

КРАЕВАЯ ЛЮМИНЕСЦЕНЦИЯ СИЛЬНО ЛЕГИРОВАННОГО  
ФОСФИДА ИНДИЯ

А. Н. Георгобшани, А. В. Микуленок, И. Г. Стоянова,  
И. М. Тихвиняну, В. В. Урсаки

УДК 535.37

Получены данные об относительном вкладе каналов излучательной рекомбинации, формирующих спектр краевой фотолюминесценции сильно легированного фосфида индия  $n$ -типа, при различных температурах. Исследован также характер температурного изменения полос краевой фотолюминесценции.

Особенности в спектрах низкотемпературной краевой фотолюминесценции (ФЛ) сильно легированного донорными примесями ( $N_D \gg 5 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$ ) фосфида индия связываются с излучательной рекомбинацией свободных электронов со свободными дырками и с дырками, локализованными на акцепторных уровнях /1,2/. Для правильной интерпретации спектров краевой ФЛ при высоких уров-

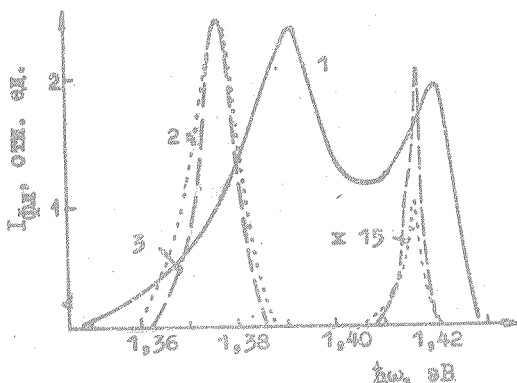
ных легирования ( $N_D > 1 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ ) необходимо также учитывать /1,2/ сужение запрещенной зоны за счет образования "хвостов" плотности состояний у обеих зон и непараболичность зоны проводимости.

Целью данной работы являлось исследование относительного вклада каналов излучательной рекомбинации, формирующих спектр краевой ФЛ сильно легированного фосфида индия, при различных температурах.

Исследовались спектры краевой ФЛ и спектры термомодулированной фотолюминесценции (ТФЛ) монокристаллов  $\text{InP:Te}$ , выращенных по методу Чохральского, с концентрацией свободных электронов  $n = 1,5 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$  и подвижностью носителей  $\mu = 2,2 \times 10^3 \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$  при 300 К. Возбуждение ФЛ осуществлялось излучением He-Ne лазера с длиной волны  $\lambda = 632,8 \text{ нм}$ . Максимальный уровень возбуждения составлял  $\sim 10^{18} \text{ квант}/\text{см}^2 \cdot \text{с}$ . Метод модуляции температуры кристалла позволяет исследовать тонкую структуру полос ФЛ. Более того, поскольку форма спектра ТФЛ зависит от наличия температурного смещения, тушения или уширения полосы /3/, то это позволяет получить информацию о температурном поведении полос ФЛ. Температура образца модулировалась путем пропускания через образец переменного электрического тока с частотой  $f = 12 \text{ Гц}$ . Сигнал ТФЛ регистрировался на частоте  $2f$ .

Спектр краевой ФЛ кристаллов  $\text{InP:Te}$  при 6 К состоит из двух перекрывающихся полос с максимумами при 1,421 и 1,391 эВ (рис. 1, кривая 1). При уменьшении уровня возбуждения на два порядка вид спектра краевой ФЛ практически не изменяется. Для сравнения на рис. 1 приведены также спектры краевой ФЛ специально нелегированных кристаллов  $n\text{-InP}$  с концентрацией электронов  $n = 1 \times 10^{17} \text{ см}^{-3}$  (2) и  $n = 2 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$  (3). Полоса ФЛ 1,416 эВ связана с рекомбинацией экситонов /1,4,5/, а полоса 1,376 эВ - с донорно-акцепторной рекомбинацией /6/. Видно, что при увеличении концентрации свободных электронов происходит некоторое уширение полосы 1,376 эВ и резкое падение интенсивности полосы экситонной люминесценции.

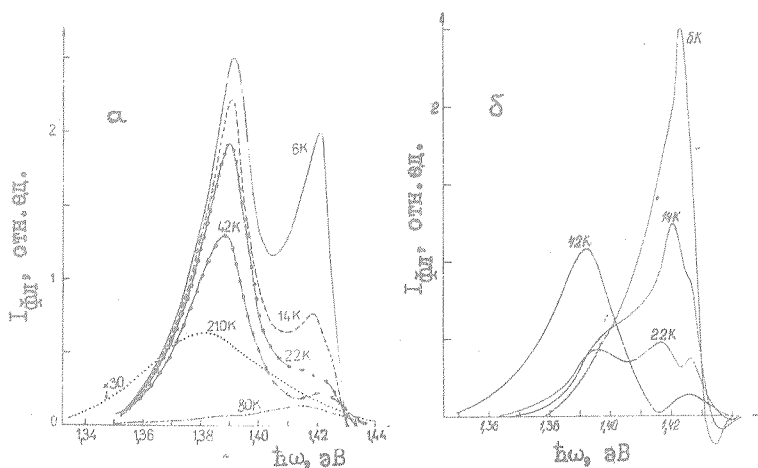
Для того, чтобы выяснить, какими каналами излучательной рекомбинации сформирован спектр краевой ФЛ  $\text{InP:Te}$ , необходимо учесть особенности электронных переходов в сильно легированном



Р и с. 1. Спектры ФЛ кристаллов  $n$ -InP с различной концентрацией электронов при 6 К:  $n = 1,5 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$  (1),  $1 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$  (2) и  $2 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$  (3)

полупроводнике (СЛП)  $n$ -типа. В таком СЛП мелкий донорный уровень "выталкивается" в зону проводимости и полупроводник становится вырожденным. По этой причине теряет смысл говорить о донорно-акцепторной и экситонной рекомбинации. По мере увеличения концентрации донорной примеси вследствие флуктуаций примесного потенциала // у краев зон появляются "хвосты" плотности состояний. Флуктуация вызывает также размытие акцепторных уровней. В СЛП  $n$ -типа с малой эффективной массой электрона  $m_e^*$  "хвост" зоны проводимости в ФЛ практически не проявляется /8/. Рекомбинационное излучение определяется переходами электронов с уровней, лежащих вблизи уровня Ферми. Спектр краевой люминесценции вырожденного СЛП  $n$ -типа формируется рекомбинацией свободных электронов со свободными дырками (канал 1) и с дырками, локализованными на глубоких уровнях "хвоста" валентной зоны (канал 2) и на акцепторных уровнях (канал 3). Максимум полосы ФЛ, обусловленной каналом 2, с увеличением температуры сильно смещается в длинноволновую область из-за термического опустошения все более глубоких уровней в "хвосте" валентной зоны /8/.

Характер зависимости спектров краевой ФЛ кристаллов InP:Te от температуры (рис. 2а) позволяет сделать вывод, что при 6 К спектр сформирован в основном каналами излучательной рекомбина-



Р и с. 2. Температурные зависимости спектра краевой ФЛ (а) и спектра ТФЛ (б) кристаллов InP:Te

при 2 ( $\hbar\omega_{\text{max}} = 1,421 \text{ эВ}$ ) и 3 ( $\hbar\omega_{\text{max}} = 1,391 \text{ эВ}$ ), а не 1 и 3, как утверждалось в [1,2]. Рекомбинационное излучение канала 1, по-видимому, не проявляется на фоне интенсивной рекомбинации канала 2. Форма спектра ТФЛ (рис. 2б) при 6 К свидетельствует о том, что полоса ФЛ, обусловленная каналом 2, при этой температуре испытывает температурные смещение и тушение, причем доминирующую роль играет тушение. В результате при увеличении температуры происходит резкое уменьшение интенсивности этой полосы ФЛ и, кроме того, максимум ее довольно сильно смещается в длинноволновую область и при  $T = 22 \text{ К}$  находится при энергии 1,417 эВ (рис. 2а). Максимум при 1,423 эВ ( $T = 22 \text{ К}$ ) связан с рекомбинационным каналом 1. В интервале температур от  $\sim 30 \text{ К}$  до 80 К основной поток рекомбинации идет через каналы 1 и 3. Из рис. 2б видно, также что при 6 К полоса 1,391 эВ в спектре ТФЛ не проявляется. Это означает, во-первых, что эта полоса ФЛ обусловлена рекомбинацией электронов на довольно глубоких акценторных уровнях (отсутствует тушение). Во-вторых, при достаточно низких температурах не проявляется уширение полосы. В-третьих, тот факт, что не проявляется температурное смещение полосы свиде-

тельствует о том, что данный акцепторный уровень генетически связан с зоной проводимости. Сильное температурное тушение по- лосы ФЛ I, 391 эВ начинается при температуре 30-40 К (рис. 2б), вследствие чего при  $T > 80$  К процесс рекомбинации определяется только каналом I.

Поступила в редакцию

II апреля 1983 г.

#### Л и т е р а т у р а

1. O. Röder, U. Heim, M. H. Pilkuhn, J. Phys. Chem. Sol., 31, 2625 (1970).
2. G. G. Baumann, K. W. Benz, M. H. Pilkuhn, J. Electrochem. Soc., 123, 1232 (1976).
3. А. Н. Гворгобмани, И. М. Тигляну, В. В. Урсаки, Краткие со- общения по физике ФИАН № I, 18 (1983).
4. A. M. White, P. J. Dean et al., Sol. St. Commun., 11, 1099 (1972).
5. D. C. Reynolds, C. W. Litton et al., Phys. Rev., B13, 2507 (1976).
6. U. Heim, Sol. St. Commun., 2, 445 (1969).
7. Б. И. Шкловский, А. Л. Эфрос, ФТП, 4, 305 (1970).
8. А. П. Леванюк, В. В. Осипов, ФТП, 7, 1058 (1973).