

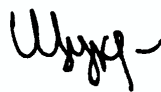
На правах рукописи

Щукин Антон Юрьевич

**СВЧ-разряд в аргон-серной смеси  
в высокоэффективном источнике света  
с малой мощностью питания**

01.04.13 – электрофизика, электрофизические установки.

Автор:



**АВТОРЕФЕРАТ**

**диссертация на соискание ученой степени  
кандидата технических наук**

**Москва 2009**

Работа выполнена на кафедре электрофизических установок Московского инженерно-физического института (государственного университета).

**Научный руководитель:** Член-корреспондент РАН,  
доктор физико-математических наук,  
профессор  
**Диденко Андрей Николаевич**

**Официальные оппоненты:** доктор технических наук, профессор  
**Завьялов Михаил Александрович**  
  
кандидат физико-математических наук  
**Коннов Александр Викторович**

**Ведущая организация:** Физический Факультет Московского  
государственного университета  
имени М.В. Ломоносова

Защита состоится “ 25 ” марта 2009 г. в 15 ч. 30 мин. в аудитории 406  
главного корпуса на заседании диссертационного совета Д **212.130.01** при  
Московском инженерно-физическом институте (государственном  
университете) по адресу: 115409, г. Москва, Каширское шоссе, д.31.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МИФИ.

Просим принять участие в работе совета или прислать отзыв в одном  
экземпляре, заверенном печатью организации, по адресу МИФИ.

Автореферат разослан “ \_\_\_\_\_ ” февраля 2009 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета



Щедрин И.С.

### **Актуальность темы.**

Проблема создания эффективных источников света является одной из старых, но не потерявшей своей актуальности. Сущность этой проблемы сводится к следующему.

Фотосфера (слой, излучающий свет) образует видимую поверхность Солнца. Из фотосферы исходит основная часть оптического (видимого) излучения Солнца. Температура в фотосфере достигает в среднем 5800К и максимум излучения приходится на  $\lambda=600\text{нм}$ . При этом на световой диапазон приходится 31% излучаемой энергии. К сожалению, ни один из элементов периодической таблицы нельзя нагреть до такой температуры и максимум излучения для ламп накаливания приходится на более длинные волны (температура плавления вольфрама порядка 3680 К), чем и объясняется их низкая эффективность. Более высокую эффективность (10-15%) имеют люминесцентные лампы, но их спектральные характеристики существенно отличаются от спектральных характеристик Солнца.

В последнее время большой интерес вызывают СВЧ-источники света, возникающего под действием СВЧ-разряда в различных средах. Прототипом таких источников света являются люминесцентные лампы, в которых используется разряд в смеси содержащей буферный газ и ртуть. В СВЧ источниках используется безэлектродный разряд, а вместо ртути применяется сера, спектральные характеристики которой в полосе чувствительности глаза практически не отличаются от спектральных характеристик Солнца. На основе СВЧ-разряда в аргон-серной смеси, можно создать безопасный и долговечный источник света с высоким КПД (~25%) и лучшими спектральными характеристиками.

Из-за уменьшения светимости ламп при уменьшении напряженности электрического поля в резонаторах, использующихся в этих устройствах, при уменьшении мощности питания, существует необходимость изучения методов сохранения световых и энергетических характеристик таких источников света при малых мощностях.

**Цель** данного исследования состоит в изучении условий необходимых для получения СВЧ-разряда в аргон-серной смеси в СВЧ источнике света при малой мощности питания, при сохранении его световых и энергетических характеристик, по сравнению с источниками с большей мощностью питания.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие **задачи**:

1. Изучить теоретические основы СВЧ-разряда в аргон-серной смеси, полиморфизм серы и физические явления, вызывающие световое излучение молекул серы;
2. Оценить необходимую напряженность электрического поля, при которой происходит эффективное излучение молекулами серы;
3. Выбрать рабочий вид колебаний, для получения необходимой напряженности электрического поля при малой мощности питания;
4. Выполнить расчет ЭДХ резонаторной камеры и провести ее экспериментальное исследование;
5. Создать высокоэффективный источник света с мощностью питания от сети порядка 400Вт и светоотдачей порядка 80 лм/Вт.

**Объект исследования** – СВЧ-разряд в аргон-серной смеси.

**Предмет исследования** – источник света на основе СВЧ-разряда в аргон-серной смеси.

**Методы, используемые для решения задачи.** Для расчета электродинамических параметров применялся пакет прикладных программ CST Microwave Studio, который использует метод конечных интегралов. Экспериментальная настройка резонаторной камеры выполнялась на установке, созданной на базе магнетронного СВЧ генератора мощностью 220Вт. Резонатор включался по проходной схеме. Анализатор спектра, использовался в качестве индикатора выходного сигнала по мощности и частоте. Для измерения световой характеристики лампы использовался

люксметр. Измерение температуры колбы во время работы СВЧ – лампы проводилось с помощью пирометра.

Носителями **научной новизны** являются следующие позиции работы:

1. Разработка оригинальной конструкции цилиндрической резонаторной рабочей камеры со штырями;
2. Получение с помощью разработанной резонаторной камеры высокого значения напряженности электрического поля при низкой мощности питания;
3. Разработка и исследование оригинальной конструкции СВЧ-источника света с мощностью питания от сети порядка 400Вт.

**Научная и практическая значимость работы:**

1. Получена информация о методах достижения высокой напряженности электрического поля в резонаторах малых размеров для возможного их использования в источниках света на основе СВЧ-разряда в аргон-серной смеси, что позволяет расширить область применения такого источника света, в том числе и в бытовых целях;
2. Получен высокоэффективный СВЧ – источник света (со световой отдачей “от сети” ~ 85 лм/Вт, “от СВЧ” ~ 140 лм/Вт) с малой мощностью питания, со спектральными характеристиками, близкими к характеристикам Солнца.

**Защищаемые положения:**

1. С помощью штыревых систем в цилиндрических резонаторах малых размеров возможно получить высокую напряженность электрического поля при малой мощности питания;
2. Использование цилиндрических резонаторов малых размеров с штыревыми системами позволяет получить высокоэффективный источник света с малой мощностью питания при сохранении световых характеристик на уровне источников с большей мощностью питания;
3. Использование цилиндрических резонаторов малых размеров с штыревыми системами позволяет сократить габаритные размеры

устройства, что дает возможность при дальнейшем сокращении мощности питания использовать устройство в бытовых целях.

### **Связь работы с научными программами, планами, темами.**

Данная работа выполнена в лаборатории СВЧ-энергетики кафедры электрофизических установок МИФИ в рамках исследований, ведущихся по гранту президента РФ для ведущей научной школы “Физико-технические проблемы СВЧ энергетики” и гранта РФФИ 07-08-12296-офи. Автор является одним из исполнителей, и его научный вклад отображен в диссертации.

**Личный вклад соискателя** в разработке источника заключается в проведении расчетов, компьютерном моделировании в пакетах прикладных программ, разработке конструкции СВЧ-источника света, настройке экспериментальной установки и проведении исследований с ее использованием.

**Апробация результатов.** Основные положения диссертации изложены в качестве докладов на Научной сессии МИФИ-2007, Научной сессии МИФИ-2008, Научной сессии МИФИ-2009.

### **Структура и объем диссертации.**

Диссертационная работа (95 страниц) состоит из введения, 3 глав, заключения, списка литературы (7 страниц – 84 наименования).

## **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

Во **Введении** обоснована актуальность и прикладное значение диссертации. Сформулирована цель и задачи исследований.

В **первой главе** “Процессы светоизлучения аргон-серной смеси в СВЧ – разряде” описано развитие СВЧ-источников света, теория процессов светоизлучения аргон-серной смеси в СВЧ-разряде, полиморфизм серы, оценка необходимой напряженности электрического поля, выбор оптимальных параметров аргон-серной смеси.

В начале главы проведено сравнение различных источников света. Показано, что светоотдача ламп накаливания порядка 15 лм/Вт при сроке службы 1000 ч. Они в большей степени нагревают, чем освещают (дают 95% тепла и лишь 5% света).

Галогенные лампы имеют яркий свет, спектр приближен к солнечному, срок службы до 4 тыс. ч, светоотдача порядка 30 лм/Вт.

Люминесцентные лампы имеют светоотдачу порядка 75 лм/Вт, срок службы до 15 тыс. ч. Цвета освещенных предметов воспринимаются не естественно. К тому же они содержат ртуть.

Ртутные лампы имеют светоотдачу порядка 60 лм/Вт, срок службы до 20 тыс. ч., хорошую цветопередачу. Парциальное давление паров во время работы достигает  $10^5$  Па; 40% излучения – ультрафиолет.

Натриевые лампы имеют уровень светоотдачи порядка 150 лм/Вт; срок службы до 25 тыс. ч. Излучение натриевой лампы низкого давления - монохроматическое (невозможно различить цвета освещенных предметов). Эффективность зависит от температуры окружающей среды (во время холодной погоды они светят хуже). Большинство натриевых ламп высокого давления содержит ртуть.

Металлогалогенные лампы имеют светоотдачу порядка 85 лм/Вт; срок службы до 15 тыс. ч. Эксплуатация разрешена только в специальных закрытых корпусах из-за избыточного рабочего давления и ультрафиолета.

Ксеноновые лампы имеют спектр близкий к солнечному, высококачественную цветопередачу. Срок службы 800-1500 ч. Светоотдача порядка 45 лм/Вт. Давление в лампе не менее 0,3-0,5 МПа, т.е. взрывоопасны даже в нерабочем состоянии.

Срок службы светодиодных ламп до 100 тыс. ч. Светоотдача порядка 25 лм/Вт, при высокой стоимости; малой единичной мощности; проблемах с надежностью при совместной работе большого количества светодиодов; узким монохроматическом спектре.

На данный момент не существует источника света, который бы полностью удовлетворял всем требованиям. Поэтому ведется работа по улучшению существующих типов источников, разработке принципиально новых или ранее считавшихся бесперспективными. К ним относятся и СВЧ-источники. Полученные на данный момент результаты позволяют говорить о перспективности использования данных источников света из-за их спектра, высокой эффективности и цветопередачи.

Разработка и создание СВЧ-источников света предполагает использование практически всех сведений о неравновесной низкотемпературной плазме – определение минимальной СВЧ – мощности для инициирования пробоя буферного газа с учетом его давления; параметрического воздействия СВЧ – поля; его роли в процессе усиления СВЧ – разряда в сере; изучение спектральных характеристик серы, с учетом ее полиморфности.

Следует отметить, что попытки исследовать источники света с серным наполнением предпринимались и раньше, но были оценены как бесперспективные. Считалось, что добавление электроотрицательной серы будет приводить к прекращению разряда. Выводы о оказались справедливыми только для высокочастотных разрядов. Плодотворным оказалось обращение к СВЧ диапазону. Была выявлена высокая эффективность преобразования энергии электромагнитных волн этого диапазона в кинетическую энергию частиц ионизированного газа и далее в излучение. Наиболее продвинутое к настоящему времени применение этого явления — мощный и эффективный источник света с высоким качеством спектра излучения.

Первые эксперименты, проведенные в США фирмой Fusion Lighting, показали высокую эффективность и перспективность таких источников света. Так было заменено наружное освещение здания Департамента Энергетики и Национального Музея астронавтики в Вашингтоне. Оказалось, что освещенность здания увеличилась в 3,65 раза, а расход электроэнергии



уменьшился в 3,5 раза. Эффективность преобразования электрической энергии в световую у этих источников превышала 20%.

Американские инженеры, исследуя составы рабочего вещества, обнаружили, что использование серы позволяет получить квазисолнечное излучение (рис. 1). Это послужило отправным пунктом для создания в 1992 году первых СВЧ-источников света на основе серы.

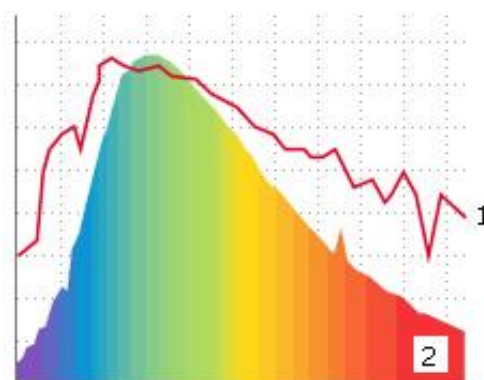


Рис. 1. Спектральные характеристики:  
солнечного света (1), серного СВЧ-источника света (2).

С 2000 года исследованием и промышленным выпуском СВЧ-источников света занимается Южнокорейская фирма LG electronics.

В России и СНГ промышленно СВЧ-источники не производятся. Специалисты ИЗМИРАН, ВНИСИ, ВЭИ, МЭИ, ОАО "Плутон" провели ряд самостоятельных и совместных работ по их созданию.

С 1996 года на кафедре электрофизических установок МИФИ проводятся работы по созданию источников света на основе СВЧ-разряда.

Можно выделить такие достоинства СВЧ-источников света на основе серы: повышенная световая отдача ( $\sim 100$  лм/Вт), обеспечивающая возможность энергосбережения; сплошной квазисолнечный спектр, максимум спектральной плотности мощности которого практически совпадает с максимумом кривой чувствительности человеческого глаза, т.е. естественная цветопередача; генерация в инфракрасной области низка ( $< 1\%$ ),

73% испускаемого излучения находятся в видимом спектре, намного больше, чем у других типов ламп; отсутствие вредной ультрафиолетовой радиации - дополнительная выгода; малые габариты, высокая яркость и симметричность формы светящего тела, облегчающая оптимизацию оптических систем; большая долговечность колбы; экологическая "чистота" излучения и материалов колбы; возможность регулировки силы света путем изменения уровня мощности; время работы составляет приблизительно 20 тыс. ч; источник достигает 80% светового потока в течение двадцати секунд, и может быть перезапущен спустя приблизительно пять минут после прекращения подачи питания; не содержит ртути и не ставит под угрозу окружающую среду; есть потенциал в уменьшении энергии, требуемой для освещения.

Но есть и ряд сложностей. К ним относят высокую температуру колбы, что вынуждает использовать высококачественное и, соответственно, дорогое кварцевое стекло и обеспечивать обеспыленную и неагрессивную воздушную среду; высокая стоимость компонентов СВЧ-источника, лампа является сложным агрегатом, состоящим из большого числа разнородных блоков и узлов, что осложняет ее эксплуатацию и обслуживание.

При нормальной температуре сера находится в твердом состоянии, ее сублимация начинается при  $444,6^{\circ}\text{C}$ . Поэтому, сначала необходимо получить разряд, используя какой-либо буферный газ, а затем поддерживать его в парах серы. СВЧ поле вызывает тлеющий разряд в буферном газе, имеющем при низком исходном давлении низкий порог пробоя, который совместно с полем нагревает до испарения порошок серы.

Эффективность зависит от многих факторов и поэтому необходимо провести тщательный анализ и выбрать условия, при которых для данной вводимой СВЧ – мощности светоотдача будет максимальной. Задача теоретического описания процессов на основе точных кинетических уравнений, ввиду очевидной сложности системы, представляется непродуктивной.

Из общих соображений можно определить, что светоотдача будет зависеть от энергии кванта света  $\hbar\omega$ , плотности аргоновой плазмы  $n_e$ , плотности молекул серы  $n_s$ , объема резонатора  $V$ , средней скорости электронов плазмы  $v$ , поперечного сечения неупругого взаимодействия электронов плазмы с молекулами серы  $\sigma_s$ , приводящего к их возбуждению.

Если бы сера имела только одно состояние, то молекулы излучали бы на одной длине волны и спектр существенно отличался бы от солнечного. Широкий спектр, излучаемый аргон – серными источниками света, является результатом полиморфизма серы. Другими словами сера состоит из многих разновидностей, каждая из которых излучает на собственной длине волны. Поэтому спектр излучения молекулярной серы близок к солнечному.

Уравнение для мощности света, излучаемого аргон-серной лампой выглядит так:

$$P_{\text{света}} = n_e \cdot V \sum_{j=1}^m \hbar\omega_j \cdot \alpha_j \cdot n_s \cdot \langle \sigma_{sj} v \rangle ,$$

где  $j$  – номер разновидности серы,  $m$  – число разновидностей серы,  $\omega_j$  – частота излучения для  $j^{\text{ой}}$  разновидности серы,  $n_s$  – плотность серы;  $\alpha_j$  – массовый коэффициент для  $j^{\text{ой}}$  разновидности серы.

Излучаемая мощность прямо связана со свойствами серы. Полиморфизм молекулярной серы вызван разнообразием путей молекулярных цепочек и циклов расположения в кристалле. При плавлении серы ( $T=99,5^\circ\text{C}$ ) разрываются слабые молекулярные связи и освобождаются циклические молекулы  $S_8$ . Полимеризация дает цепочки более чем в 200 тыс. атомов в виде длинных образований при температуре примерно  $180^\circ\text{C}$ . Цепочки постепенно укорачиваются до 1000 атомов при температуре  $400^\circ\text{C}$  ( $\approx 100$  атомов при  $600^\circ\text{C}$ ). Когда температура превышает  $445^\circ\text{C}$ , давление насыщенного пара над жидкой серой становится порядка  $10^5$  Па. При этом все молекулы  $S_n$  (где  $2 \leq n \leq 10$ ), включая молекулы, сформированные

нечетным числом атомов, могут быть найдены в парах. Однако, с возрастанием температуры, остается только двухатомная сера.

Известно, что для молекулы серы  $S_2$  энергия диссоциации  $E_d \leq 4,4$  эВ, в то время как для других молекул  $S_3 - S_9$   $E_d$  приблизительно в два раза меньше (от 3,1 до 2,8 эВ). Это означает, что энергия электронов не должна превышать 2,5 эВ, чтобы иметь квазинепрерывный спектр излучения полиморфной серы. Если электроны имеют достаточно энергии, чтобы вызвать диссоциацию молекул серы, тогда спектр излучения станет линейчатым (единственная частота), типичный для атомов серы.

Чтобы получить оптимальные условия для работы лампы энергия электронов  $\varepsilon_e$  должна быть приблизительно равна 2,5 эВ, т.е. должно быть удовлетворено следующее уравнение:

$$\varepsilon_e [\text{эВ}] = \frac{m\dot{x}^2}{2} = \frac{e^2 E_0^2}{2m(\omega^2 + \nu_{CT}^2)},$$

где  $E_0$  – напряженность электрического поля,  $\nu_{CT}$  – частота столкновений электронов с молекулами серы,  $\omega$  – частота СВЧ поля.

Оптимальная напряженность электрического поля составит порядка 6кВ/см. Молекулы серы возбуждаются только в объеме, куда проникает поле. Глубина проникновения зависит от плотности аргоновой плазмы. При значении плотности  $10^{10} \text{см}^{-3}$  глубина проникновения может быть вычислена по формуле  $\delta [\text{см}] = 7,4 \sqrt{\frac{\nu_{CT}}{\omega}}$ . И при  $\nu_{CT} \gg \omega$  плазма образовывается во всем объеме колбы.

Во **второй главе** “Выбор типа резонатора для СВЧ – источника света” проведен анализ и расчет электродинамических характеристик резонаторных рабочих камер для СВЧ-источника света. Выполнен выбор типа резонаторной камеры, рабочего вида колебаний и экспериментальное исследование источника.

Для получения высокоэффективного СВЧ – источника надо возбудить в резонаторе СВЧ – поле с напряженностью электрического поля порядка 6 кВ/см. Получить такую напряженность можно только при достаточно большой плотности СВЧ – энергии внутри резонатора. Но с уменьшением СВЧ – мощности высокую напряженность СВЧ – поля можно получить только в резонаторе малых размеров. Как известно с уменьшением размеров резонатора увеличивается его частота, и получение резонатора малых размеров, работающего на той же частоте, является непростой задачей.

Параметр напряженности электрического поля  $\xi_{\text{Э}}$  вычисляется по формуле:

$$\xi_{\text{Э}} = \frac{|E_0|}{\sqrt{P \cdot Q}},$$

где  $P$  – мощность, попадающая в резонатор,  $Q$  – добротность резонатора.

Отсюда следует, что для уменьшения мощности, при сохранении высоких значений напряженности электрического поля и добротности, необходимо увеличить значение параметра напряженности электрического поля.

Выбор рабочего вида колебаний основан на анализе энергетических свойств цилиндрического резонатора. Эти данные показывают, что резонатор на  $E_{010}^0$  – виде колебаний имеет существенно более высокую напряженность электрического поля, чем резонатор на  $H_{111}^0$  – виде колебаний при одинаковой подаваемой СВЧ – мощности.

Поскольку наличие колбы не позволяет провести аналитический расчет, то он проводился с помощью пакета прикладных программ CST Microwave Studio (табл. 1). Рабочая частота используемого магнетрона 2462 МГц, поэтому все расчеты производились для этой частоты. Определено превосходство  $E_{010}^0$  – вида над  $H_{111}^0$  – видом по энергетическим параметрам при малой мощности питания.

На основе резонатора диаметром 89 мм и длиной 60 мм, с  $E_{010}^0$  видом колебаний на частоте 2462 МГц, спроектирован и изготовлен образец

источника, и проведено его исследование. Вывод света из резонатора осуществлялся через сетчатую торцевую стенку. Внутри резонатора размещена сферическая кварцевая колба, заполненная аргон-серной смесью. Резонатор связан с прямоугольным волноводом через индуктивное окно.

Таблица 1.

Результаты расчета цилиндрических резонаторов.

	Диаметр, мм	Длина, мм	f, МГц	$\xi_{\Sigma}$ , Ом <sup>1/2</sup> /м
$H_{111}^0$	78	140	2462	270
$E_{010}^0$	91,35	80		306
	91,15	60		352
	90,95	50		386

При уменьшении высоты резонатора, колба, размер которой остается неизменным, занимает гораздо больший объем внутри резонатора. При экспериментальном исследовании источника было установлено, что увеличение значения мощности светового потока при уменьшении высоты цилиндрического резонатора происходит лишь до определенного предела. Прогнозируемое увеличение напряженности электрического поля, имеет место при высоте резонатора в 40 мм и более. Дальнейшее ее сокращение не приводит к росту светоотдачи. Причиной является шунтирование плазмой части объема резонатора в приосевой области, из-за чего падает напряженность электрического поля и следовательно световые характеристики лампы.

Решено было изучить возможность использования штыревых систем в резонаторе. Введение штырей позволяет добиться повышения напряженности электрического поля и тем самым снизить значение мощности питания. Электрическое и магнитное поля в резонаторе занимают две отдельные области. Магнитное поле расположено в промежутке между

стенкой резонатора и штырями, электрическое поле направлено к торцу резонатора и сконцентрировано в небольшой локальной области между штырями и верхней стенкой. Это увеличивает значение емкости зазора при заданной частоте системы и приводит к уменьшению геометрических размеров. Уменьшение размеров резонатора позволяет получить высокую напряженность электрического поля при малой мощности питания.

В третьей главе “Разработка высокоэффективных СВЧ-источников света с малой мощностью питания” описано создание высокоэффективного источника с малой мощностью питания. Проведен расчет, конструирование и его экспериментальное исследование.

Штыревые системы изучены достаточно подробно применительно к разработке замедляющих систем СВЧ-приборов и ускоряющих систем циклических ускорителей.

Расчет данной системы проводился в пакете прикладных программ CST Microwave Studio. С его помощью определено, что в данном резонаторе будут возбуждаться четыре вида колебаний. Виды колебаний делятся на два синфазных и два противофазных. Электрическое поле в таких структурах направлено к боковой или к торцевой стенке, т.е. является продольным или поперечным.

Интерес представляют только синфазные виды. Продольная составляющая электрического поля противофазного вида в центре пространства взаимодействия равна нулю, и поэтому этот вид не может быть использован. Синфазный вид, электрическое поле которого направлено к торцевой стенке, будет самым низкочастотным.

Штыревая система (рис. 1) представляет два одинаковых прямоугольных штыря, установленных широкими стенками параллельно друг другу, и прикрепленных симметрично относительно центральной оси резонатора к нижнему его основанию. Электрическое поле в резонаторе направлено к верхнему основанию резонатора и сосредоточено в области

между штырями и торцевой стенкой. В этой области и располагается кварцевая колба.

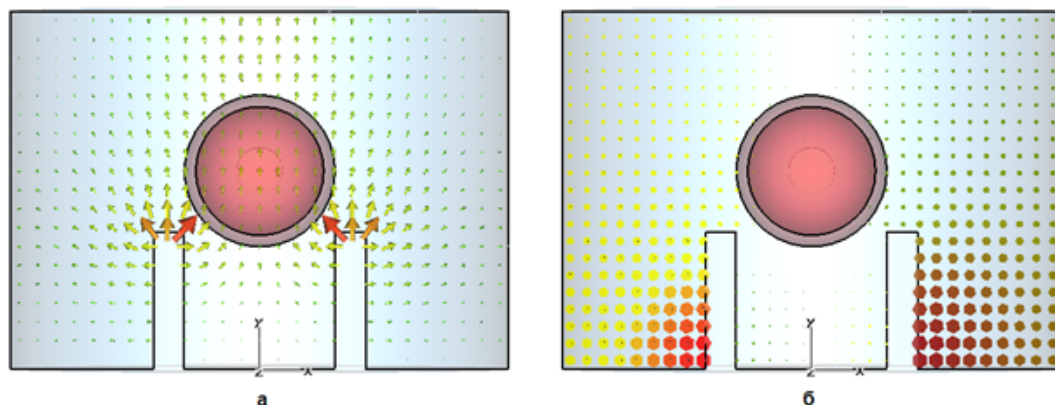


Рис. 1. Цилиндрический резонатор с прямоугольными штырями:

а)– электрическое поле, б) – магнитное поле.

Толщина, ширина, длина и расстоянием между штырями, подобраны так, чтобы параметр напряженности электрического поля в области между штырями и верхним основанием резонатора был максимально возможным.

Расчетное значение напряженности электрического поля составляет  $440 \text{ Ом}^{1/2}/\text{м}$ . Значение параметра напряженности электрического поля увеличивается, если уменьшать расстояние между штырями, но с практической точки зрения это расстояние нельзя делать меньше из-за повышения вероятности пробоя между штырями и колбой.

Образец источника спроектирован и изготовлен на основе цилиндрического резонатора с штыревой системой (рис. 2). Питание осуществлялось от бытовой сети. Блок питания выполнен на основе электронной схемы и работает в импульсном режиме и потребляет от сети мощность в 370Вт.

Использовался магнетрон, с рабочей частотой 2462МГц и мощностью 220Вт. Мощность подается в резонатор (рис. 4а) по прямоугольному волноводу. Волновод имеет размеры 72x44мм. Так как связь резонатора и волновода осуществляется через окно связи 41x17мм, то на конце волновода выполнен волноводный переход от сечения 72x44мм к сечению 72x17мм.



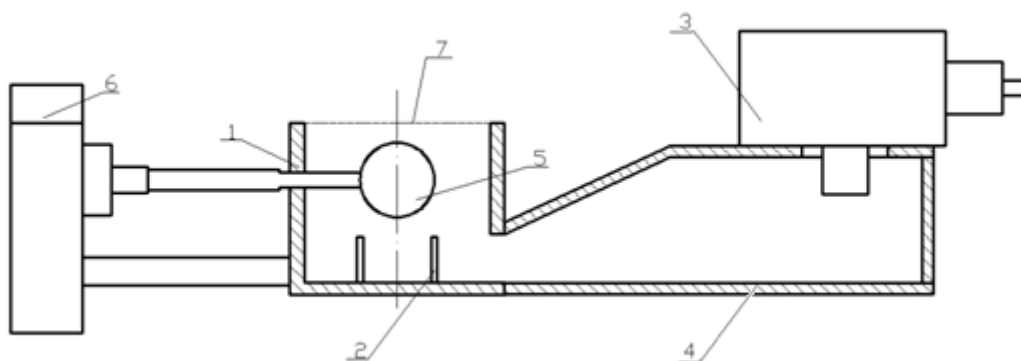


Рис. 2. Схема источника:

1 - резонатор, 2 – прямоугольные штыри, 3 – магнетрон,  
4 – волновод, 5 – колба, 6-электромотор, 7 – сетка.

При проведении экспериментов выявлено, что при вращении колбы вдоль центральной оси резонатора, она плавится под действием поля. Для устранения этого недостатка колба располагается перпендикулярно центральной оси. Для снижения ее температуры используется электродвигатель, обеспечивающий охлаждение колбы за счет вращения. Работа лампы предусматривает вывод света, поэтому торцевая стенка резонаторной камеры выполнена из сетки. Ее структура представляет собой гексагональную ячейку. Сетка выполнена из стали и покрыта серебром. Сталь обеспечивает жесткость, серебряное покрытие хорошую электропроводность, одновременно сетка является экраном для СВЧ.

Для измерения светимости использовался люксметр Chroma Meter Minolta CL200. Были выполнены измерения для различных размеров колб и колб с различным содержанием серы. С увеличением размеров колбы светимость возрастает, при плотности серы порядка  $1,5 \text{ мг/см}^3$ . Значение светимости составило 30000 лм, что соответствует светоотдаче “от сети”  $\sim 80 \text{ лм/Вт}$ , при мощности питания порядка 400 Вт.

Спустя некоторое время, был рассмотрен вариант замены, в имеющемся резонаторе, двух прямоугольных штырей на один в виде кольца, расположенный по центру резонатора (рис. 3).

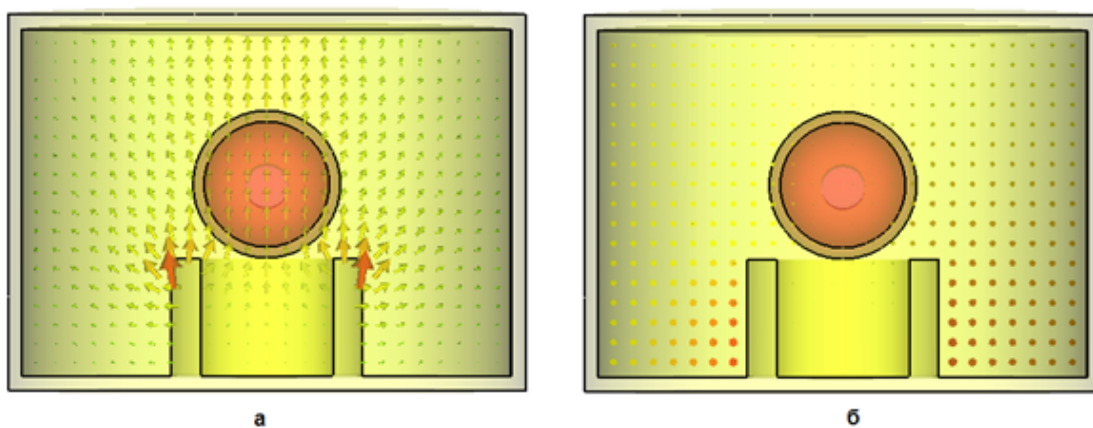


Рис. 3. Цилиндрический резонатор с кольцевым штырем:

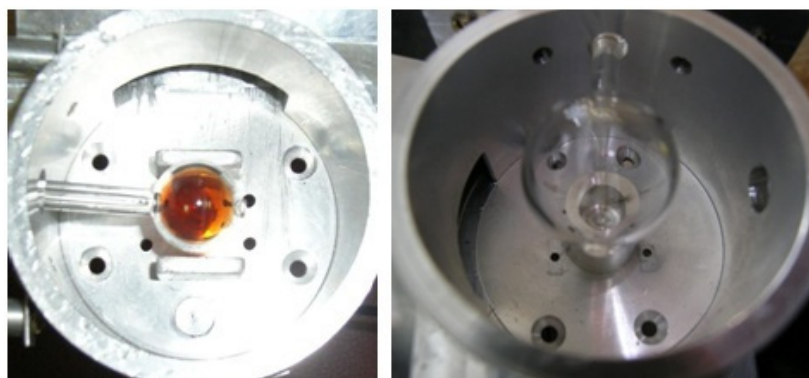
а)– электрическое поле, б) – магнитное поле

Проведены расчеты по оптимизации размеров кольцевого штыря с целью получения максимально возможного значения напряженности электрического поля. Расчетное значение напряженности электрического поля составляет  $500 \text{ Ом}^{1/2}/\text{м}$ .

Электрическое поле сосредоточено в области между кольцевой вставкой и торцевой стенкой, направлено вдоль центральной оси резонатора, достигая максимума на крае кольцевой вставки. Электрическое и магнитное поле занимают две отдельные области. Магнитное поле большей частью расположено в промежутке между стенкой резонатора и кольцевой вставкой. Это позволяет возбудить резонатор через имеющееся окно связи (рис. 4б).

Максимальное значение светимости источника составило порядка 31500 лм, что соответствует светоотдаче “от сети”  $\sim 85 \text{ лм/Вт}$ , при мощности питания порядка 400 Вт.

На рис. 5. представлен внешний вид СВЧ – источника без блока питания и сетки. Снижение мощности, полученное в данном источнике, позволят существенно расширить сферу применения таких источников света, а при дальнейшем снижении мощности питания и размеров использовать для бытового освещения.



а)

б)

Рис. 4.: Резонатор СВЧ-источника света:

а) с прямоугольными штырями, б) с кольцевым штырем



Рис. 5. СВЧ – лампа

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

Основные результаты выполненной работы заключаются в следующем:

1. Изучены теоретические основы аргон-серных источников света, полиморфизм серы, физические явления, вызывающие световое излучение молекул серы, оценена необходимая напряженность электрического поля;
2. Произведен анализ цилиндрических резонаторов работающих на  $E_{010}^O$  и  $H_{111}^O$  видах колебаний. Аналитически рассчитаны их основные электродинамические характеристики. Показано превосходство  $E_{010}^O$  – вида колебаний по энергетическим параметрам при малой высоте резонатора и малой мощности питания. Однако использовать его на практике оказалось невозможным из-за шунтирования плазмой части объема резонатора в приосевой области. Вследствие чего происходило падение значения напряженности электрического поля и световых характеристик источника;
3. Предложены штыревые структуры в цилиндрическом резонаторе, и проведены вычисления параметров таких структур, которые позволили достичь высокого значения напряженности электрического поля в резонаторах малых размеров при низкой мощности питания и исключить шунтирование плазмой части объема резонатора в приосевой области;
4. Выполнен технический проект СВЧ – источника света, и произведено его экспериментальное исследование. Измерены электродинамические параметры резонаторной рабочей камеры (добротность, резонансная частота), световые и энергетические характеристики, температура кварцевой колбы в процессе работы;
5. Получен высокоэффективный СВЧ – источник света (со светоотдачей “от сети” ~ 85 лм/Вт, “от СВЧ” ~ 140 лм/Вт) с мощностью питания от сети порядка 400Вт, со спектральными характеристиками, близкими к характеристикам Солнца;

6. Созданный высокоэффективный СВЧ – источник света малой мощности питания позволяет существенно расширить сферу применения таких источников, что дает возможность при дальнейшем сокращении мощности питания использовать устройство в бытовых целях;

7. По результатам работы отправлена заявка на получение патента РФ.

**Содержание диссертационного исследования отражено в следующих публикациях:**

1. Диденко А.Н., Щукин А.Ю., Денисов К.В. Экспериментальное исследование источника света на основе штыревой системы в цилиндрическом резонаторе, Научная сессия МИФИ-2007: Сб. науч.тр. Т.8. М: МИФИ, 2007, стр. 25;
2. Диденко А.Н, Прокопенко А.В., Щукин А.Ю. Разработка СВЧ-лампы на основе цилиндрического резонатора с кольцевым штырем, Научная сессия МИФИ-2008: Сб. науч.тр. Т.5. М: МИФИ, 2008, стр. 94;
3. Щукин А.Ю., Денисов К.В. Выбор резонатора для эффективной СВЧ - лампы малой мощности, Известия Академии Наук, серия Энергетика, 2008, №.2, стр. 9-16;
4. Диденко А.Н., Щукин А.Ю., Денисов К.В. Экспериментальное исследование СВЧ – лампы, Известия Академии Наук, серия Энергетика, 2008, №.2, стр. 17-21.