

Письма в ЖЭТФ, том 12, стр. 293 – 297

20 сентября 1970 г.

ОПТИЧЕСКАЯ ОРИЕНТАЦИЯ НОСИТЕЛЕЙ ПРИ МЕЖЗОННЫХ ПЕРЕХОДАХ В ПОЛУПРОВОДНИКАХ

А.И.Екимов, В.И.Сафаров

Оптическая ориентация, то есть создание преимущественной ориентации спина электронов при поглощении поляризованного света, является одним из наиболее плодотворных методов спектроскопии и широко применяется при исследовании атомов и ионов [1]. Наблюдение оптической ориентации в полупроводниковых кристаллах позволило бы применить методы, развитые в атомной спектроскопии, для исследования полупроводников; в частности, осуществить точные измерения времен жизни, времени спиновой релаксации, значений g -фактора носителей и т.д. Однако, к настоящему времени имеется только одно сообщение о подобных исследованиях в полупроводниковых кристаллах [2].

В настоящей работе сообщается об обнаружении оптической ориентации свободных носителей в кристаллах $Ga_xAl_{1-x}As$ при возбужде-

нии электронов циркулярно поляризованным светом (σ^\pm) из валентной зоны в зону проводимости. Степень ориентации определялась по поляризации рекомбинационного излучения. Исследования проводились на материале *n*- и *p*-типа при 4,2 и 77°K. В частности, для *p*-материала при 77°K была получена значительная степень ориентации электронов ($0,46 \pm 0,06$) и по деполяризации люминесценции в поперечном магнитном поле определено время жизни электронов в зоне проводимости $\tau = (1,2 \pm 0,2) 10^{-10}$ сек.

Для возбуждения люминесценции использовался He-Ne лазер ($h\nu = 1,959$ эв). Состав смешанных кристаллов ($x \approx 0,7$) был выбран таким образом, чтобы излучение лазера попадало в область межзонных переходов вблизи края собственного поглощения. Степень поляризации люминесценции $S = |(I_{\sigma^+} - I_{\sigma^-}) / (I_{\sigma^+} + I_{\sigma^-})|$, где I_{σ^\pm} — интенсивность излучения в поляризации σ^+ или σ^- , измерялась с помощью специального модулятора — вращающейся пластинки $\lambda/4$. Во всех проведенных опытах $S \neq 0$ было обнаружено *только* при возбуждении циркулярно поляризованным светом; при этом в дифференциальном спектре $(I_{\sigma^+} - I_{\sigma^-})$ знак сигнала менялся при изменении поляризации возбуждающего света с σ^+ на σ^- .

В спектре кристаллов *p*-типа ($Zn \sim 10^{17}$ см⁻³) при 4,2 и 77°K наблюдается одна полоса люминесценции, обусловленная переходами на мелкий акцептор ($E_i \approx 0,03$ эв). Положение полосы в смешанных кристаллах меняется в соответствии с изменением ширины запрещенной зоны в зависимости от состава, и в исследованных образцах составляло 1,89 и 1,91 эв. Было обнаружено, что при возбуждении циркулярно поляризованным светом люминесценция сильно поляризована, причем степень поляризации остается постоянной по всей полосе. При 77°K степень поляризации для обоих образцов составляла $S = 0,23 \pm 0,02$.

Значительная поляризация люминесценции показывает, что в данном случае осуществлялась эффективная ориентация создаваемых светом свободных электронов, — эффектом оптической ориентации дырок можно пренебречь, поскольку общее число дырок в *p*-материале намного превосходит число дырок, создаваемых светом. Степень ориентации (P) определяется как $P = |(n_{+1/2} - n_{-1/2}) / (n_{+1/2} + n_{-1/2})|$, где $n_{\pm 1/2}$ — число электронов со спином по или против направления распространения возбуждающего света. При наличии релаксации

$$P = \frac{1}{1 + \tau / T_1} P_0 [1],$$

где τ — время жизни электрона, T_1 — время релаксации спина электрона, P_0 — максимальная степень ориентации, определяемая вероятностями переходов с созданием электрона со спином $+1/2$ или $-1/2$ при поглощении циркулярно поляризованного света. Структура зон кристаллов Ga_{0,7}Al_{0,3}As такая же, как и GaAs; и для межзонных переходов ($\Gamma_{3/2}^{15v} - \Gamma_{1pr}^{1/2}$) согласно известным правилам отбора $P_0 = 0,5$. Вероятности рекомбинационных переходов с участием мелких примесей

в приближении эффективной массы такие же, как и для межзонных; в этом случае степень поляризации люминесценции при рекомбинации ориентированных электронов должна составлять $S = 0,5 P$.

Из измеренных значений степени поляризации следует, что в наших опытах достигалась степень ориентации электронов $P = 0,46 \pm 0,06$, близкая к максимальной ($P_0 = 0,5$). Это показывает, что в исследованных кристаллах $\tau/T_1 \ll 1$, то есть время релаксации спина T_1 значительно (по крайней мере в 3–4 раза) превосходило время жизни τ .

Для исследованных образцов энергия кванта возбуждающего света на 0,02 и 0,04 эв превосходила ширину запрещенной зоны, и, следовательно, имела место релаксация создаваемых светом ориентированных электронов на дно зоны проводимости. Обнаруженная при этом высокая степень поляризации показывает, что в данном случае релаксация электронов по энергии не сопровождалась релаксацией спина.

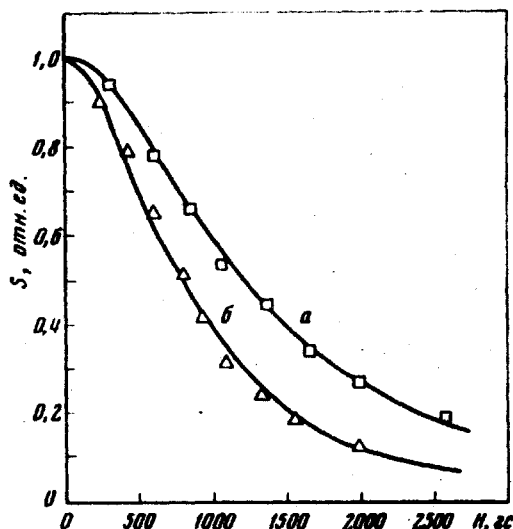


Рис. 1. Зависимость степени поляризации люминесценции S от величины поперечного поля в кристаллах p -типа: a — при 77°K и b — $4,2^\circ\text{K}$. Сплошные кривые представляют собой Лорентцевские контуры с полушириной: a — 1200 гс и b — 800 гс

Время жизни электронов τ может быть определено по деполяризации люминесценции в поперечном магнитном поле [1]. Зависимость степени поляризации от магнитного поля имеет Лорентцовский вид

$$S \sim \frac{1}{1 + (\omega_L g T_{1M})^2},$$

где ω_L — частота классической Ларморовой прецессии, g — фактор электрона, T_{1M} — время жизни магнитного момента $1/T_{1M} = 1/T_1 + 1/\tau$. Поскольку в нашем случае $\tau/T_1 \ll 1$, то время T_{1M} , определяемое из магнитных измерений, будет практически равно τ . Значение g -фактора электрона в GaAs составляет 0,5 [3], для смешанных кристаллов $\text{Ga}_{0,7}\text{Al}_{0,3}\text{As}$ с учетом изменения зонных параметров [4] можно оценить $g = 1,0$.

Рис.1, a показывает, что наблюдаемое уменьшение поляризации при увеличении магнитного поля хорошо описывается Лорентцевским контуром с полушириной — 1200 гс, что дает время жизни $\tau = (1,2 \pm 0,2) \cdot 10^{-10}$ сек.

Это значение согласуется с оценками времени жизни неосновных носителей ($10^{-10} - 10^{-12}$ сек), полученными при исследовании явлений переноса в таких кристаллах, как *p*-GaAs [5].

Таким образом, наблюдение оптической ориентации позволяет относительно просто измерять короткие времена жизни носителей, что трудно сделать достаточно точно другими методами.

При $4,2^\circ\text{K}$ в этих же кристаллах наблюдалась меньшая степень поляризации $S = 0,10 \pm 0,02$ и измерения в магнитном поле (рис.1,б) дали $T_{1M} = (1,8 \pm 0,03) \cdot 10^{-10}$ сек. Уменьшение степени ориентации электронов при $4,2^\circ\text{K}$ может быть вызвано или увеличением отношения τ/T_1 , или тем, что при $4,2^\circ\text{K}$ рекомбинация идет не с дна зоны проводимости, а с донорного уровня, и при релаксации зона - уровень ориентация электронов частично теряется.

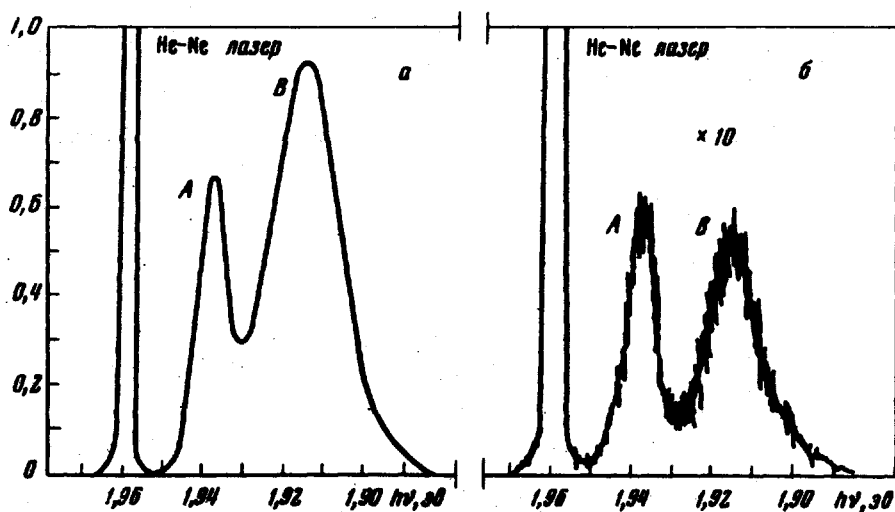


Рис. 2. Поляризованная люминесценция в кристаллах *n*-типа при $4,2^\circ\text{K}$: *a* - спектр люминесценции, *б* - дифференциальный ($I_{\sigma^+} - I_{\sigma^-}$) спектр поляризации излучения того же образца при возбуждении циркулярно поляризованным светом σ^+

В *n*-материале при $4,2^\circ\text{K}$ также была получена заметная ориентация носителей. В спектре этих кристаллов при $4,2^\circ\text{K}$ наблюдаются две полосы излучения (рис.2,а): полоса А, расположенная вблизи края поглощения и обусловленная переходами с участием мелкого донора или экситона, и полоса В, связанная с переходами на мелкий акцептор. Степень поляризации для этих полос (рис.2) была существенно различной: $S = 0,11 \pm 0,03$ для полосы А и $S = 0,06 \pm 0,03$ для полосы В. Для этих кристаллов также наблюдалась деполяризация люминесценции в поперечном магнитном поле ($T_{1M} \approx 10^{-10}$ сек), однако ввиду слабости сигналов время жизни не было измерено точно.

Авторы выражают благодарность Ж.И.Алферову, Д.З.Гарбузову, О.А. Нинуа и В.Г.Трофиму за предоставление кристаллов с измеренными спектрами люминесценции и за поддержку работы, а также М.И.Дьяконову за полезные обсуждения.

Физико-технический институт

им.А.Ф.Иоффе
Академии наук СССР

Поступила в редакцию
6 августа 1970 г.

Литература

- [1] C.Cohen-Tannoudji, A.Kastler. *Progress in Optics*, 5, 33, 1966.
 - [2] R.R.Parsons. *Phys. Rev.Lett.*, 23, 1152, 1969.
 - [3] W.Duncan, E.E.Schneider. *Phys. Lett.*, 7, 23, 1963.
 - [4] L.Roth, B.Lax, S.Zwerdling. *Phys. Rev.*, 114, 90, 1959.
 - [5] В.Г.Кустов, В.И.Орлов. *ФТН*, 3, 1728, 1969.
-