

НАБЛЮДЕНИЕ ОПТИЧЕСКОЙ ОРИЕНТАЦИИ РАВНОВЕСНЫХ ЭЛЕКТРОНОВ В ПОЛУПРОВОДНИКАХ *n*-ТИПА

А.И.Ехинов, В.И.Сафаров

Недавно были осуществлены первые опыты по оптической ориентации свободных носителей в полупроводниках [1 – 5]. Поскольку обычно не происходит ориентации дырок в валентной зоне, из-за быстрой релаксации их спина [6], большинство экспериментов проводилось на материалах *p*-типа, и ориентированными оказывались электроны, заброшенные в зону проводимости циркулярно поляризованным светом. Таким образом ориентировались лишь спины неравновесных носителей – явление, аналогичное оптической ориентации возбужденных атомов газа [7].

Однако ранее нами [3] оптическая ориентация была также обнаружена и в материале *n*-типа. В настоящей работе показано, что это явление обусловлено оптической ориентацией *равновесных электронов*, то есть осуществляется ориентация в основном состоянии, аналогично "оптической накачке" атомов [7].

Возможность оптической ориентации равновесных электронов в полупроводниках *n*-типа была предсказана в теоретической работе Дьяконова и Переля [8]. Этот эффект определяется следующим: циркулярно поляризованный свет забрасывает в зону проводимости преимущественно электроны с одним направлением спина, но скорость рекомбинации электронов не зависит от их спина. При этом, очевидно, должно происходить накопление ориентированных электронов в зоне проводимости. Если время спиновой релаксации τ_s велико по сравнению с временем жизни неравновесного электрона τ , то в ориентированное состояние может быть переведена значительная часть равновесных носителей. Вблизи поверхности степень стационарной ориентации электронов P ($P = (n_+ - n_-)/(n_+ + n_-)$), где n_{\pm} – число электронов с разной ориентацией спина) будет определяться соотношением [8]:

$$P = P_0 I \tau_s (I \tau_s + n_0 L_s)^{-1}, \quad (1)$$

где P_0 – ориентация электрона в момент его рождения светом ($P_0 = 0,5$ для межзонных переходов $\Gamma_8 - \Gamma_6$ [6]), I – интенсивность возбуждения, n_0 – равновесная концентрация электронов, L_s – диффузионная длина, определяемая коэффициентом диффузии электрона и временем τ_s .

Существенной чертой этого эффекта, как видно из формулы (1), является зависимость степени ориентации от интенсивности возбуждения. В области малых ориентаций ($I \tau_s \ll n_0 L_s$) зависимость будет примерно линейной. Отметим, что этого не должно происходить при ориентации неравновесных носителей: их число зависит от интенсивности света, но степень ориентации от интенсивности не зависит.

Наши исследования проводились на кристаллах $\text{Ga}_x\text{Al}_{1-x}\text{As}$ *n*-типа ($\approx 10^{16} \text{ см}^{-3}$) при 4,2°К. Ориентация электронов осуществлялась циркулярно поляризованным светом He – Ne-лазера, что позволило получать интенсивности возбуждения $\approx 5 \cdot 10^{20} \text{ квант/см}^2 \cdot \text{сек}$. Состав кристаллов ($x \approx 0,7$) был подобран так, чтобы ширина запрещенной зоны была

близка энергии кванта возбуждающего света. Степень ориентации электронов, как и раньше [3, 4], определялась по степени циркулярной поляризации рекомбинационной люминесценции S ($S = |(I_+ - I_-)/(I_+ + I_-)|$, где I_{\pm} – интенсивность свечения в циркулярной поляризации с правым и левым вращением). Как было показано Дьяконовым и Перелем [6], для переходов с участием мелких примесей и экситонов $S = 0,5 P$.

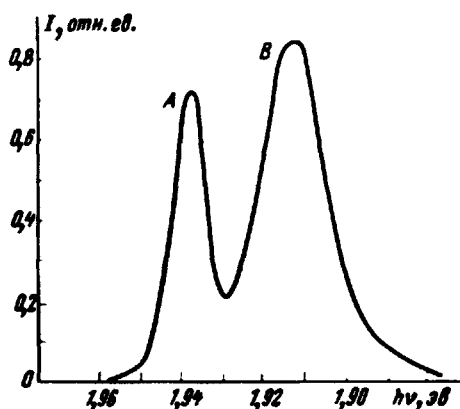


Рис. 1. Спектр фотолюминесценции кристалла $Ga_xAl_{1-x}As$ ($x \approx 0,7$) n -типа ($\approx 10^{16} \text{ см}^{-3}$) при $4,2^\circ\text{K}$

На рис. 1 представлен типичный спектр фотолюминесценции кристаллов при $4,2^\circ\text{K}$. Можно показать¹⁾, что полосы, проявляющиеся в спектре, обусловлены излучательными переходами с донора на акцептор (полоса B) и рекомбинацией экситона (свободного или связанного) – полоса A . Рис. 2 показывает обнаруженную зависимость степени поляризации этих полос люминесценции от интенсивности возбуждения²⁾. Как видно, эти зависимости существенно различны: поляризация полосы A практически постоянна ($S \approx 7\%$), для полосы B степень поляризации линейно менялась с изменением интенсивности света.

Наблюдаемые зависимости могут быть объяснены, если учесть, что при достаточно низкой температуре практически все равновесные электроны выморожены на донорные уровни. При этих условиях в образовании экситона принимают участие только неравновесные носители³⁾, степень ориентации которых не зависит от интенсивности возбуждения. Это и определяет, очевидно, постоянство поляризации линии экситона A .

Линия B обусловлена переходами с донорного уровня. В таких переходах в равной мере участвуют равновесные и неравновесные электроны, находящиеся на донорах, что должно приводить, как говорилось выше,

¹⁾ Подробнее это обстоятельство будет рассмотрено в статье авторов в ФТП за 1971 г.

²⁾ Степень поляризации была постоянной по контуру каждой полосы люминесценции (при фиксированном возбуждении).

³⁾ Об этом свидетельствует и суперлинейная, близкая к квадратичной, зависимость яркости полосы A от интенсивности света накачки.

к накапливанию ориентированных носителей, т. е. к ориентации равновесных электронов. Обнаруженная линейная зависимость степени поляризации люминесценции от интенсивности света накачки прямо показывает, что в данном случае и осуществлялась ориентация равновесных носителей, находящихся на примесном уровне ¹⁾. Наклон прямой *B* на рис. 2 несколько отличался для разных образцов, что может быть, в частности, обусловлено различием n_0 (см. формулу (1)).

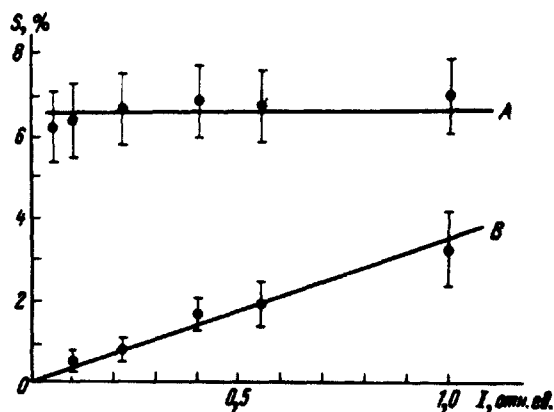


Рис. 2. Зависимость степени циркулярной поляризации S полос люминесценции *A* и *B* от интенсивности циркулярно поляризованного света накачки I для кристаллов $n - \text{Ga}_{0,7}\text{Al}_{0,3}\text{As}$ при $4,2^\circ\text{K}$

Измерения деполяризации люминесценции в поперечном магнитном поле дали значения времени жизни ориентированного спина [2 – 4]: для экситона $A \approx 5 \cdot 10^{-10}$ сек, и для донора (полоса *B*) — $1,2 \cdot 10^{-9}$ сек. Очевидно, в обоих случаях это время определяется в основном временем спиновой релаксации. Таким образом, можно заключить, что спиновая релаксация несколько отличается для электрона, связанного на доноре или в экситоне.

Максимальная степень поляризации полосы *B* составляла $\approx 0,03$. Это соответствует тому, что ориентированными оказались $\approx 6\%$ всех электронов на донорах. По формуле (1) может быть оценена глубина L_s , на которую проникает ориентация. В нашем случае $L_s \approx 1,0$ мк, что дает оценку подвижности электронов при $4,2^\circ\text{K}$ порядка (или меньше) 10^3 в.см²/сек.

¹⁾ В некоторых образцах интенсивность линии *B* (I_B) существенно нелинейно (сублинейно) зависела от интенсивности накачки (I). При этом, однако, всегда наблюдалась линейная зависимость S от I_B — поскольку именно скорость рекомбинации электронов (и связанная с этим яркость люминесценции) определяет темп накопления ориентированных электронов на донорном уровне.

Проведенные опыты показывают, что в полупроводниках *n*-типа может быть получена заметная ориентация электронов на донорных уровнях даже при таких интенсивностях возбуждения, когда концентрация неравновесных носителей мала по сравнению с концентрацией равновесных электронов.

В заключение авторы выражают благодарность В.И.Перелю и М.И.Дьяконову за полезные обсуждения, и Е.Ф.Гроссу за поддержку и интерес к работе.

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

Поступила в редакцию
2 февраля 1971г.

Литература

- [1] G.Lampel. Phys. Rev. Lett., 20, 491, 1968.
 - [2] R.R.Parsons. Phys. Rev. Lett., 23, 1152, 1969.
 - [3] А.И.Екимов, В.И.Сафаров. Письма в ЖЭТФ, 12, 293, 1970.
 - [4] Д.З.Гарбузов, А.И.Екимов, В.И.Сафаров. Письма в ЖЭТФ, 13, 36, 1971.
 - [5] Б.П.Захарченя, В.Г.Флейшер, Р.Д.Джиоев, Ю.П.Вещунов, И.Б.Русанов. Письма в ЖЭТФ, 13, 195, 1971.
 - [6] М.И.Дьяконов, В.И.Перель. ЖЭТФ, 60, вып. 5, 1971.
 - [7] С.Cohen-Tannondji, A.Kastler. Progress in Optics, 5, 33, 1966.
 - [8] М.И.Дьяконов, В.И.Перель. Письма в ЖЭТФ, 13, 206, 1971.
-