

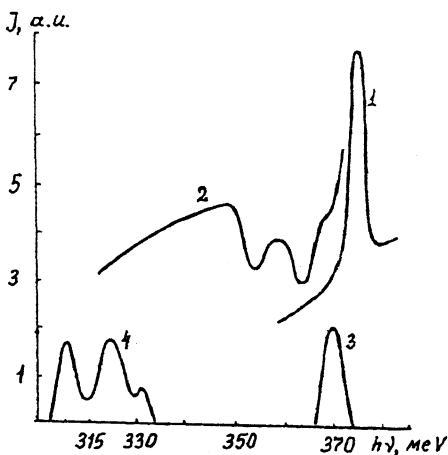
02;05;06.2;06.3;07

©1995

## ФОТОЛЮМИНЕСЦЕНЦИЯ ИОНОВ ХАЛЬКОГЕНОВ В ГЕРМАНИИ

*А.Ю.Ушаков, Р.М.Штеренгас*

Исследование фотолюминесценции было предпринято с целью получения дополнительной информации об энергетическом спектре и особенностях поведения примесей халькогенов в германии. Ранее мы наблюдали на фоне примесной фотопроводимости, связанной с халькогенами, особенности в спектрах при переходах ионов халькогенов в возбужденные состояния  $[1-4]$ . Образцы для исследований изготавливались из монокристаллического германия, легированного серой, селеном или теллуrom с концентрацией порядка  $10^{15} \text{ см}^{-3}$  и частично компенсированного галлием, введенным для ионизации атомов халькогенов. Степень компенсации в различных образцах задавалась в пределах от 0.1 до 2.0. В спектре фотопроводимости германия с примесью теллура наблюдался пик шириной порядка кТ при энергии 375 мэВ (см. рисунок, кривая 1). Для примесей селена и серы переходы в возбужденные состояния сопровождаются отрицательным вкладом в фотопроводимость (см. рисунок, кривая 2). В спектрах оптической прозрачности этим особенностям соответствуют линии поглощения при тех же энергиях. Столь значительное различие в поведении примесей селена (или серы) и теллура мы объясняем различным положением энергетических состояний этих примесей относительно зон германия. В соответствии с результатами наших измерений возбужденное состояние иона теллура располагается под  $\Gamma$ -минимумом зоны проводимости на 95 мэВ выше абсолютного минимума зоны, находящегося в  $L$ -точке. Поэтому электрон из возбужденного состояния иона теллура с большой вероятностью переходит в зону проводимости и создает дополнительное приращение фототока. Резонансный характер перехода в возбужденное состояние приводит к большому значению сечения поглощения (на порядок больше, чем для переходов непосредственно в зону), и вклад в фотопроводимость может на порядок превышать фоновую примесную фотопроводимость. Возбужденные состояния серы, как следует из  $[4]$ , лежат под  $L$ -точкой зоны проводимости с зазорами 19, 10, 4 мэВ относительно дна зоны. (В работе  $[4]$  допущены неточности: среднему пику в спектре серы приписана энергия 14 мэВ; кроме того,



Спектральные зависимости фототока образцов германия, легированного теллуром (кривая 1) и селеном (кривая 2), и фотолюминесценции (3 и 4 — германий, легированный теллуром и селеном соответственно). 77 К.

следует читать: сдвиг спектра для селена относительно серы 0.9 мэВ в сторону больших энергий). Из сопоставления с данными теоретического расчета [5] эти уровни являются  $2P_0$ ,  $3P_0$  и  $3P_{\pm}$  возбужденными состояниями ионов серы и селена. Для участия в фотопроводимости электронам с этих состояний необходимо преодолеть упомянутые энергетические зазоры. По-видимому, эти возбужденные состояния оказываются короткоживущими и для электронов с них тепловой заброс в зону практически исключен.

Фотолюминесценция возбуждалась импульсной ксеноновой лампой-вспышкой при температуре образцов 77 К. Для возбуждения примесных переходов существенна инфракрасная часть спектра в интервале 3–4 мкм. Применена лампа ИСК-75 в кварцевом баллоне. Проверка подтвердила достаточную яркость лампы в столь длинноволновой области. В области энергий порядка переходов в возбужденные состояния получены спектры, изображенные кривыми 3 и 4 на рисунке, — синглет при 370 мэВ для теллура и триплет в области 315–331 мэВ для селена. Формы спектров подобны наблюдавшимся в предыдущих экспериментах, но энергии смещены в сторону меньших значений: порядка 5 мэВ для иона теллура и порядка 37 мэВ для иона селена. В случае селена наблюдаемый стоксовский сдвиг обусловлен, по-видимому, участием в переходах в основное состояние  $\Gamma_0$ -фонона, имеющего в германии энергию 37.7 мэВ [6], что хорошо согласуется с наблюдаемой величиной энерге-

тического сдвига. Электрон, отдавший столь значительную энергию, уже не может быть термически заброшен в с-зону при 77 К. Таким образом, в данном случае резонансные переходы в возбужденные состояния эффективно конкурируют с непосредственными переходами в зону и проявляются отрицательным вкладом в фотопроводимость.

Различие в поведении примесей селена и теллура может быть объяснено тем, что селен мало искажает поле кристаллической решетки германия, имея то же число электронных оболочек, что и германий, в отличие от теллура, у которого на одну электронную оболочку больше.

#### Список литературы

- [1] Радчук Н.Б., Ушаков А.Ю. // ФТП. 1982. Т. 16. С. 1855.
- [2] Радчук Н.Б., Ушаков А.Ю. // ФТП. 1985. Т. 19. С. 749.
- [3] Ушаков А.Ю., Радчук Н.Б., Штеренгас Р.М. // ФТП. 1995. Т. 29. С. 483.
- [4] Ушаков А.Ю., Радчук Н.Б., Штеренгас Р.М. // ФТП. 1995. Т. 29. С. 754.
- [5] Faulkner R.A. // Phys. Rev. 1969. V. 184. P. 713.
- [6] Nilsson G., Nelin G. // Phys. Rev. 1971. B. 3. P. 364.

Санкт-Петербургский  
государственный  
технический университет

Поступило в Редакцию  
24 апреля 1995 г.