



На правах рукописи

МАРЦЫНЮКОВ СЕРГЕЙ АЛЕКСАНДРОВИЧ

**ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ
НА ОСНОВЕ УПРАВЛЯЕМОГО ГАЗОВОГО РАЗРЯДА
ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ МАТЕРИАЛОВ
И ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТОЛЩИНЫ ПОКРЫТИЙ**

Специальность 05.09.10 – Электротехнология

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Санкт-Петербург – 2014

Работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина)»

Научный руководитель:

лауреат государственной премии Российской Федерации в области науки и техники, доктор технических наук, профессор **Лисенков Александр Аркадьевич**

Официальные оппоненты:

Карасев Михаил Валентинович, доктор технических наук, генеральный директор ЗАО НПФ «Инженерный и технологический сервис»

Пронин Владимир Петрович, кандидат физико-математических наук, доцент, ФГАОУ ВО «Российский государственный педагогический университет им. А. И. Герцена», руководитель центра коллективного пользования Атомно-силовой микроскопии и вакуумного напыления

Ведущая организация:

Закрытое акционерное общество «**Светлана-Рентген**», г. Санкт-Петербург

Защита состоится « 24 » декабря 2014 года в 16-00 на заседании диссертационного совета Д 212.229.20 при федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет», расположенном по адресу: 195251, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29, главный учебный корпус, аудитория 150.

С диссертацией можно ознакомиться в фундаментальной библиотеке ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет» и на сайте www.spbstu.ru

Автореферат разослан «___» _____ 2014 года.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 212.229.20



Иванов Дмитрий
Владимирович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. В настоящее время для теплофизического исследования материалов, а также определения толщины формируемых покрытий требуется разработка и создание электротехнологических комплексов, использующих источники излучения с регулируемой энергией воздействия на объект исследования. Лазеры на основе газового разряда, за счет высокого значения плотности потока энергии и высокой пространственной однородности, открывают уникальные технологические возможности в этом направлении. Из лазерных источников наиболее широко применяются отпаянные молекулярные CO_2 -лазеры. Уровень выходной мощности и характерная длина волны излучения CO_2 -лазеров (10,6 мкм) позволяют использовать их в металлургии, термических процессах различного назначения, в технологических процессах сварки, резки и т. д. Создаваемая зона нагрева может быть уменьшена путем фокусирования излучения.

Кроме этого лазер может работать в частотно-импульсном режиме. Для процессов селективной технологии необходимы импульсы длительностью 10^{-6} с с высокой интенсивностью излучения и высокой частотой повторения. Для процессов лазерной сварки, термоупрочнения и других, создаются импульсы излучения длительностью $10^{-4} \dots 10^{-2}$ с.

Активная среда CO_2 -лазеров представляет собой смесь газов, важными компонентами которой являются молекулы CO_2 и азота (N_2). Лазерный эффект обеспечивается молекулами диоксида углерода, а свойства молекул азота позволяют эффективно задействовать молекулы CO_2 в электрическом разряде, обеспечивающем накачку лазерной среды. При такой форме разряда объемные процессы ионизации и рекомбинации протекают в объеме положительного столба, а вынос тепла осуществляется потоком газа через зону разряда, не вовлекая в эти процессы стенки разрядной камеры. За счет внешнего воздействия на положительный столб тлеющего разряда удается изменить плотность заполнения разрядного промежутка и обеспечить модуляцию мощности излучения.

Генерация ИК-излучения происходит в результате стимулированных переходов между колебательно-вращательными уровнями молекул CO_2 , принадлежащими основному электронному состоянию.

Цель диссертационной работы – разработка системы электромагнитного управления излучением молекулярного CO_2 -лазера для создания электротехно-

логических комплексов по изучению теплофизических свойств материалов и определению толщины покрытий.

Реализация поставленной цели достигается решением следующих **теоретических и практических** задач:

- выявлением общих закономерностей влияния электромагнитного управления на условия существования в протяженных трубках газового разряда на основе тройной смеси $\text{CO}_2\text{-N}_2\text{-He}$;

- разработкой системы электромагнитного управления лазерного излучения и формирования импульсов молекулярного лазера заданной длительности;

- разработкой молекулярного технологического CO_2 -лазера с управляемым уровнем выходной мощности излучения от минимального до максимального значения;

- исследованием диаграмм направленности и условий генерации лазера;

- проведением анализа основных термических методов исследования веществ и методов измерения толщины покрытий;

- проведением анализа передачи мощности лазерного излучения в вещество с целью реализации теплофизических методов по исследованию физических свойств материалов и измерению толщины покрытий;

- разработкой электротехнологического комплекса с системой управления для изучения фазовых превращений в неорганических материалах;

- разработкой электротехнологического комплекса с системой управления для измерения толщины покрытий;

- разработкой метода для проверки достоверности полученных результатов по измерению толщины покрытий с использованием рентгеновского излучения;

- внедрением в промышленность и учебный процесс, разработанных технологий и специализированных электротехнологических комплексов.

Объект исследования – лазерная система на основе управляемого газового разряда.

Предмет исследования – эффекты и явления, возникающие при воздействии поперечного магнитного поля на газовый разряд в протяженных трубках и взаимодействие формируемого лазерного излучения с веществом.

При решении поставленных задач применялись следующие **методы исследования**: анализ и обобщение литературных данных по поведению газового разряда в магнитном поле и термическим методам исследования теплофизических свойств материалов и методам измерения толщины покрытий; математи-

ческий анализ и компьютерное моделирование физических процессов; экспериментальные исследования с использованием современного измерительного оборудования и т. д. Полученные результаты исследований, их согласованность и корреляция экспериментальных и расчетных данных подтверждают обоснованность и достоверность научных положений, выводов и рекомендаций работы.

Научная новизна работы заключается в следующих результатах:

1. На основе теоретических и экспериментальных исследований выявлены основные закономерности влияния электромагнитного управления на условия существования в протяженных трубках газового разряда на основе тройной смеси $\text{CO}_2\text{-N}_2\text{-He}$.

2. Впервые на основе выполненного комплекса теоретических и экспериментальных исследований показано, что с уменьшением давления тройной газовой смеси, соответствующей CO_2 -лазерам, и с ростом тока в катушке электромагнита (индукции магнитного поля в рабочем зазоре электромагнита) инерционность смещения газового разряда составляет порядка одной миллисекунды.

3. Разработана теоретическая модель и математическая программа расчета электромагнитной системы управления смещением газового разряда в протяженных трубках молекулярных лазеров для управления выходной мощностью излучения от минимального до максимального значения.

4. Разработаны и сформулированы рекомендации по исследованию теплофизических свойств материалов и по измерению толщины формируемых покрытий от 100 мкм.

Практическая значимость подтверждается тем, что в процессе работы:

1. Показана возможность применения электромагнитной модуляции для управления излучением отпаянного газоразрядного лазера в технологических установках вместо существующих способов, что позволит получить существенный технико-экономический эффект.

2. Для управления уровнем выходной мощности разработана система модуляции излучением молекулярного газоразрядного CO_2 -лазера. Система предоставляет возможность формирования импульсов с широким изменением параметров.

3. Разработан и создан электротехнологический комплекс для изучения фазовых превращений в неорганических материалах.

4. Разработан и создан электротехнологический комплекс для измерения толщины покрытий.

В результате проведенных экспериментальных и теоретических исследований на защиту выносятся следующие **научные положения**:

1. Инерционность взаимодействия индукции магнитного поля с плазмой газового разряда в протяженных трубках, сопровождающееся изменением концентрации электронов на оси разряда, определяется временем задержки ее смещения и временем разрушения возбужденных уровней.

2. Для газовой смеси молекулярного CO₂-лазера в интервале рабочих давлений и токов регулирование поперечного магнитного поля за счет управления длиной активной зоны резонатора позволяет изменять уровень выходной мощности излучения от минимального до максимального значения.

3. Внешний источник излучения с плотностью мощности на образце не менее $2 \cdot 10^7$ Вт/м² и управляемым характером излучения позволяет исследовать кинетику структурно-фазовых переходов неорганических материалов с температурой плавления свыше 1000 К, при этом верхний предел температуры исследований определяется температурой, создаваемой источником воздействия, а точность измерений зависит главным образом от значения внутренней энергии, полученной или выделенной веществом в форме теплоты при фазовом переходе.

4. Измерение температуры поверхности в зоне воздействия управляемого внешнего источника излучения с постоянной скоростью нагревания, с учетом распределения теплового потока в плоскости контакта двух твердых тел, теплофизических параметров объекта исследования и инерционности измерения температуры, позволяет определить толщину покрытия от 100 мкм и выше с точностью до 10 %.

При непосредственном участии автора все разработки были внедрены в учебный процесс, а также в производственные комплексы.

Апробация работы проводилась на ежегодных научно-технических конференциях профессорско-преподавательского состава СПбГЭТУ «ЛЭТИ» и следующих научно-технических конференциях:

- молодежная научная конференция СПбГЭТУ, 1999 г., Санкт-Петербург;
- 3-я и 4-я научные молодежные школы «Физико-технические аспекты современного электронного материаловедения», 2000 и 2001 гг., Санкт-Петербург;

- V и VI международные конференции АПЭП, 2000 и 2002 гг., Новосибирск;
- научно-технический семинар «Контроль герметичности», 2001, СПб;
- всероссийская научно-техническая конференция «Вакуумная техника и технологии», 2001, 2006 и 2014 гг., Санкт-Петербург;
- 58-ая научно-техническая конференция, посвященная Дню радио и 300-летию Санкт-Петербурга, 2003 г., Санкт-Петербург;
- 5-я международная конференция «Оборудование и технологии термической обработки металлов и сплавов», 2004 г., Харьков;
- 7-я и 11-я международная конференция «Пленки и покрытия», 2005 и 2011 гг., Санкт-Петербург.

По теме диссертации опубликовано 8 научных работ в изданиях рекомендуемых ВАК, 7 публикаций в других журналах и сборниках российских и международных научно-технических конференций, а также получено 3 патента на полезную модель.

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа состоит из 3 глав, введения и заключения. Содержит 130 страниц машинописного текста, 54 рисунка и 6 таблиц. Список литературы насчитывает 87 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность проводимых исследований, сформулированы основные цели работы, показаны ее научная новизна и практическая значимость полученных результатов, указаны методы исследования, приведены выносимые на защиту научные положения, даны сведения о структуре и содержании работы.

Первая глава посвящена вопросам изучения влияния электромагнитного управления на условия существования и свойства низкотемпературной плазмы, характерной для активных сред газоразрядных лазеров, состоящей из тройной смеси газов $\text{CO}_2\text{-N}_2\text{-He}$. Атомарный азот N_2 , имеющий одну колебательную моду ($\nu = 1$), используется для создания инверсии населенности на лазерных переходах в молекулярный газ CO_2 . Верхний лазерный уровень молекулы CO_2 (00^0_1) почти точно совпадает по энергии с колебательным уровнем основного электронного состояния молекулы N_2 ($\nu = 1$). Разница энергий этих уровней составляет $\Delta E = 18 \text{ см}^{-1}$.

Поведение газового разряда в магнитном поле исследовалось в макете, позволяющем изменять как состав и давление наполняемого газа, так и условия существования разряда, достигаемые за счет наложения магнитного поля. Исследования проводились в газовой среде чистого аргона (Ar) и смеси газов $\text{CO}_2\text{-N}_2\text{-He}$.

В макете располагались электрические зонды, позволяющие определять параметры плазмы по сечению разрядной трубки. Зондовые характеристики, при отсутствии ($B = 0$) и наличии ($B > 0$) магнитного поля, представлены на рис. 1. Параметры плазмы: концентрация заряженных частиц и электронная температура определялись в диапазоне рабочих токов и при различных давлениях.

Концентрация электронов в тройной газовой смеси $\text{CO}_2\text{-N}_2\text{-He}$ не зависит от диаметра разрядной трубки, а определяется плотностью тока разряда, и постоянна для каждого значения тока при изменении давления.

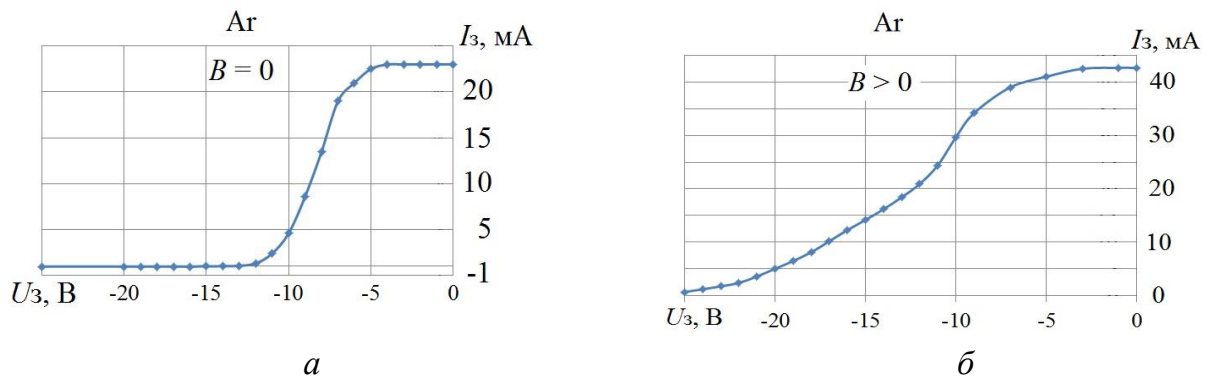


Рис. 1. Зондовые характеристики при отсутствии (а) и наличии (б) магнитного поля

При отсутствии управляющего магнитного поля газовый разряд занимает весь объем разрядного промежутка, а распределение частиц в разрядном промежутке определяется через функцию Бесселя нулевого порядка $n_e(r) = n_e(0)J_0[2.4(r/R)]$.

При возникновении поперечного магнитного поля разряд смещается к одной из стенок в зависимости от направления вектора магнитной индукции. Скорость перемещения плазмы определяется скоростью ухода частиц из положительного столба к стенке за счет амбиполярной диффузии (D_a) и наличия магнитного поля (B): $\mathcal{V} = [-(D_a/n)(\partial n/\partial x)] - \mu_e \mu_i EB$.

Воздействие поперечного магнитного поля на газовый разряд характеризуется проявляющейся инерционностью смещения частиц в плазме, которая оценивалась по сдвигу осциллограмм интенсивности спонтанного свечения ($I_{\text{св}}$) и по поступающему на зонд ионному току (I_i) относительно тока элек-

тромагнита (I_M). Управляющий импульс магнитной системы формировался электрической схемой питания. Изменялись форма, амплитуда, частота следования и длительность импульса.

Оценка инерционности смещения разряда производилась при различных токах электромагнита и в широком диапазоне рабочих давлений. Было получено, что время смещения разряда под действием поперечного магнитного поля имеет порядок мс и уменьшается как с ростом тока разряда ($I_{\text{раз}}$), так и с уменьшением давления газовой среды (p).

Таким образом, с увеличением тока электромагнита, а соответственно и индукции магнитного поля, инерционность перемещения разряда стремится к постоянной величине и составляет порядка 1 мс. Инерционность взаимодействия индукции магнитного поля с плазмой газового разряда в протяженных трубках, когда $L \gg d$, сопровождающаяся изменением концентрации электронов на оси разряда, определяется временем задержки ее смещения и временем разрушения возбужденных метастабильных уровней.

Во второй главе, применительно для газоразрядного молекулярного CO_2 -лазера типа ЛГН-703 (длина активной среды 110 см, диаметр разрядной трубки 1.5 см, уровень выходной мощности до 20 Вт), разрабатывалась система электромагнитного управления излучением. Сущность этого метода заключается в изменении зоны взаимодействия активной среды лазера с полем резонатора под действием поперечного магнитного поля, тем самым добиваясь изменения уровня выходной мощности излучения.

За основную характеристику в этом случае удобно использовать не выходную мощность излучения лазера ($P_{\text{ВЫХ}}$), а коэффициент полезного действия (η), показывающий эффективность осуществления расхода энергии накачки. В этом случае максимум η достигается тогда, когда с единицы длины активного элемента снимается максимум удельной мощности: $d(P_{\text{ВЫХ}} / L_{\text{АС}}) / dL = 0$. Оптимальная длина активной среды определяется с учетом ненасыщенного показателя усиления (G_0), показателей отражения выходного зеркала (R) и нерезонансных потерь (β): $L = 0.5 \ln R / (\beta - \sqrt{G_0 \beta})$.

Максимальная удельная мощность, снимаемая на этой длине,

$$(P_{\text{ВЫХ}} / L_{\text{АС}})_{\text{max}} = [(1 - R) / (1 + R)] [(\sqrt{G_0 \beta} - G_0 - 0.5 \ln R) / 0.5 \ln R],$$

Наложение магнитного поля приводит к изменению параметров плазмы и изменению конфигурации газового разряда.

При расчете (η) лазера учитываются КПД: накачки ($\eta_{\text{нак}}$), затраченный на возбуждение активной среды; оптического резонатора ($\eta_{\text{опт}}$); электрический ($\eta_{\text{эл}}$); геометрический ($\eta_{\text{геом}}$) и электронный (η_e).

Специфической особенностью молекулярного CO_2 -лазера является значительная зависимость скоростей релаксации и скоростей обмена между лазерными уровнями от электронной температуры (T_e), так как эти процессы определяются в основном молекулярно-молекулярными столкновениями и диффузией молекул к стенкам.

Электронная температура (T_e), как и концентрация заряженных частиц в плазме ($n_e = f(T_e)$) определяет электронный КПД (η_e).

Поскольку температура зависит от величины мощности, выделяемой в разряде, а значит от тока разряда, то для лазеров с узкой капиллярной трубкой (He-Ne-лазер), электронный КПД в рабочем диапазоне температур имеет сильную зависимость, для CO_2 -лазеров – эта зависимость слабая. Следовательно, для молекулярного CO_2 -лазера этот фактор можно не учитывать.

В этом случае основное влияние оказывает расположение газового разряда относительно оси, определяющее КПД оптического резонатора.

Смещение разряда в зависимости от величины внешнего магнитного поля сопровождается изменением концентрации заряженных частиц и изменением эффективной скоростью релаксации ($\gamma_{\text{эфф}}$), определяемой скоростями распада верхнего и нижнего лазерного уровней (γ_a, γ_b), и возбужденного уровня азота (γ_1), а также скоростями резонансного колебательного обмена.

Поэтому мощность излучения CO_2 -лазера $P = \tau(0.5\hbar\omega n_0 c)[\chi - 1]$, где τ – коэффициент пропускания выходного зеркала, χ – относительное возбуждение лазера, будет определяться длиной активной среды (L) и параметром насыщения $n_0 = (\gamma_a\gamma_b)/(\gamma_a + \gamma_b)c\sigma_0$, т. е. плотностью фотонов в разрядной среде, где γ_a, γ_b – вероятность распада уровней (a) и (b) за счет спонтанного излучения на все нижележащие уровни; $\sigma_0 = \pi^2 c^2 A_{ab} a_\omega / \omega^2$ – эффективное сечение индуцированного излучения или поглощения; A_{ab} – коэффициент Эйнштейна; a_ω – характеризует форму спектральной линии излучения или поглощения; $\hbar\omega/2\pi$ – энергия фотона.

Основной задачей, при изучении воздействия внешнего магнитного поля, на условия существования газового разряда, является определение заданной

картины распределения индукции магнитного поля в зоне размещения разрядной трубки. Для расчета распределения индукции магнитного поля в рабочем зазоре использовался программный пакет, предназначенный для построения сценарных моделей решения дифференциальных уравнений методом конечных элементов. Первым этапом моделирования явилась оценка однородности магнитного поля в рабочем зазоре при использовании от одного до семи электромагнитов (количество связано с размерами активного элемента лазера). На рис. 2 приведены графики распределения индукции магнитного поля B вдоль разрядной трубки на оси системы в зависимости от положения относительно ее центра x для системы из одного (*a*), трех (*б*) и семи (*в*) электромагнитов соответственно.

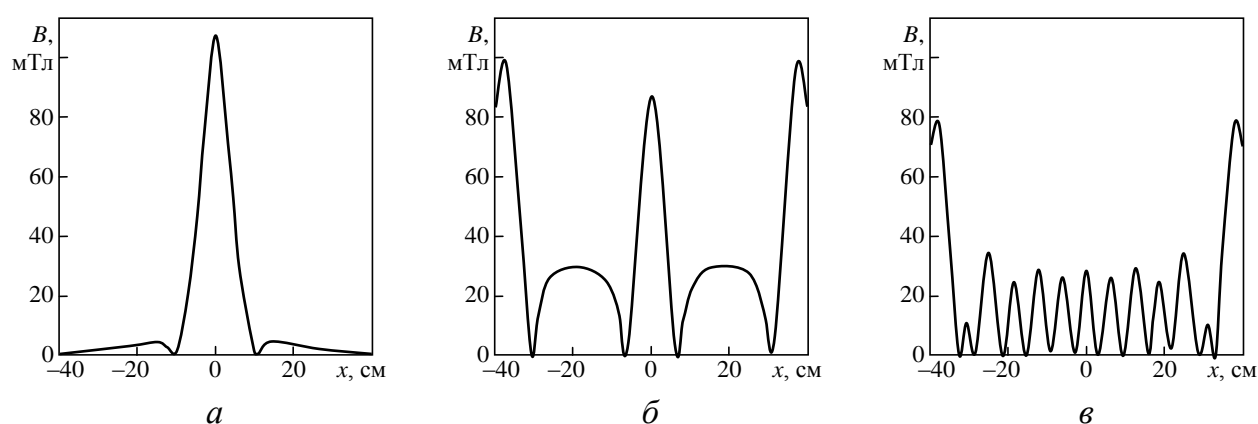


Рис. 2. Распределение индукции магнитного поля вдоль разрядной трубки на оси системы для системы из одного (*a*), трех (*б*) и семи (*в*) электромагнитов

Для устранения неоднородности распределения индукции магнитного поля был использован «выравниватель». В этом случае неравномерность вдоль лазерной трубки не превышала 3 % (рис. 3, распределение индукции магнитного поля вдоль трубки лазера для системы из «выравнивателя» и одного (*a*), трех (*б*) и семи (*в*) электромагнитов соответственно).

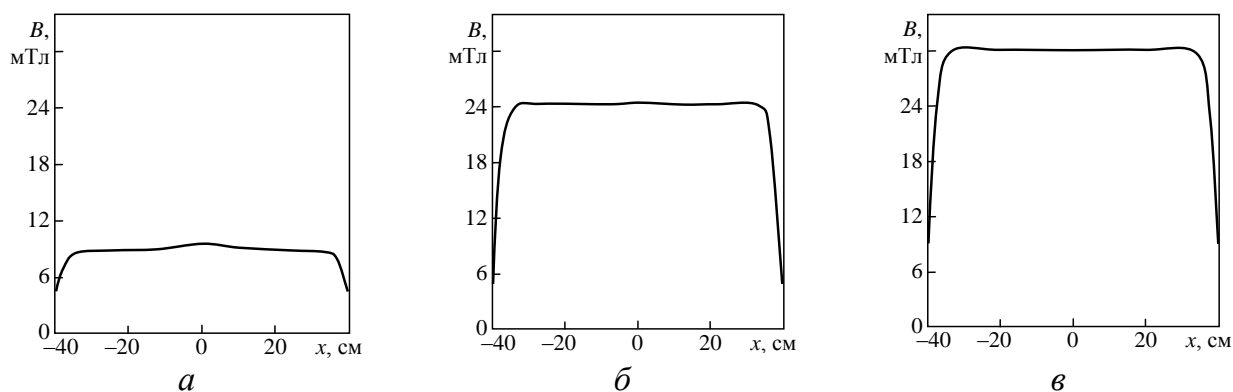


Рис. 3. Распределение индукции магнитного поля вдоль разрядной трубки на оси системы с использованием выравнивающего устройства

Концентратор позволяет выровнять магнитное поле даже при использовании одного электромагнита (рис. 3, *a*). Однако, по мере увеличения числа маг-

нитов происходит дополнительное выравнивание распределения поля вдоль оси системы, а также увеличение значения магнитной индукции.

По результатам моделирования был разработан и собран макет электромагнитной системы управления углекислотным лазером (рис. 4). Данная конструкция электромагнитной модуляции излучения CO_2 -лазера защищена двумя патентами на полезную модель [4, 5].

Измерения магнитной индукции проводились милитесламетром МПУ-1. На рис. 5 приведено распределение магнитной индукции вдоль трубки лазера при различных токах электромагнита, при этом разброс значений магнитной индукции уменьшается по мере роста тока.

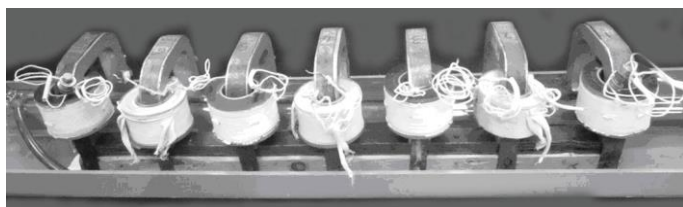


Рис. 4. Макет электромагнитной системы управления углекислотным лазером

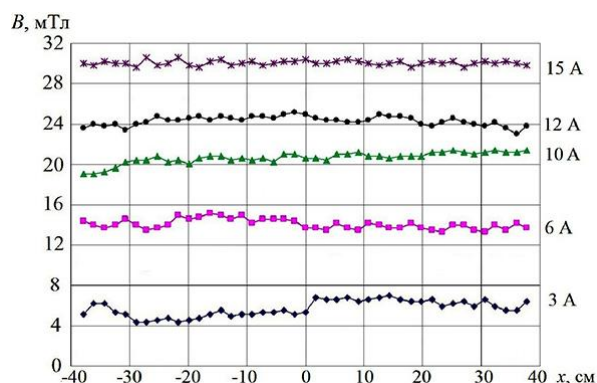


Рис. 5. Распределение магнитной индукции вдоль трубки лазера при различных токах электромагнита

Максимальная индукция магнитного поля достигается при использовании семи электромагнитов (рис. 6). Таким образом, на основе проведенных математического анализа и результатов экспериментальных исследований для газовой смеси в интервале рабочих давлений и токов регулирование поперечного магнитного поля позволяет изменять уровень выходной мощности излучения молекулярного CO_2 -лазера от минимального до максимального значения (рис. 7).

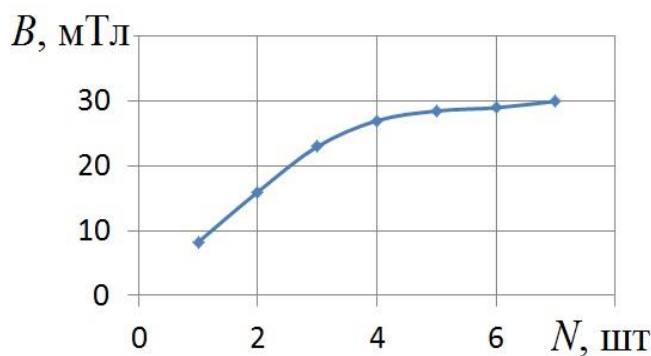


Рис. 6. Индукция магнитного поля в зависимости от количества электромагнитов

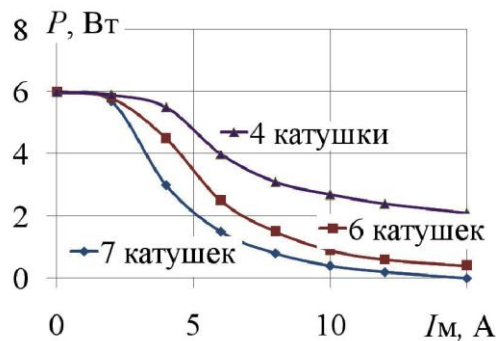


Рис. 7. Изменение уровня выходной мощности излучения молекулярного CO_2 -лазера от параметров электромагнита

При работе CO₂-лазера, управляемого поперечным магнитным полем в динамическом режиме, временное отставание выходной мощности излучения лазера относительно входного управляющего сигнала (тока катушки управления) зависит от инерционности нарастания индукции магнитного поля, и конечного времени смещения заряженных частиц.

В третьей главе представлены технологические возможности использования модернизированного CO₂-лазера с магнитной системой управления выходной мощностью излучения в электротехнологических комплексах для изучения кинетики структурно-фазовых переходов неорганических материалов. Лазерный нагрев микрообразцов объемом (V) и плотностью (ρ) определяется мощностью лазерного излучения ($P_{\text{л}}$), расходуемой на нагрев образца ($P_{\text{н}} = c_{\text{уд}}\rho V(dT/dt)$), фазовые превращения ($P_{\text{ф}}$) и отводимой за счет теплоотвода ($P_{\text{т}}$): $\alpha_{\text{п}}P_{\text{л}} = P_{\text{н}} + P_{\text{т}} + P_{\text{ф}}$, $(1 - \beta)P_{\text{л}} = c_{\text{уд}}\rho V(dT/dt) + P_{\text{т}} + P_{\text{ф}}$, где $\alpha_{\text{п}}$ и β – коэффициенты поглощения и отражения образца; $c_{\text{уд}}$ – удельная теплоемкость образца; dT/dt – изменение температуры образца во времени.

Мощность $P_{\text{т}}$ определяется с учетом мощностей: отводимой конвекцией ($P_{\text{к}} = \lambda S(T - T_0)$); теряемой за счет излучения ($P_{\text{изл}} = \varepsilon \sigma S(T^4 - T_0^4)$) и отводимой за счет теплопроводности держателя ($P_{\text{д}}$). При условии выбора оптимальной конструкции держателя, считаем, что $P_{\text{д}} \ll P_{\text{к}} + P_{\text{изл}}$. Тогда $P_{\text{т}} \approx P_{\text{к}} + P_{\text{изл}}$.

Для определения максимальной мощности, необходимой для нагрева образца, рассматривался установившийся режим, т. е. $dT/dt = 0$, а $P_{\text{н}} = 0$. Следовательно, мощность лазера будет определяться: $P_{\text{л}} = (P_{\text{к}} + P_{\text{изл}})/(1 - \beta)$.

При расчете было получено, что при низких температурах преобладает конвекция, а при высоких – излучение. Скорость нагрева образца лазерным излучением определяется из соотношения:

$$\frac{dT}{dt} = \frac{\alpha_{\text{п}}P_{\text{л}} - \lambda S(T - T_0) - \varepsilon \sigma S(T^4 - T_0^4)}{c_{\text{уд}}\rho V}.$$

Расчет температур производился с помощью математического пакета MathCAD.

Динамика разогрева образца Fe₃O₄ при воздействии лазерного излучения представлена на рис. 8.

Таким образом показано, что при использовании внешнего источника излучения с плотностью мощности на образце не менее 2×10^7 Вт/см² и управляемым характером излучения позволяет исследовать кинетику структурно-фазовых переходов неорганических материалов с температурой плавления выше 1000 К, при этом верхний предел температуры исследований определяется температурой, создаваемой источником воздействия, а точность измерений зависит главным образом от значения внутренней энергии, полученной или выделенной веществом в форме теплоты при фазовом переходе.

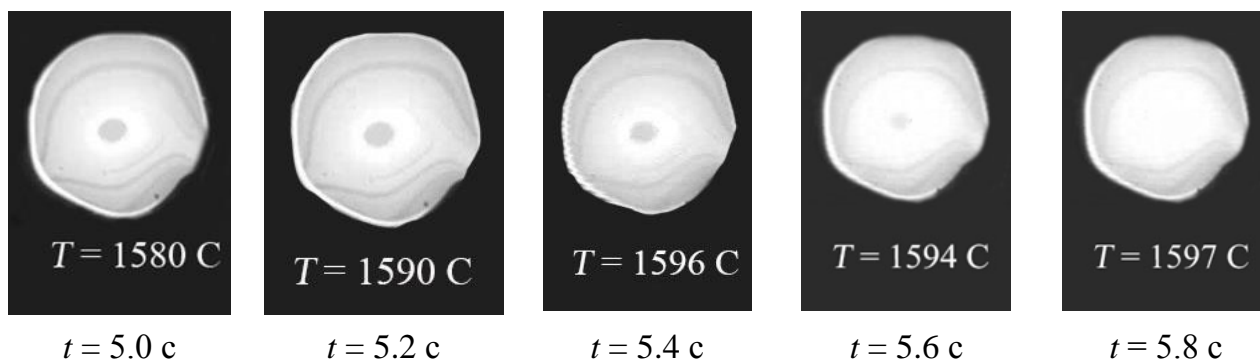


Рис. 8. Характер изменения образца при его разогреве

Принципиальная схема электротехнологического комплекса для измерения толщины покрытия включает в себя СО₂-лазер с электромагнитным управлением, пирометр и регистрирующее устройство. Особенностью схемы является использование датчика для измерения температуры. В этом случае искомая толщина покрытия будет определяться через температурный отклик исследуемого образца на тепловое воздействие. Поэтому необходимо учитывать инерционность прибора и время теплового воздействия.

При взаимодействии лазерного излучения с поверхностью возможно появление достаточно плотных паров вещества, в которых может развиваться пробой, сопровождаемый образованием плазмы или другими явлениями, связанными с испарением. Если плотность потока превышает некоторое пороговое значение, то процесс испарения вещества протекает лавинообразно, и у поверхности почти мгновенно появляется слой плотного пара, глубина которого в первом приближении того же порядка, что и диаметр пятна облучения. Поэтому в процессе разогрева поверхности необходимо использовать импульсное периодическое воздействие лазерного излучения.

Нагрев производится лазерным пучком радиусом r . Падающий на поверхность объекта луч частично отражается и частично поглощается, проникая на определенную глубину внутрь образца. При малых временах нагрева t харак-

терная глубина прогрева покрытия $x = \sqrt{at}$, где a – температуропроводность, гораздо меньше, чем толщина покрытия δ . Таким образом, в первоначальный момент времени нагрев покрытия может быть рассмотрен как нагрев монолитного образца с неограниченной толщиной, а температура в центре пучка ($z = 0$, $r = 0$) может быть определена из выражения :

$$T_{11}(0,0,t) = \alpha_{\Pi} P_{\Pi} r (\lambda \sqrt{\pi})^{-1} \operatorname{arctg} \left[\sqrt{4at / r^2} \right],$$

где P_{Π} – плотность падающей мощности; λ – коэффициент теплопроводности. По мере воздействия глубина прогрева становится соизмеримой с толщиной покрытия (δ):

$$T_{12}(0,0,t) = \frac{P_{\Pi} r^2}{\delta} \frac{\alpha}{4\lambda} \ln[1 + (4at / r^2)],$$

Для определения перехода $T_{11}(0,0,t) \rightarrow T_{12}(0,0,t)$ рассматривается изменение скорости роста температуры во времени:

$$\frac{dT_{11}}{dt} = \frac{\alpha \sqrt{a}}{\lambda \sqrt{\pi}} \cdot \frac{r^2}{r^2 + 4at} \cdot \frac{P_s}{\sqrt{t}}, \quad \frac{dT_{12}}{dt} = \frac{P_{\Pi}}{\delta} \frac{\alpha a}{\lambda} \cdot \frac{r^2}{r^2 + 4at}.$$

Решение поставленной задачи осуществлялось с использованием вспомогательной функции: $F_{i=1,2} = \lambda(\alpha P_{\Pi} \sqrt{a})^{-1} [1 + (4at / r^2)] dT_{i=1,2} / dt$, дающей следующие решения: $F_1 = 1 / \sqrt{\pi t}$, $F_2 = \sqrt{a} / \delta$, позволяющие определить толщину покрытия δ .

Одновременно с началом нагрева поверхности – малоинерционный приемник излучения фиксирует значения непрерывно растущей температуры в точке воздействия. С помощью ЭВМ в реальном масштабе времени берется производная (dT/dt) и рассчитывается значение вспомогательной функции F_i . В момент времени t_1 , когда значения $F_1 = F_2$, рассчитывается как $\delta = \sqrt{a} / F_1$. Увеличение толщины покрытия δ приводит к уменьшению F_2 , но время, по истечению которого тепловой поток достигает теплоизолирующей подложки, при этом растет. По достижении границы разделения сред скорость нарастания температуры становится больше, чем это было бы в исходном образце.

Минимальная толщина покрытия, определяется параметрами покрытия и свойствами приемника инфракрасного излучения, имеющего определенное

время срабатывания t_{\min} : $\delta_{\min} = \sqrt{a \pi t_{\min}}$. Необходимая мощность лазера находится из выражения: $P_{\text{л}} = (T_{\text{max}} \lambda \sqrt{\pi}) \cdot [\alpha r \arctg(\sqrt{4at/r^2})]^{-1}$.

Контроль толщины измеряемых покрытий осуществлялся методом шлифов и разработанным методом с использованием рентгеновского излучения. Расхождения не превышали 15 %.

Таким образом, измерение температуры поверхности в зоне воздействия управляемого внешнего источника излучения с постоянной скоростью нагревания, с учетом распределения теплового потока в плоскости контакта двух твердых тел, теплофизических параметров объекта исследования и инерционности измерения температуры, позволяет определить толщину покрытия от 100 мкм и выше с точностью до 10 %.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

В процессе работы были решены следующие теоретические и практические задачи:

- выявлены общие закономерности влияния электромагнитного управления на условия существования газового разряда в протяженных трубках на основе тройной смеси $\text{CO}_2\text{-N}_2\text{-He}$;
- разработана система электромагнитного управления лазерным излучением и формирования импульсов заданной длительности;
- разработан молекулярный технологический CO_2 -лазер с управляемым уровнем выходной мощности излучения от минимального до максимального значения;
- исследованы диаграммы направленности и условия генерации лазерного излучения;
- проведен анализ основных термических методов исследования веществ и методов измерения толщины покрытий;
- проведен анализ передачи мощности лазерного излучения в вещество;
- разработан электротехнологический комплекс для изучения фазовых превращений в неорганических материалах;
- разработан электротехнологический комплекс для измерения толщины покрытий;
- разработан метод проверки достоверности полученных результатов по измерению толщины покрытий с использованием рентгеновского излучения;

– в учебный процесс внедрены как методы изучения газового разряда, так и специализированные электротехнологические комплексы.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ

Статьи в журналах перечня ВАК

1. Демидович М. С., Лисенков А. А., Марцынюков С. А., Черниговский В. В. Электромагнитное управление мощностью излучения лазера на углекислом газе // Вакуумная техника и технология, 2014. Т.23. №1. С.167–169.
2. Демидович М. С., Лисенков А. А., Марцынюков С. А., Черниговский В. В. Тепловой метод измерения толщины покрытия // Вакуумная техника и технология, 2014. Т.23. №1. С.170–171.
3. Марцынюков С. А., Кострин Д. К. Моделирование, разработка и исследование электромагнитной системы для управления мощностью лазера на углекислом газе // Известия вузов России. Радиоэлектроника. 2014. Вып. 1. С. 50–54.
4. Марцынюков С. А. Исследование влияния электромагнитного управления на условия существования разряда в лазере на углекислом газе // Известия СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2013. № 4. С. 13–17.
5. Марцынюков С. А., Черниговский В. В. Измерение толщины металлических покрытий оптическим способом // Известия СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2012. № 8. С. 25–29.
6. Лисенков А. А., Марцынюков С. А., Сабуров И. В., Черниговский В. В. Измерение толщины покрытий, формируемых из металлической плазмы вакуумно-дугового разряда // Известия СПбГЭТУ «ЛЭТИ» серия «Физика твердого тела и электроника». 2006. Вып. 2. С. 48–54.
7. Марцынюков С. А., Черниговский В. В. Исследование инерционности перемещения плазмы под действием поперечного магнитного поля // Известия СПбГЭТУ «ЛЭТИ» серия «Физика твердого тела и электроника». 2004. Вып. 2. С. 27–31
8. Марцынюков С. А., Черниговский В. В. Исследование возможности измерения толщины защитных покрытий с помощью радиационной фотометрии // Вакуумная техника и технология. 2001. Т. 11, № 4. С. 171–173.

Наличие авторских свидетельств или патентов на изобретения

1. Патент на полезную модель № 125780, Российская федерация, МПК: H01S3/10 (2006.01). Газоразрядный CO₂ лазер / С. А. Марцынюков, В. В. Черниговский, опубл. 2013. Б. И. № 07.

2. Патент на полезную модель № 126206, Российская федерация, МПК: H01S3/10 (2006.01). Газоразрядный CO₂ лазер / С. А. Марцынюков, В. В. Черниговский, опубли. 2013. Б. И. № 08.

3. Свидетельство на полезную модель № 20968, Российская федерация, МПК: G01N25/02, 21/39. Установка для визуально-термического исследования фазовых превращений в неорганических материалах / В. И. Альмяшев, В. В. Гусаров, С. А. Марцынюков, В. В. Черниговский; опубли. 2001. Б. И. № 34.

Основные публикации в других журналах и сборниках

1. Марцынюков С. А., Черниговский В. В. Измерение толщины металлических покрытий рентгеновским дифрактометром // Петербургский журнал электроники. 2008. № 2–3. С. 105–108

2. Марцынюков С. А. Неразрушающие методы контроля толщины оптически непрозрачных покрытий // 58-ая научно-техническая конференция, посвященная Дню радио и 300-летию С.-Петербурга. Материалы конференции. 2003. С. 164–165.

3. Марцынюков С. А. Применение мягкого рентгеновского излучения для измерения толщины покрытий // 7-я Международная конференция «Пленки и покрытия – 2005». Труды конференции. С.Пб, 2005. С. 236–239

4. Марцынюков С. А. Комплекс для измерения толщины металлических покрытий оптическим способом // 11-я Международная конференция «Пленки и покрытия – 2013». Труды конференции. С.Пб, 2013. С. 215–217.

5. Лисенков А. А., Марцынюков С. А., Черниговский В. В. Контроль толщины функциональных покрытий машиностроения, формируемых из металлической плазмы вакуумно-дугового разряда // Оборудование и технологии термической обработки металлов и сплавов. Сб. докл. 5 межд. конф. Труды конференции. Харьков, 2004. С. 48–50.

6. Марцынюков С. А., Черниговский В. В. Анализ тепловых процессов при измерении толщины покрытий нагреваемых лазерным излучением Труды VI Международной научно-технической конференции «АПЭП – 2002», Новосибирск, 2002. Т. 2. С. 109–110.

7. Марцынюков С. А., Черниговский В. В. Разработка измерительной установки для исследования материалов и структур электронной техники путем нагрева их лазерным излучением Труды V Международной конференции «АПЭП – 2000». Новосибирск, 2000. Т. 2. С.147–149.