

Исследование особенностей нанесения нанослоев Al_2O_3 методом атомно-слоевого осаждения на структурированные пленки ИТО

© Л.К. Марков¹, А.С. Павлюченко¹, И.П. Смирнова¹, М.В. Меш², Д.С. Колоколов², А.П. Пушкарев³

¹ Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук,
194021 Санкт-Петербург, Россия

² АО «СКТБ Кольцова»,
198097 Санкт-Петербург, Россия

³ Университет ИТМО (физический факультет),
197101 Санкт-Петербург, Россия

E-mail: l.markov@mail.ioffe.ru

Поступила в Редакцию 8 апреля 2022 г.

В окончательной редакции 5 мая 2022 г.

Принята к публикации 2 июня 2022 г.

Изучались просветляющие наноструктурированные покрытия ИТО/ Al_2O_3 , имеющие градиент эффективного показателя преломления в направлении, перпендикулярном плоскости подложки. Исследуемые покрытия были получены методом атомно-слоевого осаждения оксида алюминия на структурированные пленки ИТО. Средствами просвечивающей электронной микроскопии показано, что осажденный наноразмерный слой оксида алюминия обладает хорошим качеством и равномерно обволакивает нитевидные кристаллы ИТО. Как оказалось в экспериментах, толщина получаемого слоя Al_2O_3 зависит от толщины и, как следствие, степени развитости поверхности исходной пленки ИТО. Получаемые толщины могут быть в несколько раз тоньше, чем планировалось в эксперименте, исходя как из расчетов параметров процесса атомно-слоевого осаждения, так и из непосредственных измерений скорости осаждения оксида алюминия на пленки неструктурированного ИТО. Возможной причиной, влияющей на скорость роста слоя Al_2O_3 в наноструктурированных пленках ИТО, является сильный рост площади поверхности пленки ИТО при ее структурировании. Так, оценка для пленки структурированного ИТО толщиной 700 нм, проведенная на основе данных просвечивающей и сканирующей микроскопии, показала, что площадь ее поверхности более чем в 20 раз превышает площадь гладкой пленки.

Ключевые слова: нанослой Al_2O_3 , ИТО, наноструктурированные покрытия.

DOI: 10.21883/FTP.2022.08.53153.9856

1. Введение

Просветляющие покрытия, сокращающие потери излучения при прохождении его через границу раздела двух сред с разными значениями показателя преломления, способны значительно улучшить эксплуатационные характеристики приборов, использующих в своем составе оптические элементы. При этом подобные покрытия разрабатываются как для видимой, так и инфракрасной областей спектра.

По мере развития технологии создания оптических покрытий отчетливо наблюдается следующая тенденция: многослойные неструктурированные пленки с различными показателями преломления, использующие конструктивную интерференцию для уменьшения потерь света, уступают место структурированным покрытиям [1–4].

Известно, что коэффициент отражения границы раздела подложка-среда можно уменьшить путем нанесения на подложку неоднородного слоя с показателем преломления, плавно изменяющимся в пределах значений показателей преломления ограничивающих его сред [5]. Отсутствие контраста показателей преломления пленки с внешними средами на обеих границах пленки эффективно минимизирует отражение света. При этом такие, так называемые градиентные пленки, работают

в широком диапазоне длин волн излучения, распространяющегося в разных направлениях. Теоретическое исследование сред с различным профилем показателя преломления представлено в работе [6].

Создание градиентных пленок может быть осуществлено разными способами, сводящимися в основном к тому, что пленка состоит из двух компонентов с разным значением показателя преломления. Если размеры частиц значительно меньше длины волны излучения, то среде можно приписать некий эффективный показатель преломления, определяемый процентным содержанием компонент в составе покрытия. Изменяя соотношение компонент по мере удаления от одной границы пленки и приближаясь ко второй границе, соответственно мы получаем среду с градиентом эффективного показателя преломления. Задача создания эффективно работающего на границе раздела двух сред градиентного покрытия сводится к поиску материалов и способов их совместного нанесения для того, чтобы обеспечить плавное изменение эффективного показателя преломления в пределах значений показателей преломления контактирующих сред. Успешные попытки осуществления данного подхода, реализованные для разных сочетаний материалов, можно найти, например, в работах [7–10].

Градиент показателя преломления может быть также получен и для однокомпонентной среды, в которой непрерывно изменяется плотность материала. Для этого в структуру покрытия вводится различное количество пустот. Среди методов получения таких сред рассматриваются, например, нанесение материала при наклонном падении [11], анизотропное травление материалов [12,13], анизотропный рост наноразмерных нитевидных кристаллов [14–17]. Обзор методов создания антибликовых покрытий приведен в работе [18], а использованию градиентных покрытий в живой природе посвящены статьи [19,20].

Благодаря широкому распространению средств визуализации и ввода информации (дисплеев, тачскринов), а также полупроводниковых источников света и фотоприемников, в последнее время востребованы покрытия, обладающие хорошими оптическими свойствами и одновременно способные проводить электрический ток для снятия или подачи напряжения на ячейку прибора. В работе [21] обсуждался способ нанесения покрытия из тонкого слоя Al_2O_3 для защиты наноразмерных нитевидных просветляющих пленок на основе ИТО. Данные пленки сочетают хорошие оптические свойства с электрической проводимостью и могут быть использованы в качестве прозрачных проводящих покрытий в широком классе современных приборов. Однако, в силу того что такие пленки обладают чрезвычайно развитой поверхностью, нанесение на них химически стойкого, прозрачного защитного слоя может препятствовать их деградации под действием факторов окружающей среды. В работе [21] было показано, что метод атомно-слоевого осаждения (АСО) позволяет создать наноразмерные слои, обволакивающие нитевидные кристаллы, из которых состоит структурированная пленка ИТО. Данный метод заключается в осаждении тонких пленок из газовой фазы и позволяет наносить слои на поверхности любой степени развитости с точностью, равной толщине моноатомного слоя, что особенно важно с точки зрения создания просветляющих покрытий, так как избыточное количество осаждаемого материала может изменить плотность распределения вещества в пленке, а следовательно, и ухудшить ее оптические свойства. Как было показано в работе [21], при отработке толщин наносимого защитного покрытия удастся сохранить градиентный характер показателя преломления, присущий исходной пленке ИТО. Настоящая работа посвящена особенностям нанесения защитного покрытия Al_2O_3 на развитые поверхности наноструктурированных пленок ИТО.

2. Результаты эксперимента и обсуждение

Осаждение слоя наноструктурированного ИТО проводилось на блоке электронно-лучевого испарения установки комбинированного нанесения пленок производства фирмы „Торр“ (США). Подложка, в качестве

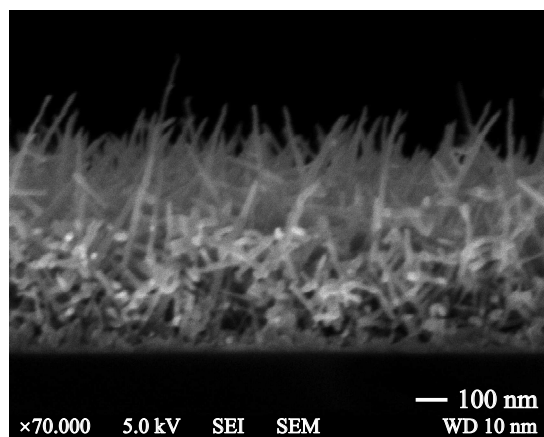


Рис. 1. РЭМ-изображение пленки ИТО.

которой использовались предметные стекла толщиной 1.2 мм, предварительно нагревалась в камере до температуры 450°C . Толщина наносимых пленок ИТО, напыляемых в настоящей работе, составила 700 нм. На рис. 1 в качестве примера приведено изображение скола одной из изготовленных пленок, полученное с помощью растрового электронного микроскопа (РЭМ).

Для проведения процесса атомно-слоевого осаждения слоев Al_2O_3 использовалась установка Picosun P-300B, производства фирмы „Picosun Oy“ (Финляндия). Осаждение проводилось чередованием напусков реагентов (ТМА (триметилалюминий) + H_2O). Время напуска составляло 0.1 с, время продувки составляло 3 с для ТМА и 5 с для воды. В качестве газа-носителя использовался азот ОСЧ. Толщина наносимого слоя рассчитывалась исходя из количества проведенных циклов процесса.

Спектры пропускания и отражения образцов исследовались на спектрометрической установке Optronic Laboratories OL 770. Излучение падало на образец со стороны пленки нормально к его поверхности.

Подробности технологии получения наноструктурированных пленок ИТО можно найти в работе [22], а детали процесса атомно-слоевого осаждения слоев Al_2O_3 изложены в работе [21]. Напомним, что, по данным растровой электронной микроскопии, для равномерного осаждения нанометрового слоя изолятора по всей длине нитей ИТО в структурированном покрытии толщиной ~ 700 нм необходимо провести процесс, при котором на гладкую, неструктурированную поверхность будет нанесен слой толщиной в 20 нм. В рамках настоящей работы данные образцы исследовались методами просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ). На рис. 2, где приведено изображение фрагментов нитевидных кристаллов ИТО, закрытых изолирующим слоем, видно, что все кристаллы покрыты равномерным слоем Al_2O_3 хорошего качества. Толщина нитей ИТО составляет ~ 15 нм, в то время как толщину слоя оксида алюминия можно оценить как 7–8 нм, что отличается от планируемой толщины покрытия, полученной исходя из количества

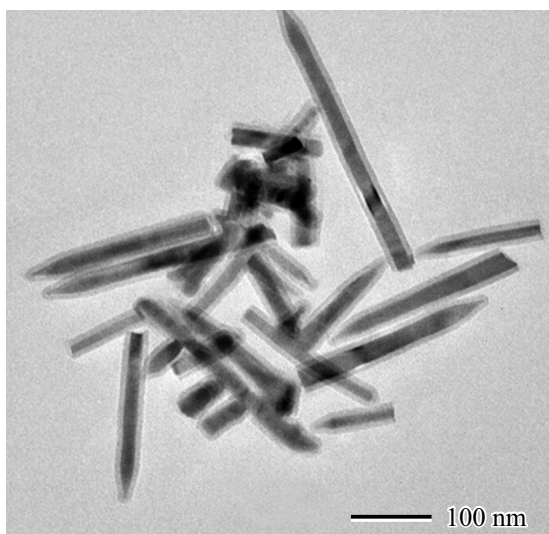


Рис. 2. ПЭМ-изображение нитевидных кристаллов ИТО, покрытых слоем Al_2O_3 .

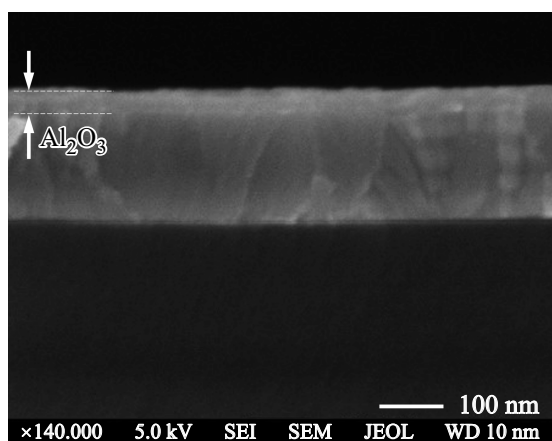


Рис. 3. РЭМ-изображение слоя Al_2O_3 на поверхности неструктурированной пленки ИТО.

проведенных циклов процесса АСО, и было подтверждено ранее при калибровке процессов нанесения слоев Al_2O_3 на неструктурированные поверхности различных материалов для использованной в экспериментах установки.

Для проверки особенности нанесения тонких слоев Al_2O_3 непосредственно на материал ИТО методом магнетронного распыления был получен неструктурированный слой толщиной 200 нм (количество материала ИТО в такой пленке равно количеству материала в структурированной пленке 700 нм, рассматриваемой в данной статье), на который в одном процессе с образцом структурированного ИТО при температуре 175°C наносился слой оксида алюминия с расчетной толщиной 20 нм. Скол полученного покрытия исследовался методом растровой электронной микроскопии (рис. 3). Несмотря на незначительный контраст в изображении

материалов ИТО и Al_2O_3 , на рисунке отчетливо видна граница между двумя материалами. Оценка толщины полученного покрытия диэлектрика близка к ожидаемому 20 нм.

Таким образом, можно утверждать, что, несмотря на то что, по меньшей мере, фрагменты нитевидных кристаллов, расположенные на внешней границе пленки, имеют хороший доступ для газов реагентов, скорость нанесения изолирующего покрытия значительно (в 2.5 раза) меньше скорости роста на неструктурированной пленке ИТО. Отметим, что впервые этот факт был отмечен нами при исследовании характера нанесения слоя Al_2O_3 на структурированные пленки ИТО различной толщины [21]. В экспериментах оказалось, что, для того чтобы равномерно закрыть всю поверхность нитевидных кристаллов пленки ИТО толщиной 160 нм, достаточно провести в 2 раза меньшее количество циклов процесса АСО, чем для пленки толщиной 700 нм.

Одним из объяснений наблюдаемой зависимости скорости нанесения слоя Al_2O_3 от степени развитости поверхности материала ИТО может служить значительный рост площади поверхности при структурировании материала, что может стать существенным с учетом ограниченности времен напуска и продувки цикла АСО. Попробуем количественно оценить увеличение поверхности рассмотренных нами пленок ИТО по сравнению с неструктурированной пленкой. Известно (см. [16]), что полученные методом электронного распыления на горячую подложку пленки структурированного ИТО имеют следующую структуру (рис. 1): непосредственно на поверхности подложки расположен достаточно плотный зародышевый слой, имеющий толщину 25–50 нм (в зависимости от толщины пленки). Слой состоит из зерен материала и имеет плотность на уровне 0.8 от плотности неструктурированного материала ИТО. Нитевидные кристаллы, рост которых начинается с поверхности зародышевого слоя, занимают весь оставшийся объем пленки до ее внешних границ. В реальной пленке они имеют разную длину и неидеально параллельны друг другу, что обеспечивает градиент плотности материала в перпендикулярном плоскости подложки направлении. Схематическое представление пленки представлено на рис. 4, а. Для оценки удельной поверхности структурированных пленок представим нитевидные кристаллы в виде ансамбля параллельных цилиндров (рис. 4, б). Диаметр цилиндров — 15 нм, (согласно данным рис. 2), а их длина для оценки прироста поверхности при структурировании не имеет значения, но для удобства примем ее равной толщине всей пленки за вычетом толщины зародышевого слоя. Необходимо лишь выполнить условие того, что масса материала, приходящаяся на нитевидные кристаллы, соответствовала экспериментальным данным. Напомним, что, согласно данным работы [21], структурированные пленки толщиной 160 и 700 нм были эквивалентны по массе неструктурированным пленкам толщиной 50 и 200 нм соответственно. Таким образом, найдя объем одного цилиндра нитевидного кристалла,

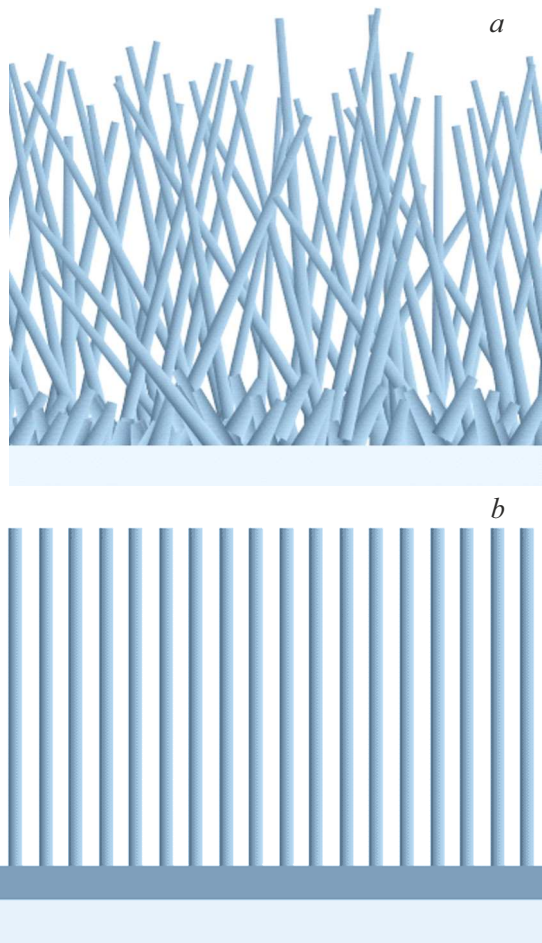


Рис. 4. Схематическое представление наноструктурированной пленки ИТО: *a* — наиболее близкое к реальности, *b* — использованное для оценки удельной поверхности.

мы можем оценить количество цилиндров, приходящихся на единичную поверхность подложки, и, посчитав боковую поверхность каждого кристалла, следующим действием найти суммарную поверхность всех боковых кристаллов, приходящихся на единичную поверхность подложки. Эта величина и будет соответствовать приросту поверхности материала, полученному в результате структурирования.

Расчет, выполненный на основе вышеприведенных соображений, показывает, что для пленки толщиной 700 нм поверхность увеличивается в 22.3 раза, а для пленки 160 нм — в 5 раз (толщина зародышевого слоя для данных пленок была взята 50 и 25 нм соответственно).

Отметим, что в использованной оценке мы занижаем полученную величину, пренебрегая тем фактом, что зародышевый слой реальной пленки не является плоским, как мы его описываем в нашей модели (см. рис. 1). Более того, как мы видим из рис. 2, нитевидные кристаллы в реальности имеют не плоские, а конусообразные окончания. Если упрощенно считать, что поверхность зародышевого слоя состоит из полусфер зерен, а ни-

тевидные кристаллы имеют неплоские окончания, то только эти 2 фактора уже удваивают поверхность по сравнению с гладкой пленкой даже без учета боковой поверхности цилиндров.

Другой особенностью нанесения тонких слоев Al_2O_3 на поверхности наноструктурированных пленок ИТО оказалась зависимость характера нанесения защитного покрытия от температуры процесса. В работе [21] было отмечено, что проведение процесса АСО при температуре 300°C сопряжено с увеличением интегрального поглощения в пленке после нанесения защиты на структурированные пленки ИТО. Уменьшение температуры процесса до 175°C уменьшает поглощение в покрытии до значений, наблюдаемых в пленке без защиты. При этом, согласно РЭМ-диагностике, все нити структурированного проводящего покрытия оказываются покрыты слоем Al_2O_3 так же, как и при температуре процесса 300°C . В нашем предположении повышенные температуры процесса могут ускорять диффузию атомов кислорода из нитей защитного покрытия в пленку изолятора при ее росте. Известно, что обеднение по кислороду материала ИТО приводит к дополнительному поглощению света в нем. С целью исследования свойств покрытия, получаемого при различных температурах нанесения защитного слоя, был проведен процесс при температуре 50°C . Спектры отражения и поглощения полученного покрытия и покрытия, в котором температура процесса АСО составляла 175°C , приведены на рис. 5. Согласно рисунку, оптические характеристики обоих покрытий близки друг к другу, однако можно отметить, что понижение температуры процесса АСО с 175 до 50°C слегка увеличивает отражение от образца во всем диапазоне длин волн, при этом, соответственно, незначительно уменьшается пропускание образца в видимом диапазоне длин волн. Наблюдаемое падение пропускания образца, полученного при температуре процесса АСО 175°C , в

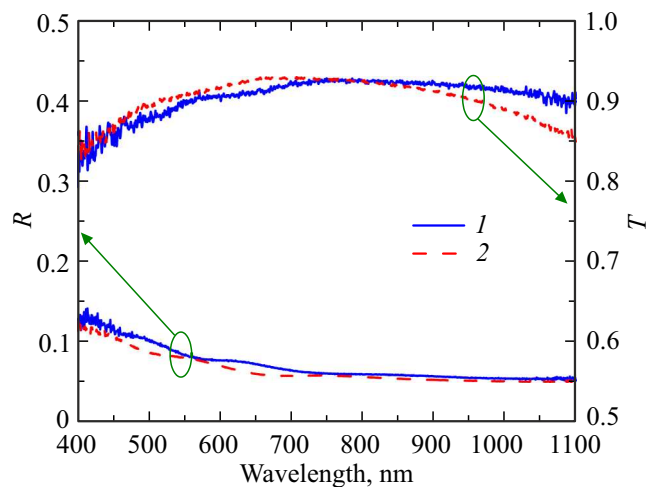


Рис. 5. Спектры пропускания и отражения образцов, полученных при температуре процесса АСО 50°C (кривые 1) и 175°C (кривые 2).

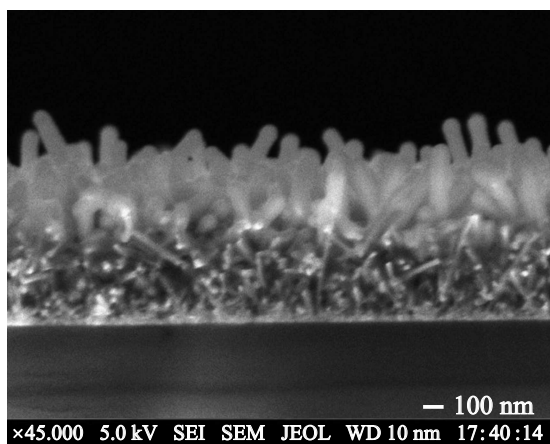


Рис. 6. РЭМ-изображение покрытия, нанесенного при температуре процесса АСО 50°C .

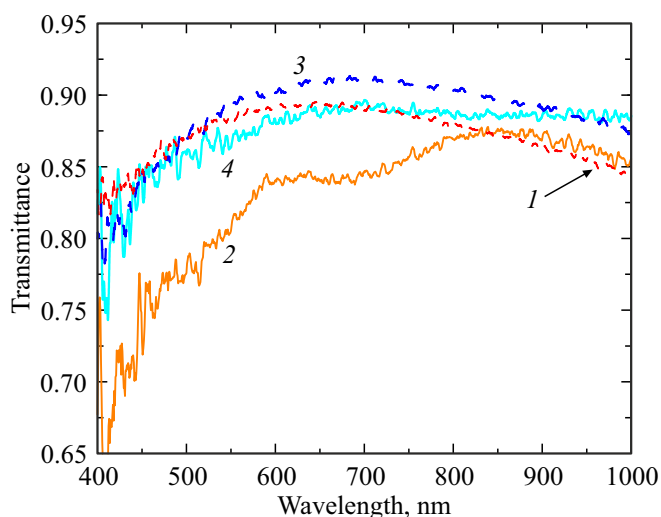


Рис. 7. Спектры пропускания образцов до и после испытания в камере влаги: 1 — образец наноструктурированного ИТО без защитного покрытия до испытаний, 2 — образец наноструктурированного ИТО без защитного покрытия после испытаний, 3 — образец наноструктурированного ИТО с защитным покрытием до испытаний, 4 — образец наноструктурированного ИТО с защитным покрытием после испытаний. (Цветной вариант рисунка представлен в электронной версии статьи).

инфракрасном диапазоне связано, по всей видимости, с дополнительным поглощением, возникающим, как мы обсуждали выше, в нитях ИТО вследствие диффузии кислорода из них в процессе нанесения защитного слоя. Таким образом, несмотря на то что температура процесса АСО 175°C значительно снижает потери света в покрытии по сравнению с температурой 300°C , в ближнем ИК диапазоне их можно пытаться минимизировать.

Однако изучение структуры образца, полученного при температуре процесса АСО 50°C , при помощи растровой электронной микроскопии (рис. 6) показало, что при

этой температуре осаждение слоя Al_2O_3 происходит не по всей длине нанонитей структурированного слоя ИТО. Видимо, это обстоятельство является причиной увеличения отражения от этого покрытия по сравнению с покрытием, полученным при повышенных температурах процесса АСО. Таким образом, неравномерное покрытие нитей приводит к искажению градиента плотности вещества в пленке и, соответственно, эффективного показателя преломления, что снижает просветляющую способность покрытия.

Сам факт нанесения слоя Al_2O_3 лишь на поверхностные участки структурированного покрытия ИТО при температуре 50°C весьма интересен. Так как при температуре процесса 175°C эта особенность отсутствует, возможно предположить, что, несмотря на то что в структурированной пленке ИТО вся поверхность нанонитей кажется открытой для газовой среды реагентов, при такой геометрии поверхности их диффузия в нижних слоях пленки может быть затруднена. Соответственно, повышение температуры способствует ускорению диффузионных процессов и равномерному зарастанию нитей по толщине покрытия.

Для оценки влияния защитного слоя Al_2O_3 на эксплуатационные характеристики наноструктурированных пленок ИТО были изготовлены образцы с покрытием и без него.

После измерения оптических характеристик изготовленных образцов они были размещены в камере влаги СМ 5/100-250 ТВО и подвергнуты следующему воздействию повышенной влажности согласно ГОСТ РВ 20.57.306 (ускоренные испытания для категории О): длительность первой части цикла составляла 12 ч, температура — 55°C , влажность — 93%, длительность второй части цикла также составляла 12 ч, температура — 25°C , влажность — 95%. Всего было проведено 9 циклов.

На рис. 7 приведены спектры пропускания образцов, снятые до и после проведенных испытаний. Согласно полученным данным, пропускающая способность пленок без защитного покрытия Al_2O_3 деградирует значительно сильнее (кривые 1 и 2), чем с защитным покрытием (кривые 3 и 4).

3. Заключение

Таким образом, изучение просветляющего наноструктурированного покрытия ИТО/ Al_2O_3 с помощью просвечивающей электронной микроскопии показало, что методом атомно-слоевого осаждения формируется слой хорошего качества, равномерно обволакивающий нитевидные кристаллы ИТО. Однако толщина получаемого слоя оксида алюминия в несколько раз тоньше, чем планируемая расчетная толщина слоя в эксперименте. При этом модельный эксперимент по осаждению слоя Al_2O_3 на поверхности неструктурированной пленки ИТО показал совпадение нанесенной толщины с расчетной.

Оценка площади поверхности структурированного ИТО, проведенная на основе данных просвечивающей и сканирующей микроскопии, показала, что при структурировании площадь поверхности возрастает более чем в 20 раз по сравнению с площадью гладкой поверхности. Возможно, это является основным фактором, влияющим на скорость роста слоя Al_2O_3 в наноструктурированных пленках ИТО. Оценка площади поверхности для структурированной пленки меньшей толщины показывает меньший прирост площади при структурировании, что согласуется с результатами эксперимента, в котором наблюдается промежуточная скорость роста пленки между гладкой и более толстой.

Изучение структуры образца, полученного при пониженной температуре процесса АСО (50°C), при помощи растровой электронной микроскопии показало, что при этой температуре осаждение слоя Al_2O_3 происходит не по всей длине нанонитей структурированного слоя ИТО, а только на наружных частях нитей, что, вероятно, может быть объяснено ограничением диффузионных процессов при снижении температуры.

Конфликт интересов

Авторы статьи заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Список литературы

- [1] H. Wang, F. Zhang, C. Wang, J. Duan. *Opt. Laser Techn.*, **149**, 107931 (2022).
- [2] N. Cherupurakal, M.S. Mozumder, A.H.I. Mourad, S. Lalwani. *Renew. Sustain. Energy Rev.*, **151**, 111538 (2021).
- [3] H. Sun, J. Liu, C. Zhou, W. Yang, H. Liu, X. Zhang, Z. Li, B. Zhang, W. Jie, Y. Xu. *ACS Appl. Mater. Interfaces*, **13**, 16997 (2021).
- [4] A. Jacobo-Marín, M. Rueda, J.J. Hernández, I. Navarro-Baena, M.A. Monclús, J.M. Molina-Aldareguia, I. Rodríguez. *Sci. Rep.*, **11**, 1 (2021).
- [5] J.W.S. Rayleigh. *Proc. London Math. Soc.*, **11**, 51 (1880).
- [6] J.A. Dobrowolski, D. Poitras, P. Ma, H. Vakil, M. Acree. *Appl. Optics*, **41**, 3075 (2002).
- [7] J.-Y. Cho, K.-J. Byeon, H. Lee. *Optics Lett.*, **36**, 3203 (2011).
- [8] J.K. Kim, A. N. Noemaun, F.W. Mont, D. Meyaard, E.F. Schubert, D.J. Poxson, H. Kim, C. Sone, Y. Park. *Appl. Phys. Lett.*, **93**, 221111 (2008).
- [9] P.G. O'Brien, D.P. Puzzo, A. Chutinan, L.D. Bonifacio, G.A. Ozin, N.P. Kherani. *Adv. Mater.*, **22**, 611 (2010).
- [10] P. G. O'Brien, Y. Yang, A. Chutinan, P. Mahtani, K. Leong, D.P. Puzzo, L.D. Bonifacio, C.W. Lin, G.A. Ozin, N.P. Kherani. *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, **102**, 173 (2012).
- [11] J.K. Kim, S. Chhajed, M.F. Schubert, E.F. Schubert, A.J. Fischer, M.H. Crawford, J. Cho, H. Kim, C. Sone. *Adv. Mater.*, **20**, 801 (2008).
- [12] T. Aytug, A.R. Lupini, G.E. Jellison, P.C. Joshi, I.H. Ivanov, T. Liu, P. Wang, R. Menon, R.M. Trejo, E. Lara-Curzio, S.R. Hunter, J.T. Simpson, M.P. Paranthaman, D.K. Christen. *J. Mater. Chem. C*, **3**, 5440 (2015).
- [13] Л.К. Марков, И.П. Смирнова, М.В. Кукушкин, А.С. Павлюченко. *ФТП*, **6**, 564 (2020).
- [14] M.J. Park, C.U. Kim, S.B. Kang, S.H. Won, J.S. Kwak, C.-M. Kim, K.J. Choi. *Adv. Opt. Mater.*, **5**, 1600684 (2017).
- [15] Z. Gong, Q. Li, Y. Li, H. Xiong, H. Liu, S. Wang, Y. Zhang, M. Guo, F. Yun. *Appl. Phys. Express*, **9**, 082102 (2016).
- [16] Л.К. Марков, А.С. Павлюченко, И.П. Смирнова, С.И. Павлов. *ФТП*, **52**, 1228 (2018).
- [17] Л.К. Марков, А.С. Павлюченко, И.П. Смирнова. *ФТП*, **53**, 181 (2019).
- [18] Z.W. Han, Z. Wang, X.M. Feng, B. Li, Z.Z. Mu, J.Q. Zhang, S.C. Niu, L.Q. Ren. *Biosurface and Biotribology*, **2**, 137 (2016).
- [19] M. Kryuchkov, J. Lehmann, J. Schaab, V. Cherepanov, A. Blagodatski, M. Fiebig, V.L. Katanaev. *J. Nanobiotechnology*, **15**, 61 (2017).
- [20] M. Kryuchkov, O. Bilousov, J. Lehmann, M. Fiebig, V.L. Katanaev. *Nature*, **585**, 383 (2020).
- [21] Л.К. Марков, А.С. Павлюченко, И.П. Смирнова, М.В. Меш, Д.С. Колоколов. *ФТП*, **55**, 365 (2021).
- [22] Л.К. Марков, И.П. Смирнова, А.С. Павлюченко, М.В. Кукушкин, Д.А. Закгейм, С.И. Павлов. *ФТП*, **50**, 1001 (2016).

Редактор А.Н. Смирнов

Study of Deposition of Al_2O_3 Nanolayers by Atomic Layer Deposition on the Structured ITO Films

L.K. Markov¹, A.S. Pavluchenko¹, I.P. Smirnova¹, M.V. Mesh², D.S. Kolokolov², A.P. Pushkarev³

¹ Ioffe Institute,
194021 St. Petersburg, Russia
² Koltsov's Design Bureau,
198097 St. Petersburg, Russia
³ ITMO University,
197101 St. Petersburg, Russia

Abstract The antireflective nanostructured ITO/ Al_2O_3 coatings that have a gradient of the effective refractive index in the direction perpendicular to the substrate plane have been studied. The coatings were obtained by the atomic layer deposition of aluminum oxide on the structured ITO films. The transmission electron microscopy showed that the deposited nanosized aluminum oxide layer was of good quality and uniformly covered the ITO whiskers. As shown in experiments, the thickness of the resulting Al_2O_3 layer is affected by the thickness and, hence, by the degree of surface roughness of the initial ITO film. The resulting thicknesses can be several times lower than that planned in the experiment, based both on calculations of the parameters of the atomic layer deposition process and on direct measurements of the aluminum oxide deposition rate for unstructured ITO films. A possible reason that affects the growth rate of Al_2O_3 layers in nanostructured ITO films is a strong increase in the surface area of the ITO film during its structuring. So, the transmission and scanning microscopy data for a 700-nm-thick structured ITO film have shown that its surface area is more than 20 times greater than that of a smooth film.