

СПИНОВАЯ РЕЛАКСАЦИЯ ЭЛЕКТРОНОВ, ОРИЕНТИРОВАННЫХ СВЕТОМ В КРИСТАЛЛЕ GaAs

В.Г.Флейшер, Р.И.Джюев, Б.И.Затарченя,
Л.М.Канская

В работе [1] было показано, что возбуждение электронов в кристалле GaAs циркулярно поляризованным светом приводит к созданию спиновой ориентации. Эта ориентация наблюдается в широком интервале энергий фотонов $E_{h\nu}$, превышающем величину энергии спин-орбитального расщепления между валентными зонами $^4\Gamma_8$ и $^2\Gamma_7$. Увеличение $E_{h\nu}$ от значения $E_g = 1,52$ эв, соответствующего возбуждению в точке $k = 0$, сопровождается уменьшением степени ориентации P электронных спинов. На опыте это проявляется в уменьшении наблюдаемой степени циркулярной поляризации ρ_3 . Приведенная в [1] кривая зависимости $\rho_3(E_{h\nu})$ отличается от теоретической зависимости $\rho_T(E_{h\nu})$ в T/τ раз, где τ — время жизни электронов и T — время "намагниченности" неравновесных электронов ($1/T = 1/\tau + 1/\tau_s$ [2], τ_s — время спиновой релаксации). Из сравнения приведенных в [1] ρ_T и ρ_3 видно, что ρ_3/ρ_T систематически уменьшается с ростом $E_{h\nu}$. Релаксация по энергии "горячих" электронов происходит за времена $\tau_e \ll \tau$. Действительно, согласно [3], τ_e порядка 10^{-12} сек, а по измерениям в [1] порядка 10^{-10} сек. Естественно допустить, что τ практически не зависит от $E_{h\nu}$. При этом уменьшение T/τ с увеличением $E_{h\nu}$ должно означать уменьшение τ_s . Такое уменьшение может быть связано с ускорением спиновой релаксации при возбуждении электронов высоко в зону проводимости из-за спинового расщепления этой зоны. Как показали Перель и Дьяконов [4], учет этого расщепления может при определенных условиях приводить к сильной зависимости τ_s от $E_{h\nu}$.

Для выяснения природы корреляции между спиновой релаксацией и энергией фотонов возбуждающего света были выполнены исследования деполяризации люминесценции в магнитном поле при разных $E_{h\nu}$. Зависимость $\rho(H)$ измерена при восьми значениях $E_{h\nu}$ (от 1,53 до 1,96 эв), для того же, что и в [1] кристалла GaAs¹⁾. На рис.1 представлены результаты измерений для $E_{h\nu} = 1,53, 1,74$ и 1,96 эв. Отчетливо видно расширение кривых $\rho(H)$ при увеличении $E_{h\nu}$. Ширины на полувысоте $H_{1/2}$ лоренцовских кривых, соответствующих экспериментальным зависимостям $\rho(H)$, обратно пропорциональны времени T . Наблюдающееся на опыте расширение кривых $\rho(H)$ при увеличении $E_{h\nu}$ соответствует уменьшению T , что согласуется с результатами сопоставления ρ_T и ρ_3 .

Как показано в [1], измерение величины ρ_3/ρ_T и зависимости $\rho(H)$ для данного значения $E_{h\nu}$ позволяет определить отдельно времена

¹⁾ Люминесценция наблюдалась с поверхности скола.

τ и τ_s . На рис.2 представлены результаты вычисления τ_s (кривая 2) и τ (кривая 1) из зависимостей $\rho_3(E_{h\nu})/\rho_T(E_{h\nu})$ и $H_{1/2}(E_{h\nu})$. Как видно, величина τ мало изменяется в рассмотренном диапазоне $E_{h\nu}$.

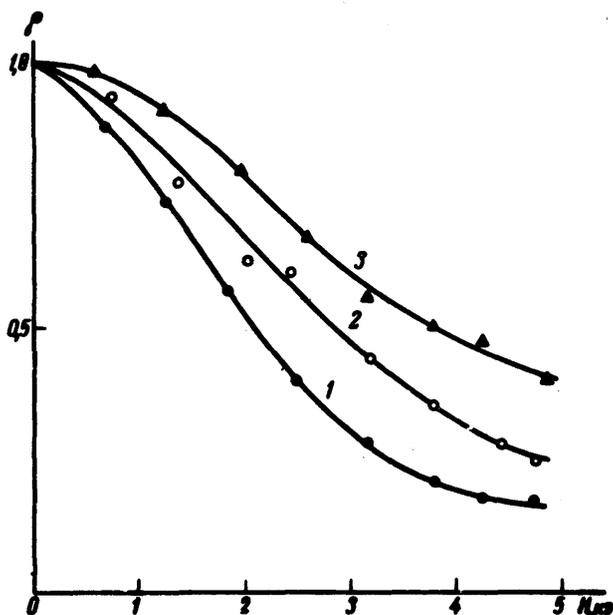


Рис. 1. Зависимость степени циркулярной поляризации рекомбинационного излучения в GaAs от магнитного поля для различных энергий возбуждающих фотонов: 1 - 1,53 эв, 2 - 1,74 эв, 3 - 1,96 эв

Если постулировать постоянство τ (см. выше) и принять $\tau = 1,4 \cdot 10^{-10}$ сек (значение, соответствующее $E_{h\nu} > 1,65$ эв на рис.2), можно сопоставить величины τ_s , определяемые из двух различных экспериментов (по ρ_3/ρ_T и $H_{1/2}$). Как видно из рис.2 (см. кривые 2 и 3), независимо определенные значения τ_s при $E_{h\nu} \gtrsim 1,65$ эв хорошо совпадают. Здесь следует подчеркнуть, что величина ρ_3/ρ_T чувствительна к любым процессам, сопровождающимся спиновой релаксацией и заканчивающимся за сколь угодно малое время по сравнению с τ .

В то же время величина $H_{1/2}$ чувствительна только к тем процессам спиновой релаксации, которые характеризуются временами порядка $1/\nu_L$, где ν_L - частота ларморовой прецессии в поле $H_{1/2}$. Для GaAs при $H_{1/2} = 2000$ гс $\nu_L = 1,5 \cdot 10^9$ иц. Если релаксация по энергии заканчивается за времена $\tau_c \sim 10^{-12}$ сек $\ll 1/\nu_L$, поворот спина внешним магнитным полем в течение τ_c пренебрежимо мал. При этом величина $H_{1/2}$ полностью определяется значением τ_s , характерным для дна зоны проводимости, и никакой зависимости $H_{1/2}$ от $E_{h\nu}$ не должно было бы наблюдаться¹⁾.

¹⁾ Если сделать маловероятное предположение о том, что τ_c все же сравнимо с наблюдаемым значением τ_s (и, следовательно, τ) в использованном кристалле, величина $H_{1/2}$ будет зависеть от $E_{h\nu}$. Однако, в этом случае должна заметно расширяться линия люминесценции, чего на опыте не наблюдается.

Таким образом, из факта совпадения величин τ_s , рассчитанных по значениям ρ_3/ρ_T и $H_{1/2}$, следует вывод о сохранении спиновой ориентации при электрон-фононных взаимодействиях, сопровождающихся релаксацией по энергии в исследованном кристалле. Чем же в таком случае объясняются зависимости ρ_3/ρ_T и $H_{1/2}$ от энергии возбуждения?

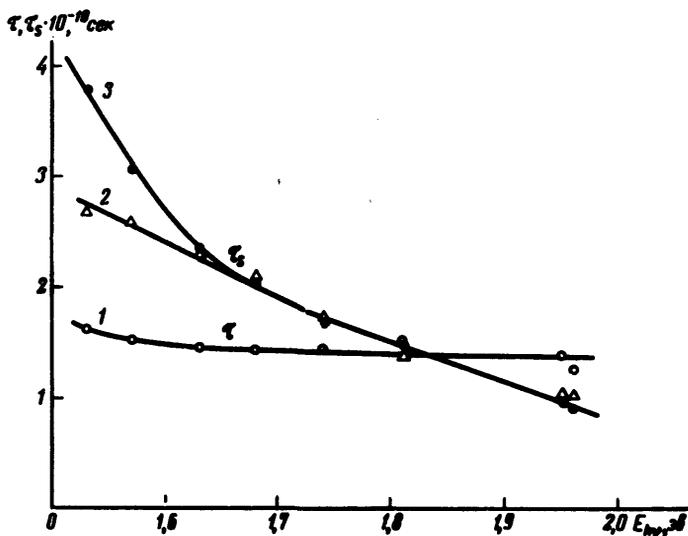


Рис. 2. Зависимость времени жизни τ и времени спиновой релаксации τ_s от энергии возбуждающего фотона. Кривая 2 — τ_s вычислены из зависимости ρ_3/ρ_T ($E_{h\nu}$) (см. рис. 1 в [1]). Кривая 3 — вычислены из зависимости $H_{1/2}$ ($E_{h\nu}$)

Эти зависимости могут быть качественно поняты, если предположить, что имеется различие параметров кристалла в объеме и приповерхностном слое. Тогда измеряемые на опыте величины $f_1 = \rho_3/\rho_T$ и $f_2 = H_{1/2}$ являются результатом усреднения значений f в объеме (f^o) и вблизи поверхности (f^{Π}), взятых с различными весовыми множителями, определяемыми зависимостью $a(E_{h\nu})$, где a — коэффициент поглощения света. Если предположить существование приповерхностной области с эффективной толщиной d , для которой $f_1 = f_1^{\Pi}$ и $f_2 = f_2^{\Pi}$, то $\bar{f}_{1,2} = f_{1,2}^{\Pi} + (f_{1,2}^o + f_{1,2}^{\Pi})e^{-ad}$ без учета диффузии носителей. На рис. 3 представлены зависимости ρ_3/ρ_T и $H_{1/2} \sim 1/T$ от a (значения a заимствованы из работы [5]). Обе зависимости хорошо аппроксимируются прямыми линиями, что указывает на малость величины ad . Учет длины диффузии ℓ_D не изменяет линейного вида зависимости f от a при $\ell_D \ll 1/a$ и $d \ll 1/a$. Линейная экстраполяция f_1 и f_2 к значению $a = 0$ позволяет определить величины τ и τ_s , соответствующие объему (τ_0 и τ_{s0}). При этом мы получили $\tau_0 = (2,4 \pm 0,3) \cdot 10^{-10}$ сек и $\tau_{s0} = (9,6 \pm 1,2) \cdot 10^{-10}$ сек. Определение величины τ_s в поверхностном слое может быть произведено при наличии дополнительных сведений о величинах d и ℓ_D . Например, пренебрегая диффузией носителей,

можно объяснить экспериментальные результаты наличием приповерхностного слоя с толщиной порядка 10^{-5} см, в котором величина τ_s на порядок меньше τ_{s0} .

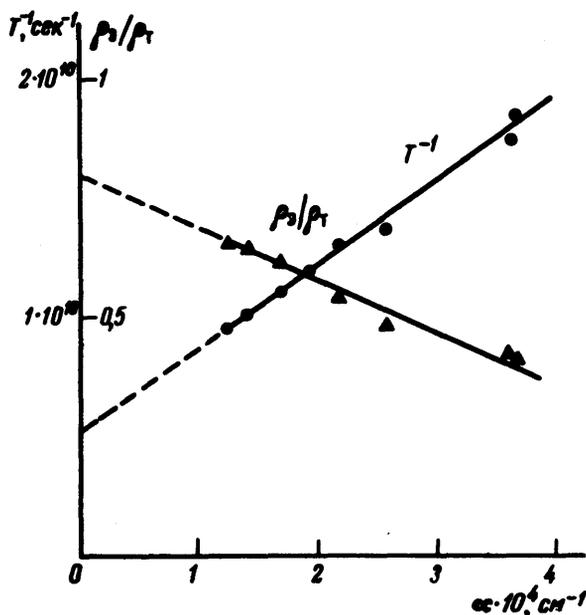


Рис. 3. Зависимость ρ_s / ρ_T и обратного времени "намагниченности" от коэффициента поглощения в GaAs

Следует отметить, что указание на различие времен спиновой релаксации при переходе от поверхности к объему в полупроводниках, облучаемых светом, содержалось в работе по исследованию ЭПР [6].

Авторы выражают признательность В.И.Перелю и М.И.Дьяконову за обсуждение экспериментальных результатов.

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

Поступила в редакцию
12 марта 1971 г.

Литература

- [1] Б.П.Захарченя, В.Г.Флейшер, Р.И.Джиоев, Ю.П.Вещунов, И.Б.Русанов. Письма в ЖЭТФ, 13, 195, 1971.
- [2] R.R.Parsons. Phys. Rev. Lett., 23, 1152, 1969.
- [3] M.T.Vlardingbroek, W.Kuypers, G.A.Acket, Phys. Lett., 28a, 2, 155, 1968.
- [4] М.И.Дьяконов, В.И.Перель. ЖЭТФ, 60, 1954, 1971.
- [5] M.D. Sturge. Phys. Rev., 127, 768, 1962.
- [6] G.Feher, E.A.Gere. Phys. Rev., 114, 1245, 1959.