

Структурные и оптические характеристики тонких пленок CdTe в видимом и инфракрасном диапазонах

В.В. Подлипов^{1,2}, Д.А. Быков^{1,2}, Д.В. Нестеренко^{1,2}

¹ ИСОИ РАН – филиал ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН,
443001, Россия, г. Самара, ул. Молодогвардейская, д. 151;

² Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королёва,
443086, Россия, г. Самара, Московское шоссе, д. 34

Аннотация

Проведено исследование характеристик тонких плёнок CdTe, сформированных методом термовакuumного испарения из гранул CdTe на нагретые подложки. Структурные свойства CdTe были изучены с помощью растровой электронной микроскопии, рамановской спектроскопии. Исследование оптических свойств проводилось методом эллипсометрии, фурье-спектроскопии. Выявлены области низкого поглощения изготовленных плёнок в инфракрасном диапазоне. Для проверки возможности применения плёнок в сенсорике было проведено исследование структур металл/диэлектрик/диэлектрик на основе волноводного слоя CdTe для сред на основе воды, этанола и изопропанола, заключенных между плёнками CdTe и золота. В спектрах отражения этих структур наблюдаются резонансы в диапазонах длин волн, соответствующих локальным максимумам поглощения материалов. Выявлена зависимость положения резонансов в спектрах отражения от значений коэффициента поглощения растворителей. Полученные результаты могут быть использованы для разработки устройств фотоники инфракрасного диапазона.

Ключевые слова: нанофотоника, металл-диэлектрические структуры, резонансы, сенсорика, тонкие пленки CdTe, халькогенидные стеклообразные полупроводники, спектроскопия.

Цитирование: Подлипов, В.В. Структурные и оптические характеристики тонких пленок CdTe в видимом и инфракрасном диапазонах / В.В. Подлипов, Д.А. Быков, Д.В. Нестеренко // Компьютерная оптика. – 2022. – Т. 46, № 3. – С. 415-421. – DOI: 10.18287/2412-6179-CO-1042.

Citation: Podlipnov VV, Bykov DA, Nesterenko DV. Structural and optical properties of thin CdTe films in the visible and infrared regions. Computer Optics 2022; 46(3): 415-421. DOI: 10.18287/2412-6179-CO-1042.

Введение

В последнее время интерес к тонкопленочным оптическим чувствительным структурам значительно возрастает благодаря возможности создания миниатюрных сенсоров с высокой точностью подстройки и быстродействием. Для детекции изменений внешней среды используется спектроскопия на основе поверхностного плазмонного резонанса [1], резонанса возбуждения волноводных мод [2], резонансов Фано для связанных мод [3]. Исследования применения узких резонансов Фано показывают возможность достижения высоких значений чувствительности и усиления поля [4–5], а также возможность определения оптических характеристик плёнок толщиной до единичных атомных слоев [6]. Развитие сенсорики требует исследования новых перспективных материалов, а также использования оптически управляемых материалов, допускающих адаптивную подстройку оптических свойств.

Пленки халькогенидных стеклообразных полупроводников на основе теллурида кадмия (CdTe), широко используемые в солнечной энергетике [7] и оптике инфракрасного (ИК) диапазона [8], имеют ряд интересных свойств. Тонкие пленки CdTe проявляют

диэлектрические свойства в ИК-диапазоне с возможностью активного фотоуправления благодаря фоторефрактивному эффекту, что может позволить использовать их в резонансных сенсорных структурах в качестве волноводных слоев. Благодаря фоторефрактивной нелинейности они могут быть использованы для применений в голографии и дифракционной оптике [9], в частности как среды для оптической памяти, усиления световых пучков и обращения их волнового фронта. Тонкие пленки на основе CdTe также показали свои преимущества в области детекции излучения рентгеновского диапазона [10]. Формирование указанных пленок с высоким качеством и достаточно низкой себестоимостью представляет собой достаточно сложную задачу.

Для формирования тонких пленок CdTe наиболее часто применяют термовакuumное испарение. Качество тонких пленок в значительной мере зависит от типа и конструкции испарителей [11]. Для достижения высоких показателей качества пленок при испарении необходимо точно поддерживать температурные режимы процесса испарения, нагрева подложки, поддерживать необходимую степень вакуума, обеспечивать постоянную скорость осаждения пленки. Также используются дополнительные процедуры об-

работки на основе температурного отжига [12], травления в специальных газовых смесях, таких как Ag, CdCl₂ [13]. Такие стадии обработки позволяют удалить излишки одного из веществ (как правило, Te), повысить однородность пленок, снять внутренние напряжения, повысить проводимость для повышения эффективности солнечных ячеек. Для этих задач важно точно оценивать оптические свойства CdTe, без знания которых невозможна оптимизация оптических структур. В работе [14] тонкие пленки CdTe формировались методом магнетронного распыления, проводился анализ оптических свойств методом эллипсометрии и последующее моделирование дисперсии показателя преломления и коэффициента экстинкции. Можно отметить, что в этой работе не проводился анализ влияния технологических параметров формирования пленок CdTe на оптические свойства. При этом в ряде работ, как, например, в [15] отмечается влияние температуры подложки на качество и оптические свойства тонких пленок CdTe. Однако в указанной работе оценки влияния температуры подложки проводились для видимого диапазона, тогда как для ряда применений, например в сенсорике [16–17], необходимо знание оптических свойств и в ИК-диапазоне.

В связи с этим в данной работе исследуются структурные и оптические свойства пленок CdTe, полученных термовакуумным испарением с различными параметрами нанесения в видимом и инфракрасном диапазонах.

1. Методика эксперимента

Формирование тонких пленок CdTe осуществлялось на поверхности диоксида кремния (SiO₂) с помощью установки УВН-2М-1. Перед напылением подложки диоксида кремния проходили процедуру плазменной очистки с использованием установки Solarus Plasma Cleaner, Gatan. В полый корпус динамического испарителя загружались кристаллы химически чистого CdTe массой 2 г. Рабочая камера вакуумной установки откачивалась до остаточного давления $2 \cdot 10^{-4}$ Па.

Температура подложки измерялась со стороны, противоположной поверхности, на которую происходило напыление CdTe, термопарой хромель–копель, и поддерживалась на заданном уровне. Далее непосредственно через корпус испарителя пропускаться электрический ток (напряжение $U = 5$ В, ток $I = 80$ А). В процессе испарения подложка нагревалась до различных температур. Были проведены четыре серии напыления пленок с температурами подложки 100, 200, 300 и 450 °С, далее упоминаемые в тексте как образцы с номерами 1, 2, 3 и 4 соответственно. Испарение осуществлялось с помощью резистивного динамического испарителя в вакууме, конструкция и математическая модель которого описаны в [18].

Сформированные пленки исследовались методами сканирующей профилометрии, растровой электрон-

ной микроскопии (РЭМ), эллипсометрии, спектроскопии комбинационного рассеяния (КР) и фурье-спектроскопии.

Получение спектров комбинационного рассеяния осуществлялось с использованием интегрированного в нанолaborаторию NtegraSpectra (MT-МДТ, Россия) рамановского спектрометра. Получение спектра осуществлялось в конфокальном режиме с использованием подсветки сфокусированного лазерного пучка с длиной волны 532 нм. Спектральное разрешение в настоящем исследовании составляло $\sim 0,8$ см⁻¹.

Исследование поверхностной структуры, морфологии проводилось с помощью РЭМ Carl Zeiss Supra 25. Исследование оптических свойств тонких пленок CdTe в диапазоне длин волн 600–1700 нм проводилось методом эллипсометрии с использованием установки Woollam M-2000 DI. Исследование оптических свойств тонких пленок CdTe в инфракрасном диапазоне длин волн от 1280 до 4000 нм для ближнего и среднего ИК проводилось с использованием фурье-спектрометра ФСМ 2203 (Инфраспек).

2. Результаты и обсуждение

2.1. Морфология и свойства пленок CdTe

Морфология изготовленных пленок CdTe, полученная с помощью РЭМ, представлена на рис. 1. Как видно на рис. 1а, пленка имеет зернистую поликристаллическую структуру высокой плотности с отсутствующими порами и микрокаплями испаряемого вещества, характерными для пленок, получаемых с использованием традиционных методов резистивного испарения в вакууме. На поверхности тонкой пленки CdTe, полученной при температуре 100 °С, видны отдельные микрокристаллиты избыточного Te, который при длительном отжиге при указанной температуре способен мигрировать и находить выход на поверхности в виде отдельных включений. При этом кристаллиты самой пленки крайне малы и почти незаметны из-за их размера, близкого к предельному разрешению РЭМ. Пленки CdTe, полученные при более высоком нагреве подложки (см. рис. 1б, в), имеют значительно меньшее количество отдельных поверхностных включений Te и большие размеры кристаллитов пленки. При этом средний размер зерен такой пленки составил 35–80 нм. Шероховатость пленок не превышала 40 нм. Увеличение размера зерна косвенно служит показателем совершенствования кристаллической структуры пленки и характерно для процессов термического испарения при увеличении температуры подложки в процессе испарения. Процесс увеличения зерен вызван увеличением миграции атомов и молекул испаряемого вещества, способного преодолевать большие расстояния, теряя энергию в процессе конденсации. Это, в свою очередь, приводит к тому, что относительное количество объема мате-

риала, находящегося в зернах, увеличивается, уменьшая при этом количество материала в межзеренном пространстве, находящегося в термодинамически менее выгодном состоянии. Аналогично тому, как на поверхности пленки CdTe образца №1 в [19] также было отмечено появление кристаллитов избыточного Te (включения Cd имеют шестиугольную форму).

2.2. Спектроскопия комбинационного рассеяния

Исследования спектров комбинационного рассеяния света образцов CdTe демонстрируют характерные максимумы, расположенные в области волновых чисел $\sim 159 \text{ см}^{-1}$ (слабая мода LO первого порядка CdTe), $\sim 324 \text{ см}^{-1}$ (2LO второго порядка CdTe) [20–22]. В [23] показано, что возбуждение продольной моды LO CdTe для монокристаллов, ориентированных вдоль направлений $\langle 100 \rangle$ и $\langle 111 \rangle$, происходит на $\sim 167 \text{ см}^{-1}$; возбуждение связанной моды E колебаний Te и TO колебаний CdTe сопровождается появлением пиков колебаний на частоте $\sim 141 \text{ см}^{-1}$ [24]. На рис. 2 представлены результаты спектроскопии комбинационного рассеяния пленок CdTe, сформированных при различных температурах подложки. На спектрах наблюдаются максимумы на $\sim 144 \text{ см}^{-1}$, что соответствует возбуждению связанной моды E колебаний Te и CdTe. Слабо выраженные максимумы на $\sim 165 \text{ см}^{-1}$ для образцов №3 и №4 согласуются со

спектрами КР для поликристаллических пленок в [24]. Незначительное увеличение ширины пика в спектре КР в области значений волновых чисел 144 см^{-1} свидетельствует о достаточно высокой степени совершенства кристаллической структуры материала и проявлении размерных эффектов, вызванных малыми размерами зерен [20].

На изображении спектра образца №2 наблюдается широкий пик небольшой интенсивности в области волнового числа 267 см^{-1} , который согласно [20–22] соответствует колебаниям избыточных атомов теллура и которого не наблюдается на спектрах образца №4. Согласно [24], причиной его возникновения может являться поперечная мода второго порядка (2TO) молекул CdTe. Наблюдение моды второго порядка, таким образом, на образцах №2 и №3 свидетельствует о более высокой однородности структуры и морфологии пленки по сравнению с образцами №1 и №4.

Сравнительный анализ спектров образцов №2 и №3, полученных при температурах подложки 200 и 300 °C соответственно, показывает относительное снижение высоты пиков на частотах $\sim 144 \text{ см}^{-1}$ и повышение интенсивности колебаний на частоте $\sim 165 \text{ см}^{-1}$, что свидетельствует о повышении степени кристаллического совершенства пленки CdTe. Данные анализа спектров КР представлены в табл. 1. Внешний вид спектров представлен на рис. 2.

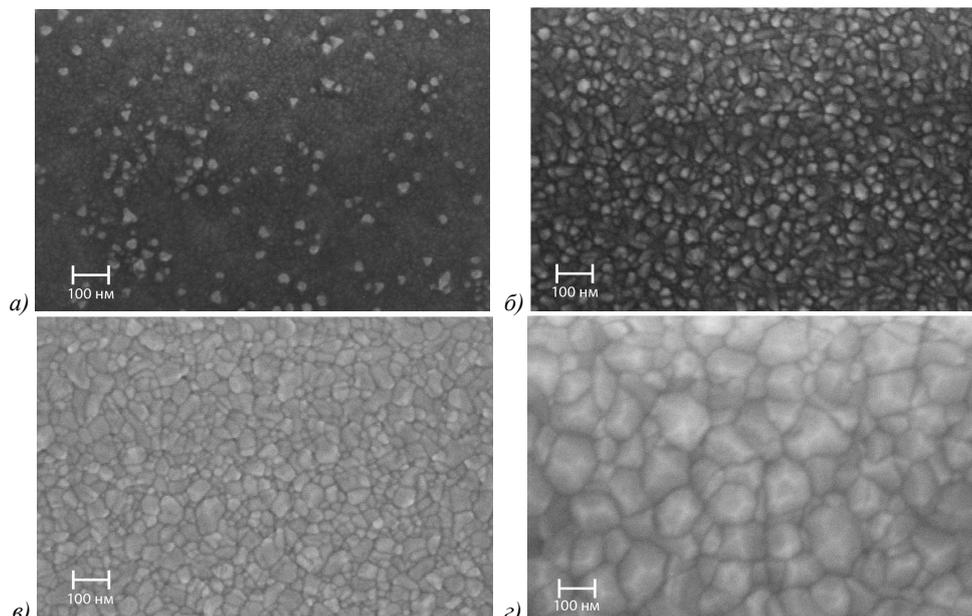


Рис. 1. Изображения РЭМ пленок CdTe, изготовленных при следующих температурах подложки: а) 100 °C, б) 200 °C, в) 300 °C, г) 450 °C

Из рис. 2 видно, что для образца №1, полученного при температуре подложки 100 °C, пики КР в областях частот 124 см^{-1} и 143 см^{-1} , обычно наблюдаемые на спектрах пленок CdTe, не выражены. Поэтому можно заключить, что образец №1 существенно отличается по составу и морфологии от образцов №2, №3 и №4, а также от образцов, исследованных в работах [20–24], и не будет использован для дальнейшего анализа.

Анализируя спектры КР образцов 2–4, можно заключить, что их форма, внешний вид, положение и интенсивность пиков наиболее соответствуют характеристикам образцов в работах [20, 21].

2.3. Оптические свойства

Для получения точных значений показателя преломления CdTe была проведена оценка значений

толщины пленки двумя способами. Геометрическая толщина плёнки в локальных областях размерами около 1 мкм измерялась при помощи стилусного профилометра. Толщина пленок, определяемая с помощью эллипсометра, далее приводится как эффективная толщина. Эффективная толщина оценивалась по данным эллипсометрии при размерах зондового пучка около 2 мм. Усреднённая геометрическая толщина локальных областей и эффективная толщина образцов плёнок приведены в табл. 2.

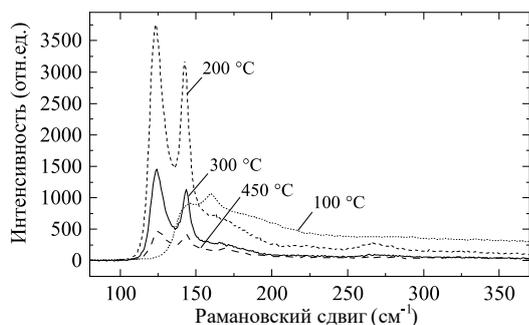


Рис. 2. Рамановские спектры тонких пленок CdTe на подложке SiO₂

Табл. 1. Анализ спектров КР для пленок CdTe

Образец – температура подложки	Положение рамановских пиков, см ⁻¹			
	№1 – 100 °C	–	142	160
№2 – 200 °C	123	143	–	267
№3 – 300 °C	124	143	165	264
№4 – 450 °C	125	144	168	–

Табл. 2. Оценка толщины образцов CdTe

Образец – температура подложки	Геометрическая толщина, нм	Эффективная толщина, нм
№1 – 100 °C	876	924
№2 – 200 °C	428	465
№3 – 300 °C	355	382
№4 – 450 °C	346	344

Аппроксимация действительной n и мнимой k частей показателей преломления измеренных пленок осуществлялась на основе данных эллипсометрии с помощью модели, включающей два осциллятора PSEMI-M0, методом, описанным в [14]. Полученные дисперсионные зависимости n и k для образцов №2, 3 и 4 показаны на рис. 3. Из графика зависимости мнимой части показателя преломления следует, что CdTe можно рассматривать как непоглощающий высокоиндексный диэлектрик для длин волн, больших 900 нм.

Спектры пропускания образцов №2, 3 и 4 показаны на рис. 4. Измерения проводились в диапазоне длин волн от 600 до 1700 нм на эллипсометре (рис. 4а), в диапазоне от 1700 до 4000 нм – на фурье-спектрометре (рис. 4б). Спектры пропускания плёнок CdTe, показанные на рис. 4б, нормированы на спектр пропускания подложки. С увеличением длины волны

в видимом диапазоне от 600 нм наблюдается рост пропускания образцов, как видно на рис. 4а, что свидетельствует об уменьшении поглощения в материале. Для длин волн больших 900 нм вследствие уменьшения поглощения CdTe наблюдаются характерные интерференционные минимумы и максимумы, обусловленные резонансами Фабри–Перо [23, 24]. Отметим, что из-за малых коэффициентов отражения на границах резонатора Фабри–Перо добротность резонансов оказывается низкой, а спектральная ширина резонансов – сравнимой с расстоянием между ними [25].

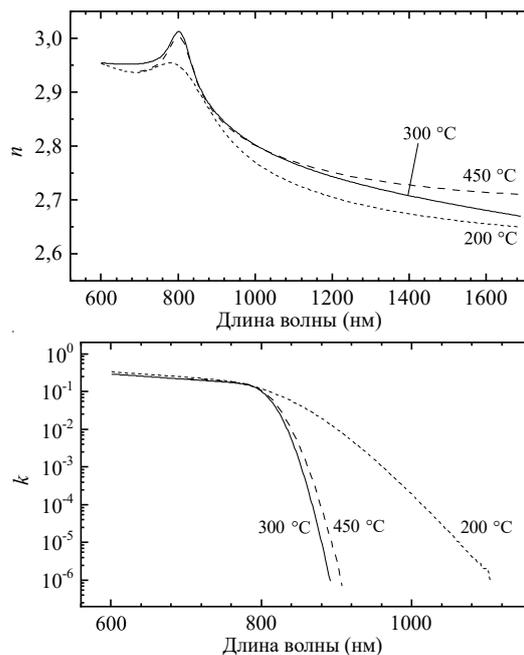


Рис. 3. Значения показателя преломления а) n и б) k пленок CdTe, изготовленных при различных температурах подложки

Спектры отражения образцов плёнок для угла падения 45° показаны на рис. 5. Как и для спектров пропускания, в спектрах отражения наблюдается картина резонансов Фабри–Перо с минимальными и максимальными значениями отражательной способности, положение которых в основном определяется толщинами слоёв CdTe рассматриваемых образцов. Аппроксимация спектров отражения с использованием метода матриц 2 × 2 на основе точной электромагнитной теории [26] позволяет оценить мнимую часть показателя преломления как равную нулю при длинах волн более 1200 нм для образца №2 и более 1000 нм для образцов №3 и 4.

Для демонстрации возможности использования плёнок CdTe в качестве отражающего слоя резонатора Фабри–Перо были исследованы структуры металл/диэлектрик/диэлектрик. Структуры представляют собой слой детектируемой диэлектрической среды толщиной около 2 мкм, заключённый между плёнкой CdTe толщиной 355 нм и оптически непрозрачным зеркалом из золота. Падение волны на плён-

ку CdTe осуществляется в воздухе под углом 45° к нормали поверхности слоёв. Прошедших волн в такой конфигурации не существует. Регистрация частотных спектров отражения осуществляется для угла отражения, равного углу падения. Данную структуру можно рассматривать в ИК-диапазоне как резонатор Фабри–Перо со слабо поглощающим полностью отражающим зеркалом из золота и непоглощающим зеркалом с низким отражением из CdTe. В случае отсутствия поглощения в диэлектрических средах отражение R падающей волны будет определяться как $R = 1 - A$, где A – поглощение при отражении от золотого зеркала. При этом увеличение поглощения в центральном детектируемом диэлектрическом слое приводит к формированию резонансного спада.

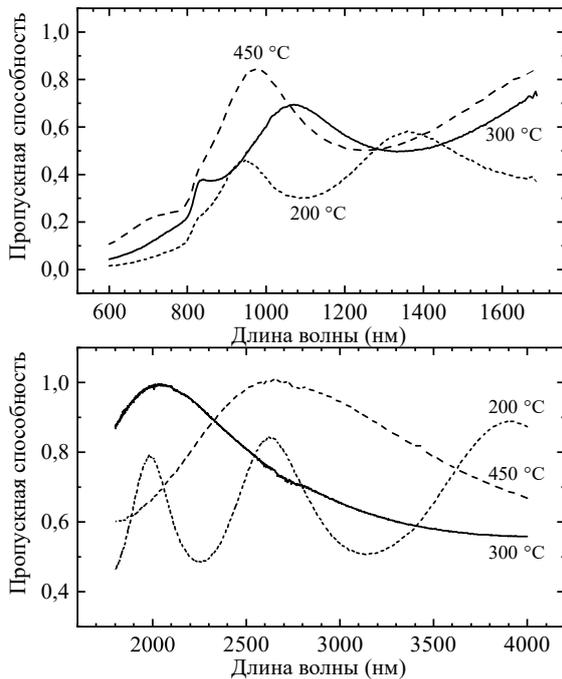


Рис. 4. Спектры пропускания пленок CdTe, изготовленных при различных температурах подложки, полученные методами а) эллипсомерии и б) фурье–спектрологии

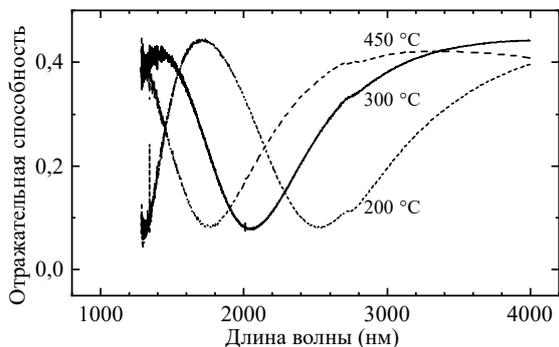


Рис. 5. Спектры отражения пленок CdTe, полученных при различных температурах подложки

Ранее, в [27], были исследованы этанол и изопропанол как детектируемые среды и для них выявлены области достижения максимальной чувствительности и усиления поля в ближнем и среднем инфракрасном

диапазоне. В качестве детектируемых сред в этой работе также были использованы воздух, дистиллированная вода, водный раствор этанола 96 %, 99,999 % изопропанол (ИПА). Спектры отражения этих структур в ИК-диапазоне, полученные для угла падения 45° , приводятся на рис. 6 и обозначены наименованиями материалов детектируемых слоёв. Из графиков видно, что в случае детекции воздуха в спектральных линиях резонансы не наблюдаются вследствие отсутствия поглощения излучения в газах, содержащихся в воздухе, в диапазоне длин волн 1300–2600 нм. В спектральной линии структуры в случае детекции водной среды наблюдается широкий асимметричный резонанс высотой 0,15 и шириной 63 нм в диапазоне длин волн 1860–2020 нм, где мнимая часть показателя преломления воды достигает локального максимума $k = 0,002$ при 1930 нм.

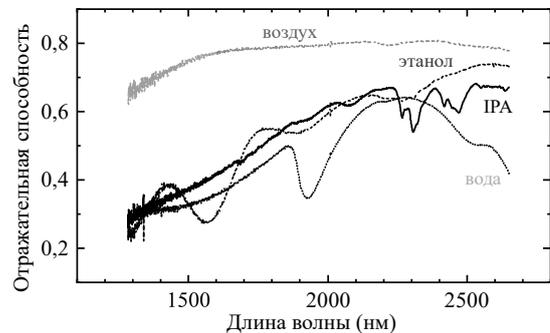


Рис. 6. Спектры отражения слоев воздуха, воды, этанола и изопропанола, заключенных между пленками CdTe и золота

В случае детекции этанола наблюдается резонанс высотой 0,02 при 2270 нм, что соответствует локальному максимуму поглощения этанола $k = 0,0008$. Поскольку в эксперименте был использован водный раствор этанола, это привело к возникновению спада в области поглощения воды 1860–2020 нм и к увеличению ширины резонансной линии в спектре. В случае детекции изопропанола наблюдаются выраженные узкие резонансы со значениями высоты 0,07–0,13 и ширины около 7 нм на длинах волн 2267 нм, 2308 нм, 2415 нм, 2471 нм, что соответствует локальным максимумам поглощения изопропанола $k = 0,00064, 0,00096, 0,00059, 0,0007$.

Заключение

В работе были получены тонкие пленки CdTe при различных значениях температуры подложки. Анализ морфологических свойств и данных рамановской спектроскопии показали влияние температуры подложки на однородность, оптические и кристаллические свойства тонких пленок CdTe. Пленки CdTe, полученные при температуре подложки менее 200°C , проявляют свойства, качественно отличные от пленок CdTe, полученных при температуре подложки более 200°C .

Анализ спектров пропускания и поглощения изготовленных пленок CdTe показал, что они могут быть использованы в качестве волноводных диэлектриче-

ских слоёв с низким поглощением на длинах волн более 1600 нм.

Проведенное исследование структур металл/диэлектрик/диэлектрик для сред на основе волноводного слоя CdTe и сред детекции на основе воды, этанола и изопропанола продемонстрировало возникновение резонансов в спектрах отражения. Положения резонансов в спектрах соответствуют локальным максимумам значений мнимой части показателя преломления растворителей в диапазоне длин волн 1500–2700 нм. Выявленные резонансные эффекты могут быть использованы для анализа содержания воды, этанола и изопропанола как детектируемых сред.

Благодарности

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ в рамках выполнения работ по Государственному заданию ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН (соглашение №007-ГЗ/ЧЗ363/26; разделы 2.1, 2.2) и Российского фонда фундаментальных исследований (грант 18-29-20006; разделы 1 и 2.3).

References

- [1] Homola J, Yee SS, Gauglitz G. Surface plasmon resonance sensors. *Sens Actuators B Chem* 1999; 54(1-2): 3-15.
- [2] Sokolov VI, Marusin NV, Panchenko VYa, Savel'ev AG, Seminogov VN, Haidukov EV. Determination of refractive index, extinction coefficient and thickness of thin films by the method of waveguide mode excitation. *Quantum Electron* 2013; 43(12):1149-1153.
- [3] Luk'yanchuk B, Zheludev NI, Maier SA, Halas NJ, Nordlander P, Giessen H, Chong CT. The Fano resonance in plasmonic nanostructures and metamaterials. *Nat Mater* 2010; 9(9): 707.
- [4] Hayashi S, Nesterenko DV, Sekkat Z. Waveguide-coupled surface plasmon resonance sensor structures: Fano lineshape engineering for ultrahigh-resolution sensing. *J Phys D* 2015; 48: 325303. DOI: 10.1088/0022-3727/48/32/325303.
- [5] Nesterenko DV, Hayashi S, Sekkat Z. Extremely narrow resonances, giant sensitivity and field enhancement in low-loss waveguide sensors. *J Opt* 2016; 18(6): 065004. DOI: 10.1088/2040-8978/18/6/065004.
- [6] Wu C, Khanikaev AB, Adato R, Arju N, Yanik AA, Altug H, Shvets G. Fano-resonant asymmetric metamaterials for ultrasensitive spectroscopy and identification of molecular monolayers. *Nat Mater* 2012; 11(1): 69-75.
- [7] Ferekides CS, Marinskiy D, Viswanathan V, Tetali B, Palekis V, Selvaraj P, Morel DL. High efficiency CSS CdTe solar cells. *Thin Solid Films* 2000; 361: 520-526.
- [8] Norton P. HgCdTe infrared detectors. *Opto-Electron Rev* 2002; 10(3): 159.
- [9] Günter P, Huignard JP. Photorefractive materials and their applications 2: Materials. New York: Springer Science+Business Media LLC; 2007.
- [10] Zaveryukhin BN, Mirsagatov ShA, Zaveryukhina NN, Volodarskii VV, Zaveryukhina EB. Cadmium telluride thin-film detectors of nuclear radiation. *Tech Phys Lett* 2003; 29(11): 959-962.
- [11] Moutinho HR, Hasoon FS, Abulfotuh F, Kazmerski LL. Investigation of polycrystalline CdTe thin films deposited by physical vapor deposition, close-spaced sublimation, and sputtering. *J Vac Sci Technol A* 1995; 13(6): 2877-2883.
- [12] Chander S, Dhaka MS. Physical properties of vacuum evaporated CdTe thin films with post-deposition thermal annealing. *Physica E Low Dimens Syst Nanostruct* 2015; 73: 35-39.
- [13] Moutinho HR, Al-Jassim MM, Levi DH, Dippo PC, Kazmerski LL. Effects of CdCl₂ treatment on the recrystallization and electro-optical properties of CdTe thin films. *J Vac Sci Technol A* 1998; 16(3): 1251-1257.
- [14] Treharne RE, Seymour-Pierce A, Durose K, Hutchings K, Roncallo S, Lane D. Optical design and fabrication of fully sputtered CdTe/CdS solar cells. *J Phys Conf Ser* 2011; 286: 012038.
- [15] Sathyamoorthy R, Narayandass SK, Mangalaraj D. Effect of substrate temperature on the structure and optical properties of CdTe thin film. *Sol Energy Mater Sol Cells* 2003; 76(3): 339-346.
- [16] Milla MJ, Barho F, González-Posada F, Cerutti L, Charlot B, Bomers M, Neubrech F, Tournie E, Taliercio T. Surface-enhanced infrared absorption with Si-doped InAsSb/GaSb nano-antennas. *Opt Express* 2017; 25: 26651-26661.
- [17] Barho FB, Gonzalez-Posada F, Milla M.-J, Bomers M, Cerutti L, Tournie E, Taliercio T. Highly doped semiconductor plasmonic nanoantenna arrays for polarization selective broadband surface-enhanced infrared absorption spectroscopy of vanillin. *Nanophotonics* 2017; 7: 507-516.
- [18] Kazanskiy NL, Kolpakov VA, Krichevskiy SV, Podlipnov VV. Simulations of dynamic resistive evaporation in a vacuum. *Tech Phys* 2017; 62(10): 1490-1495. DOI: 10.1134/S1063784217100140.
- [19] Belas EM, Bugar RG, Franc J, Moravec P, Hlidek P, Höschl P. Reduction of inclusions in (CdZn)Te and CdTe: In single crystals by post-growth annealing. *J Electron Mater* 2008; 37(9): 1212-1218.
- [20] Artamonov VV, Baidullaeva A, Vlasenko AI, Vuichik NV, Lytvyn OS, Mozol' PE, Strel'chuk VV. Atomic-force microscopy and Raman scattering studies of laser-induced structural disordering on the p-CdTe surface. *Phys Solid State* 2004; 46(8): 1533-1537.
- [21] Brus VV, Solovan MN, Maistruk EV, Kozyarskii IP, Maryanchuk PD, Ulyanytsky KS, Rappich J. Specific features of the optical and electrical properties of polycrystalline CdTe films grown by the thermal evaporation method. *Phys Solid State* 2014; 56(10): 1947-1951.
- [22] Vinogradov VS, Karczewski G, Kucherenko IV, Mel'nik NN, Fernandez P. Raman spectra of structures with CdTe-, ZnTe- and CdSe-Based quantum dots and their relation to the fabrication technology. *Phys Solid State* 2008; 50(1): 164-167.
- [23] Amirtharaj PM, Pollack FH. Raman scattering study of the properties and removal of excess Te on CdTe surfaces. *Appl Phys Lett* 1984; 45(7): 789-791.
- [24] Brajesh K, Rai HD, Bist RS, Katiyar K-T, Chen A, Burger J. Controlled micro oxidation of CdTe surface by laser irradiation: a micro-spectroscopic study. *Appl Phys* 1996; 80: 477-481.
- [25] Fabry C, Pérot A. Théorie et applications d'une nouvelle méthode de spectroscopie interférentielle. *Ann de Chim et de Phys* 1899; 16(7): 115-144.
- [26] Song GH. Mathematical modeling of Fabry-Pérot resonators: I. Complex-variable analysis by uniformly convergent partial-fraction expansion. *J Opt Soc Am A* 2014; 31(2): 404-410.

- [27] Ismail N, Kores CC, Geskus D, Pollnau M. Fabry-Pérot resonator: spectral line shapes, generic and related Airy distributions, linewidths, finesses, and performance at low or frequency dependent reflectivity. *Opt Express* 2016; 24(15): 16366-16389.
- [28] Nesterenko DV, Sekkat Z. Resolution estimation of the Au, Ag, Cu, and Al single and double layer surface plasmon sensors in the ultraviolet, visible, and infrared regions. *Plasmonics* 2013; 8(4): 1585-1595. DOI: 10.1007/s11468-013-9575-1.
- [29] Nesterenko DV, Pavelkin RA, Hayashi S. Estimation of resonance characteristics of single-layer surface-plasmon sensors in liquid solutions using Fano's approximation in the visible and infrared regions. *Computer Optics* 2019; 43(4): 596-604. DOI: 10.18287/2412-6179-2019-43-4-596-604.

Сведения об авторах

Подлипов Владимир Владимирович, инженер НИЛ-35 и ассистент кафедры технической кибернетики Самарского университета, инженер лаборатории микро- и нанотехнологий Института систем обработки изображений РАН – филиала Федерального научно-исследовательского центра «Кристаллография и фотоника» Российской академии наук (ИСОИ РАН). Область научных интересов: математическое моделирование, электронно-лучевая литография и оптимизация технологических процессов травления в микроэлектронике, дифракционной оптике, технологии обработки и контроля поверхности. E-mail: podlipovvv@ya.ru.

Сведения об авторе **Быков Дмитрий Александрович** см. стр. 365 этого номера.

Нестеренко Дмитрий Владимирович, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник лаборатории дифракционной оптики ИСОИ РАН – филиала ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН. E-mail: nesterenko@ipsiras.ru.

ГРНТИ: 29.31.26

Поступила в редакцию 07 сентября 2021 г. Окончательный вариант – 26 января 2022 г.

Structural and optical properties of thin CdTe films in the visible and infrared regions

V.V. Podlipnov^{1,2}, D.A. Bykov^{1,2}, D.V. Nesterenko^{1,2}

¹IPSI RAS – Branch of the FSRC “Crystallography and Photonics” RAS, 443001, Samara, Russia, Molodogvardeyskaya 151;

²Samara National Research University, 443086, Samara, Russia, Moskovskoye Shosse 34

Abstract

CdTe thin films have been deposited by thermal evaporation on heated glass substrates. Structural properties of the CdTe thin films were studied by scanning electron microscopy and Raman spectroscopy. Optical properties were examined by ellipsometry and Fourier spectroscopy. We revealed the low absorption of the synthesized thin films in the infrared (IR) region. We investigated the sensing capability of metal/dielectric/dielectric structures based on a CdTe waveguide layer and gold thick film. The reflectivity spectra of the structures with the water, ethanol, and isopropanol as sensing media exhibit resonance line shapes. The positions of the resonances correspond to those of local maximal values of the solvents absorption. The obtained results can be used for developing the applications of optical resonances in the IR region.

Keywords: nanophotonics, metal-dielectric structures, resonances, sensing, CdTe thin films, chalcogenide glassy semiconductors, spectroscopy.

Citation: Podlipnov VV, Bykov DA, Nesterenko DV. Structural and optical properties of thin CdTe films in the visible and infrared regions. *Computer Optics* 2022; 46(3): 415-421. DOI: 10.18287/2412-6179-CO-1042.

Acknowledgements: The work was partly funded by the Russian Federation Ministry of Science and Higher Education within a state contract with the "Crystallography and Photonics" Research Center of the RAS under agreement 007-Г3/Ч3363/26 (sections 2.1, 2.2) and Russian Foundation for Basic Research under project No. 18-29-20006 (sections 1, 2.3).

Authors' information

Vladimir Vladimirovich Podlipnov, an engineer at Samara National Research University's Lab-35, an engineer of the Micro- and Nanotechnologies Laboratory of the Image Processing Systems Institute of the RAS – Branch of the FSRC “Crystallography and Photonics” of the Russian Academy of Sciences. His research interests: mathematical modeling, electron-beam lithography, optimization of etching procedures in microelectronics, diffractive optics and techniques for surface processing and inspection. E-mail: podlipnovvv@ya.ru.

Dmitry Bykov graduated with honors (2009) from Samara State Aerospace University (SSAU), majoring in Applied Mathematics and Computer Science. Doctor of Physics and Mathematics (2017). Senior researcher at the Samara University and at the Diffractive Optics Laboratory of the Image Processing Systems Institute RAS – Branch of the FSRC “Crystallography and Photonics” RAS. His current research interests include optics of resonant diffractive structures, magneto-optics of nanostructured materials, and electromagnetic diffraction theory. E-mail: bykovd@gmail.com.

Dmitry V. Nesterenko graduated with honours (1999) from Samara State Aerospace University (Samara, Russia), majoring in Physics. Candidate in Optics (2002). Currently he is a senior researcher at Diffractive Optics laboratory of the Image Processing Systems Institute RAS – Branch of the FSRC "Crystallography and Photonics" RAS (Samara, Russia). His current research interests include nanophotonics, plasmonics, and electromagnetic theory. E-mail: nesterenko@ipsiras.ru.

Received September 07, 2021. The final version – January 26, 2022.
