

ОАО «ЛИТ-ФОНОН»

На правах рукописи

Левченко Владимир Александрович

**ГЕНЕРАЦИЯ УЛЬТРАФИОЛЕТОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ РТУТНЫМ
РАЗРЯДОМ С ВЫСОКОЙ ПЛОТНОСТЬЮ ТОКА ПРИ НИЗКИХ
ДАВЛЕНИЯХ**

01.04.08 – физика плазмы

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Москва – 2016

Диссертация выполнена в открытом акционерном обществе
«ЛИТ-ФОНОН».

Научный руководитель: д.ф.-м.н., г.н.с. лаб. 1.2.1.1 Федерального государственного бюджетного учреждения науки Объединённого института высоких температур РАН, г. Москва
Василяк Леонид Михайлович.

Официальные оппоненты: д.ф.-м.н., профессор Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», г. Москва
Курнаев Валерий Александрович.

д.ф.-м.н., в.н.с. Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Института нефтехимического синтеза им. А.В. Топчиева РАН», г. Москва
Шахатов Вячеслав Анатольевич.

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова», г. Москва

Защита диссертации состоится « ____ » _____ 2016 г. в ____ часов на заседании диссертационного совета Д 002.110.02 Федерального государственного бюджетного учреждения науки Объединённого института высоких температур Российской академии наук по адресу: 125412, Москва, ул. Ижорская, д. 13, стр. 2, экспозал.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ОИВТ РАН. Отзывы на автореферат просьба присылать по адресу: 125412, Москва, ул. Ижорская, д. 13, стр. 2, ОИВТ РАН.

Автореферат разослан « ____ » _____ 2016 г.

Учёный секретарь
диссертационного совета
Д 002.110.02, к.ф.-м.н.

М.М. Васильев

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы диссертации.

В спектре излучения ртутного разряда низкого давления присутствуют две резонансных УФ линии с длинами волн 254 и 185 нм. Излучение с длиной волны 254 нм обладает ярко выраженным бактерицидным эффектом. Излучение с длиной волны 185 нм (ВУФ диапазон, $\lambda < 200$ нм) активно поглощается в воздухе молекулярным кислородом и парами воды, и может быть использовано для генерации озона и радикалов (OH^\cdot) для фотохимической очистки воздуха от вредных веществ и запахов. Для эффективной очистки требуется присутствие обеих резонансных линий ртути, поскольку излучение линии 254 нм очень хорошо поглощается озоном с образованием высокоактивного радикала кислорода, что позволяет наработать больше активных радикалов, разрушающих молекулы загрязнителя. Во многих развитых промышленных странах воздействие запахов на людей считается опасным. В настоящее время на основе ртутных и амальгамных ламп создаются установки для очистки воздуха от вредных газовых примесей и удаления запахов с производительностью десятки тысяч м³/час. Для этого требуются мощные эффективные источники УФ и ВУФ излучения с большим ресурсом.

Амальгамные газоразрядные лампы низкого давления являются наиболее востребованными источниками УФ и ВУФ излучения, поскольку имеют большую мощность и высокий КПД по сравнению с другими типами разрядов, а также являются более экологичными по сравнению с традиционными ртутными лампами. Амальгамные газоразрядные лампы низкого давления давно и широко используются в различных установках для обеззараживания воды, воздуха и поверхностей излучением 254 нм, поэтому закономерности генерации излучения с длиной волны 254 нм ртутным разрядом низкого давления достаточно хорошо изучены. Применение газоразрядных ламп низкого давления для генерации озона и очистки воздуха в промышленных масштабах – направление относительно молодое, перспективное и активно развивающееся. Закономерности генерации излучения с длиной волны 185 нм ртутным разрядом низкого давления изучены недостаточно, в особенности при низких давлениях буферного газа, менее 1 Торр, которые более благоприятны для генерации излучения 185 нм. Недостаток информации не позволяет создать более эффективные источники для промышленных применений.

На мощность и КПД генерации УФ и ВУФ излучения ртутным разрядом низкого давления наибольшее влияние оказывают давление, состав смеси буферных газов и плотность разрядного тока. Сузить поле поисков позволяют численные модели разряда, однако, для проведения точных расчётов в области низких давлений буферной смеси не хватает экспериментальных данных.

Разработка мощных амальгамных газоразрядных ламп низкого давления с высоким КПД генерации ВУФ излучения и большим сроком службы является важной технической задачей, а усовершенствование существующих моделей разряда – научной задачей. Поэтому исследование влияния параметров разряда на поток и КПД генерации ВУФ излучения и поиск способов увеличения срока службы амальгамных газоразрядных ламп низкого давления представляет научно-практический интерес.

Целью настоящей работы является получение экспериментальных данных о закономерностях генерации ВУФ излучения электрическим разрядом в смеси паров ртути и инертных газов в малоизученной области давлений буферной смеси 0,1 - 1 Торр при высоких плотностях разрядного тока 0,75 - 1,5 А/см² с частотами десятки килогерц и сравнение полученных данных с результатами модельного расчета в этой области.

Практический интерес представляет разработка газоразрядных источников УФ излучения, обладающих повышенным физическим сроком службы, таких как безэлектродные индукционные лампы. Сравнение закономерностей генерации УФ излучения ртутным разрядом низкого давления в указанной области параметров электродными и безэлектродными источниками также является важной задачей данной работы.

Повышение мощности газоразрядных ламп низкого давления приводит к негативному воздействию плазмы разряда на стенки и электродные узлы лампы, сокращая как физический, так и полезный срок службы лампы. Поэтому важной задачей работы был поиск способов увеличения физического и полезного срока службы таких источников УФ излучения.

Научная новизна работы состоит в следующем:

1. Обнаружен максимум мощности излучения линии 185 нм в области давлений смеси Ne-Ar 0,1- 0,6 Торр, положение которого зависит от доли неона. Установлено, что при давлении смеси неон-аргон выше 1 Торр повышение плотности тока при частоте 80 кГц не приводит к значительному росту потока ВУФ излучения линии 185 нм. Обнаружено, что величина приэлектродных потерь в основном зависит от плотности тока и давления смеси буферных газов, и слабо зависит от состава газов.

2. Впервые получены характеристики индукционного разряда и генерации УФ излучения линии 254 нм для давлений буферной смеси Ne-Ar менее 1 Торр в безэлектродных лампах трансформаторного типа с малым внутренним диаметром разрядной трубки при частоте тока разряда 265 кГц.

3. Модифицирована замкнутая самосогласованная модель электрического разряда в парах ртути с учетом частичного перемешивания уровня линии 185 нм и впервые выполнены расчеты параметров ртутного разряда для смесей неон-аргон при давлении 0,1 – 2 Торр и выхода резонансного излучения на длинах волн 185 и 254 нм. Получено хорошее согласие с экспериментом.

4. Установлено, что малая добавка (менее 1%) Kr к смеси Ne-Ar повышает КПД генерации УФ излучения и продлевает время работы ламп низкого давления с высокой погонной мощностью. Найдены эффективные защитные покрытия смешанного состава оксид-шпинель для разрядов с высокой плотностью тока.

Практическая и научная значимость.

Полученные экспериментальные данные по генерации УФ и ВУФ излучения, в том числе результаты проведенных исследований по увеличению срока службы, могут быть применены при разработке новых мощных эффективных источников ВУФ и УФ излучения (как электродных, так и безэлектродных ламп), а также использованы для улучшения существующих

математических моделей, описывающих генерацию УФ излучения ртутным разрядом низкого давления. По результатам проведённых исследований на производственных мощностях ОАО «ЛИТ-ФОНОН» создана партия экспериментальных ламп.

Достоверность полученных результатов определяется следующим:

Измерения проведены на современном поверенном оборудовании при использовании проверенных ранее методик. Проведён анализ погрешностей измерений исследуемых характеристик образцов. Измерения проводились на большом количестве экспериментальных образцов и показали хорошую воспроизводимость (в пределах доверительных интервалов на нескольких сериях образцов). Полученные результаты при более высоких давлениях совпадают с известными данными. Результаты численного моделирования находятся в хорошем согласии с экспериментальными результатами.

Положения, выносимые на защиту:

Результаты исследований зависимостей КПД генерации и мощности ВУФ излучения линии 185 нм от давления и состава буферной смеси неон-аргон и от плотности разрядного тока при низких давлениях смеси буферных газов 0,1-2 Торр и частоте разрядного тока 80 кГц. Результаты измерения зависимостей падений напряжения и потерь мощности в приэлектродных областях амальгамных ламп низкого давления при разных плотностях тока и давлениях буферной смеси.

Зависимости КПД генерации и потока УФ излучения линии 254 нм от давления (в области менее 1 Торр) и состава смеси буферных газов для лампы трансформаторного типа с внутренним диаметром разрядной трубки 16,6 мм при частоте разрядного тока 265 кГц.

Модифицированная замкнутая самосогласованная модель электрического разряда в парах ртути и смесей неон-аргон при давлении 0,1 – 2 Торр и результаты расчетов параметров разряда и выхода резонансного излучения на длинах волн 185 и 254 нм.

Влияние малой добавки криптона к смеси неон-аргон на увеличение КПД генерации и поток УФ излучения 254 нм для амальгамных ламп низкого давления с высокой погонной мощностью, а также увеличение времени жизни мощных ламп. Обнаружение эффективных защитных покрытий смешанного состава оксид-шпинель для газоразрядных ламп низкого давления с высокой плотностью тока.

Апробация работы. Основные результаты диссертации докладывались на международных и всероссийских конференциях: Международная конференция молодых учёных и аспирантов «ИЕФ 2013» (Ужгород, 2013 г); X международная конференция «Волновая электрогидродинамика проводящей жидкости. Долгоживущие плазменные образования и малоизученные формы естественных электрических разрядов в атмосфере» (Ярославль, 2013 г); Всероссийская конференция «Современные проблемы физики плазмы» (Махачкала, октябрь 2013 г); 56-й научная конференция МФТИ (Москва-Долгопрудный-Жуковский, ноябрь 2013 г); XLI Международная Звенигородская конференция по физике плазмы и УТС (Звенигород, февраль

2014 г); III международная молодёжная научная школа-конференция «Современные проблемы физики технологий» (Москва, апрель 2014 г); VIII Всероссийская конференция по физической электронике (Махачкала, ноябрь 2014 г); 57-й научная конференция МФТИ (Москва-Долгопрудный-Жуковский, ноябрь 2014 г); XLII Международная Звенигородская конференция по физике плазмы и УТС (Звенигород, февраль 2015 г); Двадцать первая Всероссийская научная конференция студентов-физиков и молодых учёных «ВНКСФ-21» (Омск, март 2015 г); II Всероссийская конференция «Современные проблемы физики плазмы и физической электроники» (Махачкала, ноябрь 2015 г); XLIII Международная Звенигородская конференция по физике плазмы и УТС (Звенигород, февраль 2016 г).

Публикации. По результатам работы опубликовано 26 печатных работ, из них 11 статей в журналах, входящих в список ВАК.

Личный вклад автора. Диссертация написана автором лично. Положения, выносимые на защиту, сформулированы автором лично. Автором созданы экспериментальные схемы и получены экспериментальные результаты. Автор предложил модификацию модели для смесей неон-аргон и линии 185 нм. Интерпретация результатов выполнена при определяющем участии автора. Публикация полученных результатов осуществлялась совместно с соавторами, при этом вклад диссертанта был определяющим.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, 4 глав и заключения. Работа изложена на 127 страницах текста, содержит 70 рисунков и 6 таблиц. Список литературы включает 117 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во **Введении** обоснована актуальность выбранной темы, формулируется цель, отображается научная новизна и положения, выносимые на защиту.

В **первой главе** приведен литературный обзор, посвященный генерации УФ излучения ртутным разрядом низкого давления. Проведен краткий обзор истории развития источников УФ излучения на основе плазмы ртутного разряда низкого давления и описывающих его математических моделей. Показано, что ртутный разряд низкого давления является эффективным источником УФ излучения, описаны физические принципы генерации УФ излучения электрическим разрядом в смеси паров ртути и инертного газа, указаны параметры, влияющие на эффективность генерации УФ излучения.

Вторая глава посвящена описанию замкнутой самосогласованной модели электрического разряда в смеси паров ртути и инертных газов. Данная модель позволяет предсказывать выход резонансного излучения на длинах волн 185 и 254 нм для различных по составу буферных смесей неон-аргон в диапазоне рабочих давлений смеси 0,1 – 2 Торр, при высоких удельных плотностях тока. Основными модификациями модели являются:

- возможность моделирования разряда в парах ртути и смесей неон-аргон (ранее - только аргон);

- учёт частичного перемешивания по частотам при расчёте переноса резонансного излучения с длиной волны 185 нм.

Задаваемыми параметрами были: размер колбы, давление паров ртути и инертных газов, температура газа. Разряд считался стационарным. В процессе проведения вычислений напряженность электрического поля автоматически подбиралась таким образом, чтобы удельная мощность разряда, вычисленная на основе микрохарактеристик плазмы, совпадала с мощностью, рассчитанной по макропараметрам (ток разряда, напряжённость электрического поля). Давление паров ртути менялось в диапазоне 0,1 – 15 Па, и выбиралось решение, которое давало наибольший КПД генерации излучения с длиной волны 185 нм.

Для нахождения функции распределения электронов по энергиям (ФРЭЭ) или скоростям (ФРЭС) решалось кинетическое уравнение Больцмана в локальном приближении:

$$\frac{\partial f_e}{\partial t} + \vec{v} \cdot \nabla_r f_e + \frac{\vec{F}}{m_e} \cdot \nabla_v f_e = \frac{\delta f_e}{\delta t} \quad (1)$$

Здесь $\nabla_r f_e$, $\nabla_v f_e$ – градиенты ФРЭС в пространстве координат и скоростей, $\vec{F} = -e\vec{E}$ – сила электрического поля, действующая на электрон, $\frac{\delta f_e}{\delta t}$ – сумма интегралов упругих, неупругих и кулоновских столкновений (в приближении парных столкновений).

При решении уравнения Больцмана учитывались:

- Упругие соударения электронов с атомами ртути и буферного газа;
- Электрон-электронные соударения;
- Неупругие соударения I и II рода электронов с атомами ртути. Учитывались переходы между основным состоянием атома ртути 6^1S_0 и возбужденными состояниями 6^3P_0 , 6^3P_1 , 6^3P_2 , 6^1P_1 , 7^3S_1 и $6^3D_{1,2,3}$. Последние три уровня принимались за один, ввиду малой разницы энергий между ними и идентичными сечениями возбуждения.

Убыль электронов происходит в результате амбиполярной диффузии к стенкам. Предполагалось, что радиальное распределение концентрации электронов в разряде описывается функцией Бесселя нулевого порядка.

Уравнение Больцмана в рамках настоящей модели решалось итерационным методом с аппроксимацией дифференциального оператора с использованием метода конечных разностей. Пример рассчитанной функции распределения показан на рис. 1. Видно, что рассчитанная ФРЭЭ обеднена по сравнению с максвелловской быстрыми электронами с энергиями $U > 4.7$ эВ. Для расчёта радиальных распределений концентраций возбужденных атомов ртути решалась система уравнений баланса образования и разрушения возбужденных атомов на соответствующих энергетических уровнях. Предполагалось, что образование и разрушение атомов на некотором излучающем уровне в некоторой области плазмы происходит в результате соударений I и II рода с электронами, оптических переходов, оканчивающихся или начинающихся на рассматриваемом уровне, а также диффузии атомов к стенкам колбы. Для *резонансного* излучающего уровня s

уравнение баланса образования и гибели записывались с учётом переноса излучения в плазме (уравнение Бибермана-Холстейна):

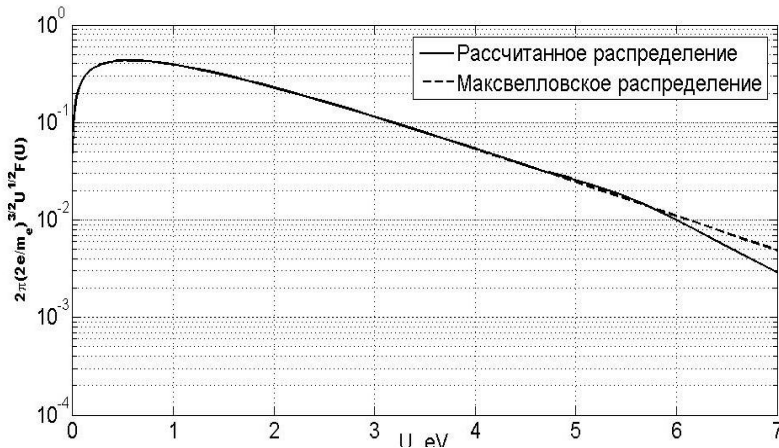


Рис.1. Зависимость $f_e(U) = 2\pi(2e/m_e)^{3/2} \sqrt{U} f_{e0}(U)$ от энергии электронов U .
 $E = 61 \text{ В/м}$, $n_e = 1 \times 10^{12} \text{ см}^{-3}$, $T = 340 \text{ К}$, $T_e = 13000 \text{ К}$, $p_{\text{Hg}} = 0,85 \text{ Па}$, $p_{\text{Ar}} = 13,3 \text{ Па}$.

$$\frac{\partial n_s}{\partial t} - \nabla(D_s \nabla n_s) + \text{div} \vec{Q}_{p,s} = n_e \sum_{n=0}^{s-1} \alpha'_{ns} n_n + n_e \sum_{\nu=s+1}^{ion-1} \beta'_{\nu s} n_\nu + \sum_{\nu=s+1}^{ion-1} n_\nu A_{\nu s} - \frac{n_s}{\tau_s}, \quad (2)$$

$$\text{div} \vec{Q}_{p,s}(\vec{r}) = A_{s0} n_s(\vec{r}) - \frac{A_{s0}}{4\pi} \int \int \frac{n_s(\vec{r}')}{|\vec{r} - \vec{r}'|^2} P(\nu) k(\nu) \exp[-k(\nu)|\vec{r} - \vec{r}'|] d\nu dV \quad (3)$$

Здесь n_s – концентрация атомов на уровне s ; D_s – коэффициент диффузии атомов сорта s ; n_e – концентрация электронов; α'_{ij} – частота соударений электронов с атомами, приводящих к переходу с уровня i на уровень j в результате ударов I рода в единице объема в единицу времени в расчете на один электрон; ion – номер уровня ионизации; β'_{ji} – частота соударений электронов с атомами, приводящих к переходу с уровня j на уровень i в результате ударов II рода в единице объема, A_{ji} – вероятность спонтанного излучения с уровня j на уровень i . Индекс «н» соответствует уровню, лежащему ниже s , «в» – выше, $\text{div} \vec{Q}_{p,s}$ – дивергенция вектора плотности потока резонансных фотонов. Под плотностью здесь следует понимать поверхностную плотность, т.к. размерность $\vec{Q}_{p,s} - \text{Вт/м}^2$. τ_s – время жизни уровня, обусловленное ударами II рода с электронами, A_{s0} – вероятность спонтанного излучения для резонансного уровня s , $P(\nu)$ и $k(\nu)$ – контур излучения резонансной линии и показатель поглощения.

В качестве начального приближения для дивергенции векторов плотности потока резонансных фотонов $\text{div} \vec{Q}_{p,254}$ и $\text{div} \vec{Q}_{p,185}$ берутся значения, рассчитанные по методу эффективной продолжительности жизни возбуждённого состояния. При проведении дальнейших вычислений $\text{div} \vec{Q}_{p,254}$ и $\text{div} \vec{Q}_{p,185}$ находятся путём численного решения уравнения Бибермана-Холстейна. Входящие в него контуры линий 185 и 254 нм считаются Фойгтовскими:

учитывается естественное уширение линий, резонансное уширение атомами ртути, ударное уширение атомами нейтрального газа и доплеровское уширение. При этом при расчёте контуров линий 254 и 185 нм принимается во внимание наличие у ртути десяти природных изотопов.

После окончания всех итерационных расчётов удельная мощность излучения плазмы рассчитывалась следующим образом:

$$\Phi_{254} = 2\pi\hbar\omega_{254} \int_0^R \operatorname{div}\vec{Q}_{p,254}(r)rdr, \quad \Phi_{185} = 2\pi\hbar\omega_{185} \int_0^R \operatorname{div}\vec{Q}_{p,185}(r)rdr, \quad (4)$$

где \hbar – постоянная Планка, ω_{185} и ω_{254} – частоты, соответствующие центрам резонансных линий ртути.

Для проведения корректного сравнения рассчитанных модельных потоков резонансного излучения с результатами измерений реальных источников при расчёте выхода излучения учитывались френелевское отражение излучения от стенок колбы и поглощение в толще кварца.

В **третьей главе** описаны используемые в работе экспериментальные образцы и методики измерений.

Для экспериментального исследования были изготовлены образцы амальгамных газоразрядных ламп низкого давления с оксидными накаливаемыми электродами с колбой из минерального кварца с различными длинами межэлектродного разрядного промежутка 200-1000 мм и внутренним диаметром 16,6 мм. В качестве буферных газов использовались неон и аргон, а также их смеси в процентном отношении 30Ne/70Ar, 60Ne/40Ar и 85Ne/15Ar, при давлении от 0,1 до 2 Торр. Защитное покрытие на внутреннюю поверхность колб ламп не наносилось. Ток разряда составлял 1,6-3,2 А, частота – 80 кГц.

Для исследования генерации ВУФ излучения применялся вакуумный монохроматор McPherson 218. Поток ВУФ излучения измерялся путём сравнения сигнала от исследуемой лампы с сигналом от калибровочной. Лампы обладали одинаковыми геометрическими параметрами, приемник работал в диапазоне с линейной зависимостью сигнала от интенсивности излучения. Для исключения поглощения ВУФ излучения воздухом, экспериментальная камера заполнялась азотом особой чистоты 99,996%. Электрические характеристики исследуемой лампы (сила и частота разрядного тока, напряжение на лампе и потребляемая мощность) измерялись с помощью анализатора мощности Yokogawa PZ4000. Потери мощности в приэлектродной зоне оценивались путём экстраполяции мощности источника при уменьшении длины разрядного промежутка до нуля по результатам измерения электрической мощности нескольких источников с разной длиной межэлектродного расстояния.

Для исследования характеристик **безэлектродного индукционного разряда** трансформаторного типа были изготовлены образцы ламп в виде одного витка замкнутой кварцевой разрядной трубки с внешним диаметром $d_2 = 19$ мм, внутренним $d_1 = 16,6$ мм и длиной плазменного витка (длина осевой линии замкнутой трубки) $\Lambda_{pl} = 815$ мм. Длина лампы – 492 мм, ширина – 100 мм. В качестве источника паров ртути использовалась амальгама индия; буферный газ - криптон, аргон и смеси аргона с неоном: 30Ne/70Ar и 60Ne/40Ar

при давлении 0,1 - 1,0 Торр. Защитное покрытие на внутреннюю поверхность колб ламп не наносилось. Частота тока разряда составляла 265 кГц.

Для исследования характеристик безэлектродного индукционного разряда трансформаторного типа использовалась установка, показанная на рис. 2. Поток УФ излучения измерялся по методике Кайтца с применением дополнительной диафрагмирующей щели, мощность УФ излучения находится по формуле:

$$\Phi_{254} = \frac{\pi^2 \cdot h d L E}{\Delta}, \quad (5)$$

где L – осевая длина лампы; h – расстояние от лампы до датчика; E – облучённость датчика; d – расстояние от щели до датчика; Δ – ширина щели.

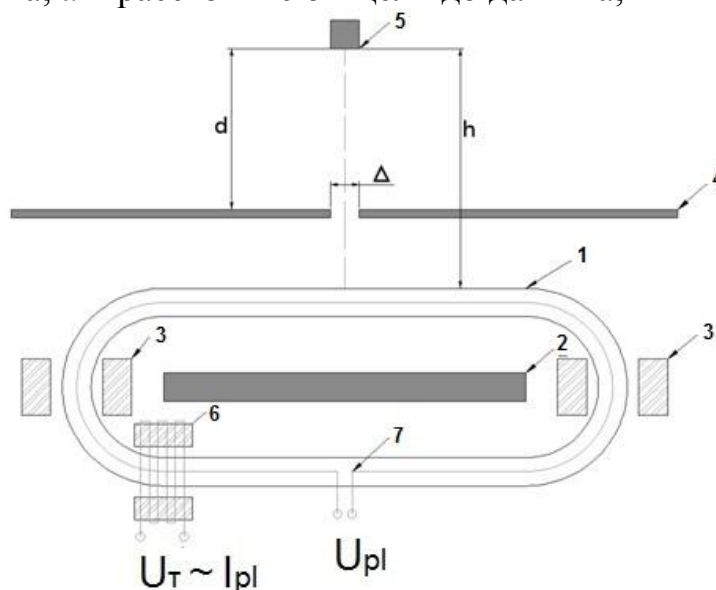


Рис. 2. Схема измерения УФ потока лампы. 1- разрядная трубка, 2 — экран, 3 — индуктор, 4 — короб со щелью, 5 — приёмник излучения, 6 — трансформатор тока, 7 — измерительный виток провода.

Измерения электрических характеристик индукционного разряда проводились с использованием цифрового многоканального осциллографа Tektronix TDS640A. Ток разряда I_{pl} измерялся с помощью предварительно откалиброванного трансформатора тока, а напряжение плазменного витка U_{pl} – с помощью одного измерительного витка провода, расположенного по периметру разрядной трубки.

Для экспериментов по **увеличению срока службы ламп** и влиянию добавок криптона к смеси неон-аргон изготавливались образцы амальгамных ламп из безозонового кварца с внутренним диаметром 25 и 29 мм и длиной межэлектродного разрядного промежутка 220 мм и 1460 мм. При проведении этих экспериментов измерение излучательных характеристик источников выполнялось по схеме Кайтца, электрических параметров – с помощью анализатора мощности Yokogawa PZ4000. Эффективность работы защитных покрытий для газоразрядных ламп низкого давления оценивалась традиционно по спаду мощности УФ излучения с длиной волны 254 нм.

В четвёртой главе представлены основные результаты исследований.

Первый параграф посвящён изучению закономерностей генерации УФ излучения индукционным разрядом трансформаторного типа. Для зависимости потока излучения 254 нм от давления буферного газа (аргон, смесь Ne30/Ar70) обнаружен максимум при давлении 0,3 Торр. При том же давлении достигает максимум и (40%) КПД генерации УФ излучения. Анализ полученных характеристик плазмы индукционного разряда показывает, что генерация УФ излучения линии 254 нм такая же, как в линейных электродных лампах (рис 3).

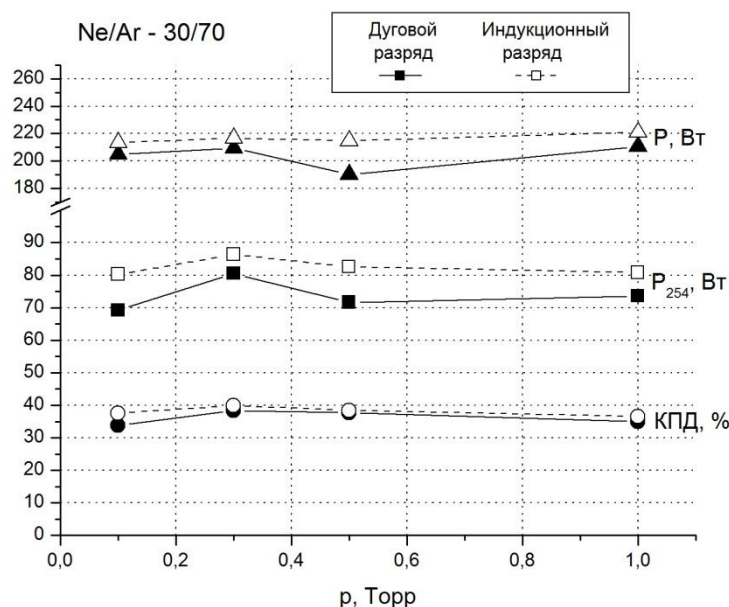


Рис. 3 Поток, КПД генерации УФ излучения 254 нм и мощность дугового электродного (сплошная линия) и индукционного (штриховая линия) разрядов от давления смеси 30Ne/70Ar (для длины разряда 1 м).

Во втором параграфе представлены закономерности генерации УФ излучения ртутным электродным разрядом в смесях неон-аргон и высоких плотностях разрядного тока. Измерена рассеиваемая мощность в приэлектродных слоях электрического разряда в смеси паров ртути и Ne-Ar при частоте тока 80 кГц. Установлено, что величина приэлектродных потерь в основном зависит от плотности тока и давления смеси буферных газов, и слабо зависит от состава газов (рис. 4).

Приведены зависимости потока и КПД генерации ВУФ излучения (далее везде для длины разряда 1 м с учетом приэлектродных потерь) от плотности разрядного тока, состава и давления буферной смеси. Установлено, что при давлении смеси неон-аргон выше 1 Торр повышение плотности тока не приводит к значительному росту потока излучения линии 185 нм, но приводит к значительному снижению КПД его генерации (рис. 5). Обнаружено наличие максимума для мощности излучения и КПД генерации линии 185 нм в области давлений смеси Ne-Ar 0,1 – 0,6 Торр (рис. 5). С повышением доли неона максимум достигается при более высоком давлении. Показано, что КПД

генерации ВУФ излучения выше в смесях неон-аргон, чем в чистых газах. Максимально достигнутое значение КПД генерации излучения 185 нм - 14%.

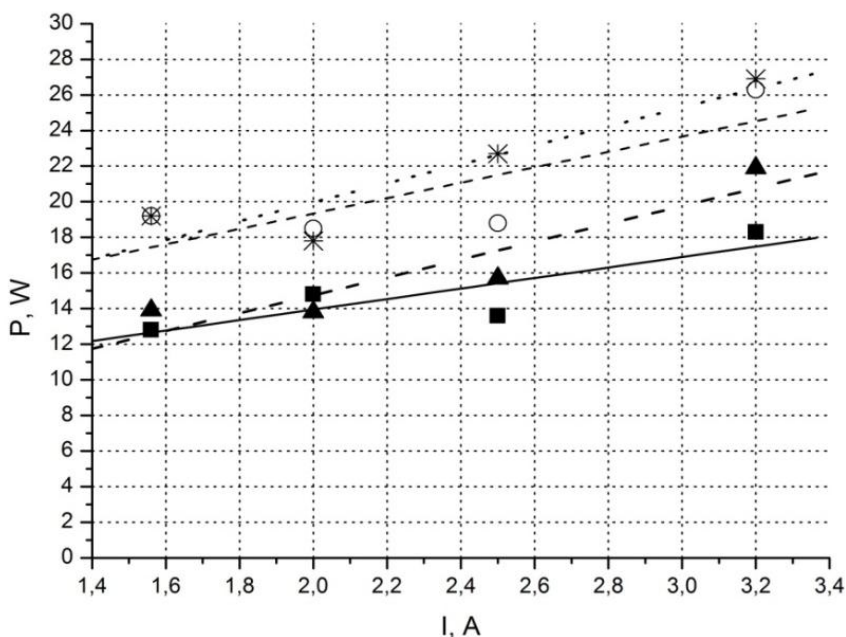


Рис. 4. Зависимости потерь мощности в приэлектродных слоях (P) от величины разрядного тока (I) для различного состава и давления буферной смеси. Квадраты и сплошная линия – Ar 100%, 1 Торр; круги и короткоштриховая линия - Ar 100%, 0,3 Торр; треугольники и длинноштриховая линия – смесь 60/40 (Ne/Ar), 1 Торр; звёзды и линия из точек – смесь 60/40 (Ne/Ar), 0,3 Торр.

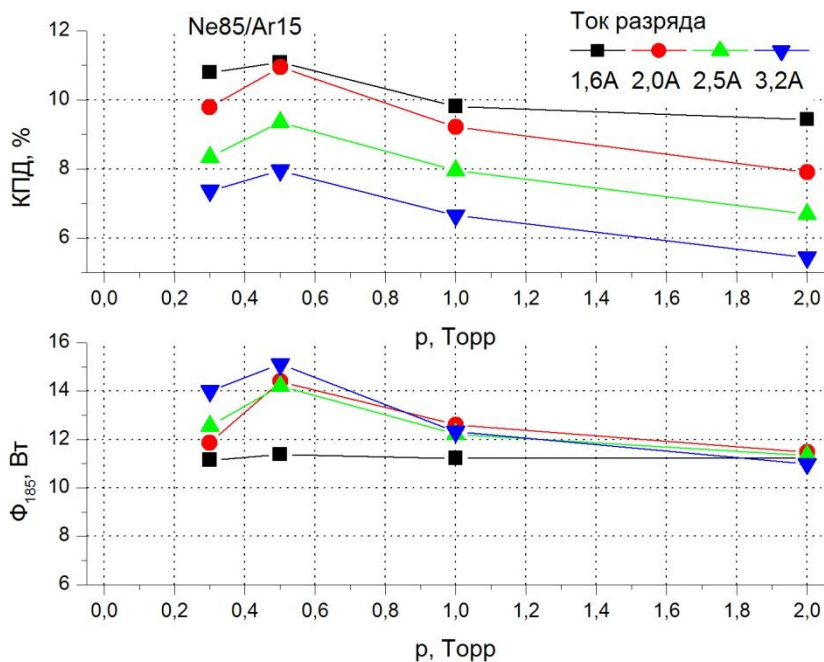


Рис. 5. Зависимость потока и КПД генерации излучения 185 нм от давления (p) ($^{85}\text{Ne}/^{15}\text{Ar}$).

Приведены результаты исследования влияния малых добавок Kr к смеси неон-аргон в ртутных разрядах с высокой погонной мощностью. Установлено, что малая добавка менее 1% Kr к смеси Ne-Ar, позволяет повысить КПД генерации УФ излучения 254 нм и понизить мощность разряда (рис. 6).

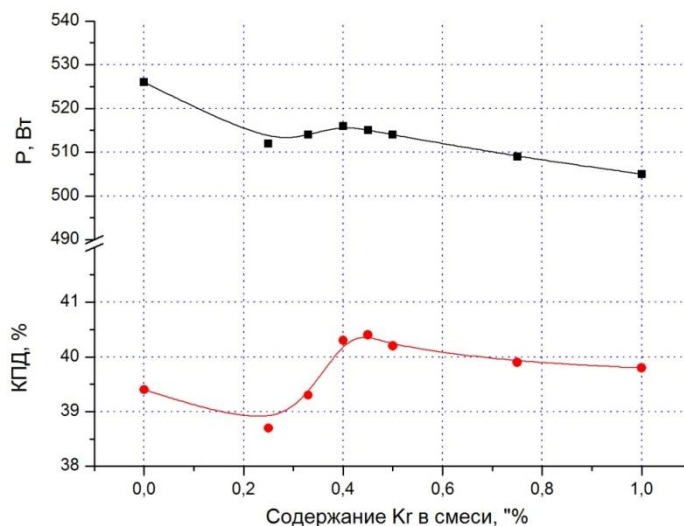


Рис. 6 Мощность и КПД генерации УФ излучения 254 нм в зависимости от процентного содержания криптона в буферной смеси (давление 0,5 Торр).

Третий параграф посвящён сравнению экспериментальных данных с результатами математического моделирования. Показано, что модель хорошо описывает экспериментальные данные в широком диапазоне изменения параметров разряда (Рис. 7).

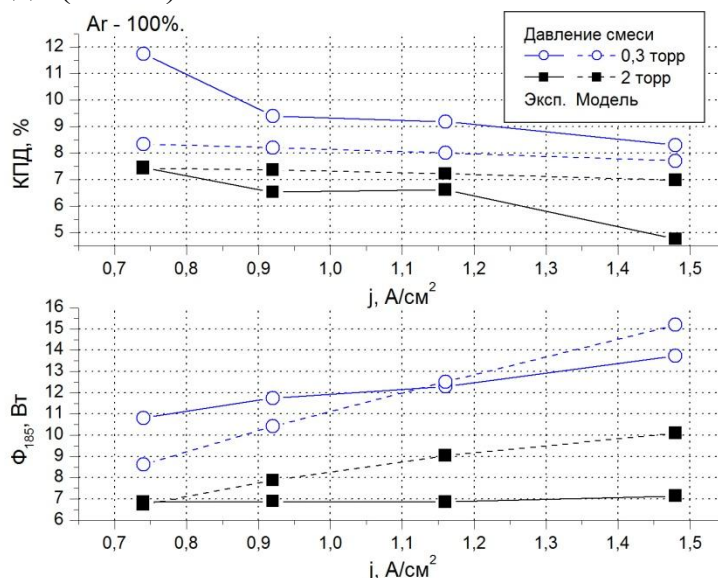


Рис. 7. Зависимость потока и КПД генерации излучения 185 нм от плотности тока. Сплошная линия – эксперимент, штриховая линия – расчёт. Буферный газ – аргон и смесь 60Ne/40Ar. (Для длины разряда– 1м).

В четвёртом параграфе приведены результаты исследований возможных способов увеличения ресурса мощных газоразрядных источников. Показывается, что совмещение удлинения ножек электрода и добавление в буферный газ небольшого количества легко ионизирующегося газа (криптона) позволит увеличить физический срок службы мощных газоразрядных ламп низкого давления в два и более раз.

Экспериментальные исследования защитных покрытий смешанного состава оксид-шпинель для газоразрядных ламп низкого давления с высокой погонной мощностью показали высокую эффективность защитных покрытий смешанного состава оксид-шпинель, на уровне лучших защитных покрытий на основе плёнок оксидов редкоземельных элементов (рис 8).

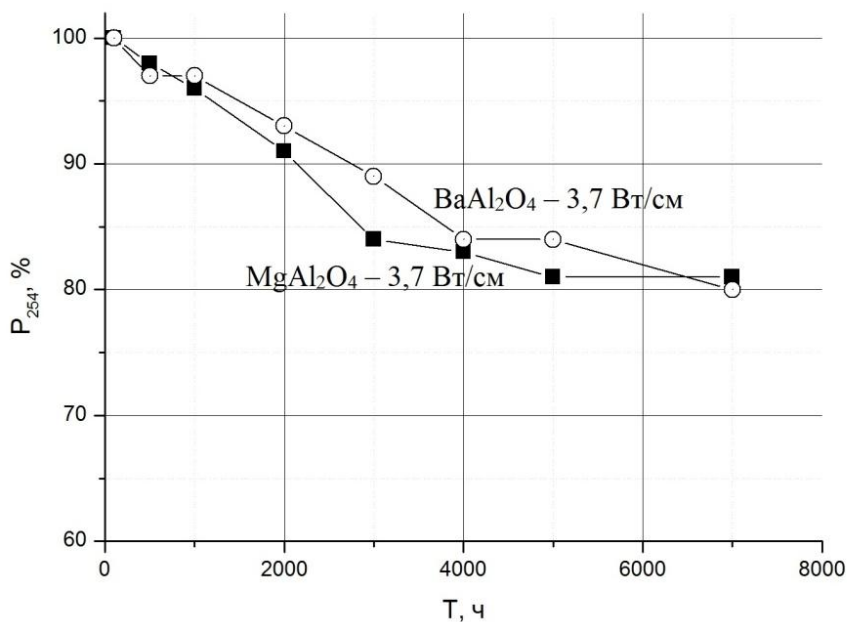


Рис. 8. Мощность УФ излучения P в зависимости от времени горения t лампы с барий-алюминиевым ($BaO-Al_2O_3-BaAl_2O_4$) и магний-алюминиевым ($MgO-Al_2O_3-MgAl_2O_4$) оксидными защитными покрытиями.

В **Заключении** кратко изложены основные полученные результаты.

Впервые получены характеристики индукционного разряда в безэлектродных лампах трансформаторного типа с внутренним диаметром разрядной трубки 16,6 мм для давлений буферной смеси Ne-Ar менее 1 Торр при частоте тока разряда 265 кГц. Показано, что генерация УФ излучения линии 254 нм такая же, как в линейных электродных лампах.

Произведены измерения падения напряжения и величины рассеиваемой мощности в приэлектродных слоях электрического разряда в смеси паров ртути и инертных газов Ne-Ar при частоте тока 80 кГц. Установлено, что величина приэлектродных потерь в основном зависит от плотности тока и давления смеси буферных газов, и слабо зависит от состава газов.

Проведены измерения зависимостей КПД генерации и потока ВУФ излучения линии 185 нм от давления и состава буферной смеси неон-аргон при низких давлениях 0,1-2 Торр и частоте разрядного тока 80 кГц. Обнаружено

наличие максимума для мощности излучения и КПД генерации линии 185 нм в области давлений смеси Ne-Ar 0,1 – 0,6 Торр. Обнаружено, что с повышением доли неона максимум достигается при более высоком давлении. Показано, что КПД генерации ВУФ излучения 185 нм при давлении буферной смеси 0,1-2 Торр выше в смесях неон-аргон, чем в чистых газах. Максимально достигнутое значение КПД генерации излучения 185 нм составило 14% при давлении 0,3 Торр в смеси 30Ne/70Ar и удельном потоке ВУФ излучения, равном 0,11 Вт/см.

Проведены измерения зависимостей КПД генерации и потока ВУФ излучения линии 185 нм от плотности разрядного тока при низких давлениях смеси буферных газов 0,1-2 Торр и частоте разрядного тока 80 кГц. Установлено, что при давлении смеси неон-аргон выше 1 Торр повышение плотности тока не приводит к значительному росту потока ВУФ излучения 185 нм, но приводит к значительному снижению КПД его генерации. При давлении смеси неон-аргон ниже 1 Торр повышение плотности тока приводит к увеличению потока (до 1,5 раз), но при снижении КПД его генерации.

Модифицирована замкнутая самосогласованная модель электрического разряда в парах ртути с учетом частичного перемешивания уровня линии 185 нм и впервые выполнены расчеты параметров ртутного разряда для смесей неон-аргон при давлении 0,1 – 2 Торр и выхода резонансного излучения на длинах волн 185 и 254 нм. Получено хорошее согласие с экспериментом.

Изучено влияние малых добавок Kr к буферной смеси неон-аргон в газоразрядных лампах низкого давления с высокой погонной мощностью. Установлено, что малая добавка менее 1% Kr к смеси Ne-Ar, позволяет повысить КПД генерации УФ излучения и существенно понизить мощность разряда. Обнаружено, что малая добавка криптона позволяет увеличить в 2 раза физический срок службы лампы.

Экспериментальные исследования защитных покрытий смешанного состава оксид-шпинель для газоразрядных ламп низкого давления с высокой погонной мощностью показали высокую эффективность защитных покрытий смешанного состава оксид-шпинель, на уровне лучших защитных покрытий на основе плёнок оксидов редкоземельных элементов.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ДИССЕРТАЦИИ ОПУБЛИКОВАНЫ В СЛЕДУЮЩИХ РАБОТАХ:

1. Свитнев С.А., Старшинов П.В., Левченко В.А., Попов О.А. Экспериментальные исследования электрических и оптических характеристик безэлектродной УФ-лампы трансформаторного типа // Светотехника. 2014. №6. С. 39-43.
2. Свитнев С.А., Попов О.А., Левченко В.А. Характеристики высокочастотной 13,56 МГц бесферритной индукционной ультрафиолетовой лампы // Прикладная физика. 2015. №6. С. 92-97
3. Levchenko V. A., Vasilyak L. M., Kostyuchenko S. V., Kudryavtsev N. N., Svitnev S. A., Sokolov D. V., Shunkov Yu. E. Protective Coatings with a Mixed Composition for Low_Pressure Discharge Amalgam Lamps // Surface Engineering and Applied Electrochemistry. 2015. Vol. 51. No. 1. P. 54–57.

4. Василяк Л.М., Воронов А.М., Костюченко С.В., Кудрявцев Н.Н., Левченко В.А., Собур Д.А., Соколов Д.В., Шунков Ю.Е. Влияния синусоидальной и прямоугольной форм тока повышенной частоты на резонансное излучение ртутного разряда НД // Светотехника. – 2015. - №1. – С.50-52.
5. Левченко В.А., Васильев А.И., Василяк Л.М., Костюченко С.В., Кудрявцев Н. Н. Увеличение физического срока службы мощных газоразрядных ламп низкого давления // Прикладная физика, 2015, №5. С. 90-94.
6. Левченко В. А., Старшинов П. В., Свитнев С. А., Попов О. А., Костюченко С. В. Влияние давления инертного газа на генерацию УФ-излучения лампы трансформаторного типа с разрядной трубкой малого диаметра // Прикладная физика. 2016. №1. С. 66-71.
7. Левченко В.А., Попов О.А., Свитнев С.А., Старшинов П.В. Электрические и излучательные характеристики лампы трансформаторного типа с разрядной трубкой диаметром 16,6 мм. Светотехника. 2016. №1. С. 41-44.
8. Василяк Л.М., Кудрявцев Н.Н., Левченко В.А., Шунков Ю.Е. Экспериментальное исследование генерации ВУФ излучения разрядом низкого давления в смеси паров ртути и инертного газа. // Физическое образование в вузах. 2015. Т.21. №1С. С 67.
9. Свитнев С.А., Попов О.А., Левченко В.А., Старшинов П.В. Характеристики бесферритного индукционного разряда низкого давления. Часть 1. Электрические параметры индуктивной катушки // Успехи прикладной физики. 2016. № 2. С. 139-149.
10. Шунков Ю.Е., Попов О.А., Левченко В.А. Экспериментальное изучение генерации ВУФ излучения разрядом низкого давления в смеси паров ртути и инертных газов на частоте 10-80 кГц // Вестник МЭИ. 2014. №2. С. 51-55.
11. Левченко В.А., Василяк Л.М., Костюченко С.В., Кудрявцев Н.Н., Свитнев С.А., Шаранов Е.П. ВУФ излучение ртутного разряда при давлении буферного газа менее 1 Торр // Успехи прикладной физики. 2016. № 3. С. 256-264.

Левченко Владимир Александрович

ГЕНЕРАЦИЯ УЛЬТРАФИОЛЕТОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ РТУТНЫМ
РАЗРЯДОМ С ВЫСОКОЙ ПЛОТНОСТЬЮ ТОКА ПРИ НИЗКИХ
ДАВЛЕНИЯХ

Автореферат

Подписано в печать		Формат 60x84/16
Печать офсетная	Уч.-изд.л. 1,0	Усл.-печ.л. 0,93
Тираж 100 экз.	Заказ №	Бесплатно

Отпечатано ООО «Печатный салон ШАНС», Москва, ул. Ижорская, д 13, стр 2