (\rho_{\text{макс}}/\Delta\rho)T = (2,8 \pm 0,6) \cdot 10^{-10} \text{сек}$, а $r = (\rho_{\text{макс}}/\rho)T = (1,4 \pm 0,2) \cdot 10^{-10} \text{сек}$.

Авторы весьма признательны В.И.Перелю и М.И.Льяконову за обсуждение результатов эксперимента.

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

Поступила в редакцию
12 января 1971 г.

Литература

- [1] L.M.Roth, B.Lax, S.Zwerdling. Phys. Rev., 114, 90, 1959; Б.П.Захарченя, И.Б.Русанов. Оптика и спектроскопия, 19, 365, 1965.
- [2] G.Lampel. Phys. Rev. Lett., 20, 491, 1968.
- [3] R.R.Parsons. Phys. Rev. Lett., 23, 1152, 1969.
- [4] А.И.Екимов, В.И.Сафаров. Письма в ЖЭТФ, 12, 293, 1970.
- [5] W.Duncan, E.E.Schneider. Phys. Lett., 7, 23, 1963.