

НЕРАВНОВЕСНАЯ ОРИЕНТАЦИЯ ЭЛЕКТРОНОВ В ЭЛЕКТРОННО-ДЫРОЧНЫХ КАПЛЯХ В КРЕМНИИ В МАГНИТНОМ ПОЛЕ

П. Д. Алтухов, Г. Е. Пикус, А. А. Рогачев

Исследована циркулярная поляризация рекомбинационного излучения электронно-дырочных капель в кремнии в магнитном поле до 50 кэ при температуре $1,9\text{К}$. Обнаружено, что электроны, ориентированные в магнитном поле в свободных экситонах, сохраняют свою ориентацию после связывания экситонов в ЭДК в течение времени жизни капель.

В ранее опубликованной нами работе [1] была обнаружена большая величина поляризации излучения электронно-дырочных капель (ЭДК) в кремнии в магнитном поле. Дальнейшие исследования показали, что наблюдаемая поляризация связана с неравновесной ориентацией электронов в ЭДК в результате сохранения ориентации, возникающей до конденсации, когда электроны находятся в свободных экситонах (СЭ).

Эксперименты проводились на пленках чистого кремния толщиной 250 мкм , возбуждаемая поверхность которых травилась в полирующем травителе, а обратная тщательно полировалась механически. Циркулярная поляризация измерялась в геометрии Фарадея с помощью вращающейся четвертьволновой пластинки и неподвижного поляроида [2]. Излучение возбуждалось аргоновым лазером.

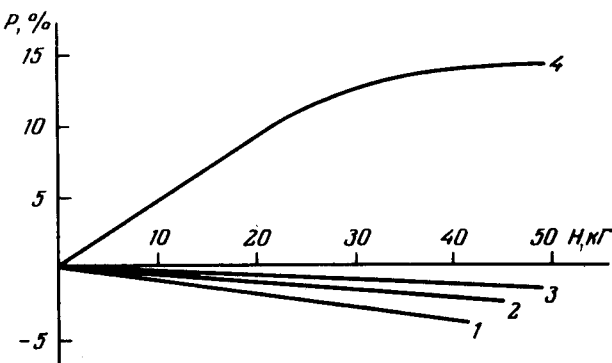


Рис. 1. Зависимость степени циркулярной поляризации излучения P от магнитного поля $H \parallel [111]$ при температуре $T = 1,9\text{К}$ в чистом кремнии ($\rho \sim 6500 \text{ ом} \cdot \text{см}$): 1, 2, 3 - ЭДК, $h\nu = 1,087 \text{ эв}$, TO -фонон; уровень возбуждения растет от 1 к 3; 4 - свободный экситон, $h\nu = 1,098 \text{ эв}$, TO -фонон; 3 и 4 соответствуют одному уровню возбуждения.

Уровень шума установки соответствует поляризации $0,5\%$

На рис. 1 представлена зависимость степени циркулярной поляризации излучения СЭ и ЭДК от магнитного поля H при разных уровнях возбуждения. Соответствующее спектральное распределение поляризации и излучения в поле $H = 48 \text{ кэ}$ показано на рис. 2. Спектры излучения нормированы по максимуму линии излучения ЭДК. Из рис. 2 видно, что максимум спектрального распределения поляризации находится на коротковолновом краю линии излучения ЭДК, а величина поляризации возрастает при относительном увеличении интенсивности излучения СЭ. В примесных образцах, содержащих $3 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$ атомов бора излучение ЭДК

оказалось практически неполяризованным. В этих образцах линия излучения СЭ отсутствовала из-за быстрого их связывания на примесях, а линия излучения экситона, связанного на нейтральном акцепторе (1,0933 эв), была сильно поляризована [1].

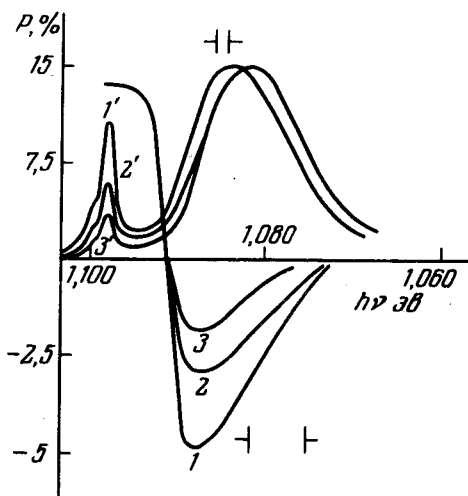


Рис. 2. Спектральное распределение излучения (1', 2', 3') и поляризации P (1, 2, 3) в поле H = 48 кэ при температуре T = 1,9К в чистом кремнии ($\rho \sim 6500 \text{ ом} \cdot \text{см}$): 1 соответствует 1', 2 - 2', 3 - 3'

Аномально большая величина поляризации линии излучения ЭДК и зависимость степени поляризации от относительной интенсивности излучения СЭ свидетельствуют о том, что эта поляризация является неравновесной. Знак поляризации обратный знаку поляризации излучения СЭ и экситонов, связанных на атомах бора, свидетельствует о том, что в ЭДК ориентированы электроны. (В работе [1] знак поляризации излучения ЭДК указан неверно). Из кривых на рис. 2 следует, что при H = 48 кэ для наименьшего уровня возбуждения степень ориентации электронов максимальна и составляет $P_d = (n^+ - n^-)/(n^+ + n^-) = 0,4$ (n^+ и n^- - числа электронов, ориентированных по полю и против поля соответственно). Фактор деполаризации излучения, необходимый для определения истинной величины поляризации, определялся, как и в [1], по степени экситонной поляризации, величина и знак которой связаны с ориентацией дырок. Сильным аргументом в пользу предположения о неравновесной ориентации электронов в ЭДК является спектральное распределение поляризации, поскольку при равновесной ориентации поляризация имеет максимум на длинноволновом краю линии.

Зависимость степени поляризации излучения ЭДК от уровня возбуждения показывает, что в условиях эксперимента время спиновой релаксации электрона в экситоне τ_s^e сравнимо с временем жизни экситона τ_{ex} , которое определяется скоростью связывания СЭ в ЭДК, и поэтому степень ориентации электронов в экситоне P_{ex}^o не достигает равновесного значения P_{ex}^o и может быть представлена как

$$P_{ex} = \frac{P_{ex}^o}{1 + (1 + |P_{ex}^o|) \frac{\tau_s^o}{\tau_{ex}}} \quad (1)$$

Время τ_{ex} можно определить из соотношения интенсивностей линий излучения СЭ J_{ex} и ЭДК — J_d :

$$\tau_{ex} = \tau_d \frac{J_{ex}}{J_d} \frac{\tau_{ex}^0}{\tau_d^0}, \quad (2)$$

где τ_{ex}^0 и τ_d^0 — излучательные времена в экситоне и ЭДК соответственно, $\tau_d \approx 1,5 \cdot 10^{-7}$ сек [3] — время жизни пар в ЭДК, не зависящее от уровня возбуждения. С помощью [2] можно найти, что при переходе от кривой 3 к кривой 1 на рис. 2 τ_{ex} меняется примерно от 10^{-7} до 10^{-8} сек.

Как показывают оценки единственным из известных механизмов спиновой релаксации электронов, который обеспечивает более быструю по сравнению с ЭДК релаксацию в экситоне и приводит к $\tau_s^e < 10^{-7}$ сек, является обменное взаимодействие электронов с дырками. Согласно [4], этот механизм при $\Delta \tau_s^h / \hbar \ll 1$ дает

$$\tau_s^e = \frac{8}{5} \frac{\hbar^2}{\Delta^2 \tau_s^h} [1 + (\omega \tau_s^h)^2]. \quad (3)$$

Здесь Δ — обменное расщепление в экситоне, τ_s^h — время спиновой релаксации дырок в экситоне, $\hbar \omega = (g_e - g_h) \mu_0 H$, g_e и g_h — g -факторы электрона и дырки. В соответствии с (1) и (3) при указанных значениях τ_{ex} и $H \sim 50$ кэ степень ориентации электронов в экситоне может достигать величины $P_{ex} > 0,5$ при $\Delta \gtrsim 10^{-5}$ эв.

Степень неравновесной ориентации электронов в ЭДК определяется выражением

$$P_d = \frac{P_{ex}}{1 + \frac{\tau_d}{\tau_s^d}}, \quad (4)$$

где τ_s^d — время спиновой релаксации электронов в ЭДК. Большое экспериментальное значение P_d показывает, что τ_s^d в ЭДК превышает $\tau_d \approx 1,5 \cdot 10^{-7}$ сек. При $\Delta \gtrsim 10^{-5}$ эв основным механизмом спиновой релаксации электронов в ЭДК является обменное взаимодействие электронов с дырками, которое согласно [5] дает

$$\tau_s^d \approx 10^3 \frac{E_B^3 \hbar}{(E_F^e \Delta)^2} \approx 10^{-10} \left(\frac{E_B}{\Delta} \right)^2 \text{ сек}. \quad (5)$$

Здесь E_B и E_F^e — боровская и фермиевская энергии электронов. Из выражений (4) и (5) видно, что для $\tau_d \approx 1,5 \cdot 10^{-7}$ сек электроны не будут терять свою ориентацию в ЭДК при $\Delta < 10^{-4}$ эв. Интервал значений $\Delta \sim 10^{-4} \div 10^{-5}$ эв согласуется с теоретическими оценками величины Δ в кремнии.

Следует отметить, что значительная ориентация электронов в ЭДК должна была бы привести к значительному изменению положения и формы линии излучения. Однако, изменений формы и положения линии в зависимости от магнитного поля обнаружить не удалось.

В связи с этим отметим, что значительная неравновесная ориентация электронов могла бы иметь место и в биэкситоне, если в основном состоянии биэкситона полный момент дырок $J = 0$, а электроны находятся в разных долинах. При этом из-за уменьшения эффективного обменного взаимодействия электронов с дырками, которое в этих условиях определяется величиной $\Delta_{ef} = \Delta^2 / \Delta_{20}$ (где Δ_{20} — разность энергий состояний с $J = 2$ и $J = 0$), время спиновой релаксации электронов в биэкситоне должно значительно возрастать. Эта модель объясняет независимость формы линии излучения от степени ориентации, но не может объяснить спектральное распределение поляризации, а также наблюдаемое на эксперименте смещение коротковолнового края линии ЭДК к экситонной линии при уменьшении уровня возбуждения. Это смещение линии (не связанное с наличием магнитного поля) можно объяснить изменением энергии связи в ЭДК при уменьшении радиусов капель.

В заключение мы хотим обратить внимание на тот факт, что поляризация излучения, расположенного в спектре на рис. 2 между экситонной линией и линией ЭДК, имеет тот же знак и близка по величине к экситонной поляризации. Этот факт позволяет считать, что указанное излучение не принадлежит очень мелким каплям. По нашему мнению это излучение может быть связано только с комплексами со свободной дыркой (экситон + электрон) или с комплексами с двумя дырками с полным моментом $J = 2$ (экситон + дырка или биэкситон). При повышении температуры от 1,9 до 5К излучение в этой области спектра резко падало.

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

Поступила в редакцию
21 декабря 1976 г.

Литература

- [1] П.Д.Алтухов, Г.Е.Пикус, А.А.Рогачев. Письма в ЖЭТФ, 23, 635, 1976.
- [2] В.М.Аснин, Ю.Н.Ломасов, А.А.Рогачев. Письма в ЖТФ, 1, 596, 1975.
- [3] W. Schmid. Sol. St. Comm., 19, 347, 1976.
- [4] Г.Е.Пикус, Г.Л.Бир. ЖЭТФ, 67, 788, 1974.
- [5] Г.Л.Бир, А.Г.Аронов, Г.Е.Пикус. ЖЭТФ, 69, 1382, 1975.