

## СЕЧЕНИЕ ОПТИЧЕСКОГО ПОГЛОЩЕНИЯ МЕЛКОГО ДОНОРА В ГЕРМАНИИ

Дружинин Ю. П., Чиркова Е. Г.

В широком спектральном интервале ( $7 < h\nu < 35$  эВ) измерено поглощение ИК излучения мелким донором Sb ( $E_i \approx 10$  мэВ) в компенсированном Ge. Полученные спектральные зависимости отличаются от спектра водородоподобной примеси, что объясняется влиянием анизотропии эффективной массы электрона.

В многодолинных полупроводниках, таких как Ge и Si, энергетический спектр мелких доноров существенно отличается от спектра водородоподобной примеси из-за анизотропии эффективной массы зоны проводимости и химического сдвига, влияние которого на оптическое поглощение мелким донором в непрерывном спектре (т. е. при забросе носителя под действием излучения из основного состояния в зону проводимости) рассматривалось в ряде работ (см. обзор [1]). Однако рассчитанные спектральные зависимости сечения оптического поглощения  $\sigma_i(h\nu)$  в широком диапазоне существенно отличаются от измеренных зависимостей  $\sigma_i(h\nu)$  для мелких доноров в Si. Если предположить, что отличие вызвано пренебрежением в расчетах анизотропией эффективной массы, которая характеризуется величиной  $\gamma = m_z/m_l$  ( $m_z$ ,  $m_l$  — поперечная и продольная эффективные массы соответственно), то в Ge, где анизотропия сильнее ( $\gamma_{Si} = 0.2$ ,  $\gamma_{Ge} = 0.05$ ), отклонение  $\sigma_i(h\nu)$  от водородоподобного поведения сечения оптического поглощения должно быть более значительным. Для проверки этого предположения необходимо измерить  $\sigma_i(h\nu)$  в широком спектральном интервале, поскольку до сих пор при изучении оптического поглощения мелкими донорами в Ge основное внимание уделялось дискретному спектру и узкому участку непрерывного, близкого к энергии ионизации основного состояния примеси  $E_i$  [2-5]. Интерес к измерению усиливается двумя обстоятельствами: с одной стороны, изотропная модель по-прежнему используется при расчете  $\sigma_i(h\nu)$  [6], с другой стороны, недавно появилась работа [7], в которой расчет  $\sigma_i(h\nu)$  произведен с полным учетом анизотропии эффективной массы.

Измерялось оптическое пропускание в дальнем ИК диапазоне компенсированного германия, в котором основной примесью был глубокий многозарядный акцептор (Cu), а компенсирующей — мелкий донор (Sb). Компенсация была такова, что верхний уровень меди в условиях равновесия заполнен примерно наполовину, а мелкий донор ( $N_d \approx 10^{15}$  см<sup>-3</sup>) полностью ионизован. Однако при низкой температуре под действием подсветки, возбуждающей электроны с многозарядного акцептора, происходит перезарядка и сурьма частично нейтрализуется (рис. 1), что вызывает уменьшение прозрачности образца в дальнем ИК диапазоне из-за поглощения фотонов мелкими донорами. Сечение оптического поглощения  $\sigma_i(h\nu)$  можно определить в пренебрежении многократным отражением с погрешностью  $\leq 20$  % по формуле

$$\sigma_i(h\nu) = \frac{1}{dN_0} \ln\left(\frac{T_0}{T_1}\right),$$

где  $d$  — толщина образца,  $N_0$  — концентрация нейтральной сурьмы,  $T_0$  — пропускание без подсветки,  $T_1$  — пропускание при наличии подсветки. Какие-

либо другие механизмы поглощения (например, решеточное) повлиять на результат не могут, поскольку они дают одинаковый вклад в  $T_0$  и  $T_1$  и при делении спектров связанные с ними члены сокращаются. В качестве источника

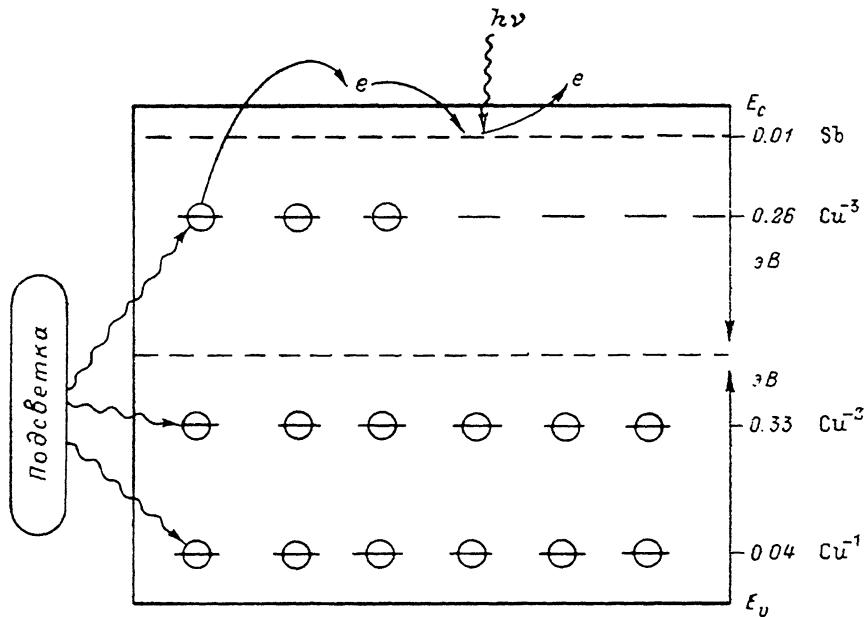


Рис. 1. Схема перезарядки примесей в компенсированном Ge : Cu : Sb под действием подсветки.

подсветки в нашем эксперименте использовалась лампа накаливания, свет от которой проходил через теплый германиевый фильтр. Детектором служил некомпенсированный германий, легированный сурьмой с  $N_d \approx 10^{15} \text{ см}^{-3}$ . Измере-

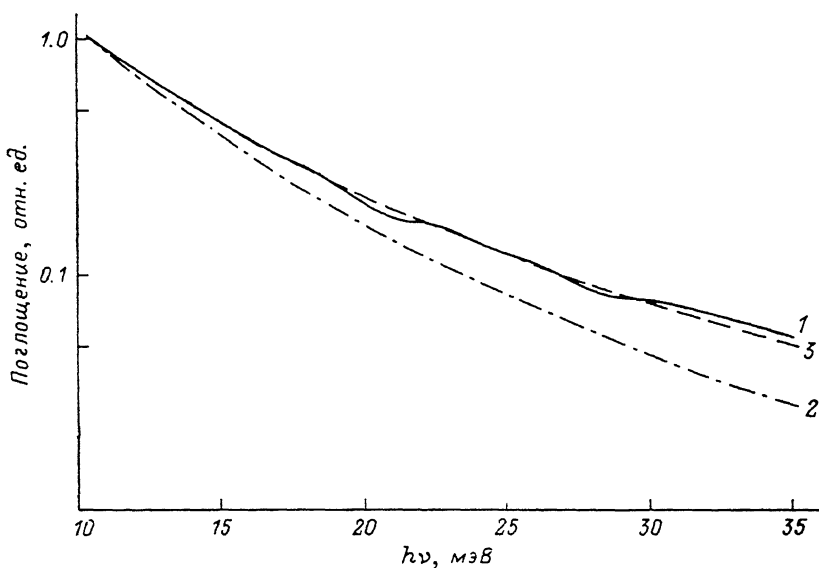


Рис. 2. Спектр сечения оптического поглощения Sb в Ge при  $h\nu \geq E_g$ .

1 — эксперимент, 2 — расчет в изотропной модели [6], 3 — расчет с учетом анизотропии [7].

ния проводились при  $T=4.2 \text{ К}$ . В качестве монохроматора использовался длинноволновый решеточный вакуумный спектрометр FIS-21.

Именно на возможности «включать» и «выключать» с помощью подсветки поглощение мелкими донорами фотонов монохроматического ИК излучения

основана методика, использованная в данной работе. Она обеспечивает большую точность измерения спектральной зависимости поглощения сурьмой в германии в широком интервале энергий фотонов, нежели стандартная методика, согласно которой необходимо иметь два образца одинаковых размеров — чистый и легированный, попеременно устанавливаемых на пути излучения. При этом способе определения  $\sigma_i(h\nu)$  имеется по крайней мере три источника погрешностей — неидентичность размеров, объемных свойств образцов и установка их на пути излучения, что отсутствует в наших измерениях.

На рис. 2 приведены измеренный спектр оптического поглощения мелким донором (кривая 1), а также результаты расчетов: кривая 2 —  $\sigma_i(h\nu)$  в приближении изотропной эффективной массы с учетом химического сдвига основного состояния мелкого донора [6], кривая 3 — теория, учитывающая и анизотропию эффективной массы, и химический сдвиг [7]. Для германия, легированного сурьмой, химический сдвиг не является существенным, поскольку расщепле-

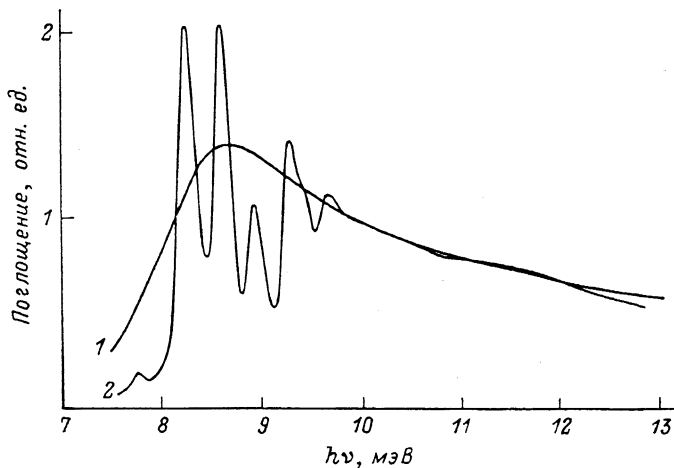


Рис. 3. Длинноволновая часть спектра сечения оптического поглощения Sb в компенсированном (1) и в некомпенсированном (2) Ge,  $N_d = 7 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$  [2].

ние основного состояния сурьмы на триплет и синглет ( $4\Delta = 0.3 \text{ мэВ}$ ) мало по сравнению с фигурирующей в данной теории [7] энергией ионизации  $E_i = 10.5 \text{ мэВ}$ , которая в свою очередь близка к энергии ионизации мелкой примеси  $E_0 = 9.8 \text{ мэВ}$ , получающейся в приближении эффективной массы. Теоретические кривые 2 и 3 совмещены с экспериментальной кривой 1 при энергии основного состояния  $E_i$ . Кривые 1 и 3 в пределах экспериментальной точности демонстрируют хорошее совпадение и значительно расходятся с кривой 2. Изменение интенсивности подсветки приводит к изменению  $N_0$ , зависимость сечения поглощения от энергии при этом не меняется. Если взять из [2, 3] значение  $\sigma_i$ , соответствующее энергии фотона  $h\nu = 10 \text{ мэВ}$ , и оценить концентрацию нейтрализованных подсветкой атомов сурьмы, воспользовавшись приведенной формулой для  $\sigma_i(h\nu)$ , то получится величина  $N_0 \approx 3 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$ . В некомпенсированном материале при такой концентрации примеси наблюдаются линии поглощения, связанные с переходами в возбужденные состояния из основного синглета и триплета (рис. 3, кривая 2, взятая из [2]). В компенсированном германии вместо линий наблюдается широкая полоса поглощения при  $h\nu = 7 \div 10 \text{ мэВ}$  (рис. 3, кривая 1), положение максимума которой близко к энергии перехода из  $1s(A)$ -состояния в  $2p_{\pm}(A)$ -состояние. Такая особенность спектра поглощения в компенсированном материале может быть связана, например, с наличием электрических полей, создаваемых случайно расположенными заряженными примесями и деформацией решетки под действием примесей [4, 5].

Таким образом, измеренное в широком спектральном интервале сечение оптического поглощения мелкого донора в германии существенно отличается

от спектральной зависимости оптического поглощения водородоподобной примеси. Это отличие объясняется влиянием анизотропии эффективной массы.

Авторы выражают признательность Н. Г. Ждановой и М. С. Кагану за предоставление образцов, И. Л. Бейнихесу, Ш. М. Кагану и В. Н. Губанкову за многочисленные обсуждения.

#### Список литературы

- [1] Sclar N. // Prog. Quant. Electron. 1984. V. 9. N 2. P. 149—257.
- [2] Reuszer J. H., Fisher P. // Phys. Rev. 1964. V. 135. N 4A. P. 1125—1132.
- [3] Yosio Nisida, Kenju Horii // J. Phys. Soc. Japan. 1969. V. 26. N 2. P. 388—395.
- [4] Kogan Sh. M., Lifshits T. M. // Phys. St. Sol. (a). 1977. V. 39. N 11. P. 10—39.
- [5] Rotsaert E., Clauws P., Vennik J., Van Goethem L. // J. Appl. Phys. 1989. V. 65. N 2. P. 731—735.
- [6] Coon D. D., Karunaziri R. P. G. // Phys. Rev. 1986. B. 33. Part 1. P. 8228—8233.
- [7] Бейнихес И. Л., Каган Ш. М. // ЖЭТФ. 1987. Т. 93. В. 1. С. 285—301.

Институт радиотехники  
и электроники АН СССР  
Москва

Получена 15.10.1990  
Принята к печати 17.10.1990