

БИЭКСИТОННО-ПРИМЕСНЫЕ КОМПЛЕКСЫ В ОДНООСНО СЖАТОМ ГЕРМАНИИ С ПРОСТЫМИ ЗОНАМИ

В.Д.Кулаковский, И.В.Кукушкин

Обнаружено, что в германии возможно связывание на нейтральном доноре двух экситонов даже в сильно сжатых кристаллах при полном снятии вырождения электронной и дырочной зон.

Возможность образования в полупроводниках связанного состояния нейтрального донора и экситона, или экситонно-примесного комплекса (ЭПК), вытекает из их аналогии с атомами водорода¹. Из этой аналогии следовало также ожидать, что присоединение второго экситона к ЭПК на нейтральном доноре (акцепторе) в полупроводниках с невырожденными зонами, также как и присоединение третьего атома к молекуле водорода, окажется невыгодным из-за сильного отталкивания электронов (дырок) с одинаковыми спинами. Действительно, к настоящему времени надежно установлено существование связанных много-экситонно-примесных комплексов только в полупроводниках с вырожденными зонами, в которых в $1s$ -оболочке может находиться больше двух электронов (дырок) благодаря дополнительному орбитальному вырождению зон². В проведенных же в настоящей работе исследованиях рекомбинационного излучения комплексов в сильно сжатых кристаллах Ge легированных сурьмой, было найдено, что в Ge связанные биэкситонно-примесные комплексы на нейтральных донорах остаются стабильными даже при полном снятии вырождения электронной и дырочной зон.

Исследовались кристаллы Ge(Sb) с $N_{Sb} = 5 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$. Методика одноосного однородного сжатия кристаллов размером $3 \times 3 \times 10 \text{ мм}^3$ описана ранее³. Оптическое возбуждение осуществлялось с помощью лазера ЛТ-2 ($\lambda = 1,06 \text{ мкм}$) мощностью до 4 Вт. Спектральным прибором служил двойной монохроматор с решетками 600 штрихов/мм и дисперсией 8 А/мм. Излучение регистрировалось охлаждаемым Ge (Cu) фотосопротивлением в режи-

ме синхронного детектирования. Для идентификации электронной структуры комплексов использовались измерения в магнитных полях $H \lesssim 5T$.

Наименьшая стабильность электронно-дырочной жидкости и, следовательно, наибольшая плотность экситонов в Ge достигается в кристаллах, сильно сжатых вдоль оси, близкой к $\langle 100 \rangle$, когда снимается вырождение зоны проводимости и валентной зоны и анизотропия валентной зоны минимальна^{3,4}. Для того, чтобы можно было пренебречь вырождением зоны проводимости при исследовании МЭПК на нейтральных донорах, энергетический зазор до ближайшей, по отношению к основной, долины ΔE_c должен быть много больше как энергий связи МЭПК, так и величины орбитально-долинного расщепления ($\Gamma_1 - \Gamma_5$) доноров. Поэтому для исследования мы выбрали Ge с очень мелким донором — Sb, для которого расщепление $\Gamma_1 - \Gamma_5$ составляет всего 0,3 мэВ⁵. Энергия связи Э₂ПК в Ge(Sb), сжатом вдоль оси $\langle 100 \rangle$, с вырожденной зоной проводимости, как следует из наших измерений, $\Delta_2 \lesssim 1,5$ мэВ. Учитывая это, мы остановились на деформации кристаллов Ge(Sb) вдоль оси $\langle 1.1.16 \rangle$, когда при $P \gtrsim 500$ МПа величина ΔE_c достигает 6–7 мэВ. Аналогичные результаты были получены нами и в Ge(Sb) при $P \parallel \langle 116 \rangle$ с $\Delta E_c \approx 15$ мэВ. Однако доля Э₂ПК в этом случае была ниже из-за меньшей плотности экситонной газовой фазы.

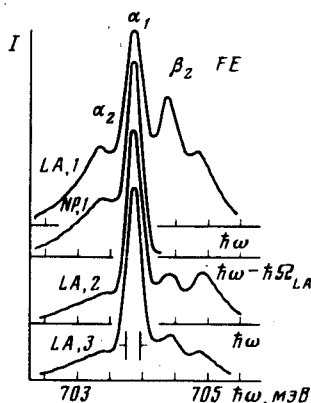


Рис. 1. Спектры излучения Ge(Sb), сжатого вдоль оси $\langle 1.1.16 \rangle$, при $P = 500$ МПа. LA- и NP-компоненты I записаны при $T = 1,6K$, $W = 20$ Вт/см² LA-компоненты 2 и 3 отвечают, соответственно, $T = 2K$, $W = 20$ Вт/см² и $T = 1,6K$, $W = 6$ Вт/см². Для удобства сравнения NP-спектр смещен на величину энергии LA-фона

На рис. 1 показаны спектры излучения кристаллов Ge(Sb), сильно сжатых вдоль оси $\langle 1.1.16 \rangle$, при разных температурах и плотностях возбуждения W . При $W < 0,5$ Вт/см² как в бесфононной, так и в LA-компоненте спектра излучения наблюдалась только одна линия α_1 , отвечающая излучению ЭПК. При больших плотностях возбуждения $W \sim 20$ Вт/см² в LA-компоненте возгораются еще три линии — α_2 , β_2 и FE, только одна из которых, α_2 , проявляется в бесфононной области. Интенсивности линий α_2 и β_2 уменьшаются с ростом температуры, однако отношение их интенсивностей не зависит ни от плотности возбуждения, ни от температуры. Поэтому можно сделать вывод о том, что они отвечают переходам из одного состояния. Интенсивность линии излучения свободных экситонов, FE, возрастает с ростом температуры из-за диссоциации связанных состояний (рис. 1).

Описанные выше свойства спектра излучения Ge(Sb) находят естественное объяснение, если предположить, что линии α_2 и β_2 отвечают рекомбинации электронов и дырок в Э₂ПК (рис. 2). Как и в случае МЭПК при наличии вырождения долины в зоне проводимости^{2,6} переходы в основное состояние (линия β_2), отвечающие рекомбинации слабо связанного электрона, видны только в фононной компоненте, а переходы в возбужденное состояние (линия α_2), когда рекомбинирует электрон из внутренней оболочки, происходят с отдачей бриллюэновского импульса как фонону, так и примесному центру. Из сравнения расщепления линий α_2 и β_2 ($= 0,95 \pm 0,03$ мэВ) с энергией связи ЭПК, определенной по положению линий α_1 и FE ($0,94 \pm 0,04$ мэВ) видно, что возбужденное состояние ЭПК (ЭПК*) нестабильно.

тельно, в \mathcal{E}_2 ПК : 1) две дырки образуют спиновый синглет и 2) во внешней оболочке находится только один электрон. Из-за наличия зеемановского расщепления свободных экситонов и отсутствия такого расщепления у электронов в ЭПК и электронов в основной оболочке и дырок в \mathcal{E}_2 ПК энергии связи ЭПК и, особенно, \mathcal{E}_2 ПК уменьшаются при включении магнитного поля (рис. 2). Об этом свидетельствует сближение линий α_1 и β_2 , отвечающих, соответственно, переходам между основными состояниями ЭПК и НД и \mathcal{E}_2 ПК и ЭПК, с линией излучения экситонов (рис. 3). Одновременно наблюдается сильное уменьшение интенсивности линий α_2 и β_2 , которые при $H > 2,5$ Т исчезают из спектра даже при $T = 1,6$ К и самых больших (≈ 100 Вт/см²) плотностях возбуждения.

Таким образом, в исследованиях излучения одноосно сжатых кристаллов Ge(Sb) с невырожденными зонами нами обнаружены биэкситонно-примесные комплексы, стабильность которых не вытекает из прямой аналогии с водородом. Причинами стабильности таких комплексов могут быть сильная анизотропия зоны проводимости или электрон-фононное взаимодействие, отсутствующие в случае водорода. Электрон-фононное взаимодействие в Ge — ковалентном кристалле, хотя и мало, может оказаться существенным в силу очень малого масштаба энергий связи ($\Delta_2 \sim 0,3$ мэВ).

В заключение авторы выражают глубокую благодарность А.В.Малявкину, Я.Е.Покровскому и В.Б.Тимофееву за полезные дискуссии.

Литература

1. Lampert M.A. Phys. Rev. Lett., 1958, 1, 450.
2. Кулаковский В.Д., Пикус Г.Е., Тимофеев В.Б. УФН, 1981, 135, 237.
3. Кукушкин И.В., Кулаковский В.Д. ЖЭТФ, 1982, 82, 800.
4. Кулаковский В.Д., Кукушкин И.В., Тимофеев В.Б. ЖЭТФ, 1981, 81, 684.
5. Reuszer J.H., Fisher P. Phys. Rev., 1964, 135, A1125.
6. Mayer A.E., Lightowers E.C. J. Phys. C., 1979, 12, L945.