

Примесная фотопроводимость халькогенов в твердых растворах $\text{Ge}_{1-x}\text{Si}_x$

© Н.Б. Радчук, А.Ю. Ушаков[¶]

Санкт-Петербургский государственный политехнический университет,
195251 Санкт-Петербург, Россия

(Получена 9 сентября 2004 г. Принята к печати 14 октября 2004 г.)

Исследовано влияние добавки $\sim 3\%$ кремния на энергетические спектры примесей теллура и селена в германии. Регистрировались спектры фотопроводимости при температуре образцов 80 К, в спектральном диапазоне 2.5–5 мкм. На фоне полосы примесной фотопроводимости наблюдались узкие пики возбужденных состояний ионов халькогенов. При данной концентрации кремния не наблюдалось перестройки спектра возбужденных состояний. Происходило увеличение энергетических зазоров между зоной проводимости и примесными состояниями халькогенов.

Теллур и селен ведут себя в германии и кремнии как примеси замещения и образуют в запрещенной зоне глубокие двухзарядные донорные состояния, соответствующие нейтральному и ионизированному состояниям атомов халькогена. Энергии ионизации примесей в германии:

Te [1]: 0.095 и 0.28 эВ,

Se [2]: 0.24 и 0.372 эВ;

в кремнии:

Te [3]: 0.199 и 0.411 эВ,

Se [4]: 0.3 и 0.52 эВ.

Приведенные энергии соответствуют окнам прозрачности атмосферы в инфракрасном спектральном диапазоне, что делает эти материалы перспективными для создания на их основе фотоприемников. В твердых растворах $\text{Ge}_{1-x}\text{Si}_x$ ширина запрещенной зоны изменяется с увеличением доли Si [5], увеличивается и энергия ионизации примесей, что позволяет дополнительно управлять областью чувствительности.

В спектрах фотопроводимости германия, легированного халькогенами, наблюдаются, на фоне обычных примесных полос, узкие пики переходов в возбужденные состояния ионов халькогенов. При этом в образцах, легированных теллуrom, наблюдается одиночный пик положительной полярности, а примеси селена соответствуют три отрицательных пика [6,7]. Для накопления данных о причинах различия в поведении примесей халькогенов исследовались спектры фотопроводимости твердых растворов $\text{Ge}_{1-x}\text{Si}_x$ с примесями Te и Se.

Методом горизонтальной перекристаллизации в графитовой лодочке были выращены монокристаллы сплава Ge–Si с содержанием Si не более 3%, легированные халькогенами. Исходный материал *p*-типа проводимости с концентрацией Ga $\sim 10^{15} \text{ см}^{-3}$ обеспечивал частичную компенсацию доноров. При степени компенсации

$K \approx 0.5$ в спектрах фотопроводимости Ge с примесью халькогенов наблюдались особенности, связанные с переходами иона примеси в возбужденное состояние [8]. Добавка кремния приводила к увеличению энергии ионизации.

На рис. 1 представлена спектральная зависимость фотоэффекта для образца $\text{Ge}_{0.98}\text{Si}_{0.02}$ с примесью Te при температуре 80 К (кривая 2). Для сравнения тут же представлен спектр Ge:Te без примеси кремния. Видно, что пик, соответствующий переходам электронов из однократно ионизованного состояния в возбужденное, сдвинулся для образца с Si (кривая 2) в сторону больших энергий на 7 мэВ, а длинноволновый край, соответствующий переходам электронов из нейтрального состояния в зону проводимости, — на 16 мэВ. Введение в германий 4.5% Si приводит к увеличению энергии ионизации на 30 мэВ, а максимум пика смещается на 16 мэВ относительно Ge:Te. Таким образом, энергия ионизации нейтрального атома теллура изменяется на 7–8 мэВ при изменении содержания Si на 1%, в то время как изменение энергии связи составляет 3.5 мэВ на 1% Si.

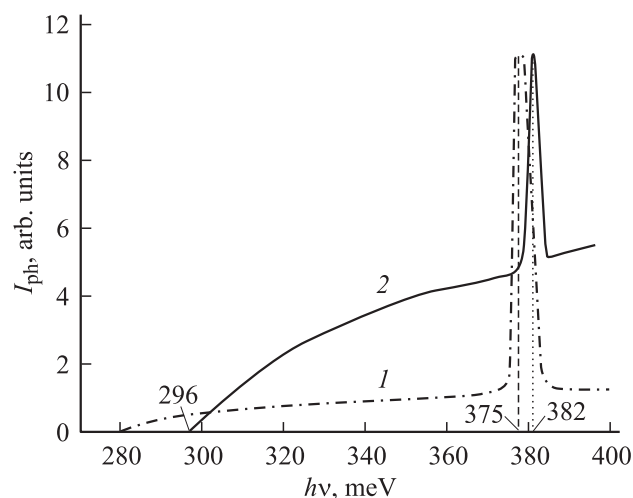


Рис. 1. Спектры фотопроводимости при 80 К для образцов: 1 — Ge:Te, 2 — $\text{Ge}_{0.98}\text{Si}_{0.02}$:Te. Степень компенсации для всех образцов $K \approx 0.5$.

[¶] E-mail: ushakov@twonet.stu.neva.ru

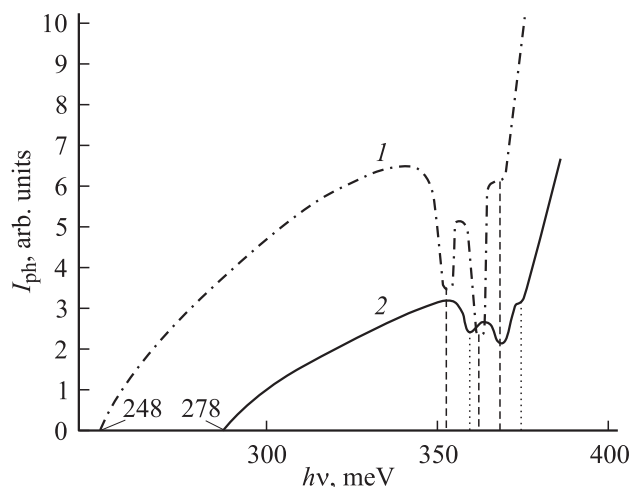


Рис. 2. Спектры фотопроводимости при 80 К для образцов: 1 — $\text{Ge}:\text{Te}$, 2 — $\text{Ge}_{0.985}\text{Si}_{0.015}:\text{Se}$. Степень компенсации для всех образцов $K \approx 0.5$. Вертикальными штрихами и пунктирными прямыми отмечены энергии, соответствующие особенностям спектров; слева направо $h\nu$, мэВ: 353, 360, 362, 368, 373.

На рис. 2 показан спектр фотопроводимости $\text{Ge}_{0.985}\text{Si}_{0.015}:\text{Se}$ при 80 К (кривая 2). В отличие от теллура переходы электронов с иона Se^+ в возбужденные состояния проявляются в виде трех провалов [8]. Видно, что добавка Si приводит к сдвигу спектра в коротковолновую область и увеличению энергии ионизации на 30 мэВ, а энергия связи на 7 мэВ (см. кривые 1 и 2), т.е. энергия ионизации изменяется со скоростью 20 мэВ/1% Si, а энергия возбужденного состояния приблизительно на 5 мэВ/1% Si.

Таким образом, не произошло качественной перестройки спектра фотопроводимости при замене атомов германия кремнием, а наблюдается только его количественное изменение. Вместе с тем для примеси селена по сравнению с примесью теллура скорость изменения энергии переходов при введении кремния приблизительно в 2 раза выше, что свидетельствует о различиях в структуре, создаваемых халькогенами примесных центров, а также может быть вызвано идентифицированной нами связью возбужденных состояний ионов селена с точкой L зоны проводимости германия, а для теллура — с точкой Γ [2].

Список литературы

- [1] H.G. Grimmeiss, L. Montelius, K. Larsson. *Phys. Rev. B*, **37**, 6916 (1988).
- [2] А.Ю. Ушаков, Н.Б. Радчук, Р.М. Штеренгас. *ФТП*, **29**, 754 (1995).
- [3] H.G. Grimmeiss. *Helv. Phys. Acta*, **56**, 317 (1983).
- [4] H.G. Grimmeiss, E. Janzen, B. Skarstam. *J. Appl. Phys.*, **51**, 3740 (1980).
- [5] E.R. Johnson, S.M. Christian. *Phys. Rev.*, **95**, 560 (1954).
- [6] Н.Б. Радчук, А.Ю. Ушаков. *ФТП*, **16**, 1855 (1982).

[7] Н.Б. Радчук, А.Ю. Ушаков. *ФТП*, **19**, 749 (1985).

[8] А.Ю. Ушаков, Р.М. Штеренгас, Л.М. Штеренгас, Н.Б. Радчук. *ФТП*, **32**, 155 (1998).

Редактор Т.А. Полянская

Impurity photoconductivity of chalcogen in solid solutions $\text{Ge}_{1-x}\text{Si}_x$

N.B. Radchuk, A.Yu. Ushakov

St. Petersburg State Polytechnical University,
195251 St. Petersburg, Russia

Abstract Influence of $\sim 3\%$ Si on the energy spectra of chalcogen impurities in Ge has been studied. The photoconductivity spectra was registered at 80 K, with spectrum range 2.5–5 μm . The narrow lines of excited states of chalcogen ions are observed on background of impurity photoconductivity. Rebuilding of excited states' spectrum hasn't been observed at this concentration Si. Energy spacings between conductivity band and impurity states are increased.