

# Нелинейное поглощение света в твердых растворах $Zn_{0.37}Cd_{0.63}Se$

© А. Байдуллаева<sup>¶</sup>, А.И. Власенко, П.Е. Мозоль, Л.Ф. Щербонос

Институт физики полупроводников им. В.Е. Лашкарева Национальной академии наук Украины,  
03028 Киев, Украина

(Получена 22 сентября 2003 г. Принята к печати 17 октября 2003 г.)

Измерены спектры нелинейного поглощения света методом двух источников в монокристаллах  $Zn_{0.37}Cd_{0.63}Se$ . При высоких уровнях возбуждения излучением неодимового лазера наблюдается собственное двухфотонное поглощение света и поглощение света на неравновесных свободных носителях. При низких уровнях возбуждения обнаружены примесные центры с глубиной залегания 0.72, 0.63, 0.53, 0.42, 0.36, 0.25 и 0.20 эВ.

Создание высокоинтенсивных лазерных источников света с перестройкой частоты стимулировало дальнейшее развитие основных направлений классической спектроскопии твердого тела и привело к развитию принципиально новых направлений спектроскопии.

При возбуждении кристаллов лазерным излучением с энергией квантов  $\hbar\omega > \Delta_{CV}/2$ , где  $\Delta_{CV}$  — ширина запрещенной зоны, кроме двухфотонного поглощения (ДФП) могут происходить и существенно конкурировать с ним другие нелинейные процессы поглощения света: 1) двухступенчатые переходы (ДСП) через глубокие локальные уровни примесной или дефектной природы в запрещенной зоне; 2) поглощение света на неравновесных свободных носителях (ПНСН), возбужденных в процессе ДФП; 3) индуцированное поглощение (ИП) и индуцированное просветление (ИПР), обусловленное изменением заселенности примесных уровней [1].

Наложение эффектов ДФП, ДСП, ПНСН, ИП и ИПР затрудняет интерпретацию экспериментальных результатов по нелинейному изменению интенсивности излучения, прошедшего через кристалл. Однако их исследование позволяет получить новую информацию о примесных центрах и энергетической структуре кристаллов.

Спектры нелинейного поглощения можно исследовать, изучая зависимости  $\beta = f(2\hbar\omega - \Delta_{CV})$  при изменении энергии кванта излучения, где  $\beta = K \cdot I^{-1}$  — коэффициент нелинейного поглощения света,  $I$  — интенсивность излучения,  $K$  — коэффициент поглощения.

Метод технически сложен в связи с трудностью получения изотипных по параметрам световых пучков при различных энергиях квантов. Кроме того, он весьма чувствителен к статистическим свойствам света [2,3], возможным проявлениям размерных эффектов [4].

Изучение спектров нелинейного поглощения света путем изменения ширины запрещенной зоны  $\Delta_{CV}$  также ограничено, так как значительного изменения  $\Delta_{CV}$  удается достичь только для кристаллов твердых растворов — например,  $CdS_xSe_{1-x}$ ,  $Zn_xCd_{1-x}Se$ .

Наиболее информативным является метод двух источников света. В нем используются один высокоинтенсивный пучок лазерного излучения с фиксированной

энергией кванта излучения  $\hbar\omega_1$  и второй, менее интенсивный, с широким спектром излучения, из которого с помощью спектральной аппаратуры выделяется узкий монохроматический пучок с переменной энергией кванта  $\hbar\omega_2$  [5].

Экспериментально коэффициент поглощения  $K(\omega_2)$  определялся по формуле

$$K(\omega_2) = \frac{1}{X} \ln \frac{1}{[1 + \Delta I(\omega_2)/I_0(\omega_2)]}, \quad (1)$$

где  $\Delta I(\omega_2) = I(\omega_2) - I_0(\omega_2)$ ,  $I_0(\omega_2)$  и  $I(\omega_2)$  — интенсивности света, падающего на образец в момент времени  $t = 0$  и при  $t > 0$  соответственно,  $X$  — толщина образца. Учитывая, что  $\Delta I(\omega_2)/I_0(\omega_2) = \Delta h(\omega_2)/h_0(\omega_2)$ , где  $h_0(\omega_2)$  — отклонение электронного луча на экране осциллографа от нулевого уровня при  $t = 0$ , обусловленное зондирующим светом с частотой  $\omega_2$ ,  $\Delta h(\omega_2)$  — отклонение электронного луча от уровня  $h_0(\omega_2)$  при  $t > 0$ , получаем выражение для вычислений

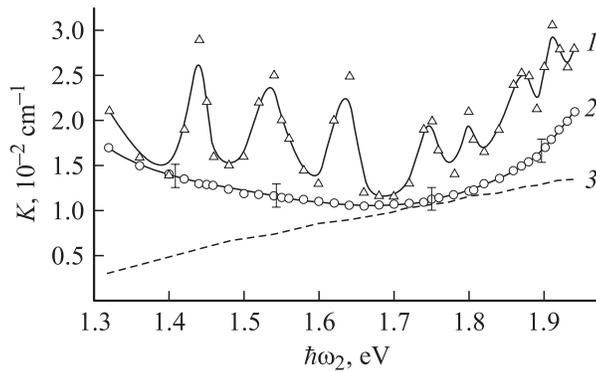
$$K(\omega_2) = \frac{1}{X} \ln \frac{1}{[1 + \Delta h(\omega_2)/h_0(\omega_2)]}. \quad (2)$$

Твердые растворы  $A^{II}B^{VI}$  используют для создания плоских оптических волноводов, являющихся в интегральной оптике тонкопленочными аналогами волоконно-оптических световодов. Поэтому представляется интересным исследовать спектры нелинейного поглощения  $Zn_{0.37}Cd_{0.63}Se$  при использовании высокоинтенсивного излучения лазера с энергией квантов  $\hbar\omega_1 = 1.17$  эВ и длительностью импульса  $1.5 \cdot 10^{-8}$  с.

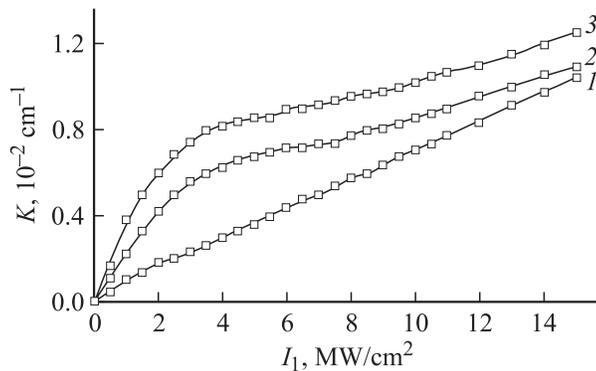
Экспериментальные зависимости коэффициента поглощения для двух кристаллов  $Zn_{0.37}Cd_{0.63}Se$  с шириной запрещенной зоны 2.16 эВ, взятых из различных ростовых ампул, от энергии квантов зондирующего излучения  $\hbar\omega_2$  для линейной поляризации света при интенсивности излучения  $\hbar\omega_1$ , равной 7 и 17 МВт/см<sup>2</sup>, приведены на рис. 1 (кривые 1 и 2 соответственно). В каждой экспериментальной точке спектральной зависимости проводилась большая серия опытов с последующим усреднением.

Как видно, при меньших уровнях лазерной подсветки (кривая 1) на спектре нелинейного поглощения света

<sup>¶</sup> E-mail: baidulla@yahoo.com



**Рис. 1.** Спектры поглощения света  $\text{Zn}_{0.37}\text{Cd}_{0.63}\text{Se}$  при плотности мощности излучения с  $\hbar\omega_1 = 7$  (1) и  $17 \text{ МВт/см}^2$  (2). 3 — теоретическая спектральная зависимость собственного двухфотонного поглощения.



**Рис. 2.** Зависимость коэффициента поглощения  $K$  от интенсивности излучения неодимового лазера с  $\hbar\omega_1$  при  $\hbar\omega_2 = 1.75$  (1),  $1.55$  (2),  $1.43$  эВ (3).

можно выделить 7 максимумов, амплитуды которых различаются для образцов, взятых из разных партий.

При интенсивности излучения лазера  $17 \text{ МВт/см}^2$  наблюдается плавная кривая нелинейного поглощения света. При энергиях квантов зондирующего излучения  $\hbar\omega_2 < 1.75$  эВ проявляется поглощение света на неравновесных носителях заряда. Примесные и (или) дефектные уровни в запрещенной зоне могут одновременно принимать участие в ДФП света в качестве как виртуальных, так и реальных состояний. В первом случае будет происходить собственное ДФП, во втором — резонансное ДФП или ДСП.

Одним из наиболее простых методов разделения ДФП и ДСП является анализ изменения во времени формы зондирующего импульса света с  $\hbar\omega_2$ . Если после прекращения действия интенсивной лазерной подсветки наблюдается релаксационное изменение его интенсивности, то имеет место ДСП. Однако часто форма дополнительного уменьшения во времени интенсивности зондирующего луча идентична форме лазерного импульса во всей исследуемой области спектра. Используя только эти результаты, разделить вышеуказанные процессы не

представлялось возможным. В связи с этим измерялись зависимости  $K = f(I_1)$ , где  $I_1$  — интенсивность излучения с  $\hbar\omega_1$ , при различных энергиях квантов  $\hbar\omega_2$ . На рис. 2 приведены зависимости  $K = f(I_1)$  для различных энергий квантов  $\hbar\omega_2$ . При энергии  $\hbar\omega_2 = 1.75$  эВ наблюдается линейная зависимость, что может свидетельствовать о собственном ДФП. При меньших энергиях  $\hbar\omega_2$  наблюдаются нелинейные зависимости, указывая на проявление резонансных ДСП или ДФП.

Теоретическая зависимость  $K = f(\hbar\omega_2)$  в случае собственного ДФП и разрешенно-запрещенных переходов с учетом кулоновского электронно-дырочного взаимодействия приведена на рис. 1 (кривая 3).

Наличие в запрещенной зоне  $\text{Zn}_x\text{Cd}_{1-x}\text{Se}$  реальных уровней приводит к резонансному возрастанию нелинейного поглощения при низких уровнях возбуждения  $\hbar\omega_1$ , пропорциональному членам вида

$$\frac{1}{\Delta_i - \hbar\omega_2 - (\mu/m_V)(\hbar\omega_1 + \hbar\omega_2 - \Delta_{CV})}, \quad \mu = \left( \frac{1}{m_V} - \frac{1}{m_C} \right)^{-1},$$

где  $\Delta_i$  — глубина залегания примесного уровня,  $m_C$  и  $m_V$  — эффективные массы электронов и дырок соответственно [6,7].

Наличие максимумов на кривой спектрального распределения нелинейного поглощения света при низких уровнях возбуждения  $\hbar\omega_2$  позволяет с точностью до слагаемого  $(\mu/m_V)(\hbar\omega_1 + \hbar\omega_2 - \Delta_{CV})$  оценить глубины залегания уровней, которые оказались равными  $0.72$ ,  $0.63$ ,  $0.53$ ,  $0.42$ ,  $0.36$ ,  $0.25$ ,  $0.20$  эВ. Наблюдаемые полосы в спектре нелинейного поглощения света  $\text{Zn}_{0.37}\text{Cd}_{0.63}\text{Se}$   $0.72$  и  $0.36$  эВ совпадают с энергией залегания примеси меди в  $\text{ZnSe}$ . Уровень с энергией  $0.42$  эВ близок к энергии спин-орбитального расщепления валентной зоны  $\text{ZnSe}$  [6].

Так как сигнал нелинейного поглощения повторяет форму импульса излучения лазера, эти уровни могут выступать в качестве центров быстрой безызлучательной рекомбинации, затрудняя наблюдение фотолюминесценции в этих кристаллах.

Таким образом, метод двух источников света позволяет наиболее информативно исследовать нелинейные процессы поглощения света, которые происходят при возбуждении кристаллов лазерным излучением, и получить новые результаты о примесных центрах и энергетической структуре кристаллов.

## Список литературы

- [1] П.Е. Мозоль, И.И. Пацкун, Е.А. Сальков, Л.С. Марценюк. ФТП, **17**, 1861 (1983).
- [2] B.R. Mollow. Phys. Rev., **175**, 1555 (1968).
- [3] D.A. Kleiman, R.C. Miller, W.A. Nordland. Appl. Phys. Lett., **23**, 243 (1973).
- [4] I.P. Herman, J. Ducuing. Phys. Rev. A, **5**, 2557 (1972).
- [5] П.Е. Мозоль, И.И. Пацкун, Е.А. Сальков, Н.С. Корец, И.В. Фекешгази. ФТП, **14**, 902 (1980).

[6] Е. Джонсон. *Оптические свойства полупроводников* (М., Мир, 1970).

[7] В.И. Бредихин, В.Н. Галкин. ФТТ, **13**, 1329 (1971).

Редактор Л.В. Шаронова

## Nonlinear light absorption in $Zn_{0.37}Cd_{0.63}Se$ solid solutions

A. Baidullaeva, A.I. Vlasenko, P.E. Mozol',  
L.F. Scherbonos

V. Lashkarev Institute of Semiconductor Physics,  
National Academy of Sciences of Ukraine,  
03028 Kiev, Ukraine

**Abstract** Spectra of nonlinear absorption in  $Zn_{0.37}Cd_{0.63}Se$  monocrystals were measured by the method of two light sources. Two-photon fundamental light absorption and absorption of light on nonequilibrium free carriers were observed for high excitation levels of neodymium laser. Impurity centers with the depth of occurrence 0.72, 0.63, 0.53, 0.42, 0.36, 0.25 and 0.20 eV were observed for low excitation levels.