

О МЕХАНИЗМЕ МАГНИТОПРИМЕСНЫХ РЕЗОНАНСОВ В ФОТОВОЗБУЖДЕННОМ p -Ge

Гантмахер В. Ф., Зверев В. Н., Шовкун Д. В.

На основании современных данных по энергетическому спектру мелких акцепторов в германии и влиянию на него магнитного поля и одноосной деформации проводится анализ экспериментальных результатов исследования магнитопримесных осцилляций в p -Ge в условиях межзонного фотовозбуждения при низких температурах. Сделан вывод о том, что элементарным процессом, приводящим к осцилляциям, является распад экситона на ионизованном акцепторе, сопровождающийся нейтрализацией акцептора и эмиссией свободного электрона в зону проводимости.

1. В работе [1] было показано, что фотопроводимость p -Ge при гелиевых температурах и в условиях межзонной подсветки осциллирует при изменении магнитного поля H . Наблюдавшиеся осцилляции были периодичны в функции H^{-1} , причем период зависел от химической природы акцепторов.

Подробный анализ [2] позволил выделить два возможных элементарных процесса, ответственных за осцилляции: а) процесс неупругого рассеяния термализованных электронов на акцепторах, находящихся в долгоживущем низшем возбужденном состоянии (при этом электроны переходят на более высокие уровни Ландау, а акцептор девозбуждается); б) процесс распада экситона на ионизованном акцепторе, сопровождающийся нейтрализацией акцептора и эмиссией свободного электрона в зону проводимости.

Оба процесса описываются резонансным условием

$$n\hbar\Omega = \Delta E(H), \quad (1)$$

где n — целое число, $\Omega = eH/mc$ — циклотронная частота, определяемая циклотронной массой m электронов.

В первом случае ΔE — низший потенциал возбуждения акцептора, равный разности энергий ионизации основного E_a и низшего из возбужденных состояний E_a^* акцептора:

$$\Delta E \equiv \Delta_1(H) = E_a - E_a^*. \quad (2)$$

Магнитопримесные резонансы, обусловленные процессами такого типа, надежно зарегистрированы, например, в n -GaAs [3].

Во втором случае

$$\Delta E \equiv \Delta_2(H) = E_a - E_{ex}, \quad (3)$$

где E_{ex} — энергия ионизации экситона. Если считать, что ΔE вообще не зависит от H или зависит от H линейно, то из (1) следует периодичность резонансов в шкале H^{-1} с периодом

$$\Delta(H^{-1}) = (e\hbar/mc) \Delta E(0). \quad (4)$$

В германии в силу случайного совпадения $E_{ex}(0) \approx E_a^*(0)$ [4, 5], а от химической природы акцепторов зависит лишь величина E_a , входящая и в (2), и в (3). Поэтому по экспериментально измеренному периоду осцилляций различить два указанных механизма резонансов оказалось невозможно.

2. Зависимости от поля передаваемой в резонансе энергии в случаях (2) и (3) существенно различны. Величина $\Delta_1(H)$ всегда положительна. Поэтому ряд возможных значений n в (1) начинается с $n=1$. Величина $\Delta_2(H)$, в принципе,

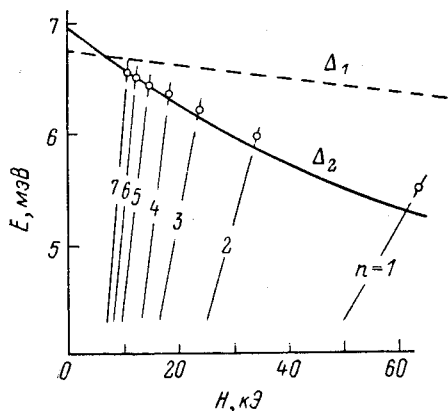


Рис. 1. Сравнение экспериментальных значений энергии $(\Delta E)_{\text{эксп}}$ для магнитопримесных резонансов с зависимостью от H величины $\Delta_2(H)$ и линейной частью зависимости от H величины $\Delta_1(H)$.

Ge : Ga, $H \parallel [001]$.

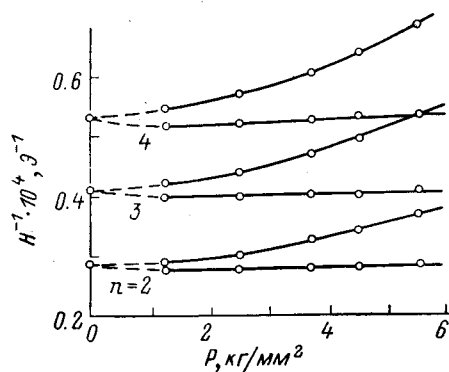


Рис. 2. Зависимость положения экстремумов магнитопримесных резонансов в Ge : Ga от величины одноосного механического напряжения.

$P \parallel [100], H \parallel [001]$.

может обратиться в нуль. Тогда возникнет дополнительный «нулевой» резонанс, определяемый условием

$$E_a(H_0) = E_{\text{ex}}(H_0). \quad (5)$$

Данные по зависимости обеих входящих в (5) величин в сильных полях отсутствуют. Несомненно, однако, что если в Ge условие (5) и достигается, то в очень больших полях. Например, при $H \parallel [100]$ оценка дает $H_0 \geq 500$ кЭ.

Произвести однозначный выбор между двумя процессами на основании анализа кинетических характеристик (амплитуды осцилляций, их температурной зависимости и т. п.) тоже затруднительно [2].

3. Для выбора одного из двух механизмов имеется еще одна возможность: определив по периодичности в обратном поле номера n для каждого резонанса

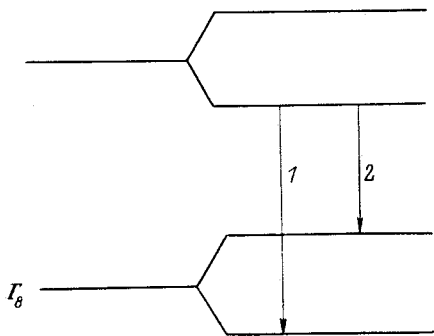


Рис. 3. Энергетическая схема, иллюстрирующая переходы в основное состояние акцептора, которыми сопровождаются магнитопримесные резонансы в условиях одноосной деформации.

и измерив таким образом $\Delta E(H)$ в резонансных точках H_n , сравнить эту величину с энергиями (2) и (3), полученными из независимых измерений. Такая возможность возникла в связи с появившимися недавно новыми данными по спектроскопии мелких акцепторов в Ge.

Благодаря тому что зеемановское расщепление и диамагнитный сдвиг основного состояния акцептора очень малы [6, 7], ими можно пренебречь. Поэтому измеренную нами зависимость $\Delta E(H)$ можно сравнить с (2) и (3) с учетом зависимости от H лишь величин E_{ex} и E_a^* . Такое сравнение проведено на рис. 1. Экспериментальные точки $(\Delta E)_{\text{эксп}}$ имеют абсциссы H_n и лежат на прямых $\Delta E = n\hbar\Omega$. Зависимость $\Delta_2(H)$ построена по данным экспериментов [5, 8]. Аналогичные данные для $\Delta_1(H)$ имеются лишь в полях до 20 кЭ [9]. Поэтому мы произвели собственные измерения зеемановского расщепления низшего возбужден-

ного состояния акцептора по кривым фототока (dJ/dH) (H) в условиях резонансного захвата легких дырок ионизированным акцептором, сопровождающегося испусканием оптического фонона [10]. Результаты согласуются с данными [9], полученными в малых полях. Линейная часть зависимости $\Delta_1(H)$, обусловленная зеемановским расщеплением низшего возбужденного состояния акцептора, приведена на рис. 1. Поскольку диамагнитный сдвиг энергии E_a^* , величина которого неизвестна, должен давать положительный вклад в $\Delta_1(H)$, для процесса неупругого рассеяния точки $(\Delta E)_{\text{эксн}}$ должны были бы лежать выше прямой $\Delta_1(H)$.

Таким образом, анализ зависимостей, представленных на рис. 1, свидетельствует в пользу резонансного распада экситона.

4. Аналогичным образом можно проанализировать расщепление магнитопримесных резонансов при одноосном сжатии [11]. Двум сериям резонансов (рис. 2) соответствуют, согласно (4), две характерные энергии $(\Delta E)_1$ и $(\Delta E)_2$. Согласно [12], в условиях одноосной механической деформации вдоль [100] расщепление уровня основного состояния E_a примерно в 6 раз превышает расщепление уровня E_a^* . Разность $(\Delta E)_1 - (\Delta E)_2$ совпадает с точностью около 10 % с величиной расщепления E_a , определенной в [12]. Однако энергия $(\Delta E)_1$ оказывается практически не зависящей от деформации, что свидетельствует о примерно равных деформационных расщеплениях уровней, между которыми происходят переходы (рис. 3). Таким образом, сопоставление результатов [12] и [11] показывает, что обсуждаемые резонансы не могут быть обусловлены неупругим рассеянием электронов.

Данные по деформационному расщеплению уровня основного состояния непрямого экситона в Ge в области слабых деформаций пока отсутствуют.

5. Совокупность аргументов в пп. 3 и 4 однозначно указывает на то, что магнитопримесные резонансы в p -Ge обусловлены распадом экситонов на ионизированных акцепторах, представляющим собой разновидность оже-рекомбинации. Обычно в качестве основного процесса, определяющего безызлучательную рекомбинацию экситонов в легированных образцах германия, рассматривается образование связанных экситонов на нейтральных примесях с их последующей рекомбинацией. Наши результаты указывают на то, что развал экситона на ионизированных центрах может в определенных условиях конкурировать с этим процессом, несмотря на то что концентрация ионизированных примесей при межзонном фотовозбуждении значительно меньше концентрации нейтральных примесей.

Л и т е р а т у р а

- [1] Гантмахер В. Ф., Зверев В. Н. — ЖЭТФ, 1975, т. 69, в. 8, с. 695—706.
- [2] Гантмахер В. Ф., Зверев В. Н., Мешков С. В., Рашба Э. И. — Изв. АН СССР, сер. физ., 1978, т. 42, в. 6, с. 1160—1165.
- [3] Зверев В. Н., Шовкун Д. В. — ЖЭТФ, 1984, т. 87, в. 5 (11), с. 1745—1756.
- [4] Altarelli M. A., Lipari N. O. — Phys. Rev. Lett., 1976, v. 36, N 11, p. 619—622.
- [5] Haller E. E., Hansen W. L. — Sol. St. Commun., 1974, v. 15, N 4, p. 687—692.
- [6] Tokumoto H., Ishiguro T. — Phys. Rev., 1977, v. B15, N 4, p. 2099—2117.
- [7] Freeth C. A., Fischer P., Simmonds P. E. — Sol. St. Commun., 1986, v. 60, N 2, p. 175—178.
- [8] Martin R. W., Störmer H., Rühle W., Bimberg D. — J. Lumin., 1976, v. 12/13, p. 645—649.
- [9] Soepangkat H. P., Fischer P. — Phys. Rev., 1973, v. B8, N 2, p. 870—893.
- [10] Гантмахер В. Ф., Зверев В. Н. — ЖЭТФ, 1980, т. 79, в. 6 (12), с. 2291—2301.
- [11] Зверев В. Н. — ФТТ, 1977, т. 19, в. 7, с. 2015—2020.
- [12] Martin A. D., Fisher P., Freeth C. A., Sabib E. H., Simmonds P. E. — Phys. Lett., 1983, v. 99A, N 8, p. 391—395.

Институт физики твердого тела
АН СССР
Черноголовка

Получена 22.06.1987
Принята к печати 20.07.1987