

Исследование структуры и свойств

Физические методы исследования и контроля

УДК 681.2,539.23,67.05

ВЛИЯНИЕ ЭЛЕКТРОПИТАНИЯ МАГНЕТРОННОЙ РАСПЫЛИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ НА СВОЙСТВА ОСАЖДАЕМЫХ ПЛЕНОК TiO_2 ¹

© Н. Ф. Абрамов², А. В. Безруков², О. Д. Вольпян², Ю. А. Обод³

Статья поступила 12 июня 2016 г.

Рассмотрены преимущества получения прецизионных оптических покрытий методом магнетронного распыления с электропитанием газового разряда в среднечастотном диапазоне изменения токов. Обоснована важность выбора оптимальных характеристик и режимов работы источников электропитания магнетронной распылительной системы (МРС) для получения оптических покрытий высокого качества. На разработанной технологической установке магнетронного распыления, включающей многорежимную систему электропитания МРС, получены образцы с тонкими пленками TiO_2 при различных частотах повторения импульсов тока f_{mag} , подаваемых на МРС, и идентичных других условиях напыления. Образцы исследовали методами лазерной эллипсометрии, атомно-силовой микроскопии, рентгеновской дифракции и рентгеновской рефлектометрии. Показано влияние f_{mag} на функциональные свойства пленок TiO_2 : показатель преломления, плотность, шероховатость.

Ключевые слова: магнетронное распыление; магнетронная распылительная система; оптические покрытия; нанокompозитные покрытия; источники питания; эллипсометрия; атомно-силовая микроскопия; рентгеновская дифрактометрия; рентгеновская рефлектометрия.

Получение прецизионных оптических покрытий с малыми потерями и высокой лазерной прочностью, устойчивых к различным внешним воздействиям, — одна из важных задач современного приборостроения. Для изготовления таких покрытий необходимо применять методы, обеспечивающие высокую точность процессов изготовления и воспроизводимость параметров и свойств покрытия, в первую очередь физической толщины и показателя преломления слоев, определяющих основные его функциональные характеристики.

В последнее десятилетие метод магнетронного распыления (МР), активно используемый для получения прецизионных оптических покрытий, вытесняет традиционные методы их нанесения, например, электронно-лучевой. Основные преимущества МР: боль-

шая скорость роста пленок, возможность точного контроля процесса напыления, высокая равномерность нанесения покрытий на подложки больших диаметров, очень плотная структура покрытия с малым числом дефектов, хорошая адгезия покрытия к подложке [1–3].

Важнейший узел магнетронных распылительных систем (МРС) — блоки питания (БП), обеспечивающие создание, поддержание и регулирование плазмы рабочих и реактивных газов. БП МРС представляют собой генераторы импульсов тока большой амплитуды. В ходе процесса напыления характер нагрузки меняется — от состояния с высоким импедансом (при иницировании разряда) до состояния, которое может быть описано ВАХ стабилитрона (при установившемся разряде) [4]. Современные БП МРС должны обладать следующими основными характеристиками: высокой точностью стабилизации параметров разряда — силы тока, напряжения или мощности (не хуже 1%), минимальным временем реакции системы защиты и стабилизации на изменение параметров плазменной нагрузки (не более 1 мкс), расширенными функциональными возможностями (наличием интерфейсов управления и обмена данными с ПК и др.). Для боль-

¹ Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки РФ (проект «Оптические транзисторы на основе метаматериалов», соглашение о предоставлении субсидии от 29.09.2016 № 14.577.21.0219, уникальный идентификатор ПНИЭР RFMEFI57716X0219).

² Научно-производственный комплекс «Фотрон-Авто», Москва, Россия; e-mail: nicolas.fotron-auto@mail.ru

³ Московский технологический университет (МИРЭА), Москва, Россия.



Рис. 1. Установка магнетронного напыления «Магнетон» с размещенными на ней БП МРС «БПМ-3», коммутатором магнетронов «К-2» и измерительным комплексом «ИК-1»

шинства электрических параметров, таких как сила тока в импульсах, форма импульсов тока, частота повторения импульсов, скважность, выходная мощность, должна быть обеспечена возможность их регулирования в широких пределах как в ручном, так и автоматическом режимах.

В настоящее время в зависимости от технологических задач используют БП с различными режимами электропитания МРС: постоянным током; токами, изменяющимися в средне- (СЧ) и высокочастотном (ВЧ) диапазонах. При реактивном распылении, которое, как правило, применяют при получении пленок диэлектриков, электропитание магнетрона постоянным и ВЧ-токами неэффективно из-за существенных недостатков (микродуги, проблема «исчезающего анода», низкое КПД для больших мощностей и др.). Напротив, электропитание импульсными или переменными токами в СЧ-диапазоне гораздо эффективнее. Кроме того, анализ существующих систем питания показывает, что магнетроны с СЧ-электропитанием имеют значительные преимущества: высокая скорость осаждения покрытий сложного состава и плотность плазмы около поверхности подложек, положительно влияющая на характеристики слоев наносимых покрытий, возможность высокоточного управления характеристиками покрытий, эффективное обеспечение теплового режима мишени [1, 2].

В случае СЧ БП МРС используют большие импульсные или периодические прямоугольной формы токи частотой 10 – 100 кГц и два режима работы: уни- и биполярный.

Один из характерных недостатков существующих СЧ БП МРС — изменение формы импульса тока в ходе работы (вместо импульса прямоугольной формы на нагрузку выдается импульс в виде обрезанного синуса, трапецеидальной формы и др.), что может быть связано с архитектурой БП, типом и длиной под-

водящих высоковольтных кабелей и др. Поскольку эффективная работа реактивных МРС и высокая воспроизводимость получения основных характеристик прецизионных оптических покрытий возможны только при прямоугольной форме импульса, СЧ БП МРС должен обеспечить прямоугольность импульса с относительными отклонениями меньше 0,01 в уни- и биполярном режимах для различных типов и величин переменной функциональной нагрузки. Этим требованиям отвечает СЧ БП МРС «БПМ-3», разработанный авторами для изготовления высокоскоростных оптических транзисторов [5].

Цель работы — исследование влияния частот повторения импульсов тока $f_{\text{маг}}$, генерируемых СЧ БП МРС «БПМ-3», на функциональные свойства пленок TiO_2 (показатель преломления, плотность, шероховатость).

Установка «Магнетон» (рис. 1) предназначена для получения прецизионных оптических и лазерных нанокomпозитных покрытий МР-методом [3].

Рабочая камера установки содержит двухпозиционную МРС с дуальными непланарными магнетронами. Предусмотрена возможность ионно-лазерного ассистирования процесса роста пленок. Блок управления газовой системой и системой электропитания магнетронов имеет интерфейс для подключения к ПК со специально разработанным ПО, что обеспечивает автоматизацию технологического процесса. Рабочие и реактивные газы — аргон и кислород — могут подаваться независимо при контроле их парциальных давлений. Система электропитания включает: СЧ БП МРС «БПМ-3», коммутатор магнетронов «К-2», служащий для переключения между двумя МРС установки, и измерительный комплекс «ИК-1», позволяющий измерять и передавать на ПК основные электротехнические характеристики магнетронного разряда. «БПМ-3», представляющий собой адаптивную систему возбуждения и высоко стабилизированного электропитания магнетронного разряда, способен автоматически управлять как собственными внутренними параметрами, реализуя тем самым функцию автодиагностики, так и параметрами магнетронного разряда. При этом БП МРС построен по модульному принципу, что позволяет расширить при необходимости его функциональные возможности. В конструкции БП МРС использованы современные составляющие, среди которых высоковольтные IGBT (Insulated-gate bipolar transistor) интеллектуальные силовые модули, малогабаритные ферромагнитные компоненты с низкими потерями и высокопроизводительные микроконтроллеры. Структурная схема импульсного БП МРС «БПМ-3» приведена на рис. 2.

Переменное напряжение трехфазной сети 380 В, подводимое к БП МРС «БПМ-3», преобразуется в постоянное с помощью выпрямителя (В) и фильтра (Ф). Затем постоянное напряжение поступает в импульсный понижающий стабилизатор напряжения (ИСН),

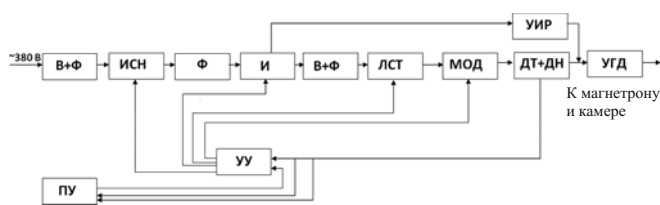


Рис. 2. Структурная схема импульсного БП МРС «БПМ-3»

позволяющий регулировать его значение в широких пределах. Для сглаживания пульсаций напряжения дополнительно установлен фильтр Φ перед входом инвертора (И), предназначенного для преобразования постоянного напряжения в высокое переменное напряжение прямоугольной формы и для гальванической развязки сети и цепей «БПМ-3» (на рис. 2 изображен только один инвертор, но в действительности используют несколько). После инверторов переменное напряжение преобразуется в постоянное с помощью выпрямителя (В) и фильтра (Ф). В БП действует двойная стабилизация тока — помимо ИСН установлен также линейный стабилизатор тока (ЛСТ). Модулятор (МОД) формирует импульсы требуемой частоты, скважности и полярности. Текущие значения тока и напряжения, измеряемые датчиками тока (ДТ) и напряжения (ДН), поступают в устройство управления (УУ), которое вырабатывает управляющие сигналы для узлов силовой части и передает информационные сигналы на панель управления (ПУ). Быстрая обратная связь позволяет за время менее 1 мкс отключить силовую часть при аварийных ситуациях (короткое замыкание, возникновение дуг и др.). Устройство инициирования разряда (УИР), зажигающее разряд в широком диапазоне давлений рабочих газов, формирует импульсы высокого напряжения на магнетроне. При работе с большими токами разряда необходимо эффективное подавление дуг. Для этой цели служит устройство гашения дуги (УГД), к которому подключается линия электропитания магнетрона (или магнетронов в случае дуального магнетронного распыления).

Включение БП МРС «БПМ-3» и задание режимов работы (выходного тока, напряжения, мощности, частоты, длительности и полярности выходных импульсов) может осуществляться как внешним контроллером, так и с ПУ БП МРС. «БПМ-3» может работать в режиме стабилизации тока, напряжения или мощности. Его основные параметры: выходное напряжение — 300 – 1200 В; выходной ток — 0 – 10 А; напряжение запуска — 1500 – 3000 В; частота выходных импульсов — 1 – 100 кГц; длительность выходных импульсов — 10 – 1000 мкс.

Методом СЧ МР титановой мишени получили образцы со слоями TiO_2 при следующих частотах повторения подаваемых на МРС импульсов тока: 20, 24 и 36 кГц. Слои наносили на подложки из стекла К-8, обработанные методом «глубокой шлифовки и

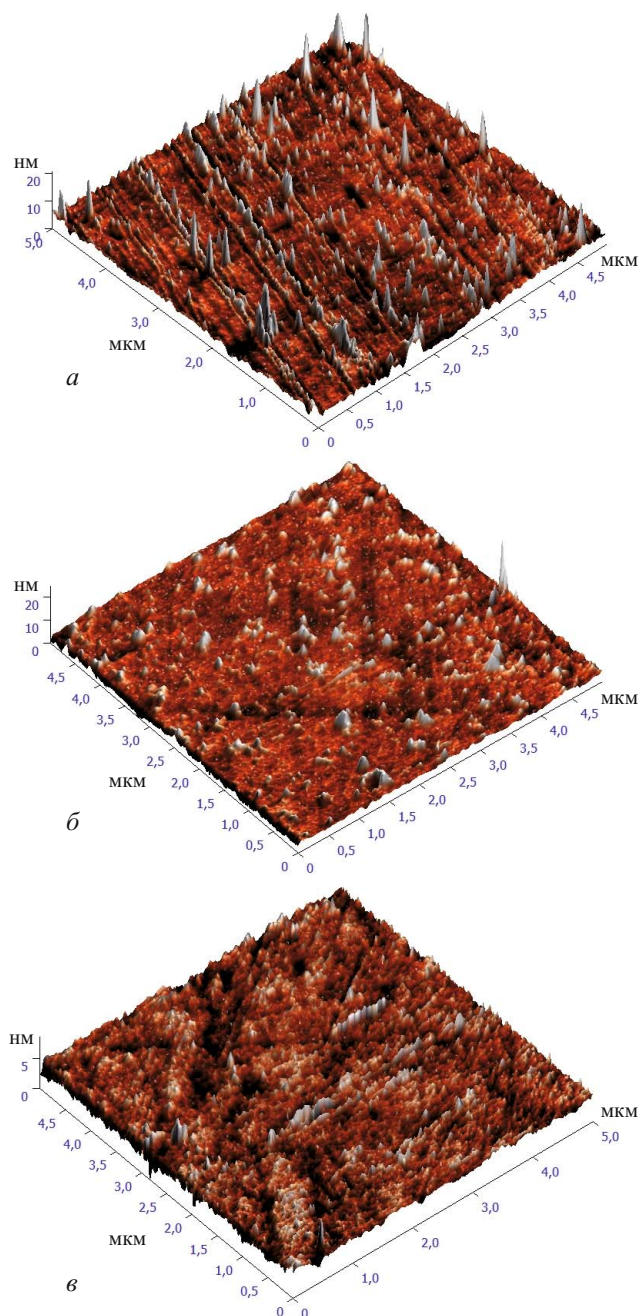


Рис. 3. Морфология поверхностей образцов 1 (а), 2 (б) и 3 (в)

полировки) (ГШП). Качество обработки проверяли на электронном микроскопе «Альтами МЕТ 5С» и по результатам измерения лазерной устойчивости обработанной поверхности подложек. Устойчивость прецизионных оптических покрытий к воздействию мощного лазерного излучения исследовали с использованием методик, разработанных в НИИ «Полус» им. М. Ф. Стельмаха [5, 6]. Давление смеси рабочего (Ar) и реактивного (O_2) газов в камере во время процесса осаждения составляло $1,5 \cdot 10^{-3}$, парциальное давление O_2 — $4,5 \cdot 10^{-4}$ Торр. Технологические процессы осуществляли в режиме стабилизации силы тока в каждом импульсе, которую поддерживали на уровне 1,5 А с точностью 1 % [7].

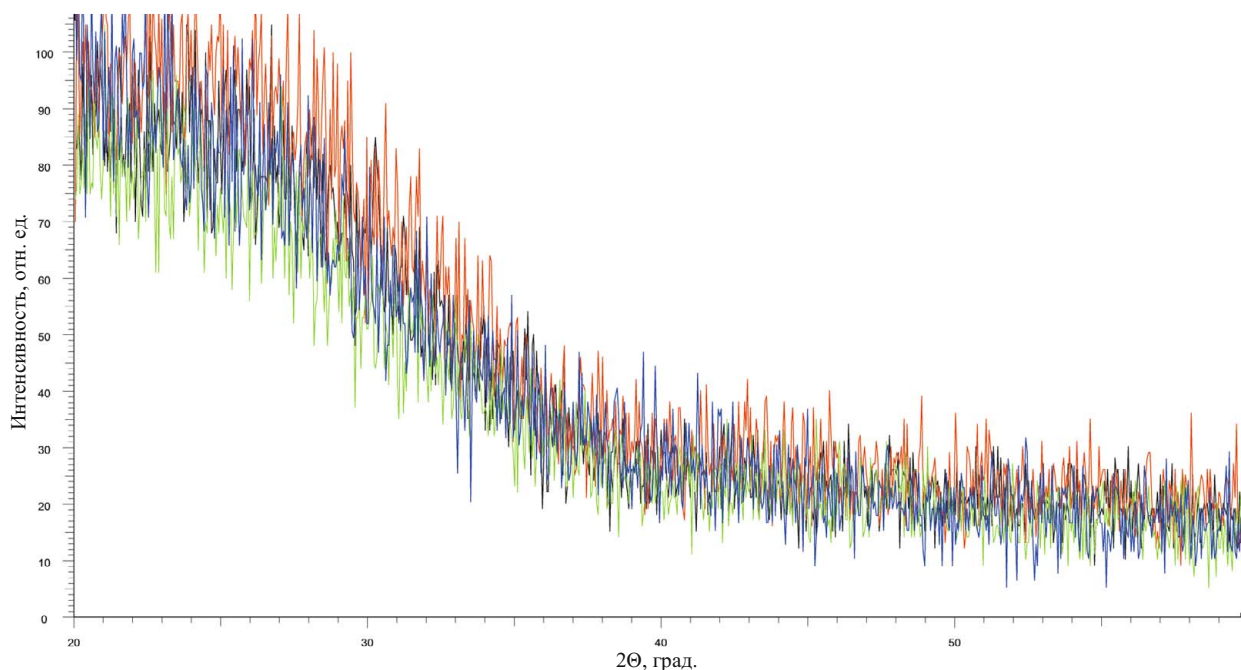


Рис. 4. Дифрактограммы для однослойных образцов пленок TiO_2 , полученных на установке «Магнетон» (угол падения $0,35^\circ$), и тестовой подложки (черная кривая — образец 1, красная — образец 2, синяя — образец 3, зеленая — подложка)

С помощью метода лазерной эллипсометрии получили зависимости показателя преломления образцов тонких пленок TiO_2 от режима питания МРС (эллипсометр Alpha-SETM, США). В таблице приведены результаты измерения толщины (d_1) и показателя преломления (n) на длине волны $\lambda = 1000$ нм.

С помощью атомно-силового микроскопа Ntegra Prima (Россия) исследовали морфологию (шероховатость) поверхности покрытий TiO_2 на участке 5×5 мкм² в центральной части подложки (см. таблицу, рис. 3). Видно, что среднеквадратическое значение шероховатости уменьшается от единицы (образец 1) до 0,36 нм (образец 3).

С увеличением частоты питающего напряжения меняется структура дефектности поверхности пленок. При уменьшении размера шероховатости она становится поверхностно более плотной (см. рис. 3).

Рентгенодифракционные измерения проводили на рентгеновском дифрактометре D8 Discover (Германия) в геометрии параллельного пучка (источник рентгеновского излучения — рентгеновская трубка мощностью 1,6 кВт с медным анодом (излучение $\text{CuK}\alpha$), режим съемки — 40 кВ \times 40 мА). Для увеличения интенсивности первичного пучка и его частичной монохроматизации и коллимации в плоскости дифрак-

ции использовали зеркало Гебеля. Ширина пучка составляла 0,2 мм. Интенсивность дифрагированного пучка измеряли с помощью сцинтилляционного детектора, перед которым установили щель Соллера.

Стандартная $2\theta - \theta$ -схема для съемки дифрактограмм оказалось неэффективной для исследования тонких (<200 нм) пленок из-за очень слабой интенсивности дифрагированного излучения. Поэтому использовали схему съемки рентгеновской дифракции в скользящей геометрии. Образец путем проведения пробных съемок выставляли на небольшой угол ($\theta = 0,35^\circ$) по отношению к падающему рентгеновскому излучению и оставляли неподвижным во время съемки дифрактограммы (перемещался только детектор). В этом случае глубина проникновения рентгеновских лучей в материал уменьшается, а интенсивность дифрагированного излучения увеличивается. При этом фиксируется дифракция от кристаллографических плоскостей, почти перпендикулярных рабочей поверхности или отклоненных от нее на малый угол.

Обработку экспериментальных кривых и фазовый анализ проводили с помощью программы EVA из пакета программ к дифрактометру D8 Discover.

На рис. 4 приведены рентгеновские дифрактограммы образцов и тестовой подложки. Видно, что

Результаты измерения показателя преломления, толщины и шероховатости пленок TiO_2

Образец	Ток магнетронной плазмы, А	$f_{\text{маг}}$, кГц	Время нанесения, с	d_1 , нм	d_2 , нм	n ($\lambda = 1000$ нм)	Шероховатость среднеквадратичная, нм
1	1,5	20	9000	108,4	86	2,075	1
2		24		117,2	94	2,114	0,7
3		36		152,8	126	2,117	0,36

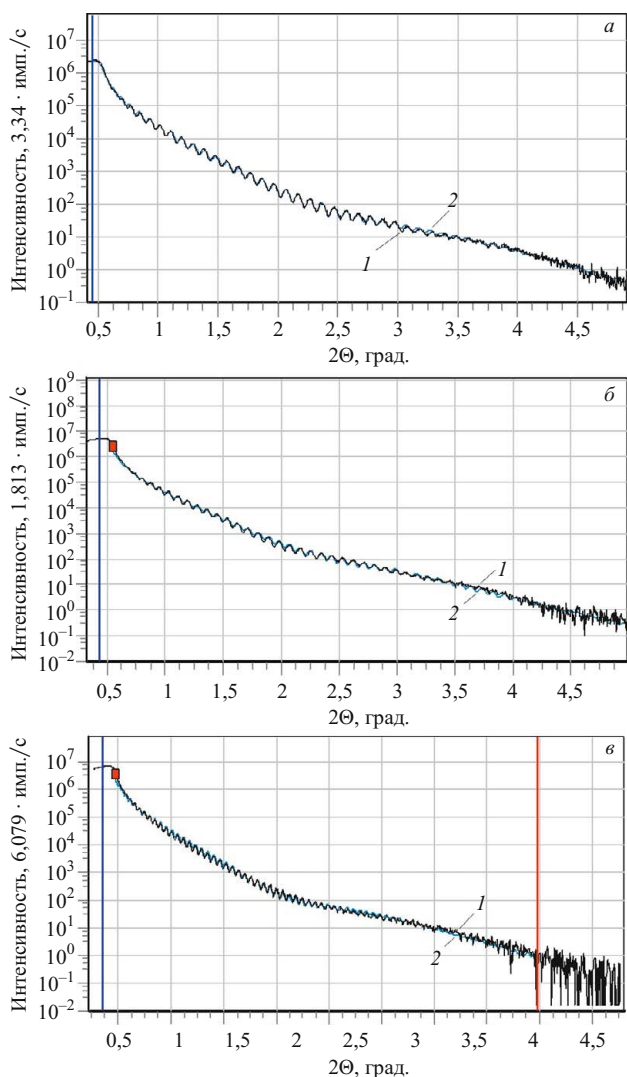


Рис. 5. Экспериментальные (1) и теоретические (2) рефлектометрические кривые слоя TiO_2 для образцов 1 (а), 2 (б) и 3 (в)

в области $20 - 30^\circ$ присутствует гало, свидетельствующее о том, что выращенные пленки TiO_2 рентгеноаморфны. Отражений от кристаллической фазы и существенных различий между образцами по степени аморфности не выявлено.

На рис. 5 приведены результаты рентгеновской рефлектометрии. Исследования проводили на многоцелевом рентгеновском дифрактометре D8 Discover, интенсивность отраженного луча измеряли с помощью позиционно-чувствительного детектора LynxEye (угловое разрешение — $0,015^\circ$).

Параметры модели (толщину и плотность слоя) подбирали с помощью программы Leptos ver. 7.03. Слой TiO_2 разбивали на 4–5 подслоев переменной плотности, у которых изменяли толщину и плотность на нижней и верхней границах. Сам подслои также разбивали на ламели толщиной порядка 1 нм, в которых плотность полагали постоянной. Программа меняет параметры модели слоя так, чтобы расчетная и экспериментальная кривые наилучшим образом совпадали.

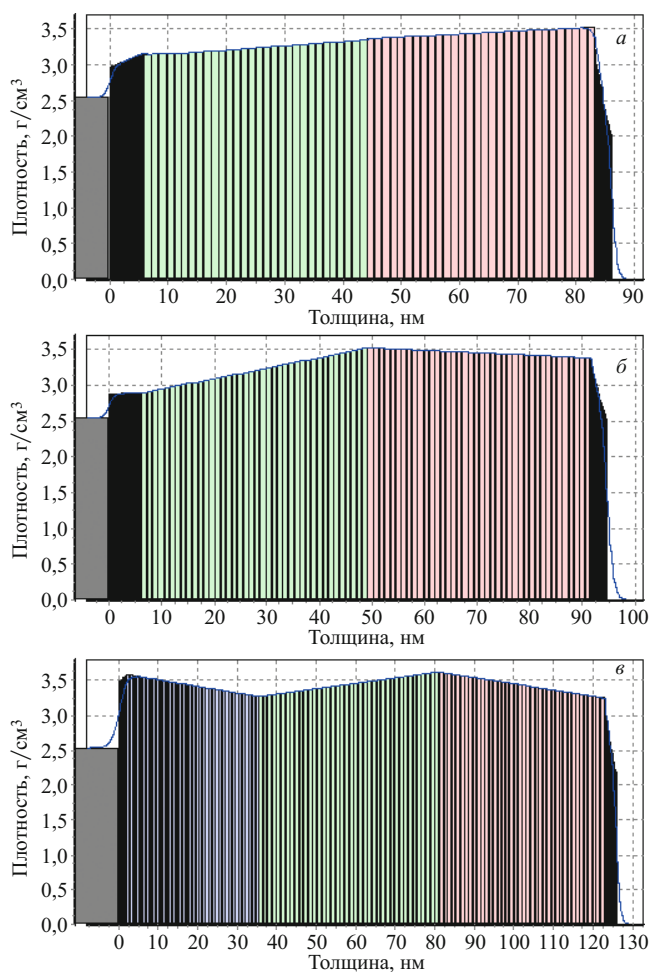


Рис. 6. Профили распределения плотности пленок TiO_2 по толщине для образцов 1 (а), 2 (б) и 3 (в)

По форме рефлектометрических кривых определяли уточненные (по сравнению с полученными в результате эллипсометрических измерений) значения толщин пленок d (см. таблицу). Полученные данные подтверждают, что с повышением частоты электропитания МРС скорость образования пленок TiO_2 возрастает.

На рис. 6 показаны рассчитанные по экспериментальным рефлектометрическим зависимостям профили распределения плотности пленок по их толщине. Видно, что плотность неоднородна по толщине для всех исследованных образцов. С изменением частоты электропитания МРС характер распределения плотности меняется. На границе пленка — подложка присутствует переходной слой толщиной порядка 5 нм.

Последовательность физико-химических процессов, происходящих на подложке при получении пленочных покрытий МР-методом [8, 9]: 1) адсорбция атомов и ионов распыленного вещества; 2) формирование островковых образований; 3) образование сплошной пленки; 4) формирование последующих слоев пленки.

Можно предположить, что увеличение частоты электропитания МРС существенно влияет на ход про-

цессов, способствующих формированию требуемых функциональных свойств пленок, за счет увеличения коэффициента поверхностной диффузии атомов и ионов Ti по подложке и уменьшения времени полного заполнения целого числа монослоев (увеличение степени соответствия периода повторения импульсов электропитания времени полного заполнения целого числа монослоев). Отметим, что время пролета атомов и ионов мишени может превышать на несколько порядков длительность импульса. Так, при расстоянии 0,1 м между мишенью и подложкой время пролета атомов или ионов составляет около 20 – 40 мс, в то время как длительность импульса разряда при СЧ-распылении — 10 – 1000 мкс [10, 11].

Это может быть вызвано следующими изменениями в свойствах плазмы при росте частоты электропитания: 1) увеличением энергии поступающих ионов Ti вследствие меньшей степени термализации энергии ионов и атомов Ti при рассеянии на аргоне; 2) ростом интенсивности потока ионов из-за увеличения плотности плазмы; 3) увеличением доли ионов Ar^{2+} ; 4) уменьшением дугообразования.

В [12] рассмотрен процесс резкого увеличения потока ионов в момент начала высоковольтного импульса электропитания. Очевидно, что с ростом частоты повторения импульсов растет и вклад такого процесса в плотность плазмы. При равной средней мощности, подаваемой на магнетрон, мгновенное значение мощности всегда выше при импульсном СЧ-распылении [11]. При увеличении частоты повторения импульсов наблюдается значительный рост доли ионов Ar^{2+} . Это может быть одной из причин уменьшения шероховатости [12]. Частота повторения импульсов напряжения на магнетроне влияет на вероятность возникновения дуг и микродуг [13]. При определении минимальной частоты, требуемой для устранения дугового разряда на поверхности мишени, рассматривают систему мишень — слой диэлектрика — поверхностный заряд, представляющую собой, по сути, конденсатор. Чтобы получить процесс с полным отсутствием дуг и микродуг, частота повторения импульсов электропитания должна составлять 50 – 100 кГц [10].

Таким образом, в технологических процессах получения прецизионных оптических покрытий МР-методом большое значение имеют высокоэффективные системы электропитания МРС, позволяющие менять силу тока, напряжение и мощность магнетронного разряда, а также скважность и частоту повторения импульсов. Каждый из этих параметров влияет на характеристики тонкопленочного покрытия. Выполненные исследования показали, что при изготовлении оптических пленок TiO_2 повышение частоты следования импульсов магнетронного разряда значительно влияет на морфологию поверхности и физические свойства пленки — уменьшается шероховатость, увеличиваются плотность и показатель преломления.

Анализ работы разработанного БП МРС «БПМ-3» позволяет заключить, что создано эффективное устройство для электропитания МРС и исследования технологических процессов изготовления нанокompозитных прецизионных оптических и лазерных покрытий. Следует отметить, что разработанное оборудование в первую очередь предназначено для получения нанокompозитных лазерных покрытий с высокой устойчивостью к лазерному излучению, предназначенных для работы в широких спектральных областях электромагнитного излучения.

В настоящее время актуальна задача получения гипертолстых (более 10 мкм) прецизионных оптических покрытий с высокими плотностью и однородностью и предельно малой шероховатостью. Для решения этой задачи необходимо разработать БП МРС, обеспечивающие импульсный магнетронный разряд длительностью до 20 мкс со сверхвысокой удельной мощностью электропитания (более 1 кВт/см²). При этом общая импульсная мощность, прикладываемая к разряду, должна составлять десятки – сотни мегаватт. Необходим также обоснованный выбор оптимального частотного интервала питания магнетронного разряда. Проведенные исследования намечают пути проектирования таких БП.

Авторы выражают благодарность сотрудникам НИТУ «МИСиС» К. Д. Щербачеву, Д. А. Киселеву и Р. Н. Жукову за помощь в проведении экспериментов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кузьмичев А. И. Магнетронные распылительные системы. Кн. 1. Введение в физику и технику магнетронного распыления. — Киев: Аверс, 2008.
2. Вольян О. Д., Кузьмичев А. И., Обод Ю. А., Яковлев П. П. Получение оптических наногradientных и метапокрытий методом реакционного магнетронного распыления / Наноинженерия. 2011. № 4. С. 37 – 39.
3. Abramov N. F., Volpian O. D., Obod Yu. A., Dronskii R. V. Fabrication of nanogradient coatings for laser devices using the method of magnetron sputtering / Quantum Electronics. 2013. Vol. 43. N 9. P. 791 – 794.
4. Gueldner H., Wolf H., Eckholz F., Schrade F. A novel topology for pulse generators in magnetron sputter systems / Proc. VII IEEE International Power Electronics Congress. Acapulco, Mexico. October 2000. P. 365 – 370.
5. Сидорюк О. Е., Скворцов Л. А. Измерение поглощения посредством лазерной внутривибрационной фототермической радиометрии / ЖПС. 1992. Т. 56. № 5 – 6. С. 781 – 786.
6. Астапенко В. А., Сидорюк О. Е. Регистрация лазерного разрушения поверхности материалов и покрытий с помощью индуцированного газового разряда / Квантовая электроника. 1997. Т. 24. № 7. С. 609 – 612.
7. Вольян О. Д., Яковлев П. П., Мешков Б. Б., Обод Ю. А. Получение оптических пленок TiO_2 методом реактивного магнетронного распыления на переменном токе / Оптический журнал. 2001. Т. 68. № 7. С. 36 – 39.
8. Броудай И., Мерей Дж. Физические основы микротехнологии. — М.: Мир, 1985.
9. Kaiser N. Review on fundamentals of thin-film growth / Applied Optics. 2002. Vol. 41. Issue 16. P. 3053 – 3060.
10. Jonsson L. B. et al. Frequency response in pulsed DC reactive sputtering processes / Thin Solid Films. 2000. Vol. 365. Issue 1. P. 43 – 48.
11. Bradley J. W. et al. The distribution of ion energies at the substrate in an asymmetric bi-polar pulsed DC magnetron discharge / Plasma Sources Sci. Technol. 2002. Vol. 11. N 2. P. 165 – 174.

12. **Franz R. et al.** Observation of multiple charge states and high ion energies in high-power impulse magnetron sputtering (HiPIMS) and burst HiPIMS using a LaB₆ target / *Plasma Sources Sci. Technol.* 2014. Vol. 23. P. 0350011 – 03500111.
13. **Yukimura K. et al.** High-Power Inductively Coupled Impulse Sputtering Glow Plasma IEEE / *Trans. Plasma Sci.* 2011. Vol. 39. N 11. P. 3085 – 3094.

REFERENCES

1. **Kuz'michev A. I.** Magnetronnye raspylitel'nye sistemy [Magnetron sputtering systems]. Book 1. Vvedenie v fiziku i tekhniku magnetronnogo raspyleniya [Introduction to the physics and technology of magnetron sputtering]. — Kiev: Avers, 2008 [in Russian].
2. **Vol'pian O. D., Kuz'michev A. I., Obod Yu. A., Yakovlev P. P.** Poluchenie opticheskikh nanogradientnykh i metapokrytii metodom reaktivnogo magnetronnogo raspyleniya [Fabrication of optical nanogradient and meta-coatings using the method of magnetron sputtering] / *Nanoinzheneriya*. 2011. N 4. P. 37 – 39 [in Russian].
3. **Abramov N. F., Volpian O. D., Obod Yu. A., Dronskii R. V.** Fabrication of nanogradient coatings for laser devices using the method of magnetron sputtering / *Quantum Electronics*. 2013. Vol. 43. N 9. P. 791 – 794.
4. **Gueldner H., Wolf H., Eckholz F., Schrade F.** A novel topology for pulse generators in magnetron sputter systems / *Proc. VII IEEE International Power Electronics Congress. Acapulco, Mexico*. October 2000. P. 365 – 370.
5. **Sidoryuk O. E., Skvortsov L. A.** Izmerenie pogloshcheniya posredstvom lazernoi vnutrirezonnatoinei fototermicheskoi radiometrii [Measurement of absorption by means of laser intracavity photothermal radiometry] / *Zh. Prikl. Spektrosk.* 1992. Vol. 56. N 5 – 6. P. 781 – 786 [in Russian].
6. **Astapenko V. A., Sidoryuk O. E.** Registratsiya lazernogo razrusheniya poverkhnosti materialov i pokrytii s pomoshch'yu indutsirovannogo gazovogo razryada [Detection of laser destruction of materials surface and coatings using induced gas discharge] / *Kvant. Elektron.* 1997. Vol. 24. N 7. P. 609 – 612 [in Russian].
7. **Vol'pian O. D., Yakovlev P. P., Meshkov B. B., Obod Yu. A.** Poluchenie opticheskikh plenok TiO₂ metodom reaktivnogo magnetronnogo raspyleniya na peremennom toke [Fabrication of optical TiO₂ films using the method of AC magnetron sputtering] / *Optich. Zh.* 2001. Vol. 68. N 7. P. 36 – 39 [in Russian].
8. **Brodie I., Murray J.** *Physics of microfabrication*. — New York: Plenum, 1982.
9. **Kaiser N.** Review on fundamentals of thin-film growth / *Appl. Optics*. 2002. Vol. 41. Issue 16. P. 3053 – 3060.
10. **Jonsson L. B. et al.** Frequency response in pulsed DC reactive sputtering processes / *Thin Solid Films*. 2000. Vol. 365. Issue 1. P. 43 – 48.
11. **Bradley J. W. et al.** The distribution of ion energies at the substrate in an asymmetric bi-polar pulsed DC magnetron discharge / *Plasma Sources Sci. Technol.* 2002. Vol. 11. N 2. P. 165 – 174.
12. **Franz R. et al.** Observation of multiple charge states and high ion energies in high-power impulse magnetron sputtering (HiPIMS) and burst HiPIMS using a LaB₆ target / *Plasma Sources Sci. Technol.* 2014. Vol. 23. P. 0350011 – 03500111.
13. **Yukimura K. et al.** High-Power Inductively Coupled Impulse Sputtering Glow Plasma IEEE / *Trans. Plasma Sci.* 2011. Vol. 39. N 11. P. 3085 – 3094.