

На правах рукописи



Ирхин Игорь Вячеславович

**РАЗРАБОТКА БЕЗЭЛЕКТРОДНЫХ ВЫСОКОЧАСТОТНЫХ
ИСТОЧНИКОВ ОПТИЧЕСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА ОСНОВЕ
СЕРНЫХ ЛАМП**

Специальность: 05.27.02 – Вакуумная и плазменная электроника

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Рязань - 2017

Диссертация выполнена на кафедре электроники и наноэлектроники Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский университет «МЭИ».

Научный руководитель: **Попов Олег Алексеевич**, д.т.н., профессор кафедры светотехники Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский университет «МЭИ», г. Москва,

Официальные оппоненты: **Двинин Сергей Александрович**, д. ф.-м. н, доцент кафедры Физической электроники Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова», г. Москва,

Бочков Виктор Дмитриевич, к.т.н., директор ООО «Импульсные технологии», г. Рязань,

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Институт нефтехимического синтеза им. А.В. Топчиева РАН», г. Москва.

Защита диссертации состоится «19» сентября 2017 года в 11 часов 30 минут на заседании диссертационного совета Д 212.211.03 при Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Рязанский государственный радиотехнический университет» по адресу: 390005, г. Рязань, ул. Гагарина 59/1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГБОУ ВО РГРТУ <http://www.rsgeu.ru>

Отзывы на автореферат посылать по адресу: 390005, г. Рязань, ул. Гагарина 59/1

Автореферат разослан « 13 » июня 2017 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
Д 212.211.03 д.ф.-м.н., профессор



М.В. Чиркин

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы диссертации

Сегодня уровень развития безэлектродных источников оптического излучения достигает промышленных масштабов. Ведутся работы по миниатюризации конструкций, повышению эффективности источников питания, увеличению световой отдачи излучателей, получению требуемого спектрального состава излучения. Одним из видов безэлектродных источников оптического излучения является разрядная серная лампа высокого давления, плазма в которой возбуждается на высокой (ВЧ) или сверхвысокой (СВЧ) частоте в смеси буферного газа и паров серы.

Типовая конструкция серной СВЧ-лампы высокого давления, предназначенной для общего освещения, состоит из цилиндрического светопрозрачного (сетчатого) металлического СВЧ резонатора с типом колебаний TE_{111} и помещённой в него, в максимум напряженности электрического поля, кварцевой сферической колбы диаметром 3,5 см, содержащей аргон (20 Торр) и 20 мг серы. В качестве источника СВЧ мощности обычно используются магнетроны мощностью от 0,5 до 1,0 кВт, работающие на частоте 2,45 ГГц. В установившемся режиме работы серной лампы температура стенок колбы $T_w = 500 - 800^\circ\text{C}$, концентрация электронов в плазме $n_e = 10^{13} - 10^{14} \text{ см}^{-3}$.

Источники видимого излучения на основе серных СВЧ-ламп высокого давления обладают лучшими техническими и эксплуатационными характеристиками, чем электродные ртутные и натриевые лампы высокого давления, с низким индексом цветопередачи (< 50) и небольшим сроком службы, до 15000 ч. Они имеют высокие световые отдачи (до 90 лм/Вт), сплошной квазисолнечный спектр излучения, высокий индекс цветопередачи (до 90), комфортную цветовую температуру 4000 – 5000 К, большой срок службы разрядной колбы (до 60000 ч). Области их применения весьма разнообразны - от освещения жилых и рабочих помещений и выращивания в теплицах садовых и овощных растений до мощных прожекторных систем.

Большая яркость излучения серных ламп позволяет на их основе создавать прожекторные системы, что выгодно отличает их от светодиодных прожекторов такой же мощности, состоящих из множества маломощных (единицы ватт) светодиодов и потому имеющих весьма большую излучающую поверхность. Отметим также, что срок службы светодиодного светильника определяется сроком службы не светодиода (до 100000 ч), а источника питания светодиодов (до 40000 ч), практически такого же, какой у разрядных серных СВЧ источников оптического излучения.

Как сложная взаимосвязанная система, серный источник видимого излучения состоит из трех узлов: 1) генератор ВЧ мощности; 2) разрядная колба с плазмой; 3) согласующее устройство (резонатор, индуктор и т.п.), обеспечивающее передачу мощности от ВЧ генератора в плазму. Очевидно, что КПД всей системы: $\eta_{\text{системы}} = \eta_{\text{генератор}} \eta_{\text{резонатор}} \eta_{\text{плазма}}$ определяется КПД каждого узла, а срок службы сроком службы наименее надежного узла.

Таким образом, повышение эффективности и срока службы каждого из трех узлов серного источника света, несомненно, является актуальной задачей. Одна из задач связана с вращением разрядной колбы серной СВЧ-лампы, работающей на высоких мощностях $P > 500$ Вт. В существующих светильниках с серными лампами колба вращается для улучшения охлаждения ее стенок, причем, выбор скорости вращения колбы весьма произволен и определен лишь типом электродвигателя. В то же время, разумно предположить, что скорость вращения разрядной колбы влияет не только на тепловой режим колбы, но и на параметры плазмы и ее излучательные характеристики. К сожалению, исследований по этой тематике в литературе нет.

Другая неисследованная область – серные ВЧ-лампы, в которых разряд зажигается и поддерживается на более низких, чем СВЧ лампы частотах $f = 13,56 - 915$ МГц, и на меньших, чем у магнетрона уровнях мощности (< 500 Вт). Эта область частот весьма «привлекательна», поскольку в качестве источника ВЧ мощности можно использовать полупроводниковые генераторы, имеющие более высокий срок службы (> 30000 ч), чем магнетрон (~ 10000 ч), и более высокий КПД (до 90%), чем у магнетрона ($\sim 75\%$). К тому же, полупроводниковые генераторы могут питать серную лампу ВЧ мощностью от единиц до сотен ватт.

Таким образом, формулируются две основные цели диссертации:

- Исследование влияния скорости вращения разрядной колбы на излучательные и электрические характеристики серной СВЧ-лампы, работающей на относительно высоких мощностях в сотни ватт.
- Исследование характеристик серной лампы, возбужденной в широком диапазоне мощностей и частот ВЧ генераторов.

Для достижения поставленных целей в диссертации решались следующие задачи:

- Исследование влияния внешних условий работы серной лампы, в частности, скорости вращения разрядной кварцевой колбы и подводимой СВЧ мощности на температурные, электрические и излучательные характеристики лампы в стадии разгорания и в установившемся режиме.
- Исследование зажигания, электрических и излучательных характеристик серной лампы в стационарном режиме, разряд в которой возбуждается на

различных частотах и мощностях с помощью полупроводниковых ВЧ генераторов.

- Моделирование, разработка и апробация ВЧ резонаторов с высокой добротностью, работающих на мегагерцовых частотах с высокой эффективностью передачи ВЧ мощности в плазму серной лампы.

Научная новизна

- Впервые экспериментально установлено, что зависимость освещенности серной лампы высокого давления, работающей на частоте 2450 МГц и мощности 200 – 740 Вт, от скорости вращения разрядной колбы в диапазоне 0 – 24 об/с имеет максимум.
- Впервые экспериментально установлено, что увеличение скорости вращения разрядной колбы приводит к смещению спектра излучения плазмы серной лампы в длинноволновую область.
- Впервые для зажигания и поддержания стационарного разряда на частоте 840 МГц в смеси аргона и паров серы был применен полупроводниковый генератор ВЧ мощности, согласованный с разработанным в диссертации спиральным резонатором.
- Впервые экспериментально получен и исследован в смеси аргона и паров серы индукционный разряд, возбужденный на частоте 16,5 МГц.

Достоверность результатов

Экспериментальные характеристики измерялись сертифицированным оборудованием с соблюдением необходимых условий измерений. Применялись широко известные и достоверные способы компьютерного сбора и обработки данных. Результаты расчетов и численного моделирования подтверждены экспериментально, что позволяет считать полученные результаты достоверными.

Практическая ценность

- Обнаруженное в диссертации влияние скорости вращения разрядной колбы на величину освещенности, создаваемой плазмой серной лампы, позволяет определять оптимальную скорость вращения колбы, обеспечивающую максимальный световой поток лампы.
- Обнаруженная в диссертации зависимость спектра излучения серной плазмы от скорости вращения колбы позволяет на фиксированной мощности лампы менять в процессе ее работы цветовую температуру лампы.

- Разработана оригинальная конструкция полупроводникового генератора, с направленным ответвителем и детектором КСВ, обеспечивающая на частоте 810 – 925 МГц и мощности генератора 43 Вт зажигание и поддержание стабильного ВЧ разряд в смеси аргона и паров серы.
- Рассчитаны и разработаны согласующие устройства (резонаторы), обеспечивающие на частоте 810 – 925 МГц эффективную передачу ВЧ мощности в плазму серной лампы.

Основные положения, выносимые на защиту

1. Зависимость освещенности, создаваемой СВЧ серной лампой, работающей на частоте 2450 МГц, от скорости вращения разрядной колбы, в диапазоне 0 – 24 об/с, имеет выраженный максимум.
2. Увеличение скорости вращения колбы серной СВЧ-лампы сдвигает спектр излучения серной плазмы в длинноволновую область, от 320 – 650 нм до 430 – 800 нм.
3. Источники питания, состоящие из разработанных автором резонаторов, полупроводникового генератора, направленного ответвителя и детектора КСВ, возбуждающие на частоте 810 – 925 МГц и мощности 42 Вт разряд в парах серы со спектром излучения плазмы в диапазоне длин волн 300 – 550 нм.
4. Излучательные и электрические характеристики индукционного разряда в смеси аргона и паров серы, возбужденного на частоте 16,5 МГц с помощью полупроводникового генератора мощностью 150 Вт и КПД 79%.

Апробация работы и публикации

Результаты диссертации доложены на 5 научно-технических конференциях, опубликованы в 5 статьях в рецензируемых журналах из перечня ВАК РФ, и в 1 патенте на полезную модель.

Личный вклад автора

Автором разработаны и изготовлены высокочастотные генераторы и измерительный стенд на их основе, рассчитаны и изготовлены резонаторы и проведены измерения их электрических характеристик. Им проведено численное моделирование параметров и пространственного распределения напряженности ВЧ и СВЧ электрического поля в резонаторах. Автором лично, либо при его непосредственном участии, проведены эксперименты по исследованию излучательных и электрических характеристик серных ламп, обработаны и проанализированы полученные данные.

Объем и структура диссертации

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка использованных источников, списка публикаций автора и приложений. Общий объем работы составляет 152 страницы, в том числе 99 рисунков и графиков. Библиография включает в себя 123 наименования.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обосновывается актуальность работы, указываются цели и задачи которые будут рассмотрены в диссертации, приводятся результаты проведенных автором исследований, имеющие научную новизну и практическую значимость, доказательства достоверности результатов исследований. Формулируются выносимые на защиту положения, сообщаются данные об апробации работы, публикациях автора и его личном вкладе в диссертацию. Приводится структура диссертации и кратко излагается содержание ее глав.

В **первой главе** проведен анализ литературных источников по проблемам, исследуемым в диссертации. Первая часть главы посвящена истории появления серных ламп как ответвления от устройств для получения мощного ультрафиолетового излучения, а также ключевым моментам их конструкции, необходимости принудительного воздушного охлаждения и вращения колбы. Указаны некоторые особенности применения серных ламп в качестве источника видимого излучения высокой мощности для выращивания отдельных садовых и агрономических растений в контролируемой среде, а также по применению безэлектродного источника интенсивного УФ излучения для бактерицидной обработки предметов и материалов живого и неживого происхождения. Приводится подробное описание некоторых, наиболее полно описанных в литературе конструкций светильников на базе серных ламп, обсуждаются их особенности, электрические и излучательные характеристики. Описываются конструкции ламп с резонаторами с аксиально-симметричным электромагнитным полем, улучшающим тепловой режим колбы.

В заключении первой главы обсуждаются основные особенности и недостатки известных конструкций серных ламп, связанные с вращением разрядной колбы и сроком службы используемого источника СВЧ – магнетрона. Указывается на необходимость исследования излучательных характеристик лампы при различных скоростях вращения разрядной колбы. Рассматриваются способы расширения области применения серных ламп путем применения полупроводниковых ВЧ генераторов. Приводятся

параметры современных LDMOS транзисторов на частоты 30 – 2450 МГц подходящих для создания ВЧ генератора. В качестве примера лампы питаемой от полупроводникового ВЧ генератора, описывается конструкция металлогалогенной лампы с ВЧ возбуждением, где безэлектродная лампа закрепляется в резонаторе, заполненном диэлектриком. На основе проведенного анализа формулируются цели и задачи диссертации.

Во **второй главе** приведено поэтапное описание проектирования экспериментальной установки на основе регулируемого источника СВЧ мощности и блока измерений, содержащего 6 аналоговых входов, микроконтроллер со встроенным АЦП, дисплей и преобразователь интерфейсов для передачи данных в компьютер. Приводится описание методик измерений электрических и излучательных характеристик СВЧ серной лампы в процессе разгорания и в стационарном режиме.

Для определения условий эффективного введения СВЧ мощности в безэлектродную лампу проведены моделирование и расчет волноводного тракта и цилиндрического резонатора типа TE_{111} на частоте 2450 МГц. На рис. 1 приведено распределение напряженности электрического поля по сечению волноводного тракта, где можно видеть значительное возрастание напряженности поля около щели связи ($E \leq 2,5$ кВ/см) и в центральной части резонатора ($E \leq 1,3$ кВ/см). Из-за высокого коэффициента связи резонатора с волноводом резонансный максимум достаточно «тупой», что позволяет иметь большой допуск на точность установки разрядной колбы относительно центра резонатора. Результаты измерений температуры колбы, освещенности и спектра излучения плазмы приводятся при разных скоростях вращения колбы и различных уровнях подводимой мощности. Объектом исследования была сферическая кварцевая колба диаметром $d = 35$ мм (объем колбы – 19 см³), помещенная в цилиндрический резонатор. Давление аргона в колбе 20 Торр, масса твердофазной серы, внесенной в колбу, 20 мг.

Фотоснимки плазмы СВЧ разряда в парах серы высокого давления, полученные в экспериментах с невращающейся и вращающейся разрядной колбой, зарегистрированы с помощью фотокамеры Lumix TZ-7 с набором нейтральных светофильтров. Мощность магнетрона и скорость вращения колбы варьировались в пределах 90 - 740 Вт и 0 - 50 об/с. Эксперименты при различных скоростях вращения показали, что изменения температуры стенок, освещенности, спектра излучения, формы и положения плазмы происходят в интервале скоростей вращения колбы 0 - 20 об/с. Нижний предел мощности ($P = 100$ Вт) был ограничен возникновением неустойчивости разряда в колбе, приводившей к срыву разряда. Верхний предел мощности лампы ограничен мощностью источника питания магнетрона.

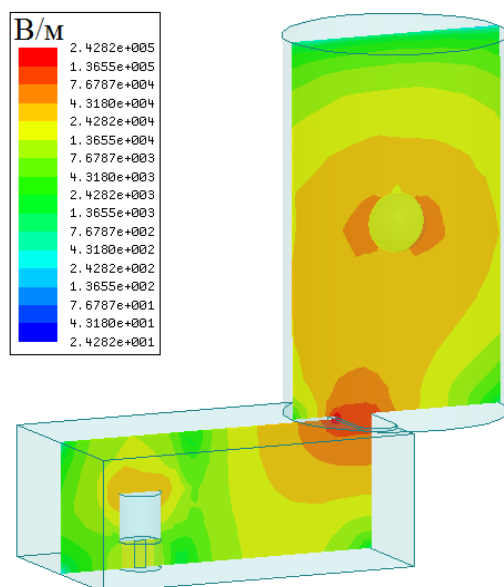


Рис. 1. Распределение напряженности электрического поля в сечении волноводного тракта

Экспериментальные исследования влияния скорости вращения разрядной колбы, ν , на освещенность, создаваемую лампой, E_{\max} , показали, что на малых скоростях вращения максимальная освещенность возрастает, достигая максимума при $\nu = 7 - 8$ об/с, а затем снижается. Коэффициент увеличения освещенности тем больше, чем ниже подводимая мощность. Так, при мощности магнетрона $P = 200$ Вт, увеличение скорости вращения с 4 до 7 об/с увеличивает освещенность в 1,5 раза, при мощности 500 Вт в 1,4 раза, а при мощности 740 Вт только в 1,1 раз. Обнаружено, что при определенных значениях скорости вращения колбы и СВЧ мощности разряд в колбе становится неустойчивым. Граница между устойчивым и неустойчивым режимами определяется зависимостью от скорости вращения пороговой мощности, при которой «срывается» разряд, P_{thr} . Экспериментально установлено, что пороговая мощность P_{thr} снижается с увеличением скорости вращения колбы от 260 Вт ($\nu = 2$ об/с) до 50 Вт ($\nu = 24$ об/с).

Кривые разгорания (зависимости освещенности E от времени разгорания τ), полученные при различных скоростях вращения колбы ($\nu = 0, 4, 7$ и 20 об/с) и мощности магнетрона 200 Вт, приведены на рис. 2. Конфигурация плазмы СВЧ разряда на всех стадиях разгорания лампы и в установившемся режиме также зависит от скорости вращения. Например, в невращающейся колбе разряд сосредоточен в ее верхней области, что предположительно связано с конвекцией (рис. 3, ряд «0 об/с»). При повороте лампы по ее горизонтальной оси разряд остаётся сосредоточенным в верхней области колбы. Это подтверждает эффект конвекции в результате которой верхняя часть колбы нагревается плазмой разряда сильнее и, таким образом, создаётся

значительный перепад температур (по приблизительным измерениям $200\text{ }^{\circ}\text{C}$) между верхней и нижней поверхностью колбы. Пары серы конденсируются в холодной точке, расположенной около ножки лампы в нижней части колбы, температура которой определяет их давление.

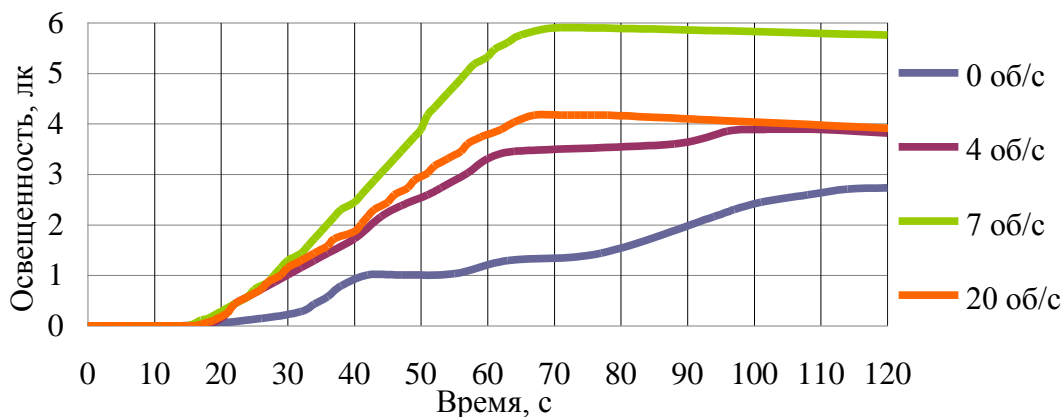


Рис. 2. Зависимость освещенности от времени разгорания лампы, полученные при различных скоростях вращения колбы. Мощность магнетрона $P = 200\text{ Вт}$

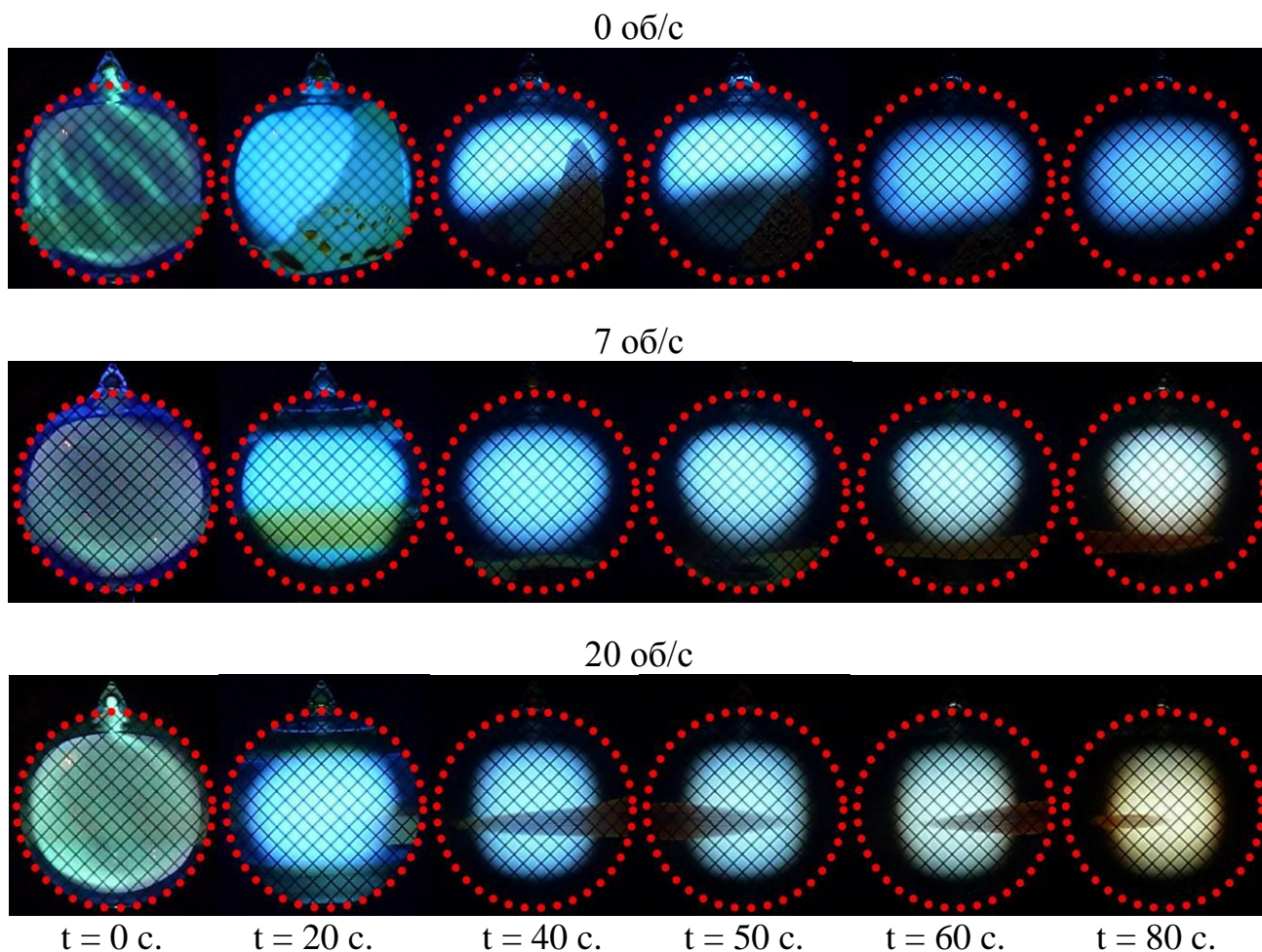


Рис. 3. Фотографии плазмы СВЧ разряда в безэлектродной серной лампе в процессе разгорания. Мощность магнетрона $P = 200\text{ Вт}$

Таким образом, даже при большой подводимой мощности доля серы, «участвующей» в разряде невелика, давление паров остается насыщающим, а излучение плазмы разряда сосредоточено в синей области спектра. При вращении колбы со скоростью 10 об/с и более серная плазма СВЧ разряда имеет сферическую форму и занимает пространство в центре колбы. В процессе разгорания сера достигает жидкой фазы и за счет центробежной силы распределяется по экватору колбы (рис. 3, ряд «20 об/с»).

Вращение колбы способствует равномерному распределению температуры по ее поверхности, в результате чего температура холодной точки повышается, а с ней повышается давление паров серы, соответственно, излучения плазмы разряда смещается в красную область спектра. При меньших скоростях вращения колбы, $\nu = 4 - 10$ об/с, плазма разряда имеет форму конуса или вихря с основанием в верхней части колбы (рис. 3, ряд «7 об/с»). При этом, спектр излучения разряда различен по его сечению. В верхней части колбы, имеющей более высокую температуру стенок, спектр смещен в синюю область, в нижней части колбы, где температура стенок ниже, спектр смещен в красную область.

Приведенные результаты показывают, что варьируя скорость вращения колбы можно, при фиксированной мощности питания лампы, менять температуру холодной точки (давление паров серы) и, следовательно, изменять спектр излучения лампы (см. рис. 4). Установлено, что при разгорании невращающейся колбы происходит лишь возрастание интенсивности излучения, а во вращающейся колбе спектр излучения плазмы по мере разгорания лампы смещается в красную область (рис. 5).

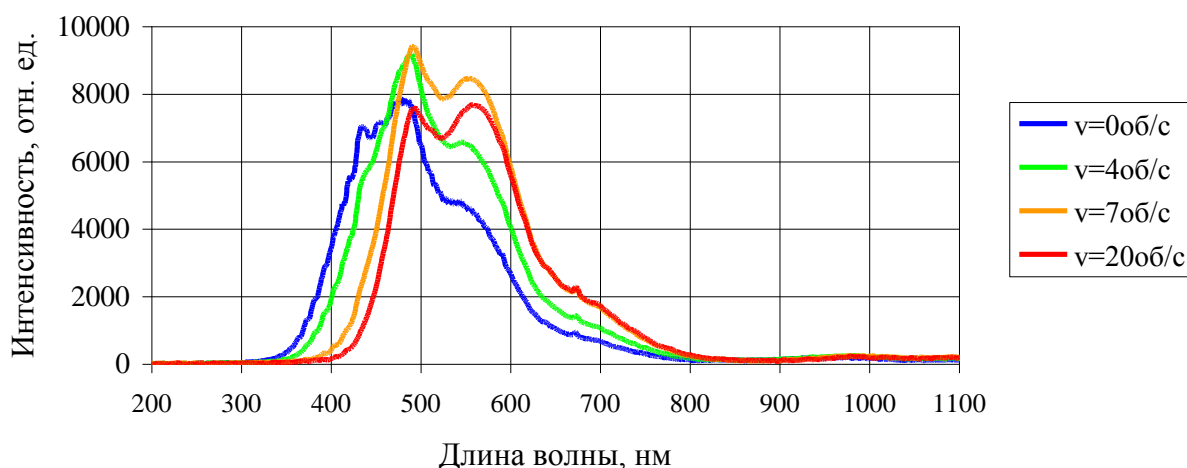


Рис.4. Спектры излучения безэлектродной серной лампы при различных скоростях вращения колбы. Мощность магнетрона 500 Вт

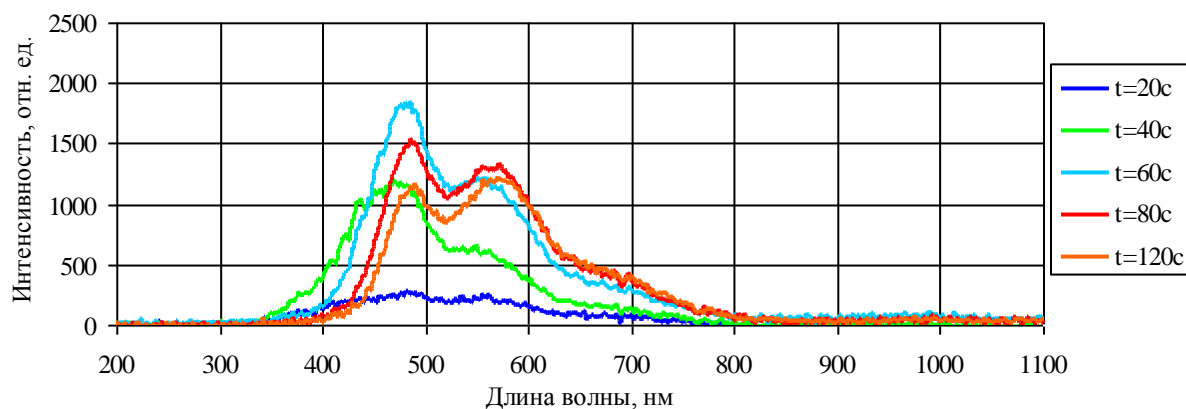


Рис.5. Спектры излучения безэлектродной серной лампы в процессе разгорания. Скорость вращения колбы 20 об/с. Мощность магнетрона 200 Вт

Третья глава посвящена разработке полупроводникового генератора для возбуждения серной плазмы в смеси аргона и паров серы. Приводятся основные требования к разрабатываемому генератору, в частности необходимость использования относительно низких рабочих частот для повышения эффективности полупроводникового генератора, необходимость установки детектора КСВ и согласующего устройства для работы генератора как на «холодную» лампу, в режиме поджига, так и в установившемся режиме. Для создания первого прототипа ВЧ генератора на частоту 810-925 МГц автором было решено применить конструкцию на основе серийно выпускаемых твердотельных ВЧ модулей.

Отличительной особенностью разработанного генератора является система непрерывного контроля КСВ и блок защиты уменьшающий выходную мощность при превышении КСВ установленного значения. Необходимость такого усложнения конструкции обусловлена тем, что резонатор с помещённой в него лампой в режиме поджига представляет собой рассогласованную нагрузку, т.к. газ в лампе в этот момент не ионизирован и не поглощает энергию. Мощность возвращается в усилитель и может вывести выходной каскад из строя. Чтобы избежать этого автор использовал направленный ответвитель (НО) на микрополосковых линиях и автоматическую регулировку выходной мощности (рис. 6). Помимо высокочастотного тракта автором в диссертации был разработан микропроцессорный блок измерений, который осуществлял контроль КСВ и индикацию данных о падающей, отраженной волне и частоте генерации. Выходная мощность генератора составила 43 Вт, его КПД составил 36 %.

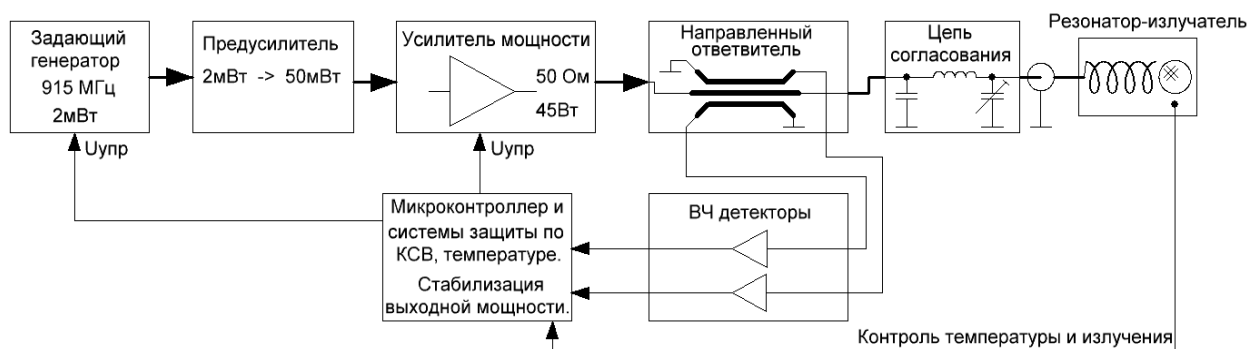


Рис. 6. Блок схема ВЧ генератора для работы на несогласованную нагрузку (плазма)

Испытания генератора с резонаторами, описанными в главе 4, продемонстрировали надежное зажигание разряда в буферном газе. Однако, при дальнейшем разгорании лампы температура стенок колбы не превышала 220 °С, из-за чего давление паров серы в ней не превышало 10 Торр, а излучение плазмы представляло собой непрерывный спектр с практически постоянной интенсивностью, простирающийся от 300 до 550 нм, что может найти применение в УФ технологии и для освещения растений.

В третьей главе диссертации проведен анализ способов повышения мощности и эффективности высокочастотного генератора, в результате которого было принято решение о разработке генератора со сравнительно низкой рабочей частотой 10 – 20 МГц, КПД которого достигает 79% а мощность 150 Вт. Там же дается подробное описание процесса разработки генератора, где в качестве резонансной системы использован последовательный колебательный контур. В резонансе и в отсутствии нагрузки, ВЧ напряжение на элементах контура достигает нескольких киловольт, что обеспечивает надежное зажигание разряда в колбе. В результате возникновения в лампе разряда и последующего шунтирования индуктора плазменным витком добротность контура резко снижается, что вызывает резкое снижение ВЧ напряжения на нем.

Генератор был испытан с разрядной колбой диаметром 13 мм, содержащей аргон при давлении 20 Торр и 6 мг серы. Колба помещалась по центру индуктора, содержащего 12 витков медного провода диаметром 3мм. Частота генератора - 16,5 МГц. При включении генератора зажигался разряд в аргоне со сравнительно низкой плотностью плазмы. Изменения ВЧ тока и напряжения на индукторе не наблюдалось, что указывало на слабую связь индуктора с плазмой разряда. Через 1-2 с после зажигания разряда интенсивность излучения плазмы скачкообразно возросла, а ВЧ ток в индукторе резко уменьшался, что свидетельствовало о возрастании связи индуктора с разрядной плазмой. Учитывая быстроту изменения характера

нагрузки и форму плазмы разряда, можно уверенно предположить, что в этот момент происходил переход от емкостного разряда в лампе к индукционному. В момент времени $\tau = 1$ с, когда происходит скачок нагрузки генератора, температура колбы начинает резко возрастать и за время $\tau = 6$ с увеличивается с 30 до 350 °С (рис. 7). Однако при $\tau = 6,5$ с рост температуры прекращается, скачкообразно падает освещенность и возрастают ВЧ напряжение и ток в индукторе.

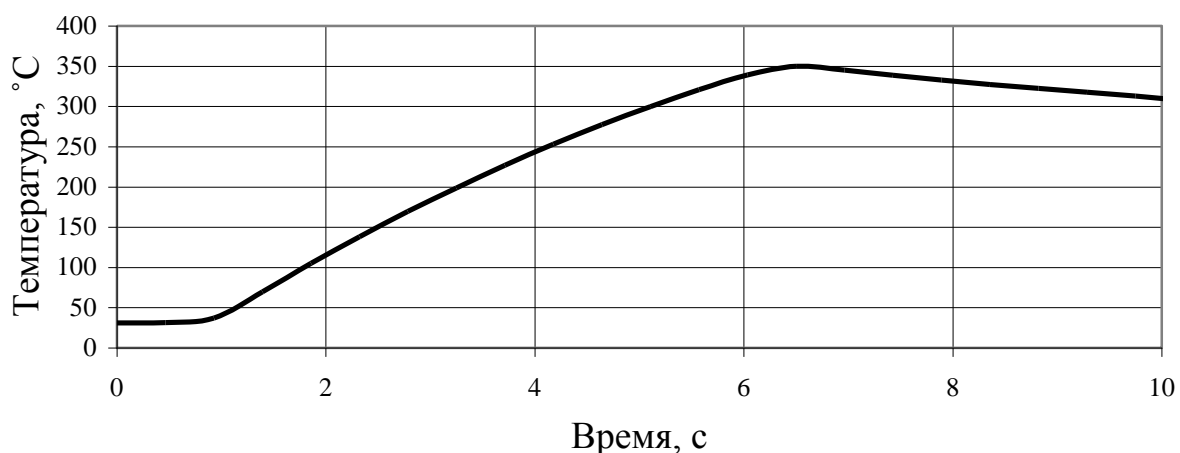


Рис. 7. Зависимость температуры стенок колбы от времени

Предположительно, это происходит из-за срыва индукционного разряда при возрастающем в колбе давлении. Устранить это можно дополнив генератор согласующим устройством. В начале разгорания лампы наблюдается характерный спектр излучения аргона в инфракрасной области. Затем, с нагревом колбы, возрастает интенсивность излучения в видимой области, а интенсивность линий аргона падает.

В заключительной части главы приводятся и анализируются характеристики разработанных автором ВЧ генераторов. Делается вывод о перспективности применения низких (13,56, 27 МГц) рабочих частот, т.к. КПД генератора при этом может достигать 90%, а мощность - сотен ватт. Также указываются возможные причины срыва разряда в процессе разгорания и способы модификации ВЧ генератора.

В **четвертой главе** описывается методика и процесс конструирования резонаторов различных типов для использования их совместно с разработанным автором полупроводниковым генератором на частоте от 810 до 925 МГц для возбуждения ВЧ разряда в парах серы в безэлектродной кварцевой колбе. Для оптимизации параметров резонаторов и определения их резонансной частоты применялась система проектирования и трёхмерного моделирования ВЧ и СВЧ устройств HFSS. Сначала рассматривается

спиральный резонатор. Его модель, созданная в программе HFSS, состоит из четырех витков проволоки диаметром 1,4 мм, диаметр намотки – 8 мм, диаметр экрана – 15 мм (Рис. 8). Резонансная частота резонатора составила 848,3 МГц. При подводимой мощности 50 Вт расчетная напряженность поля на вершине спирали составила 5,2 кВ/см. Т.к. у заземленного конца спирали преобладает магнитное поле, возбуждать резонатор было решено с помощью катушки связи, расположенной у заземленного конца спирали.

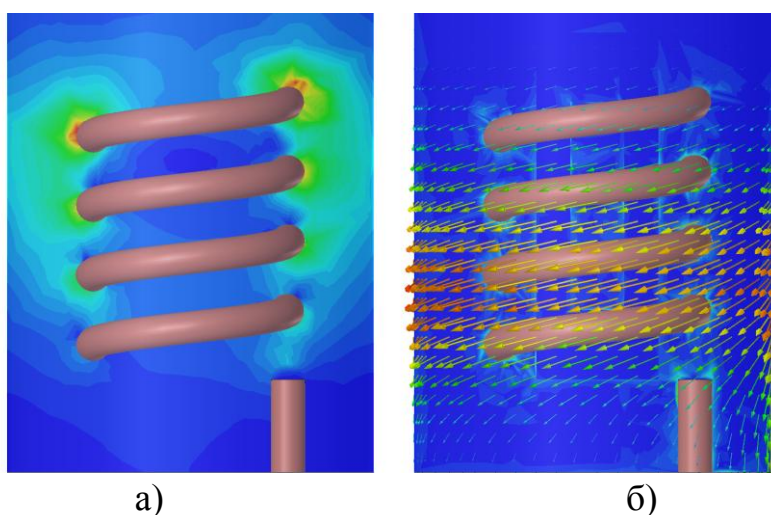


Рис. 8. Распределение а) напряженности ВЧ электрического поля, б) ВЧ тока в стенках резонатора

Резонатор был изготовлен из посеребренного медного цилиндра внутрь которого впаивалась катушка связи, состоящая из двух витков провода, и резонаторная спираль, состоящая из четырех витков медной проволоки диаметром 1,4 мм. В торце цилиндра закреплен разъём для присоединения резонатора к генератору. У изготовленного резонатора измерялась частота резонанса и добротность с помощью анализатора цепей типа Agilent 8719ET. Частота резонатора составила 835 МГц, его добротность определялась по ширине полосы по уровню -3Дб и составила 33.

Автором рассматривалась возможность применения других типов резонаторов: коаксиального, микрополоскового и тороидального. В диссертации приводятся результаты их приближенного расчета и моделирования. Для получения максимальной напряженности электрического поля была проведена оптимизация микрополоскового резонатора путем варьирования величины коэффициента связи на различных частотах. Автором была создана модель резонатора в программе HFSS. Толщина подложки равнялась 0,508 мм, её диэлектрическая проницаемость $\epsilon = 3,48$.

Для возбуждения резонатора использовалась линия длиной $L\nu$ с зазором dh . Один конец линии заземлён, другой подключён к источнику сигнала –

порту с сопротивлением 50 Ом, имитирующему задающий генератор мощностью 1 Вт. Длина резонатора составляет 61 мм, что составляет $\lambda/4$ электромагнитной волны частотой 850 МГц. Задача оптимизации была задана по максимальной напряженности электрического поля. Параметр $L\nu$ изменялся в диапазоне 20 – 40 мм, а dh в интервале 0,1 – 1 мм; частотный диапазон менялся в интервале 800 – 880 МГц с шагом 10 МГц. Таким образом было проанализировано 1890 комбинаций параметров и получена комбинация $L\nu = 28$ мм и $dh = 0,3$ мм, при которой достигается напряженность поля 2,9 кВ/см при частоте 830 МГц. В диссертации предлагается применение описанной методики расчета микрополоскового резонатора для оптимизации других типов резонаторов, возбуждаемых петлей (или штырем) связи.

В четвертой главе приведены также результаты апробирования полупроводникового генератора со спиральным резонатором на частоте 848 МГц и безэлектродной серной лампой. Использовалась разрядная кварцевая сферическая колба диаметром 13 мм которая содержала аргон (20 Торр) и 6 мг серы в твердой фазе. В диссертации приведены спектры разгорания лампы. В начале разгорания наблюдается характерный спектр излучения аргона в инфракрасной области. По мере нагрева плазмой стенок колбы и повышения давления паров серы возрастает интенсивность излучения серной плазмы в видимой области, а интенсивность линий аргона уменьшается. Температура стенок колбы возрастает за 100 с от 30 до 200°C.

В заключении диссертации приведены ее основные результаты:

1. Экспериментально установлено, что зависимость освещенности, создаваемой СВЧ серной лампой, работающей на частоте 2450 МГц и мощности 200 – 740 Вт, от скорости вращения разрядной колбы, в диапазоне 0 - 24 об/с, имеет выраженный максимум.
2. Полученная в диссертации зависимость освещенности от скорости вращения разрядной колбы позволяет повысить эффективность светильника с серной лампой путем выбора оптимальной скорости вращения колбы, при которой освещенность, создаваемая лампой, увеличивается на 40% при подводимой мощности 200 Вт, на 27% при подводимой мощности 500 Вт, и на 4% при подводимой мощности 740 Вт.
3. Установленная зависимость спектра излучения от скорости вращения разрядной колбы позволяет изменять цветовую температуру лампы в диапазоне 5000 – 10000 К непосредственно в процессе работы и может найти применение в современных системах адаптивного освещения, подстраивающих параметры светильника под изменяющиеся условия

внешнего освещения, а также в ряде специальных применений, таких как выращивание растений в контролируемой среде.

4. Разработан полупроводниковый высокочастотный генератор на частоту 810 – 925 МГц, мощностью 43 Вт с КПД 36% с помощью которого получен разряд в безэлектродной серной лампе и исследованы его излучательные характеристики. Спектр излучения разряда сосредоточен в диапазоне 300 - 600 нм.
5. Предложены, сконструированы и апробированы несколько типов компактных ВЧ резонаторов на частоту от 810 до 925 МГц для возбуждения разряда в безэлектродной серной лампе.
6. Разработан полупроводниковый высокочастотный генератор на частоту 16,5 МГц мощностью 150 Вт с КПД 79% для возбуждения индукционного разряда в серной лампе.
7. Показана возможность возбуждения индукционного разряда в серной лампе на частоте 16,5 МГц; исследован процесс разгорания этой лампы. Отметим, что использование относительно низкой частоты (16 МГц) позволяет повысить эффективность ВЧ генератора и, следовательно, всего источника излучения.

Области применения разработанных конструкций и модификаций серной лампы весьма обширны. Большая яркость при малом объёме светящегося тела позволяет создавать прожекторные системы и системы освещения на основе световодов. Возможность изменения цветовой температуры излучения позволяет создавать системы адаптивного освещения. Модификации ламп с полупроводниковыми генераторами применимы для систем точечного и специального освещения, в том числе для выращивания отдельных видов растений в контролируемой среде, а также в качестве спектральных источников непрерывного спектра в видимой и УФ области.

Публикации по теме диссертации

Статьи, опубликованные в изданиях, рекомендованных ВАК:

1. А.В. Щербаков, И.В. Ирхин, М.М. Ефанов, М.О. Гузенко. Полупроводниковый генератор для возбуждения безэлектродного плазменного светооптического устройства [Текст]/ Вестник МЭИ. – 2013. – № 3. – С. 89-95.
2. А.В. Щербаков И.В. Ирхин М.М. Ефанов, М.О. Гузенко. Резонатор для СВЧ возбуждения безэлектродного плазменного источника света [Текст]/ Вестник МЭИ. – 2014. – № 6. – С. 98-105.

3. А.В. Щербаков, И.В. Ирхин М.М. Ефанов. Безэлектродный газоразрядный источника света с полупроводниковым генератором накачки [Текст]/ Электричество. – 2015. – №4. – С. 34 - 37.
4. И.В. Ирхин, О.А. Попов, А.А. Сухачевский. Экспериментальное исследование влияния вращения разрядной колбы на характеристики СВЧ серной лампы высокого давления [Текст]/ Успехи прикладной физики. – 2016. – № 5. – С. 454 - 460.
5. И.В. Ирхин, А.А. Сухачевский, О.А. Попов, Р.А. Иликеева. Характеристики разгорания серной СВЧ-лампы высокого давления [Текст]/ Успехи прикладной физики. 2017. – № 2. – С.120 – 129

Статьи, опубликованные в других изданиях, патенты и материалы конференций:

6. И. В. Ирхин. Разработка полупроводникового ВЧ источника накачки и возбуждения безэлектродной аргонно-серной лампы [Текст]/ Тезисы докл. XIX межд. научно-техн. конф. студентов и аспирантов. Радиоэлектроника, электротехника и энергетика. Москва. Февраль 2013. – Т. 1. – С. 197.
7. И.В. Ирхин. Применение индукционного разряда для накачки безэлектродной серной лампы [Текст]/ Тезисы докл. XXI межд. научно-техн. конф. студентов и аспирантов Радиоэлектроника, электротехника и энергетика. Москва. Февраль 2015. – Т. 1. – с.159.
8. А.В. Щербаков, И.В. Ирхин, И.Е. Кудрявцев, И.Е. Овчаров И.Е. Устройство возбуждения безэлектродной сверхвысокочастотной газоразрядной лампы [Текст]/ Полезная модель № RU 154178 U1.
9. И.В. Ирхин, О.А. Попов. Конструкции резонаторов и излучательные характеристики высокочастотных безэлектродных серных ламп [Текст]/ Тез. докл. XXII межд. научно-техн. конф. студентов и аспирантов. Москва. 2016. – Т. 1. – с.132.
- 10.И.В. Ирхин, О.А. Попов, А.А. Сухачевский. Влияние скорости вращения разрядной колбы на характеристики СВЧ серной лампы высокого давления [Текст]/ Материалы 9-й Всероссийской конференции по Физической электронике. Махачкала. – октябрь 2016. – С. 23 – 26.
- 11.И.В. Ирхин, О.А. Попов. Исследование влияния вращения разрядной колбы на характеристики СВЧ серной лампы высокого давления [Текст]/ Тез. докл. XXIII межд. научно-техн. конф. студентов и аспирантов. Москва. 2017. – Т. 1. – с.134.

ИРХИН Игорь Вячеславович

**РАЗРАБОТКА БЕЗЭЛЕКТРОДНЫХ ВЫСОКОЧАСТОТНЫХ
ИСТОЧНИКОВ ОПТИЧЕСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА ОСНОВЕ СЕРНЫХ
ЛАМП**

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Подписано в печать 10.06.2017 г.

Заказ №100

Тираж 100 экземпляров

Отпечатано в ООО «Копимастер»

ИНН 7721282097

КПП 772121001

Г. Москва, Рязанская пр., дом №10

+7(495)229-56-62