

НОВОЕ СОСТОЯНИЕ НЕРАВНОВЕСНЫХ НОСИТЕЛЕЙ ЗАРЯДА, СВЯЗАННОЕ С ДОНОРАМИ В ГЕРМАНИИ

А.С.Каминский, Я.Е.Покровский, М.В.Горбунов

При гелиевых температурах обнаружены новые полосы люминесценции, возникающие в германии, легированном мышьяком и фосфором. Происхождение полос объяснено излучательным распадом комплексов, содержащих ионизованный донор, два электрона и две дырки.

Недавно была опубликована работа¹, в которой полосы люминесценции, лежащие вблизи линии излучения экситона, связанного на атоме сурьмы в одноосно деформированном германии, были интерпретированы как a_2 - и β_2 -линии, возникающие при распаде многочастичного экситон-примесного комплекса (МЭПК), образованного при связывании двух экситонов на атоме сурьмы. Аналогичные полосы излучения, смещенные приблизительно на 1 мэВ в область меньших энергий относительно линии излучения связанного экситона a_1 мы обнаружили более года назад в германии, легированном мышьяком и фосфором, при сжатии вдоль оси (111). Эти результаты не были опубликованы, поскольку до настоящего времени мы не видим исчерпывающего объяснения их происхождения.

Новое излучение удобно наблюдать в одноосно деформированных кристаллах германия, легированного мышьяком, при сравнительно небольших уровнях возбуждения, когда электронно-дырочные капли (ЭДК) еще не образуются². На рис. 1 приведены спектры люминесценции германия, легированного мышьяком в концентрации $5 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$. Из рис. 1, а видно, что новое излучение не наблюдается при 4,2К, но хорошо видно при понижении температуры до 2К в бесфононной (*NP*) компоненте спектра, в том числе и вблизи линии $a_1^{\Gamma_5}$, соответствующей распаду связанного экситона с рождением нейтрального донора в возбужденном состоянии Γ_5 ³. При увеличении уровня возбуждения (рис. 1, б) и низких температурах в спектре появляется излучение ЭДК². При повышении температуры первой исчезает полоса ЭДК, и лишь затем — полоса нового излучения.

На рис. 2 приведена зависимость спектрального положения различных компонент в спектре излучения Ge, легированного мышьяком, от давления P , приложенного вдоль осей (111) и (001). Одноосное сжатие вдоль (111) приводит к снятию вырождения зоны проводимости и валентной зоны. При этом изменяется расщепление состояний Γ_1 – Γ_5 как в нейтральном доноре, так и в связанном экситоне, что приводит к сублинейной зависимости смещения компонент излучения связанного экситона a_1' и a_1'' от P . Компонента $a_1^{\Gamma_5}$ должна сме-

щаться с давлением согласно выражению ⁴.

$$\Delta = \Delta_0 \left(1 + \frac{\Delta_c}{\Delta_0} + \frac{\Delta_c^2}{\Delta_0^2} \right)^{1/2}, \quad (1)$$

где Δ_c — расщепление зоны проводимости, $\Delta_0 = 4,23$ мэВ для мышьяка — расщепление $\Gamma_1 - \Gamma_5$ в нейтральном доноре при $P = 0$. Рассчитанная согласно (1) зависимость хорошо согласуется с экспериментом. Новая полоса излучения смещается при увеличении P аналогично смещению линий a''_1 и a''_1 . Отсюда следует, что в акте рекомбинации ответственном за происхождение новой полосы, принимает участие нейтральный донор, который может переходить в возбужденное состояние. Отметим, что при распаде МЭПК, содержащего два экситона, конечным состоянием является связанный экситон, а не нейтральный донор, что исключает возможность предложенной в ¹ интерпретации новой полосы как линии a_2 . Из рис. 1 видно, что новая полоса имеет "хвост", простирающийся в область меньших энергий. Такое неоднородное уширение полосы противоречит высказанному в ¹ предположению о нестабильности возбужденного состояния связанныго экситона.

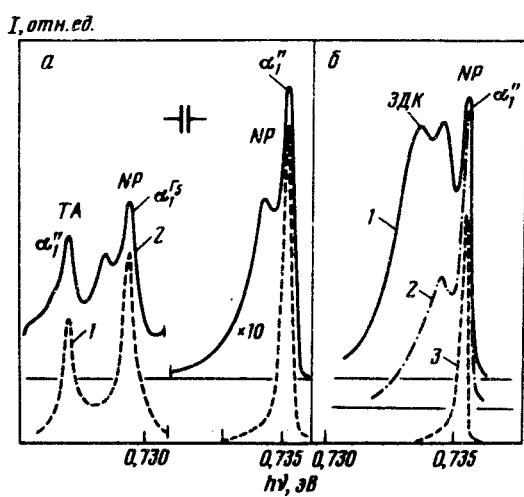


Рис. 1

Рис. 1. Спектральное распределение *NP*- и *TA*-компонент фотолюминесценции германия, легированного мышьяком при сжатии вдоль оси (111) давлением $P = 740$ кГ/см². Полоса нового излучения не имеет индекса на рисунке. *a* — Малый уровень возбуждения: 1 — 2К; 2 — 4,2К. *б* — Большой уровень возбуждения: 1 — 2К; 2 — 2,8К; 3 — 4,2К

Рис. 2. Зависимость спектрального положения *NP* и *TA* полос фотолюминесценции германия, легированного мышьяком при 2К от давления P в направлениях (111) (кружки) и (001) (треугольники). Темные кружки — расчет согласно формуле (1)

Спектр фононной *LA*-компоненты излучения германия, легированного мышьяком при сжатии вдоль осей (111) и (001) совершенно аналогичен спектру *NP*-компоненты. Нам не удалось обнаружить полос, аналогичных " β_2 "-полосе в ¹. Интенсивность новой полосы в *TA*-компоненте была заметно меньше по сравнению с интенсивностью линии a_1 , чем в остальных компонентах. Мы исследовали также образец германия, легированный сурьмой в концентрации $3 \cdot 10^{15}$ см⁻³. При сжатии вдоль осей (111) и (001) и давлениях $P \leq 2000$ кГ/см² *LA*-компоненты спектра этого образца были аналогичны спектру при легировании мышьяка, но расстояние между линией a_1 и максимумом новой полосы было несколько меньшим ($\sim 0,5$ мэВ). " β_2 "-полосу обнаружить не удалось. Интенсивность *NP*-компоненты излучения германия, легированного сурьмой, по крайней мере в 60 раз меньше интенсивности *LA*-компоненты, что не позволило нам исследовать ее структуру.

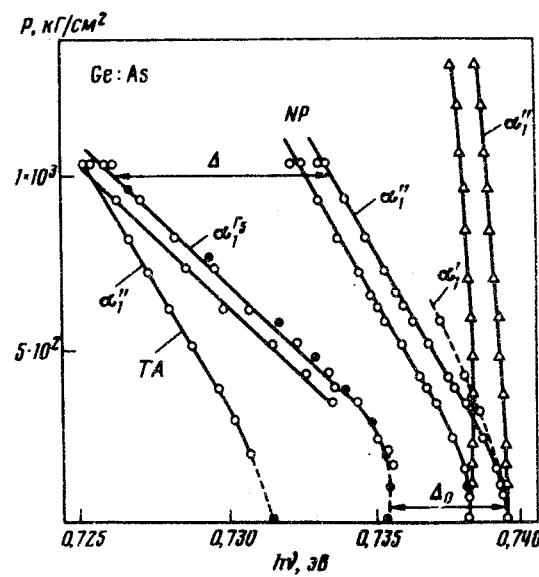


Рис. 2

Приведенные выше результаты можно объяснить на основе следующей схемы. Согласно оболочечной модели⁵, наиболее сложный комплекс при снятии вырождения в результате одноосного сжатия, например, вдоль оси (111), может содержать положительно заряженный примесный донор, два электрона и две дырки. Введем обозначения для энергий связи: E_{D_0} ; $E_{D_0^x}$ – донора в основном и возбужденном состоянии, E_{ex} – экситона, E_{D_1} – связанный экситона, E_{D_1+h} – дырки на связанным экситоне, E_{D_0+h} – дырки на нейтральном доноре. Рекомбинация в таком четырехчастичном комплексе может сопровождаться выбросом дырки в валентную зону, так что конечным состоянием окажется нейтральный донор. Энергия испущенного фотона в этом случае равна $\hbar\nu_1 = E_g - (E_{D_0} - E_{D_0^x}) - E_{ex} - E_{D_1+h} - (m^x v^2)/2$, где $m^x v^2/2$ – кинетическая энергия выброшенной дырки. Рекомбинационное излучение должно занимать полосу, смещенную в область меньших энергий относительно линии a_1 на величину $E_{D_1+h} + (m^x v^2/2)$, причем скорость дырки v может изменяться в довольно широких пределах. Если выброса дырки не происходит, то конечным состоянием должен являться нейтральный донор со связанный на нем дыркой. Такой комплекс является стабильным⁶. Энергия испущенного фотона в этом случае равна $\hbar\nu_2 = E_g - (E_{D_0} - E_{D_0^x}) - E_{ex} - E_{D_0+h}$ т. е. должна испускаться узкая линия. Однако эта линия должна быть очень близкой к a_1 , поскольку E_{D_1} и E_{D_0+h} отличаются незначительно⁶. Отметим, что наша интерпретация предполагает существование примесных комплексов нового типа.

Литература

1. Кулаковский В.Д., Кукушкин И.В. Письма в ЖЭТФ, 1982, 35, 323.
2. Райс Т., Хенсел Дж., Филлипс Т., Томас Г. Электронно-дырочная жидкость в полупроводниках, 1980, М.: Мир.
3. Mayer A., Lightowers. J. Phys. C, 1979, 12, 945.
4. Бир Г.П., Пикус Г.Е. Симметрия и деформационные эффекты в полупроводниках, 1972, М.: Наука.
5. Lippenzow G. Can J. Phys., 1977, 55, 1787.
7. Lampert M. Phys. Rev. Lett., 1958, 1, 450.