

КОМБИНИРОВАННЫЙ РЕЗОНАНС ПРИ ОПТИЧЕСКОМ ВОЗБУЖДЕНИИ ДОНОРОВ В *n*-Ge

А. М. Палкин, О. А. Шегай

В работе сообщается об экспериментальном обнаружении методом субмиллиметровой лазерной магнитоспектроскопии особенностей в спектре фотопроводимости (ФП) при переходе $1s \rightarrow 2p_{+1, A}$ для мелких доноров фосфора (P) и сурьмы (Sb) в *n*-Ge. Анализ показывает, что эти особенности связаны с электродипольными переходами при одновременном перевороте спина, т. е. с комбинированным резонансом (КР) [1].

Нами исследовались образцы чистого и легированного сурьмой германия методом фотоэлектрической магнитоспектроскопии [2]. Излучение субмиллиметрового лазера (СММ) с помощью оптических зеркал фокуси-

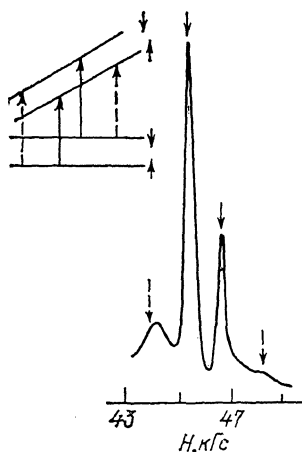


Рис. 1. Спектр ФП перехода $1s(A) \rightarrow 2p_{+1, A}$ мелкого донора P в Ge.

$N_D - N_A \sim 10^{10} \text{ см}^{-3}$, $\lambda = 70.5 \text{ мкм}$, $T = 4.2 \text{ К}$, $H \parallel [111]$.

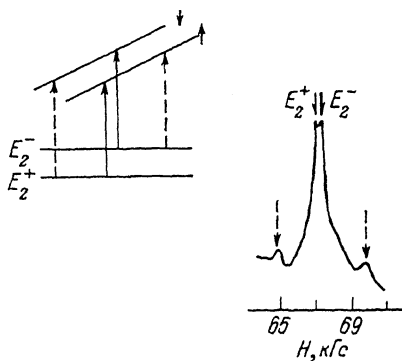


Рис. 2. Спектр ФП перехода $1s(T) \rightarrow 2p_{+1, A}$ мелкого донора Sb в Ge : Sb.

$N_{Sb} = 4.4 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$, $\lambda = 70.5 \text{ мкм}$, $T = 4.2 \text{ К}$, $H \parallel [111]$. Обозначения резонансов соответствуют расщепленному по спину основному состоянию примесей согласно [4].

руется на образец, расположенный в центре сверхпроводящего соленоида. Измерения проводились в геометрии Фарадея при температуре жидкого гелия. Образцы представляют собой ориентированные в плоскости (111) пластины размером $5 \times 4 \times 1 \text{ мм}$ с нанесением на противоположные $4 \times 1 \text{ мм}$ грани омическими контактами. Магнитное поле прикладывалось параллельно оси [111]. В такой геометрии возбужденное $2p_{+1}$ -состояние примеси расщепляется на два уровня, один из которых ($2p_{+1, A}$) связан с эллипсоидом постоянной энергии A с главной осью, параллельной H, а другой ($2p_{+1, B}$) — с тремя эллипсоидами B, вытянутыми под одинаковым углом к магнитному полю.

На рис. 1 представлен фрагмент спектра ФП на длине волны (СММ) лазера $\lambda = 70.5 \text{ мкм}$, полученный разверткой магнитного поля, соответствующего основному переходу $1s \rightarrow 2p_{+1, A}$ остаточной донорной примеси фосфора P. Кроме центрального дублета, видны дополнительные пики меньшей интенсивности по обе стороны от него. Спектр образца с донорной примесью Sb для аналогичного перехода приведен на рис. 2, где также наблюдаются дополнительные особенности.

Основное состояние мелкого донора замещения V группы, какими являются P и Sb в Ge, 4-кратно вырождено (с учетом спина 8-кратно).

Долин-орбитальное взаимодействие, связанное с короткодействующей частью потенциала примеси, приводит к сдвигу энергии основного состояния (химический сдвиг) и частичному снятию вырождения, в результате основное состояние расщепляется на синглетное $1s (A)$ и триплетное $1s (T)$ состояния (без учета спина). Величина расщепления различна для доноров с различной химической природой, для доноров Р она составляет 2.83 мэВ, для Sb — 0.32 мэВ [2]. В условиях эксперимента при $T=4.2$ К для доноров Р $1s (T)$ -состояния в отличие от ситуации с Sb не заселены и мы их не учитываем. В магнитном поле происходит снятие спинового и остаточного долинного вырождения, и энергетический спектр усложняется [3]. Дублетная структура перехода $1s (A) \rightarrow 2p_{+1, A}$ для доноров Р наблюдалась во многих работах [4] и связана с различием g -факторов основного и возбужденного состояний. В геометрии эксперимента это различие равно: $\Delta g = g_0 - g_{\parallel}$, где $g_0 = g_{\parallel}/3 + 2g_{\perp}/3$ — изотропный g -фактор основного состояния доноров пятой группы, g_{\parallel} , g_{\perp} — соответственно g -факторы для H , параллельного и перпендикулярного оси эллипсоида A постоянной энергии, $g_{\parallel} = 0.83$, $g_{\perp} = 1.93$ [5].

Подробная идентификация оптических переходов с синглетного и триплетного уровней с учетом спина для доноров Sb приведена в [6]. Однако наблюдаемые нами дополнительные пики (на рис. 2 отмечены штриховыми стрелками), расположенные по обе стороны основного перехода $1s (T) \rightarrow 2p_{+1, A}$, не укладываются в эту схему оптических переходов.

Мы предполагаем, что наблюдаемые особенности спектра ФП обусловлены электродипольным переходом с переворотом спина, т. е. комбинированным резонансом с основного состояния на возбужденные $2p_{+1, A}$. Возможность КР на свободных и связанных носителях в кристаллах с центром инверсии, к которым относится Ge, была показана в работе [1]. Причиной «зацепления» конфигурационного и спиновых движений является зависимость g -фактора от волнового вектора K . Так как германий — многодолинный полупроводник с сильной анизотропией g -фактора, то существует эффективный механизм спин-орбитального взаимодействия [7], перемешивающий спиновые компоненты состояний. Это снимает запрет на оптические переходы с основного на возбужденные состояния с переворотом спина.

В работе [8] наблюдали спиновый резонанс на мелких донорах Р и As под действием электрической компоненты электромагнитной волны.

На вставке к рис. 1 (и рис. 2) приведены схема переходов и их взаимное расположение по магнитному полю при реализации комбинированного резонанса (штриховые стрелки). Из дополнительных пиков ФП нами были вычислены g -факторы для возбужденных $2p_{+1, A}$ -состояний доноров Р и Sb $g_{\parallel} = 0.85 \pm 0.03$, которые хорошо согласуются с литературой [5].

Таким образом, нами впервые экспериментально обнаружен комбинированный резонанс на основном переходе $1s \rightarrow 2p_{+1, A}$ донорных состояний Р и Sb. Учет таких переходов поможет правильной идентификации примесных состояний.

Авторы выражают благодарность С. К. Саввиных за полезные обсуждения.

Список литературы

- [1] Рашба Э. И. // УФН. 1964. Т. 84. № 4. С. 557—578.
- [2] Kogan Sh. M., Lifshits T. M. // Phys. St. Sol. (a). 1977. V. 39. N 11. P. 11—39.
- [3] People R., Wolff P. A. // Phys. Rev. B. 1981. V. 24. N 8. P. 4634—4644.
- [4] Ramdas A. K., Rodriguez S. // Rep. Prog. Phys. 1981. V. 44. P. 1297—1387.
- [5] Wilson D. K. // Phys. Rev. 1963. V. 134. N 3A. P. 265—286.
- [6] Аверкиев Н. С., Гельмонт Б. Л., Голубев В. Г., Иванов-Омский В. И., Кропотов Г. И. // ЖЭТФ. 1982. Т. 83. № 4 (10). С. 1409—1417.
- [7] Саввиных С. К. // ФТТ. 1988. Т. 30. № 9. С. 2780—2786.
- [8] Гершензон Е. М., Певин Н. М., Семенов И. Т., Фогельсон М. С. // ФТП. 1976. Т. 10. № 1. С. 175—177.