

На правах рукописи

**ЛЕВЧЕНКО ВЛАДИМИР АЛЕКСАНДРОВИЧ**

УДК 533.9

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

01.04.08 – физика плазмы

Диссертация на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Научный руководитель  
доктор физико-математических наук,  
Василяк Л.М.

Москва – 2016

## ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение .....	4
1. Литературный обзор .....	16
1.1. Классификация УФ излучения.....	16
1.2. Области применения УФ-излучения. ....	17
1.3. Исследования разряда низкого давления с парами ртути .....	19
1.3.1. Разработка источников УФ излучения на основе ртутного разряда низкого давления.....	19
1.3.2. Математическое моделирование процессов в плазме ртутного разряда низкого давления.....	22
1.4. Генерация УФ излучения ртутным разрядом низкого давления.....	25
1.5. Параметры, определяющие эффективность генерации резонансного излучения плазмой ртутного разряда.....	27
1.6. Поддержание оптимального давления паров ртути при высоких удельных мощностях разряда .....	36
1.7. Ресурс источников УФ излучения .....	37
1.8. Заключение к обзору литературы .....	41
2. Модель разряда.....	43
2.1. Основные уравнения модели.....	43
2.2. Заключение к главе 2.....	54
3. Экспериментальная установка и методики измерений.....	55
3.1. Объекты исследования.....	55
3.2. Методики измерения потока УФ излучения.....	59
3.3. Методики измерения электрических и излучательных характеристик трубчатых ламп трансформаторного типа.....	61

3.4.	Методика измерения потока излучения и электрических характеристик линейных озоногенерирующих ламп.....	64
3.5.	Методика измерения падения мощности в приэлектродных слоях.....	73
3.6.	Методика исследования эффективности защитных покрытий .....	74
3.7.	Заключение к главе 3.....	75
4.	Результаты экспериментов и их обсуждение.....	77
4.1.	Характеристики индукционного разряда.....	77
4.1.1.	Зависимости электрических и излучательных характеристик индукционного разряда от давления и состава буферной смеси.....	77
4.1.2.	Сравнение характеристик индукционного и дугового электродного разрядов.....	81
4.2.	Характеристики дугового разряда в линейной электродной лампе.....	84
4.2.1.	Зависимости падения мощности в приэлектродных слоях.....	84
4.2.2.	Зависимости КПД и потока ВУФ излучения 185 нм от давления и состава буферной смеси неон-аргон .....	86
4.2.3.	Зависимости КПД и потока ВУФ излучения 185 нм от плотности разрядного тока .....	94
4.2.4.	Влияние малых добавок криптона к буферной смеси неон-аргон на генерацию УФ излучения.....	97
4.3.	Сравнение экспериментальных данных с модельным расчетом.....	105
4.4.	Увеличение срока службы ламп .....	111
4.4.1.	Ресурс электродного узла лампы.....	111
4.4.2.	Перспективные защитные покрытия.....	118
4.5.	Заключение к главе 4.....	123
	Заключение.....	126
	Список литературы.....	129

## **Введение**

### **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 ( $\text{OH}^\cdot$ ). Сочетание излучения с длинами волн 254 и 185 нм может применяться для фотохимической очистки воздуха от вредных веществ и запахов за счет наработки радикалов и фотохимических реакций разложения. Причем 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. 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  $\text{м}^3/\text{час}$ . Во многих развитых промышленных странах воздействие запахов на людей считается опасным; введены нормативы на концентрацию запахов, даже если концентрация вредных веществ находится в рамках допустимых нормативов. Поэтому разработка мощных эффективных источников УФ и ВУФ излучения для очистки воздуха является важной актуальной задачей.

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. В связи с этим к настоящему моменту закономерности генерации излучения с длиной волны 254 нм ртутным разрядом низкого давления 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, более благоприятных для генерации высокоэнергетичных квантов излучения с длиной волны 185 нм. Это ставит разработчиков таких источников ВУФ излучения в затруднительное положение, поскольку к промышленным источникам предъявляются высокие требования по мощности, эффективности и полезному сроку службы.

При разработке амальгамных газоразрядных ламп низкого давления (как электродных, так и безэлектродных) необходимо определить ряд параметров, существенно влияющих на мощность и эффективность генерации излучения. В числе этих параметров находятся: давление, состав смеси буферных газов и плотность разрядного тока. Сузить поле поисков позволяют численные модели разряда. Тем не менее, 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, а уточнение существующих моделей разряда – научной задачей. Поэтому детальное 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.

### **Цель работы.**

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/см<sup>2</sup> с частотами десятки

килогерц и сравнение полученных данных с результатами модельного расчета в этой области.

Практический интерес представляет разработка специализированных газоразрядных источников УФ излучения, обладающим 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.**

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%) Кг 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.

#### **Основные 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.

#### **Достоверность полученных результатов.**

Достоверность полученных результатов определяется следующими факторами:

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 результатами экспериментальных исследований.

### **Практическая и научная значимость результатов.**

Практическая и научная значимость полученных результатов заключается в получении экспериментальных данных по генерации ВУФ излучения электрическим разрядом низкого давления в смеси паров ртути и инертных газов в неисследованной до этого области давлений буферного газа 0,1 – 1 Торр. Полученные данные, в том числе результаты проведенных исследований по увеличению срока службы, могут быть применены при разработке новых мощных эффективных источников ВУФ/УФ излучения (как электродных, так и безэлектродных ламп), а также использованы для улучшения существующих математических моделей, описывающих генерацию УФ излучения ртутным разрядом низкого давления.

### **Личный вклад автора.**

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.

### **Апробация работы.**

Основные результаты диссертации докладывались на следующих международных и всероссийских конференциях:



Международная конференция молодых учёных и аспирантов «IEF 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.

#### **Список основных публикаций.**

По результатам работы опубликовано 26 печатных работ, из которых 11 опубликованы в рецензируемых научных журналах, из них 11 – в журналах,

входящих в список ВАК, 15 – в сборниках материалов всероссийских и международных конференций.

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.

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

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.

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.

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.

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.

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.

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.

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.

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.

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 В.А., Свитнев С.А., Шунков Ю.Е., Собур Д.А., Костюченко С.В., Кудрявцев Н.Н. Экспериментальное исследование закономерностей генерации УФ-излучения безэлектродными бесферритными лампами с аксиальным расположением индуктора // Тезисы докл. международной конференции молодых учёных и аспирантов «ИЕФ 2013». Ужгород, 20-23 мая 2013 г, С. 87-88.

Левченко В.А., Свитнев С.А., Шунков Ю.Е., Собур Д.А., Костюченко С.В., Василяк Л.М., Кудрявцев Н.Н. Характеристики линейной бесферритной лампы с аксиальным расположением индуктора на частоте 13.56 МГц // Материалы X международной конференции «Волновая электрогидродинамика проводящей жидкости. Долгоживущие плазменные образования и малоизученные формы естественных электрических разрядов в атмосфере». Ярославль, 04-08 июля 2013 г. С. 132-135.

Левченко В.А., Соколов Д.В., Костюченко С.В., Кудрявцев Н.Н., Шунков Ю.Е. Новый источник бактерицидного излучения повышенной мощности для установок обеззараживания воды // Материалы Всероссийской конференции «Современные проблемы физики плазмы». Махачкала, 25-27 октября 2013 г. С. 92-95.

Левченко В.А., Соколов Д.В., Костюченко С.В., Кудрявцев Н.Н., Шунков Ю.Е., Ермаков В.Н. Новое поколение источников бактерицидного излучения для установок обеззараживания воды // Труды 56-й научной конференции МФТИ, Всероссийской научной конференции «Актуальные проблемы фундаментальных и прикладных наук в современном информационном обществе», Всероссийской молодёжной научно-инновационной конференции «Физико-математические науки: актуальные проблемы и их решения». Москва-Долгопрудный-Жуковский, 25-30 ноября 2013 г. Молекулярная и химическая физика. С. 36-38.

Костюченко С.В., Кудрявцев Н.Н., Левченко В.А., Соколов Д.В., Шунков Ю.Е. Новая высокоэффективная газоразрядная лампа низкого давления повышенной мощности // Тезисы докл. XLI Международной Звенигородской конференции по физике плазмы и УТС. Звенигород, 10-14 февраля 2014 г. С. 242.

Левченко В.А., Василяк Л.М., Костюченко С.В., Кудрявцев Н.Н., Свитнев С.А., Соколов Д.В., Шунков Ю.Е. Экспериментальное исследование покрытий смешанного состава для амальгамных газоразрядных ламп низкого давления // Тезисы докл. III международной молодёжной научной школы-конференции «Современные проблемы физики технологий». Москва, 10-13 апреля 2014 г. С. 278-280.

Левченко В.А., Василяк Л.М., Костюченко С.В., Кудрявцев Н.Н., Собур Д.А., Старшинов П.В., Шаранов Е.П., Шунков Ю.Е. Исследование генерации ВУФ излучения ртутным разрядом при давлении буферного газа менее 1 Торр. // Материалы VIII Всероссийской конференции по физической электронике. Махачкала, 20-22 ноября 2014 г. С. 132-134.

Свитнев С.А., Левченко В.А., Старшинов П.В., Попов О.А., Шунков Ю.Е., Кудрявцев Н.Н. Характеристики УФ-лампы трансформаторного типа с разрядной трубкой диаметром 19 мм. // Материалы VIII Всероссийской конференции по физической электронике. Махачкала, 20-22 ноября 2014 г. С. 165-168.

Левченко В.А., Василяк Л.М., Кудрявцев Н.Н., Костюченко С.В., Собур Д.А., Старшинов П.В., Шунков Ю.Е. Экспериментальное исследование генерации УФ-

излучения ртутного разряда при давлениях буферного газа менее 1 Торр. // Труды 57-й научной конференции МФТИ, Всероссийской научной конференции с международным участием: «Актуальные проблемы фундаментальных и прикладных наук в области физики», Международной молодежной научной конференции «Актуальные проблемы фундаментальных и прикладных наук в современном информационном обществе». Москва-Долгопрудный-Жуковский, 24-29 ноября 2014 г. Молекулярная и химическая физика. С. 40-42.

Левченко В.А., Василяк Л.М., Костюченко С.В., Кудрявцев Н.Н., Собур Д.А., Старшинов П.В., Шаранов Е.П., Шунков Ю.Е. Исследование генерации ВУФ излучения ртутным разрядом при давлении буферного газа менее 1 Торр. // Тезисы докл. XLII Международной Звенигородской конференции по физике плазмы и УТС. Звенигород, 9-13 февраля 2015 г. С. 207.

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. // Труды конференции-конкурса молодых физиков. Москва, 2 марта 2015 г. С 76.

Левченко В.А. Генерация ВУФ излучения электрическим разрядом в смеси паров ртути и инертного газа при давлении буфера менее 1 Торр. Материалы двадцать первой Всероссийской научной конференции студентов-физиков и молодых учёных «ВНКСФ-21». Омск, 26 марта – 2 апреля 2015 года. С. 227-228.

Левченко В.А. Генерация ВУФ излучения ртутным разрядом при давлении буферного газа менее 1 Торр. // Материалы II Всероссийской конференции «Современные проблемы физики плазмы и физической электроники». Махачкала, 25-28 ноября 2015 г. С. 108-111.

Старшинов П.В., Свитнев С.А., Попов О.А., Левченко В.А. Электрические и излучательные характеристики плазмы индукционного разряда с трубкой малого диаметра. // Материалы II Всероссийской конференции «Современные проблемы физики плазмы и физической электроники». Махачкала, 25-28 ноября 2015 г. С. 124-126.

Левченко В.А., Василяк Л.М., Кудрявцев Н.Н., Собур Д.А., Шаранов Е.П. Генерация ВУФ излучения ртутным разрядом низкого давления. // Тезисы докл. XLIII Международной Звенигородской конференции по физике плазмы и УТС. Звенигород, 8-12 февраля 2016 г. С. 212.

### **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 насчитывает 117 наименований.

Первая глава диссертации отведена анализу литературы, посвященной генерации УФ излучения ртутным разрядом низкого давления. Описываются физические принципы генерации УФ излучения электрическим разрядом в смеси паров ртути и инертного газа, указываются параметры, влияющие на эффективность генерации УФ излучения ртутным разрядом низкого давления. Приводится обзор источников УФ излучения, математических моделей, описывающих электрический разряд в смеси паров ртути и инертного газа, указываются основные проблемы практического характера в сфере применения и разработки новых источников УФ излучения.

Во второй главе диссертации изложена замкнутая математическая модель разряда. Приводится обширный массив данных, полученных в результате математического моделирования электрического разряда в смеси паров ртути и смесей неон-аргон при различных условиях.

В третьей главе диссертации описываются исследованные источники УФ излучения, а также приводится описание методик измерения потока УФ излучения и электрических параметров образцов. Описаны использованные в работе экспериментальные установки.

В четвертой главе приводятся результаты экспериментальных измерений параметров ртутного разряда низкого давления при различных условиях, приводится сравнение экспериментальных и расчетных данных и их обсуждение. Последний параграф четвертой главы посвящён вопросу увеличения физического и

полезного ресурса мощных газоразрядных источников УФ излучения. Описываются методы, позволяющие увеличить ресурс источников, в подтверждение приводятся результаты экспериментов.

В заключении к диссертации сформулированы основные выводы по результатам математического моделирования и экспериментальных исследований электрического разряда в смеси паров ртути и инертных газов.

# 1. Литературный обзор

## 1.1. Классификация УФ излучения

Электромагнитное излучение принято делить по диапазонам от гамма-излучения с длиной волны менее 5 пм до длинноволновых радиоизлучений с длинами волн более десяти километров. В зависимости от выбранного диапазона (длины волны) свойства электромагнитного излучения и его воздействие на окружающую среду значительно изменяется и определяется, прежде всего, энергией его кванта [1]. Во всём диапазоне электромагнитных излучений выделяется оптическая область спектра с длинами волн 10 нм – 1 мм, а в ней - ультрафиолетовое излучение (10 - 380 нм). УФ излучение было открыто в 1801 году Иоганном Вильгельмом Риттером [2]. А в 1893 году Виктор Шуман обнаружил излучение с длиной волны менее 200 нм, впоследствии названное вакуумным ультрафиолетом (ВУФ – излучение) [3]. Согласно международным стандартам выделяется несколько подвидов УФ – излучения, приведённых ниже (Таблица 1.1).

Таблица 1.1. Типы УФ-излучения, согласно ISO 21348:2007

Наименование вида УФ - излучения	Аббревиатура	Диапазон длин волн, нм	Энергия фотона, эВ
Ближний	NUV	400— 300	3.10 — 4.13
Средний	MUV	300— 200	4.13 — 6.20
Дальний	FUV	200— 122	6.20 — 10.2
Экстремальный	EUV, XUV	121— 10	10.2 — 124
Вакуумный	VUV (ВУФ)	200— 10	6.20 — 124
Ультрафиолет А	UVA (УФ-А)	400— 315	3.10 — 3.94
Ультрафиолет В	UVB (УФ-В)	315— 280	3.94 — 4.43
Ультрафиолет С	UVC (УФ-С)	280— 100	4.43 — 12.4

УФ излучение с длиной волны менее 200 нм (за исключением небольшой полосы прозрачности в районе 120 нм [4]) активно поглощается молекулярным

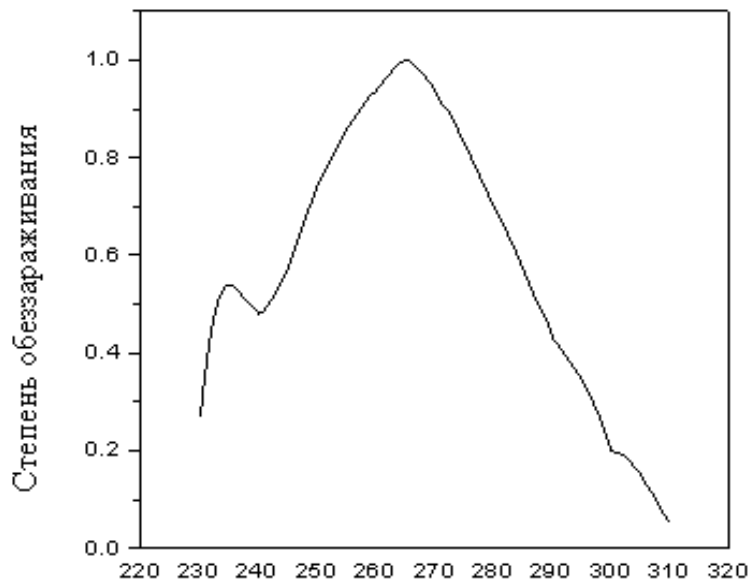


кислородом воздуха с образованием озона. Именно этим обуславливается верхняя граница области ВУФ – излучения, которое также называют озонирующим.

## **1.2. Области применения УФ-излучения.**

Эффект стерилизации жидкостей под воздействием солнечного излучения известен с 1877 года [5]. В 1903 году Нобелевскую премию по физиологии и медицине получил Нильс Финсен за открытие нового направления в медицине – фототерапии и лечение волчаночного туберкулеза оптическим излучением. Тогда же, Барнард и Морган обнаружили, что излучение в диапазоне 226-329 нм обладает бактерицидным эффектом [6]. Через год в фирме Heraeus была разработана первая ртутная кварцевая лампа, предназначенная для решения задач уличного освещения. Люминесцентные лампы на основе электрического разряда в парах ртути и инертного газа в настоящее время широко распространены и практически вытеснили классические лампы накаливания в промышленном и уличном освещении.

Позднее было продемонстрировано обеззараживающее действие ртутных ламп низкого давления [7]. Бактерицидное излучение широко используется при подготовке питьевых и сточных вод, очистке поверхностей и воздуха, в сельском хозяйстве и пищевой промышленности, а также в биохимии. Обеззараживающий (бактерицидный) эффект связан со способностью УФ-С излучения нарушать структуру ДНК [7-9]. При этом эффективность воздействия УФ излучения характеризуется кривой относительной спектральной бактерицидной эффективности (рис. 1.1), практически не зависящей от видов микроорганизмов - бактерий, вирусов, грибков и простейших одноклеточных [10], так как связана с законами построения ДНК всех живых организмов. Однако стоит отметить, что дозы, необходимые для достижения бактерицидного эффекта могут отличаться на порядки.



*Рис. 1.1. Кривая бактерицидной эффективности УФ излучения.*

Другим важной областью применения УФ излучения является использование ртутных разрядных источников, в спектре которых присутствуют две яркие резонансные линии 185 и 254 нм [11-13], для наработки озона. Озон также обладает обеззараживающим воздействием, так как имеет высокий окислительный потенциал (2,07 В) и способен деполимеризовывать органические молекулы.

В 1972 году Болоном и Кунцом была обнаружена возможность разрушения фоторезистивных полимеров с помощью совместного применения излучения УФ-С спектра и озона [14]. Начиная с 1974 года, исследовалась возможность очищения поверхности от различных типов загрязнений, путем обработки совместно УФ - излучением и озоном [15]. Интерес также представляется класс процессов, называемый как АОП – advanced oxidation processes. К этому классу относят процессы окисления неорганических и органических соединений с участием ОН – радикалов, озона и пероксида водорода ( $H_2O_2$ ) в воде [16]. Совместное использование озона и излучения на длине волны 254 нм представляет

практический интерес для очистки воздуха от загрязняющих органических соединений, а также  $H_2S$  в промышленных масштабах.

Для получения озона в промышленных масштабах используют электросинтез барьерным разрядом [17,18], коронный дуговой (плазмотроны) или поверхностный разряды. Однако для эффективного применения этих методов необходимо использовать осушенный кислород, а обрабатываемая смесь должна остужаться, так как увеличение температуры приводит к ускорению нежелательной термической диссоциации молекул наработанного озона.

Установки для получения озона из воздуха путём воздействия на него ВУФ излучения обладают меньшей эффективностью по сравнению с разрядными генераторами, однако, по ряду причин, такой механизм представляет интерес [19]:

- удобство сочетания наработанного озона с УФ излучением на длине волны 254 нм для очистки воздуха;

- установки для удаления запахов на очистных сооружениях работают при повышенной влажности, что приводит к нецелесообразности использования разрядных генераторов;

- использование разрядных источников УФ излучения удобно для моделирования фотохимических процессов образования озона в верхних слоях атмосферы, поскольку природный озон в естественных условиях образуется под воздействием УФ составляющей солнечного излучения;

- при использовании УФ источников для наработки озона не образуются оксиды азота, что при научных исследованиях физико-химических реакций важнее энергетических затрат.

### **1.3. Исследования разряда низкого давления с парами ртути**

#### **1.3.1. Разработка источников УФ излучения на основе ртутного разряда низкого давления**

Электрический разряд в газах является самым распространенным источником УФ-излучения. Развитие газоразрядных источников в основном связано с созданием

закрытых *дуговых электродных* источников. Первые попытки их создания были предприняты в 40-х годах XIX века. Но реальная возможность создать лампы такого типа появилась лишь после разработки специальных стекол, позволявших создать вакуумно плотные электровводы, и вакуумной техники, необходимой для откачки и заполнения колб инертным газом.

Газовый разряд при низком давлении обладает характерным для данного газа эмиссионным спектром. Данный факт был открыт около 1850 года Плюккером и Г. Гейслером [20]. В это же время в Германии появились люминесцентные лампы из «уранового стекла», т.н. Гесслеровские трубки. Конструкция лампы, в которой использовалась жидкая ртуть в качестве электродов и источников паров, в которых горела дуга, была предложена И. Репьевым в 1879 г. [21]. Первые образцы пригодных для использования ламп такого типа были предложены в 1901-1902 гг. П. Купер-Хьюитом. Колбы из кварцевого стекла стали применять с 1904 г. Позже, использование твердотельных активированных оксидами щелочноземельных металлов катодов позволило сделать возможным работу ламп в промышленных электросетях (127-220 В), поскольку они обладают небольшим прикатодным падением напряжения по сравнению с холодными твердотельными катодами.

Вскоре (в 1920 г.) было обнаружено, что ртутный разряд низкого давления чрезвычайно эффективен при генерации УФ излучения [20] и при соблюдении правила Стокса (энергия возбуждающих квантов должна превосходить энергию квантов люминесценции) квантовый выход преобразования возбуждающего излучения в люминесценцию может приближаться к единице. Было установлено, что УФ излучение можно эффективно использовать для освещения после разработки подходящих люминофоров. Первые образцы современных люминесцентных ламп были разработаны в лаборатории В.А. Фабриканта в 1940 г. [22].

В середине 30-х годов XX века также были разработаны надежные вакуумно-плотные токовводы в кварцевое стекло, после чего УФ - излучение ртутного разряда низкого давления стало широко применяться, поскольку использование

соответствующих колб и люминофоров позволяет ртутным лампам генерировать излучение практически во всех областях УФ - спектра.

Наравне с дуговым электродным разрядом велись исследования и безэлектродного разряда, впервые полученного Хитторфом в 1884 году [23]. В 1907 году был запатентован принцип *индукционного* возбуждения разряда [24]. Первая успешная попытка создания безэлектродной люминесцентной лампы, работающей на сравнительно низкой частоте (100-500 кГц), была предпринята Андерсоном в 70-х годах XX века [25]. Тем не менее, стоит отметить, что эффективность лампы была невелика в виду отсутствия достаточно хороших ферромагнитных сердечников. Лампа Андерсона является прообразом современных индукционных ламп трансформаторного типа (рис. 1.2). В лампах подобного типа индукционный разряд возбуждается однородным по сечению трубки электрическим полем, направленным вдоль оси трубки. При этом разряд образует замкнутый плазменный виток [26-31].

При частотах разрядного тока  $\sim 1-20$  МГц поддержание разряда можно получить в линейном (или более сложной формы) источнике с помощью обычной катушки индуктивности, которая помещается либо внутри разрядного промежутка, либо охватывает разряд снаружи.

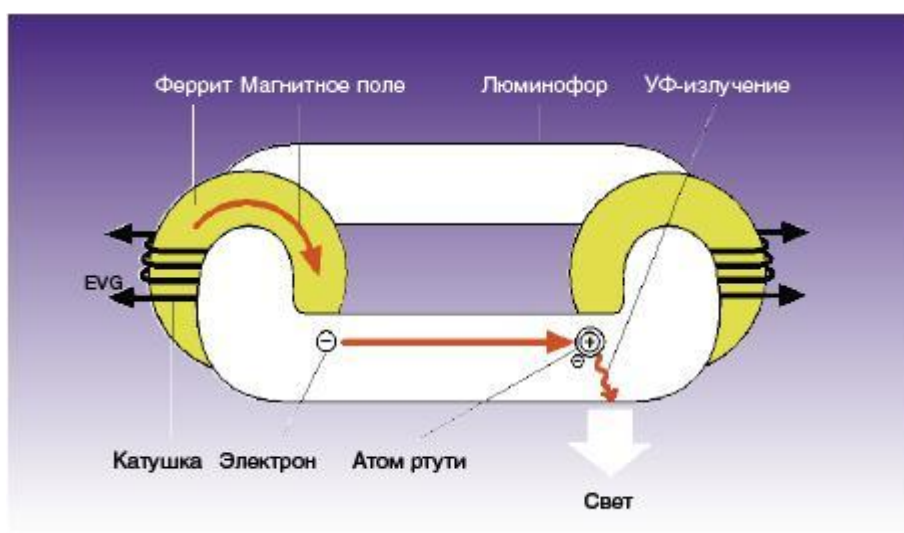


Рис. 1.2. Эскиз лампы трансформаторного типа.

В настоящее время разработаны и изучены характеристики нескольких видов безэлектродных источников, не являющихся лампами трансформаторного типа. К ним можно отнести, например, длинные цилиндрические трубки с одной или несколькими индуктивными катушками, охватывающими трубку по окружности [32-34] или охватывающими колбу вдоль оси [35]. Форма лампы может быть и сферической или эллиптической, а индуктор располагаться снаружи [36-38], или внутри вогнутых полостей на теле лампы [35,39].

### **1.3.2. Математическое моделирование процессов в плазме ртутного разряда низкого давления**

Разработка математических моделей ртутных ламп низкого давления была начата одновременно с установлением возможности их массового применения в освещении. Среди работ этого периода необходимо отметить работы К. Кенти [40], Д. Уэймауса и Ф. Битера [41], М. Кейлеса [42], Ф.А. Уварова и В.А. Фабриканта [43]. Модели, представленные в этих работах, изложены, например, в [12,20,44]. Впоследствии математические модели продолжали развиваться и усложняться [45-47]. И в современных моделях учитываются практически все процессы, происходящие в ртутном разряде низкого давления, причем применяется строгий интегральный подход на основе численного решения входящий в модель уравнений [48]. В этой работе также предложен метод учёта переноса резонансного излучения.

Исследования разряда на постоянном, переменном и импульсно-периодическом токе приведены в [44]. Особо стоит обратить внимание на то, что в этой работе большое внимание уделяется расчёту функции распределения электронов по энергиям (ФРЭЭ), отличной от равновесной (максвелловской) для электронов с энергией выше 4,7 эВ. Были также попытки предложить модели на основе двухтемпературной ФРЭЭ [49].

Попытки решения кинетического уравнения Больцмана в нелокальном приближении для расчёта ФРЭЭ предприняты также в работах [50-52]. При этом учитывалось влияние ассоциативной ионизации на протекание ионизационных процессов в плазме, и было выяснено, что такого рода процессы оказывают

существенное влияние на градиент потенциала в разряде, уменьшая его. Это приводит к уменьшению концентрации возбужденных состояний атома ртути и снижению генерации и выхода резонансного излучения из плазмы. [46]. В работах Х.А. Поста было существенно уточнено сечение прямого возбуждения атома ртути в состоянии  $6^1P_1$  и определено сечение ступенчатого возбуждения уровня  $6^1P_1$  с уровней  $6^3P_{0,1,2}$  [53]. Позднее, В.П. Каланов в своих работах обнаружил, что доля ступенчатого и прямого возбуждения уровня  $6^1P_1$  в условиях плазмы ртутного разряда низкого давления сравнимы. Им были определены сечения соответствующих процессов, оказавшиеся близкими к значениям, полученным ранее Х.А. Постом.

В исследованиях Д. Вильгельма и Р. Винклера было показано, что методы расчета характеристик столба разряда реальных ртутных источников должны включать процессы, связанные с наличием молекулярных газов, в большей степени отвечающих за скорость диффузии электронов и возбужденных атомов ртути к стенкам разрядных трубок. Ими была описано изменение ФРЭЭ при изменении давления паров ртути, силы разрядного тока, давления инертного газа и давления примесных газов для одного диаметра трубки (36 мм). Делается вывод о недопустимости повышения парциального давления азота и водорода в разряде выше 0.013 Па [46].

Исследования индукционного разряда связаны в основном с изучением безэлектродного разряда трансформаторного типа, а первые модели были предложены ещё в начале XX века английским физиком Дж. Томсоном [54]. В этом подходе индукционная лампа рассматривается как трансформатор, первичной обмоткой которого является обмотка индуктора, а вторичной – замкнутый плазменный виток. Эта модель использовалась при исследовании индукционного разряда низкого давления в 20-е годы XX века [55], и позднее, Эккертом и Андерсеном в трансформаторных лампах с кольцевыми магнитопроводами [56-58]. Также данный тип разряда исследовали Троицкий, Исупов, Уланов и некоторые другие ученые [59-66]. Отметим, что трансформаторная модель индукционного

разряда позволяет получить аналитические выражения, связывающие макропараметры разряда – ток в плазме, напряжение на плазменном витке, активное и реактивное сопротивления плазмы, с параметрами контура возбуждения разряда, но не даёт информации о микропараметрах разряда. В связи с этим при исследовании индукционных источников модели такого типа необходимо дополнять классическими моделями электрического разряда в смеси паров ртути и инертных газов.

Упомянутые выше модели позволяют получить результаты, качественно описывающие экспериментальные данные, однако стоит отметить, что в них используется различное количество поправочных коэффициентов. Д. Уэймаус и Ф. Биттер использовали эффективные времена жизни возбужденных атомов ртути. Р. Зонненберг, Х. Гундель, А.А. Вашкис – сечение возбуждения, а Р. Лягушенко – сечение ассоциативной ионизации. Модели сложно адаптируются под изменение параметров разряда в широком диапазоне, часто некоторые полученные зависимости не соответствуют эксперименту [46]. Порой, более простые модели, учитывающие меньше процессов, описывают экспериментальные результаты лучше сложных моделей. Данное обстоятельство связано с недостаточной изученностью кинетических процессов и процессов переноса излучения в плазме. Сечения многих соответствующих процессов всё ещё требуют уточнения, для чего необходимо проведение дорогостоящих натуральных экспериментов.

Трансформаторная модель индуктивного разряда позволяет получить аналитические выражения, связывающие макропараметры индукционного разряда – ток в плазме, напряжение на плазменном витке, активное и реактивное сопротивления плазмы, с параметрами контура возбуждения разряда – током и напряжением индуктора, коэффициентом связи индуктора и плазмы, индуктивностью  $L$  и активным сопротивлением  $R$  индуктора. Однако трансформаторная модель не даёт никакой информации о микропараметрах разряда – функции распределения электронов по энергиям, концентрации электронов и возбужденных атомов, температуре электронов и газа и т.д. Кроме того,



трансформаторная модель не позволяет оценить выход излучения из плазмы и определить эффективность источника излучения в целом. Поэтому в настоящее время все большее внимание уделяется разработке математических моделей безэлектродных источников излучения, опирающихся на детальный анализ процессов, происходящих в индукционной плазме.

#### **1.4. Генерация УФ излучения ртутным разрядом низкого давления**

Закономерности генерации УФ излучения дуговым электродным и индукционным разрядом трансформаторного типа при низком давлении буферного газа аналогичны при изменении соответствующих параметров разряда, поскольку главное отличие между двумя этими типами разрядов заключается в способе подвода энергии к плазме. Положительный столб дугового разряда низкого давления аналогичен положительному столбу тлеющего разряда и замкнутому витку индукционного разряда трансформаторного типа, поскольку набор энергии электронами проходит в продольном электрическом поле. Кинетические и радиационные процессы в плазме для этих типов разрядов не различаются. Приэлектродные области дугового разряда и области около трансформаторных колец индукционного разряда в большинстве случаев составляют небольшую долю от длины положительного столба разряда или длины плазменного витка, соответственно. Учитывая вышеперечисленные факторы, при дальнейшем описании закономерностей генерации УФ излучения двумя этими типами разрядов не будем делать различий между положительным столбом дугового разряда и замкнутым плазменным витком безэлектродного разряда трансформаторного типа.

Характерной особенностью ртутного разряда низкого давления является сильная неравновесность плазмы - температура электронов (1-2 эВ) на два порядка больше температуры ионов и газа в разряде.

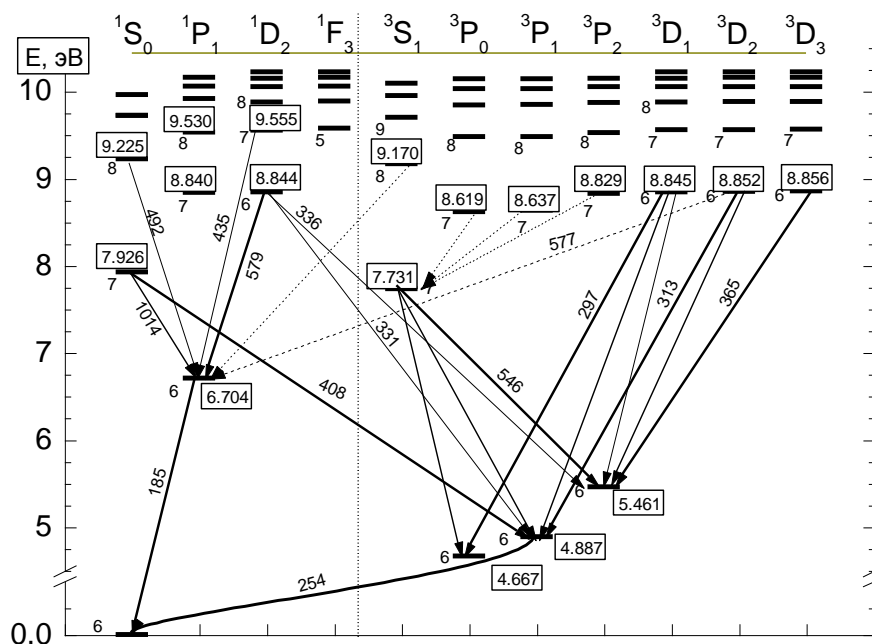


Рис. 1.3. Диаграмма Гротриана атома ртути [67]

На рис. 1.3 показана схема возможных переходов между уровнями атомов ртути (диаграмма Гротриана). В излучении ртутного разряда низкого давления преобладает резонансное излучение с уровней  $6^3P_1$  и  $6^1P_1$  (рис. 1.4).

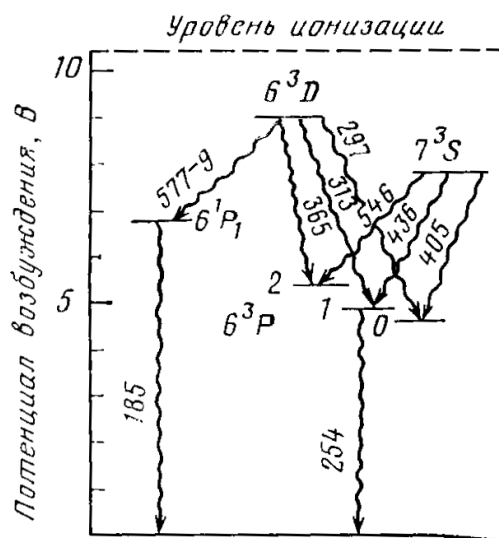


Рис. 1.4. Энергетическая диаграмма уровней ртути [20].

Излучение, соответствующее этим уровням, обладает длинами волн 253,652 нм (УФ-С область) и 184,957 нм (ВУФ - область).

Клярфельдом с помощью зондовых измерений было показано, что ионизация в ртутном разряде низкого давления может происходить ступенчатым образом, причем роль ступенчатой ионизации возрастает с ростом разрядного тока [68]. Позднее эти результаты были подтверждены и с помощью численного моделирования ртутного разряда низкого давления [69-71]. В данных работах показано, что ионизация в ртутном разряде идет по двум основным каналам: ступенчатая ионизация через состояния  $6^3P$  электронным ударом и через ассоциативную ионизацию  $Hg(6^3P)+Hg(6^3P)\rightarrow Hg_2^++e$ . При повышении давления паров ртути роль ступенчатой ионизации падает, а ассоциативной - возрастает [71].

Заселение излучательного уровня  $6^3P_1$  происходит обычно с метастабильных состояний  $6^3P_{0,2}$  посредством столкновений возбужденных атомов ртути с электронами [72], при этом заселенность уровня  $6^3P_2$  оказывается выше, чем уровней  $6^3P_{0,1}$  [73]. Разрушение возбужденного состояния атома ртути  $6^3P_1$ , может произойти за счёт испускания кванта излучения с длиной волны 254 нм, соударения второго рода (с электроном, атомом газа или стенкой) или его ионизации посредством электронного удара. Аналогичным образом могут разрушаться и возбуждения метастабильных уровней  $6^3P_{0,2}$ . Заселение представляющего интерес для настоящей работы излучательного уровня  $6^1P_1$  происходит также, в основном, с метастабильных уровней  $6^3P_{0,2}$  [20], а его распад - с испусканием кванта 185 нм. Разрушением данного возбужденного состояния атома ртути за счет перехода на более высокие уровни и ионизацию можно пренебречь [68]. Такое различие в поведении двух состояний связано с различными временами релаксации.

### **1.5. Параметры, определяющие эффективность генерации резонансного излучения плазмой ртутного разряда**

Важнейшим параметром, описывающим разрядную плазму, является её электронная температура  $T_e$ . Температура электронов характеризует скорость кинетических процессов в плазме ртутного разряда низкого давления, определяя тем самым заселённость возбужденных состояний атома ртути. С ростом электронной

температуры эффективность генерации резонансного излучения на длинах волн 254 и 185 нм должна расти, однако существует её оптимальное значение с точки зрения генерации двух указанных резонансных линий. Данный факт обуславливается тем, что с ростом температуры электронов также растут и потери на возбуждение более высоких уровней  $6^3D$  и  $7^3S$ , релаксация которых происходит с излучением в видимом диапазоне, и растут потери энергии электронов на упругие соударения с атомами инертного газа. Поскольку электронный уровень  $6^1P_1$ , ответственный за генерацию линии 185 нм, расположен существенно выше уровня  $6^3P_1$ , с которого излучается линия 254 нм, то для возбуждения состояния  $6^1P_1$  необходимы электроны с большей энергией. Кроме того, зависимость сечения возбуждения атома ртути из основного состояния электронным ударом существенно различается для состояний  $6^1P_1$  и  $6^3P_1$  (рис. 1.5). Поэтому оптимальное значение электронной температуры для генерации излучения с длиной волны 185 нм будет выше, чем для генерации излучения с длиной волны 254 нм.

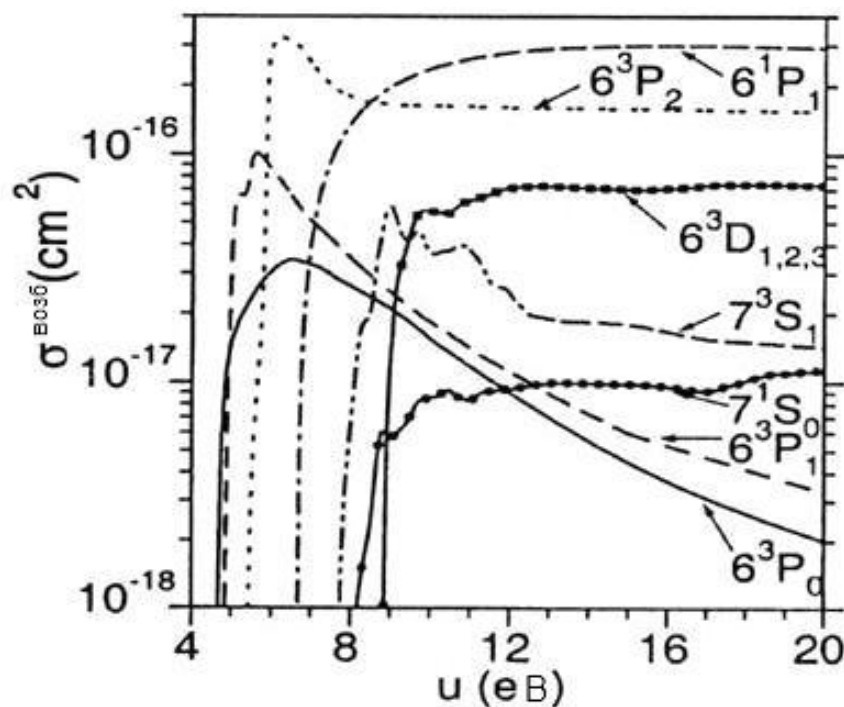


Рис. 1.5. Сечение возбуждения из основного состояния электронным ударом, в зависимости от энергии электрона, для различных энергетических уровней атома ртути[52].

Температура электронов в ртутном разряде низкого давления находится в области  $\sim 1$  эВ и определяется рядом параметров разряда.

**Геометрические параметры источника**, в котором создаётся разряд, оказывают существенное влияние на мощность и КПД генерации УФ излучения. При увеличении длины разрядного промежутка растёт поток и КПД его генерации. Рост мощности УФ излучения связан с увеличением длины положительного столба дугового разряда и общей длины плазменного витка индукционного разряда трансформаторного типа. Относительный вклад приэлектродных потерь в дуговом электродном разряде с ростом длины уменьшается, поэтому КПД возрастает.

Диаметр разрядной трубки оказывает наиболее существенное влияние на характеристики разряда. С увеличением диаметра разрядной трубки следует рассматривать несколько процессов, оказывающих противоположное влияние на КПД генерации УФ излучения. Во-первых, при больших диаметрах разрядной трубки начинает играть роль эффект пленения резонансного излучения, уменьшающий КПД разряда. Во-вторых, с ростом диаметра разрядной трубки уменьшается скорость потерь электронов на её стенках вследствие амбиполярной диффузии, это приводит к незначительному уменьшению потерь энергии на ионизацию в разряде, но также приводит и к снижению электронной температуры. Это связано с тем, что снижение скорости исчезновения заряженных частиц на стенках трубки большего диаметра требует и меньшей скорости их образования в объёме разряда и, значит, меньших значений электронной температуры [20]. При уменьшении электронной температуры будут уменьшаться потери энергии на упругие столкновения электронов с атомами нейтрального газа, что должно увеличивать КПД разряда, а с другой стороны – будет уменьшаться и заселённость уровней, с которых испускается резонансное излучение. Присутствие разнонаправленных процессов обуславливает и предполагает наличие максимума на кривой зависимости КПД генерации излучения линии с длиной волны 254 нм от диаметра разрядной трубки, что было показано, например, в работе [74] (рис. 1.6).

Изменяя диаметр разрядной трубки, можно добиться оптимального его значения с точки зрения генерации УФ излучения. Отметим, что при прочих равных условиях, оптимальный диаметр трубки для генерации излучения с длиной 185 нм будет меньше, чем для генерации излучения с длиной волны 254 нм, поскольку генерация резонансного излучения с длиной волны 185 нм требует более высоких электронных температур.

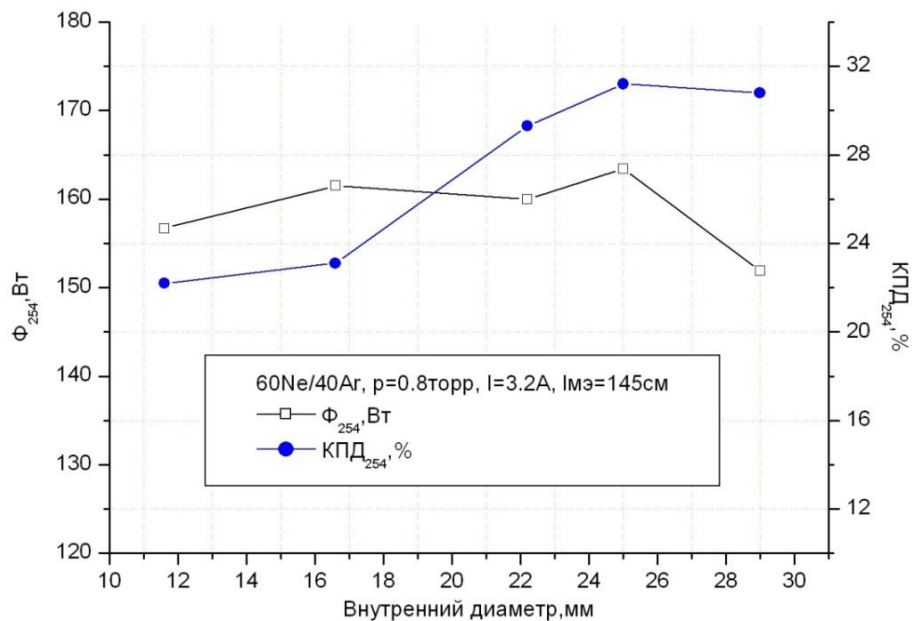


Рис. 1.6. Зависимость потока и КПД генерации линии 254 нм от внутреннего диаметра разрядной трубки[74].

Еще одним значимым фактором, определяющим режим работы разрядной лампы, являются **сила и плотность тока разряда**. С повышением силы тока разряда интенсивность излучения с длиной волны 254 нм сначала растёт, а потом приходит к насыщению (рис. 1.7), обусловленному равновесием между возбуждающими и тушащими соударениями, определяющими заселённость резонансного уровня  $6^3P_1$ . Для излучения с длиной волны 185 нм насыщение потока с ростом силы разрядного тока экспериментально не наблюдалось, хотя данная тенденция прослеживается в работе [75]. Это объясняется тем, что заселенность резонансного уровня  $6^1P_1$  в условиях, характерных для традиционного ртутного разряда низкого давления, в

меньшей степени определяется тушащими соударениями. Данный уровень имеет существенно меньшее по сравнению с уровнем  $6^3P_1$  время жизни [44]. Отметим также, что с ростом силы разрядного тока, падает доля энергии, приходящаяся на обе резонансные линии, также обуславливая уменьшение КПД их генерации.

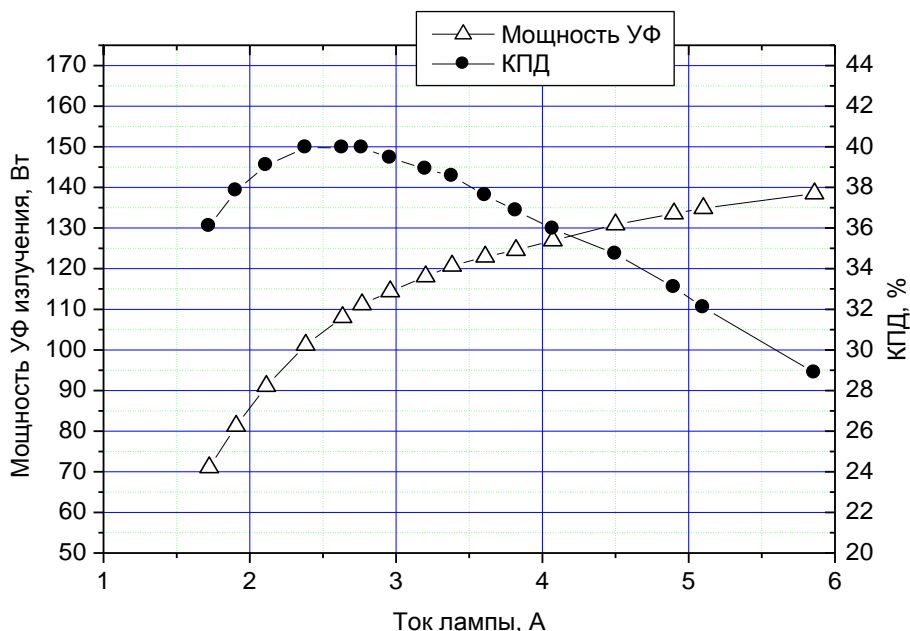


Рис. 1.7. Зависимость мощности УФ - излучения (254 нм) и КПД лампы от разрядного тока при использовании газового наполнения 40/60 Ne/Ar с давлением смеси 0,65 Торр [74].

Помимо силы разрядного тока, непосредственное влияние на генерацию резонансного излучения оказывает также **частота разрядного тока**. Первые экспериментальные исследования увеличения светоотдачи газоразрядных ламп при переходе к повышенной частоте питания были проведены в работах [76-78]. Теоретические исследования влияния частоты разрядного тока были проведены в работах [44,79-82], а численное моделирование в работах Охонской и Федоренко (например, в [83]).

Проведённые исследования показывают, что с ростом частоты разрядного тока с одной стороны уменьшается усреднённое по периоду значение электронной температуры, а с другой растёт её максимальное значение. С уменьшением среднего по периоду значения электронной температуры должны снижаться потери энергии

на упругие столкновения электронов с атомами. Тем не менее, увеличение максимального за период значения электронной температуры приводит к отклонению функции распределения электронов по энергиям от Максвелловской в области быстрых электронов. Это приводит к тому, что скорость прямого заселения резонансных уровней  $6^1P_1$  и  $6^3P_1$  возрастает [44]. Уменьшение потерь энергии на упругие столкновения и увеличение скорости заселения резонансных уровней прямым электронным ударом объясняют увеличение потока и КПД генерации резонансного излучения с ростом частоты разрядного тока.

В работе [75] были проведены экспериментальные исследования генерации ВУФ излучения от частоты разрядного тока. С ростом частоты разрядного тока наблюдается рост как потока ВУФ излучения, так и КПД его генерации (рис. 1.8), которое практически прекращается при частотах выше 60 кГц.

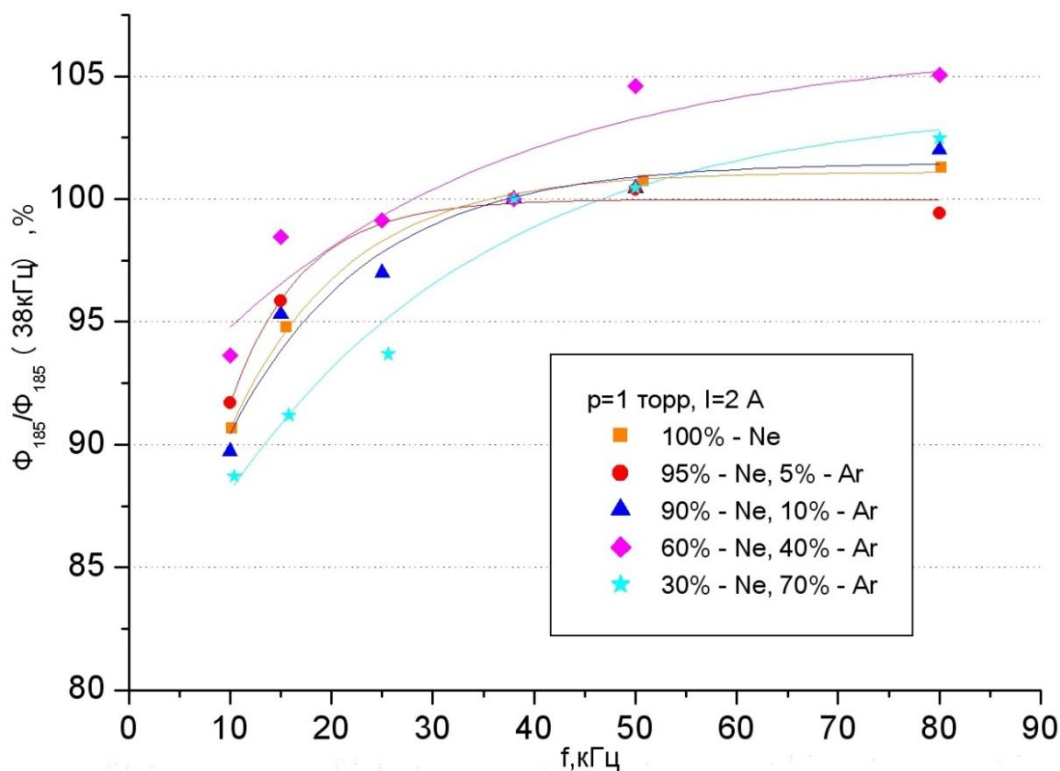


Рис. 1.8. Относительное изменение потока линии 185 нм с ростом частоты разрядного тока в лампах с различными наполняющими смесями инертных газов при давлении 1 Торр и  $I=2$  А [75].



Автор не даёт объяснение экспериментально обнаруженному эффекту насыщения потока ВУФ излучения и КПД его генерации, но можно сделать предположение, что чрезмерный рост максимального значения электронной температуры увеличивает потери на возбуждение более высоких уровней  $6^3D$  и  $7^3S$ , релаксация которых происходит с излучением в видимом диапазоне.

**Давление и состав буферной смеси** (инертного газа) являются ключевыми характеристиками, влияющими на генерацию УФ излучения ртутным разрядом низкого давления. Два этих фактора в совокупности определяют скорость амбиполярной диффузии заряженных частиц к стенкам разрядной трубки и, значит, скорость ионизации и электронную температуру. Варьированием состава и давления буферной смеси можно подобрать оптимальный режим генерации УФ излучения, при котором потери на упругие соударения минимальны по отношению к тратам энергии на возбуждение и излучение атомов ртути.

В работе [84] исследовалось влияние добавления аргона в качестве буферного газа к чисто ртутному разряду, и было обнаружено, что это приводит к увеличению выхода излучения с длиной волны 254 нм. Объяснить это можно двумя факторами. Во-первых, радиальные профили концентраций излучающих атомов более пологие в смеси газов, чем в чистой ртути, тем самым увеличивается число излучательных центров вблизи стенок трубки. Во-вторых, добавление инертного газа приводит к дополнительному уширению спектральной линии за счет столкновений атомов ртути с атомами нейтрального газа. Данные обстоятельства обуславливают уменьшение влияния эффекта пленения резонансного излучения, что и приводит к увеличению потока УФ излучения.

Добиться оптимального значения электронной температуры можно изменением рода наполняющего газа или изменением его давления. В более легком газе, также как и при понижении давления буферной смеси, подвижность ионов ртути выше, скорость амбиполярной диффузии растёт [12], что приводит к росту электронной температуры. Электронная температура и уровень насыщения выхода УФ излучения будут наибольшими в гелии и наименьшими в ксеноне (рис. 1.9) [20].

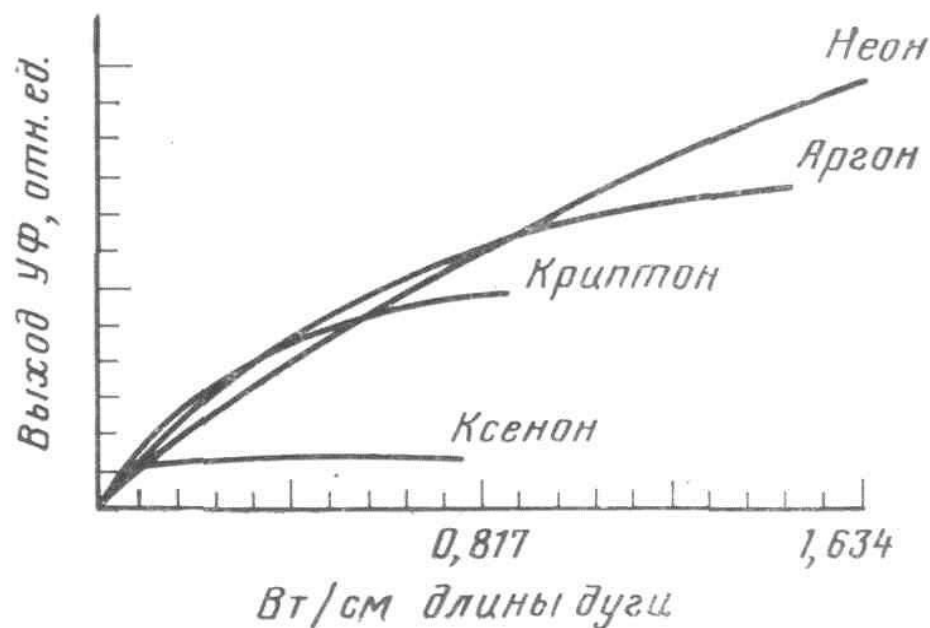


Рис. 1.9. Выход линии 253,7 нм в зависимости от нагрузки на единицу длины положительного столба для ламп диаметром 38 мм, наполненных различными инертными газами при давлении 260 Па (2 мм рт. ст.), при давлении ртути 0,8 Па ( $6 \cdot 10^{-3}$  мм рт. ст.) [20].

Исследования влияния давления и состава смеси буферного газа на генерацию УФ излучения приводятся, например, в [74,75,85]. Показано, что при снижении давления буферной смеси происходит увеличение мощности и КПД генерации резонансного излучения, обусловленное снижением потерь на ионизацию и упругие соударения. В работе [85] отмечается более быстрый спад КПД генерации резонансного излучения с ростом тока при более высоких давлениях буферной смеси (рис. 1.10).

Последние исследования закономерностей генерации ВУФ излучения показывают, что КПД генерации резонансного излучения с длиной волны 185 нм выше при использовании буферных смесей неон-аргон, чем при использовании чистых газов [75]. При этом оптимальными с точки зрения генерации ВУФ излучения оказываются смеси состава 30%Ne + 70%Ar. Наличие максимума в работе [75] не объясняется, но может быть связано с тем, что добавление неона к аргону (также как и аргона к чистому неону) способствует более эффективному

заселению уровня  $6^1P_1$ . Однако при преобладании неона в буферной смеси рост потерь на упругие соударения перекрывает эффект от более эффективного заселения уровня  $6^1P_1$ .

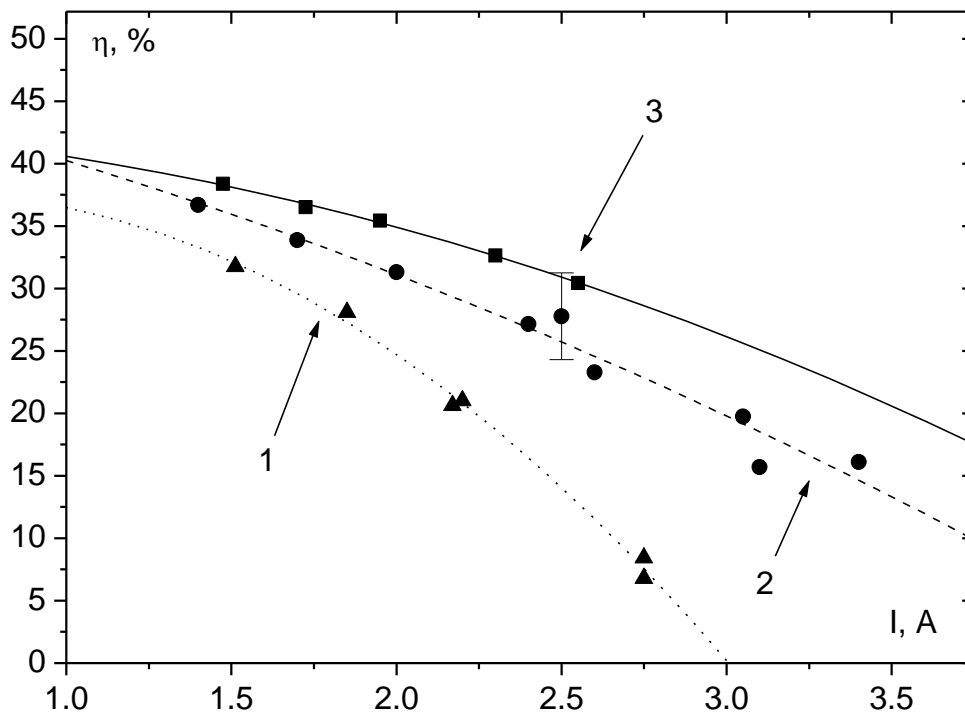


Рис. 1.10. Зависимости КПД генерации линии 254 нм от тока при разном давлении. Смесь Ne+Ar в соотношении 30/70 при различных давлениях. 1 - 4 Торр, 2 - 3 Торр, 3 - 2 Торр.  $P_{Hg} = 7$  мТорр[85].

Изменяя давление и состав смесей неон-аргон, можно добиться изменения в широком диапазоне потока резонансного излучения и КПД его генерации. Использование более тяжёлых газов (криптон, ксенон) не представляется целесообразным из-за чрезвычайно низкой скорости амбиполярной диффузии ионов ртути при рабочих давлениях буферного газа, что приводит к критическому снижению температуры электронов и слишком сильному уменьшению потока резонансного УФ излучения.

## 1.6. Поддержание оптимального давления паров ртути при высоких удельных мощностях разряда

Важнейшим фактором, влияющим на характеристики ртутного разряда низкого давления, является давление паров ртути. С ростом концентрации атомов ртути растёт мощность резонансного излучения за счёт увеличения концентрации излучающих атомов, но вместе этим увеличивается и оптическая толщина разряда за счёт эффекта «пленения», приводящему к увеличению вероятности безизлучательной релаксации возбуждения за счет соударения II рода со свободными электронами. Этот эффект имеет гораздо меньшее значение для выхода из плазмы излучения с длиной волны 185 нм, чем для излучения с длиной волны 254 нм, в виду существенно меньшей продолжительности жизни возбуждённого уровня  $6^1P_1$  по сравнению с таковым для уровня  $6^3P_1$ . Экспериментально установлено, что максимум излучения линии с длиной волны 185 нм достигается при более высоких концентрациях атомов ртути в разряде, нежели максимум излучения с длиной волны 254 нм [86].

Концентрация атомов ртути в разряде низкого давления определяется давлением насыщенных паров ртути при температуре холодной точки источника (лампы) и зависит от его удельной мощности. Оптимальным для генерации резонансного излучения является давление насыщенных паров ртути 7-10 мТорр. Однако, при этом удельная электрическая мощность разряда составляет 0,3 – 0,5 Вт/см, а температура холодной точки колеблется около 30°C (рис. 1.11). При дальнейшем увеличении удельной мощности разряда давление паров ртути быстро повышается, что приводит к быстрому росту концентрации атомов ртути в разряде и, следовательно, к снижению потока и КПД генерации УФ излучения. Поддержать давление паров ртути на оптимальном уровне можно с помощью специальных термостатирующих блоков [87], но такие источники УФ излучения не нашли широкого применения.

В современных мощных газоразрядных лампах низкого давления применяется гораздо более удобный пассивный метод регулировки давления паров ртути в

разряде: вместе жидкой ртути источником паров ртути служит амальгама – жидкий или (чаще) твёрдый раствор ртути в металлах [13,88].

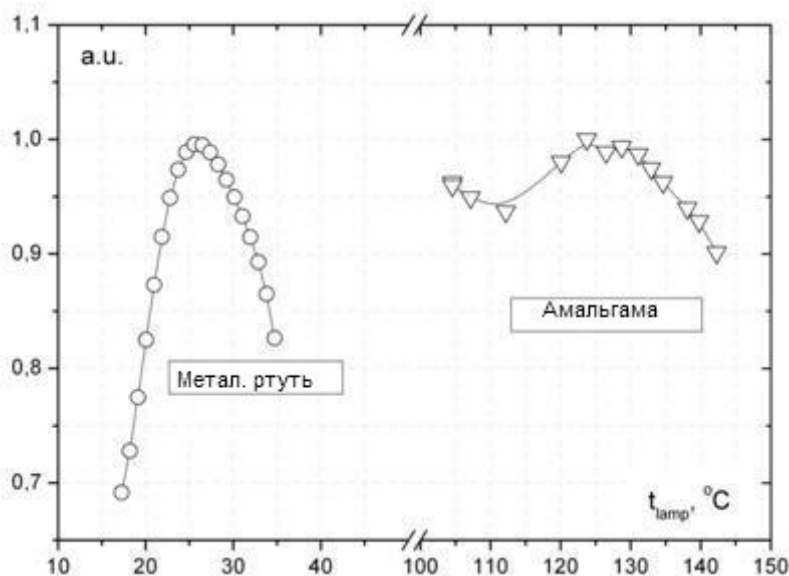


Рис. 1.11. Зависимость мощности УФ - излучения от температуры: холодной точки (в ртутной лампе), амальгамы (в амальгамной лампе) [89].

На рис. 1.11 показано, что применение амальгамы позволяет получить оптимальное давление паров ртути при более высоких температурах холодной точки источника (в данном случае – место закрепления амальгамы). Это позволяет поднять удельную электрическую мощность разряда до 3-5 Вт/см и сохранить высокий КПД преобразования электрической мощности в УФ - излучение, свойственный ртутным лампам низкого давления [13,89]. Диапазон температур, при которых обеспечивается стабильное давление паров ртути, определяется составом амальгамы [89], который, как правило, подбирается экспериментально.

### 1.7. Ресурс источников УФ излучения

Переход к повышенным удельным электрическим мощностям ртутного разряда низкого давления в современных источниках УФ излучения, а также снижение давления буферного газа для поддержания КПД генерации резонансного излучения на высоком уровне, приводит к усилению воздействия плазмы на конструктивные элементы источников. При этом уменьшаются как физический, так и полезный срок

службы источников. Физический срок службы источника УФ излучения на основе дугового разряда низкого давления, прежде всего, определяется долговечностью оксидных электродов. Полезный (эффективный) срок службы источника определяется временем спада УФ излучения до заданной величины [13].

Способы увеличения физического срока службы, связанные с изменением конструктивных характеристик оксидных электродов (длина и диаметр вольфрамового керна, постоянные его спирализации), подробно описаны в [90]. Отметим лишь, что конструктивные параметры электродного узла, а также состав и масса оксидного покрытия подбираются, исходя из величины разрядного тока и тока предварительного прогрева электродов.

Гораздо больший интерес представляет выявление механизмов спада УФ излучения в процессе работы источников и способы увеличения их полезного срока службы. Например, в бактерицидных лампах с колбами из увиолевого стекла спад потока обычно составляет 30-50% за 3500 часов работы [10,13,91]. Основным механизмом спада УФ излучения таких ламп является соляризация стекла вследствие окисления в объеме стекла примесей FeO до Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> под действием УФ – излучения [92]. Для мощных газоразрядных источников низкого давления, колбы которых выполнены из кварца, спад излучения происходит в силу ряда причин, обусловленных взаимодействием атомов и ионов ртути с внутренней поверхностью стенки разрядной трубки. К таковым относят образование оксида ртути на внутренней поверхности стенки колбы [93,94], проникновение молекул ртути в толщу кварца и образование в структуре кварца комплексов [HgO]. В настоящее время основным способом увеличения полезного срока службы мощных газоразрядных источников является нанесение на внутреннюю поверхность колб ламп защитных покрытий из оксидов редкоземельных элементов. Основной функцией данных покрытий является защита кварцевых стенок разрядной трубки от воздействия на них ионов ртути [95,96]. При этом желательно выбирать оксиды металлов с атомной массой близкой к атомной массе ртути [93]. Эффективность применения защитных покрытий была продемонстрирована, например, в [74,97,98].

Их применение позволяет существенно увеличить полезный срок службы мощных амальгамных газоразрядных ламп низкого давления (рис. 1.12).

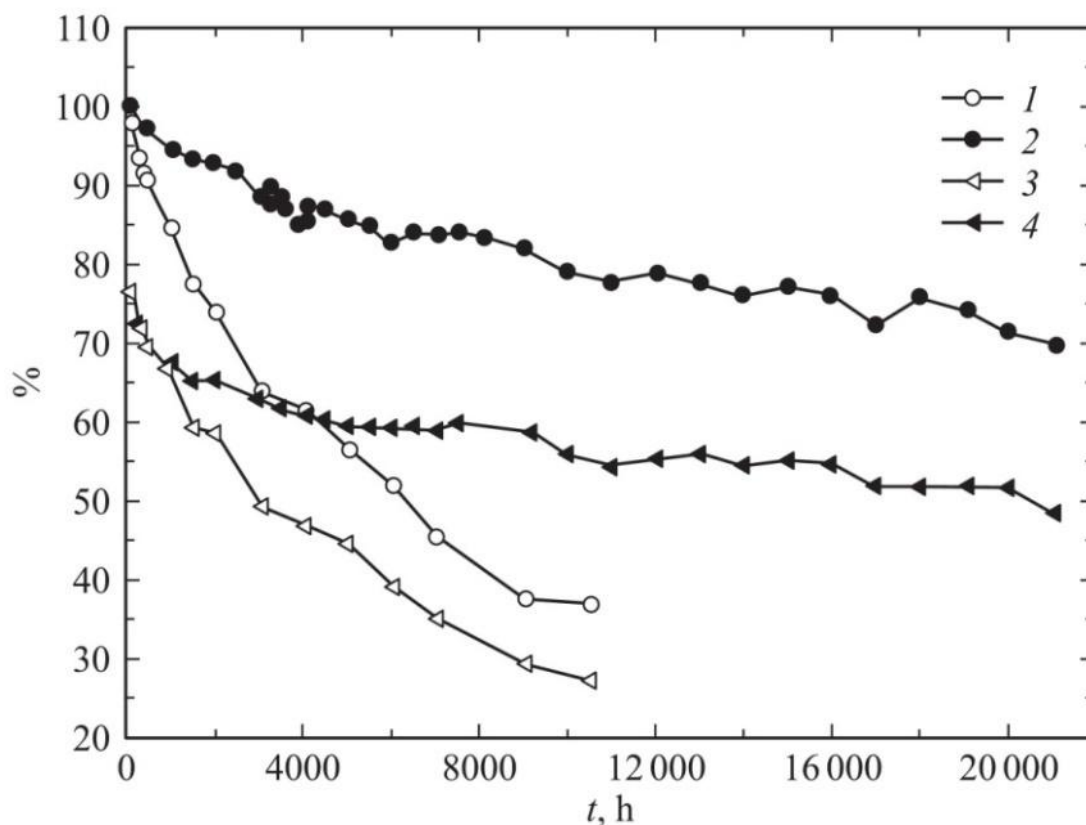


Рис. 1.12. Зависимость интенсивности УФ – излучения (1,2) и коэффициента пропускания кварцевого стекла (3,4) от времени работы амальгамной лампы. 1,3 – без защитного покрытия; 2,4 – с защитным покрытием [97].

Защитное покрытие может наноситься в несколько слоёв (рис. 1.13), и одной из ключевых его характеристик является способность пропускать УФ излучение (рис. 1.14). Экономически наиболее целесообразно наносить двухслойное покрытие из оксида алюминия или иттербия [74].

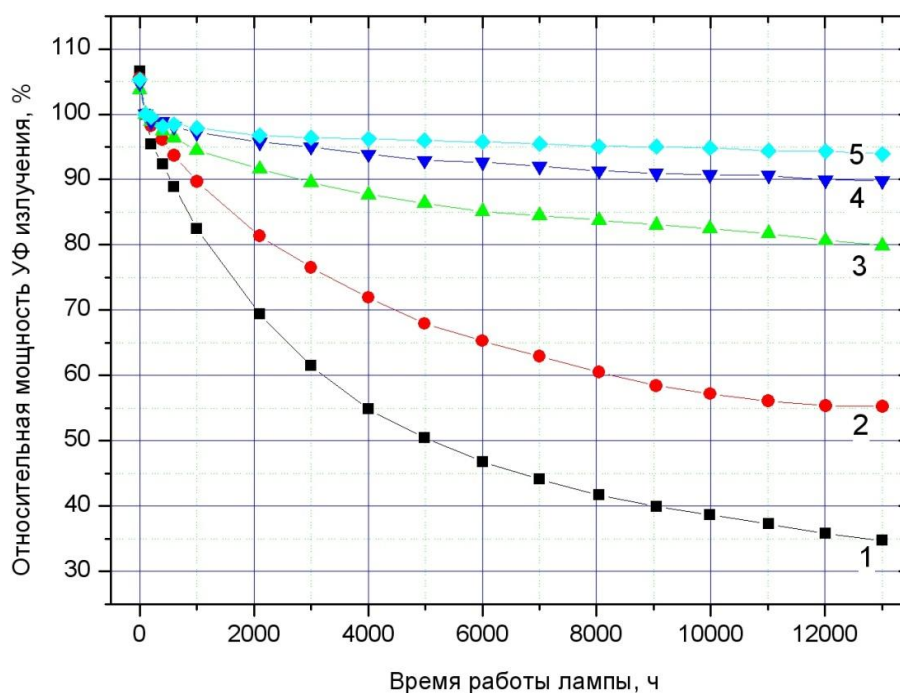


Рис. 1.13. Результаты ресурсных испытаний ламп с разным количеством слоев покрытия. 1 – без покрытия, 2 – один слой покрытия, 3 – два слоя покрытия, 4 – три слоя покрытия, 5 – четыре слоя покрытия [74].

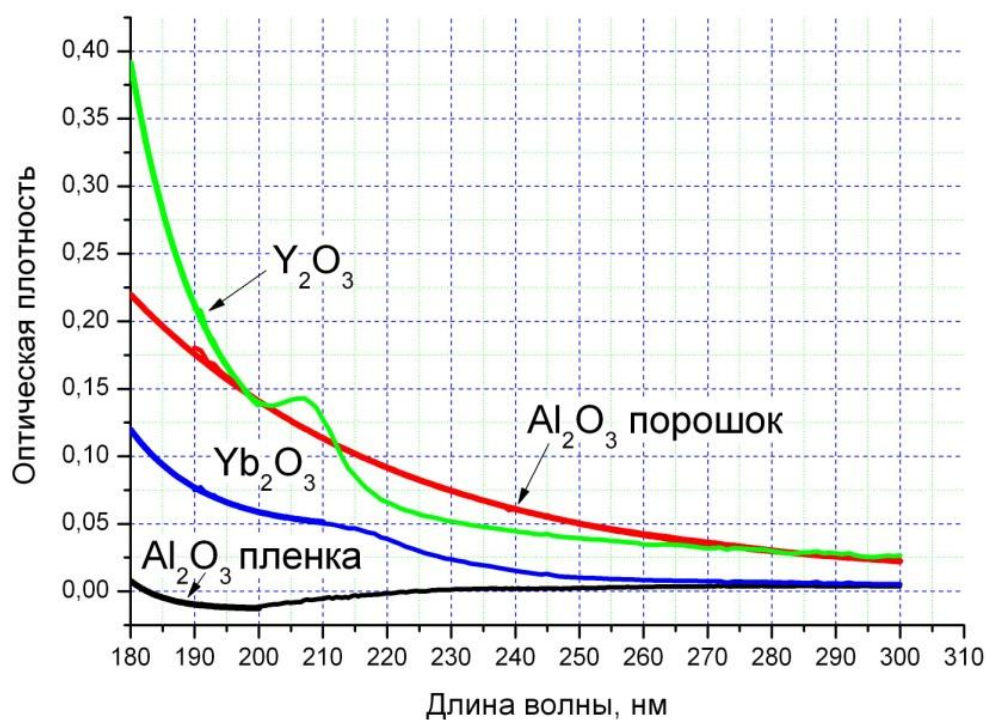


Рис. 1.14. Спектры поглощения различных защитных покрытий [86].



Тем не менее, даже такое покрытие недостаточно эффективно работает в мощных источниках ВУФ излучения (рис. 1.15), что вынуждает наносить либо большее количество слоёв, либо искать новые составы и оптимизировать технологии их нанесения для создания более эффективных защитных плёнок.

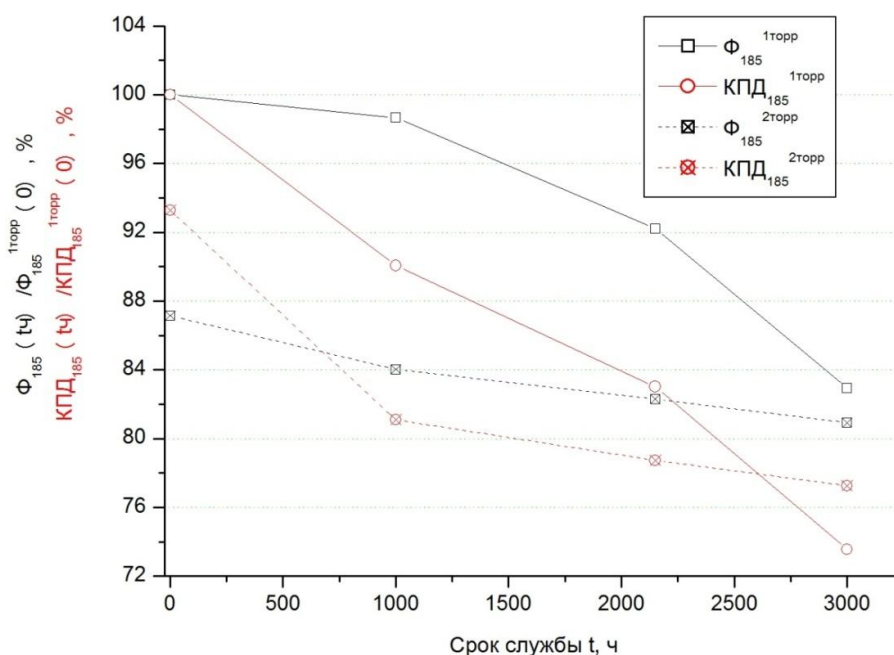


Рис. 1.15. Изменение потока и КПД генерации излучения линии 185 нм в течение срока службы у образцов со смесями 30%Ne- 70%Ar с давлениями 1 и 2 Торр, рассчитанные относительно потока и КПД в смеси с давлением 1 Торр в начале срока службы.  $I=2$  А, колбы из синтетического кварца, покрытие - 2 слоя  $Al_2O_3$ [75].

## 1.8. Заключение к обзору литературы

Электрический разряд в смеси паров и инертных газов является эффективным источником УФ излучения. Оптимальное давление паров ртути составляет 0,8-1,5 Па, газовой смеси – 100-500 Па. Для ртутных газоразрядных источников низкого давления удельная электрическая мощность разряда лежит в пределах 0,2 – 0,5 Вт/см, при переходе к удельным мощностям разряда 2-5 Вт/см вместо металлической ртути целесообразно использовать амальгаму, позволяющую поддерживать оптимальное давление паров ртути в разряде при более высоких

температурах, характерных для мощных ламп. КПД генерации УФ излучения при этом лежит в пределах 40-50%.

В спектре ртутного разряда низкого давления присутствуют две интенсивные резонансные УФ линии с длинами волн 254 и 185 нм. Вакуумное ультрафиолетовое излучение (ВУФ) с длиной волны меньше 200 нм хорошо поглощается в воздухе молекулярным кислородом с образованием озона. Совместное использование озона и излучения на длине волны 254 нм представляет практический интерес для очистки воздуха от загрязняющих органических веществ в промышленных масштабах.

Поток резонансного УФ излучения и эффективность его генерации ртутным разрядом низкого давления характеризует и определяет электронная температура плазмы разряда. Существует множество факторов, влияющих на её значение: геометрические размеры источника, давление паров ртути в разряде, давление и состав инертного газа (смеси газов), сила, плотность и частота разрядного тока. Закономерности генерации излучения с длиной волны 254 нм ртутным разрядом низкого давления хорошо изучены, чего нельзя сказать о линии с длиной волны 185 нм. Таким образом, актуальной задачей является экспериментальное и теоретическое исследование закономерностей генерации ВУФ излучения с длиной волны 185 нм от параметров разряда при его высокой удельной электрической мощности.

Переход к повышенным удельным электрическим мощностям ртутного разряда низкого давления в современных источниках УФ излучения, а также снижение давления буферного газа для поддержания КПД генерации резонансного излучения на высоком уровне, приводит к уменьшению физического и полезного срока службы источников. Это делает актуальным поиск способа увеличения их рабочего ресурса.

## 2. Модель разряда

### 2.1. Основные уравнения модели

Важной частью данной работы было проведение математического моделирования электрического разряда в парах ртути и инертных газах. Закономерности генерации УФ излучения ртутным разрядом хорошо проработаны теоретически, однако на настоящий момент приходится констатировать тот факт, решение их является достаточно трудоёмкой задачей даже для современных ЭВМ, поскольку приходится решать сложную самосогласованную систему уравнений.

Для расчётов использовалась усовершенствованная (дополненная) версия замкнутой самосогласованной модели разряда, изложенная в [45] и [48]. По сравнению с предыдущими версиями, главными отличиями и преимуществами данной модели являются:

- возможность моделирования ртутного разряда при использовании в качестве буферного газа не только аргона, но и неон-аргоновых смесей;
- учёт частичного перемешивания по частотам при расчёте переноса резонансного излучения с длиной волны 185 нм.

*Ниже приводится описание использованной модели и алгоритма расчёта необходимых параметров разряда.*

К внешне задаваемым параметрам относились размер колбы, давление паров ртути и инертных газов, температура газа и напряженность продольного электрического поля (на первом этапе расчётов). 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). По давлению паров ртути велся перебор в диапазоне 0,1 – 15 Па. Выбиралось то решение, которое давало наибольший КПД генерации излучения с длиной волны 185 нм.

**Расчёт функции распределения электронов по энергиям и определение электронной температуры.** Для моделирования разряда необходимо рассчитать функцию распределения электронов по энергиям (ФРЭЭ) или скоростям (ФРЭС). Для этого необходимо решить кинетическое уравнение Больцмана [11,44,99,100]:

$$\frac{\partial f_e}{\partial t} + \vec{v} \cdot \nabla_r f_e + \frac{\vec{F}}{m_e} \cdot \nabla_v f_e = \frac{\delta f_e}{\delta t} \quad (2.1)$$

Здесь  $\nabla_r f_e$ ,  $\nabla_v f_e$  – градиенты ФРЭС в пространстве координат и скоростей,  $\vec{F} = -e\vec{E}$  – сила, действующая на электрон (влиянием магнитного поля на движение электрона в условиях ртутного разряда НД можно пренебречь [44,100]),  $\frac{\delta f_e}{\delta t}$  – сумма интегралов упругих, неупругих и кулоновских столкновений (в приближении парных столкновений). Уравнение (2.1) представляет собой уравнение непрерывности для потока электронов в фазовом пространстве. Ниже перечислим основные допущения, использованные при решении кинетического уравнения Больцмана в использованной модели разряда.

В рамках рассматриваемой модели при условиях, характерных для ртутного разряда низкого давления, делается допущение о локальности функции распределения. Это предположение справедливо в том случае, если длина релаксации электронов по энергии не превосходит характерного размера неоднородности в плазме (в нашем случае  $\lambda_{\text{рел}} \leq R$ ,  $R$  – радиус трубки). Использование локального приближения связано с тем, что в плазме низкого давления движение электронов связано кулоновскими силами с движением медленных ионов, что приводит к значительному уменьшению длины релаксации электронов по энергии. Несмотря на то, что при давлениях порядка 0,1 – 0,5 Торр в нашем случае будет достигаться пограничная ситуация, экспериментальные данные, полученные в рамках настоящей работы и [86], показывают, что локальное приближение применимо в данном случае, так как результаты модельного расчёта удовлетворительно согласуются с экспериментальными результатами. При решении

кинетического уравнения Больцмана данное условие позволяет пренебречь градиентом ФРЭС по пространственной координате и существенно упростить и ускорить расчет.

При расчёте ФРЭС принималось во внимание условие стационарности разряда.

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. При этом 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  $6^3D_{1,2,3}$  в соответствии со схемой атома ртути, показанной на рис. 2.1. Последние три уровня принимались за один, ввиду малой разницы энергий между ними и идентичными сечениями возбуждения.

Уравнение Больцмана в рамках настоящей модели решается итерационным методом с аппроксимацией дифференциального оператора с использованием метода конечных разностей [48]. В качестве начального приближения используется функция Максвелла. Однако, для её задания, а также для вычисления кулоновского логарифма необходимо знать электронную температуру.

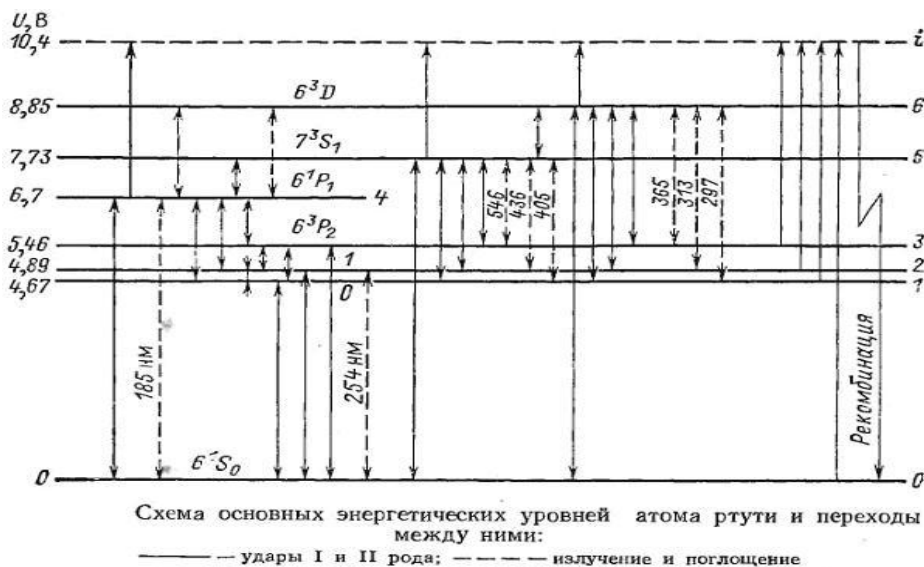


Рис. 2.1 Схема основных уровней атома ртути.

Для поиска истинного её значения и вида ФРЭЭ использовался метод бисекции. В качестве начальных приближений выбирались два значения электронной температуры, в интервал между которыми заведомо попадало её истинное значение. После этого итеративно проводились вычисления, необходимые для *расчета концентраций возбужденных атомов ртути (описываются ниже)*. При известных концентрациях возбужденных состояний атомов ртути, исходя из уравнения баланса заряженных частиц (2.2), уточнялись исходно выбранные значения электронной температуры.

$$T_e = - \frac{e}{R \frac{dn_e(R)}{dr} k \mu_i} \int_0^R r \left( n_e \sum_{n=0}^{ion-1} \alpha_{n,ion} n_n + \sum_j \sum_i C_{i,j} n_i n_j + C_{неп} n_0 n_m^{Ar} \right) dr. \quad (2.2)$$

Здесь  $\mu_i$  – подвижность ионов,  $R$  – радиус трубки, коэффициенты  $C$  – скорости ассоциативной и пеннинговской ионизации,  $\alpha_{n,ion}$  – число соударений атомов с электронами, приводящих к ионизации с уровня  $n$  в результате ударов I рода в единице объема в единицу времени в расчете на один электрон (учитывается прямая и ступенчатая ионизация);  $ion$  – номер уровня ионизации. В модели также учитывалась зависимость коэффициента амбиполярной диффузии от состава буферной смеси (неон-аргон). Уравнение (2.2) записано в предположении отсутствия в разряде объемной рекомбинации, но учитывает убыль электронов в результате их амбиполярной диффузии к стенкам [48]. При этом предполагалось, что радиальное распределение концентрации электронов в разряде описывается функцией Бесселя нулевого порядка:

$$n_e(r) = n_{e0} J_0(\alpha r / R), \quad (2.3)$$

где  $\alpha$  – коэффициент, учитывающий отличие концентрации электронов вблизи стенок от нуля, определяемый из граничного условия

$$-\frac{\mu_i k T_e}{e} \frac{\partial}{\partial r} J_0(\alpha r / R) \Big|_{r=R} = J_0(\alpha) \sqrt{\frac{k T_e}{M_i}}. \quad (2.4)$$

В (2.4)  $\mu_i$  и  $M_i$  – подвижность и масса иона ртути,  $T_e$  – температура электронов (до уточнения). Концентрация электронов на оси разряда определяется при дополнении уравнений (2.3) - (2.4) законом Ома

$$I = e\mu_e E \int_0^R n_e(r) 2\pi r dr, \quad (2.5)$$

где  $\mu_e$  – подвижность электронов, рассчитанная по формуле:

$$\mu_e = -\frac{2e}{3m_e} \int_0^\infty \frac{U^{3/2}}{v_m} \frac{\partial}{\partial U} \left[ \frac{f(U)}{\sqrt{U}} \right] dU \quad (2.6)$$

где  $v_m$  – транспортная частота упругого рассеяния электронов на атомах ртути, аргона и неона,  $f(U)$  – ФРЭЭ.

Поиск истинного значения электронной температуры и формы ФРЭЭ заканчивается при уменьшении интервала бисекции до заранее заданной величины.

На рис. 2.2 представлен пример рассчитанной ФРЭЭ  $f_e(U) = 2\pi(2e/m_e)^{3/2} \sqrt{U} f_{e0}(U)$  и распределение Максвелла. Расчеты проводились для условий, характерных для ртутно-аргонового разряда низкого давления:  $E_{\text{средн}} = 61 \text{ В/м}$ ,  $n_{e,\text{средн}} = 1 \times 10^{12} \text{ см}^{-3}$ ,  $T = 340 \text{ К}$ ,  $T_e = 13000 \text{ К}$ ,  $p_{\text{Hg}} = 0.85 \text{ Па}$ ,  $p_{\text{Ar}} = 13.3 \text{ Па}$ . Видно, что рассчитанная ФРЭЭ обеднена по сравнению с максвелловской быстрыми электронами с энергиями  $U > 4.7 \text{ эВ}$ . Это говорит о том, что при использовании в качестве ФРЭЭ максвелловского приближения скорости образования возбужденных состояний атома ртути будут завышены, и это приведёт к завышению рассчитанных потоков резонансного излучения. Однако, максвелловское приближение пригодно для моделирования процессов, обусловленных взаимодействием атомов с медленными электронами.

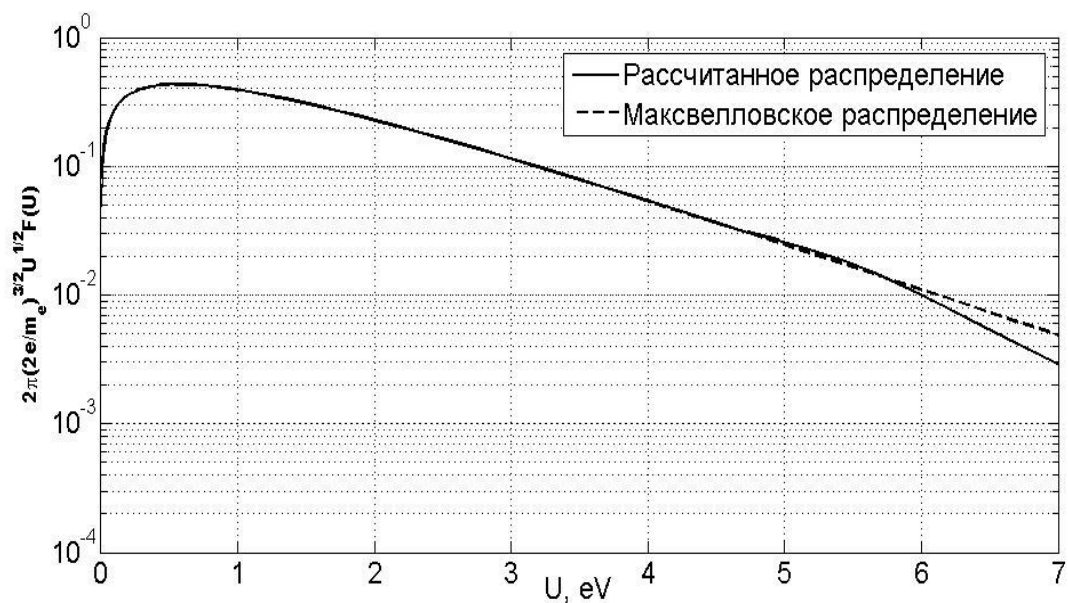


Рис. 2.2. Зависимость  $f_e(U) = 2\pi(2e/m_e)^{3/2} \sqrt{U} f_{e0}(U)$  от энергии электронов  $U$ .

Для расчёта радиальных распределений концентраций возбужденных атомов ртути необходимо решить систему уравнений баланса образования и разрушения возбужденных атомов на соответствующих энергетических уровнях. При составлении системы уравнений баланса использовалась схема энергетических уровней атома ртути, изображённая на рис. 2.1 и учитывающая уровни  $6^1S_0$ ,  $6^3P_{0,1,2}$ ,  $6^1P_1$ ,  $7^3S_1$ ,  $6^3D$  и уровень ионизации. 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 некоторого излучающего уровня  $s$  уравнение, описывающее динамику его заселённости, записывается нижеследующим образом [12,45,48]:



$$\frac{\partial n_s}{\partial t} - \nabla(D_s \nabla n_s) = n_e \sum_{h=0}^{s-1} \alpha_{hs} n_h + n_e \sum_{\vartheta=s+1}^{ion-1} \beta_{\vartheta s} n_{\vartheta} + \sum_{h=0}^{s-1} \Delta N_{hs} + \sum_{\vartheta=s+1}^{ion-1} n_{\vartheta} A_{\vartheta s} -$$

$$- n_e \sum_{\vartheta=s+1}^{ion} \alpha_{s\vartheta} n_s - n_e \sum_{h=0}^{s-1} \beta_{sh} n_s - \sum_{\vartheta=s+1}^{ion-1} \Delta N_{s\vartheta} - \sum_{h=0}^{s-1} n_s A_{sh} \quad , \quad (2.7)$$

где  $n_s$  – концентрация атомов на уровне  $s$ ;  $D_s$  – коэффициент диффузии атомов сорта  $s$ ;  $n_e$  – концентрация электронов;  $\alpha_{ij}$  – число соударений атомов с электронами, 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;  $\beta_{ji}$  – число соударений атомов с электронами, приводящих к переходу с уровня  $j$  на уровень  $i$  в результате ударов II рода в единице объема в единицу времени в расчете на один электрон;  $\Delta N_{ij}$  – число переходов с уровня  $i$  на уровень  $j$  в результате поглощения фотонов в единице объема в единицу времени.  $A_{ji}$  – вероятность спонтанного излучения с уровня  $j$  на уровень  $i$ . В уравнении (2.7) индекс «н» соответствует уровню, лежащему ниже  $s$ , «в» – выше.

При этом, исходя из известного вида ФРЭЭ (на конкретном этапе проведения вычислений), согласно [48], коэффициенты  $\alpha_{ij}$  и  $\beta_{ji}$  рассчитываются по формулам:

$$\alpha_{ij} = \sqrt{\frac{2e}{m_e}} \int_0^{\infty} q_{ij}(U) \sqrt{U} f_e(U) dU, \quad \beta_{ji} = \sqrt{\frac{2e}{m_e}} \int_0^{\infty} q_{ji}(U) \sqrt{U} f_e(U) dU, \quad (2.8)$$

где  $q_{ij}(U)$  и  $q_{ji}(U)$  – эффективные сечения для столкновений электронов с атомами ртути I и II рода, связанные соотношением  $g_j U_2 q_{ji}(U_2) = g_i U q_{ij}(U)$ ,  $U_2 = U - U_{ji}$ ,  $g_i$  и  $g_j$  – статистические веса нижнего и верхнего возбужденных уровней. Данные по сечениям  $q_{ij}(U)$  и  $q_{ji}(U)$ , а также вероятностям  $A_{ji}$  спонтанного излучения с уровня  $j$  на уровень  $i$  также приведены в [48].

Для резонансного излучающего уровня  $s$  уравнение баланса образования и гибели (2.7) записывались с учётом переноса излучения в плазме (уравнение Бибермана-Холстейна):

$$\frac{\partial n_s}{\partial t} - \nabla(D_s \nabla n_s) + \operatorname{div} \vec{Q}_{p,s} = n_e \sum_{h=0}^{s-1} \alpha_{hs} n_h + n_e \sum_{\epsilon=s+1}^{ion-1} \beta_{\epsilon s} n_\epsilon + \sum_{\epsilon=s+1}^{ion-1} n_\epsilon A_{\epsilon s} - \frac{n_s}{\tau_s}, \quad (2.9)$$

$$\operatorname{div} \vec{Q}_{p,s}(\vec{r}) = A_{s0} n_s(\vec{r}) - \frac{A_{s0}}{4\pi} \int_V \int_V \frac{n_s(\vec{r}')}{|\vec{r} - \vec{r}'|^2} P(\nu) k(\nu) \exp[-k(\nu)|\vec{r} - \vec{r}'|] d\nu dV \quad (2.10)$$

Здесь  $\operatorname{div} \vec{Q}_{p,s}$  – дивергенция вектора плотности потока резонансных фотонов. Под плотностью здесь следует понимать поверхностную плотность, т.к. размерность  $\vec{Q}_{p,s} - Bm/m^2$ .  $\tau_s$  – 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.

Уравнения (2.7) - (2.10) записываются при условии стационарности разряда и с учетом того, что метастабильные атомы не могут образовываться или разрушаться в результате оптических переходов с более низких состояний. Система уравнений (2.7) - (2.10) при добавлении уравнения-связки

$$n_0 + \sum_{s=1}^6 n_s = \frac{P_{Hg}}{kT}, \quad (2.11)$$

позволяет итеративно рассчитывать радиальные распределения концентраций возбужденных атомов, если известны ФРЭЭ,  $\operatorname{div} \vec{Q}_{p,254}$ ,  $\operatorname{div} \vec{Q}_{p,185}$ , температура газа, давления ртути и буферного газа и концентрация электронов на оси трубки. В качестве начального приближения для дивергенции векторов плотности потока резонансных фотонов  $\operatorname{div} \vec{Q}_{p,254}$  и  $\operatorname{div} \vec{Q}_{p,185}$  берутся значения, рассчитанные по методу эффективной продолжительности жизни возбуждённого состояния. При проведении дальнейших вычислений  $\operatorname{div} \vec{Q}_{p,254}$  и  $\operatorname{div} \vec{Q}_{p,185}$  находятся путём численного решения уравнения Бибермана-Холстейна [48]. Входящие в него контуры линий 185 и 254 нм считаются Фойгтовскими (свёртка Доплеровского и Лоренцевского контуров): 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 (рис. 2.3 и рис. 2.4) принимается во внимание наличие у ртути десяти природных изотопов.

После окончания всех итерационных расчётов удельную мощность излучения плазмы можно рассчитать следующим образом:

$$\Phi_{254} = 2\pi\hbar\omega_{254} \int_0^R \text{div}\vec{Q}_{p,254}(r)rdr, \quad \Phi_{185} = 2\pi\hbar\omega_{185} \int_0^R \text{div}\vec{Q}_{p,185}(r)rdr \quad (2.12)$$

где  $\hbar$  – постоянная Планка,  $\omega_{185}$  и  $\omega_{254}$  – 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. Данный аспект существенно влияет на выход излучения из реальных источников. Для кварцевых трубок, из которых изготавливались экспериментальные образцы, исследованные в главе 4, поправочные коэффициенты на выход излучения из плазмы составляли 0,6 и 0,84 для линий 185 и 254 нм соответственно.

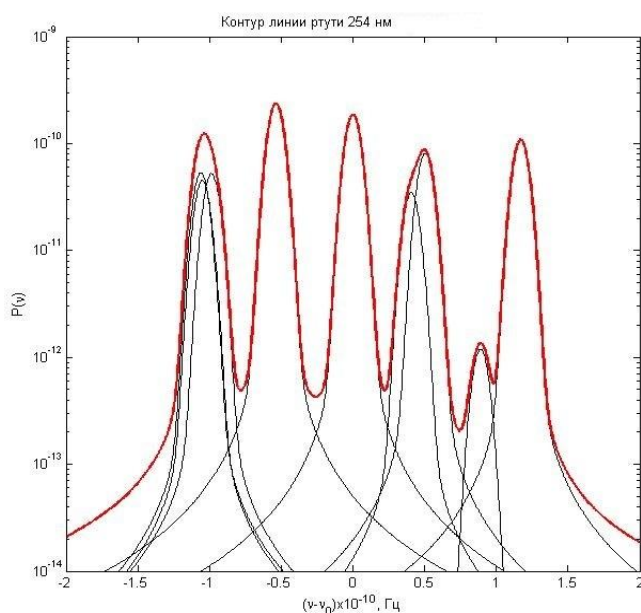


Рис. 2.3 Контур линии 254 нм [45,48].

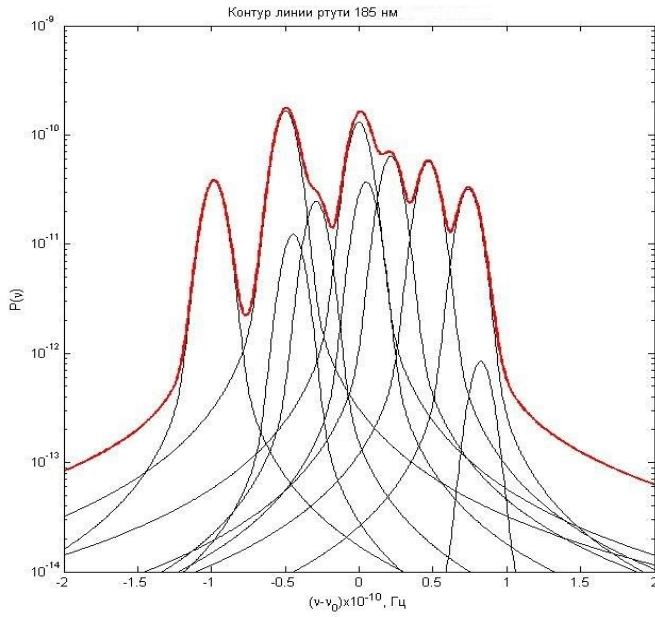


Рис. 2.4 Контур линии 185 нм [45,48].

**Самосогласованность модели.** Подводимая к столбу электрическая энергия воспринимается, прежде всего, электронным газом, который в результате различных соударений передает ее атомам. Суммарные потери мощности электронного газа складываются из потерь в объеме при упругих соударениях электронов с атомами инертного газа и ртути, возбуждающих и ионизирующих столкновениях, а также мощности, отдаваемой электронами стенкам при рекомбинации [48]:

$$P_1 = 2\pi \int_0^R n_e(r) \omega_{e\Sigma}(r) r dr, \text{ где} \quad (2.13)$$

$$\omega_{e\Sigma} = \omega_{e,z} + \omega_{e,g} + \omega_{e,i} + \omega_{e,рек}. \quad (2.14)$$

$$\omega_{e,z} = n_2 \frac{2m_e}{M_2} \int_0^\infty \frac{m_e v_e^2}{2} v_e q_{e,z}(v_e) f_e(v_e) dv_e. \quad (2.15)$$

$$\omega_{e,g} = \sum_{k=0}^{r-1} \sum_{r=1}^6 e(U_r - U_k) (\alpha_{kr} n_k - \beta_{rk} n_r), \quad (2.16)$$

$$\omega_{e,i} = \sum_{k=0}^6 e(U_i - U_k) \alpha_{ki} n_k \quad (2.17)$$

$$\omega_{e,pek} = \left( 2kT_e + e \frac{kT_e}{e} \ln \sqrt{\frac{T_e M_{Hg}}{T m_e}} + eU_i \right) \frac{a^2 \mu_i kT_e}{R^2 e}. \quad (2.18)$$

Здесь  $\omega_{e,z}$  – мощность, передаваемая атомам ртути и аргона при упругих соударениях в расчете на один электрон,  $\omega_{e,s}$  – мощность потерь на возбуждение в расчете на один электрон,  $U_r$  и  $U_k$  – потенциалы возбужденных состояний  $6^3P_0$ ,  $6^3P_1$ ,  $6^3P_2$ ,  $6^1P_1$ ,  $7^3S_1$  и  $6^3D_{1,2,3}$  атома ртути,  $\omega_{e,i}$  – мощность потерь на ионизацию в расчете на один электрон,  $U_i = 10.4B$  – потенциал ионизации ртути,  $\omega_{e,pek}$  – мощность, передаваемая электронами и ионами стенке трубки в расчете на один электрон,  $a$  – коэффициент в формуле  $n_e(r) = n_{e0} J_0(\alpha r / R)$ .

С другой стороны, удельная мощность разряда может быть рассчитана по макропараметрам: разрядный ток и напряжённость продольного электрического поля. При проведении моделирования нет необходимости задавать оба параметра – достаточно задания величины (плотности) разрядного тока. В настоящей модели напряженность продольного электрического поля подбиралась итерационно таким образом, чтобы по окончании расчёта остальных ключевых характеристик разряда, зависящих от неё (ФРЭЭ, электронная температура, концентрации возбужденных атомов ртути), рассчитанные удельные мощности разряда по макро- и микропараметрам плазмы совпадали. При этом могут использоваться различные методы, например, метод бисекции.

**Алгоритм расчёта** представляет собой сложную систему вложенных циклов, коротко охарактеризовать которую можно иерархическим списком. При проведении вычислений на каждом вложенном уровне параметры вышестоящего уровня считались задаваемыми внешне. Часть параметров для каждого конкретного случая расчёта задавалась и не изменялась на протяжении всего расчёта: температура, состав и давление буферного газа, плотность и частота разрядного тока, радиус разрядной трубки.

*Алгоритм расчёта:*

- Поиск оптимального давления паров ртути в разряде – оптимум генерации излучения с длиной волны 185 нм;
- Согласование модели по удельной мощности разряда - подбор напряженности продольного электрического поля;
- Расчёт вида ФРЭЭ и электронной температуры;
- Расчёт концентраций возбужденных атомов ртути с учётом переноса излучения в плазме.

Поиск оптимального давления паров ртути в плазме вёлся в виду того, что при проведении натуральных измерений не было возможности его измерить.

## **2.2. Заключение к главе 2**

В главе 2 описываются основные аспекты замкнутой самосогласованной модели электрического разряда в парах ртути и инертного газа, использованной в настоящей работе. 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. В изложенной модели учитывается отличие от равновесной функции распределения электронов по энергиям за порогом возбуждения атома ртути (4,7 эВ). Расчёт радиальных концентраций возбужденных атомов ртути (основное состояние, 6 возбужденных уровней и уровень ионизации) учитывает перенос резонансного излучения в плазме, при этом принимается во внимание эффект частичного спектрального перемешивания по частотам для линии 185 нм. Результаты сравнения модельного расчёта с измеренными на практике значениями приведены в главе 4.

### 3. Экспериментальная установка и методики измерений

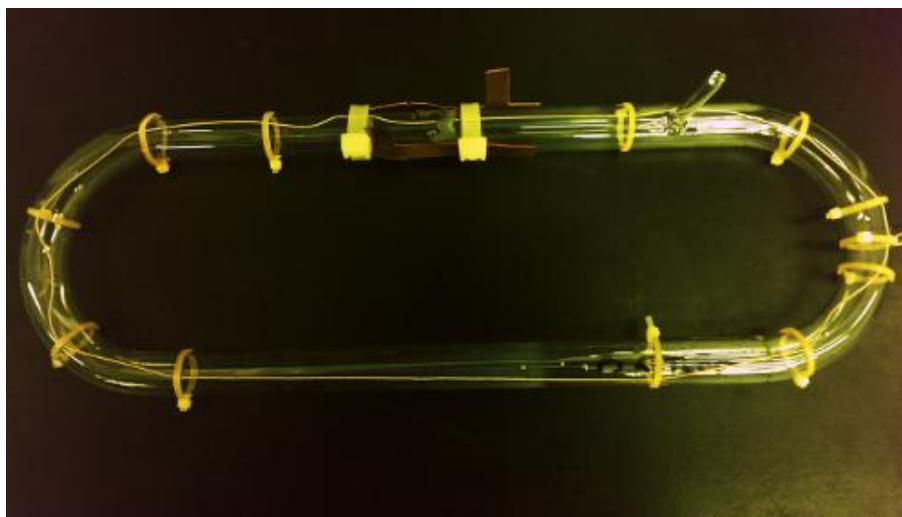
#### 3.1. Объекты исследования

Электрический разряд переменного тока в смеси паров ртути и инертных газов создаёт плазму, генерирующую излучение, в составе которого присутствуют две интенсивные резонансные (для атома ртути) линии с длинами волн 254 и 185 нм. Оптимальным давлением паров ртути с точки зрения эффективности генерации этого излучения является диапазон 0,1-10 Па. Давление буферной газовой смеси находится, как правило, в пределах 1 – 5 Торр, а состав может варьироваться (0-100% неона в смеси).

В качестве объектов исследования были выбраны электрический дуговой и индукционный разряд трансформаторного типа в смеси паров ртути и инертных газов. Параметры варьировались в следующих диапазонах: плотность тока – 0,75 – 1,5 А/см<sup>2</sup>; давление смеси буферных газов – 0,1 – 2 Торр; состав буферной газовой смеси – спектрально чистые неон, аргон, криптон и их смеси в различных пропорциях; частота разрядного тока – 80 кГц для дугового электродного разряда, 265 кГц – для индукционного.

В рамках данной работы ставилась задача изучить влияние параметров разряда (плотность тока, состав и давление буферной смеси) на эффективность генерации излучения с длинами волн 254 нм и 185 нм.

**Использованные источники УФ излучения.** Для исследования характеристик индукционного разряда были изготовлены образцы ламп трансформаторного типа 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)  $L_{pl} = 815$  мм. Длина лампы – 492 мм, ширина – 100 мм (рис. 3.1). В качестве источника паров ртути использовалась амальгама индия. В качестве буферного газа использовался криптон, аргон и смеси аргона с неоном: 30Ne/70Ar и 60Ne/40Ar; давление буферного газа  $p$  варьировалось от 0,1 до 1,0 Торр. Защитное покрытие на внутреннюю поверхность колб ламп не наносилось.



*Рис. 3.1 Внешний вид экспериментального образца безэлектродной лампы, использованной для изучения характеристик индукционного разряда.*

Для экспериментального исследования влияние различных параметров (таких как плотность тока разряда, давление и состав буферной смеси) на характеристики дугового разряда и закономерности генерации ВУФ излучения 185 нм (удельный поток и КПД генерации), были изготовлены образцы амальгамных газоразрядных ламп низкого давления с оксидными накаливаемыми электродами с колбой из минерального кварца с длиной межэлектродного разрядного промежутка 200-1000 мм и внутренним диаметром 16,6 мм (рис. 3.2).

Величина диаметра разрядной трубки выбрана из следующих соображений: увеличение диаметра ведет к снижению удельной мощности и увеличению стоимости изделия, а уменьшение диаметра, хотя и позволяет добиться более высоких значений удельного потока, одновременно ведет к увеличению нагрузки на защитное покрытие колбы. С двух сторон в кварцевую трубку заштамповываются электроды. Электроды (их часть, расположенная внутри колбы) представляют из себя закрученный в двойную спираль вольфрамовый керн, на который сверху навивается дополнительная спирализация из нити малого диаметра - таким образом получается электрод с тройной спирализацией. Спирализация керна позволяет увеличить длину нити, при сохранении компактности. В свою очередь, дополнительная спирализация позволяет лучше удерживать на электроде



эмиссионное вещество. Для улучшения эмиссионных свойств, электроды покрывают суспензиями из оксидов щелочноземельных металлов с различными присадками. В качестве буферных газов использовались неон и аргон, а также их смеси в процентном отношении 30Ne/70Ar, 60Ne/40Ar и 85Ne/15Ar, давление буферной смеси изменялось в пределах от 0,1 до 2 Торр. Защитное покрытие на внутреннюю поверхность колб ламп не наносилось.



*Рис. 3.2 Внешний вид экспериментальных образцов электродных ламп.*

Для исследования влияния малых добавок криптона на параметры дугового разряда была изготовлена партия амальгамных ламп из безозонового кварца с внутренним диаметром трубки 29 мм и длиной межэлектродного разрядного промежутка 1460 мм. Процентное содержание Kr в смеси варьировалось от 0 до 1%, общее давление газовой смеси – 0,5 – 2 Торр.

При исследовании способов увеличения физического и полезного срока службы упомянутых выше источников УФ излучения были изготовлены образцы амальгамных ламп из безозонового кварца с внутренним диаметром 25 и 29 мм и длиной межэлектродного разрядного промежутка 220 мм и 1460 мм. В качестве

буферного газа использовался криптон, аргон и смеси неона с аргоном и криптоном при давлении 0,5 – 1,8 Торр. Защитное покрытие на внутреннюю поверхность колб ламп либо не наносилось, либо наносилось экспериментальное покрытие оксид-шпинельного смешанного состава.

**Использованные источники питания ламп.** Для исследования характеристик индукционного разряда был разработан и создан пускорегулирующий аппарат, позволяющий регулировать частоту питающего тока и потребляемую лампой мощность. ВЧ индуктор состоял из двух кольцевых магнитопроводов с общим сечением 4 см<sup>2</sup>, симметрично размещенных на замкнутой трубке, и двух индуктивных катушек (каждая 16 витков), охватывающих «свой» магнитопровод и соединённых параллельно (Рис. 3.3).



*Рис. 3.3 Внешний вид кольцевого магнитопровода с намотанным на него индуктором.*

Для исследования характеристик дугового электродного разряда в качестве источника питания экспериментальных ламп был выбран специализированный ЭПРА производства ОАО «ЭНЭФ», способный поддерживать в лампе стабилизированный переменный ток с частотой ~80 кГц и действующим значением от 1,6 до 3,2 А.

Для проведения остальных экспериментов использовались серийные ЭПРА ОАО «ЭНЭФ», позволяющие поддерживать в исследуемой лампе стабилизированный переменный ток 3,2 А или 5 А с частотой 38 кГц.

### **3.2. Методики измерения потока УФ излучения**

Для измерения мощности (потока) УФ излучения на длине волны 254 нм, генерируемым газоразрядными лампами низкого давления, могут применяться методики, применяемые и для обычных ламп, генерирующих излучение в видимой части спектра. К таковым относится, например, интегрирующая сфера (сфера Ульбрехта) [101,102]. Несомненным плюсом использования таких установок являются то, что они позволяют получить полную информацию о полном потоке излучения источника всего за одно измерение. Тем не менее, при работе с газоразрядными лампами низкого давления, проявляются и недостатки таких устройств. Такие источники имеют линейные размеры  $L$  до 2,5 м, а диффузно отражающее покрытие, наносимое на внутреннюю поверхность интегрирующей сферы весьма дорого и быстро деградирует при воздействии на него высокоэнергетичным УФ излучением. По этим причинам интегрирующие сферы больших размеров являются дорогостоящими уникальными установками, которые редко применяются в лабораторных исследованиях, и служат для проверки других методик или контрольных измерений. Возможно также применение различных гониометрических методик, но в этом случае процесс измерения будет занимать значительное время.

Для осесимметричных источников излучения измерить поток излучения источника можно и более простым способом. Например, при измерении потока излучения бактерицидных ламп в мировой практике общепринятым является использование методики Кайтца [103-105], либо различных её модификаций [74]. Схема измерения по методике Кайтца приведена ниже (рис. 3.4). Поток рассчитывается по формуле Кайтца:

$$\Phi_{254} = \frac{2\pi^2 EDL}{2\alpha + \sin(2\alpha)}, \quad (3.1)$$

где,  $E$  – облученность датчика на длине волны 254 нм, остальные обозначения – в соответствии с рис. 3.4,  $L$  – длина источника,  $D$  – расстояние от середины лампы до датчика излучения.

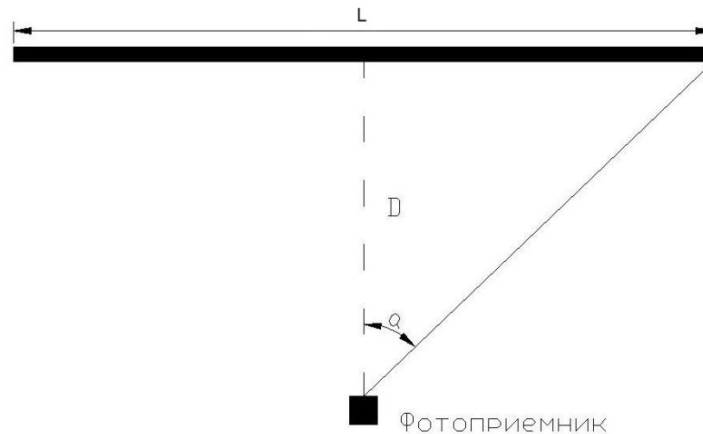


Рис. 3.4 Схема измерения в методике Кайтца[104]

Формула (3.1.) справедлива при нижеследующих условиях:

- излучение лампы однородно по длине столба;
- датчик расположен от лампы на достаточно большом расстоянии, и источник можно считать бесконечно тонким;
- лампа является ламбертовским источником оптического излучения;
- рабочая апертура датчика позволяет охватить лампу целиком;
- датчик обладает косинусной угловой характеристикой в пределах  $\pm\alpha$  от нормали

При больших расстояниях между лампой и датчиком, формула (3.1.) переходит в:

$$\Phi_{254} = ED^2\pi^2. \quad (3.2)$$

При малых расстояниях, формула (3.1.) переходит в формулу для бесконечно длинной светящей нити [106]:

$$\Phi_{254} = \frac{4\pi^2 ED^2}{2+\pi}. \quad (3.3)$$

Данная схема измерений может применяться как к источникам излучения с длиной волны 254 нм, так и - 185 нм, при условии наличия датчика с подходящей селективностью и проведения эксперимента в атмосфере газов, не поглощающих излучение с длиной волны 185 нм (например, азот).

Для измерения мощности ВУФ излучения источников на длине волны 185 нм может быть использован обратный по своему смыслу актинометрический подход [19,107]. Данный метод базируется на поглощении воздушной или кислородной средой квантов излучения с длиной волны 185 нм с последующей фотодиссоциацией молекул кислорода и образованием молекул озона. Измеряя концентрацию наработанного озона (оптическими или химическими методами), можно рассчитать мощность потока исходного ВУФ излучения лампы. Данная методика хороша тем, что квантовый выход разложения исходных и образования новых веществ в некоторых реакциях хорошо известен, а условия и результат эксперимента обладают достаточно хорошей воспроизводимостью [19]. К числу недостатков данного метода стоит прежде всего отнести его технологическую сложность: требуется подавать осушенный кислород, а наработанный озон быстро и безопасно удалять.

### **3.3. Методики измерения электрических и излучательных характеристик трубчатых ламп трансформаторного типа**

На рис. 3.5 представлена обобщённая схема экспериментальной установки, которая позволяла измерять поток УФ излучения лампы, ток и напряжение плазмы, ток и напряжение в ВЧ индукторе, а также мощности, потребляемые плазмой, лампой (к потребляемой плазмой мощности добавлялась мощность потерь в ВЧ индукторе) и комплектом лампа + ЭПРА (общая потребляемая всем устройством мощность).

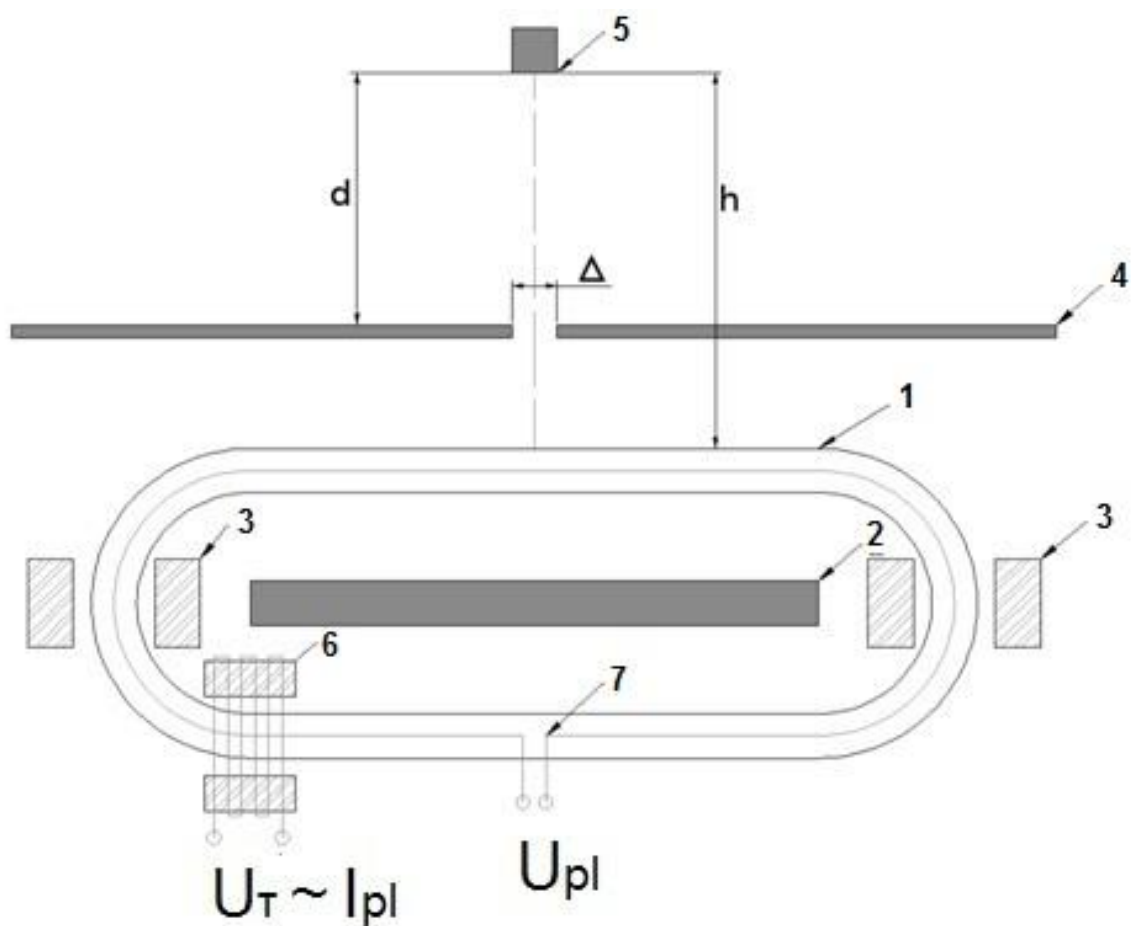


Рис. 3.5 Схема измерения УФ потока лампы. 1- разрядная трубка, 2 — экран, 3 — индуктор, 4 — короб со щелью, 5 — приёмник излучения, 6 — трансформатор тока, 7 — измерительный виток провода.

Характеристики разряда измерялись в течение всего времени его горения. Сразу после зажигания разряда начинается рост поток регистрируемого УФ излучения, затем поток достигает максимального значения (в этот момент давление паров ртути считалось оптимальным для генерации УФ излучения длиной волны 254 нм), а затем уменьшается и выходит на стационарное значение.

Измерение УФ потока (рис. 3.5) проводилось в приближении малых углов и при допущении, что исследуемая лампа являлась ламбертовским источником оптического излучения и излучала равномерно по всей длине. Лампа помещалась в чёрный металлический заземленный короб, в котором имелась щель шириной  $\Delta = 30$  мм и длиной 150 мм, через которую излучение лампы попадало на поверхность приёмника излучения, расположенного на расстоянии  $d = 1500$  мм от щели.

Расстояние от лампы до фотодатчика составляло  $h = 1600$  мм. Чтобы избежать попадания излучения от «задней» части лампы на поверхность приёмника излучения, в полость лампы устанавливался чёрный экран. Исходя из предположения о равномерности излучения лампы по длине, поток всей лампы можно вычислить по излучению небольшого участка, вырезаемого щелью. При такой схеме измерений облучённость, создаваемая на чувствительной поверхности приёмника излучения, была пропорциональной потоку лампы (приближение формулы (3.1) при малых значениях  $\alpha$  [13]):

$$\Phi_{254} = \frac{\pi^2 \cdot h d L E}{\Delta}, \quad (3.4)$$

где  $L$  – осевая длина лампы;  $h$  – расстояние от лампы до датчика;  $E$  – облучённость датчика;  $d$  – расстояние от щели до фотоэлемента;  $\Delta$  – ширина щели.

Приёмником УФ-излучения служила «солнечнослепая» фотометрическая головка SED 240/W, чувствительная к излучению только в окрестности резонансной линии ртути 254 нм. Фототок приёмника излучения регистрировался цифровым радиометром IL1700, данные с которого передавались на персональный компьютер по физическому интерфейсу RS232. Затем в среде программирования LabView производился пересчёт полученных значений облучённости в УФ-поток, генерируемый исследуемой лампой. Измерения электрических характеристик индукционного разряда проводились с использованием цифрового многоканального осциллографа Tektronix TDS640A (входное сопротивление соответствующих измерительных каналов было установлено равным 1 МОм). 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 измерения тока индуктора в электрическую цепь последовательно с индукционными катушками был установлен резистор (1 Ом), сопротивление которого мало по сравнению с реактивным сопротивлением индуктора на рабочей частоте ( $f = 265$  кГц).

Напряжение на индукторе измерялось непосредственно с помощью высоковольтного делителя, подключенного к осциллографу. Мощности плазмы и лампы были получены путём перемножения мгновенных значений соответствующих сигналов и последующим интегрированием (осциллограф Tektronix TDS640A имеет необходимые для этого встроенные функции). Общая потребляемая всем устройством мощность измерялась подключаемым между сетью питания и ЭПРА цифровым мультиметром UT71E, имеющим функцию измерения мощности в широком диапазоне частот (до 400 кГц).

Лампа питалась с помощью ЭПРА, позволяющего регулировать частоту питающего тока и потребляемую лампой мощность. ВЧ индуктор состоял из двух кольцевых магнитопроводов с общим сечением 4 см<sup>2</sup>, симметрично размещенных на замкнутой трубке, и двух индуктивных катушек (каждая 16 витков), охватывающих «свой» магнитопровод, соединённых параллельно. Поскольку выходной каскад ЭПРА вместе с лампой представлял собой резонансный контур, то для получения высокой добротности и, как следствие, больших напряжений рабочая частота ( $f = 265$  кГц) выбиралось немного выше резонансной.

Для снижения напряжения зажигания индукционного разряда в трубке предварительно зажигался емкостной разряд, создаваемый с помощью приложенных снаружи, к стенкам разрядной трубки двух металлических пластин, на которые подавалось ВЧ напряжение с ВЧ индуктора.

### **3.4. Методика измерения потока излучения и электрических характеристик линейных озоногенерирующих ламп**

Изложенная ниже методика измерения потока ВУФ излучения была подробно изложена, апробирована и использована в работах [75] и [86].

Технически, задача измерения потока ВУФ излучения источника с длиной волны 185 нм может быть решена при наличии датчика, чувствительного в этом диапазоне. Для выделения линии 185 нм и уменьшения фоновой засветки в процессе



выполнения экспериментальных исследований применялась схема измерения (рис. 3.6) на основе вакуумного монохроматора McPherson 218 (рис. 3.7). Монохроматор McPherson 218 рассчитан на спектральный диапазон от 105 нм (входное окно монохроматора выполнено из фторида магния). С помощью диффузионного насоса Varian DS-102 и турбомолекулярного насоса Varian Turbo – V 70 в рабочей камере монохроматора создается давление  $10^{-3}$  Торр. После откачки камера может быть заполнена другим газом.

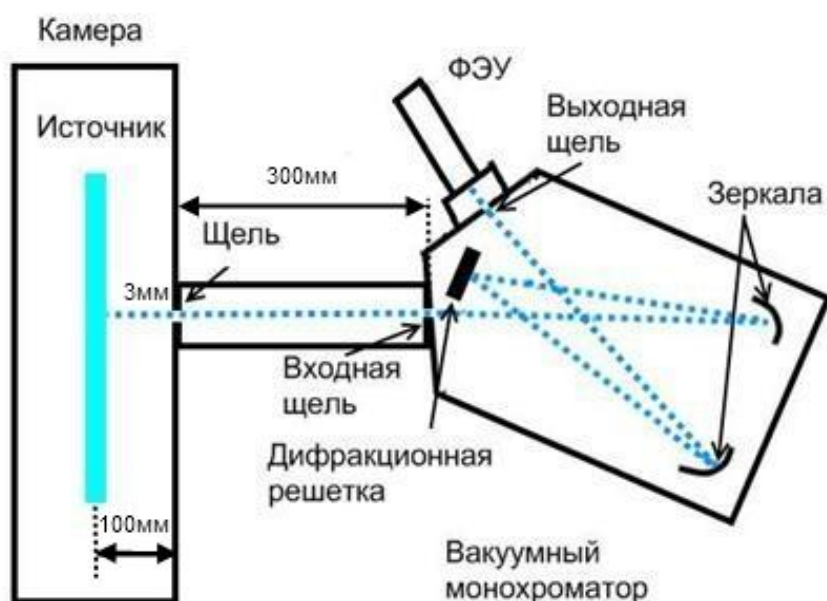


Рис. 3.6. Схема измерения потока ВУФ излучения на базе вакуумного монохроматора.

В комплекте монохроматора есть две плоские алюминиевые дифракционные решетки 600 шт/мм с максимумом отражения на длине волны 500 нм и 1200 шт/мм с максимумом отражения на 200 нм, и была использована для измерений ВУФ излучения. Геометрический размер дифракционной решетки 154x206 мм. Решетка работает в первом порядке дифракции, дисперсия составляет 2,6 нм/мм.

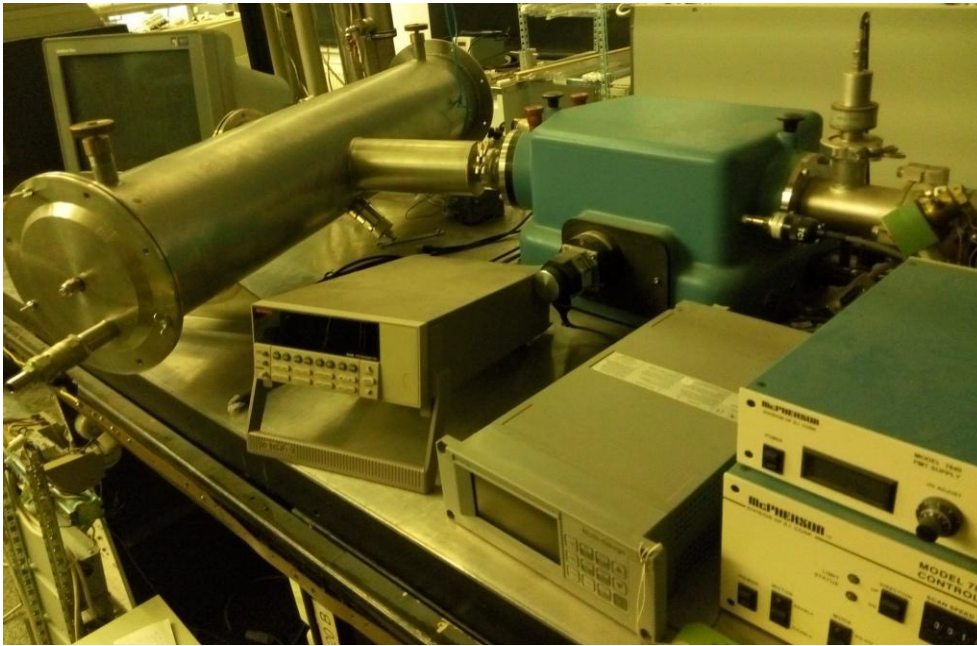


Рис. 3.7 Вакуумный монохроматор McPherson 218 в составе измерительного комплекса ВУФ излучения дугового электродного разряда.

Для измерения излучения использовался фотоэлектронный умножитель (ФЭУ) РМТ 658-1 (Hamamatsu R6095). Спектральная чувствительность и квантовый выход фотокатода ФЭУ приведены на рис. 3.8.

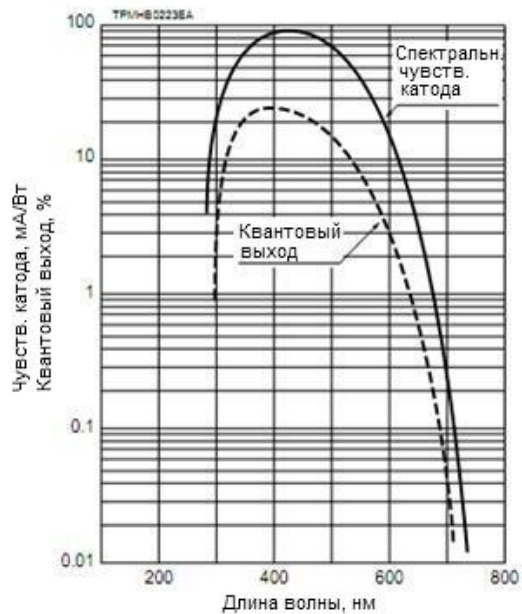


Рис. 3.8. Спектральная чувствительность ФЭУ Hamamatsu R6095.

Для измерения ВУФ излучения перед ФЭУ установлен сцинтиллятор из салицилата натрия, излучающий в диапазоне 350-550 нм. В качестве источника напряжения для ФЭУ использовался PMT Power Supply Model 7640 Series. Оптимальное значение ускоряющего напряжения было определено экспериментально и составило 350 В. Темновой ток ФЭУ, измерявшийся с помощью пикоамперметра KEITHLEY 6485, при данном напряжении был равен 0,002 нА, что пренебрежимо мало по сравнению с величиной измеряемого сигнала. Ширина входной и выходной щелей монохроматора была выбрана равной 300 мкм. Для оценки погрешности, вносимой рассеянным излучением других спектральных линий, измерялся отклик измерительной системы, настроенной на резонансную линию 185 нм. При использовании бактерицидной лампы, колба которой была изготовлена из кварца с малой добавкой оксида титана, что не уменьшает мощность излучения линии 254 нм и других линий с большей длиной волны, но практически полностью блокирует выход линии 185 нм. Фоновый сигнал фототока ФЭУ для этого случая составил всего 0,07 нА, что по величине составляло менее 0,1% от фототока измеряемого сигнала.

Для проведения измерений озonoобразующего ВУФ излучения линии 185 нм, а также для контроля и поддержания необходимого режима работы лампы была создана экспериментальная измерительная камера (рис. 3.9).

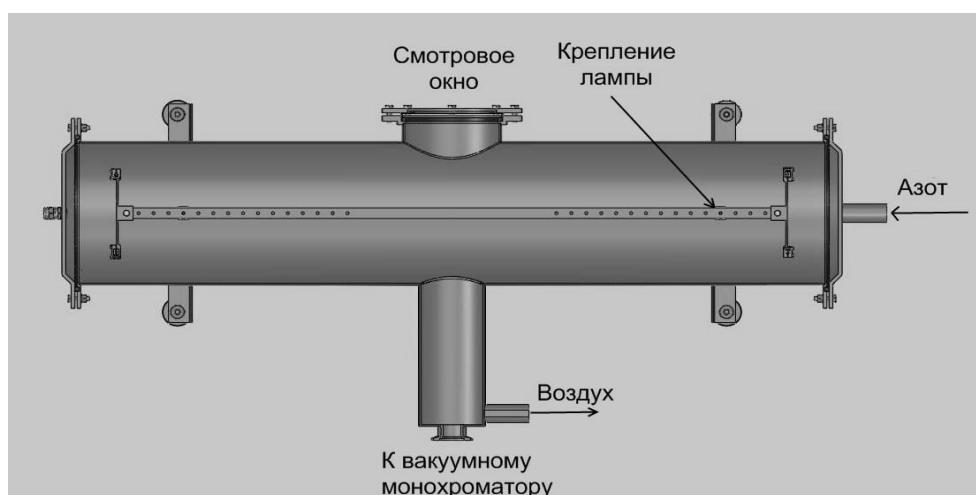


Рис. 3.9. Экспериментальная измерительная камера.

Измерительная камера представляет собой цилиндр из нержавеющей стали (коэффициенты отражения  $\rho_{254} \approx 0,3$ ,  $\rho_{185} \approx 0,1-0,15$ ) диаметром 200 мм, вдоль оси, которого устанавливалась лампа. По центру цилиндра перпендикулярно к оси камеры врезан металлический патрубок диаметром 90 мм, с помощью которого камера присоединялась к входному окну вакуумного монохроматора. У входа в патрубок была расположена щель шириной 3 мм и высотой 15 мм, выполняющая функцию диафрагмы, соответственно на входную щель вакуумного монохроматора, выполняющую роль апертурной диафрагмы, попадает только часть потока лампы. Пучок излучения, прошедший входную щель монохроматора, попадает на фокусирующий элемент (вогнутое зеркало), отражается от него на дифракционную решетку. Затем, изображение нужной спектральной линии попадает на фокусирующий элемент – вогнутое зеркало, которое строит его изображение в плоскости выходной щели. Равенство входной и выходной щели монохроматора (300 мкм) обеспечивает максимальную разрешающую способность.

Для предотвращения образования озона излучением линии 185 нм экспериментальная камера и патрубок заполнялись азотом особой чистоты 99,996%.

Для обеспечения возможности охлаждения лампы (при слишком больших разрядных токах) в экспериментальной камере установлены вентиляторы. Для увеличения и регулирования концентрации паров ртути на лампе под местом расположения амальгамы закреплялась электрическая спираль, которая дополнительно подогревала амальгаму.

В приведенной схеме измерения, детектор реагирует на энергетическую яркость линий 185 нм. С помощью щелей выделялся небольшой участок излучающей поверхности лампы. Элементом, выделяющим телесный угол, в пределах которого сила излучения постоянна, являлась дополнительная щель, играющая роль диафрагмы Гартмана, выделяющей в продольной плоскости исследуемый участок положительного столба разряда. Было рассчитано, что для обеспечения погрешности в 1% необходимо ограничить ширину исследуемого участка размером 5,6 см. Это достигалось использованием диафрагмы шириной

3 мм. Рассчитанная систематическая ошибка измерений интенсивности излучения лампы на данном стенде составила 4%.

Измерения абсолютных значений мощности излучения линии 185 нм проводились посредством сравнения с калибровочным источником, в качестве которого использовалась ртутная лампа низкого давления типа Heraeus NIQ 60/35, которая согласно проведённым измерениям в независимой светотехнической лаборатории Philips имеет мощность излучения линии 185 нм 5 Вт и межэлектродное расстояние 383 мм. При калибровке предполагается, что положительный столб разряда излучает одинаково по всей длине. Такое допущение оправдано, и подтверждается многолетней практикой измерений в лаборатории НПО «ЛИТ» [74,106]. Измеряемый сигнал при этом будет прямо пропорционален удельному потоку лампы в исследуемом участке спектра.

Погрешность определения потока излучения определялась погрешностью калибровочных измерений и составляла не более 12%. Зачастую определение абсолютного значения мощности УФ излучения не требуется, достаточно определить отношение двух мощностей или их разность. В настоящей работе больший интерес представляло сравнение характеристик ртутного разряда низкого давления ламп при различных его параметрах. В этом случае погрешность калибровки уже не влияет на точность измерений, поэтому погрешность определения отношения или разности мощностей не превышает 4-5%.

Параллельно с измерением потока ВУФ излучения измерялась и мощность излучения источников на длине 254 нм. Для этого использовался вмонтированный в стенку камеры и направленный на ось лампы датчик IS-4, снабженный черной оправой – диафрагмой Гартмана. Сигнал датчика IS-4 был откалиброван по мощности трубчатой бактерицидной лампы такого же диаметра и длины, установленной на место исследуемой лампы. Погрешность калибровки рабочего средства измерения в абсолютных единицах не превышает 10% (согласно сертификату). Погрешность, возникающая от измерения к измерению, не превышает 1 %.

В качестве стабилизированного источника тока с частотой 80 кГц использовался электронный пускорегулирующий аппарат производства АО «ЭНЭФ». С использованием данных аппаратов, эффективное значение силы тока можно было задавать в диапазоне 1,6 – 3,2 А. Применение ЭПРА усложняет измерение параметров разряда, таких как разрядный ток лампы, напряжение на лампе и мощность лампы. Все эти параметры изменяются с частотой 80 кГц, поэтому для их измерения необходимо использовать приборы с высокой скоростью съема данных.

Для исследования электрических характеристик разряда в настоящей работе использовался анализатор мощности YOKOGAWA PZ4000, являющийся специализированным цифровым осциллографом с максимальной частотой оцифровки 5 миллионов точек в секунду. Этого достаточно для оценки параметров исследуемых в настоящей работе сигналов на требуемой частоте. YOKOGAWA PZ4000 имеет 4 измерительных канала тока и 4 измерительных канала напряжения.

Прямое измерение силы разрядного тока лампы невозможно, так как с выходных контактов ЭПРА стекает сумма разрядного тока лампы и тока накала электрода. Измерения тока разряда проводились с помощью откалиброванных токовых клещей Chauvin Arnoux C 160, обеспечивающих возможность измерения тока с частотой до 100 кГц. Токовые клещи присоединялись к анализатору мощности, сквозь них пропускали два провода, ведущих к одному из электродов лампы (рис. 3.10). При таком подключении наведённое напряжение на токовых клещах зависит от разности токов, по одному из которых течет ток накала электрода, по другому - суммарный ток, и пропорционально току лампы.

Напряжение разряда измерялось прямым методом – электроды источника соединялись с входами для измерения напряжения анализатора мощности. Анализатор мощности YOKOGAWA PZ 4000 позволяет автоматически рассчитать мощность разряда через интеграл произведения мгновенных значений тока на мгновенные значения напряжения при их измерении одним измерительным элементом, что и делалось в настоящей работе.

Инструментальная погрешность измерения напряжения на лампе и тока лампы, посчитанная, исходя из класса точности прибора и использованного рабочего диапазона, не превышала 1%. Оценка относительной инструментальной погрешности измерения мощности лампы может быть приближенно получена, как корень из суммы квадратов относительных погрешностей тока и напряжения, и не превышает 2%.

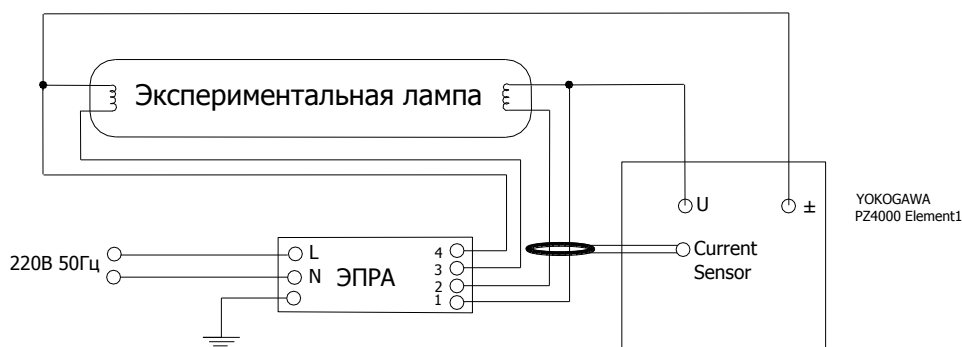


Рис. 3.10. Схема измерения электрических параметров электродной лампы.

ЭПРА, использованные в настоящей работе, обеспечивали стабилизацию значения разрядного тока с точностью  $\pm 5\%$ . При проведении исследований было выяснено, что в исследуемом диапазоне плотностей токов отклонение разрядного тока от номинального значения на 5% не оказывает существенного влияния на мощность излучения линии с длиной волны 185 нм.

При измерении характеристик разряда не имелось возможности измерить давление паров ртути. Поэтому с помощью внешнего подогрева (подогревная спираль) и охлаждения (вентиляторы) устанавливался тот температурный режим амальгамы, при котором КПД генерации излучения с длиной волны 185 нм был максимальным. Типичная зависимость регистрируемых параметров от времени представлена на рис. 3.11.

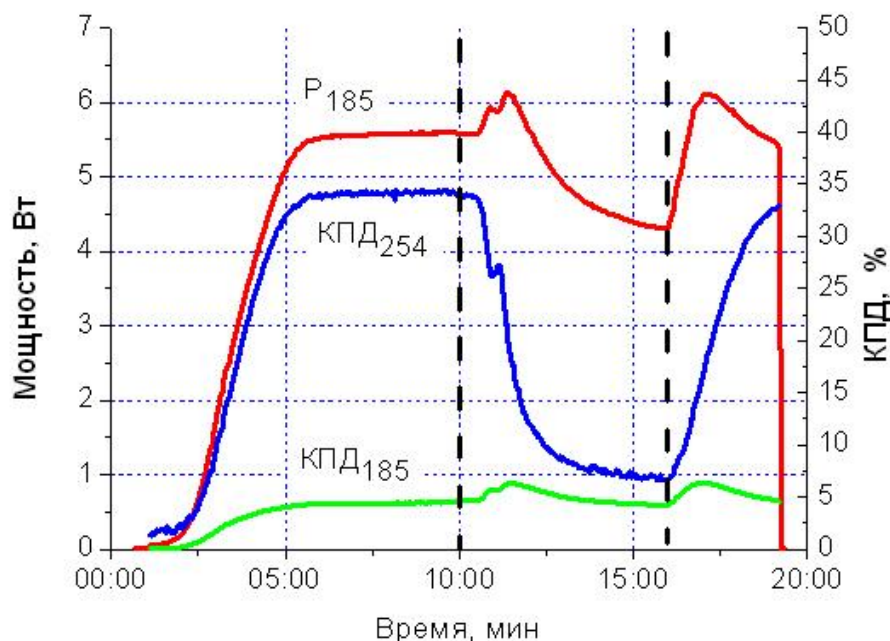


Рис. 3.11. Регистрируемые во времени характеристики озоногенерирующей лампы. Вертикальными линиями обозначены моменты включения и выключения внешнего подогрева амальгамы.

Для расчёта несистематической погрешности необходимо учитывать две составляющие:

- составляющую, обусловленную технологическим разбросом;
- случайный разброс при повторных измерениях одного и того же образца.

Чтобы в дальнейшем не загромождать графики изображением погрешностей в каждой экспериментальной точке, ниже указаны предельные значения для погрешностей обоих типов (таблица 3.1).

Таблица 3.1. Характерные погрешности измерения.

Составляющая погрешности	Поток, %	Мощность, %	КПД, %
Технологическая	1,5	4	4
Случайная	1,0	0,8	1,2
Суммарная	2,5	5	6



Для максимально быстрого и точного сбора требуемых данных, на базе экспериментальной установки разработана автоматическая система измерений, позволяющая изменять разрядный ток источника, регистрировать потоки и КПД генерации УФ излучения с длинами волн 185 и 254 нм и сохранять все данные в формате Excel.

### **3.5. Методика измерения падения мощности в приэлектродных слоях**

При исследовании параметров дугового разряда стоит учитывать то, что суммарная мощность, потребляемая источником, складывается из мощности, рассеиваемой в положительном столбе и мощности, теряемой в приэлектродных слоях. В тех случаях, когда размеры экспериментальной установки не позволяют изготавливать образцы большой длины, доля общей мощности лампы, приходящаяся на приэлектродные слои, может быть существенной, что будет вносить ощутимую погрешность в измерение реальной мощности, рассеивающейся в положительном столбе разряда.

Исходя из того, что общая мощность лампы складывается из мощности положительного столба и мощности, теряемой в приэлектродных слоях, можно провести линейную экстраполяцию мощности лампы до длины разрядного промежутка, равной нулю (по имеющимся данным для реальных длин разрядных промежутков, как на рис. 3.12). Тогда это значение даст примерную величину приэлектродных потерь в лампах с одинаковыми конструктивными параметрами (одинаковый состав и давление буферного газа, одинаковый электрод) при заранее заданной величине разрядного тока.

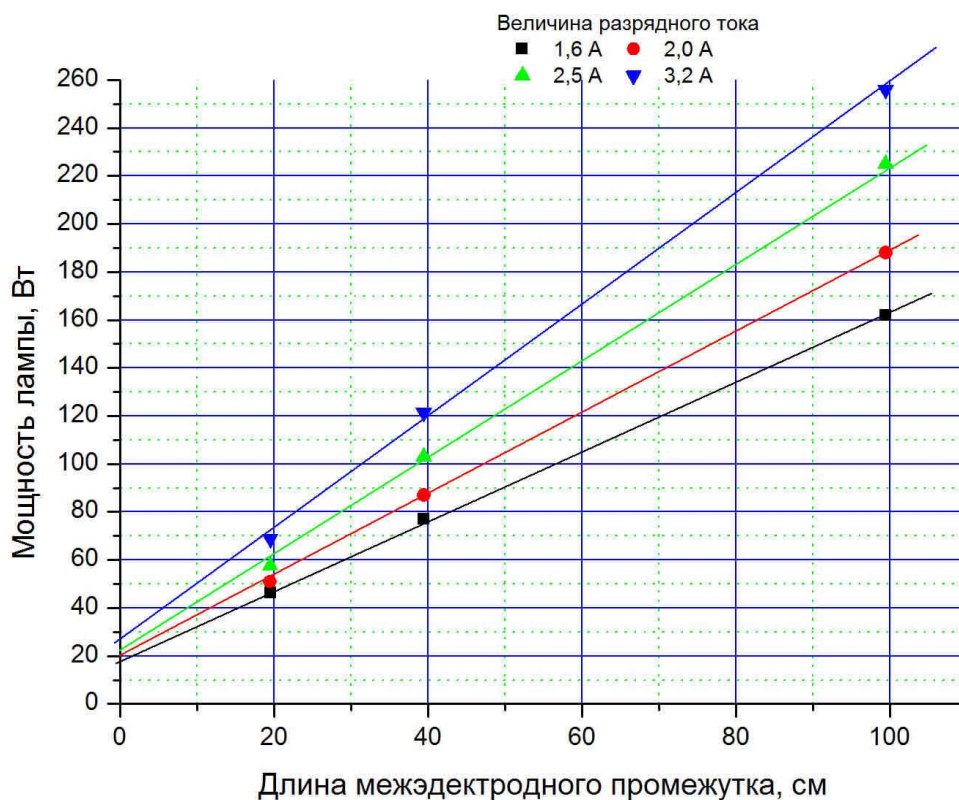
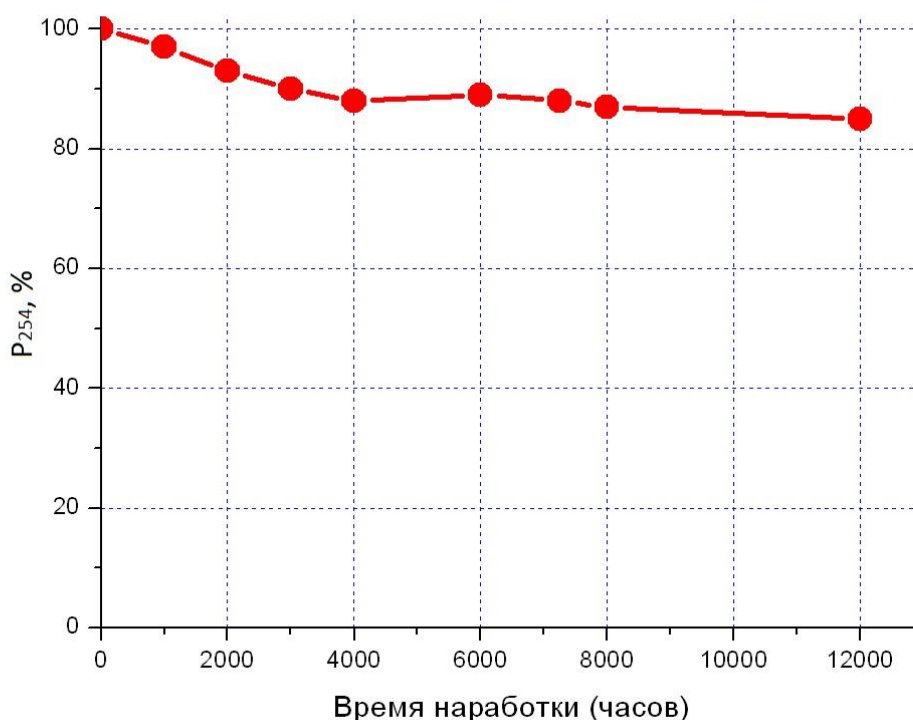


Рис. 3.12. Зависимость средней мощности, потребляемой лампами с наполнением 100% Ar,  $p=0,3$  Торр, от межэлектродного расстояния при различных токах разряда. Внутренний диаметр колбы равен 16,6 мм.

### 3.6. Методика исследования эффективности защитных покрытий

Эффективность работы защитного покрытия для газоразрядных ламп низкого давления традиционно оценивалась по спаду мощности УФ излучения с длиной волны 254 нм. Для этого изготавливалась пробная партия ламп с одинаковыми параметрами. Лампы устанавливались в закрытые металлические хорошо вентилируемые короба и питались от стандартных ЭПРА. В процессе горения ламп периодически измерялась мощность излучения на длине волны 254 нм по схеме Кайтца с использованием дополнительной диафрагмирующей щели, описанной в п. 3.3. Величина мощности УФ излучения в точке, соответствующей 100 часам работы лампы, взята за 100% в соответствии с общепринятыми нормами измерений

излучения УФ ламп в РФ и за рубежом [12,13,104]. Типичная кривая полученных результатов представлена на рисунке ниже.



*Рис. 3.13. Типичная кривая спада мощности УФ излучения для стандартной бактерицидной лампы.*

### **3.7. Заключение к главе 3**

В качестве объектов исследования были выбраны электрический дуговой и индукционный разряд трансформаторного типа в смеси паров ртути и инертных газов. Параметры варьировались в следующих диапазонах: плотность тока – 0,75 – 1,5 А/см<sup>2</sup>; давление смеси буферных газов – 0,1 – 2 Торр; состав буферной газовой смеси – спектрально чистые неон, аргон, криптон и их смеси в различных пропорциях; частота разрядного тока – 80 кГц для дугового электродного разряда, 265 кГц – для индукционного.

В рамках данной работы ставилась задача изучить влияние параметров разряда (плотность тока, состав и давление буферной смеси) на эффективность генерации

излучения с длинами волн 254 нм и 185 нм. В связи с этим, в настоящей главе приводится описание методик измерения электрических и излучательных характеристик дугового электродного и индукционного разрядов низкого давления. Рассмотренные методики были использованы при проведении исследований, результаты которых подробно описаны в главе 4. Для дугового электродного разряда описана методика измерения приэлектродных потерь мощности, позволяющая учитывать их при измерении характеристик реальных источников и находить более точно КПД и мощность положительного столба дугового разряда.

В конце данной главы описывается общепринятая методика оценки эффективности защитных покрытий, служащих для увеличения полезного срока службы газоразрядных источников низкого давления.

## 4. Результаты экспериментов и их обсуждение

### 4.1. Характеристики индукционного разряда

#### 4.1.1. Зависимости электрических и излучательных характеристик

##### индукционного разряда от давления и состава буферной смеси

В качестве источника индукционного разряда были использованы лампы трансформаторного типа с внешним диаметром замкнутой кварцевой разрядной трубки  $d_2 = 19$  мм, внутренним  $d_1 = 16,6$  мм и длиной плазменного витка (длина осевой линии замкнутой трубки)  $L_{pl} = 815$  мм. Длина лампы – 492 мм, ширина – 100 мм. В качестве источника паров ртути использовалась амальгама индия. В качестве буферного газа использовался криптон, аргон и смеси аргона с неоном: 30Ne/70Ar и 60Ne/40Ar; давление буферного газа  $p_g$  варьировалось от 0,1 до 1,0 Торр. ВЧ индуктор состоял из двух кольцевых магнитопроводов с общим сечением 4 см<sup>2</sup>, симметрично размещенных на замкнутой трубке, и двух индуктивных катушек (каждая 16 витков), охватывающих «свой» магнитопровод, соединённых параллельно. Рабочая частота ЭПРА, создающего разряд в лампе, – 265 кГц.

Методика измерения характеристик разряда приведена в п. 3.3. Как и в электродных лампах после зажигания разряда наблюдался рост мощности УФ излучения, который проходил через максимум, а затем уменьшался.

На рис. 4.1 представлены зависимость потока УФ излучения лампы  $\Phi_{254}$  на длине волны  $\lambda = 254$  нм от давления буферного газа (криптон, аргон и смесь 30Ne/70Ar) при оптимальном давлении паров ртути. Мощность плазмы во всех случаях составила  $175 \pm 10$  Вт. Значения тока разряда  $I_{pl}$  и напряжения на плазменном витке  $U_{pl}$  представлены ниже (таблица 4.1).

Из рис. 4.1 видно, что поток УФ излучения в ртутной лампе с криптоном ниже, чем в лампе с аргоном и смесью 30Ne/70Ar, а зависимость  $\Phi_{254}$  от давления буферного газа обнаруживает в обеих смесях максимум при давлении  $p_g = 0,3$  Торр. Соответственно, при таком же давлении буферного газа достигает максимума (40%) КПД генерации УФ излучения плазмы  $\eta_{pl} = \Phi_{254}/P_{pl}$ . Аналогичную зависимость от  $p_g$

и близкие значения имеют КПД генерации УФ излучения мощных (2-5 А) электродных амальгамных УФ ламп [13].

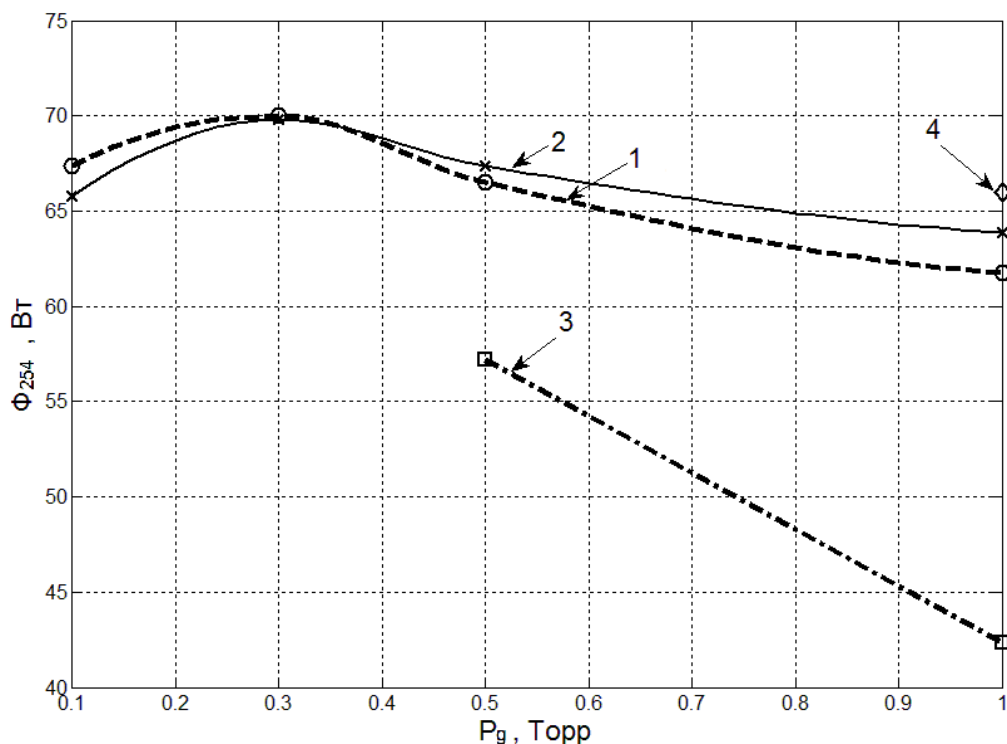


Рис. 4.1. Экспериментальная зависимость потока УФ излучения  $\Phi_{254}$  от давления инертного газа  $p_g$ . Круги и пунктирная линия (1) – Ar, кресты и сплошная линия (2) – Ne/Ar 30/70%, квадраты и штрих-пунктирная линия (3) – Kr, ромб (4) - Ne/Ar 60/40%.

Так как эффективность генерации УФ излучения определяется в значительной степени величиной напряженности ВЧ электрического поля в плазме разряда  $E_{pl}$ , был проведён, при разумном допущении однородности электрического поля вдоль плазменного витка  $\Lambda_{pl}$ , расчет напряженности поля плазмы, как  $E_{pl} = U_{pl}/\Lambda_{pl}$ . Результаты расчета  $E_{pl}$  для ртутной лампы с двумя разными наполнениями - аргон и смесь неона с аргоном - приведены в зависимости от давления буферного газа  $p_g$  на рис. 4.2. Видно, что в диапазоне давлений буферного газа от 1,0 до 0,1 Торр напряженность электрического поля  $E_{pl}$  с уменьшением давления газа сначала возрастает, а затем уменьшается, достигая максимума  $E_{pl} = 0,83$  В/см (Ar) и  $E_{pl} = 0,86$

В/см (30Ne/70Ar) при давлении буферного газа  $p_g = 0,2-0,3$  Торр, практически таком же, при котором максимален поток УФ излучения  $\Phi_{254}$ .

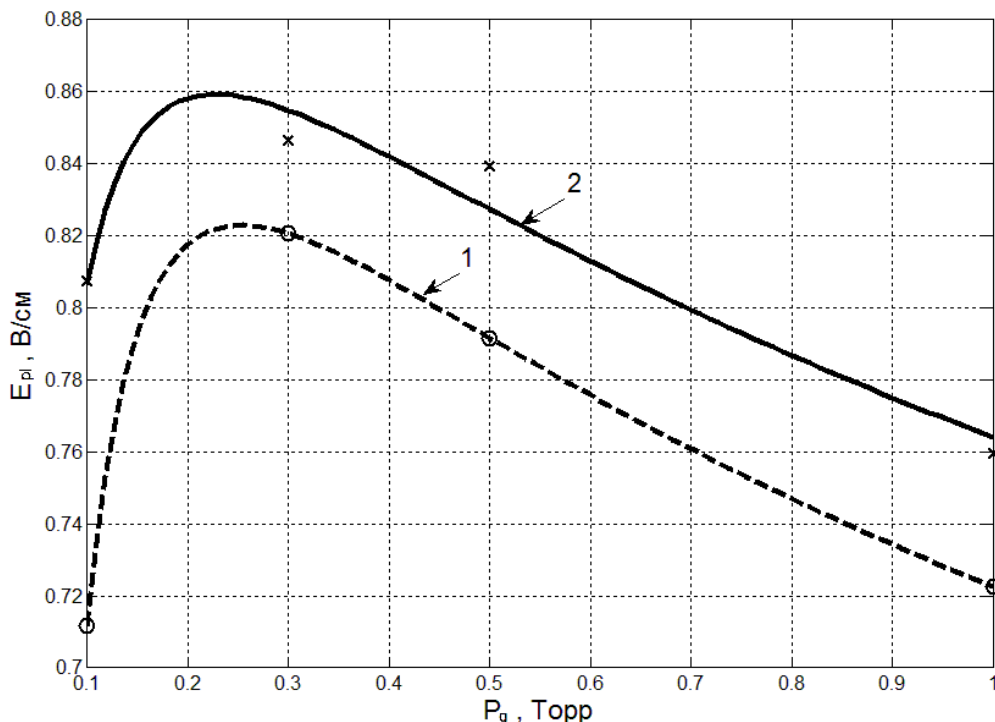


Рис. 4.2. Экспериментальная зависимость напряжённости ВЧ электрического поля плазмы  $E_{pl}$  от давления инертного газа  $p_g$ . Условия горения разряда как на рис. 2. Круги и пунктирная линия (1) – Ar, кресты и сплошная линия (2) – Ne/Ar 30/70%.

Действительно, немонотонная зависимость  $E_{pl}$  от  $p_g$  характерна для плазмы низкого давления в парах металлов и инертных газов, равно как и в их смесях, и удовлетворительно описывается известным соотношением [11]:

$$E_{pl} \approx \frac{1,5T_e \cdot \chi^{1/2}}{\lambda_e} \quad (4.1)$$

Здесь  $T_e$ - электронная температура;  $\chi$  - доля энергии, теряемая средним электроном между двумя соударениями,  $\lambda_e$  - средняя длина пробега электрона. Отметим, что при давлениях газа  $p_g = 0,1-1,0$  Торр в плазме индукционного разряда, работающего на частоте  $f = 265$  кГц, выполняется условие постоянно-токовой аналогии  $\omega \ll \nu_{el}$  ( $\nu_{el}$ - частота упругих соударений электронов с атомами) [11].

Таблица 4.1. Электрические параметры плазмы индукционного разряда.

№	Наполнение лампы	Ток плазмы, $I_{pl}$ , А	Напряжение плазменного витка, $U_{pl}$ , В
1	Ar 100% 1 Торр	2,7	59,8
2	Ar 100% 0,5Торр	2,8	66,4
3	Ar 100% 0,3Торр	2,6	68,9
4	Ar 100% 0,1 Торр	3,0	59,1
5	Ne/Ar 30/70% 1 Торр	3,0	65,3
6	Ne/Ar 30/70% 0,5Торр	2,6	71,5
7	Ne/Ar 30/70% 0,3Торр	2,6	72,5
8	Ne/Ar 30/70% 0,1Торр	2,7	69,8
9	Ne/Ar 60/40% 1 Торр	2,6	70,9
10	Kr 100% 1 Торр	4,6	41,3
11	Kr 100% 0,5Торр	4,0	47,8

Поскольку с увеличением давления инертного газа  $\lambda_e$  и  $T_e$  уменьшаются, а зависимость  $\chi$  от  $p_g$  имеет сложный немонотонный характер, то зависимость  $E_{pl}$  от  $p_g$  также немонотонна и образует максимум, положение которого зависит от степени ионизации плазмы, потенциала ионизации атома и его атомного веса [11]. В плазме с более «тяжёлым» буферным газом максимальная напряженность электрического поля ниже, а максимум в зависимости  $E_{pl}$  от  $p_g$  смещен в область более низких давлений. Это видно из рис. 4.2, а также следует из результатов наших измерений, проведенных в лампе трансформаторного типа со смесью паров ртути с криптоном, где напряженность электрического поля в плазме оказалась заметно ниже, чем в лампе со смесью неона с аргоном: 0,48 В/см (1,0 Торр) и 0,55 В/см (0,5 Торр).



#### **4.1.2. Сравнение характеристик индукционного и дугового электродного разрядов**

Для сравнения характеристик индукционного и дугового электродного разрядов были изготовлены электродные лампы из минерального кварца с внутренним диаметром трубки 16,6 мм и длиной разрядного промежутка 400 мм. В качестве буферных газов для наполнения ламп были выбраны аргон и смесь неона с аргоном в отношении 30Ne/70Ar при давлении от 0,1 до 1 Торр. В качестве источника тока был выбран специальный электронный пускорегулирующий аппарат (ЭПРА), способный поддерживать в лампе стабилизированный переменный ток с частотой ~80 кГц и действующим значением от 1,6 до 3,2 А (плотность тока разряда в эксперименте составляла от 0,75 до 1,5 А/см<sup>2</sup>).

При исследовании характеристик индукционного разряда была возможность регулировать мощность, закачиваемую в плазму; при этом ток разряда, напряжение и излучение измерялись согласно методике, описанной в п. 3.3. Исследования проведены при частоте тока разряда 265 кГц.

При измерении характеристик дугового электродного разряда с помощью специального ЭПРА ток разряда устанавливался максимально близким к измеренному току индукционного разряда (таблица 4.1). Поток УФ излучения экспериментальных образцов измерялся по методике, применявшейся для измерения УФ потока индукционных ламп (п. 3.3). Электрические характеристики дугового электродного разряда были измерены с помощью анализатора мощности YOKOGAWA PZ4000 по методике, представленной на рис. 3.10 в п. 3.4.

Для удобства сравнения поток УФ излучения и мощность дугового и индукционного разрядов были пересчитаны на длину разрядного промежутка, равную 1 м. При этом для дугового разряда были учтены (вычтены из общей потребляемой источником мощности) приэлектродные потери мощности в экспериментальных образцах, данные о которых представлены ниже в п. 4.2.1.

На рис. 4.3 и рис. 4.4 представлены экспериментальные зависимости потока, КПД генерации УФ излучения с длиной волны 254 нм и мощности дугового

электродного и индукционного разрядов от давления буферной смеси. Видно, что оба разряда ведут себя схожим образом, достигая максимального КПД генерации линии с длиной волны 254 нм, равного ~40%, в области давления буферной смеси 0,3-0,4 Торр.

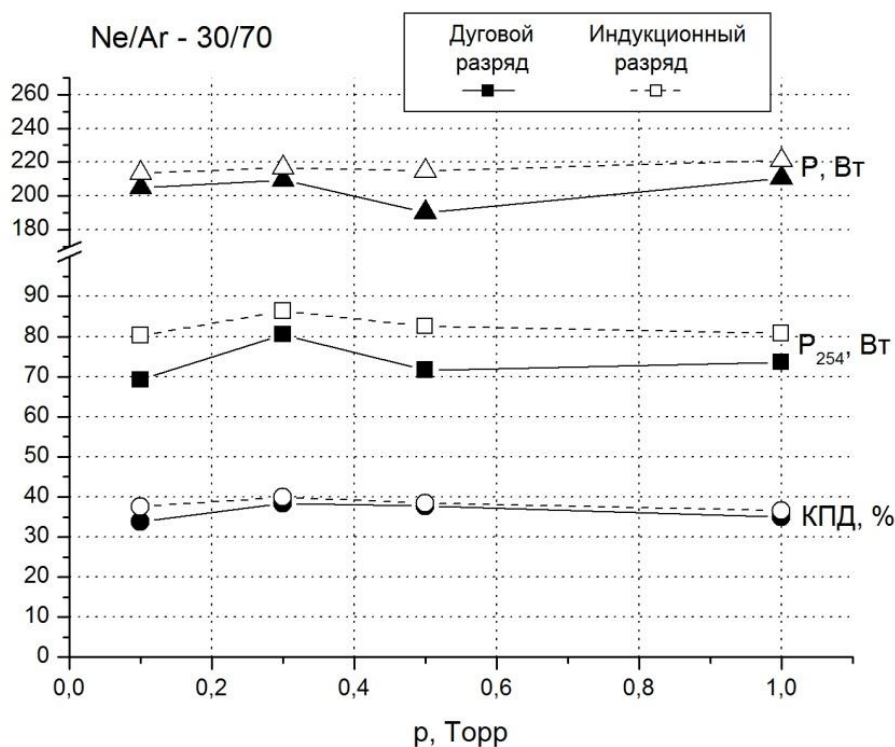


Рис. 4.3. Экспериментальные зависимости потока, КПД генерации УФ излучения с длиной волны 254 нм и мощности дугового электродного (сплошная линия) и индукционного (штриховая линия) разрядов от давления буферной смеси (30Ne/70Ar).

Незначительную разницу в КПД генерации УФ излучения индукционным разрядом по сравнению с дуговым можно объяснить более высокой частотой индукционного разряда (265 кГц против 80 кГц – дугового), поскольку известно, что зависимость КПД от частоты тока при этих частотах не слишком велика, а форма токового сигнала согласно нашим исследованиям при этих частотах практически не влияет на КПД генерации линии 254 нм [108].

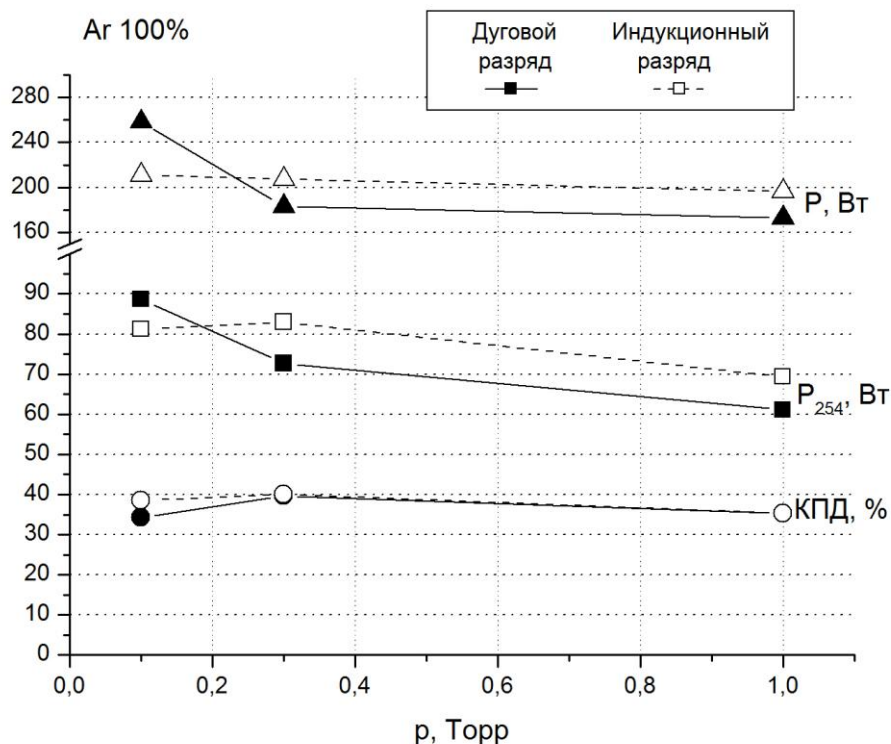


Рис. 4.4. Экспериментальные зависимости потока, КПД генерации УФ излучения с длиной волны 254 нм и мощности дугового электродного (сплошная линия) и индукционного (штриховая линия) разрядов от давления буферного газа (Ar – 100%).

Более высокую погонную мощность индукционного разряда можно объяснить более сложной конфигурацией магнитного и электрических полей лампы трансформаторного типа, прежде всего в районе расположения индукционных катушек. Искажения электрического и магнитного полей разряда могут приводить к увеличению убыли электронов на стенки лампы [74], что приведет к росту продольного электрического поля и, как следствие, к повышению погонной мощности разряда, увеличению температуры электронов и потока УФ излучения.

Исходя из схожести зависимостей, характеризующих генерацию УФ излучения с длиной волны 254 нм плазмой дугового и индукционного разрядов, логично сделать предположение, что закономерности генерации ВУФ излучения двумя типами разрядов также не будут значительным образом различаться. Следовательно, для исследования закономерностей генерации ВУФ излучения электрическим разрядом в смеси паров ртути и инертного газа при давлениях буферной смеси 0,1 –

2 Торр в области частот разряда 30-300 кГц можно использовать классические электродные газоразрядные лампы низкого давления. Это обстоятельство достаточно важно с точки постановки эксперимента, поскольку позволяет обобщить полученные закономерности на индукционный разряд, не прибегая к использованию дорогостоящего и менее надёжного оборудования, служащего для подвода энергии к лампам трансформаторного типа. Также это позволяет избежать других сложностей в постановке эксперимента, связанных, прежде всего, с фотометрией индукционных источников УФ излучения, зачастую имеющих более сложную геометрическую форму, чем электродные газоразрядные лампы.

## **4.2. Характеристики дугового разряда в линейной электродной лампе**

### **4.2.1. Зависимости падения мощности в приэлектродных слоях**

Для измерения падения мощности в приэлектродных слоях были изготовлены четыре группы ламп с внутренним диаметром 16,6 мм, заполненные аргоном и смесью неона с аргоном 60Ne/40Ar при давлениях 0,3 Торр и 1 Торр с разной длиной межэлектродных промежутков (20 см, 40 см и 100 см). Измерение падение мощности в приэлектродных слоях проводилось согласно методике, описанной в п. 3.5, при тех же значениях разрядного тока, для которых впоследствии измерялись электрические и оптические характеристики экспериментальных ламп.

Результаты расчета мощности, теряемой в приэлектродных слоях в зависимости от силы тока, полученные по данным измерения мощностей, потребляемых лампами с разной длиной разрядного промежутка, представлены на рис. 4.5 и рис. 4.6.

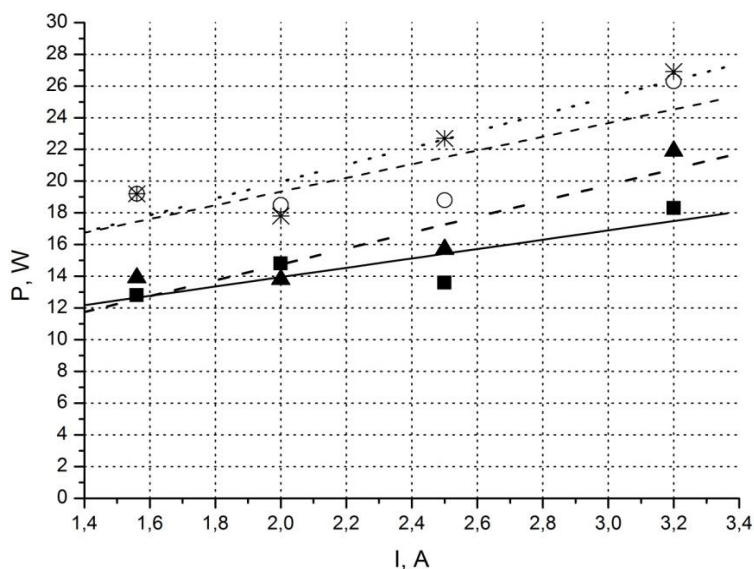


Рис. 4.5. Зависимости потерь мощности в приэлектродных слоях ( $P$ ) от величины разрядного тока ( $I$ ) для различного состава и давления буферной смеси. Квадраты и сплошная линия – Ar 100%, 1 Торр; круги и короткоштриховая линия - Ar 100%, 0,3 Торр; треугольники и длинноштриховая линия – смесь 60/40 (Ne/Ar), 1 Торр; звёзды и линия из точек – смесь 60/40 (Ne/Ar), 0,3 Торр.

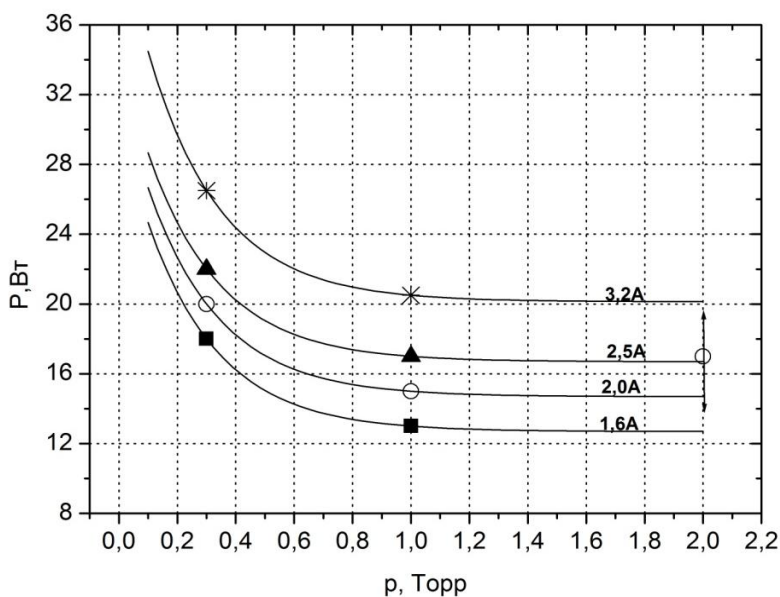


Рис. 4.6. Обобщённые зависимости потерь мощности в приэлектродных слоях ( $P$ ) от давления ( $p$ ) для различных значений разрядного тока: квадраты – 1,6 А, круги – 2 А, треугольники – 2,5 А, звёзды – 3,2 А.

Было установлено, что в области значений разрядных токов 1,6 – 3,2 А мощность, теряемая в приэлектродных слоях, в большей степени зависит от величины разрядного тока и давления буферной смеси, чем от её состава, поскольку

кривые располагаются на графике (рис. 4.5) группами по давлениям, а не по составу, и падение мощности в приэлектродных слоях существенно возрастает с ростом тока разряда.

Данное обстоятельство дает возможность использовать усреднённое значение падения мощности в приэлектродных слоях при заранее заданном значении разрядного тока и давлении буферной смеси для её различных составов (долей неона и аргона в смеси). На рис. 4.6 эти значения были нанесены для получения зависимостей падения мощности в приэлектродных слоях от давления буферной смеси при различных значениях величины разрядного тока. На этот график также была нанесена точка, соответствующая падению мощности в приэлектродных слоях при давлении буферной смеси (Ne, 100%) 2 Торр и величине разрядного тока 2А, полученная в рамках другого исследования. Было выявлено, что наилучшим образом полученные в эксперименте данные аппроксимируются экспоненциальной зависимостью, поэтому для построения зависимостей падения мощности в приэлектродных слоях от давления буферной смеси для других значений разрядного тока также была выбрана экспоненциальная аппроксимация.

#### **4.2.2. Зависимости КПД и потока ВУФ излучения 185 нм от давления и состава буферной смеси неон-аргон**

Состав и давление буферной смеси газов в основном определяют предельные значения величин потока и КПД генерации УФ излучения электрическим разрядом в смеси паров ртути и инертных газов. Для исследования этих зависимостей были изготовлены образцы амальгамных газоразрядных ламп низкого давления с колбой из минерального кварца с длиной разрядного промежутка 400 мм и внутренним диаметром 16,6 мм. В качестве буферных газов использовались неон и аргон, а также их смеси в отношении 30Ne/70Ar, 60Ne/40Ar и 85Ne/15Ar, давление смеси изменялось в пределах от 0,1 до 2 Торр. Защитное покрытие на внутреннюю поверхность колб ламп не наносилось.

На рис. 4.7 - рис. 4.11 представлены результаты проведённых измерений зависимостей потока и КПД генерации ВУФ излучения от давления буферной смеси. При обработке данных были учтены приэлектродные потери мощности в лампах. Поток и КПД генерации ВУФ излучения пересчитаны для длины плазменного столба 1 м.

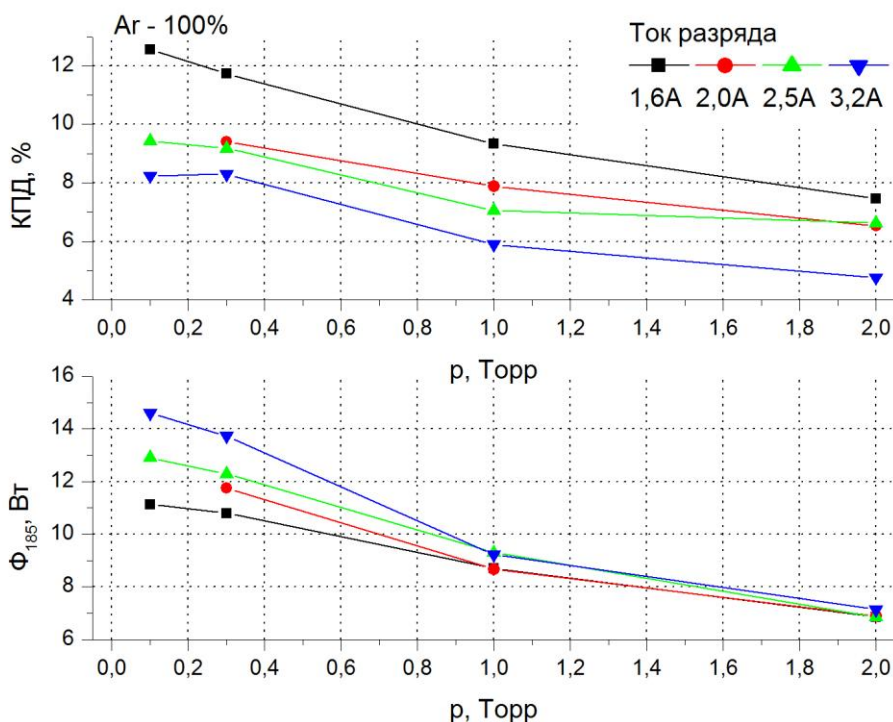


Рис. 4.7. Зависимость потока и КПД генерации излучения с длиной волны 185 нм от давления (p) буферного газа (аргон) в оптимуме генерации линии 185 нм для длины излучающего промежутка 1 м, вычтены потери в приэлектродных слоях.

В лампе с аргоном или со смесью с большим его процентным содержанием поток и КПД генерации ВУФ излучения с длиной волны 185 нм растут с понижением давления буферного газа, причем рост КПД очень велик. С увеличением тока (плотности тока) КПД падает при всех давлениях, при увеличении тока в 2 раза КПД снижается на одну треть. Из рис. 4.7 следует, что максимум КПД генерации излучения линии 185 нм достигается вблизи давления аргона 0,05 - 0,1 Торр. И чем выше разрядный ток, тем при большем давлении аргона расположен максимум в зависимости КПД генерации ВУФ излучения от p.

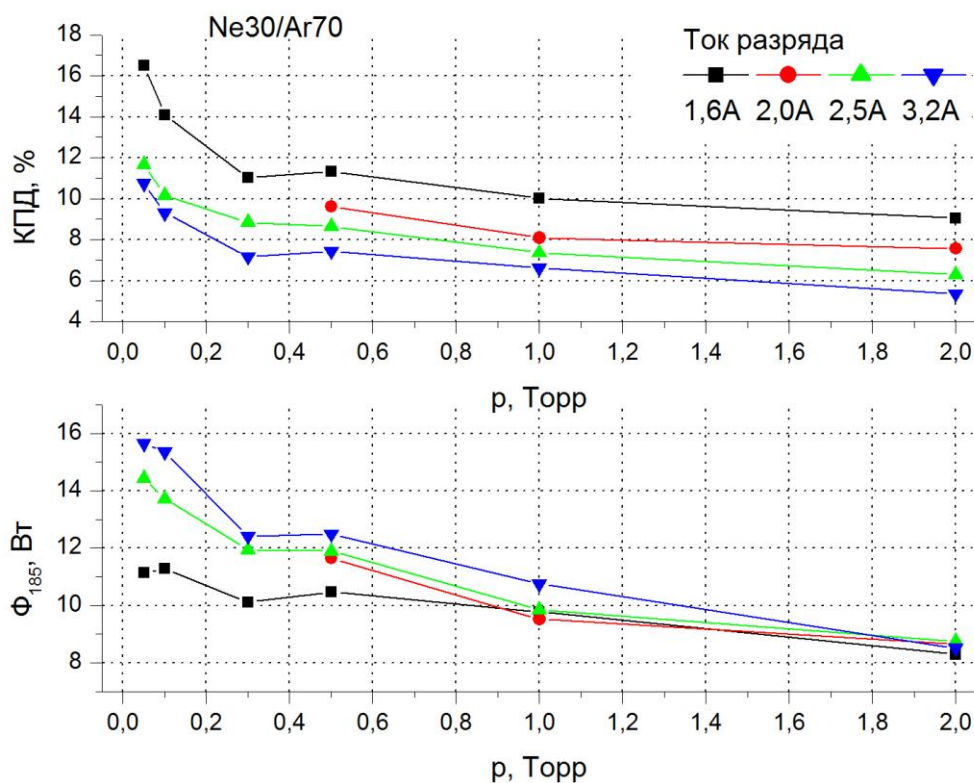


Рис. 4.8. Зависимость потока и КПД генерации излучения с длиной волны 185 нм от давления (p) буферного газа (30Ne/70Ar) в оптимуме генерации линии 185 нм в пересчете на длину излучающего столба 1 м с учетом потерь в приэлектродных областях.

Использование смеси с большим содержанием неона – более 60% - сдвигает максимум потока или КПД генерации ВУФ излучения в сторону больших давлений буферной смеси (рис. 4.10). Ранее экспериментально наблюдался только оптимум для КПД генерации излучения с длиной волны 254 нм при давлении буферных смесей 0,3 - 0,5 Torr (Ne/Ar – 30/70, 60/40) [95]; наличие оптимума для линии 185 нм предполагалось, но экспериментально не было подтверждено.



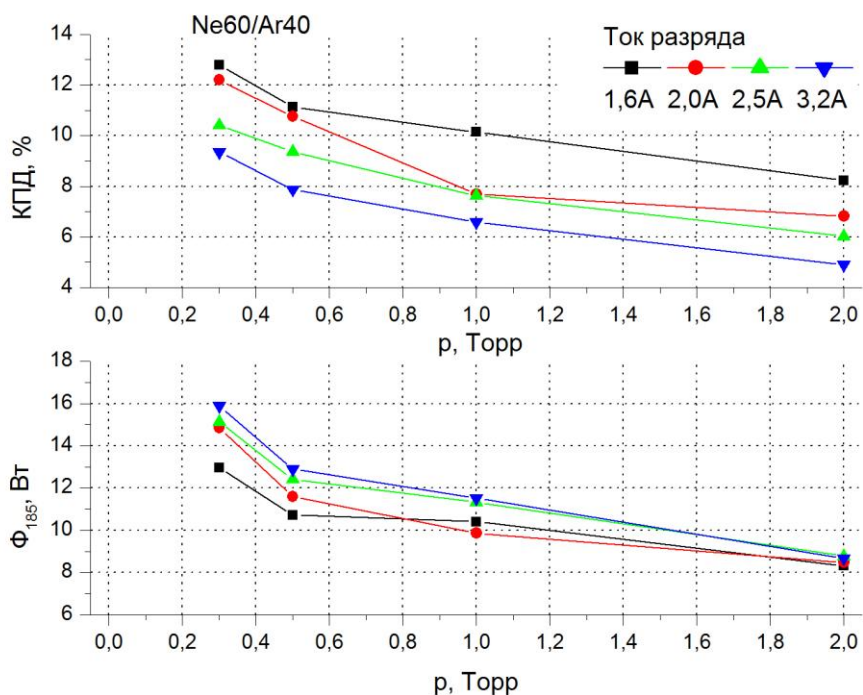


Рис. 4.9. Зависимость потока и КПД генерации излучения с длиной волны 185 нм от давления ( $p$ ) буферного газа ( $^{60}\text{Ne}/^{40}\text{Ar}$ ) в оптимуме генерации линии 185 нм в пересчете на длину 1 м с учетом потерь в приэлектродных областях.

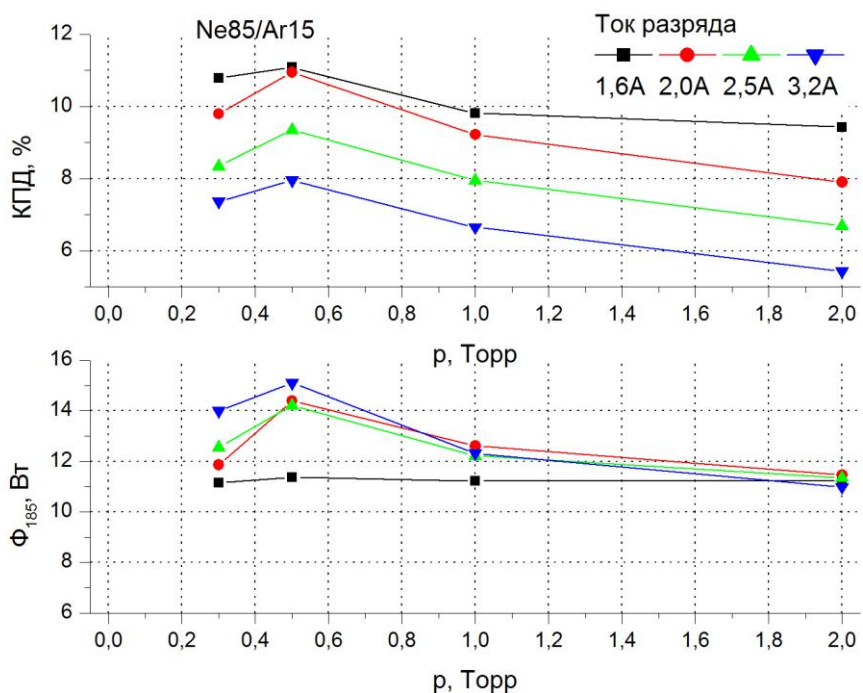


Рис. 4.10. Зависимость потока и КПД генерации излучения с длиной волны 185 нм от давления ( $p$ ) буферного газа ( $^{85}\text{Ne}/^{15}\text{Ar}$ ) в оптимуме генерации линии 185 нм в пересчете на длину 1 м с учетом потерь в приэлектродных областях.

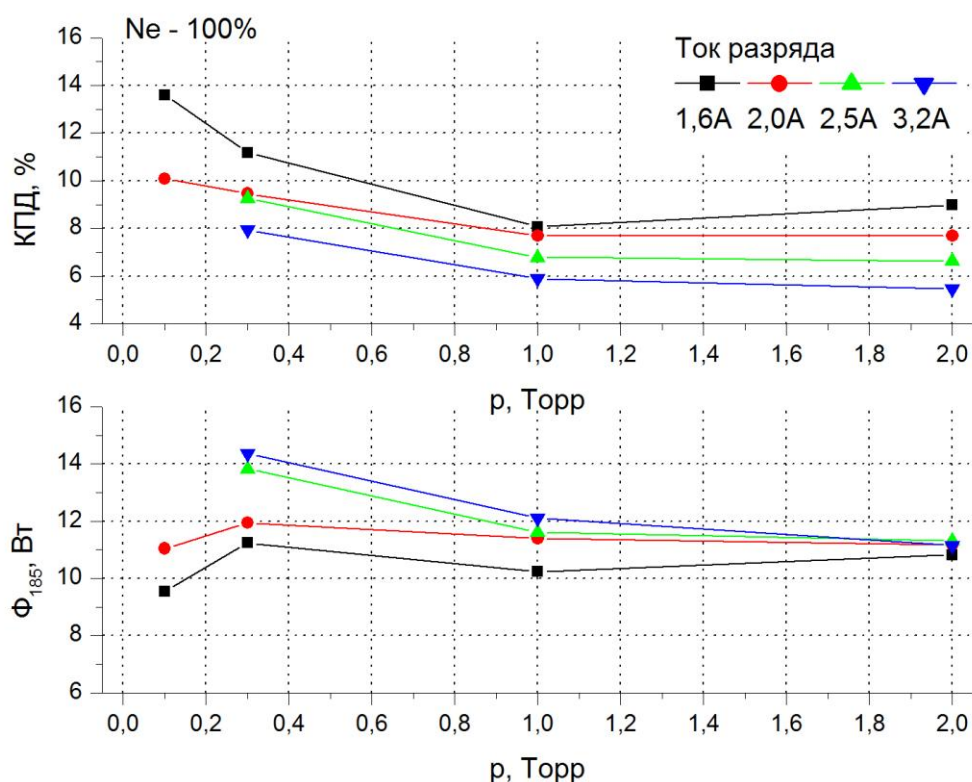


Рис. 4.11. Зависимость потока и КПД генерации излучения с длиной волны 185 нм от давления (p) буферного газа (неон) в оптимуме генерации линии 185 нм в пересчете на длину 1 м с учетом потерь в приэлектродных областях.

Следует отметить, что при повышении давления буферной смеси до 1-2 Торр поток излучения с длиной волны 185 нм слабо меняется с ростом тока в диапазоне 1,6 – 3,2 А (соответствующая плотность тока 0,75 – 1,5 А/см<sup>2</sup>). При этом КПД генерации ВУФ излучения в этих точках существенно отличаются, что также хорошо видно из рис. 4.17 - рис. 4.21 п. 4.2.3.

При исследовании зависимостей потоков и КПД генерации излучения с длиной 185 нм от состава смеси было получено, что КПД генерации при использовании смесей неона с аргоном в качестве буфера, оказывается практически во всех случаях выше, чем при использовании чистых газов (рис. 4.12 - рис. 4.16).

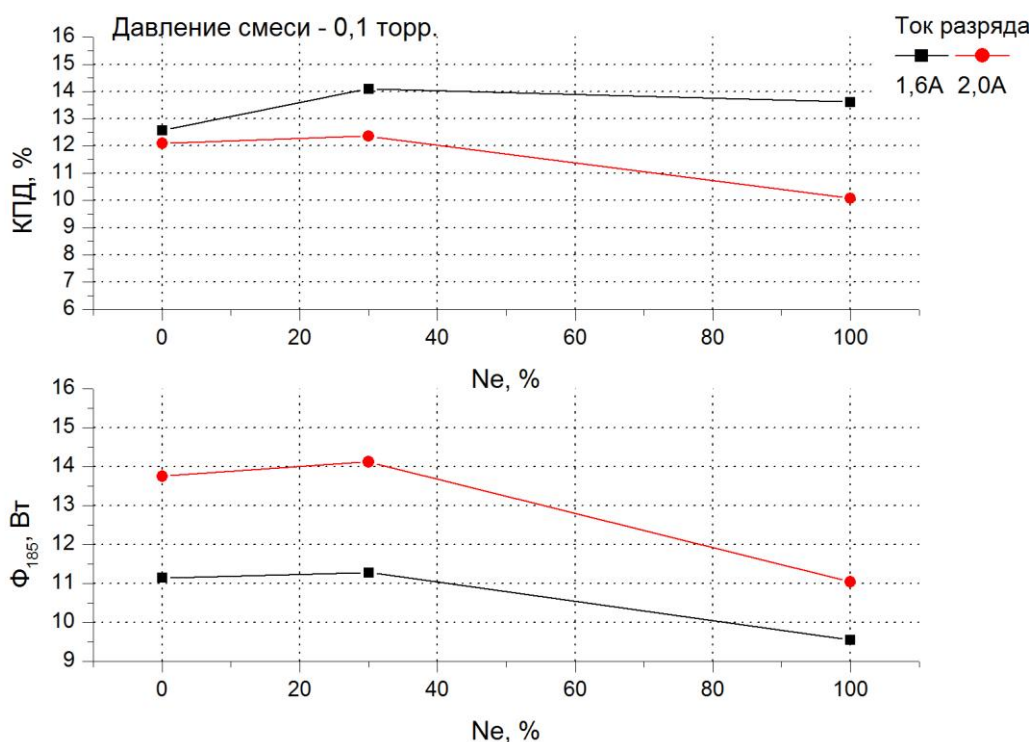


Рис. 4.12. Зависимость потока и КПД генерации излучения с длиной волны 185 нм от состава смеси Ne/Ar. Давление смеси – 0,5 Торр. Длина разрядного промежутка – 1 м, учтены потери в приэлектродных областях.

В области давлений буферной смеси 0,5 – 2 Торр поток излучения с длиной волны 185 нм растет с увеличением процентного содержания неона в смеси (рис. 4.14 - рис. 4.16). Более интересным является тот факт, что в области давлений 0,1 – 0,5 Торр появляется максимум, который смещается в сторону большего процентного содержания аргона в буферной смеси при уменьшении её давления (**Ошибка! Источник ссылки не найден.** и рис. 4.13). При повышении давления смеси до 2 Торр поток излучения линии 185 нм практически не меняется при изменении тока в два раза от 1.6 до 3.2 А вследствие сильного падения КПД с ростом тока, что свидетельствует о бесперспективности увеличения потока 185 нм изменением состава газа в общепринятой области давлений.

С точки зрения достижения максимального КПД генерации ВУФ излучения из полученных зависимостей следует, что лучшими являются смеси с процентным содержанием неона в их составе от 30 до 60 процентов. При этом использование

смеси 30Ne/70Ar также положительным образом скажется на ресурсе оксидных электродов ламп.

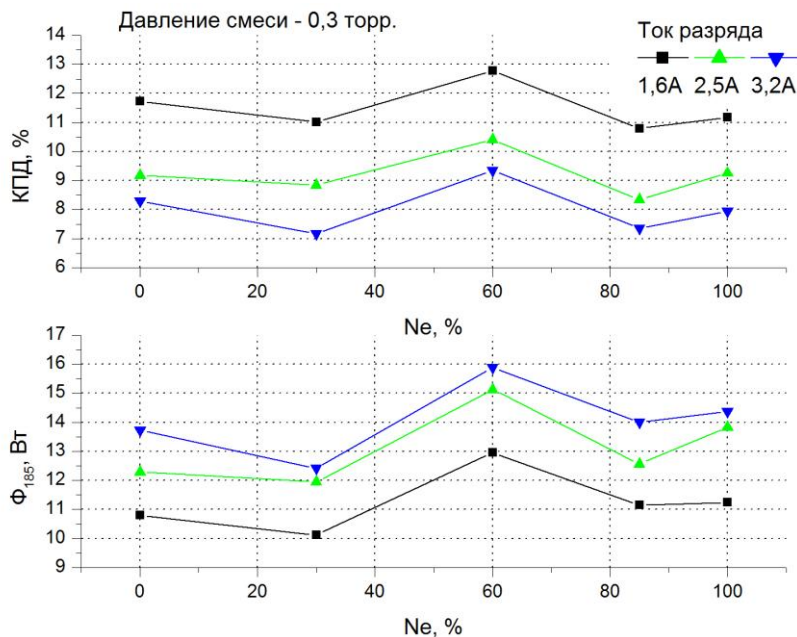


Рис. 4.13. Зависимость потока и КПД генерации излучения с длиной волны 185 нм от состава смеси Ne/Ar. Давление смеси – 0,3 Торр.

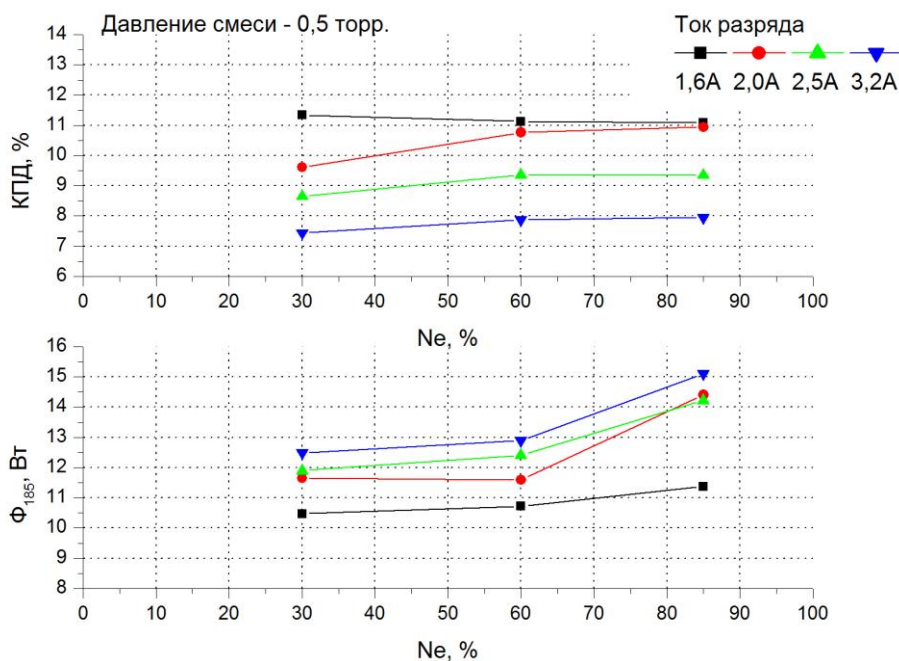


Рис. 4.14. Зависимость потока и КПД генерации излучения с длиной волны 185 нм от состава смеси Ne/Ar. Давление смеси – 0,5 Торр. Длина разрядного промежутка – 1 м, учтены потери в приэлектродных областях.

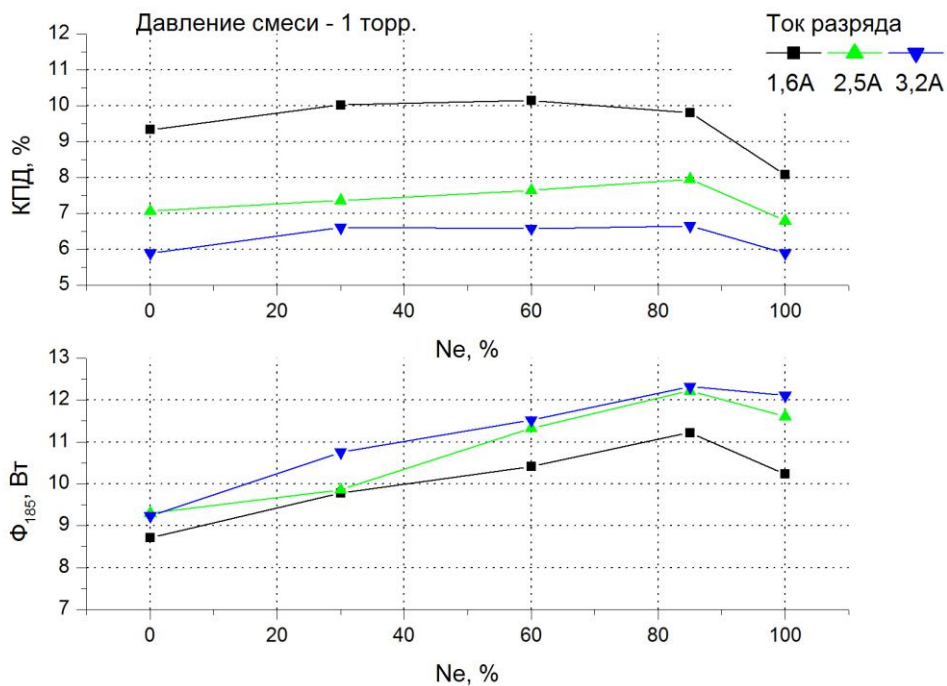


Рис. 4.15. Зависимость потока и КПД генерации излучения с длиной волны 185 нм от состава смеси Ne/Ar. Давление смеси - 1 Торр. Длина 1 м.

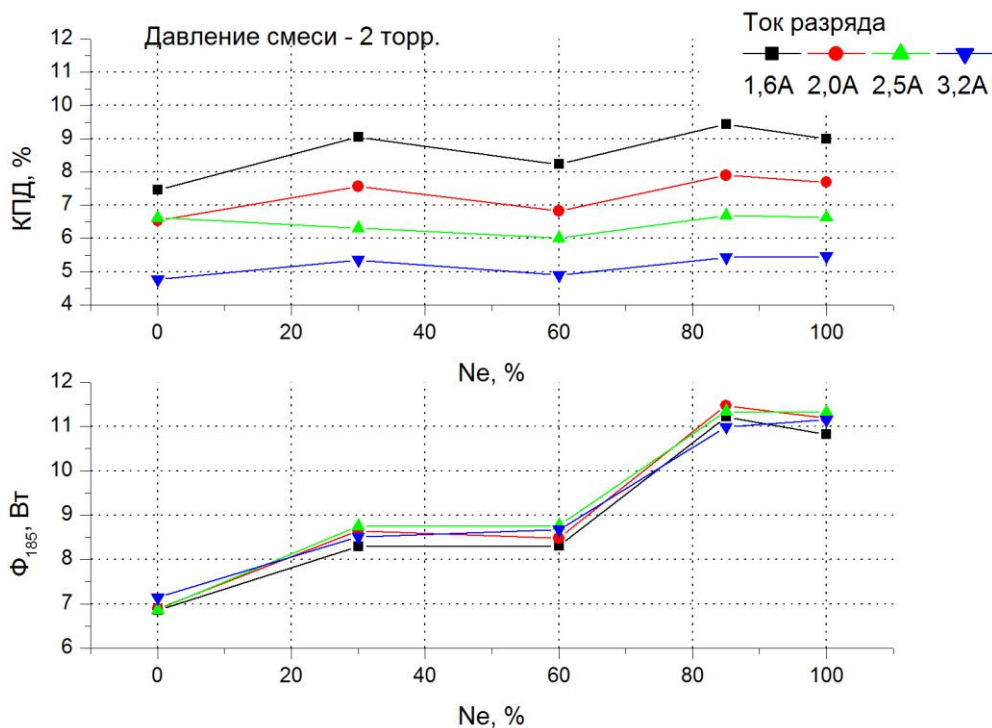


Рис. 4.16. Зависимость потока и КПД генерации излучения с длиной волны 185 нм от состава смеси Ne/Ar. Давление смеси - 2 Торр. Длина разрядного промежутка - 1 м, учтены потери в приэлектродных областях.

Максимальное достигнутое значение КПД генерации линии с длиной волны 185 нм составило 14,1% (при удельном потоке 0,11 Вт/см; смеси 30Ne/70Ar, давлении 0,1 Торр), что практически в 1,5 раза превышает ранее достигнутые значения. Максимальный выход ВУФ излучения с длиной волны 185 нм составил 0,16 Вт/см при КПД его генерации 9,4%; смеси 60Ne/40Ar и давлении 0,3 Торр.

#### **4.2.3. Зависимости КПД и потока ВУФ излучения 185 нм от плотности разрядного тока**

Для исследования влияния плотности тока на поток и КПД генерации ВУФ излучения были использованы те же образцы, что и в п. 4.2.2 (длина разрядного промежутка – 400 мм, внутренний диаметр колбы – 16,6 мм). В качестве источника тока был выбран специальный электронный пускорегулирующий аппарат (ЭПРА), способный поддерживать в лампе стабилизированный ток силой от 1,6 до 3,2 А (плотность тока разряда в эксперименте составляла от 0,75 до 1,5 А/см<sup>2</sup>) и частотой ~80 кГц. Полученные зависимости потока и КПД генерации ВУФ излучения от плотности разрядного тока представлены на рис. 4.17 – рис. 4.21.

Нетрудно заметить, что при повышении давления буферной смеси до 1-2 Торр поток излучения с длиной волны 185 нм слабо меняется с ростом плотности тока в диапазоне 0,75 – 1,5 А/см<sup>2</sup>. Однако КПД генерации (ВУФ излучения) в этих точках существенно разнится и во всех случаях снижается с ростом плотности тока. Это означает, что при работе в реальных установках (давления буферной смеси 1-2 Торр являются «рабочими» для этого типа ламп на данный момент) для достижения максимального потока и КПД генерации ВУФ излучения для наработки озона нет смысла поднимать плотность разрядного тока слишком высоко.

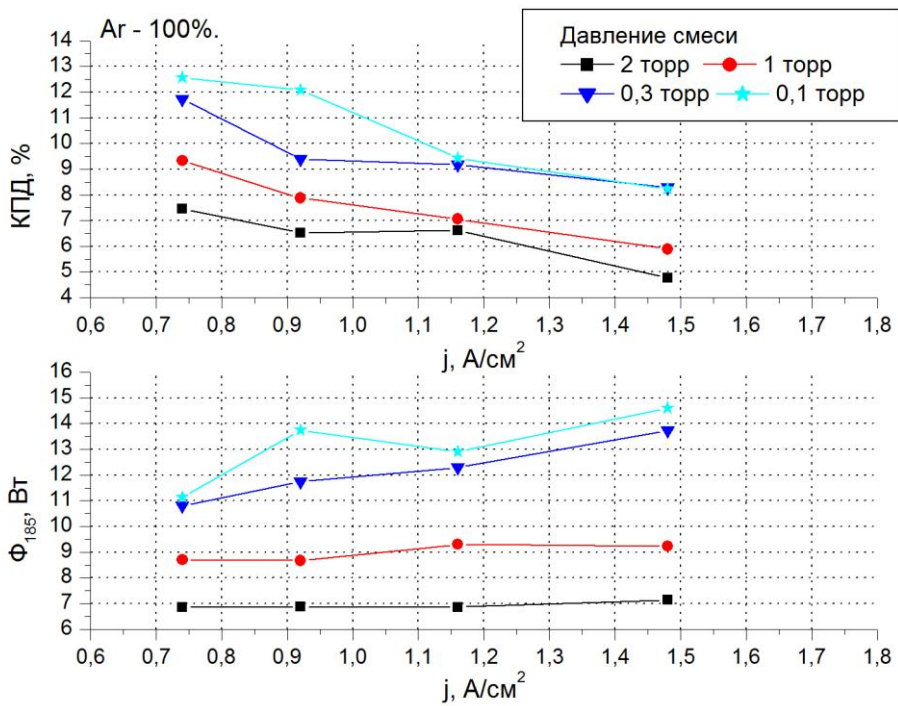


Рис. 4.17. Зависимость потока и КПД генерации излучения с длиной волны 185 нм от плотности тока. Буферный газ - аргон. Длина – 1м.

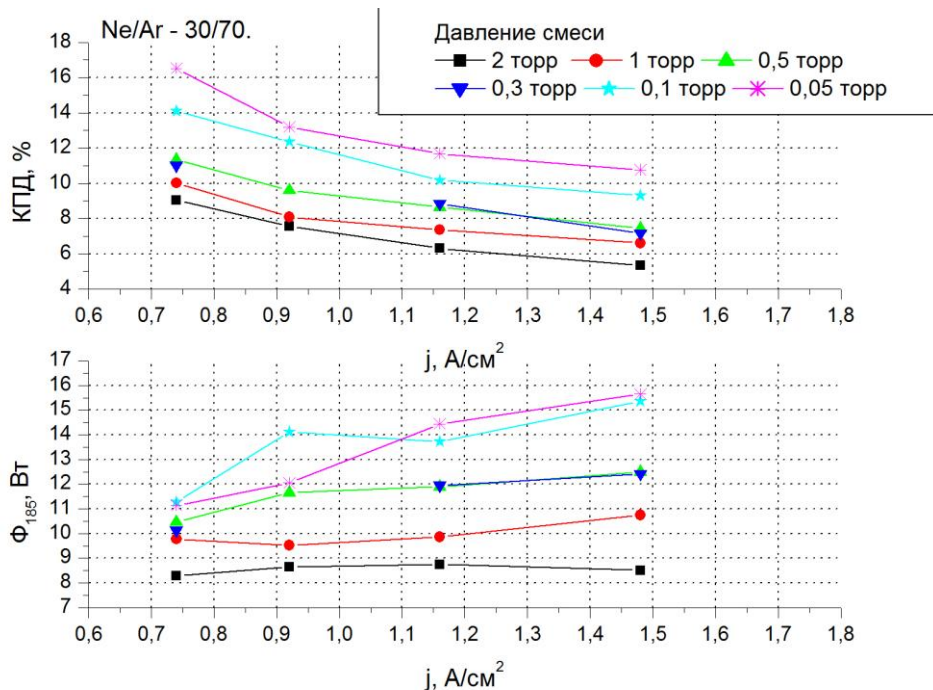


Рис. 4.18. Зависимость потока и КПД генерации излучения с длиной волны 185 нм от плотности тока. Буферный газ – 30Ne/70Ar. Длина разрядного промежутка – 1 м, учтены потери в приэлектродных областях.

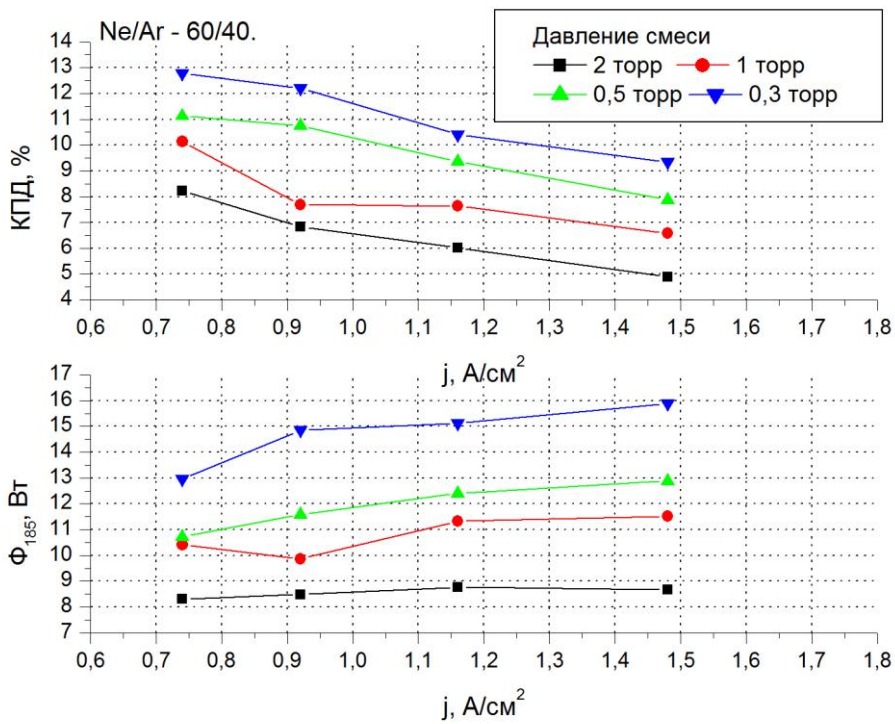


Рис. 4.19. Зависимость потока и КПД генерации излучения с длиной волны 185 нм от плотности тока. Буферный газ – 60Ne/40Ar. Длина разрядного промежутка – 1м, учтены потери в приэлектродных областях.

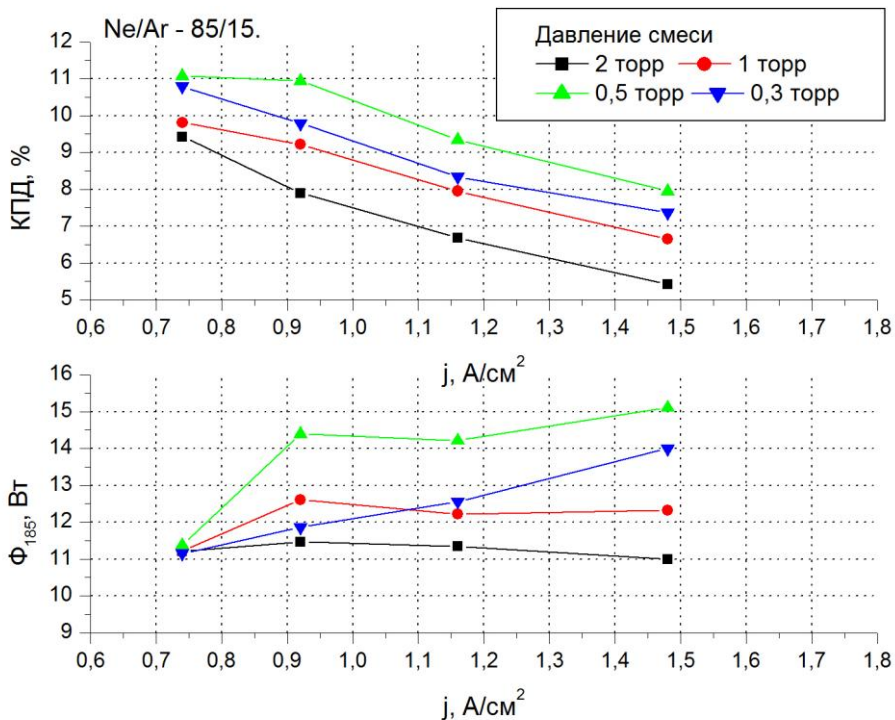


Рис. 4.20. Зависимость потока и КПД генерации излучения с длиной волны 185 нм от плотности тока. Буферный газ – 85Ne/15Ar. Длина разрядного промежутка – 1 м, учтены потери в приэлектродных областях.



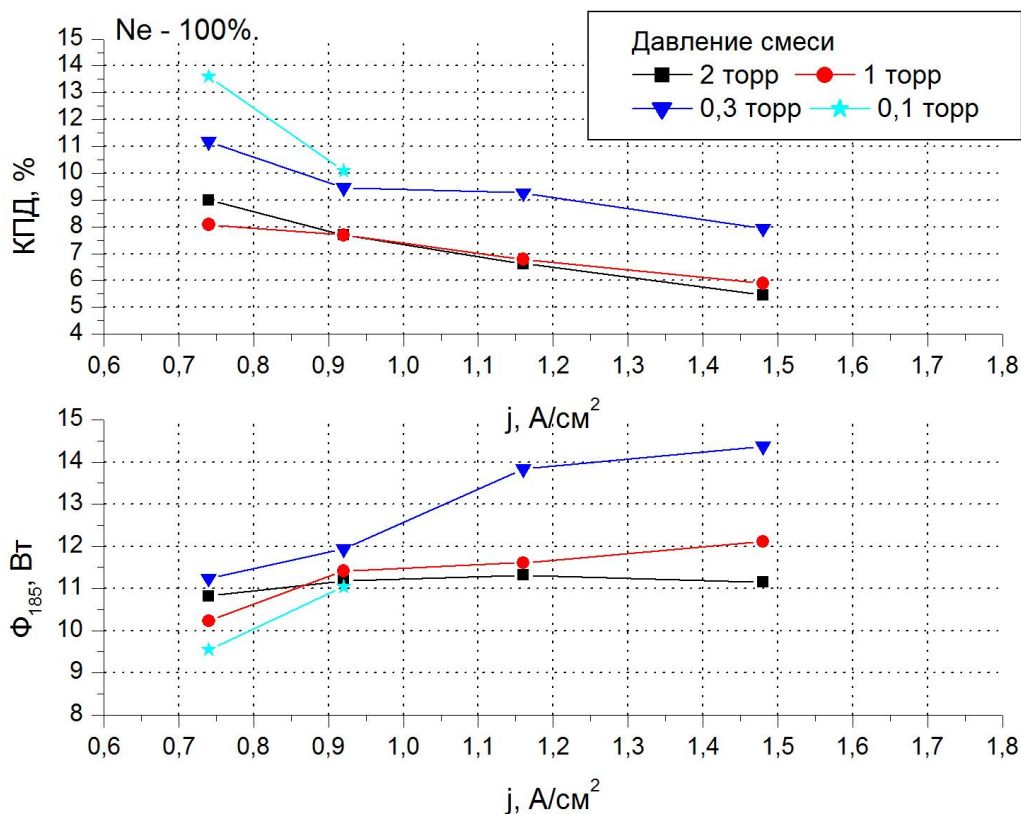


Рис. 4.21. Зависимость потока и КПД генерации излучения с длиной волны 185 нм от плотности тока. Буферный газ - неон. Длина разрядного промежутка – 1 м, учтены потери в приэлектродных областях.

Данный факт может позволить упростить источники питания и электродные узлы ламп для наработки озона, а также снизить общее энергопотребление такого рода систем. При переходе к более низким давлениям буферной смеси (ниже 0,5 Торр) более выгодным с точки зрения получения максимального потока на длине волны 185 нм является использование высокой плотности тока. Следует отметить, что даже в этом случае КПД генерации ВУФ излучения остаётся на уровне, достигаемым в современных источниках ВУФ излучения (не ниже 7-8%) [75,109], и значительно превосходит его (~ в 1,5 раза) при плотности тока разряда 0,75 А/см<sup>2</sup> и ниже.

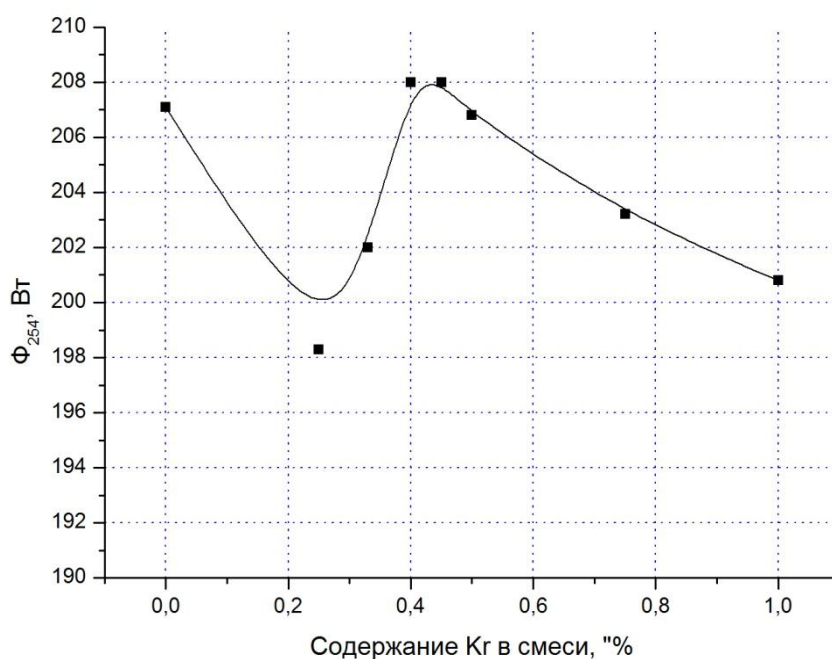
#### 4.2.4. Влияние малых добавок криптона к буферной смеси неон-аргон на генерацию УФ излучения

Для исследования влияния малых добавок криптона на параметры дугового разряда была изготовлена партия амальгамных ламп из кварца, допированного

оксидом титана, с внутренним диаметром трубки 29 мм и длиной межэлектродного промежутка 1460 мм. Процентное содержание Kr в смеси варьировалось от 0 до 1%, общее давление газовой смеси – 0,5 – 2 Торр.

Лампы питались ЭПРА, позволявшим поддерживать стабилизированный переменный ток величиной 5А (соответствующая плотность тока составляла  $\sim 0,75$  А/см<sup>2</sup>) и частотой 38 кГц.

На рис. 4.22 и рис. 4.23 приведены зависимости изменения характеристик разряда от процентного содержания криптона в смеси (99Ne/1Ar) + X% Kr<sup>1</sup> при давлении 0,5 Торр. Видно, что мощность излучения на длине волны 254 нм и потребляемая мощность разряда с ростом доли криптона в смеси сначала снижаются, а потом растут. Максимум достигается в области доли криптона в смеси, равной 0,4 – 0,45%.



*Рис. 4.22. Выход УФ излучения лампы в зависимости от процентного содержания криптона в буферной смеси (давление 0,5 Торр).*

<sup>1</sup> Данная запись означает, что в трёхкомпонентной буферной смеси на долю криптона приходится X%. В оставшейся части (100-X)% на долю неона приходится 99%, на долю аргона – 1%.

Если сравнивать характеристики разряда при добавлении 0,4 – 0,45% криптона к буферной смеси с характеристиками разряда в смеси без добавки криптона, то видно, что поток УФ излучения практически не изменился, а мощность разряда снизилась почти на 3% (15 Вт). Это дает заметный прирост КПД источника (рис. 4.23). Автор предполагает, что это можно связать с более эффективно протекающими процессами ионизации атомов ртути в разряде и, как следствие, со снижением доли энергии разряда, уходящими на ионизацию. Добавка более 0,7% криптона к буферной смеси приводит к уменьшению выхода УФ излучения и потребляемой разрядом мощности.

На рис. 4.24 представлены зависимости характеристик исследуемых источников от давления буферной смеси при доле криптона в смеси, равной 0,75%. Никаких особенностей при исследовании не обнаружено.

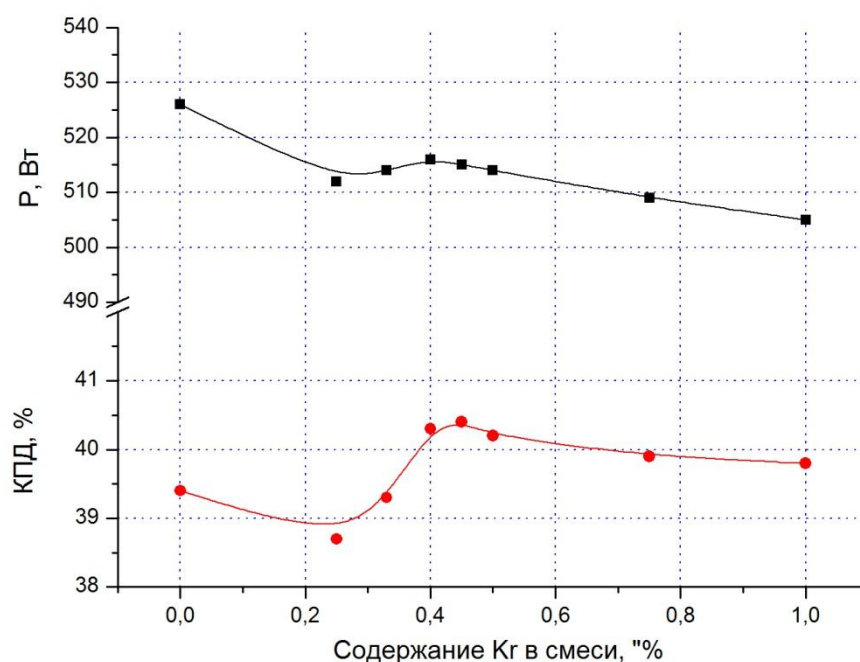


Рис. 4.23. Мощность и КПД генерации УФ излучения лампы в зависимости от процентного содержания криптона в буферной смеси (давление 0,5 Торр).

Ниже приведены характеристики всех типов исследованных источников. Из полученных результатов следует, что эффект повышения КПД разряда за счет

снижения его мощности ярче выражен при давлении буферной смеси 1-2 Торр (строки 11-14, таблица 4.2). При добавлении криптона к буферной смеси снижается мощность УФ излучения, но не так сильно, как падает потребляемая разрядом мощность.

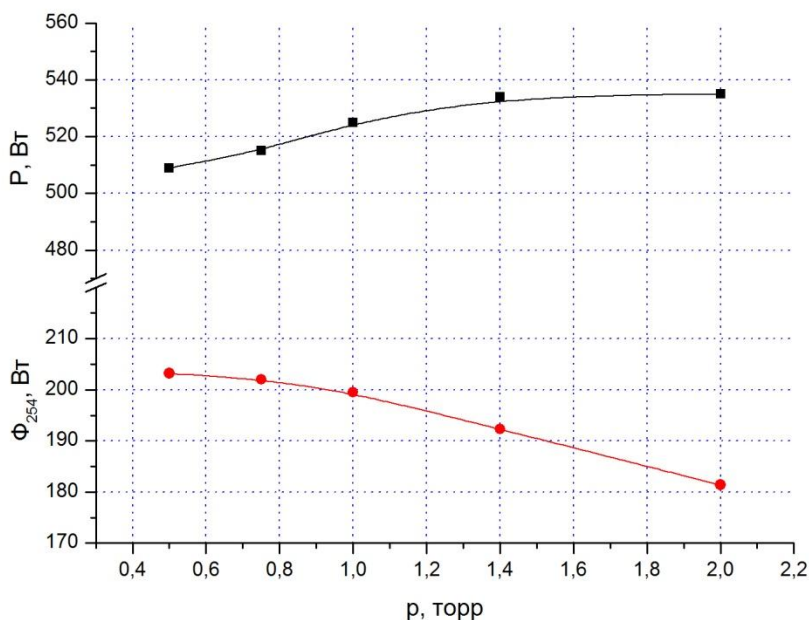


Рис. 4.24. Характеристики исследуемого источника в зависимости от давления буферной смеси (доля криптона в смеси – 0,75%).

Стоит отметить и другой интересный факт: добавление небольшого количества криптона (менее 1%) к буферному газу «работает» так же, как добавление достаточно большого количества аргона (строки 14-16, таблица 4.2). В обоих случаях существенно снижается мощность разряда (по сравнению с лёгкой буферной смесью 99Ne/1Ar). Однако, при добавлении криптона мощность УФ излучения источника выше. Это можно связать с тем, что добавка очень малого количества криптона к смеси не влияет на скорость амбиполярной диффузии, тогда как в более тяжелой смеси с относительно большим процентным содержанием аргона скорость амбиполярной диффузии снижается, следовательно, уменьшается убыль электронов на стенку. Это приводит к снижению электронной температуры и

уменьшению мощности и эффективности генерации УФ излучения разрядом в смеси 90Ne/10Ar по сравнению со смесью (99Ne/1Ar)+0,5% Kr.

Таблица 4.2. Электрические и излучательные параметры ламп.

№	Состав буферной смеси	Давление, Торр	Рл, Вт	Φ <sub>254</sub> , Вт	КПД, %
1	99Ne/1Ar	0,5	526	207,1	39,4
2	99Ne/1Ar + 0,25% Kr	0,5	512	198,3	38,7
3	99Ne/1Ar + 0,33 % Kr	0,5	514	202,0	39,3
4	99Ne/1Ar + 0,4 % Kr	0,5	516	208,0	40,3
5	99Ne/1Ar + 0,45 % Kr	0,5	515	208,0	40,4
6	99Ne/1Ar + 0,5 % Kr	0,5	514	206,8	40,2
7	99Ne/1Ar + 0,75% Kr	0,5	509	203,2	39,9
8	99Ne/1Ar + 1% Kr	0,5	505	200,8	39,8
9	99Ne/1Ar + 0,75% Kr	0,75	515	202,0	38,7
10	99Ne/1Ar + 0,75% Kr	1	525	199,5	38,1
11	99Ne/1Ar + 0,75% Kr	1,4	534	192,3	36,0
12	99Ne/1Ar + 0,75% Kr	2	535	181,4	33,9
13	99Ne/1Ar	1,4	625	214,7	34,3
14	99Ne/1Ar	2	621	205,2	33,0
15	99Ne/1Ar + 0,5 % Kr	1,8	528	192,1	36,3
16	95Ne/5Ar	2,0	540	184,0	34,1

На рис. 4.25 и рис. 4.26 показаны спектры излучения источников с различным газовым наполнением (Ne, Ar, 95Ne/5Ar, 99Ne/1Ar + 0,5% Kr). Данные спектры были получены с помощью портативного спектрометра Ocean Optics USB4000 с разрешающей способностью 1 нм.

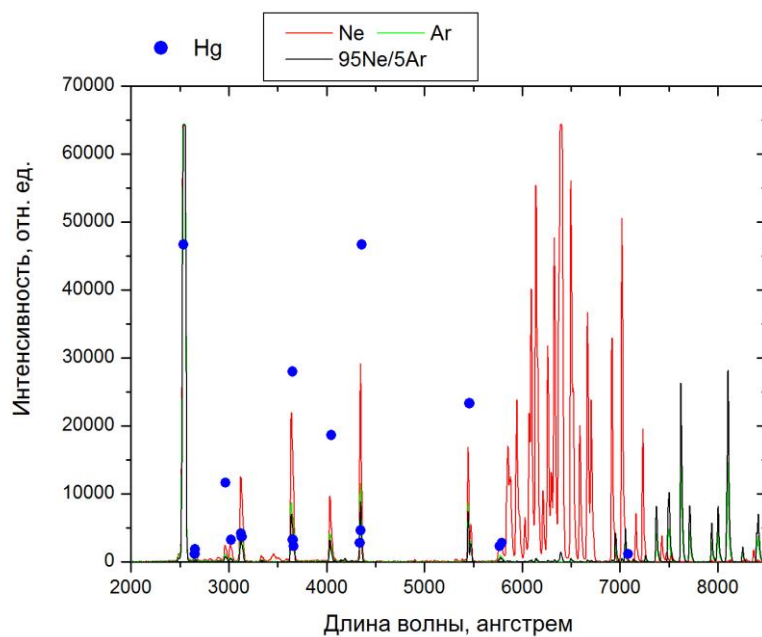


Рис. 4.25. Спектры излучения ламп с различным газовым наполнением: красный – неон, зелёный – аргон, чёрный – смесь 95Ne/5Ar. Синие точки – линии в спектре излучения атома ртути.

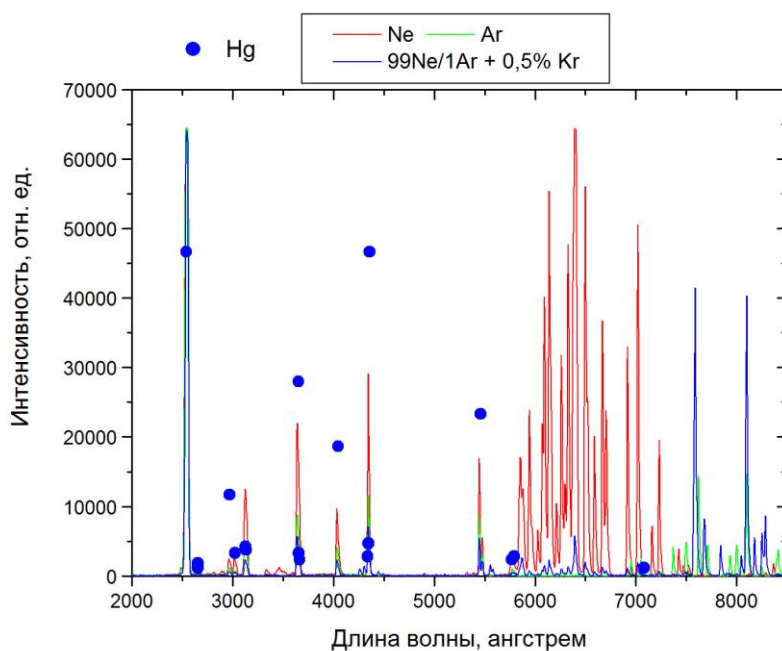


Рис. 4.26. Спектры излучения ламп с различным газовым наполнением: красный – неон, зелёный – аргон, синий – смесь 99Ne/1Ar + 0,5% Kr. Синие точки – линии в спектре излучения атома ртути.

Видно, что в области длин волн 200 – 570 нм преобладают линии, относящиеся к излучению атома ртути (на графиках указаны линии излучения атома ртути по

данным NIST). Эти линии присутствуют в спектре излучения всех источников. Линии, относящиеся к излучению атомов неона, преобладают в области 570-730 нм. Они ярко выражены в спектре излучения лампы с чистым неоном в качестве буферного газа, но отсутствуют в спектре излучения остальных ламп. В области длин волн 730-850 нм преобладают линии, относящиеся к излучению атомов аргона и криптона. Эта область спектров излучения ламп показана на рис. 4.27.

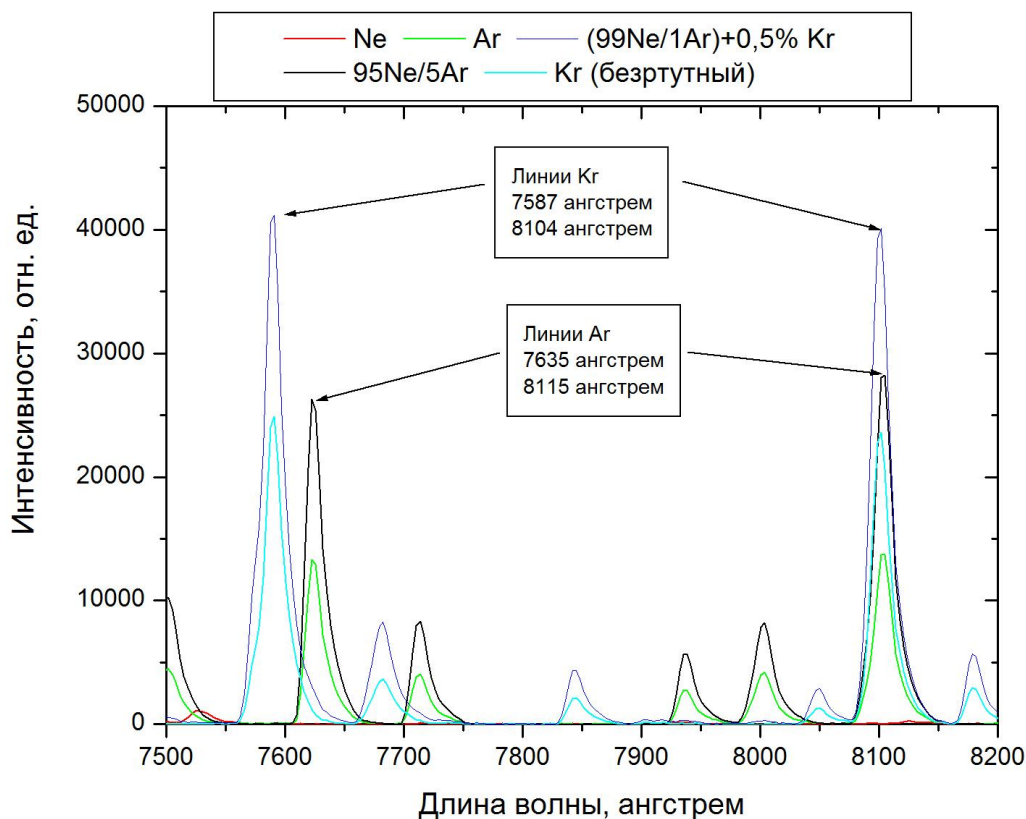


Рис. 4.27. Спектры излучения ламп с различным газовым наполнением: красный – неон, зелёный – аргон, чёрный – смесь 95Ne/5Ar, синий – смесь 99Ne/1Ar + 0,5% Kr. Голубая линия – спектр излучения безртутной лампы, заполненной криптоном.

Видно, что в области длин волн 750-820 нм присутствуют две яркие линии аргона и две яркие линии криптона, расположенные очень близко друг к другу. Причём линии, характерные для излучения атома аргона, отсутствуют в спектре излучения лампы с буферной смесью 99Ne/Ar1 + 0,5% Kr. Вместо них в спектре излучения этой лампы присутствуют линии, характерные для излучения атома

криптона. Это подтверждается измеренным спектром излучения безртутной лампы, наполненной чистым криптоном (Kr, 0,5 Torr – голубая линия на рис. 4.27), и данными о спектрах излучения атомов Ar и Kr, приведёнными ниже (таблица 4.3). Данные о спектрах излучения атомов и их характеристиках взяты из [110].

Таблица 4.3. *Линии в спектрах излучения атомов аргона и криптона.*

	Длина волны, нм	Энергия возбуждения, эВ
Ar	736,5	13,16
Ar	811,5	13,57
Kr	758,7	11,67
Kr	810,4	11,45

Обратим внимание на два факта. Во-первых, ионизация атомов ртути в разряде низкого давления в большей степени происходит с метастабильного уровня  $6^3P_1$ , ответственного также за резонансное излучение с длиной волны 254 нм. Во-вторых, энергии возбуждения указанных линий криптона, присутствующих в спектре излучения лампы с малой добавкой криптона, лежат ближе к потенциалу ионизации атома ртути (10,43 эВ), чем энергии возбуждения линий аргона, присутствующих в спектре излучения ламп с буферной смесью  $95Ne/5Ar$ . Вероятно, данное обстоятельство приводит к тому, что при малой добавке криптона к буферной смеси ионизация атомов ртути происходит эффективнее за счёт прямых столкновений с атомами криптона, находящимися в указанных энергетических состояниях, и доля энергии разряда, приходящаяся на ионизацию с уровня  $6^3P_1$ , сокращается. Также уменьшается частота тушащих соударений с метастабильными атомами ртути, находящимися на энергетическом уровне  $6^3P_1$ . За счёт этого, с одной стороны, уменьшается мощность разряда, а с другой – растёт относительное число излучающих центров, что и обуславливает повышение КПД источника.



### 4.3. Сравнение экспериментальных данных с модельным расчетом

Разработка эффективно работающего алгоритма расчета характеристик электрического разряда в смеси паров ртути и инертных газов является сложной прикладной задачей. В настоящей работе была использована самосогласованная модель (п. 2), в которой учитывался эффект неполного перемешивания по частотам для линии 185 нм и решались уравнения переноса излучения для обеих резонансных линий в излучении атома ртути. Рассматриваемая модель позволяла рассчитывать характеристики ртутного разряда низкого давления не только в атмосфере чистого аргона или неона, но и в смеси газов. Данная модель является развитием модели, описанной в [45, 48]. Поскольку при проведении экспериментальной работы не было возможности производить измерения давления паров ртути, то при проведении численного моделирования разряда выбиралось то давление, при котором достигался оптимум генерации линии 185 нм. Также, для проведения корректных сравнений результатов расчёта с полученными в эксперименте данными, учитывались потери излучения в кварце и френелевские отражения. Результаты расчётов представлены на рис. 4.28 - рис. 4.33. В целом результаты математического моделирования электрического разряда в смеси паров ртути и инертных газов находятся в качественном соответствии с полученными экспериментальными данными и точность расчётов составляет порядка 20-30%, что является очень хорошим результатом с учётом усложнения модели разряда.

На рис. 4.28 и рис. 4.29 показаны зависимости потока и КПД генерации излучения с длиной волны 185 нм от плотности разрядного тока. Как и в работе [86], в модельном расчёте не наблюдается насыщения с ростом плотности тока, проявляющееся при давлениях буферной смеси выше 1 Торр.

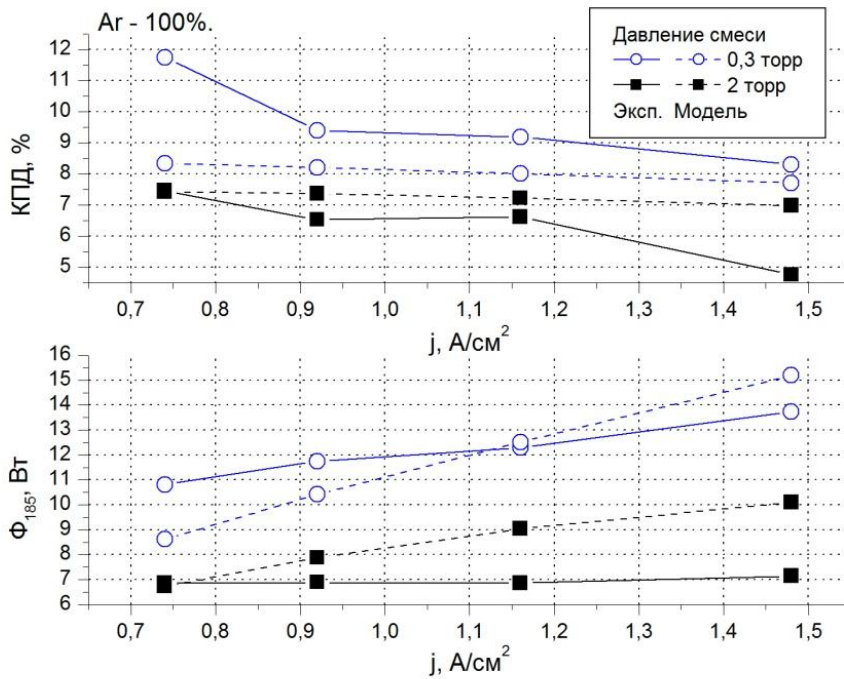


Рис. 4.28. Зависимость потока и КПД генерации излучения 185 нм от плотности тока. Сплошная линия – эксперимент, штриховая линия – расчёт. Буферный газ – аргон. Длина разрядного промежутка – 1 м.

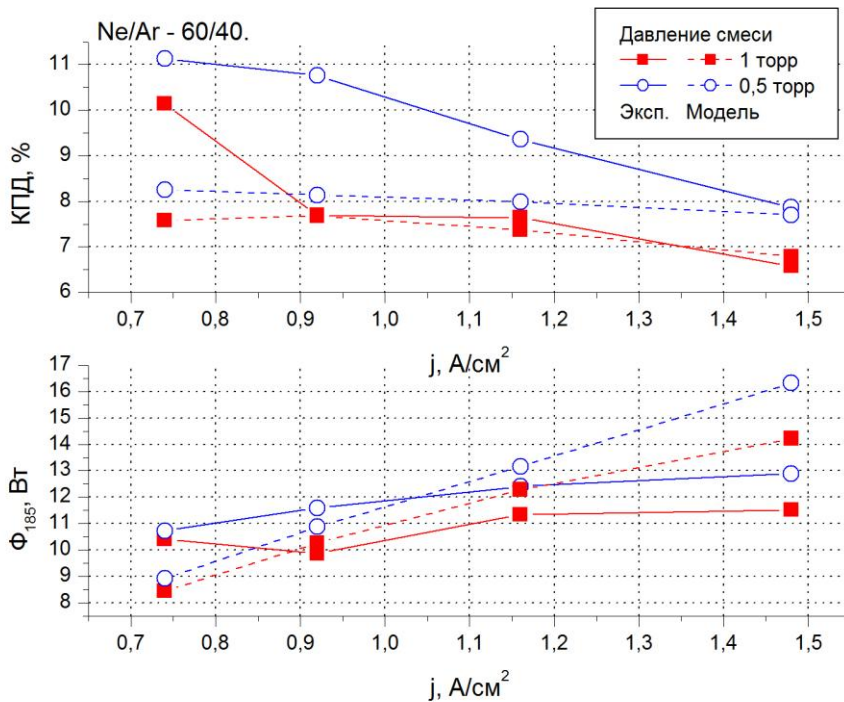


Рис. 4.29. Зависимость потока и КПД генерации излучения с длиной волны 185 нм от плотности тока. Сплошная линия – эксперимент, штриховая линия – расчёт. Буферный газ – 60Ne/40Ar. Длина промежутка – 1 м.

При внимательном рассмотрении зависимостей потока и КПД генерации ВУФ излучения от давления и состава буферной смеси (рис. 4.30 - рис. 4.33) видно, что наибольшие расхождения между экспериментальными данными и модельным расчётом наблюдаются в двух «полярных» ситуациях. При понижении давления до 0,1 – 0,3 Торр и малом разрядном токе (менее 2А) модель занижает выход ВУФ излучения, при большом разрядном токе (более 2А) и высоких давлениях буферной смеси (1-2 Торр) - завышает.

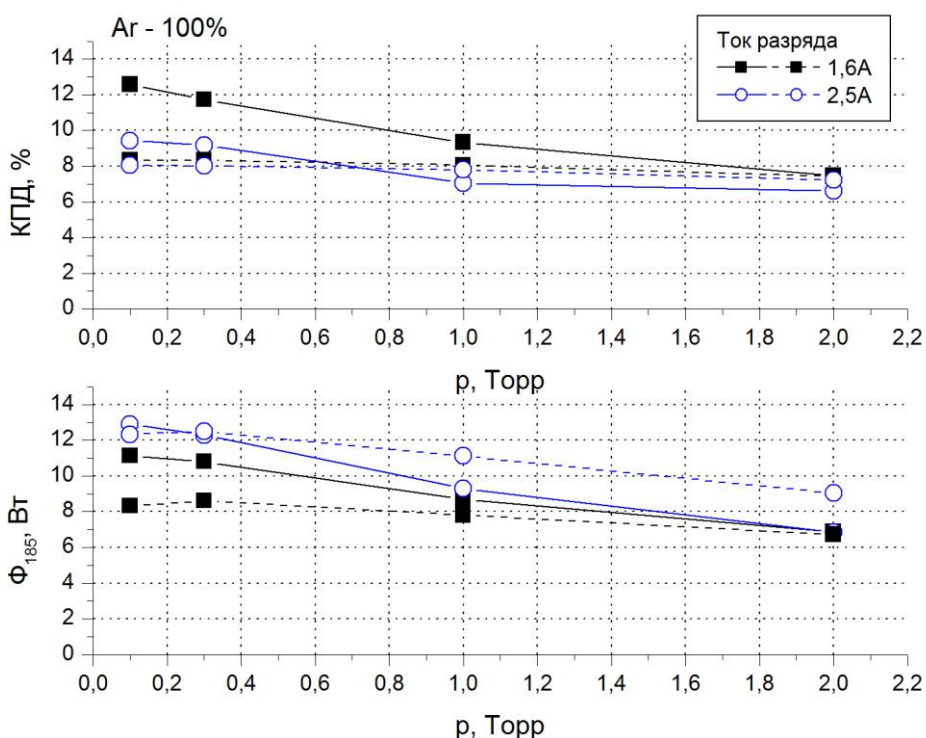


Рис. 4.30. Зависимость потока и КПД генерации излучения с длиной волны 185 нм от давления буферного газа. Сплошная линия – экспериментальные данные, штриховая линия – модельный расчёт. Буферный газ – аргон. Длина разрядного промежутка – 1 м.

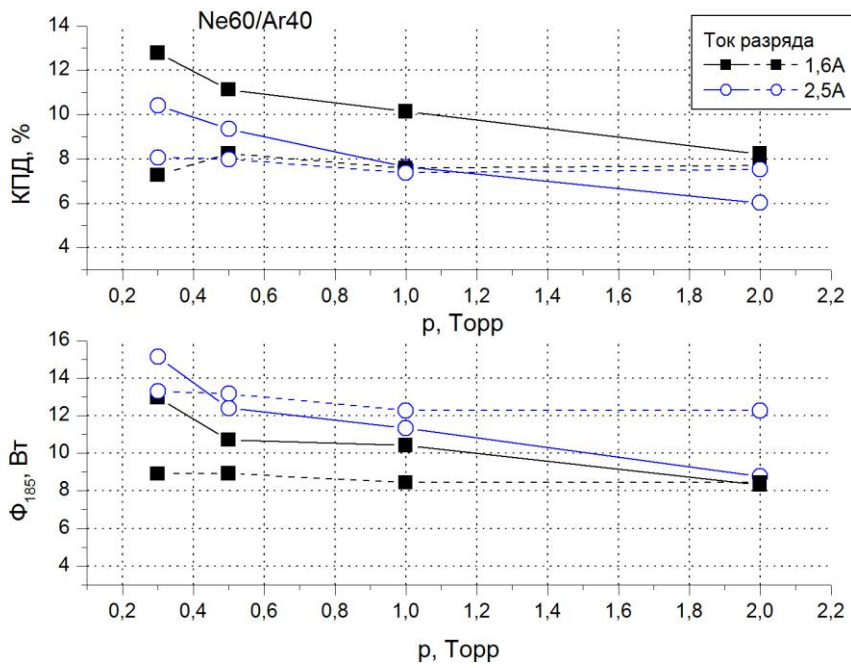


Рис. 4.31. Зависимость потока и КПД генерации излучения с длиной волны 185 нм от давления буферного газа. Сплошная линия – экспериментальные данные, штриховая линия – модельный расчёт. Буферный газ – 60Ne/40Ar. Длина разрядного промежутка – 1 м.

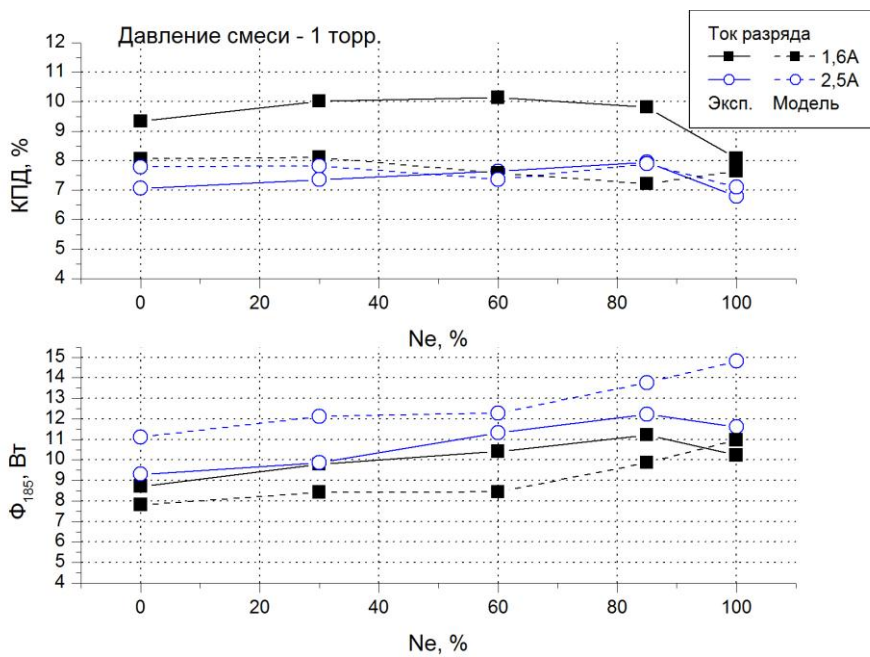


Рис. 4.32. Зависимость потока и КПД генерации излучения с длиной волны 185 нм от состава буферного газа. Сплошная линия – экспериментальные данные, штриховая линия – модельный расчёт. Давление смеси – 1 Торр. Длина разрядного промежутка – 1 м.

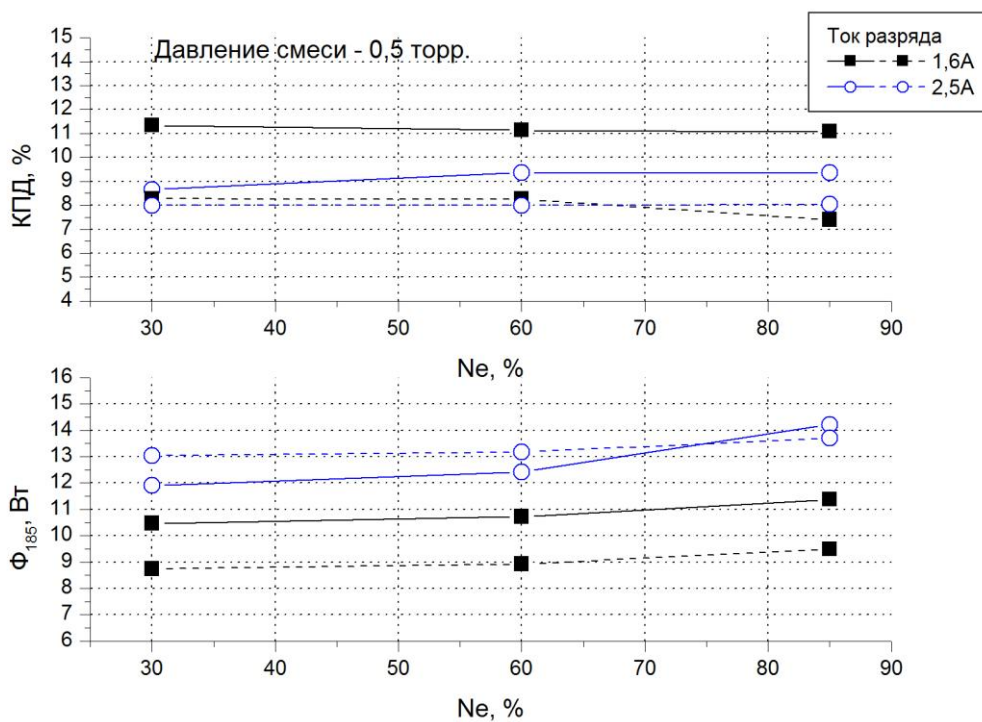


Рис. 4.33. Зависимость потока и КПД генерации излучения с длиной волны 185 нм от состава буферного газа. Сплошная линия – экспериментальные данные, штриховая линия – модельный расчёт. Давление смеси – 0,5 Торр. Длина разрядного промежутка – 1 м.

При анализе возможных причин расхождения модельного расчёта и экспериментальных данных стоит обратить внимание на нижеследующие факторы.

Несмотря на то, что в рассматриваемой модели вёлся перебор по давлению паров ртути в разряде, истинное значение его было неизвестно. Данное обстоятельство может сказаться на вычислении скоростей образования и релаксации излучательного уровня  $6^1P_1$  за счёт соударений второго рода и приводить к завышению потока ВУФ излучения, генерируемого разрядом при высоких плотностях тока и давлении буферного газа.

Вторым важным допущением использованной модели является решение кинетического уравнения Больцмана в локальном приближении. В этом случае функция распределения электронов по энергиям в каждой точке определяется лишь локальными параметрами. Данное приближение можно использовать, когда расстояние релаксации электрона по энергии много меньше характерного размера

неоднородности плазмы. При низких давлениях (менее 0,5 Торр) локальное приближение, видимо, может давать погрешность. Данное несоответствие может приводить к занижению электронной температуры и, как следствие, занижению потока ВУФ излучения.

Разработанный алгоритм расчёта характеристик электрического разряда в смеси паров ртути и инертных газов на момент написания работы не позволял рассчитывать четырёх компонентные системы (пары ртути + 3 инертных газа), поэтому математическое моделирование влияния малых добавок криптона к буферной смеси неон-аргон не было проведено. Стоит отметить, что рассчитанные зависимости потока и КПД генерации ВУФ излучения от состава буферной смеси менее дифференцированы по составу, чем экспериментально полученные. Это может быть связано с тем, что необходимые для расчёта сечения различных процессов недостаточно точно измерены, а механизмы взаимодействия различных частиц в такой многокомпонентной плазме имеют более сложный характер, чем это закладывается в модель расчёта. Это косвенно подтверждается тем фактом, что в наилучшем соответствии с экспериментальными данными находятся расчёты характеристик разряда для смеси паров ртути с чистым аргоном. Следует также учитывать, что при проведении экспериментов с современными мощными газоразрядными лампами в качестве источников излучения, приходится иметь дело с многокомпонентными амальгамами в качестве источников ртути в разряде. Задача определения давления паров ртути над многокомпонентной амальгамой является достаточно сложной.

Совокупность всех вышеперечисленных факторов приводит к тому, что характерная погрешность расчётов составляет порядка 20-30%. Этого достаточно, чтобы описать и предсказать общие закономерности генерации ВУФ излучения ртутным разрядом низкого давления. Для решения же практических задач при разработке новых источников ВУФ излучения такая точность не всегда достаточна, особенно когда фактически идёт «борьба» за проценты КПД. В связи с этим приходится констатировать, что экспериментальное исследование электрического

разряда в смеси паров ртути и инертных газов является наиболее продуктивным методом исследования ртутного разряда низкого давления в атмосфере инертных газов. Вместе с этим также стоит отметить, что за последние годы существующие математические модели существенно усложнились и используют всё меньше произвольных допущений и упрощений при проведении расчётов, учитывают большее количество процессов, протекающих в плазме ртутного разряда, при этом сохраняя точность предсказаний на относительно высоком уровне. Это позволяет надеяться, что в скором времени, при надлежащем количестве и качестве экспериментальных данных, такие модели позволят рассчитывать электрический разряд в смеси паров ртути и инертных газов с достаточной точностью.

#### **4.4. Увеличение срока службы ламп**

Увеличение плотности тока и использование в качестве буферного газа неона или его легких смесей с аргоном приводят к увеличению мощности газоразрядных источников. В свою очередь, 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 ламп. Поэтому важной задачей работы был поиск способов увеличения физического и полезного срока службы таких источников УФ излучения.

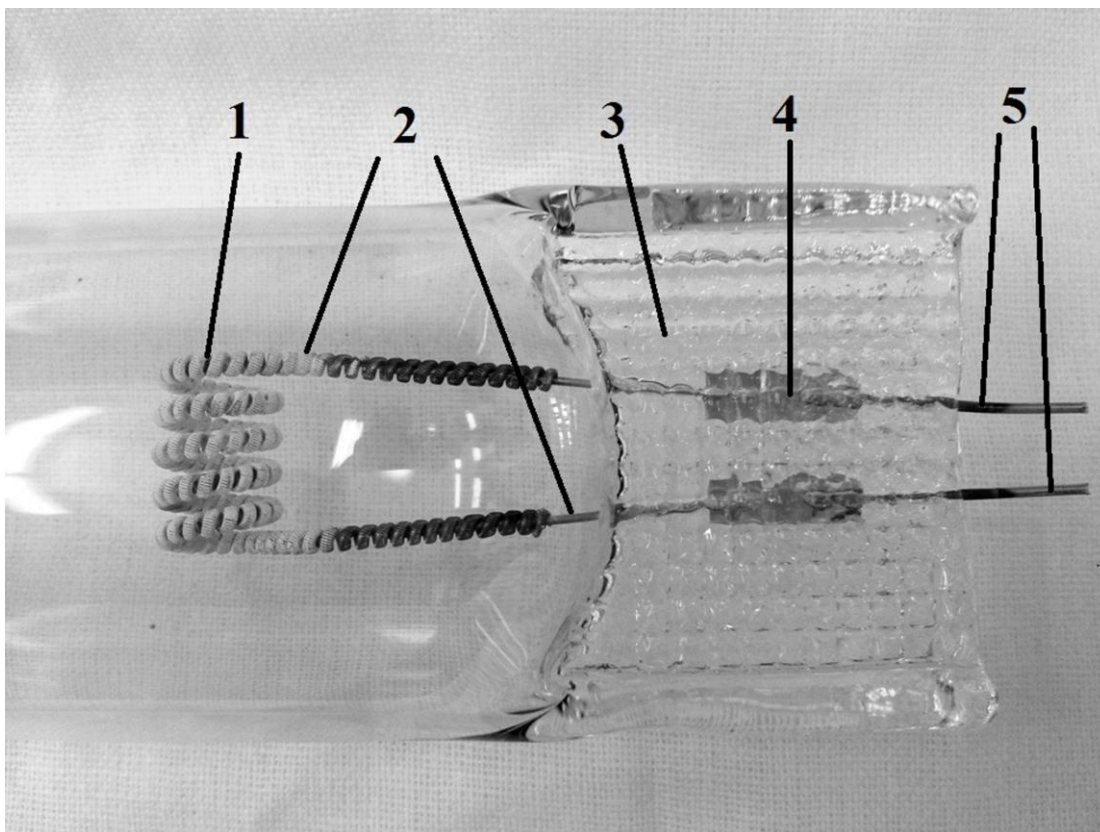
##### **4.4.1. Ресурс электродного узла лампы**

Исследования работы мощных газоразрядных ламп низкого давления (в т.ч. на основе дугового разряда в парах ртути) с кварцевыми колбами при токах несколько ампер показали, что ресурс лампы при увеличении тока резко снижается даже при неизменной величине плотности тока и наличии защитного покрытия на внутренней поверхности лампы. Исходя из этих фактов, можно предположить, что в данном случае взаимодействие плазмы со стенками кварцевой трубки вдали от электродов и последующее загрязнение разрядной среды продуктами этого взаимодействия не является решающим фактором при выработке лампой её ресурса, как это было в работах [97,98,109,110].

Исследования показали, что погасание лампы происходит до разрушения электрода или полного расхода эмитирующего оксидного покрытия, а также не зависит от наличия защитных экранов на электродах. При этом, влияние фазы тлеющего разряда, имеющей место при поджиге лампы [112], тоже не имеет решающего значения, поскольку эффект наблюдается независимо от количества циклов запуска лампы, в том числе и при однократном поджиге и дальнейшей работы лампы в непрерывном режиме непосредственно до её погасания. Следовательно, погасание лампы может быть связано с изменением режима работы электрода, например, ухудшения эмиссионной способности оксидного слоя, или с изменением свойств или состава газовой смеси. В случае попадания в лампу кислорода произойдет как "отравление" катода, так и увеличение падения напряжения на лампе, что и приведет к ее погасанию, поскольку источник питания поддерживает ток в ограниченном диапазоне рабочего напряжения.

Экспериментальные исследования производились на газоразрядных трубчатых лампах низкого давления при токах до 5 А. Конструктивно, такая лампа, как и большинство других газоразрядных ламп с электродами, представляет собой кварцевую трубку, заполненную инертным газом (или смесью инертных газов), в торцах которой находятся оксидные электроды. Внешний вид электродного узла показан на рис. 4.34. Принципиально важно отметить, что в отличие от стекла, кварц не смачивает металл, и электрод технологически не может быть герметично впаян в лампу. По этой причине используется фольговый ввод, при котором тонкая молибденовая фольга специальной формы запрессовывается в толщу кварца при высокой температуре. Такой способ ввода электрода обеспечивает достаточную герметичность для нормальной работы газоразрядных ламп с накальными оксидными электродами, работающими при разрядных токах 1-3 А, в течение требуемого срока службы 8-12 тысяч часов.





*Рис. 4.34. Внешний вид заштампованного электродного узла. 1 – спираль оксидного электрода с нанесенным оксидом, 2 – ножки оксидного электрода, 3 – лопатка лампы, 4 – фольговый ввод, 5 – выводы для подключения источника питания.*

С увеличением разрядного тока в лампах стали применять более мощные электроды, способные нести на себе большее количество эмиссионного оксидного покрытия и противостоять усилившейся электронной и ионной бомбардировке. Такой электрод значительно крупнее и имеет более высокое резистивное сопротивление. При повышении мощности лампы нагрев электрода и приэлектродной зоны возрастает за счет различных механизмов: возросшей мощности нагрева электродов током накала, увеличения электронной и ионной бомбардировки электродов вследствие роста тока разряда и увеличения приэлектродного падения напряжения при переходе к другим газам. При этом длина ножек электрода в лампе оставалась неизменной. Разогретые до более высокой температуры электрод и приэлектродная область создают гораздо более сильный тепловой поток на близлежащие стенки лампы, нежели ранее использовавшиеся электроды в лампах, работающих на токах до 3 А. В связи с этим

авторами работы было сделано предположение, что основная причина резкого снижения срока службы при увеличении разрядного тока до 5 А может быть связана с перегревом лопаток лампы. Измеренные с помощью термопары температуры лопаток лампы на границе с разрядной колбой составляли 70-80°С для ламп, работающих при разрядном токе до 3А, и около 130-140°С для ламп с током 5 А, что подтверждает предположение о перегреве лопаток и приэлектродной области кварцевой трубки. Известно, что при нагреве кварца более 130°С начинается интенсивное газоотделение в вакуум. Выделяющиеся пары воды и других газов будут вызывать "отравление" оксидного слоя, что приведет к повышению приэлектродного падения. Неравномерное расширение толщи кварца и металлических вводов электрода может также приводить к образованию микроканалов вдоль последних, нарушая тем самым общую герметичность лампы. Проникновение воздуха внутрь колбы лампы "отравляет" оксид и изменяет химический состав плазмы и, поскольку кислород (молекулярный/атомарный) является достаточно хорошим акцептором электронов, то это приводит к увеличению напряжения на лампе и, как следствие, к увеличению мощности лампы. Этот процесс создаёт положительную обратную связь, поскольку увеличение мощности лампы приводит к ещё большему перегреву лопаток и ускоренному проникновению воздуха внутрь лампы. При достижении предельной мощности, на которую рассчитан ЭПРА, лампа гаснет. Повторная попытка поджига лампы, как правило, является неудачной из-за того, что в изменённом газовом наполнении лампы (смесь инертных газов и воздуха), напряжение пробоя оказывается гораздо выше того, которое может обеспечить ЭПРА. Для устранения проблемы необходимо уменьшить температуру лопаток лампы.

Одним из способов уменьшения температуры является уменьшение теплового потока по направлению к торцу лампы. Для этого было решено удлинить ножки электродов и отодвинуть раскалённую спираль электрода дальше от фольгового ввода. Для проведения экспериментов были изготовлены газоразрядные лампы из кварцевых трубок с длиной разрядного промежутка 220 мм и внутренним

диаметром 29 мм, наполненных смесью неона, аргона и криптона до давления 0,5-1,0 Торр (газовое наполнение варьировалось). Для изготовления всех экспериментальных ламп был использован один тип электрода из одной партии. Защитное покрытие на внутреннюю поверхность колб ламп не наносилось для сокращения времени испытаний. Одна группа ламп наполнялась неон-аргоновой смесью А до давления 1 Торр, длина ножек электродов от задней кромки спирали электрода до лопатки лампы составляла 22 мм и 33 мм. Другая группа ламп наполнялась неон-аргоновой смесью Б с более высоким по отношению к смеси А процентным содержанием неона до давления 0,7 Торр. Длина ножек электродов в лампах группы Б составляла 33 мм, 35 мм и 37 мм. Состав и давление смеси Б были изменены с целью ускорения испытаний. Экспериментальные лампы зажигали при помощи ЭПРА, который обеспечивал питание лампы стабилизированным переменным током ( $5,0 \pm 0,1$ ) А с частотой около 38 кГц. Результаты испытаний приведены на рис. 4.35.

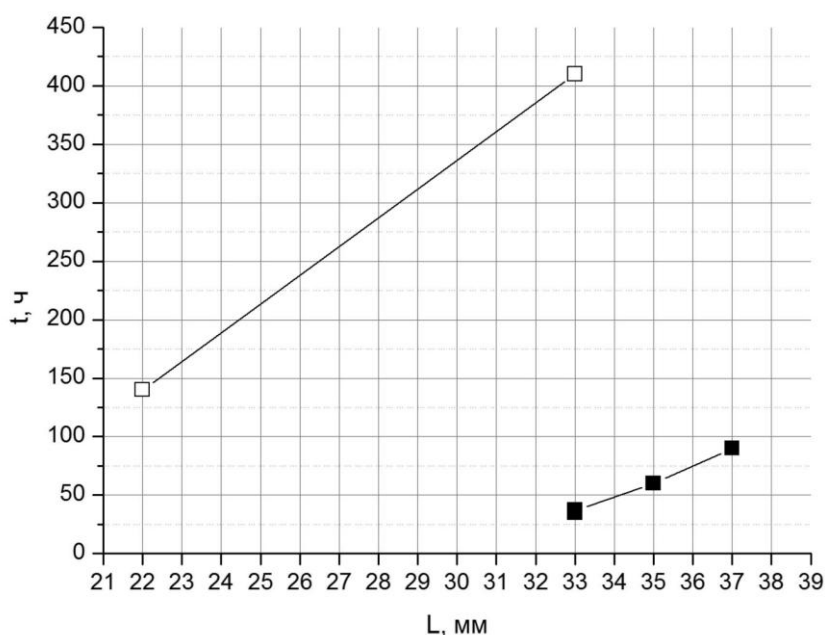


Рис. 4.35. Зависимость времени до погасания лампы ( $t$ ) от длины ножек ( $L$ ) электрода. Верхняя кривая - смесь А, 1 Торр; нижняя кривая - смесь Б, 0,7 Торр. Разрядный ток - 5А.

Из полученных данных следует, что время жизни ламп при удлинении ножек электрода существенно увеличивается: в 3 раза при удлинении ножек с 22 до 33 мм и в 2 раза при удлинении с 33 до 37 мм. Измерения показали падение температуры кварца на границе между колбой и лопаткой лампы со 135°С до 90°С при увеличении длины ножек электрода с 22 мм до 33 мм. Чем дальше расположена спираль электрода от лопатки лампы, тем меньше тепловой поток на торец лампы, и, соответственно, меньше температура, и меньше образуется микротрещин в кварце, приводящих к нарушению герметичности колбы лампы.

Другим важным фактором, который следует учитывать, является рабочая смесь газов, в частности, для ламп, использующих неон. Лампы наполняются неоном с целью увеличения погонной мощности положительного столба разряда при том же токе и, как следствие, погонной мощности излучения источника. Однако, поскольку неон имеет существенно больший потенциал ионизации, нежели аргон, который часто использовался ранее (Ne – 21,56 В, Ar – 15,76 В), а также вследствие увеличения потерь зарядов на стенках вследствие более высокого коэффициента диффузии ионов и электронов в неоне по сравнению с аргоном, существенно возрастает не только напряженность электрического поля в положительном столбе разряда, но и приэлектродное падение напряжения и, как следствие, выделение мощности (в т.ч. тепловой) в приэлектродной зоне. Добавка относительно большого в процентном отношении количества аргона к неону (10% и более в неон-аргоновой смеси) позволяет решить данную проблему, поскольку аргон ионизируется гораздо легче неона, но при этом неизбежно также уменьшается скорость дрейфа электронов и их убыль в разряде за счет рекомбинации на стенках. Это приводит к дополнительному снижению мощности разряда, уменьшению генерации излучения неона и появлению линий аргона. Следовательно, необходима добавка к неону малой примеси газа, который одновременно бы легко ионизировался, но при этом его процентная концентрация была бы настолько мала, что практически не замедляла бы скорость дрейфа электронов к стенкам, позволяя избежать

дополнительного падения мощности в разряде. В настоящей работе было предложено к неону добавлять криптон, имеющий потенциал ионизации 14 эВ.

Для проведения экспериментов с добавками криптона были изготовлены лампы с длиной ножек электрода равной 35 мм. Лампы наполнялись различными газовыми смесями до давления 0,5 Торр в целях ускорения проведения испытаний. Результаты экспериментов представлены ниже (Таблица 4.4).

Таблица 4.4. Зависимость времени горения ламп от состава буферной смеси.

Газовое наполнение	Время до погасания лампы, ч
Ne-Ar, Ne > 95%	40
Ne - 90%, Ar - 10%.	75
(1)Ne-Kr, Ne > 95%	75
(2)Ne-Kr, Ne > 95%	110
Ne-Ar-Kr, Ne > 95%	125

В смеси (2) процентное содержание криптона выше, чем в смеси (1).

Из полученных данных в таблице следует, что добавление достаточно большого количества аргона к неону (10% и более в смеси) позволяет существенно увеличить время жизни источника, однако, как было указано выше, такие рабочие смеси с высоким содержанием аргона изменяют другие свойства источника. Более интересным представляется результат, что гораздо более малые в количественном отношении (менее 5% в смеси) добавки криптона к неону или смеси неон-аргон с небольшим процентным содержанием аргона позволяют существенно увеличить физическое время жизни лампы. При этом температура кварца на границе между колбой и лопаткой лампы снижается дополнительно на 10-15°C. Использование малых добавок криптона к неону может быть более предпочтительным, чем увеличенное содержание аргона, поскольку добавка большого количества аргона к неону приводит к дополнительной потере лампой удельной мощности и изменению спектра.

Совмещение удлинения ножек электрода и добавление в буферный газ небольшого количества легко ионизирующегося газа (криптона) позволит увеличить физический срок службы мощных амальгамных газоразрядных ламп низкого давления в два и более раз при низких (0,5 Торр и менее) давлениях буферной смеси.

#### **4.4.2. Перспективные защитные покрытия**

Активное взаимодействие плазмы с внутренней стенкой колбы лампы в процессе горения дугового разряда в смеси паров ртути и инертных газов приводит к модификации ее поверхности и инжекции в стенки кварцевой колбы атомов ртути. В результате этого процесса происходит уменьшение выхода УФ излучения за счет поглощения резонансного излучения с длинами волн 185 и 254 нм атомами ртути, внедрившимися при горении разряда в толщу кварца, а также уменьшается запас атомов ртути в амальгаме, что приводит к уменьшению полезного срока службы ламп. Для увеличения полезного срока службы лампы обычно используют разнообразные защитные покрытия на основе оксидов щелочноземельных металлов, наносимые на внутреннюю поверхность колбы лампы, которые защищают поверхность кварца от воздействия плазмы и препятствуют проникновению ионов ртути в кварц [97]. Ведется как усовершенствование технологии нанесения уже известных материалов, так и поиск новых покрытий. Шпинели являются минералами класса сложных оксидов с общей формулой  $AM_2O_4$ , где А -  $Mg^{2+}$ ,  $Zn^{2+}$ ,  $Mn^{2+}$ ,  $Fe^{2+}$ ,  $Ni^{2+}$ ,  $Co^{2+}$ ; М -  $Al^{3+}$ ,  $Mn^{3+}$ ,  $Fe^{3+}$ ,  $V^{3+}$ ,  $Cr^{3+}$ ,  $Ti^{4+}$  [113]. Поскольку шпинели являются одними из самых твердых минералов, было сделано предположение, что защитные свойства покрытий смешанного состава или полностью из шпинелей будут обладать более эффективными защитными свойствами, чем покрытия на основе пленок простых оксидов.

Эффективность покрытия определялась по спаду мощности УФ излучения с длиной волны 254 нм. Методика проведения измерений описана в п. 3.6. Для исследований были изготовлены амальгамные лампы с внутренним диаметром кварцевой трубки 25 мм и длиной разрядного промежутка 146 см. Все лампы

прошли стандартную технологическую обработку, включая высокотемпературную обработку в вакууме, и заполнялись смесью спектрально чистых инертных газов. Для испытаний были выбраны защитные покрытия с предполагаемым смешанным составом:  $\text{MgO-Al}_2\text{O}_3\text{-MgAl}_2\text{O}_4$ ,  $\text{ZnO-Al}_2\text{O}_3\text{-ZnAl}_2\text{O}_4$ ,  $\text{MgO-Yb}_2\text{O}_3\text{-MgYb}_2\text{O}_4$ ,  $\text{BaO-Al}_2\text{O}_3\text{-BaAl}_2\text{O}_4$  и  $\text{SrO-Al}_2\text{O}_3\text{-SrAl}_2\text{O}_4$ . Известны различные способы получения шпинелей, однако для создания защитного покрытия могут быть применены только те из них, при которых температурная обработка в ходе всех процедур проводится при температурах ниже температуры плавления кварца [114-117], а полученная мелкодисперсная шпинель будет прочно закреплена на поверхности кварца. После анализа известных технологий, для получения шпинелей при создании защитного покрытия на внутренней стенке колб ламп был выбран способ, схожий со способом, описанным в патенте [117]. Водные растворы нитратов исходных веществ, взятых в стехиометрическом отношении, наносились на внутреннюю поверхность колбы лампы, после чего подвергались упариванию и длительному высокотемпературному отжигу в печи при температуре 700-1000 °С. Поскольку анализ состава покрытия не проводился, то можно предположить, что он может состоять из смеси шпинели и простых оксидов.

Испытания были проведены для двух стабилизированных токов разряда с частотой  $38 \pm 5$  кГц:  $3,2 \pm 0,1$  А (величина тока в промышленных лампах) и  $5,0 \pm 0,1$  А (ток в лампах с предельно высокой погонной мощностью).

На рис. 4.36 приведены результаты испытаний стронций-алюминиевого ( $\text{SrO-Al}_2\text{O}_3\text{-SrAl}_2\text{O}_4$ ) и цинк-алюминиевого ( $\text{ZnO-Al}_2\text{O}_3\text{-ZnAl}_2\text{O}_4$ ) оксидных защитных покрытий. Условия горения разряда в эксперименте с защитным покрытием на основе ганита по степени воздействия плазмы на стенку колбы были наиболее мягкими из всей серии, поскольку в качестве буферной смеси была взята стандартная смесь инертных газов – 60% неон + 40% аргон при давлении 1,2 Торр, величина разрядного тока равнялась 3,2 А. Погонная мощность разряда при таких условиях составляла приблизительно 2 Вт/см. Величина спада выхода УФ излучения лампы составила не более 10% после работы в течение 12000 часов, и не

более 15% после 18000 часов, что сопоставимо с результатами для лучших защитных покрытий, поскольку большинство производителей серийных амальгамных ламп схожей мощности гарантируют полезный срок службы от 8 до 12-16 тысяч часов при спаде 15-20%. При повышении разрядного тока до 5 А эффективность этого покрытия резко упала, и спад УФ излучения составил 15% уже после 500 часов горения лампы. В ходе проведения испытаний стронций-алюминиевого оксидного защитного покрытия давление смеси буферных газов (60% неон + 40% аргон) было снижено до 1 Торр, величина разрядного тока равнялась 5 А, погонная мощность лампы - примерно 3,3 Вт/см. Спад выхода УФ излучения составил в среднем около 15% после 500 часов горения ламп и 25% - после 2000 часов горения ламп, что сопоставимо с результатами для цинк-алюминиевого оксидного защитного покрытия для длительности испытания 500 часов.

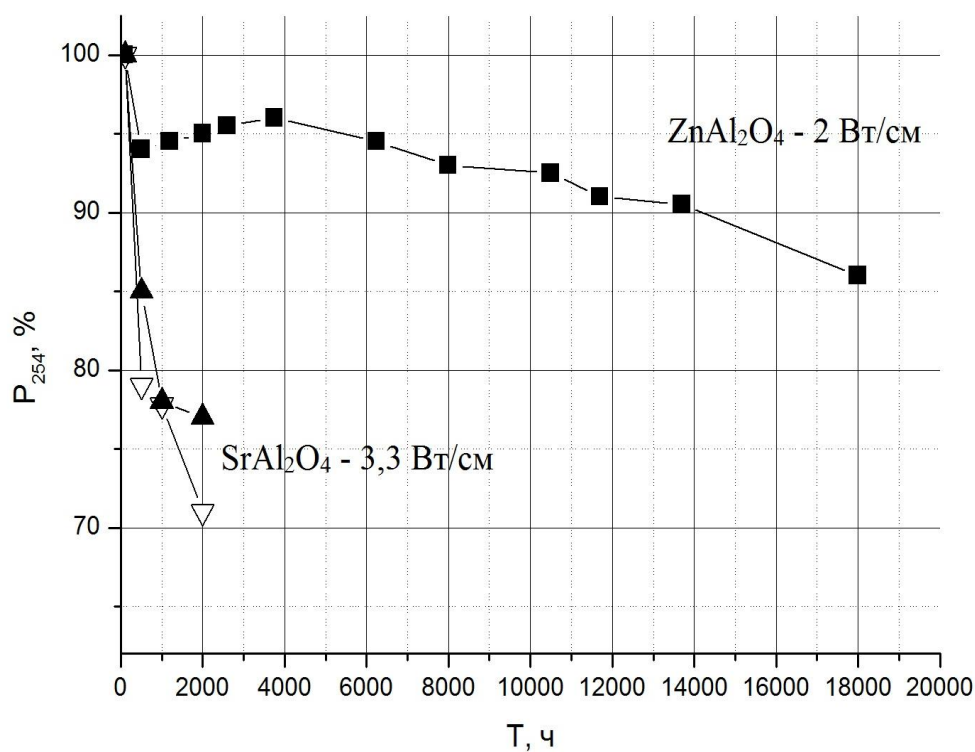


Рис. 4.36. Мощность УФ излучения  $P$  в зависимости от времени горения  $t$  лампы с цинк-алюминиевым ( $ZnO-Al_2O_3-ZnAl_2O_4$ ) оксидным защитным покрытием и двух одинаковых ламп с синтетическим стронций-алюминиевым ( $SrO-Al_2O_3-SrAl_2O_4$ ) оксидным защитным покрытием.



Для исследования эффективности защитных покрытий при еще более сильном воздействии плазмы лампы были наполнены смесью буферных газов с более высоким процентным содержанием неона при давлении смеси не выше 1 Торр. Такой выбор параметров обеспечивает увеличение удельного энерговклада в разряд, увеличение воздействия плазмы на поверхность кварца, увеличение энергии ионов и электронов плазмы и увеличение потока ионов на стенку разрядной трубки, что вызывает ускоренное разрушение пленки защитного покрытия. На рис. 4.37 представлены результаты исследования УФ излучения ламп с магний-иттербиевым ( $\text{MgO-Yb}_2\text{O}_3\text{-MgYb}_2\text{O}_4$ ) и магний-алюминиевым ( $\text{MgO-Al}_2\text{O}_3\text{-MgAl}_2\text{O}_4$ ) оксидными защитными покрытиями при токе разряда 5 А и погонной мощности разряда 4,5 Вт/см.

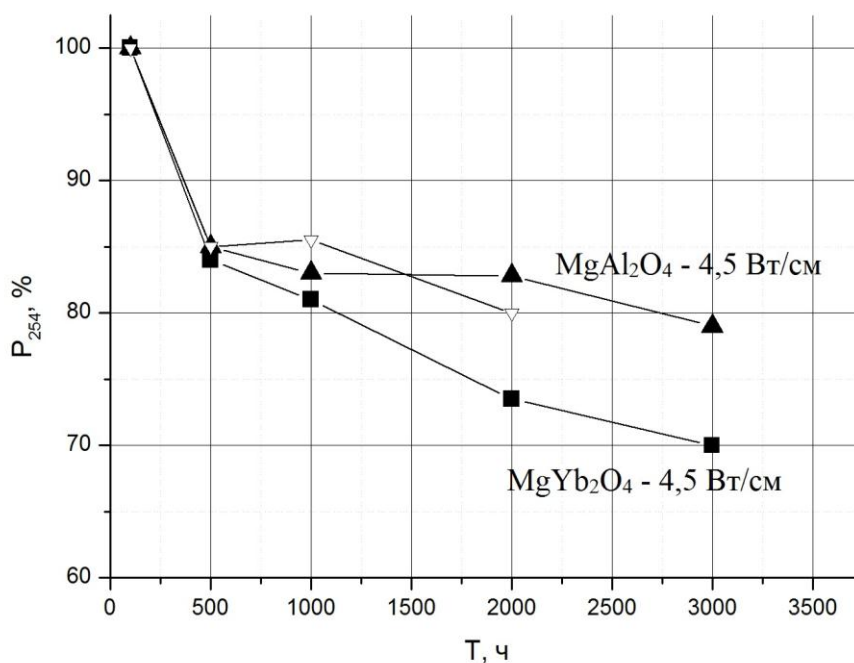


Рис. 4.37. Мощность УФ излучения  $P$  в зависимости от времени горения  $t$  лампы с магний-алюминиевым ( $\text{MgO-Al}_2\text{O}_3\text{-MgAl}_2\text{O}_4$ ) и магний-иттербиевым ( $\text{MgO-Yb}_2\text{O}_3\text{-MgYb}_2\text{O}_4$ ) оксидными защитными покрытиями.

Несмотря на гораздо более жесткие условия воздействия плазмы на эти покрытия, спад выхода УФ излучения не превысил 25% после 2000 часов работы для лампы с магний-иттербиевым оксидным защитным покрытием, и 20% для ламп с цинк-алюминиевым оксидным защитным покрытием.

Барий-алюминиевые ( $\text{BaO-Al}_2\text{O}_3\text{-BaAl}_2\text{O}_4$ ) и магний-алюминиевые ( $\text{MgO-Al}_2\text{O}_3\text{-MgAl}_2\text{O}_4$ ) оксидные защитные покрытия оказались более эффективными при испытаниях с током разряда 5А и погонной мощности разряда 3,7 Вт/см в смеси буферных газов с немного меньшим процентным содержанием неона (рис. 4.38). Результаты испытаний эффективности этих двух покрытий можно признать удовлетворительными, поскольку при достаточно тяжелых для защитного покрытия условиях горения разряда спад интенсивности УФ излучения после 7000 часов работы лампы составляет не более 20%. Данный результат сопоставим с результатами для лучших защитных покрытий на основе оксидов редкоземельных элементов, которые обеспечивают спад мощности УФ излучения около 20% после 8-10 тысяч часов работы лампы при аналогичных условиях.

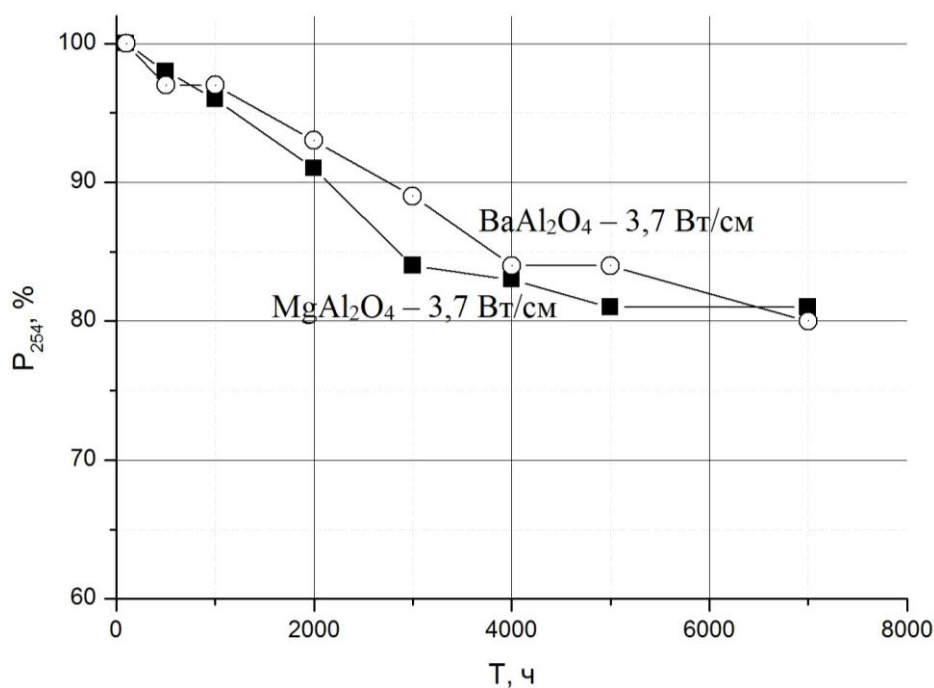


Рис. 4.38. Мощность УФ излучения  $P$  в зависимости от времени горения  $t$  лампы с барий-алюминиевым ( $\text{BaO-Al}_2\text{O}_3\text{-BaAl}_2\text{O}_4$ ) и магний-алюминиевым ( $\text{MgO-Yb}_2\text{O}_3\text{-MgYb}_2\text{O}_4$ ) оксидными защитными покрытиями.

Следует отметить, что технология нанесения оксидных покрытий с учетом конкретных условий работы лампы специально разрабатывалась для каждого вида покрытия и мощности разряда. В ходе данных исследований не ставилась задача повышения эффективности покрытий смешанного состава за счет улучшения

технологии нанесения покрытия, и даже не проводилось исследование качества созданных покрытий. Это является самостоятельной задачей, в результате решения которой эффективность защитных покрытий будет увеличена.

При токах разряда 3,2 А, с которым работают серийные мощные амальгамные лампы низкого давления, все исследованные покрытия смешанного состава показали высокую эффективность защиты кварцевой стенки лампы от воздействия плазмы разряда, сравнимую с лучшими оксидными покрытиями. При повышении разрядного тока до 5 А, повышении погонной мощности разряда и понижении давления смеси буферных газов ниже 1 Торр эффективность оксидных защитных покрытий резко падает, и при этих условиях перспективными являются магний-алюминиевые защитные покрытия. Эффективность данных видов защитных покрытий может быть улучшена за счет усовершенствования технологии их нанесения на внутреннюю поверхность кварцевой разрядной трубки.

#### **4.5. Заключение к главе 4**

В настоящей главе представлены основные результаты исследований.

Первый параграф посвящён изучению закономерностей генерации УФ излучения индукционным разрядом трансформаторного типа при давлениях буферной смеси менее 1 Торр и частоте разрядного тока 265 кГц (внутренний диаметр разрядной трубки – 16,6 мм). Показано, что зависимость потока резонансного излучения на длине волны 254 нм от давления буферного газа (аргон, смесь Ne30/Ar70) обнаруживает максимум при давлении 0,3 Торр. При таком же давлении буферного газа достигает максимума (40%) КПД генерации УФ излучения плазмы. Анализ полученных характеристик плазмы индукционного разряда трансформаторного типа при указанных составах и давлениях буферной смеси показывает, что генерация УФ излучения линии 254 нм такая же, как в линейных электродных лампах.

Второй параграф посвящён исследованию закономерностей генерации УФ излучения ртутного разряда низкого давления при низком давлении буферного газа

(неона, аргона и их смесей) и высоких плотностях разрядного тока. Произведены измерения 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.

Далее приводятся результаты исследования зависимостей потока и КПД генерации ВУФ излучения 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. Обнаружено наличие максимума для мощности излучения и КПД генерации линии 185 нм в области давлений смеси Ne-Ar 0,1 – 0,6 Торр. 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 с длиной волны 185 нм разряда составило 14%.

В конце второго параграфа приведены результаты исследования влияния 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 понизить мощность разряда.

Третий параграф посвящён сравнению полученных экспериментальных данных с результатами математического моделирования ртутного разряда низкого давления. Показано, что использованная для расчётов модель хорошо описывает экспериментальные данные в широком диапазоне изменения параметров разряда. Расхождения обнаруживаются в двух полярных ситуациях: при понижении давления до 0,1 – 0,3 Торр и малой плотности разрядного тока менее 0,9 А/см<sup>2</sup>

модель занижает выход ВУФ излучения, при большой плотности разрядного тока ( $>0,9 \text{ А/см}^2$ ) и высоких давлениях буферной смеси (1-2 Торр) - завышает.

В последнем, 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, что эффективность защитных покрытий смешанного состава оксид-шпинель не хуже, чем у традиционных защитных покрытий на основе плёнок оксидов редкоземельных элементов.

## **Заключение**

Настоящая работа посвящена экспериментальному исследованию и математическому моделированию закономерностей генерации УФ излучения электрическим разрядом в смеси паров ртути и инертных газов (неона, аргона и криптона) при низком давлении и высоких плотностях разрядного тока. Основные результаты работы:

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 неон-аргоновой буферной смеси 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 при давлении буферной смеси 0,1-2 Торр и частоте разрядного тока 80 кГц выше в смесях неон-аргон, чем в чистых газах. Максимально достигнутое значение КПД генерации излучения с длиной волны 185 нм разряда 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 при частоте 80 кГц не приводит к значительному росту потока ВУФ излучения линии 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 также к снижению 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.

В заключение автор выражает благодарность своему научному руководителю, д.ф.-м.н., Василяку Л.М. за помощь и поддержку в выполнении настоящей работы. Автор выражает искреннюю признательность председателю совета директоров группы компаний «Лаборатория импульсной техники» Костюченко С.В., главному разработчику светотехнической службы Соколову Д.В. и заведующему светотехнической лабораторией Собуру Д.А. за возможность провести исследования

и всестороннюю помощь. Также автор благодарит д.т.н. Попова О.А. и своих коллег, сотрудников «ЛИТ», Васильева А.И., Исакова М.С., Шункова Ю.Е., Свитнева С.А., Старшинова П.В. и студента кафедры светотехники НИУ «МЭИ» Шаранова Е.П. за помощь в проведении измерений, участие в обсуждении диссертации и ценные советы. Отдельную благодарность автор выражает своей семье и друзьям за поддержку и терпение.



## Список литературы

- 1 Мешков В.В. Основы светотехники - М.: Энергия. 1979. С. 15.
- 2 Hockberger P. E. A history of ultraviolet photobiology for humans, animals and microorganisms // Photochem. Photobiol. 2002. V. 76 (6). P. 561–579.
- 3 Lyman T. Victor Schumann // Astrophysical Journal. 1914. 38: 1–4.
- 4 Зайдель А.Н., Шрейдер Е.Я. Физика и техника спектрального анализа- М.: Наука. 1967. С. 11.
- 5 Downes A., Blunt T.P. Researches on the effect of light upon bacteria and other organisms // Proceedings of the Royal Society of London. 1877. 26. P. 488-500.
- 6 Barnard J. E., Morgan H. Upon the bactericidal action of some ultraviolet radiations as produced by the continuous current arc // P. R. Soc. London. 1903. 72. P. 126–128.
- 7 Bolton J.R. Ultraviolet application handbook // ICC Lifelong Learn Inc. 2010. P.4
- 8 Спиринов А.С. Молекулярная биология: структура и биосинтез нуклеиновых кислот //М. Высш. шк. 1990. С. 75.
- 9 Kowalski W. Ultraviolet germicidal irradiation handbook // Springer. 2009. P. 17-47.
- 10 Справочная книга по светотехнике // Под ред. Айзенберга Ю.Б. М.: Знак. 2006. 972 с.
- 11 Райзер Ю.П. Физика газового разряда. – М.: Наука, 1987. – 592 с.
- 12 Рохлин Г.Н. Разрядные источники света. – М.: Энергоатомиздат, 1991.
- 13 Ультрафиолетовые технологии в современном мире. Под ред. Кармазинов Ф. В., Костюченко С. В., Кудрявцев Н. Н., Храменков С.В. - Долгопрудный: Издательский дом «Интеллект», 2012
- 14 Bolon D.A., Kunz C.O. Ultraviolet depolymerization of photoresist polymers // Polym. Eng. Sci. 1972. V. 12. P. 109-111.
- 15 Vig J.R. UV/ozone cleaning of surfaces //J. Vac. Sci. Technol. 1985. 3(3). P. 1027-1034.

- 16 Glaze W.H., Kang J.-W., Chapin D.H. The Chemistry of Water Treatment Processes Involving Ozone, Hydrogen Peroxide and Ultraviolet Radiation // Ozone Sci.Eng. 1987. V.9(4). P. 335-352.
- 17 Kogelschatz U., Eliasson B., Hirth M. Ozone Generation From Oxygen And Air: Discharge Physics And Reaction Mechanisms // Ozone Sci. Eng. 1988. V.10. P. 367-378.
- 18 Kogelschatz U., Eliasson B., Egil W. Dielectric - Barrier Discharges. Principle and Applications // J. Phys. IV. 1997. 07(C4). P.47-66.
- 19 Лунин В.В., Попович М.П., Ткаченко С.Н. Физическая химия озона. – М.: Изд-во МГУ. 1998.
- 20 Уэммаус Д. Газоразрядные лампы. – М.: «Энергия», 1977.
- 21 Рохлин Г.Н. Дуговым источникам 200 лет – М.: ВИГМА, 2001.
- 22 Фабрикант В.А. Механизм излучения газового разряда. Цит. по кн: Электронные и ионные приборы / под редакцией П.В. Тимофеева. Госэнергоиздат. 1941. С. 322.
- 23 HITTORF W. Ueber die Elekcitititsleitung der Case // Ann. Phys. 1884. 21. P. 137-139.
- 24 Wharmby D.O. Science, Measurement and Technology // IEE Proceedings A. 1993. V. 140. Issue 6. P. 465 – 473.
- 25 Anderson J. M. US Patent N 3500118. 1970.
- 26 V.A. Godyak, B. Alexandrovich, R.B. Piejak, E. Statnic. High Intensity Electrodeless Low Pressure Light Source Driven by a Transformer Core Arrangement // US Patent 5,834,905. Nov.10, 1998.
- 27 J. Shaffer and V.A. Godyak. The Development of low frequency high output electrodeless fluorescent lamp // J. Ill. Eng. Soc. Winter 1999. P.142.
- 28 С.В. Гвоздев-Карелин. Особенности и примеры применения безэлектродной люминесцентной лампы Endura фирмы Osram//Светотехника, 2006. № 3.
- 29 M.R. Kling. Electrodeless lamp having thermal bridge between transformer core and amalgam // US Patent 6,175,197 B1. Jan. 16, 2001.

- 30 М.В. Исупов, И.М. Уланов, А.Ю. Литвинцев, К.Н. Колмаков.  
Экспериментальное исследование энергетических характеристик  
индукционного разряда трансформаторного типа в парах ртути //  
Теплофизика и Аэромеханика. 2002. Т.9. С. 151-161.
- 31 М.В. Исупов, С.В. Кротов, А.Ю. Литвинцев, И.М. Уланов. Индукционная  
ультрафиолетовая лампа // Светотехника. 2007. № 5. С.37-40.
- 32 G.G. Lister and M. Cox. Modelling of inductively coupled discharges with  
internal and external coils // Plasma Sources Sci. Technol. 1992. V.1. P. 67–73.
- 33 J.W. Denneman. Determination of electromagnetic properties of low-pressure  
electrodeless inductive discharges // J. Phys. D: Appl. Phys. 1990. vol. 23. P. 293  
– 298.
- 34 Y. Watanabe, H. Miyazaki. Analysis of the inductively-coupled electrodeless  
discharge by the equivalent circuit // Proc. 8th Int'l. Symp. Sci. Technol. Light  
Sources. 1998. Greifswald. Germany. P 225-226.
- 35 Попов О.А. Исследование и разработка индукционных люминесцентных  
источников света на частотах 100-15000 кГц // Диссертация на соискание  
уч. ст. д.т.н. М., МЭИ. 2012.
- 36 M. Shinomiya, M. Toho, and M. Kawaguchi. Impedance characteristics and its  
equivalent circuit of the electrodeless lamp excited by the air-cored coil // Proc.  
6th Int Symp. Sci. Technol. Light Sources. 1992. Budapest. P. 333 - 334.
- 37 M. Shinomiya, K. Kobayashi, M. Higashikawa, S. Ukegawa, J. Matsuura, and K.  
Tanigawa. Development of the electrodeless fluorescent lamp // J. Illum. Eng.  
Soc., 1991, v. 20. №1. P. 44 – 49.
- 38 S. Ukegawa, M. Shinomiya, M. Higashikawa, T. Uetsuki, K. Kobayashi.  
Electrodeless discharge lamp // US Patent 5,013,975. May 7, 1991.
- 39 О.А. Попов. Индукционный источник света с двумя симметричными  
контурами возбуждения, работающий на частотах 100–400 кГц и  
мощностях 300–450 Вт // Светотехника. 2009. № 6. С. 48-49.
- 40 Kenty C. Production of 2537 radiation and the role p metastable atoms in argon-  
mercury discharges // J. Appl. Phys. – 1950. – V.21. – P.1309.
- 41 Woymouth J.E., Bitter P. Analysis of the plasma of fluorescent lamps // J. Appl.  
Phys. – 1956. – V.27. - №2 – P.112.

- 42 Cayless M.A. Theory of the positive column in mercury-rare discharges // J. Appl. Phys. – 1984. V. 14 – P.337.
- 43 Уваров Ф.А., Фабрикант В.А. Экспериментальное определение эффективной вероятности испускания фотонов атомами плазмы // Оптика и спектроскопия. – 1965. – Т. 18. Вып. 4. – С. 562.
- 44 В.М. Миленин, Н.А. Тимофеев. Плазма газоразрядных источников света низкого давления // Л.: изд. Ленинградского университета. 1991.
- 45 Свитнев С.А. Кинетика элементарных процессов в столбе разряда люминесцентной лампы. // Диссертация на соискание степени магистра техники и технологии. – М.: МЭИ, 2009.
- 46 Самхарадзе Т.Г. Анализ расчетных математических моделей плазмы положительного столба люминесцентных ламп // Инженерная физика. – 2005 – №4. – С. 85-86.
- 47 Федоренко А.С. Экспериментально-расчетные исследования характеристик положительного столба разряда и совершенствование люминесцентных ламп. Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. – М.: МЭИ, 1980.
- 48 Свитнев С.А. Эффективный источник ультрафиолетового излучения на основе разряда низкого давления // Диссертация на соискание уч. ст. к.т.н. - М., МЭИ. 2012.
- 49 Wani K. Stepwise excitation of  $6^1P_1$  level in the afterglow of a low pressure Hg-Ar discharge // J. Appl. Phys. – 1986. – V.58. – N. 08. – P. 2968.
- 50 Tsendin L.D. Electron kinetics in non-uniform glow discharge plasmas. //Plasma Sources Sci. Technol. – 1995. – N. 4. – P. 200-211.
- 51 Kortshagen U., Busch C., Tsendin L.D. On simplifying approaches to the solution of the Boltzmann equation in spatially inhomogeneous plasmas // Plasma Sources Sci. Technol. – 1996. – N. 5 – P. 1-17.
- 52 Petrov G.M., Giuliani J.L. Inhomogeneous model of an Ar-Hg direct current column discharge. //Journal of Applied Physics. Vol. 94 №1 (2003), p. 62-74.
- 53 Post H.A. Radiative transport at the 184.9-nm Hg resonance line. I. Experiment and theory // Physical Review A, Vol.33. 1986. P.2003-2016.

- 54 Thomson J.J. Electrodeless discharges through gases // *Phil. Mag.* 1927. vol. 4. P.1128.
- 55 Tykocinski-Tykociner J. Measurement of current in electrodeless discharges by means of frequency variations // *Phil. Mag.* 1932. vol.13. P.953.
- 56 Hans U. Eckert. Induction Plasmas at low frequencies // *AIAA Journal.* 1971. vol.9. P.1452.
- 57 Hans U. Eckert. // *J. Appl. Phys.* 1962. V. 33, 6 p. 2780.
- 58 J.M. Anderson. Electrodeless fluorescent lamps excited by solenoidal electric Fields // *J. Illum. Eng. Soc.* 1969. vol. 64. P.236-241.
- 59 А.М. Троицкий и Д.Д. Юшков. Определение параметров безэлектродного разряда // *Светотехника*, 1984, №11. С. 6.
- 60 D.O. Wharmby, S-A. El-Hamansy. Low power compact electrodeless lamp // *Proc. 6th Int. Symp. Sci. Technol. Light Sources.* 1992. Budapest. P. 26-29.
- 61 М.В. Исупов, И.М. Уланов. Анализ параметров плазмы индукционного разряда трансформаторного типа в неоне // *Теплофизика высоких температур.* 2005. т.43. №2. С. 181-187.
- 62 R.B. Piejak, V.A. Godyak, B.M. Alexandrovich. A Simple Analyses of an Inductive RF Discharge//*Plasma Sources Sci. Technol.* 1992. № 1. С. 179-185.
- 63 Э.М. Гутцайт. Безэлектродные источники света, использующие электромагнитную энергию высоких частот // *Издательство МЭИ.* М. 2003.
- 64 И.М. Уланов, К.Н. Колмаков, М.В. Исупов, А.Ю. Литвинцев. Исследование индукционных разрядов трансформаторного типа с целью создания плазмохимических реакторов и новых источников света // *Материалы семинаров-школ молодых ученых, студентов и аспирантов 2002/2003 г.г.* Петрозаводск. 2004. С. 177-189.
- 65 V.A. Godyak, R.B. Piejak, B.M. Alexandrovich. Electron energy distribution function measurements and plasma parameters in inductively coupled argon plasma // *Plasma Sources Sci. Technol.* 1994, 3, P. 169-173.
- 66 L.R. Nerone, A.H. Quereshi. Mathematical modelling and optimization of the electrodeless low-pressure discharge system // *Proc. 24th Ann. IEEE Power Electronics Specialists Conf.* 1993. Seattle. WA. П. 509-514.

- 67 Справочник Физические величины под редакцией Григорьева И.С., Мейлихова Е.З. // М.: Энергоатомиздат. 1991. С. 677.
- 68 Клярфельд Б.Н. Положительный столб газового разряда и его использование для получения света. вкн: Электронные и ионные приборы. под редакцией П.В. Тимофеева // Госэнергоиздат. 1941. С. 322.
- 69 Vriens L., Keijser R.A. and Ligthart F.A.S. Ionization processes in the positive column of the low-pressure Hg-Ar discharge // J.Appl.Phys. V.49. N7. 1978. P. 3807-3813.
- 70 Tingsheng Lin. Toshio Goto. Accounts of ionization mechanism in low-pressure Ar-Hg discharges // J. Applied Physics. 1991. V 1. 69. P. 8.
- 71 Сепман В.Ю., Шеверов В.А., Вуйнович В. Ассоциативная ионизация при парных столкновениях 63P0 возбужденных атомов ртути // Оптика и Спектроскопия. 1984. Т. 56. Вып. 4. С. 591-595.
- 72 Пенкин Н.П., Редько Т.П. Сечение возбуждения и перемешивания уровней 63P0.1.2 атома ртути электронным ударом // Оптика и спектроскопия. 1974. Т. 36. Вып. 3. С. 360.
- 73 Уваров Ф.А., Фабрикант В.А. Экспериментальное определение эффективной вероятности испускания фотонов атомами плазмы // Оптика и спектроскопия. 1965. Т. 18. Вып. 4. С. 562.
- 74 Дроздов Л.А. Повышение мощности и ресурса высокоэффективных источников ультрафиолетового излучения с дуговым разрядом низкого давления // Диссертация на соискание уч. ст. к.т.н. М. 2010. С. 145
- 75 Шунков Ю.Е. Экспериментальное исследование источника вакуумного ультрафиолетового излучения на основе ртутного разряда низкого давления с высокой плотностью тока // Диссертация на соискание уч. ст. к.т.н. - М., МЭИ. 2015.
- 76 Meyers G. A., and Strojny F. M. W. Design of Fluorescent Lamps for High-Frequency Service // Illuminating Engineering. 1959. V. 54. P. 65-70.
- 77 Koedam M. and Verwey W. Proc. 7th Int. Conf. on Phenomena in Ionized Gases // Belgrade: GradevinskaKnjiga. 1965. P. 392-395.
- 78 Read T. B., Kerry D. C. The effect of supply frequency on a mercury-argon discharge // British Journal of Applied Physics. 1964. V.16. P. 453-455.

- 79 Polman J. Relaxation of the electron velocity distribution in time dependent weakly ionized plasma // *Physica*. 1971. V.54. P. 305-307.
- 80 Drop P.C., Polman J. Calculations on the effect of supply frequency on the positive column of a low-pressure Hg-Ar AC discharge // *Journal of Physics*. 1972. V.5. P. 562-568.
- 81 Polman J., Werf J.E., Drop P.C. Nonlinear effects in the positive column of a strongly modulated mercury-rare gas discharge // *Journal of Physics*. 1972. V.5. P. 266-279.
- 82 Polman J. Recent developments in low pressure gas discharge research // *Physica*. 1976. V.82. P. 125-140.
- 83 Охонская Е.В., Федоренко А.С. Расчет и конструирование люминесцентных ламп // Саранск. Издательство Мордовского университета. 1997.
- 84 Каланов В.П., Миленин В.М., Тимофеев Н.А. Исследование заселенности резонансных уровней 63P1 и 61P1 атома ртути в плазме разряда в смеси паров ртути с аргоном // *Оптика и спектроскопия*. 1986. Т. 60. 4. С. 711.
- 85 Кузьменко М.Е. Экспериментальные исследования разряда в парах ртути и инертных газов и разработка мощного источника УФ-излучения // Диссертация на соискание уч. ст. к.ф.м.н. М. 2000. С. 142.
- 86 Собур Д.А. Исследование генерации вакуумного ультрафиолетового излучения ртутным разрядом низкого давления. // Диссертация на соискание уч. ст. к.ф.-м.н. – М.: МФТИ, 2011.
- 87 Башлов Н.Л., Каланов В.П., Панасюк Г.Ю., Тимофеев Н.А. Приложение правил подобия разрядов в смеси ртути с инертными газами к изучению плазмы газоразрядных люминесцентных источников света // 7-я Всесоюзная конференция по физике низкотемпературной плазмы. Тезисы докладов. Ч. I. Ташкент. 1987. С. 252-253.
- 88 Lankhorst M.H.R., Niemann U. Amalgams for fluorescent lamps Part I: Thermodynamic design rules and limitations // *Journal of Alloys and Compounds*. 2000. V. 308. P. 280–289.

- 89 Lankhorst M.H.R., Keur W., van Hal H.A.M. Amalgams for fluorescent lamps Part II: The systems Bi–Pb–Hg and Bi–Pb–Au–Hg // *Journal of Alloys and Compounds*. 2000. V. 309. P. 188–196.
- 90 Старцев А.Ю. Исследование влияния плазмы на электроды мощных амальгамных ламп низкого давления и повышение срока их службы. // Диссертация на соискание уч. ст. к.т.н. – М. 2011.
- 91 UK Patent Application GB 2124019 A.
- 92 Литвинов В.С. Методы расчета и оптимизация параметров источников света широкого применения // Диссертация на соискание уч. ст. д.т.н. М., МЭИ. 1983.
- 93 Krasnochub A.V., Vasiliev A.I. Qualitative model of the operating mechanism of the protective coating for low pressure Hg lamps // *J. Phys.D.: Appl. Phys.* 2006. V.39. P. 1378-1383.
- 94 Rudolph J. Photochemischeprozesse in der leuchtstofflampe // *Technisch – Wissenschaftliche Abhandlungen der Osram-Gesellschaft*. 1969. V.10.
- 95 Печеркин В. Я. Исследования механизмов спада УФ-излучения и ресурса работы источников УФ-излучения с ртутной дугой низкого давления// Диссертация на соискание уч. ст. к.ф.-м.н. М. 2007. С. 139.
- 96 Василяк Л. М., Васильев А.И., Дроздов Л. А, Костюченко С. В., Кудрявцев Н. Н., Соколов Д. В., Старцев А. Ю. Защитное покрытие лампы низкого давления с парами ртути как решающий фактор срока ее службы// *Прикладная физика*. 2009. №1. С. 120-124.
- 97 Васильев А.И, Василяк Л.М., Костюченко С.В., Кудрявцев Н.Н., Кузьменко М.Е., Печёркин В.Я. Влияние защитного слоя на длительность горения и излучение кварцевых газоразрядных ламп низкого давления. // *Письма в ЖТФ*. 2006, **32**(1), 83-88
- 98 Василяк Л.М., Васильев А.И., Дроздов Л.А., Костюченко С.В., Кудрявцев Н.Н., Соколов Д.В., Старцев А.Ю. Защитное покрытие лампы низкого давления с парами ртути как решающий фактор срока ее службы // *Прикладная физика*. 2009. № 1. С. 120.
- 99 Л.М. Биберман, В.С. Воробьев, И.Т. Якубов. Кинетика неравновесной низкотемпературной плазмы. М.: Наука, 1982.



- 100 U. Kortshagen, C. Busch, L.D. Tsendin. On simplifying approaches to the solution of the Boltzmann equation in spatially inhomogeneous plasmas // Plasma Sources Sci. Technol. 1996. № 5. p.1-17.
- 101 McCluney W.R. Introduction to radiometry and photometry // Artech House. 1994. P. 271-280.
- 102 Гуревич М.М. Фотометрия. Теория методы и приборы // Л.: Энергоатомиздат. 1983.
- 103 Keitz. H.A.E. Light Calculation and Measurements. London: Macmillan and Co Ltd, 1971.
- 104 Lawal O. et al., Proposed Method for Measurement of Output of Monochromatic (254 nm) Low Pressure UV Lamps // IUVA News. 2008. V.10. №1
- 105 Sasges M., Robinson J., Daynouri F. Ultraviolet lamp output measurement: A concise derivation of the Keita equation // Ozone: Sci. Eng. 21012. V.34. P.306-309.
- 106 Василяк Л.М., Дроздов Л.А., Костюченко С. В., Кудрявцев Н.Н., Собур Д.А., Соколов Д.В., Шунков Ю.Е. Методика измерения мощности УФ излучения трубчатых бактерицидных ламп низкого давления // Светотехника. – 2011.–№ 1. – С. 29 – 32
- 107 Al-Shamma'a A.I. et al. Low pressure microwave plasma ultraviolet lamp for water purification and ozone application // J. Phys. D.: Appl. Phys. 2001. V.34. P. 2775-2781.
- 108 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.
- 109 Василяк Л.М., Дроздов Л.А., Костюченко С. В., Кудрявцев Н.Н., Собур Д.А., Соколов Д.В. Влияние режимов работы газоразрядной амальгамной лампы низкого давления на интенсивность генерации вакуумного УФ-излучения с длиной волны 185 нм// Прикладная физика. 2010. № 6. С. 70 – 76.

- 110 Зейдель А.Н., Прокофьев С.М., Славный В.А., Шрейдер Е.Я. Таблицы спектральных линий. Справочник. – М.: «Наука», 1977.
- 111 Vasilyak L.M., Pecherkin V.Ya. Temperature effect on the burning time of a low-pressure discharge in a quartz discharge tube with a protective layer// Surf. Eng. Appl. Elect. 2012. V. 48. No 3. P. 250.
- 112 Костюченко С.В., Кудрявцев Н.Н., Микаева С.А., Соколов Д.В., Старцев А.Ю. Метод повышения срока службы бактерицидных ламп низкого давления путем улучшения физико-механических свойств оксидной суспензии для электродов ламп // Инженерная физика. 2009. №6. С. 19.
- 113 Н.С. Зефирова - Ред. *Химическая энциклопедия*. Москва: Научное издательство «Большая Российская энциклопедия», 1998. – Т.5, с. 788-789
- 114 Ледовская Е.Г., Габелков С.В., Литвиненко Л.М., Логвинков Д.С., Миронова А.Г., Одейчук М.А., Полтавцев Н.С., Тарасов Р.В. Низкотемпературный синтез магний-алюминиевой шпинели. //Вопросы атомной науки и техники. 2006, (1), 160-162.
- 115 Ханамирова А.А., Адимосян А.Р., Апресян Л.П. Разработка различных способов получения ультрадисперсной алюмомагниево-шпинели. //Химический журнал Армении. 2009, **62**(3-4), 347-354.
- 116 C. Păcurariu, I. Lazău, Z. Ecsedi, R. Lazău, P. Barvinschi, G. Mărginean. New synthesis methods of  $MgAl_2O_4$  spinel.// Journal of the European Ceramic Society. 2007, (27), 707-710.
- 117 Hayne Palmour, Halit Z. Dokuzoguz. Finely devided spinel. U.S. Patent 3,544,266, issued December 1, 1970.