

КАЧЕСТВЕННЫЙ АНАЛИЗ ТЕПЛООВОГО РЕЖИМА РАБОТЫ БЕЗЭЛЕКТРОДНОЙ СЕРНОЙ ЛАМПЫ С СВЧ НАКАЧКОЙ

Г.И. ЧУРЮМОВ, Е.Н. ОДАРЕНКО, Т.И. ФРОЛОВА, Ю.Л. СТАРЧЕВСКИЙ,
В.П. ГЕРАСИМОВ, В.П. ИВАНЦОВ, А.И. ЭКЕЗЛИ

В данной работе рассмотрены тепловые режимы работы безэлектродной лампы с СВЧ накачкой. Показан энергетический баланс безэлектродной серной лампы с СВЧ накачкой. Описаны физические процессы, приводящие к перегреву и разрушению кварцевых колб. Предложены пути по снижению тепловой нагрузки колбы и обеспечению её теплового режима при работе лампы. Проведены измерения температуры колбы и показаны пути её регулирования.

Ключевые слова: серная лампа, СВЧ накачка, тепловой режим.

ВВЕДЕНИЕ

В последнее время внимание исследователей обращено на создание энергосберегающих источников излучения в оптическом диапазоне [1]. Ведется активная работа по созданию новых и совершенствованию существующих ламп. Среди перспективных конструкций таких ламп следует выделить безэлектродную серную лампу с накачкой СВЧ полем [2].

Интерес к безэлектродным серным лампам с СВЧ накачкой связан с рядом их преимуществ по сравнению с другими источниками света. Эти лампы обладают высокой светоотдачей (порядка 140 лм/Вт), квазисолнечным спектром излучения и большой эффективностью (до 25 %). Лампы накаливания, люминесцентные лампы, металлогалогенные лампы, светодиоды уступают безэлектродной серной лампе с СВЧ накачкой по энергетическим и спектральным характеристикам [1]. Конкурировать по светоотдаче с серной лампой может дуговая натриевая трубчатая (ДНАТ) лампа, которая обеспечивает освещение объектов преимущественно жёлтым светом и содержит в качестве рабочего вещества ртуть, что усложняет распознавание цветов и создаёт ряд опасных экологических проблем при утилизации таких ламп. Дуговые ртутные люминесцентные (ДРЛ) лампы и дуговые ртутные лампы с йодидами металлов (ДРИ) обладают лучшим спектром излучения, чем лампы ДНАТ, но имеют относительно низкую эффективность (не более 60 лм/Вт) [3].

Одной из причин, препятствующих повсеместному внедрению источников света на основе безэлектродной серной лампы с СВЧ накачкой, является проблема обеспечения её стабильной и долговечной работы. Перегрев колбы лампы приводит к её преждевременному разрушению и выходу из строя всей осветительной установки [4].

Целью данной работы является исследование физических эффектов, влияющих на тепловой режим работы безэлектродной серной лампы с СВЧ

накачкой, рассмотрение и улучшение конструктивных особенностей данной лампы, направленных на улучшение теплоотвода и повышение её эффективности.

1. ФИЗИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ РАБОТЫ БЕЗЭЛЕКТРОДНОЙ СЕРНОЙ ЛАМПЫ

Магнетрон генерирует электромагнитные колебания мощностью $P_{\text{СВЧ}} = 800$ Вт на частоте $f_{\text{СВЧ}} = 2450$ МГц. В резонаторе возбуждается электромагнитное поле на выбранном типе колебаний (при применении цилиндрического резонатора обычно выбирается E_{010} тип колебания). Колба лампы выполнена из кварцевого стекла и содержит инертный газ неон, находящийся под давлением $p_0 = 10^3$ Па. Лампа размещается в том месте резонатора, где напряженность электрической компоненты электромагнитного поля максимальна. Для возбуждения разряда неона в колбе необходимо, чтобы амплитуда напряженности электрической составляющей электромагнитного поля E_m и давление газа в колбе p удовлетворяли кривой Пашена. Для возбуждения разряда при меньших амплитудах напряженности электрического поля необходимо увеличивать его температуру и длину свободного пробега заряженных частиц, которая ограничивается характерным размером колбы. На минимальную амплитуду электромагнитного поля, при которой происходит разряд в газе, также влияет его частота и потенциал ионизации инертного газа [5, 6].

Особый интерес при изучении безэлектродного разряда в серной лампе представляют процессы ионизации, для описания которых воспользуемся микроскопическим подходом. Для этого предполагаем, что в начальный момент времени $t_0 = 0$ концентрация молекул неона в колбе равна:

$$n_0 = \frac{p_0}{k \cdot T_0} = 2,415 \cdot 10^{23} \text{ м}^{-3}, \quad (1)$$

где $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К – постоянная Больцмана; $T = 300$ °К. Нейтральные молекулы газа при своем движении испытывают соударения друг с другом. Количество соударений характеризуется длиной свободного пробега молекул, которая определяется как

$$\lambda = \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot \frac{1}{n_0 \cdot Q} = 6,72 \cdot 10^{-5} \text{ м}, \quad (2)$$

где $Q = 4.14 \cdot 10^{-20} \text{ м}^{-2}$ – эффективное газокинетическое сечение столкновений молекул неона.

Средняя скорость теплового (хаотического) движения молекул неона \bar{v}_T определяется из выражения

$$\bar{v}_T = \sqrt{\frac{8 \cdot k \cdot T_0}{\pi \cdot m_{Ne}}} \approx 560,914 \text{ м/с}, \quad (3а)$$

частота их столкновений равна

$$\nu = \sqrt{2} \cdot n_0 \cdot \bar{v}_T \cdot Q = 8,347 \cdot 10^6 \text{ Гц}. \quad (4)$$

В результате процесса ударной ионизации молекулы неона переходят в возбужденное состояние или ионизируются. При этом в объеме колбы образуются свободные заряженные частицы (электроны и ионы неона). Средняя тепловая скорость \bar{v}_e электронов определяется из выражения

$$\bar{v}_e = \sqrt{\frac{8 \cdot k \cdot T_0}{\pi \cdot m_e}} \approx 1,076 \cdot 10^5 \text{ м/с}, \quad (5)$$

где $m_e = 9,1096514 \cdot 10^{-31}$ кг – масса электрона. Эффективная частота столкновений молекул неона с электронами равна

$$\nu_{Ne-e} = n_0 \cdot \bar{v}_e \cdot Q = 1,132 \cdot 10^9 \text{ Гц}. \quad (6)$$

Длина свободного пробега электрона равна

$$\lambda = (n \cdot Q)^{-1} = 9,504 \cdot 10^{-5} \text{ м}. \quad (7)$$

Под действием внешнего СВЧ поля $\vec{E} = \vec{E}_0 \sin(\omega t)$ электрон осциллирует с амплитудой смещения

$$\Delta r = \frac{e \cdot E_0}{m \cdot \omega \cdot \sqrt{\omega^2 + \nu_{Ne-e}^2}} = 3,701 \cdot 10^{-3} \text{ м} \quad (8)$$

и амплитудой скорости

$$u_e = \frac{e \cdot E_0}{m_e \cdot \sqrt{\omega^2 + \nu_{Ne-e}^2}} = 5,697 \cdot 10^7 \text{ м/с}, \quad (9)$$

где $E = 5 \cdot 10^4$ В/м – амплитуда напряженности СВЧ поля, при которой происходит пробой; $e = 1,6021 \cdot 10^{-19}$ к – заряд электрона; $\omega = 2 \cdot \pi \cdot f_{свч} = 1,539 \cdot 10^{10}$ Гц – круговая частота СВЧ поля.

Проводимость плазмы с учётом полной ионизации определяется выражением:

$$\sigma_p = \frac{e^2 \cdot n_e \cdot \nu_{Ne-e}}{m_e \cdot (\omega^2 + \nu_{Ne-e}^2)} = 34029,82 \frac{1}{\text{Ом} \cdot \text{м}}, \quad (10)$$

где n_e – концентрация электронов в плазме. Эффективная глубина проникновения СВЧ поля в плазму вычисляется по формуле:

$$\delta = \frac{5.03}{\sqrt{\sigma_p \cdot f_{свч}}} = 5,509 \cdot 10^{-7} \text{ м}. \quad (11)$$

Плазменная частота определяется выражением:

$$\omega_p = \frac{n_e \cdot 4 \cdot \pi \cdot e^2}{m_e} = 2,844 \cdot 10^{13} \text{ Гц}. \quad (12)$$

Предельная концентрация электронов n_e^{\max} , при которой поле ещё не отражается от плазмы, определяется по формуле:

$$n_e^{\max} = \frac{m_e \cdot \omega^2}{4 \cdot \pi \cdot e^2} = 7,446 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-3}. \quad (13)$$

Это достигается при степени ионизации $2,928 \cdot 10^{-7}$, что соответствует тлеющему разряду.

Таким образом, свободные заряженные частицы (электроны и ионы неона) под действием внешнего электромагнитного поля совершают колебательные движения с частотой $f_{свч}$. Частицы, находящиеся вблизи внутренней поверхности стенок колбы на расстоянии не превышающем λ , бомбардируют их с потерей части кинетической энергии, которая переходит в тепловую энергию материала колбы и, как следствие, температура ее поверхности увеличивается. Повышение температуры приводит к росту давления внутри лампы и, как следствие, к дальнейшему росту частоты столкновений, степени ионизации газовой среды и появлению тлеющего газового разряда.

Важная роль в процессе формирования выходного спектра излучения безэлектродной серной лампы отводится рабочему веществу лампы – сере $S_2 - S_8$, которая в начальный момент находится в твердом состоянии, а с повышением температуры (при $T > T_S = 444,6$ °С, где T_S – температура сублимации серы) переходит в газообразное состояние с полиморфной структурой. Наличие такой структуры молекул серы обуславливает широкий спектр ее излучения на частотах

$$(\nu_{изл})_{S_2-S_8} = \frac{(\Delta E)_{S_2-S_8}}{h}, \quad (14)$$

где h – постоянная Планка; ΔE – энергия возбуждения молекул серы $S_2 - S_8$ свободными заряженными частицами ионизированной газовой среды. В результате наблюдается квазинепрерывный спектр излучения, приближенный к солнечному. Наибольшая интенсивность свечения с квазисолнечным спектром регистрируется при температуре колбы порядка $T_{\min} = 600$ °С [7].

С дальнейшим ростом температуры ($T > 1200$ °С) в газовой среде происходит распад молекулы серы на атомы, что ведет к изменению спектра излучения. Энергия диссоциации молекул серы $S_2 - S_8$ лежит в пределах 2,6–4,4 эВ. Поэтому энергия электронов в разряде не должна превы-

шать эту величину для обеспечения непрерывно-го квазисолнечного спектра свечения [8].

С другой стороны, генерация серной лампой излучения в ультрафиолетовом диапазоне частот (особенно в диапазоне температур от 460 °С до 640 °С [7]) позволяет предположить о существовании процесса переизлучения как результата взаимодействия генерируемой световой энергии со средой (пары серы + плазма), ее поглощения и переход во внутреннюю энергию среды с последующим переизлучением на частотах, отличных от частоты поглощенного излучения (ультрафиолетового излучения).

2. ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ БАЛАНС ИСТОЧНИКА СВЕТА С БЕЗЭЛЕКТРОДНОЙ СЕРНОЙ ЛАМПОЙ

Безэлектродная серная лампа является ключевым элементом осветительной системы, схема которой показана на рис. 1. Как видно, в состав экспериментальной установки для запуска безэлектродной серной лампы входят блок питания 1, СВЧ генератор – магнетрон 2, согласующее устройство 3, резонатор 4, колба лампы 5, содержащая рабочую смесь инертного газа (неона) и серы [9].

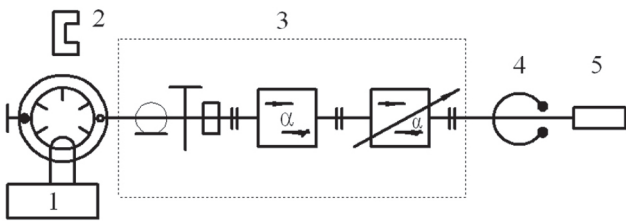


Рис. 1. Схема экспериментальной установки на основе безэлектродной серной лампы

Эффективность работы экспериментальной установки в целом зависит от функциональных особенностей и эффективности работы каждого элемента установки с учетом вносимых ими потерь энергии. В этом случае эффективность работы осветительной системы можно представить как

$$\eta_{\text{эфф}} = \eta_{\text{бп}} \cdot \eta_{\text{магн}} \cdot \eta_{\text{лампа}}, \quad (15)$$

где $\eta_{\text{бп}} \approx 0,98$ – эффективность работы блока питания; $\eta_{\text{магн}} = \frac{P_{\text{свч}}}{P_{\text{бп}}} \approx 0,7$ – коэффициент полезного действия (кпд) магнетрона (при условии, что коэффициент стоячей волны (кsw) в тракте не превышает 1,1.); $P_{\text{бп}}$ – мощность, потребляемая магнетроном от блока питания; $\eta_{\text{лампа}} = \frac{P_{\text{изл}}}{P_{\text{свч}}}$ – кпд лампы; $P_{\text{свч}}$ – мощность на выходе магнетрона; $P_{\text{изл}}$ – мощность излучения лампы.

В качестве источника СВЧ колебания используется магнетрон ОМ 75S(21) с выходной мощностью $P_{\text{свч}} = 800$ Вт. Отсюда мощность, которая пот-

ребляется от блока питания равна $P_{\text{бп}} \approx 1143$ Вт, мощность, потребляемая от сети $P_0 \approx 1166$ Вт, а мощность излучения лампы $P_{\text{изл}} \approx 286$ Вт.

Как показывает анализ механизма преобразования энергии в элементах установки, эффективность работы осветительной системы, по данным работ [10], равна $\eta_{\text{эфф}} = 0,25$. Из (15) следует, что эффективность преобразования энергии в лампе равна $\eta_{\text{лампа}} = 0,36$. Тогда мощность излучения лампы составляет $P_{\text{изл}} \approx 292$ Вт.

Легко показать, что необходимая для обеспечения работы лампы мощность равна $\Delta P = P_{\text{свч}} - P_{\text{изл}} = 508$ Вт. Данную мощность можно представить в виде

$$\Delta P = P_{\text{min}} + \Delta P_{\text{доп}}, \quad (16)$$

где P_{min} – минимальная мощность, подводимая к кварцевой колбе лампы и обеспечивающая устойчивую ее работу при температурах $T > T_{\text{min}}$; $\Delta P_{\text{доп}}$ – излишек мощности, который следует отводить от колбы лампы для обеспечения нормальной ее работы. Мощность $\Delta P_{\text{доп}}$ затрачивается на нагрев стенок колбы. При этом следует стремиться к уменьшению мощности $\Delta P_{\text{доп}}$ до значения, которое обеспечивает нагрев колбы лампы до температур $1200 \text{ °С} > T > T_{\text{min}}$. Важным условием является также поддержание данной температуры колбы постоянной, что позволит генерировать излучение с устойчивым выходным спектром.

3. СПОСОБЫ ОХЛАЖДЕНИЯ КОЛБЫ И ФИЗИЧЕСКИЕ МЕХАНИЗМЫ ИХ РЕАЛИЗАЦИИ

В источнике света на основе безэлектродной серной лампы с СВЧ накачкой применяются различные способы охлаждения элементов. Магнетрон охлаждается принудительным конвективным способом при помощи вентилятора, обеспечивающего скорость прокачки воздуха не менее 800 литров в минуту. Блок питания и СВЧ-тракт, как правило, не требуют специальных систем охлаждения, поскольку достаточно эффективно охлаждаются естественным путём. Кварцевая колба лампы в процессе работы имеет наиболее высокую рабочую температуру до 800–1000 °С. Процесс деформации колбы возникает при температуре 1250–1340 °С и зависит от марки применяемого кварцевого стекла КВ и КУ. Размягчение колбы происходит, соответственно, при температурах 1660–1700 °С [11].

Ввиду низкой теплопроводности кварца естественное охлаждение обеспечивается конвекцией и тепловым излучением. Излучение происходит со всего объёма стенки колбы и увеличивается с увеличением толщины стенки кварцевой оболочки. По оценкам работы [10], отводимая мощность путём естественной конвекции в зависимости от характерного размера колбы составляет 1,1–1,5 Вт/см² при 1000 °С, причём с увеличением характерного размера колбы отводимая мощность уменьшается.

Механизм охлаждения путём теплового излучения позволяет отводить мощность до 6 Вт/см^2 при $1000 \text{ }^\circ\text{C}$, причём с увеличением характерного размера колбы отводимая мощность увеличивается, поскольку она пропорциональна площади излучаемой поверхности.

Таким образом, для отвода излишков тепловой мощности $\Delta P_{\text{доп}}$ от сферической колбы естественным путём и поддержания её температуры на уровне $1000 \text{ }^\circ\text{C}$, как показывают предварительные расчеты, достаточно выполнить её с внешним радиусом $R_2 = 22 \text{ мм}$. Такой подход предполагает погрешность не более $10\text{--}15 \%$, поэтому для надёжной работы радиус колбы необходимо выбирать с соответствующим запасом.

При работе колбы в резонаторе электромагнитное поле взаимодействует с заряженными частицами разрядной плазмы и может существенно изменить равномерное распределение температуры на внутренней поверхности колбы. Кварц теряет прозрачность (в результате образования трещин) и механическую прочность, что ведёт к локальному разрушению оболочки. Участки разрушений колбы составляют единицы квадратных миллиметров. Также наблюдаются следы вдавливания размягчённого участка во внутрь колбы при остывании за счёт более высокого атмосферного давления по сравнению с давлением внутри колбы.

Для решения проблемы неравномерного нагрева участков кварцевой колбы применяется система вращения колбы с высокой частотой [2, 12]. В этом случае рабочая смесь под действием центробежной силы сосредотачивается вблизи внутренней поверхности на максимально возможном расстоянии от оси вращения, а потом разряд постепенно заполняет весь объём. Также для охлаждения колбы применяется метод принудительно-конвективного охлаждения [13, 4].

При циклических термических нагрузках ($200 \text{ }^\circ\text{C}\text{--}800 \text{ }^\circ\text{C}$) на поверхности колбы могут образовываться трещины глубиной до $0,5 \text{ мм}$ как с внутренней, так и с внешней стороны. Это вызвано наличием внутренних напряжений, поверхностных субмикротрещин и наличием молекул воды на поверхности колбы (см. рис. 2). В работе [14] предлагается проводить отжиг не готовых кварцевых деталей, а заготовок, чтобы после термообработки удалить трещины механическим путём либо травлением в плавиковой кислоте.

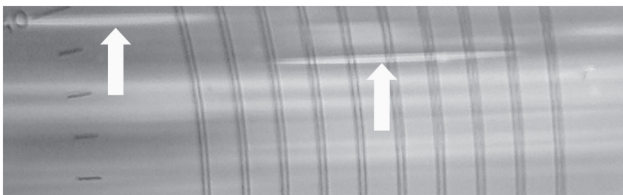


Рис. 2. Микротрещины в стенке кварцевой колбы

Важным вопросом является электромагнитная связь разряда с СВЧ полем, возбуждаемым в

резонаторе. Увеличение размеров колбы существенно влияет на распределение поля в резонаторе и выбранный тип колебаний. Появляются участки плазмы, которые испускают различное по спектральному составу излучение. Эти участки имеют различные электрические характеристики и по-разному поглощают энергию поля СВЧ накачки. Часть пространства колбы используется менее эффективно. При уменьшении размеров кварцевой колбы также ограничивается связь с СВЧ полем и потребляемая мощность, по сравнению с колбами, занимающими весь объём резонатора. В то же время изменение свойств внутреннего пространства резонатора автоматически ведёт к изменению его добротности, распределения и амплитуды СВЧ-поля. Уменьшение размера колбы приводит к снижению её температуры за счёт уменьшения связи с СВЧ полем и отражению части энергии.

Рассмотрим варианты выполнения кварцевых колб в составе источника света, позволяющие минимизировать наиболее опасные факторы, влияющие на перегрев колбы лампы без применения систем принудительного охлаждения колбы.

Часть колбы покрывается материалом, который обладает большим значением коэффициента теплопроводности и экранирует объём покрытой части колбы от влияния СВЧ поля накачки в резонаторе. Фактически таким материалом может быть металл [15].

Рассмотрим работу колбы в составе источника света. Разряд возбуждается под действием СВЧ поля в той части колбы, которая не покрыта материалом, экранирующим внутренний объём покрытой части колбы от СВЧ поля накачки в резонаторе. В экранированной части колбы разряд не возбуждается и её температура близка к температуре окружающей среды. Эта часть колбы с газом работает как термостат, который выводит тепло из разряда за счёт столкновений частиц газоразрядной плазмы с нейтральными молекулами, которые, в свою очередь, передают тепло через кварцевую стенку материалу покрытия, выполняющему функции радиатора, поскольку имеет большое значение коэффициента теплопроводности и эффективно выводит из колбы дополнительное тепло.

Для улучшения контакта колбы с материалом, который обладает большим значением коэффициента теплопроводности, можно использовать термопасту, которая уменьшает тепловое сопротивление контакта. Данный способ охлаждения был проверен экспериментально и оказался работоспособным. С его помощью удалось обеспечить стабильную, надёжную и длительную работу источника света.

Отметим, что металлическое покрытие на поверхности колбы не только изменяет степень связи плазменного разряда с СВЧ полем накачки, но и меняет параметры резонаторной камеры.

Рассмотрим различные резонаторы на основе коаксиальной линии, нагруженной на ёмкость, которые позволяют реализовать предложенный способ охлаждения на практике (рис. 3). Длина резонатора при фиксированных диаметрах стенок изменяется дискретно. С увеличением длины резонатора добротность уменьшается. Внутренний диаметр резонатора выбирается исходя из внешнего диаметра кварцевой колбы. Внешний радиус не должен превышать четверти длины волны СВЧ накачки ($R_2 < 30$ мм).

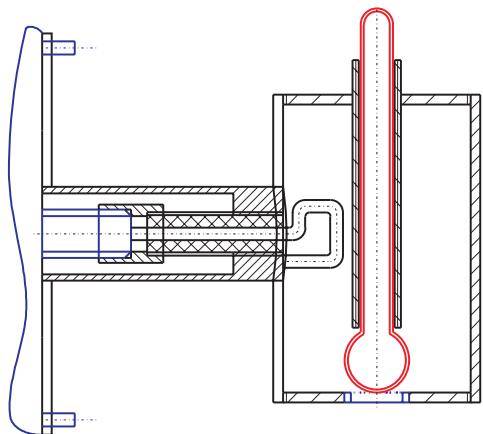


Рис. 3. Коаксиальный резонатор, нагруженный на ёмкость

Электрическое поле сосредоточено в ёмкостном зазоре, где размещается сферическая часть колбы. В этой части увеличивается средняя длина свободного пробега заряженных частиц, вероятность столкновений и снижается амплитуда электрического СВЧ поля, необходимая для возникновения разряда. Такая конструкция резонатора позволяет использовать колбы различной длины. С другой стороны, при такой конструкции колбы распределение температуры на ее поверхности вдоль продольной длины является неравномерным. Вблизи области плазменного разряда температура колбы значительно выше, чем на другом ее конце. Такой недостаток устраняется путём изменения формы кварцевой колбы с добавлением сферической части, объём которой значительно больше объёма, в котором происходит разряд (рис. 4). Сферическая часть более эффективно выполняет функции термостата, чем цилиндрическая часть такого же объёма.

К достоинствам резонатора в этой конструкции можно отнести высокую добротность, малые размеры разрядного промежутка, что позволяет рассматривать его как точечный источник света и наличие элемента для подстройки частоты. Сложности реализации заключаются в изменении параметров резонатора при возникновении разряда, а также за счёт элементов ввода энергии и отверстий для вывода света.

Рассмотрим работу цилиндрических кварцевых колб в объёмных резонаторах. Эти колбы широко применяются в осветительной технике, поскольку они просты в изготовлении. Сложности их

использования в источниках света с СВЧ накачкой связаны с тем, что в резонаторных камерах устанавливается распределение амплитуд, приводящее к неравномерной накачке, и, как следствие, к свечению разной интенсивности и спектра различных участков колбы. С другой стороны, в резонаторных камерах иногда устанавливаются колебания сразу нескольких видов колебаний, что приводит к более равномерной накачке. Перераспределение давления внутри колбы также приводит к сглаживанию неравномерности свечения. При удалении от источника света неравномерность свечения становится невидимой.

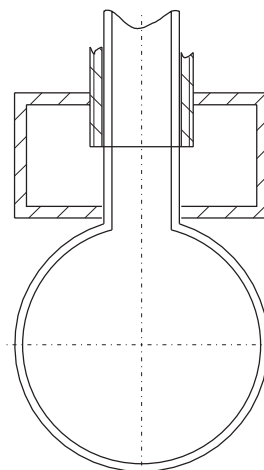


Рис. 4. Коаксиальный резонатор, нагруженный на ёмкость с колбой-термостатом

При работе цилиндрической колбы теплоотдача в окружающее пространство происходит через всю её поверхность, она занимает большее пространство и эффективнее поглощает энергию СВЧ поля, чем точечные источники света.

Один из возможных вариантов конструкции СВЧ-тракта для возбуждения в цилиндрическом резонаторе вида колебаний E_{010} представлен на рис. 5. Отличительной чертой данной конструкции является возбуждение резонатора с помощью проводника с током (штыря), который обеспечивает согласование резонатора с волноводом. Это исключает возможность возбуждения H_{111} вида, имеющего более низкую собственную частоту. Кроме этого одновидовость обеспечивается выбором отношения длины резонатора к его радиусу менее 2,03 [16].

Было проведено измерение температуры колбы на начальной стадии работы лампы. Датчик температуры Т1 был размещён в стенке запредельного волновода на поверхности колбы и защищён от воздействия СВЧ излучения. Измерение температуры проводилось прибором АРА106 с погрешностью 1 °С. Мощность СВЧ накачки регулировалась входным напряжением, которое изменялось от 220 до 180 В. Из графиков (рис. 6) видно, что при большем напряжении питания нагрев происходит за меньшее время. Уменьшая напряжения питания, можно наблюдать за ди-

намикой нагрева и регулировать интенсивность свечения лампы.

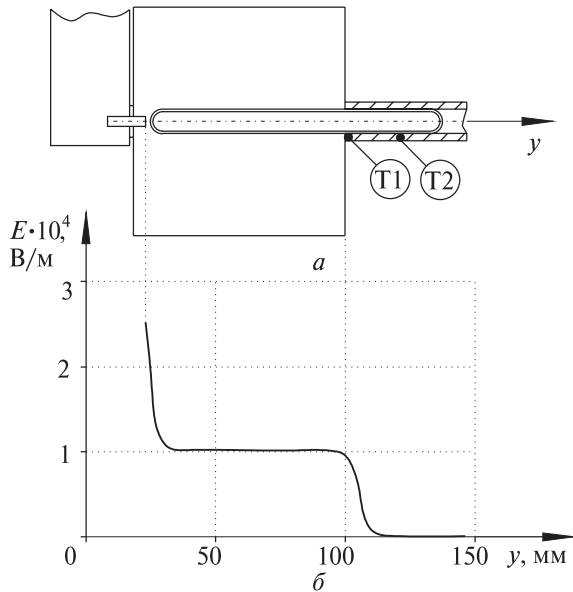


Рис. 5. Возбуждение цилиндрического резонатора на виде колебаний E_{010}

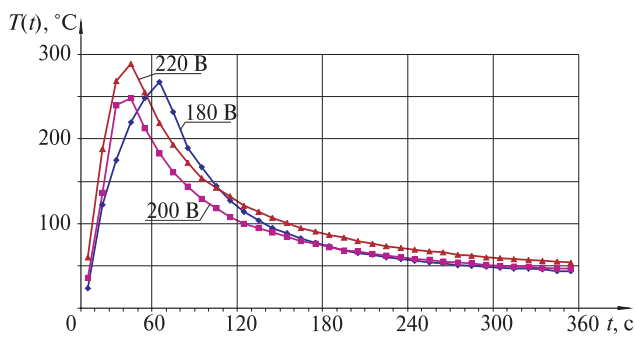


Рис. 6. Зависимость температуры колбы от времени при различных напряжениях питания установки

На рис. 7 представлены экспериментальные зависимости изменения температуры по длине лампы. Датчик температуры поочередно размещался в точках T1 и T2, расстояние между которыми 2 см (рис. 5, а). Как видно, температура в точке T1 может во время работы отличаться от температуры в точке T2 более, чем на 100 °С. Это вызвано малой теплопроводностью стекла и наличием металлической пластины вблизи точки T1, которая выполняет функции радиатора и эффективно отводит тепло от колбы. Остывание колбы в окрестности точки T1 также происходит медленнее, благодаря большой теплоёмкости радиатора. Точка T2 имеет тепловой контакт с тонкой металлической трубкой с малой теплоёмкостью, поэтому колба в этом месте быстрее нагревается и быстрее остывает, чем в точке T1 несмотря на различные расстояния от края резонатора. Полученные результаты измерения позволяют сделать вывод, что можно эффективно отводить тепло от экранированной части колбы, используя радиатор.

Спектр излучения регистрировался спектрометром «USB 2.0 Fiber Optical Spectrometer», который фиксировал линию излучения неона 640 нм.

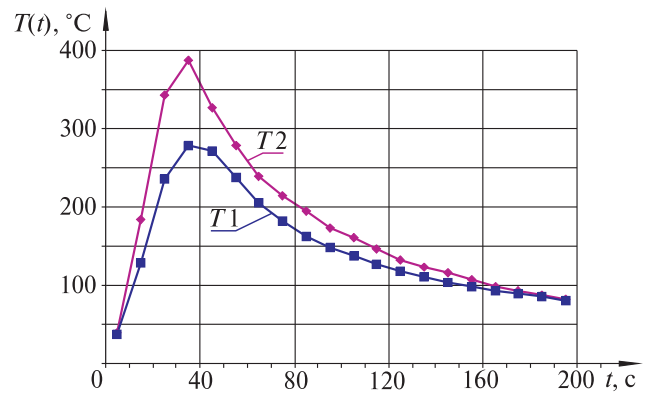


Рис. 7. Зависимость температуры колбы от времени в точках T1 и T2

Исследуем влияние возбуждающего штыря, кварцевой колбы и держателя на распределение E_{010} вида колебания в цилиндрическом СВЧ резонаторе. Наличие в резонаторе дополнительных элементов сдвигает его резонансную частоту на $\Delta f_1 = -35$ МГц, что требует наличие дополнительного устройства подстройки частоты. Увеличения резонансной частоты резонатора можно добиться путем вытеснения магнитного поля электропроводящим телом [16]. Однако эффективность такой подстройки мала (не более $\Delta f_2 = +10 \div 15$ МГц) и ведет к усложнению конструкции. Другой путь – выбор такого радиуса резонатора, при котором резонансная частота будет больше частоты генерации магнетрона на Δf_1 .

На рис. 5, б представлены результаты моделирования распределения амплитуды электрического СВЧ поля вдоль продольной оси цилиндрического резонатора от торца возбуждающего штыря до окончания держателя лампы.

Как видно, амплитуда напряженности электрического поля имеет максимум вблизи возбуждающего штыря, что облегчает возбуждение разряда в лампе. При удалении от штыря поле быстро падает и становится практически однородным по всей длине резонатора. Эту область можно использовать для обеспечения равномерного свечения разряда в цилиндрической колбе по всей длине. Затем электрическое СВЧ-поле быстро убывает до нуля внутри держателя, который представляет собой цилиндрический запердельный волновод. Длина держателя должна быть более 20 мм, чтобы СВЧ поле оставалось внутри резонатора и отсутствовало излучение в окружающее пространство.

Оценочные расчеты уровня ионизации показывают, что существуют режимы, при которых внутри колбы амплитуда напряженности электрического поля в поперечном сечении практически не изменяется. Амплитуда напряженности электрического поля в поперечном сечении резонатора имеет максимум на оси y и падает возле стенок.

Использование цилиндрического резонатора с видом колебаний E_{010} позволяет расположить колбу параллельно вектору электрического поля

и снизить таким образом температуру колбы за счёт снижения числа ударов заряженных частиц о её стенки.

Горизонтальное расположение колбы имеет ряд преимуществ. Упрощается крепление колбы в стенках резонатора, нет необходимости делать это консольно (в одной точке). Появляется возможность расположить несколько колб по высоте так, чтобы сферическая часть попадала в максимум электрического поля резонатора (рис. 8). Это облегчает возбуждение разряда за счёт увеличения длины свободного пробега частиц и увеличения электромагнитной связи разряда с полем СВЧ накачки.

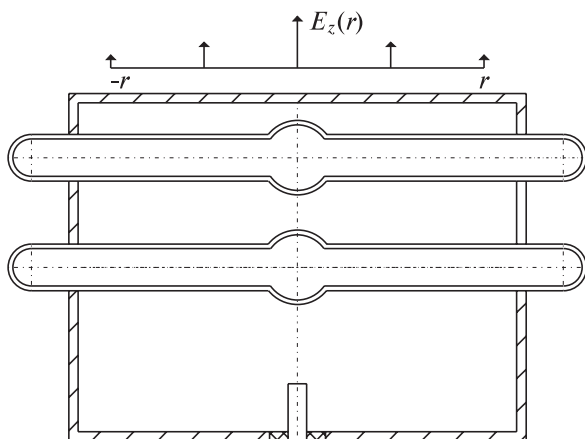


Рис. 8. Горизонтальное расположение колб в цилиндрическом резонаторе

При удалении от оси резонатора амплитуда поля уменьшается, поэтому края колбы имеют меньшую температуру и позволяют охлаждать изнутри сферическую часть колбы, путём обмена частиц. Мощность СВЧ поля накачки расходуется на несколько колб, что приводит к их меньшему разогреву и улучшению теплового режима.

ВЫВОДЫ

В данной работе представлен качественный анализ теплового режима работы и рассмотрены физические принципы работы безэлектродной серной лампы. Показано, что результатом ударной ионизации является образование в колбе лампы плазмы в виде тлеющего разряда, а процесс генерации оптического излучения обусловлен как возбуждением молекул серы ускоренными СВЧ полем заряженными частицами образованной плазмы, так и явлением переизлучения световой энергии средой (пары серы + неон) на частотах, отличных от частоты поглощенного ультрафиолетового излучения (область «малых» температур до 600 °С).

Анализ физики работы лампы показывает, что процесс нагрева колбы до 460–640 °С является необходимым и достаточным для нормальной ее работы. Дальнейшее увеличение температуры ухудшает эффективность работы лампы и приводит к росту тепловых потерь. Оценка энергетического баланса показывает, что в лампе и узлах ее конструкции выделяется в виде тепла более

60% от подводимой СВЧ мощности. Представлен анализ причин разрушения кварцевой колбы, вызванный процессом нагревания.

Исследована динамика разогрева колбы до 400 °С. Эта температура достигается менее, чем за минуту. Процесс остывания колбы до температуры 50 °С занимает 5 минут. Установлено, что улучшению теплоотвода способствует контакт лампы с резонатором, который выполняет функции радиатора. Часть тепла из колбы отводится благодаря взаимодействию частиц из разряда с нейтральными молекулами, находящимися в экранированной от СВЧ поля части колбы. Температура поверхности колбы в различных точках при фиксированной мощности накачки может отличаться более чем на 100 °С.

Проведены измерения температуры при различных напряжениях питания, показаны способы управления динамикой разогрева колбы. Установлено, что процесс нагревания с уменьшением напряжения происходит дольше и в этом режиме можно наблюдать поэтапное развитие разрядного процесса.

Рассмотрены физические механизмы естественного и принудительного охлаждения колбы лампы и их сочетание.

Литература.

- [1] Шлифер Э.Д. Некоторые особенности и проблемы создания осветительных и облучательных устройств на базе безэлектродных газоразрядных ламп с СВЧ накачкой. — Светотехника, 1999, № 1, с. 6-9.
- [2] Гутцайт Э.М. Безэлектродные источники света, использующие электромагнитную энергию высоких и сверхвысоких частот // Радиотехника и электроника. — 2003. — Т. 48, №1, С. 5–38.
- [3] Ефимкина В.Ф., Софронов Н.Н. Светильники с газоразрядными лампами. — М.: Энергоатомиздат, 1984. — 104 с.
- [4] Michael G. Ury, Charles H. Wood. Method and Apparatus for cooling Electrodeless Lamps, USA Patent # 4,695,757 (1987), PP 6.
- [5] Мик Дж. М., Крэгс Дж. Д. Электрический пробой в газах. — М.: Издательство иностранной литературы, 1960. — 605 с.
- [6] Макдональд А.Д. Сверхвысокочастотный пробой в газах. — М.: Мир, 1969. — 206 с.
- [7] Козлов А.Н., Ляхов Г.А., Павлов Ю.В., Резников А.Е., Умарходжаев Р.М., Шлифер Э.Д. СВЧ и ВЧ возбуждение разряда в парах серы с неона // Письма в ЖТФ. — 1999. — Т. 25, № 13. — С. 27-33.
- [8] Шукин А.Ю. СВЧ-разряд в аргон-серной смеси в высокоэффективном источнике света с малой мощностью питания: Диссертация на соискание учёной степени кандидата технических наук: 01.04.13. — Москва, 2009. — 95 с.
- [9] Мачехин Ю.П., Чурюмов Г.И., Одаренко Е.Н., Фролова Т.И., Старчевский Ю.Л., Экезли А.И. Безэлектродная серная лампа с СВЧ-накачкой // Светотехника. — 2008. — №3. — С. 9-14.
- [10] Прокопенко А.В. Разработка высокоэффективных источников видимого света на базе серных ламп: Диссертация на соискание учёной степени кандидата технических наук: 01.04.13. — Москва, 2001. — 152 с.

- [11] ГОСТ 15130-86.
- [12] *Brian Turner, Mohammad Kamarehi, Leslie Levine, Michael G. Ury* Electrodeless Lamp with Improved Efficacy, USA Patent # 5,831,386 (1998), PP 7.
- [13] *Ury M. G., Wood C. H., Dolan J. T.* Lamp including sulfur, USA Patent # 5,404,076 (1995), PP 9.
- [14] *Лунин Б.С., Торбин С.Н.* Образование дефектов поверхности кварцевого стекла при термообработке // Вестник Московского университета. Сер. 2. Химия. – 2005. – Т. 46, № 6. – С. 378-381.
- [15] Рішення про видачу деклараційного патенту на корисну модель Заявка № u 2009 08270. Вхідний номер листа 19 жовтня 2009 №11711/1 Україна, МПК (2009) H01J 65/04, H05B 41/24. Пристрій для освітлення на основі безелектродної лампи з НВЧ-накачкою: *Г.І.Чурюмов, Ю.П. Мачехін, Ю.Л. Старчевський*; Харківський національний університет радіоелектроніки; Заявл. 05.08.2009.
- [16] *Никольский В.В., Никольская Т.И.* Электродинамика и распространение радиоволн. – М.: Главная редакция физико-математической литературы, 1989. – 607 с.



Поступила в редколлегию 19.04.2010

Чурюмов Геннадий Иванович, доктор физико-математических наук, профессор. Область научных интересов: математическое моделирование вакуумных приборов СВЧ; теория и техника СВЧ, применение СВЧ технологий.



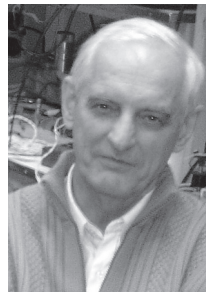
Одаренко Евгений Николаевич, кандидат физико-математических наук, с.н.с., доцент кафедры ФОЭТ ХНУРЭ. Область научных интересов: многомерные теоретические модели электровакуумных приборов мм диапазона; численное моделирование физических процессов в сложных электронно-волновых системах.



Фролова Татьяна Ивановна, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры ФОЭТ ХНУРЭ. Область научных интересов: разработка трехмерных математических моделей вакуумных приборов; численное моделирование нелинейных процессов в нетрадиционных приборах со скрещенными полями; проектирование новых электронных СВЧ-приборов.



Старчевский Юрий Львович, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры ФОЭТ ХНУРЭ. Область научных интересов: разработка трехмерных математических моделей электронных приборов; моделирование нелинейных физических процессов в мощных приборах СВЧ; математическое моделирование генерации мощных электронных пучков.



Герасимов Владимир Петрович, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры ФОЭТ ХНУРЭ. Область научных интересов: моделирование физических процессов в электронных приборах и устройствах; автоматизированное компьютерное проектирование СВЧ-приборов.



Иванцов Валентин Петрович, инженер кафедры ФОЭТ ХНУРЭ. Область научных интересов: разработка и исследование электронных приборов; современные источники света.



Экезли Андрей Игоревич, аспирант кафедры ФОЭТ ХНУРЭ. Область научных интересов: разработка трехмерных математических моделей электронных приборов; исследование СВЧ-трактов для улучшения работы магнетронов.

УДК 621.385.12, 621.385.64, 621.385.8

Якісний аналіз теплового режиму роботи безелектродної сіркової лампи з НВЧ накачкою / Г.І. Чурюмов, Є.М. Одаренко, Т.І. Фролова, Ю.Л. Старчевський, В.П. Герасимов, В.П. Иванцов, А.І. Екезлі // Прикладна радіоелектроніка: науч.-техн. журнал. – 2010. Том 9. № 2. – С. 232-239.

У даній роботі розглянуті теплові режими роботи безелектродної лампи з НВЧ-накачкою. Показаний енергетичний баланс безелектродної сіркової лампи з НВЧ-накачкою. Описані фізичні процеси, що призводять до перегріву та виходу з ладу кварцових колб. Запропоновані шляхи по зменшенню теплового навантаження колби та забезпеченню її теплового режиму при роботі лампи. Проведені вимірювання температури колби та показані шляхи її регулювання.

Ключові слова: сіркова лампа, НВЧ накачка, тепловий режим.

Лл. 8. Бібліогр.: 19 найм.

UDC 621.385.12, 621.385.64, 621.385.8

Qualitative analysis of the thermal regime of an electrodeless sulphuric lamp with microwave pumping / G.I. Churyumov, Ye.N. Odarenko, T.I. Frolova, Yu.L. Starchevskiy, V.P. Gerasimov, V.P. Ivantsov, A.I. Ekezli // Applied Radio Electronics: Sci. Mag. – 2010. Vol. 9. № 2. – P. 232-239.

Thermal modes of operation of an electrodeless lamp with microwave pumping are considered in this paper. Energy balance of the electrodeless sulphuric lamp with microwave pumping is shown. Physical processes that lead to overheat and damage of quartz retorts are described. Some ways of reducing the thermal loading of a retort and providing its thermal regime during the operation of the lamp are offered. Measurements of the retort temperature are executed and ways of adjusting the retort temperature are considered.

Key words: sulphuric lamp, microwave pumping, thermal regime.

Fig. 8. Ref.: 19 items.