

На правах рукописи

Виленский Андрей Владимирович

**АКУСТООПТИЧЕСКИЕ СПЕКТРОФОТОМЕТРЫ
И ИХ ПРИМЕНЕНИЕ ДЛЯ КОНТРОЛЯ
ОПТИЧЕСКИХ ПОКРЫТИЙ**

Специальности

05.27.03 - Квантовая электроника

05.11.07 - Оптические и оптико-электронные приборы и комплексы

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Москва, 2002

Работа выполнена в
ФГУП НИИ "ПОЛЮС" им М.Ф. Стельмаха

Научный руководитель:

Доктор технических наук, с н с

Чередниченко О Б

Официальные оппоненты.

Доктор технических наук, проф.

Ермаков Г. А

Кандидат физико-математических наук

Молчанов В Я

Ведущая организация.

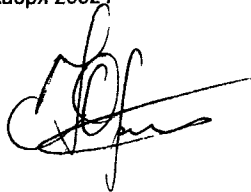
Научно-Технологический Центр Уникального Приборостроения РАН

Защита состоится "16" января 2003 г в 15 час на заседании диссертационного
совета Д 409 003 01 в ФГУП НИИ "ПОЛЮС" им М.Ф. Стельмаха
по адресу. 117342, Москва, ул. Введенского, д.3.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГУП НИИ "ПОЛЮС"
им М.Ф. Стельмаха

Автореферат разослан "15" декабря 2002 г

Ученый секретарь совета



Кротов Ю.А

Оптические диэлектрические покрытия являются одними из важнейших элементов современных приборов квантовой электроники. Все более жесткие требования предъявляются к спектральным характеристикам покрытий. Соответственно возрастают требования к приборам, предназначенным для контроля этих характеристик. Так, в частности, для изготовления многослойных диэлектрических покрытий со сложными спектральными характеристиками необходимо иметь скоростной спектрофотометр, который позволил бы отслеживать эволюцию спектральной характеристики покрытия в реальном времени в процессе нанесения слоев.

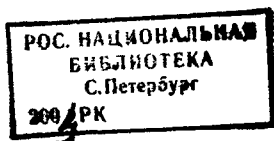
Данная работа посвящена экспериментальному исследованию одного из широко используемых в современной квантовой электронике приборов - скоростного акустооптического спектрофотометра на коллинеарных акустооптических фильтрах, разработке и созданию специализированных моделей скоростных акустооптических спектрофотометров, предназначенных для контроля оптических, в том числе лазерных, покрытий, а также модернизации ранее созданного в ФГУП НИИ "ПОЛЮС" им. М.Ф. Стельмаха акустооптического спектрофотометра АОС-3S.

В настоящее время акустооптические устройства используются для управления оптическим излучением [1,2]. Одна из задач управления излучением, выделение узкой линии из широкого спектрального диапазона, может быть решена с помощью акустооптических фильтров (АОФ) [3-6].

В данной диссертационной работе рассматриваются акустооптические спектрофотометры на коллинеарных АОФ со звукопроводами, изготовленными из кристаллов кварца [7,8] и молибдата кальция [9-10]. Далее, для краткости, будем писать АОФ из кварца (или кварцевые АОФ) и АОФ из молибдата кальция.

В основе действия акустооптического фильтра лежит Брэгговская дифракция света на акустической волне в анизотропных средах [1,2,11]. При этом для коллинеарных АОФ [6,12] выполнение условия Брэгга приводит к эффективной дифракции света с длиной волны

$$\lambda = V \times \Delta n / (f \times \cos \phi) \quad (1)$$



где V - скорость акустической волны, распространяющейся в звукопроводе АОФ; Δn - разность показателей преломления материала звукопровода АОФ для необыкновенного и обыкновенного лучей света, взаимодействующего со звуком (далее, двулучепреломление); f - частота акустической волны; ϕ - угол между направлениями групповой и фазовой скоростей звука (для SiO_2 $\phi=217^\circ$, а для CaMoO_4 $\phi=0^\circ$).

Таким образом, АОФ является электронно-управляемым скоростным селектирующим элементом, который выделяет из широкополосного излучения узкий спектральный диапазон:

$$\delta \approx \lambda^2 / (2 \times \Delta n \times L), \quad (2)$$

где L - геометрическая длина взаимодействия звуковой и световой волн. Время перестройки длины волны максимума пропускания АОФ определяется временем заполнения звукопровода акустической волной соответствующей частоты f [6, 13] и составляет порядка нескольких десятков микросекунд.

В 1976 году [13] было предложено использовать коллинеарный акустооптический фильтр со звукопроводом из молибдата кальция (CaMoO_4) для создания скоростных сканирующих спектрофотометров. В работе [14] авторы предложили использовать скоростные акустооптические анализаторы спектра для контроля толщины тонкопленочных покрытий (лазерных зеркал, светоделителей, поляризаторов, и т.п.) во время их напыления в вакуумных камерах, что позволяет реализовать не только традиционные методы фотометрического контроля на одной длине волны света [15, 16], но и более информативный метод контроля спектральной характеристики покрытия в некотором диапазоне длин волн [16-18].

В работах [19-21] прослеживается эволюция технологических акустооптических спектрофотометров (АОС), ориентированных на спектральный контроль в реальном масштабе времени. В этих статьях показаны преимущества акустооптических приборов перед классическими спектрофотометрами, обозначены некоторые недостатки, приведены технические характеристики и описания АОС. Авторы показали универсальность акустооптического спектрофотометра при реализации различных методов фотометрического контроля. Также приведены

теоретические и экспериментальные спектральные характеристики покрытий, контролируемых в процессе напыления с помощью АОС

Актуальность темы. АОС обладают рядом достоинств, таких как скоростное сканирование в широком спектральном диапазоне; малоинерционная перестройка с одной длины волны на другую с произвольной выборкой спектральных точек; высокая светосила; большой динамический диапазон; полностью электронное управление. Благодаря своим достоинствам, акустооптические спектрофотометры нашли применение не только в научных исследованиях, но и на производстве, например, в качестве систем оптического контроля в вакуумных напылительных установках.

Следует отметить, что к началу выполнения данной работы не существовало достаточно совершенных спектрофотометров для контроля толщины тонкопленочных покрытий во время их напыления. К тому же практически отсутствовали недорогие модели лабораторных спектрофотометров, предназначенных для оперативного контроля спектральных характеристик оптических покрытий.

В последнее время наблюдается развитие технологии вакуумного магнетронного напыления оптических покрытий на крупногабаритные детали архитектурные стекла, экраны мониторов, заготовки для автомобильных антибликовых зеркал и т.п. Для таких покрытий одним из важнейших требований является высокая воспроизводимость спектральных характеристик в широком диапазоне, например, во всей видимой области спектра. В связи с этим становится актуальной задача контроля спектральных характеристик движущихся крупногабаритных деталей во время нанесения на них тонкопленочных покрытий.

Из вышесказанного следует актуальность разработки акустооптических спектрофотометров и их применения, как для контроля толщины слоев покрытий во время их напыления в вакуумных установках, так и для исследования, контроля, аттестации и паспортизации готовой продукции.

Особо отметим важность и актуальность разработки и эффективного использования АОС в квантовой электронике для изготовления сложных и прецизионных лазерных просветляющих и отражающих покрытий

Цель работы Целью данной диссертационной работы явилось проведение исследований, направленных на

- создание ряда специализированных скоростных акустооптических спектрофотометров, а именно: настольного спектрофотометра для контроля коэффициентов пропускания и отражения крупногабаритных оптических деталей, настольного спектрофотометра для контроля спектральных характеристик оптических покрытий в квантовой электронике - на деталях лазерной техники, АОС для мониторинга процесса нанесения покрытий по спектрам отражения или пропускания вращающихся деталей;
- модернизацию ранее созданного в НИИ "ПОЛЮС" акустооптического спектрофотометра АОС-3С, который широко применяется в качестве технологического спектрофотометра при изготовлении изделий квантовой электроники;
- выявление и снижение негативных последствий влияния изменений температуры на работу АОС

Научная новизна

Впервые, с целью повышения эффективности и прецизионности одного из перспективных приборов квантовой электроники – скоростного акустооптического спектрофотометра – проведен комплекс специальных экспериментальных исследований и предложен ряд оригинальных методов и схем, а именно:

- впервые измерены величины относительного температурного смещения длины волны настройки акустооптических фильтров со звукопроводами из молибдата кальция и кварца и получены спектральные зависимости этих величин в диапазоне 720-1175 нм;
- предложен и реализован оригинальный способ определения температурных зависимостей скорости звука и разности показателей преломления в акустооптических двулучепреломляющих материалах. Измерены

температурные зависимости скорости звука и разности показателей преломления в кристалле молибдата кальция;

- предложен и реализован способ компенсации влияния температурных изменений на точность установки длины волны акустооптического спектрофотометра;
- предложена схема акустооптического спектрофотометра, включающая в себя узел с вращающейся призмой. На основании предложенной схемы разработана система оптического контроля, позволяющая вести мониторинг процесса нанесения покрытий по спектрам отражения или пропускания вращающихся деталей.

Практическая ценность Полученные в диссертационной работе результаты реализованы в разработанных и выпускаемых в НИИ "Полюс" акустооптических спектрофотометрах.

- 1 Замена акустооптического фильтра со звукопроводом из молибдата кальция на фильтр со звукопроводом из кварца в выпускаемом в НИИ "Полюс" технологическом акустооптическом спектрофотометре AOS-3S позволила увеличить долговременную стабильность фотометрического сигнала более чем в три раза
- 2 Создан настольный одноканальный спектрофотометр AOS-3SG, предназначенный для контроля спектральных характеристик оптических покрытий на крупногабаритных деталях
- 3 Создан специализированный настольный спектрофотометр AOS-3SL, предназначенный для контроля спектральных характеристик оптических элементов квантовой электроники и оптических приборов. В опорном канале спектрофотометра помещен репер длин волн, позволяющий компенсировать температурное смещение длины волны настройки АОФ и обеспечить установку длины волны с абсолютной погрешностью $\pm 0,05$ нм и стабильностью $\pm 0,013$ нм, что меньше полуширины аппаратной функции прибора
- 4 Предложенная в работе система оптического контроля на основе акустооптического спектрофотометра с узлом вращающейся призмы была

реализована в установке для нанесения покрытий на защитные экраны для мониторов компьютеров

- 5 Предложенный и продемонстрированный на примере молибдата кальция метод измерения температурных зависимостей скорости звука и двулучепреломления может быть использован для определения этих параметров для других акустооптических двулучепреломляющих материалов

Апробация работы Результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на постоянно действующем научно-техническом семинаре "Электровакуумная техника и технология" (1997, 1998, 2000, 2001 гг), научно-технических семинарах отдела 650 ФГУП НИИ "Полус" им. М Ф Стельмаха (1995-2002 гг) и на XLV научной конференции МФТИ (секция квантовой электроники)

Работа "Температурные эффекты в акустооптических спектрофотометрах" была удостоена Первого места в конкурсе на звание "Лучший молодой специалист предприятия" 2001 года, ежегодно проводимом во ФГУП НИИ "Полус" им М Ф Стельмаха.

Защищаемые положения На защиту выносятся следующие положения

1. Исследованные в работе акустооптические спектрофотометры могут найти широкое применение в квантовой электронике, оптическом и оптико-электронном приборостроении для контроля процесса нанесения оптических и лазерных диэлектрических покрытий, контроля спектральных характеристик готовых изделий квантовой электроники, создания систем спектрофотометрического контроля в реальном масштабе времени, в том числе по спектрам отражения и пропускания движущихся и вращающихся деталей.
2. Для коллинеарных акустооптических фильтров из молибдата кальция изменение скорости звука при изменении температуры примерно в 4,5 раза больше влияет на смещение длины волны настройки АОФ, чем изменение величины двулучепреломления кристалла температурный коэффициент скорости звука $\beta = -(5,6 \pm 3,3) \times 10^{-5} \text{ K}^{-1}$, а температурный коэффициент двулучепреломления $\gamma = -(1,2 \pm 0,7) \times 10^{-5} \text{ K}^{-1}$

- 3 Компенсация температурной зависимости длины волны настройки акустооптического спектрофотометра может быть реализована путем введения автоматически вычисляемой поправки в зависимость длины волны настройки от частоты управляющего высокочастотного сигнала. Для определения величины поправки в качестве репера длины волны можно использовать линии поглощения неодима в кристалле алюмоиттриевого граната, размещаемого в специальном оптическом канале акустооптического спектрофотометра. Создание спектрофотометров с репером длин волн в опорном канале позволяет компенсировать температурное смещение длины волны настройки АОФ и обеспечить установку длины волны с точностью $\pm 0,05$ нм и стабильностью $\pm 0,013$ нм.

Публикации Материалы по теме диссертации опубликованы в 5 научных статьях.

Структура диссертации Диссертация состоит из введения, трех глав, основных результатов и выводов, списка использованной в работе литературы и приложений. Основной материал изложен на 91 стр текста, проиллюстрирован 34 стр с рисунками и дополнен списком литературы из 43 наименований.

Краткое содержание

Во введении сформулирована цель работы, обосновывается ее актуальность, приведены научные положения, выносимые на защиту, дана общая характеристика работы.

Глава 1 содержит описание методов и аппаратуры, использованных в экспериментальных исследованиях. Здесь же показана возможность использования линий поглощения неодима в кристалле алюмоиттриевого граната (АИГ Nd³⁺) в качестве репера длин волн для акустооптических спектрофотометров.

Глава 2 посвящена влиянию изменений температуры на работу акустооптических спектрофотометров.

В §2.1 рассмотрены погрешности акустооптических спектрофотометров, связанные с изменениями температуры звукопровода акустооптического фильтра. Показано, что изменение температуры звукопровода акустооптического фильтра

приводит как к погрешности установки длины волны, так и к увеличению погрешности фотометрирования. Увеличение погрешности фотометрирования наблюдается в тех диапазонах длин волн, в которых имеет место сильная зависимость сигнала, регистрируемого фотоприемным устройством спектрофотометра, от длины волны света. Зависимость длины волны настройки АОС от температуры в диссертации характеризуется величиной относительного температурного смещения

$$\xi = 1/\lambda \times d\lambda/dT, \quad (3)$$

где $d\lambda/dT$ – производная длины волны настройки АОС по температуре

Для коллинеарных акустооптических фильтров со звукопроводами из кварца и молибдата кальция получены спектральные зависимости величины относительного температурного смещения длины волны настройки спектрофотометра. В линейном приближении:

$$\xi(\lambda) = a \times \lambda + b \quad (4)$$

Для АОФ из кварца $a=0$ и $b = 2,9 \times 10^{-5} \text{ K}^{-1}$, а для АОФ из молибдата кальция $a=7 \times 10^{-8} (\text{нм} \times \text{K})^{-1}$ и $b = 2,13 \times 10^{-5} \text{ K}^{-1}$. Формула (4) с приведенными коэффициентами дает погрешность определения ξ не более $\pm 3 \times 10^{-7} \text{ K}^{-1}$

В §2.2 исследован вклад, который вносят температурные зависимости скорости звука V и двулучепреломления Δn материала звукопровода АОФ в смещение длины волны настройки спектрофотометра, возникающее при изменении температуры звукопровода акустооптического фильтра. Предложены акустооптические способы измерения температурных зависимостей скорости звука и двулучепреломления акустооптических материалов. Для молибдата кальция указанные зависимости получены экспериментально.

Предложенный способ измерения скорости звука основан на возможности исключения из формулы, описывающей связь длины волны света с частотой, величины двулучепреломления кристалла. Для этого на акустооптическом спектрофотометре измерялся спектр пропускания фазовой пластины [22], помещенной между двумя параллельными поляризаторами. Фазовая пластина должна удовлетворять следующим условиям:

- пластина должна быть изготовлена из того же материала, что и звукопровод АОФ,

- свет в пластине должен распространяться по тому же кристаллографическому направлению, что и в звукопроводе АОФ,

- температура пластины должна равняться температуре звукопровода

Зная разность подаваемых на АОФ управляющих частот Δf_{ν} , соответствующих m -ому и $m+\nu$ -ому экстремумам спектра пропускания помещенной между поляризаторами фазовой пластины, можно определить значение скорости звука в звукопроводе АОФ

$$V = 2 \times L \times \Delta f_{\nu} / \nu, \quad (5)$$

где L – толщина пластины, $\Delta f_{\nu} = f_{m+\nu} - f_m$, а ν – целое число.

Меняя одновременно значение температуры для звукопровода и пластины, можно получить зависимость скорости звука от температуры.

Имея зависимость скорости звука от температуры и данные о температурном уходе длины волны настройки спектрофотометра, полученные при спектрофотометрировании реперных спектральных линий при различных значениях температуры звукопровода АОФ, можно определить температурную зависимость двулучепреломления материала звукопровода

Проведенные исследования показали, что

- для акустооптических фильтров из молибдата кальция изменение скорости звука при изменении температуры примерно в 4,5 раза больше влияет на смещение длины волны настройки АОФ, чем изменение величины двулучепреломления кристалла: температурный коэффициент скорости звука $\beta = -(5,6 \pm 3,3) \times 10^{-5} \text{ К}^{-1}$

$$(V(T) = V_0 \times (1 + \beta \times (T - T_0)), \quad V_0 = 2953 \pm 7 \text{ м/с} \quad \text{для } T_0 = 298 \text{ К}),$$

температурный коэффициент двулучепреломления $\gamma = -(1,2 \pm 0,7) \times 10^{-5} \text{ К}^{-1}$

$$(\Delta n(T) = \Delta n_0 \times (1 + \gamma \times (T - T_0)), \quad \Delta n_0 = (9,36 \pm 0,02) \times 10^{-3} \quad \text{для } T_0 = 298 \text{ К}),$$

- предложенный акустооптический метод позволяет с высокой точностью (до 0,5 м/с) определять скорость звука в акустооптических кристаллах

Следует отметить, что представленная методика измерения V и Δn может быть использована и для других акустооптических материалов

В §2.3 представлен предложенный нами способ компенсации температурного дрейфа длины волны настройки акустооптического спектрофотометра путем введения динамической поправки в формулу зависимости длины волны настройки от частоты управляющего напряжения. Величина поправки вычисляется в зависимости от отклонения $\delta\lambda_0$ измеряемого спектрального положения реперной линии поглощения λ_0 материала помещенного в специальный (опорный) канал спектрофотометра от ее истинного положения. Показано, что в качестве реперных линий можно использовать линии поглощения неодима в алюмоиттриевом гранате. Для акустооптических фильтров из молибдата кальция приведена эмпирическая формула для вычисления динамической поправки $\Delta f(\lambda)$ в ближнем инфракрасном диапазоне 720-1175 нм:

$$\Delta f(\lambda) = \Delta f_0 \times (1 + k \times (\lambda - \lambda_0)), \quad (6)$$

где $k = -9 \times 10^{-4} \text{ нм}^{-1}$, а Δf_0 – разность управляющих частот, соответствующая сдвигу длины волны настройки спектрофотометра $\delta\lambda_0$, λ - длина волны света, для которой вычисляется поправка.

В главе 3 рассмотрены практические схемы реализации проведенных в рамках диссертационной работы исследований.

В §3.1 проведен сравнительный анализ АОФ со звукопроводами из кварца и молибдата кальция в плане их использования в спектрофотометрах для измерения спектральных характеристик тонкопленочных оптических покрытий. Показано, что

1) в спектрофотометрах с компенсацией температурного дрейфа длины волны настройки (предложенной в §2.3) в спектральном поддиапазоне 720 – 1175 нм лучше использовать акустооптические фильтры из молибдата кальция, позволяющие добиться большей фотометрической точности за счет снижения уровня шума благодаря большей эффективности преобразования и лучшему контрасту,

2) в спектрофотометрах без компенсации температурного дрейфа длины волны настройки (таких как описанный в главе 1 АОС-3С) во всем рабочем спектральном диапазоне целесообразней использовать кварцевые фильтры, так суммарная погрешность спектрофотометра на кварцевых фильтрах может быть в

несколько раз ниже фотометрической погрешности, вносимой саморазогревом звукопровода АОФ из молибдата кальция в процессе работы спектрофотометра

В §3.2 продемонстрирована возможность использования технологического акустооптического спектрофотометра AOS-3S в качестве лабораторного настольного спектрофотометра. Показана целесообразность работы настольного спектрофотометра только по тем спектральным точкам, в которых проводилась калибровка. Приведены экспериментальные данные подтверждающие снижение влияния изменений температуры на фотометрическую точность за счет применения этого алгоритма работы и представлена схема настольного акустооптического спектрофотометра AOS-3SG, предназначенного для измерения крупногабаритных деталей.

В §3.3 приведено описание настольного спектрофотометра AOS-3SL для контроля оптических покрытий элементов лазерной техники. Спектрофотометр позволяет контролировать спектральные зависимости коэффициентов пропускания и отражения плоских оптических деталей. Причем, спектры пропускания могут регистрироваться при углах падения света на деталь от 0° до 70° , как в неполяризованном так и в линейно поляризованном свете с S- или P- поляризацией.

В спектрофотометре реализованы предложенные идеи компенсации температурного дрейфа длины волны настройки и работы по точкам калибровки. Приведена эмпирическая формула для вычисления динамической поправки при использовании кварцевых акустооптических фильтров:

$$f_c = f \times (2 - \lambda_{00} / \lambda_0), \quad (7)$$

где f_c – частота, которую необходимо подать на АОФ для выделения длины волны λ , с учетом температурного сдвига длины волны настройки фильтра; f – частота, вычисленная для длины волны λ по эмпирической формуле, полученной при некоей фиксированной температуре; λ_0 – истинное значение длины волны минимального пропускания линии поглощения АИГ Nd^{3+} (для спектрального поддиапазона 370 – 720 нм - 588,9 нм, а для поддиапазона 720 – 1175 нм - 795,5 нм), λ_{00} – полученное при измерении в опорном канале значение длины волны минимального пропускания линии поглощения АИГ Nd^{3+}

Таким образом, обеспечивается установка длины волны с точностью $\pm 0,05$ нм и стабильностью $\pm 0,013$ нм

В §3.4 представлена схема акустооптического спектрофотометра, позволяющая осуществлять контроль процесса нанесения покрытий непосредственно по спектрам отражения или пропускания находящейся в движении рабочей детали. Сформулирована задача контроля по движущейся детали. Описаны особенности конструкции вакуумных установок барабанного типа. Предложена схема акустооптического спектрофотометра с оптомеханическим узлом вращающейся призмы, позволяющая реализовать спектрофотометрический контроль по вращающейся детали. Приведены экспериментальные данные, полученные на установке, оснащенной созданной системой спектрофотометрического контроля, и демонстрирующие ее эффективность.

В заключение, сформулированы основные результаты и выводы диссертационной работы, указаны области возможного применения полученных результатов, а также приведены примеры их реализации в аппаратуре, производимой ФГУП НИИ "Полус" им. М.Ф. Стельмаха.

Основные результаты и выводы

1) На основе проведенных исследований были созданы акустооптические спектрофотометры, которые применяются как в системах оптического контроля процессов нанесения оптических покрытий в вакуумных камерах в реальном масштабе времени, так и в качестве настольных спектрофотометров для контроля спектров пропускания и отражения и готовых оптических деталей, что особенно актуально при изготовлении оптических элементов квантовой электроники и оптико-электронного приборостроения.

Разработанные при нашем непосредственном участии и выпускаемые акустооптические спектрофотометры [23] нашли применение на промышленных предприятиях и в исследовательских лабораториях, как в нашей стране, так и за рубежом.

2) Спектральную зависимость величины относительного температурного смещения длины волны настройки акустооптического спектрофотометра в первом

приближении можно описать следующей эмпирической формулой $\xi(\lambda) = a \times \lambda + b$, где для кварца $a = 0$ и $b = 2,9 \times 10^{-5} \text{ K}^{-1}$, а для молибдата кальция $a = 7 \times 10^{-8} (\text{нм} \times \text{K})^{-1}$ и $b = 2,13 \times 10^{-5} \text{ K}^{-1}$. Погрешность определения ξ по этим коэффициентам и формуле не превышает $\pm 3 \times 10^{-7} \text{ K}^{-1}$.

Величина относительного температурного смещения длины волны настройки АОФ из кварца примерно в 3 раза меньше, чем в акустооптических фильтрах из молибдата кальция.

Следовательно, в спектрофотометрах, в конструкции которых не предусмотрена компенсация температурного дрейфа длины волны настройки, во всем рабочем спектральном диапазоне целесообразней использовать кварцевые фильтры, т.к. суммарная погрешность спектрофотометра на кварцевых фильтрах может быть в несколько раз ниже фотометрической погрешности, вносимой саморазогревом звукопровода АОФ из молибдата кальция в процессе работы спектрофотометра

3) Относительное температурное смещение линии поглощения неодима в алюмоиттриевом гранате на длине волны 795,5 нм вблизи комнатной температуры составляет $\xi_{\text{АИГ}} \approx -(2,7 \pm 0,1) \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$, что на порядок меньше, чем относительное температурное смещение длины волны настройки для кварцевых АОФ и почти в 30 раз меньше, чем для АОФ из молибдата кальция

4) Создание спектрофотометров с репером длин волн в опорном канале позволяет компенсировать температурное смещение длины волны настройки АОФ и обеспечить установку длины волны с точностью $\pm 0,05$ нм и стабильностью $\pm 0,013$ нм.

Таким образом, для снижения влияния изменений температуры на точность настройки длины волны в настольных акустооптических спектрофотометрах целесообразно использовать схему с опорным каналом. В качестве репера длин волн в опорном канале удобно использовать кристалл алюмоиттриевого граната с ионами неодима, имеющими ряд узких линий поглощения с относительно стабильным спектральным положением

В спектрофотометрах с компенсацией температурного дрейфа длины волны настройки в спектральном поддиапазоне 720 - 1175 нм предпочтительно

использовать акустооптические фильтры из молибдата кальция, которые позволяют получить большую фотометрическую точность за счет увеличения отношения сигнал/шум благодаря большей эффективности преобразования и лучшему контрасту

5) Экспериментально получены температурные коэффициенты для скорости звука $\beta = -(5,6 \pm 3,3) \times 10^{-5} \text{ K}^{-1}$ и двулучепреломления $\gamma = -(1,2 \pm 0,7) \times 10^{-5} \text{ K}^{-1}$ в кристаллах молибдата кальция

Следовательно, для акустооптических фильтров из молибдата кальция изменение скорости звука при изменении температуры примерно в 4,5 раза больше влияет на смещение длины волны настройки АОФ, чем изменение величины двулучепреломления кристалла

6) Предложенный акустооптический метод позволяет с высокой точностью (до 0,5 м/с) определять скорость звука в акустооптических кристаллах

При необходимости, этот метод можно использовать для уточнения величины скорости звука

7) Акустооптические спектрофотометры с оптомеханическим узлом вращающейся призмы позволяют в процессе вакуумного напыления тонкопленочных оптических покрытий контролировать толщину слоев непосредственно по спектрам отражения и пропускания вращающихся деталей

Системами спектрофотометрического контроля на основе скоростных акустооптических спектрофотометров могут оснащаться вакуумные напылительные установки, в которых невозможно вести контроль по неподвижно закрепленному образцу – "свидетелю"

Основные результаты диссертации опубликованы в следующих работах

1 Виленский А В, Лысой Б Г, Чередниченко О Б Температурные зависимости скорости звука и двулучепреломления кристаллов молибдата кальция – Лазерные новости, 2001, 1-2, 50-53

2 Виленский А В, Лысой Б Г, Чередниченко О Б Компенсация температурного дрейфа длины волны настройки акустооптического спектрофотометра – Квантовая электроника, 2002, 32, №3, 232-234

- 3 Виленский А В , Лысой Б Г , Чередниченко О Б Система оптического контроля для вакуумных установок барабанного типа – "Труды семинара "Электровacuумная техника и технология" (за 1997/1998 гг.)", Москва, 1999, с 119
- 4 Виленский А В , Лысой Б Г Метод определения температурных зависимостей скорости звука и двулучепреломления в одноосных акустооптических кристаллах – XLV научная конференция МФТИ, Труды конференции, ч V, Москва-Долгопрудный, 2002, 70-71
- 5 Acousto-Optic Spectrophotometers Have 10⁵ Dynamic Range - Europhotonics, 2001, April/May, 56

Список цитируемой литературы

- 1 Магдич Л Н , Молчанов В Я , "Акустооптические устройства и их применение" -М Советское радио,1978, 112
- 2 Балакий В И , Парыгин В Н , Чирков Л Е "Физические основы акустооптики", - М , "Радио и связь", 1985, 264
- 3 Harris S.E., Wallace R W – J Opt. Soc Amer., 1969, 59(6), 744-747
4. I.C. Chang, - Opt Eng , 1977, 16(5), 455-460
- 5 Магдич Л Н – Изв АН СССР Сер физ , 1980, т 44, N8, 1683-1690
6. I.C Chang, - Opt Eng., 1981, 20(6), 824-829
- 7 Kusters J A , Wilson D A., Hammond D L – J Opt Soc Amer , 1974, v 64, N 4, 434-440.
- 8 Научно-технический отчет по НИР "Каватина" – Москва, 1991, номер госрегистрации Ф38806
- 9 Taylor D J , Hams S E , Nieh S T K , Hanch T W - Appl Phis Letts , 1971, v 19, N 8, 269-271
- 10 Антипов В В , Иванкин П Я , Лигун В Д , Соловьев А А , Степанов А В – ОМП, 1989, N 9, с 52-54
- 11 Ярив А , Юх П "Оптические волны в кристаллах", - М , "Мир", 1987, 343
- 12 Копылов С М , Лысой Б Г , Серегин С Л , Чередниченко О Б "Перестраиваемые лазеры на красителях и их применение" - М Радио и связь, 1991, с 90
- 13 W S Shipp, J Biggins, C W Wade – Rev Sci Instrum , 1976, 47, 5, 565-569

- 14 Копылов С М , Лысой Б Г , Михайлов Л К , Серегин С Л , Соловьев А А , Спицин Е М , Чередниченко О Б - Эл Пром , 1987, в 5, 52-54
- 15 "Прибор GSM 210 для измерения толщины оптической пленки" Пер с англ Фирменного материала Optical Film Thickness Measuring Instrument GSM 210 p-51-557101e, 4pp, Balzers AG, s a e t s e – М 1981, № Г-28681
- 16 P Bousquet, E Pelletier – Thin Solid Films, 77 (1981), 165-179
- 17 F J Van Milligen, B Bovard, M R Jacobson, J Mueller, R Potoff, R L Shoemaker, H A Macleod – Appl Optics, v 24, N 12, 1799-1802
- 18 Xue-Qun Hu, Yu-Ming Chen, Jin-Fa Tang - Appl Optics, v 28, N 14, 2886-2894.
- 19 Галишников И В , Копылов С М , Михайлов Л К , Соловьев А А , Чередниченко О Б - Вакуумная техника и технология, 1991, т 1, N 2, 62-66
- 20 Копылов С М , Лысой Б Г , Михайлов Л К , Соловьев А А , Чередниченко О Б - Электронная техника, сер 11, Лазерная техника и оптоэлектроника, 1993, N 1-2, 54-57
- 21 Копылов С М , Лысой Б Г , Михайлов Л К , Михайлова К В , Чередниченко О Б - Лазерные новости, 1995, 4, 3
- 22 Борн М , Вольф Э "Основы оптики" – М , "Наука", 1973, с 640-641
- 23 Europhotonics, 2001, April/May, 56

Из фондов Российской национальной библиотеки

РНБ Русский фонд

2004-4

1693

Из фондов Российской национальной библиотеки