

Ньейн Чан

ИССЛЕДОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА ПЛЕНОЧНОГО
ХОЛОДНОГО КАТОДА ГЕЛИЙ-НЕОНОВОГО ЛАЗЕРА

Специальность 01.04.07 – физика конденсированного состояния

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук



Работа выполнена в Калужском филиале федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Московский государственный технический университет имени Н.Э.Баумана»

Научный руководитель: **Мазин Анатолий Викторович**
доктор технических наук, доцент

Официальные оппоненты: **Квашенников Владислав Валентинович**
доктор технических наук, с.н.с
ОАО «Калужский научно-исследовательский институт телемеханических устройств»,
технический отдел, руководитель группы

198

Тай Александр Викторович
кандидат технических наук
ЗАО «Научно-технический центр эксплуатации
и ресурса авиационной техники», ведущий инженер

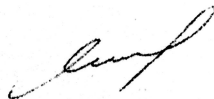
Ведущая организация: Открытое акционерное общество «Научно-производственное предприятие» «Калужский приборостроительный завод «ТАЙФУН»»

Защита состоится « 13 » мая 2015 г. в 14 часов 30 минут на заседании диссертационного совета Д212.141.17, созданного на базе ФГБОУ ВПО «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана» по адресу: 248600, г. Калуга, ул. Баженова, 2, МГТУ имени Н.Э. Баумана, Калужский филиал.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВПО «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана» и на сайтах www.bmstu.ru, www.bmstu-kaluga.ru.

Автореферат разослан « 11 » марта 2015 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
канд. тех. наук, доцент



С.А.Лоскутов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы. Многолетние научные и прикладные исследования, осуществленные за период существования газоразрядных приборов, в том числе гелий-неоновых лазеров, позволили создать на их основе множество типов устройств и систем, используемых для решения задач в различных сферах народного хозяйства.

В течение этого времени выяснилась и основная область применения малогабаритных гелий-неоновых лазеров – прецизионные кольцевые датчики безынерционных навигационных систем и это несмотря на то, что разработаны и используются системы на других датчиках. При этом основные требования, предъявляемые к лазерам указанного типа – долговечность, стабильность и высокая надежность и как уже было отмечено, основным конструктивным элементом, обуславливающим требуемые их параметры, является холодный катод. В соответствии с этим, решение вопросов усовершенствования конструктивных и улучшения эксплуатационных параметров катодов является актуальной задачей дальнейшего развития лазерной навигационной техники, поскольку именно лазерные гироскопы в настоящее время востребованы и широко применяются в навигации всех известных движущихся объектов (ракет, самолет, кораблей, подводных лодок и т.п).

Современные требования, предъявляемые к моноблочным лазерным датчикам, работающим на использовании тлеющего разряда в гелий-неоновой смеси, позволяют сформулировать и основные параметры к холодным катодам:

- минимальная долговечность в составе моноблочных лазеров на уровне 30000 - 50000 часов;
- плотность тока на поверхности катода до $0,5 \text{ mA/cm}^2$;
- малые массогабаритные характеристики и максимальная устойчивость к динамическим внешним воздействиям.

С целью обеспечения перечисленных характеристик **предложены и решены следующие задачи.**

По прежнему основным фактором, ограничивающим долговечность катода, является распыление его эмиссионной поверхности под действием ионной бомбардировки. Важное следствие этого процесса – «жестчение» газа, снижение концентрации атомов гелия и неона в разрядном объеме из-за «замуровывания» распыленными с поверхности катода частицами на стенках разрядного капилляра и балластного объема. Анализ источников касающихся уже созданных и применяемых ныне катодов, показывает, что возможны два пути решения задачи устранения эффекта «жестчения» - снижение коэффициента распыления поверхности и минимизация диффузного распространения распыленных частиц в область разрядного капилляра.

Поскольку снижение коэффициента распыления связано с величиной электрического поля в области катодного падения, напрямую зависящей от

коэффициента ионно-электронной эмиссии, то первой задачей работы было нахождение оптимальных режимов формирования эмиссионного оксидного слоя катода.

Для минимизации количества распыленных частиц, попадающих в область разрядного капилляра и через его объем на зеркала, поверхность катода из компактного материала выполняется в виде специального микрорельефа. Поэтому вторая задача работы - разработка способа создания микрорельефной поверхности в пленочном холодном катоде.

Третья задача - изучение вопроса о долговечности катода, обусловленной наличием тепловых градиентов в областях катодного падения, разрядных капилляров и балластных объемах моноблока, приводящих к дифференциации концентраций газового наполнения в соответствующих объемах и, как следствие, к изменению электрического поля в катодном падении.

Основные научные цели работы:

Для создания принципиально нового холодного катода для малогабаритного гелий-неонового лазерного датчика необходимы:

- проведение исследований закономерностей формирования эмиссионной поверхности пленочного холодного катода;
- изыскание и разработка способа формирования микрорельефной поверхности пленочного катода;
- разработка аналитического способа определения условий эксплуатации пленочного холодного катода с учетом тепловых режимов его работы.

Научная новизна полученных результатов:

- разработан способ создания микрорельефной поверхности пленочного холодного катода;
- рассчитаны и экспериментально исследованы тепловые поля в моноблочном лазере в зависимости от конструкции и типа применяемого катода;
- разработана оптимальная последовательность вакуумно-термических и плазменных операций очистки подложки и формирования оксидного слоя катода.

Практическая ценность работы

Проведенные экспериментальные исследования ряда физических процессов позволили усовершенствовать конструкцию пленочного холодного катода гелий-неонового лазера и способ формирования эмиссионного слоя на его рабочей поверхности.

При этом получены:

- увеличенная на 20-25% долговечность лазера за счет создания специального микрорельефа эмитирующей поверхности катода;

— повышена точность прогнозирования ресурса лазера вследствие учета изменения концентрации частиц газа в областях катодного падения потенциала, положительного столба разряда и балластном объеме лазера;

— способ изготовления пленочного холодного катода с заданным микрорельефом эмиссионной поверхности.

Достоверность результатов работы обусловлена корректной постановкой задачи, применением математически обоснованных методов ее решения, соответствием результатов известным экспериментальным данным.

Основные положения и результаты, выносимые на защиту

1. Разработанный способ получения микрорельефа эмиссионной поверхности и его практическая реализация.
2. Оптимальные условия формирования эмиссионных параметров катода.
3. Способ повышения точности прогнозирования ресурса лазера вследствие учета изменения концентрации частиц газа в областях катодного падения потенциала, положительного столба разряда и балластном объеме лазера.

Личный вклад автора состоит в проведении расчетов температурных режимов работы катода, разработке оригинальных способов изготовления микрорельефной поверхности, постановке экспериментальных работ, получении результатов теоретических и экспериментальных исследований с последующей их обработкой и анализом.

Апробация работы. Основные результаты настоящей работы докладывались и обсуждались на Всероссийской научно-технической конференции «Наукоемкие технологии в приборо- и машиностроении и развитие инновационной деятельности в вузе» (МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, 2012г, 2013г, 2014г), и на 5-ой Всероссийской межвузовской научно-практической конференции «Актуальные проблемы информатизации в науке, образовании и экономике» (МИЭТ, Москва, 2012г.).

Публикации. По теме диссертации имеется двенадцать публикаций, из которых три публикации в изданиях, входящих в перечень ВАК РФ.

Структура и объём работы

Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, выводов, заключения, списка литературы и приложения. Ее общий объем составляет 103 страницы, включая 28 рисунков, 4 таблицы и список литературы из 85 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обосновывается актуальность темы диссертации, ее практическое значение, формулируются основные цели исследования и основные положения, выносимые на защиту.

Первая глава диссертации посвящена анализу литературных данных и результатов современных исследований долговечности пленочных холодных

катодов гелий-неоновых лазеров. Проведено исследование основных характеристик катодов и способов их достижения, показано, что в подавляющем большинстве случаев эти исследования проводились для холодных катодов из компактных материалов.

При работе лазера с катода могут выделяться загрязняющие молекулярные газы. Потенциал ионизации молекулярных газов составляет 13-14эВ (потенциал ионизации He – 24,5эВ, Ne- 21,5эВ). Поэтому их наличие в положительном столбе приводит к обеднению «хвоста» функции распределения электронов по энергиям. Падает и общая концентрация электронов и их средняя энергия. Это приводит к снижению скорости заселения метастабильных уровней He и, следовательно, уменьшается мощность излучения.

Ресурс работы холодного катода определяется как время, в течение которого поддерживается генерации с заданным уровнем мощности при заданных параметрах источника питания. В результате сделанного анализа процессов можно заключить, что снижение уровня мощности может происходить при: уменьшении как парциального давления рабочего газа (Ne), так и общего давления гелий-неонового наполнения; снижении величины эмиссии электронов, приводящем к невозможности поддержания необходимого уровня инверсной населенности при заданном напряжении горения разряда; присутствия в разряде «гасящих» примесей (H_2 , O_2 и др.). Первые два фактора обусловлены распылением рабочей поверхности катода, другие два фактора связаны с изменением состава и структуры рабочей поверхности катода и выделением молекулярных газов с катода, соответственно.

Подводя итог сказанному, сформулированы основные требования к катодному материалу:

- 1) Максимальная устойчивость к распылению, характеризующаяся минимальным коэффициентом распыления Y ;
- 2) Максимальный коэффициент ионно-электронной эмиссии γ , обеспечивающий минимальные энергии распыляющих частиц;
- 3) Материал подложки должен обеспечивать минимальное поглощение и последующее выделение молекулярных газов.

Долговечностью работы холодного катода в составе прибора считают промежуток времени, в течение которого осуществляется генерации с заданным уровнем мощности при заданных параметрах источника питания. Снижение уровня мощности может происходить при уменьшении давления газовой смеси, снижении эмиссии электронов, приводящем к невозможности поддержания необходимого уровня инверсной населенности при заданном напряжении горения разряда, «гашении» излучающих уровней молекулярными примесными газами. Следовательно, долговечность гелий-неонового лазера в основном зависит от вышеперечисленных основных характеристик холодного катода. Вешний вид некоторых холодных катодов приведен на Рис. 1.



Рис.1. Вешний вид
некоторых холодных катодов

Вторая глава диссертации посвящена рассмотрению и анализу методов исследования основных характеристик холодных катодов. Исследование процесса очистки подложки холодных при тепловом воздействии эффективно проводится масс-спектрометрическим методом с использованием масс-спектрометра МХ7304.

Масс-спектрометр через фланец с вакуумным уплотнением соединяется с вакуумной камерой, в которой размещен держатель образца с нагревателем и термопарой для контроля температуры. Исследуемый образец закрепляется на держателе, после чего камера откачивается до давления, не превышающего $5 \cdot 10^{-6}$ Па. При комнатной температуре снимается масс-спектр остаточных газов в камере. Далее образец прогревается с помощью нагревателя и снимаются масс-спектры летучих частиц и соединений, выделяемых образцом в процессе нагрева.

Катод газоразрядного лазера работает в жестких условиях ионной бомбардировки, разрушающей эмиссионный слой, причем его долговечность зависит от параметров окисла, являющегося собственно источником электронов. При этом энергии распыляющих ионов будут минимальными в том случае, когда коэффициент ионно-электронной эмиссии γ , обеспечиваемый качеством оксидного слоя, максимален, а, соответственно, катодное падение потенциала $U_{\text{кп}}$ минимально. Для выбора режима окисления, обеспечивающего такую толщину пленки и ее качество, при которых γ максимален, а $U_{\text{кп}}$ минимально, использовался прибор, представляющий собой трехэлектродную газонаполненную лампу.

Одним из электродов служил исследуемый образец, другим - окислительный анод, изготовленный из молибдена и третьим - измерительный анод, также выполненный из молибдена, и экранируемый во время процесса окисления. Такая конструкция обусловлена следующим. Непосредственное измерение катодного падения потенциала связано с определенными трудностями. Поэтому в качестве измеряемого параметра использовалось падение напряжения горения $U_{\text{г}}$ на разрядном промежутке. $U_{\text{г}}$ состоит из трех составляющих:

$$U_{\text{г}} = U_{\text{кп}} + U_{\text{пст}} + U_{\text{а}},$$

где $U_{\text{пст}}$ — падение напряжения на положительном столбе разряда;

$U_{\text{а}}$ — анодное падение напряжения.

$U_{\text{пст}}$ зависит от параметров газового наполнения и разрядного тока, значения которых в эксперименте не изменялись. Поэтому $U_{\text{пст}}$ являлось постоянной величиной. В тлеющем разряде кислорода, помимо

положительных ионов кислорода, окисляющих катод, образуются также и отрицательные, которые окисляют анод. А это приводит к неконтролируемому изменению U_a в процессе измерений. Поэтому окисление в тлеющем разряде кислорода проводилось с использованием окислительного анода. Затем прибор перенаполнялся рабочей смесью газов и измерялось U_r с измерительным анодом, экранируемом во время окисления, благодаря чему его электрические характеристики оставались неизменными, и, как следствие, постоянным было U_a . Таким образом все изменения U_r обуславливались изменением $U_{кп}$, и $U_{кп}$ однозначно определялось как функция от режимов окисления.

Во второй главе получены следующие результаты:

- определен метод нахождения оптимальных физических процессов очистки подложки катода и напыленного слоя, основанный на использовании масс-спектрометрических данных о состоянии остаточной атмосферы в измерительной камере от временных и температурных условий очистки;

- предложен усовершенствованный метод оперативного косвенного измерения эмиссионных свойств рабочей поверхности пленочного катода, использующий в качестве информационного параметра катодное падение потенциала $U_{кп}$;

- модернизирован метод нахождения коэффициента ионно-электронной эмиссии γ пленочных катодов с использованием калиброванного источника ионов, позволяющего определять численные значения γ .

Третья глава диссертации посвящена исследованию физических процессов, сопровождающих этапы изготовления и работы пленочных холодных катодов.

Скорость распыления характеризуется числом атомов n , распыляемых в единицу времени с единицы площади:

$$n = n_0 v_0 \int_{E_{th}}^{eU_{кп}} Y(E) \frac{dN_i}{dE} dE, \quad (1)$$

где: N_0 – концентрация ионов в области катодного падения потенциала

$$v_0 = \frac{\sqrt{\frac{2}{M_i} \int_0^{eU_{кп}} \frac{dN_i}{dE} dE}}{\int_0^{eU_{кп}} \frac{dN_i}{dE} \frac{dE}{\sqrt{E}}}$$

(ОКП);

- средняя скорость ионов в ОКП;
- E и M_i — энергия и масса ионов;
- $\frac{dN_i}{dE} = f(E)$ — функция распределения ионов по энергиям.

Функция распределения ионов по энергиям может быть представлена в виде [85,86]:

$$f(E) = \frac{1}{eU_{\text{кп}}} \exp\left(-\frac{d_k}{\lambda_n}\right) \left[\frac{d_k}{\alpha \lambda_n} \frac{1}{2\sqrt{1-\epsilon}} \exp\left(\frac{d_k}{\lambda_n} \sqrt{1-\epsilon}\right) + \delta(1-\epsilon) \right], \quad (2)$$

где: $\epsilon = \frac{E}{eU_{\text{кп}}}$;

$$\lambda_n = \frac{1}{\sigma n_g};$$

σ — сечение перезарядки;

n_g — концентрация атомов газа.

Из литературы известно выражение для $Y(E)$

$$Y(E) = 6,4 \cdot 10^{-3} M_2 \left[\frac{U_{\text{кп}} M_1 M_2}{(M_1 + M_2)} \right]^{-5/3} * E_{\text{th}}^{1/4} \left[1 - \sqrt{\frac{E_{\text{th}}}{E}} \right]^{7/2}, \quad (3)$$

где: M_2 — массовое число атома распыляемого материала.

Подстановкой (2) и (4) в (1) получено следующее выражение для n :

$$n = c \frac{j^2}{p^2} \exp\left(-D \cdot \frac{p}{\sqrt{j}}\right), \quad (4)$$

где: $c = \frac{6,4 \cdot 10^{-3}}{\sqrt{\pi e M}} \left(\frac{e}{E_{\text{th}}} \right)^2 \left(\frac{kT_g}{\sigma} \right)^{5/2} \frac{\beta^{4/3}}{B^{1/3}}$; $D = \frac{\sigma E_{\text{th}}}{2ekT_g} \left(\frac{B}{\beta} \right)^{2/3}$; $\epsilon = (1+\gamma) \sqrt{\frac{e\lambda_n p}{\pi^2 M_2}}$

P — давление газа, T_g — давление газа.

Полученное выражение для описывает связь параметров катода и разряда. Чем выше коэффициент распыления (КР), тем больше скорость распыления. В свою очередь величина КР определяется свойствами материала катода, энергией распыляющих частиц и состава газовой смеси, как следует из формулы (3).

Состав газовой смеси существенно влияет на коэффициент распыления. Поскольку рабочая поверхность катода бомбардируется ионами гелия и неона, имеющими энергии до 150-200эВ, естественно, происходит ее разогрев. Кроме того, в процессе разряда нагревается весь разрядный промежуток, в особенности область катодного падения потенциала, где находятся частицы с максимальной энергией. Поскольку катод крепится к корпусу моноблока посредством пайки или термодиффузионной сварки, то тепловое сопротивление контакта пренебрежимо мало. Следствием этого является наличие теплового потока от корпуса катода и нагретого в области катодного падения газа в область разряда и корпуса моноблока. Качественный анализ возможных последствий этого процесса приведен ниже.

Во-первых, температура газа в газоразрядном промежутке поднимается незначительно вследствие лишь упругих столкновений частиц. Основной

подъем происходит внутри катода, где ионы отдают поверхности всю свою кинетическую энергию. Вследствие этого возникает температурный градиент, приводящий к изменению концентрации газа в области катодного падения потенциала и газоразрядном промежутке в соответствии с известным выражением:

$$n = \frac{p}{kT}.$$

В свою очередь, концентрацией частиц в катодном пространстве определяется длина перезарядки ионов, то есть, в конечном счете, их энергия. Если при небольших плотностях разрядного тока различием концентраций можно пренебречь, то при средних и, особенно, больших плотностях, имеющих место в режиме форсированных испытаний, этот факт может иметь решающее влияние.

В данной работе исследовано влияние расположения катода на поверхности корпуса моноблочного лазера на температуру газового наполнения внутри его объема. Найдено аналитическое решение стационарного уравнения теплопроводности для случаев, когда участок поверхности моноблока, через который поступает поток тепла из разряда, располагается на ее ребре и в центре боковой грани. На Рис.2 схематически изображен моноблочный лазер, содержащий катод и два анода, а также разрядный капилляр. Разряд осуществляется в двух отрезках капилляра между общим катодом и каждым из анодов. В первом варианте рассматриваемой задачи в качестве источника тепла являются два участка разрядного капилляра, примыкающие к ребру корпуса лазера. При этом расчеты производились для следующих параметров:

- катодное падение $U_{kp}=190В$;
- плотность тока на катоде $2,5А/м^2$;
- напряженность электрического поля в разряде (в капилляре) $2кВ/м$;
- периметр лазера по оси капилляра – $0,32м$;
- разрядный ток в каждом промежутке катод – анод $1 \cdot 10^{-3}А$.

Геометрия задачи в этом случае изображена на Рис.3. Стационарное распределение температуры $T(x,y)$ в области определяется уравнением теплопроводности

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} = 0, \quad (5)$$

причем на ее границах $x=0$ и $y=0$ считается заданной температура, а на границах $x=a$ и $y=b$ — тепловой поток q , что дает граничные условия для уравнения (5)

$$T(x,0) = T_0, \quad T(0,y) = T_0, \quad \frac{\partial T}{\partial x}(a,y) = q_1(y), \quad \frac{\partial T}{\partial y}(x,b) = q_2(x), \quad (6)$$

$$\text{где: } q_1(y) = \begin{cases} 0, & 0 \leq y \leq b-d/2 \\ q/\lambda, & b-d/2 \leq y \leq b \end{cases}, \quad q_2(x) = \begin{cases} 0, & 0 \leq x \leq a-d/2 \\ q/\lambda, & a-d/2 \leq x \leq a \end{cases}.$$

Функция $T(x, y)$ может быть представлена в виде

$$T(x, y) = T_0 + T_1(x, y) + T_2(x, y), \quad (7)$$

причем функция $T_1(x, y)$ есть решение краевой задачи

$$\frac{\partial^2 T_1}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T_1}{\partial y^2} = 0, \quad (8)$$

$$T_1(x, 0) = 0, \quad T_1(0, y) = 0, \quad \frac{\partial T_1}{\partial x}(a, y) = 0, \quad \frac{\partial T_1}{\partial y}(x, b) = q_2(x). \quad (9)$$

а $T_2(x, y)$ — краевой задачи

$$\frac{\partial^2 T_2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T_2}{\partial y^2} = 0, \quad (10)$$

$$T_2(x, 0) = 0, \quad T_2(0, y) = 0, \quad \frac{\partial T_2}{\partial x}(a, y) = q_1(y), \quad \frac{\partial T_2}{\partial y}(x, b) = 0. \quad (11)$$

Решение первой из них может быть найдено методом разделения переменных. Используя первые три из условий (9), его можно привести к виду

$$T_1(x, y) = \sum_{n=0}^{\infty} A_n \sinh \left[\pi (2n+1) y / 2a \right] \sin \left[\pi (2n+1) x / 2a \right]. \quad (12)$$

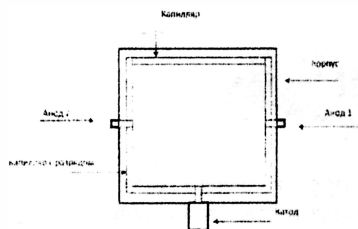


Рис. 2. Моноблочный лазер

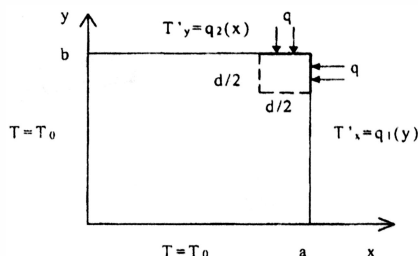


Рис. 3. Граничные условия на поверхности корпуса лазера в случае источника тепла — капилляра

Используя формулу для коэффициентов ряда Фурье, можно из последнего условия (12) получить выражение для A_n

$$A_n = \frac{q_{2n}}{\left[\pi (2n+1) / 2a \right] ch \left[\pi (2n+1) / 2b \right]}, \quad (13)$$

где

$$q_{2n} = (2/a) \int_0^a q_2(x) \sin \left[\pi (2n+1) x / 2a \right] dx = \frac{4q}{\pi \lambda (2n+1)} \sin \left[\pi (2n+1) d / 4a \right] \quad (14)$$

Подстановка соотношения (13) в (12) дает выражение, определяющее функцию $T_1(x, y)$

$$T_1(x, y) = \sum_{n=0}^{\infty} \left[\frac{q_{2n}}{\pi(2n+1)/2a} \frac{sh \left[\frac{\pi(2n+1)y}{2a} \right]}{ch \left[\frac{\pi(2n+1)b}{2a} \right]} \right] \sin \left[\frac{\pi(2n+1)x}{2a} \right] \quad (15)$$

Краевая задача (10), (11) переходит в задачу (8), (9) при замене $x \leftrightarrow y$, $a \leftrightarrow b$ и $q_2 \leftrightarrow q_1$. Поэтому функция $T_2(x, y)$ определяется выражением

$$T_2(x, y) = \sum_{n=0}^{\infty} \left[\frac{q_{1n}}{\pi(2n+1)/2b} \frac{sh \left[\frac{\pi(2n+1)x}{2b} \right]}{ch \left[\frac{\pi(2n+1)a}{2b} \right]} \right] \sin \left[\frac{\pi(2n+1)y}{2b} \right], \quad (16)$$

где

$$q_{1n} = (2/b) \int_0^b q_1(y) \sin \left[\frac{\pi(2n+1)y}{2b} \right] dy = \frac{4q}{\pi\lambda(2n+1)} \sin \left[\frac{\pi(2n+1)d}{4b} \right]. \quad (17)$$

Поэтому решение исходной задачи (5), (6) имеет вид

$$T(x, y) = T_0 + \sum_{n=0}^{\infty} \left[\frac{q_{2n}}{\pi(2n+1)/2a} \frac{sh \left[\frac{\pi(2n+1)y}{2a} \right]}{ch \left[\frac{\pi(2n+1)b}{2a} \right]} \right] \sin \left[\frac{\pi(2n+1)x}{2a} \right] + \quad (18)$$

$$+ \sum_{n=0}^{\infty} \left[\frac{q_{1n}}{\pi(2n+1)/2b} \frac{sh \left[\frac{\pi(2n+1)x}{2b} \right]}{ch \left[\frac{\pi(2n+1)a}{2b} \right]} \right] \sin \left[\frac{\pi(2n+1)y}{2b} \right]$$

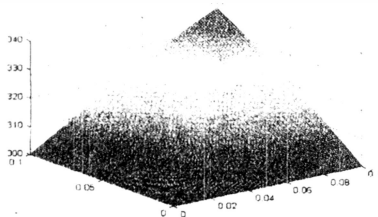


Рис.4. Распределение температуры на поверхности корпуса лазера в случае источника тепла – капилляра

Графическое изображение распределения температуры, рассчитанное в соответствии с приведенными аналитическими выражениями, изображено на Рис.4. Как следует из графика Рис.4, неравномерность теплового поля, обусловленная теплом, поступающим в корпус лазера из разрядного капилляра, имеет незначительную величину, составляющую порядка 5–7К. График распределения температуры характеризует распределение тепла на одной стороне корпуса моноблока. В силу симметрии конструкции аналогичное распределения будет и в другой половине. Таким образом, даже небольшие тепловые потоки от разряда в капилляре приводят к появлению теплового градиента в разрядном объеме, причем направление градиента такое, что концентрация газовых молекул в области катодного падения снижается, приводя к увеличению энергии распыляющих катод ионов. Следствием этого процесса будет уменьшение долговечности катода.

Другим источником нагрева корпуса катода и корпуса моноблока является разряд в катоде. Используя аналогичный подход к расчету тепловых градиентов в этом случае, получим распределения, приведенные на Рис. 5. Как следует из рисунков, температура корпуса моноблока в области присоединения катода к корпусу моноблочного лазера почти на 30K выше, чем на противоположном торце. Для экспериментального определения температурных условий работы катода в рабочем и форсированных режимах эксплуатации был изготовлен прибор, схема которого показана на Рис.6, а графическое отображение зависимости температуры катода от плотности разрядного тока на его поверхности – на Рис.7.

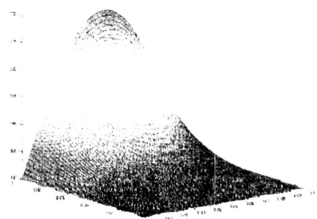


Рис. 5. Распределение температуры моноблока при расположении катода в середине боковой грани

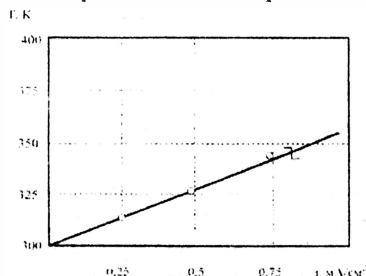


Рис. 7. Зависимость температуры корпуса катода от плотности разрядного тока на катоде

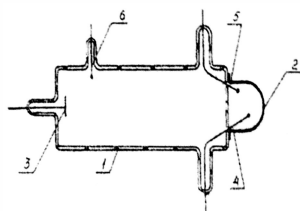


Рис. 6. Макет моноблочного лазера для измерения температуры

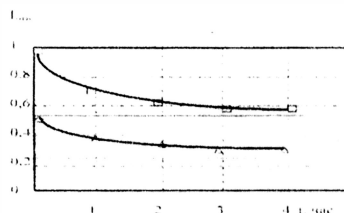


Рис. 8. Зависимости интенсивности пиков кислорода (□) и воды (Δ) от времени при температуре отжига образцов 650K

Одним из способов снижения температурных градиентов в разрядном объеме может стать расположение катода в центре корпуса. Подобная конструкция имеет ряд преимуществ, особенно в случае создания пленочного холодного катода, сформированного непосредственно на корпусе лазера. Кроме снижения температурных неоднородностей, подобная конструкция обеспечивает повышенную устойчивость к механическим воздействиям.

Исследования процессов термической очистки катодов проводились методом, описанным в диссертации. Исследуемые образцы, представляющие собой диски Ø10мм и толщиной 3мм, вырезанные из ситалла СО115М, с напыленными слоями Cu и Al на этапе очистки помещались в вакуумную камеру. После откачки камеры до давления $5 \cdot 10^{-6}$ Па снимался масс-спектр остаточных газов при комнатной температуре. Затем образцы нагревались до определенной температуры и дискретно по времени при неизменной температуре снимались масс-спектры газов в камере. Интервал температур выбирался из фактически используемых для очистки электровакуумных приборов (570 – 770К). На Рис.8 - Рис.10 приведены результаты измерений, проведенных при наиболее характерных для процесса очистки образцов температурах. Масс-спектры снимались через каждые 30 минут, начиная с момента достижения заданной температуры.

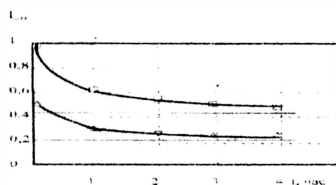


Рис. 9. Зависимости интенсивности пиков C_n ($\square$) и C_nH_x (Δ) от времени при температуре отжига образцов 650K

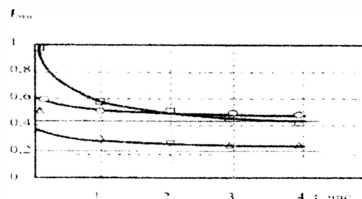


Рис. 10. Зависимости интенсивности пиков Ca ($\square$), N_2O (o) и N_2 ($\square$) от времени отжига образцов при температуре 650K

Аналогичный анализ результатов измерений при температурах 570K и 770K, показал, что снижение температуры до 570K приводит к резкому увеличению времени обезгаживания до 8-10 часов и больше, причем концентрация углерода и углеводородов практически не снижается от уровня на 50% выше от исходного. Увеличение температуры до 770K уменьшает время обезгаживания до 1 часа. По результатам анализа экспериментов было принято решение об оптимальном времени обезгаживания образцов при $T=650K$ составляющем три часа.

Результаты исследований процессов катодного окисления подложек в тлеющем разряде кислорода показали, что оптимальную толщину оксидного слоя на поверхности напыленной алюминиевой пленки, обеспечивающую коэффициент ионно-электронной эмиссии на уровне 0,18, можно получить в тлеющем разряде в кислороде.

В четвертой главе диссертации проведена разработка способов изготовления пленочного холодного катода с повышенной долговечностью и прогнозирования его ресурса. Была предпринята попытка усовершенствовать пленочные катоды, совмещенные с корпусом лазера, а

именно - обеспечить возможность создания микрорельефной эмиссионной поверхности. В качестве элементов микрорельефа было решено использовать квазицилиндрические углубления. Как показывают расчеты, подтвержденные при использовании катодов из компактных материалов, наличие микрорельефа на рабочей поверхности приводит к снижению количества распыленных частиц, попадающих в разрядный объем. Характер этого явления иллюстрируется Рис. 11. Техническая сущность предполагаемого решения поставленной задачи заключается в следующем:

- на первом этапе на ситалловую подложку через трафарет напыляется медный подслоя, образующий микрорельефную структуру;
- полученный медный слой вжигается в подложку, обеспечивая высокие адгезионные параметры;

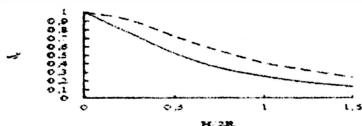


Рис. 11. Зависимость количества покидающих углубление частиц от отношения высоты углубления к его радиусу

- на полученную структуру напыляется слой алюминия высокой чистоты, повторяющий структуру медного подслоя;

- на поверхности алюминиевой пленки формируется оксидный слой, обладающий высокой пороговой энергией распыления и требуемыми эмиссионными свойствами.

Процесс напыления производился на установке вакуумного напыления УВН-2М, позволяющей получать вакуум на уровне $1 \cdot 10^{-5}$ Па. При этом использовались методы термического испарения, обеспечивающие высокую однородность свойств металлизации. В качестве испарителей использовалась вольфрамовая проволока марки ВА-1 диаметром 0,9 мм, на которую с шагом 0,5 мм была намотана спираль из такой же проволоки диаметром 0,15 мм. Из испаряемого материала - меди или алюминия, - готовились навески в виде полосок размером 0,15 × 2 × 25 мм. Навески закреплялись на испарителе посредством навивки. На Рис.12 приведены фотографии элементов сформированной микрорельефной поверхности.

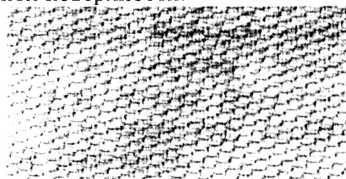
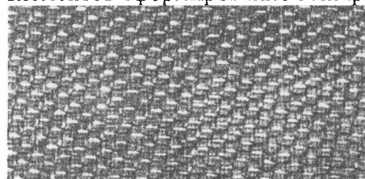


Рис. 12. Фотографии элементов сформированной микрорельефной поверхности: а - медный подслоя, б - напыленный на медь слой алюминия

Срок службы разработанных катодов определялся расчетным методом по формуле

$$\frac{j_{\phi}}{j_p} = \left(\frac{j_p}{j_{\phi}} \right)^2 \left(\frac{p_{\phi}}{p_p} \right)^2 \exp \left[D \left(\frac{p_{\phi}}{\sqrt{j_{\phi}}} - \frac{p_p}{\sqrt{j_p}} \right) \right],$$

причем учитывались результаты расчетов и измерений температурных градиентов, присущих моноблочной конструкции лазера при разных плотностях тока на катоде. Результаты испытаний пленочных катодов для датчиков лазерных гироскопов представлены в Таблице 1.

Таблица 1.

Результаты испытаний пленочных катодов для датчиков лазерных гироскопов

$J, \text{А/м}^2$	t - фактическая долговечность, часов	t - расчетная долговечность, часов
1,0	Не определена	60 000
3,0	5300	5100

Точность прогноза составляет порядка 90%, что позволяет оценить ресурс катода при нормальных режимах эксплуатации в 60 тысяч часов.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

В результате выполнения работы создан принципиально новой холодной катод и получены следующие результаты:

- определен метод нахождения оптимальных физических процессов очистки подложки катода и напыленного слоя, основанный на использовании масс-спектрометрических данных о состоянии остаточной атмосферы в измерительной камере от временных и температурных условий очистки;

- предложен усовершенствованный метод оперативного косвенного измерения эмиссионных свойств рабочей поверхности пленочного катода, использующий в качестве информационного параметра катодное падение потенциала $U_{\text{КП}}$;

- модернизирован метод нахождения коэффициента ионно-электронной эмиссии γ пленочных катодов с использованием калиброванного источника ионов, позволяющего определять численные значения γ ;

- проведен анализ параметров, изменение которых влияет на срок службы катода, и, соответственно, гелий-неонового лазера; установлено, что значительный вклад в ограничение срока службы вносит наличие температурного градиента в разрядном промежутке, приводящего к снижению концентрации газового наполнения в области катодного падения потенциала; расчетным и экспериментальными методами установлено, что температура газового наполнения в области катодного падения потенциала в рабочем режиме лазера превышает температуру в балластном объеме на величину порядка 30К, что сокращает срок службы катода на 20%;

– рассчитано и экспериментально измерено распределение температуры по корпусу моноблочного лазера при различных режимах работы и расположениях катода, позволяющее более достоверно определять распределение концентраций газового наполнения в зоне катодного падения потенциала, разрядном капилляре и балластном объеме, на основании чего сделан вывод о предпочтительном расположении катода в центре оси симметрии корпуса моноблочного лазера;

– исследованы условия очистки подложки катодов посредством прогрева в вакуумной камере при постоянной откачке. Доказано, что нахождение катодов в вакуумной камере в течение трех часов при температуре не менее 770K позволяет произвести их полное обезгаживание;

– определена зависимость коэффициента ионно-электронной эмиссии γ от толщины оксидного слоя, сформированного на поверхности алюминиевого напыления, при этом найдены режимы окисления, при которых толщина оксидного слоя находится на уровне 180-200 нм, что обеспечивает γ порядка 0,2;

– на базе проведенных исследований определен оптимальный микрорельеф эмиссионной поверхности пленочного катода как с точки зрения его эффективности, так и практической реализуемости;

– разработан способ практической реализации оптимального микрорельефа, базирующийся на последовательном вакуумном напылении медного подслоя, создающего квазицилиндрические углубления, и пленки алюминия А999, на поверхности которой создан оксидный эмиссионный слой;

– проведены ресурсные испытания разработанных пленочных катодов и определена их долговечность, рассчитанная в соответствии с оптимальной методикой прогнозирования, достигающая в оптимальном режиме эксплуатации моноблочного лазера с пленочным катодом 60 тысяч часов.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ДИССЕРТАЦИИ ОТРАЖЕНЫ В НАУЧНЫХ РАБОТАХ

1. Ньейн Чан. Пленочные холодные катоды для современных гелий-неоновых лазеров // Наукоемкие технологии. 2014, Т.15, №10. С. 26-30 (0,31 п.л./0,31 п.л.).
2. Ньейн Чан, Пью Мьинт Вей. Применение метода Монте-Карло для вычисления кратных интегралов при имитационном моделировании // Научное обозрение. 2013. №9. С.114-116. (0,19 п.л./0,10 п.л.).
3. Пью Мьинт Вей, Ньейн Чан. Фазовый переход обобщенной ферромагнитной модели Поттса - эффективность невидимых состояний // Научное обозрение. 2014. №4. С.63-66. (0,25 п.л./0,12 п.л.).

4. Ньейн Чан. Способы увеличения долговечности гелий-неонового лазера // Научные технологии в приборостроении и развитии инновационной деятельности в вузе: Материалы региональной научно-технической конференции. М., 2014. Т.3. С.134-136. (0,31 п.л./0,31 п.л.). (0,19 п.л./0,19 п.л.).
5. Ньейн Чан, Мазин А.В. Увеличение срока службы пленочного холодного катода гелий-неонового лазера // Научные технологии в приборостроении и развитии инновационной деятельности в вузе: Материалы региональной научно-технической конференции. М., 2014. Т.3. С.146-148. (0,19 п.л./0,10 п.л.).
6. Ньейн Чан, Пью Мьинт Вей. Анализ намагничивания материала на основе модели Изинга // Студенческая Научная Весна – 2012 // Материалы региональной научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. М., 2012. Т.2. С. 269-274. (0,37 п.л./0,18 п.л.).
7. Ньейн Чан. Компьютерное моделирование Гейзенбергского метода Монте-Карло // Тезисы докладов 5-ой Всероссийской межвузовской научно-практической конференции. М., 2012. С. 112. (0,06 п.л./0,06 п.л.).
8. Ньейн Чан, Пью Мьинт Вей. Фазовые переходы в двумерной антиферромагнитной модели Поттса на треугольной решетке // Научные технологии в приборостроении и развитии инновационной деятельности в вузе: Материалы Всероссийской научно-технической конференции. М., 2012. Т.3. С. 22-24. (0,19 п.л./0,10 п.л.).
9. Ньейн Чан, Пью Мьинт Вей. Анализ фазовых переходов и критических явлений на основе модели Поттса // Научные технологии в приборостроении и развитии инновационной деятельности в вузе: Материалы Всероссийской научно-технической конференции. М., 2012. Т.3. С. 25-28. (0,25 п.л./0,12 п.л.).
10. Ньейн Чан, Пью Мьинт Вей. Реализация алгоритма Метрополиса на основе модели Гейзенберга // Научные технологии в приборостроении и развитии инновационной деятельности в вузе: Материалы Всероссийской научно-технической конференции. М., 2012. Т.3. С. 29-31. (0,19 п.л./0,10 п.л.).
11. Пью Мьинт Вей, Ньейн Чан. Анализ исследования магнитоэлектрического вольтаметра // Научные технологии в приборостроении и развитии инновационной деятельности в вузе: Материалы Всероссийской научно-технической конференции. М., 2013. Т.3. С. 118-121. (0,25 п.л./0,12 п.л.).
12. Ньейн Чан, Пью Мьинт Вей. Оценка эффективности алгоритма Метрополиса // Научные технологии в приборостроении и развитии инновационной деятельности в вузе: Материалы Всероссийской научно-технической конференции. М., 2013. Т.3. С. 122-123. (0,12 п.л./0,6 п.л.).