

# ТЕЗИСЫ ДОКЛАДОВ

## ОГЛАВЛЕНИЕ

### СЕКЦИЯ № 1

#### ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ И ПРАКТИЧЕСКИЕ ИННОВАЦИОННЫЕ РАЗРАБОТКИ В ОБЛАСТИ ВАКУУМНЫХ ОПТИЧЕСКИХ ТЕХНОЛОГИЙ

Азарова В.В.	<b>Прецизионные оптические поверхности и лазерные зеркала, их метрология и применение</b>	8
Абдулкадыров М.А. Азербайев А.А. Баландин В.Ю. Белоусов С.П. Патрикеев В.Е. Семенов А.П. Шаров Ю.А.	<b>Вакуумная установка для ионно-лучевой обработки поверхностей крупногабаритных оптических деталей</b>	10
Телеш Е.В. Касинский Н.К.	<b>Формирование оптических покрытий прямым осаждением из ионных пучков</b>	13
Томаль В.С. Касинский Н.К. Иванов И.А. Мисник И.В.	<b>Исследование процессов формирования структуры вакуумных конденсатов в среде технологического газа</b>	15
Иванов И.А. Мисник И.В.	<b>Применение метода пробной частицы к моделированию процессов нанесения вакуумных оптических покрытий</b>	17
Телеш Е.В. Достанко А.П.	<b>Применение вторичного разряда в ускорителе с анодным слоем для формирования оптических покрытий из диоксида кремния</b>	19



Телеш Е.В.  
Ширипов В.Я

Сеник Б.Н.  
Тарасов А.П.

Коротких А.В.  
Большаков А.Д.

Горшков В.А.  
Кузнецов В.Н.  
Сальникова Л.Ю.  
Щенникова Т.И.

Гайнутдинов И.С.  
Азаматов М.Х.  
Нагимов И.Х.  
Хасанов А.М.  
Кольцов А.Ю.

Гайнутдинов И.С.  
Сабиров Р.С.  
Азаматов М.Х.

Гайнутдинов И.С.  
Гусев А.Г.  
Кольцов А.Ю.  
Хасанов А.М.

Савицкий А.М.  
Гусакова М.Б.  
Круглик А.А.  
Лопатин А.И.  
Сокольский М.Н.

**Формирование алмазоподобных покрытий** 21

**Применение вакуумных технологий для изготовления нетрадиционных оптических элементов высокой точности** 23

**Практические результаты нанесения оптических покрытий с использованием высоковакуумной напылительной установки «Sygus Pro 1110», фирмы «Leybold Optics», Германия** 25

**Технология автоматизированного формообразования методом ионно-лучевой обработки** 28

**Разработка светосильных перестраиваемых узкополосных фильтров на видимый и ИК спектральные диапазоны** 30

**Оптические покрытия для современных оптико-электронных приборов** 33

**Исследование влияния краевых эффектов на точность границ многозонных интерференционных покрытий** 36

**Технологические аспекты изготовления многозонных интерференционных светофильтров для космических телескопов дистанционного зондирования Земли** 40



Ширипов В.Я.

Хохлов Е. А.  
Мысливец А.С.  
Розель П.А.

Котов Д.А.  
Хохлов Е.А.  
Войтулевич Д.М.  
Турбан А.А.

Артамонов А.М.

Войтулевич Д.М.  
Хисамов А.Х.  
Хохлов Е.А.

Чекан Н.М.  
Акула И.П.  
Логуновская Н.В.

Жиркевич С.В.

Годун Д.В.  
Достанко А.П.  
Бордусов С.В.

Годун Д.В.  
Достанко А.П.

Современное состояние и перспективы развития вакуумных технологий и оборудования для формирования оптических структур 41

Ключевые подходы и особенности технологии формирования прецизионных высокостабильных тонкопленочных покрытий для оптического назначения 43

Технологический комплекс "Аспира" (варианты) для изготовления элементов прецизионной оптики 45

Серия вакуумного оборудования "Ortus" для получения оптических структур методом электронно-лучевого и резистивного испарения с ионным ассистированием 47

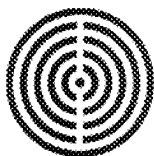
Перспективная базовая платформа оптических вакуумных напылительных установок Advanced Optical Coater производства компании Изовак 49

Светопоглощающие покрытия на основе алмазоподобных пленок 51

Оборудование для просветления германия алмазоподобными покрытиями (АПП) импульсно-дуговым методом с лазерной инициацией дуги 53

Модуль токовой защиты мощного импульсного источника электропитания предназначенного для работы в среде особо нестабильных нагрузок 55

Аппаратно-диагностический комплекс формирования низкотемпературной неравновесной плазмы для создания тонкопленочных структур 57



Кривецкий К.Н.  
Лисовский Т.С.

**Универсальный сканирующий спектрометр PHOTON  
RT для определения оптических свойств материалов** 59

Томаль В.С.,  
Касинский Н.К.,  
Демидович Т.И.,  
Иванов И.А.

**Анализ состава остаточной атмосферы в вакуумной  
камере различных установок** 61

Гапоненко С.В.  
Кожух С.Г.  
Малевиц Н.А.  
Степкова С.А.

**Трехполосные селективные оптические фильтры** 63

Дергай Н.Ф.  
Кондалева И.А.

**Опыт эксплуатации встраиваемой системы контроля  
оптических характеристик IRIS 0411на вакуумном  
участке НТЦ "ЛЭМТ" БЕЛОМО** 65

## СЕКЦИЯ 2

**ТЕХНОЛОГИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ И КОНТРОЛЯ  
ОПТИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ, ИСПОЛЬЗУЕМОЕ  
СОВРЕМЕННОЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ ОБОРУДОВАНИЕ** 68

Волосач Ю.П.

**Основные направления развития оптического произ-  
водства ОАО " ММЗ им. С.И. Вавилова - управля-  
ющая компания холдинга "БелОМО"** 69

Глеб Л.К.  
Городкин Г.Р.

**Магнетогидродинамическое полирование оптических  
поверхностей** 72

Глеб Л.К.  
Дрозд Е.С.  
Городкин Г.Р.

**Оценка качества поверхности оптических деталей ме-  
тодом атомно-силовой микроскопии** 73

Томаль В.С.  
Касинский Н.К.  
Дорошкевич А.Г.  
Ратомский В.В.

**Современное оборудование для оптических цехов** 75



Боровский Г.В.

**«ОАО «ВНИИИнструмент» - Центр ультрапрецизионного станкостроения и уникальных технологий наноточной обработки**

78

Горшков В.А.  
Невров А.С.  
Савельев А.С.

**Технология автоматизированного формообразования асферических, в том числе внеосевых, поверхностей оптических элементов для оптико-электронных систем наземного и космического базирования**

80

Смирнов А.М.

**Технология очистки оптических деталей с применением жидкостей на основе гидрофторэфиров**

83

Стрелкова Т.А.  
Сауткин В.А.

**Стохастический подход оценки качества оптического стекла**

85

Левинок В.Е.  
Михайлов А.В.

**Отечественные оптические клеи**

87

Семенов А.П.  
Абдулкадыров М.А.  
Белюсов С.П.  
Патрикеев В.Е.  
Придня В.В.

**Методы изготовления и контроля уникальных крупногабаритных астрономических зеркал телескопов в ОАО ЛЗОС**

89

Григорьев В.И.

**Системы ЧПУ "Микрос" для станков всех технологических групп**

91

Новиков Н.В.,  
Филатов Ю.Д.,  
Пашенко Е.А.

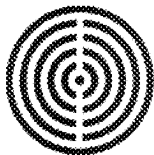
**Перспективы создания инструмента для полирования прецизионных оптических поверхностей**

95

Филатов Ю.Д.  
Ветров А.Г.  
Сидорко В.И.  
Филатов А.Ю.  
Ковалев С.В.

**Алмазно-абразивная обработка оптических элементов из монокристаллического карбида кремния**

97



Ермолаев А.А. Головач Т.Ю. Радюк В.В.	<b>Проблемные вопросы прецизионной обработки серийных изделий из лейкосапфира</b>	99
Дежкунов Н.В. Красовский В.А. Федоринчик М.П. Шаплько В.В.	<b>Динамика развития кавитационной области в высокочастотном ультразвуковом поле</b>	101
Дежкунов Н.В. Федоринчик М.П. Котухов В.А. Томаль В.С.	<b>Спектрально-акустический метод контроля режима работы ультразвуковых установок</b>	103
Томаль В.С. Касинский Н.К. Ратомский В.В.	<b>Анализ выбора оборудования для систем управления станков с ЧПУ для обработки оптических деталей</b>	105
Дежкунов Н.В. Ланин В.Л. Котухов А.В. Томаль В.С.	<b>Повышение активности кавитации и качества очистки оптических поверхностей при обработке в комбинированном ультразвуковом поле</b>	107
Воробей А.М.	<b>Емкостной преобразователь встречно-штыревого типа в медицинской диагностике</b>	109
Вайнштейн И.В. Подобрянский А.В. Тюрин Н.В.	<b>Создание ультрапрецизионного оборудования с ЧПУ для обработки оптических деталей</b>	111
Арико О.В.	<b>Изготовление оптических сеток и шкал с использованием вакуумного нанесения хрома</b>	113

# **Секция 1**

## **Теоретические исследования и практические инновационные разработки в области вакуумных оптических технологий**

# ПРЕЦИЗИОННЫЕ ОПТИЧЕСКИЕ ПОВЕРХНОСТИ И ЛАЗЕРНЫЕ ЗЕРКАЛА, ИХ МЕТРОЛОГИЯ И ПРИМЕНЕНИЕ

АЗАРОВА В.В.

ОАО НИИ "Полюс" им. М.Ф.Стедьмаха, Россия

Многочисленные применения кольцевых газовых лазеров (КГЛ) в системах управления движением различных объектов<sup>1</sup> и повышение требований к точности этих систем приводит к необходимости более глубокого исследования КГЛ и оптических элементов, входящих в их состав. Представляет большой научный и практический интерес исследование влияния качества оптических поверхностей и тонких пленочных слоев на характеристики многослойных интерференционных диэлектрических отражающих покрытий зеркал, в частности величин рассеяния, поглощения, фазовой анизотропии резонаторных зеркал и их связь с характеристиками лазерного гироскопа.

В работе сформулированы требования к прецизионным оптическим поверхностям и лазерным зеркалам, применяемым в лазерной гироскопии. Обсуждаются характеристики и статистические параметры прецизионных оптических поверхностей. Сопоставляются результаты измерений, полученных разными метрологическими методами, а именно: методом атомно-силовой микроскопии (AFM), светового и рентгеновского рассеяний (TIS, ARS, XRS) и методом низко когерентной интерферометрии (WLI) с помощью функции спектральной плотности мощности (PSD-функции). Функция спектральной плотности мощности дает полную статистическую информацию о распределении высот шероховатости по пространственным частотам. Общим критерием качества поверхности при этом является величина эффективной шероховатости  $\sigma_{\text{eff}}$  в заданном диапазоне пространственных частот. Величина коэффициента отражения зеркал и потерь на интегральное рассеяние зависит от величины шероховатости  $\sigma_{\text{eff}}$  их подложек, но не только.

В работе анализируется связь между профилем поверхности многослойного покрытия и поверхности подложки зеркала. Показано, что величина интегрального рассеяния поверхности  $S(\lambda)$  пропорциональна квадрату величины ее шероховатости  $\sigma$ . Если поверхность представляет собой многослойное зеркальное покрытие, то при полной корреляции между слоями межслойное изменение  $\sigma$  будет минимальным и наблюдаемая величина рассеяния света будет близкой к определяемой шероховатостью поверхности подложки. Не идеальность процесса нанесения слоев и условий окружающей среды при этом, недостаточная чистота материалов мишеней при нанесении слоев могут привести к неполной межслойной корреляции. При частичной корреляции между слоями,  $\sigma$  будет меняться с каждым дополнительным слоем, и шероховатость будет зависеть не только от качества поверхности подложки, но и от числа слоев. Это, в свою очередь, приведет к увеличению потерь на рассеяние многослойным интерференционным зеркалом. Из статистического анализа качества лазерных зеркал, проведенного по приблизительно 1000 зеркалам и представленного на рисунке видно, что рассеяние на зеркалах определяется не только качеством подложек, но при шероховатости близкой к 0,1 нм качество зеркал значительно улучшается.



## Статистический анализ качества лазерных зеркал по параметру интегральное рассеяние



В работе также обсуждаются результаты анализа поверхностей и характеристик тонких однородных и градиентных пленок при использовании методов лазерной и спектральной эллипсометрии. Проведенное в работе исследование синтеза тонких пленок многослойных интерференционных покрытий лазерных зеркал и оптимизация режимов их изготовления позволило уменьшить потери резонаторов на поглощение в несколько раз.

В результате проведенного анализа в работе были сделаны следующие выводы: - Метод некогерентной интерферометрии (WLI) является наиболее эффективным метрологическим методом для контроля шероховатости прецизионных оптических поверхностей подложек лазерных зеркал. - Зеркала, полученные путем ионно-лучевого напыления на сверх гладкие поверхности подложек имеют минимальные потери и минимальную величину рассеяния назад в моду резонатора.

Список литературы:

1. В.В. Азарова, Ю.Д. Голяев, В.Г. Дмитриев. Кольцевые газовые лазеры с магнитооптическим управлением в лазерной гироскопии. Квантовая Электроника, 30, 96 (2000).

# ВАКУУМНАЯ УСТАНОВКА ДЛЯ ИОННО-ЛУЧЕВОЙ ОБРАБОТКИ ПОВЕРХНОСТЕЙ КРУПНОГАБАРИТНЫХ ОПТИЧЕСКИХ ДЕТАЛЕЙ

АБДУЛКАДЫРОВ М.А., АЗЕРБАЕВ А.А., БАЛАНДИН В.Ю., БЕЛОУСОВ С.П.,  
ПАТРИКЕЕВ В.Е., СЕМЕНОВ А.П., ШАРОВ Ю.А.

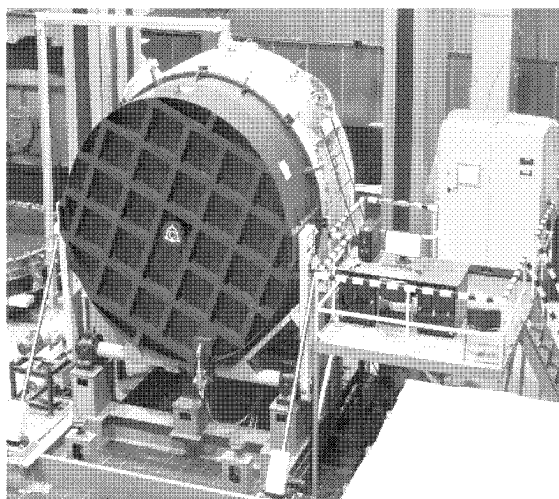
ОАО "Лыткаринский завод оптического стекла", г. Лыткарино, Московской области, Россия

E-mail: lastro@lzos.ru

Для обработки поверхностей прецизионных оптических деталей в настоящее время широко используется технология и оборудование для автоматизированного формообразования с использованием малого полирующего инструмента. Такая технология активно используется в ОАО Лыткаринский завод оптического стекла и позволила изготовить целый комплекс высокоточной оптики, зеркал астрономических и космических телескопов диаметром до 4 м, как для российских, так и для зарубежных изготовителей телескопов.

В настоящее время для изготовления крупногабаритной астрономической и космической оптики широко используется метод программноуправляемой финишной доводки рабочих поверхностей с использованием малого полирующего инструмента. Современные тенденции развития методов формообразования поверхностей оптических деталей выдвигают на передовые рубежи метод ионно-лучевой обработки (ИЛО). При контакте полирующего инструмента с поверхностью детали появляются значительные ошибки в краевой зоне при выходе его за край детали, поэтому задаются параметры световой области на рабочей поверхности. Метод ИЛО не имеет данного недостатка и особенно эффективен при обработке составных зеркал телескопов, состоящих, как правило, из шестигранных сегментов, объединенных в единое зеркало.

Подобные установки для обработки сегментов составных зеркал созданы во Франции (фирма SAGEM), в США (ИТТ), они успешно использовались при изготовлении составных главных зеркал телескопов Keck I и Keck II (США), GRANTECAN (Испания) и т.д.



*Рисунок 1.*  
*Установка "Луч-2,5"*

В ОАО "ЛЗОС" создана вакуумная установка для ИЛО поверхностей крупногабаритных оптических деталей (установка "Луч-2,5", рис. 1) диаметром до 2,5 м.

При ИЛО оптической детали происходит распыление атомов материала с поверхности детали направленным ионным пучком. Ионно-лучевая обработка позволяет получать поверхности с точностью формы по среднеквадратичному отклонению (RMS) до  $\lambda/100$  и микрошероховатостью по RMS не хуже 2 нм для оптических деталей вне зависимости от их конструктивного исполнения (линзы, зеркала, пластины, клинья), вида внешнего контура и формы поверхности (плоские, сферические и асферические).

Технические характеристики установки Луч-2,5:

Диаметр обрабатываемой детали: до 2,5 м.

Вес обрабатываемой детали: до 5,5 т.

Форма обрабатываемой поверхности: плоская, выпуклая и вогнутая (сферическая, асферическая).

Конфигурация внешнего контура детали: произвольная.

Достижимая точность формы поверхности по RMS: до  $\lambda/60$ .

Система перемещения ионного источника: 6-ти координатный гексапод.

Точность перемещений системы перемещения: линейная  $\pm 0,5$  мм, угловая  $\pm 1'$ .

Ионный источник: 2 источника Холловского типа с диаметрами пучка ионов 50 и 100 мм.

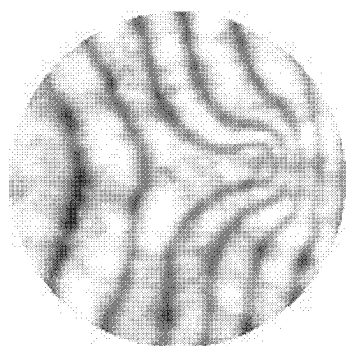
Рабочий газ: аргон, ксенон.

Откачная система: форвакуумные агрегаты на основе насосов Рутса и высоковакуумные турбомолекулярные насосы.

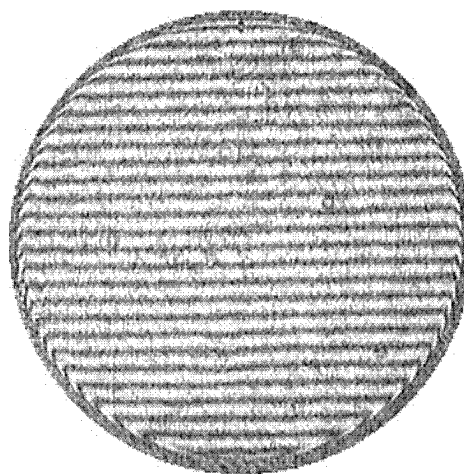
Разряжение в вакуумной камере: предельное -  $1 \cdot 10^{-3}$  Па, предварительное -  $4 \cdot 10^{-3}$  Па.

На стадии отладки технологического процесса выполнялись исследования процесса съема материала с поверхности детали и определение функций съема материала при различных режимах обработки. На рис. 2 представлена одна из интерферограмм профиля съема ионным источником с диаметром пучка 50 мм при распылении в течение 10 минут. Максимальный съем в центре пучка составляет  $\sim 0,9$  мкм.

Полученные экспериментальные профили съема для различных источников ИЛО использовались при моделировании и расчете сеансов программно-управляемого формообразования поверхности детали.



*Рисунок 2.*  
*Интерферограмма профиля съема*



*Рисунок 3.*  
*Интерферограмма обработанной поверхности*

На установке получены первые результаты по формообразованию оптических поверхностей деталей с использованием описанной методики. На рис. 3 представлена интерферограмма обработанной поверхности с СКО =  $\lambda/56$ .

В настоящее время проводится доработка и совершенствование узлов системы, выполняется отладка технологического процесса и программного обеспечения.

Созданная установка "Луч-2,5" позволяет достигать точности формы поверхности по RMS до  $\lambda/60$  для крупногабаритных оптических деталей диаметрами до 2,5 м при помощи ИЛО. Выполняются работы по отладке и совершенствованию системы ИЛО для достижения стабильных результатов обработки и обеспечения уверенного достижения формы поверхности с точностью формы по среднеквадратичному отклонению (RMS) до  $\lambda/100$  и микрошероховатостью по RMS не хуже 2 нм для оптических деталей вне зависимости от их конструктивного исполнения (линзы, зеркала, пластины, клинья), вида внешнего контура и формы поверхности (плоские, сферические и асферические).

---

# ФОРМИРОВАНИЕ ОПТИЧЕСКИХ ПОКРЫТИЙ ПРЯМЫМ ОСАЖДЕНИЕМ ИЗ ИОННЫХ ПУЧКОВ

ТЕЛЕШ Е.В.

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники

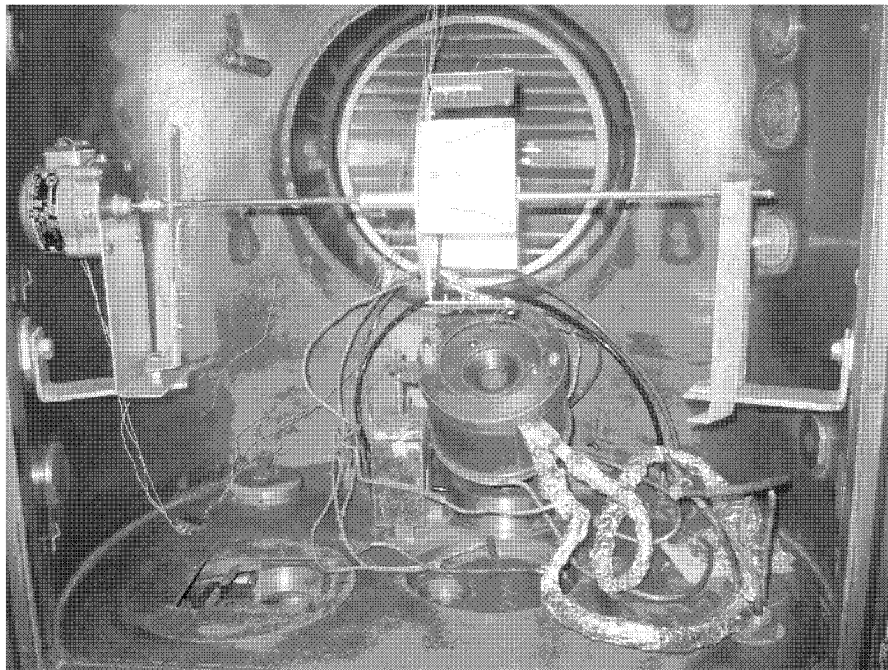
КАСИНСКИЙ Н.К.

РУП "Оптическое станкостроение и вакуумная техника"

Существующие традиционные методы формирования оптических покрытий, основанные на термическом испарении, ионном распылении, связаны с использованием дорогостоящих мишеней и материалов для испарения. Энергия осаждаемых на подложку атомов составляет 0,01-5 эВ, что не позволяет получать тонкопленочные покрытия с высокой адгезией и требуемой микроструктурой при низких температурах подложки. В последние годы интенсивно разрабатываются методы, основанные на нанесении покрытий из ионных потоков или пучков. Прямое осаждение из ионных пучков предполагает использования только рабочего газа, причем стоимость последнего намного ниже стоимости мишеней.

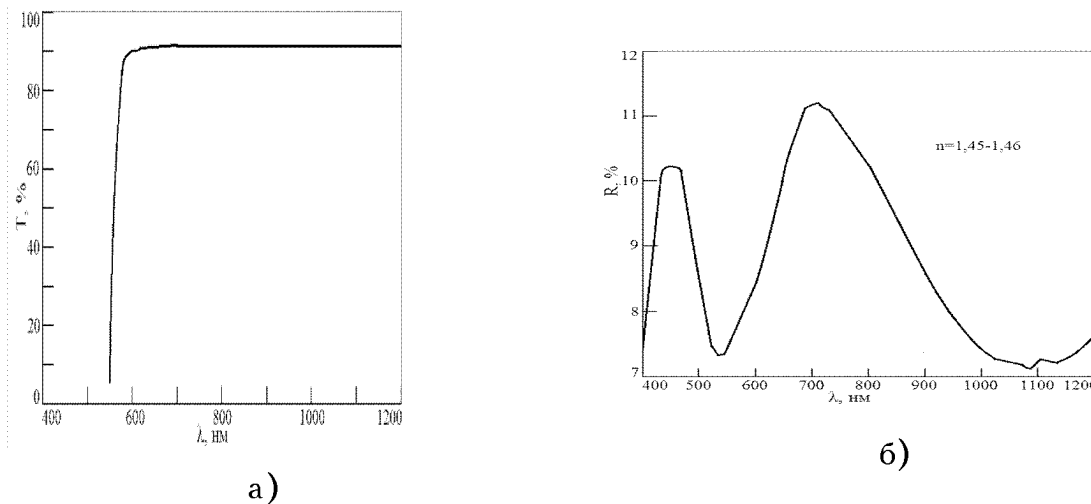
Весьма перспективным является метод нанесения покрытий с использованием торцевых холловских ускорителей (ТХУ). ТХУ позволяют формировать широкие пучки ионов с энергией 25-200 эВ и током пучка до 2 А. Ускорители могут быть как цилиндрические, так и протяженные, что обеспечивает высокую равномерность покрытий по толщине. ТХУ имеют простую конструкцию, надежны в эксплуатации, не требуют применения высоковольтного питания. В качестве пленкообразующих газов могут использоваться  $\text{SiH}_4$ ,  $\text{CH}_4$ ,  $\text{CF}_4$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{O}_2$ ,  $\text{N}_2$ , металлосодержащие газы и др. Это позволит синтезировать широкий ассортимент оптических покрытий.

Формирование покрытий из  $\text{SiO}_2$  проводили на модернизированной установке вакуумного напыления ВУ-1А, оснащенной ТХУ и каруселью подложкодержателей (рис. 1). В качестве рабочих газов использовались аргон высшей очистки, смесь моносилана с аргоном (5% $\text{SiH}_4$ +95% $\text{Ar}$ ), кислород и тетраэтоксисилан  $\text{Si}(\text{OC}_2\text{H}_5)_4$  (ТЭОС). Покрытия наносились на подложки из стекол К8, ТФ-5 и кремния. Остаточный вакуум в процессе нанесения не превышал значения  $2 \cdot 10^{-5}$  мм рт. ст. Покрытия наносились на неподвижную подложку. Режимы работы ионного источника были следующими: анодное напряжение - 75 -115 В; ток разряда - 4 - 8 А; ток эмиттера электронов - 12-13 А. Такие режимы способствовали горению стабильного разряда. Температура подложек составляла 323-423 К. Увеличение доли кислорода в рабочем газе приводило к некоторому снижению скорости нанесения. При давлении кислорода всего  $1,5 \cdot 10^{-4}$  мм рт.ст. покрытия были прозрачными в видимом диапазоне, что свидетельствует об эффективном протекании процессов окисления. Установлено также, что с ростом тока разряда происходит увеличение скорости нанесения. Средняя скорость составила 0,5 нм/с. Использование в качестве рабочего газа паров ТЭОС позволило резко увеличить скорость нанесения. Так, при рабочем давлении  $5 \cdot 10^{-3}$  мм рт. ст.; напряжении анода 100-125 В, токе разряда 2 -5 А были достигнуты скорости формирования 2,8-4,3 нм/с.



**Рисунок 1.**  
**Внешний вид подколпачного устройства установки ВУ-1А**

Установлено, что парциальное давление кислорода при формировании пленок  $\text{SiO}_2$  оказывает сильное влияние на пропускание до давления  $2 \cdot 10^{-4}$  мм рт.ст. Спектральная зависимость пропускания свидетельствует о высокой прозрачности полученных покрытий (рис. 2 а).



**Рисунок 2.**  
**Спектр пропускания (а) и отражения (б) пленки  $\text{SiO}_2$**

На рис. 2 б приведен спектр отражения пленки двуокиси кремния, нанесенной на стекло ТФ-5. По этой зависимости был определен показатель преломления для пленок  $\text{SiO}_2$ . Он составил 1,45-1,46, что соответствует коэффициенту преломления кварца, т.е. происходит полное окисление кремния.

Полученные покрытия прошли тест на адгезию с использованием отрыва липкой ленты. Исследование ИК спектров поглощения показало отсутствие поглощения группы ОН, что свидетельствует о плотной структуре покрытий.

# ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ФОРМИРОВАНИЯ СТРУКТУРЫ ВАКУУМНЫХ КОНДЕНСАТОВ В СРЕДЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ГАЗА

ТОМАЛЬ В.С., КАСИНСКИЙ Н.К., ИВАНОВ И.А., МИСНИК И.В.

РУП "Оптическое станкостроение и вакуумная техника",

Белорусский национальный технический университет, г. Минск, Республика Беларусь

Нанесение вакуумных оптических покрытий является важной технологической составляющей получения готового изделия с требуемыми эксплуатационными свойствами. Основной задачей на данном этапе является формирование покрытий с заданной структурой и составом.

Цель данной работы - это обобщение имеющихся экспериментальных результатов по исследованию процессов формирования структуры вакуумных покрытий из ионизированных потоков вещества и теоретическое обоснование механизма влияния технологического газа на структуру покрытий.

Формирование структуры и фазового состава вакуумно-плазменных покрытий протекает в равновесных температурных условиях. Для однокомпонентных покрытий, формируемых в условиях близких к равновесным, справедливы зонные модели Мовчана-Демчишина-Торнтон, что подтверждается результатами экспериментов. Однако наличие технологического газа показывает возможность получения новых структур покрытий без изменения температуры поверхности конденсации.

Результаты исследований D.M. Mattox и G. Kominiak показывают, что покрытия TiN, имеющие при низком ускоряющем потенциале (температура поверхности конденсации 200...250 °C) столбчатую структуру, при высоком ускоряющем потенциале (температура более 400 °C) формируют однородное плотное покрытие. Осаждаемые покрытия TiN имеют низкий уровень примесей, большая часть из которых локализуется на поверхности. Эти поверхностные примеси являются адсорбированной пленкой атомов технологического газа. Y. Igasaki и H. Mitsuhashi объясняют эти результаты действием увеличенной горизонтальной мобильности титановых атомов и ростом плотности плёнок. Однако J.E. Sundgren показал, что уменьшение мобильности атомов также может привести к уничтожению столбчатой структуры. В работах проф. Мрочека Ж.А. и соавторов показано, что для многокомпонентных покрытий получаемых осаждением металл (титан или цирконий или алюминий)-кремниевой плазмы в азоте характерна многофазность. Фазы, в образовании которых азот не участвует, образуются при всех значениях базового потенциала. Молекулы азота, при определенных условиях, накапливаются в покрытии и не образуют химических соединений с другими химическими элементами осаждаемого плазменного потока. Осаждение покрытий цирконий (титан)-кремний при низких давлениях азота ( $P$ )  $1...6 \cdot 10^{-1}$  Па не дает каких-либо отличий в структуре покрытия от структур других вакуумных конденсатов. Увеличение давления азота более 1 Па и при значениях ускоряющего потенциала -80...-150 В сопровождается прерыванием роста кристаллов и образованием "послойной" структуры покрытия.

Сопоставление результатов экспериментальных исследований состава и структуры по-

зволяет сделать предположение, что основной причиной образования "послойной" структуры является растворимый в покрытии азот и относительно низкая энергия ионов конденсирующейся плазмы, при которых отсутствуют условия образования химических соединений на основе азота. Азот, накапливаясь на поверхности растущего кристалла, приводит к изменению сил поверхностного натяжения  $d\gamma$  на границе роста кристаллов.

Изменение величины работы  $\omega$  затрачиваемой на образование дополнительной поверхности площадью  $d\sigma$ :  $\omega = \gamma_s(n) d\sigma$ . Учтем что поток молекул азота на поверхности основы составляет:  $J_{\text{азот}} = 3,5 \cdot 10^{22} \cdot p \sqrt{M_0 T}$ , где  $M_0$  - молекулярная масса азота;  $T$  - температура поверхности основы. Тогда уравнение поверхностного натяжения Гиббса:

$$J_{\text{азот}} = -\frac{1}{RT} \left( n \frac{d\gamma}{dn} \right), \text{ или } 3,5 \cdot 10^{22} \cdot p \sqrt{M_0 T} = -\frac{1}{RT} \left( n \frac{d\gamma}{dn} \right).$$

Для постоянных условиях формирования покрытий ( $P, T = \text{const}$ ):  $K \frac{dn}{n} = d\gamma$ , где  $K$  - постоянная, зависящая от давления, температуры и молекулярной массы. Интегрируя последнее уравнение и принимая начальную концентрацию примеси на поверхности растущего кристалла малой получим, что:  $\gamma_s = \gamma_{s0} - \ln C \cdot n^k$ , где  $C$  - константа интегрирования;  $k$  - показатель степени, учитывающий влияние давления и температуры, т.е. рост  $n$  на поверхности растущего кристалла приводит к уменьшению  $\gamma_s$ . Следствием является изменение термодинамических условий роста покрытия на ( $\gamma_0 + \gamma_i > \gamma_s$ ) и увеличение подвижности адсорбированных атомов его поверхности. Это приводит к выделению фазы, обогащенной одним из компонентов в виде прослойки и сформированной "послойной" структуры. Скорость изменения  $\gamma_s$  зависит от давления газа  $P$ . При низких давлениях газа образования послойной структуры может не наблюдаться.

Таким образом, формирование покрытий в вакууме из ионизированных потоков частиц имеет как общие черты с осаждением паровых потоков, так и некоторые различия. Эти различия связаны, в первую очередь, с возможностью управления энергией конденсирующихся частиц и их средней плотностью.

Применение технологического, химически активного, газа не всегда приводит к образованию в составе формируемых покрытий химических соединений. При низких давлениях атомы технологического газа не вступают в химическую реакцию с ионами плазменного потока и вытесняются на поверхность растущих кристаллов покрытия. Показано, что рост примеси на поверхности растущих зерен покрытия является наиболее вероятной причиной образования "послойной" структуры



# ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА ПРОБНОЙ ЧАСТИЦЫ К МОДЕЛИРОВАНИЮ ПРОЦЕССОВ НАНЕСЕНИЯ ВАКУУМНЫХ ОПТИЧЕСКИХ ПОКРЫТИЙ

ИВАНОВ И.А., МИСНИК И.В.

Белорусский национальный технический университет

Одной из традиционных областей применения вакуумных и вакуумно-плазменных покрытий является оптическая промышленность. Благодаря технологии вакуумных покрытий созданы различные оптические элементы, обладающие определёнными свойствами: зеркала, фильтры и линзы с заданным уровнем светопропускания. Свойства и функциональное назначение данных оптических элементов будут определяться составом, а также качеством нанесенного покрытия. Если состав покрытия будет задаваться материалом мишени, а также присутствующим в объеме вакуумной камеры технологическим газом, то качество сформированного покрытия будет определяться составом потока, особенностями его транспортировки через вакуумную камеру и взаимодействия с поверхностью изделия. Как правило, отработка таких технологических процессов является трудоемкой задачей. Для уменьшения объема производственно-лабораторных испытаний наиболее оптимальным представляется предварительный теоретический анализ процессов, протекающих в вакуумной камере. В связи с этим необходима расчетная модель, описывающая процесс транспортировки рабочего вещества от испарителя к поверхности конденсации.

Цель работы - разработка численного алгоритма метода пробной частицы для моделирования процессов нанесения вакуумных оптических покрытий с учетом парных взаимодействий частиц рабочего вещества с молекулами технологического газа в рабочем объеме вакуумной камеры.

Поток напыляемых частиц, сформированный вакуумным испарительным устройством состоит из нейтральных атомов или молекул, ионов, в ряде случаев, электронов. Кроме того, в объеме вакуумной камеры присутствуют хаотично перемещающиеся атомы и молекулы остаточного и/или технологического газа при давлении в пределах  $10^{-4} \dots 10^{-3}$  Па. В связи с этим, при моделировании процесса массопереноса в рабочем объеме вакуумной камеры, возникает необходимость рассмотрения вопросов рассеяния потока паров или ионов материала покрытия.

Для описания процессов осаждения парового или ионизированного потока в вакууме наиболее перспективно применение метода статистических вычислений. При столкновении ускоренного иона с атомом часть его кинетической энергии передается всему объему атома (упругое столкновение), а часть расходуется на изменение внутренних энергетических состояний (неупругое столкновение).

Для процессов неупругого взаимодействия в условиях нанесения вакуумно-плазменных покрытий наиболее характерны явления двойной ( $i+e \rightarrow a+h\nu$ ) и тройной ( $i+e+e \rightarrow a+e$ ) рекомбинации, в результате которых происходит образование возбужденных атомов. В условиях упругих взаимодействий величина энергии, теряемой заряженной частицей в

момент ее соударения, будет равна энергии, приобретаемой атомом:  $E = \mu \bar{W} \sin^2(\chi/2)$ , где  $\mu = 4m_1m_2/(m_1 + m_2)^2$  - приведенная масса;  $\bar{W}$  - средняя энергия налетающей частицы перед взаимодействием;  $\chi$  - угол рассеивания (между конечным направлением движения частицы и начальным).

Для моделирования процесса транспортировки частиц парового потока или ионов плазмы от источника к подложке был составлен следующий алгоритм. Исходной точкой траектории движения частицы является поверхность мишени. Процесс испарения идет в условиях, при которых можно считать, что на поверхности мишени все параметры усредняются. Для задания координаты начальной точки в сферической системе координат необходим угол  $\varphi = 2\pi\xi$  и радиус  $r = R_0\sqrt{\xi}$ , где  $\xi$  - случайное число в интервале  $[0,1]$ ,  $R_0$  - радиус катода. Далее переходим к выбору направления вектора скорости частицы, который будет определяться двумя углами:  $\psi = 2\pi\xi$  и  $\theta = \arcsin \sqrt{\xi}$ . Расстояние, пройденное частицей до столкновения, будет определяться длиной свободного пробега:  $\lambda = \lambda_0 \ln(1-\xi)$ , где  $\lambda_0$  - средняя длина свободного пробега. В точке столкновения частица будет менять направление вектора скорости. Новое направление вектора будет определяться двумя углами  $\Psi$  и  $\Phi$ , равномерно распределенными в интервале от 0 до  $\pi$ :  $\Phi = 2\pi\xi$   $\Psi = 2\pi\xi$ . После столкновения частицы процесс повторяется. Моделирование производится до момента попадания частицы (иона) на поверхность изделия, либо до момента пересечения частицей (ионом) геометрических границ вакуумной камеры. Далее расчет повторяется для следующей частицы. Результаты расчета позволяют получить осредненные параметры потока на поверхности конденсации, которые учитывают стохастический характер процессов, протекающих в объеме вакуумной камеры. В работе представлены результаты расчетов по предложенному алгоритму. Результаты статистического расчета сравнивались с расчетами по имеющимся теоретическим методикам, опирающимся на анализ геометрии потока.

В ходе численного моделирования процессов нанесения вакуумных оптических покрытий получены следующие основные результаты. Предложена методика позволяющая рассчитать изменение плотности потока у поверхности у поверхности конденсации с учетом геометрических размеров как изделия, так и испарителя. Разработана численная модель парных столкновений, позволяющая перейти от анализа массовых характеристик потока (изменение плотности по поверхности конденсации) к анализу пространственного распределения энергетических параметров потока (средняя энергия, средний заряд, угол падения частиц).

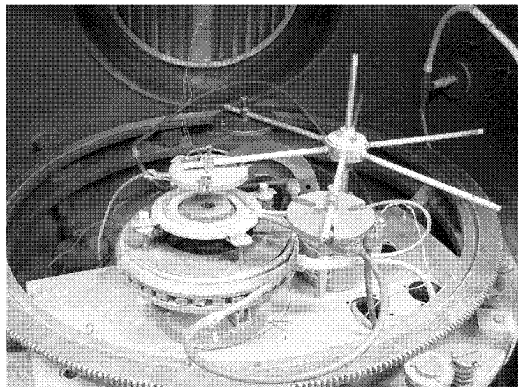
# ПРИМЕНЕНИЕ ВТОРИЧНОГО РАЗРЯДА В УСКОРИТЕЛЕ С АНОДНЫМ СЛОЕМ ДЛЯ ФОРМИРОВАНИЯ ОПТИЧЕСКИХ ПОКРЫТИЙ ИЗ ДИОКСИДА КРЕМНИЯ

ТЕЛЕШ Е.В., ДОСТАНКО А.П.

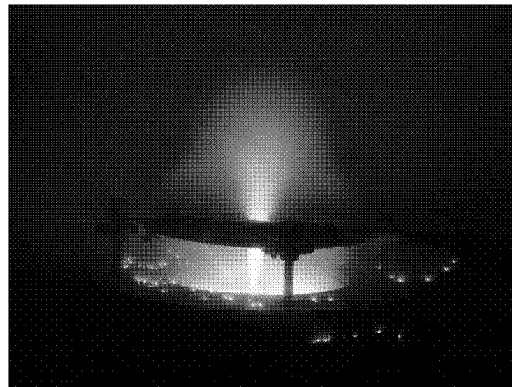
Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники

Новый метод нанесения тонких пленок посредством генерации потока ионов пленкообразующих газов из пучкового фокуса является перспективным для формирования оптических покрытий. Его суть заключается в том, при определенных условиях в ионном источнике на основе ускорителя с анодным слоем имеет место формирование зоны вторичного разряда. Зона этого разряда имеет форму слаборасходящегося пучка ионов. Для устранения воздействия первичного пучка ионов используется диафрагма, которая имеет по центру отверстие диаметром 8-10 мм.

Экспериментальные исследования проводили на модернизированной установке вакуумного напыления ВУ-1А. Внешний вид подколпачного устройства представлен на рис. 1 а, а полученный ионный пучок на рис. 1 б.



а)



б)

*Рисунок 1.*

*Внешний вид подколпачного устройства (а) и ионного пучка (б)*

В качестве рабочих газов использовались смесь моносилана с аргоном ( $5\%SiH_4+95\%Ar$ ) и кислород. Остаточный вакуум в процессе нанесения не превышал значения  $3 \cdot 10^{-5}$  мм рт. ст. Покрытия из  $SiO_2$  наносились на неподвижные подложки из кремния, оптических стекол К8 и ТФ-5. Оптимальные режимы работы ионного источника были следующими: анодное напряжение - 2,5-3 кВ, ток разряда - 100-120 А. Такие режимы способствовали горению стабильного разряда. Температура подложек составляла 323-573 К.

Исследование влияния парциального давления кислорода на скорость нанесения покрытий показало, что увеличение доли кислорода приводит к существенному снижению скорости нанесения покрытий (рис. 2 а). Что же касается прозрачности покрытий, то даже при давлении кислорода всего  $1 \cdot 10^{-4}$  мм рт. ст. они получались прозрачные в видимом диапазоне, что свидетельствует об эффективном протекании процессов окисления. Также было установлено, что с ростом мощности первичного разряда ионного источника происходит увеличение скорости нанесения (рис. 2 б). Увеличение расстояния "диафрагма - подложка" с 10 до 25 мм приводило к снижению скорости нанесения более чем в 2 раза.

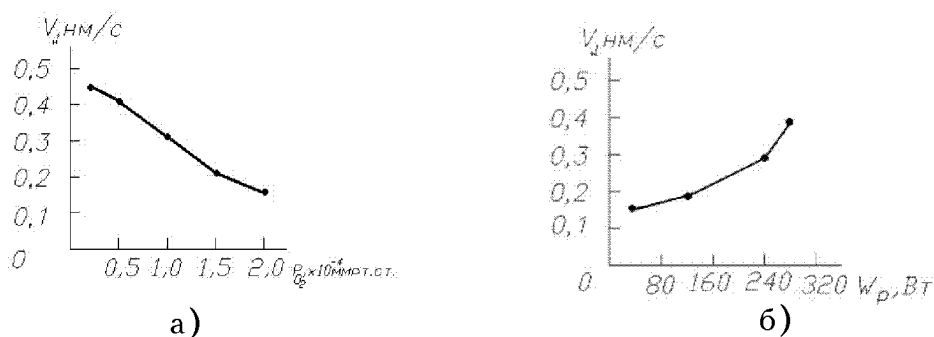


Рисунок 2.

*Зависимости скорости нанесения пленок от парциального давления кислорода (а) и от мощности первичного разряда (б)*

Энергия осаждаемых ионов в пучке измерялась с использованием многосеточного зонда путем снятия тормозной характеристики. Энергия ионов при заземленной диафрагме составила около 50 эВ. Наличие потенциала на диафрагме приводило к росту энергии ионов в пучке до 150 эВ. Было также проведено исследование влияния напряжения на диафрагме на скорость нанесения. Напряжение изменялось от 30 до 200 В, при этом скорость нанесения снизилась с 0,3 до 0,16 нм/с. Зависимость представлена на рис. 3 а.

Установлено, что покрытия по характеристикам пропускания близки к кварцу, то есть в результате формируются пленки со стехиометрическим составом. В видимом диапазоне коэффициент составляет 0,84 - 0,90 (рис. 3 б).

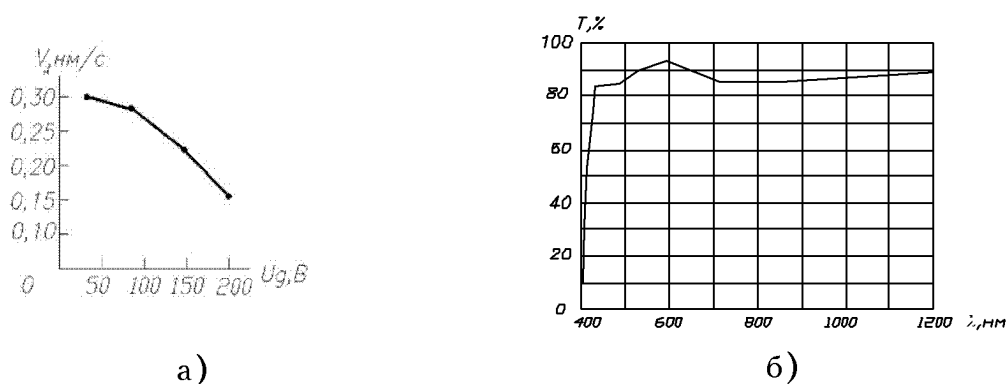


Рисунок 3.

*Зависимость скорости нанесения от напряжения на диафрагме (а) и спектр пропускания покрытия (б)*

Таким образом, полученные покрытия были прозрачны в видимом и ближнем ИК-диапазоне, а также высокими плотностью и адгезией, благодаря большой энергии ионов.

# ФОРМИРОВАНИЕ АЛМАЗОПОДОБНЫХ ПОКРЫТИЙ

ТЕЛЕШ Е.В.

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники

ШИРИПОВ В.Я.

ООО "Изовак"

Алмазные и алмазоподобные покрытия (АПП) широко применяются для защиты поверхности окон лазеров, просветления инфракрасной оптики и т.п. Существующие методы формирования таких покрытий основаны на ионном распылении графита и деструкции углеводородов на подложке. В данной работе для получения покрытий использовался метод прямого осаждения углерода из вторичного ионного пучка, сформированного в ускорителе с анодным слоем (УАС).

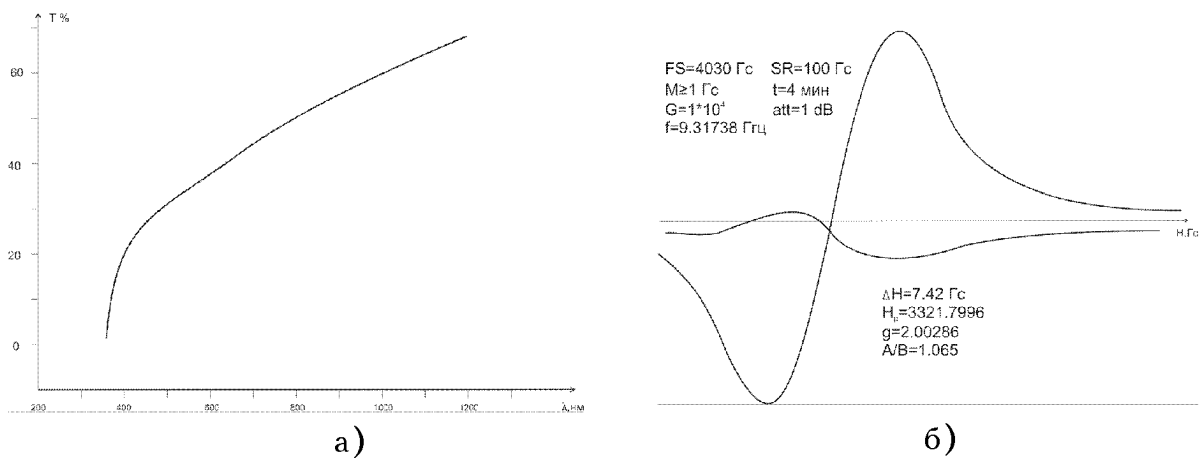
Экспериментальные исследования проводили на установке вакуумного напыления ВУ-1А, оснащенной модернизированным ионным источником на основе УАС, зондовым контролем и системой эмиссионного спектрального анализа состава ионного пучка. Измерение энергии ионов проводилось с использованием многосеточного зонда. Анализ эмиссионных спектров излучения показал наличие линий атомарного углерода, ионов углерода, азота и  $\text{OH}^+$ . Установлено, что для всех применяемых газов интенсивность пиков атомарного углерода значительно ниже интенсивности пиков от ионов углерода, что свидетельствует об эффективных процессах деструкции и ионизации.

Измерение энергии ионов показало, что она зависит от напряжения на диафрагме. При ускоряющем напряжении первичного ионного пучка 3 кВ и токе разряда 100 мА, энергия ионов вторичного ионного пучка составила около 50 эВ. При этом напряжение на диафрагме изменялось от 0 до 20 В. Повышение напряжения на диафрагме приводило к соответственному увеличению энергии. Для формирования качественных АПП энергия конденсирующихся на подложке частиц должна находиться в диапазоне 20-60 эВ.

Формирование покрытий осуществляли осаждением из ионных пучков метана и пропана. Температура подложек не превышала 40°C. С ростом мощности первичного разряда происходило увеличение скорости нанесения, которая находилась в диапазоне 0,15-0,40 нм/с. Было установлено, что увеличение  $U_d$  от 30 до 200 В привело к снижению скорости с 0,4 до 0,16 нм/с.

Для исследования оптических параметров пленки алмазоподобного углерода наносились на подложки из стекла К8. Покрытия имели окраску от желтоватого до коричневого цвета, толщина покрытий составляла 0,17-0,37 мкм. На рис. 1,а приведена спектральная зависимость коэффициента пропускания. По спектральной зависимости отражения был определен коэффициент преломления покрытий, который находился в диапазоне 2,2...2,4.

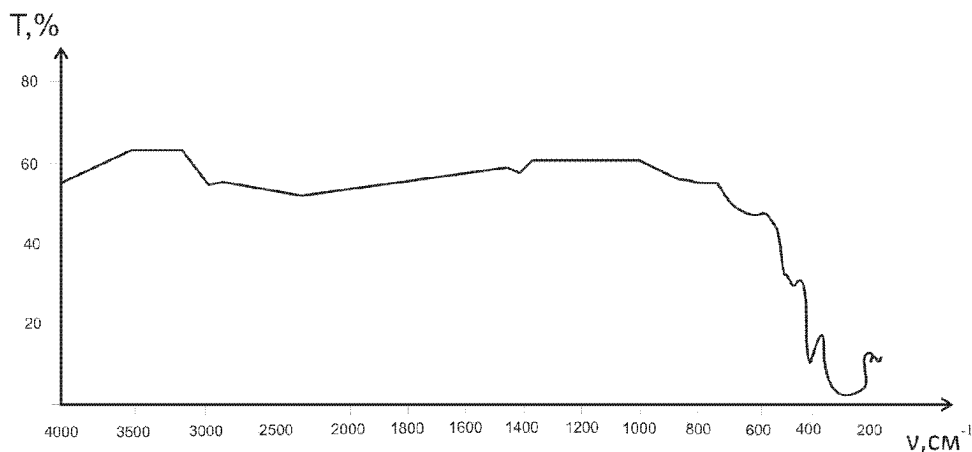
Были также сняты ЭПР-спектры, измеренные на спектрометре Radiopan-SE/x на частоте 9,3 ГГц. Они показали наличие ярко выраженного сигнала с  $g=2,00286$ , что свидетельствует об образовании структуры  $\alpha$ -C (рис. 1 б). Это подтверждается также измерением электрической прочности покрытия, которая составила  $1,1 \cdot 10^6$  В/см, а удельное объемное сопротивление -  $1,4 \cdot 10^8$  Ом·см. Полученные результаты свидетельствуют о высоком проценте содержания алмазной фазы в покрытиях.



**Рисунок 1.**  
**Спектр пропускания (а) и ЭПР-спектр (б)**

По спектральной зависимости отражения был определен коэффициент преломления покрытий, который находился в диапазоне 2,2...2,4.

Покрытия из АПП толщиной ~1,1 мкм были нанесены на поверхность германиевой подложки. На рис. 2 приведена спектральная зависимость пропускания системы АПП/германий.



**Рисунок 2.**  
**Спектральная зависимость пропускания системы АПП / германий**

Анализ этой зависимости позволяет сделать вывод о перспективности использования полученных покрытий для просветления германиевой оптики инфракрасного диапазона.

Для измерения трибологических характеристик покрытия толщиной ~ 0,3 мкм наносились на подложки из кремния. Измеренная на трибометре ТАУ-1Н износостойкость составила 1240 циклов истирания. Измерение микротвердости покрытий дало результаты от 1145 до 2155HV. Исследование адгезии покрытий методом отрыва липкой ленты показало, что покрытия имели отличное сцепление со всеми использованными в экспериментах подложками.

# ПРИМЕНЕНИЕ ВАКУУМНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ НЕТРАДИЦИОННЫХ ОПТИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ ВЫСОКОЙ ТОЧНОСТИ

СЕНИК Б.Н., ТАРАСОВ А.П.

ОАО "Красногорский завод им. С.А. Зверева", г. Красногорск Московской обл., Россия

E-mail: bogdan\_senik@mail.ru

Для решения проблемных задач, возникающих в процессе разработки и создания современных оптико-электронных приборов и комплексов различного назначения, связанных с обеспечением предельных выходных оптических параметров и максимальной информативности, требуется разработка оптических систем на элементной базе, формирующей волновой фронт с погрешностями порядка  $1/50 - 1/80$  рабочей длины волны и минимальными массогабаритными характеристиками.

При построении оптических систем на традиционной элементной базе, основу которой составляют линзы из однородного материала и зеркала со сферическими поверхностями, требования по улучшению выходных оптических параметров и уменьшению массогабаритных характеристик часто оказываются противоречивыми и невыполнимыми. Например, высокая коррекция аберраций, необходимая для высокоразрешающих систем, может быть достигнута только за счёт использования большого количества элементов, а это усложняет конструкцию приборов, уменьшает коэффициент светопропускания, увеличивает массогабаритные характеристики и себестоимость изготовления.

Реализация поставленных задач возможна только с помощью самых современных компьютерных программ по расчёту и оптимизации оптических систем и использованием нетрадиционных оптических элементов, изготовленных с помощью современных прогрессивных технологий (асферических, киноформных, градиентных оптических элементов и элементов, сочетающих в себе конструктивные особенности и асферических, и киноформных, и градиентных).

Известно, что применение нетрадиционных оптических элементов позволяет значительно сократить количество оптических элементов в сложных оптических системах и одновременно повысить их тактико-технические характеристики. На сегодняшний день промышленное внедрение нетрадиционных оптических элементов высокой точности медленное по причине отсутствия высокопроизводительных технологий.

В настоящее время уровень использования и технологические возможности прецизионной вакуумной техники впечатляющие. Вакуумные установки, как правило, используют для нанесения оптических покрытий любой категории сложности. Оптические покрытия наносятся с высочайшей точностью по толщине (в пределах погрешности 1 нм) и по плотности, (изменение показателя преломления в четвёртом знаке после запятой). Современный уровень технологии нанесения прецизионных оптических покрытий предполагает выполнение расчётов и оптимизации покрытий самого различного назначения с применением специализированных компьютерных программ и обеспечение нанесения синтезированного покрытия в полностью автоматическом режиме. Одновременно с выполнением чисто оптических задач, вакуумная техника широко применяется в оптоэлектронике. Потенциальные возможности прецизионных вакуумных технологий намного шире, и тенденции по дальнейшему расширению использования современной вакуумной техники серьёзные.

В докладе рассматриваются реальные возможности использования вакуумных технологий для изготовления нетрадиционных оптических элементов.

В 80-е годы прошлого столетия специалистами "ГОИ им. С.И. Вавилова" разработан и внедрён на ряде оптических предприятий технологический процесс изготовления асферических и киноформных поверхностей методом ионно-плазменного травления оптических деталей средней точности.

На предприятии ОАО "Красногорский завод им. С.А. Зверева" современные вакуумные установки используют не только для нанесения оптических покрытий. На протяжении многих лет в промышленном масштабе используется разработанная на предприятии технология вакуумной асферизации для изготовления высокоточных асферических элементов из различных оптических материалов, в том числе кристаллов для ИК-диапазона диаметрами от 10 до 200 мм и точностью ( $СКО \leq \lambda/20$  для  $\lambda=532\text{нм}$ ).

Одними из перспективных видов нетрадиционных оптических элементов являются градиентные оптические элементы, в которых показатель преломления является непрерывной функцией  $f(x,y,z)$  координат точек изотропной среды. При этом традиционный набор конструктивных параметров  $(r,d)$  дополняется функцией распределения показателя преломления  $n$ . Градиентные оптические элементы представляются наиболее универсальными и перспективными по сравнению с другими нетрадиционными элементами. К сожалению, несмотря на несомненную перспективность использования вышеуказанных элементов в оптических схемах различных высококачественных оптико-электронных приборов и комплексов, промышленных технологий их изготовления в мире не существует.

Применение градиентных асферических элементов в оптических системах позволяет повысить качественные характеристики системы, в частности увеличить её числовую апертуру, уменьшить габариты и массу. При совместном применении асферической поверхности и градиентной среды в одной линзе увеличение числовой апертуры возможно при меньших порядках уравнения асферической поверхности и функции распределения показателя преломления. Так, достижение числовой апертуры 0,47 возможно при уравнении второго порядка функции распределения показателя преломления:

$$n=n_0+n_1r^2+n_2r^4+n_3r^6+K,$$

и уравнении восьмого порядка асферической поверхности:

$$z=(y^2/r)/(1+(1-\rho(y/r)^2)^{1/2})+Fy^4+Fy^6+Gy^8+K$$

Формирование градиентной среды и асферической поверхности в одном технологическом процессе позволяет сократить процесс изготовления нетрадиционных элементов, а также снизить себестоимость оптической системы. Наиболее перспективным технологическим решением является получение асферической поверхности методом вакуумного напыления с одновременным управлением изменения величины показателя преломления в напыляемом слое.

В докладе подробно излагаются проблемные вопросы по созданию специализированных вакуумных установок для решения вышеуказанных задач.

Список литературы:

1. Д.С. Волосов «Фотографическая оптика». Издательство «Искусство», Москва, 1971 г., 671 с.
2. В.В. Потелов, Б.Н. Сенник «Асферизация высокоточных оптических элементов методом вакуумного напыления». «Оптический журнал», т. 71, № 12, 2004 г., с. 14-19.
3. Патент № 2078467 (РФ). Способ получения коррекционных слоёв на оптическом элементе. / В.Г. Крючков, С.Н. Бездидько, В.В. Потелов, Н.П. Заказнов, Б.Н. Сенник // Открытия, изобретения ... - 1997 г. - № 12.



# ПРАКТИЧЕСКИЕ РЕЗУЛЬТАТЫ НАНЕСЕНИЯ ОПТИЧЕСКИХ ПОКРЫТИЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ВЫСОКОВАКУУМНОЙ НАПЫЛИТЕЛЬНОЙ УСТАНОВКИ "SYRUS PRO 1110" ФИРМЫ "LEYBOLD OPTICS", ГЕРМАНИЯ

КОРОТКИХ А. В., БОЛЬШАКОВ А. Д.

ОАО "Красногорский завод им. С. А. Зверева", г. Красногорск Московской обл., Россия

ОАО "Красногорский завод им. С. А. Зверева" как одно из ведущих предприятий РФ всегда реализовывает самые высокие задачи в области оптического и оптико-электронного приборостроения.

В последнее время перед предприятием существует проблема по достижению мировых стандартов в части увеличения общего светопропускания приборов и комплексов, содержащих в оптических трактах большое количество оптических элементов. Эта проблема в основном затрагивает изделия военного направления, но её технологические решения могут также использоваться в изделиях гражданского применения (прицелы, фотографические объективы и т. д.).

Несомненно, решение этой проблемы не может быть осуществлено без такого важного технологического передела в оптическом производстве как нанесение оптических покрытий с совершенной технологической и метрологической базой.

Предварительные теоретические расчёты показывают, что задачи по нанесению особо сложных покрытий должны осуществляться только по технологии нанесения покрытий с неравнотолщинными слоями. Существует много математических и компьютерных программ, обеспечивающих автоматизированный расчёт такой структуры покрытий.

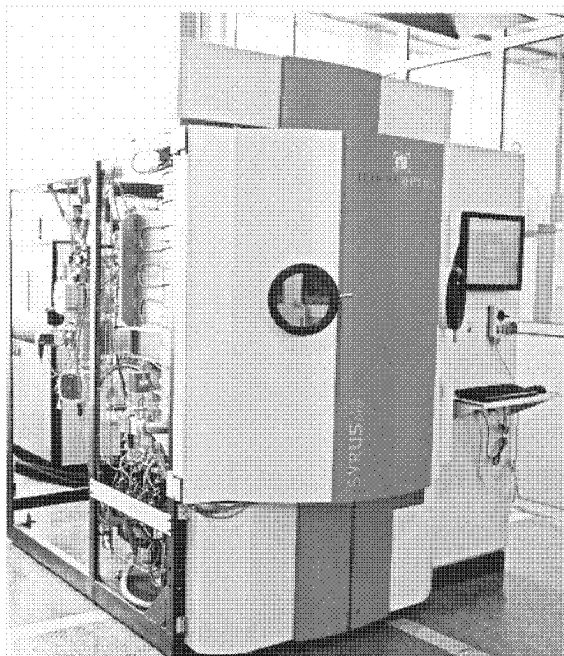
Практическая реализация такого расчёта сталкивается с некоторыми трудностями по его обеспечению. Основные проблемы заключаются в обеспечении точности физической толщины наносимых слоёв в 1-2 нм и показателя преломления напыляемых материалов с точностью до 3го знака после запятой.

Для практических решений вышеуказанных задач ОАО "Красногорский завод им. С. А. Зверева" приобрёл высоковакуумную напылительную установку "SyruSPro 1110" фирмы "Leybold Optics". (Leybold Optics - ведущий европейский производитель оборудования для нанесения оптических покрытий на различные материалы в условиях вакуума).

Основные особенности установки:

- Полная автоматизация рабочего процесса, позволяет добиться высокой повторяемости (95%) полученных результатов даже в особо сложных процессах;
- Применение технологии ионно-лучевого ассистирования с использованием источника APS-Pro (собственная разработка Leybold);
- Оптическая (раб. диапазон прибора 220-2400 нм; точность нанесения слоя - 3 нм) и кварцевая системы контроля толщины и скорости напыления слоя с отображением результатов. В оптической системе контрольный образец находится в арматуре с остальными рабочими деталями.
- Сегментная конструкция арматуры, обеспечивающее удобную и безопасную установку деталей.

Процесс нанесения покрытий полностью автоматизирован. Вся работа по подготовке техпроцесса выполняется технологом и происходит с использованием программного обеспечения. Технолог формулирует техзадание (на основании теоретического расчёта структуры покрытий) для установки, исходя из технических требований, которые требуется получить. Полученный расчёт формулы покрытия конвертируется в программный код (так называемый рецепт или техпроцесс), который загружается в управляющий компьютер установки. Во время работы установки управляющий компьютер установки подает команды на исполнительные механизмы вакуумной напылительной установки, реализуя нанесение слоёв необходимой толщины. Процесс продолжается до завершения полностью в автоматическом режиме.

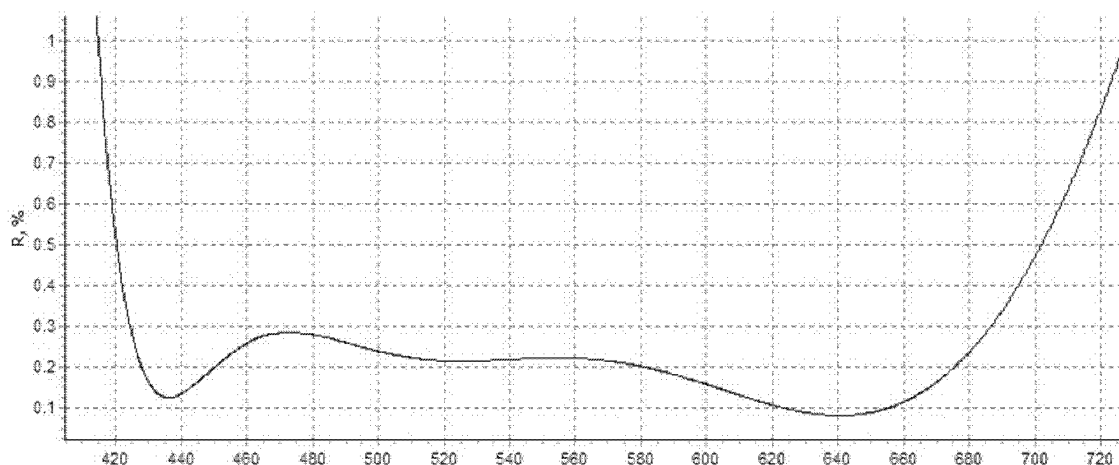


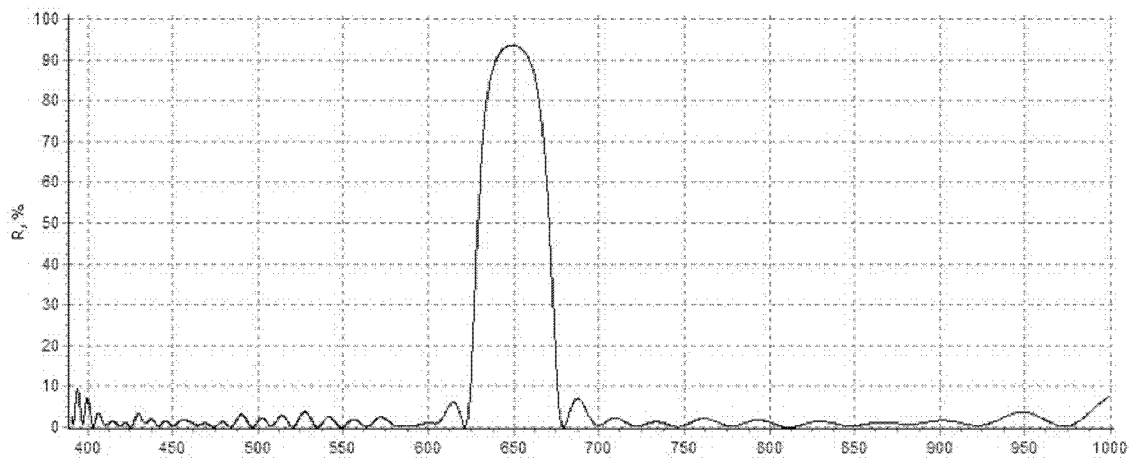
**Высоковакуумная напылительная установка  
«Syrgus Pro 1110» фирмы «Leybold Optics», Германия**

Ниже представлены примеры отработанных процессов с получением практических результатов:

1)  $R_{\Delta\lambda} \leq 0.3\%$  для  $\Delta\lambda = (480 \div 660)$  нм

Четырёхслойное покрытие из материалов оксидов титана ( $\text{TiO}_2$   $n=2.3$ ) и кремния ( $\text{SiO}_2$   $n=1.48$ ).





3) Notch фильтр  
 $R_{\lambda_{\max}} \geq 90\%$  для  $\lambda = 650$  нм;  $\Delta\lambda_{0.5}(R_{\lambda_{\max}}) \leq 50$  нм;  $R_{\Delta\lambda_{\Phi}} \leq 5\%$ ;  $\Delta\lambda_{\Phi} = (400 \div 610)$  нм,  $(680 \div 950)$  нм. Покрытие: 52 чередующихся слоя оксидов титана и кремния.

# ТЕХНОЛОГИЯ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ФОРМООБРАЗОВАНИЯ МЕТОДОМ ИОННО-ЛУЧЕВОЙ ОБРАБОТКИ

ГОРШКОВ В.А., КУЗНЕЦОВ В.Н. САЛЬНИКОВА Л.Ю. ЩЕННИКОВА Т.И.

ОАО "НПО "Оптика". г. Москва, Россия

E-mail: optika@nprooptica.ru

Сравнение существующих на сегодняшний день методов формообразования прецизионных оптических деталей с асферическими поверхностями:

- обработка полноразмерным абразивным инструментом;
- обработка абразивным инструментом с использованием специальных масок;
- автоматизированная программная обработка малоразмерным абразивным инструментом;
- обработка широкоапертурным ионным пучком с использованием осесимметричных (вращающихся относительно ОД) масочных диафрагм;
- автоматизированная программная обработка малым ионно-лучевым инструментом (малоапертурным ионным пучком).

Возможности данных методов, отличительные особенности, достоинства и недостатки.

Методы вакуумного формообразования с использованием ионно-лучевого инструмента позволяют повысить точность формообразования сложных оптических поверхностей и расширить номенклатуру изготавливаемых ОД. К недостаткам относится то, что: требуется высоковакуумное оборудование для того, чтобы работать энергетическим ионным пучком; высоки требования к предварительной механической полировке; тепло индуцируется в компонентах, подверженных ионному формообразованию и вероятность увеличения шероховатости поверхности в результате распыления.

На сегодняшний день также существуют зарубежные компании, разработавшие оборудование для ионно-лучевого формообразования, в частности, компания REOSC, также Космический центр г. Льеж.

Специалистами ОАО "НПО "Оптика" создана компьютеризированная вакуумная установка ВУ-2М на основе базовых вакуумных установок серии ВУ с гибким технологическим оснащением, построенным по модульному принципу. Для обеспечения конкурентоспособности на мировом рынке вакуумного технологического оборудования конструктивное исполнение и элементная база вакуумной установки соответствуют требованиям зарубежных стандартов (в качестве аналога взят Евростандарт "МЭК 555").

Вакуумная установка ВУ-2М включает:

- модуль высоковакуумной откачки (модуль ВО) со стойкой автоматизированной системы управления откачкой вакуумных установок (стойка АСУ ВУ);
- вакуумную систему с рабочей камерой и гибким (сменным) технологическим оснащением;
- технологический модуль ИЛО с ионными источниками мод. ИЛО-50М (ионно-лучевая обработка фокусированным ионным пучком) и мод. ИЛО-200М (ионно-лучевая обработка широкоапертурным ионным пучком);
- автоматизированную систему управления вакуумной установкой и техпроцессом с программным и техническим обеспечением.

Описание технологического процесса ионно-лучевого формообразования асферической поверхности на примере реальных оптических деталей, примеры режимов обработки, используемая оснастка, параметры качества полученных поверхностей.

После проведенных исследований по асферизации поверхностей данным методом, были сделаны следующие выводы:

- процесс формообразования поверхностей методом ионного травления является перспективным и высокоэффективным, в особенности, при изготовлении поверхностей сложной формы;

- при использовании данного метода не возникает проблем краевого эффекта, что свойственно механическим методам обработки;

- высока эффективность процесса формообразования на конечных стадиях тонкой доводки формы за счет лучшей управляемости ионно-лучевого инструмента;

- технологический процесс формообразования автоматизирован от стадии расчета технологических параметров асферической поверхности (расчета припуска) до изготовления оптической детали с использованием современных вычислительных средств;

- технологический процесс ионного травления стабилен во времени и позволяет осуществлять формообразование поверхностей с достижением высоких точностных параметров в пределах  $\lambda/40 \dots \lambda/80$  по среднеквадратическому отклонению.



# РАЗРАБОТКА СВЕТОСИЛЬНЫХ ПЕРЕСТРАИВАЕМЫХ УЗКОПОЛОСНЫХ ФИЛЬТРОВ НА ВИДИМЫЙ И ИК СПЕКТРАЛЬНЫЕ ДИАПАЗОНЫ

ГАЙНУТДИНОВ И.С., АЗАМАТОВ М.Х., НАГИМОВ И.Х.,

ХАСАНОВ А.М., КОЛЬЦОВ А.Ю.

ОАО "НПО ГИПО", г. Казань, Россия

В статье рассмотрены вопросы технологии изготовления перестраиваемых интерференционных фильтров. Приведены основные требования к современным ЛПУФ и достигнутые технические параметры разработанных в ОАО "НПО ГИПО" фильтров.

Линейные перестраиваемые узкополосные фильтры (ЛПУФ), являясь оптическими монохроматизирующими элементами, по геометрической форме представляют собой плоскопараллельные прямоугольные пластины, на которые нанесены многослойные интерференционные системы.

ЛПУФ находят применение в составе газоанализаторов, монохроматоров, радиометров, сканирующих скоростных спектрометров при решении задач контроля загрязнения воздуха, дистанционного мониторинга, астрономии, разделения порядков в дифракционных решетках и т.д.

ЛПУФ в составе многоэлементных приемников изображения могут использоваться в оптико-электронной аппаратуре высокого разрешения, позволяющей оперативно решать задачи обнаружения, распознавания и анализа сложных сигналов.

Технология изготовления ЛПУФ представляет собой напыление в вакууме узкополосных интерференционных фильтров с использованием специально рассчитанных экранирующих масок.

Главной отличительной особенностью ЛПУФ является линейное изменение его рабочей длины волны  $\lambda_0$  по длине подложки  $l$ . Для достижения этого в процессе напыления применяются маски, регулирующие величину осаждаемого вещества таким образом, что толщина каждого слоя пропорционально растет от одного края подложки к другому.

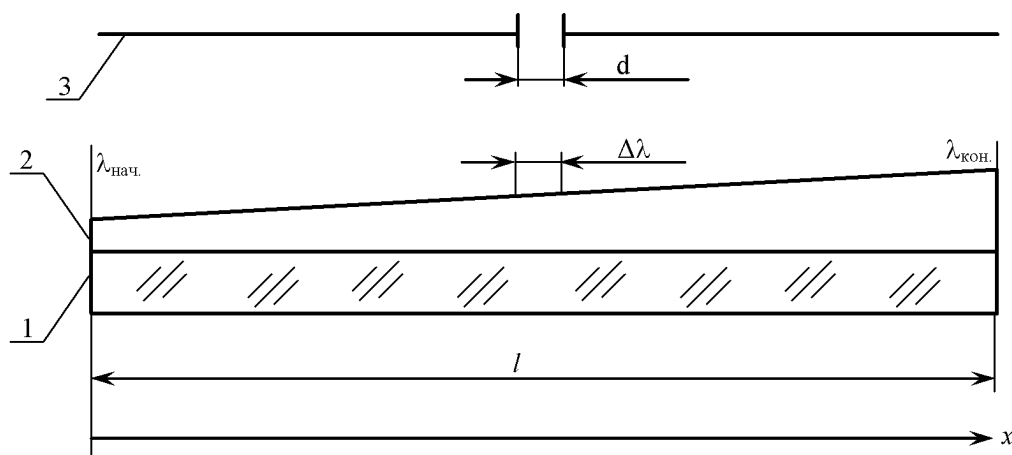


Рисунок 1. Схема ЛПУФ

Таким образом, ЛПУФ представляет собой непрерывный ряд узкополосных фильтров с изменяющейся по линейному закону рабочей длиной волны. На рис. 1 схематично показан ЛПУФ (1 - подложка длиной  $l$ , 2 - узкополосные интерференционные фильтры с рабочими длинами волн от  $\lambda_{нач.}$  до  $\lambda_{кон.}$ , 3 - диафрагма шириной  $d$ , выделяющая спектральный диапазон  $\Delta\lambda$ ).

Основными требованиями, помимо оптических характеристик, предъявляемыми в настоящее время к разрабатываемым ЛПУФ, является их миниатюризация - уменьшение габаритных размеров с целью использования в составе современной оптико-электронной аппаратуры с матричными (многоспектральными) фотоприемными устройствами. За последние годы в ОАО "НПО ГИПО" выполнено несколько работ по разработке ЛПУФ, в результате чего были изготовлены перестраиваемые фильтры длиной 70 мм на спектральные диапазоны от 3 до 5 мкм и от 8 до 12,5 мкм, а также ЛПУФ длиной 15 мм на спектральный диапазон от 0,4 до 1,1 мкм.

Форма спектральной характеристики пропускания ЛПУФ определяется как конструктивными параметрами интерференционного покрытия и составляющих его слоев (количеством и порядком чередования слоев, показателями преломления пленкообразующих материалов, толщинами слоев), так и апертурой светового пятна, используемого при измерении характеристик фильтра (вследствие его неравнотолщинности по длине подложки). Это наглядно проявляется при измерении спектральных характеристик ЛПУФ на приборах с переменным регулируемым размером входной щели. В работе [1] было отмечено, что с увеличением угловой ширины входной щели пропускание кольцевого перестраиваемого узкополосного фильтра падает, а его полуширина растет. Этот вывод справедлив и для линейных перестраиваемых фильтров, что показывают проведенные нами расчеты.

Степень изменения толщин слоев фильтра по длине подложки характеризуется параметром, называемом линейной дисперсией и определяемом из соотношения:

$$\delta = \frac{\lambda_{кон.} - \lambda_{нач.}}{l}, \quad (1)$$

где  $\lambda_{нач.}$  и  $\lambda_{кон.}$  - длины волн, определяющие, соответственно, начало и конец рабочего спектрального диапазона ЛПУФ,  $l$  - длина ЛПУФ.

Измерение параметров реальных ЛПУФ происходит не точно в координате  $x$ , а в имеющих конечную ширину окрестностях этой координаты  $\Delta x$ , определяемых размером диафрагмы сканирующего по поверхности фильтра светового пучка. Поэтому измеренная спектральная характеристика ЛПУФ всегда является результатом интегрирования спектральных характеристик узкополосных фильтров с различными значениями  $\lambda_0$ , соответствующие которым координаты  $x$  находятся внутри интервала  $\Delta x$ . Увеличение ширины щели  $d$  приводит к увеличению количества суммирующихся фильтров и, соответственно, искажению результирующей спектральной характеристики - уменьшению максимального коэффициента пропускания и увеличению относительной полуширины. Влияние ширины диафрагмы на оптические параметры ЛПУФ рассмотрено в работе [2].

Основными оптическими параметрами ЛПУФ являются максимальное пропускание, относительная полуширина и пропускание в области блокировки. Исходя из требований конструкция узкополосных фильтров могут представлять собой как фильтр Фабри-Перо, так и контрастный интерференционный фильтр (состоящий из нескольких последовательных элементарных фильтров Фабри-Перо). Подавление фонового излучения в

Таблица 1. Технические параметры разработанных ЛПУФ

Параметры ЛПУФ	Спектральный диапазон ЛПУФ		
	3... 5 мкм	8... 12,5 мкм	0,4... 1,1 мкм
Длина фильтра, мм	70	70	15
Коэффициент пропускания на рабочей длине волны, %	Не менее 30	Не менее 30	Не менее 30
Относительная полуширина	Не более 1,3	Не более 1,3	Не более 3.0
Среднее пропускание в области блокировки, %	Не более 0,1	Не более 0,1	Не более 0,1
Тип конструкции	Фабри-Перо	Фабри-Перо	контрастный
Пленкообразующие материалы	Ge/SiO	PbTe/ZnSe	ZrO <sub>2</sub> /SiO <sub>2</sub>
Материал подложки	Ge, КО-1	Ge	К-108
Количество подложек	2	2	2

области блокировки, которое не устраняется узкополосными фильтрами, обеспечивается нанесением дополнительных блокирующих фильтров либо на обратную сторону подложки, либо на вторую подложку. Контрастные фильтры более трудоемки в изготовлении, и имеют в несколько раз большую толщину, чем фильтры конструкции Фабри-Перо. Толщина контрастных фильтров ограничивает возможность их изготовления видимой и ближней ИК областями спектра. Преимущества таких конструкций фильтров в сравнении с фильтрами типа Фабри-Перо заключаются в лучших значениях оптических параметров (контрастность, фоновое пропускание) и меньшем искажении формы спектральной кривой по мере увеличения ширины щели.

В результате проведенных теоретических расчетов и экспериментальных исследований нами были разработаны ЛПУФ некоторые параметры которых приведены в табл. 1.

*Список литературы:*

1. Марциновский В.А., Несмелов Е.А. Исследование зависимости спектральных характеристик кольцевых перестраиваемых фильтров от ширины входной щели монохроматора // Журнал прикладной спектроскопии. 1984. Т.40. №2. С.250-254.
2. Азаматов М.Х., Валеев Ш.Ш., Гайнутдинов К.Н., Нагимов И.Х. Учет влияния ширины сканирующей щели при измерении оптических параметров линейных перестраиваемых узкополосных фильтров // Оптический журнал. 2011. Т.78, №3. С.88-91.



# ОПТИЧЕСКИЕ ПОКРЫТИЯ ДЛЯ СОВРЕМЕННЫХ ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫХ ПРИБОРОВ

ГАЙНУТДИНОВ И.С., САБИРОВ Р.С., АЗАМАТОВ М.Х.

ОАО "НПО ГИПО", г. Казань, Россия

Выполнен обзор оптических покрытий, разработанных одним из ведущих предприятий отрасли - ОАО "НПО ГИПО". Приведены номенклатура выпускаемых типов оптических покрытий и их технические характеристики, указаны возможные области применения.

Оптические покрытия являются неотъемлемой частью современной оптоэлектроники. Применение покрытий позволяет улучшить энергетику приборов за счет увеличения коэффициента пропускания оптических элементов в рабочих спектральных диапазонах, увеличить соотношение сигнал/шум путем подавления фонового излучения, повысить помехозащищенность благодаря устранению бликов [1, 2].

В ОАО "НПО ГИПО" на протяжении нескольких десятков лет разрабатываются и изготавливаются оптические покрытия различного функционального назначения для УФ, видимой и ИК областей спектра. За это время предприятием накоплен огромный опыт в создании оптических покрытий - от расчета и синтеза конструкций до изготовления и испытаний образцов. Разработанные покрытия находят применение в современных оптико-электронных приборах. Основные типы оптических покрытий, изготавливаемые в ОАО "НПО ГИПО", представлены ниже.

**Просветляющие покрытия для дневных, ночных, тепловизионных, дальномерных каналов оптико-электронных приборов [3, 4].**

Просветляющие покрытия на лазерные длины волн видимого и ближнего ИК диапазонов с остаточным отражением не более 0,1%. Просветляющие покрытия для оптических элементов лазерных систем, изготовленные на основе пленкообразующих материалов из тугоплавких окислов обладают малыми потерями на рассеяние и высокой лучевой прочностью.

Широкополосные (ахроматические) просветляющие покрытия для оптических деталей из оптического стекла, кремния, германия и селенида цинка служат для увеличения коэффициента пропускания полезного излучения в рабочих спектральных диапазонах приборов. Среднее значение коэффициента пропускания оптических элементов с двухсторонним широкополосным просветлением в рабочих спектральных диапазонах составляет не менее 99% в спектральных диапазонах 0,4 - 0,7 мкм и 0,6 - 0,9 мкм, не менее 94% в спектральных диапазонах 3 - 5 мкм и 8 - 11 мкм.

**"Солнечно-слепой" фильтр для УФ-пеленгаторов [5].**

Разработанный фильтр предназначен для работы в составе приборов пеленгации для обнаружения объектов по их УФ-излучению. Глубокое подавление фона в спектральной области от 300 до 1000 нм позволяет устранить влияние излучения Солнца на фотоприемник. Солнечное излучение в области длин волн короче 300 нм сильно поглощается озоновым слоем земной атмосферы, поэтому помехи, вызванные им, в этой зоне отсутствуют. Максимальное значение коэффициента пропускания фильтра в спектральном диапазоне 280 - 290 нм составляет не менее 30%, а фоновое пропускание в области блокировки 300 - 800 нм не превышает  $1 \cdot 10^{-7}$  %. Такие характеристики фильтра достигнуты благодаря комбинированной фильтрации излучения как цветными стеклами,

так и несколькими интерференционными системами, общее количество слоев в которых превышает 300.

### **Интерференционные фильтры для многоспектральных глубокоохлаждаемых фотоприемников ИК-спектрального диапазона [2].**

Разработанные двухзонные блокирующие и полосовые интерференционные фильтры обеспечивают пространственную и спектральную селекцию падающего на них излучения. Межзонная граница фильтров составляет не более 30 мкм. Фильтры работоспособны при температурах до минус 196 С и используются в составе многоспектральных фотоприемных устройствах мозаичного (матричного) типа, требующих охлаждения жидким азотом. Разработанные фильтры охватывают спектральный диапазон от 1,5 до 15 мкм.

### **Алмазоподобные защитно-просветляющие покрытия для входных окон тепловизионных приборов.**

Используемая технология получения алмазоподобных пленок основана на разложении углеводорода (пропана) ионным пучком в плазме газового разряда. Метод прямого осаждения углерода на подложку позволяет получать износостойкие пленки с алмазоподобной структурой. Стойкость к внешним воздействиям (механическая прочность, химическая инертность к агрессивным средам, термо- и влагопрочность) дает возможность использовать пленки алмазоподобного углерода в приборах, работающих в самых жестких условиях эксплуатации приборов. Разработанные многослойные двухсторонние покрытия, имеющие в своем составе слой алмазоподобного углерода, позволяют увеличить максимальное значение коэффициента пропускания оптических элементов из германия в спектральном диапазоне от 8 до 12 мкм до 94%, оптических элементов из кремния в спектральном диапазоне от 3 до 5 мкм до 96%.

ОАО "НПО ГИПО" обладает большим опытом в изготовлении **отражающих покрытий** различного назначения, как на основе диэлектрических пленкообразующих материалов, так и получаемых напылением металлов (серебро, алюминий, золото) [1, 2].

Изготавливаемые высокоотражающие металлические зеркала служат для отражения излучения в широком спектральном интервале при формировании телевизионных и/или ИК каналов приборов. Коэффициент отражения зеркал из напыленного золота составляет не менее 98,0% в спектральном диапазоне от 1 до 12 мкм.

Диэлектрические покрытия с высоким значением коэффициента отражения (до 99,99% на лазерной длине волны) находят применение в зеркалах лазерных резонаторов, обладают высокой лучевой прочностью и малыми потерями на поглощение и рассеяние.

Кроме того, изготавливаются отражающие диэлектрические системы с заданным значением коэффициента отражения - от 50% до 99% для светоделения падающего излучения [6].

**Интерференционные узкополосные и полосовые фильтры** с рабочими длинами волн в спектральном диапазоне от 0,4 до 15 мкм служат для выделения излучения заданных спектральных интервалов и наносятся на оптические элементы из оптического и кварцевого стекла, оптической керамики, кремния, германия [1, 2, 7, 8]. Относительная полуширина узкополосных фильтров составляет от 1 до 3%, коэффициент пропускания от 60 до 90%, среднее пропускание в области блокировки не более 0,1%.

ОАО "НПО ГИПО" - одно из немногих предприятий, владеющих технологией изготовления малогабаритных **линейных перестраиваемых узкополосных фильтров [9]**. Особенность такого типа покрытий заключается в линейном изменении толщин их слоев от одного края подложки к другому. Благодаря этому на плоскопараллельной пластине длиной 15 - 70 мм располагается непрерывный ряд узкополосных фильтров, рабочие длины волн которых охватывают широкую область спектра. Линейные узкопо-

лосные перестраиваемые фильтры могут быть использованы в составе современной оптико-электронной аппаратуры для решения широкого круга задач от дистанционного мониторинга и анализа окружающей среды и удаленных объектов до обнаружения и распознавания сигналов сложного спектрального состава.

На нашем предприятии разработаны перестраиваемые фильтры на спектральные диапазоны от 0,4 до 1,0 мкм, от 3 до 5 мкм, от 8 до 12,5 мкм.

**Коротковолновые и длинноволновые блокирующие интерференционные фильтры** служат для спектрального разделения светового потока [10, 11]. Фильтры, разработанные в ОАО "НПО ГИПО" обладают крутизной (контрастностью) более 0,97, высокой прозрачностью в области пропускания и подавлением фонового излучения в области блокировки до 0,01%.

Все покрытия, разработанные на нашем предприятии, обладают высокими эксплуатационными характеристиками - механической, химической, термической прочностью и влагопрочностью. Наличие опытных, высококвалифицированных специалистов, а также современного технологического, измерительного и испытательного оборудования позволяют нам успешно разрабатывать новые типы покрытий для решения стоящих перед отечественным оптико-электронным приборостроением задач.

#### *Список литературы:*

1. Гайнутдинов И.С., Несмелов Е.А., Хайбуллин И.Б. Интерференционные покрытия для оптического приборостроения. - Казань, изд-во "Фэн", 2002 г.
2. Гайнутдинов И.С., Несмелов Е.А., Михайлов А.В., Иванов В.П., Абзалова Г.И. Свойства и методы получения интерференционных покрытий для оптического приборостроения. - Казань, изд-во "Фэн", 2003 г.
3. Гайнутдинов И.С., Несмелов Е.А., Азаматов М.Х., Каримов Р.Т., Сафин Р.Г., Абзалова Г.И. Достижение предельных характеристик просветляющих интерференционных покрытий. // Оптический журнал, 2007 г., т.74, №3, с.75-78.
4. Гайнутдинов И.С., Шувалов Н.Ю., Сабиров Р.С., Иванов В.А., Гареев Р.Р. Просветляющие покрытия на подложках из германия и кремния в окнах прозрачности ИК области спектра 3 - 5 мкм и 8 - 12 мкм. // Оптический журнал, 2009 г., т.76, №5, с.68-72.
5. Сафин Р.Г., Гайнутдинов И.С., Сабиров Р.С., Азаматов М.Х. "Солнечно-слепой" фильтр для УФ области спектра. // Оптический журнал, 2007 г., т.74, №3, с.72-74.
6. Гайнутдинов И.С., Несмелов Е.А., Сабиров Р.С., Сафин Р.Г. Широкополосный светоделитель. // Оптический журнал, 2002 г., т.69, №4, с.67-68.
7. Гайнутдинов И.С., Несмелов Е.А., Алиакберов Р.Д., Михайлов А.В., Абзалова Г.И. Стабилизация оптических параметров фильтров на основе аморфного кремния. // Оптический журнал, 2004 г., т.71, №12, с.48-53.
8. Гайнутдинов И.С., Алиакберов Р.Д., Гареев Р.Р., Михайлов А.В., Мирханов Н.Г. Развитие теории Карда для металлодиэлектрических фильтров. // Оптический журнал, 2009, т.76, №5, с.60-67.
9. Азаматов М.Х., Валеев Ш.Ш., Гайнутдинов К.Н., Нагимов И.Х. Учет влияния ширины сканирующей щели при измерении оптических параметров линейных перестраиваемых узкополосных фильтров. // Оптический журнал, 2011 г., т.78, №3, с.88-91.
10. Гайнутдинов И.С., Иванов В.А., Борисов А.Н., Никитин А.С., Несмелов Е.А. Воспроизводимость спектральных характеристик отрезающих фильтров. // Оптический журнал, 2002 г., т.69, №4, с.62-63.
11. Гайнутдинов И.С., Несмелов Е.А., Алиакберов Р.Д. Критерий качества для определения оптимальных параметров широкополосных спектроделителей. // Оптический журнал, 2003 г., т.70, №5, с.83-86.

# ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ КРАЕВЫХ ЭФФЕКТОВ НА ТОЧНОСТЬ ГРАНИЦ МНОГОЗОННЫХ ИНТЕРФЕРЕНЦИОННЫХ ПОКРЫТИЙ

ГАЙНУТДИНОВ И.С., ГУСЕВ А.Г., КОЛЬЦОВ А.Ю., ХАСАНОВ А.М.

ОАО "НПО ГИПО", г. Казань, Россия

В работе рассмотрены вопросы технологии изготовления двухзонных интерференционных фильтров с помощью экранирующих масок. Дано объяснение нечеткости границы покрытий, исследовано влияние "краевых" эффектов на точность границ двухзонных интерференционных фильтров.

В случае необходимости получения нескольких различных покрытий в разных зонах одной и той же подложки обычно используется метод масок. Каждое покрытие наносится через соответствующую маску, определяющую положение покрытия на подложке. Выполнение заданных требований к границе покрытия должно обеспечиваться тщательным и точным изготовлением режущей кромки маски. Кроме того, недопустимы зазоры между маской и поверхностью подложки. Маска должна плотно прилегать к подложке. Это означает, что поверхность маски должна быть отполирована по высокому классу.

Наиболее технологичными материалами для изготовления маски являются металлы. Однако, полировка металлов всегда дает качество поверхности значительно хуже, чем можно получить на стекле или кристаллах. Кроме того, полное сопряжение двух поверхностей из разных материалов практически невозможно, поэтому между маской и поверхностью подложки всегда остается малый зазор.

Проведенные эксперименты показали, что поверхность подложки под маской на 10 - 15 мкм от ее кромки оказывается покрытой слоем испаряемого пленкообразующего вещества (действие маски и краевые эффекты, возникающие при этом, иллюстрирует рис. 1).

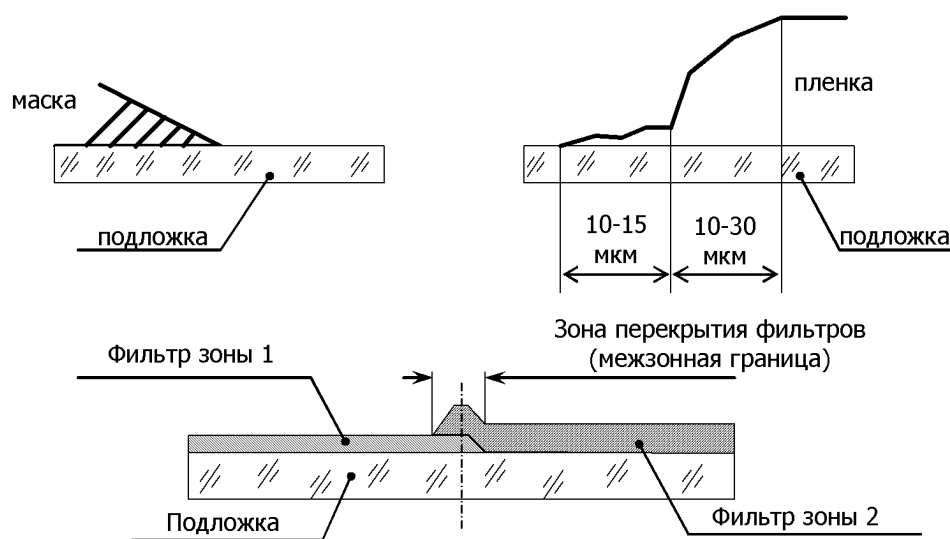


Рисунок 1. Применение маски для формирования границ зон фильтров

Объяснение факта образования тонкого слоя под маской лежит в процессах диффузии конденсируемого материала по поверхности подложки, "подпылений" через зазор при больших углах падения пучка атомов испаряемого материала (это происходит при вращении общей системы для получения равномерного по покрываемой площади покрытия и изменения угла падения пучка на подложку), изменении положения края маски на подложке из-за теплового расширения материала маски. Следует отметить, что управление температурой маски для предотвращения смещения положения границы покрытия выполнить невозможно. В процессе нанесения покрытия производится управление только температурой подложки, что необходимо для получения интерференционных покрытий со строго заданными свойствами. Тепловые свойства материала маски отличаются от тепловых свойств материала подложки. Поэтому температура маски в каждый момент времени оказывается отличной от температуры подложки и ход изменения температуры маски и подложки не совпадают.

Кроме этого, толщина слоя покрытия в области границы плавно уменьшается от заданного значения в нескольких десятках микрон от границы до малого значения на самой границе. Это малое значение и продолжается в область "тени". Такое изменение толщины слоев можно объяснить процессами отражения пучка испаряемого материала от маски и скачком температуры между подложкой и маской, что следует из представлений [1, 2]. Очевидно, что температура маски выше, чем температура поверхности подложки, что и служит причиной подобного роста слоя вблизи границы. Более детальное рассмотрение кинетики образования слоя в области границы пока не проводилось, так как это требует создания специальных математических моделей образования слоя с привлечением сложного аппарата современной теории необратимых процессов.

В области границы между различными зонами происходит наложение покрытий из-за не абсолютно точного совмещения положения масок и процессов, указанных выше. Это усложненное наличием маски расширение области границы вносит дополнительные эффекты. Наличие маски приводит к искажению распределения толщины слоев покрытия в области границы как из-за перекрытия в установке масок, так и из-за всех указанных выше эффектов различия температуры и процессов диффузии.

Наличие пленки в "тени" маски накладывает ограничение на ширину минимально возможной области перекрытия покрытий при их нанесении на сопряженные зоны одной подложки. Очевидно, при изготовлении многозонных покрытий, ширина зоны перекрытия которых должна быть менее 10 мкм, необходимо использовать методы, позволяющие получать более четкие границы, например, метод фотолитографии.

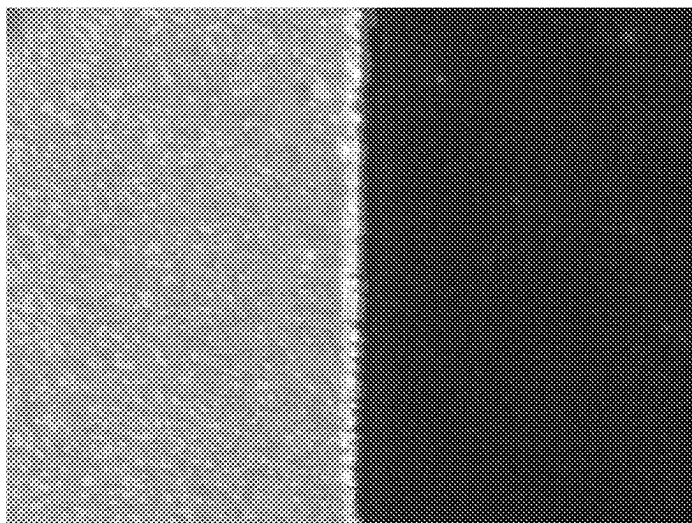
До тех пор, пока площадь покрытия много больше площади граничных искажений, эффектами границы можно пренебречь. Прозрачность фильтра (или любого иного интерференционного покрытия) следует определить как:

$$T = \int_S T(r, \varphi) r dr d\varphi - \int_{S_1} T(r, \varphi) r dr d\varphi, \quad (1)$$

где  $S$  - полная площадь покрытия в заданном окне, а  $r, \varphi$  - полярные координаты на поверхности,  $S_1$  - площадь границы,  $T(r, \varphi)$  - пропускание фильтра в точке с полярными координатами  $r, \varphi$ .

Если площадь занятой границей можно пренебречь (что бывает в обычных случаях нанесения одного интерференционного покрытия на подложку), то второй интеграл выпадает из рассмотрения и выражение для прозрачности фильтра оказывается обычным.

Для изготовления двухзонных фильтров и обеспечения четкой и точной границы между зонами нами была разработана и изготовлена технологическая оснастка, принцип действия



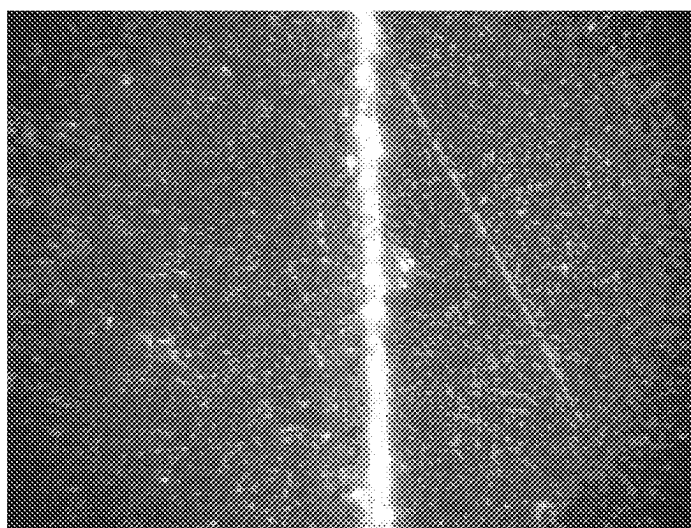
*Рисунок 2. Фотография границы фильтра первой зоны при использовании разработанной технологической оснастки*

которой состоит в следующем. Подложка фильтра устанавливается на основание и прижимается к упору. Границу зон формируют стальные ножи, передвигаемые по направляющим с помощью микрометрического винта. Сначала открыта для напыления поверхность первой зоны фильтра, поверхность второй зоны фильтра закрыта поверхностью ножа.

Результат напыления фильтра первой зоны и его граница при использовании разработанной оснастки показан на рис. 2.

После напыления фильтра на первую зону подложка разворачивается на основании таким образом, что открытой для напыления становится вторая зона фильтра. Граница области перекрытия фильтров первой и второй зон показана на рис. 3.

Разработанная технологическая оснастка обеспечивает получение межзонной области перекрытия фильтров для многоспектральных фотоприемных устройств ИК спектрального диапазона шириной от 20 до 60 мкм.



*Рисунок 3. Фотография границы между фильтрами первой и второй зон, полученная с использованием разработанной технологической оснастки*

Список литературы:

1. Днепровский В.Г., Осадин Б.А., Русаков Н.В. К конденсации плотного потока пара // ЖТФ, 1974, т.44, вып. 2, с. 435-441.
2. Журавлев В.А. Термодинамика необратимых процессов. - Ижевск: Изд-во Удмуртского университета, 1998.
3. Шпильрайн Э.Э., Кессельман П.М. Основы теории теплофизических свойств веществ. - М.: Энергия, 1977

# ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ИЗГОТОВЛЕНИЯ МНОГОЗОННЫХ ИНТЕРФЕРЕНЦИОННЫХ СВЕТОФИЛЬТРОВ ДЛЯ КОСМИЧЕСКИХ ТЕЛЕСКОПОВ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ

САВИЦКИЙ А.М., ГУСАКОВА М.Б., КРУГЛИК А.А., ЛОПАТИН А.И., СОКОЛЬСКИЙ М.Н.

ОАО «ЛОМО», г. Санкт-Петербург, Россия

E-mail: mnsokolski@rambler.ru

Современные крупногабаритные оптико - электронные комплексы (ОЭК) для дистанционного зондирования Земли обеспечивают высокоразрешающую космическую съёмку в различных спектральных интервалах. Для мультиспектральной съёмки применяются многозонные интерференционные светофильтры, устанавливаемые вблизи матричных приёмников.

Рассматривается технология изготовления многозонных (3 ÷ 4 зоны) светофильтров, нанесённых на единую подложку. Размеры спектральных зон: длина 15 мм, ширина 1,4 мм, промежуток между зонами не более 0,3 мм. Диапазон длин волн  $\Delta\lambda$  от 400 до 1100 нм с полосой пропускания от 30 до 300 нм с точностью положения границ не более 10 нм. Спектральный диапазон подавления 400 ÷ 1000 нм. Коэффициент пропускания  $\tau_{\text{ф}} \geq 70\%$  с отклонением по полю не более 5%. Светофильтры обладают радиационной стойкостью и чистотой поверхностей не хуже II класса. Технология изготовления 3 - 4-х зонных светофильтров состоит из этапов:

- изготовление подложки;
- нанесение слоя хрома на подложку;
- удаление хрома из зон нанесения интерференционного покрытия светофильтров;
- нанесение многослойных интерференционных покрытий.

К особенностям технологии изготовления многозонных светофильтров относятся:

- прецизионные оправы с масками, толщиной менее 0,05 мм;
- система контроля светофильтров в процессе напыления;
- система ионного ассистирования (уплотнение слоёв в процессе нанесения покрытия);
- специальная подколпачная арматура и оснастка для группового напыления, позволяющая за один сеанс формировать покрытия на 60 подложках с минимальными различиями в спектральных характеристиках.

Приведены результаты изготовления 3-х зонных светофильтров для крупногабаритных телескопов.



# СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ВАКУУМНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ И ОБОРУДОВАНИЯ ДЛЯ ФОРМИРОВАНИЯ ОПТИЧЕСКИХ СТРУКТУР

ШИРИПОВ В.Я.

ООО «Изовак», г. Минск, Республика Беларусь

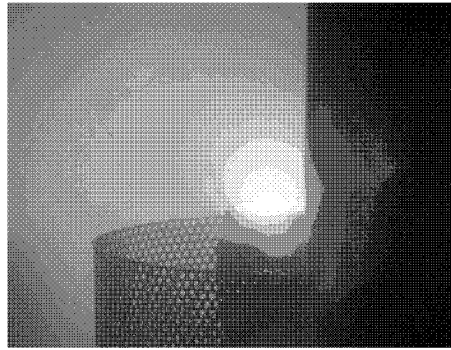
Современные технологии и оборудование для формирования оптических тонкопленочных структур характеризуются применением широкого спектра пленкообразующих материалов и материалов подложек, ужесточением требований к дефектности покрытий, к состоянию и геометрии межслойных границ. Растущий уровень требований к оптическим параметрам заставляет применять сложные алгоритмы в методах автоматизированного контроля и управления, оснащать вакуумные установки ранее не применявшимися наборами технологических устройств и использовать не стандартные методы обработки поверхности.

В докладе рассмотрены примеры передовых технических решений от ведущих производителей вакуумной техники, а также оригинальных подходов в технологиях оптических изделий. Среди наиболее перспективных и интересных технических решений следует отметить технологии японских компаний по нанесению прозрачных проводящих покрытий с низким поверхностным сопротивлением без специального нагрева подложек. Компания OPTORUN CO., LTD анонсировала технологию реактивного плазменного нанесения (Reactive Plasma Deposition - RPD) и в 2012 г представила на рынок установку RPD-1000 для ее реализации [1]. Другая японская компания - NACHI-FUJIKOSHI Corp. в этот же период времени представила свою установку Z-TOPS с технологией LD-PIP (Low Damage Plasma Ion Plating).

Компания Изовак также работает в этом направлении, но идет другим путем. В компании идет проект по разработке технологии нанесения прозрачных проводящих покрытий с применением анодного разряда. На рис. 1 показан снимок работающей системы испарения в анодном разряде. Первые варианты оборудования на базе платформы "Ортус" для промышленной реализации данной технологии планируется представить нашим Заказчикам в 2014 г.

Среди новых быстро развивающихся технологических направлений следует отметить повышенную активность в области создания изделий микрооптики с использованием пластмасс, оптические покрытия на которых должны выдерживать температуру пайки волной. Изделия микрооптики становятся элементами для поверхностного монтажа в электронных системах.

Целый ряд новых подходов наметился в применении технологий распыления, плазменного окисления и ионного травления в таких областях как нанесение покрытий с высокой стабильностью оптических параметров. Эти же технологические приемы позволяют реализовывать совершенно новые подходы в создании трехмерныхборок в составе подложек из разных материалов. Интересным примером является разработка японской компании Lantechical Co., которая, используя технологическое оборудование от Изовак, разработала технологию сварки при комнатной температуре различных пар матери-



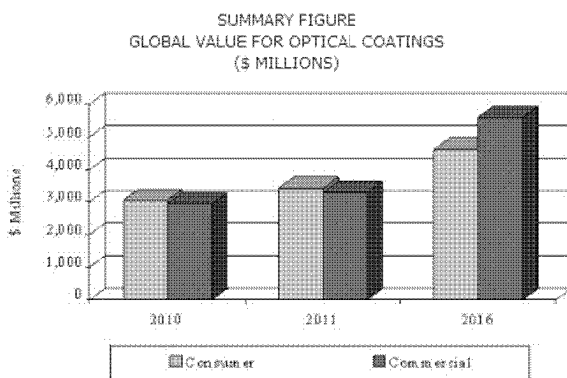
**Рисунок 1.**

**Система испарения в анодном разряде**

алов; стекло-стекло, стекло-сапфир, стекло - кремний и др. Подложки из разных материалов при этом могут быть совмещены с очень высокой точностью.

Рост рынков тонкопленочных покрытий в оптике наблюдается сейчас во всем мире (рис. 2). Если не брать в расчет валютный кризис в Беларуси в 2011 г. то данные по росту объемов продаж в области тонкопленочных покрытий в компании Изовак соответствуют мировому тренду (рис. 3).

Удержаться в этом тренде позволяет политика компании, предусматривающая высокий уровень реинвестирования прибыли в новые разработки в области оптических тонкопленочных технологий и оборудования.



**Рисунок 2.**

**Динамика мирового рынка  
оптических покрытий**



**Рисунок 3.**

**Сравнительные объемы продаж  
в области тонкопленочных покрытий  
компании Изовак**

Список литературы:

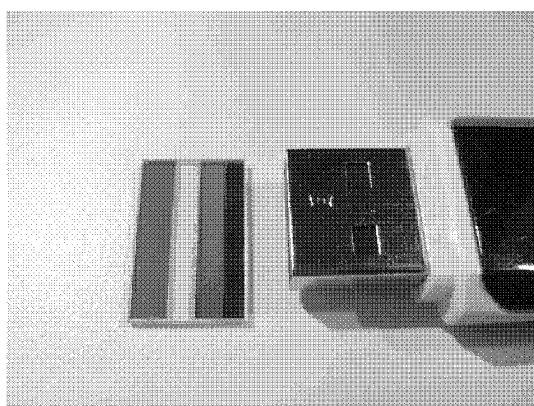
1. Каталог компании *OPTORUN* за 2012 год.

# КЛЮЧЕВЫЕ ПОДХОДЫ И ОСОБЕННОСТИ ТЕХНОЛОГИИ ФОРМИРОВАНИЯ ПРЕЦИЗИОННЫХ ВЫСОКОСТАБИЛЬНЫХ ТОНКОПЛЕНОЧНЫХ ПОКРЫТИЙ ДЛЯ ОПТИЧЕСКОГО НАЗНАЧЕНИЯ

ХОХЛОВ Е.А., МЫСЛИВЕЦ А.С., РОЗЕЛЬ П.А.

ООО «Изовак», г. Минск, Республика Беларусь

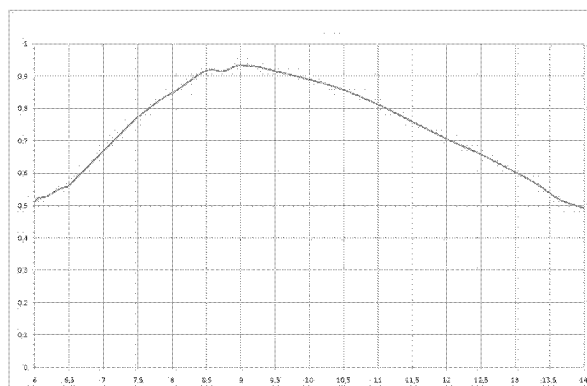
В настоящее время многозонные полосовые интерференционные светофильтры нашли применение в космической отрасли. В связи с этим, получаемые покрытия должны соответствовать жестким предъявляемым требованиям, которым полностью удовлетворяет технология нанесения с использованием ионно-лучевых источников распыления. На рис. 1 представлена фотография одного из вариантов таких фильтров.



*Рисунок 1.*

*4-х зонный фильтр на одной подложке*

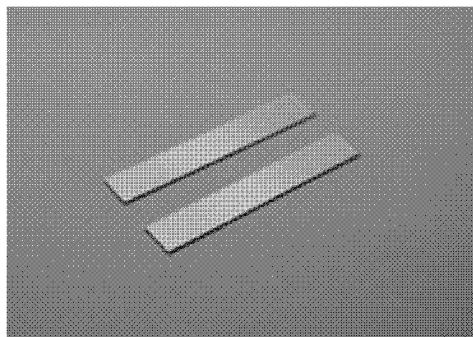
Технология получения просветляющих и упрочняющих покрытий для ИК-оптики, в основе которой лежит реакция деструкции пропана в ионно-лучевом источнике типа УАС, с дальнейшим переносом атомарного углерода на подложку, позволяет получать высококачественные DLC покрытия как по оптическим, так и по механическим свойствам. График пропускания германиевой подложки с двухсторонним DLC покрытием представлен на рис. 2.



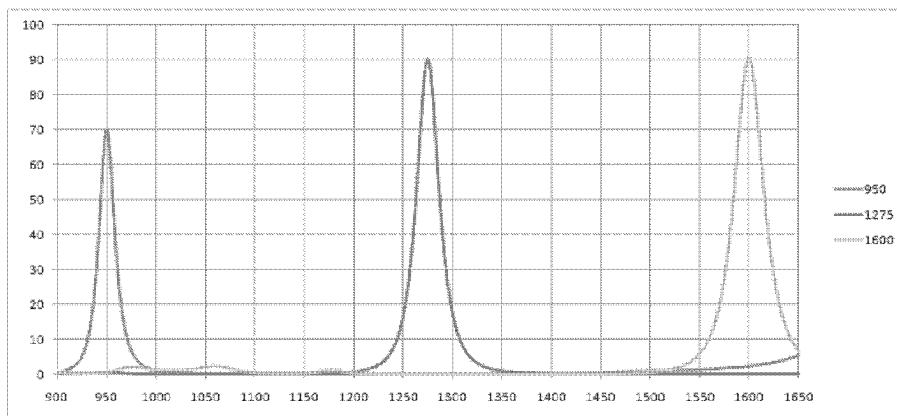
*Рисунок 2.*

*Пропускание германиевой подложки с двухсторонним DLC покрытием*

В докладе представлена краткая информация о перспективных технологиях, которые в настоящий момент находятся в стадии разработки, а именно, линейно перестраиваемых фильтров, технология нанесения просветляющего покрытия на пластиковые линзы, выдерживающего reflow процессы, технология нанесения гидрофобного покрытия, технология получения тонкопленочных оптических покрытий с высокой лучевой прочностью. Внешний вид и пропускание линейно перестраиваемых линейных фильтров представлен на рис. 3, 4.



**Рисунок 3.**  
**Перестраиваемый фильтр**



**Рисунок 4.**  
**Зависимость длины волны максимума от координаты фильтра**

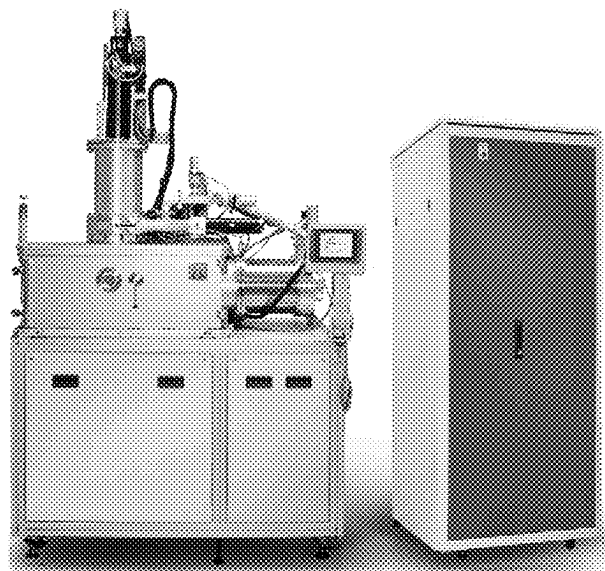
# ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ КОМПЛЕКС "АСПИРА" ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ ПРЕЦИЗИОННОЙ ОПТИКИ

КОТОВ Д.А., ХОХЛОВ Е.А., ВОЙТУЛЕВИЧ Д.М., ТУРБАН А.А.

ООО «Изовак», г. Минск, Республика Беларусь

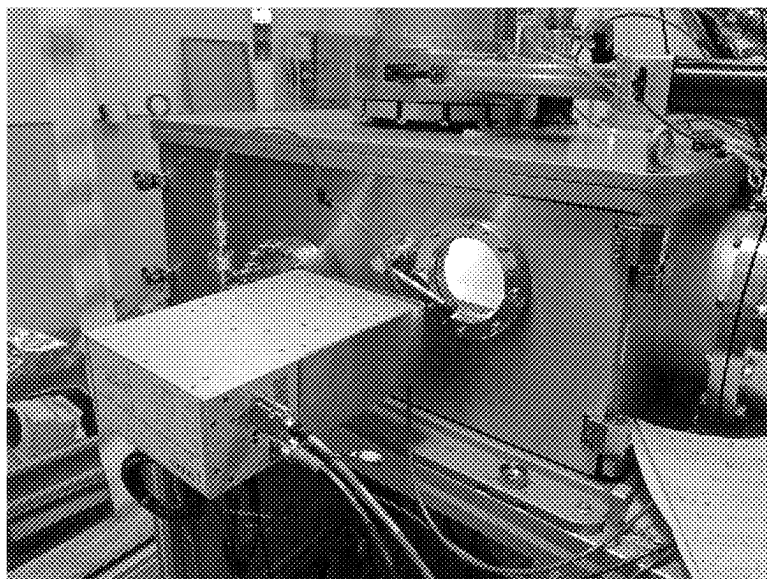
Уровень развития передовых технических систем требует применения высокостабильных прецизионных оптических элементов и устройств, для создания которых необходимо использовать вакуумные методы ионно-лучевой и ионно-плазменной обработки и осаждения. Поэтому целью разработки и развития вакуумного технологического комплекса "Аспира" является получение покрытий специального назначения, таких как узкополосные фильтры, высокоотражающие зеркала, многоволновые спектроделители, токопроводящие слои и др., с предельно высокими параметрами.

В докладе рассмотрены особенности технического устройства и достоинства технологического применения вакуумной установки "Аспира" (см. рис.1) для изготовления элементов прецизионной оптики.



*Рисунок 1.*  
*Внешний вид вакуумной установки "Аспира"*

Установка оснащена безмаслянной системой откачки, шлюзовой загрузочной камерой на подложки до 150 мм, шести позиционным мишенедержателем для ионно-лучевого и магнетронного распыления в среде инертного и реактивного газов, а также источником ионов для очистки поверхности, автоматизированной системой оптического контроля, возможна также, дополнительная установка ВЧ магнетронной распылительной системы.



*Рисунок 2.*  
*Внешний вид камеры установки "Аспира"*  
*оснащенной ВЧ сеточным источником ионов*

Приведен краткий обзор перспективы развития данного технологического комплекса для создания покрытий с высокой лазерной прочностью, оснащенного ВЧ сеточным источником ионов (см. рис. 2.).

*Список литературы:*

1. Руководство по эксплуатации «Установки вакуумного напыления» АРСМ.443225.046 РЭ. Минск, ООО «Изовак», 2007.

# СЕРИЯ ВАКУУМНОГО ОБОРУДОВАНИЯ "ORTUS" ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ ОПТИЧЕСКИХ СТРУКТУР МЕТОДОМ ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОГО И РЕЗИСТИВНОГО ИСПАРЕНИЯ С ИОННЫМ АССИСТИРОВАНИЕМ

АРТАМОНОВ А.М.

ООО «Изовак», г. Минск, Республика Беларусь

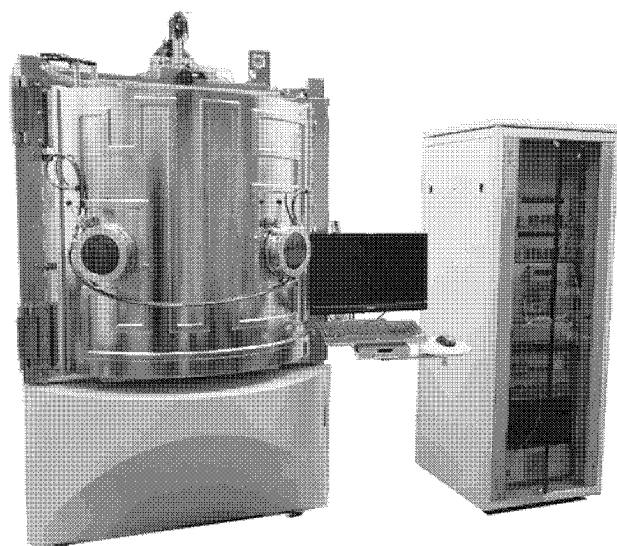
Серия вакуумного технологического оборудования платформы "Ortus" предназначена для получения многослойных оптических покрытий, в том числе лазернопрочных, для видимого, УФ и ИК диапазонов. Возможность установки различных технологических устройств, таких как электронно-лучевые и резистивные испарители, магнетронные распылительные системы, источники ионно-лучевого ассистирования и ионно-лучевой очистки - позволяет максимально гибко сконфигурировать вакуумную установку для решения конкретных технологических задач. Использование современных откачных средств - турбомолекулярных и криогенных высоковакуумных насосов, а также безмасляных механических насосов предварительного разряжения от ведущих мировых производителей, обеспечивают в установках платформы "Ortus" вакуумные условия, которые во многом определяют высокое качество и стабильность получаемых покрытий.

На рис. 1 представлена установка вакуумного напыления из серии "Ortus" - "Ortus-700", оснащенная турбомолекулярным насосом.



*Рисунок 1.*

*Вакуумное технологическое оборудование "Ortus-700"*



*Рисунок 2.*

*Вакуумное технологическое оборудование "Ortus-1100"*

На рис. 2 представлена установка "Ortus-1100" с диаметром камеры 1120 мм, в комплект которой входят два криогенных насоса.

Автоматизированное управление технологическими устройствами и процессами, построенное на основе SCADA системы MasterSCADA, обеспечивает простоту управления и позволяет в короткие сроки освоить управление установкой. Для размещения подложек применяется куполообразная, либо планетарные оснастки, которые обеспечивают высокую степень равномерности по всей поверхности оснастки. Для контроля процесса напыления покрытий применяются одноволновая, либо спектральная системы оптического контроля, также система кварцевого контроля толщины покрытий.

В докладе представлены примеры получаемых покрытий для ультрафиолетового, видимого и инфракрасного диапазонов. Приведены профили относительной неравномерности в случае использования куполообразной и планетарной оснастки.



# ПЕРСПЕКТИВНАЯ БАЗОВАЯ ПЛАТФОРМА ОПТИЧЕСКИХ ВАКУУМНЫХ НАПЫЛИТЕЛЬНЫХ УСТАНОВОК ADVANCED OPTICAL COATER ПРОИЗВОДСТВА КОМПАНИИ "ИЗОВАК"

ВОЙТУЛЕВИЧ Д.М., ХИСАМОВ А.Х., ХОХЛОВ Е.А.

ООО «Изовак», г. Минск, Республика Беларусь

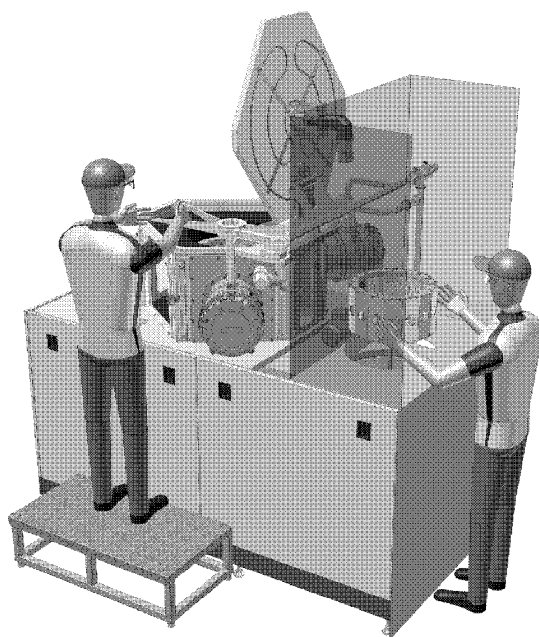
В настоящее время вместе с ростом рынка оптических покрытий растет потребность в высокопроизводительном оборудовании с повышенными требованиями к качеству покрытий. Одним из развиваемых методов нанесения оптических покрытий на данный момент является технология MetaMode™.

Суть метода заключена в послойном нанесении материала толщиной на уровне атомарного слоя с последующим реакционным окислением в среде ионизованного газа.

В докладе представлена концепция перспективной платформы вакуумной установки "Izovac Advanced Optical Coater", которая обеспечивает прецизионное формирование оптических покрытий по этой технологии.

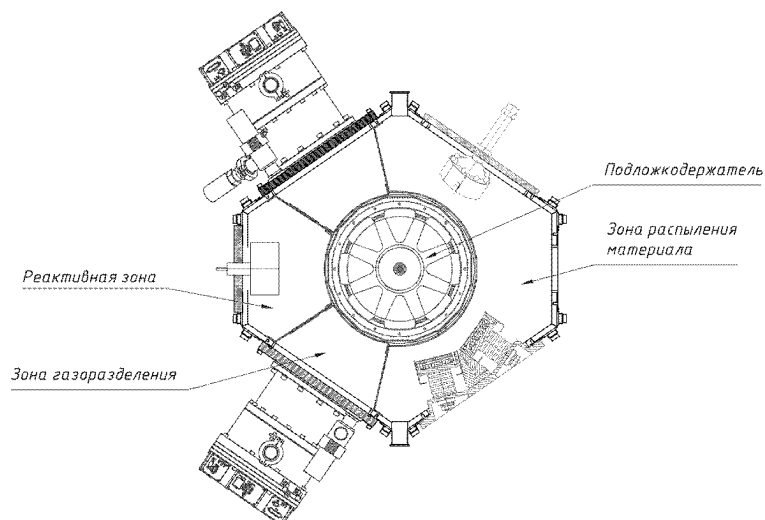
Данный тип оборудования позволит обеспечить высокую воспроизводимость толщин и оптических констант напыляемых покрытий в режимах автоматического нанесения. При этом покрытия, нанесенные без специального нагрева подложек демонстрируют очень плотную структуру и стабильность параметров в предельных условиях эксплуатации.

Для нанесения металлической компоненты материала покрытия применяется технология магнетронного распыления. Процесс реакционного окисления происходит в среде ионизованного газа в зоне плазменного ВЧ разряда высокой плотности.



*Рисунок 1.*

*Общий вид вакуумной установки «Izovac Advanced Optical Coater»*



**Рисунок 2.**  
**Компоновка технологической камеры**

Толщина единичных нанослоев металлов контролируется мощностью магнетронных источников и скоростью вращения подложкодержателя.

Для стабилизации скорости нанесения вакуумная установка оснащена системой оптического контроля на пропускание и кварцевым измерителем толщины покрытия.

В докладе рассмотрена компоновка установки, ее основные системы, узлы и элементы. Общий вид вакуумной напылительной установки указан на рис. 1, а компоновка технологической камеры на рис. 2.

# СВЕТОПОГЛОЩАЮЩИЕ ПОКРЫТИЯ НА ОСНОВЕ АЛМАЗОПОДОБНЫХ ПЛЕНОК

ЧЕКАН Н.М., АКУЛА И.П., ЛОГУНОВСКАЯ Н.В.

Физико-технический институт НАН Беларуси

В связи с бурным развитием направления космической инженерии, связанным с оптическим зондированием поверхности Земли с высоким разрешением, требуются новые материалы для фотоприемников с зарядовой связью, включая поглощающие покрытия корпусных деталей оптических устройств, способные длительное время работать в открытом космосе.

В настоящей работе приводятся результаты исследований и разработок по использованию в качестве антибликовых поглощающих покрытий алмазоподобного углерода, полученного методами комбинированного физического и химического вакуумного осаждения. Этот материал характеризуется стойкостью к абразивному износу при контакте с космической "пылью", высокой химической инертностью и способностью противостоять воздействию термализованного атомарного кислорода [1].

Показано, что при оптимальном соотношении  $sp^2$  и  $sp^3$  гибридных химических связей между атомами углерода можно получать углеродные слои с коэффициентом поглощения  $9,0 \cdot 10^4 \text{ см}^{-1}$  и  $4,7 \cdot 10^4 \text{ см}^{-1}$  для коротковолновой и длинноволновой области видимого света соответственно, что обеспечивает поглощение света для всего видимого диапазона на уровне 98% пленками, толщина которых составляет несколько микрон. По кривым поглощения из построения Тауца определена ширина оптической щели 1,1...1,4 эВ и красная граница фундаментальной полосы поглощения около 1 микрон, которая лежит значительно выше длин волн видимого диапазона.

Методами рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии и спектроскопии комбинационного рассеяния света изучен состав покрытий. Показано, что высокая поглощающая способность алмазоподобных покрытий обусловлена наличием наноразмерных графитоподобных кластеров, расположенных в матрице аморфного тетраэдрического углерода, содержание и размеры которых сильно зависят от давления реакционного газа в вакуумной камере, в качестве которого использовался ацетилен. Из эллипсометрических измерений на длине волны зондирующего лазерного излучения 632,8 нм установлен монотонный характер изменения показателя преломления в сторону уменьшения и коэффициента поглощения тонкопленочного материала в сторону увеличения с возрастанием давления ацетилена.

Комбинированный PVD-CVD метод был адаптирован для разработки технологии нанесения антибликовых покрытий на основу из инвара. Для полированной основы интенсивность отраженного света уменьшается с 46 % до 5,4 % и для шлифованных - с 5,2 % до 0,56 % при использовании разработанных покрытий. Исследована термическая стабильность покрытий в условиях периодического циклирования для диапазона температуры -100 ...+150 оС в вакууме с параметрами циклирования, соответствующими стандарту Европейского космического агентства ECSS-Q-70-04A. Выявле-

но некоторое увеличение поглощающих свойств покрытий при практически неизменных механических свойствах.

Показаны примеры успешного применения разработанных покрытий для изделий оптических устройств космической техники, в частности фокальных плоскостей космических аппаратов дистанционного зондирования Земли.

*Список литературы:*

1. *Tagawa M. et al. Space environmental effects on MoS<sub>2</sub> and diamond-like carbon lubricating films: Atomic oxygen-induced erosion and its effect on tribological properties //Surface and Coatings Technology. - 2007. - Т. 202. - №. 4. - С. 1003-1010.*

# ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ ПРОСВЕТЛЕНИЯ ГЕРМАНИЯ АЛМАЗО-ПОДОБНЫМИ ПОКРЫТИЯМИ (АПП) ИМПУЛЬСНО- ДУГОВЫМ МЕТОДОМ С ЛАЗЕРНОЙ ИНИЦИАЦИЕЙ ДУГИ

ЖИРКЕВИЧ С.В.

Частное предприятие "ВТЛСЗОС", г. Минск, Республика Беларусь

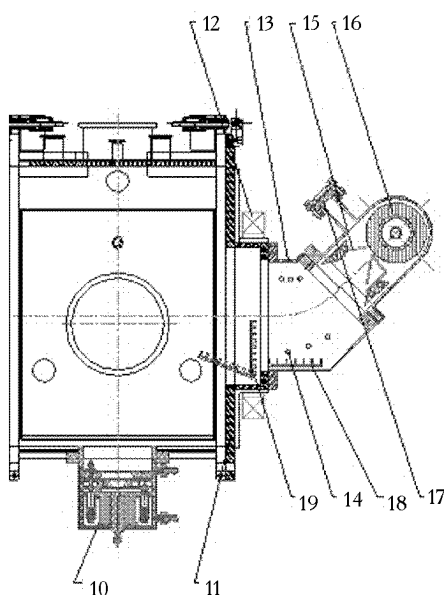
E-mail: zhsv@vtlszos.by

Германиевая оптика очень широко применяется в приборах и устройствах, работающих в инфракрасном диапазоне. Чистый германий пропускает в инфракрасном (ИК) диапазоне (до 12 мкм) на уровне 40%.

Мы предлагаем PVD-метод, основанный на импульсно-дуговом методе. Это означает максимальный процент  $sp^3$  связей, что уменьшает поглощение, а также увеличивает механическую прочность. При этом скорость нанесения может достигать до 1 мкм/ч! Еще одно несомненное преимущество нашего метода по сравнению с ныне используемыми - это возможность нанесения АПП на подложки большого габарита с различной кривизной - до 500 мм в диаметре.

Вакуумная система (см. рис. 1) для нанесения функциональных АПП покрытий состоит из низкоэнергетического ионного источника и источника сепарированного по массам потока ионов углерода.

Источник сепарированного по массам потока ионов углерода состоит из корпуса плазменного фильтра 13, отклоняющей катушки 14, фильтров-ловушек "тяжелых" ионов 18 и 19, импульсного электродугового источника ионов 15 и 16. Импульсный дуговой источник имеет лазерную систему инициализации дугового разряда оснащенную устройством



**Рисунок 1.**  
**Вакуумная система для**  
**нанесения функциональных АПП**

шагового перемещения точки фокусировки на поверхности катода на расстояние 300 мм. Между катодом 16 (диаметр катода 140 мм, высота 320 мм) и анодом 15 источника, гальванически соединенных с накопителем электрической энергии - батареей конденсаторов емкостью 2000 мкФ, изначально создана разность потенциалов 300 - 320 В. Луч лазера направляется через оптический порт 17 и фокусируется на поверхности катода 16. Вследствие абляции повышается проводимость промежутка катод - анод 15. По мере нарастания тока разряда на поверхности катода возникает катодное пятно (пятна) дугового разряда, ток разряда при этом лавинообразно возрастает. Из катодного пятна испаряется материал катода (углерод), при этом поток паров сильно ионизирован. Разряд имеет длительность около 10 мкс, длительность разряда определяется емкостью накопителя и суммой электрических сопротивлений разрядного промежутка

и соединения накопитель - разрядный промежуток. По завершении разряда оптическая система лазерной инициализации за счет вертикального перемещения зеркала фокусирует импульс излучения в точке поверхности катода отстоящей на 1 мм от предыдущей. Цикл разряда повторяется.

Плазменный фильтр поворачивает плазменный поток на  $45^\circ$  и представляет собой систему вертикально расположенных проводников 14 (медные штыри или трубки), изолированных от корпуса 13 плазменного фильтра и соединенных снаружи плазменного фильтра таким образом, чтобы получился изогнутый соленоид с прямоугольной формой витка. Питается соленоид током основного дугового разряда. Катод и анод источника гальванической связи с корпусом испарителя не имеют. Катод подключается к накопителю непосредственно, анод - через соленоид плазменного фильтра. На стенке корпуса плазменного фильтра, расположенной в прямой видимости катода размещен изолированный от корпуса фильтрловушка 18, 19 с развитой поверхностью для предотвращения попадания "тяжелых" частиц в камеру установки вследствие упругого столкновения со стенкой корпуса плазменного фильтра. Предложенная конструкция источника позволяет работать как на условно прямом потоке плазмы (условно - потому что в любом случае сепарация по массе ионов будет иметь место) практически без потери производительности, так и получать достаточно однородный по массе поток ионов углерода в камере системы, но с пониженной производительности. Это решение является компромиссным и ориентировано в основном на применение в промышленных вакуумных системах.

Для обработки поверхности образцов перед осаждением покрытия, а также для модификации пленки в процессе работы в систему введен низкоэнергетический (50 - 150 эВ) ионный источник.

# МОДУЛЬ ТОКОВОЙ ЗАЩИТЫ МОЩНОГО ИМПУЛЬСНОГО ИСТОЧНИКА ЭЛЕКТРОПИТАНИЯ ПРЕДНАЗНАЧЕННОГО ДЛЯ РАБОТЫ В СРЕДЕ ОСОБО НЕСТАБИЛЬНЫХ НАГРУЗОК

ГОДУН Д.В., ДОСТАНКО А.П., БОРДУСОВ С.В.

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники,  
г. Минск, Республика Беларусь

E-mail: godundv@mail.ru

Импульсные методы плазменной обработки материалов в настоящее время становятся всё более актуальными, в силу таких особенностей пульсирующей плазмы, как возможность управлять процессом обработки путём изменения частоты и длительности рабочих импульсов источника питания, получать более стабильные характеристики самого разряда, возможность вкладывать большую импульсную мощность при небольшом уровне средней мощности. Основная особенность функционирования источника импульсного напряжения состоит в том, что заранее электрические параметры плазменного разряда, являющегося нагрузкой, неизвестны и могут изменяться вместе с разрядными условиями (род газа, конструкция катода, давление газа и т.д.) в процессе проведения обработки изделия. При этом плазма обладает высокой нестабильностью, в результате чего разряд из одной формы может переходить в другую форму в том числе, например, в дуговой разряд [1].

Интегрирование токовой защиты в систему управления силовыми IGBT транзисторами позволяет получить схемотехническое решение, обеспечивающее защиту силового каскада от импульсных сверхтоков со временем срабатывания не превышающим 100 нс. Введение триггерной схемы фиксирования превышения значений импульсного тока и позволяет избежать ложных переключений состояния устройства ввиду больших импульсных помех.

Алгоритм управления построен так, что драйверное устройство обеспечивает комплексную защиту силовых приборов импульсного преобразователя и в случае выхода на режим защиты может находиться в таком состоянии длительное время. Устройство имеет два порога контроля импульсного тока протекающего через силовую цепь. Первым определяется состояние перегрузки, при котором устройство ограничивает ширину импульса управления через IGBT транзисторы, тем самым, обеспечивая стабилизацию тока в нагрузке. Вторым компаратор определяет режим короткого замыкания в нагрузке, при котором происходит блокирование сигнала управления IGBT транзистора.

В качестве анализатора величины импульсного тока используется быстродействующий компаратор LM2901. При достижении порогового значения величины импульсного тока и осуществлении его превышения, компаратор переключается и сигнал управления поступает на специализированный вход генератора ШИМ. При дальнейшем увеличении тока разряда осуществляется переключение второго канала компаратора и происходит блокирование импульсов управления силовым мостом.

В ходе экспериментов по защите силовых IGBT ключей было установлено, что защита первичной цепи отработывает гораздо быстрее, чем контур ООС по току заведенный на ШИМ контроллер [2].

*Список литературы:*

1. Годун Д.В., Достанко А.П. Устройство токовой защиты импульсного источника электропитания газоразрядных систем // Материалы доклада Международной научно-технической конференции "Современная радиоэлектроника: научные исследования и подготовка кадров" 23-24 апреля 2008г., Минск - с.30 - 31.

2. Godun D.V. The transformative cascade control of the powerful software-controlled pulse inverter for the excitation of the glow discharge plasma for technological applications. / D.V. Godun, S.V. Bordusov, A.P. Dostanko // Plasma Physics and Plasma Technology (PPPT - 7): proc. of the VII International Conference, Minsk, Belarus, 17 - 21 September, 2012 P. 719-722.



# АППАРАТНО-ДИАГНОСТИЧЕСКИЙ КОМПЛЕКС ФОРМИРОВАНИЯ НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОЙ НЕРАВНОВЕСНОЙ ПЛАЗМЫ ДЛЯ СОЗДАНИЯ ТОНКОПЛЕНОЧНЫХ СТРУКТУР

ГОДУН Д.В., ДОСТАНКО А.П.

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники,  
г. Минск, Республика Беларусь

E-mail: godundv@mail.ru

Аппаратно-диагностический комплекс предназначен для формирования и поддержания низкотемпературной неравновесной плазмы в среде низкого вакуума, обеспечивая широкие диапазоны регулирования электрофизических параметров протекающего технологического процесса.

Конструктивно комплекс состоит из мультисигментного генератора прямоугольных импульсов отрицательной полярности [1], модуля управления разрядной системой и самой разрядной камеры, объединенных одним контуром программного управления. Диагностика работы системы производится по средствам цифрового измерения параметров силовых импульсов и контроля искривления их геометрии. Сбор и анализ параметров производится в режиме "реального времени".

Мультисигментный генератор состоит из повышающего АС-DC преобразователя и модулятора силовых импульсов. Применение мультисигментного генератора в составе комплекса позволило обеспечивать электропитание системы, как от однофазной, так и трехфазной питающей сети. Наличие в составе генератора корректоров коэффициента мощности позволило существенно поднять общий КПД преобразования электрической энергии. Мультисигментный генератор обеспечивает формирование импульсов отрицательной полярности с регулированием амплитуды выходного импульсного напряжения от -600 до -1500 В с шагом 20 В. Частота следования силовых импульсов обеспечивается от 5 до 60 кГц с шагом 5 кГц. Генератор обеспечивает регулировку скважности в диапазоне от 2 до 10. Импульсный ток, протекающий в цепи формирования разряда, в зависимости от установленной скважности, может достигать значения в 40 А. Изменение выходных электрических параметров мультисигментного генератора, реализовано ручным и программным методом. Повышение частоты следования силовых импульсов под решение узкоспециализированных технологических задач, может быть обеспечено путем установки более высокочастотных "ключей". Аналого-цифровая система управления генератором обеспечивает стабилизацию амплитуды выходного напряжения на заданном уровне, контроль импульсного тока в выходных цепях, измерение температуры нагрева силовых ключей (IGBT и Mosfet), а так же фиксирование электрических параметров источника электропитания при возникновении аварийных ситуаций [2].

Модуль управления разрядной системой реализован на микроконтроллере и обеспечивает управление блоком охлаждения и подогрева, проводит разгерметизацию камеры, по средствам датчиков производит измерение расхода рабочих газов, считывает данные с вакуумметра и программным путем осуществляет стабилизацию давления в разрядной камере. Выходной тракт мультисигментного генератора соединен с электрическим вводом

разрядной системы при помощи специального устройства согласования. Применение данного устройства позволило уменьшить сдвиг фаз между импульсами тока и напряжения, получить более ровные фронты силовых импульсов и тем самым повысить как надежность работы всей системы, так и КПД технологического процесса.

Проведенные исследования характеристик реактивности плазмы, как нагрузки для мультисигментного генератора, выявили большое количество схемотехнических особенностей проектирования силовых модулей преобразования электрической энергии [3].

*Список литературы:*

1. Годун Д.В., Достанко А.П. Мультисигментный программно-управляемый генератор формирования низкотемпературной неравновесной плазмы / Д.В. Годун, А.П. Достанко // Нанотехнологии-2012: материалы Международной научно-технической конференции, 25 - 29 июня 2012 г., г. Таганрог, Россия. - С. 144-145.

2. Godun D.V. Systems of electronic overcurrent protection in pulse power generator operating on plasma load / D.V. Godun, S.V. Bordusov, A.P. Dostanko // Plasma Physics and Technology : proc of the 25th Symp. , Prague, Czech Republic, 2012.- P. 144

3. Bordusau S. Experimental study of reactivity of low-temperature nonequilibrium plasma excited by a low frequency pulse generator / S. Bordusau, D. Godun, A. Dostanko, V. Belevich // Plasma Physics and Technology : proc of the 25th Symp. , Prague, Czech Republic, 2012.- P. 142

# УНИВЕРСАЛЬНЫЙ СКАНИРУЮЩИЙ СПЕКТРОФОТОМЕТР PHOTON RT ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОПТИЧЕСКИХ СВОЙСТВ МАТЕРИАЛОВ

КРИВЕЦКИЙ К.Н., ЛISOVСКИЙ Т.С.

ООО "ЭссентОптикс"

E-mail: office@essentoptics.com

Современные и перспективные задачи по разработке новых типов оптических приборов предъявляет повышенные требования к оптическим характеристикам деталей с покрытиями. Имеющиеся в наличии на предприятиях классические аналитические спектрофотометры разработаны для преимущественного применения в области биохимии, медицины и т.п. Их конфигурация зачастую либо не обеспечивает возможность получения необходимых данных об оптических характеристиках, либо требует применения сложных, громоздких и дорогостоящих приставок, которые тем не менее не решают большинства прикладных задач по оптическим измерениям.

Анализ требований к оптическим измерениям показывает, что сейчас уже недостаточно знать характеристики покрытия при нормальном угле падения излучения. Важно знать фактические параметры покрытия для тех условий, в которых оптическое покрытие будет реально эксплуатироваться в приборе. Это включает измерения в широком диапазоне спектра, а также измерения в большом диапазоне углов с учетом отдельных поляризующих компонентю. Дополнительно, при решении задач расчета и производства неравнотолщинных интерференционных покрытий важнейшей составляющей успеха являются сведения о фактической дисперсии показателя преломления материала слоев, составляющих конструкцию покрытия. Наличие и применение указанных данных обеспечивает более высокое качество получаемых покрытий.

В докладе представлены возможности и результаты применения универсального двухлучевого сканирующего спектрофотометра PHOTON RT, разработанного спе-

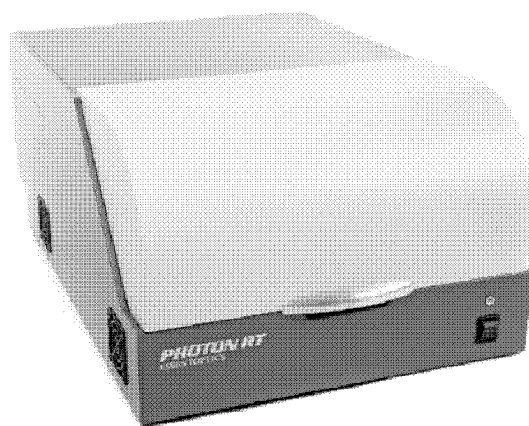


Рисунок 1. «PHOTON RT»

циально для решения задач по оптическим измерениям деталей с покрытиями. Подробно освещаются реализованные прогрессивные технические решения, позволяющие проводить достоверные измерения в рекордно широком диапазоне спектра 190-4500 нм, многоугловые измерения до 75 градусов, измерения пропускания образцов большой толщины с автоматической компенсацией смещения луча. Показаны возможности прибора по измерениям в поляризованном свете в УФ, видимом и ИК диапазонах до 4500 нм - отдельно s и p компонент и автоматический расчет средней поляризации. Дополнительно представлены функции измерения отражения и пропускания для поляризационных кубиков. Для определения параметров одиночных слоев пленкообразующих материалов в спектрофотометре PHOTON RT внедрено программное обеспечение, позволяющее по результатам измерения вычислять параметры n, k, d слоя. Важной отличительной особенностью прибора является выполнение всех измерений без применения дополнительных приставок, простота и удобство работы, компактный размер прибора, а также минимальное участие оператора в измерительном процессе.

---

# АНАЛИЗ СОСТАВА ОСТАТОЧНОЙ АТМОСФЕРЫ В ВАКУУМНОЙ КАМЕРЕ РАЗЛИЧНЫХ УСТАНОВОК

ТОМАЛЬ В.С., КАСИНСКИЙ Н.К., ДЕМИДОВИЧ Т.И., ИВАНОВ И.А.

РУП "Оптическое станкостроение и вакуумная техника".

Белорусский национальный технический университет, г. Минск, Республика Беларусь

E-mail: os\_vt@mail.belpak.by, E-mail: ViKT@bntu.by

Состав остаточной атмосферы в вакуумной камере оказывает существенное влияние на свойства оптических покрытий и определяется процессами сорбции и десорбции, протекающими на внутренних поверхностях камеры и всей откачной системы, применяемыми средствами откачки и процессами, связанными с испарением и конденсацией пленкообразующего материала.

В связи с использованием в настоящее время различных средств откачки в вакуумных технологических установках и существенным расширением номенклатуры применяемых для напыления пленкообразующих материалов (ПОМ) представляет интерес сравнительный анализ состава остаточной атмосферы в вакуумных установках одного типа с различными средствами откачки, качественный и количественный анализ атмосферы при испарении новых ПОМ.

Состав остаточной атмосферы технологического вакуумного объема установки является важнейшим параметром, определяемым в первую очередь конструкцией установки и свойствами используемых материалов. Был проведен сравнительный анализ остаточной атмосферы в вакуумных установках одного типа, но с различными средствами откачки, а именно:

- на установке типа ВУ-1А с криогенным высоковакуумным насосом;
- на установке ВУ-2М с паромасляным насосом;
- на установке А-700QE с криогенным насосом высокой производительности.

Исследовался также состав атмосферы при испарении ПОМ различных заводов - изготовителей.

Измерение парциального давления производилось с помощью масс-спектрометра МХ-7304 с анализатором монополярного типа, позволяющим разрешать ионы с массовыми числами от 1 до 200 и сходимостью показаний не хуже 2,5%.

Состав остаточной атмосферы был исследован после следующих этапов технологического цикла: высоковакуумной откачки, прогрева вакуумной камеры, прогрева ПОМ.

Как видно из приведенного в таблице 1 сравнения остаточной атмосферы в разных установках, основную часть её составляют пары водорода ( $H_2$ ), воды ( $H_2O$ ), углерода ( $N_2$ ), кислорода ( $O_2$ ) и углеводороды.

Остаточное давление паров углеводородов выше у установок с паромасляным насосом (ВУ-2М). Несколько более высокое давление углеводородов в установке ВУ-1А по сравнению с А-700 QE обусловлено тем, что в качестве антифрикционной смазки используется вакуумное масло ВМ-1.

Было определено давление углеводородов в установках ВУ-1А, А-700 QE и ВУ-2М при не нагретой и нагретой до 6000К камерой. Результаты приведены в таблице 2.

**Таблица 1**

Тип вакуумной установки, тип насоса	Состав остаточной атмосферы, %				
	H <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> O	N <sub>2</sub>	O <sub>2</sub>	углеводороды
ВУ-1 (криогенный насос, скорость откачки 1,5 м <sup>3</sup> /с)	1,6	65,8	20	4,2	8,1
А-700QE (криогенный насос, скорость откачки 10,0 м <sup>3</sup> /с)	3,9	82,5	8,2	1,1	5,2
ВУ-2М (паромасляный насос)	2,3	82,0	5,3	1,1	9,5

**Таблица 2**

Тип вакуумной установки, тип насоса	Содержание углеводородов, %	
	без нагрева	с нагревом
ВУ-1 (криогенный насос)	8,1	13,1
А-700QE (криогенный насос)	5,2	13,0
ВУ-2М (паромасляный насос)	9,5	17,8

В вакуумной установке ВУ-2М с паромасляным насосом давление углеводородов в нагретой камере близко к давлению насыщенных паров ВМ-1 при этой температуре.

Несколько ниже давление углеводородов при использовании безмасляной откачки, хотя негативное влияние оказывает наличие вакуумного масла в отдельных узлах установки ВУ-1А при использовании криогенных насосов.

На основании анализа полученных экспериментальных результатов можно сделать следующие выводы:

1. Использование безмасляных средств откачки снижает давление паров воды и углеводородов по сравнению с использованием паромасляного насоса.

2. Для эффективного снижения давления углеводородов необходимо устранять источники паров масла в вакуумной камере.

# ТРЕХПОЛОСНЫЕ СЕЛЕКТИВНЫЕ ОПТИЧЕСКИЕ ФИЛЬТРЫ

ГАПОНЕНКО С.В., КОЖУХ С.Г., МАЛЕВИЧ Н.А., СТЕПКОВА С.А.

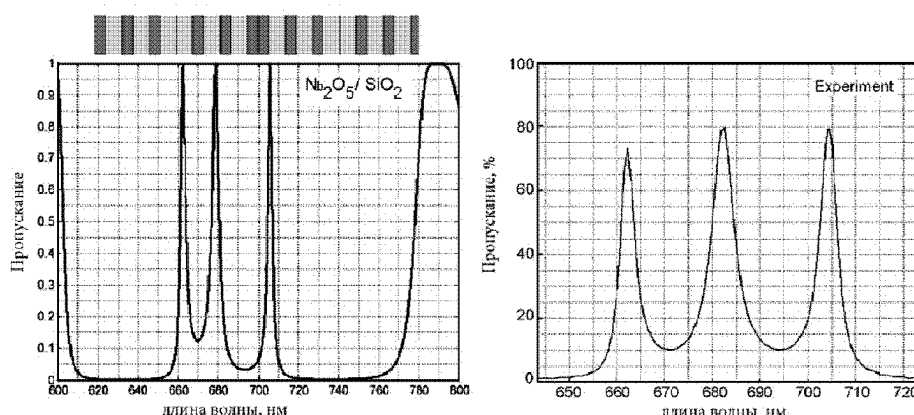
Институт физики им. Б.И.Степанова НАН Беларуси

Селективные оптические фильтры с одной узкой полосой пропускания являются массовым коммерческим продуктом на рынке оптических и оптоэлектронных компонентов и находят применение в разнообразных оптических приборах и инструментах. Однако для решения различных задач требуются селективные фильтры с иными характеристиками - а именно, требуется наличие не одной узкой полосы пропускания, а нескольких. Трехполосные селективные фильтры могут применяться в медицине при диагностике ряда заболеваний с помощью прямого детектирования аналитических полос в спектре вторичного свечения биопроб либо с помощью детектирования антител, меченых рамановскими маркерами. Используя оптический фильтр с узкими полосами пропускания, можно создавать компактный фильтровый анализатор, не содержащий дорогостоящего спектрографа и не требующего высокой спектроскопической квалификации оператора [1]. Селективные оптические фильтры могут найти применение и в фотолитографии для выделения из спектра ртутной лампы необходимых полос излучения. В данной работе произведен расчет трехполосного фильтра, пропускающего три длины волны 365; 404,6; 435,8 нм. [2].

На основе анализа распространения света в слоистых аперидических структурах предложена конструкция трехполосного избирательного оптического фильтра. Такой оптический фильтр представляет собой слоистую структуру, состоящую из трех связанных многослойных интерферометров Фабри-Перо (планарных микрорезонаторов), образованных двумя многослойными зеркалами с диэлектрическим промежутком между ними. Структуру фильтра можно описать следующей формулой:

$$(BA)_n A(BA)_m (AB)_m A(AB)_n,$$

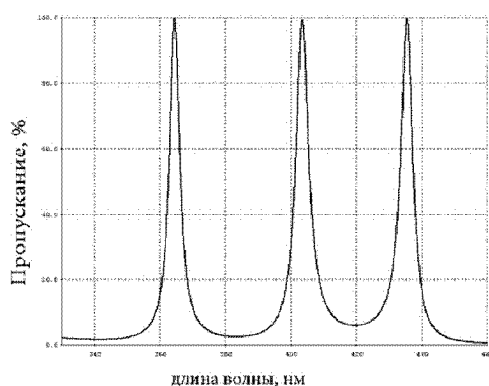
где А, В - слои диэлектрических материалов с высоким и низким показателем преломления, n, m - число повторений элементов структуры, изменяя которое, мы можем менять расстояние между пиками относительно друг друга и делать пики более выраженными.



**Рисунок 1. Спектральная характеристика рассчитанного и экспериментального фильтра для задачи диагностики рака горла**

Можно добиться лучшей контрастности фильтра, удлиняя данную структуру с использованием промежуточных слоев. В качестве промежуточных слоев может выступать в данном случае структура вида А(ВА).

Применительно к задаче диагностики рака горла по данным спектроскопии комбинационного рассеяния были произведены расчеты структуры трехполосного оптического фильтра. В результате, на основе расчетов методом вакуумного напыления был изготовлен трехполосный оптический фильтр, который может стать частью компактного анализатора, позволяющего на ранних стадиях диагностировать рак горла, при этом не содержащего дорогостоящего спектрографа и не требующего высокой спектроскопической квалификации лаборанта.



**Рисунок 2. Спектральная характеристика рассчитанного оптического фильтра для выделения трех линий излучения ртутной лампы**

Произведены расчеты структуры трехполосного оптического фильтра с использованием данных о практически используемых материалах применительно к задаче выделения трех линий излучения ртутной лампы.

Список литературы:

1. Design of high-transmission multiband multilayer filters for Raman spectroscopy. / S.Kozhukh, S.Gaponenko, S.Zhukovsky, I.Yurkevich, S.Stepkova, et al.// J. Nanophoton. - 2012. - 6(1) - 061704.
2. Sansonetti C. J., Salit M. L., Reader J. Wavelengths of spectral lines in mercury pencil lamps / Applied optics. - 1996. - Т. 35. - №. 1. - С. 74-77.



# ОПЫТ ЭКСПЛУАТАЦИИ ВСТРАИВАЕМОЙ СИСТЕМЫ КОНТРОЛЯ ОПТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК IRIS 0411 НА ВАКУУМНОМ УЧАСТКЕ НТЦ "ЛЭМТ" БЕЛОМО

ДЕРГАЙ Н.Ф., КОНДАЛЕВА И.А.

Научно-технический центр "ЛЭМТ" БелОМО, Республика Беларусь

E-mail: optic@lemt.by

В связи с ростом конкуренции по созданию новых оптических приборов возросла потребность в новых типах сложных покрытий, ужесточились требования к качеству покрытий. Недостаточный уровень технологий вакуумного напыления, являющихся завершающим этапом всего многостадийного технологического процесса производства оптических элементов для лазерной и оптико-электронной техники может повлечь существенные затраты материальных ресурсов и времени, поскольку наличие брака на последнем этапе производства приводит либо к необходимости производить ряд предшествующих операций повторно, либо к утилизации бракованных деталей и повторению всего производственного цикла. Вследствие этого перед технологами-производственниками стоят задачи улучшения качества, повторяемости оптических параметров покрытий, резкого сокращения сроков изготовления покрытий.

На вакуумном участке НТЦ "ЛЭМТ" БелОМО эксплуатируются установки ВУ-2М и ВУ-1А (СЗОС, год выпуска установок 1990). Для проведения контроля напыления установки оснащены системой фотометрического контроля СФКТ-751В. В связи с длительным сроком эксплуатации утратили свои технические характеристики основные узлы системы контроля, такие как дифракционные решетки, отрезающие фильтры, узлы монохроматора, ФЭУ и приемники излучения. Вследствие морального устаревания данные детали сняты с производства и вопрос восстановления работоспособности СФКТ-751В порой не может быть решен. В итоге вакуумное оборудование простаивает либо вообще не подлежит эксплуатации. Проблемы с устареванием ФЭУ, дифракционных решеток и отрезающих фильтров вызывают большие трудности в изготовлении оптических покрытий, даже если при этом состояние вакуумных установок поддерживается на должном техническом уровне. Ошибки фотометрирования зачастую не позволяют выполнить новые требования конструкторов, приводят к браку больших партий оптических деталей.

## Принятые решения и достигнутые результаты

В 2011 вакуумный участок был оснащен встраиваемой системой спектрального контроля оптических характеристик модель IRIS 0411 производства компании ЭссентОптикс (Минск). Введение в эксплуатацию этой системы позволило решить следующие задачи:

1. Уйти от проблем поиска ЗИПа для СФКТ-751В, тем самым продлить срок эксплуатации вакуумных установок.

2. Новая система контроля проста в установке и юстировке.

3. Применение системы контроля позволяет решить проблемы напыления оптических покрытий с неравнотолщинными слоями для любых напыляемых материалов. Стало возможным напылить  $0,125\text{SiO}_2$ ;  $0,873\text{ZrO}_2$ ;  $1,67\text{Al}_2\text{O}_3$ .

4. Повторяемость процесса 95%, при этом оставшиеся 5% мы отдаем человеческому

фактору и самой вакуумной установке (вода, воздух, электроэнергия, механика установки).

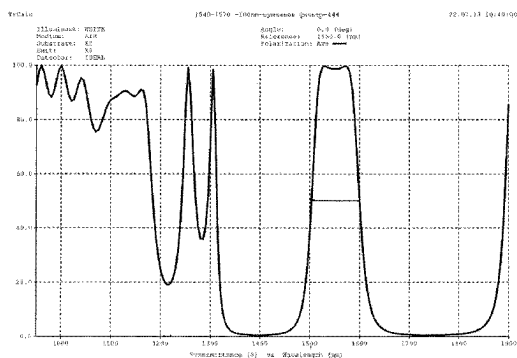
5. После наработки навыков эксплуатации данной системы стало возможным проводить ряд даже ответственных процессов без так называемых "пробных" процессов, что позволило экономить рабочее время и материалы для напыления.

6. При спектральном наблюдении фотометрирования слоев становится понятно, как лучше или эффективнее сделать тот или иной расчет покрытия. Четко анализируется динамика изменения всей спектральной кривой и видны точки, позволяющие получить оптимальные параметры новых покрытий.

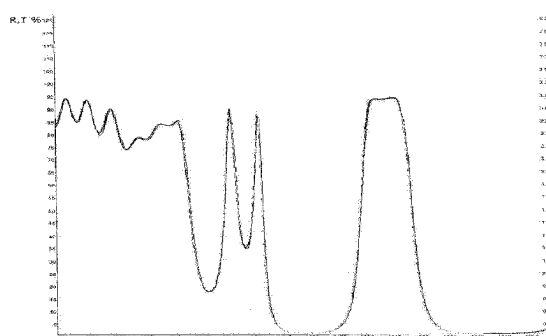
7. Система также имеет программу МультиСпектр для расчета основных и промежуточных спектров оптических покрытий. Это позволяет корректировать процесс напыления оптических деталей, провести расчет оптического покрытия (если у технолога нет программы расчета, а такое еще встречается в наше время).

8. Рабочая документация к системе контроля составлена четко и с большим количеством поясняющих рисунков и графиков.

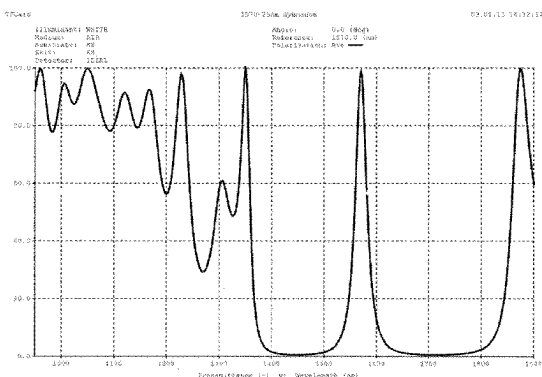
Приводим несколько типов покрытий, изготовленных с помощью спектральной системы контроля IRIS 041, и соответствующие расчеты. Расхождения составляют сотые доли процента (см. рисунки).



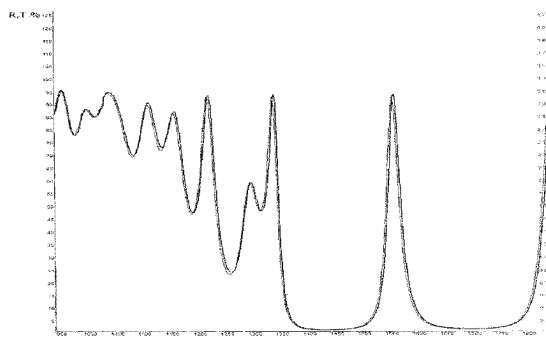
**Рисунок 1 а. Широкополосный фильтр на стекле K8  $\lambda = 1540-1570$  нм с  $T > 90\%$   $\Delta\lambda_{0.5} = 100$  нм (получен без пробного процесса).  
Теоретический расчет покрытия**



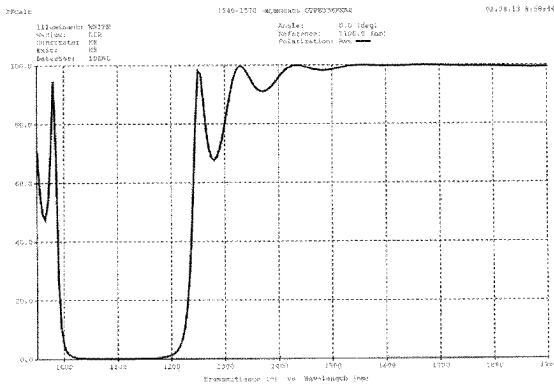
**Рисунок 1 б.  
Фактический спектр полученного покрытия**



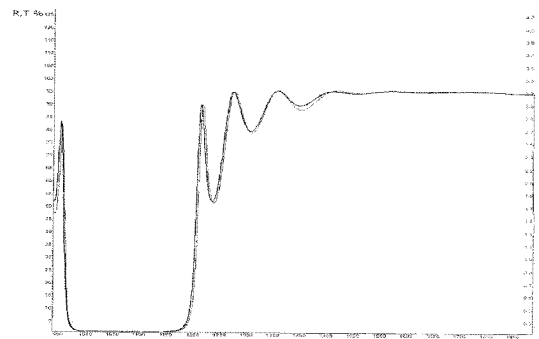
**Рисунок 2 а. Узкополосный фильтр на стекле K8  $\lambda = 1570$  нм  $T > 90\%$   $\Delta\lambda_{0.5} = 25$  нм.  
Теоретический расчет покрытия**



**Рисунок 2 б.  
Фактический спектр полученного покрытия**



**Рисунок 3 а. Зеркало для  $\lambda_1 = 1064$  нм с  $R \geq 99,7\%$ ,  $\lambda_2 = 1540$  с  $T \geq 95\%$  (получено без пробного процесса).  
Теоретический расчет покрытия**



**Рисунок 3 б.  
Фактический спектр полученного покрытия**

## Выводы

Эксплуатируемая на нашем предприятии встраиваемая система спектрального контроля IRIS 041 показала себя простым, надежным в эксплуатации и эффективным решением для получения оптических покрытий с характеристиками, соответствующими расчетным. Внедрение системы спектрального контроля IRIS 041 позволило не только улучшить характеристики изготавливаемых покрытий, но и перевести весь технологический процесс на качественно новый уровень изготовления покрытий.

## **Секция 2**

# **Технологии изготовления и контроля оптических элементов, используемое современное технологическое оборудование**

# ОСНОВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ РАЗВИТИЯ ОПТИЧЕСКОГО ПРОИЗВОДСТВА ОАО " ММЗ ИМ. С.И. ВАВИЛОВА - УПРАВЛЯЮЩАЯ КОМПАНИЯ ХОЛДИНГА "БЕЛОМО"

ВОЛОСАЧ Ю.П.

ОАО " Минский механический завод им. С.И. Вавилова -  
управляющая компания холдинга "БелОМО" г. Минск, Республика Беларусь

E-mail: optic@mail.lida.by

В настоящее время оптическое производство ОАО «ММЗ им. С.И. Вавилова - управляющая компания холдинга «БелОМО» организационно оформлено как Оптический завод «Сфера» и представляет гибкую производственную структуру, способную выпускать широкую номенклатуру оптических деталей как в единичных количествах, так и крупными сериями. Оптическое производство имеет полный цикл, начиная от заготовительных операций и заканчивая операциями оптических покрытий и склейкой.

Номенклатура изготавливаемых деталей включает:

- линзы диаметром до 150 мм
- пластины с максимальным размером 250 мм
- призмы с максимальным размером 100 мм

Максимальная точность обработки составляет:

Для линзы: N - 1,  $\Delta N$  - 0,1, точность центрирования - 0,005 мм, класс чистоты P - I

Для пластин: N - 1,  $\Delta N$  - 0,1, Клиновидность - 5", класс чистоты, P - II-III

Для призм: N - 0,2-0,3,  $\Delta N$  - 0,1, точность углов  $\pm 2''$ , класс чистоты P - II-III

Для сеток и шкал: N - 2-3,  $\Delta N$  - 0,3-0,5,  $\rho$  - 0-20, класс чистоты P - 0-20 - P - I

1. Заготовительный участок.

1.1. Выполняемые операции:

На заготовительном участке выполняются следующие операции:

- распиловка
- плоское, круглое, сферошлифование
- изготовление призм
- сверление отверстий
- фрезерование по контуру

1.2. Используемое оборудование и инвестиции в обновление станочного парка:

На заготовительном участке задействовано оборудование, в основном производства Сморгонского завода оптического станкостроения.

В последние годы сделаны значительные инвестиции в обновление парка заготовительных станков. В частности были закуплены станки Сморгонского завода:

- Алмазно-отрезной станок АОС-200 - 1 ед.
- Станки бесцентрового шлифования БШС-10 - 2 ед.
- Фрезерный 3-х координатный станок с ЧПУ-ХК 7032 производства КНР - 1 ед.
- Модернизированы сферошлифовальные станки Алмаз 70 - 4 ед.

### 1.3. Внедрение современных технологий.

В 2012 г. введен в эксплуатацию 3-х координатный станок с ЧПУ, на котором освоена технология контурной обработки сложнопрофильных деталей, позволяющая обрабатывать наружный контур сложного профиля на станке без дополнительной ручной подгонки. Также на заготовительном участке применяется современная высокопроизводительная технология двухстороннего плоского шлифования на станках СДШ 100.

#### 2. Участок полирования.

##### 2.1. Выполняемые операции:

На участке полирования производится полирование линз, пластин, призм.

##### 2.2. Используемое оборудование и инвестиции в обновление станочного парка:

Используемое оборудование - шлифовально-полировальные и полировально-доводочные станки Сморгонского завода оптического станкостроения моделей: 9ШП20, 9ШП50, 6ШП100, 6ПД-100, 6ШП200, 3ШП350, 4ПД-200, 3ПД-320.

В 2010-2012 годах были приобретены новые станки Сморгонского завода моделей 9ШП50- 2 ед., 6ПД-100 - 1 ед., 3ПД-350 - 2 ед., ШПД-200 - 1 ед.

В рамках реализации инвестпроекта по созданию участка полирования линз 1 класса чистоты запланировано в 2013 г. приобретение одного сферошлифовального станка SM 100, двух станков для полирования сферических поверхностей SPK 100, интерферометра OWI-150 производства фирмы Optotech Optikmaschinen (Германия).

##### 2.3. Внедрение современных технологий.

Постоянно растущие требования к точности и классу чистоты оптических поверхностей привели к необходимости создания отдельного участка полирования линз 1 класса чистоты, строительство которого осуществляется в настоящее время. На этом участке с помощью современной системы кондиционирования планируется поддерживать постоянные параметры производственной среды, в том числе: температура воздуха  $24 \pm 2^\circ$ , влажность не более  $55^\circ$ , что позволит стабилизировать технологический процесс полирования линз 1 класса чистоты и получить процент выхода годных деталей с 1 предъявления на уровне не менее 50%.

Для полирования пластин внедрена и используется высокопроизводительная технология двухстороннего шлифования и полирование плоскостей.

#### 3. Участок центрирования.

##### 3.1. Выполняемые операции:

На участке центрирования производится центрирование линз методом самоцентрирования и методом наклейки с центрированием линзы по прибору.

##### 3.2. Используемое оборудование и инвестиции в обновление парка станков:

На участке центрирования эксплуатируются центрировочные станки Сморгонского завода оптического станкостроения.

В 2010-2011 годах приобретены станки Сморгонского завода: ЦСМ-50М - 3 ед., ЦС-100А - 1 ед.

##### 3.3. Внедрение современных технологий.

В рамках реализуемого на предприятии инвестиционного проекта по созданию участка обработки линз 1 класса чистоты планируется закупка центрировочных станков моделей SLC50, SLC201 фирмы Schneider (Германия), которые позволяют без наклейки центрировать по лазерному прибору линзы любой конфигурации с любым углом сжатия.

#### 4. Участок оптических покрытий.

##### 4.1. Выполняемые операции:

На участке оптических покрытий наносятся покрытия различного функционального назначения:

- просветляющие,
- отражающие,
- светоделительные,
- спектроделительные,
- токопроводящие,
- интерференционные фильтры.

Спектральный диапазон наносимых покрытий: ультрафиолетовая, видимая и ближняя инфракрасная область спектра.

#### 4.2. Используемое оборудование и инвестиции в обновление оборудования:

На участке покрытий используется вакуумные установки производства Сморгонского завода оптического станкостроения. В 2010-2012 гг. были закуплены вакуумные установки Сморгонского завода: ВУ-2М - 1 ед., ВУ-1А - 2 ед., спектрофотометр Carry 5000 для высокоточных измерений оптических характеристик покрытий.

#### 4.3. Внедрение прогрессивных технологий.

За последние годы внедрена прогрессивная технология контроля спектральных характеристик наносимых покрытий в режиме реального времени на базе спектровизора.

#### 5. Участок промывки оптических деталей.

##### 5.1. Выполняемые операции:

На участке промывки осуществляется роботизированная промывка оптических деталей на установках РТКП-1 после операций полирования, центрирования. Выполняется также промывка вручную в ЛВЖ для химически нестойких стекол.

##### 5.2. Используемое оборудование и инвестиции в обновление.

На участке промывки эксплуатируются роботизированные линии РТКП-1, разработанные в НП РУП «ОС и ВТЦ». В рамках реализации инвестпроекта по созданию участка полирования линз 1 класса чистоты запланировано в 2013 г. приобретение линии промывки производства фирмы DeSonic (Германия).

##### 5.3. Внедрение новых технологий.

Приобретение новой промывочной линии производства фирмы DeSonic (Германия) позволит производить промывку по программе в зависимости от марки стекла в полностью закрытой установке без участия человека после операций полирования, центрирования, а также перед нанесением оптических покрытий.

В линии применяется система регенерации моющих растворов на основе дистилляции, что позволяет экономить расходные материалы. В линии содержится узел подготовки и очистки воды, а также узел деионизации воды.

#### 6. Участок изготовления сеток и шкал.

##### 6.1. Выполняемые операции:

На участке изготовления шкал и сеток нанесение рисунка производится методом фотолитографии и методом механического деления по слою воска с последующим травлением в парах плавниковой кислоты. Сетки, изготавливаемые делением, выполняются с белым и черным запуском.

##### 6.2. Используемое оборудование и инвестиции в обновление станочного парка:

Для механического деления используется пантографы Новосибирского приборостроительного завода. В 2013 году собственными силами изготовлены 4 пантографа.

##### 6.3. Внедрение современных технологий.

В 2013 году внедрена новая технология изготовления сеток, представляющая собой комбинацию фотолитографии и механического деления, значительно расширившая диапазон изготавливаемых рисунков.

# МАГНИТОГИДРОДИНАМИЧЕСКОЕ ПОЛИРОВАНИЕ ОПТИЧЕСКИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ

ГЛЕБ Л.К., ГОРОДКИН Г.Р.

Институт тепло- и массообмена имени А.В. Лыкова НАН Беларуси,

г. Минск, Республика Беларусь

E-mail: sni.itmo@gmail.com

Оптические детали изготавливаются высококвалифицированными оптиками с использованием специально разработанного рабочего инструмента - полировальника. Изменение со временем механических свойств и формы полировальника ограничивает возможности прецизионного полирования поверхностей сложной формы. Кардинальное решение этой проблемы предложено в конце прошлого века в Беларуси и получило развитие в США в компании QED-Technologies [1-4]. Оно заключается в использовании в качестве полировальника жидкой магниточувствительной среды (полировальной жидкости). Этот принцип положен в основу технологии магнитореологического (MR) полирования, которая в настоящее время известна под торговой маркой MRF (magnetorheological finishing). Полировальная жидкость, состоящая из магнитных и абразивных частиц, воды и химических добавок, подается на движущуюся подложку в зону полирования. В зоне полирования формируется сильное неоднородное магнитное поле, под воздействием которого полировальная жидкость преобразуется в пластичный материал - эластичный полировальный слой и уносится движущейся подложкой из зоны полирования. Полировальная жидкость специальными мерами приводится в исходное однородное состояние и вновь подается в зону полирования.

Фундаментальное достоинство метода (при условии обеспечения длительной и контролируемой стабильности свойств жидкости, применении средств измерения пространственной функции уноса материала в пятне полирования, расчете кинематики перемещения полируемой детали) заключается в возможности равномерного съема материала со сложной поверхности и в управлении формой поверхности.

В докладе представлены: результаты разработки основных компонентов системы, ее технологические характеристики, созданные станки для оптических деталей, результаты полирования некоторых материалов. Американские специалисты предложенный метод полирования назвали революцией в полировании оптики [5].

## Список литературы:

1. Л.К. Глеб, Г.Р. Городкин. Полирование оптических поверхностей с использованием магнитных жидкостей / Прогрессивные методы создания оптических элементов. Материалы второго научно-технического совещания. Минск ИФ АН БССР, 12-16 октября 1987г.
2. Kordonsky W.I., Prokhorov I.V., Gorodkin S.R., Gorodkin G.R., Gleb L.K., Kashevsky B.E. Magnetorheological polishing devices and methods. USA Patent 5449313 (1995).
3. Кордонский В.И., Глеб Л.К., Городкин Г.Р., Городкин С.Р. Способ гидродинамического полирования. Патент РБ № 2895 (1996).
4. History of magnetorheological finishing / D. C. Harris and other. // Proceedings of SPIE, 2011.
5. Dale G. Adam, Stanley P. Kopacz. A revolution in optics manufacturing. Army RD&A, November-December 1996.



# ОЦЕНКА КАЧЕСТВА ПОВЕРХНОСТИ ОПТИЧЕСКИХ ДЕТАЛЕЙ МЕТОДОМ АТОМНО-СИЛОВОЙ МИКРОСКОПИИ

ГЛЕБ Л.К., ДРОЗД Е.С., ГОРОДКИН Г.Р.

Институт тепло- и массообмена имени А.В. Лыкова НАН Беларуси,

г. Минск, Республика Беларусь

E-mail: sni.itmo@gmail.com

Большое внимание в последнее время уделяется созданию и развитию оптических приборов, в которых используются детали с наивысшими техническими требованиями к состоянию обработанных поверхностей. Для оценки качества поверхности оптических изделий используют два критерия: шероховатость поверхности и чистота поверхности. При аттестации контроля параметров шероховатости используются три вида приборов: контактные профилографы-профилометры, бесконтактные оптические приборы светового сечения (теневые и интерференционные) и рефлектметры. Данные приборы не позволяют измерить шероховатость менее 20 нм на базовой длине менее 80 мкм и оценить качество поверхности подложек перед нанесением различных пленочных покрытий, свойства которых непосредственно зависят от рельефа и степени предварительной очистки поверхности [1]. Одним из мощных современных методов исследования морфологии и локальных свойств поверхности с высоким пространственным разрешением является атомно-силовая микроскопия (АСМ). АСМ является прямым методом, позволяющим получить рельеф поверхности и рассчитать его статистические характеристики [2, 3]. Целью данной работы являлся неразрушающий контроль качества поверхностей до и после магнитного полирования с использованием атомно-силовой микроскопии.

Процесс полирования проводился на станке "Полимаг", первом отечественном образце выпуска 1987 года. Станок представляет собой кювету, вращающуюся с линейной скоростью 1 м/с, под которой располагается электромагнитная система, обеспечивающая величину индукции градиентного магнитного поля 0,2-0,4 Тл в зазоре 2 мм. Образец размером 20-30 мм закрепляется на шпинделе станка с числом оборотов 5000 об/мин вакуумным способом. В кювету помещается полировальная жидкость с магнитными и абразивными частицами, водой и химическими добавками. Жидкость, проходя через поле, застывает на миллисекунды (в зоне полирования) и затем при выходе возвращается в исходное состояние.

Контроль полированных образцов поликристаллического ситалла марки СО-115М проводили на АСМ NT-206 ("MicroTestMachines", Беларусь), кремниевыми кантилеверами NSC11 ("MikroMaschCo", Estonia). Шероховатость поверхности оценивали по неровностям профиля АСМ-изображения. Размер поля сканирования позволял исключить влияние отклонения формы и волнистости. Для количественной оценки шероховатости поверхности использовались параметры согласно ГОСТ 2789-73 [4]. По каждому АСМ-изображению рассчитывались значения среднеарифметической шероховатости  $R_a$  и среднеквадратичной шероховатости  $R_q$ . Среднеквадратичная шероховатость подложек после магнитореологического (МР) полирования составила 0,20-0,27 нм. Поверхность подложек после МР-полирования содержала значительно меньшее количество

точечных и линейно структурированных дефектов по сравнению с подложками, обрабатываемыми традиционным способом.

Таким образом, установлены параметры шероховатости поверхности образцов до и после магнитного полирования с помощью АСМ. Результаты исследования свидетельствуют о том, что комплексная методика с использованием АСМ позволяет более точно осуществлять неразрушающий контроль сверхгладких оптических поверхностей.

*Список литературы:*

1. *Окатов, М.А.* Справочник технолога оптика / М.А. Окатов, Э.А. Антонов. - 2004. - С. 679.
  2. *Чижик, С.А.* Оценка качества поверхностей лазерной оптики методом атомно-силовой микроскопии / С.А. Чижик, А.П. Шкадаревич, Т.А. Кузнецова, А.М. Курганович // Методологические аспекты сканирующей зондовой микроскопии. - 2006. - С.27-31.
  3. *Трушко А.В., Чижик С.А., Кузнецова Т.А., Шкадаревич А.П., Курганович А.М., Городкин Г.Р., Глеб Л.К.* Контроль шероховатости оптических поверхностей методом атомно-силовой микроскопии // Машиностроение. - 2007. - Вып. 23.- С. 349-353.
  4. Шероховатость поверхности. Параметры и характеристики. ГОСТ 2789-73.
-

# СОВРЕМЕННОЕ ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ ОПТИЧЕСКИХ ЦЕХОВ

ТОМАЛЬ В.С., КАСИНСКИЙ Н.К., ДОРОШКЕВИЧ А.Г., РАТОМСКИЙ В.В.

РУП "Оптическое станкостроение и вакуумная техника", г. Минск, Беларусь

E-mail: os\_vt@mail.belpak.by

За последние 20 лет на оптических предприятиях России и Беларуси произошли значительные изменения - практически отсутствует серийное и массовое производство оптических деталей, повысились требования к точности обработки рабочих и вспомогательных поверхностей, возросла номенклатура крупногабаритных линз, ежегодно происходит отток высококвалифицированных рабочих и т. д. В связи с этим потребовалась разработка комплекса нового оборудования взамен морально и физически устаревшего разработанного нами в семидесятых-восемидесятых годах прошлого столетия и серийно выпускаемого Сморгонским заводом оптического станкостроения.

В первую очередь потребовалась разработка и изготовление заготовительного оборудования, так как стекловаренные заводы стали всё чаще поставлять оптическое стекло в виде фрезерованных плиток установленного размера. Оптические цеха вынуждены самостоятельно осуществлять алмазную обработку этих плиток для получения заготовок под конкретные размеры оптических деталей.

При отсутствии специального оборудования вспомогательные операции по разделке плиток на необходимые заготовки по трудоёмкости становятся соизмеримы с основными (шлифовкой, полировкой, центрировкой и т. д.), что повышает трудоёмкость в оптическом цехе, а следовательно, и себестоимость продукции.

Для решения возникшей проблемы нашим предприятием был разработан комплекс автоматизированного заготовительного оборудования для получения требуемых заготовок из поставляемых плиток. Комплекс включает в себя следующие станки:

- распиловочные станки моделей АЗР-100, РСД-100;
- круглошлифовальные станки моделей АЗК-100, КШС-100;
- круглошлифовальный станок модели КШС-35;
- штрипсовый станок модели РСШ-100.

Система управления станками выполнена на базе промышленного программируемого логического контроллера корпорации "Omron" (Япония). Она обеспечивает работу станков в автоматическом и ручном режимах.

Система управления позволяет с микронной точностью осуществлять перемещение рабочих органов станка, плавно и в широком диапазоне регулировать частоты вращения шпинделей инструмента и изделия.

Работа перечисленных станков осуществляется в автоматическом режиме. Роль рабочего заключается в установке исходной заготовки в зажимных устройствах станка, задании на сенсорном экране пультового терминала режимов обработки и снятия обработанной заготовки с зажимных устройств. Рабочий задействован на этих операциях не более 5 процентов от общего времени работы станка. Поэтому один рабочий может обслуживать 4-5 станков одновременно.

Высокие требования к рабочим и вспомогательным поверхностям оптических деталей диаметром от 20 до 350 мм, выпускаемых мелкими партиями, потребовало разработки многофункционального оборудования, позволяющего выполнять следующие операции за одну установку обрабатываемой детали:

- огабаривание заготовки по высоте и диаметру;
- сферошлифование рабочей поверхности;
- нанесение технологических и конструктивных фасок;
- сверление глухих и сквозных отверстий;
- расшлифовку отверстий;
- фрезерование осевых и внеосевых пазов;
- центрирование линз.

За последнее десятилетие создана гамма многофункциональных станков с ЧПУ:

- станок модели МОС-100 для обработки оптических деталей диаметром от 20 до 100 мм;
- станок модели АСШ-320 для обработки оптических деталей диаметром от 80 до 320 мм;
- станок модели ШС-1600 для обработки оптических деталей диаметром от 300 до 1000 мм.

Все операции осуществляются без переустановки обрабатываемой детали, заменяя только алмазный инструмент и производя переналадку станка согласно имеющейся технологической карты. Переналадка станка с одной операции на другую осуществляется оператором в течение 3-4 минут.

Система управления станками построена на базе комплектного оборудования корпорации Fagor Automation (Испания). Она включает в себя ЧПУ, цифровые сервоприводы, серводвигатели, линейные и угловые энкодеры в качестве устройств обратной связи. Данная система управления позволяет с микронной точностью осуществлять перемещение рабочих органов станка, плавно и в широком диапазоне регулировать частоты вращения шпинделей инструмента и изделия, скорости перемещения бабки изделия и инструмента, угол установочного наклона бабки инструмента от вертикального положения.

Многоцелевое освоение космического пространства требует наличия прецизионных оптических деталей, как со сферическими, так и с асферическими поверхностями, диаметром от 80 до 1000 мм. Для решения данной задачи на предприятии был разработан и изготовлен комплекс оборудования, позволяющий получать требуемые детали по всем механическим пределам.

В качестве заготовительного оборудования рекомендуется использовать станки моделей АСШ-320 и ШС-1600 описанные выше. Для шлифования и полирования линз диаметром до 320 мм разработан и изготовлен станок модели ЗШП-350М, а диаметром от 320 до 1000 мм станки моделей ШП-1000 и ПДА-1000. Для прецизионной доводки сферических и асферических рабочих поверхностей предлагается использовать станки с ЧПУ моделей АП-350, АПД-500 и АП-1000. Точность обработки на этих станках составляет от  $\lambda/20$  до  $\lambda/80$  по СКО при  $\lambda = 0,63$  мкм.

За последние 25 лет в оптических цехах стран СНГ не было внедрено ни одной новой модели установки для промывки оптических деталей отечественной разработки. Работавшие установки моделей КП-2М, РТКП-1, РТКП-2 и др. морально и физически устарели.

Предприятием в 2009 г. разработан и изготовлен опытный образец промывочной установки на базе программируемого логического контроллера модели АКП-1, который

имеет ряд существенных отличий от разработанных ранее моделей: комплекс состоит из отдельных модулей, в состав которого входит две ванны, что позволит собирать установку из любого количества ванн необходимого для реализации требуемого технологического процесса промывки; перенос каждой кассеты из одной ванны в другую осуществляется автооператором; управление работой автооператором происходит по заданной программе, позволяющей обеспечить перемещение кассеты из одной ванны в другую в любой последовательности. На базе опытного образца предполагается начать в 2013 году разработку базового промывочного комплекса оснащённого: модулем для подготовки деионизованной воды, работающем в замкнутом цикле с ваннами для ополаскивания линз; одним или двумя модулями для регенерации органических моющих растворов. Для защиты рабочего помещения промывочного участка от паров экологически вредных моющих веществ предполагается весь комплекс промывки поместить в защитный кожух, оснащённый системой отсоса воздуха из зоны обработки.

Во всей гамме полировально-доводочных станков, выпускаемых ранее, использовались двигатели постоянного тока, управление которыми осуществлялось с помощью терристорных приводов. Уже более десяти лет такие двигатели и комплектация для терристорных приводов не выпускается. В связи с этим нами была разработана и успешно апробирована электрическая схема привода шпинделей станков с использованием асинхронных двигателей управляемыми инверторами.

Перечисленное выше оборудование внедрено на ряде предприятий Беларуси, России, в Социалистической Республике Вьетнам, Азербайджане, Венесуэле.

# ОАО "ВНИИИНСТРУМЕНТ" - ЦЕНТР УЛЬТРАПРЕЦИЗИОННОГО СТАНКОСТРОЕНИЯ И УНИКАЛЬНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ НАНОТОЧНОЙ ОБРАБОТКИ

БОРОВСКИЙ Г.В.

ОАО "ВНИИИНСТРУМЕНТ", Россия

Основанный в 1943 г. Всероссийский научно-исследовательский инструментальный институт - ОАО "ВНИИИНСТРУМЕНТ" выполняет комплексные научно-исследовательские, опытно-конструкторские и инновационно-технологические работы (НИОКТР) по созданию и внедрению инновационных технологий металлообработки и деревообработки, специального автоматизированного высокопроизводительного оборудования, режущего, вспомогательного, мерительного, слесарно-монтажного, абразивного и алмазного инструмента, оснастки, обеспечивает их оптимальную эксплуатацию и мониторинг, решает задачи технологического перевооружения механообрабатывающих производств предприятий гражданского и оборонного машиностроения.

Синергический эффект, обеспечивающий получение отдачи от реализации проектов технологического перевооружения, многократно превышающей вложенные средства, может быть получен только по схеме **«новый продукт→новые технологии и оборудование→новое производство по выпуску этого продукта»**.

Важнейшее направление деятельности - создание комплексных отечественных инновационных решений (разработка технологических процессов и изготовление ультрапрецизионных технологических модулей с ЧПУ, сверхвысокоточного контрольно-измерительного оборудования, специального инструмента из сверхтвердых материалов, специальной технологической оснастки) для ультрапрецизионной обработки алмазным точением, фрезерованием и шлифованием особо точных ответственных деталей из труднообрабатываемых материалов с точностью формы  $P-V < 100$  нм и оптическим качеством поверхности  $Ra \leq 5$  нм.

В настоящее время и на период до 2016 г. включительно в интересах предприятий ОПК, Росатома, Российской академии наук планируется выполнение следующих разработок:

- ультрапрецизионный шлифовальный 4-х координатный обрабатывающий центр для обработки методом алмазного шлифования деталей сложной формы типа тел вращения из труднообрабатываемых материалов с оптическим качеством поверхности и субмикронной точностью;
- ультрапрецизионный 4-х координатный токарный обрабатывающий центр с использованием дополнительной быстрой оси для обработки на оптических поверхностях трехмерных микроструктур и оптических деталей свободной формы;
- ультрапрецизионный 5-ти координатный обрабатывающий центр для изготовления методом алмазного фрезерования и шлифования микроструктур и деталей произвольной формы из различных материалов (в т.ч. труднообрабатываемых);
- ультрапрецизионный 5-ти координатный шлифовальный обрабатывающий центр для формирования режущих лезвий ультрапрецизионного инструмента из сверхтвердых монокристаллических и поликристаллических материалов;

- ультрапрецизионный 4-х координатный токарно-шлифовальный обрабатывающий центр с наложением тангенциальных высоко-частотных колебаний на режущий инструмент для обработки деталей (в т.ч. тонкостенных) из кварцевого стекла, ситалла, лейкосапфира, стеклокерамики и других хрупких материалов;

- ультрапрецизионный 4-х координатный токарно-центровой обрабатывающий центр для обработки деталей типа тел вращения с одновременным формированием микро-структур заданного профиля.

Уже в 2013 году будут созданы технология и пилотный образец ультрапрецизионного фрезерного модуля с ЧПУ для обработки крупногабаритных деталей металлооптики длиной до 1000 мм мод. "Фреза - 1000". Данная работа проводится в тесном сотрудничестве с ОАО "Научно-исследовательский институт электромеханики" (Федеральное космическое агентство) г. Истра, Московской области.

По инициативе Минпромторга России в Корпорации "Ростехнологии" в 2013 году создан государственный холдинг "Станкопром" с приданием ему функций системного интегратора по разработке и реализации проектов технологического перевооружения и модернизации обрабатывающих производств ОПК России.

ОАО «ВНИИИНСТРУМЕНТ» станет научно-технологическим центром холдинга «Станкопром».

---

# ТЕХНОЛОГИЯ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ФОРМООБРАЗОВАНИЯ АСФЕРИЧЕСКИХ, В ТОМ ЧИСЛЕ ВНЕОСЕВЫХ, ПОВЕРХНОСТЕЙ ОПТИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ ДЛЯ ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫХ СИСТЕМ НАЗЕМНОГО И КОСМИЧЕСКОГО БАЗИРОВАНИЯ

ГОРШКОВ В.А., К.Т.Н., НЕВРОВ А.С., САВЕЛЬЕВ А.С.

ОАО "НПО "Оптика", Россия

E-mail: teopt@nproptica.ru

Высокоразрешающие оптические системы наземного и космического базирования, применяемые в интересах приборостроения, аэрокосмической промышленности, народно-хозяйственных нужд, научных исследований, мониторинга космического пространства и поверхности Земли, состояния ее атмосферы и т.п. требуют высокого качества формируемого этими системами изображения исследуемого объекта.

Для получения требуемых оптических параметров системы (разрешающей способности, точности наведения и т. д.), а также снижения ее массогабаритных характеристик (за счет сокращения числа оптических компонентов прибора, применения облегченных оптических элементов) используют:

- асферические поверхности второго и высшего порядков;
- адаптивные элементы для управления формой волнового фронта системы;
- составные компоненты оптических элементов (главных зеркал) асферической формы с различной конфигурацией наружного периметра (n-гранники);
- внеосевые асферические элементы круглой и произвольной конфигурации периметра;
- облегченные оптические элементы из традиционных материалов (ситалл, стекло, кварц) и нетрадиционных материалов, в т.ч. высокомодульных (карбид кремния SiC).

Диапазон габаритных параметров оптических компонентов указанных систем 300 - 3000 мм, требования к качеству формы поверхности по критерию среднеквадратического отклонения  $\sigma_{\text{ско}} = \lambda \sqrt{60 \div \lambda} \sqrt{100}$  ( $\lambda=0.6328$  мкм). Формообразование таких оптических компонентов традиционными методами невозможно.

Для решения вышеуказанных задач в ОАО "НПО "Оптика" создана комплексная технология автоматизированного формообразования асферических, в том числе внеосевых, поверхностей оптических элементов для оптико-электронных систем наземного и космического базирования.

Реализованная комплексная автоматизированная технология формообразования асферических поверхностей (ТЕСАФ), в том числе внеосевых оптических деталей, показана на рис. 1.

В работе представлена разработанная ОАО "НПО "Оптика" гамма автоматизированных Санков серии АД (АФ-90, АПД-400, АПД-250, АПД-1000, АПД-600, АПД-2000, АПД-4000), гамма интерференционных средств контроля плоских, сферических, асферических и внеосевых поверхностей типа ПИКА, ПИК-ПС300, ИКИ-1, технологические и управляющие программы, реализующие технологический процесс, а также ряд технологических средств базирования и разгрузки изготавливаемой оптики.



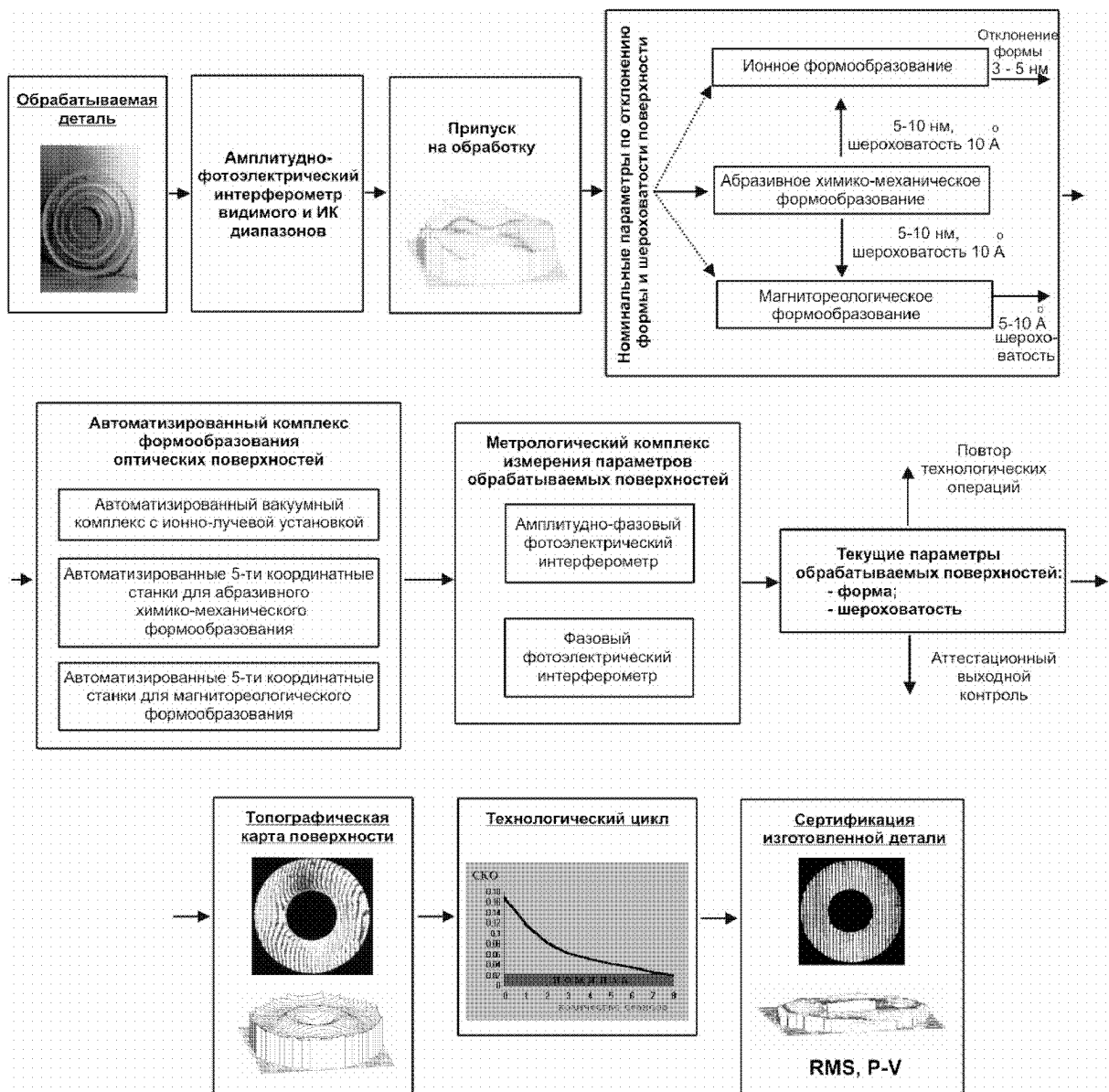


Рисунок 1.

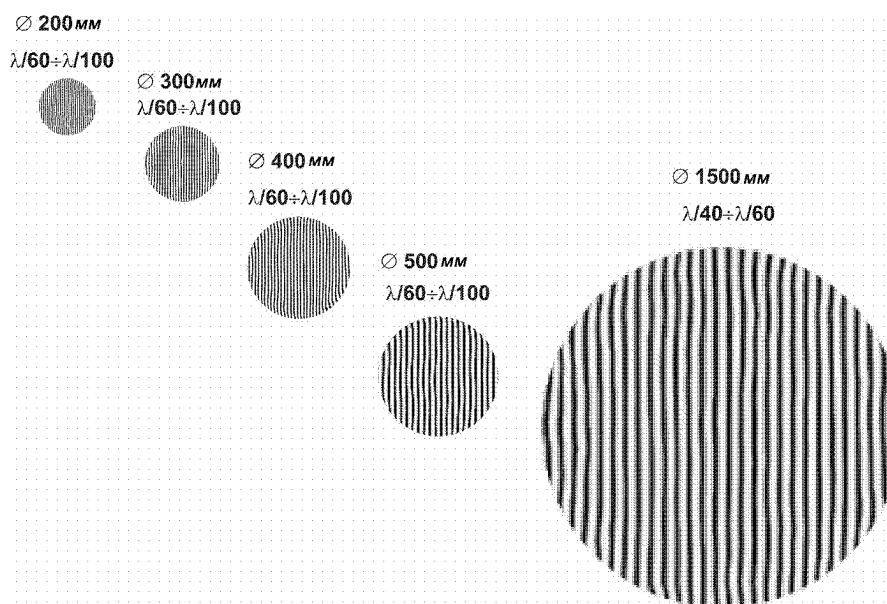


Рисунок 2.

В разработанной технологии применяются комплексные способы воздействия на обрабатываемую поверхность с использованием различных физических принципов: химико-механического, магнитореологического, ионного. Такой комплексный подход позволил достичь высоких технических параметров обрабатываемых поверхностей с отклонениями по форме  $\sigma_{\text{ско}} = \lambda \sqrt{60} - \lambda \sqrt{100}$  ( $\lambda = 0.6328$  мкм) и шероховатости в пределах  $5 \div 10 \text{ \AA}$ .

С применением ТЕСАФ предприятием изготовлено более 300 оптических элементов различных типоразмеров (рис. 2).

---

# ТЕХНОЛОГИЯ ОЧИСТКИ ОПТИЧЕСКИХ ДЕТАЛЕЙ С ПРИМЕНЕНИЕМ ЖИДКОСТЕЙ НА ОСНОВЕ ГИДРОФТОРЭФИРОВ

СМИРНОВ А.М.

Научно-техническая компания Солтек

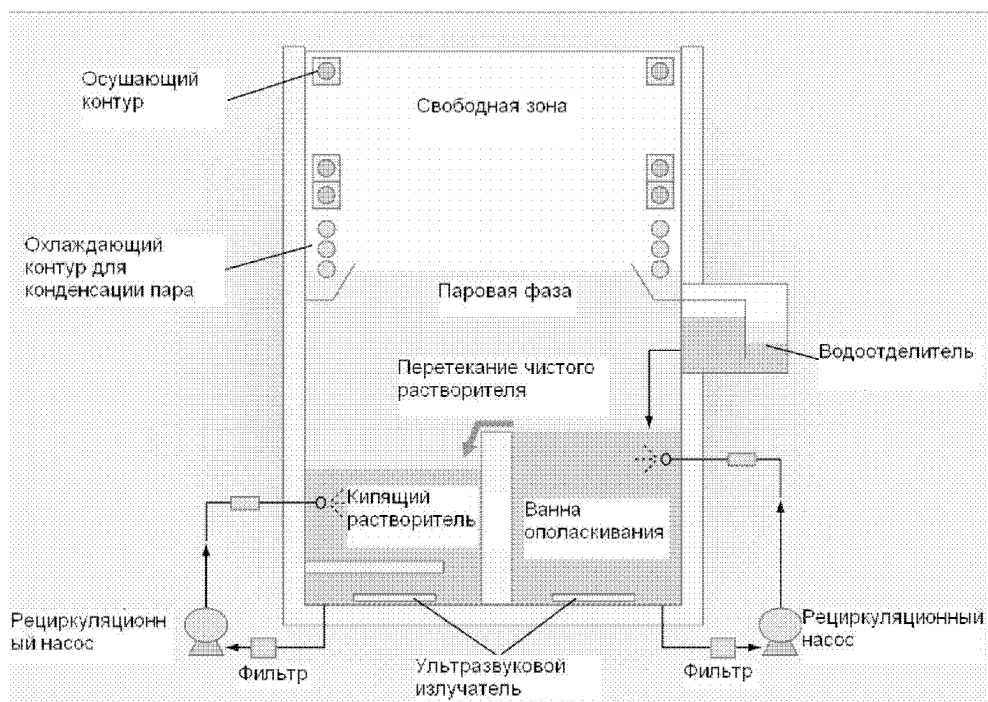
Тенденции ужесточения требований к качеству очистки, автоматизации и повышения производительности производственного процесса приводят к необходимости применения современных промышленных решений для очистки поверхностей оптических деталей. Современные автоматизированные системы очистки оптики, как правило, базируются на использовании технологии ультразвуковой очистки с применением водных растворов моющих средств. Подобные системы очистки позволяют обеспечить эффективную очистку поверхностей оптических деталей как предварительную, так и финишную, перед нанесением на поверхность изделий оптических покрытий.

Известно, что существуют типы оптических стекол, воздействие влаги на которые является критичным и приводит к изменению оптических свойств, что, в большинстве случаев, является недопустимым. Очистка таких типов стекол может осуществляться исключительно с применением растворителей. Автоматизация процесса очистки с применением традиционных растворителей, применяемых на сегодняшний день в процессах ручной очистки (ацетон, спирт, бензин...), крайне затруднительна. В этой связи, одним из вариантов решения задач очистки оптики является использование технологии очистки в гидрофторэфирах.

Гидрофторэфиры- негорючие органические растворители, которые являются экологически безопасными, не разрушают озоновый слой, не требуют специального исполнения помещений для работы с ними. При этом, их использование позволяет осуществлять эффективную автоматизированную финишную очистку, ополаскивание и сушку оптических деталей, не принимая во внимание химический состав стекол. Эфиры являются инертными по отношению к оптическим стеклам, испаряются с поверхности изделий, не оставляя следов.

Химические формулы чистых эфиров:  $C_4F_9OCH_3$ ,  $C_4F_9OC_2H_5$ . В зависимости от задач, в состав эфиров добавляют другие растворители, например, изопропиловый спирт и транс-1,2 - дихлорэтилен. Чистые гидрофторэфиры обладают слабой растворяющей способностью и могут быть использованы в процессах очистки влаговосприимчивых стекол на этапах ополаскивания и сушки после использования других типов растворителей. Значение каурибутанольного числа чистых эфиров составляет около 10. При введении в состав эфиров растворителей значение каурибутанольного числа увеличивается до 150-200, в зависимости от типа и концентрации растворителя, что позволяет осуществлять очистку изделий от органических загрязнений, таких, как: лаки, смолы, остатки клеев и др.

Процесс очистки в эфирах реализуется с применением специализированного технологического оборудования. Схема процесса показана на рис. 1. Обрабатываемые изделия помещаются в емкость с кипящим растворителем, который представляет собой смесь



**Рисунок 1.**  
**Схема процесса очистки в гидрофторэфирах**

жидкости на основе гидрофторэфиров и соразтворителя. Под воздействием ультразвука происходит удаление загрязнений с поверхности изделий. Далее изделия перемещаются в соседнюю ванну, в которой находится только жидкость на основе гидрофторэфиров. Происходит ополаскивание изделия под воздействием ультразвука. По окончании данного цикла изделия проходят ополаскивание в парах гидрофторэфиров, после чего извлекаются из рабочей камеры. Проходя через контур охлаждения, происходит конденсация жидкости на стенках камеры, сушка изделий. На выходе из установки очистки поверхность оптических изделий - чистая и сухая.

Благодаря низкому значению поверхностного натяжения 14-19 мН/м, гидрофторэфиры обладают отличной проникающей способностью, что позволяет осуществлять эффективную очистку изделий сложной конфигурации.

Применение гидрофторэфиров - новое слово в процессах очистки оптики. Однако, технология их применения известна в нашей стране с тех времен, когда было законодательно разрешено использование фреонов в промышленных масштабах. Очистка в гидрофторэфирах сочетает в себе преимущества очистки во фреонах с экологичностью водных процессов, позволяя достичь высочайшей степени чистоты поверхности оптических деталей по сравнению со всеми имеющимися на сегодняшний день технологиями очистки.

# СТОХАСТИЧЕСКИЙ ПОДХОД К ОЦЕНКЕ КАЧЕСТВА ОПТИЧЕСКОГО СТЕКЛА

СТРЕЛКОВА Т.А., САУТКИН В.А.

Харьковский национальный университет радиоэлектроники, Украина

ОАО "Красногорский завод им. С.А.Зверева", Россия

E-mail: strelkova\_t@ukr.net; sautkin@zenit-kmz

Целью работы является объединение макроскопических и микроскопических концепций описания взаимодействия электромагнитного излучения с материалом стекла на основе стохастических процессов.

Оптическое и оптико-электронное приборостроение в настоящий момент занимает лидирующее положение в развитии различных областей науки, техники и естествознания. Оптические и оптико-электронные приборы позволяют решать большой круг задач, недостижимых для других областей техники.

Одним из важнейших элементов таких приборов является оптическое звено, основной функцией которого является построение оптического изображения, наблюдаемого системой. Сегодня достигнуты существенные результаты в создании высококачественных оптических приборов нового поколения, разработаны и реализованы новые марки оптических стекол, к которым предъявляются весьма строгие технические требования.

В оптических технологиях особое внимание уделяется методам контроля физико-химического состояния поверхности и атомно-электронной структуре, а также свойствам материала в объеме. Показатели преломления и поглощения определяются исходя из модели приповерхностного слоя **и внутренней структуры оптического материала**. Описание и прогнозирование свойств оптических материалов базируется на определении детерминированных макропараметров. Однако учет микропараметров, таких как квантовые свойства излучения, то есть процессы, происходящие после поглощения кванта света, группировок и антигруппировок фотонов, флуктуаций и фотон-фононного взаимодействия, позволяет интерпретировать полученные результаты более адекватно.

Рассматривая процесс взаимодействия оптического излучения со стеклом необходимо принять упорядоченную или неупорядоченную модель. Оптические стекла в основном рассматриваются с точки зрения упорядоченности и симметрии. При описании взаимодействий квантов света с материалом стекла должно учитываться то обстоятельство, что в аморфных материалах разупорядоченность может возникать в случае пространственной несимметрии узлов в объеме, наличия хаотически расположенных дефектов, влияния процессов атмосферных воздействий и старения, а также расположения центров окраски оптически плотных материалов.

Неупорядоченные материалы на микроскопическом уровне принципиально неоднородны и различаются по структуре в различных участках макроскопически однородного оптического стекла. Все процессы трансформации энергии фотонов носят вероятностный характер. Поведение одной частицы будет всегда различно, поэтому изучают усредненные макрохарактеристики этих процессов.

Макроскопическая и микроскопическая концепции в настоящий момент считаются вполне разработанными. Однако усреднение микрохарактеристик и учет их влияния на макроскопические параметры, получение аналитических решений, которые будут хорошо согласовываться с экспериментальными данными - достаточно сложная задача. Возникает проблема определения области применимости такого подхода к приему сигналов, объединяющего различные как физические, так и математические основы. Другими словами, задача заключается не в объяснении вероятности события, а в вычислении вероятности события на основе других вероятностей, а именно, на основе известной вероятности более простого явления, которое может являться причиной более сложного.

Работы авторов ведутся в направлении расширения потенциальных возможностей оптических и оптико-электронных систем. При изучении процесса регистрации малоконтрастных и малоразмерных объектов в условиях, характеризующихся низкой величиной сигнал/шум, таких как регистрация сверхслабого излучения биологических тканей и жидкостей, наблюдение астрономических объектов в дневных и ночных условиях при значительных фоновых излучениях, регистрируемое выходное излучение (прошедшее оптическое звено) в отдельных элементах разрешения фотоприемника может иметь уровни амплитуды, превышающие уровни входного излучения. Статистические характеристики излучения на выходе оптической системы также может отличаться от пуассоновской и гауссовой статистики. Статистику выходного излучения эмпирически можно описать несимметричными законами распределения, обладающими "тяжелыми" хвостами, то есть имеется вероятность крупного, но редкого события, которым нельзя пренебречь и вносящего существенный вклад в описание получаемых результатов. Это, в свою очередь, приводит к изменению показателей оценки эффективности работы системы в целом.

Рандомизация такого явления может иметь специальный вид причинной связи, то есть регистрация больших всплесков интенсивностей зависит от случая (микропараметра). Это явление является некоторой переменной причиной, величина которой неизвестна или на которую не обращают внимания (вводят условия ограничения), причем зависимость такова, что наступление или не наступление такого события зависит от очень малого значения переменной причины (например, образование дефектов поверхностного слоя, фотон-фононного взаимодействия, явлений поглощения, рассеяния и отражения в объеме).

В докладе представлен стохастический подход оценки качества материала стекла, основанный на модели взаимодействия фотонов с оптическим звеном системы. Процесс рандомизирован по уровню интенсивности и частотному составу входного и выходного сигнала, по траекториям прохождения фотонов через оптическое звено. Представлены выражения кинетического уравнения движения фотонов. Проведен анализ влияния микрохарактеристик стекла на процесс прохождения фотонов в стекле, оказывающие влияние на макрохарактеристики, в частности нарушения принципа линейной суперпозиции.

Представленный подход может найти свое применение для анализа структуры стекла, выявления образованных дефектов в процессе старения и оценки потенциальных возможностей оптических систем в целом, в частности, при решении задачи выделения слабых оптических сигналов на фоне помех.

# ОТЕЧЕСТВЕННЫЕ ОПТИЧЕСКИЕ КЛЕИ

ЛЕВИНОК В.Е., МИХАЙЛОВ А.В.

ОАО "Государственный оптический институт им.С.И.Вавилова", Россия

E-mail: mihailov.anatoli @ rambler.ru

Создание оптоэлектронных приборов невозможно без применения оптических клеев. Изготовление элементов конструкции с точной оптикой не позволяет использовать обычные клеи. Для этих целей нужны клеи отвечающие особым критериям.

В данной работе представлены результаты работы, проведенной по теме "Разработка промышленной технологии изготовления оптических клеев". Разработана промышленная технология изготовления и изготовлены экспериментальные партии компонентов восстановленных оптических двухкомпонентных эпоксидных клеев ОК-50П, ОК-72ФТ5, ОК-72ФТ15, кремнийорганических УФ215 и УФ215М, эпоксикакрилатного ММА, нового клея акрилоستيриольного ИК-12 и однокомпонентного акрилового клея-раствора АКС.

Разработан новый оптический клей Бальзамин-Н на основе существующего технического карбинола с другой окислительно-восстановительной системой, заменяющий клей Бальзамин-М. Свойства карбинольных оптических клеев приведены в табл. 1.

Таблица 1

Клей Параметры	Бальзамин	Бальзамин-М	Новый Бальзамин-Н
Для жидких клеев:			
Показатель преломления	1,487±0,003	1,485±0,004	1,4769±0,0004
Вязкость, Па.с	0,1-0,5	0,1-1,2	0,2-1,2
Для твердых клеев в слое:			
Показатель преломления	1,518±0,001	1,518±0,001	1,518±0,001
Мах пропускание в слое толщиной 10мкм,%	99	99	99
Граница для 99% пропускания, нм	430-2700	420-2700	420-2700
Предел прочности соединения стекла К8 при равномерном отрыве, Па, не менее:	39,2*10 <sup>5</sup>	39,2*10 <sup>5</sup>	40,7*10 <sup>5</sup>
а)через сутки при 23±2 °С			
б)через 3-е суток при 23±2 °С	-	40,9*10 <sup>5</sup>	56,2*10 <sup>5</sup>
в )через 7суток с при 23±2 °С	-	45,6*10 <sup>5</sup>	63,1*10 <sup>5</sup>
Нагревостойкость клеевого шва, °С, не ниже	60	110	120
Холодостойкость клеевого шва, °С, не выше	-60	-90	-100
Влагостойкость клеевого шва, (при 40°С и относительной влажности 98%)сутки, не менее	8	6	37
Стойкость клеевого шва к термическому удару в интервале температур ±60 °С, количество циклов, не менее	5*	10**	3***

\*при разности ТКР склеиваемой пары не более  $5 \cdot 10^{-7}$  град<sup>-1</sup>,

\*\* при разности ТКР склеиваемой пары не более  $30 \cdot 10^{-7}$  град<sup>-1</sup>,

\*\*\* при разности ТКР склеиваемой пары не более  $57 \cdot 10^{-7}$  град<sup>-1</sup>.

Клей Бальзамин-Н не уступает по оптическим и физико-механическим свойствам клею Бальзамин-М, обеспечивает демонтаж склеенных забракованных деталей и позволяет проводить работы повторной склейки без существенных затрат, его использование не создаст трудности при переоснащении существующих производственных участков по склеиванию оптических деталей.

Проведены испытания нового оптического клея для инфракрасной области марки ИК-12, диапазон пропускания которого от 300 нм до 12 мкм, по ОСТ 3-6187-95 на нагревостойкость, холодостойкость, влагостойкость и последовательные испытания, включающие ниже перечисленные испытания и термоудар  $-60 +60^{\circ}$  С.

Разработан новый оптический эпоксидный высокопрочный, эластичный клей марки ОВПЭК-2М. Он по своим характеристикам значительно превосходит широко используемые в отечественной промышленности, ранее разработанные клеи марки ОК-72ФТ[3].

Установлено, что прочность соединения при равномерном отрыве различных металлов со стеклом клеем ОВПЭК-2М примерно на 40% выше, чем клеем ОК-72ФТ15 стекол марок с содержанием диоксида кремния менее 40% - выше на 20-70% , для стекол с содержанием диоксида кремния более 60% клей ОВПЭК-2М позволяет получить прочность соединения на уровне когезионной прочности самого стекла (неоднократно разрыв проходил по центру "столбика", вклеиваемого между "шляпок"); для химически нестойких кристаллов, а именно, для кристаллов хлористого натрия позволяет увеличить прочность соединения в 2,5 раза, а для кристаллов бромистого калия почти в три раза.

Для клея ОВПЭК-2М практически отсутствует влияние избыточной влаги в атмосфере на оптические характеристики склеиваемого слоя и отсутствует эффект образования "ореола капли" клея.

Разработаны и утверждены технологические инструкции на процессы склеивания новым оптическими клеями.

Проведено производственное опробование восстановленных оптических клеев на предприятиях ОАО "Швабе".

Получены экспертные заключения по результатам санитарно-эпидемиологической экспертизы оптических клеев.

По результатам санитарно-эпидемиологической экспертизы получены экспертные заключения на ТУ разработанных оптических клеев.

Получены свидетельства о государственной регистрации на производство, реализацию и использование разработанных оптических клеев.



# МЕТОДЫ ИЗГОТОВЛЕНИЯ И КОНТРОЛЯ УНИКАЛЬНЫХ КРУПНОГАБАРИТНЫХ АСТРОНОМИЧЕСКИХ ЗЕРКАЛ ТЕЛЕСКОПОВ В ОАО ЛЗОС

СЕМЕНОВ А.П., АБДУЛКАДЫРОВ М.А., БЕЛОУСОВ С.П.,  
ПАТРИКЕЕВ В.Е., ПРИДНЯ В.В.

ОАО "Лыткаринский завод оптического стекла", г. Лыткарино, Московской области, Россия

E-mail: lastro@lzos.ru

В ОАО ЛЗОС за последние два десятилетия разработаны компьютерно-управляемые методы обработки крупногабаритной астрономической и космической оптики, которые позволили изготовить зеркала для крупных российских и зарубежных телескопов. Это сеть 17-ти телескопов LGOGT (Las Cumbres Observatory Global Telescope Network) с диаметром главных зеркал 1 м и вторичных диаметром 345 мм, телескоп TNT (Thai National telescope, Australia - Thailand) с главным зеркалом диаметром 2.4 м, зеркала телескопа DOT ARIES (Devasthal Optical Telescope, DOT, for Aryabhata Research Institute of Observational Sciences, ARIES) с главным зеркалом диаметром 3.7 м, главное и вторичное зеркала обзорных телескопов VST (VLT Survey Telescope, 2.6 м) и VISTA (Visible and Infrared Survey Telescope for Astronomy, 4 м). Зеркала этих телескопов имеют значительную асферичность и высокую апертуру, что создает существенные трудности не только при обработке данных зеркал, но и при их контроле. Для успешного изготовления таких оптических элементов необходим контроль процесса производства оптики на всех стадиях обработки, начиная с предварительного шлифования и кончая финишной доводкой.

ОАО ЛЗОС имеет значительный запас заготовок из Астроситалла® для изготовления как отдельных зеркал, так и для составных сегментированных зеркал. Технологический процесс обработки заготовок включает в себя изготовление окончательных геометрических параметров заготовки, шлифование задней базовой поверхности, фрезерование пазов, фасок, фрезерование центрального отверстия, и облегченной структуры. Точность изготовления геометрической структуры достигает величины 20 мкм на диаметре до 4000 мм.

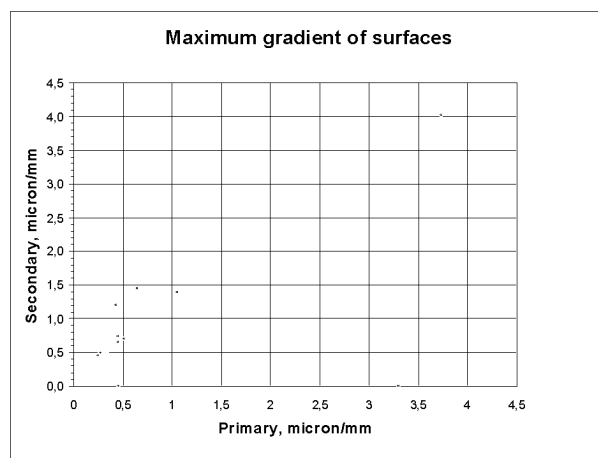
Для создания управляющей программы обработки рабочей поверхности на стадии шлифования необходима информация о топографии поверхности. Ее можно получить тремя разными способами.

- для деталей диаметром до 1400 мм механическим способом с помощью 6-координатной измерительной машины KIM-1400, российского производства, дающей точность отклонений от требуемой асферической поверхности в 2-3 мкм;

- для деталей любых размеров, выпуклых и вогнутых, но осесимметричных, применим метод трехточечного линейного сферометра, который успешно используется в настоящее время;

- для деталей произвольной формы, на стадии шлифования может быть использован ИК-интерферометр в сочетании с зеркальным корректором волнового фронта. Зеркальный корректор для ИК-диапазона ( $\lambda=10.6$  мкм) использовался для автоматизированной асферизации главных зеркал проектов VST и VISTA.

Как на стадии шлифования, так и на стадии полирования, и особенно на этапе финишной доводки зеркала, оно базируется либо на штатной разгрузке, на которой будет использоваться в телескопе, либо на мембранно-пневматической технологической разгрузке. Так, например, зеркало TNT диаметром 2.4 м обрабатывалось на штатной механической разгрузке, а зеркала VST, VISTA на мембранно-пневматической.



*Градиент асферичности для зеркал ряда телескопов*

Для контроля вогнутых асферических поверхностей на этапе полирования используются линзовые или зеркально-линзовые корректоры волнового фронта или ДОЭ-корректоры (СГН-корректоры-Computer Generated Hologram) с СГН-имитаторами зеркала. Причем СГН-имитаторы зеркала позволяют проконтролировать и линзовый корректор волнового фронта. Такой перекрестный контроль оптической поверхности позволяет избежать ошибок при изготовлении зеркала и получить правильные значения вершинного радиуса и эксцентриситета рабочей поверхности. При этом выполняются измерения радиуса обрабатываемой поверхности с лазерным трекером. Такие методы позволили получить высокоточные зеркала, которые сейчас успешно функционируют в действующих телескопах.

Таким образом, ОАО ЛЗОС использует самые современные средства контроля оптики, включающие машины 3D, лазерный трекер, системы позиционирования с использованием гексаподов, комплект интерферометров с элементами микроподач, интерферометры с линзовыми корректорами производства ОАО ЛЗОС и ДОЭ-корректорами производства Института автоматизации и электротехники СО РАН, современное программное обеспечение для обработки интерферограмм и для оптических расчетов, включая программу ZEMAX. И это лишь краткий перечень имеющегося оборудования и технологий. На рисунке представлен график максимального градиента асферичности в мкм/мм для главного (ось абсцисс) и вторичного (ось ординат) зеркал телескопов: треугольники - ряд зарубежных проектов по изготовлению оптики телескопов. Кружками обозначены ряд выполненных в ОАО ЛЗОС проектов по изготовлению оптики различных телескопов, в основном в последнее время. Точки, лежащие на оси абсцисс - не изготавливали вторичное зеркало для данного проекта - только главное зеркало. Как видно из данного графика, комплект оптики телескопа VISTA (3.74; 4.02) по сложности изготовления, по градиенту асферичности, существенно превосходит все предыдущие изготовленные главные и вторичные зеркала.

# СИСТЕМЫ ЧПУ "МИКРОС" ДЛЯ СТАНКОВ ВСЕХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ГРУПП

В.И.ГРИГОРЬЕВ

ЗАО "Микрос", г. Ногинск Московской обл., Россия

E-mail: grigoryev@mikros.ru

Коллектив ЗАО "Микрос" занимается созданием систем ЧПУ ещё с конца 70-х гг., находясь до 1991 г. в составе ЦНИТИ Минобрпрома страны.

В начале 2000-х гг. был разработан и стал серийно выпускаться ряд УЧПУ "Микрос-12" для станков всех технологических групп - токарных, фрезерных (в т. ч., обрабатывающих центров), кругло- и плоскошлифовальных, электроэрозионных и ультрапрецизионных, которые имеют единую аппаратную базу и различаются программным обеспечением.

УЧПУ "Микрос-12" имеет архитектуру промышленного компьютера, в них используются новейшие вычислительные средства, обновляющиеся вместе с общим прогрессом вычислительной техники: IBM-совместимый модуль процессор с тактовой частотой 1000 МГц, жёсткий диск ёмкостью 160 ГБ, ОЗУ ёмкостью 128/256 КБ, большой, 15-дюймовый, цветной жидкокристаллический дисплей. Электронные модули связи со станком - для управления приводами, для приёма информации от датчиков перемещений, для ввода и вывода дискретных сигналов - являются разработкой ЗАО "Микрос" и выполнены на современной элементной базе.

Блочная конструкция УЧПУ "Микрос-12" даёт возможность расположить компактный пульт управления близко к зоне обработки, размещая его на кронштейне, на ограждении или на отдельной стойке.

Программное обеспечение УЧПУ "Микрос-12" является полностью оригинальной разработкой ЗАО "Микрос". Оно построено на собственной модульной операционной системе жёсткого реального времени МОС, являющейся надстройкой над MS DOS, надёжно и всесторонне обеспечивающей многозадачный режим работы - управление задачами, доступ к вычислительным ресурсам, доступ к внешним устройствам, приоритеты и веса задач, обмен данными через почтовые ящики, использование "семафоров", синхронное выполнение задач с частотой несколько тысяч Гц и пр. Базовое программное обеспечение УЧПУ "Микрос-12" вобрало в себя 35-летний опыт создания, производства, применения и сопровождения УЧПУ нескольких поколений. Оно нацелено на обеспечение полной функциональной достаточности для станков всех технологических групп, простоту подключения к станкам, лёгкость и удобство работы оператора, возможность управления прецизионными и ультрапрецизионными станками, полноценную компенсацию погрешностей механики станков и инструмента, облегчение диагностики возможных неисправностей и ошибок в работе.

Работа с УЧПУ "Микрос-12" удобна, благодаря дружественному человеко-машинному интерфейсу. Управление осуществляется в диалоговом режиме с использованием меню. Контроль за выполняемыми операциями, а также, за состоянием УЧПУ и станка обеспечивается с помощью развитой индикации.

Широкий, хорошо систематизированный набор параметров с ясными, полноценными названиями, указанием единиц измерения и допустимых диапазонов значений на русском языке обеспечивает удобную и лёгкую настройку УЧПУ "Микрос-12" на конструктивные и технологические особенности станков.

Для программирования управления электроавтоматикой станков используется оригинальный функционально ориентированный язык высокого уровня Мик-Си, созданный на базе языка высокого уровня Си, обладающий универсальностью, наглядностью и компактностью. Программы ЭА выполняются следующим образом: каждые 5 мс - быстрый цикл (полная отработка всех активных блокировок), и каждые 20 мс - медленный цикл (отработка части всех активных "пунктов").

Встроенный имитатор входных и выходных сигналов станка даёт возможность проводить предварительную отладку программы управления электроавтоматикой без включения станка. Редактирование программы электроавтоматики возможно непосредственно на УЧПУ. Отладку программ управления электроавтоматикой упрощает функция просмотра временных диаграмм состояния выбранных наладчиком входных и выходных дискретных сигналов.

Планирование движения в УЧПУ "Микрос-12" осуществляется с плавным нарастанием и снижением ускорения (время разгона-торможения задаётся параметрами), что обеспечивает быстрый и безударный разгон до высоких скоростей и такое же торможение.

Для управления приводами, имеющими аналоговое задание, используется в 14- или 16-разрядный ЦАП.

Время цикла планирования движения и управления приводами по всем осям: 1 мс.

Встроенная процедура самонастройки позволяет при подключении УЧПУ к станкам или замене приводов всего за несколько минут определить оптимальные параметры управления положением для каждой оси станка с учётом реальных характеристик приводов и механики.

Текстовый редактор УЧПУ "Микрос-12" обеспечивает ручной ввод и редактирование управляющих программ.

Развитый макроязык УЧПУ "Микрос-12" даёт возможность существенно сократить объём управляющей программы и время её отладки. Математические операции, функции и операторы позволяют задавать выражения с локальными, глобальными и системными переменными в удобном "математическом" виде.

Программное обеспечение УЧПУ "Микрос-12" включает в себя различные постоянные технологические циклы, позволяющие упростить программирование многопроходной обработки, обработки типовых контуров и сократить длину программ.

Встроенные измерительные циклы позволяют обмерять типовые элементы: отверстия, пазы и пр.

Ввод управляющих программ возможен с помощью НГМД, USB, RS-232, Ethernet.

Объём памяти управляющих программ: 160 ГБ. Объём оперативной памяти управляющих программ: 100 000 кадров.

Режим графической поддержки УЧПУ "Микрос-12" позволяет оператору просматривать запрограммированное движение инструмента и проверять элементы его траектории без включения станка.

Все основные события в работе станка, оснащённого УЧПУ "Микрос-12", в т.ч. действия оператора, автоматически фиксируются в ежедневно создаваемом протоколе. Протоколы сохраняются в памяти УЧПУ; их можно просмотреть на экране дисплея и распечатать на принтере. При возникновении нештатной ситуации такой протокол позволяет провести апостериорную диагностику.

Для анализа качества движения подвижных органов станка, его точности, повторяемости, особенностей, вызванных управляющей программой, аномалий, вызванных какими либо возмущениями или сбоями, имеется возможность записи во внутреннюю память УЧПУ в реальном времени, в штатном режиме и последующего наглядного графического воспроизведения полного набора переменных, ответственных за движение: текущих заданного и фактического положений, а также, управляющих воздействий по всем осям.

УЧПУ обеспечивает самоконтроль работоспособности с поддержанием/снятием сигнала "готовность УЧПУ", встраиваемого в аварийную цепь станка. При отказе процессора или ОЗУ, датчиков перемещений или приводов будет автоматически снят сигнал готовности УЧПУ и станок выключится.

Выпускаются модели систем ЧПУ: "Микрос-12Т" - для токарных станков и обрабатывающих центров, "Микрос-12Ф" - для фрезерных станков и обрабатывающих центров, "Микрос-12ШЗ" - для плоскошлифовальных станков, "Микрос-12Ш4" - для круглошлифовальных станков, "Микрос-12Э" - для электроэрозионных копировально-прошивочных станков, "Микрос-12ТС2" - для ультрапрецизионных станков алмазного точения (имеет точность планирования движения 1 нм и позволяет обработку поверхностей произвольных тел вращения с субмикронной точностью).

Вся технология производства УЧПУ "Микрос-12" подчинена достижению высокой надёжности. Основные покупные изделия - модуль процессор, ОЗУ, жёсткий диск, монитор, клавиатура, ключевые элементы РЭА - подвергаются 100%-му входному контролю на стендах по специальным тестам. В процессе производства УЧПУ осуществляется полный пооперационный контроль качества всех модулей и блоков. На заключительной стадии производства каждый образец УЧПУ подвергается длительному непрерывному технологическому прогону при максимально допустимой рабочей температуре. В течение прогона постоянно ведётся проверка работоспособности всех модулей и блоков УЧПУ с использованием специальных аппаратно-программных стендов. Потребителю отгружаются УЧПУ, не допустившие за время прогона ни одного отказа или сбоя. Благодаря этим мерам, достигается высокая надёжность УЧПУ "Микрос-12". Реальная наработка на отказ - порядка 10000 часов.

Благодаря высокой надёжности, удобным средствам подключения к станку, наличию высококачественной документации, лёгкости освоения в работе, УЧПУ "Микрос-12" завоевали признание многих потребителей как для модернизации существующих, так и для комплектации вновь выпускаемых станков. К настоящему времени устройствами ЧПУ "Микрос-12" оснащено около 90 моделей станков, в том числе, более 25 токарных станков и более 45 фрезерных станков и обрабатывающих центров. Среди потребителей систем ЧПУ "Микрос-12" - такие известные предприятия оборонной промышленности, как, ОАО "ВМП "АВИТЕК" (г. Киров), ОАО "Красногорский завод им. С.А. Зверева" (г. Красногорск), ОАО "НПО ЭНЕРГОМАШ им. акад. В.П. Глушко" (г. Химки), ОАО "ММП им. В.В. Чернышёва" (г. Москва), ОАО "ГосМКБ "Радуга" им. А. Я. Березняка", (г. Дубна), ОАО "НИКИЭТ им. Н.А.Доллежала" (г. Москва), ОАО "Уральский электромеханический завод" (г. Екатеринбург), ОАО "Сарапульский электрогенераторный завод" (г. Сарапул) и многие другие.

Важнейший принцип работы ЗАО "Микрос" - высококачественное послепродажное обслуживание УЧПУ. Обучение потребителей - наладчиков, технологов и операторов - основам и тонкостям эффективной эксплуатации УЧПУ непосредственно разработчиками УЧПУ, последующие оперативные консультации, помощь в подключении УЧПУ к станкам - поставка готовых проектов, разработка электрических схем подключения, программирование электроавтоматики, полное выполнение работ "под ключ", помощь в

диагностике возникающих на станках ситуаций, оперативный ремонт, доработки программного обеспечения УЧПУ по индивидуальному заказу, максимально полный учёт интересов потребителя, всё это, естественным путём, приводит к тому, что, поработав с нами однажды, Заказчики в последующем отдают предпочтение именно нашему предприятию.

В 80-х гг. системы ЧПУ нашего предприятия АС2621 поставлялись на заводы оптического станкостроения Миноборонпрома, в т.ч. в Сморгонь, для комплектации станков АД-1000, АД-2000 и применялись на многих предприятиях оптической промышленности (в т.ч. в Лыткарино). В настоящее время, когда в России вновь возрастает потребность в станках для обработки стекла методом абразивного свободного притира, наше предприятие готово к сотрудничеству с КБ и заводами оптического станкостроения в деле оснащения таких станков современными российскими системами ЧПУ.

---

# ПЕРСПЕКТИВЫ СОЗДАНИЯ ИНСТРУМЕНТА ДЛЯ ПОЛИРОВАНИЯ ПРЕЦИЗИОННЫХ ОПТИЧЕСКИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ

НОВИКОВ Н.В., ФИЛАТОВ Ю.Д., ПАЩЕНКО Е.А.

Институт сверхтвердых материалов им. В.Н. Бакуля НАН Украины

E-mail: filatov@ism.kiev.ua

Оптические и оптоэлектронные детали из стекла, оптических и полупроводниковых кристаллов, оптической керамики и других неметаллических материалов в современном производстве изготавливаются методами алмазно-абразивной обработки. Операции шлифования, тонкого шлифования и супертонкого шлифования практически повсеместно осуществляются при помощи алмазного инструмента с функционально ориентированной характеристикой и конструкцией рабочего слоя. Заключительная операция полирования осуществляется в один или несколько переходов при помощи алмазных или полировальных порошков в свободном или связанном состоянии.

В теории алмазно-абразивной обработки прецизионных поверхностей деталей электронной техники и оптических систем разработаны и успешно используются обобщенная модель съема обрабатываемого материала при полировании диэлектриков, основанная на кластерной модели износа взаимодействующих при трении поверхностей твердых тел и физико-статистической модели образования и удаления с обрабатываемой поверхности частиц шлама. Механизм съема обрабатываемого материала при полировании принципиально отличается от механизма процесса шлифования, поскольку при удалении нанометрических частиц шлама с обрабатываемой поверхности никакого макроскопического воздействия инструментального материала на обрабатываемый не происходит. Образование и удаление с обрабатываемой поверхности частиц шлама является следствием межмолекулярного взаимодействия между кластерами, которые образуются в контактирующих поверхностях обрабатываемого и инструментального материалов, а не микрорезания и хрупкого разрушения как при шлифовании. Размеры частиц шлама и частиц износа инструмента, их концентрация в зоне контакта инструмента и обрабатываемой детали и характер взаимодействия между собой и контактирующими поверхностями, - определяют как производительность съема обрабатываемого материала и интенсивность износа инструмента, так и состояние этих поверхностей [1, 2]. Формирование микро- и нанорельефа обрабатываемой поверхности и образование дефектов (налета и т.п.) происходит при воздействии на нее частиц шлама и частиц износа, а также химическом взаимодействии с технологической средой. Полирование неметаллических материалов, в том числе и оптического стекла - это процесс химико-механического полирования, являющийся комбинацией химического (гидролиз и выщелачивание, деформация и разрыв химических связей, образование ионных и радикальных центров) и механического (квантово-механическое рассеяние частиц шлама и частиц износа) воздействия технологической среды и "абразивных" (полировальных) частиц в свободном или связанном состоянии.

Поверхность рабочего слоя инструмента со связанным полировальным порошком типа

АКВАПОЛ или частица полировального порошка, по существу, является эмиттером наночастиц инструментального материала, под воздействием которых происходит удаление обрабатываемого материала (процесс переноса) и убыль массы обрабатываемой детали. Аналогичные процессы происходят и при ионной обработке оптических поверхностей, когда при ионной бомбардировке обеспечивается удаление поверхностного слоя (асферизация методами ионно-лучевого травления, ионная ретушь и т.п.). В общем случае, убыль массы может быть отрицательной, то есть под воздействием наночастиц, испускаемых эмиттером, на обрабатываемую поверхность наносится слой вещества, например при вакуумной асферизации оптических деталей.

В процессе полирования формирование атомно-гладкой поверхности является результатом удаления частиц шлама нанометрического размера, которое происходит вследствие резонансного взаимодействия с частицами износа инструмента, наиболее вероятный размер которых не превышает 10 нм. Независимо от механизма транспортирования частиц износа к обрабатываемой поверхности, они должны "отрываться" от зерен полировального порошка, размер которых не превышает 1 мкм, или от поверхности инструмента, в рабочем слое которого они содержатся в виде нанопорошков.

Процесс съема обрабатываемого материала при полировании можно рассматривать как накопление энергии в критическом объеме - кластере и его переходы в дискретном эквидистантном энергетическом спектре. С учетом многочастотного режима взаимодействия поверхностей обрабатываемой детали и инструмента, когда собственные колебания их молекулярных фрагментов происходят на частотах, которые определяются по спектрам инфракрасного поглощения или комбинационного рассеяния, можно определить энергию кластера, вероятность образования частиц шлама, параметр распределения Пуассона по площадям их поверхности, их число и наиболее вероятный размер, а также объем удаляемого при полировании материала.

Для минимизации размера частиц износа инструмента наиболее перспективным представляется выбор полировального порошка из так называемых двумерных структур (2-D материалов), которые получают путем трансформации трехмерных слоистых систем, например нанолистов *MXene*, слоистая часть которых имеет размер около 10 нм, а также разработка полимерных композитов, в объеме которых полирующий материал содержится в виде наноразмерных частиц.

#### Список литературы:

1. *Filatov Y.D., Filatov O.Y., Monteil G.*, Boundabrasive grinding and polishing of surfaces of optical materials // *Optical Engineering*. Vol. 50, Issue 6, pp. 063401-063401-7 (2011).
2. *Filatov Y.D., Monteil G., Sidorko V.I., Filatov O.Y.* Formation of a deposit on workpiece surface in polishing nonmetallic materials / *Smart Sensors, Actuators, and MEMS VI. Proc. SPIE*. - Vol. 8763, pp. 876336-876336-9 (2013).



# АЛМАЗНО-АБРАЗИВНАЯ ОБРАБОТКА ОПТИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ ИЗ МОНОКРИСТАЛЛИЧЕСКОГО КАРБИДА КРЕМНИЯ

ФИЛАТОВ Ю.Д., ВЕТРОВ А.Г., СИДОРКО В.И.,

ФИЛАТОВ А.Ю., КОВАЛЕВ С.В.

Институт сверхтвердых материалов им. В.Н. Бакуля НАН Украины,

E-mail: filatov@ism.kiev.ua

Исследование закономерностей съема обрабатываемого материала при финишной алмазно-абразивной обработке монокристаллического карбида кремния (плотность  $\rho = 3,21$  г/см<sup>3</sup>, коэффициент теплопроводности  $\lambda = 490$  Вт/(м·К), статическая диэлектрическая проницаемость - 6,5) осуществлялось при использовании суспензий из порошков из микропорошков синтетического алмаза АСМ 2/1, суперабразива "FR-Remillox" фирмы "Fujiimi Kenzai" (Япония) на основе диоксида церия ( $\text{CeO}_2$ ) со средним размером зерен 1 мкм, оксида алюминия ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) с размером зерен 1-2 мкм, оксида хрома ( $\text{Cr}_2\text{O}_3$ ) с размером зерен 1-5 мкм, оксида титана ( $\text{TiO}_2$ ) и карбида бора ( $\text{B}_4\text{C}$ ) с размером зерен 3 мкм на шлифовально-полировальном станке мод. 2ШП-200М при частоте вращения полировальника 90 об/мин., давлении прижима детали к инструменту 49,5 кПа, смещении штриха 30 мм, длине штриха 50 мм, максимальном расстоянии между центрами инструмента и детали 39 мм, средней температуре в зоне контакта - 300 К и продолжительности цикла полирования 15 мин.

Результаты расчетов параметров обобщенной модели образования и удаления частиц шлама и съема обрабатываемого материала [1], а также экспериментальные данные по производительности съема монокристаллического SiC приведены в таблице. Зависимости производительности финишной обработки карбида кремния от коэффициентов объемного износа  $\eta$  и массового износа  $\xi$  характеризуют интенсивность съема обрабатываемого материала в процессах механообработки [2]. Чем меньше величина этих коэффициентов, тем меньше производительность съема обрабатываемого материала при обработке карбида кремния каждой из суспензий рассматриваемых порошков. Процессы тонкого шлифования, супертонкого шлифования и полирования характеризуются коэффициентами объемного и массового износа, а также энергией переноса, являющейся наиболее чувствительной к производительности процесса обработки [2].

Зависимость производительности финишной обработки карбида кремния от энергии переноса  $W$  описывается гиперболической зависимостью  $Q = k / \rho W$  ( $k = 3,2 \cdot 10^4$  Вт, погрешность аппроксимации - 12 %). Величина энергии переноса на операциях обработки: "тонкое шлифование - супертонкое шлифование - полирование" изменяется на три порядка [2] и может быть принята в качестве критерия при разделении процесса финишной алмазно-абразивной обработки неметаллических материалов на отдельные операции. В связи с тем, что энергия переноса  $W$  зависит не только от условий процесса обработки, а и от коэффициента теплопроводности обрабатываемого материала, целесообразно воспользоваться величиной приведенной энергии переноса  $W_0 = [\lambda_{\text{K8}}/\lambda]W$ , которая характеризует участие частиц шлама в передаче тепловой энергии при обработке карбида кремния по отношению к процессу обработки оптического стекла марки К8, коэффициент теплопроводности которого  $\lambda_{\text{K8}} = 0,95$  Вт/(м·К).

Таблица.

Параметры контактного взаимодействия SiC с абразивным порошком	Полировальный порошок					
	АСМ 2/1 (1)	CeO <sub>2</sub> (2)	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (3)	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (4)	TiO <sub>2</sub> (5)	B <sub>4</sub> C (6)
Коэффициент объемного износа, $\eta$ , м <sup>2</sup> /с	$1,5 \cdot 10^{-11}$	$1,1 \cdot 10^{-11}$	$1,4 \cdot 10^{-11}$	$2,3 \cdot 10^{-11}$	$1,1 \cdot 10^{-10}$	$3,2 \cdot 10^{-10}$
Коэффициент массового износа, $\xi$ , кг/(мс)	$4,8 \cdot 10^{-8}$	$3,5 \cdot 10^{-8}$	$4,6 \cdot 10^{-8}$	$7,3 \cdot 10^{-8}$	$3,6 \cdot 10^{-7}$	$1,0 \cdot 10^{-6}$
Энергия переноса, W, Дж/кг	$3,1 \cdot 10^{12}$	$4,2 \cdot 10^{12}$	$3,2 \cdot 10^{12}$	$2,0 \cdot 10^{12}$	$4,0 \cdot 10^{11}$	$1,4 \cdot 10^{11}$
Производительность обработки, Q, м <sup>3</sup> /с	$3,6 \cdot 10^{-12}$	$2,7 \cdot 10^{-12}$	$3,6 \cdot 10^{-12}$	$5,6 \cdot 10^{-12}$	$2,8 \cdot 10^{-11}$	$7,9 \cdot 10^{-11}$
Экспериментальная величина производительности съема SiC: мг/мин, м <sup>3</sup> /с	0,87 $4,5 \cdot 10^{-12}$	0,64 $3,3 \cdot 10^{-12}$	0,60 $3,1 \cdot 10^{-12}$	0,93 $4,8 \cdot 10^{-12}$	4,5 $2,3 \cdot 10^{-11}$	13,0 $6,8 \cdot 10^{-11}$

Исходя из приведенной энергии переноса  $W_0$ , можно считать, что при обработке SiC суспензией порошков карбида бора (№ 6) или диоксида титана (№ 5) происходит процесс тонкого шлифования, а при помощи суспензий из порошков оксида хрома (№ 4), оксида алюминия (№ 3), диоксида церия (№ 2) и алмазных микропорошков АСМ 2/1 (№ 1) - процесс супертонкого шлифования.

Сравнение результатов расчета производительности финишной обработки монокристаллического карбида кремния при помощи суспензий из алмазных и абразивных порошков с экспериментом показало их хорошую сходимость (отклонение расчетных и экспериментальных данных не превышало 20%), что является подтверждением эффективности применения обобщенной модели образования и удаления частиц шлама и съема обрабатываемого материала.

#### Список литературы:

1. Филатов Ю.Д., Сидорко В.И. Статистический подход к износу поверхностей деталей из неметаллических материалов при полировании // Сверхтвердые материалы, 2005, № 1. - С. 58-66.
2. Сидорко В.И., Филатов Ю.Д. Энергетические соотношения в физико-статистической модели процессов финишной обработки неметаллических материалов // Породоразрушающий и металлообрабатывающий инструмент - техника и технология его изготовления и применения. - Киев: ИСМ им. В.Н. Бакуля. - 2005. - С. 285-287.

# ПРОБЛЕМНЫЕ ВОПРОСЫ ПРЕЦИЗИОННОЙ ОБРАБОТКИ СЕРИЙНЫХ ИЗДЕЛИЙ ИЗ ЛЕЙКОСАПФИРА

ЕРМОЛАЕВ А.А., ГОЛОВАЧ Т.Ю., РАДЮК В.В

ОАО "Завод "Оптик", г. Лида, Республика Беларусь

Применение лейкосапфировых оптических элементов в последнее время становится все более актуальным, что обеспечивается рядом их уникальных свойств. Это сочетание чрезвычайно высокой прочности, термостойкости и прозрачности в широком диапазоне спектра, что в свою очередь накладывает свои особенности в технологии обработки данного материала. Во многих случаях применение изделий из лейкосапфира ограничено невозможностью или высокой сложностью обработки оптических поверхностей с минимальной шероховатостью (выше  $Rz\ 0,05\ \mu\text{м}$ ), высокими классами чистоты (Р-I-II ГОСТ 1141-84) и точностью поверхности N-1, |N-0,1 на значительных площадях поверхностей.

Существующая в настоящее время в оптической промышленности технология обработки твердых кристаллов лейкосапфира позволяет получить детали со следующими параметрами:

- шероховатость  $Rz$  от 0,05;
- класс чистоты полированных поверхностей Р- IV -VII ГОСТ 1141-84;
- отклонения от плоскостности

$$\begin{array}{l} N=0,1 \quad | \quad N=0,1 \text{ на } \varnothing \text{ дет. } 20 \text{ мм,} \\ N=0,5 \quad | \quad N=0,5 \text{ на } \varnothing \text{ дет. } 20 - 70 \text{ мм} \end{array}$$

(при этом допускается сетка волосяных царапин). Данные параметры качества полированных поверхностей кристаллов лейкосапфира регламентированы РТМЗ-1450-81 "Детали оптические из рубина и лейкосапфира. Типовой технологический процесс механической обработки". Изделия, изготовленные по такой технологии, массово применяются в часовой промышленности, в электронике, медицине т.д., но редко пригодны для точных оптических приборов.

В настоящее время на территории бывшего СНГ существует ряд предприятий, имеющих технологию обработки высокоточных оптических деталей из кристаллов лейкосапфира, обеспечивающих минимальную шероховатость и, одновременно, высокие требования по чистоте и точности оптических поверхностей, а именно:  $Ra=0,7 - 0,9\ \text{нм}$ , класс чистоты 20/10 MIL. К этим предприятиям относятся ЗАО "Оптотехнологическая лаборатория" г. С-Петербург, СПбГУ ИТМО г. С-Петербург, НИИ НПО "Луч" г. Подольск, масОПТИСА LTD г. Москва, "Электростекло" г. Москва, Алкор Технолоджиз г. С-Петербург.

Но трудоемкость обработки для варианта серийного производства достаточно высока. Целью нашей работы, после изучения опыта других предприятий, является подбор оптимальной линейки технологического оборудования, оснастки, материалов позволяю-

щих с минимальной трудоемкостью получить гарантированно высокие требования оптических изделий из лейкосапфира в масштабах серийного производства.

К особенностям обработки изделий из лейкосапфира следует отнести и качество исходных заготовок, которое напрямую зависит от метода их получения. Основными методами выращивания являются методы Степанова, Чохральского, Богдасарова, Киропулоса.

Особенность обработки кристаллов лейкосапфира (микротвердость более  $10^6$  Па) состоит в том, что в связи с их повышенной твердостью и плотностью требуются специальные станки с большей жесткостью узлов привода СПИД и мощностью двигателей ("Квант-2", ГПИ-10). При отсутствии специальных станков обработку можно вести на оборудовании, предназначенном для обработки деталей из оптических стекол (типа ШП, ПД, СД), но при этом требуется проведение модернизации, которая заключается в установке узла дополнительного давления на шпиндель каретки станка и включается либо совместно с системой давления станка, либо отдельно.

Кроме того, изначально требуется подобрать и изготовить на операции "грубое шлифование, обработка габаритов" обрабатывающий инструмент (фрезы, алмазные круги) из природного алмаза или алмаза с повышенной прочностью зерен АС6-АС35 на металлокерамической или стеклокерамической связке.

Нами опробованы варианты работы как свободным абразивом, так и связанным. Были изготовлены алмазные инструменты на органической и металлической связках различных концентраций алмаза. Блокирование производилось как эластичное, так и жесткое (вплоть до оптического контакта).

Использованы химические компоненты на этапах тонкого шлифования и полирования: ортофосфорная кислота, водный раствор коллоидного кремнезема, этиленгликоль, фтористый натрий, амилацетат и др.

В качестве полировальных подложек применялись: Д16Т, латунь, оловяно-свинцовые подложки, политан, смола.

Опробованы различные переходы микро и субмикророшков алмаза на финишных операциях, вплоть до 01/0, различных производителей.

Изучены и интересны для производства новые методы обработки кристаллов лейкосапфира на основе квазипластичности. Метод предложен и опробован в восьмидесятых годах прошлого столетия и до настоящего времени научные подразделения продолжают совершенствовать эту технологию. Данный метод требует специализированного оборудования и инструмента. Подача инструмента осуществляется в долях мкм. О промышленном использовании данной технологии нам не известно.

Наше предприятие продолжает работу по обработке лейкосапфира в условиях серийного производства и готово к рассмотрению любых деловых предложений по сотрудничеству

# ДИНАМИКА РАЗВИТИЯ КАВИТАЦИОННОЙ ОБЛАСТИ В ВЫСОКОЧАСТОТНОМ УЛЬТРАЗВУКОВОМ ПОЛЕ

ДЕЖКУНОВ Н.В., КРАСОВСКИЙ В.А., ФЕДОРИНЧИК М.П., ШАПЛЫКО В.В.

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники

E-mail: dnv@bsuir.by

В настоящее время для ультразвуковой очистки оптических деталей и изделий электронной техники используются обычно поля с частотой в диапазоне 20-50 кГц. Дальнейшее повышение степени очистки за счет гарантированного удаления с обрабатываемой поверхности все более мелких частиц требует применения высокочастотного (ВЧ) ультразвука с частотой в диапазоне 0,5-3 МГц [1]. Обычно при этом реализуется процесс в два этапа: на первом обработка производится в низкочастотном (НЧ) поле, а на втором - в ВЧ поле.

Одним из факторов, сдерживающих применение высокочастотного ультразвука, является недостаток знаний о закономерностях генерирования кавитации в ВЧ поле, а также отсутствие методов оценки активности кавитации в этих условиях.

В данной работе исследовалась динамика развития кавитационной области в поле фокусирующего излучателя на частоте 720 кГц при импульсном и непрерывном озвучивании.

Рабочая емкость использовавшейся установки представляет собой цилиндр из нержавеющей стали диаметром 10 см и высотой 16 см. Пьезокерамический излучатель 4 диаметром 65 мм вмонтирован через отверстие в днище емкости с помощью тefлоновой крышки, навинчиваемой на емкость. На уровне фокального пятна излучателя в боковой поверхности емкости выполнено окно, в котором установлен световод фотоумножителя. Гидрофон вмонтирован через крышку ёмкости таким образом, что его приемный пьезо-керамический элемент диаметром 2 мм и толщиной 0,25 мм находится за фокальным пятном излучателя на расстоянии 25 мм от него. Выходные сигналы фотоумножителя L и гидрофона Н (после предварительного усиления) подавались на запоминающий осциллограф и анализировались с использованием компьютера.

В результате проведенной работы показано, что варьируя параметры импульсов ультразвукового поля, при заданном напряжении на излучателе, т.е. при заданной интенсивности ультразвука, можно влиять на динамику развития кавитационной области.

Ячейка заполнялась рабочей жидкостью и отстаивалась в течение двух суток. Затем жидкость дегазировали под действием ультразвука в течение 20 мин при напряжении на излучателе 170 В ( $\approx 10$  Вт/см<sup>2</sup>). Газосодержание под действием ультразвука уменьшалось на 20-25% по сравнению с равновесным. Предварительная частичная дегазация жидкости существенно повышает воспроизводимость результатов, так как после такой обработки концентрация воздуха в жидкости под действием ультразвука при проведении эксперимента практически не меняется.

Из полученных данных следует, что можно выделить следующие стадии развития кавитационной области.

1. Первая стадия, по-видимому, связана с возникновением нелинейно пульсирующих

кавитационных пузырьков. Поглощение ультразвука на этой стадии практически не увеличивается по сравнению с поглощением в жидкости без пузырьков. Это указывает на то, что объёмная доля пузырьков незначительна. Вероятно, вырастают существенно только пузырьки резонансного размера или близкого к резонансному.

2. На второй стадии развития кавитационной области возникает звуколюминесценция, что сопровождается незначительным увеличением поглощения ультразвука. Интересно, что в этом режиме в импульсно модулированных ультразвуковых полях интенсивность ЗЛ мало меняется при увеличении интенсивности ультразвука в довольно широком диапазоне интенсивностей. Увеличение поглощения ультразвука может быть вызвано увеличением числа и размеров больших пульсирующих кавитационных пузырьков, поглощающих и рассеивающих ультразвуковые колебания.

3. Переход к третьей стадии развития кавитационной области сопровождается быстрым увеличением интенсивности звуколюминесценции и поглощения ультразвука в кавитационной области, что указывает на увеличение числа кавитационных пузырьков и эффективности их захлопывания. Переход от режима 2 к режиму 3 может происходить и произвольно, при постоянном напряжении на излучателе. При этом интенсивность звуколюминесценции, в некоторых случаях увеличивается более, чем в 10 раз, а поглощение ультразвука - в несколько раз.

Спектральные характеристики кавитационного шума существенно меняются при переходе от одной стадии развития кавитационной области к другой, что указывает на возможность идентификации режимов озвучивания на основании спектрального анализа кавитационного шума.

Работа выполнена при финансовой поддержке Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований

*Список литературы:*

1. Hauptmann M., Struf H., Mertens P., Heyns M., De Gent S., Glorieux C., Brems S. Ultrasonics Sonochemistry. V.20, 2013. P 77-88.

# СПЕКТРАЛЬНО-АКУСТИЧЕСКИЙ МЕТОД КОНТРОЛЯ РЕЖИМА РАБОТЫ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ УСТАНОВОК

ДЕЖКУНОВ Н.В., ФЕДОРИНЧИК М.П., КОТУХОВ В.А.

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники

E-mail: dnv@bsuir.by

ТОМАЛЬ В.С.

РУП «Оптическое станкостроение и вакуумная техника», г. Минск, Республика Беларусь

E-mail: os\_vt@mail.belpak.by

К настоящему времени предложено значительное количество методов оценки активности кавитации и контроля режимов работы ультразвуковых установок. Активность кавитации, как известно, определяется количеством захлопывающихся пузырьков в единице объема жидкости и эффективностью с которой пузырьки концентрируют звуковую энергию и преобразуют её в энергию ударных волн, тепловую и энергию микроструй жидкости [1,2]. Эффективность преобразования энергии пузырьками определяется скоростью их захлопывания. Однако прямыми измерениями невозможно определить ни число пузырьков в кавитационной области, ни скорость их захлопывания. Именно сложность подобного рода измерений и отсутствие методики оценки числа кавитирующих пузырьков и эффективности преобразования ими энергии ультразвука в другие её виды является причиной того, что до сих пор не разработаны надежные методы контроля, а соответственно - и средства управления активностью кавитации. Это обстоятельство существенно ограничивает возможности применения мощного ультразвука для интенсификации физико-химических процессов в жидкостях.

В данной работе исследованы спектральные характеристики кавитационного шума в режимах, соответствующих различным стадиям развития кавитационной области.

Показано, что можно выделить 4 стадии развития кавитационной области в поле фокусирующего излучателя при плавном увеличении напряжения на излучателе: 1) возникновение пузырьков и их пульсации без генерирования звуколюминесценции (ЗЛ); 2) возникновение свечения и медленный рост интенсивности ЗЛ; 3) быстрый рост интенсивности ЗЛ сопровождающийся быстрым ростом увеличения поглощения ультразвука в кавитационной области; 4) состояние насыщения кавитационной области, в котором интенсивность ЗЛ уменьшается с ростом интенсивности ультразвука.

На рис. 1 приведены спектры кавитационного шума для различных интенсивностей ультразвука, соответствующих упомянутым выше стадиям развития кавитационной области.

При интенсивности ультразвука ниже порога ЗЛ, т. е. ниже порога нестационарной кавитации (рис. 1 а, 1 б), спектр включает, как правило, не более двух первых гармоник. Возникновение ЗЛ сопровождается значительным расширением спектра: появляются более высокие гармоники (рис. 1 в). Увеличение интенсивности ультразвука приводит к дальнейшему расширению спектра в сторону высокочастотных составляющих и возникновению широкополосного шума (рис. 1 г).

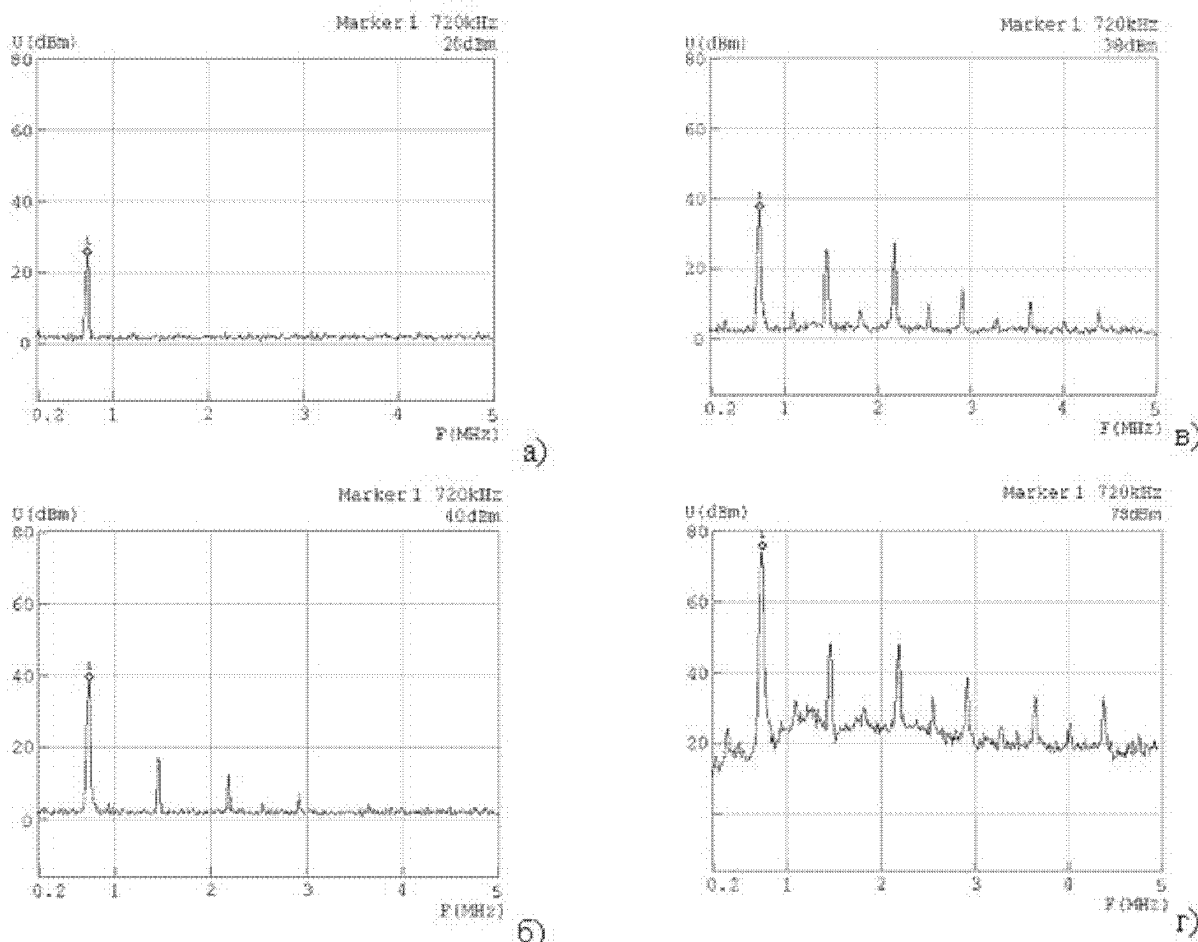


Рисунок 1

При возникновении звуколюминесценции, т. е. при появлении в кавитационной области захлопывающихся кавитационных полостей в спектре появляется непрерывная составляющая. Нами установлено, что интегральная интенсивность широкополосной составляющей кавитационного шума хорошо коррелирует с активностью кавитации, оцениваемой, например, по интенсивности ЗЛ или по скорости кавитационной эрозии. На основании полученных результатов разработан прибор для измерения и контроля активности кавитации - кавитометр ИКА-3. Прибор апробирован на РУП "Оптическое станкостроение и вакуумная техника" и других предприятиях. Его применение позволяет выбирать оптимальные режимы озвучивания, контролировать равномерность акустического и кавитационного полей в рабочем объеме, обеспечивает высокую воспроизводимость режимов обработки.

Список литературы:

1. М. Г. Сиротюк. Акустическая кавитация. М.: Наука, 2008, 271с.
2. Dezhkunov N. V. and Francescutto A. Book of Abstracts of 13-th meeting of the European Society of Sonochemistry (ESS-13), 2012, Lviv, Ukraine, 2012, P. 26-27.



# АНАЛИЗ ВЫБОРА ОБОРУДОВАНИЯ ДЛЯ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ СТАНКОВ С ЧПУ ДЛЯ ОБРАБОТКИ ОПТИЧЕСКИХ ДЕТАЛЕЙ

ТОМАЛЬ В.С., КАСИНСКИЙ Н.К., РАТОМСКИЙ В.В.

РУП «Оптическое станкостроение и вакуумная техника», г. Минск, Республика Беларусь

E-mail: os\_vt@mail.belpak.by

В настоящее время мировой рынок для построения систем управления станков и технологического оборудования предлагает оборудование от различных производителей: Mitsubishi Electric (Япония), Siemens (Германия), Fagor Automation (Испания), Omron (Япония) и ряда других. Поэтому перед разработчиками нового оптического оборудования актуальной становится проблема выбора оборудования того производителя, которое позволит оптимально решить все технические задачи. С учётом разработки и изготовления нового поколения оптического оборудования на нашем предприятии проведён сравнительный анализ выбора оборудования для систем управления станков с ЧПУ.

На текущий момент на нашем предприятии разработаны следующие модели станков на базе УЧПУ 8055М и сервоприводов производства корпорации Fagor Automation (Испания):

- |                     |             |
|---------------------|-------------|
| 1. Асфероид - 100М; | 6. МОС-100; |
| 2. Асфероид - 100Т; | 7. СОШ-150; |
| 3. Асфероид - 100П; | 8. АПД-500; |
| 4. ЦС-350;          | 9. АП-160;  |
| 5. ШС-1600;         | 10. СПА-320 |

В целях поддержки отечественного производителя был разработан станок модели АСШ-320 как модификация станка модели ЦС-350 с применением отечественного УЧПУ "ИРИС М64" и сервоприводов корпорации Mitsubishi Electric.

Кроме них нами разработаны станки на базе модульного промышленного логического контроллера СЈ1 и сервоприводов Sigma-II корпорации Omron:

- |             |             |
|-------------|-------------|
| 1. РСД-100; | 6. АШС-10;  |
| 2. РСШ-100; | 7. АЗР-100; |
| 3. КШС-35.  | 8. АЗК-100; |
| 4. КШС-100; | 9. АЗШ-100; |
| 5. ША-10;   | 10. АКП-1   |

Ещё один станок модели АШС-300 выполнен на базе контроллера Omron и сервоприводов Fagor.

При выборе оборудования для системы управления к первому станку из первой группы станков прежде всего руководствовались ценовыми показателями коммерческих предложений от дистрибьюторов компаний Siemens и Fagor. Сравнивались системы с оборудованием Siemens (УЧПУ Sinumerik 840D, сервоприводы Simodrive с моторами 1FT6) и оборудованием Fagor Automation (УЧПУ 8055М, сервоприводы AXD1 с моторами FХМ). За явным преимуществом, предпочтение было отдано второму предложению. Помимо коммерческой составляющей, важную роль в выборе сыграла широ-

кая номенклатура исполнительных сервомоторов по мощности, номинальному моменту и номинальной частоте вращения. Кроме этого Fagor имеет большой выбор преобразователей угловых и линейных перемещений в качестве устройств обратной связи систем управления. Одним словом, предпочтение отдано комплектной поставке необходимого оборудования от одного производителя и выгодному соотношению цена/качество.

Вместе с поставкой оборудования заключался договор на разработку программного обеспечения системы управления станка, его отладку и запуск станка. И в этом вопросе более выгодным было предложение от дистрибьютора Fagor. Все последующие станки этой группы автоматически строились на оборудовании Fagor, перенося технические решения и накопленный опыт в обращении с УЧПУ 8055М и его программным обеспечением от первого станка.

При выборе оборудования для систем управления к первым станкам второй группы сравнивались ценовые показатели коммерческих предложений от дистрибьюторов компаний Siemens и Omron как на поставку оборудования, так и на разработку программного обеспечения системы управления станка, его отладку и запуск станка. В этом выборе предпочтение было отдано предложениям дистрибьютора Omron.

Потенциальных потребителей выпускаемого на нашем предприятии оборудования, у которых на предприятии эксплуатируются станки с ЧПУ на оборудовании Siemens, не должно отпугивать наше оборудование с системами Fagor и Omron. Это техника высокого качества. Создание управляющих программ обработки деталей для станков с УЧПУ ведется, как и для Siemens, на наиболее распространенном языке программирования Международного стандарта ISO - "G-код". Для станков с промышленными логическими контроллерами используется одинаковый принцип программирования: в редакторе "релейные диаграммы".

# ПОВЫШЕНИЕ АКТИВНОСТИ КАВИТАЦИИ И КАЧЕСТВА ОЧИСТКИ ОПТИЧЕСКИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ПРИ ОБРАБОТКЕ В КОМБИНИРОВАННОМ УЛЬТРАЗВУКОВОМ ПОЛЕ

ДЕЖКУНОВ Н.В., ЛАНИН В.Л., КОТУХОВ А.В.

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники

E-mail: dnv@bsuir.by

ТОМАЛЬ В.С.

РУП «Оптическое станкостроение и вакуумная техника», г. Минск, Республика Беларусь

E-mail: os\_vt@mail.belpak.by

В настоящее время общепризнано, что ключевым фактором ультразвуковой интенсификации физико-химических процессов в жидкостях является кавитация - явление образования, роста и захлопывания микропузырьков в жидкости [1]. Активность кавитации, понимаемая как интенсивность воздействия ультразвука на тот или иной процесс в жидкости определяется концентрацией кавитационных полостей и эффективностью, с которой они преобразуют энергию ультразвука в энергию ударных волн и микроструй жидкости [2].

В работах [3,4] показано, что воздействие низкочастотным (НЧ) ультразвуком на кавитационную область, генерируемую высокочастотным (ВЧ) полем, является эффективным методом повышения активности кавитации. В частности, во взаимодействующих ВЧ и НЧ полях с сильно отличающимися частотами  $f_1$  и  $f_2$  наблюдалось значительное усиление свечения, генерируемого кавитационными пузырьками - звуколюминесценции (ЗЛ).

В данной работе исследовались механизмы усиления кавитации во взаимодействующих ультразвуковых полях и возможности использования этого эффекта для повышения качества очистки оптических изделий. Активность кавитации оценивалась по интенсивности ЗЛ.

Показано, что если используется импульсно модулированное ВЧ поле, то интенсивность ЗЛ в комбинированном поле, создаваемом одновременно работающими ВЧ и НЧ излучателями, во много раз превосходит сумму интенсивностей ЗЛ, генерируемых при работе каждого из излучателей в отдельности.

Установлено, что возможными механизмами повышения активности кавитации во взаимодействующих ультразвуковых полях являются следующие.

1. Возникновение комбинационных частот  $f_1+f_2$  и  $f_1-f_2$  и расширение в результате этого спектрального состава результирующего поля, что может приводить к расширению диапазона размеров пузырьков, вовлекаемых в кавитационный процесс.

2. Уменьшение порога ВЧ кавитации течение полупериода разрежения НЧ поля (которое является квазистатическим по отношению к ВЧ полю) и увеличение в результате числа пузырьков, кавитирующих под действием ВЧ поля.

3. Подавление процесса образования устойчивых образований кавитационных полостей - кластеров. Возможно, что большие пузырьки, генерируемые НЧ полем, оказывают сильное воздействие на кластеры ВЧ пузырьков, препятствуя их образованию и увеличивая однородность распределения пузырьков по объему кавитационной области.

Уменьшение кластеризации кавитационной области способствует повышению активности кавитации и равномерности обработки поверхностей.

4. Кавитирующие пузырьки при захлопывании, как известно, распадаются на мелкие части. Число образующихся при этом фрагментов (осколков), может достигать 10 и более [1]. Фрагменты пузырька, захлопнувшегося под действием НЧ поля могут быть подходящими зародышами для кавитации в ВЧ поле. Поскольку эти новые зародыши содержат гораздо меньше воздуха, чем пузырьки, стабильно существующие в жидкости, то они и захлопываются в ВЧ поле с большей скоростью.

Особенность экспериментов, выполненных в данной работе, состоит в том, что воздействия НЧ и ВЧ полей на жидкость разнесены во времени. Установлено, что если интенсивность НЧ поля выше порога кавитации, то усиление интенсивности ЗЛ, генерируемой ВЧ полем, имеет место и в том случае, когда ВЧ поле включается через некоторый промежуток времени  $t$  после отключения НЧ поля. Таким образом, наблюдается своего рода эффект последствия НЧ поля на кавитацию, генерируемую ВЧ полем.

Этот результат позволяет считать, что основным фактором при взаимодействии сильно различающихся по частоте ультразвуковых полей является генерирование новых зародышей кавитации при захлопывании пузырьков.

Для исследования качества очистки использовалась алмазная полировальная паста с добавкой люминесцирующей жидкости ЛЖ-6А. Паста наносилась на поверхность образца полированием. После очистки в ультразвуковом поле измерялась интенсивность свечения обработанной поверхности в ультрафиолетовом свете. Показано, что озвучивание во взаимодействующих ультразвуковых полях позволяет сократить время обработки и повысить равномерность обработки и эффективность удаления загрязнений с поверхности изделия.

#### Список литературы:

1. М. Г. Сиротюк. Акустическая кавитация. М.: Наука, 2008. -271с.
2. *Dezhkunov N. V. and Francescutto A.* Book of Abstracts of 13-th meeting of the European Society of Sonochemistry (ESS-13), 2012, Lviv, Ukraine, 2012, P. 26-27.
3. *Дежкунув Н.В.* Инж.-физ. журн. 2003. Т. 76, № 1. С. 120-127.
4. *Francescutto A., Dezhkunov N, Calligaris F.* Proceedings of the 2-nd Congresso Nazionale CUCS. Padova, Italy, Sept. 2011. P. 64-68

# ЕМКОСТНОЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ ВСТРЕЧНО-ШТЫРЕВОГО ТИПА В МЕДИЦИНСКОЙ ДИАГНОСТИКЕ

ВОРОБЕЙ А.М.

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники,

г. Минск, Республика Беларусь

E-mail: vorobeianna@tut.by

Известно, что все потовые железы человека в зависимости от механизма секреции подразделяются на эккриновые, или малые потовые железы, и апокриновые, или большие железы [1]. Функцией эккриновых желез, расположенных преимущественно на ладонях, подошвах и в подмышечных впадинах, является секреция содержащего электролиты пота. Пот, секретлируемый эккриновыми потовыми железами, на 98-99% состоит из воды. В нем содержится также органические (0,15-0,5%) и неорганические (0,65-1,5%) вещества [2]. Содержание хлорида натрия (NaCl) в поте составляет около 0,3%, содержание же других хлоридов щелочных металлов меньше [1], т.е. эккриновые потовые железы выделяют преимущественно NaCl [3]. Исходя из вышеизложенного, можно сделать вывод, что пот представляет собой раствор, состоящий в большей степени из воды и хлорида натрия.

С целью объективизации диагностики интенсивности потоотделения человека с помощью разработанного емкостного датчика встречно-штыревой структуры [4] проведено исследование зависимости электрической емкости встречно-штыревого преобразователя от относительной влажности (раствор «дистиллированная вода + хлорид натрия») помещенного на него хлопчатобумажного образца прямоугольной формы 10x20 мм и толщиной 0,1 мм. В данном исследовании использован емкостной датчик встречно-штыревого типа, изготовленный в промышленных условиях (рис. 1). Датчик состоит из нанесенных на стеклотекстолитовую подложку марки FR4 (толщина 1,5 мм) медных электродов (толщина 120 мкм), покрытых диэлектрическим покрытием - маской H9100 (толщина 25 мкм).

В проведенном исследовании для измерения массы хлопчатобумажного образца использованы весы торсионные ВТ-500, а также измеритель иммитанса Е7-20 для определения электрической емкости образца. При измерении электрической емкости

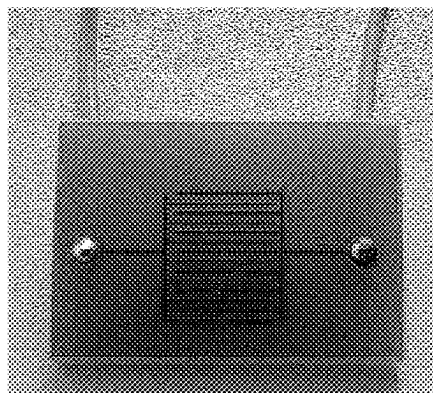
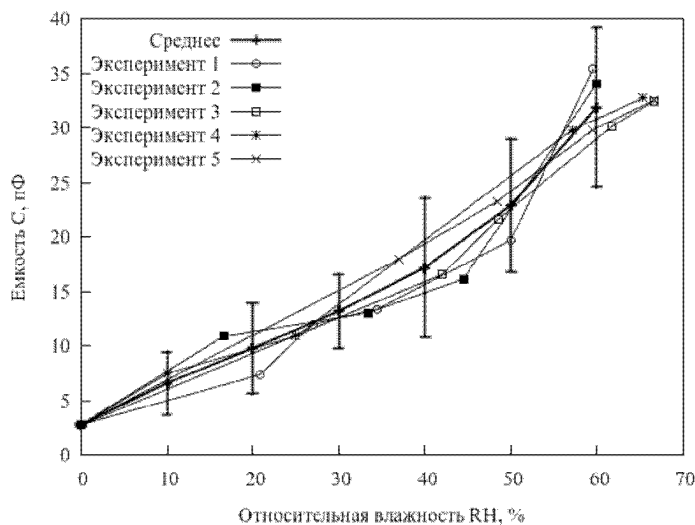


Рисунок 1.

Емкостной датчик встречно-штыревого типа

хлопчатобумажный образец располагался непосредственно на датчике под постоянным давлением (около 1,5 Н) специального пружинного механизма. Частота сигнала датчика влажности кожи задавалась на уровне 1 МГц. Состав исследуемого солевого раствора: молярная концентрация NaCl - 40 ммоль/л, или 234 мг NaCl на 100 мл дистиллированной воды. Количество проведенных экспериментов равнялось пяти.

В результате проведенных экспериментальных исследований получены зависимости электрической емкости датчика встречно-штыревого типа от относительной влажности (раствор "дистиллированная вода + хлорид натрия") помещенного на него хлопчатобумажного образца (рис. 2).



**Рисунок 2.**  
**Зависимости электрической емкости датчика встречно-штыревого типа от относительной влажности (раствор «дистиллированная вода + хлорид натрия») помещенного на него хлопчатобумажного образца**

Анализируя вышепредставленные графики, можно сделать вывод, что при изменении относительной влажности от 0% до 60% чувствительность датчика имеет тренд к увеличению. При относительной влажности от 0% до 30% наблюдается рост электрической емкости в среднем на 3,5 пФ, при изменении влажности от 30% до 60% - на 6,2 пФ. Как видно из рис. 2, измерения (эксперименты 1-5) имеют среднюю повторяемость. При этом все результаты эксперимента с вероятностью 99,7% попадают в пределы доверительного интервала  $[m \pm 3\sigma]$ . Полученные результаты позволяют применять изготовленный емкостной преобразователь встречно-штыревого типа для диагностики повышенного потоотделения проблемных зон человека.

Список литературы:

1. Мяделец О.Д. Морфофункциональная дерматология / О.Д Мяделец, В.П. Адашкевич. - М: Медлит, 2006. - 752 с.
2. Laden K. Antiperspirants and Deodorants. CRC, 1999. - 422 p.
3. Солоха О.А. Фокальный гипергидроз: проблема, нашедшая свое решение / О. А. Солоха / Неврологический журнал. - 2004. - №6. - С.43-48.
4. Воробей А.М. Comsol Multiphysics: моделирование электрических параметров прототипа встречно-штыревого датчика влажности кожи / А. М. Воробей, Д. В. Рымарев, А. Л. Потапов, М. В. Давыдов, С. С. Стебунов // Современные проблемы радиотехники и телекоммуникаций "РТ-2013": Материалы 9-ой международной молодежной научно-технической конференции. - С.: СевНТУ, 2013. - С. 276.

# СОЗДАНИЕ УЛЬТРАПРЕЦИЗИОННОГО ОБОРУДОВАНИЯ С ЧПУ ДЛЯ ОБРАБОТКИ ОПТИЧЕСКИХ ДЕТАЛЕЙ

ВАЙНШТЕЙН И.В., ПОДОБРЯНСКИЙ А.В., ТЮРИН Н.В.

МГТУ "Станкин", ОАО "НПО "Оптика", г. Москва,

ООО "ВСЗ "Техника", г. Владимир, Россия

E-mail: optika@nprooptica.ru

В рамках программы «Развитие отечественного станкостроения и инструментальной промышленности на 2011-5-2016 годы» федеральной целевой программы «Национальная технологическая база», ФГБОУ ВПО МГТУ «СТАНКИН», ОАО «Научно-производственное объединение «Оптика» и ОАО «Владимирский станкостроительный завод «Техника» были проведены НИОКР:

- «Создание технологии и специального ультрапрецизионного станка для обработки матриц линз Френеля»;

- «Разработка и технологическое обеспечение серийного производства семейства многокоординатных ультрапрецизионных станков с числовым программным управлением для алмазного точения и магнитореологической доводки асферических внеосевых оптических деталей»;

- «Разработка технологии и оборудования для ультрапрецизионного пластичного резания хрупких материалов (кварц, кремний, германий и др.) с использованием непрерывной электролитической правки мелкодисперсного шлифовального круга во время обработки».

ФГБОУ ВПО МГТУ «СТАНКИН», как головной исполнитель работ по темам, разрабатывал и изготавливал систему управления опытными образцами создаваемого оборудования и проводил общую отладку станков.

ОАО «НПО «Оптика» разрабатывало технологию обработки, изготавливало инструмент и механическую часть станка магнитореологической обработки деталей.

ОАО «ВСЗ «Техника» изготавливало механическую часть станков.

В результате выполнения НИОКР были созданы:

- многокоординатный ультрапрецизионный полировальный станок с ЧПУ мод. «СДМ-600» для магнитореологической доводки асферических внеосевых оптических деталей.

Обработка осуществляется методом магнитореологической доводки оптических деталей диаметром до 600 мм, изготовленных из оптических стекол различных марок. Среднеквадратическая погрешность формы обработанной поверхности - не более 0,01 мкм; шероховатость обработанной поверхности,  $K_a$  - не более 1 нм.

- многокоординатный ультрапрецизионный станок с ЧПУ мод. «А-500» для алмазного точения оптических деталей.

Обработка осуществляется методом алмазного точения оптических деталей диаметром до 500 мм, изготовленных из металлооптических материалов. Среднеквадратическая погрешность формы обработанной поверхности - не более 0,03 мкм; шероховатость обработанной поверхности,  $K_a$  - не более 5 нм.

- ультрапрецизионный шлифовальный станок мод. «К-200» для пластичного резания хрупких материалов (кварц, кремний, германий и др.) с использованием непрерывной электролитической правки мелкодисперсного шлифовального круга во время обработки. Количество одновременно управляемых координат - 3. Погрешность формы оптической

поверхности на длине 100 мм в любом направлении - не более 100 нм; шероховатость обработанной поверхности,  $K_a$  - не более 15 нм; максимальный диаметр алмазного круга - не менее 100 мм.

- специальный ультрапрецизионный станок мод. «Ф-300» для изготовления концентрических линз Френеля из различных материалов (пластмасса, цветные металлы и их сплавы, стекло, кристаллы, керамика и т.п.) с аппроксимированием контура прямолинейными и криволинейными участками методом алмазного точения и шлифования.

Наибольший диаметр обрабатываемого изделия при точении и шлифовании - 300 мм; наибольшее количество одновременно управляемых координат - 3; отклонение формы на 0 100 мм - 0,1 мкм; отклонение взаимного расположения поверхностей - 0,15 мкм; размерная точность - 0,2 мкм; шероховатость поверхности при точении и шлифовании  $K_a$  - 0,01 мкм.

Опытные образцы оборудования изготовлены и в настоящее время проводится испытание.

Первые полученные результаты позволяют сказать, что требования технического задания на станки вышеперечисленных наименований в части точности обработки и шероховатости обрабатываемых поверхностей деталей успешно выполняются.



# ИЗГОТОВЛЕНИЕ ОПТИЧЕСКИХ СЕТОК И ШКАЛ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ВАКУУМНОГО НАНЕСЕНИЯ ХРОМА

АРИКО О.В.

МГТУ "Станкин", ОАО "НПО "Оптика", г. Москва,

ОАО " Минский механический завод имени С.И. Вавилова

- управляющая компания холдинга "БелОМО" г. Минск , Республика Беларусь

В докладе излагается методика и технология изготовления оптических сеток и шкал комбинацией методов фотолитографии и гравировки.

Оптические сетки и шкалы изготавливаются несколькими методами:

1. Гравировки;
2. Фотолитографии.

При изготовлении оптических сеток и шкал с разными параметрами толщины штрихов методом гравирования возникают определенные ограничения. Ранее проводились исследования, связанные с комбинацией методов гравировки и фотолитографии. Однако большого распространения данная методика не получила из-за недостаточности стойкости фотолитографических слоев к воздействию паров плавиковой кислоты. Возникали различные вопросы, связанные с проколами в процессе травления, что не позволяло достигать высоких классов чистоты поверхности.

Нами была поставлена задача разработки и внедрения технологии изготовления оптических сеток с различными вариациями параметра толщины штрихов и достижения высокого класса чистоты (0-20/0-40). В проведенных исследованиях нами были исследованы различные параметры, влияющие на процесс изготовления сеток; испробованы различные фоторезисты; применены ранее внедренные технологии нанесения вакуумного покрытия. Данные изменения позволили уменьшить количество проколов в процессе травления в парах плавиковой кислоты.

Разработанная технология изготовления оптических сеток и шкал комбинированным методом фотолитографии и гравировки отразилась на качестве выполняемых работ:

1. Число годных деталей на участке гравировки возросло на величины от 20 до 60%.
2. Изготавливаются оптические сетки и шкалы с различной толщиной штриха с последующим применением белого запуска.