

Определение энергии ионизации уровней ванадия в селениде цинка

© В.П. Махний, О.В. Кинзерская[†]

Черновицкий национальный университет им. Ю. Федьковича,
58012 Черновцы, Украина

(Получена 1 июня 2011 г. Принята к печати 15 июня 2011 г.)

Сопоставлением экспериментальных спектров оптического поглощения и фотопроводимости с формулами Луковского установлено, что примесь V в ZnSe образует акцепторные уровни с энергией ионизации 0.62 эВ.

Известно, что переходные металлы в широкозонных полупроводниках образуют глубокие примесные состояния, которые во многом определяют их физические свойства [1]. При этом актуальным является определение параметров глубоких центров, главный из которых — энергия ионизации E_i . Достаточно часто ее находят путем сопоставления экспериментальных спектров примесного поглощения с известной формулой Луковского [2]. В данной работе эта задача решается для примеси V в ZnSe, введение которой в кристалл вызывает существенное увеличение эффективности краевого излучения при 300 К [3].

Легирование осуществлялось путем диффузии V в монокристаллические подложки ZnSe размером $4 \times 4 \times 1$ мм в откачанной до 10^{-4} Торр и запаянной кварцевой ампуле. Отметим, что достаточно высокий коэффициент диффузии ванадия в селениде цинка ($D \approx 5 \cdot 10^{-8}$ см²/с при $T = 1500$ К [4]) обеспечивает полное объемное легирование подложек за 2–4 часа. При этом поверхность образцов остается зеркальной и не требует дополнительной обработки для проведения оптических исследований.

Спектры поглощения измерялись с помощью спектрофотометра СФ-5, входная щель которого освещалась лампой накаливания мощностью 100 Вт. Фотоприемником служил Ge-фотодиод, сигнал с которого подавался на вход преобразователя ток–напряжение. Для исключения влияния эффектов оптической перезарядки примеси образцы располагались за монохроматором, а сканирование по спектру проводилось с длинноволновой стороны.

На рис. 1 показано типичное спектральное распределение относительного коэффициента поглощения α образцов ZnSe:V при 300 К. Он содержит низкоэнергетическую V-полосу с размытым максимумом $\hbar\omega_V$, энергетическое положение которого заметно меньше E_g селенида цинка. Поскольку данная полоса отсутствует в спектрах поглощения базовых подложек, можно считать, что она вызвана наличием примеси V. Согласно [5], существуют четыре основных типа спектров примесного поглощения, форма которых зависит от симметрии примесного центра и зонной структуры полупроводника. Сопоставление экспериментальной зависимости $\alpha(\hbar\omega)$

с приведенными в [5] выражениями показало, что она может быть описана формулой Луковского [2]

$$\alpha \propto (\hbar\omega - E_i)^{3/2} / (\hbar\omega)^3, \quad (1)$$

которая справедлива для переходов электронов из валентной зоны на локальный центр. Энергию последнего можно определить, построив V-полосу в координатах $\alpha^{2/3}(\hbar\omega)^2 - \eta\omega$. Как видно из рис. 1 (см. вставку), большинство экспериментальных точек ложатся на прямую, которая отсекает на оси абсцисс величину энергии ионизации уровня ванадия — $E_i = 0.62$ эВ. На этом же рисунке сплошной линией показана теоретическая кривая, рассчитанная по формуле (1) с использованием найденного значения E_i , которая качественно неплохо описывает опытную форму V-полосы. Таким образом, можно считать, что примесь V в ZnSe создает достаточно глубокий акцепторный уровень с энергией ионизации ~ 0.62 эВ.

С другой стороны, обратим также внимание на возможность электронных переходов с ионизированных

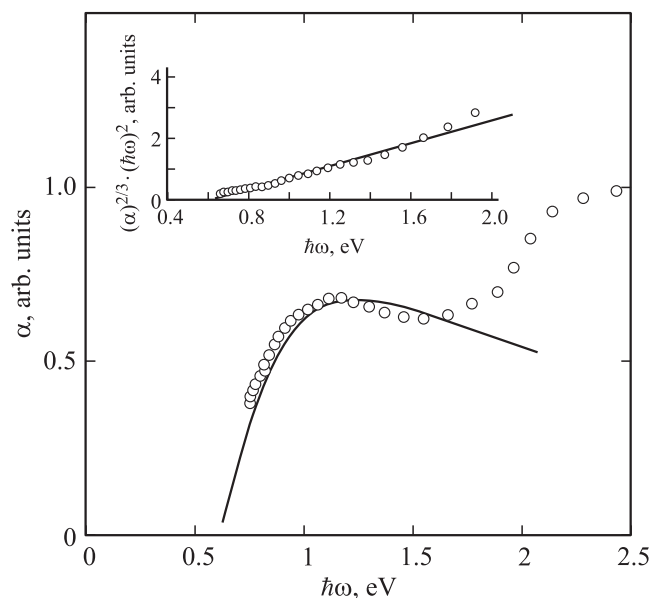


Рис. 1. Типичный спектр поглощения образцов ZnSe:V при 300 К. Точки — эксперимент, сплошная линия — расчет по формуле (1). На вставке — сопоставления экспериментальной зависимости V-полосы с формулой (1).

[†] E-mail: OksanaKinzersky@rambler.ru

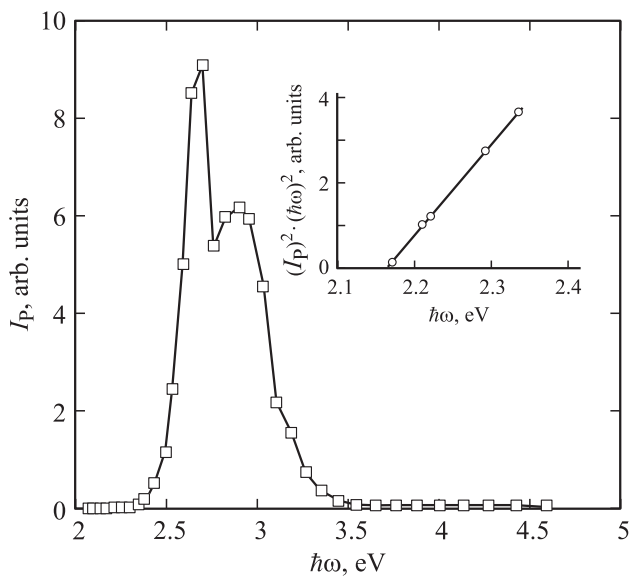


Рис. 2. Спектр фотопроводимости образцов ZnSe:V при 300 К. На вставке — сопоставления низкоэнергетического „хвоста“ кривой $I_p(\hbar\omega)$ с формулой (2).

акцепторов в зону проводимости. В этом случае энергия поглощаемых квантов должна удовлетворять условию $\hbar\omega > E_g - E_i = 2.7 - 0.62 = 2.08$ эВ, а зависимость $\alpha(\hbar\omega)$ описывается выражением [2]

$$\alpha \propto (\hbar\omega - E_i')^{1/2} / \hbar\omega, \quad (2)$$

где $E_i' = E_g - E_i$. Однако сопоставление экспериментальных кривых $\alpha(\hbar\omega)$ с формулой (2) в этом диапазоне энергий затруднено наличием полос поглощения, связанных с переходами носителей в возбужденные состояния V. Эти полосы при 300 К достаточно размыты и вследствие этого могут перекрываться с полосой поглощения, описываемой выражением (2). Выход из этой ситуации возможен путем исследования спектров фотопроводимости, поскольку внутрицентровые переходы не образуют свободных носителей заряда.

Фототок при $\hbar\omega < E_g$ создают только электроны, которые появились в зоне проводимости вследствие переходов с уровней V, находящихся в основном состоянии. Если считать, что $I_p \propto \alpha$, то зависимость $I_p(\hbar\omega)$ в диапазоне энергий $E_i < \hbar\omega < E_g$ также должна описываться формулой (2). Справедливость данного допущения подтверждается рядом экспериментальных фактов. Во-первых, в спектре фотопроводимости присутствует достаточно затянутый низкоэнергетический „хвост“ при энергиях фотонов $\hbar\omega$, заметно меньших E_g . Во-вторых, эта часть кривой $I_p(\hbar\omega)$ в координатах $I_p^2(\hbar\omega)^2 - \hbar\omega$ аппроксимируется прямой, которая отсекает на оси абсцисс энергии $E_i' \approx 2.1$ эВ. И наконец, сумма $E_i + E_i' \approx 2.72$ эВ достаточно неплохо согласуется с E_g селенида цинка при 300 К.

Список литературы

- [1] В.И. Фистуль. *Атомы легирующих примесей в полупроводниках (состояние и поведение)* (М., Изд-во физ.-мат. лит., 2004).
- [2] G. Lucovsky. *Sol. St. Commun.*, **3**, 299 (1965).
- [3] V.P. Makhniy, O.V. Kinzerskaya, P.P. Horley. *Telecommunications Radio Engin.*, **69** (15), 1401 (2010).
- [4] V.P. Makhniy, O.V. Kinzerskaya, K.S. Ufyanitsriy. *Telecommunications Radio Engin.*, **68** (19), 1735 (2009).
- [5] I.C. Inkson. *J. Phys. C*, **14**, (7), 1093 (1981).

Редактор Л.В. Беляков

Definition of levels of ionization energy of vanadium in zinc selenide

V.P. Makhniy, O.V. Kinzerskaya

Fedkivich Chernivtsi National University,
58012 Chernivtsi, Ukraine

Abstract By comparison of the experimental optical absorption spectra and photoconductivity spectra with formulas Lucowsky was found that V impurity in ZnSe forms acceptor levels with ionization energy of 0.62 eV.