

УДК 538.975

## ИССЛЕДОВАНИЕ ОПТИЧЕСКИХ СВОЙСТВ НАНОКЛАСТЕРНЫХ ПЛЕНОК ОКСИДА ТАНТАЛА В ИНФРАКРАСНОМ ДИАПАЗОНЕ

© 2023 г. Д. В. Бортко<sup>а, \*</sup>, П. В. Борисюк<sup>а</sup>, В. А. Шилов<sup>а</sup>,  
О. С. Васильев<sup>а</sup>, Ю. Ю. Лебединский<sup>а, b</sup>, К. М. Балахнев<sup>а</sup>

<sup>а</sup>Национальный исследовательский ядерный университет “МИФИ”, Москва, 115409 Россия

<sup>b</sup>Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет),  
Москва, 141701 Россия

\*E-mail: DVBortko@mephi.ru

Поступила в редакцию 01.07.2022 г.

После доработки 29.07.2022 г.

Принята к публикации 29.07.2022 г.

Представлены результаты формирования, аттестации морфологии поверхности и исследования оптических свойств в ближнем и среднем ИК диапазоне нанокластерных пленок Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, полученных путем термического оксидирования на атмосфере монодисперсных кластерных пленок металлического тантала, созданных на подложках кремния Si(001) методом магнетронного распыления. Методами атомно-силовой микроскопии (*in situ*) получены изображения поверхности и показано, что пленки Ta обладают пористой плотноупакованной структурой, состоящей из отдельных наночастиц сферической формы. При помощи спектрометра на ближний и средний ИК диапазон излучения исследованы оптические свойства полученных пленок. Показано, что тонкие пленки (толщиной менее 100 нм) имеют резкую границу между областью пропускания излучения и областью поглощения и/или отражения, тогда как для более толстых пленок данный эффект постепенно исчезает с ростом толщины кластерной пленки и не зависит от размера нанокластеров. Обсуждается возможность применения полученных структур в составе термофотовольтаических генераторов с целью повышения их КПД.

**Ключевые слова:** нанокластерные тонкие пленки, оксид тантала, Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, пропускание ИК излучения

**DOI:** 10.56304/S2079562922050098

### ВВЕДЕНИЕ

Термофотовольтаический эффект был открыт еще в середине прошлого века, и с тех пор люди активно стараются применять его для удовлетворения своих технологических потребностей [1, 2]. Неугасающий интерес к данному явлению связан с большими перспективами, открывающимися при внедрении систем, основанных на этом эффекте [1, 3–7]. Например, термофотовольтаические системы, использующие для своей работы инфракрасную часть спектра, отвечающую тепловому излучению, по расчетам могут помочь преодолеть известный лимит эффективности Шокли–Квисера в солнечных батареях [8], более перспективны для использования в радиоизотопных источниках питания, чем традиционные термоэлектрические системы [9, 10], а также с особым вниманием рассматриваются для оптимизации работы других тепловых источников энергии и различных бытовых приспособлений, которые имеют значительные тепловые потери [11].

Однако устройство термофотовольтаических ячеек далеко не тривиально, в связи с чем на сегодняшний день для них еще не достигнуты максимально возможные показатели эффективности преобразования энергии [1, 6]. Поэтому поиск возможностей для улучшения рабочих характеристик ТФВ-преобразователей является актуальной областью исследований и будет оставаться таковой еще длительное время.

Повышение эффективности ТФВ-систем может быть осуществлено за счет оптимизации различных частей этих систем. В связи с тем, что качество термофотовольтаического эффекта в большой степени определяется спектром излучения, достигающим материала, в котором происходит преобразование энергии фотонов в электрический ток или напряжение, совместно с этим материалом-преобразователем необходимо использовать селективные эмиттеры и фильтры, которые позволяют контролировать диапазон падающего теплового излучения [2–5, 7]. Они должны пропускать лишь узкую часть из всего падающего спектра, которая

может быть преобразована эффективно, и отражать часть спектра, которая не может быть преобразована в электричество, но может быть использована для повторного нагрева источника тепла.

Селективные эмиттеры и фильтры создают на основе довольно широкого спектра материалов: редкоземельных и тугоплавких металлов (Ta, W, Mo) и их оксидов, метаматериалов, различного рода фотонных кристаллов и других наноструктур на основе высокотемпературных соединений [1–3, 6, 12, 13]. Решающими факторами для выбора материала и структуры излучателей и фильтров является возможность регулировать спектр проходящего излучения, температурная стабильность, а также разумная стоимость полученной системы. Однако на сегодняшний день еще не получен материал, удовлетворяющий всем перечисленным факторам. Основная проблема состоит в том, что многие методы, позволяющие получать наиболее подходящие оптические характеристики, являются технологически сложными и затратными [13, 14], что затрудняет переход к массовому их использованию.

В связи с вышесказанным становится очевидна необходимость поиска и исследования структур с регулируемыми оптическими свойствами в видимом и тепловом диапазоне, надежным и недорогостоящим методом получения. В качестве такой структуры могут быть рассмотрены тонкие нанокластерные пленки оксида тугоплавкого металла тантала, у которых такой важный оптический параметр, как ширина запрещенной зоны, может регулироваться посредством варьирования размера кластеров, а также благодаря пористой внутренней структуре могут ожидать необычные эффекты поглощения и отражения света [15].

Целью данной работы является формирование, аттестация морфологии поверхности и исследование оптических свойств в ближнем и среднем ИК диапазоне нанокластерных пленок Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, полученных путем термического оксидирования на атмосфере монодисперсных кластерных пленок металлического тантала, созданных на подложках кремния Si(001) методом магнетронного распыления, а также проверка потенциальной возможности применения получаемых структур для повышения производительности термофотогенераторов электрической энергии.

## МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

В настоящем исследовании создан набор образцов, представляющих тонкие нанокластерные монодисперсные пленки тантала, осажденные на кремниевые подложки Si(001) толщиной 500 мкм

и продольными размерами около  $1.5 \times 1.0$  см<sup>2</sup>. Каждый образец характеризуется определенным диаметром кластеров, имеющим значение в диапазоне от 1.45 до 8.0 нм.

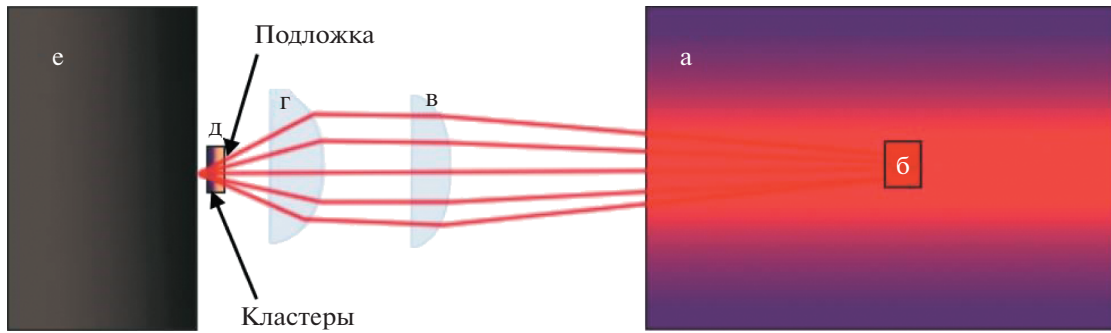
Выбор тантала в качестве материала напыляемых кластерных пленок обоснован его принадлежностью к тугоплавким металлам и, следовательно, высокотемпературными свойствами, которые необходимы для применения в термофотогальванике, а также позволяют избежать эффектов коагуляции кластеров, которые могут возникать из-за явления понижения температуры плавления частиц с уменьшением их размеров.

Формирование тонких нанокластерных пленок осуществлялось по известной методике кластерного осаждения из газовой фазы [16] с помощью магнетронного распыления мишени тантала марки ТВЧ (чистотой 99.95%). Формирование кластеров производилось с использованием кластерного источника Nanogen-50 с квадрупольным масс-фильтром MesoQ (Mantis Deposition Ltd., Великобритания) интегрированным в камеру препапарирования сверхвысоковакуумной (СВВ) системы Multiprobe MXP5 VT AFM-25 (Omicron Nanotechnology GmbH, Германия). Осаждение кластеров на подложку кремния, находящуюся под напряжением +900 В. Поскольку формируемые в результате магнетронного распыления кластеры имеют единичный отрицательный заряд, наличие положительного напряжения на подложке обеспечивает лучшую адгезию нанокластеров на поверхность. Размер осаждаемых кластеров контролировался посредством квадрупольного масс-фильтра MesoQ с погрешностью 2%. Толщина пленок контролировалась через значение эмпирического параметра экспозиции  $k$ :

$$k = I t d^3,$$

где  $I$  [нА] — значение кластерного тока, измеряющегося на выходе из кластерного источника,  $t$  [мин] — время осаждения,  $d$  [нм] — диаметр осаждаемых кластеров. Время напыления пленок для каждого образца было выбрано одинаковым и составляло 50 мин.

Чтобы установить связь между коэффициентом  $k$  и толщиной полученной пленки  $h$ , был создан набор образцов с одинаковым размером кластеров и разными коэффициентами экспозиции. Образцы были исследованы методом обратного резерфордского рассеяния (ОРР) на ускорителе ионов HVEE AN-2500 (High Voltage Engineering Europa B.V., Нидерланды) [17]. Данный метод позволяет осуществлять элементный и количественный анализ материала мишени на основе полученных данных об энергии ионов, рассеянных на атомах мишени на различной глубине и под разными углами. Так как метод ОРР имеет глубину анализа от 1 до 10 мкм в зависимости от исследу-



**Рис. 1.** Схема детектирования проходящего через образец (д) излучения от теплового источника (б), нагретого в трубчатой печи (а), с помощью спектрометра (е) и двух собирающих линз (в) и (г).

емого материала и начальной энергии рассеиваемых ионов, для исследуемых тонких пленок были получены значения содержания атомов на  $1 \text{ см}^2$  на всей глубине пленки (слоевая концентрация атомов). В приближении плотной упаковки кластеров в пленке была рассчитана толщина  $h$  для каждого образца. Анализ результатов установил прямолинейную зависимость толщины от коэффициента экспозиции:

$$h[\text{нм}] \approx 0.94k.$$

Таким образом, в ходе напыления толщина пленок постепенно увеличивались с ростом диаметра нанокластеров и составила 30 нм для образца с наименьшим размером частиц (1.45 нм) и 3447 нм для образца с наибольшим размером частиц (8.00 нм).

С целью аттестации полученных образцов они были *in situ* исследованы методом атомно-силовой микроскопии (АСМ) в камере анализа той же СВВ системы.

Для формирования оксида тантала каждый образец был подвергнут отжигу на атмосфере в трубчатой печи при температуре  $1300^\circ\text{C}$  в течение нескольких часов. В процессе отжига также происходило формирование слоя термического оксида кремния ( $\text{SiO}_2$ ) на обратной стороне подложки. В связи с тем, что  $\text{SiO}_2$  имеет ширину запрещенной зоны около 8 эВ [18] и обладает хорошим пропусканием падающего излучения с длинами волн в инфракрасном и частично видимом диапазоне, а также используется в качестве просветляющего покрытия в кремниевых солнечных элементах [19], поглощение теплового излучения кремниевой подложкой и достижение им исследуемых кластерных пленок предположительно должно было улучшиться.

Химический состав сформированных нанокластерных пленок, осажденных на поверхность  $\text{Si}(001)$  непосредственно после осаждения и после окисления были измерены с помощью метода

РФЭС в камере анализа СВВ системы Multiprobe MXPS VT AFM-25. Поверхностная концентрация химических элементов рассчитывалась по известной методике [20].

Для непосредственного детектирования спектров пропускания образцами излучения от теплового источника была составлена схема эксперимента, представленная на рис. 1.

Обозначения на рисунке: (а) трубчатая печь RT 30-200/15 (Nabertherm GmbH, Германия), (б) образец SiC с продольными размерами  $25 \times 20 \text{ мм}^2$  и толщиной 5 мм, выполняющий роль нагретого тела, (в) плосковыпуклая линза из  $\text{CaF}_2$ , собирающая расходящееся излучение от SiC в близкий к параллельному пучок излучения, (г) короткофокусная плосковыпуклая линза из  $\text{CaF}_2$ , концентрирующая излучение, падающее на образец (д), (е) спектрометр ASP-IR-2.6 (Avesta Project Ltd., Россия), детектирующий проходящее через образец излучение. Расстояния между всеми элементами схемы были подобраны таким образом, чтобы удовлетворить нескольким критериям. Во-первых, собранное излучение от нагретого SiC должно попадать в щель спектрометра с максимальной плотностью энергии, то есть должно быть сконцентрировано в как можно меньшую область и при этом иметь наибольшую возможную мощность. Во-вторых, попадающее на подложку образца пятно от излучения должно иметь диаметр около 3 мм, чтобы покрыть практически всю область сформированной кластерной пленки, а также быть максимально сфокусированным.

Для каждого образца с помощью спектрометра ASP-IR-2.6 (Avesta Project Ltd., Россия) был снят спектр пропускания ИК-излучения в диапазоне от 800 нм до 2500 нм от нагретого до  $1500^\circ\text{C}$  карбида кремния. Температура была выбрана с учетом типичных температур эмиттеров, используемых в термофотовольтаике, а также для создания максимальной возможной для данной печи мощности из-

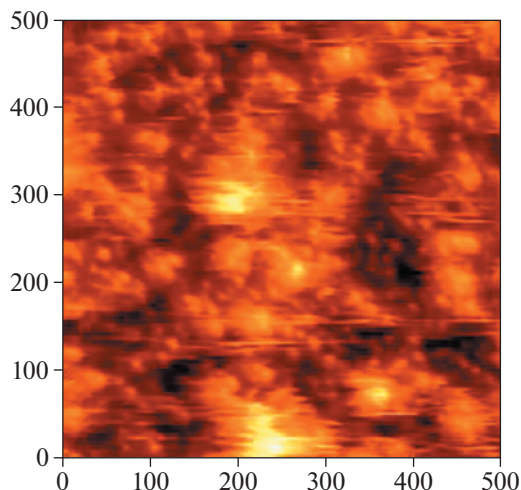


Рис. 2. Изображение, полученное *in situ* с помощью АСМ для образца с диаметром кластеров 8.00 нм.

лучения. Также был снят спектр пропускания ИК-излучения подложки без нанокластерной пленки, которая перед этим аналогично остальным образцам была подвергнута отжигу в печи при  $1300^{\circ}\text{C}$  в течение нескольких часов, и спектр излучения нагретого тела проходящий через оптическую систему линз и спектрометра в отсутствии образца.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Пример изображения поверхности образца, полученного методом АСМ с целью аттестации морфологии полученных пленок, представлен на рис. 2.

По виду данного изображения можно заключить, что кластерные пленки имеют рыхлую структуру и представляют из себя систему из плотноупа-

кованных сферических наночастиц. Диаметр кластеров, исследованных до выноса на атмосферу и отжига, соответствует установленному при напылении. Анализ химического состава методом РФЭС непосредственно после напыления показал формирование пленок тантала с небольшим (5–10%) количеством физ-сорбированного кислорода и следовым содержанием углерода. После процесса отжига на атмосфере в трубчатой печи анализ химического состава показал формирование соединения  $\text{Ta}_2\text{O}_5$ .

Спектр излучения в диапазоне длин волн от 800 до 2500 нм от нагретого до  $1500^{\circ}\text{C}$  карбида кремния представлен на рис. 3. Для сравнения также представлена теоретическая кривая, построенная по закону Планка и отвечающая нормированному на единицу спектру излучения абсолютно черного тела (АЧТ) при температуре 1773 К (или  $1500^{\circ}\text{C}$ ). Как можно видеть, SiC ожидаемо близок к АЧТ и является хорошим источником теплового излучения.

С целью оценить спектр излучения, попадающий на кластерную пленку после прохождения кремниевой подложки была получена зависимость интенсивности излучения, проходящего через подложку, от длины волны и рассчитан коэффициент пропускания  $T$  в диапазоне длин волн 900–2500 нм (рис. 4). Из графика видно, что пропускание излучения в среднем на всем диапазоне около 30%, однако начиная с 1400 нм коэффициент  $T$  начинает снижаться, что приводит к ухудшению отношения сигнал/шум на спектрах. В связи с этим, дальнейшие расчеты косвенных величин были ограничены снизу длиной волны 1050 нм.

Нормированные спектры пропускания ИК-излучения подложкой и образцами с большими и маленькими характерными размерами кластеров представлены на рис. 5. Из полученных результатов

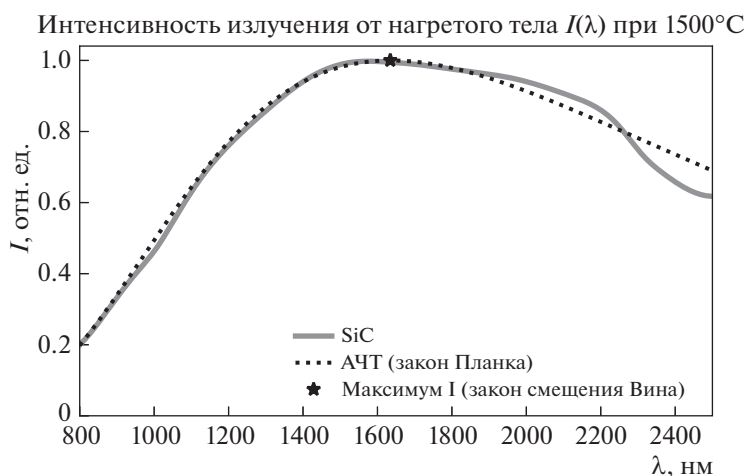
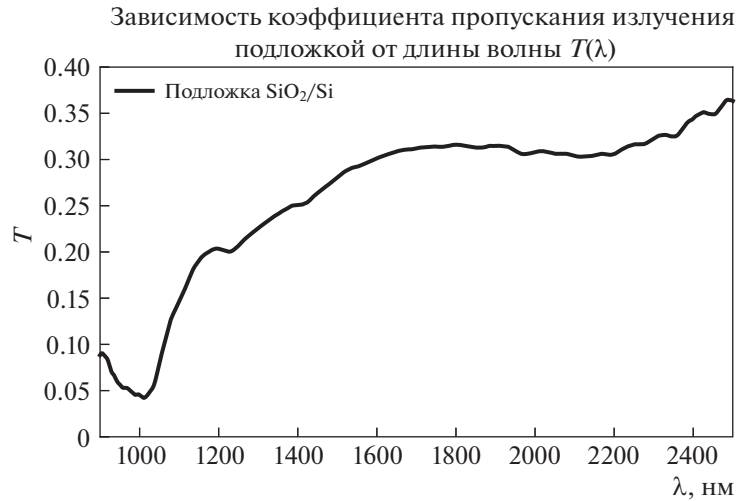
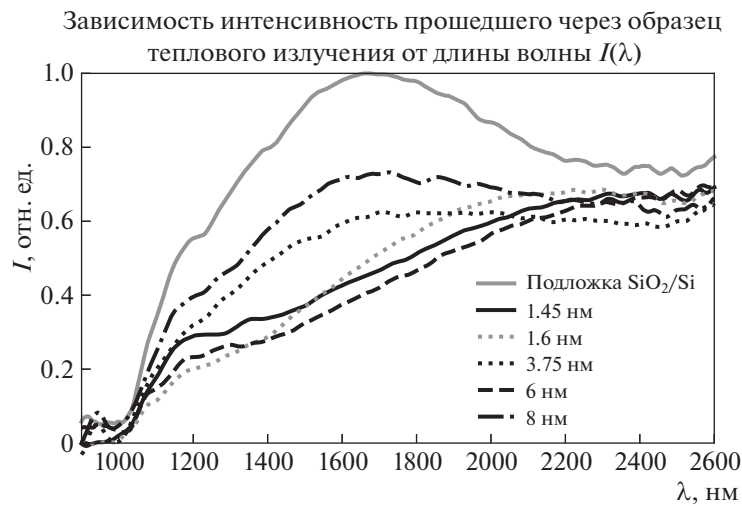


Рис. 3. Сравнение спектра излучения нагретого SiC до  $1500^{\circ}\text{C}$  со спектром излучения абсолютно черного тела (АЧТ) при той же температуре в соответствии с законом Планка.



**Рис. 4.** Зависимость коэффициента пропускания  $T$  излучения от нагретого тела подложкой образцов (Si/SiO<sub>2</sub>) для диапазона длин волн от 900 до 2500 нм.



**Рис. 5.** Зависимость интенсивности прошедшего через образец теплового излучения  $I$  от длины волны  $\lambda$  в диапазоне от 900 нм до 2600 нм для образцов монодисперсных пленок нанокластеров в диапазоне размеров 1.5–8.0 нм.

видно, что формы спектров, максимумы и минимумы пропускания для разных образцов отличаются между собой, а следовательно, пленки различной толщины, образованные кластерами различных размеров, проявляют разные оптические свойства.

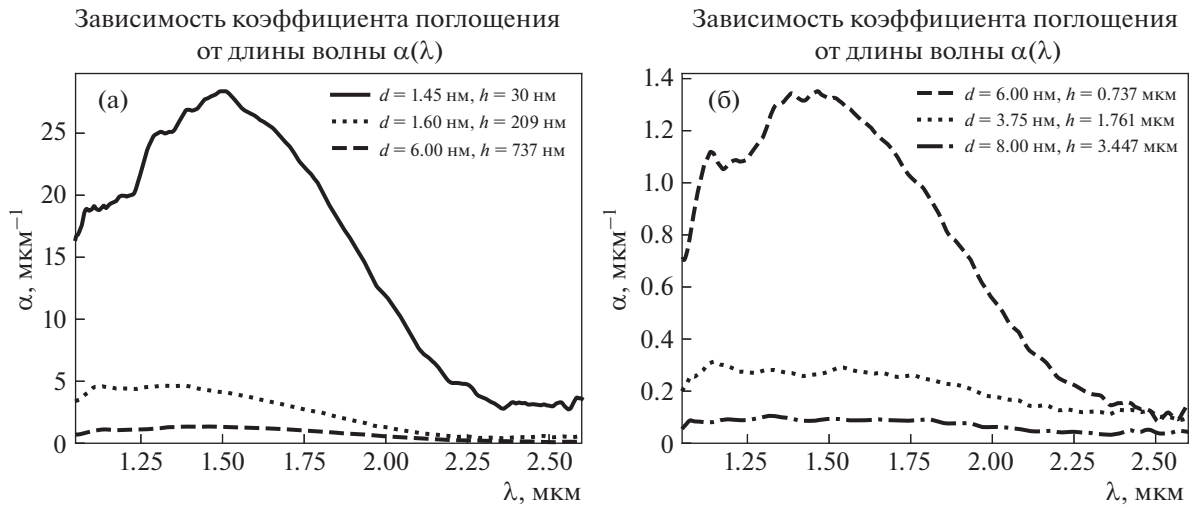
Для выявления наличия размерной зависимости оптических свойств кластерных пленок были найдены зависимости коэффициентов поглощения от длины волны падающего излучения. Так как коэффициент поглощения  $\alpha(\lambda)$  характеризует такую толщину слоя вещества, которая ослабляет интенсивность проходящего через него из-

лучения с длиной волны  $\lambda$  в  $e$  раз, то можно записать следующее уравнение:

$$I(\lambda)_{\text{sample},i} = I(\lambda)_{\text{sub}} e^{-\alpha(\lambda)h_i},$$

где  $I(\lambda)_{\text{sample},i}$  и  $I(\lambda)_{\text{sub}}$  — зависимость интенсивности проходящего излучения от длины волны для  $i$ -того образца и подложки соответственно,  $h_i$  — толщина кластерной пленки  $i$ -того образца. Тогда

$$\alpha(\lambda) = \frac{1}{h_i} \ln \left( \frac{I(\lambda)_{\text{sub}}}{I(\lambda)_{\text{sample},i}} \right).$$



**Рис. 6.** Зависимость поглощения излучения от нагретого тела кластерами от длины волны для кластеров разных размеров в тонких пленках (а) и в менее тонких пленках (б).

Зависимость коэффициента поглощения от длины волны для кластеров различных размеров с указанием толщины пленки данного образца представлена на рис. 6.

Так как коэффициент  $\alpha(\lambda)$  изменяется в большом диапазоне, рис. 6 был разделен на две части. На рис. 6а представлены образцы с маленьким диаметром кластеров 1.45 и 1.60 нм, образовавших тонкие пленки с толщиной 30 и 209 нм соответственно, а также образец с переходной толщиной 737 нм и диаметром кластеров 6.00 нм. На рис. 6б представлены образцы с большим диаметром кластеров 3.75 и 8.00 нм, образовавших пленки более толстые с толщиной 1.761 и 3.447 мкм соответственно, а также еще раз переходный образец для сопоставления масштабов. По данным графикам можно сделать следующие выводы. Во-первых, для тонких структур из кластеров наблюдается сильное непропускание в области от 1.0 до 1.8 мкм и характер зависимости имеет хорошо различимые максимумы и минимумы поглощения. Во-вторых, с ростом толщины пленки материал меняет свои свойства и даже для пленок, состоящих из кластеров близких размеров (1.45 и 1.60 нм) поглощение резко падает. Пленки, толщина которых составляет порядка 1 мкм, становятся более прозрачными для падающего ИК-излучения и коэффициент поглощения для них практически не зависит от длины волны. Это также можно видеть на рис. 5 для образцов с 3.75 и 8.00 нм, форма спектров которых довольно близка к форме спектра излучения, проходящего через подложку.

Сильно выраженный эффект поглощения излучения для тонких пленок может быть связан с квантовыми размерными эффектами, возникающими при взаимодействии микроволнового из-

лучения с нанометровыми объектами. При росте толщины пленок эти эффекты, по всей видимости, начинают нивелироваться, несмотря на наличие нанокластерной структуры внутри пленки.

Таким образом, по результатам данного исследования была определена верхняя граница толщины кластерной пленки, которая позволяет наблюдать заметную зависимость коэффициента поглощения излучения от длины волны с хорошо различимой границей между областью сильного поглощения и областью пропускания. Это ставит следующую задачу для дальнейшего исследования: необходимо изучить тонкие пленки толщиной до 100 нм для проверки наличия размерной зависимости коэффициента поглощения от размера кластеров пленки и возможности контроля границы пропускания посредством варьирования размеров кластеров и/или толщины пленки. Также можно добавить, что тонкие (порядка 10–100 нм) нанокластерные пленки, состоящие из кластеров малых размеров, явно проявляют свойства фильтров излучения, причем область пропускания сдвинута в сторону видимого диапазона, а область поглощения и/или отражения сдвинута в область среднего ИК. С учетом высокотемпературных свойств оксида тантала, такой эффект в перспективе может быть рассмотрен для использования в термофотозлектрогенераторах с целью увеличения эффективности преобразования теплового излучения в электричество, например, следующим образом. Напыление такого рода пленок на источник теплового излучения будет приводить к практически полному пропусканию более коротковолнового излучения, которое эффективно может преобразовываться современными термофотодетекторами, тогда как более длинноволно-

вая область излучения нагретого тела будет оказываться поглощенной и/или отраженной кластерной пленкой обратно, что должно приводить к эффективному вторичному разогреву источника излучения и, следовательно, к увеличению его излучения во всем диапазоне длин волн, в частности, в коротковолновой части спектра излучения.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной статье представлены результаты исследования оптических свойств монодисперсных нанокластерных пленок, состоящих из плотноупакованных кластеров термического оксида тантала ( $Ta_2O_5$ ). Каждая кластерная пленка создавалась методом магнетронного распыления Та мишени с последующим осаждением в газовой фазе на подложку Si(001), находящуюся под высоким напряжением (+900 В), после чего производился вынос каждого образца на атмосферу и его термическое оксидирование в трубчатой печи при  $T = 1300^\circ\text{C}$ . Каждый образец при напылении имел фиксированный характерный размер кластеров, который находится в диапазоне от 1.45 до 8.00 нм, а толщины пленок увеличиваются соответственно от 30 до 3447 нм в связи с одинаковым временем напыления для каждого образца. Анализ морфологии поверхности образцов, выполненный *in situ* методом АСМ, подтвердил образование на подложках плотноупакованных нанокластерных структур со сферическими частицами, размеры которых совпадают с заявленными.

По результатам анализа спектров пропускания излучения от нагретого до  $1500^\circ\text{C}$  в трубчатой печи образца SiC, являющимся хорошим подобием АЧТ, выяснилось, что с ростом толщины нанокластерной пленки практически исчезает зависимость поглощения и/или отражения такими пленками ближнего и среднего ИК излучения от длины волны, а сами пленки становятся почти прозрачными для падающего света. Однако для тонких пленок толщиной до 100 нм наблюдается резкая граница между областью пропускания и областью сильного поглощения и/или отражения излучения. При этом по отношению к падающему свету область пропускания сдвинута в коротковолновую часть спектра, что может быть в дальнейшем использовано в качестве фильтра излучения теплового источника в термофотоэлектрогенераторах с целью повышения эффективности преобразования тепла в электроэнергию. Преимущество подобного фильтра заключается в том, что кластерные пленки оксида тантала устойчивы к высоким температурам и могут быть нанесены на поверхность теплового источника, при этом пропускаемый коротковолновый диапазон спектра может быть эффективно преобразован термофотодетекторами, а более длинноволновый диапазон будет отражен и/или поглощен пленками, что должно способствовать вторичному разогреву ис-

точника тепла и, следовательно, его более эффективному излучению.

### БЛАГОДАРНОСТИ

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 21-72-10054). Авторы выражают благодарность Александру Гойхману (БФУ им. Иммануила Канта) за помощь в проведении исследований методом спектроскопии обратного резерфордского рассеяния.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ/REFERENCES

1. *Daneshvar H. et al.* // Appl. Energy. 2015. V. 159. P. 560.
2. *Wang Z. et al.* // Sol. Energy Mater. Sol. Cells. 2022. V. 238. P. 111554.
3. *Wang H.J. et al.* // Sci. China Tech. Sci. 2014. V. 57 (2). P. 332.
4. *Nam Y. et al.* // Sol. Energy Mater. Sol. Cells. 2014. V. 122. P. 287.
5. *Zhou Z. et al.* // J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transf. 2022. V. 278. P. 108016.
6. *Sakakibara R. et al.* // Sol. Energy Mater. Sol. Cells. 2022. V. 238. P. 111536.
7. *Kondaiah P. et al.* // Sol. Energy Mater. Sol. Cells. 2019. V. 198. P. 26.
8. *Rana A.S. et al.* // Nano Energy. 2021. V. 80. P. 105520.
9. *Crowley C.J. et al.* // Proc. AIP Conf. 2005. P. 601.
10. *Lee J. et al.* // Int. J. Heat Mass Transf. 2017. V. 108. P. 1115.
11. *Burger T. et al.* // Joule. 2020. V. 4. P. 1660.
12. *Chen Y.B., Zhang Z.M.* // Opt. Commun. 2007. V. 269. P. 411.
13. *Silva-Oelker G. et al.* // J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transf. 2019. V. 231. P. 61.
14. *Ollier E. et al.* // Sol. Energy Mater. Sol. Cells. 2017. V. 170. P. 205.
15. *Borisyuk P.V. et al.* // Mater. Lett. 2021. V. 286. P. 129204.
16. *Васильев О.С. и др.* // Ядерная физика и инжиниринг. 2019. Т. 10. № 5. С. 489 [*Vasilyev O.S. et al.* // Phys. At. Nucl. 2020. V. 83 (10). P. 1484].
17. *Shvets P., Maksimova K., Goikhman A.* // Coatings. 2022. V. 12 (3). P. 291.
18. *Tan G.-L. et al.* // J. Am. Ceram. Soc. 2003. V. 86 (11). P. 1885.
19. *Abbasiyan A. et al.* // Opt. Quantum Electron. 2019. V. 51. P. 338.
20. *Briggs D., Grant J.* Surface Analysis by Auger and X-Ray Photoelectron Spectroscopy. 2003. Chichester: IM Publications.

## Optical Properties of Tantalum Oxide Nanocluster Films in the Infrared Range

D. V. Bortko<sup>1, \*</sup>, P. V. Borisyuk<sup>1</sup>, V. A. Shilov<sup>1</sup>,  
O. S. Vasilyev<sup>1</sup>, Yu. Yu. Lebedinskii<sup>1, 2</sup>, and K. M. Balakhnev<sup>1</sup>

<sup>1</sup>National Research Nuclear University MEPHI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, 115409 Russia

<sup>2</sup>Moscow Institute of Physics and Technology (State University), Moscow Region, 141701 Russia

\*e-mail: [DVBortko@mephi.ru](mailto:DVBortko@mephi.ru)

Received July 1, 2022; revised July 29, 2022; accepted July 29, 2022

**Abstract**—The results of formation, certification of surface morphology and investigation of optical properties in the near and middle IR range of Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub> nanocluster films obtained by thermal oxidation in the atmosphere of monodisperse cluster films of metallic tantalum created on Si(001) silicon substrates by magnetron sputtering are presented. Surface images were obtained by atomic force microscopy (in situ) and it was shown that Ta films have a porous densely packed structure consisting of individual spherical nanoparticles. The optical properties of the obtained films were studied using a spectrometer for the near and medium IR radiation range. It is shown that thin films (with a thickness of less than 100 nm) have a sharp boundary between the radiation transmission region and the absorption and/or reflection region, whereas for thicker films this effect gradually disappears with an increase in the thickness of the cluster film and does not depend on the size of the nanoclusters. The possibility of using the obtained structures as part of thermal photoelectric generators in order to increase their efficiency is discussed.

**Keywords:** nanocluster thin films, tantalum oxide, Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, IR transmission