

Исследование структурных и оптических свойств тонких пленок CdS в зависимости от времени химического осаждения

© В.Ф. Гременок^{1,2}, Е.П. Зарецкая¹, А.В. Станчик^{1,2,¶}, К.П. Бускис¹, С.Т. Пашаян³,
А.С. Токмаджян⁴, А.С. Мусаелян⁴, С.Г. Петросян⁴

¹ Научно-практический центр НАН Беларуси по материаловедению,
220072 Минск, Республика Беларусь

² Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники,
220013 Минск, Республика Беларусь

³ Институт физических исследований НАН Армении,
0204 Аштарак-2, Армения

⁴ Институт радиофизики и электроники НАН Армении,
0204 Аштарак, Армения

¶e-mail: alena.stanchik@bk.ru

Поступила в редакцию 27.11.2023 г.

В окончательной редакции 24.01.2024 г.

Принята к публикации 28.02.2024 г.

Тонкие пленки CdS были получены химическим осаждением на стеклянные подложки для потенциального применения в качестве буферных слоев в тонкопленочных фотопреобразователях. Методами рентгеновского фазового анализа и спектроскопии комбинационного рассеяния установлено, что синтезированные в оптимальных технологических режимах пленки CdS кристаллизуются в гексагональной структуре вюрцита. Показано, что время осаждения оказывает влияние на скорость роста, морфологические и микроструктурные характеристики синтезированного материала. С увеличением длительности синтеза при заданной температуре раствора наблюдается значительное снижение шероховатости поверхности, сопровождаемое уменьшением размеров кластеров кристаллитов и микроструктурных дефектов. Оптическая ширина запрещенной зоны пленок CdS составляет 2.53–2.57 eV. Наличие ярко выраженной зеленой полосы излучения в спектрах фотолюминесценции показывает, что пленки CdS обладают высокой степенью кристалличности при минимальной плотности дефектов.

Ключевые слова: пленки CdS, химическое осаждение, микроструктура, оптические свойства, оптическая ширина запрещенной зоны, спектры фотолюминесценции.

DOI: 10.61011/OS.2024.02.57775.5731-23

1. Введение

Сульфид кадмия (CdS) — прямозонный полупроводник класса II–VI, является одним из наиболее перспективных материалов для изготовления оптоэлектронных приборов. Этот материал обладает *n*-типом проводимости, имеет оптическую ширину запрещенной зоны 2.38–2.62 eV и высокий коэффициент поглощения ($> 10^4 \text{ cm}^{-1}$), хорошую термическую и химическую стабильность [1]. В тонкопленочных солнечных элементах на основе CdTe и $\text{Cu}(\text{In,Ga})(\text{S,Se})_2$ с эффективностью более 22% в качестве буферного слоя применяется CdS [2–4]. Помимо участия в формировании *p-n*-перехода, пленка CdS способствует пассивации поверхностных состояний слоя поглотителя и механической защите при осаждении прозрачного проводящего контакта ZnO. Сульфид кадмия является прямозонным полупроводником *n*-типа II–VI с шириной запрещенной зоны, зависящей от его структурной модификации: $E_g = 2.58 \text{ eV}$ для стабильной структуры вюрцита и $E_g = 2.40 \text{ eV}$ для кубической (метастабильной) структуры [4,5]. Характерной особенностью кинетики роста гексагональной

фазы является формирование столбчатой структуры зерен вдоль оси *C*, перпендикулярной подложке, что создает меньше границ зерен, препятствующих потоку фотогенерированных избыточных носителей [6,7]. Этими свойствами определяется перспективность применения высокостабильной гексагональной фазы CdS с более высоким значением ширины запрещенной зоны для создания фотопреобразователей. Формирование пленок CdS кубической или гексагональной фазы зависит от многих факторов, в том числе от метода нанесения.

Тонкие пленки этого соединения могут быть легко получены несколькими способами, такими как ВЧ распыление, термическое испарение, распыление пиролизом и осаждение в химической ванне [6]. В последнее время в технологии получения тонких пленок сульфидов металлов доминируют методы на основе химических процессов [8]. Одним из основных требований для массового использования в солнечной энергетике является изготовление тонких пленок на больших площадях и при температурах ниже 100°C. Идеальным выбором для получения тонких полупроводниковых пленок является технология химического поверхностного осаждения, ко-

торая заключается в нанесении на подложку раствора, содержащего ионы металла и источник ионов серы. Поверхностное натяжение раствора обеспечивает минимизацию объема реакционной смеси и ее содержания на подложке. Осаждение тонких пленок CdS из водных растворов осуществляется в результате реакции между солями кадмия и тиокарбамидом (тиомочевиной) в щелочной среде. При этом рост пленок CdS проходит в равновесных условиях, что позволяет снизить концентрацию дефектов по сравнению с другими методами. Физические свойства осажденных пленок зависят главным образом от таких параметров, как показатель кислотности pH и температура водного раствора, вид субстрата и относительная концентрация в растворе веществ, создающих ионы Cd^{2+} и S^{2-} для химических реакций. Кристаллическая структура пленок CdS, формируемых методом химического осаждения, определяется составом ванны, температурой и pH раствора. Авторы работ [9–11] сообщают о получении пленок CdS с кубической модификацией из ванны, содержащей хлорид кадмия, гидроксид калия, нитрат аммония и тиомочевину при температуре $75^{\circ}C$. В работах [12,13] пленки CdS гексагональной структуры (вюрцита) были получены химическим осаждением из раствора, содержащего нитрат кадмия, цитрат натрия, водный раствор аммиака и тиомочевину при температуре ванны $60^{\circ}C$. Имеются сообщения о формировании двухфазных пленок CdS с кубической и гексагональной модификацией методом химического осаждения в ванне (chemical bath deposition, CBD) [14,15]. Значительное влияние на физические свойства тонких пленок CdS, изготовленных методом CBD, оказывает длительность осаждения. Несмотря на наличие достаточно большого числа публикаций, посвященных синтезу тонких пленок CdS, структура и фазовый состав синтезированных слоев остаются недостаточно изученными. Анализ литературных источников показывает, что исследование влияния времени осаждения на оптические свойства тонких пленок CdS встречается редко. Авторы работы [16] при исследовании влияния времени осаждения (15–90 min) и температуры (55 – $75^{\circ}C$) на оптические и структурные свойства тонких пленок CdS с использованием в качестве основных источников атомов Cd и S сульфата кадмия ($CdSO_4$) и тиомочевины ($CS(NH_2)_2$) установили, что структура пленок CdS трансформируется из кубической структуры в смесь кубической и ромбической фаз при увеличении длительности осаждения до 90 min. Они также указали, что размеры кристаллитов возрастают с увеличением времени осаждения. Однако кинетика наблюдаемого авторами явления четко не выявлена. В ряде исследований предлагаются различные механизмы роста пленок при использовании метода химического осаждения, требующие дополнительного изучения [17,18]. Кроме того, почти во всех опубликованных работах для получения тонких пленок CdS методом CBD использовались комплексные агенты, а синтезированные пленки,

как правило, были подвергнуты последующей обработке до исследования их структурных и оптических свойств.

В настоящей работе приведены результаты исследований физических характеристик тонких пленок CdS (оптическое поглощение, ширина запрещенной зоны, энергия Урбаха, показатели экстинкции и преломления), полученных на стеклянных подложках методом химического осаждения без дополнительного отжига.

2. Материалы и методы исследований

2.1. Получение пленок CdS

Тонкие пленки CdS были получены методом химического осаждения в ванне с использованием раствора, содержащего 90 ml деионизованной воды, 30 ml 25% водного раствора аммиака, 40 ml сульфата кадмия ($0.0096M CdSO_4$) в качестве источника кадмия и 40 ml тиомочевины ($0.8M CS(NH_2)_2$) в качестве источника серы. Значение pH полученного раствора составило 10.7. Нанесение слоя CdS производилось на стеклянные подложки, вертикально погруженные в полученный раствор, при оптимальной для стабильного осаждения слоя CdS температуре (62 ± 1) $^{\circ}C$ (экспериментально установленной). В течение всего процесса осаждения раствор размешивался с помощью магнитной мешалки. Подложки предварительно очищались ультразвуком в ацетоне и этаноле, промывались в деионизованной воде и сушились струей азота. После осаждения пленки CdS промывались в течение 10 min в ультразвуковой ванне для удаления прилипших частичек CdS и сушились под струей азота. Для трех разных циклов время осаждения устанавливалось равным 5, 10 и 15 min. Толщина пленок CdS, измеренная профилометром Mitutoyo SurfTest SJ-410 (Japan), составила соответственно 102, 135 и 157 nm с погрешностью измерения ± 5 nm.

2.2. Экспериментальные методы

Исследование элементного состава пленок и морфологии поверхности было проведено методом рентгеновского энергодисперсионного микроанализа и сканирующей электронной микроскопии с применением растрового электронного микроскопа серии ZEISS EVO. Структурные характеристики осажденных пленок CdS анализировались с помощью рентгеновского дифрактометра Ultima-IV с монохроматическим излучением CuK_{α} ($\lambda = 0.15406$ nm) при скользящих углах падения 1° (GIXD) сканированием в диапазоне от 10° до 80° . Спектры комбинационного рассеяния света (КРС) пленок CdS были зарегистрированы при комнатной температуре с помощью конфокального комбинационного спектрометра Nanofinder HE (LOTIS III, Беларусь-Япония) со спектральным разрешением не хуже 3 cm^{-1} . Измерения проводились в геометрии обратного рассеяния без анализа поляризации рассеянного излучения.

Возбуждение КРС осуществлялось твердотельным лазером в непрерывном режиме с длиной волны 473 nm. Диаметр лазерного пятна на поверхности образца составлял 0.6–0.7 μm . Исследования структуры и шероховатости поверхности пленок CdS осуществлялись с использованием атомно-силового микроскопа NT 206 (Microtestmachines Co., Беларусь) в контактном режиме. Для исследования поверхности образцов на каждом из них было выбрано не менее 5 площадок с областью сканирования размером $3 \times 3 \mu\text{m}$. По каждой области получали значения средней арифметической и средней квадратичной шероховатости, максимальной высоты неровности профиля поверхности, полученные результаты усреднялись для каждого образца. Спектры пропускания и отражения пленок были зарегистрированы на спектрофотометре Photon RT (Essent Optics) в диапазоне длин волн 400–2500 nm со спектральным разрешением не менее 4 nm в неполяризованном свете при комнатной температуре. Спектры фотолюминесценции (ФЛ) записывались при комнатной температуре с помощью ФЛ-спектрометра высокого разрешения Nanofinder HE (LOTIS III). В качестве источника возбуждения использовался твердотельный лазер (355 nm). Диаметр области возбуждения составлял 2 μm , мощность лазерного излучения, падающего на образец, составляла не более 2.0 mW во избежание его термического повреждения, а спектральное разрешение было не менее 2.5 cm^{-1} . В качестве фотоприемника использовался охлаждаемый кремниевый фотодетектор, время накопления сигнала составляло 10 с.

3. Результаты и их обсуждение

3.1. Рентгеноструктурный анализ и морфология

Нанесенные на стекло пленки CdS были прозрачными, имели светло-желтый цвет, однородную поверхность без видимых проколов и обладали хорошей адгезией к подложке. При определении элементного состава пленок CdS установлено, что их состав является близким к стехиометрическому. Однако при увеличении длительности осаждения (от 5 до 15 min) концентрация кадмия в пленках CdS незначительно возрастает от 50.56 до 51.93 at.%, а содержание серы соответственно уменьшается от 49.44 до 48.07 at.%.

Исследование фазового состава сформированных покрытий CdS показало, что они кристаллизуются в стабильной гексагональной структуре вюрцита с преимущественной ориентацией в направлении [002]. Дифрактограмма пленок CdS, полученных при указанных условиях, имели сходный характер с широким рефлексом высокой интенсивности в области $2\theta = 26.50^\circ$ и рефлексами меньшей интенсивности при углах отражения 43.85° и 52.08° . На рис. 1 приведена дифрактограмма пленки CdS, осажденной в течение 15 min.

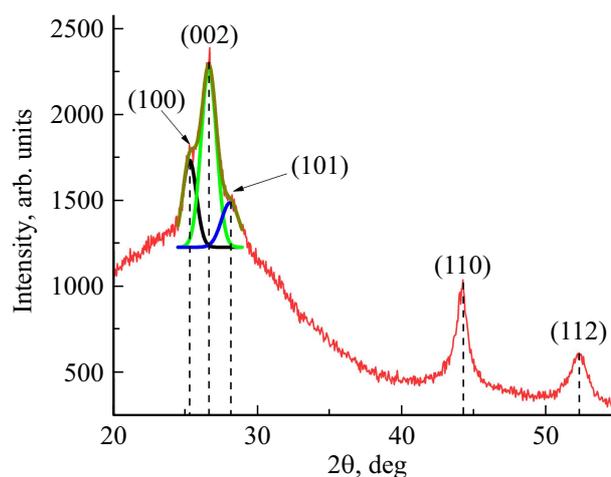


Рис. 1. Дифрактограмма пленки CdS, осажденной в течение 15 min.

Деконволюция по Лоренцу доминирующего рефлекса при $2\theta = 26.50^\circ$ выявляет наложение характеристических рефлексов от плоскостей (100), (002) и (101) при углах отражения 24.92° , 26.52° и 28.32° соответственно, принадлежащих только гексагональной фазе (JCPDS № 80–0006). Рефлексы низкой интенсивности, наблюдаемые при $2\theta = 43.85^\circ$ и $2\theta = 52.08^\circ$, относятся к плоскостям (110) и (112) гексагональной структуры CdS (симметрия C_{6v} ($P6_3mc$)) и хорошо согласуются с литературными данными [19–21].

С целью уточнения фазового состава пленок CdS были исследованы их спектры КРС, зарегистрированные в частотном диапазоне 20–1000 cm^{-1} при возбуждении светом с длиной волны 473 nm. В спектрах КРС наблюдались асимметричные пики в области ~ 300 и 600 cm^{-1} , характерные для гексагональной структуры CdS [9]. Доминирующим колебанием в этих спектрах является продольная акустическая мода 1LO при 302 cm^{-1} с ее первым обертоном 2LO при 601 cm^{-1} . Положения мод 1LO и 2LO в спектрах КРС осажденных тонких пленок CdS смещены по отношению к спектру объемного CdS из-за вероятного эффекта, обусловленного размером микрокристалликов. Дополнительные рефлексы, соответствующих оксидной фазе, на спектрах не проявлялось. Увеличение длительности синтеза до 15 min сопровождается незначительным увеличением интенсивности основных рефлексов, что, по-видимому, обусловлено увеличением толщины синтезированного слоя CdS. Полученные данные хорошо согласуются с сообщаемыми значениями колебательных мод для тонких пленок CdS со структурой вюрцита [9,22] и подтверждают результаты исследования фазового состава и структуры синтезированных нами слоев CdS.

При исследовании морфологических характеристик пленок CdS методом атомно-силовой микроскопии выявлена зависимость топографии поверхности, размера кристаллитов и соотношения их крупной и мелких

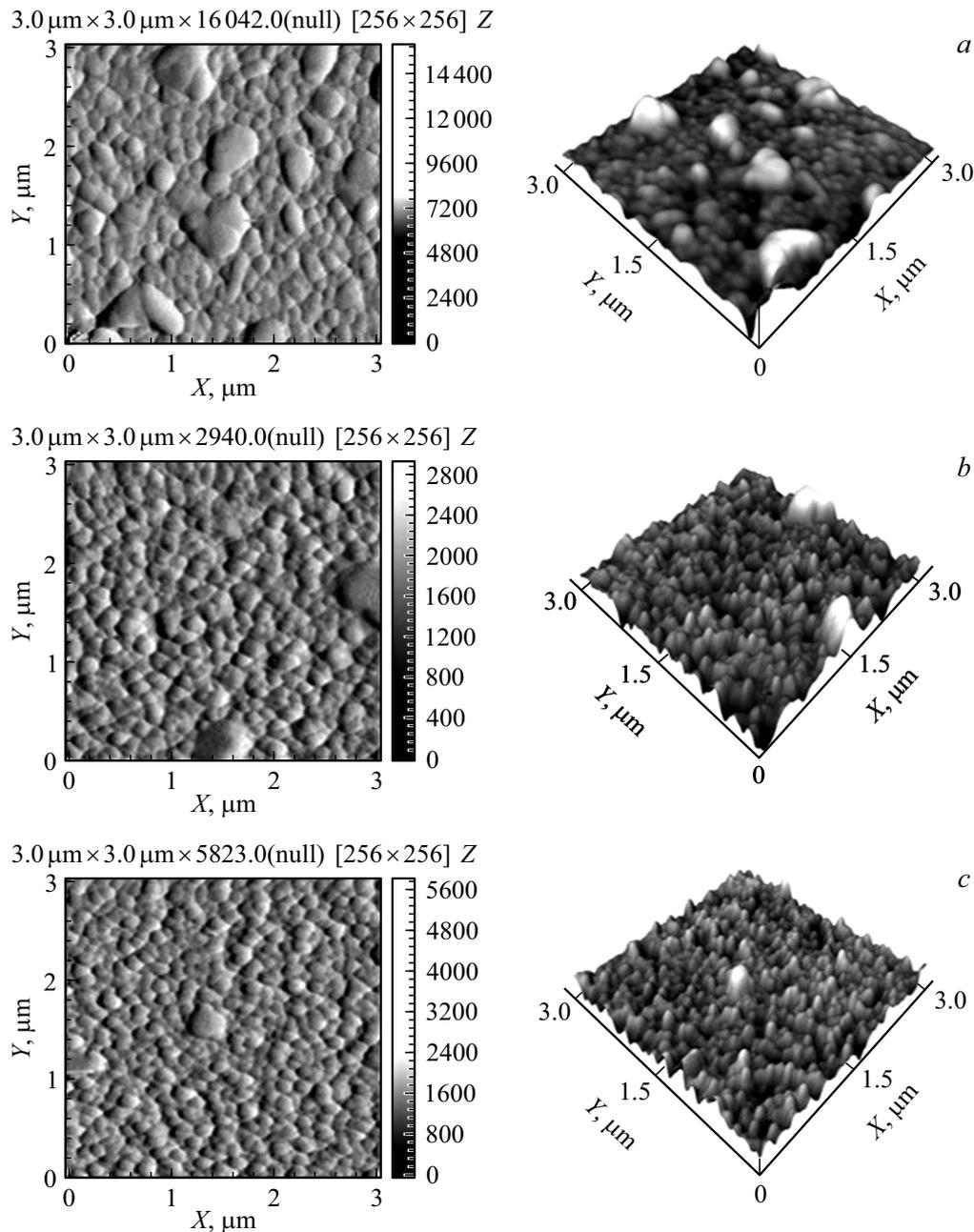


Рис. 2. Трехмерное АСМ-изображение и топография поверхности пленок CdS в зависимости от времени осаждения: 5 (a), 10 (b), 15 min (c).

фракций от времени синтеза. Изображения поверхности образцов CdS, полученных при различном времени осаждения, приведены на рис. 2. Образцы, осажденные в течение 5 min, характеризуются наиболее высокой шероховатостью поверхности со средней арифметической шероховатостью $R_a = 7.8$ nm и средней квадратичной шероховатостью $R_q = 11.0$ nm.

Размеры кластеров кристаллитов в CdS-слоях, осажденных за минимальное время, меняются от 100 до 600 nm, причем их наибольшая часть имеет размер от 200 до 400 nm. При увеличении длительности осаждения

наблюдается снижение шероховатости поверхности до значений $R_a = 5.1$ nm, $R_q = 7.1$ nm (осаждение в течение 10 min) и $R_a = 3.9$ nm, $R_q = 5.1$ nm (осаждение в течение 15 min). Наибольшая часть зерен в этих образцах имеет размер в пределах 100–250 и 50–150 nm (для 10 и 15 min соответственно).

Следует отметить, что увеличение длительности синтеза приводит к более плотной упаковке кристаллитов, сопровождаемой сглаживанием поверхности формируемой пленки CdS. Это является весьма важным фактором при разработке технологического процесса

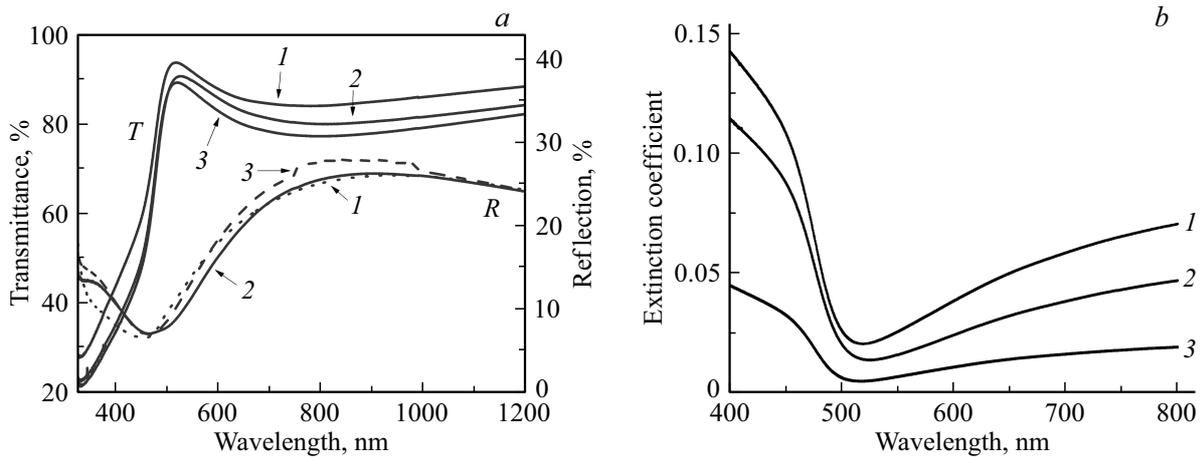


Рис. 3. Спектры пропускания и отражения (а) и коэффициента экстинкции (b) тонких пленок CdS в зависимости от времени осаждения: 5 (1), 10 (2), 15 min (3).

осаждения буферного слоя на поглощающие слои тонкопленочных солнечных фотопреобразователей на основе Cu(In,Ga)(Se,Se)₂ и Cu₂ZnSnSe₄.

3.2. Оптические и люминесцентные характеристики

Полученные пленки CdS характеризуются высоким оптическим пропусканием в области длин волн свыше 500 nm, коэффициент пропускания достигает значений 80–90%. Наиболее высокое пропускание наблюдалось для пленок, осажденных в течение 5 min, и незначительно уменьшалось при увеличении длительности осаждения. На рис. 3,а приведены спектры оптического пропускания и отражения CdS-пленок в зависимости от времени синтеза. Графики коэффициента экстинкции (ослабления) (k) в зависимости от длины волны для пленок (рис. 3, b), полученных при всех режимах, показывают, что значения k снижаются до минимальных значений в области длины волны ≈ 500 nm, соответствующей оптической полосе пропускания, и затем незначительно возрастают.

Наблюдаемое уменьшение величины k показывает, что максимальное поглощение падающего излучения происходит в области энергий, больших оптической ширины запрещенной зоны CdS. Как видно из рис. 3, b, увеличение длительности синтеза до 15 min приводит к значительному снижению поглощения в осажденном слое.

По спектрам пропускания и отражения был рассчитан коэффициент поглощения (α) с учетом множественных внутренних отражений в плоскопараллельном образце от его границ [23] по формуле

$$\alpha = -\frac{1}{d} \ln \left(\frac{\sqrt{(1-R)^4 + 4T^2R^2} - (1-R)^2}{2TR^2} \right), \quad (1)$$

где d — толщина пленки, T и R — пропускание и отражение соответственно. При анализе оптических характе-

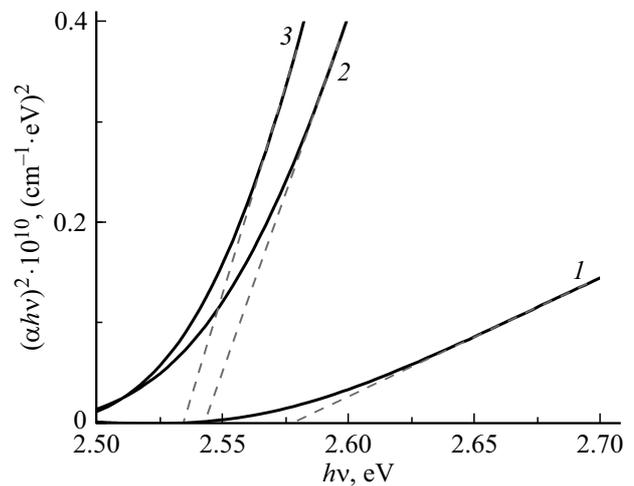


Рис. 4. Кривые Таука тонких пленок CdS в зависимости от режима осаждения: 5 (1), 10 (2), 15 min (3).

ристик установлено, что пленки обладают высоким коэффициентом оптического поглощения ($\alpha > 10^4 \text{ cm}^{-1}$) в области высоких энергий фотонов ($h\nu > E_g$). Оптическая ширина запрещенной зоны (E_g) полученных тонких пленок CdS была определена экстраполяцией линейной спектральной зависимости $(\alpha h\nu)^2 = f(h\nu)$ к оси энергии фотонов в предположении прямых разрешенных межзонных переходов согласно уравнению Таука [24]

$$(\alpha h\nu)^2 = A(h\nu - E_g), \quad (2)$$

где $h\nu$ — энергия падающего фотона, A — константа.

Графики зависимости $(\alpha h\nu)^2 = f(h\nu)$ для пленок CdS, осажденных за разное время, представлены на рис. 4.

При увеличении толщины осажденных пленок от 102 до 157 nm с возрастанием времени синтеза (от 5 до 15 min) значение оптической ширины запрещенной зоны уменьшалось от 2.57 до 2.53 eV. Подобный эффект,

Значения ширины запрещенной зоны (E_g), энергии Урбаха (E_U) и показателя преломления (n) пленок CdS в зависимости от условий осаждения

Толщина пленок (d), nm	Время осаждения (t), min	E_g , eV	E_U , meV	n
102	5	2.57	190	2.502
135	10	2.54	170	2.513
157	15	2.53	160	2.520

наблюдаемый и другими авторами, можно отнести к влиянию различных факторов, таких как размер зерна, структурное упорядочение, наличие примесей, отклонение от стехиометрии пленки и деформация решетки [25].

Кроме того, мы наблюдали сильное поглощение для исследуемых образцов ниже края фундаментального поглощения, что объясняется переходами с участием хвостов зон [26]. Коэффициент оптического поглощения (α) ниже края зоны в кристаллических, а также в неупорядоченных полупроводниках включает переходы из локализованных состояний или в эти состояния и обычно имеет экспоненциальную зависимость от энергии фотонов. Такая зависимость коэффициента α , впервые обнаруженная Урбахом, а затем Мартинсенем, известна как правило Урбаха-Мартинсена. Энергия Урбаха (E_U) в области низких энергий фотонов ($h\nu < E_g$) описывается [26] следующим выражением:

$$\alpha = \alpha_0 \exp \left[\frac{\sigma(h\nu - E_g)}{kT} \right], \quad (3)$$

где $h\nu$ — энергия фотона излучения, α_0 — коэффициент поглощения при значении энергии $E = E_g$, k — постоянная Больцмана, T — температура, $\sigma/kT = E_U$ — энергия Урбаха, характеризующая степень крутизны зависимости коэффициента поглощения и зависит от параметров материала.

Значение E_U можно получить из обратного наклона линейного графика зависимости $\ln(\alpha) = f(h\nu)$. Установленное уменьшение значений E_U от 190 до 160 meV (см. таблицу) с увеличением толщины полученных пленок CdS указывает на важную роль времени осаждения в уменьшении структурных дефектов и плотности локализованных состояний в запрещенной зоне материала CdS.

Показатели преломления (n) непосредственно осажденных пленок CdS оценивали на основе оптических измерений по формуле Эрве-Вандама, в которой n обратно пропорционально E_g , а A и B — константы, равные 13.6 и 3.4 eV соответственно [27]:

$$n = \left[1 + \left(\frac{A}{E_g + B} \right)^2 \right]^{1/2}. \quad (4)$$

Полученные значения показателя преломления с увеличением времени осаждения (соответственно с увеличением толщины пленки) незначительно возрастают

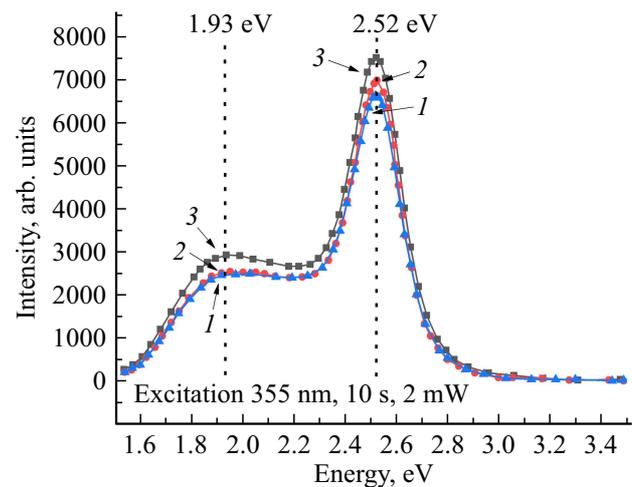


Рис. 5. Спектры ФЛ пленок CdS в зависимости от времени осаждения: 5 (1), 10 (2), 15 min (3).

от 2.502 до 2.520. Это указывает на то, что слои становились более плотными с увеличением времени процесса, что согласуется с данными атомно-силовой микроскопии. Изменения в значениях n относительно толщины пленки также приведены в таблице.

На рис. 5 представлены спектры ФЛ тонких пленок CdS, нанесенных за время от 5 до 15 min при постоянной температуре раствора (62 ± 1)°C. Сульфид кадмия — это компенсированный полупроводник, содержащий большое количество дефектов мелкого и глубокого уровня. Природа и тип дефектов сильно зависят от условий осаждения, и соответственно спектр ФЛ варьирует. На приведенных спектрах ФЛ пленок видны два пика в диапазоне от 1.6 до 2.8 eV. Полоса красной эмиссии, расположенная в энергетической области 1.8–2.0 eV, обусловлена переходами электронов с участием глубоких уровней междоузельного кадмия и вакансий серы [28–31], и поэтому этот эффект коррелирует с накоплением кристаллографических дефектов в слоях CdS, выращенных при низких температурах осаждения. В целом красная полоса излучения связана с вовлечением вакансий серы в излучательную рекомбинацию. Энергетическая полоса в области от 2.40 до 2.60 eV в спектрах ФЛ CdS известна как полоса зеленого излучения [30–33]. Эмиссионный пик при 2.52 eV, близкий к полученным значениям оптической ширины запрещенной зоны пленок CdS, можно отнести к энергии связанных экситонов [32,34]. Известно, что валентная зона CdS в центре зоны Бриллюэна расщепляется на три подзоны — A, B и C [34]. В нашем случае спектральное положение этой линии соответствует основному состоянию A-типа экситона гексагональной фазы CdS.

Наличие полосы зеленого излучения в спектрах ФЛ пленок CdS свидетельствует о том, что синтезированные слои имеют кристаллическую структуру с малым количеством границ зерен и минимальной плотностью собственных дефектов.

Заключение

Тонкие пленки CdS различной толщины были сформированы методом химического осаждения в ванне. Изучено влияние времени осаждения на структурные и оптические свойства сформированных пленок. Полученные нами пленки имеют близкий к стехиометрии состав с незначительным дефицитом серы и гексагональную структуру вюрцита с преимущественной ориентацией в направлении [002]. Выявлена зависимость коэффициента пропускания пленок от их толщины. Пленки CdS характеризуются прямыми разрешенными переходами с шириной запрещенной зоны E_g в диапазоне 2.53–2.57 eV. Установлено, что значения энергии Урбаха пленок CdS уменьшаются с увеличением времени осаждения от 190 до 160 meV. В спектрах ФЛ всех образцов наблюдается относительно узкий интенсивный пик при 2.52 eV (зеленая полоса излучения) и более широкой пик дефектной эмиссии с центром при 1.93 eV (красная полоса излучения). Наличие зеленой полосы излучения свидетельствует о том, что полученные пленки CdS обладают высокой кристаллическостью и могут быть использованы в качестве буферного слоя для тонкопленочных солнечных элементов.

Финансирование работы

Работа была поддержана Белорусским республиканским фондом фундаментальных исследований (грант № T21APM-003), Комитетом науки МОНКС Республики Армения (грант № 21SC-BRFFR-1C003) и Государственной программой научных исследований Республики Беларусь „Физическое материаловедение, новые материалы и технологии“.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] K.L. Chopra, R.C. Kainthla, D.K. Pandya, A.P. Thakoor. *Physics of Thin Films* (Academic Press, NY., 1982).
- [2] M.A. Green, E.D. Dunlop, J. Hohl-Ebinger, M. Yoshita, N. Kopidakis, K. Bothe, D. Hinken, M. Rauer, X. Hao. *Prog. Photovolt. Res. Appl.*, **30**, 687 (2022). DOI: 10.1002/pip.3595
- [3] M.G. Buonomenna. *Symmetry*, **15** (9), 1718 (2023). DOI: 10.3390/sym15091718
- [4] A. Romeo, E. Arregiani. *Energies*, **14** (6), 1684 (2021). DOI: 10.3390/en14061684
- [5] T. Nakada, M. Mizutani, Y. Hagiwara, A. Kunioka. *Solar Energy Materials & Solar Cells*, **67**, 255 (2001). DOI: 10.1016/S0927-0248(00)00289-0
- [6] M. Islam, S. Hossain, M. Aliyu, P. Chelvanathan, Q. Huda, M. Karim, K. Sopian, N. Amin. *Energy Procedia*, **33**, 203 (2013). DOI: 10.1016/j.egypro.2013.05.059
- [7] P. Jackson, D. Hariskos, R. Wuerz, O. Kiowski, A. Bauer, T.M. Friedlmeier, M. Powalla. *Phys. Status Sol. Rapid Res. Lett.*, **9** (1), 28 (2015). DOI: 10.1002/pssr.201409520
- [8] L.A. Kosyachenko. *Solar Cells-Thin-Film Technologies* (InTech, 2011).
- [9] M.A. Nusimovici, M. Balkanski, J.L. Birman. *Phys. Rev. B*, **1**, 595 (1970). DOI: 10.1103/PhysRevB.1.595
- [10] A.I. Oliva, O. Solis-Canto, R. Castro-Rodriguez, P. Quintana. *Thin Solid Films*, **391** (1), 28 (2001). DOI: 10.1016/S0040-6090(01)00830-6
- [11] R. Castro-Rodríguez, A.I. Oliva, Victor Sosa, F. Caballero-Briones, J.L. Peña. *Appl. Surf. Sci.*, **161** (3–4), 340 (2000). DOI: 10.1016/S0169-4332(99)00574-7
- [12] P.J. George, A. Sanchez-Juarez, P.K. Nair. *Semicond. Sci. Technol.*, **11**, 1090 (1996). DOI: 10.1088/0268-1242/11/7/021
- [13] A.E. Rakhshani, A.S. Al-Azab. *J. Phys.: Cond. Matt.*, **12**, 8745 (2000). DOI: 10.1088/0953-8984/12/40/316
- [14] P.J. Sebastian, Hailin Hu. *Adv. Mater. Opt. Electron*, **4**, 407 (1994). DOI: 10.1002/amo.860040604
- [15] N. Lejmi, O. Savadogo. *Solar Energy Materials & Solar Cells*, **70**, 71 (2001). DOI: 10.1016/S0927-0248(00)00412-8.
- [16] H. Moualkia, S. Hariech, M.S. Aida. *Thin Solid Film*, **518**, 1259 (2009). DOI: 10.1016/j.tsf.2009.04.067
- [17] M.G. Sandoval-Paz, R. Ramirez-Bon. *Thin Solid Film*, **517**, 6747 (2009). DOI: 10.1016/j.tsf.2009.05.045
- [18] A.S. Najm, H.S. Naem, H.Sh. Majdi, S.A. Hasbullah, H.A. Hasan, K. Sopian, B. Bais, H.J. Al-Iessa, H.A. Dhahad, J.M. Ali, A.J. Sultan. *Sci. Rep.*, **12**, 15295 (2022). DOI: 10.1038/s41598-022-19340-z
- [19] F. Lisco, P.M. Kaminski, A. Abbas, K. Bass, J.W. Bowers, G. Claudio, M. Losurdo, J.M. Walls. *Thin Solid Films*, **582**, 323 (2015). DOI: 10.1016/j.tsf.2014.11.062
- [20] A. Ashok, G. Regmi, A. Romero-Nunez, M. Solis-Lopez, S. Velumani, H. Castaneda. *J. Materials Science: Materials in Electronics*, **31**, 7499 (2020). DOI: 10.1007/s10854-020-03024-3
- [21] D. Abou-Ras, G. Kostorz, A. Romeo, D. Rudmann, A.N. Tiwari. *Thin Solid Films*, **481**, 118 (2005). DOI: 10.1016/j.tsf.2004.11.033
- [22] S. Aksay. *Eskişehir Technical Univ. J. Sci. and Tech. A – Appl. Sci. and Eng.*, **19** (4), 1013 (2018). DOI: 10.18038/aubtda.425869
- [23] D.K. Schroeder. *Semiconductor Materials and Device Characterization* (Wiley, N.Y., 1990).
- [24] J. Tauc. *Optical properties of solids* (Amsterdam, North-Holland, 1970).
- [25] J.P. Enriquez, X. Mathew. *Solar Energy Materials & Solar Cells*, **76**, 313 (2003). DOI: 10.1016/S0927-0248(02)00283-0
- [26] F. Urbach. *Phys. Rev.*, **92** (5), 1324 (1953). DOI: 10.1103/physrev.92.1324. ISSN 0031-899X
- [27] P.J.L. Herve, L.K.J. Vandamme. *Infrared Phys. and Technol.*, **35**, 609 (1994). DOI: 10.1016/1350-4495(94)90026-4
- [28] R. Lozada-Morales, O. Zelaya-Angel. *Thin Solid Films*, **281–282**, 386 (1996). DOI: 10.1016/0040-6090(96)08621-X
- [29] S. Hariech, J. Bougrida, M. Belmahi, G. Medjahdi, M.S. Aida, A. Zertal. *Bull. Mater. Sci.*, **45**, 78 (2022). DOI: 10.1007/s12034-022-02661-0
- [30] P.K. Narayanam, P. Soni, P. Mohanta, R.S. Srinivasa, S.S. Talwar, S.S. Major. *Mater. Chem. Phys.*, **139**, 196 (2013). DOI: 10.1016/J.MATCHEMPHYS.2013.01.022

- [31] K.S. Ramaiah, R.D. Pilkington, A.E. Hill, R.D. Tomlinson, A.K. Bhatnagar. *Mater. Chem. Phys.*, **68**, 22 (2001). DOI: 10.1016/S0254-0584(00)00281-9
- [32] S.R. Meher, D.K. Kaushik, A. Subrahmanyam. *J. Materials Science: Materials in Electronics*, **28** (8), 6033 (2017). DOI: 10.1007/s10854-016-6279-2
- [33] J. Aguilar-Hernandez, G. Contreras-Puente, A. Morales-Acevedo, O. Vigil-Galan, F. Cruz-Gandarilla, J. Vidal-Larramendi, A. Escamilla-Esquivel, H. Hernandez-Contreras, M. Hesiquio-Garduno, A. Arias-Carbajal, M. Chavarria-Castaneda, G. Arriaga-Mejia. *Semicond. Sci. Technol.*, **18**, 111 (2003). DOI: 10.1088/0268-1242/18/2/308
- [34] O. Madelung. *Semiconductors-Basic Data*. 2nd rev. ed (Berlin, Springer, 1996).