

значительно меньшие значения, чем при шлифовании кругом; МР-жидкость автоматически приспосабливается к форме обрабатываемой поверхности, копируя ее.

Управляемый с помощью ЭВМ, магнито реологический процесс позволил производить обработку поверхности с точностью 10..100 нм, и снял многие ограничения, присущие обычным видам финишной обработки [1]. Уникальные характеристики данного метода, сделали его наиболее эффективным при отделочной обработке оптики, входящей в состав приборов навигации, медицинского оборудования, военной техники (прибор ночного видения, инфракрасный бинокль и т.п.) и т.д.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Kordonski, W.I. Magnetorheological finishing / W.I. Kordonski // International Journal of modern physics B, Vol. 10, 1996.
2. Furst, E.M. Micromechanics of Magnetorheological Suspensions . E.M. Furst // Physical Review E. – Vol. 61, № 6. – 2000. – P. 6732–6739.
3. Kordonski, W. Static Yield Stress in Magnetorheological Fluid / W. Kordonski // Int. J. of Modern Physics B, Vol. 15, Nos. 6 & 7, 2001. – P. 1078-1084.

УДК 621.5

Сергеева А.Г.

### **ВЛИЯНИЕ ИОННОГО АССИСТИРОВАНИЯ НА ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ОПТИЧЕСКИХ ПОКРЫТИЙ**

*БНТУ, г. Минск*

*Научный руководитель: Бабук В.В.*

Одной из важнейших проблем вакуумной технологии оптических покрытий является повышение эксплуатационных характеристик, в том числе механической прочности получаемых пленок. В последние годы рядом авторов показано, что бомбардировка растущей пленки ионами (или нейтральными молекулами) инертного или реактив-

ного газа вызывает протекание в районе бомбардировки ряда процессов, которые, в конечном счете, приводят к изменению свойств пленок.

Использование ионного ассистирования (ИА) совместно с традиционными методами вакуумного нанесения тонких пленок позволяет получить высокую адгезию пленок к подложкам, что дает возможность, расширить комбинации материалов подложки и покрытий, обеспечивающих высокие эксплуатационные характеристики.

Надежность таких покрытий зависит от особенностей адгезионного взаимодействия на границе раздела покрытие-основа. Адгезионная прочность соединения достигается созданием протяженного переходного слоя, в котором обеспечивается непрерывное изменение структуры и свойств материала.

Эффективным способом формирования такого слоя является ионно-лучевая обработка покрытия на начальном этапе его формирования, когда длина пробега ускоренных ионов превышает толщину пленки. В результате имплантации и ионно-лучевого перемешивания может быть сформирован приповерхностный слой с изменяющимся по глубине содержанием атомов осаждаемого материала.

Одним из факторов увеличения адгезии вследствие воздействия ионного пучка на поверхность подложки является очистка от адсорбированных загрязнений и травление тонкого поверхностного слоя. Другим фактором является имплантация атомов образующейся пленки вглубь подложки в результате бомбардировки высокоэнергетическими ионами и нейтральными атомами. Глубина имплантации в зависимости от энергии может достигнуть 20..50 Å. Таким образом, благодаря ионному облучению возможно образование переходного диффузионного слоя между подложкой и пленкой.

Эксперименты показали, что ИА в той или иной степени снижает величину структурной составляющей напряжений в пленке.

Ионное ассистирование, как правило, увеличивает адгезию пленок к подложке, уменьшает внутреннее напряжение. Однако, если в полученном без ИА многослойном покрытии упругие составляющие внутреннего напряжения каждого слоя в какой-то степени компенсируют друг друга, то применение ИА может существенно изменить взаимокompенсацию напряжений.

Из большого числа теоретически рассчитанных инструкций для просветления деталей из поликристалла ПО-4 выбраны конструкции на основе следующих материалов:  $\text{BiF}_3$ ,  $\text{YF}_3$ ,  $\text{ZnS}$ ,  $\text{PbF}_2$ . Для просветления деталей из германия в области спектра 8..14 мкм выбрано покрытие, состоящее из  $\text{ZnS}$ ,  $\text{Ge}$  и  $\text{YF}_3$ .

Практически для всех исследованных покрытий наблюдалось увеличение микротвердости, что обусловлено уплотняющим воздействием ионного пучка. Соответственно отмечается и увеличение показателей преломления слоев, полученных методом ИА (на 0,03..0,1 в диапазоне 8..14 мкм). При этом не зафиксировано какого-либо изменения поглощения света в ИК области спектра в пленках, полученных с ИА, по сравнению со слоями, нанесенными без ионного сопровождения.

Микротвердость фторидных пленок в результате применения ИА увеличивается, причем также наблюдается зависимость микротвердости от технологических параметров процесса.

Аналогичные по качеству, но менее выраженные зависимости механических характеристик пленок от технологических факторов, наблюдались у фторидов свинца и иттрия. Результаты исследований приведены в таблице 1.

Адгезионная прочность определялась методом царапания алмазным наконечником со сферической рабочей частью диаметром 60 мкм и выражалась через работу, затрачиваемую на отслоение покрытия с единицы площади поверхности. Микротвердость покрытий измерялась стандартизированным методом вдавливания бицилиндрического

алмазного наконечника, при этом измерялись размеры восстановленного отпечатка, оставленного индентором под нагрузкой 2 г.

Износостойкость оценивалась по результатам истирания образцов в наклонно-вращающемся барабане с песком. За меру износостойкости принималось минимальное количество оборотов барабана вызывающее повреждение поверхности покрытия, фиксируемое с помощью микроскопа.

Таблица 1 – Сравнительные характеристики прочности просветляющих покрытий, полученных традиционным способом и с использованием ионного ассистирования

Конструкция покрытия	Подложка	Адгезия, Дж/см <sup>2</sup>	Микротвердость, кгс/мм <sup>2</sup>	Износостойкость, тыс. об
PbF <sub>2</sub> – s	ПО-4	2-4	60	6
PbF <sub>2</sub> – s *	ПО-4	4-8	90	8
BiF <sub>3</sub> – s	ПО-4	3-6	100	10
BiF <sub>3</sub> – s *	ПО-4	8-12	250	10
BiF <sub>3</sub> –s–YF <sub>3</sub> – s–YF <sub>3</sub> –s– YF <sub>3</sub> –s	ПО-4	1-3	200	3-5
BiF <sub>3</sub> – ZnS– YF <sub>3</sub> – ZnS– YF <sub>3</sub> – ZnS– YF <sub>3</sub> *	ПО-4	1-4	240	7-9
ZnS– Ge– ZnS–YF <sub>3</sub> – ZnS–YF <sub>3</sub>	Ge	0,3-0,7	420	5
ZnS– Ge– ZnS–YF <sub>3</sub> – ZnS–YF <sub>3</sub> *	Ge	0,5-1,2	480	7-8

Примечание: s – тонкий слой YO<sub>3</sub>, не влияющий на спектральные характеристики покрытия; \* – покрытие нанесено с ионным ассистированием.

Исследованные просветляющие покрытия обеспечивают среднее отражение в диапазоне 8–14 мкм не более 1,5 % и среднее пропускание не менее 93 %, при этом в диапазоне 8–11 мкм среднее пропускание составляет не менее 96 %. Механическая прочность просветляющих покрытий

соответствует стандартизированной «нулевой» группе прочности, адгезионная прочность  $A = 0,5 \text{ Дж/см}^2$ , микротвердость – не менее  $250 \text{ кгс/см}^2$ . Покрытия выдерживают воздействие температур в диапазоне  $-196 \dots +300 \text{ }^\circ\text{C}$  без изменения адгезионной прочности и являются влагостойкими.

Полученные результаты показывают, что ИА является эффективным технологическим методом, позволяющим улучшать эксплуатационные характеристики большинства оптических покрытий и обеспечивающим расширение возможностей тонкопленочной технологии.

УДК 621.5

Соловей И.А.

## **МОДЕРНИЗАЦИЯ ИОННОГО ИСТОЧНИКА КАУФМАНА**

*БНТУ, г. Минск*

*Научный руководитель: Бабук В.В.*

Ионные источники – устройства для получения направленных потоков ионов. Ионные источники применяются в ускорителях, масс-спектрометрах, ионных микроскопах, установках разделения изотопов, ионных ракетных двигателях.

Существует несколько способов генерации ионных пучков, однако наиболее перспективный способ основан на извлечении ионов из плазмы.

Основными конструктивными элементами плазменных источников ионов являются: разрядная камера; катодный узел; ионно-оптическая система формирования пучка; магнитная система (в источниках с магнитным полем) система подачи рабочего вещества; вакуумная система; система электропитания; система контроля и управления.

Технические возможности ионно-лучевой установки во многом определяются типом ионного источника.

Назначением каждого источника является эффективное сообщение нейтральным атомам и молекулам вещества