

ВЛИЯНИЕ СПИНОВОЙ РЕЛАКСАЦИИ "ГОРЯЧИХ" ЭЛЕКТРОНОВ НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ ОПТИЧЕСКОЙ ОРИЕНТАЦИИ В ПОЛУПРОВОДНИКАХ

А. И. Екимов, В. И. Сафаров

К настоящему времени выполнено значительное число работ по оптической ориентации электронов в полупроводниках [1–6]. В большинстве случаев эффективность ориентации определялась главным образом спиновой релаксацией электронов на дне зоны проводимости. В настоящей работе показано, что степень стационарной ориентации неравновесных электронов может в значительной мере (в зависимости от концентрации примесей) определяться спиновой релаксацией при термализации созданных светом "горячих" электронов.

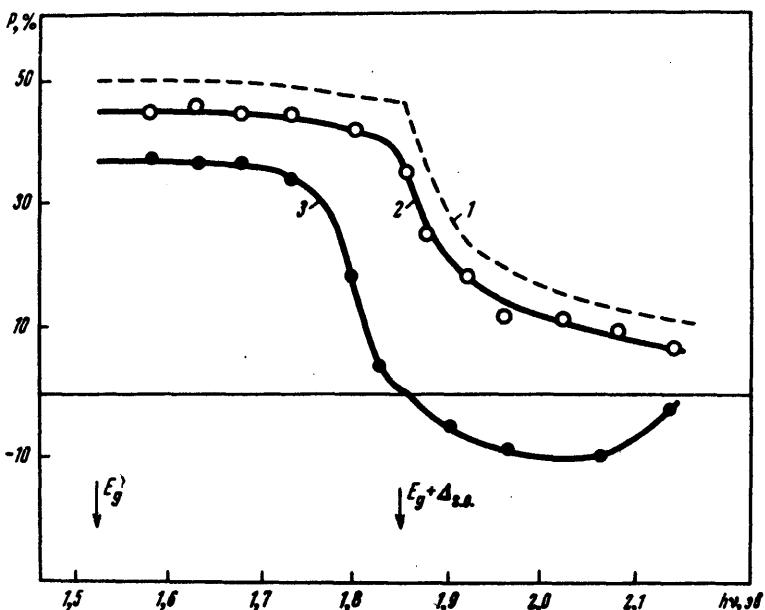


Рис. 1. Зависимость степени ориентации электронов от энергии кванта возбуждающего света в кристаллах GaAs с разной концентрацией примеси при 4,2°К: 1 – теоретическая кривая (см. текст), 2 – концентрация примеси $4 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$, 3 – концентрация примеси $7,8 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$

В работе исследовалась зависимость степени ориентации электронов (P) от энергии кванта возбуждающего света ($h\nu$) в кристаллах p -GaAs с концентрацией примеси (Zn) $7,8 \cdot 10^{16} + 4 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$ при температуре 4,2 и 77°К. На рис. 1 представлены полученные зависимости $P(h\nu)$ для двух значений концентрации примеси. Степень ориентации P измерялась, как и ранее [3–5], по степени циркулярной поляризации рекомбинационного излучения. Как видно, форма кривых $P(h\nu)$ зависит от содержания примеси, и для кристалла с малой кон-

центрацией примеси наблюдается даже инверсия знака P , т. е. изменение направления преимущественной ориентации спинов на противоположное.

Теоретически такая возможность была предсказана Дьяконовым и Перелем [7], и было показано, что такой эффект обусловлен спин-орбитальным расщеплением валентной зоны в GaAs и спиновой релаксацией "горячих" электронов. Согласно правилам отбора для межзонных переходов степень ориентации электронов, заброшенных в зону проводимости из верхних валентных подзон (легких и тяжелых дырок) составляет $P = 0,5$; а для переходов из отщепленной зоны $P = -1$ [7].

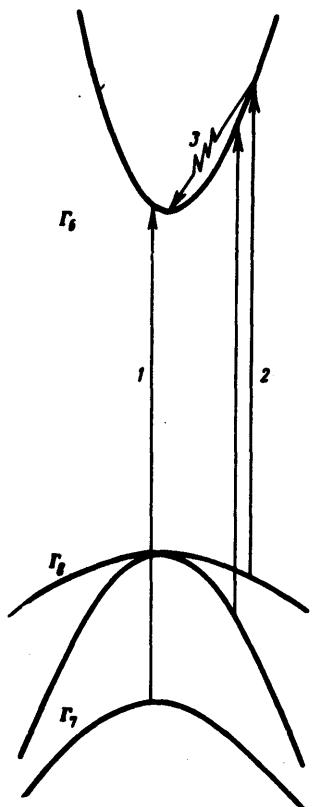


Рис. 2. Схема оптических межзонных переходов в GaAs

Таким образом в результате переходов из разных валентных подзон в зоне проводимости создаются электроны с противоположными направлениями преимущественной ориентации спина. Переходы из отщепленной зоны проявляются лишь при $h\nu > E_g + \Delta$, где E_g – ширина запрещенной зоны, а Δ – величина спин-орбитального расщепления валентной зоны. Однако при таких энергиях кванта света электроны, возбужденные из отщепленной зоны попадают в область вблизи дна зоны проводимости (рис. 2), а возбужденные из верхних валентных подзон – в глубину зоны проводимости (создаются "горячие" носители). Поэтому относительный вклад электронов, возбужденных из разных валентных подзон, в ориентацию носителей на дне зоны проводимости (которая и измеряется на эксперименте) будет определяться также спиновой релаксацией при термализации "горячих" электронов.

В случае слабой спиновой релаксации "горячие" электроны полностью сохраняют свою ориентацию за время термализации на дно зоны проводимости, и степень ориентации определяется только относительным вкладом в поглощение переходов из разных подзон. Соответствующая теоретическая кривая $P(h\nu)$ приведена на рис. 1. Для GaAs $E_g = 1,52 \text{ эв}$, а $\Delta = 0,33 \text{ эв}$ и резкое уменьшение P вблизи $h\nu = 1,85 \text{ эв}$ соответствует началу переходов из отщепленной зоны, которые дают "отрицательный" вклад в ориентацию. Суммарная степень ориентации сохраняет положительный знак, поскольку коэффициент поглощения для переходов из верхних подзон существенно выше, чем для переходов из отщепленной зоны. С теоретической кривой, как видно из рис. 1, совпадает экспериментальная¹⁾, соответствующая сильно легированному кристаллу. Это показывает, что при большой концентрации примеси в кристалле релаксация "горячих" электронов на дно зоны не сопровождается релаксацией их спина. Такой же результат был получен для сходной концентрации примеси и в работе [6].

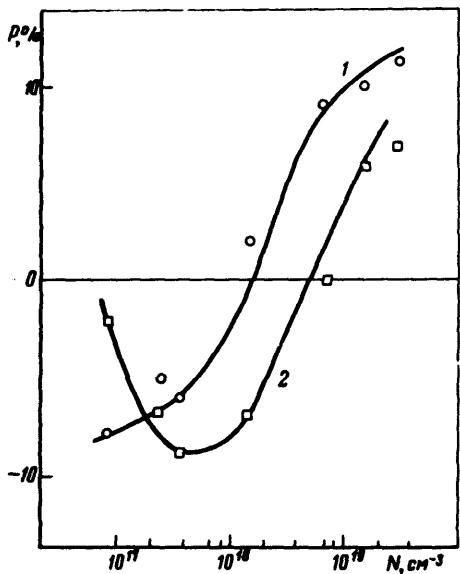


Рис. 3. Зависимость степени ориентации электронов (P) в GaAs от концентрации примеси для двух фиксированных значений энергии кванта возбуждающего света 1, 96 эв (1) и 2,14 эв (2). Значения P нормированы: для каждой концентрации примеси за $P = 0,5$ принято значение степени ориентации при $h\nu = E_g$

Для кристалла с меньшей концентрацией примеси (рис. 1, кривая 3) степень ориентации падает до ноля еще до начала переходов из отщепленной зоны. Это означает, что при данной концентрации примеси имеется механизм спиновой релаксации, эффективность которого сильно возрастает с увеличением энергии электрона. Вид кривой $P(h\nu)$ показывает, что зависимость скорости спиновой релаксации от энергии "горячего" электрона имеет пороговый характер: релаксация резко

¹⁾ Отличие экспериментальных значений P от теоретических для $h\nu = E_g$ определяется [3, 4] соотношением времени жизни и времени спиновой релаксации неравновесных электронов на дне зоны проводимости для данной концентрации примеси.

возрастает для электронов, с энергией больше некоторого критического значения ϵ_{kp} . Для кривой 3 рис. 1 можно оценить $\epsilon_{kp} \approx 0,28$ эв, поэтому в данном кристалле при $h\nu > E_g + \Delta$ "горячие" электроны, возбужденные из верхних валентных подзон не дают вклада в ориентацию электронов на дне зоны проводимости, и отрицательный знак P при $h\nu > 1,85$ эв обусловлен вкладом "холодных" электронов, возбужденных из отщепленной зоны, которые имеют "отрицательную" ориентацию. Наблюдаемое в области $h\nu > 2,1$ эв падение (по абсолютному значению) степени "отрицательной" ориентации определяется тем же пороговым значением ϵ_{kp} , но для "горячих" электронов, возбужденных из отщепленной зоны. В кристаллах с большей концентрацией примеси наблюдалось увеличение порогового значения ϵ_{kp} и кривые $P(h\nu)$ имели промежуточный вид, по сравнению с приведенными на рис. 1.

На рис. 3 представлена зависимость степени ориентации P от концентрации примеси в p -GaAs для двух фиксированных значений частоты возбуждающего света 1,96 и 2,14 эв. Полученные кривые отражают зависимость скорости спиновой релаксации горячих электронов от содержания примеси в кристалле. Отрицательные значения P соответствуют сильной, а положительные – слабой спиновой релаксации горячих электронов, возбужденных из верхних валентных подзон, с фиксированными значениями энергии – 0,44 и 0,62 эв. Как видно, эксперимент дает несколько необычный результат: *увеличение концентрации примеси приводит к ослаблению спиновой релаксации горячего электрона*.

Этот результат, однако, полностью соответствует механизму спиновой релаксации горячих электронов, предложенному Дьяконовым и Перелем для кристаллов без центра инверсии [7]: релаксация обусловлена спиновым расщеплением (в точках $k \neq 0$) зоны проводимости и сильно возрастает с увеличением энергии электрона. Эффективность релаксации определяется соотношением времени спиновой релаксации и времени релаксации по энергии и импульсу "горячего" электрона. В легированных кристаллах уменьшение времени релаксации по энергии и импульсу горячего электрона с увеличением содержания примеси должно приводить к ослаблению спиновой релаксации и, соответственно к увеличению порогового значения ϵ_{kp} для спиновой релаксации, обусловленной данным механизмом.

Точка $P = 0$ на кривых рис. 3 примерно соответствует концентрации примеси, при которой $\epsilon_{kp} \approx h\nu - E_g$. Из приведенных данных для двух значений частоты возбуждающего света, можно оценить, что в соответствии с теорией [7], примерно выполняется закономерность $\epsilon_{kp} \sim N_p^{1/3}$.

В заключение авторы выражают благодарность М.И.Дьяконову и В.И.Перелю за полезные обсуждения.

Литература

- [1] G.Lampel. Phys. Rev. Lett., 20, 491, 1968.
 - [2] R.Parsons. Phys. Rev. Lett., 23, 1152, 1969.
 - [3] А.И.Екимов, В.И.Сафаров. Письма в ЖЭТФ, 12, 293, 1970.
 - [4] А.З.Гарбузов, А.И.Екимов, В.И.Сафаров. Письма в ЖЭТФ, 13., 36, 1971.
 - [5] А.И.Екимов, В.И.Сафаров. Письма в ЖЭТФ, 13, 251, 1971.
 - [6] Б.П.Захарчена, В.Г.Флейшер, Р.Д.Джоев, Ю.П.Вешунов, И.Б.Русанов. Письма в ЖЭТФ, 13, 195, 1971.
 - [7] М.И.Дьяконов, В.И.Перель. ЖЭТФ, 60, 1954, 1971.
-