

ИССЛЕДОВАНИЕ ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ СОЛНЕЧНОЙ ЭНЕРГИИ НА ОСНОВЕ ГЕТЕРОСТРУКТУРЫ CdS/Si(p)

В.В. Трегулов

*Кафедра «Общая, теоретическая физика и методика преподавания физики»,
ГОУ ВПО «Рязанский государственный университет им. С.А. Есенина»,
г. Рязань; trww@yandex.ru*

Представлена членом редколлегии профессором В.И. Коноваловым

Ключевые слова и фразы: вольт-амперная характеристика; гетероструктура; кремний; контактная разность потенциалов; сульфид кадмия; технология; fotocувствительность; фотоэлектрический преобразователь.

Аннотация: Приведены результаты исследования фотоэлектрических характеристик гетероструктур CdS/Si(p), изготовленных с помощью технологии осаждения пленок сульфида кадмия из водных растворов. Рассмотрена возможность применения этих гетероструктур в качестве фотоэлектрических преобразователей солнечной энергии.

В настоящее время сульфид кадмия CdS активно используется при изготовлении фотоэлектрических преобразователей (ФЭП) солнечной энергии. Тонкие пленки CdS применяются в качестве абсорбирующего и буферного слоев. Для формирования слоев CdS используется достаточно большое число методов: молекулярно-лучевая эпитаксия, осаждение из металлоорганических соединений в паровой фазе, сублимация в закрытом объеме, пиролиз аэрозолей, осаждение в химической ванне (Chemical Bath Deposition), электрохимическое осаждение [1]. Несмотря на большое количество работ, посвященных исследованию CdS, актуальной является задача оптимизации технологии изготовления и изучения характеристик гетероструктур ФЭП, содержащих слои CdS.

Проанализируем результаты исследования ФЭП на основе гетероструктуры CdS/Si(p) (сульфид кадмия на кремнии p-типа проводимости). Формирование слоев CdS производилось методом осаждения в химической ванне из водного раствора [1]. Главным достоинством данного метода является простота реализации. Кроме того, рост пленок CdS проходит в равновесных условиях, что позволяет снизить концентрацию дефектов по сравнению с широко применяемым методом пиролиза аэрозолей.

Тонкие пленки CdS формировались на поверхности кремниевых подложек осаждением из водного раствора, содержащего хлорид кадмия CdCl₂ с концентрацией 0,44 М и тиомочевину N₂H₄CS с концентрацией 0,22 М. Хлорид кадмия является источником ионов кадмия, тиомочевина – источником ионов серы для образования соединения CdS. В начале для образования аммиачного комплекса Cd(NH₃)₆²⁺ к раствору CdCl₂ добавлялся концентрированный водный раствор аммиака NH₄OH до полного растворения выпавшей основной соли. Затем к полу-

ченному раствору добавлялся такой же объем водного раствора тиомочевинны. Далее в раствор погружались кремниевые подложки, раствор нагревался до 90 °С и в течение 20 мин проводился рост пленок.

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 проводился при температуре 90 °С в течение 20 мин. Содержание индия в пленке CdS регулировалось изменением соотношения $\text{CdCl}_2/\text{InCl}_3$.

Пленки CdS имели проводимость n-типа, толщина составила 0,25 мкм.

В качестве подложек для формирования гетероструктуры использовался монокристаллический кремний p-типа проводимости с удельным сопротивлением 1 Ом·см. Такой кремний обычно используется в солнечной энергетике.

После осаждения пленок на поверхности кремния, проводилось травление образцов в 10%-м водном растворе HCl в течение 20 с для удаления аморфной фазы CdS. Затем образцы промывались дистиллированной водой и высушивались.

Формирование омических контактов к кремниевой подложке и пленке CdS производилось посредством пайки индия с последующей формовкой электрическим импульсом.

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 $\text{CdCl}_2/\text{InCl}_3$ (образцы №№ 2–5) (таблица). Дальнейшее увеличение доли InCl_3 приводило к ухудшению адгезии пленки к подложке.

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

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

где I_0 – ток насыщения, А; q – заряд электрона, Кл; V – напряжение, В; k – постоянная Больцмана, Дж/К; T – абсолютная температура, К; n – показатель идеальности [2].

Для образца № 1 величина показателя идеальности составила 2,5, для остальных образцов $n = 2,0$ (см. таблицу). Это говорит о том, что токи, протекающие через гетеропереход, определяются, главным образом, процессами генерации и рекомбинации носителей в области пространственного заряда.

Проводилось измерение высокочастотных вольт-фарадных характеристик при температуре 300 К для определения контактной разности потенциалов гетероперехода. Частота синусоидального измерительного сигнала составляла 1 МГц, амплитуда – 25 мВ. Для всех образцов зависимость $C^{-2} = f(V)$ имела вид прямой

Результаты исследования гетероструктур CdS/Si(p)

№ образца	Соотношение $\text{CdCl}_2/\text{InCl}_3$	n	V_d , В	$J_{кз}$, mA/cm^2	U_{xx} , мВ	FF	$h\nu_{кв}$, эВ
1	–	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	2,0	1,00	1,60	356	0,30	2,65
Абсолютная погрешность		0,1	0,01	0,01	0,2	0,01	0,01

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. 1) [3]. Измеренные значения V_d приведены в таблице, откуда видно, что с ростом доли InCl_3 в соотношении $\text{CdCl}_2/\text{InCl}_3$ полная контактная разность потенциалов увеличивается. Причем заметный рост V_d наблюдается при соотношении $\text{CdCl}_2/\text{InCl}_3$, равном 1/0,5.

Исследование эффективности ФЭП осуществлялось в стандартном режиме освещения АМ1,5. Измерялось напряжение холостого хода $U_{\text{ХХ}}$, плотность тока короткого замыкания $J_{\text{КЗ}}$ и коэффициент заполнения вольт-амперной характеристики ФЭП FF , результаты приведены в таблице, из которой видно, что величина $U_{\text{ХХ}}$ существенно возрастает при легировании пленки CdS индием. Заметный рост $U_{\text{ХХ}}$ начинается при соотношении $\text{CdCl}_2/\text{InCl}_3$, равном 1/0,5. Это можно объяснить повышением величины V_d гетероперехода CdS/Si(p).

В то же время из таблицы видно, что величина $J_{\text{КЗ}}$ у гетероструктур со слоями CdS, легированными индием, значительно ниже, чем у образца № 1. 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 (см. таблицу). 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 ИТО [4]. За счет этих мер реально достижимые значения FF для ФЭП с применением пленок CdS составляют 0,41...0,66 [5]. При изготовлении ФЭП подобные меры не применялись, так как основной задачей было исследование гетероперехода CdS/Si(p), поэтому значения коэффициента FF получились довольно низкими.

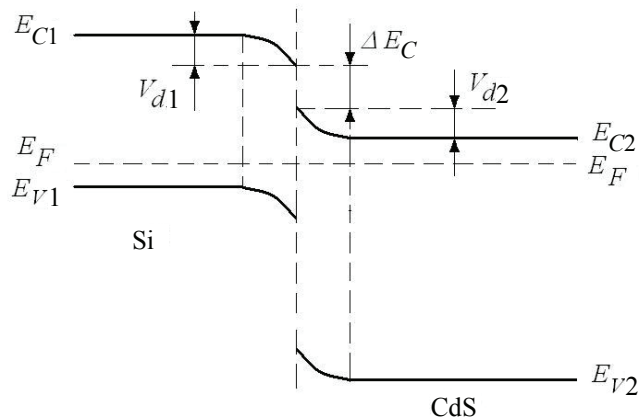


Рис. 1. Зонная диаграмма гетероструктуры CdS/Si(p) в равновесном состоянии

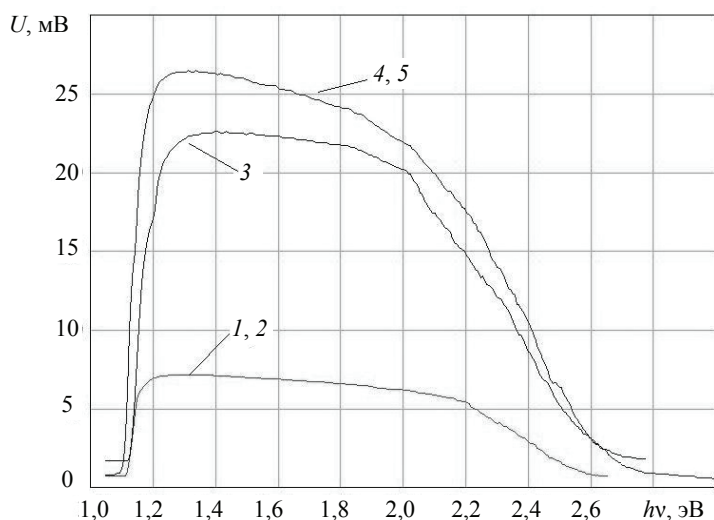


Рис. 2. Спектр фоточувствительности гетероструктур

Для всех образцов измерялись спектры фоточувствительности в виде зависимости фотоЭДС гетероструктуры от энергии квантов (рис. 2). Спектры измерялись при освещении гетероструктур со стороны пленки CdS.

Как видно из рис. 2, 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 образцов спад фотоЭДС менее резкий, он определяется поглощением в слое CdS. Величины энергии коротковолнового спада $h\nu_{\text{КВ}}$ спектральной зависимости фотоЭДС для всех образцов представлены в таблице. Значения $h\nu_{\text{КВ}}$ возрастают с увеличением доли InCl_3 в соотношении $\text{CdCl}_2/\text{InCl}_3$. Причем заметный рост $h\nu_{\text{КВ}}$ наблюдается при соотношении $\text{CdCl}_2/\text{InCl}_3$, 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). Это особенно заметно для образца № 1, у которого область медленного изменения фотоЭДС лежит в пределах 1,2...2,2 эВ (см. рис. 2).

Таким образом, гетероструктуры CdS/Si(p), изготовленные методом осаждения слоев CdS в химической ванне из водного раствора, могут применяться в качестве основы ФЭП для солнечной энергетики. Легирование индием слоев CdS позволяет повысить напряжение холостого хода гетероструктуры за счет увеличения контактной разности потенциалов, что позволяет управлять характеристиками ФЭП.

Список литературы

1. Fangyang, L. Characterization of Chemical Bath Deposited CdS thin Films at Different Deposition Temperature / L. Fangyang, L. Yanging, L. Jun // Journal of Alloys and Compounds. – 2010. – Vol. 493, No. 1–2. – P. 305–308.
2. Зи, С.М. Физика полупроводниковых приборов : пер. с англ. ; в 2 т. Т. 2. / С.М. Зи. – 2-е изд. – М. : Мир, 1984. – 456 с.
3. Шарма, Б.Л. Полупроводниковые гетеропереходы / Б.Л. Шарма, Р.К. Пурухит ; пер. с англ. под ред. Ю.В. Гуляева. – М. : Сов. радио, 1979. – 232 с.

4. Фаренбух, А. Солнечные элементы: Теория и эксперимент / А. Фаренбух, Р. Бьюб ; пер. с англ. под ред. М.М. Колтуна. – М. : Энергоатомиздат, 1987. – 280 с.

5. Хрипунов, Г.С. Гибкие солнечные элементы ИТО/CdS/CdTe/Cu/Au с высокой удельной мощностью / Г.С. Хрипунов, Б.Т. Бойко // ФИП. – 2004. – Т. 2, № 1–2. – С. 69–73.

Research into Photoelectric Solar Energy Converter on the Basis of CdS/Si(p) Heterojunction Structure

V.V. Tregulov

*Department «General, Theoretical Physics and Methods of Teaching Physics»,
Ryazan State University Named after S.A. Esenin, Ryazan;
trww@yandex.ru*

Key words and phrases: volt-ampere characteristic; heterojunction structure; silicon; contact potential difference; cadmium sulfide; technology; photosensitivity; photoelectric converter.

Abstract: This article describes the results of the research into photoelectrical characteristics of CdS/Si(p) heterojunction structures, produced by the technology of cadmium sulfide film deposition in aqueous solutions. It studies the possibility of application of these heterojunction structures as photoelectric converter of solar energy.

Untersuchung des photoelektrischen Umformer der Sonnenenergie auf Grund der CdS/Si(p) Heterostruktur

Zusammenfassung: Es sind die Ergebnisse der Untersuchung der photoelektrischen Charakteristiken der Heterostrukturen CdS/Si(p), die mit Hilfe der Technologie der Fällung der Folien vom Kadmiumsulfid aus den Wasserlösungen erzeugt sind, angeführt. Es ist die Möglichkeit der Benutzung dieser Heterostrukturen als die photoelektrischen Umformer der Sonnenenergie betrachtet.

Etude du convertisseur photoélectrique de l'énergie solaire à la base de l'hétérostructure CdS/Si(p)

Résumé: Sont cités les résultats de l'étude des caractéristiques photoélectriques des hétérostructures CdS/Si(p) fabriquées à l'aide de la technologie de la précipitation des pellicules du sulfide de cadmium à partir des solutions d'eau. Est examinée la possibilité de l'application de ces hétérostructures en qualité des convertisseurs photoélectriques de l'énergie solaire.

Автор: *Трегулов Вадим Викторович* – кандидат технических наук, доцент кафедры «Общая, теоретическая физика и методика преподавания физики», ГОУ ВПО «Рязанский государственный университет им. С.А. Есенина», г. Рязань.

Рецензент: *Коненков Николай Витальевич* – доктор физико-математических наук, профессор кафедры «Общая, теоретическая физика и методика преподавания физики», ГОУ ВПО «Рязанский государственный университет им. С.А. Есенина», г. Рязань.
