

«УТВЕРЖДАЮ»

Проректор МГУ им. М.В. Ломоносова



*А.А. Федянин*  
/А.А. Федянин /  
«30» ноября 2016 г.

### ОТЗЫВ

ведущей организации на диссертацию Левченко Владимира Александровича «Генерация ультрафиолетового излучения ртутным разрядом с высокой плотностью тока при низких давлениях», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.08 – «Физика плазмы»

Ртутный разряд низкого давления является эффективным источником УФ и ВУФ излучения. В настоящее время наиболее востребованными источниками такого разряда являются амальгамные газоразрядные лампы низкого давления, поскольку они имеют большую мощность, а также являются более экологичными по сравнению с традиционными ртутными лампами, поскольку не содержат металлической ртути. Сочетание излучения с длинами волн 254 и 185 нм, генерируемое такими источниками, применяется для фотохимической очистки воздуха от вредных веществ и запахов за счет наработки радикалов, озона и фотохимических реакций разложения. Известно, что для эффективного разрушения примесей при очистке воздуха необходимо 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 кубических метров в час. Для оборудования с такой высокой производительностью требуются мощности УФ излучения от нескольких киловатт до десятков киловатт, для чего, соответственно, необходимы мощные источники с высокой эффективностью генерации УФ и ВУФ излучения. К настоящему времени генерация излучения 254 нм ртутным разрядом достаточно хорошо изучена, поскольку в последние 15 лет такие источники применяются в системах обеззараживания воды, однако, закономерности генерации излучения с длиной волны 185 нм ртутным разрядом низкого давления изучены недостаточно хорошо, в особенности при низких давлениях буферного газа, менее 1 Торр, более благоприятных для генерации высокоэнергетичных квантов излучения с длиной волны 185 нм. Переход к более низким

давлениям буферного газа и 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 поиск способов увеличения физического и полезного срока службы таких источников УФ излучения является важной технической задачей для широкого круга применений. Результаты диссертационной работы Левченко В.А. могут послужить основой для разработки новых мощных и эффективных амальгамных газоразрядных ламп низкого давления, предназначенных для генерации ВУФ излучения.

Диссертация состоит из введения, четырёх глав, заключения, списка литературы. Работа содержит 127 страниц, 70 рисунков, 6 таблиц. Список использованной литературы включает 117 наименований.

Во введении автор определяет объект и цели исследования, обосновывает актуальность работы и приводит основные положения, вынесенные на защиту.

В первой главе проведён анализ литературы, посвященной генерации УФ и ВУФ излучения ртутным разрядом низкого давления. Описываются физические принципы генерации УФ и ВУФ излучения электрическим разрядом в смеси паров ртути и инертного газа, указываются параметры, влияющие на эффективность генерации УФ и ВУФ излучения ртутным разрядом низкого давления, проведен математических моделей, описывающих электрический разряд в смеси паров ртути и инертного газа. Приводится обзор источников УФ и ВУФ излучения, указываются основные проблемы практического характера в сфере применения и разработки новых источников.

Во второй главе диссертации изложена замкнутая математическая модель электрического разряда в смеси паров ртути и инертных газов. Данная модель позволяет предсказывать выход резонансного излучения на длинах волн 185 и 254 нм для различных по составу буферных смесей неон-аргон в диапазоне рабочих давлений смеси 0,1 – 2 Торр, при высоких удельных плотностях тока. К основным особенностям модели стоит отнести возможность моделирования разряда в парах ртути и смесей неон-аргон (ранее - только аргон) и учёт частичного перемешивания по частотам при расчёте переноса резонансного излучения с длиной волны 185 нм.

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

В четвёртой главе приводятся результаты экспериментальных измерений параметров ртутного разряда низкого давления при различных условиях, приводится сравнение экспериментальных и расчетных данных и их обсуждение. Последний параграф четвёртой 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 сформулированы основные результаты и выводы, полученные при подготовке диссертационной работы.

В диссертационной работе Левченко В.А. получены зависимости 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. 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. 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. 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. 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.

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, что позволит создать более мощные и более эффективные источники ВУФ излучения 185 нм. 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.

Результаты работы могут быть использованы в научных и научно-образовательных центрах, а также в организациях, изготавливающих источники УФ излучения, в частности, в Объединенном институте высоких температур РАН, в Санкт-Петербургском, Мордовском, Петрозаводском и

Дагестанском государственных университетах, Институте нефтехимического синтеза им. А. В. Топчиева РАН, Институте Общей физики им. А. М. Прохорова РАН, Физико-энергетическом институте им. А. И. Лейпунского, Московском физико-техническом институте, НИЦ "Курчатовский институт", ОАО «ЛИТ-ФОНОН», НПО ЛИТ.

Основные результаты и выводы диссертации являются достоверными и обоснованными, что подтверждается использованием современного исследовательского оборудования и приборов, тщательностью проведения экспериментов и учета погрешностей, согласием с имеющимися экспериментальными данными других авторов, опорой на современные физические представления. Результаты численного моделирования находятся в хорошем согласии с экспериментальными результатами.

Диссертационная работа Левченко Владимира Александровича «Генерация ультрафиолетового излучения ртутным разрядом с высокой плотностью тока при низких давлениях» представляет собой законченное научное исследование, выполненное по актуальной тематике на высоком экспериментальном и теоретическом уровне.

По диссертации имеются следующие замечания:

1. Отличие КПД генерации УФ излучения индукционным разрядом по сравнению с дуговым могут быть следствием не только более высокой частотой индукционного разряда, но и некоторыми различиями в схеме измерения мощности УФ излучения ламп, а также различной геометрией ламп.

2. Для найденных новых защитных покрытий смешанного состава проведены исследования их эффективности по отношению к излучению с длиной волны 254 нм, однако не проведено измерений пропускания этими покрытиями излучения с длиной волны 185 нм.

3. Автор получил экспериментальные данные о мощности, рассеиваемой в приэлектродных зонах, но не провел анализ ее влияния на ресурс электродного узла.

4. На с. 86 сказано, 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». Однако в работе не указаны полученные коэффициенты экспоненциальной аппроксимации. Вместе с тем, эти коэффициенты могут представлять самостоятельный интерес для анализа приэлектродных процессов.

Приведенные выше замечания не снижают общей высокой оценки работы, не влияют на сделанные выводы и на положения, выносимые на защиту.

Результаты диссертационной работы опубликованы в открытой печати, обсуждались на конференциях и симпозиумах. По теме диссертации опубликовано 26 работ, из которых 11 - в ведущих рецензируемых журналах, входящих в перечень ВАК РФ. Результаты исследований были доложены на

12 российских и международных конференциях.

Автореферат соответствует основному содержанию диссертации.

В целом диссертационная работа «Генерация ультрафиолетового излучения ртутным разрядом с высокой плотностью тока при низких давлениях» выполнена на высоком научном уровне, по объему выполненных исследований, установленным закономерностям, новизне и значимости основных положений, выносимых на защиту, удовлетворяет всем требованиям ВАК, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук (включая п. 9 «Положения о порядке присуждения ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации №842 от 24.09.2013 года), а ее автор Левченко Владимир Александрович заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.08 - «Физика плазмы».

Диссертационная работа Левченко В.А. и отзыв на эту работу рассмотрены и одобрены на научном семинаре кафедры физической электроники физического факультета Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова (протокол №1 от 09.11.2016 г.) результаты голосования-единогласно.

И.О. Заведующего кафедрой физической электроники

д.ф.-м.н., профессор



В. С. Черныш

Учёный секретарь кафедры физической электроники

д.ф.-м.н., доцент



С. А. Двинин

МГУ, 1. Стр.2, ГСП-2, Ленинские горы, Москва, 119991,  
каф. физической электроники, 495 9391787, bychvl@gmail.com