

# Получение и СВЧ фотопроводимость полупроводниковых пленок CdSe

© Ю.В. Метелева, Г.Ф. Новиков<sup>†</sup>

Институт проблем химической физики Российской академии наук,  
142432 Черноголовка, Россия

(Получена 30 января 2006 г. Принята к печати 9 февраля 2006 г.)

Исследована кинетика СВЧ фотопроводимости пленок CdSe, полученных методом пиролиза аэрозоля водных растворов тиомочевинных координационных соединений на кварцевых и ситалловых подложках в диапазоне температур  $T_s = 300\text{--}600^\circ\text{C}$ . Для характеристики пленок использован анализ рентгеновских дифрактограмм, спектров оптического поглощения и отражения. СВЧ фотопроводимость (возбуждение лазерными импульсами 10 нс, 337 нм) исследовалась при 295 К резонаторным методом и диапазонах 9 и 36 ГГц. Кинетика процессов гибели фотоэлектронов, определяющих временные характеристики фотоотклика, зависела от температуры опыта  $T$  и интенсивности падающего света  $I$ . На пленках, полученных при  $T_s < 400^\circ\text{C}$ , наблюдалась кинетика гибели 1-го порядка. При  $T > 450^\circ\text{C}$  кинетика гибели не соответствовала ни 1-му, ни 2-му порядку при низких величинах  $I$ , но приближалась к кинетике 2-го порядка при высоких значениях  $I > 10^{14}$  фотон/см<sup>2</sup> на один импульс.

PACS: 73.50.Mx, 73.50.Pz, 78.30.Fs, 78.47.+p

## 1. Введение

Несмотря на то что в основе широкого применения селенида кадмия в различных технических приложениях лежит хорошо известное явление генерации носителей тока светом [1], количественных данных по реакциям этих заряженных частиц в CdSe крайне мало. В настоящее время это обстоятельство заметно сдерживает дальнейший прогресс в этой области, поскольку недостаток таких данных затрудняет прогнозирование предельных характеристик разрабатываемых устройств. Ключевыми с этой точки зрения являются данные о константах скоростей (сечениях) элементарных реакций, приводящих к гибели избыточных зарядов, в значительной степени определяющих временные характеристики фотоотклика. Однако для получения таких данных необходимо проводить исследования кинетики гибели зарядов на системах, свойства которых можно достаточно легко изменять во время или сразу после синтеза. Безусловно, такие изменения трудно делать на монокристаллах. По-видимому, лучше других для этих целей подходят тонкие пленки. Но поскольку дефектность пленок заведомо выше, чем монокристаллов, важной задачей становится изучение влияния дефектов на свойства пленок.

## 2. Методы изготовления и исследования пленок CdSe

В настоящее время известно много методов получения пленок. Например, химическое осаждение из газовой фазы (методы горячей стенки – hot wall method), осаждение из раствора (chemical bath deposition) [2–5], золь-гель метод (sol-gel method) [5], электроосаждение (при постоянном [6] и переменном [7] токе), напыление,

лазерное распыление (laser ablation) [8]. В работе [9] пленки получали конверсией CdO в парах Se. Однако при использовании этих методов все же трудно в широких пределах варьировать свойства получаемых пленок. Поэтому в данной работе с целью изучения кинетики процессов с участием заряженных частиц пленки получали методом пиролиза водных растворов тиомочевинного комплекса  $\text{Cd}((\text{NH}_2)_2\text{CSe})_2\text{Cl}_2$  на кварцевых и ситалловых подложках, нагретых до  $T_s = 300\text{--}600^\circ\text{C}$ . Это позволило уже при синтезе направленно изменять структуру дефектов в пленках (так как данный метод включает в себя стадию образования комплекса из солей кадмия и селеномочевины, протекающую в растворе) и изучить влияние условий синтеза пленок CdSe на кинетику процессов, проходящих с участием заряженных частиц.

С целью характеристики пленок были измерены спектры пропускания и отражения пленок, а также спектры рентгеновской дифракции. Процессы с участием заряженных частиц в пленках CdSe исследовались методом СВЧ фотопроводимости.

Рентгеновские дифрактограммы записывались с помощью дифрактометра ДРОН АДП-1 ( $\text{CuK}_\alpha$ -излучение, Ni-фильтр,  $\lambda = 1.54$  нм). Спектры пропускания регистрировались на спектрометре Perkin Elmer Lambda EZ210 в диапазоне 200–1100 нм.

Спектры диффузного отражения измеряли с помощью спектрометра PC1000 с фотометрической линейкой, оснащенного интегрирующей сферой. Отражение измеряли относительно подложки (ситалл), коэффициент отражения которой принимали равным 100%. Измерение проводилось в диапазоне  $h\nu = 1.5\text{--}3.5$  эВ.

СВЧ фотоотклик регистрировали в 3-см частотном диапазоне (резонатор типа TE<sub>101</sub>) как изменение под действием света мощности отраженной электромагнитной волны  $\Delta P(t)$ , где  $t$  — время, отсчитываемое от максимума импульса возбуждающего света [10,11]. Вре-

<sup>†</sup> E-mail: ngf@icp.ac.ru  
Fax: 8(09652)21842

Таблица 1. Межплоскостные расстояния в пленках CdSe *d*

№ п/п	<i>d</i> , Å						Порошок CdSe [12]	Отнесение к кристаллическим плоскостям
	Температура пиролиза <i>T<sub>s</sub></i> , °C							
	300	350	400	500	550	600		
1	3.693	3.700	3.708	3.700	3.700	3.700	3.720	(100)
2	3.480	3.486	3.486	3.486	3.486	3.486	3.510	(002)
3	3.278			3.273			3.290	(101)
4	2.539		2.546	2.546		2.539	2.554	(102)
5	2.144	2.144	2.144	2.144	2.144	2.146	2.151	(110)
6	1.977	1.975	1.975	1.975	1.973	1.975	1.980	(103)
7			1.829	1.829	1.829		1.834	(112)
8	1.451				1.454		1.456	(203)
9						1.411	1.407	(210)
10			1.310				1.312	(105)
11				1.241		1.247	1.241	(300)
12				1.205			1.205	(213)
13		1.168		1.169	1.169	1.170	1.170	(302)

меннее разрешение установки  $\sim 50$  нс. Образцы пленок на подложке размещали в ампуле в центре резонатора. Для освещения использовали азотный лазер ЛГИ-505 ( $\lambda = 337$  нм) с длительностью импульса  $\sim 10$  нс. Максимальная интенсивность света, использовавшаяся в опытах, составляла  $3 \cdot 10^{14}$  фотон/см<sup>2</sup> за один импульс. Для изменения интенсивности света использовали светофильтры.

### 3. Результаты исследований и их обсуждение

#### 3.1. Рентгеновский анализ

На рис. 1 представлены дифрактограммы исследованных образцов. Сопоставление межплоскостных расстояний, рассчитанных из измеренных положений дифракционных максимумов, позволило заключить, что основной кристаллической фазой изучаемых образцов является гексагональный CdSe (вюрцит), — совпадение по 8 пикам в измеренном диапазоне углов  $2\Theta$ . Помимо пиков, обусловленных вюрцитом, на дифрактограмме присутствуют малоинтенсивные пики, которые обусловлены подложкой (на рис. 1 они отмечены крестиками).

Таблица 2. Размеры кристаллитов  $D_{[103]}$  в пленках CdSe по направлению [103]

<i>T<sub>s</sub></i> , °C	$D_{[103]}$ (гекс.), Å
300	263
350	389
400	494
500	657
550	834
600	917

Рассчитанные из положения пиков дифрактограммы значения межплоскостных расстояний представлены в табл. 1. Рассчитанные межплоскостные расстояния меньше известных для порошков [12], что может быть объяснено сжатием решетки из-за присутствия вакансий. С ростом температуры получения пленок  $T_s$  межплоскостные расстояния незначительно растут, что может быть объяснено формированием более совершенной структуры пленок при больших  $T_s$ .

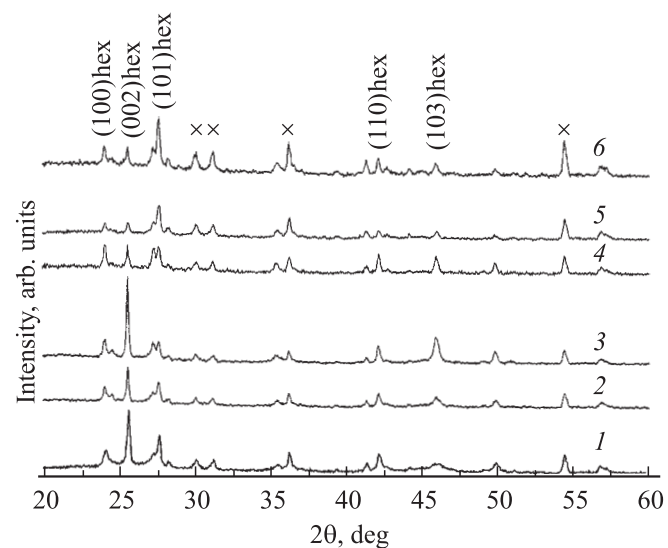


Рис. 1. Рентгенограммы для пленок CdSe, полученных на ситалле при разных температурах пиролиза  $T_s$ , °C: 1 — 300, 2 — 350, 3 — 400, 4 — 500, 5 — 550, 6 — 600. Крестиками отмечены пики, обусловленные подложкой.

Размеры кристаллитов по направлению, перпендикулярному плоскости (103), были оценены по формуле  $D_{[103]} = \lambda / \beta \cos \Theta$ , где  $\lambda$  — длина волны рентгеновского

излучения,  $\beta$  — ширина на половине высоты дифракционного пика, и занесены в табл. 2. Дифракционный пик (103) был выбран для этой цели, поскольку он находится на плоском фоне и не перекрывается с другими пиками. Размеры кристаллитов достаточно малы и с ростом температуры подложки почти линейно увеличиваются.

Таким образом, рост межплоскостных расстояний и размеров кристаллитов в пленках CdSe с увеличением температуры  $T_s$  свидетельствует о том, что структура пленок с ростом  $T_s$  становится более совершенной.

### 3.2. Спектры пропускания

Осаждение пленок сильно зависит от типа подложки. На кварце, нагретом до  $T_s = 300\text{--}400^\circ\text{C}$ , пленки осаждаются плохо, получаются слишком тонкими, неоднородными — по-видимому, в силу слабой адгезии кварца. Поэтому спектры пропускания представлены далее только для пленок, синтезированных при высоких температурах ( $T_s = 500\text{--}600^\circ\text{C}$ ).

На рис. 2 показаны спектры пропускания пленок CdSe, напыленных на кварц. Можно видеть характерные участки быстрого увеличения поглощения. У образцов, синтезированных при  $500\text{--}600^\circ\text{C}$ , этот участок находится в районе  $h\nu = 1.5\text{--}2$  эВ. Положение и форма этого участка схожи с поведением поглощения вблизи красной границы для селенида кадмия. Этот факт позволил определить ширину запрещенной зоны, используя зависимость оптического поглощения  $\alpha$  от энергии фотона  $h\nu$ :

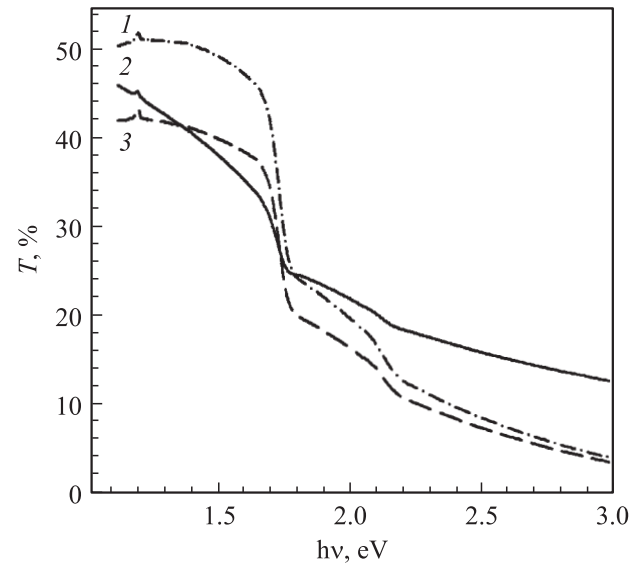
$$\alpha = \frac{k(h\nu - E_g)^{m/2}}{h\nu}, \quad (1)$$

где  $k$  — константа,  $m = 1$  для прямых переходов и  $m = 4$  для непрямых (для CdSe переход прямой). Для определения ширины запрещенной зоны  $E_g$  экстраполировали прямолинейный участок зависимости  $(\alpha h\nu)^{2/m} = f(h\nu)$  по оси абсцисс. Рассчитанные значения ширины запрещенной зоны (рис. 3) занесены в табл. 3 (2-я колонка) и близки к литературным данным [13]: для образцов, полученных при  $500$  и  $600^\circ\text{C}$ , —  $1.71$  эВ, у образца с  $T_s = 550^\circ\text{C}$  —  $1.67$  эВ.

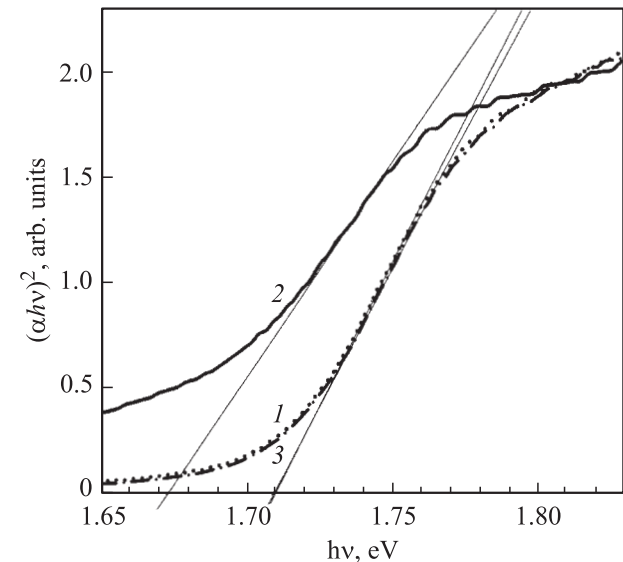
**Таблица 3.** Значения ширины запрещенной зоны  $E_g$ , рассчитанные из спектров пропускания и отражения для пленок CdSe, полученных при разных температурах пиролиза  $T_s$

$T_s, ^\circ\text{C}$	$E_g, \text{эВ}$ (пропускание)	$E_g, \text{эВ}$ (отражение)
300	—	1.705
350	—	1.703
400	—	1.704
500	1.710	1.717
550	1.673	1.722
600	1.711	1.720

В монокристаллах  $E_g = 1.74$  эВ [25]



**Рис. 2.** Спектры пропускания пленок CdSe, синтезированных при  $T_s, ^\circ\text{C}$ : 1 — 500, 2 — 550, 3 — 600.



**Рис. 3.** Зависимости  $(\alpha h\nu)^2 = f(h\nu)$  из спектров пропускания для пленок CdSe, полученных при  $T_s, ^\circ\text{C}$ : 1 — 500, 2 — 550, 3 — 600.

### 3.3. Спектры отражения

Хорошая адгезия ситалла позволила получить однородные пленки CdSe в широком диапазоне температур  $T_s = 300\text{--}600^\circ\text{C}$ . На рис. 4 показаны спектры отражения пленок в диапазоне от 1.5 до 2.5 эВ. Спектры имеют сходный вид, четко видна красная граница в районе  $h\nu = 1.5\text{--}2$  эВ.

Результаты обрабатывались методом, аналогичным [14,15]. Полагая, что отраженный свет складывается из отраженного от поверхности пленки и отраженного

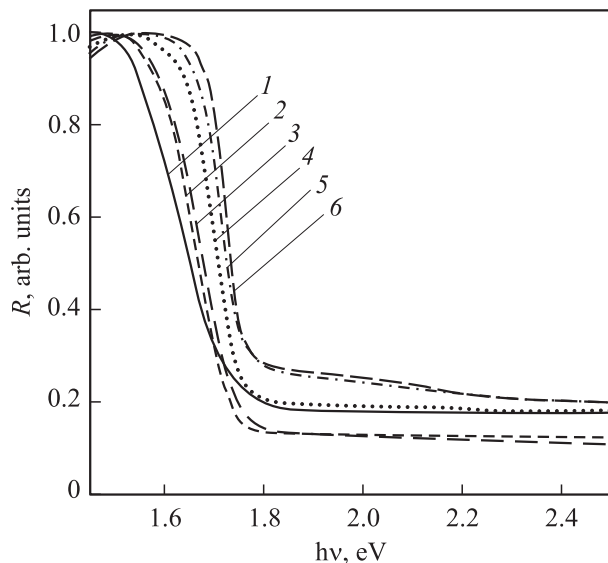


Рис. 4. Спектры отражения для пленок CdSe, полученных при  $T_s$ , °C: 1 — 300, 2 — 350, 3 — 400, 4 — 500, 5 — 550, 6 — 600.

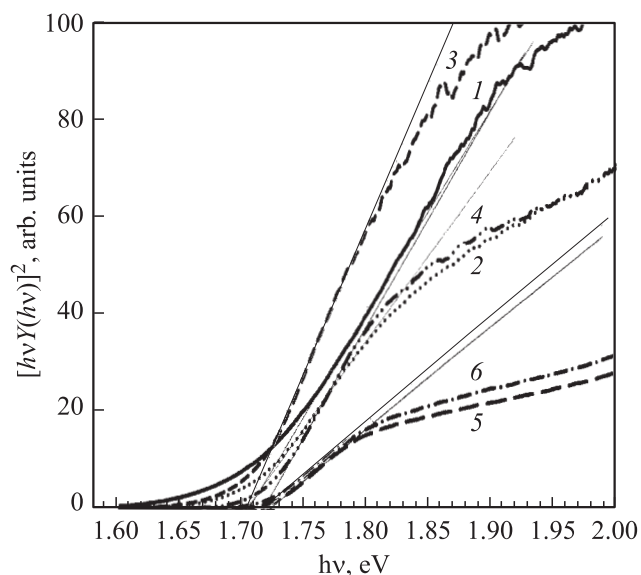


Рис. 5. Зависимости  $[hvY(hv)]^2 = f(hv)$  из спектров отражения для пленок CdSe, полученных при  $T_s$ , °C: 1 — 300, 2 — 350, 3 — 400, 4 — 500, 5 — 550, 6 — 600. Функция  $Y(hv)$  вычислена в соответствии с (4).

от подложки, запишем для коэффициента отражения:

$$R = \frac{I_n + I_r^s}{I_0} = \frac{I_r}{I_0} + R_s \exp(-2\alpha d), \quad (2)$$

где  $I_0$ ,  $I_r$ ,  $I_r^s$  — интенсивности падающего, отраженного от пленки и отраженного от подложки света,  $d$  — толщина пленки. При этом максимальный и минимальный коэффициенты отражения равны

$$R_{\max} = \frac{I_r}{I_0} + R_s; \quad R_{\min} = \frac{I_r}{I_0}. \quad (3)$$

Комбинируя (2), (3), получим

$$Y(hv) = \ln\left(\frac{R_{\max} - R_{\min}}{R - R_{\min}}\right) = 2\alpha d. \quad (4)$$

В соответствии с уравнением Таука, коэффициент поглощения для прямозонных полупроводников при разных энергиях фотона  $h\nu$  дается выражением (1) при  $n = 1$  [16,17].

Значения ширины запрещенной зоны, полученные экстраполяцией данных рис. 5 в соответствии с (1) и (4), оказались близкими к значениям, полученным из спектров пропускания, и литературным данным для селенида кадмия (см. табл. 3). Из данных табл. 3 видно, что с увеличением  $T_s$  значение ширины запрещенной зоны  $E_g$  незначительно, но плавно увеличивается. Наблюдаемое изменение ширины запрещенной зоны можно связать с уменьшением концентрации примеси в пленках с ростом  $T_s$ . О большей концентрации примесей в пленках, полученных при низких  $T_s$ , говорит большее количество переходов с поглощением энергии, меньшей  $E_g$ . Это следует из наличия больших и пологих „хвостов“ спектров как пропускания, так и отражения, построенных в координатах  $(\alpha h\nu)^2 = f(h\nu)$ .

Таким образом, спектры пропускания и отражения свидетельствуют о том, что в зависимости от условий получения пленки CdSe имеют разную концентрацию дефектов. Этот вывод согласуется с данными рентгенофазового анализа.

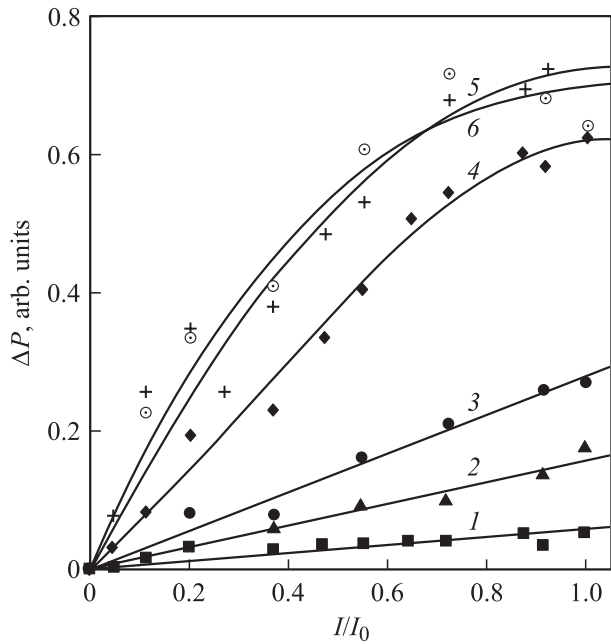
### 3.4. СВЧ проводимость

**3.4.1. Зависимости амплитуды фотоотклика от интенсивности света.** Для предварительного анализа зависимостей формы СВЧ фотоотклика от условий синтеза образцов и интенсивности падающего света экспериментальные зависимости спадов амплитуды фотоотклика от времени на резонансной частоте описывали суммой или отдельными функциями, входящими в выражение

$$\Delta P = a \left(\frac{b}{b+t}\right)^n + \sum_{i=1}^j A_i \exp\left(-\frac{t}{\tau_i}\right), \quad (5)$$

где  $n$  — показатель степени,  $a$  — амплитуда гиперболы,  $b$  — константа,  $A_i$  — амплитуда  $i$ -й экспоненциальной компоненты с характеристическим временем  $\tau_i$ ,  $1 \leq j \leq 3$ . Результаты усредняли по 2 или 3 измерениям.

Известно, что при малом возмущении  $\Delta P/P_0 \ll 1$  амплитуда фотоотклика пропорциональна концентрации свободных носителей [10,18]. На рис. 6 приведены зависимости амплитуд фотооткликов, неразложенных на компоненты (5), от относительной интенсивности падающего света  $I/I_0$ . При низких температурах пиролиза  $T_s = 300$ – $400$ °C наблюдается линейная зависимость амплитуды фотоотклика от  $I$  (рис. 6, кривые 1–3). Это соответствует наблюдению процессов гибели фотоэлектронов 1-го порядка. Типичный фотоотклик таких



**Рис. 6.** Зависимости амплитуды фотоотклика СВЧ фотопроводимости  $\Delta P$  от интенсивности света  $I$  для пленок CdSe, полученных при  $T_s$ , °C: 1 — 300, 2 — 350, 3 — 400, 4 — 500, 5 — 550, 6 — 600.

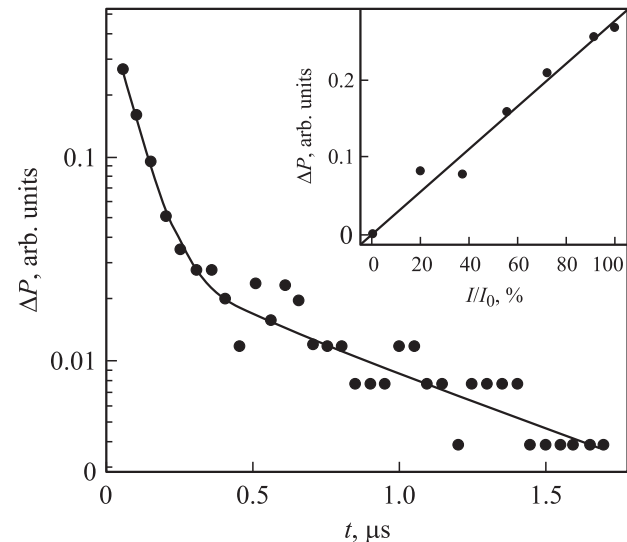
образцов содержит 1 или 2 компоненты, при этом спады СВЧ фотоотклика описываются экспоненциальными функциями (5).

С ростом температуры синтеза зависимость амплитуды фотоотклика от  $I$  становится нелинейной, и чем выше  $T_s$ , тем раньше начинается нелинейный участок на зависимости (рис. 6). Для образцов пленок CdSe, полученных при 500°C, нелинейность зависимости наблюдается при  $I/I_0 \approx 0.72-1$ , при  $T_s = 550^\circ$  — при интенсивности  $I/I_0 > 0.3$ . При  $T_s = 600^\circ$  уже при  $I/I_0 > 0.2$  наблюдается нелинейная зависимость, близкая к корневой. Этот результат может свидетельствовать об увеличении роли процессов 2-го порядка с ростом интенсивности света и уменьшением концентрации примесей, служащих ловушками, с ростом  $T_s$  [19,20]. Такой реакцией, конкурирующей с процессами захвата, вероятнее всего, является реакция рекомбинации свободных электронов и дырок.

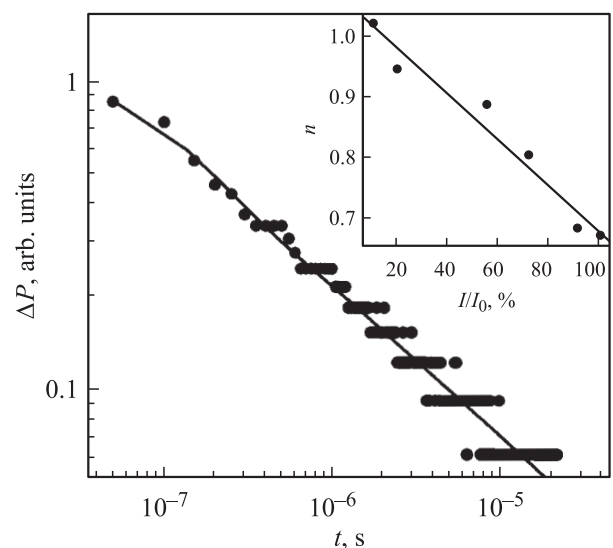
**3.4.2. Кинетика спадов СВЧ фотоотклика для пленок CdSe, полученных при разных температурах подложки.** Спады СВЧ фотоотклика пленок, полученных при  $T_s = 350-400^\circ\text{C}$ , удовлетворительно описываются 1 или 2 экспоненциальными функциями (5), при этом вклад второй компоненты был малым. На рис. 7 представлен спад СВЧ фотоотклика пленки CdSe, полученной при 400°C, в полулогарифмических координатах. Различимы два линейных участка — две экспоненциальные компоненты: быстрая и медленная. На основании линейной зависимости амплитуды СВЧ фотоотклика от интенсивности света (рис. 7, вставка)

и симметричной (относительно резонансной частоты электрического поля  $f_0$ ) частотной зависимости фотоотклика быстрая компонента СВЧ фотоотклика (время полуспада 100–200 нс) может быть отнесена (как и в пленках CdS [18]) к реакции захвата свободных электронов в ловушки, а медленная (время полуспада — несколько микросекунд) — к процессу гибели захваченных электронов.

В пленках, синтезированных при  $T_s = 300^\circ\text{C}$ , спад фотоотклика очень быстрый (время полуспада порядка 50 нс, что совпадает с временным разрешением установки). Вероятно, такая большая скорость гибели элек-



**Рис. 7.** Спад фотоотклика для пленки, полученной при 400°C. На вставке — зависимость амплитуды отклика от интенсивности возбуждения  $I$ .



**Рис. 8.** Спад фотоотклика для пленки, полученной при 500°C. На вставке — зависимость показателя степенной функции  $n$  от интенсивности возбуждения  $I$ .

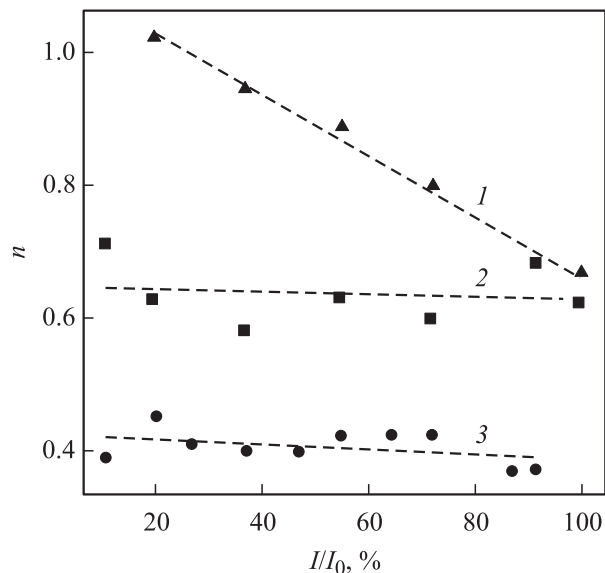


Рис. 9. Показатель  $n$  степенных спадов пленок, полученных при  $T_s$ , °C: 1 — 500, 2 — 550, 3 — 600, в зависимости от интенсивности возбуждения  $I$ .

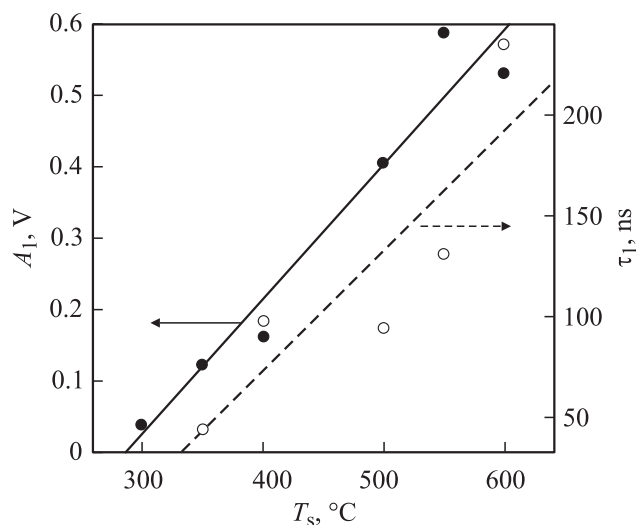


Рис. 10. Зависимости  $A_1$  и  $\tau_1$  (см. (5)) от температуры синтеза  $T_s$ .

тронов обусловлена большой концентрацией примесей в этих образцах.

В пленках, полученных при более высоких температурах, 500–600°C, наблюдается другая кинетика (рис. 8). Спады фотопроводимости практически линейны в двойных логарифмических координатах, т.е. удовлетворительно описываются степенными функциями. Показатель степени  $n$  этих функций не был одинаковым. Например, для пленок, полученных при  $T_s = 500^\circ\text{C}$ , показатель  $n$  зависел от интенсивности возбуждения, как показано на вставке к рис. 8. В принципе такая зависимость может быть кажущейся, например, обусловленной наложением двух зависимостей — гиперболы

при  $n \approx 1$  и экспоненты. Действительно, с ростом  $T_s$  концентрация примеси хлора в пленках уменьшается, образуется меньше электронных ловушек, и реакция избыточных свободных электронов и дырок между собой может начать эффективно конкурировать с их захватом. Это коррелирует с зависимостями амплитуды фотоотклика в таких пленках от интенсивности возбуждения (рис. 6, кривые 4–6) — для пленок, полученных при  $T_s = 500\text{--}600^\circ\text{C}$ , эта зависимость нелинейная. Этот факт согласуется с высказанным предположением, что с ростом  $T_s$  растет вклад в кинетику процессов 2-го порядка.

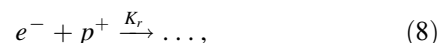
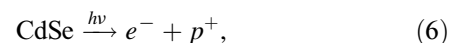
Зависимость показателя степенной функции от интенсивности возбуждения для образцов, полученных при более высоких  $T_s$  (550 и 600°C), в пределах ошибки эксперимента отсутствует (рис. 9). Его значения колеблются при этом от  $n \approx 0.6$  до  $n \approx 0.4$ . Форма спадов при повышении интенсивности света  $I$  постепенно меняется и переходит в степенную функцию. Время полуспада фотоотклика в таких пленках заметно уменьшается с ростом  $I$ .

Факт, что в области линейной зависимости амплитуды фотоотклика от интенсивности возбуждения (рис. 6), характеристические времена полураспада быстрой компоненты больше у пленок с большей  $T_s$  (рис. 10) — веское свидетельство снижения концентрации акцепторных примесей в пленках при увеличении  $T_s$ .

Однако наблюдаемая зависимость амплитуды фотоотклика  $A_1$  от  $T_s$  (рис. 10) позволяет предположить, что процесс захвата электрона на акцепторную примесь — не единственный наблюдаемый процесс, приводящий к спаду фотоотклика. Существенный вклад, вероятно, дает еще более быстрый процесс с характеристическим временем спада, меньшим временного разрешения установки.

В области высоких интенсивностей света таким быстрым процессом может быть рекомбинация свободных электронов и дырок. Действительно, можно назвать границу для температуры получения пленок  $T_s = 500^\circ\text{C}$ , при которой при увеличении интенсивности света происходит переход от экспоненциального закона спада к степенному. По-видимому, при этих условиях синтеза пленок сильно изменяется структура дефектов, что обуславливает изменение соотношения вклада в кинетику СВЧ фотопроводимости процессов 1-го и 2-го порядка.

Если принять вывод о преобладающем вкладе в процесс гибели электронов в пленках, полученных при  $T_s \gtrsim 500^\circ\text{C}$ , процесса рекомбинации свободных электронов и дырок при высоких интенсивностях света:



то можно приближенно оценить константу скорости этого процесса  $K_r$ , используя способ [21],

$$K_r \approx \frac{1}{\alpha \beta I_{0.7} \tau_e \left[ 1 - \exp\left(-\frac{t_{0.7}}{\tau_e}\right) \right]}. \quad (9)$$

Здесь  $e^-$ ,  $p^+$  — свободные электрон и дырка,  $\beta$  — квантовый выход процесса ионизации (6),  $I_{0.7}$  — интенсивность света, при которой зависимость фотоотклика от интенсивности света отклоняется от линейной на 30%,  $t_{0.7}$  — момент времени, в который регистрируется зависимость фотоотклика от интенсивности света,  $\tau_e$  — характеристическое время процесса гибели 1-го порядка (7),  $A_e$  — электронная ловушка.

Подставляя значения параметров  $\beta = 1$ ,  $\tau_e = 2 \cdot 10^{-7}$  с,  $t_{0.7} = 5 \cdot 10^{-8}$  с (т.е.  $t_{0.7}$  примерно соответствует положению максимума фотоотклика и временному разрешению установки) и  $I_{0.7} = 10^{13}$  фотон  $\cdot$  см $^{-2}$  за один импульс, из соотношения (9) получим

$$\alpha K_r \approx 2 \cdot 10^{-6} \text{ см}^2 \text{ с}^{-1}$$

для пленок, полученных при  $T_s = 500\text{--}550^\circ\text{C}$  (рис. 6, кривая 5 и рис. 8). Принимая для коэффициента поглощения света на длине волны 337 нм значение  $\alpha = 10^6$  см $^{-1}$ , получим оценку константы скорости рекомбинации  $K_r \approx 2 \cdot 10^{-12}$  см $^3$ /с. Заметим, что полученная оценка константы скорости вполне соответствует сделанному предположению о межзонной рекомбинации свободных носителей тока в CdSe при высоких интенсивностях света. Действительно, аналогичная величина для CdS составляет  $2 \cdot 10^{-13}$  см $^3$ /с [22]. При экситонном механизме рекомбинации величины констант скоростей на 1–2 порядка величины больше: например,  $10^{-11}$  см $^3$ /с для AgBr [21,23],  $2 \cdot 10^{-12}$  см $^3$ /с для AgCl [24].

#### 4. Заключение

Таким образом, проведенный анализ данных показал, что при изменении условий получения пленок CdSe с ростом температуры подложки  $T_s$  уменьшается концентрация примесей и изменяется распределение ловушек электронов по глубине. Это приводит к изменению соотношения процессов захвата электрона и рекомбинации и позволяет интерпретировать степенную кинетику с показателем степени  $n < 1$  как сочетание гиперболической компоненты (процесс рекомбинации) и экспоненциальной.

Заметим, что попытка получить сведения о кинетике процессов с участием электронов уже предпринималась в работе [9], в которой методом СВЧ фотопроводимости были исследованы пленки CdSe, осажденные электрохимическим способом. Авторы [9] выделили 3 участка на спаде СВЧ фотоотклика: быстрый экспоненциальный спад, затем степенная зависимость, отнесенная авторами к дисперсионному транспорту, и далее излом с более

быстрым спадом, отнесенным к процессу рекомбинации. Частично наши результаты не согласуются с этим выводом. Однако следует иметь в виду, что временные разрешения установки, примененной в работе [9], составляло 60 нс, и анализ кинетики они проводили начиная со 100 нс. Учитывая к тому же наблюдавшуюся авторами [9] не совсем линейную зависимость амплитуды быстрой компоненты от интенсивности света, сделанные выводы об отнесении участков спада к определенным процессам трудно признать надежными. Принимая в расчет сделанную нами оценку константы скорости процесса электронно-дырочной рекомбинации, вполне можно допустить, что процессы рекомбинации в экспериментах [9] могли проявляться гораздо раньше, чем это считают авторы цитируемой работы.

Авторы выражают свою благодарность студентке Липецкого педагогического университета В.В. Шацко за проведение ряда экспериментов при выполнении ее дипломной работы.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, проекты № 03-03-32202-а, 03-03-96404-р2003цпр, 05-03-33016-а.

#### Список литературы

- [1] *Properties of Wide Bandgap II-VI Semiconductors*, ed. by R. Bhargava (INSPEC Publications. London, 1997).
- [2] P.P. Hankare, V.M. Bhuse, K.M. Garadkar, S.D. Delekar, I.S. Mulla. *Semicond. Sci. Technol.*, **19**, 70 (2004).
- [3] V.M. Garcia, M.T.S. Nair, P.K. Nair, R.A. Zingaro. *Semicond. Sci. Technol.*, **11**, 427 (1996).
- [4] M.E. Hernandez Torres, R. Silva-Gonzalez, H. Havarro-Conteras, M.A. Vidal, J.M. Gracia-Jimenez. *Modern Phys. Lett. B*, **15**, 741 (2001).
- [5] E. Lifshitz, I. Dag, I. Litvin, G. Hodes, S. Gorer, R. Reisfeld, M. Zelner, H. Minti. *Chem. Phys. Lett.*, **288**, 188 (1998).
- [6] S.J. Lade, M.D. Uplane, M.M. Uplane, C.D. Lokhande. *J. Mater. Sci.: Materials in Electronics*, **9**, 477 (1998).
- [7] V. Swaminathan, V. Subramanian, K.R. Murali. *Thin Sol. Films*, **359**, 113 (2000).
- [8] G. Perna, V. Capozzi, S. Pagliara, M. Ambrico. *Thin Sol. Films*, **387**, 208 (2001).
- [9] S. Grabtchak, M. Cocivera. *J. Appl. Phys.*, **79**, 786 (1996).
- [10] G.F. Novikov, B.I. Golovanov, A.V. Chukalin, N.A. Tikhonina. *Sci. Appl. Photo*, **39** (4), 313 (1998).
- [11] С.Ю. Грабчак, Г.Ф. Новиков, Л.С. Моисеева, М.Р. Любовский, М.В. Алфимов. *Журн. науч. и прикл. фотографии*, **35** (2), 134 (1990).
- [12] U. Pal, D. Samanta, S. Ghorai, B.K. Samantaray, A.K. Ghaudhuri. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, **25**, 1488 (1992).
- [13] Р.Х. Бьюб. *Физика и химия соединений A<sup>II</sup>B<sup>VI</sup>* (М., Мир, 1970).
- [14] V. Kumar, T.P. Sharma. *J. Phys. Chem. Sol.*, **59** (8), 1321 (1998).
- [15] S.Kr. Sharma, S. Kumar, V. Kumar, T.P. Sharma. *Opt. Mater.*, **13**, 261 (1999).
- [16] *Amorphous and Liquid Semiconductors*, ed. by J. Tauc (N. Y., Plenum Press, 1974).

- [17] T.P. Sharma et al. C.S.I.O. Communication, **19** (3–4), 63 (1992).
- [18] Ю.В. Метелева, Г.Ф. Новиков, Н.Л. Сермакашева, В.Н. Семенов. Хим. физика, **20** (7), 30 (2001).
- [19] Ю.В. Метелева, А.В. Наумов, Н.Л. Сермакашева, В.Н. Семенов, Г.Ф. Новиков. Хим. физика, **20** (9), 39 (2001).
- [20] В.Н. Семенов, А.В. Наумов. Вестн. ВГУ. Сер. химия, биология, **2**, 50 (2000).
- [21] G.F. Novikov, V.I. Golovanov. J. Imaging Sci., **39** (6), 520 (1995).
- [22] A.V. Tataurov, Yu.V. Meteleva, N.L. Sermakasheva, G.F. Novikov. Russian Chem. Bull., Int. Edition, **52** (5), 1201 (2003).
- [23] Г.Ф. Новиков, Б.И. Голованов, М.В. Алфимов. Химия высоких энергий, **29** (6), 429 (1995).
- [24] Г.Ф. Новиков, Б.И. Голованов, Н.А. Тихонина. Изв. АН. Сер. хим., **9**, 2234 (1996).
- [25] M. Gardona, G. Harbeke. Phys. Rev. A, **1237**, 1467 (1965).

*Редактор Т.А. Полянская*

## **Production and the SHF photoconductivity of semiconductor CdSe films**

*Yu.V. Meteleva, G.F. Novikov*

Institute for Problems of Chemical Physics,  
Russian Academy of Sciences,  
142432 Chernogolovka, Russia