

**В.В. Трегулов**

**ИССЛЕДОВАНИЕ ГЕТЕРОСТРУКТУР CdS/Si(P),  
ИЗГОТОВЛЕННЫХ МЕТОДОМ  
ГИДРОХИМИЧЕСКОГО ОСАЖДЕНИЯ CdS**

Приведены результаты исследования химических, структурных и электрофизических характеристик пленок CdS, а также гетероструктур CdS/Si(p), изготовленных с помощью технологии гидрохимического осаждения сульфида кадмия из водных растворов. Рассмотрена возможность применения этих гетероструктур в качестве фотоэлектрических преобразователей солнечной энергии.

*вольт-амперная характеристика, вольт-фарадная характеристика, гетероструктура, кремний, контактная разность потенциалов, сульфид кадмия, фотоэлектрический преобразователь, электронная Оже-спектроскопия.*

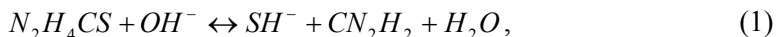
Сульфид кадмия (*CdS*) в настоящее время широко используется в микроэлектронике. В частности, важной областью его применения являются фотоэлектрические преобразователи (ФЭП) солнечной энергии. Тонкие пленки *CdS* применяются в ФЭП в качестве поглощающего и буферного слоев. Для формирования слоев *CdS* используется достаточно большое число методов: молекулярно-лучевая эпитаксия, осаждение из металл-органических соединений в паровой фазе, сублимация в закрытом объеме, пиролиз аэрозолей, электрохимическое осаждение, осаждение в химической ванне из водных растворов (гидрохимическое осаждение) [7; 9]. Несмотря на большое количество публикаций, посвященных исследованию *CdS*, задача оптимизации технологии его изготовления и изучения характеристик гетероструктур, остается актуальной.

В работе представлены результаты исследования тонких пленок *CdS*, изготовленных с помощью технологии гидрохимического осаждения, а также гетероструктур *CdS/Si(p)* (сульфид кадмия на кремнии р-типа проводимости). Как отмечается в работах [7] и [9], главным достоинством метода гидрохимического осаждения является простота реализации. Рост пленок *CdS* проходит в равновесных условиях, что позволяет снизить концентрацию дефектов по сравнению с широко применяемым методом пиролиза аэрозолей [7]. Кроме того, метод гидрохимического осаждения позволяет получать достаточно качественные поликристаллические пленки на подложках с большой площадью поверхности [9]. Эта особенность гидрохимической технологии важна для организации массового производства ФЭП.

Исследуемые в данной работе пленки *CdS* формировались на поверхности подложек осаждением из водного раствора, содержащего хлорид кадмия  $CdCl_2$  с концентрацией 0,44 М и тиомочевину  $N_2H_4CS$  с концентрацией 0,22 М. Для

образования ионных комплексов использовался концентрированный водный раствор аммиака  $NH_4OH$ . Хлорид кадмия является источником ионов кадмия, тиомочевина – источником ионов серы для образования соединения  $CdS$ .

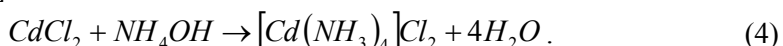
Процесс образования соединения  $CdS$  при гидрохимическом осаждении можно представить следующим образом. Образование ионов серы  $S^{2-}$  происходит в результате диссоциации тиомочевины, которая протекает в два этапа [9]:



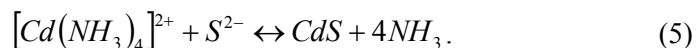
Реакции (1) и (2) происходят с участием ионов  $OH^-$ , источником которых служит концентрированный водный раствор аммиака  $NH_4OH$  [9]:



Далее происходит взаимодействие концентрированного водного раствора аммиака с  $CdCl_2$  [9]:



В результате реакции (4) возникает сложное соединение  $[Cd(NH_3)_4]Cl_2$ , которое при диссоциации дает комплексный ион  $[Cd(NH_3)_4]^{2+}$ . Соединение  $CdS$  образуется за счет химического взаимодействия комплексного иона, содержащего кадмий, возникающего в ходе реакции (4) и ионов серы, возникающих в ходе реакции (1) и (2). В работе [9] эта реакция описана уравнением



Соотношение между основными компонентами  $[Cd(NH_3)_4]Cl_2$  и  $N_2H_4CS$  поддерживалось равным 1:1 (по объему). Далее в раствор погружались предварительно подготовленные подложки. Рост пленок  $CdS$  на подложках проводился в течение 20 минут при температуре 90 °С. Показатель pH в ходе процесса роста пленок поддерживался равным 11.

В качестве подложек для формирования гетероструктуры использовался монокристаллический кремний р-типа проводимости с удельным сопротивлением 1 Ом·см. Такой кремний обычно используется в солнечной энергетике. Для исследования оптических спектров пропускания одновременно производился рост пленок  $CdS$  на плоскопараллельных стеклянных пластинах.

Проводилось также легирование пленок  $CdS$  индием в процессе роста за счет добавления в реакционную среду водного раствора хлорида индия  $InCl_3$  с концентрацией 0,44 М. Рост легированных пленок проходил при температуре 90 °С в течение 20 минут. Содержание индия в пленке  $CdS$  регулировалось изменением соотношения  $CdCl_2/InCl_3$ . Согласно работе [5], легирование  $In$  позволяет эффективно управлять электрофизическими характеристиками  $CdS$ .

Был изготовлен один образец гетероструктуры  $CdS/Si(p)$  с нелегированной пленкой  $CdS$  (образец 1) и четыре образца с легированными индием пленками  $CdS$  с различными значениями соотношения  $CdCl_2/InCl_3$  (образцы 2–5). Даль-

нейшее увеличение доли  $InCl_3$  приводило к ухудшению адгезии пленки к подложке.

После осаждения пленок на поверхности подложек проводилось травление образцов в 10-процентном водном растворе  $HCl$  в течение 20 секунд для удаления аморфной фазы  $CdS$ . Затем образцы промывались дистиллированной водой и высушивались.

Пленки  $CdS$  для всех образцов имели проводимость  $n$ -типа и толщину, равную 2,5 мкм.

Химический состав пленок  $CdS$  исследовался методом электронной Оже-спектроскопии. Характер Оже-спектров поверхности пленок  $CdS$  для всех образцов был идентичен, за исключением интенсивности спектральных линий вследствие различия концентрации химических элементов, входящих в состав пленки. Типичный Оже-спектр, полученный в результате исследования образцов 1–4, представлен на рисунке 1.

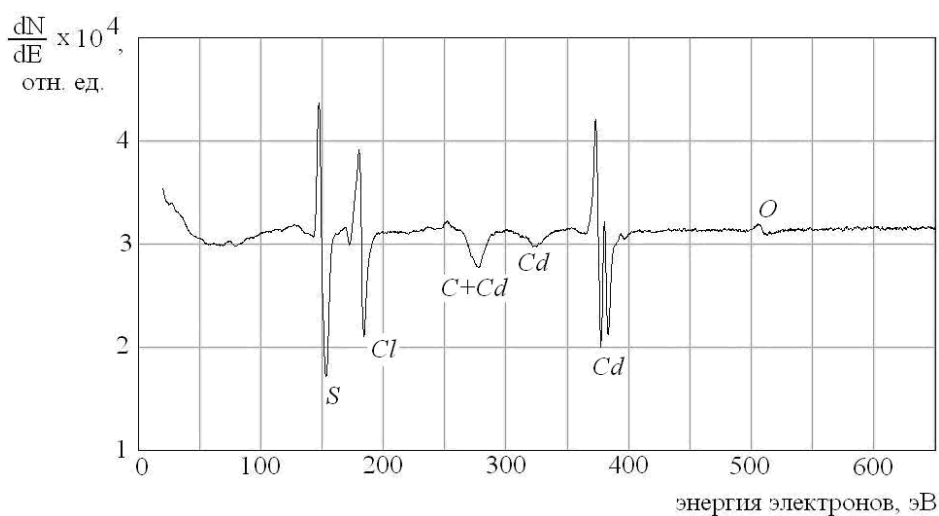


Рис. 1. Оже-спектр пленки  $CdS$

Примесь  $In$  зарегистрирована в спектрах образцов 3 и 4. Спектральная линия  $In$  для этих образцов в увеличенном виде показана на рисунке 2. Следует отметить, что для образца 2 концентрация  $In$  была ниже предела чувствительности Оже-спектрометра. Таким образом, примесь  $In$  в пленке  $CdS$  обнаруживается при соотношении  $CdCl_2/InCl_3$ , равном 1:0,5.

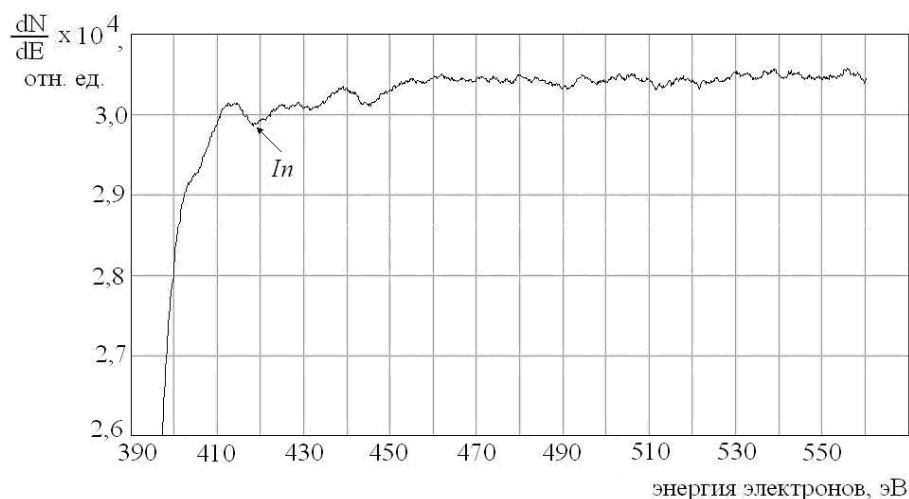


Рис. 2. Фрагмент Оже-спектра, содержащий линию *In* (образцы 3 и 4)

На основе полученных Оже-спектров были рассчитаны атомные концентрации химических элементов *S*, *Cd*, *Cl*, *C*, *O*, *In*, входящих в состав пленки *CdS* (табл. 1).

Таблица 1

Атомные концентрации химических элементов,  
входящих в состав пленок *CdS*

Номер образца	Соотношение $CdCl_2/InCl_3$	Атомная концентрация, %					
		<i>S</i>	<i>Cd</i>	<i>Cl</i>	<i>C</i>	<i>O</i>	<i>In</i>
1	1:0	45,9	26,5	16,6	9,7	1,3	–
2	1:0,3	46,4	27,4	6,3	18,8	1,4	–
3	1:0,5	36,4	25,8	11,9	20,6	что	0,5
4	1:0,7	60,8	24,6	2,1	11,6	0,9	0,5

Из таблицы 1 видно, что все образцы имеют избыточную концентрацию серы по отношению к кадмию. Согласно работе [5] для *CdS* должна наблюдаться обратная ситуация: наличие вакансий серы и избыток кадмия. Именно этим обусловлен *n*-тип проводимости *CdS* [5]. Наблюдаемую ситуацию можно объяснить тем, что метод электронной Оже-спектроскопии фиксирует химический состав пленки и не дает ответа на вопрос, какая доля примеси является электрически активной. Так как полученные пленки *CdS* на всех образцах имеют *n*-тип проводимости, то можно считать, что не вся наблюдаемая примесь серы является электрически активной. Избыток серы может быть обусловлен наличием в пленке *CdS* промежуточных продуктов реакции, которые не были удалены в ходе травления и отмывки образцов.

Концентрация *In* не изменяется с ростом доли  $InCl_3$  в соотношении  $CdCl_2/InCl_3$  в диапазоне значений 1:0,5–1:0,7.

Важно отметить, что все образцы содержат достаточно большую концентрацию примеси хлора, который может создавать электрически активные дефекты с глубокими уровнями в запрещенной зоне  $CdS$ . Источником хлора являются исходные компоненты  $CdCl_2$  и  $InCl_3$ , используемые при синтезе пленки  $CdS$ .

Источником углерода могут быть промежуточные соединения, возникающие при диссоциации тиомочевинны  $N_2H_4CS$  в ходе реакции (1). Наиболее вероятным источником кислорода может быть соединение  $CdO$ , возникающее за счет окисления кадмия кислородом, содержащимся в реакционном объеме.

Исследование распределения концентрации примесей по глубине показало, что в объеме пленок  $CdS$  содержание углерода и кислорода снижается вдвое, концентрации остальных примесей существенно не изменяются. Отсюда следует, что другим источником углерода и кислорода является поверхностная адсорбция, протекающая после изготовления образцов при их сушке при повышенной температуре ( $80\text{ }^\circ\text{C}$ ), а также при длительном хранении на воздухе.

Структурные исследования выращенных пленок  $CdS$  проводились на рентгеновском дифрактометре с излучением  $CuK\alpha$  ( $\lambda = 1,54\text{ \AA}$ ). Дифрактограмма пленок  $CdS$ , не содержащих примесь  $In$  (рис. 3), содержит 4 пика, которые, как следует из работы [8], характерны для гексагональной фазы  $CdS$ .

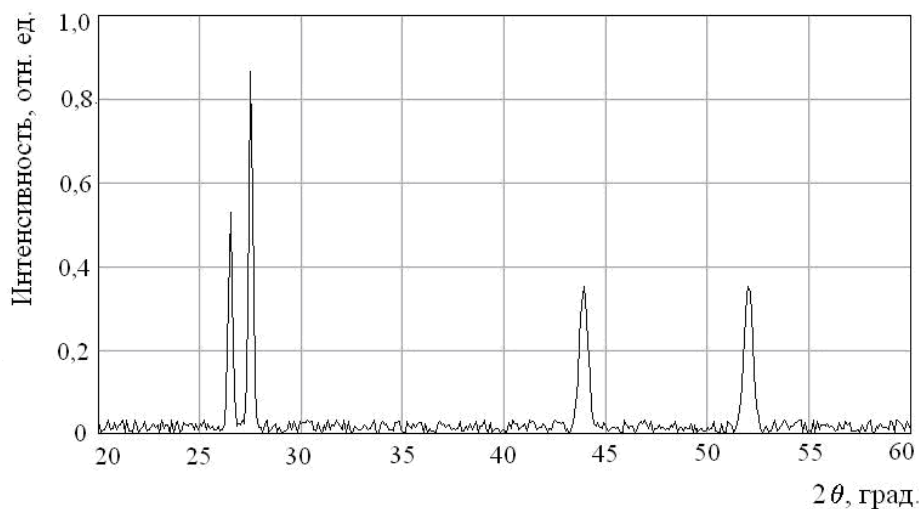


Рис. 3. Рентгеновская дифрактограмма для  $CdS$  без примеси  $In$

Дифрактограмма пленок  $CdS$ , легированных  $In$  (рис. 4), содержит 7 пиков. Согласно работе [8], пики 1, 2, 5, 6 характерны для  $CdS$ , пик 3 соответствует соединению  $CdO$  (111) [8]. Пик 4, согласно работе [10], характерен для соединения  $In_2S_3$  (411), пик 7 соответствует соединению  $CdIn_2S_4$  (533).

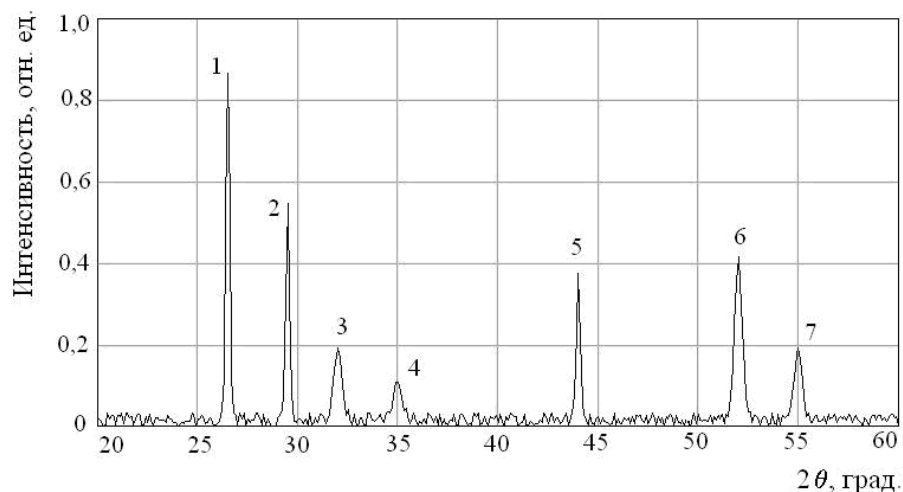


Рис. 4. Рентгеновская дифрактограмма для  $CdS$  с примесью  $In$

Таким образом, при легировании индием пленка  $CdS$  может содержать включения сульфида индия и тройного соединения  $CdIn_2S_4$ .

Для пленок  $CdS$ , выращенных на плоскопараллельных стеклянных пластинах, измерялись оптические спектры пропускания. На основе полученных данных построены графики спектральной зависимости коэффициента оптического поглощения в области фундаментального поглощения в координатах  $\alpha^2 = f(h\nu)$  (рис. 5).

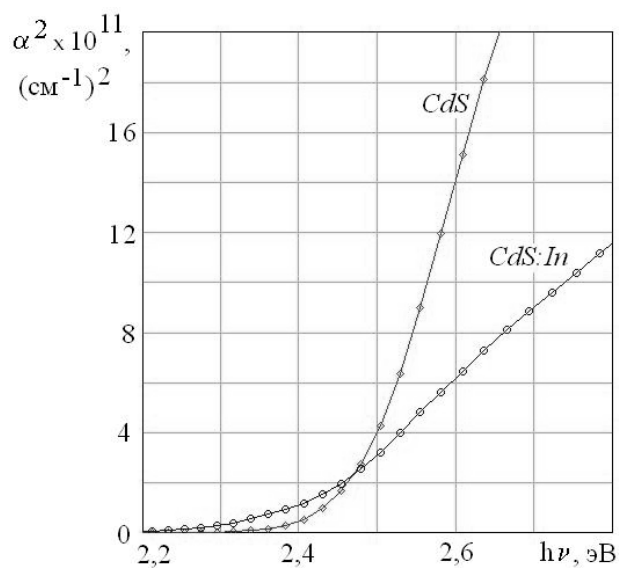


Рис. 5. Спектральная зависимость коэффициента оптического поглощения

Экстраполяция кривых  $\alpha^2 \rightarrow 0$  позволила определить ширину запрещенной зоны  $E_g$ : для пленок  $CdS$ , выращенных без примеси,  $In E_g = 2,48$  эВ; для пленок  $CdS$ , легированных индием,  $E_g = 2,40$  эВ (кривая  $CdS:In$  на рисунке 5). Спектры коэффициента оптического поглощения для пленок  $CdS$  в координатах  $\ln(\alpha) = f(\ln(h\nu - E_g))$  вблизи области фундаментального поглощения аппроксимируются отрезками прямых с коэффициентом наклона 1/2. Следовательно, для пленок  $CdS$ , содержащих и не содержащих примесь индия, фундаментальное поглощение определяется прямыми межзонными переходами.

Отклонение полученного значения  $E_g$  для пленки  $CdS$ , не содержащей примесь  $In$ , от 2,42 эВ – традиционной величины для этого полупроводника [1], можно объяснить отклонением от стехиометрии, возникающим во время роста. В то же время пленки  $CdS$ , легированные  $In$ , имеют  $E_g$  более близкое к «табличному» значению, что свидетельствует о снижении влияния структурных дефектов при легировании индием.

Для исследования электрофизических характеристик гетероструктур  $CdS/Si(p)$  формирование омических контактов к кремниевой подложке и пленке  $CdS$  производилось посредством пайки индия с последующей формовкой электрическим импульсом.

Исследование прямых вольт-амперных характеристик гетероструктур  $CdS/Si(p)$ , измеренных при температуре 300 К, показало, что они могут быть представлены зависимостью

$$I = I_0 \cdot \exp\left(\frac{qV}{nkT}\right), \quad (6)$$

где  $I_0$  – ток насыщения,  $q$  – заряд электрона,  $V$  – напряжение,  $k$  – постоянная Больцмана,  $T$  – абсолютная температура,  $n$  – показатель идеальности [1].

Результаты исследования электрофизических свойств гетероструктур  $CdS/Si(p)$  представлены в таблице 2.

Таблица 2

Результаты исследования электрофизических характеристик гетероструктур  $CdS/Si(p)$

Номер образца	Соотношение $CdCl_2/InCl_3$	$n$	$V_a, B$	$J_{K3}, mA/cm^2$	$U_{XX}, мВ$	$FF$	$h\nu_{KB}, эВ$
1	1:0,0	2,5	0,66	2,21	295	0,31	2,57
2	1:0,3	2,0	0,67	1,06	295	0,25	2,58
3	1:0,5	2,0	0,73	1,73	310	0,28	2,61
4	1:0,7	2,0	0,98	1,31	350	0,28	2,63
5	1:1,0	2,0	1,00	1,60	356	0,30	2,65

Для образца 1 величина показателя идеальности составила 2,5, для остальных образцов  $n = 2,0$  (табл. 2). Это говорит о том, что токи, протекающие через гетеропереход, определяются главным образом процессами генерации и рекомбинации носителей в области пространственного заряда.

Для определения контактной разности потенциалов гетероперехода  $CdS/Si(p)$  проводилось измерение высокочастотных вольт-фарадных характеристик при температуре 300 K. Частота синусоидального измерительного сигнала составляла 1 МГц, амплитуда – 25 мВ. Для всех образцов зависимость  $C^{-2} = f(V)$  имела вид прямой линии в диапазоне обратных напряжений смещения от 0 до 2 В. Обратному смещению гетероперехода  $CdS/Si(p)$  соответствует приложение положительного полюса источника постоянного напряжения смещения к  $CdS$  и отрицательного полюса – к кремнию. Экстраполяция зависимости  $C^{-2}(V) \rightarrow 0$  позволила определить величину полной контактной разности потенциалов  $V_d$  гетероструктуры. Полная контактная разность потенциалов может быть представлена в виде суммы контактных разностей потенциалов полупроводников, составляющих гетероструктуру:  $V_d = V_{d1} + V_{d2}$  (рис. 6) [6].

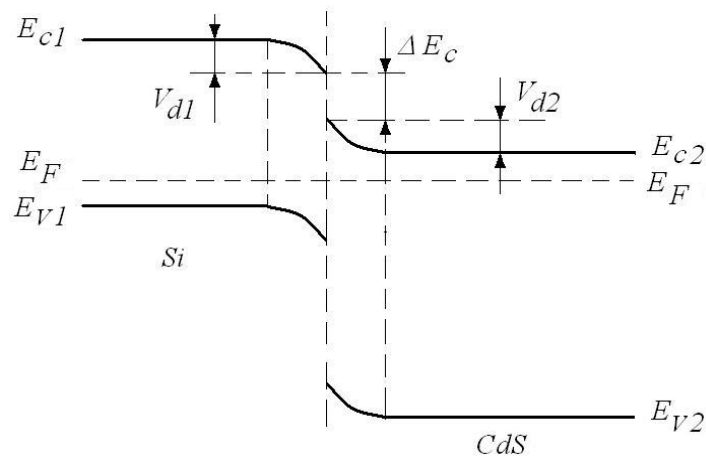


Рис. 6. Зонная диаграмма гетероструктуры  $CdS/Si(p)$  в равновесном состоянии [6]

Измеренные значения  $V_d$  приведены в таблице 2, откуда видно, что с ростом доли  $InCl_3$  в соотношении  $CdCl_2/InCl_3$  полная контактная разность потенциалов увеличивается, причем заметный рост  $V_d$  наблюдается при соотношении  $CdCl_2/InCl_3$ , равном 1:0,5.

Как уже отмечалось, для всех образцов зависимость  $C^{-2} = f(V)$  имела вид прямой линии в диапазоне обратных напряжений смещения от 0 до 2 В. Следовательно, в указанном диапазоне напряжений смещения гетеропереход  $CdS/Si(p)$  можно считать резким и концентрация донорной примеси в слое  $CdS$ , толщина которого соответствует ширине ОПЗ при указанном обратном напряжении смещения, постоянна. При более высоких напряжениях обратного смещения зависимость  $C^{-2} = f(V)$  отклоняется от прямой. Это свидетельствует о наличии градиента концентрации донорной примеси в глубине слоя  $CdS$ . Концентрация акцепторной примеси в кремниевой подложке постоянна и составляет  $2,0 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ .



На основе анализа вольт-фарадной характеристики гетероперехода  $CdS/Si(p)$ , измеренной в диапазоне обратных напряжений смещения от 0 до 5 В, был построен профиль распределения концентрации донорной примеси в слое  $CdS$  (рис. 7).

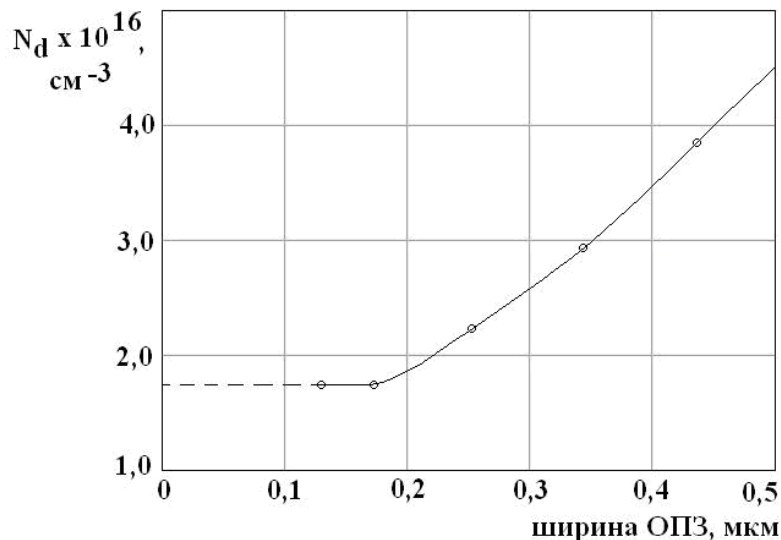


Рис. 7. Профиль распределения концентрации донорной примеси в слое  $CdS$  гетероструктуры  $CdS/Si(p)$

Значение предельного напряжения обратного смещения при измерении вольт-фарадной характеристики выбрано ниже напряжения пробоя гетероперехода.

Примерно до расстояния 0,17 мкм в глубину пленки  $CdS$  концентрация донорной примеси остается постоянной (рис. 7), что соответствует линейному участку зависимости  $C^{-2} = f(V)$ . На расстоянии более 0,17 мкм от гетерограницы концентрация донорной примеси в слое  $CdS$  начинает возрастать по закону, близкому к линейному (рис. 7), при этом зависимость  $C^{-2} = f(V)$  отклоняется от линейной. Такой вид профиля распределения концентрации донорной примеси наблюдался во всех образцах гетероструктур  $CdS/Si(p)$ , изготовленных методом гидрохимического осаждения из водных растворов.

Для исследования эффективности применения гетероструктур  $CdS/Si(p)$  в качестве ФЭП измерялось напряжение холостого хода  $U_{xx}$ , плотность тока короткого замыкания  $J_{кз}$  и коэффициент заполнения вольт-амперной характеристики  $FF$ . Освещение фронтальной поверхности ФЭП (со стороны пленки  $CdS$ ) при проведении указанных измерений соответствовало стандартному режиму АМ 1,5 [1]. Результаты измерений приведены в таблице 2.

Из таблицы 2 видно, что величина  $U_{xx}$  существенно возрастает при легировании пленки  $CdS$  индием. Заметный рост  $U_{xx}$  начинается при соотношении

$CdCl_2/InCl_3$ , равном 1:0,5. Это можно объяснить повышением величины  $V_d$  гетероперехода  $CdS/Si(p)$ .

В то же время величина  $J_{кз}$  у гетероструктур со слоями  $CdS$ , легированными индием, значительно ниже, чем у образца 1 (табл. 2). Возможно это связано с влиянием поверхностных состояний на гетерогранице  $CdS/Si(p)$ , а также дефектов с глубокими энергетическими уровнями в области пространственного заряда гетероперехода. Вероятно, введение примеси индия способствует росту концентрации таких дефектов.

Коэффициент  $FF$  имеет наибольшие значения для образцов 1 и 5 (табл. 2). Для остальных образцов величина  $FF$  несколько ниже. Обычно для повышения величины  $FF$  производят оптимизацию геометрии токосъемных омических контактов на фронтальной поверхности ФЭП, а также используют прозрачные токопроводящие оконные слои на основе  $SnO_2$  или  $ITO$  [5]. За счет этих мер реально достижимые значения  $FF$  для ФЭП с применением пленок  $CdS$  составляют 0,41–0,66 [4]. При изготовлении ФЭП, исследованных в данной работе, подобные меры не применялись, так как основной задачей было изучение гетероперехода  $CdS/Si(p)$ , поэтому значения коэффициента  $FF$  получились достаточно низкими.

Для всех образцов измерялись спектры fotocувствительности в виде зависимости фотоэдс гетероструктуры  $CdS/Si(p)$  от энергии квантов (рис. 8). Спектры измерялись при освещении гетероструктур со стороны  $CdS$ .

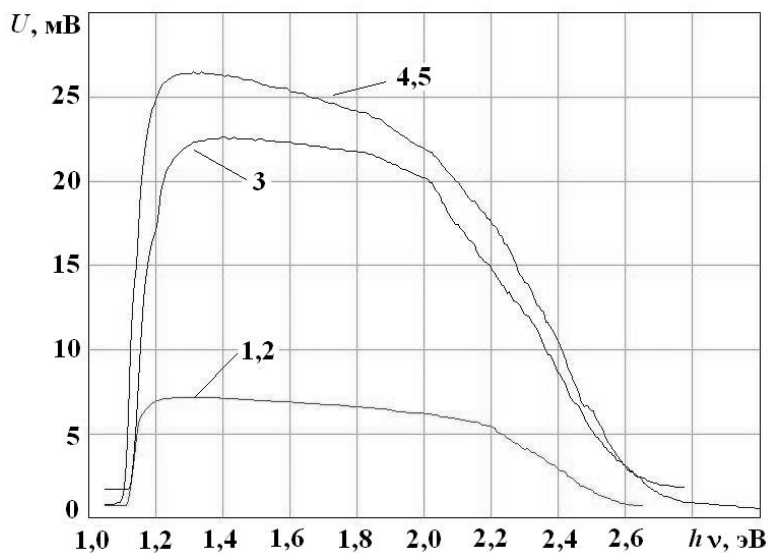


Рис. 8. Спектр fotocувствительности гетероструктур  $CdS/Si(p)$

Как видно из рисунка 8, в длинноволновой области эффективность преобразования гетероструктур определяется поглощением квантов света в кремнии. Здесь для всех образцов величина  $h\nu$  составляет 1,11–1,12 эВ, что соответствует ширине запрещенной зоны кремния. В коротковолновой области для всех об-

разцов спад фотоэдс менее резкий и определяется поглощением в слое  $CdS$ . Величины энергии коротковолнового спада ( $h\nu_{KB}$ ) спектральной зависимости фотоэдс для всех образцов представлены в таблице 2.

Значения  $h\nu_{KB}$  возрастают с увеличением доли  $InCl_3$  в соотношении  $CdCl_2/InCl_3$  (табл. 2), причем заметный рост  $h\nu_{KB}$  наблюдается при соотношении  $CdCl_2/InCl_3$ , равном 1:0,5. Для всех гетероструктур фоточувствительность сохраняется на высоком уровне в достаточно широком диапазоне энергии квантов, что свидетельствует о достаточно низкой концентрации дефектов вблизи гетероперехода  $CdS/Si(p)$ . Особенно это заметно для образца 1, у которого область медленного изменения фотоэдс лежит в пределах 1,2–2,2 эВ (рис. 8).

Таким образом, гетероструктуры  $CdS/Si(p)$ , изготовленные методом гидрхимического осаждения слоев  $CdS$  на поверхности кремния, могут применяться в качестве ФЭП для солнечной энергетики. Применение технологии гидрхимического осаждения полупроводниковых пленок позволит существенно снизить себестоимость ФЭП, что положительно скажется на их конкурентоспособности. Вместе с тем, как было показано в данной работе, технология гидрхимического осаждения позволяет получать достаточно качественные поликристаллические пленки  $CdS$  с приемлемыми электрофизическими характеристиками. Достоинством данной технологии является также возможность легирования полупроводниковой пленки непосредственно в процессе ее выращивания. Легирование индием слоев  $CdS$  позволяет повысить напряжение холостого хода гетероструктур за счет увеличения контактной разности потенциалов, в результате появляется возможность управления характеристиками ФЭП.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Зи, С. М. Физика полупроводниковых приборов [Текст] : в 2 т. – Т. 2. – М. : Мир, 1984. – 456 с.
2. Лидин, Р.А. Химические свойства неорганических веществ [Текст] : учеб. пособие / Р.А. Лидин, В.А. Молочко, Л.Л. Андреева. – М. : КолосС, 2006. – 480 с.
3. Фаренбух, А. Солнечные элементы. Теория и эксперимент [Текст] : пер. с англ. / А. Фаренбух, Р. Бьюб. – М. : Энергоатомиздат, 1987. – 280 с.
4. Хрипунов, Г.С. Гибкие солнечные элементы  $ITO/CdS/CdTe/Cu/Au$  с высокой удельной мощностью [Текст] / Г.С. Хрипунов, Б.Т. Бойко // ФИП. – 2004. – Т. 2. – № 1–2. – С. 69–73.
5. Чопра, К. Тонкопленочные солнечные элементы [Текст] : пер. с англ. / К. Чопра, С. Дас. – М. : Мир, 1986. – 435 с.
6. Шарма, Б.Л. Полупроводниковые гетеропереходы [Текст] : пер. с англ. / Б.Л. Шарма, Р.К. Пурохит. – М. : Сов. радио, 1979. – 232 с.
7. Fangyang, L. Characterization of chemical Bath deposited CdS thin films at different deposition temperature [Text] / L. Fangyang, L. Yanging, L. Jun // Journal of Alloys and Compounds. – 2010. – Vol. 493. – № 1–2. – P. 305–308.
8. Mahdavi, S.M. Optical and structural properties of copper doped CdS thin films Prepared by pulsed laser deposition [Text] / S.M. Mahdavi, A. Irajizad, A. Azarian, R.M. Tilaki // Scientia Iranica. – 2008. – Vol. 15, № 3. – P. 360–365.
9. Mahdi, M.A. Structural and optical properties of chemical deposition CdS thin films [Text] / M.A. Mahdi, S.J. Kasem, J.J. Hassen, A.A. Swadi // Int. J. Nanoelectronics and Materials. – 2009. – № 2. – P. 163–172.

10. Patil, L.A. Studies on  $\text{CdIn}_2\text{O}_4$  derived from  $\text{CdIn}_2\text{S}_4$  prepared by flux method [Text] / L.A. Patil, M.D. Mahanubhav // Bull. Mater. Sci. – 2007. – Vol. 30, № 2. – P. 141–146.

**V.V. Tregulov**

#### **CDS/SI(P) HETEROJUNCTION STRUCTURES OBTAINED BY HYDROCHEMICAL DEPOSITION OF CDS**

The article presents the results of the investigation of chemical, structural and electro-physical properties of CdS films, as well as of CdS/Si(p) heterojunction structures obtained by hydrochemical deposition of cadmium sulfide from aqueous solutions. The paper considers a possibility of using these heterojunction structures as a source of photovoltaic solar energy.

*Volt-ampere characteristics, capacitance-voltage characteristics, heterojunction structure, silicon, contact potential difference, cadmium sulfide, photoelectric converter, Auger electron spectroscopy.*