

Обзорная статья

УДК 535.211:535.217

DOI: 10.18577/2307-6046-2026-0-10-219-234

ОБЗОР ПРИМЕНЕНИЙ ШИРОКОПОЛОСНОГО ИМПУЛЬСНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ДЛЯ МОДИФИКАЦИИ СВОЙСТВ ПОЛУПРОЗРАЧНЫХ ТОНКОПЛЕНОЧНЫХ ПОКРЫТИЙ

И.А. Сорокин¹, И.В. Мекалина¹

¹Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Национального исследовательского центра «Курчатовский институт», Москва, Россия; admin@viam.ru

Аннотация. Импульсная фотонная обработка (ИФО) – новый метод воздействия на свойства материалов, осуществляемый при помощи высокомоощных вспышек ксеноновых ламп. В научно-технической литературе представлено большое количество исследований по модификации свойств непрозрачных структур, а полупрозрачным тонкопленочным покрытиям уделено меньше внимания. В данной работе рассмотрены применения ИФО для отжига прозрачных проводящих оксидов, управления фазовым и примесным составом диоксида титана и ультрафиолетовой гидрофиллизации фотокатализаторов, а также выделены потенциальные направления будущих исследований.

Ключевые слова: импульсная фотонная обработка, импульсные ксеноновые лампы, широкополосное излучение, ультрафиолет, тонкопленочные покрытия, прозрачные проводящие оксиды, фотокатализаторы

Для цитирования: Сорокин И.А., Мекалина И.В. Обзор применений широкополосного импульсного излучения для модификации свойств полупрозрачных тонкопленочных покрытий // Труды ВИАМ. 2026. № 10 (164). С. 219–234. URL: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2026-0-10-219-234.

Review article

A REVIEW ON BROADBAND PULSED LIGHT APPLICATIONS FOR PROPERTIES MODIFICATION OF SEMITRANSSPARENT THIN-FILM COATINGS

I.A. Sorokin¹, I.V. Mekalina¹

¹Federal State Unitary Enterprise «All-Russian Scientific-Research Institute of Aviation Materials» of National Research Center «Kurchatov Institute», Moscow, Russia; admin@viam.ru

Abstract. Flash lamp annealing (FLA) is a new method for modifying material properties, using highly powered xenon lamp flashes. While the scientific and technical literature presents numerous studies on modifying properties of opaque structures, less attention has been paid to semitransparent thin-film coatings. This work reviews FLA applications for annealing of transparent conductive oxides, control of phase composition and doping of titanium dioxide and ultraviolet hydrophilization of photocatalysts. The areas of possible future research are also highlighted.

Keywords: flash lamp annealing, xenon flash lamps, broadband light, ultraviolet, thin-film coatings, transparent conductive oxides, photocatalysts

For citation: Sorokin I.A., Mekalina I.V. A review on broadband pulsed light applications for properties modification of semitransparent thin-film coatings. *Trudy VIAM*, 2026, no. 10 (164), pp. 219–234. Available at: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2026-0-10-219-234.

Введение

Тонкопленочные покрытия традиционно используются в разнообразных отраслях промышленности: оптике [1], микроэлектронике [2], авиастроении [3], для повышения износостойкости изделий [4, 5] и др. В настоящее время существует ряд перспективных областей, для которых востребованы новые тонкопленочные материалы, а также методы повышения их эксплуатационных характеристик. Данные области включают, например, гибкую [6] и печатную электронику [7], фотовольтаику [8], полупроводниковые изделия [9] и т. д.

Часто после нанесения покрытия (или, например, наночернил) требуется его постобработка для улучшения эксплуатационных характеристик или придания новых свойств. Традиционными методами термической постобработки таких материалов являются отжиг в печи или быстрый термический отжиг при помощи инфракрасных ламп [10]. При необходимости фотохимического воздействия ультрафиолета (отверждение, фотокатализ и др.) обычно используются ртутные лампы низкого [11] или среднего [12] давления, ультрафиолетовые (УФ) светодиоды [13] или лампы Вуда [14].

Модификация широкополосным импульсным излучением или импульсная фотонная обработка (ИФО) – сравнительно новый метод постобработки материалов. Как правило, она осуществляется при помощи импульсных ксеноновых ламп, а продолжительность воздействия варьируется от десятков микросекунд до сотен миллисекунд. Характер модификации свойств материалов при этом может быть как термическим, так и фотохимическим. Данная технология не только позволяет достичь высокой энергоэффективности по сравнению с традиционными методами, упомянутыми ранее, но и открывает ряд новых возможностей, обусловленных неравновесностью импульсного воздействия [10]. Одно из таких применений – обработка широкого ассортимента тонкопленочных материалов и покрытий, в частности, на чувствительных полимерных подложках.

Известно большое количество исследований, направленных на модификацию разнообразных непрозрачных материалов при помощи ИФО: кристаллизация аморфного кремния [9], гиперлегирование германия [15] и кремния [16], спекание металлических наночернил [17], изготовление перовскитных солнечных элементов [18] и др. При этом гораздо меньшее внимание уделено полупрозрачным тонкопленочным покрытиям, имеющим большую значимость для промышленности и науки. Цель данной работы – выявление ряда существующих областей применения ИФО таких материалов и определение потенциальных направлений дальнейших исследований.

Работа выполнена в рамках реализации комплексного научного направления 15. «Наноструктурированные, аморфные материалы и покрытия» («Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года») [19].

Импульсные ксеноновые лампы

Для проведения ИФО в основном используют импульсные ксеноновые лампы (ИКЛ), которые в общем случае представляют собой отпаянные колбы с выведенными электродами, заполненные спектрально чистым ксеноном, обеспечивающим максимальную эффективность преобразования электрической энергии в излучение в широком диапазоне длин волн, а также наибольшую долговечность. Начальное давление ксенона составляет 300–600 торр (обычно 400 торр) [20]. Следует отметить, что иногда импульсные лампы заполняют криптоном, однако такой вариант получил широкое распространение для накачки лазеров. Колбы выполняют из кварцевого стекла, состав

которого влияет на пропускание УФ-части спектра (наличие или отсутствие коротковолновой компоненты). Конструктивно ИКЛ делятся на два типа [20]:

– трубчатые – расширение плазмы ограничивается стенками колбы, форма лампы может быть прямая цилиндрическая, спиральная, U-образная, кольцевая, коаксиальная и др.;

– шаровые – для данного типа характерным является малый объем области разряда и стабилизация дуги электродами, а не стенкой; колбы необязательно имеют форму шара.

Для задач ИФО применение нашли трубчатые ИКЛ [10]. Схематичный вид цилиндрического варианта исполнения представлен на рис. 1.

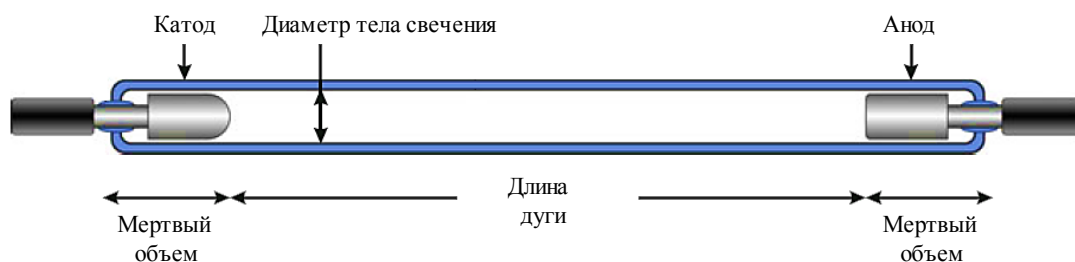


Рис. 1. Характерный вид трубчатой импульсной ксеноновой лампы [10]

В ИКЛ реализуется сильноточный импульсный дуговой разряд, позволяющий получать высокоинтенсивные вспышки излучения со сплошным спектром в диапазоне длин волн от 200 до 1100 нм, близким к абсолютно черному телу, с наложенными на него линиями. Характерный вид спектра излучения ИКЛ приведен на рис. 2.

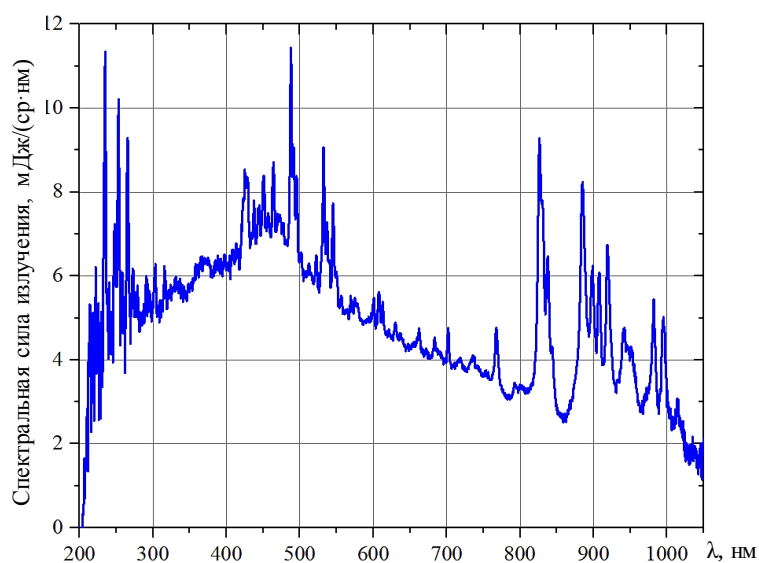


Рис. 2. Характерный спектр импульсной ксеноновой лампы

Следует отметить, что в действительности внешний вид спектра может значительно меняться в зависимости от фактора нагрузки – комбинации энергии, запасаемой в питающей конденсаторной батарее; характерной продолжительности импульса и параметров геометрии лампы. Это дает возможность оптимизировать форму спектра под конкретную задачу, что, в частности, может выражаться во вкладе УФ-компоненты в состав импульса. Характерный коэффициент полезного действия преобразования электрической энергии в излучение во всем диапазоне для ИКЛ составляет порядка 50–60 % [20].

Особенности модификации широкополосным импульсным излучением

Фотохимическое действие ИФО обусловлено протеканием реакций под действием излучения, создаваемого ИКЛ (главным образом УФ-части спектра), а также его комбинации с нагревом. Термическое воздействие ИФО имеет ряд особенностей, выделяющих ее на фоне других методов тепловой постобработки, в связи с чем рассмотрим данный механизм подробнее.

Исторически возникла необходимость в ускорении и повышении энергоэффективности термической обработки материалов (особенно в электронной промышленности) по сравнению с традиционным отжигом в печи [21]. Это привело к возникновению трех технологий, в которых используется излучение, – быстрый термический отжиг, импульсный фотонный отжиг и лазерный отжиг. Их схематичное изображение, а также характер влияния на распределение температуры по толщине обрабатываемого изделия представлены на рис. 3.

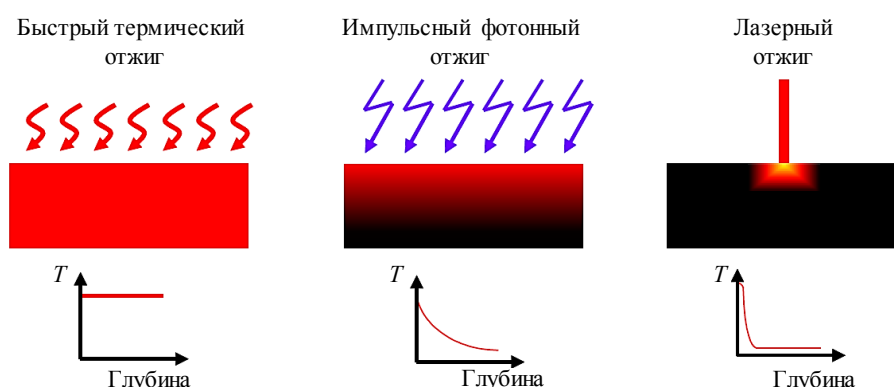


Рис. 3. Схемы термической обработки при помощи излучения [21]

Для каждой из этих технологий характерны свои особенности, определяющие границы их применимости. Их краткое сравнение представлено в таблице.

Характеристика технологий отжига излучением [10]

Параметр	Значения параметров для отжига		
	быстрого термического	импульсного фотонного	лазерного
Продолжительность процесса	1–100 с	10 мкс–100 мс	1–1000 нс
Температура задней стенки	$T_{BS} \approx T_{FS}$	$T_{BS} < T_{FS}$	$T_{BS} \ll T_{FS}$
Скорость нагрева, К/с	$10\text{--}10^3$	$10^4\text{--}10^7$	$>10^8$
Источник излучения	Инфракрасная лампа	Импульсная ксеноновая лампа	Импульсный лазер
Спектр излучения	Сплошной с максимумом в инфракрасной области	Сплошной с максимумом в синей или ультрафиолетовой области	Дискретные линии
Совместимость с рулонным процессом	Средняя (низкая скорость нагрева)	Высокая (большое поле облучения и высокая скорость нагрева)	Низкая (необходима организация сканирования)
Примечание. T_{BS} и T_{FS} обозначают температуры задней и передней стенок соответственно.			

Таким образом, ИФО оказывает неравновесное тепловое воздействие, при котором интенсивному нагреву подвергается лишь тонкий поверхностный слой, поглощающий излучение. При этом подложка, на которую он нанесен, остается сравнительно холодной. Особенно актуальным данное обстоятельство оказывается для деталей гибкой и печатной электроники, гибких сенсоров и других областей, в которых используются полимерные подложки, чувствительные к перегреву. Кроме того, ИФО обеспечивает высокую скорость нагрева и энергетическую эффективность [22], а также простую совместимость с рулонными и конвейерными процессами. Данные преимущества обуславливают высокий потенциал технологии для промышленного применения.

Отжиг прозрачных проводящих оксидов

Тонкие пленки прозрачных проводящих оксидов вызывают значительный интерес в связи с их высоким пропусканием видимого излучения, сочетаемого со сравнительно низким электрическим сопротивлением. К данным материалам часто относят: оксид олова (SnO_2); оксид индия, легированный оловом (ITO); оксид цинка, легированный алюминием (AZO); оксид олова, легированный фтором (FTO), и др. Наибольшее распространение получил ITO, а AZO в настоящее время рассматривается как его более дешевый и экологичный аналог. Прозрачные проводящие оксиды широко используются в качестве прозрачных электродов и нагревателей, в производстве солнечных панелей, плоскопанельных дисплеев и электрохромных устройств.

Магнетронное распыление позволяет наносить покрытия высокого качества с контролируемыми параметрами [23], в том числе традиционно используется для получения тонких пленок прозрачных проводящих оксидов [24]. Однако в данном случае они оказываются преимущественно аморфными, что, во-первых, ограничивает подвижность носителей из-за дефектной структуры, а, во-вторых, в случае легированных материалов приводит к неактивности примесных доноров (следовательно, ограничивает концентрацию носителей) [25]. Оба этих обстоятельства сказываются на предельно достижимой проводимости, кроме того, лимитируется и оптическая прозрачность. В связи с этим при нанесении покрытий необходим нагрев подложек или термическая постобработка. Импульсная фотонная обработка позволяет проводить такую постобработку для покрытий, полученных при комнатной температуре на чувствительных (например, полимерных) подложках или же увеличить энергоэффективность процессов в других случаях.

В работе [26] показана принципиальная возможность осуществления импульсной фотонной обработки ITO, нанесенного магнетронным распылением на стеклянные подложки. При этом за характерную продолжительность импульса 400 мкс удалось достичь свойств на уровне стандартного отжига в печи при температуре 250 °C в течение 1 ч. Тот же коллектив в работе [27] осуществил ИФО пленок, нанесенных на полиимид. При этом реализована схема электропитания, позволившая поддерживать напряжение разряда в ИКЛ практически постоянным. Исследовано влияние продолжительности импульса (суммарной плотности энергии) на результаты ИФО. На рис. 4 показано монотонное уменьшение сопротивления ITO вплоть до определенного значения длительности импульса, а также сопутствующие концентрация и подвижность носителей заряда.

Видно, что с порогового значения длительности импульса происходит резкое снижение подвижности носителей. Авторы работы [27] объясняют это следующим образом: избыточный нагрев приводит к образованию микротрещин, являющихся следствием различия температурных коэффициентов линейного расширения ITO и полимерной подложки. Данный вывод подтверждается при помощи сканирующей электронной микроскопии – характерный вид трещин представлен на рис. 5. Следует отметить, что аналогичные дефекты обнаружены и при превышении температуры при отжиге в печи.

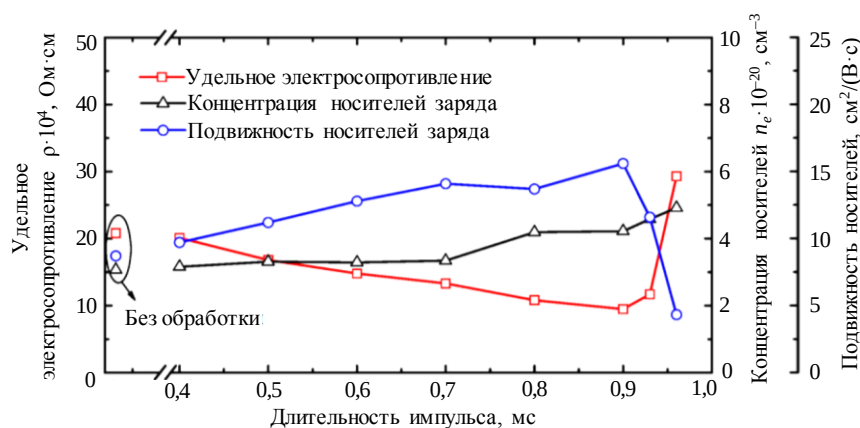


Рис. 4. Зависимость электрических параметров ИТО от длительности импульса при импульсной фотонной обработке [27]

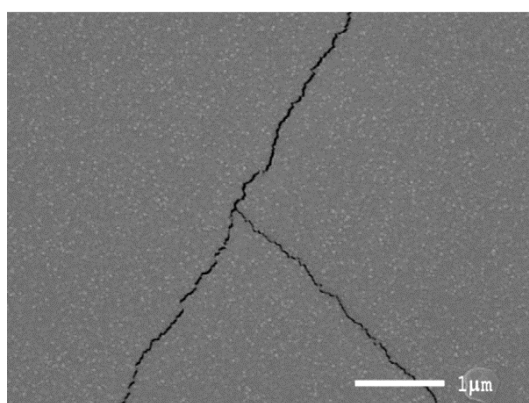


Рис. 5. Характерный вид микротрещин в ИТО при избыточном энерговкладе [27]

Описанные работы главным образом сконцентрированы на параметрах ИФО, однако влияние изначальных условий нанесения не рассматривается. Кроме того, в работе [27] подложка не являлась чисто полимерной – полиимид предварительно наносился на стекло. В работах [26, 27] представлены модели расчета профилей температуры в процессе отжига. Однако подробно они не описываются и не учитывают возможные временные изменения оптических характеристик покрытия. В других немногочисленных работах по ИФО [28–30] также получают ИТО на стеклянных подложках и абстрагируются от условий их нанесения.

В исследовании [31] авторы проводят нанесение пленок ИТО при помощи магнетронного распыления как в ходе реактивного процесса с металлической мишенью, так и из керамической мишени на стеклянные подложки. Особое внимание уделяется влиянию потока кислорода при нанесении на предварительные свойства покрытия и на его характеристики после отжига (в печи или ИФО). На рис. 6 представлены полученные авторами зависимости для пропускания на длине волны $\lambda = 550$ нм и удельного сопротивления пленок ИТО сразу после нанесения, а также после термической обработки в случае керамической мишени.

Видно, что ИФО позволяет достичь даже более высокого уровня характеристик при правильном подборе параметров, чем отжиг в печи. При этом в последнем случае максимум пропускания и минимум сопротивления получены при различных потоках кислорода, в связи с чем необходим баланс, чего не наблюдается при ИФО. Данные зависимости также показали, что наиболее существенное улучшение характеристик

наблюдается при малых потоках кислорода. Кроме того, отмечено, что доля кислорода, при которой достигаются предельные свойства ($\sim 0,05$), смещена левее от ее оптимального значения без постобработки ($> 0,075$). С точки зрения сопротивления для объяснения данного явления авторы приводят результаты измерений концентрации носителей и их подвижности, представленные на рис. 7.

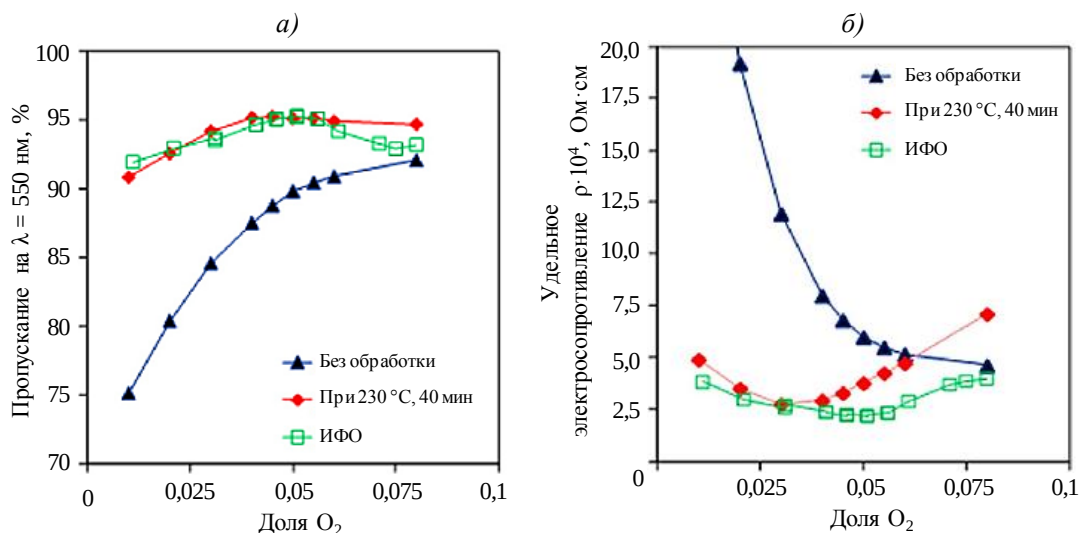


Рис. 6. Свойства пленок ИТО в зависимости от потока кислорода при различных условиях постобработки [31]

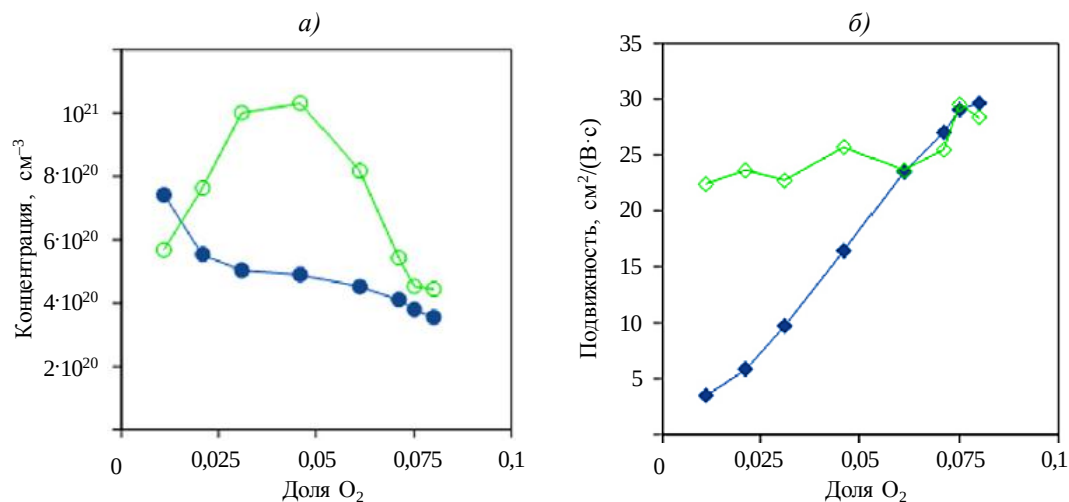


Рис. 7. Концентрация (а) и подвижность (б) носителей без обработки (●, ◆) и после ИФО (○, ◇) для пленок ИТО [31]

Видно, что вблизи оптимального значения доли кислорода ($\sim 0,05$) наблюдается значительное возрастание концентрации носителей, которое авторы объясняют упомянутой ранее активацией примесей Sn⁴⁺ в результате кристаллизации пленки. При малых потоках кислорода возрастание оказывается незначительным или даже отрицательным. Это объясняется избыточным количеством кислородных вакансий, снижающих эффективность активации даже после кристаллизации. Снижение концентрации при высоких потоках кислорода авторы связывают как с дальнейшей оксидацией вакансий, так и с образованием комплексов междоузельного кислорода и замещающего олова [24].

Подвижность же носителей значительно возростала при долях кислорода вплоть до оптимальной, после которой ИФО практически не оказывала влияния. Авторы указывают, что высокое значение подвижности, наблюдаемое в аморфной пленке при больших значениях потока кислорода, может быть связано с прямым перекрытием *s*-орбиталей соседних атомов металлов, на которое, как считается, не влияет структура покрытия [31]. Возможно, что формирование комплексов Sn–O повлияло на возникновение такого механизма проводимости. Следует отметить, что в данном исследовании не раскрываются режимы ИФО, за исключением характерной продолжительности импульса, составлявшей 1 мс.

Аналогичные работы, сфокусированные на параметрах ИФО, проведены в отношении AZO, нанесенного на стекло [32, 33], а также на полиэтилентерефталат [34].

Таким образом, в научно-технической литературе наблюдается недостаток комплексных исследований по изучению совместного влияния условий нанесения и режимов ИФО на конечные характеристики прозрачного проводящего оксида. Кроме того, среди рассмотренных работ только в статье [34] проведена обработка пленки на гибкой полимерной подложке. Не представлены также подробно описанные расчетные модели процесса нагрева полупрозрачного покрытия, полностью учитывающие спектральные и временные характеристики задачи.

Управление фазовым и примесным составом диоксида титана

Фотокатализаторы широко используются для производства самоочищающихся поверхностей, очистки воды и воздуха, при производстве водорода, в солнечной энергетике и т. д. [35]. Наиболее распространенным веществом данного класса является диоксид титана (TiO_2), финальными электрическими и оптическими свойствами которого можно управлять посредством изменения фазового состава или легирования. Диоксид титана имеет три стандартные фазы, характеризующиеся разной шириной запрещенной зоны и равновесными температурами образования [10, 35]:

- анатаз – ширина запрещенной зоны 3,2 эВ, стабилен до 400–500 °С;
- рутил – ширина запрещенной зоны 3,0 эВ, необратимый переход к нему с образованием смешанной фазы начинается при температуре >450 °С, а преобладает он после 700 °С;
- бурсит – ширина запрещенной зоны 3,3 эВ, наименее распространен.

При температуре <300 °С диоксид TiO_2 обычно оказывается аморфным [11]. Однако следует отметить, что на указанные температурные промежутки могут влиять различные факторы, в частности и условия нанесения.

Несмотря на то что рутил имеет более узкую ширину запрещенной зоны (что позволяет поглощать более широкий спектр излучения), анатаз демонстрирует более высокую фотокаталитическую активность. Это связано с увеличенным временем жизни образующихся под воздействием излучения носителей заряда, что обусловлено прямыми межзонными переходами [35].

Таким образом, для максимальной фотокаталитической активности необходимо одновременно стабилизировать фазу анатаза, а также сузить запрещенную зону. Вторая цель часто достигается путем легирования – например, азотом или хромом.

В исследовании [35] показано, что ИФО позволяет не только кристаллизовать тонкую пленку диоксида титана, полученную при комнатной температуре с помощью магнетронного распыления, но и стабилизировать анатаз вплоть до температуры 1200 °С на поверхности пленки (по результатам расчета). Это в свою очередь позволило получить более крупные кристаллы и уменьшить концентрацию дефектов, что, по мнению авторов, указывает на рост фотокаталитической активности. Обработку

производили в среде кислорода с характерной продолжительностью импульса, равной 20 мс, и плотностью энергии, варьируемой в диапазоне 60–110 Дж/см².

Ранее широко исследовалось легирование диоксида титана азотом, однако в данном случае возникают проблемы, связанные с ограниченностью его растворимости. В частности, анионы азота склонны занимать междоузельные положения, в результате чего образуются центры рекомбинации носителей. В связи с этим в настоящее время актуальны исследования по легированию диоксида титана катионами металлов – например, хрома или же совместным Cr–N-легированием [36]. Хром, напротив, имеет высокую растворимость в TiO₂, однако вносит значительные искажения в кристаллическую решетку матрицы, которые можно исправить в результате термической постобработки. В связи с этим главные задачи – стабилизация анатаза, а также подавление диффузии Cr. В работе [37] исследователям при помощи ИФО с длительностью 20 мс и плотностью энергии до 65 Дж/см² удалось достичь этих целей и улучшить кристалличность анатаза для концентраций хрома вплоть до 6 %.

Таким образом, ИФО позволяет управлять фазовым составом тонких пленок диоксида титана и улучшать качество легирования. Это в свою очередь позволяет усилить фотокаталитические свойства данного материала с высокой энергетической эффективностью и скоростью, присущей ИФО.

Ультрафиолетовая гидрофиллизация

Гидрофильные покрытия нашли применение для самоочищающихся и антизапотевающих поверхностей – например, для увеличения эффективности и продолжительности работы без обслуживания различных уличных сенсоров и солнечных панелей. В качестве таких покрытий рассматриваются в том числе оксиды переходных металлов.

Исследования показывают, что упомянутые ранее аморфные тонкие пленки TiO₂ демонстрируют слабые гидрофильные свойства – их краевой угол смачивания (КУС) водой составляет ~70 градусов, однако отжиг с получением анатаза приводит к его снижению вплоть до ~40 градусов [38]. Установлено также, что облучение таких пленок УФ-излучением позволяет не только очистить их поверхность, но и усилить гидрофильность вследствие фотокатализа. В работе [14] облучение ультратонких (15 нм) пленок диоксида титана, полученных магнетронным распылением, проводилось при помощи УФА-лампы Вуда с плотностью мощности 1,2 мВт/см² и центральной длиной волны 365 нм (энергия фотона составляет 3,4 эВ). Исследованию подвергались покрытия, нанесенные при различных температурах (рис. 8).

Видно, что общая тенденция состоит в том, что рост температуры нанесения уменьшает как начальное значение КУС, так и его минимальное значение после УФА-облучения. Авторы связывают это с образованием более фотокаталитически активной фазы анатаза, что согласуется с изложенной ранее информацией.

Механизм УФ-гидрофиллизации состоит в следующем: поглощение высокоэнергетичного фотона приводит к образованию электронно-дырочных пар, которые затем участвуют в окислительно-восстановительных реакциях с адсорбированными веществами, в результате чего образуются высокоактивные радикалы. Эти радикалы затем запускают цепочку реакций, приводящую к полному разрушению органических загрязнений. Помимо этого, образуемые электроны восстанавливают катионы Ti⁴⁺ до Ti³⁺, а дырки окисляют анионы кислорода вблизи поверхности, в результате чего образуются кислородные вакансии. Считается, что данные дефекты могут взаимодействовать с водой в атмосфере, образуя ОН-группы, что приводит к росту гидрофильности поверхности вплоть до достижения КУС, близкого к 0 градусов (супергидрофильность) [14]. Описанный механизм схематично показан на рис. 9.

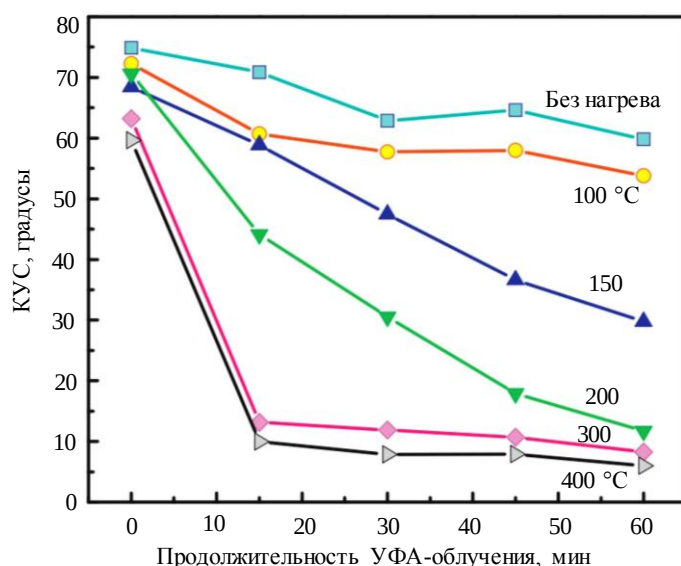


Рис. 8. Краевой угол смачивания (КУС) тонких пленок TiO_2 в зависимости от времени УФ-облучения при различных температурах нанесения [14]

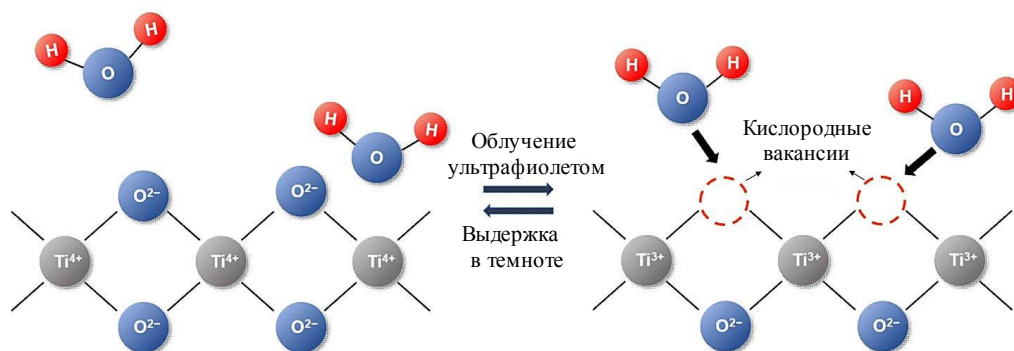


Рис. 9. Структура поверхности TiO_2 до и после УФ-облучения [11]

При этом отмечается, что данный эффект является обратимым при длительной выдержке в темноте, а продолжительность обратного перехода существенно зависит от окружающих условий, но обычно составляет несколько дней [39]. Следует отметить, что исследователи получали схожие результаты и при облучении УФС-излучением при помощи ртутных ламп низкого давления [11, 40].

Схожие исследования проведены для другого известного фотокатализатора – оксида цинка (ZnO). В работах [40] и [41] удалось достичь КУС порядка 5 градусов при облучении УФС- и УФА-лампами соответственно. Однако в первом случае покрытие было изготовлено спрей-пиролизом и изначально демонстрировало гидрофобные свойства, а во втором – при помощи золь-гель процесса и являлось гидрофильным.

В настоящее время в открытой научно-технической литературе авторами данной статьи не найдены исследования по УФ-гидрофиллизации фотокатализаторов при помощи ИФО. Более того, в случае диоксида титана не исключено, что при правильном подборе спектра ИКЛ удастся совместить процессы перевода структуры в форму анатаза и гидрофиллизации, что позволит значительно ускорить описанные операции.

Заключения

При проведении обзора рассмотрены основные особенности и применения широкополосного импульсного излучения для осуществления модификации полупрозрачных тонкопленочных покрытий. Отмечены также возможные направления дальнейших исследований в данной области.

Импульсная фотонная обработка осуществляется при помощи ксеноновых ламп, формирующих высокомошные вспышки излучения со спектром в диапазоне длин волн от 200 до 1100 нм. Данный метод постобработки позволяет оказывать как фотохимическое, так и неравновесное термическое воздействие в миллисекундном масштабе. Это позволяет достигать особых свойств материалов, а также проводить обработку на чувствительных подложках – например, полимерных.

Импульсная фотонная обработка может быть использована для отжига прозрачных проводящих оксидов, таких как ИТО и AZO, полученных нанесением при комнатной температуре, за счет их кристаллизации. В известной научно-технической литературе наблюдается недостаток комплексных исследований совместного влияния как условий нанесения, так и параметров ИФО на конечные свойства пленок, а также подробно описанных расчетных моделей. Кроме того, почти отсутствуют работы, проведенные с гибкими полимерными подложками.

Управление фазовым и примесным составом диоксида титана – также одно из актуальных применений широкополосного излучения. За счет своего быстрого действия ИФО позволяет не допустить необратимого перехода от анатаза к рутилу в процессе отжига. Кроме того, оказывается возможным улучшить качество легирования TiO_2 . Все это позволяет повысить его фотокаталитическую активность.

Ультрафиолетовое излучение супергидрофилизует поверхность фотокатализаторов – например, диоксида титана и оксида цинка. В существующих научно-технических работах облучение проводится при помощи ртутных ламп и ламп Вуда, а ИФО не используется. Применение импульсного излучения не только ускорит накопление необходимой УФ-дозы, но и гипотетически может позволить объединить процессы перевода диоксида титана в фазу анатаза и его гидрофилизации.

Список источников

1. Raut H.K., Ganesh V.A., Nair A.S., Ramakrishna S. Anti-reflective coatings: A critical, in-depth review // *Energy & Environmental Science*. 2011. Vol. 4. No. 10. P. 3779–3804. DOI: 10.1039/c1ee01297e.
2. Schmitz J. Low temperature thin films for next-generation microelectronics // *Surface and coatings technology*. 2018. Vol. 343. P. 83–88. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2017.11.013.
3. Тюньков А.В., Андронов А.А., Золотухин Д.Б. и др. Методы формирования теплозащитных покрытий лопаток турбин (обзор) // *Авиационные материалы и технологии*. 2024. № 4 (77). С. 140–168. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 03.03.2026). DOI: 10.18577/2713-0193-2024-0-4-140-168.
4. Будиновский С.А., Ляпин А.А., Горлов Д.С., Бенклян А.С., Татарников С.В. Нанесение многослойного антифреттингового покрытия на крупногабаритные изделия // *Авиационные материалы и технологии*. 2022. № 3 (68). С. 98–107. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 03.03.2026). DOI: 10.18577/2713-0193-2022-0-3-98-107.
5. Будиновский С.А., Горлов Д.С., Бенклян А.С. Нанесение защитных ионно-плазменных покрытий на крупногабаритные детали на установках типа МАП // *Авиационные материалы и технологии*. 2024. № 1 (74). С. 101–110. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 03.03.2026). DOI: 10.18577/2713-0193-2024-0-1-101-110.

6. Liu H., Wang L., Lin G., Feng Y. Recent progress in the fabrication of flexible materials for wearable sensors // *Biomaterials Science*. 2022. Vol. 10. No. 3. P. 614–632. DOI: 10.1039/D1BM01136G.
7. Kamysnyy A., Magdassi S. Conductive nanomaterials for printed electronics // *Small: Wiley Journal*. 2014. Vol. 10. No. 17. P. 3515–3535. DOI: 10.1002/sml.201303000.
8. Green M.A., Ho-Baillie A., Snaith H.J. The emergence of perovskite solar cells // *Nature photonics*. 2014. Vol. 8. No. 7. P. 506–514. DOI: 10.1038/nphoton.2014.134.
9. Henke T., Bartha J.W., Rebohle L. et al. Formation of regularly arranged large grain silicon islands by using embedded micro mirrors in the flash crystallization of amorphous silicon // *Journal of Applied Physics*. 2014. Vol. 115. No. 3. DOI: 10.1063/1.4861398.
10. Rebohle L., Prucnal S., Reichel D. Flash Lamp Annealing. From Basics to Applications. Cham: Springer Nature Switzerland, 2019. 288 p. DOI: 10.1007/978-3-030-23299-3.
11. Park S., Yoon Y., Lee S. et al. Thermoinduced and photoinduced sustainable hydrophilic surface of sputtered-TiO₂ thin film // *Coatings*. 2021. Vol. 11. No. 11. P. 1360. DOI: 10.3390/coatings11111360.
12. Sanai Y., Kagami S., Kubota K. Cross-linking photopolymerization of monoacrylate initiated by benzophenone // *Journal of Polymer Science Part A: Polymer Chemistry*. 2018. Vol. 56. No. 14. P. 1545–1553. DOI: 10.1002/pola.29038.
13. Li M., Wang Z., Jin Y. et al. Highly efficient visible-blind ultraviolet photodetector based on scapably produced titanium dioxide nanowire arrays // *Nano Letters*. 2023. Vol. 23. No. 13. P. 6059–6066. DOI: 10.1021/acs.nanolett.3c01383.
14. Horprathum M., Eiamchai P., Limnonthakul P. et al. Structural, optical and hydrophilic properties of nanocrystalline TiO₂ ultra-thin films prepared by pulsed dc reactive magnetron sputtering // *Journal of alloys and compounds*. 2011. Vol. 509. No. 13. P. 4520–4524. DOI: 10.1016/j.jallcom.2011.01.038.
15. Heera V., Mücklich A., Posselt M. et al. Heavily Ga-doped germanium layers produced by ion implantation and flash lamp annealing: Structure and electrical activation // *Journal of Applied Physics*. 2010. Vol. 107. No. 5. DOI: 10.1063/1.3309835.
16. Skorupa W., Yankov R.A., Anwand W. et al. Ultra-shallow junctions produced by plasma doping and flash lamp annealing // *Materials Science and Engineering: B*. 2004. Vol. 114. P. 358–361. DOI: 10.1016/j.mseb.2004.07.063.
17. Kim H.S., Dhage S.R., Shim D.E., Hahn H.T. Intense pulsed light sintering of copper nanoink for printed electronics // *Applied Physics A*. 2009. Vol. 97. P. 791–798. DOI: 10.1007/s00339-009-5360-6.
18. Lavery B.W., Kumari S., Konermann H. et al. Intense pulsed light sintering of CH₃NH₃PbI₃ solar cells // *ACS applied materials & interfaces*. 2016. Vol. 8. No. 13. P. 8419–8426. DOI: 10.1021/acsami.5b10166.
19. Каблов Е.Н. Инновационные разработки ФГУП «ВИАМ» ГНЦ РФ по реализации «Стратегических направлений развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года» // *Авиационные материалы и технологии*. 2015. № 1 (34). С. 3–33. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-33.
20. Камруков А.С., Кулебякина А.И. Импульсные ксеноновые лампы. Техника, эксперимент, расчет: учеб. пособие. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2011. 85 с.
21. Skorupa W., Schumann T., Rebohle L. Millisecond thermal processing using flash lamps for the advancement of thin layers and functional coatings // *Surface and Coatings Technology*. 2017. Vol. 314. P. 169–176. DOI: 10.14332/svc16.proc.0064.
22. Zhestkij N.A., Povarov S.A., Volodin L. et al. One-step flashlight processing of MOF thin films for non-linear light absorption // *Materials Chemistry Frontiers*. 2025. Vol. 9. No. 9. P. 1355–1363. DOI: 10.1039/D5QM00166H.
23. Будиновский С.А., Доронин О.Н., Косьмин А.А., Бенклян А.С. Влияние состояния мишени системы Zr–Y–PЗМ на скорость ее распыления при нанесении керамического слоя ТЗП с помощью установки УОКС-3 // *Авиационные материалы и технологии*. 2021. № 2 (63). С. 85–92. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 01.08.2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-2-85-92.

24. Facchetti A., Marks T. Transparent electronics: from synthesis to applications. N.-Y.: John Wiley & Sons, 2010. 452 p. DOI: 10.1002/9780470710609.
25. Guillén C., Herrero J. Structure, optical, and electrical properties of indium tin oxide thin films prepared by sputtering at room temperature and annealed in air or nitrogen // *Journal of Applied Physics*. 2007. Vol. 101. No. 7. DOI: 10.1063/1.2715539.
26. Kim Y., Park S., Kim S. et al. Xe-arc flash annealing of indium tin oxide thin-films prepared on glass backplanes // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2015. Vol. 91. P. 543–551. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2015.07.132.
27. Kim Y., Park S., Kim S. et al. Flash lamp annealing of indium tin oxide thin-films deposited on polyimide backplanes // *Thin Solid Films*. 2017. Vol. 628. P. 88–95. DOI: 10.1016/j.tsf.2017.03.016.
28. Weller S., Junghänel M. Flash Lamp Annealing of ITO thin films on ultra-thin glass // *Vakuum in Forschung und Praxis*. 2015. Vol. 27. No. 4. DOI: 10.1002/vipr.201500586.
29. Neitzke E., Fan Q.H. Study of flashlamp annealing to promote crystallization of indium tin oxide thin films // *Journal of Applied Physics*. 2023. Vol. 134. No. 23. DOI: 10.1063/5.0177627.
30. Plumley J.B., Cook A.W., Larsen C.A. et al. Crystallization of electrically conductive visibly transparent ITO thin films by wavelength-range-specific pulsed Xe arc lamp annealing // *Journal of Materials Science*. 2018. Vol. 53. No. 18. P. 12949–12960. DOI: 10.1007/s10853-018-2534-7.
31. David C., Tinkham B.P., Prunici P., Panckow A. Highly conductive and transparent ITO films deposited at low temperatures by pulsed DC magnetron sputtering from ceramic and metallic rotary targets // *Surface and Coatings Technology*. 2017. Vol. 314. P. 113–117. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2016.09.022.
32. Panckow A.N., David C., Weber J. Flash Lamp Annealing (FLA) of Magnetron Sputtered Low-Temperature TCO Coatings: Post-growth treatment enhances highly conductive and transparent thin films // *Vakuum in Forschung und Praxis*. 2017. Vol. 29. No. 4. P. 21–25. DOI: 10.1002/vipr.201700652.
33. Gebel T., Neubert M., Endler R. et al. Millisecond-annealing using flash lamps for improved performance of AZO layers // *MRS Online Proceedings Library (OPL)*. 2011. Vol. 1287. Art. 1010. DOI: 10.1557/opl.2011.1438.
34. Lee J., Jo C.H., Lee G. et al. Advancing Al-doped ZnO thin films structural, optical and electrical properties of low temperature PET substrates via flash lamp annealing // *Journal of Semiconductors*. 2024. Vol. 45. No. 12. P. 122101. DOI: 10.1088/1674-4926/24070005.
35. Prucnal S., Gago R., Calatayud D.G. et al. TiO₂ Phase Engineering by Millisecond Range Annealing for Highly Efficient Photocatalysis // *The Journal of Physical Chemistry C*. 2023. Vol. 127. No. 26. P. 12686–12694. DOI: 10.1021/acs.jpcc.3c01165.
36. Gago R., Prucnal S., Hübner R. et al. Phase selectivity in Cr and N co-doped TiO₂ films by modulated sputter growth and post-deposition flash-lamp-annealing // *Coatings*. 2019. Vol. 9. No. 7. P. 448.
37. Gago R., Prucnal S., Hubner R. et al. Structural impact of chromium incorporation in as-grown and flash-lamp-annealed sputter deposited titanium oxide films // *Journal of Alloys and Compounds*. 2017. Vol. 729. P. 438–445. DOI: 10.3390/coatings9070448.
38. Ye Q., Liu P.Y., Tang Z.F., Zhai L. Hydrophilic properties of nano-TiO₂ thin films deposited by RF magnetron sputtering // *Vacuum*. 2007. Vol. 81. No. 5. P. 627–631. DOI: 10.1016/j.vacuum.2006.09.001.
39. Hashimoto K., Irie H., Fujishima A. TiO₂ photocatalysis: a historical overview and future prospects // *Japanese journal of applied physics*. 2005. Vol. 44. No. 12R. P. 8269. DOI: 10.1143/jjap.44.8269.
40. Sun R.D., Nakajima A., Fujishima A., Watanabe T., Hashimoto K. Photoinduced surface wettability conversion of ZnO and TiO₂ thin films // *The Journal of Physical Chemistry B*. 2001. Vol. 105. No. 10. P. 1984–1990. DOI: 10.1021/jp002525j.
41. Numpud P., Charinpanitkul T., Tanthapanichakoon W. Photoinduced hydrophilic property of zinc oxide thin films prepared by sol-gel dip coating method // *Journal of the Ceramic Society of Japan*. 2008. Vol. 116. No. 1351. P. 414–417. DOI: 10.2109/jcersj2.116.414.

References

1. Raut H.K., Ganesh V.A., Nair A.S., Ramakrishna S. Anti-reflective coatings: A critical, in-depth review. *Energy & Environmental Science*, 2011, vol. 4, no. 10, pp. 3779–3804. DOI: 10.1039/c1ee01297e.
2. Schmitz J. Low temperature thin films for next-generation microelectronics. *Surface and coatings technology*, 2018, vol. 343, pp. 83–88. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2017.11.013.
3. Tyunkov A.V., Andronov A.A., Zolotukhin D.B. et al. Methods of forming heat-protective coatings of turbine blades (review). *Aviation materials and technologies*, 2024, no. 4 (77), pp. 140–168. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: March 03, 2026). DOI: 10.18577/2713-0193-2024-0-4-140-168.
4. Budinovskiy S.A., Lyapin A.A., Gorlov D.S., Benklyan A.S., Tatarnikov S.V. Multilayer antifretting coating on large-sized manufactures. *Aviation materials and technologies*, 2022, no. 3 (68), pp. 98–107. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: March 03, 2026). DOI: 10.18577/2713-0193-2022-0-3-98-107.
5. Budinovskiy S.A., Gorlov D.S., Benklyan A.S. Deposition of protective ion-plasma coatings on largescale parts on MAP type installations. *Aviation materials and technologies*, 2024, no. 1 (74), pp. 101–110. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: March 03, 2026). DOI: 10.18577/2713-0193-2024-0-1-101-110.
6. Liu H., Wang L., Lin G., Feng Y. Recent progress in the fabrication of flexible materials for wearable sensors. *Biomaterials Science*, 2022, vol. 10, no. 3, pp. 614–632. DOI: 10.1039/D1BM01136G.
7. Kamyshny A., Magdassi S. Conductive nanomaterials for printed electronics. *Small: Wiley Journal*, 2014, vol. 10, no. 17, pp. 3515–3535. DOI: 10.1002/sml.201303000.
8. Green M.A., Ho-Baillie A., Snaith H.J. The emergence of perovskite solar cells. *Nature photonics*, 2014, vol. 8, no. 7, pp. 506–514. DOI: 10.1038/nphoton.2014.134.
9. Henke T., Barthä J.W., Rebohle L. et al. Formation of regularly arranged large grain silicon islands by using embedded micro mirrors in the flash crystallization of amorphous silicon. *Journal of Applied Physics*, 2014, vol. 115, no. 3. DOI: 10.1063/1.4861398.
10. Rebohle L., Prucnal S., Reichel D. *Flash Lamp Annealing. From Basics to Applications*. Cham: Springer Nature Switzerland, 2019, 288 p. DOI: 10.1007/978-3-030-23299-3.
11. Park S., Yoon Y., Lee S. et al. Thermoinduced and photoinduced sustainable hydrophilic surface of sputtered-TiO₂ thin film. *Coatings*, 2021, vol. 11, no. 11, p. 1360. DOI: 10.3390/coatings11111360.
12. Sanai Y., Kagami S., Kubota K. Cross-linking photopolymerization of monoacrylate initiated by benzophenone. *Journal of Polymer Science Part A: Polymer Chemistry*, 2018, vol. 56, no. 14, pp. 1545–1553. DOI: 10.1002/pola.29038.
13. Li M., Wang Z., Jin Y. et al. Highly efficient visible-blind ultraviolet photodetector based on scalably produced titanium dioxide nanowire arrays. *Nano Letters*, 2023, vol. 23, no. 13, pp. 6059–6066. DOI: 10.1021/acs.nanolett.3c01383.
14. Horprathum M., Eiamchai P., Limnonthakul P. et al. Structural, optical and hydrophilic properties of nanocrystalline TiO₂ ultra-thin films prepared by pulsed dc reactive magnetron sputtering. *Journal of alloys and compounds*, 2011, vol. 509, no. 13, pp. 4520–4524. DOI: 10.1016/j.jallcom.2011.01.038.
15. Heera V., Mücklich A., Posselt M. et al. Heavily Ga-doped germanium layers produced by ion implantation and flash lamp annealing: Structure and electrical activation. *Journal of Applied Physics*, 2010, vol. 107, no. 5. DOI: 10.1063/1.3309835.
16. Skorupa W., Yankov R.A., Anwand W. et al. Ultra-shallow junctions produced by plasma doping and flash lamp annealing. *Materials Science and Engineering: B*, 2004, vol. 114, pp. 358–361. DOI: 10.1016/j.mseb.2004.07.063.
17. Kim H.S., Dhage S.R., Shim D.E., Hahn H.T. Intense pulsed light sintering of copper nanoink for printed electronics. *Applied Physics A*, 2009, vol. 97, pp. 791–798. DOI: 10.1007/s00339-009-5360-6.

18. Lavery B.W., Kumari S., Konermann H. et al. Intense pulsed light sintering of $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$ solar cells. *ACS applied materials & interfaces*, 2016, vol. 8, no. 13, pp. 8419–8426. DOI: 10.1021/acsami.5b10166.
19. Kablov E.N. Innovative developments of FSUE «VIAM» SSC of RF on realization of «Strategic directions of the development of materials and technologies of their processing for the period until 2030». *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2015, no. 1 (34), pp. 3–33. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-33.
20. Kamrukov A.S., Kulebyakina A.I. *Pulsed Xenon Lamps: Technology, Experiment, and Calculation*: Study Guide. Moscow: Bauman MSTU Publ., 2011, 85 p.
21. Skorupa W., Schumann T., Rebohle L. Millisecond thermal processing using flash lamps for the advancement of thin layers and functional coatings. *Surface and Coatings Technology*, 2017, vol. 314, pp. 169–176. DOI: 10.14332/svc16.proc.0064.
22. Zhestkij N.A., Povarov S.A., Volodin L. et al. One-step flashlight processing of MOF thin films for non-linear light absorption. *Materials Chemistry Frontiers*, 2025, vol. 9, no. 9, pp. 1355–1363. DOI: 10.1039/D5QM00166H.
23. Budinovskiy S.A., Doronin O.N., Kosmin A.A., Benklyan A.S. Influence of the state of the YSZ target on its sputtering rate during deposition of a TBC ceramic layer by the UOKS-3 unit. *Aviation materials and technologies*, 2021, no. 2 (63), pp. 85–92. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: August 01, 2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-2-85-92.
24. Facchetti A., Marks T. *Transparent electronics: from synthesis to applications*. N.-Y.: John Wiley & Sons, 2010, 452 p. DOI: 10.1002/9780470710609.
25. Guillén C., Herrero J. Structure, optical, and electrical properties of indium tin oxide thin films prepared by sputtering at room temperature and annealed in air or nitrogen. *Journal of Applied Physics*, 2007, vol. 101, no. 7. DOI: 10.1063/1.2715539.
26. Kim Y., Park S., Kim S. et al. Xe-arc flash annealing of indium tin oxide thin-films prepared on glass backplanes. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2015, vol. 91, pp. 543–551. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2015.07.132.
27. Kim Y., Park S., Kim S. et al. Flash lamp annealing of indium tin oxide thin-films deposited on polyimide backplanes. *Thin Solid Films*, 2017, vol. 628, pp. 88–95. DOI: 10.1016/j.tsf.2017.03.016.
28. Weller S., Junghänel M. Flash Lamp Annealing of ITO thin films on ultra-thin glass. *Vakuum in Forschung und Praxis*, 2015, vol. 27, no. 4. DOI: 10.1002/vipr.201500586.
29. Neitzke E., Fan Q.H. Study of flashlamp annealing to promote crystallization of indium tin oxide thin films. *Journal of Applied Physics*, 2023, vol. 134, no. 23. DOI: 10.1063/5.0177627.
30. Plumley J.B., Cook A.W., Larsen C.A. et al. Crystallization of electrically conductive visibly transparent ITO thin films by wavelength-range-specific pulsed Xe arc lamp annealing. *Journal of Materials Science*, 2018, vol. 53, no. 18, pp. 12949–12960. DOI: 10.1007/s10853-018-2534-7.
31. David C., Tinkham B.P., Prunici P., Panckow A. Highly conductive and transparent ITO films deposited at low temperatures by pulsed DC magnetron sputtering from ceramic and metallic rotary targets. *Surface and Coatings Technology*, 2017, vol. 314, pp. 113–117. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2016.09.022.
32. Panckow A.N., David C., Weber J. Flash Lamp Annealing (FLA) of Magnetron Sputtered Low-Temperature TCO Coatings: Post-growth treatment enhances highly conductive and transparent thin films. *Vakuum in Forschung und Praxis*, 2017, vol. 29, no. 4, pp. 21–25. DOI: 10.1002/vipr.201700652.
33. Gebel T., Neubert M., Endler R. et al. Millisecond-annealing using flash lamps for improved performance of AZO layers. *MRS Online Proceedings Library (OPL)*, 2011, vol. 1287, art. 1010. DOI: 10.1557/opl.2011.1438.
34. Lee J., Jo C.H., Lee G. et al. Advancing Al-doped ZnO thin films structural, optical and electrical properties of low temperature PET substrates via flash lamp annealing. *Journal of Semiconductors*, 2024, vol. 45, no. 12, p. 122101. DOI: 10.1088/1674-4926/24070005.

35. Prucnal S., Gago R., Calatayud D.G. et al. TiO₂ Phase Engineering by Millisecond Range Annealing for Highly Efficient Photocatalysis. *The Journal of Physical Chemistry C*, 2023, vol. 127, no. 26, pp. 12686–12694. DOI: 10.1021/acs.jpcc.3c01165.
36. Gago R., Prucnal S., Hübner R. et al. Phase selectivity in Cr and N co-doped TiO₂ films by modulated sputter growth and post-deposition flash-lamp-annealing. *Coatings*, 2019, vol. 9, no. 7, p. 448.
37. Gago R., Prucnal S., Hubner R. et al. Structural impact of chromium incorporation in as-grown and flash-lamp-annealed sputter deposited titanium oxide films. *Journal of Alloys and Compounds*, 2017, vol. 729, pp. 438–445. DOI: 10.3390/coatings9070448.
38. Ye Q., Liu P.Y., Tang Z.F., Zhai L. Hydrophilic properties of nano-TiO₂ thin films deposited by RF magnetron sputtering. *Vacuum*, 2007, vol. 81, no. 5, pp. 627–631. DOI: 10.1016/j.vacuum.2006.09.001.
39. Hashimoto K., Irie H., Fujishima A. TiO₂ photocatalysis: a historical overview and future prospects. *Japanese journal of applied physics*, 2005, vol. 44, no. 12R, p. 8269. DOI: 10.1143/jjap.44.8269.
40. Sun R.D., Nakajima A., Fujishima A., Watanabe T., Hashimoto K. Photoinduced surface wettability conversion of ZnO and TiO₂ thin films. *The Journal of Physical Chemistry B*, 2001, vol. 105, no. 10, pp. 1984–1990. DOI: 10.1021/jp002525j.
41. Numpud P., Charinpanitkul T., Tanthapanichakoon W. Photoinduced hydrophilic property of zinc oxide thin films prepared by sol-gel dip coating method. *Journal of the Ceramic Society of Japan*, 2008, vol. 116, no. 1351, pp. 414–417. DOI: 10.2109/jcersj2.116.414.

Информация об авторах

Сорокин Илья Алексеевич, инженер-исследователь, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Мекалина Ирина Васильевна, начальник лаборатории, к.т.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Information about the authors

Ilya A. Sorokin, Research Engineer, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Irina V. Mekalina, Head of Laboratory, Candidate of Sciences (Tech.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Статья поступила в редакцию 25.06.2026; одобрена и принята к публикации после рецензирования 15.07.2026.
The article was submitted 25.06.2026; approved and accepted for publication after reviewing 15.07.2026.