

Письма в ЖЭТФ, том 13, стр. 36 – 40

5 января 1971 г.

**ИЗМЕРЕНИЕ ВРЕМЕНИ ЖИЗНИ
И ВРЕМЕНИ СПИНОВОЙ РЕЛАКСАЦИИ ЭЛЕКТРОНОВ
В ПОЛУПРОВОДНИКАХ МЕТОДОМ ОПТИЧЕСКОЙ ОРИЕНТАЦИИ**

Д.З.Гарбузов, А.И.Екимов, В.И.Сафаров

Как было недавно показано [1,2], в полупроводниковых кристаллах в результате межзонных переходов, вызванных поглощением поляризованного света, может быть достигнута значительная ориентация спинов неравновесных носителей. Наблюдение оптической ориентации позволяет распространить на полупроводники методы исследований, широко используемые в атомной спектроско-

пии [3], в частности, провести в стационарных условиях исследование релаксационных процессов в кристалле.

В настоящей работе метод оптической ориентации был использован для измерения температурной зависимости времени жизни и времени спиновой релаксации неравновесных электронов в интервале $77 - 300^\circ\text{K}$ на смешанных кристаллах $\text{Ga}_x\text{Al}_{1-x}\text{As}$ p -типа, для которых ранее [2] была получена при 77°K сильная ориентация электронов.

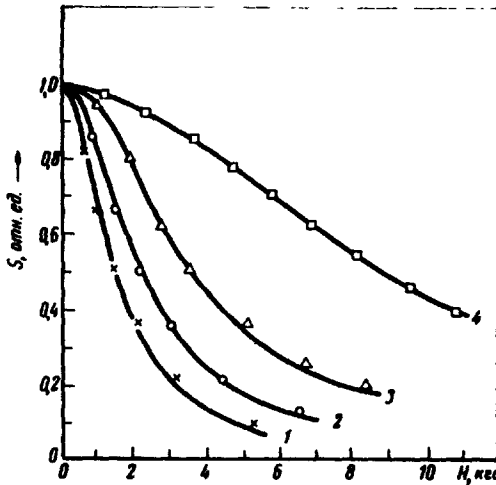


Рис. 1. Зависимость степени поляризации люминесценции от напряженности поперечного магнитного поля в кристаллах $\text{Ga}_{0,7}\text{Al}_{0,3}\text{As}$ p -типа при различных температурах: 1 — 77°K , 2 — 169°K , 3 — 220°K , 4 — 300°K . Для всех температур за единицу принято значение степени поляризации при $H = 0$

Ориентация неравновесных электронов осуществлялась в результате преимущественного заселения одной из подзон проводимости с $m = 1/2$ или $m = -1/2$ при возбуждении электронов циркулярно поляризованным светом (σ^+ или σ^- соответственно) из валентной зоны в зону проводимости. Степень стационарной ориентации спинов электронов (P) при наличии релаксации определяется соотношением [1-3]

$$P = \frac{P_0}{1 + \tau/T_1}, \quad (1)$$

где T_1 — время спиновой релаксации, а τ — время жизни неравновесного электрона в зоне проводимости, P_0 — ориентация в отсутствии релаксации, определяемая вероятностями переходов в состоянии с $m = 1/2$ или $m = -1/2$ при поглощении циркулярно поляризованного света. В нашем случае для межзонных переходов $\Gamma_{15}^{3/2}$ вал — $\Gamma_1^{1/2}$ пр $P_0 = 0,5$ [1, 2].

Времена τ и T_1 определяют также полное время жизни ориентированного спина T_{1M} :

$$\frac{1}{T_{1M}} = \frac{1}{\tau} + \frac{1}{T_1}, \quad (2)$$

которое может быть измерено по уменьшению степени ориентации электронов в поперечном магнитном поле (явление, аналогичное эффекту Ханле в атомной спектроскопии [3]). При этом зависимость степени ориентации от напряженности магнитного поля (H) имеет лорентцевский вид:

$$P \sim \frac{1}{1 + (\omega_L g T_{1M})^2}. \quad (3)$$

где $\omega_L = eH/2mc$ — частота классической ларморовой прецессии, g — спектроскопический фактор электрона. В исследуемых кристаллах $\text{Ga}_x\text{Al}_{1-x}\text{As}$ можно принять $g = 1$ [2].

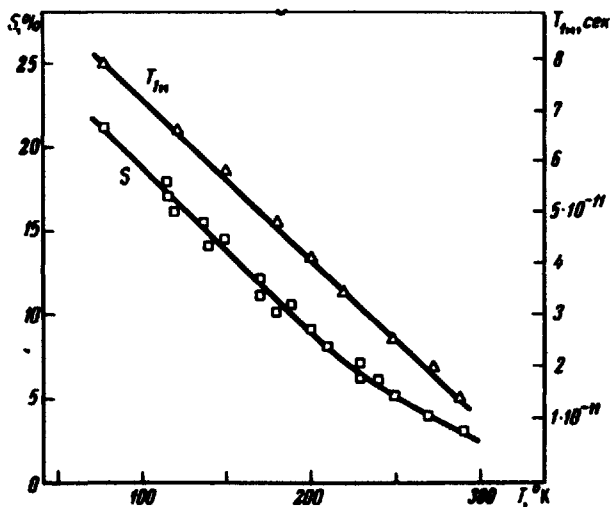


Рис. 2. Зависимость степени поляризации люминесценции S и времени T_{1M} (полученного из измерения деполяризации люминесценции в магнитном поле) для кристаллов $\text{Ga}_{0,7}\text{Al}_{0,3}\text{As}$

Наблюдение спиновой ориентации неравновесных электронов осуществлялось по поляризации рекомбинационного излучения зона проводимости — мелкий акцептор. Связь степени циркулярной поляризации люминесценции (S) и степени ориентации спинов определяется правилами отбора для рекомбинационных переходов, и в рассматриваемом случае $S = 0,5 P$ [2].

Таким образом, как следует из приведенных соотношений, по экспериментальным измерениям абсолютного значения S и деполяризации люминесценции в поперечном магнитном поле могут быть определены значения времени жизни τ и времени спиновой релаксации T_1 неравновесных электронов.

В настоящей работе нами проведены измерения S и T_{1M} на кристаллах $Ga_{0,7}Al_{0,3}As$ в температурном интервале $77 - 300^\circ K$. На рис. 1 представлена зависимость степени поляризации люминесценции от напряженности магнитного поля при различных температурах. Видно, что полуширина кривых деполяризации, которая определяет время T_{1M} (3), сильно возрастает с увеличением температуры. Температурная зависимость времени T_{1M} , полученная из этих кривых, представлена на рис. 2. Там же приведена измеренная зависимость степени поляризации S (при $H = 0$) от температуры. С повышением температуры степень поляризации падает от $S = 0,21 \pm 0,02$ при $77^\circ K$ до $S = 0,03 \pm 0,01$ при $300^\circ K$. По измеренным значениям S и T_{1M} в численные значения τ и T_1 при различных температурах. Эти результаты представлены на рис. 3. Как видно, время жизни $\tau = 10^{-10}$ сек оказалось практически независимым от температуры в интервале $77 - 300^\circ K$. Время же спиновой релаксации T_1 в этом температурном интервале падает примерно в 60 раз.

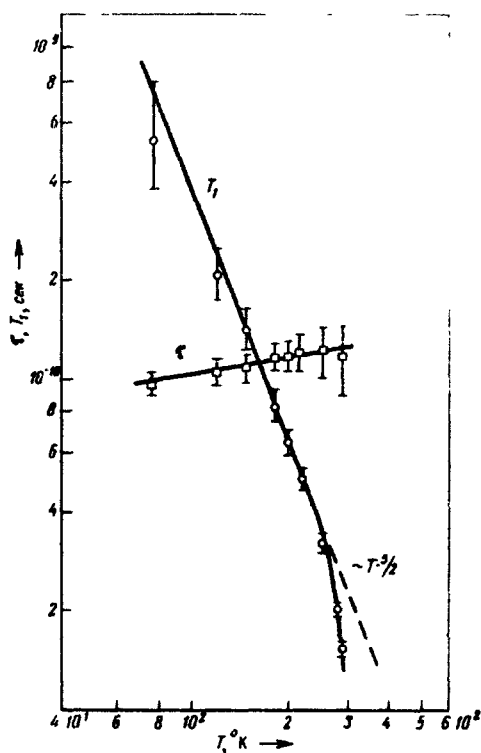


Рис. 3. Температурная зависимость времени жизни τ и времени спиновой релаксации T_1 неравновесных электронов, полученная из данных рис. 2

Сильная зависимость времени спиновой релаксации от температуры характерна для случая взаимодействия спина с колебаниями решетки. Для релаксации на акустических колебаниях при $T < \theta_g$ (θ_g — температура Дебая) теоретически предсказывается степенная зависимость времени релаксации от температуры: $T_1^{-1} \sim (T^\circ K)^{5/2}$ [4]. На рис. 3 видно, что в области $77 - 240^\circ K$ ¹⁾, наблюдаемая зависимость T_1 хорошо описывается законом $T^{5/2}$. Стклонение от этой законо-

¹⁾ Из данных по ИК спектрам кристаллов $Ga_xAl_{1-x}As$ [5] можно оценить $\theta_g = 400^\circ K$ для случая $x = 0,7$.

мерности в области более высоких температур вызвано, по-видимому, вкладом оптических колебаний, которыми уже нельзя пренебрегать при этих температурах.

Время жизни τ менялось незначительно от $\tau = 0,9 \cdot 10^{-10}$ сек при 77°K до $\tau = 1,2 \cdot 10^{-10}$ сек при 300°K . Однако интенсивность люминесценции при этом падала примерно на порядок. Сопоставление этих фактов позволяет заключить, что в данном случае время жизни электронов относительно излучательных переходов по крайней мере в 5 — 6 раз превышает общее время жизни неравновесных носителей. Общее время жизни, по-видимому, определяется безызлучательной рекомбинацией через глубокие уровни, и в этом случае, как известно [6], может оставаться постоянным при изменении температур в широких пределах. Как показывают оценки, увеличение излучательного времени жизни при повышении температуры может быть обусловлено уменьшением числа нейтральных акцепторов ($E_i \approx 0,03 \text{ эВ}$), на которые происходит излучательная рекомбинация.

Из заключения отметим, что проведенные измерения общего времени жизни в совокупности с измерениями квантового выхода позволяют определить абсолютное значение излучательного времени жизни.

Авторы выражают благодарность Ж.И. Алферову за постановку задачи, В.И. Перелю, М.И. Дьяконову и С.Т. Павлову за полезные обсуждения.

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

Поступила в редакцию
17 ноября 1970 г.

Литература

- [1] R.R.Parsons. Phys. Rev. Lett., 23, 1152, 1969.
- [2] А.И.Екимов, Б.И.Сафаров. Письма в ЖЭТФ, 12, 293, 1970.
- [3] С.Cohen-Tannoudji, A.Kastler. Progress in Optics, 5, 33, 1966.
- [4] С.Т.Павлов. ФТТ, 8, 900, 1966.
- [5] M.Hegems, G.L.Pearson. Phys. Rev., 1B, 1576, 1970.
- [6] С.М.Рывкин. Фотоэлектрические явления в полупроводниках М., Физматгиз, 1963.