

## **ВЫБОР МАТЕРИАЛА ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ КОЛБЫ БЕЗЭЛЕКТРОДНОЙ СВЧ-ЛАМПЫ**

### **Введение**

Источники света играют важную роль в жизни человека, поэтому развитие технологий по созданию нового более эффективного искусственного освещения очень перспективное направление. К современным требованиям источников света относят экономичность, долговечность, стабильность выходных параметров (цветопередачи, световой эффективности и др.) ламп на протяжении всего периода эксплуатации. Поэтому в настоящее время создаются высокоинтенсивные источники света [1], основанные на безэлектродном возбуждении плазменного разряда в инертном газе с добавками серы, щелочноземельных металлов и других элементов. Возбуждение наполнителя ламп осуществляется СВЧ полем. Сейчас доступны источники света со световым потоком от 10000 до 130000 Лм и более.

Плазменные источники света известны достаточно давно, однако их интенсивное развитие началось около пяти лет назад. Сегодня в мире в этом направлении работают три-четыре фирмы. Среди которых фирма LG Южная Корея и LUXIM США.

При многих достоинствах безэлектродных источников света (высокая светоотдача, КПД, долговечность, цветопередача и т.д.) существуют также недостатки, среди которых температурный режим работы лампы, который влияет на стабильность и долговечность работы осветительного устройства. Поэтому эти источники света не нашли широкого применения на сегодняшний день.

Температурный режим работы безэлектродной лампы главным образом зависит от температуры нагрева колбы лампы, которая влияет на выбор материала и конструкцию самого устройства (наличие или отсутствие блока вращения колбы лампы). Поэтому необходимо определить ряд оптимальных параметров (критическую температуру плавления, теплопроводность, оптические свойства и др.) для используемого материала при изготовлении колб.

### **Постановка задачи**

В реальных лампах всегда наблюдается неравномерность распределения температуры по поверхности колбы, которая зависит от неравномерности нагрева и других факторов. Строгое решение уравнения баланса с учетом всех этих обстоятельств может быть выполнено только на ЭВМ путем численного решения конечно-разностной системы уравнения при задании начальных и граничных условий. Однако строгое решение достаточно сложно и трудоемко, тем более в двух- и трехмерном пространстве, кроме того, для решения требуется соответствующая ЭВМ. Поэтому изначально для многих инженерных задач более рационально иметь приближенные решения с приемлемыми в каждом конкретном случае допущениями либо использовать для создания модели взаимосвязанных физических процессов с распределенными параметрами современные пакеты моделирования (среды разработки), такие как: ANSYS, COMSOL Multiphysics, Maxwell и др. Все эти программные продукты используют для решения метод конечных элементов (МКЭ), который широко используется для решения задач механики деформируемого твердого тела, теплообмена, гидродинамики, электродинамики и др.

Безэлектродная лампа с СВЧ-накачкой представляет собой кварцевую колбу (рис. 1), внутри которой находится буферный газ (аргон или неон) и кристаллическая сера. Система накачки включает в себя магнетрон с блоком питания, СВЧ-тракт, состоящий из волновода и резонатора, выполненного в виде сетки, внутрь которого помещена лампа [2]. В процессе

работы температура колбы горелки достаточно высокая, отсюда возникает необходимость использования высококачественного кварцевого стекла и защиты ее от пыли.

Температура поверхности колбы в такой лампе может достигать  $\sim 1000^\circ\text{C}$ , поэтому обеспечение приемлемого теплового режима работы лампы является важной задачей [3]. При длительной работе безэлектродной серной лампы происходит повышение температуры плазмы. Стенки колбы имеют меньшую температуру, чем температура паров серы внутри колбы. В результате наблюдается процесс осаждения серы на внутренней поверхности колбы. Нужно отметить, что по мере распределения серы по поверхности колбы увеличивается площадь контакта серы с буферным газом. В этом случае при последующем включении лампы загорается быстрее.

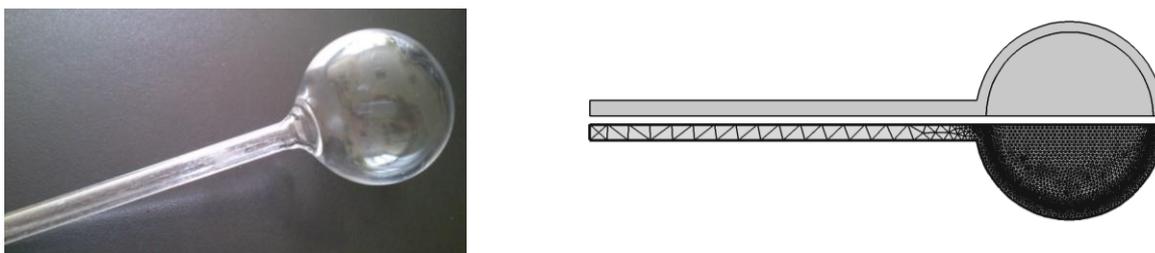


Рис. 1. Внешний вид колбы безэлектродной лампы и ее модель

Материал колбы лампы должен удовлетворять таким основным требованиям:

- быть прозрачным в видимом диапазоне (380 – 780 нм);
- обладать газонепроницаемостью при рабочей температуре не превышающей  $1000^\circ\text{C}$ ;
- допускать работу при температурах, требуемых условиями разряда и эксплуатации;
- обладать химической стойкостью по отношению к веществам, в которых происходит разряд при рабочих температурах, и не взаимодействовать с ними;
- не выделять веществ, нарушающих работу лампы;
- допускать возможность придания ему формы различных оболочек и обладать способностью сохранять полученную форму;
- обладать при рабочих температурах механической прочностью, достаточной для того, чтобы выдерживать внешние и внутренние давления, необходимые для работы лампы;
- быть достаточно дешевым и технологичным для изготовления колб и т. д.

Основным материалом, применяемым для изготовления колб разрядных ламп, являются различные сорта неорганических стекол. В качестве основного стеклообразующего оксида используется оксид кремния, который обычно составляет от 50 до 100 %. Обычные сорта стекол могут работать при температурах не превышающих  $200^\circ\text{C}$ , а температура размягчения кварцевого стекла составляет около  $1600^\circ\text{C}$ . Хорошие сорта стекол могут работать многие сотни часов при рабочих температурах до  $950^\circ\text{C}$ . Механическая прочность кварцевого стекла находится на уровне прочности лучших стекол:  $\sigma_z = 700 \div 1200 \text{ кгс/см}^2$ .

Существуют различные марки кварцевого оптического стекла [4], которые делятся по области спектрального пропускания – КУ-1, КУ-2, КВ, КИ, КУВИ. Кварцевое стекло имеет весьма низкий температурный коэффициент линейного расширения, слабо возрастающий с температурой ( $\alpha \approx 6 \cdot 10^{-7} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ ), что обеспечивает его очень высокую термическую устойчивость. С другой стороны, малый температурный коэффициент расширения затрудняет создание достаточно удобных в производстве и надежных вакуумно-плотных спаев, поскольку ни один металл при температуре размягчения кварца не имеет такого низкого коэффициента расширения. Также серьезным недостатком силикатных стекол и кварцевого стекла является их слабая устойчивость по отношению к разряду в парах щелочных металлов при высоких температурах.

Однако появление новых материалов, обладающих более высокими рабочими температурами (до 1600 °С) и устойчивых к воздействию паров щелочных металлов вплоть до 1500 С, таких как поликристаллический оксид алюминия  $Al_2O_3$  особой чистоты, известный под названиями «поликор», «люкор» и др., дало возможность создания ряда ламп высокого давления с парами щелочных металлов. Поэтому, чтобы обеспечить оптимальный тепловой режим безэлектродных ламп, необходимо определить критические параметры для материала.

Разогрев внутренней поверхности колбы осуществляется конвективным и кондуктивным способами. Конвективный теплообмен обусловлен ударами ионов серы и буферного газа о стенки колбы. Энергия этих ударов пропорциональна температуре плазмы. Кондуктивный теплообмен обусловлен непосредственным контактом осажденной серы и стекла. Отвод тепла от стенок колбы осуществляется конвекционными потоками воздуха с внешней стороны стеклянной колбы.

В случае возникновения локального перегрева поверхности стекла наблюдается его размягчение. Поскольку атмосферное давление на два порядка выше давления внутри лампы, то разогретый участок вдавливается во внутрь лампы и образуется отверстие диаметром около 2 мм. При нарушении герметичности стенок колбы свечение лампы прекращается.

Улучшить тепловой режим работы лампы можно путем увеличения отводимой энергии от внешней поверхности колбы. Но этот путь решения проблемы предполагает снижение эффективности работы лампы. Другой более рациональный путь основан на частичном устранении переноса тепла на внутреннюю поверхность колбы. Если количество серы уменьшить до уровня, чтобы в рабочем режиме она полностью испарялась, то процесс кондуктивного теплообмена будет устранен. Конвективный процесс разогрева колбы менее опасен, поскольку он происходит равномерно по всей поверхности колбы.

Определим конструктивные размеры колбы в зависимости от требуемого температурного режима. Для упрощения задачи примем, что температуры на внутренней и внешней поверхностях колбы постоянны и градиент температур направлен нормально к поверхности; охлаждение с внешней поверхности происходит по закону Ньютона.

При этих допущениях тепловой поток  $Q$  через поверхность стенки колбы будет определяться [5] так:

$$Q = -\chi \cdot (dT / dr) \cdot S, \quad (1)$$

где  $(dT / dr)$  – градиент температуры в стенке колбы нормальный к поверхности  $S$ ;  $\chi$  – коэффициент теплопроводности, зависящий от координат и температуры.

Для внешней поверхности цилиндрической и сферической колбы имеем соответственно:

$$Q_{цл} = \alpha(T_2 - T_0) \cdot 2\pi r_2 \quad \text{и} \quad Q_{сф} = \alpha(T_2 - T_0) \cdot 4\pi r_2^2, \quad (2)$$

где  $\alpha$  – полный коэффициент внешнего теплообмена поверхности колбы с окружающей средой;  $r_2$  – внешний радиус колбы;  $T_2$  – температура внешней поверхности колбы;  $T_0$  – температура окружающей среды.

Полученные графики зависимости теплового потока с внешней поверхности колбы в зависимости от изменения радиуса цилиндра единичной длины (1) или сферы (2)  $r$  в соответствии с формулами (2) показан на рис. 2.

Как видно из рис. 2, охлаждение внешней поверхности колбы эффективнее будет происходить цилиндрической колбы, нежели сферической.

Коэффициент пропускания кварцевого стекла в видимой области составляет 90 %. Полосы погло-

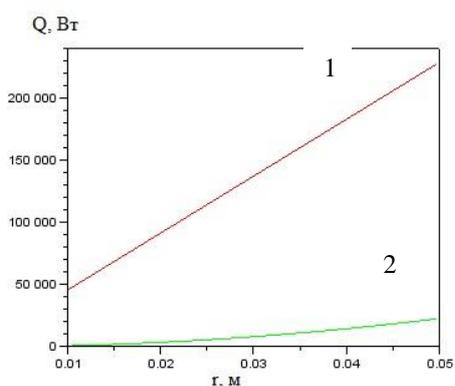


Рис. 2. График зависимости теплового потока от размера колбы

щения расположены в диапазонах длин волн 170 – 250 нм, 2100 – 2300 нм и 2600 – 2800 нм. В диапазоне от 5 до 50 мкм кварцевое стекло непрозрачно. Полосы поглощения, обусловлены разогревом примесей и микровключений [4].

В полосе частот 2,6 – 2,8 мкм и 5 – 50 мкм кварцевая оболочка представляет собой черное тело с коэффициентом поглощения близким к единице. Определим температуру, при которой максимум излучаемой энергии оболочки приходится на диапазон 2,6 – 2,8 мкм ( $\lambda_m = 2.7 \cdot 10^{-6}$  м). Для этого воспользуемся законом смещения Вина:

$$T = \frac{b}{\lambda_{\max}} = \frac{2,9 \cdot 10^{-3}}{2,7 \cdot 10^{-6}} = 1074 \text{ K} = 801 \text{ }^\circ\text{C}, \quad (3)$$

где  $b = 2.9 \cdot 10^{-3}$  м;  $K$  – постоянная Вина.

Рассчитанная температура является допустимой, поскольку она ниже температуры плавления кварца более чем на 200 градусов. Кроме того, при данной температуре кварцевое стекло восстанавливает свои свойства в случае возникновения нарушений.

Определим энергетическую светимость  $M$  в полосах частот  $\lambda_1 = 2,6 \cdot 10^{-6}$  м,  $\lambda_2 = 2,8 \cdot 10^{-6}$  м, и  $\lambda_3 = 5 \cdot 10^{-6}$  м,  $\lambda_4 = 5 \cdot 10^{-5}$  м, которая является интегралом от универсальной функции Кирхгофа  $f(\lambda, T)$  в заданном спектральном диапазоне:

$$M(T) = \int_{\lambda} f(\lambda, T) d\lambda, \quad (4)$$

$$M = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{2 \cdot \pi \cdot c^2 \cdot h}{\lambda^5 \cdot \left( \exp\left(\frac{h \cdot c}{\lambda \cdot k \cdot T}\right) - 1 \right)} d\lambda + \int_{\lambda_3}^{\lambda_4} \frac{2 \cdot \pi \cdot c^2 \cdot h}{\lambda^5 \cdot \left( \exp\left(\frac{h \cdot c}{\lambda \cdot k \cdot T}\right) - 1 \right)} d\lambda = 12720 \text{ (Вт/м}^2\text{)}, \quad (5)$$

где  $h = 6.6256 \cdot 10^{-34}$  Дж·с – постоянная Планка;  $c = 2.997925 \cdot 10^8$  м/с – скорость света;  $k = 1.38054 \cdot 10^{-23}$  Дж/К – постоянная Больцмана.

Определим мощность  $P$ , которая может быть отведена с поверхности кварцевой оболочки радиусом  $R = 1,8 \cdot 10^{-2}$  м путем излучения.

$$P = M \cdot 4 \cdot \pi \cdot R^2 = 12720 \cdot 4 \cdot \pi \cdot (1,8 \cdot 10^{-2})^2 = 51,786 \text{ Вт}. \quad (6)$$

Построим зависимость излучаемой мощности от внешнего радиуса поверхности кварцевой оболочки (рис. 3).

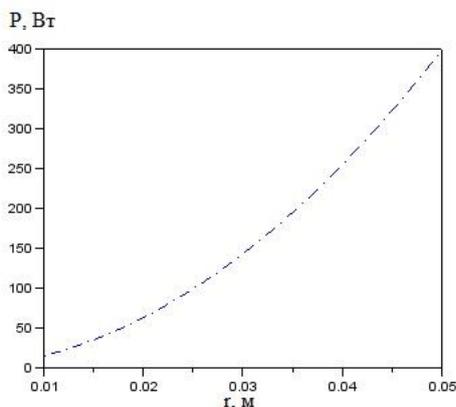


Рис. 3. Зависимость излучаемой мощности от внешнего радиуса поверхности кварцевой оболочки

Из рис. 3 видно, что с увеличением радиуса поверхности колбы можно увеличить излучаемую мощность до нескольких сотен ватт, что позволит исключить разрушение кварцевой оболочки лампы в результате перегрева.

На сегодняшний день колба безэлектродной серной лампы изготавливается из кварцевого стекла, которое рассчитано на высокие температуры. Толщина колбы примерно 2 мм. Большинство стекол не пропускает длинноволновое излучение с длинами волн более 2,7 мкм из-за сильного поглощения излучения ионами ОН. Стекла на основе плавленного кварца хорошо пропускают излучение с длинами волн до 5 мкм; за этим предельным значением поглощение обусловлено колебательным спектром связи Si-O.

### **Выводы**

В результате теоретического исследования показана необходимость выполнения определенных требований при выборе материала для изготовления колбы безэлектродной СВЧ-лампы, так как от этого зависит температурный режим всего устройства. Перенос теплоты может осуществляться тремя способами: теплопроводностью, конвекцией и излучением, или радиацией и зависит от физических свойств тела, от его геометрических размеров, а также от разности температур между различными частями тела. Температурные поля колбы могут быть найдены путем решения уравнений их теплового баланса с соответствующими начальными и граничными условиями.

Строгое решение нахождения распределения температуры по поверхности колбы, которая зависит от неравномерности ее нагрева, достаточно сложная задача. Она требует применения современных пакетов моделирования (например, Comsol), поэтому в настоящей работе на первом этапе было использовано уравнение теплопроводности с определенными допущениями и найдено его решение для колб цилиндрической и сферической форм. Расчет для безэлектродной лампы с СВЧ-накачкой показал, что тепловой поток и излучаемая мощность зависят от внешнего радиуса колбы, поэтому необходимо более подробного изучения тепловых процессов происходящих при длительной работе лампы.

**Список литературы:** 1. Гутцайт Э.М. Безэлектродные источники света, использующие электромагнитную энергию высоких и сверхвысоких частот // Радиотехника и электроника. – 2003. – Т.48, № 1, С. 5-38. 2. Колзлов А.Н., Ляхов Г.А. и др. СВЧ и ВЧ возбуждение ВЧ разряда в парах серы с неона // Письма в ЖТФ. – 1999. – Т. 25. Вып. 13. – С. 27-33. 3. Чурюмов Г.И., Одаренко Е.Н., Фролова Т.И., Старчевский Ю.Л., Герасимов В.П., Иванцов В.П., Экезли А.И. Качественный анализ теплового режима работы безэлектродной серной лампы с СВЧ накачкой // Прикладная радиоэлектроника. – 2010. – Т. 9, № 2. – С. 232-239. 4. ГОСТ 15130-86 «Стекло кварцевое оптическое». 5. Рохлин Г.Н. Разрядные источники света. – М. : Энергоатомиздат, 1991. – 720 с.

*Харьковский национальный  
университет радиоэлектроники*

*Поступила в редколлегию 21.10.2013*