

## ИССЛЕДОВАНИЕ ПАРАМАГНЕТИЗМА ПОЛУПРОВОДНИКОВ ПО ПОЛЯРИЗАЦИИ ЛЮМИНЕСЦЕНЦИИ В СЛАБОМ МАГНИТНОМ ПОЛЕ

*Р. И. Джиоев, Б. П. Захарченя, В. К. Флейшер*

Парамагнетизм носителей и примесных центров может приводить к появлению заметной циркулярной поляризации рекомбинационного излучения полупроводника, помещённого в слабое магнитное поле. Теория этого эффекта рассмотрена в работе Дьяконова и Переля [1].

При определенных условиях по степени  $\rho$  циркулярной поляризации люминесценции можно получать информацию о  $g$ -факторах примесных центров и свободных носителей. Для этого необходимо выделять случаи, при которых поляризация определяется одним типом носителей или примесей. Так, например, в случае легированных полупроводников имеются 2 возможности. 1) Неравновесные носители не успевают заметным образом ориентироваться за время жизни  $\tau$  ( $\tau \ll \tau_s$ , где  $\tau_s$  — время спиновой релаксации). При этом  $\rho$  определяется средним спином равновесных носителей. Такая ситуация реализуется в невырожденных полупроводниках  $p$ -типа при условии медленной (в масштабе  $\tau$ ) спиновой релаксации неравновесных электронов. 2) За время  $\tau$  неравновесные носители практически полностью ориентируются ( $\tau_s \ll \tau$ ), а ориентация равновесных носителей незначительна. Этот случай реализуется в вырожденных полупроводниках  $n$ -типа, поскольку дырки релаксируют по спине достаточно быстро, а ориентация равновесных электронов возможна лишь вблизи уровня Ферми.

Ниже приводятся результаты экспериментального исследования циркулярной поляризации фотолюминесценции в кристаллах  $GaAs$   $n$ - и  $p$ -типа при наблюдении вдоль магнитного поля  $H$ . Как в  $p$ -, так и  $n$ - $GaAs$  исследовалось рекомбинационное излучение с участием акцепторов. Для оценки возможного вклада неравновесных электронов в  $p$ - $GaAs$  использован метод оптической ориентации [2]. Сочетание методов ориентации спинов циркулярно поляризованным светом и магнитным полем позволяет разделить вклад неравновесных носителей и акцепторов. Большая скорость спиновой релаксации за время жизни приводит к снижению (в  $\tau_s/(\tau + \tau_s)$  раз) эффекта оптической ориентации неравновесных электронов, но увеличению их "намагниченности" в поле  $H$ . При малой скорости спиновой релаксации, наоборот, возрастает оптическая ориентация, но в  $\tau/(\tau + \tau_s)$  раз уменьшается "намагниченность"

неравновесных электронов по сравнению с равновесными в невырожденном полупроводнике.

На рис. 1 приведены зависимости  $\rho(H)$  для кристаллов  $n$ - и  $p$ -GaAs, полученные при возбуждении фотолюминесценции He-Ne-лазером. Наклон прямых  $\rho(H)$  существенно зависит от концентрации легирующих примесей и относительно мало зависит от их типа ( $n$  или  $p$ ). С увеличением концентрации  $\rho$  падает. При концентрации легирующей примеси  $\geq 3 \cdot 10^{18}$  чувствительность установки недостаточна для обнаружения циркулярной поляризации.

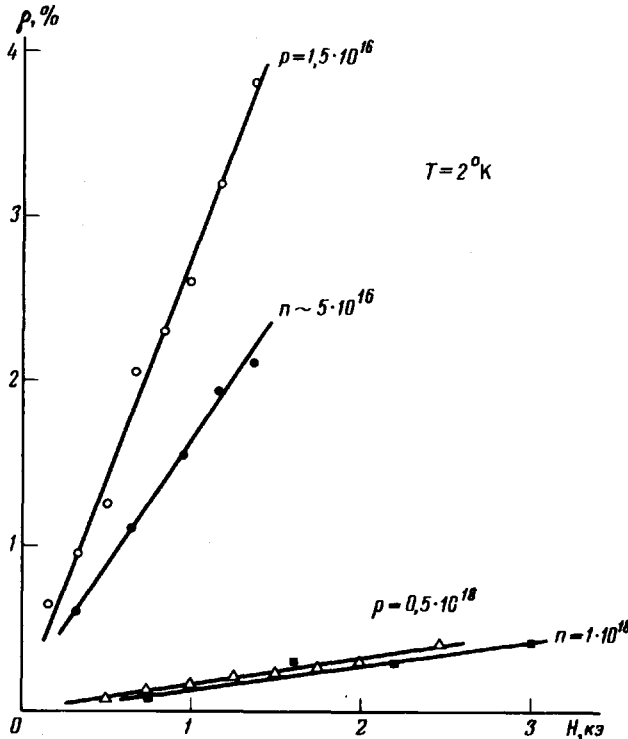


Рис. 1. Зависимости степени циркулярной поляризации  $\rho(H)$  при возбуждении фотолюминесценции неполяризованным или линейно поляризованным светом при разных концентрациях легирующих примесей в  $n$ - и  $p$ -GaAs.  $T \approx 2^\circ\text{K}$ .

Как показано в [1], поляризация люминесценции, связанная с ориентацией акцепторов  $\rho_A = 5g_A \mu_B H / 4kT$ , где  $g_A$  —  $g$ -фактор акцепторов,  $\mu_B$  — магнетон Бора,  $k$  — постоянная Больцмана и  $T$  — температура. Соответственно для равновесных электронов в невырожденном полупроводнике  $\rho_3 = g_3 \mu_B H / 4kT$ , где  $g_3$  — электронный  $g$ -фактор. Для неравновесных электронов  $\rho_3$  уменьшается в  $\tau / (\tau + \tau_s)$  раз. Опыты по оптической ориентации позволяют оценить величину  $\tau / (\tau + \tau_s)$ . Так, например, для  $p$ -GaAs с концентрацией акцепторов  $N_A = 1,5 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$   $\tau / (\tau + \tau_s) \lesssim 0,4$ . При  $g_3 = 0,5$  [3],  $H = 1 \text{ кэ}$  и  $T = 2^\circ\text{K}$   $\rho_3 \lesssim 2 \cdot 10^{-3}$ , что значительно меньше наблюдаемой величины. Таким образом, поляризация люминесценции определяется "намагниченностью" акцепторов. При возбуждении фотолюминесценции неполяризованным светом в поперечном направлении поля  $H$  наблюдается люминесценция, поляризованная по правому кругу. Это соответствует преобладающему вкладу переходов  $-1/2 \rightarrow -3/2$ .

По наклону прямых  $\rho(H)$  можно определить эффективный  $g$ -фактор акцепторов  $g'_A = 4kT\rho / 5\mu_B H$ , который падает с увеличением концентрации примесей. Для образца с  $N_A = 1,5 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$   $g'_A = 0,67 \pm 0,11$ .

Соответствующая парамагнитная восприимчивость  $\chi_A = \mu_B^2 (g_A^2)^2 i(i+1) N_A / 3kT = (1,78 \pm 0,29) \cdot 10^{-9}$ . Здесь  $i$  – квантовое число полного момента. Очевидно, что истинный  $g$ -фактор акцепторов  $g_A \geq (0,67 \pm 0,11)$ . Определенная таким образом величина  $\chi_A$  в кристаллах  $p$ -типа меняется слабо с легированием, т. к. мало меняется произведение  $(g_A^2)^2 N_A$ , а в  $n$ -GaAs уменьшается с ростом концентрации доноров пропорционально  $(g_A^2)^2$  (т. к.  $N_A \approx \text{const}$ ).

Из того факта, что при близких концентрациях легирующих примесей наклоны прямых  $\rho(H)$  также близки, можно сделать заключение, что неравновесные дырки в  $n$ -GaAs за время  $\tau$  приобретают практически равновесную ориентацию. Аналогичные зависимости  $\rho(H)$  наблюдались в кристаллах GaAlAs и GaInP.

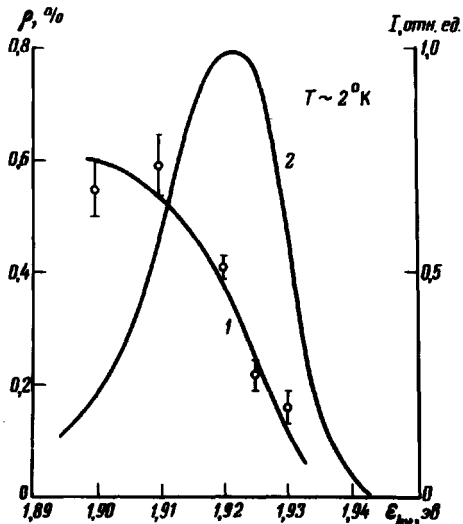


Рис. 2. Зависимость  $\rho$  от энергии  $\epsilon_{h\nu}$  квантов рекомбинационного излучения для кристалла  $p$ -GaAlAs с концентрацией акцепторов  $\approx 5 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$  (кривая 1) при  $H = 2,5 \text{ кэ}$  и  $T \approx 2^\circ \text{К}$ . Кривая 2 иллюстрирует зависимость интенсивности фотолюминесценции  $I$  от  $\epsilon_{h\nu}$  для этого кристалла при  $\approx 2^\circ \text{К}$

Зависимость  $g_A^2$  от легирования определяется, вероятно, влиянием электрических полей ионизованных примесей или связанных с примесями статических деформаций на относительное положение магнитных подуровней акцепторов. Можно воспользоваться оценками расщепления  $\Delta\epsilon_E$  уровней акцепторов под действием электрического поля  $E$ , приведенными в [4]. В этой работе оценены линейный и квадратичный по полю эффекты ( $\Delta\epsilon_E \sim N_i^{2/3}$  и  $N_i^{4/3}$  соответственно,  $N_i$  – концентрация ионизованных примесей). При  $\Delta\epsilon_E$ , сравнимом с расщеплением в магнитном поле  $\Delta\epsilon_H$ , относительное положение магнитных подуровней меняется так, что средний спин акцепторов уменьшается и соответственно падают  $\rho$  и  $g_A^2$ . Оценки показывают, что  $\Delta\epsilon_E$  становится сравнимым с  $\Delta\epsilon_H$  (при  $H = 1 \text{ кэ}$ ), если  $N_i$  составляет по порядку величины  $10^{17} \text{ см}^{-3}$  (при этом квадратичный по  $E$  эффект превышает линейный). Очевидно, что наибольшее воздействие оказывают ближайшие к акцептору центры. В случае донорно-акцепторной рекомбинации можно ожидать влияния донора, принадлежащего рекомбинирующей паре. При этом парам с меньшим расстоянием  $R$  между донором и акцептором должна соответствовать меньшая поляризация люминесценции. Такая зависимость, действительно, наблюдалась на опыте. На рис. 2 представлена кривая  $\rho(\epsilon_{h\nu})$ , где  $\epsilon_{h\nu}$  – энергия кванта рекомбинационного излучения. Коротковолновый край линии соответствует мень-

шим  $R$  (большая энергия кулоновского взаимодействия в конечном состоянии). По мере возрастания  $R$  к длинноволновому краю линии люминесценции  $\rho$  увеличивается. Наблюдалось также изменение  $\rho$  под действием одноосного сжатия.

Исследование ориентации экситонов в слабом поле  $H$  показало, что  $\rho$  аннигиляционного излучения экситонов в несколько раз меньше, чем рекомбинационного излучения с участием ориентированных акцепторов при прочих равных условиях.

Отметим, в заключение, что простые методы измерения циркулярной поляризации позволяют "чувствовать" энергетические сдвиги магнитных подуровней акцепторов порядка  $10^{-5} \div 10^{-6}$  эв.

Авторы благодарны М.И.Дьяконову и В.И.Перелю за ряд замечаний.

Физико-технический институт  
им. А.Ф.Иоффе

#### Литература

Поступила в редакцию  
22 ноября 1972 г.  
После переработки  
15 января 1973 г.

- [ 1 ] М.И.Дьяконов, В.И.Перель. ФТТ, 14, 5, 1452, 1972.
  - [ 2 ] R.R.Parsons. Phys. Rev. Lett., 23, 1152, 1969.
  - [ 3 ] W.Duncan, E.E.Schneider. Phys. Lett., 7, 23, 1963.
  - [ 4 ] G.L.Bir, E.I.Butikov and G.E. Pikus, I. Phys. Chem. Solids, 24, 1475, 1963.
-