

## СИНТЕЗ ПЛЕНКООБРАЗУЮЩИХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ НИТРИДА АЛЮМИНИЯ ДЛЯ ФОРМИРОВАНИЯ ИЗ НИХ ОПТИЧЕСКИХ ПОКРЫТИЙ

© 2008 г. **В. В. Кириленко\***, доктор техн. наук; **Б. М. Жигарновский\***, канд. хим. наук; **В. К. Павловский\***, канд. хим. наук; **И. П. Маркелова\***; **А. В. Михайлов\*\***, канд. техн. наук; **Г. А. Муранова\*\***, канд. техн. наук

\* НТЦ “Спектр” РАН и АИН РФ, Москва

\*\* НПК “Государственный оптический институт им. С.И. Вавилова”, Санкт-Петербург

В работе рассмотрены вопросы синтеза и прессования нитрида алюминия для получения пленкообразующих материалов, используемых для формирования оптических покрытий. На основе полученных пленкообразующих материалов разработан технологический процесс изготовления покрытий из нитрида алюминия на основе двух вакуумных методов напыления тонких пленок: вакуумного испарения и магнетронного распыления. Рассмотрены вопросы использования пленок нитрида алюминия в оптическом приборостроении.

Коды OCIS: 160.4760, 310.1620.

*Поступила в редакцию 28.05.2008.*

Значительный интерес, который проявляют ученые многих стран мира к проблеме получения высококачественного нитрида алюминия (AlN), вызван уникальными свойствами этого материала и широкими возможностями его использования. Хорошие диэлектрические характеристики, химическая, термическая и радиационная стабильность позволяют использовать AlN в электронных приборах, работающих в экстремальных условиях. Есть сведения об использовании его в качестве источника люминесцентного излучения [1], в пьезоэлектрических устройствах [2], полупроводниковых приборах [3]. Уникальные теплофизические свойства (коэффициент теплопроводности достигает 240 Вт/м К) повлекли за собой разработку силовых приборов, СВЧ устройств с использованием AlN. Весьма перспективным представляется использование AlN в различных областях оптики, в частности, в качестве оптических покрытий.

### Синтез и прессование нитрида алюминия

Обычно в лабораторных условиях AlN получают нагреванием порошка алюминия в токе азота [4, 5] или разложением хлораммиаката алюминия [6–7]. Однако наиболее совершенным является синтез AlN методом СВС (самовоспламеняющийся синтез). Большинство работ по синтезу AlN методом СВС выполнены на лабораторных установках с использованием шихты массой 30–600 г. Как показал анализ опубликованных работ, описанные методы синтеза имеют ряд недостатков. При горении шихты малой массы в лабораторном реакторе вследствие больших теплопотерь формируется значитель-

ный (до 600°C) градиент температур между внутренним и внешним участками шихты. Наличие градиента температур приводит к образованию в одном спеке AlN с различным морфологическим и химическим составом.

Исследование проводили в промышленном реакторе СВС-30 с рабочим объемом 30 л и максимальным рабочим давлением до 20 МПа. Для приготовления шихты использовали порошок алюминия марки АСД-1 и порошок СВС-нитрида алюминия в виде конгломератов в качестве разбавителя. Порошки исходных компонентов Al + AlN дозировали с точностью 0,5%. Компоненты смешивали в шаровой мельнице в течение 30 мин. Полученную шихту загружали на реакционную лодочку и помещали в реактор. Реактор заполняли азотом до необходимого давления и осуществляли воспламенение шихты. Синтез проводили под давлением 7 МПа. Температуру и скорость горения определяли с помощью W/Re-термопар, которые помещали в слой шихты на определенном расстоянии друг от друга. После охлаждения спек AlN извлекали из реактора и направляли на исследование и дальнейшую переработку. Удельную поверхность порошка AlN определяли по адсорбции азота, предварительно просеяв AlN через сетку с размером ячеек 150 мкм. Гранулометрический состав порошков определяли на лазерном седиментографе ANALYSETTE 22 фирмы “FRITSHCH”. Морфологию частиц исследовали с помощью сканирующего электронного микроскопа JEOL-733.

Для получения качественной теплопроводящей керамики, а также таблеток и мишеней из AlN необходимо использовать хорошо спекаемый поро-

шок. Такой порошок должен удовлетворять следующим основным требованиям: низкое содержание кислорода и примесей металлов, сферическая форма частиц, маленький (до 5 мкм) размер частиц. В зависимости от способа получения вышеуказанные параметры достигаются на различных стадиях производства (синтез, измельчение, классификация, очистка и т. д.). На основании проведенных исследований был определен оптимальный режим синтеза AlN и последующей его переработки. В результате получен пригодный для спекания порошок AlN со следующими параметрами: порошок серого цвета с удельной поверхностью  $S_{уд} = 2,6 \text{ м}^2/\text{г}$  и средним размером частиц 50 мкм, содержание отдельных компонентов (в масс. %): N – 33,6, O – 0,74, Fe – 0,06, остальное – Al. Перед прессованием порошок увлажняли 4%-ным раствором поливинилового спирта (ПВС) до относительной влажности  $W_{отн} = 10\%$  и прессовали в формах из оргстекла диаметром 18 мм. Навеска составляла 2,5 г, давление прессования  $300 \text{ кг}/\text{см}^2$ . При этих условиях высота таблетки была равна 5 мм. Первый обжиг был проведен при температуре  $800 \text{ }^\circ\text{C}$  с выдержкой 2 ч. Таблетка была помещена в корундовый тигель и наполовину погружена в порошок электрокорунда ЭКБ-50 с зернистостью 500 мкм. После обжига нижняя половина таблетки, погруженная в ЭКБ, частично разрушилась. Внутри таблетка светлосерая, поверхность верхней половины более темная. Таблетка приобрела определенную прочность, однако легко разламывалась руками.

Учитывая взаимодействие AlN с электрокорундом, отмеченное после обжига при  $800 \text{ }^\circ\text{C}$ , температура следующего обжига была снижена на  $100 \text{ }^\circ\text{C}$  с сохранением длительности выдержки 2 ч. Таблетка после обжига была светлой на разломе и немного темнее с поверхности.

После обжига при  $600 \text{ }^\circ\text{C}$  с выдержкой 2 ч таблетка была почти белой, но ее механическая прочность была невелика – она “пачкалась”. Плотность таблетки, рассчитанная по данным веса и объема, оказалась равной  $1,76 \text{ г}/\text{см}^3$ .

### Исследование парообразования нитрида алюминия

Исследование процесса парообразования AlN проводили в интервале температур  $1760\text{--}1950 \text{ K}$  из молибденовых, вольфрамовых и графитовых эффузионных ячеек Кнудсена. В масс-спектрах насыщенного пара, полученного при испарении образцов из разных ячеек, были зарегистрированы ионы  $\text{Al}^+$  и  $\text{N}_2^+$ . Ионы, содержащие катион металла с азотом, в масс-спектрах отсутствовали. Для определения про-

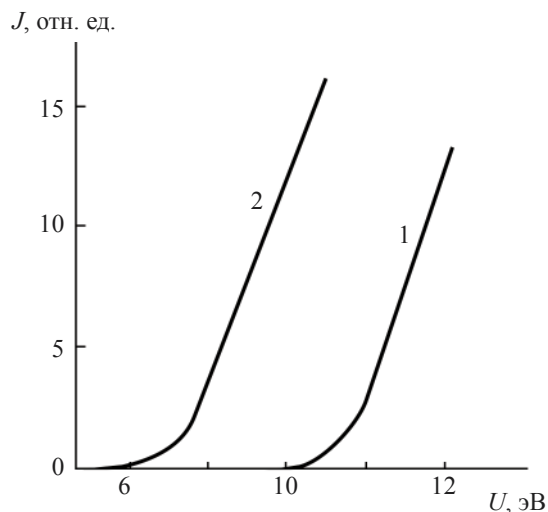


Рис. 1. Кривые эффективности ионизации ионов  $\text{Hg}^+$  (1) и  $\text{Al}^+$  (2).

исхождения ионов  $\text{Al}^+$  снимали и исследовали кривую эффективности ионизации (КЭИ). Обработку КЭИ проводили методом экстраполированных разностей [8]. В качестве стандартов использовали Ag, Hg [9]. Полученные результаты приведены на рис. 1.

Отсутствие излома на КЭИ и низкий потенциал ( $AP = 6,1 \pm 0,3 \text{ эВ}$ ) появления иона  $\text{Al}^+$ , который практически хорошо согласуется с литературными данными, свидетельствуют, что основным компонентом насыщенного пара над AlN являются молекулы алюминия.

Для выяснения характера сублимации и определения давления насыщенного пара AlN проводили эксперименты по полному изотермическому испарению известных навесок вещества.

Постоянство интенсивностей ионных токов с самого начала экспериментов по полному изотермическому испарению свидетельствует об отсутствии области твердых растворов в системе Al–N. В процессе исследования было установлено, что в интервале температур  $1760\text{--}1950 \text{ K}$  AlN сублимирует конгруэнтно. Следует отметить, что систематическое исследование процесса парообразования AlN проведено впервые, при этом получена полная картина взаимосвязанных термодинамических характеристик соединения. Совпадение энергетических характеристик AlN, полученных по второму и третьему законам термодинамики при использовании молибденовых, вольфрамовых и графитовых ячеек Кнудсена и данных элементного анализа, свидетельствует об отсутствии взаимодействия AlN с этими материалами в процессе парообразования в исследованном интервале температур.

## Напыление покрытий из нитрида алюминия

Разработка процесса изготовления покрытий из AlN проводилась на основе двух вакуумных методов напыления тонких пленок: вакуумного испарения и магнетронного распыления. Вакуумное испарение один из лучших методов для получения тонких пленок. Однако большинство соединений  $A^{III}B^V$  разлагаются при температурах, необходимых для их испарения, что приводит к фракционной дистилляции. Поэтому для получения пленок таких соединений разрабатываются специальные технологические приемы, такие как испарение компонентов соединений из отдельных испарителей, взрывное испарение, использование активирующих излучений [10, 11].

Среди вакуумных методов нанесения пленок, использующих в процессе нанесения пленок энергетические ионные пучки (реактивное ионное распыление, эпитаксия из молекулярных пучков, ионно-плазменное распыление, ионно-лучевое распыление, магнетронное распыление, ионная имплантация, распыление с помощью автономных ионных источников), наибольший интерес вызывает метод планарного магнетронного распыления, как наиболее эффективный и универсальный.

## Получение покрытий из нитрида алюминия методом электронно-лучевого испарения

Нанесение пленок AlN проводилось на основе электронно-лучевого испарения (ЭЛИ) синтезированных в оптимальных условиях таблеток AlN при воздействии ионного облучения на паровую фазу испаряемого вещества и формируемый на подложке слой. Ионно-стимулированные процессы формирования тонкопленочных структур влияют на качество создаваемых структур на всех стадиях синтеза, начиная с подготовки поверхности перед нанесением покрытия, синтеза пленки и заканчивая травлением и модификацией сформированной пленки.

Пленки AlN наносились методом ЭЛИ на стандартной вакуумной установке ВУ-1А, модернизированной под решаемую задачу. Для создания активирующих ионных пучков использовалось разработанное в ГОИ устройство ИОП-2 [12].

Устройство формирует пучок энергетических нейтральных частиц рабочего газа, которые бомбардируют поверхности оптических деталей, распыляя их и не создавая заряда на поверхности. Устройство размещалось внутри вакуумной камеры напротив электронной пушки, но может быть выведено из зоны потока испаряемого вещества путем его опус-

кания или отклонения, не содержит элементов накаливания и не требует охлаждения.

Устройство использовалось для реализации следующих процессов:

- 1) ионного полирования подложек и покрытий,
- 2) ионной очистки подложек перед нанесением покрытий,
- 3) ионного платирования покрытий.

Процессы ионной обработки подложек и покрытий различного состава и влияние ионной обработки на характер зародышеобразования конденсируемых пленок достаточно полно описаны в работах [13–14]. Обработка поверхности подложки ионами кислорода приводит к ее полной очистке от адсорбированных молекул остаточных газов и тяжелых углеводородов (при использовании паромасляных насосов) и создает условия для формирования на ней высококачественных слоев. В данной работе было установлено, что структура формируемых слоев AlN улучшается, если непосредственно перед началом нанесения слоев кратковременную ионную обработку подложки проводить ионами азота. Это согласуется с данными работ [15, 16], в которых отмечается значительное улучшение структуры слоев AlN на подложках из Si при использовании предварительной ионной имплантации азота в подложку до нанесения AlN.

Метод ионного платирования является одним из современных методов нанесения тонких оптических слоев высокого качества [17, 18] и заключается в электронно-лучевом испарении вещества через плазму рабочего (Ar) и реактивного ( $O_2$ ,  $N_2$ ) газов. При этом испаряющийся материал ионизируется, а подложки, расположенные на изолированном держателе, приобретают отрицательный по отношению к плазме потенциал смещения (10–15 В). Благодаря этому ионизированные частицы испаряемого вещества, рабочего и реактивного газов ускоряются в направлении подложек с повышенной кинетической энергией. Полученные слои отличаются повышенной плотностью и прочностью. В зависимости от реактивного газа можно получать оксиды, нитриды или оксинитриды различных металлов с заданной стехиометрией. Слои имеют беспористую структуру, причем среднеквадратические значения шероховатости их поверхности практически не отличаются от шероховатости поверхности подложки, на которую они нанесены.

Скорость роста пленки в условиях стимулированного воздействия ионно-плазменного потока можно представить как алгебраическую сумму двух независимых процессов: ионно-стимулированного осаждения из газовой фазы и физического распыления растущей пленки, если пленка растет на ровной поверхности. Если рост происходит на рельеф-

ной поверхности, то необходимо учитывать явление переосаждения, так как часть распыляемого материала попадет на боковую поверхность и будет осажаться на ней. Теоретически можно оценить скорость каждого процесса в отдельности, но когда они протекают вместе, эта задача может решаться только экспериментально. Поэтому основные факторы управления выбирались исходя из теоретической модели процесса, а степень их влияния определялась экспериментально.

Без использования активирующего ионного разряда нам не удалось получить прозрачные пленки AlN во всех исследованных режимах нанесения. Пленки имели явный металлический блеск, указывающий на высокое содержание в них металлического алюминия. Была установлена тенденция к увеличению содержания в пленках металлического алюминия с увеличением тока эмиссии.

Скорость осаждения слоев зависит от температуры подложки, давления рабочего газа и тока эмиссии. Содержание металлического алюминия в слоях AlN зависит от состава рабочего газа. При малых добавках N<sub>2</sub> к Ar (10–15%) содержание Al так велико, что его можно определить визуально. При увеличении доли N<sub>2</sub> примесь алюминия оценивалась коэффициентом пропускания пленок AlN на длине волны 500 нм. При соотношении N<sub>2</sub> и Ar 1:1 поглощение в пленках резко снижается, а при 70%-ном содержании N<sub>2</sub> – практически отсутствует. При этом падает скорость роста пленок AlN. Выбор режима получения непоглощающих пленок AlN с высокими скоростями роста затруднен тем, что при большом содержании азота в рабочем газе увеличивается прозрачность пленок, но при этом резко (в 5–10 раз) падают скорости их роста. Уменьшается также зависимость скорости роста пленок от тока эмиссии, что препятствует форсированию процесса изготовления пленок.

Напыление таблеток, изготовленных при разных температурах отжига (700 и 800 °С), не выявило заметных различий в структуре осажденных слоев. Установлено, что пленки, нанесенные на подложки из кварца, оптических стекол, сапфира и кремния, имеют поликристаллическую структуру.

### Нанесение покрытий из нитрида алюминия магнетронным распылением мишеней из Al и AlN

Метод магнетронного распыления, основанный на ионно-плазменном распылении мишеней в скрещенных электрическом и магнитном полях, в настоящее время все больше используется в отечественном и зарубежном производстве оптических покрытий. Это связано с рядом его преимуществ перед другими

методами изготовления оптических покрытий [19]. Интерес к этому методу возрос также в связи с появлением на рынке высокопроизводительных автоматизированных производственных линий по изготовлению металлодиэлектрических (МД) покрытий различного назначения с высокой адгезионной и механической прочностью.

Разработка процесса изготовления покрытий из AlN проводилась на основе метода магнетронного распыления с использованием активирующих ионных пучков. Для изготовления пленок AlN использовалась отечественная вакуумная установка ВУ-1А, оснащенная планарным магнетроном на постоянном токе “Магнетрон-2”, а также ионным источником “ИОН-4”. В качестве мишеней использовались алюминиевая мишень и бинарные мишени, состоящие из алюминия и AlN. Для получения пленок AlN использовались мишени из чистого алюминия (Al чистотой 99,999%) и бинарные мишени, состоящие из алюминия и AlN, расположенного в кольцевой зоне распыления мишени. На рис. 2 представлена схематичная конструкция магнетрона с бинарной мишенью.

В “Магнетроне-2” используется планарная мишень с кольцеобразной зоной распыления. Наилучшая равномерность пленки по толщине достигается при расположении подложки на расстоянии от мишени, примерно равном половине диаметра мишени. Точное распределение пленки по толщине определялось экспериментально.

Поскольку процесс магнетронного распыления является высоко энергетическим процессом, следует ожидать, что конденсированные пленки будут всегда иметь мелкозернистую структуру. Как показали наши исследования, действительно, размер кристал-

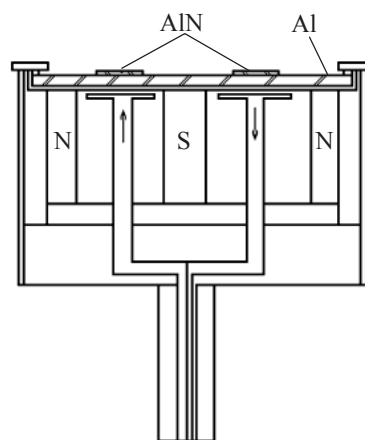


Рис. 2. Конструкция магнетрона с бинарной мишенью.

литов полученных нами пленок меньше по сравнению с напыленными в вакууме термическими методами.

Однако из-за неоднородности дефектной структуры поверхности подложки зародышеобразование на разных участках подложки идет с разной скоростью [20]. Для улучшения условий зародышеобразования, дополнительной очистки подложки от загрязнений и органических остатков, а также для удаления тонкого приповерхностного слоя подложки с адсорбированными примесями и случайными дефектами перед нанесением пленки нами использовалось ионное распыление подложек в едином технологическом цикле без разгерметизации вакуумной камеры.

Основной технической проблемой реактивного магнетронного распыления для получения диэлектрических слоев является подавление электрических дуг, которые возникают вследствие пробоя слоя диэлектрика, образующегося на поверхности мишени. Для решения этой проблемы следует увеличивать скорость распыления таким образом, чтобы образующийся изолирующий слой не успевал покрыть всю поверхность мишени. Возможно использование переменного напряжения, частота которого выбирается в зависимости от толщины пленки диэлектрика и ее диэлектрической проницаемости. В некоторой степени, при правильно выбранных режимах разряда, данная проблема решается “тренировкой” мишени, предшествующей выполнению технологического процесса. Скорость роста слоев зависит от мощности разряда, от состава и давления реакционных газов. При разработке процесса получения пленки магнетронным распылением учитывалась необходимость выбора соотношения давления смеси реактивного и рабочего газов и тока разряда при сохранении максимальной скорости роста пленки, что необходимо для стабилизации разряда. При этом давление газовой смеси должно обеспечивать минимальное поглощение в пленке. Существенное внимание должно быть уделено самому составу рабочего газа.

Известно, что вероятность хемосорбции молекул азота на алюминии близка к нулю [21], а для образования AlN необходимо присутствие атомарного азота. Основными же частицами плазмы вблизи подложки являются ионы  $N_2^+$ . Следовательно, атомы азота могут попасть на подложку только тогда, когда они распыляются с поверхности мишени или из слоя AlN, образующегося на мишени. Из этого следует, что для получения высококачественных пленок AlN распыление лучше проводить в атмосфере чистого азота, при низких давлениях рабочего газа и, по-видимому, при высоких скоростях осаж-

дения. Именно поэтому мы, наряду с мишенью из алюминия, использовали также бинарную мишень, включающую AlN.

Исследования параметров пленок, полученных распылением мишени из чистого алюминия в атмосфере  $Ag + N_2$  при различных соотношениях Ag и  $N_2$  показали, что при небольших добавках Ag к  $N_2$  (до 2–5%), показатель преломления пленок уменьшается незначительно, а скорость осаждения увеличивается. При увеличении концентрации Ag до 10–30%, за счет увеличения скорости осаждения, полученные пленки имели значительные внутренние напряжения, показатель преломления уменьшался, увеличивалось поглощение. При увеличении содержания Ag в смеси с  $N_2$  до 40–60% полученные пленки имели значительное, видимое на глаз поглощение. Лучшие результаты получены при нанесении пленок в чистом азоте. В пленках практически отсутствует поглощение, отсутствуют и внутренние напряжения. Однако уменьшалась скорость осаждения слоев. На рис. 3 представлена экспериментальная зависимость скорости осаждения пленок AlN от содержания азота в составе рабочего газа ( $Ag + N_2$ ). Зависимость получена при использовании мишени из чистого алюминия.

Показатель преломления пленок, осажденных в разряде чистого азота при разных мощностях разряда, растет с 1,85 до 1,89 с увеличением мощности разряда с 0,5 до 0,6 кВт. Дальнейшее увеличение мощности разряда приводит к нестабильности работы магнетрона.

В отличие от азота кислород обладает повышенной способностью к хемосорбции на алюминии (быстрый и неактивированный захват газа, обнаруживаемый при  $T = 300$  К и  $p = 10^{-2}$  Па) [22].

Поэтому уже при добавлении к азоту 1–3% кислорода формируемые слои, как показали спектраль-

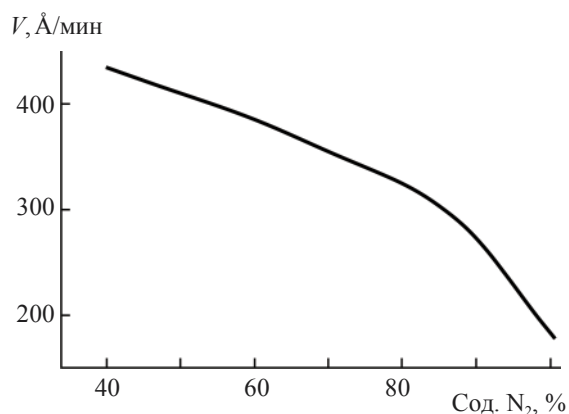


Рис. 3. Зависимость скорости роста пленок AlN  $V$  от содержания  $N_2$  в смеси  $Ag + N_2$ .

ные исследования, состояли большей частью из оксинитрида алюминия  $AlN_xO_y$  с различным отношением  $y/x$ .

При увеличении содержания кислорода до 10% полученные слои фактически представляли собой оксид алюминия. Эти результаты указывают на необходимость, во-первых, хорошей предварительной откочки вакуумной камеры для получения равномерных по составу слоев нитрида алюминия и, во-вторых, “тренировки” мишени перед нанесением слоев для очистки ее от оксидов.

При увеличении мощности разряда до максимального и стабильного значения показатель преломления осажденных пленок увеличивается. Исследовалась возможность увеличения скорости нанесения слоев за счет использования в составе рабочего газа аргона. Показатель преломления пленок повышался до 1,8, но значительно увеличивалось поглощение в коротковолновой части спектра. При уменьшении содержания аргона в рабочем газе до 10% показатель преломления увеличивается до 1,95, поглощение уменьшается. Скорость нанесения уменьшается незначительно. В зависимости от используемых параметров технологического процесса были получены пленки  $AlN$  с показателем преломления от 1,46 до 1,95. Самые качественные пленки без поглощения получены при нанесении слоев в атмосфере чистого азота при максимальной мощности распыления (0,6 кВт).

### **Использование пленок $AlN$ в оптическом приборостроении**

Разработанные покрытия на основе  $AlN$  использовались для изготовления устойчивых к внешним условиям цветных зеркал и тонированных покрытий. Выбранной конструкцией цветных зеркал является трехслойная МД интерференционная система, представляющая собой отражающий интерференционный фильтр типа Фабри–Перо, состоящий из полупрозрачного металлического слоя, разделительного слоя диэлектрика и непрозрачного металлического слоя. Цвет зеркал изменяется в зависимости от толщины среднего слоя. Выполнены точные расчеты цветности, количественно определяющие цвет зеркал в стандартных системах МКО-31 и CIE Lab для трехслойных МД зеркал, нанесенных на подложку из стекла К8 в последовательности:

1-й слой – непрозрачная пленка алюминия,

2-й слой – пленка нитрида алюминия с геометрической толщиной  $d$ , изменяющейся от 100 до 610 нм;

3-й слой – полупрозрачная пленка алюминия, титана или никеля толщиной 6 нм.

Зеркала с полупрозрачным слоем из титана и никеля менее чувствительны к изменению источника освещения по сравнению с алюминиевыми зеркалами. Разработана методика расчета цветности стекол, тонированных МД покрытиями, которые получили в последнее время широкое распространение. При этом может оцениваться цвет отражения и цвет пропускания стекол с внутренней и наружной сторон.

### **Выводы**

В соответствии с выполненными теоретическими расчетами [23] в лабораторных условиях были изготовлены экспериментальные образцы цветных металлодиэлектрических зеркал. Образцы изготавливались методом магнетронного и реактивного магнетронного распыления. Для получения диэлектрических слоев использовалась бинарная мишень из алюминия и нитрида алюминия. Рабочий газ – смесь аргона и азота. Разработанные покрытия рекомендованы для нанесения на крупногабаритные стекла на поточных линиях магнетронного распыления и могут использоваться для остекления зданий, транспорта, создания оригинальных эффектных интерьеров.

В оптическом приборостроении пленки нитрида алюминия могут использоваться при изготовлении металлодиэлектрических фильтров, поскольку процесс полностью может осуществляться методом магнетронного распыления. Разработка узкополосных отражательных фильтров позволит реализовать новые системы отображения оптической информации, а также дополнительные функции в оптико-электронных системах наблюдения.

В последнее время возрос интерес к многоспектральным оптическим покрытиям, работающим в видимой и ИК областях спектра. В настоящее время такие покрытия изготавливают с помощью токопроводящих покрытий, спектральные и, особенно, эксплуатационные параметры которых не вполне удовлетворяют приборостроителей. В нашей работе показана возможность создания пленок нитрида алюминия с различными показателями преломления и плавным изменением поглощения в слоях. Как показывают расчеты, именно использование сочетания оптических и электропроводных свойств пленок  $AlN$  делают их чрезвычайно перспективными для изготовления многоспектральных покрытий.

### *ЛИТЕРАТУРА*

1. Fischer A. Verfahren zur Herstellung und Dotierung von Aluminiumnitrid-kristallen // Pat. FRG N 1128410. 1962.

2. *Hutton H.R.* Piezoelectric Device Utilizing Aluminum Nitride // Pat. USA N 3090876. 1963.
3. *Witzke H.D.* Ein Beitrag zur orientiren Abscheidung halbleitender Verbindungen aus der Dampfphase am Beispiel  $\text{AlN-Al}_4\text{C}_3$  // Z. phys. Chem. 1962. V. 221. № 3–4. P. 253–263.
4. *Fichter F.* Über Aluminiumnitrid // Z. Anorg. Allgem. Chem. 1907. V. 54. P. 322–327.
5. *Wolf J.* Über Darstellung von Aluminiumnitrid aus den Element // Z. Anorg. Allgem. Z. Anorg. Allgem. Chem. 1913. V. 83. P. 159–162.
6. *Tiede E., Thimann M., Sensse K.* Über phosphoreszenzfähiges, durch Siliciumaktiviertes Aluminiumnitrid // Ber. 1928. V. 61. P. 1568–1573.
7. *Renner T.* Über Aluminiumnitrid // Z. Anorg. Allgem. Chem. 1959. V. 298. P. 22–25.
8. *Warren J.W.* Measurement of Appearance Potentials of Ions Produced by Electron Impact using a Mass Spectrometer // Nature. 1950. V. 165. P. 810–811.
9. Энергии разрыва химических связей. Потенциалы ионизации и сродство к электрону. Справочник / Под ред. акад. В.Н. Кондратьева. М.: Наука, 1974. С. 227.
10. *Кутюлин С.А., Степанов И.В., Бойкин Н.И.* Влияние ультрафиолетового облучения на процесс кристаллизации пленок нитрида и окиси алюминия, получаемых вакуумтермическим испарением // Электроника. Сер. Полупроводниковые приборы. ИСЛ № 001628. 1971. С. 1–5.
11. *Степанов И.В., Кутюлин С.А., Антонов М.И., Тепман Г.П.* Исследование процессов получения и применения диэлектрических пленок на основе нитрида алюминия // Методы получения, свойства и применение нитридов. Сб. трудов. Киев, Изд.ИПМ АН УССР, 1972. С. 201–208.
12. *Миллер В.Т., Первеев А.Ф.* Устройство для ионной очистки подложек полировки слоев // Оптический журнал. 1993. № 2. С. 72–75.
13. *Стенуро А.В., Туровская Т.С., Муранова Г.А., Первеев А.Ф.* Влияние ионной обработки подложек на начальные стадии роста металлических пленок // ОМП. 1983. № 11. С. 30–33.
14. *Первеев А.Ф.* Ионная обработка оптических материалов и покрытий // Труды ГОИ. 1983. Т. 52. В. 186. С. 58–74.
15. *Song Z.R., Yu Y.H., Zou S.C., Zheng Z.H., Shen D.S., Luo E.Z., Xie Z., Sundaravel B., Wong S.P., Wilson I.H.* Simulation and characterization on properties of AlN films for SOI application // Thin Solid Films. 2004. 459(1–2). P. 41–47.
16. *Kok-Wan Tay, Cheng-Liang Huang, Long Wu, Meng-Shan Lin.* Performance Characterization of Thin AlN Films deposited on Mo Electrode for Thin-Film Bulk Acoustic-Wave Resonators // Jap. J. Appl. Phys. Pt. 1. 2004. V. 43(8A). P. 5510–5515.
17. *Iborra E., Olivares J., Clement M., Vergara L., Sanz-Hervas A., Sangrador J.* Piezoelectric properties and residual stress of sputtered AlN Thin films for MEMS applications // Sensors and Actuator. A: Physical. 2004. V. 115 (2–3). 3SPEC. 501–507.
18. *Martin P.J., Macleod H.A., Netterfield R.P., Pacey C.G., Sainty W.G.* Ion-beam-assisted deposition of thin films // Appl. Opt. 1983. V. 22. № 1. P. 178–184.
19. *Chang Kwon Hwangbo, Linda J. Lingg, John P. Lehan, H. Angus Macleod, John L. Makous, Sang Yeol Kim.* Ion assisted deposition of thermally evaporated Ag and Al films // Appl. Opt. 1989. V. 28. № 14. P. 2769–2777.
20. *Данилин Б.С., Сырчин В.К.* Магнетронные распылительные системы. М.: Радио и связь, 1982. 72 с.
21. *Моррисон С.* Химическая физика поверхности твердого тела. М.: Мир, 1980. 488 с.
22. *Хобсон П.Дж.* Физическая адсорбция. М.: Мир, 1977. В. 1. С. 152–188.
23. *Михайлов А.В., Муранова Г.А., Смирнов Н.Н.* Определение колориметрических параметров и оптимизация конструкции цветных зеркал на основе металлodieлектрических интерференционных систем // Оптический журнал. 2001. Т. 68. № 8. С. 30–43.