

**ПОДАВЛЕНИЕ ПРОДОЛЬНЫМ МАГНИТНЫМ ПОЛЕМ
СПИНОВОЙ РЕЛАКСАЦИИ ЭЛЕКТРОНОВ ПРОВОДИМОСТИ
В ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ КРИСТАЛЛАХ БЕЗ ЦЕНТРА ИНВЕРСИИ**

В.А.Марущак, М.Н.Степанова, А.Н.Титков

Экспериментально показано, что орбитальное движение электронов проводимости в магнитном поле эффективно ослабляет спиновую релаксацию электронов, вызванную спин-орбитальным расщеплением зоны проводимости в кристаллах без центра инверсии.

Недавние исследования спиновой релаксации электронов проводимости в ряде полупроводниковых кристаллов группы A_3B_5 ¹⁻⁴ показали, что в достаточно чистых кристаллах основным механизмом спиновой релаксации является механизм Дьяконова — Переля (механизм ДП) ^{5,6}, связанный со спиновым расщеплением зоны проводимости в кристаллах без центра инверсии. Это расщепление описывается выражением $\hbar\vec{\Omega} = \alpha(2m_e^{3/2} E_g^{1/2})^{-1}\vec{k}$, где α — безразмерная константа, m_e — эффективная масса электрона, E_g — ширина запрещенной зоны, а компоненты вектора \vec{k} определяются через компоненты квази-импульса электрона $k_x = p_x(p_y^2 - p_z^2)$ и т. д. Наличие спинового расщепления зоны проводимости эквивалентно влиянию на электронный спин некоторого эффективного магнитного поля, величина и ориентация которого определяются величиной и ориентацией импульса электрона. Прецессия электронного спина в таком эффективном поле и является причиной спиновой релаксации в механизме ДП. Быстрое рассеяние электронов по импульсу приводит к частой смене осей прецессии, что вызывает замедление релаксации.

Ранее Е.Л.Ивченко было высказано предположение о возможности подавления механизма ДП продольным относительно спина внешним магнитным полем ⁷. При этом указывалось на две возможные причины такого эффекта. Одной из них является ларморова прецессия электронного спина в достаточно сильном внешнем поле B с частотой $\Omega_L = g\mu_B B/\hbar$, подавляющая прецессию в случайно меняющемся эффективном поле. Влияние внешнего поля должно стать заметным тогда, когда электронный спин уже перестанет успевать следить за изменением эффективного поля, т. е. при $\Omega_L > \tau_p^{-1}$, где τ_p — время рассеяния электронов по импульсу, определяющее частоту изменения эффективного поля.

Второй возможной причиной ослабления механизма ДП называлось орбитальное движение электронов во внешнем магнитном поле. Прецессия электронного импульса вокруг поля B с циклотронной частотой $\Omega_C = eB/m_e c$ может рассматриваться как некий дополнительный механизм рассеяния импульса и поэтому, как отмечалось выше, должна вызывать ослабление механизма ДП. Ослабление спиновой релаксации при этом должно наблюдаться в полях, при которых изменение ориентации импульса будет определяться преимущественно его прецессией в поле B , т. е. при $\Omega_C > \tau_p^{-1}$.

В данной работе изучалось влияние продольного магнитного поля на скорость спиновой релаксации оптически ориентированных фотоэлектронов в кристаллах GaAs с концентрацией акцепторов $4 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ при $T = 77 \text{ К}$. В этих условиях спиновая релаксация электронов проводимости в GaAs целиком обуславливается механизмом ДП ³. Применение в работе метода оптической ориентации электронных спинов ⁸ позволило, анализируя степень циркулярной поляризации спектров люминесценции и ее изменение в поперечном магнитном поле, непосредственно находить времена спиновой релаксации τ_S , а также времена жизни τ свободных электронов, лежавшие в исследованных образцах в интервалах $0,6 - 1,3 \cdot 10^9$ и $0,5 - 1,5 \cdot 10^{-8} \text{ с}$, соответственно. Влияние продольного магнитного поля на скорость спиновой релаксации τ_S^{-1} изучалось по изменению с полем степени циркулярной поляризации люминесценции, определяемой выражением $\rho = 0,25/(1 + \tau/\tau_S)$ ⁸. При этом принималось, что τ не зависит от магнитного поля. Действительно, найденные значения τ обуславливаются конкуренцией излучательного и безызлучательного процессов рекомбинации ⁹. Если бы имело место изменение эффективностей этих процессов в поле, то оно должно было бы проявиться в изменении интегральной интенсивности люминесценции, что не наблюдалось.

Влияние продольного магнитного поля на τ_S^{-1} в различно компенсированных образцах, отличающихся подвижностями носителей, показано на рис. 1. Действительно, как и предсказывалось теорией ⁷, наблюдается замедление спиновой релаксации в поле, причем эффект тем сильнее, чем больше подвижность электронов в образце. Поскольку в GaAs $\Omega_L/\Omega_C = 0,05$ ⁷, то следовало предположить, что ослабление спиновой релаксации связано с орбитальным движением электронов. Поэтому для сопоставления экспериментальных данных

с теорией мы воспользовались соответствующим выражением (9) работы ^{7 1)}, которое после усреднения по энергетическому распределению термализованных электронов принимает вид

$$\tau_S^{-1}(B)/\tau_S^{-1}(0) = 1/8 \{ 15(T_1 - 9T_2) + 5(1 - 4T_1 + 45T_2)F(y) + (17T_1 - 117T_2)F(4y) + 3(1 - 4T_1 + 9T_2)F(9y) \}, \quad (1)$$

$$F(y) = 1/120 \int_0^{\infty} dx x^5 (1 + yx^3)^{-1} \exp(-x), \quad y = \pi(\Omega_C \tau_p / 48)^2$$

здесь $T_1 = (\hbar_x^2 \hbar_y^2 + \hbar_x^2 \hbar_z^2 + \hbar_y^2 \hbar_z^2) / \hbar^4$, $T_2 = (\hbar_x^2 \hbar_y^2 \hbar_z^2) / \hbar^6$, где \hbar — орт в направлении магнитного поля, x, y, z — главные оси симметрии кристалла. При усреднении учитывалось, что рассеяние носителей происходит на заряженных примесях ¹¹. На рис. 1 видно, что выражение (1), содержащее единственный подгоночный параметр — время τ_p , хорошо описывает уменьшение τ_S^{-1} с полем. Значения τ_p , позволяющие достичь наилучшего согласия экспериментальных данных и теории, также приведены на рис. 1. Отметим, что найденные значения τ_p близки к их теоретическим оценкам ¹¹.

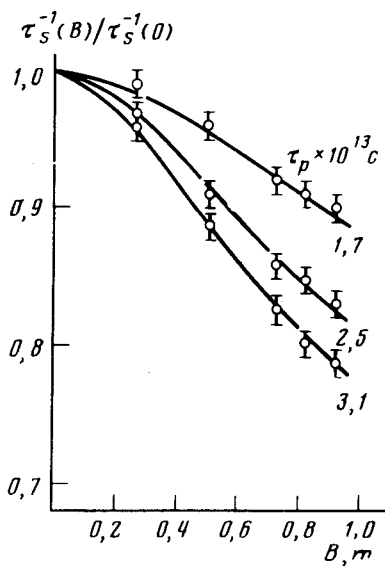


Рис. 1

Рис. 1. Уменьшение скорости спиновой релаксации электронов проводимости в магнитном поле в образцах GaAs с различной подвижностью носителей. Сплошные кривые построены согласно выражению (1) при выборе значений времени τ_p указанных на рисунке, $B \parallel < 110 >$

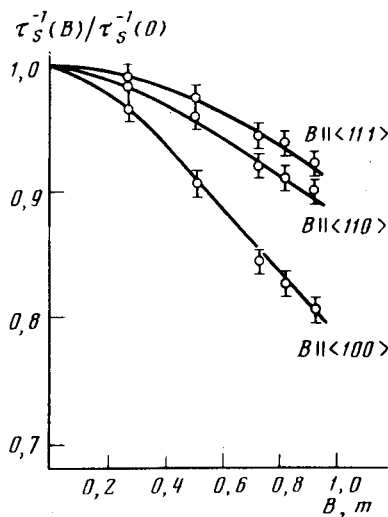


Рис. 2

Рис. 2. Уменьшение скорости спиновой релаксации электронов проводимости при ориентации магнитного поля B вдоль различных кристаллографических осей в образцах GaAs с одинаковой подвижностью носителей. Сплошные кривые построены согласно выражению (1) при выборе значения времени τ_p равным $1,7 \cdot 10^{-13}$ с

¹⁾ В нашем случае $\hbar\Omega_L, \hbar\Omega_C \ll kT$, и мы воспользовались выражением, полученным в приближении классического магнитного поля. Случай квантующего магнитного поля рассмотрен в работе ¹⁰.

Анализ выражения (1) показывает, что влияние поля должно существенно зависеть и от его ориентации относительно главных осей кристалла. В связи с этим нами было изучено ослабление спиновой релаксации в образцах с примерно одинаковыми подвижностями носителей при ориентации электронных спинов вдоль трех кристаллографических осей $\langle 100 \rangle$, $\langle 111 \rangle$ и $\langle 110 \rangle$. Эти данные приведены на рис. 2, где видно, что влияние поля действительно имеет анизотропный характер и максимально при $B \parallel \langle 100 \rangle$. Полученные данные также хорошо описываются выражением (1) при выборе одного и того же для всех образцов значения $\tau_p = 1,7 \cdot 10^{-13}$ с. Заметим, что при подавлении спиновой релаксации за счет ларморовой прецессии электронного спина влияние поля не должно было бы зависеть от его ориентации.

Таким образом проведенные на кристаллах GaAs исследования показали, что орбитальное движение электронов в магнитном поле может эффективно подавлять спиновую релаксацию электронов, вызванную спин-орбитальным расщеплением зоны проводимости. Обнаруженный эффект должен иметь место и для других соединений A_3B_5 , поскольку для кристаллов этой группы отношение частот $\Omega_L/\Omega_C \ll 1$ является характерным.

В заключение авторы считают своим приятным долгом поблагодарить Е.Л.Ивченко за полезные советы, Г.Е.Пикуса и В.И.Сафарова за плодотворные обсуждения результатов работы.

Литература

1. Clark A.H., Burnham R.D., Chadi D.J., White R.M. Solid State Comm., 1976, 20, 385.
2. Сафаров В.И., Титков А.Н. Proc. 15-th Int. Conf. on Phys. of Semiconduct. Kyoto 1980, J. Phys. Soc. Japan, 1980, 49, Suppl. A. 623.
3. Дьяконов М.И., Марущак В.А., Перель В.И., Степанова М.Н., Титкова А.Н. Труды Всесоюзной конференции по физике полупроводников, Баку 1982, 1, 165.
4. Аронов А.Г., Пикус Г.Е., Титков А.Н. ЖЭТФ, 1983, 84, 1170.
5. Дьяконов М.И., Перель В.И. ЖЭТФ, 1971, 60, 1954.
6. Дьяконов М.И., Перель В.И. ФТТ, 1971, 13, 3581.
7. Ивченко Е.Л. ФТТ, 1973, 15, 1566.
8. Гарбузов Д.З., Екимов А.И., Сафаров В.И. Письма в ЖЭТФ, 1971, 13, 36.
9. Гарбузов Д.З., Халфин В.Б. Эффективность и времена излучательных переходов в прямозонных полупроводника типа Ga As, РТП ЛИЯФ № 652, Ленинград, 1980, стр. 21.
10. Захарченя Б.П., Ивченко Е.Л., Рыскин А.Я. ФТТ, 1976, 18, 230.
11. Stillman G.E., Wolfe C.M. Thin Solid Films, 1976, 31, 69.

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

Поступила в редакцию
1 марта 1983г.