

На правах рукописи

СОБУР ДЕНИС АНАТОЛЬЕВИЧ

**ИССЛЕДОВАНИЕ ГЕНЕРАЦИИ ВАКУУМНОГО  
УЛЬТРАФИОЛЕТОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ РТУТНЫМ РАЗРЯДОМ  
НИЗКОГО ДАВЛЕНИЯ**

01.04.08 – физика плазмы

Автореферат диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Москва – 2011

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Московский физико-технический институт (государственный университет)».

Научный руководитель: доктор физико-математических наук  
Сасоров Павел Васильевич

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук  
Рагозин Евгений Николаевич

кандидат физико-математических наук  
Попов Олег Алексеевич

Ведущая организация: Государственный научный центр Российской Федерации Троицкий институт инновационных и термоядерных исследований.

Защита состоится « \_\_ » декабря 2011 года в \_\_\_ часов на заседании диссертационного совета Д 212.156.03 при Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Московский физико-технический институт (государственный университет)» по адресу: 141700, Московская обл., г. Долгопрудный, Институтский переулок, д. 9.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МФТИ.

Автореферат разослан « \_\_\_\_ » ноября 2011 года.

Ученый секретарь диссертационного совета,  
кандидат физико-математических наук

\_\_\_\_\_ Арсенин А.В.

## Общая характеристика работы

### Актуальность темы

Источники ультрафиолетового (УФ) излучения применяются для обеззараживания различных сред, в медицине, для обработки поверхностей, для полимеризации лаков и красок, в фотохимии, микроэлектронике, в системах диагностики и множестве других областей. Наибольший интерес представляют ртутные газоразрядные лампы низкого давления, имеющие высокую мощность, высокий КПД преобразования электрической энергии в УФ излучение (35–45%) и большой ресурс. В таких источниках оптимальное давление паров ртути составляет 0,5–1,5 Па, а давление газовой смеси (как правило, неон-аргон) - несколько сотен Па. В лампах с мощностью УФ излучения более 0,5 Вт/см вместо металлической ртути используют амальгаму, позволяющую поддерживать оптимальное давление паров ртути при высоких температурах.

Спектр ртутного разряда содержит две интенсивные резонансные УФ линии 253,65 и 184,95 нм, что соответствует областям УФ-С и вакуумного УФ (ВУФ) излучения. Сегодня растет интерес к использованию ВУФ излучения ртутного разряда, особенно в сочетании с излучением линии 254 нм. В частности, сочетание излучения с длинами волн 254 и 185 нм возможно эффективно использовать в задачах фотохимической очистки воздуха.

Амальгамные газоразрядные источники УФ излучения разрабатывались для систем обеззараживания, поэтому была подробно исследована генерация бактерицидной линии 254 нм. В то же время, генерация линии 185 нм практически не изучалась, особенно экспериментально. Таким образом, в настоящее время в литературе практически отсутствуют данные по генерации ВУФ излучения плазмой ртутного разряда низкого давления, особенно при использовании в качестве буферной среды смеси инертных газов. Кроме того, с распространением электронных источников питания, возрос интерес к генерации излучения плазмой ртутного разряда при частотах в несколько десятков кГц.

## **Цели и задачи работы**

**Целью данной работы** было экспериментальное исследование генерации ВУФ излучения резонансной линии ртути (185 нм) в разряде низкого давления при использовании различных смесей инертных газов в области плотностей разрядных токов до  $2 \text{ А/см}^2$  с частотой в несколько десятков кГц.

Для достижения данной цели необходимо было решить следующие **задачи**:

1. Выбрать методику измерений и создать экспериментальный стенд, позволяющий измерять мощность излучения резонансных линий ртутного разряда (185 и 254 нм) и электрические характеристики разряда в режиме реального времени.
2. Экспериментально исследовать зависимость генерации ВУФ излучения (185 нм) ртутного разряда в присутствии смеси инертных газов от давления паров ртути, силы разрядного тока, давления и состава смеси инертных газов для различных параметров разряда.
3. Сравнить полученные экспериментальные результаты с теоретическими расчетами.
4. Исследовать спектры пропускания оксидных покрытий предназначенных для защиты разрядной колбы от воздействия ионов ртути.

## **Научная новизна**

1. Экспериментально исследована зависимость мощности и КПД генерации ВУФ излучения плазмы ртутного разряда низкого давления в присутствии смеси инертных газов от давления паров ртути.
2. Впервые исследована зависимость мощности излучения линии 185 нм от давления паров ртути. Показано, что зависимость при определенных условиях имеет два максимума. Данный тип зависимости наблюдался при давлениях смеси Ne-Ar менее 2 торр и плотностях разрядного тока от 0,2 до  $1,5 \text{ А/см}^2$ . При повышении давления буферного газа свыше 2 торр первый максимум размывается.

3. Экспериментально определена зависимость мощности и КПД генерации ВУФ излучения плазмы ртутного разряда низкого давления в присутствии смеси инертных газов (Ne-Ar) от силы тока разряда в диапазоне от 0,2 до 2 А/см<sup>2</sup>.
4. Экспериментально исследовано влияние давления смеси инертных газов (Ne-Ar) на выход резонансной линии 185 нм в области давлений от 0,3 до 4 торр. Показано, что в области давлений буферной смеси Ne-Ar от 1 до 2 торр мощность и КПД излучения линии 185 нм слабо зависит от давления буферного газа.
5. Впервые исследована зависимость мощности и КПД ВУФ излучения от процентного состава смеси инертных газов (Ne-Ar). Впервые показано, что незначительное добавление аргона (порядка 1%) к чистому неону позволяет существенно (на 20%) повысить мощность излучения линии 185 нм без уменьшения КПД.

#### **Основные положения, выносимые на защиту**

1. Метод измерения мощности ВУФ и УФ излучения, а также электрических параметров ртутного разряда низкого давления в режиме реального времени.
2. Зависимость мощности и КПД генерации линий 185 и 254 нм от давления паров ртути в разряде низкого давления в присутствии смеси инертных газов (Ne-Ar). Сложный характер данной зависимости для линии 185 нм при давлениях смеси менее 2 торр. Значительный (примерно в 1,5 раза) рост КПД генерации линии 185 нм с ростом давления паров ртути за счет падения выхода линии 254 нм вследствие эффекта «пленения» и релаксации возбуждений уровня ртути  $6^3P_1$  соударениями II рода.
3. Зависимость мощности и КПД генерации излучения резонансных уровней ртути ( $6^1P_1$  и  $6^3P_1$ ) от плотности разрядного тока с частотой в несколько десятков кГц.
4. Влияние на мощность и КПД генерации линий 185 и 254 нм давления и процентного состава смеси инертных газов (Ne-Ar). Слабая зависимость

мощности и КПД генерации линий 185 нм от давления смеси в области давлений 1-2 торр. Повышение эффективности при переходе от чистого неона к смеси неон-аргон с небольшим содержанием последнего (99/1%).

5. Коэффициенты пропускания излучения с длиной волны 185 нм для различных тонких оксидных пленок ( $Y_2O_3$ ,  $Yb_2O_3$ ,  $Al_2O_3$ ), а также для нанокристаллического порошкового покрытия из  $Al_2O_3$ .

### **Достоверность научных положений.**

Научные положения, выводы и рекомендации, сформулированные в диссертации, обоснованы теоретическими решениями и экспериментальными данными, полученными в работе, базируются на строго доказанных выводах, согласуются с известными результатами других авторов. Достоверность измерений на созданном экспериментальном стенде подтверждается сравнительными измерениями в лаборатории компании Philips (г. Тенаут, Бельгия) и результатами измерений мощности и КПД генерации линии 185 нм амальгамных ламп низкого давления компании Heraeus Noblelight.

### **Практическая и научная ценность результатов**

Научная и практическая ценность полученных результатов заключается в получении экспериментальных данных по генерации ВУФ излучения плазмой ртутного разряда низкого давления в присутствии смеси инертных газов. Полученные результаты могут использоваться при разработке газоразрядных источников ВУФ излучения. Экспериментальные данные позволяют подбирать параметры ртутного разряда для достижения желаемых параметров источника. Кроме того, полученные экспериментальные результаты могут использоваться для уточнения компьютерных программ для математического моделирования ртутного разряда низкого давления, в том числе и для расчета люминесцентных ламп. Результаты исследований также могут использоваться для оценки нагрузки ВУФ излучения на люминофор газоразрядных источников света.

### **Личный вклад автора.**

Экспериментальные результаты, описанные в работе, получены автором самостоятельно. Численные расчеты выполнены автором самостоятельно с использованием готовой вычислительной программы.

### **Апробация работы**

Основные результаты диссертации докладывались на научных семинарах в ГНЦ РФ ИТЭФ, ЗАО «Лаборатория импульсной техники», на следующих международных и всероссийских конференциях:

International Ultraviolet Association World Congress (France, Paris, - 2011)

XXXVII, XXXVIII Международные конференции по физике плазмы и УТС (Звенигород, - 2010, 2011 гг.)

VIII Международный Симпозиум по радиационной плазмодинамике РПД–2009 (Москва, МГТУ им. Баумана)

XVI, XVII Международные конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Ломоносов» (Москва, МГУ - 2009, 2010 гг.)

V, VI Всероссийские конференции «Физическая Электроника» (Махачкала, - 2008, 2010 гг.)

XVI Всероссийская научная конференция студентов физиков, аспирантов и молодых ученых ВНКСФ (Волгоград, - 2010)

V, VI, VII Российские ежегодные конференции молодых научных сотрудников и аспирантов (Москва, Институт Металлургии и Материаловедения им. Байкова РАН - 2008, 2009, 2010 гг.)

IX Научно-техническая конференция «Молодежь в науке» (Саров, РФЯЦ ВНИИЭФ, - 2010)

L-, LI-, LII-, LIII научные конференции МФТИ (Долгопрудный, - 2007, 2008, 2009, 2010 гг.)

На основании результатов работы была разработана серия опытных образцов газоразрядных источников ВУФ излучения в компании ЗАО «Лаборатория импульсной техники» (г. Москва).

## Список основных публикаций

По результатам работы опубликовано 16 печатных работ, из которых 5 опубликованы в рецензируемых научных журналах [1-5], 6 в сборниках материалов международных и всероссийских научных конференций [8-13]. Получено 2 патента [6, 7].

## Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, 3 глав и заключения. Работа изложена на 125 страницах текста, содержит 58 рисунков, 4 таблицы. Список литературы насчитывает 89 наименований.

Первая глава содержит литературный обзор, посвященный генерации УФ излучения ртутным разрядом низкого давления. Приводится обзор истории развития источников УФ излучения на основе плазмы ртутного разряда и соответствующих математических моделей. Описываются основы теории плазмы ртутного разряда низкого давления. Рассматривается влияние различных параметров на эффективность генерации УФ излучения разрядом в парах ртути. Излагаются данные по использованию амальгамы для поддержания оптимального давления паров ртути. Особое внимание уделяется генерации ВУФ излучения ртутной плазмой низкого давления. Приводится классификация типов УФ излучения, а также данные по фотохимическому взаимодействию ВУФ излучения с кислородом воздуха и озоном.

В обзоре литературы показано, что ртутный разряд низкого давления в присутствии инертного газа (смеси газов) является эффективным источником УФ излучения. В таких источниках оптимальное давление паров ртути составляет 0,5–1,5 Па, а давление газовой смеси (как правило неон-аргон) – несколько сотен Па. Погонная мощность УФ излучения для ртутных ламп составляет 0,2 – 0,5 Вт/см. В лампах с мощностью УФ излучения более 0,5 Вт/см вместо металлической ртути используют амальгаму, позволяющую поддерживать оптимальное давление паров ртути при высоких температурах, характерных для мощных ламп.



Приводится математическая модель описывающая плазму ртутного разряда низкого давления. Показано, что состояние разрядной плазмы описывается следующими уравнениями:

Уравнение связывающее плотность тока  $j$  с градиентом потенциала  $E$ , подвижностью электронов  $\mu_e$  и их концентрацией  $n_e$ :

$$j(r,t) = en_e(r,t)\mu_e(r,t)E(r,t) \quad (1)$$

Уравнение баланса ионизации и рекомбинации атомов ртути

$$\frac{\partial n_e}{\partial t} = \nabla(D_a \nabla n_e) + n_e \sum_{n=0}^{ion-1} \alpha'_{n,ion} n_n, \text{ где } D_a \approx \frac{\mu_i k T_e}{e} \quad (2)$$

$\mu_i$  – подвижность ионов,  $D_a$  – коэффициент диффузии атомов,  $\alpha'_{ij}$  – 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): аналогично  $\beta'_{ij}$  число соударений II рода;  $ion$  – номер уровня ионизации. Граничное условие:

$$\nabla n_e|_{r=0} = 0, \quad -D_a \nabla n_e|_{r=R} = \frac{n_e(R) \langle v_i \rangle}{a}, \text{ где } \langle v_i \rangle = \sqrt{\frac{8kT_i}{\pi M_i}} \quad (3)$$

где  $R$  - радиус разрядной трубки,  $\langle v_i \rangle$  - средняя скорость ионов вблизи стенки,  $a$  – коэффициент, лежащий в диапазоне 2-4 в зависимости от типа усреднения.

Закон сохранения энергии. В обобщенном виде:

$$\eta_{рез} + \eta_{нр} + \eta_V + \eta_{тр} = 1 \quad (4)$$

где  $\eta_{рез}$  – доля излучения резонансных линий;  $\eta_{нр}$  - доля излучения нерезонансных линий;  $\eta_V$  – доля тепловых потерь в объеме газа,  $\eta_{тр}$  – доля тепловых потерь на стенках трубки. Также это уравнение можно записать в пересчете на один электрон:

$$n_e \frac{\partial \langle \epsilon_e \rangle}{\partial t} = jE - n_e \omega_{e\Sigma} \quad (5)$$

где  $\langle \varepsilon_e \rangle$  – средняя энергия одного электрона,  $\omega_{e\Sigma}$  – средняя суммарная мощность потерь энергии электронным газом на все виды упругих и неупругих потерь в расчете на один электрон.

Уравнение баланса возбуждения и релаксации метастабильных уровней атома ртути:

$$\begin{aligned} \frac{\partial n_m}{\partial t} = & n_e \sum_{n=0}^{m-1} \alpha_{nm} n_n + n_e \sum_{v=m+1}^{ion-1} \beta_{vm} n_v + \sum_{v=m+1}^{ion-1} n_v A_{vm} - \\ & - n_e \sum_{v=m+1}^{ion} \alpha_{mv} n_m - n_e \sum_{n=0}^{m-1} \beta_{mn} n_m - \sum_{v=m+1}^{ion-1} \Delta N_{mv} + \nabla(D_m \nabla n_m) \end{aligned} \quad (6)$$

где  $n_i$  – концентрация атомов на уровне  $i$ ;  $N_{ij}$  – число переходов с уровня  $i$  на уровень  $j$  в результате поглощения фотонов в единице объема в единицу времени.  $A_{ij}$  – вероятность спонтанного излучения с уровня  $j$  на уровень  $i$ . В уравнении (6) индекс « $n$ » соответствует уровню, лежащему ниже « $m$ », « $v$ » – выше. Последний член уравнения учитывает диффузию метастабильных атомов к стенкам колбы.

В обзоре сделан вывод, что в литературе представлено много работ посвященных генерации бактерицидной резонансной линии ртути 254 нм. Однако генерация ВУФ излучения (линия 185 нм) исследована достаточно мало, особенно для случая использования смеси инертных газов.

Также в первой главе описывается влияние параметров источника на интенсивность и КПД генерации ВУФ излучения газового разряда. Основным из них является электронная температура плазмы разряда. Ее значение зависит от ряда параметров, таких как геометрические размеры источника, давление паров ртути в разряде, давление и состав инертного газа (смеси газов), сила и частота разрядного тока. Таким образом, показана актуальность проведения экспериментального исследования зависимости интенсивности и КПД генерации ВУФ излучения с длиной волны 185 нм от параметров разряда в диапазоне значений характерном для амальгамных ламп низкого давления.

**Вторая глава диссертации** посвящена описанию экспериментальной и расчетной части работы. Приводится математическая модель ртутного столба низкого давления в парах инертного газа использованная в работе. Описывается расчетная программа на языке MatLab, разработанная аспирантом МЭИ (ТУ) Свитневым С.А. использованная для расчетов в данной работе. Вычисления по данной программе проводятся в несколько этапов. Сначала находится функция распределения электронов по энергиям, для чего решается в локальном приближении кинетическое уравнение Больцмана:

$$\frac{\partial f_e}{\partial t} + \vec{v} \cdot \nabla_r f_e + \frac{\vec{F}}{m_e} \cdot \nabla_v f_e = \left. \frac{\delta f_e}{\delta t} \right|_{coll} \quad (7)$$

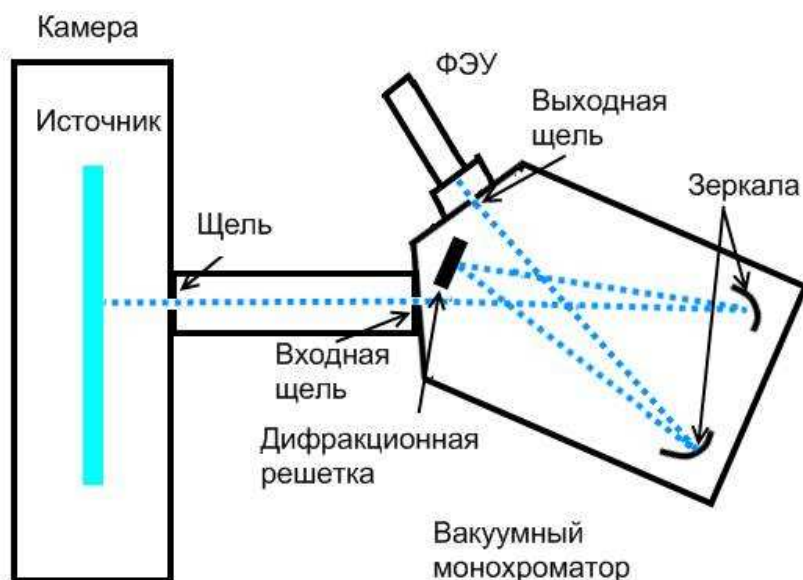
При решении уравнения (7) учитываются следующие взаимодействия:

- а) упругие соударения электронов с атомами ртути;
- б) неупругие соударения с атомами ртути I и II рода. При этом учитываются переходы между основным уровнем  $6^1S_0$  и уровнями  $6^3P_{0,1,2}$ ,  $6^1P_{0,1}$ ,  $7^3S_1$  и  $6^3D_{1,2,3}$ . Переходы между возбужденными уровнями атомов ртути не учитываются.
- в) упругие соударения электронов с атомами буферного газа и ионами ртути;
- г) электрон-электронные соударения.

После этого, с использованием полученной функции распределения, находится концентрация возбужденных атомов ртути. Наконец рассчитывается мощность излучения резонансных линий ртути 185 и 254 нм. Вычисления осуществляются в приближении отсутствия рекомбинации в объеме плазмы. Также не учитывается обмен энергии между атомами ртути и инертным газом. Функция распределения электронов по энергии вычисляется в локальном приближении. При расчете концентрации возбужденных атомов учитывались взаимные переходы между уровнями  $6^1S_0$ ,  $6^3P_{0,1,2}$ ,  $6^1P_{0,1}$ ,  $7^3S_1$  и  $6^3D_{1,2,3}$ , а также ионизация с данных уровней. Также учитывалась величина диффузионного потока возбужденных до метастабильных состояний атомов ртути на стенку.

В качестве параметров необходимых для расчета выхода резонансного излучения используются сила тока разряда I, градиент потенциала E, давление

паров ртути и аргона в разряде и радиус разрядной трубки. В принципе, задание и силы тока и градиента потенциала является излишним и для решения задачи достаточно задать лишь один из данных параметров. Однако в целях обеспечения необходимой скорости вычислений задавались оба параметра.

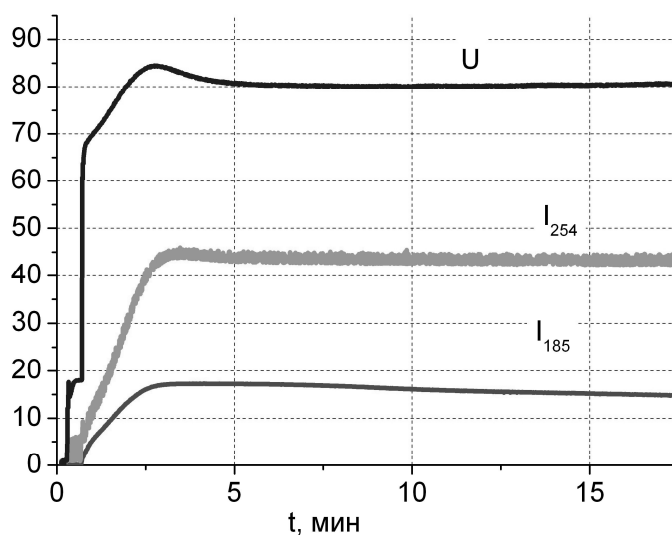


*Рис. 1 Схема измерения ВУФ излучения разряда*

**Во втором параграфе** рассказывается о выбранной методике измерения параметров разряда. Приводятся, как возможные варианты, методика Кайца и методика, используемая в компании ЗАО «ЛИТ» для измерения мощности УФ излучения. Описывается экспериментальный стенд на основе вакуумного монохроматора McPheson, созданный в рамках диссертационной работы (Рис. 1). Данный стенд позволяет измерять в режиме реального времени мощность излучения резонансных линий ртути и электрические параметры разряда. Для измерения энергетической яркости ВУФ излучения используется фотоэлектронный умножитель (ФЭУ) PMT 658-1 (Hamamatsu R6095).

Описывается экспериментальная камера, представляющая собой металлический цилиндр, в которую помещался исследуемый источник ВУФ излучения. Для обеспечения теплового режима работы источника камера заполнялась азотом, оптически прозрачным в этой области. Данная камера подсоединялась к монохроматору при помощи металлического патрубка, в котором была расположена щель шириной 3 мм и высотой 15 мм,

выполняющая функцию полевой диафрагмы. Роль апертурной диафрагмы играла входная щель монохроматора (300 мкм). Дифракционная решетка монохроматора изготовлена из алюминия (1200 шт/мм). Для измерения излучения линии 254 нм использовался фотодиодный датчик SUV 20.1. Калибровка осуществлялась с помощью эталонного источника, откалиброванного в лаборатории компании Phillips (Бельгия). Относительная погрешность измерений мощности ВУФ излучения на данном стенде составила около 4%, а абсолютная 10-15%. Отмечается, что для сравнительного анализа источников при исследованиях, важна в первую очередь относительная погрешность.

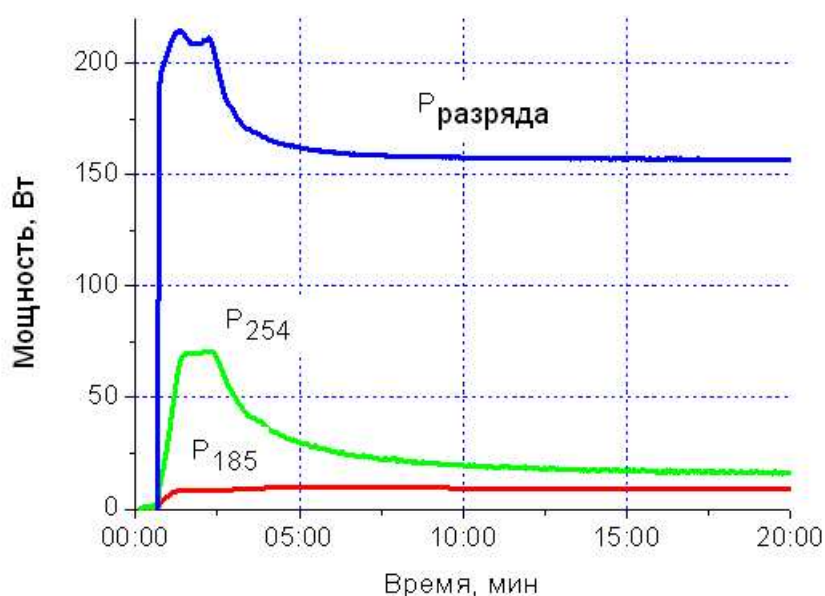


*Рис. 2. Зависимость напряжения на лампе  $U$  и интенсивности излучения линий 185 нм  $I_{185}$  и 254 нм  $I_{254}$  (относительных единиц) от времени  $t$  (мин).  
Наполнение Ar,  $P = 1$  торр,  $I = 1,6$  А*

Далее в работе отмечается, что в качестве стабилизированных источников тока использовались серийные электронные пускорегулирующие аппараты (ЭПРА) с частотой тока 30-70 кГц. Электрические параметры разряда измерялись с помощью анализатора мощности YOKOGAWA PZ4000. Погрешность данных измерений не превышает 2%.

После этого рассказывается об использованном методе изучения зависимости параметров разряда от давления паров ртути ( $P_{Hg}$ ). Указывается, что  $P_{Hg}$  определяется температурой амальгамы, прогрев которой занимает около 7-15 минут. Поясняется, что при этом квазистационарное давление паров ртути

в объеме разряда устанавливается значительно быстрее. Мы приходим к выводу, что в таком случае, измеряя динамику изменения мощности излучения и напряжения на лампе, мы можем наблюдать зависимость параметров разряда от давления паров ртути (Рис. 2). Это в значительной мере упрощает проведение экспериментов по определению оптимального значения давления паров. Указывается, что давления паров ртути, которые оптимальны для генерации линий 254 нм и 185 нм в общем случае различаются. Отмечается, что при обработке результатов фиксировались параметры, соответствующие как максимумам мощности излучения линий 185 нм, так и 254 нм.

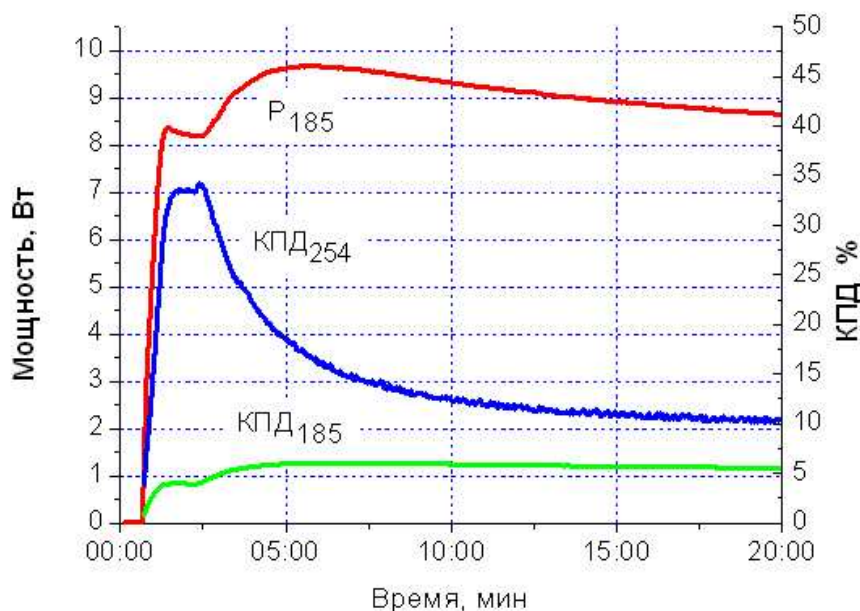


*Рис. 3 Динамика изменения энергетического баланса разряда при прогреве источника. Наполнение Ne-Ar (60/40), P = 0,8 торр, j<sub>ср</sub> = 1,5 А/см<sup>2</sup> (I = 3,2 А).*

Далее речь идет об использованной методике измерения коэффициента пропускания защитным покрытием колбы излучения резонансных линий ртути. Измерения проводились как с помощью спектрофотометра Varian Carry 50, так и непосредственно, сравнением мощности излучения источников с различными защитными покрытиями.

В работе говорится, что было изготовлено несколько серий амальгамных ламп и приводятся их параметры. В различных сериях использовались разные давления и составы буферного газа в разряде. Также для разрядной трубки

использовались различные кварцевые стекла и разные защитные покрытия. С помощью данных источников исследовалась зависимость мощности и КПД генерации ВУФ и УФ излучения (линии 185 и 254 нм соответственно) ртутным разрядном низкого давления в атмосфере буферного газа (смеси газов).



*Рис. 4 Динамика изменения мощности излучения линии 185 нм ( $\Phi_{185}$ ) и КПД генерации УФ излучения (КПД<sub>185</sub> и КПД<sub>254</sub>). Наполнение Ne-Ar (60/40),  $P = 0,8$  торр,  $j_{cp} = 1,5$  А/см<sup>2</sup> ( $I = 3,2$  А).*

**В третьей главе** речь идет о результатах исследования влияния параметров разряда на мощность и КПД генерации ВУФ излучения. В первом параграфе анализируется влияние на генерацию УФ излучения давления паров ртути в разряде. Особое внимание уделяется изучению разряда при сравнительно больших плотностях тока (средняя плотность тока 1,5 А/см<sup>2</sup>). Приводятся примеры такой зависимости (Рис. 3). Показывается, что зависимость мощности линии 185 нм от давления имеет сложный характер. Сначала выход линии монотонно возрастает, достигая максимума, аналогично поведению мощности линии 254 нм. Однако при дальнейшем нагреве амальгамы выход линии 254 нм продолжает падать, а выход линии 185 нм начинает возрастать, достигая второго максимума. Мощность, потребляемая источником, при этом падает на величину близкую к величине падения потока мощности линии 254 нм. Таким образом, КПД генерации линии 185 нм

источником за счет этого вырастает приблизительно в 1,5 раза, а КПД генерации линии 254 нм падает в 1,5-2 раза (Рис. 4).

Далее показывается, что максимумы интенсивности линий 185 и 254 нм достигаются при значительно различающихся давлениях паров ртути. Данный эффект объясняется тем, что время жизни возбужденного состояния  $6^1P_1$ , с которого испускается квант 185 нм, на два порядка меньше времени жизни состояния  $6^3P_1$ . С ростом давления паров ртути увеличивается оптическая плотность плазмы и растет роль релаксации возбуждения за счет ударов II рода и, как следствие, падает выход излучения из разряда. Для квантов 185 нм эффект пленения также играет роль, но, за счет малого времени жизни, удары II рода начинают играть роль при существенно бóльших давлениях паров ртути.

Насколько нам известно, данный эффект наблюдается впервые. Данный эффект имеет огромную важность для создания газоразрядных источников ВУФ излучения. За счет повышения давления паров ртути в разряде возможно существенное (в 1,5 раза) повышение КПД генерации ВУФ - излучения. В работе отмечается, что данная сложная зависимость наблюдается при токах в диапазоне от 0,4 до 1,5 А/см<sup>2</sup> (0,9 – 3,2 А) для ламп работающих на смеси Ne-Ar (60/40 и 85/15) при давлениях буферного газа от 1 до 2 торр. Кроме того, отмечается, что данная зависимость принимает интересный характер в атмосфере чистого неона. В этом случае первый максимум имеет более высокую мощность излучения линии 185 нм. Второй максимум является слабовыраженным, однако за счет резкого падения выхода линии 254 нм КПД генерации ВУФ излучения возрастает почти в 1,5 раза.

В работе допускается, что данный эффект может быть связан с нелокальностью функции распределения электронов. В условиях разряда, расстояние релаксации энергии электронов сравнимо с диаметром разрядной трубки, что делает ее достаточно чувствительной к изменению давления буферного газа. Для удобства в работе данные максимумы обозначены как «низкотемпературный» и «высокотемпературный» по температуре амальгамы.



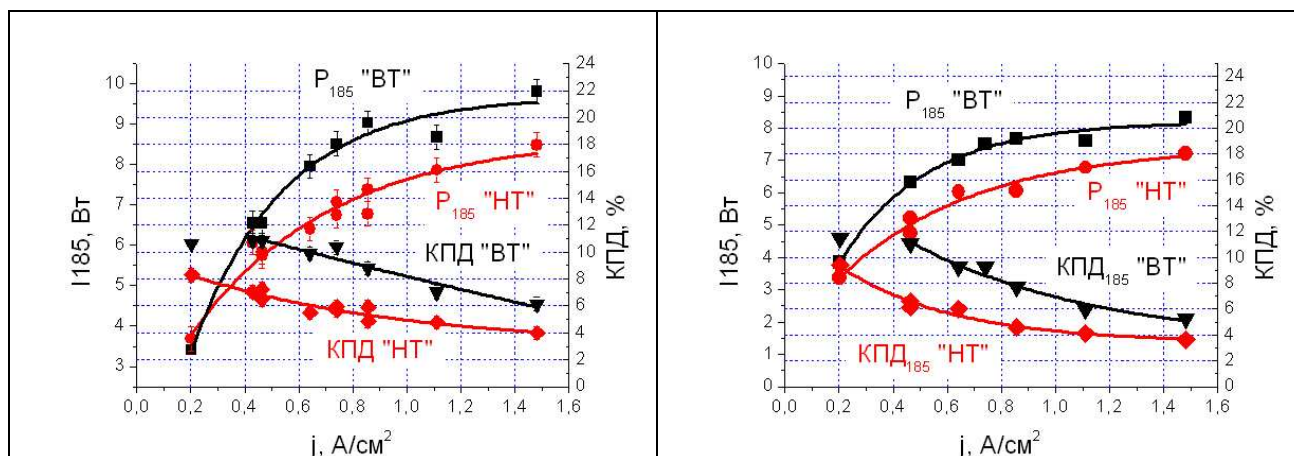
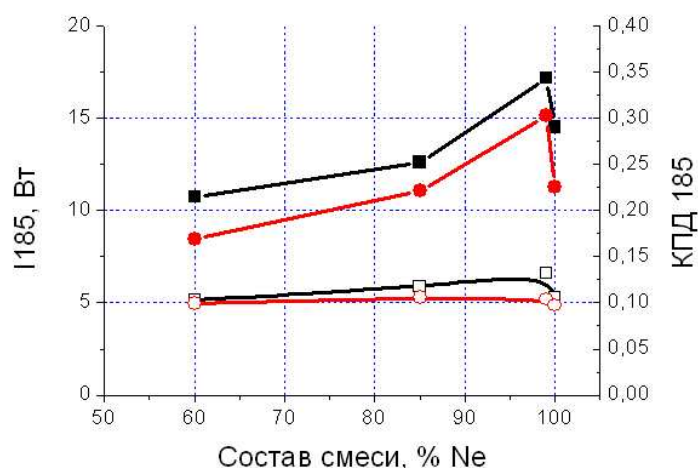


Рис. 5 Зависимость мощности и КПД генерации линии 185 нм от плотности разрядного тока.. Черный – высокотемпературный максимум ( $\Phi_{185}$  – квадраты,  $\eta_{185}$  – треугольники); серый – низкотемпературный ( $\Phi_{185}$  – круги,  $\eta_{185}$  – ромбы). Ne-Ar (60/40). Слева  $P_{\text{смеси}} = 0,8$  торр, справа – 1,2 торр.

**Во втором параграфе** рассматривается влияние силы разрядного тока. Исследуются плотности тока в диапазоне от 0,2 до 1,5 А/см<sup>2</sup>. Указывается, что с ростом тока потребляемая электрическая мощность возрастает за счет роста потерь на упругие соударения и нагрев, а мощность излучения постепенно приходит в насыщение. Приводятся зависимости величины мощности излучения линий 185 и 254 нм и напряжения на источнике излучения от плотности тока разряда. Выход излучения обеих резонансных линий, как и ожидалось, растет с ростом силы тока, постепенно достигая насыщения около 1 А/см<sup>2</sup>. Делается вывод, о нецелесообразности использования бóльших плотностей тока. Приводятся зависимости КПД генерации линии 185 нм для «высокотемпературного» и «низкотемпературного» максимумов от плотности тока (Рис. 5). Дается объяснение данного характера зависимости.

**Третий параграф** описывает зависимость разряда от давления смеси инертных газов. Показывается, что при токах в области менее 1 А/см<sup>2</sup> мощность и КПД генерации линии 185 нм достаточно слабо зависит от давления смеси Ne-Ar (60/40). Повышение давления в два раза (от 1 до 2 торр) не приводит к существенному изменению мощности или КПД генерации линии 185 нм. Отмечается, что при понижении давления буферного газа ниже 1 торр, мощность излучения линии 185 нм начинает быстро возрастать. КПД при этом или растет или не изменяется, в зависимости от параметров.



*Рис. 6 Зависимость мощности и КПД генерации ВУФ излучения (185 нм) ртутным разрядом от процентного состава буферной смеси инертных газов (Ne-Ar). при давлениях 1 торр (черный) и 2 торр (серый). Залитые квадраты и круги – I185, полые – КПД185. Низкотемпературный максимум.*

**Четвертый параграф** посвящен исследованию влияния состава смеси инертных газов на генерацию ВУФ излучения. В работе исследуются неон, аргон и их смеси с различным процентным составом. Отмечается, что увеличение процентного содержания неона в составе смеси приводит к уменьшению молярной массы газа и росту скорости диффузии атомов ртути к стенкам разрядной трубки. За счет этого повышается электронная температура и растет мощность излучения (Рис. 6).

Указывается, что были получены интересные результаты при использовании смеси газов неон – аргон с незначительным содержанием последнего (1%). Оказалось, что в этом случае существенно (на 20%) возрастает мощность ВУФ излучения. При этом подчеркивается, что мощность возрастает как по сравнению с чистым неоном, так и с более тяжелыми смесями (85/15 и 60/40). При этом КПД генерации ВУФ излучения либо практически не изменяется (давление смеси 2 торр), либо несколько возрастает (1 торр).

Насколько нам известно, данный эффект наблюдается впервые. Использование данного эффекта позволяет повысить поток мощности ВУФ излучения от газоразрядного амальгамного источника. Отмечается, что данный эффект наблюдается как для низкотемпературного максимума, так и для высокотемпературного.

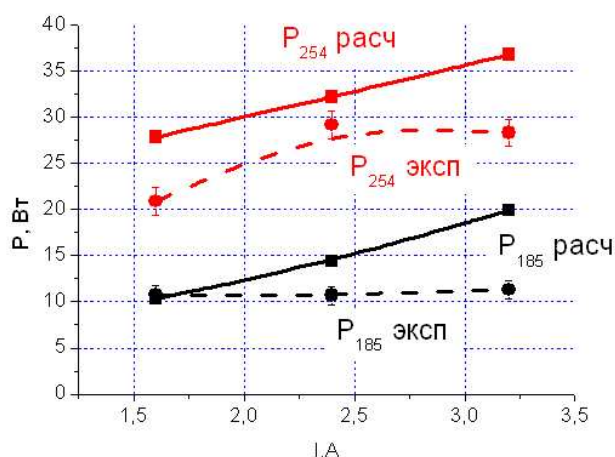


Рис. 7 Зависимость мощности УФ излучения ртутного разряда от силы тока. Черные линии – 185 нм, серые – 254 нм. Квадраты и сплошная линия – расчет, круги и пунктир – эксперимент. Давление Ar 1 торр.

**В пятом параграфе** приводятся результаты экспериментальных расчетов выполненных с помощью программы разработанной в МЭИ (ТУ). Данные результаты сравниваются экспериментальными. Указывается, что при исследовании зависимости мощности излучения от давления паров ртути наблюдается качественное согласие с экспериментом. Однако отмечается, что в расчете не удастся получить сложную зависимость имеющую два максимума, которая была получена в эксперименте.

Приводятся результаты расчета зависимости мощности излучения от силы разрядного тока (Рис. 7). Указывается, что качественно результаты похожи, но абсолютные значения существенно различаются. Для линии 254 нм расчет дает несколько завышенное значение мощности излучения (на 20-30%), что является обычной погрешностью для подобных расчетов. Для линии 185 нм, напротив, расчет дает несколько завышенные значения. Подчеркивается, что в расчете не удастся получить насыщение мощности излучения с ростом тока. Предполагается, что причиной расхождения является невозможность использования в данных условиях разряда некоторых приближений допущенных при разработке расчетной программы. Среди них отмечаются в первую очередь приближение эффективной продолжительности жизни возбужденного атома и использование локального приближения для уравнения

Больцмана. Делается вывод, что доступные в настоящее время используемые расчетные программы имеют невысокую точность и утверждается, что экспериментальное исследование все еще остается наиболее эффективным способом изучения ртутного разряда низкого давления в атмосфере инертных газов.

**Шестой параграф** посвящен исследованию спектров различных защитных покрытий, предназначенных для защиты кварцевой трубки от деструктивного взаимодействия с разрядом. Показывается нецелесообразность использования спектрофотометра для измерения коэффициента пропускания тонких пленок, нанесенных на цилиндрическую поверхность. Утверждается, что оптимальным способом является создание серии источников с различными защитными покрытиями и измерение их параметров. В работе указываются оптимальные покрытия с точки зрения пропускания ВУФ излучения.

**В последнем параграфе** приводятся данные по серии амальгамных источников ВУФ излучения разработанных в компании ЗАО «ЛИТ» (г. Москва) на основе проведенных исследований.

Завершается работа **заключением** в котором приводятся основные выводы и результаты диссертации.

## **Основные результаты и выводы диссертации**

1. Выбрана методика измерения мощности ВУФ излучения. Создан экспериментальный стенд на основе вакуумного монохроматора для измерения мощности излучения резонансных линий ртути (185 и 254 нм). Стенд также позволяет измерять электрические параметры разряда в условиях реального времени.
2. Получены зависимости параметров разряда от давления паров ртути при различных условиях разряда. Впервые показано, что в определенном диапазоне (давление смеси инертных газов 1 – 2 торр) зависимость мощности излучения линии 185 нм от давления паров ртути имеет два максимума. При этом первый максимум может иметь как большую мощность, так и меньшую. При повышении давления инертного газа свыше 2 торр меньший из максимумов

размывается и зависимость принимает классический вид. При переходе к высокотемпературному максимуму выход излучения линии 254 нм существенно падает, что приводит к росту КПД генерации ВУФ излучения (примерно в 1,5 раза).

3. Определена зависимость генерации ВУФ излучения плазмой разряда от силы разрядного тока. Показано, что с ростом тока потребляемая электрическая мощность возрастает, а мощность излучения приходит в насыщение при плотностях токах около  $1 \text{ A/cm}^2$ .

4. Исследовано влияние давления смеси инертных газов на генерацию ВУФ излучения. Показано, что в области давлений инертного газа  $1 \div 2$  торр это влияние достаточно слабое.

5. Изучено влияние состава смеси инертных газов неон-аргон. Показано, что при увеличении процентной доли неона растет мощность излучения обеих резонансных линий ртути (185 и 254 нм). Впервые показано, что использование смеси неона с незначительным количеством Ar (99/1%) позволяет существенно (на 10-20%) увеличить мощность излучения по сравнению с чистым неоном.

6. Произведено сравнение результатов измерений с численными расчетами. Показано качественное согласие между экспериментом и вычислениями. Подтверждено, что в настоящее время погрешность численных расчетов составляет примерно 20-30%.

7. Исследовано пропускание излучения резонансной линии 185 нм различными оксидными покрытиями. Показано, что наилучшие результаты достигаются при использовании пленки из оксида алюминия. Кроме того, хороший коэффициент пропускания достигается при использовании пленок из оксидов иттрия и иттербия.

8. Разработаны опытные образцы газоразрядных источников ВУФ излучения в компании ЗАО «Лаборатория импульсной техники» на основе полученных результатов.

## Список основных публикаций по теме диссертации

1. *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.
2. *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.
3. *Василяк Л.М., Дроздов Л.А., Костюченко С. В., Кудрявцев Н.Н., Собур Д.А., Соколов Д.В.* Генерация вакуумного ультрафиолетового излучения (185 нм) амальгамной лампой низкого давления // Труды МФТИ. – 2010. – Т. 2. – № 3. – С. 66-70.
4. *Васильев А.И., Василяк Л.М., Дриго А.Л., Костюченко С. В., Кудрявцев Н.Н., Сасоров П.В. Соколов Д.В.* Создание нанокристаллических пленок TiO<sub>2</sub> с развитой структурой поверхности для очистки воздуха // «Нанотехника». – 2009. – №2 (18). – С. 44 – 48.
5. *Собур Д.А.* Создание нанокристаллических пленок с развитой структурой поверхности на основе оксида титана. // Перспективные материалы. – 2008. – Специальный выпуск (№ 5). – С. 692-696.
6. *Дроздов Л.А., Костюченко С. В., Кудрявцев Н.Н., Собур Д.А., Соколов Д.В.* Газоразрядная амальгамная лампа низкого давления. Патент на изобретение №2396633 от 08 июля 2009г. Зарегистрирован 10 августа 2010 г.
7. *Кудрявцев Н.Н. Костюченко С.В. Васильев А.И., Соколов Д.В., Дроздов Л.А., Ситников А.С., Собур Д.А., Урбанович В.А., Кожуров В.Н.* Способ зажигания мощной газоразрядной лампы. Патент на изобретение № 2422940 от 22 марта 2010г. Зарегистрирован 27 июня 2011 г.
8. *Sobur D., S. Kostuchenko, D. Sokolov, L. Drozdov, M. Meer, H. Maes, F. Lierop* Method for measuring the UVC-output of low pressure germicidal lamps // Proceedings of IOA IUVA World Congress. – 23-27 May 2011. – France, Paris. – P. 2174 – 2182.
9. *Собур Д.А.* Создание амальгамной лампы низкого давления для генерации озона // Материалы Международного молодежного научного форума «Ломоносов-2010» [Электронный ресурс]. – 2010. – М.: МАКС Пресс.
10. *Васильев А.И., Василяк Л.М., Дриго А.Л., Дроздов Л.А., Костюченко С.В., Кудрявцев Н.Н., Сасоров П.В., Собур Д.А., Соколов Д.В.* Амальгамная лампа низкого давления для генерации озона // Материалы VIII

- Международного Симпозиума по радиационной плазмодинамике РПД – 2009. – 8-11 декабря 2009. – М.: МГТУ им. Баумана. – С. 111-113.
11. *Собур Д.А.* Исследование генерации вакуумного ультрафиолетового излучения (185 нм) амальгамной лампой низкого давления // *Материалы VI Всероссийской конференции по физической электронике ФЭ-2010.* – 23-26 сентября 2010. – Махачкала: ИПЦ ДГУ. – С. 221-225
  12. *Собур Д.А.* Создание амальгамной газоразрядной озоновой лампы // *Сборник материалов XVI Всероссийской научной конференции студентов-физиков, аспирантов и молодых ученых.* 2010. – Волгоград. – С. 268-270.
  13. *Собур Д.А.* Разработка защитного покрытия амальгамной лампы низкого давления для генерации озона // *Материалы VII Российской ежегодной конференции молодых научных сотрудников и аспирантов.* 2010. – М.: ИМЕТ РАН. – С. 331-333.
  14. *Васильев А.И., Василяк Л.М., Дроздов Л.А., Костюченко С.В., Кудрявцев Н.Н., Собур Д.А., Соколов Д.В.* Влияние параметров амальгамной лампы низкого давления на интенсивность генерации вакуумного УФ излучения (185 нм) // *Тезисы докладов XXXVII Международной (Звенигородской) конференции по физике плазмы и УТС.* – 8 -12 февраля 2010. – Звенигород, – С. 168.
  15. *Василяк Л.М., Дроздов Л.А., Костюченко С.В., Кудрявцев Н.Н., Собур Д.А., Соколов Д.В.* Влияние давления разрядной смеси на интенсивность генерации линии 185 нм в амальгамных лампах // *Тезисы докладов XXXVIII Международной (Звенигородской) конференции по физике плазмы и УТС.* – 14-18 февраля 2011. – Звенигород. – С. 221.
  16. *Собур Д.А.* Амальгамная лампа для генерации ВУФ излучения (185 нм) // *Сборник трудов IX научно-технической конференции «Молодежь в науке».* – 26-28 октября 2010. – Саров, – С. 331-335.