

Влияние условий теплосъема на параметры импульсного газоразрядного источника ИК-излучения

С. В. Гавриш

Приведены результаты теоретического анализа и экспериментального исследования влияния условий теплосъема на температурное поле импульсного газоразрядного источника ИК-излучения. На основе математической модели выявлен радиальный профиль цезиевого разряда, ограниченного системой из двух сапфировых оболочек, рассчитан энергетический баланс излучения и конвективного теплосъема при различных коэффициентах теплоотдачи. Экспериментально изучено влияние на температурный профиль лампы расхода и скорости охлаждающего потока, а также теплопроводности газа – теплоносителя, заполняющего зазор между сапфировыми оболочками.

Ключевые слова: разряд, сапфир, оболочка, цезий, температура, коэффициент теплопроводности, коэффициент теплоотдачи, пиковая сила и постоянная составляющая ИК-излучения.

Ссылка: Гавриш С. В. // Прикладная физика. 2018. № 5. С. 86.

Reference: S. V. Gavrish, Prikl. Fiz., No. 5, 86 (2018).

Введение

В настоящее время в системах оптико-электронного противодействия тепловым головкам самонаведения широко используются импульсные источники ИК-излучения (газоразрядные лампы) с двумя сапфировыми оболочками. Основными излучательными характеристиками такой разрядной лампы являются пиковая сила излучения A , постоянная составляющая A_n , длительность импульса $t_{0,5}$ и глубина модуляции, рассчитываемая по формуле: $m = [A - A_n]/A \times 100\%$ [1]. Из приведенного выражения следует, что одним из основных факторов, определяющим глубину модуляции, является постоянная составляющая непрерывного излучения нагретых до рабочих температур сапфировых оболочек. Поэтому изучение теплофизических процессов, влияющих на температурное поле газоразрядной лампы, является актуальной задачей.

Целью данной работы являлись теоретические и экспериментальные исследования влияния условий теплосъема на температурное поле импульсного газоразрядного источника ИК-излучения.

Теоретический анализ и математическое моделирование теплофизических процессов в лампе

Конструктивно импульсный газоразрядный источник ИК-излучения представляет собой разрядную трубку (горелку) из монокристаллического сапфира (корунда), наполненную парами цезия и коаксиально размещенную в наружной термостатирующей корундовой оболочке, которая заполнена газом-теплоносителем [2]. Такая газоразрядная лампа обеспечивает высокие удельные электрические нагрузки за счет теплосъема потоком воздуха или азота, направленным на наружную оболочку. Как следует из описания конструкции, теплофизическое состояние внутренней оболочки (разрядной трубки) формируется двусторонним энергетическим воздействием:

1) из плазмы – это излучение разряда и энергия, передаваемая теплопроводностью, воздействием заряженных частиц, ударными волнами, газодинамическим давлением рабочей среды на ее внутреннюю поверхность.

2) снаружи на оболочку действует возвращенное от отражающей системы оптическое излучение, внешние воздействующие факторы (рентгеновское, нейтронное излучение и т. д.), теплосъем посредством теплопроводности через газовый зазор.

На продольный температурный профиль внешней колбы из всех перечисленных выше фак-

Гавриш Сергей Викторович, нач. научно-производственного комплекса, д.т.н.

АО «Специальное конструкторское бюро «ЗЕНИТ».
Россия, 124489, Москва, Зеленоград, Панфиловский просп., 10.
E-mail: svgavr@list.ru

Статья поступила в редакцию 9 августа 2018 г.

торов влияет теплопроводность газа–теплоносителя между оболочками, теплосъем (принудительное или естественное охлаждение), выходящее излучение из плазмы и нагретой до рабочих температур оболочки разрядной трубки, ограничивающей разряд.

Экспериментальное исследование влияния каждого из перечисленных факторов на теплофизическое состояние оболочек и, как следствие, на постоянную составляющую излучения весьма проблематично в силу конструктивных особенностей лампы. Поэтому в работах [2, 3] нами была разработана математическая модель цезиевого разряда, ограниченной системой из двух сапфировых оболочек. Расчетная модель, сформированная в приближении локального термодинамического равновесия, объединяла уравнения сохранения энергии, неразрывности, переноса излучения в плазме, сохранения массы в замкнутом объеме, закона Ома, уравнения внешней электрической цепи.

Для определения температурного состояния оболочек источника излучения разработанная система уравнений дополнена уравнениями энергии (теплопроводности) системы из двух оболочек с зазором между ними, заполненного газом:

$$c_i(r) \frac{\partial T_{ci}}{\partial t} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \lambda_i(r) \frac{\partial T_{ci}}{\partial r} \right) - \text{div} F_{Li}(r), \quad (1)$$

где c_i, λ_i – теплоемкость и коэффициент теплопроводности в i -м слое (нумерация слоев идет в направлении от разряда: $i = 1$ и 3 – для внутренней и внешней оболочек, $i = 2$ для газа в зазоре), T_{ci} – температура в слое, F_{Li} – интегральный по спектру поток излучения в оболочках.

В результате реализации математической модели получено радиальное распределение температуры в плазме и системе двух поглощающе-излучающих оболочек (см. рис. 1) при различных удельных электрических мощностях $P_{уд}$, определяющие параметры ИК-излучения импульсного газоразрядного источника, а именно, пиковую силу импульса излучения A и глубину модуляции m . При моделировании использованы следующие параметры разряда: радиус разрядного канала $R = 0,35$ см, соотношение компонент плазмообразующей среды Cs:Hg = 1:1,5 и Cs:Xe = 1:1 и суммарное давление наполнения $p = 0,5$ МПа. Коэффициент теплоотдачи с наружной поверхности лампы составлял 0,001 Вт/(см² К), а толщины стенки внутренней оболочки, зазора и внешней оболочки равнялись 0,13, 0,1 и 0,13 см соответственно.

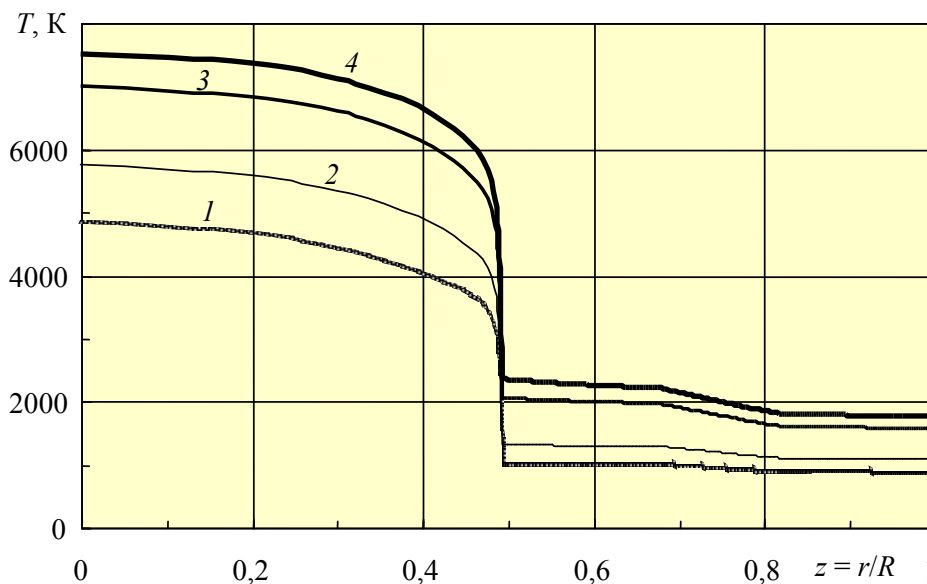


Рис. 1. Радиальное температурное распределение в Cs – Hg – Xe разряде и оболочках. $z = r/R$, где r – текущий радиус, R – радиус разрядной трубки. $P_{уд} = 155$ (1), 320 (2), 800 (3), 1100 (4) Вт/см.

Показано, что при изменении электрической мощности от 155 до 1100 Вт/см температура в центре разряда изменяется от 4800 до 7500 К, температура разрядной трубки – от 1000 до 2250 К, причем основное падение температуры приходится на зазор между оболочками. С ростом темпера-

туры оболочек от 700 К до 2300 К коэффициент поглощения сапфира увеличивается почти на порядок, одновременно происходит сдвиг максимума функции распределения Планка для нагретых оболочек с 3 до 1,3 мкм, что приводит к увеличению постоянной составляющей импульса излуче-

ния и, соответственно, к снижению глубины модуляции.

Математическое моделирование позволило выявить многообразие факторов, определяющих температуру, следовательно, непрерывное излучение оболочек, свести к следующим основным видам:

- конструктивные параметры, среди которых следует отметить геометрические размеры оболочек (диаметры, толщины стенок, зазоры между оболочками);
- спектральные оптические свойства материала оболочек;
- состав и интенсивность тепловых нагрузок на стенку;
- условия охлаждения;
- свойства газа в зазоре между оболочками.

Некоторые из перечисленных параметров оказывают незначительное влияние на постоянную составляющую излучения, другие – заметное. Слабо влияющими являются толщины оболочек, величины зазоров между оболочками, диаметры. Оптимизация по этим параметрам может обеспечить эффект до 10–18 % [1, 2]. Большие резервы снижения A_n заключены в коэффициенте поглощения сапфира. Здесь важны значения коэффи-

циента в области прозрачности, а также длинноволновая граница области пропускания и степень черноты поверхности. Соответствующими исследованиями можно сформулировать требования к материалу, которые обеспечивают заметное снижение постоянной составляющей излучения [2, 3].

Рассчитанная структура баланса мощности, теряемой оболочками, в зависимости от средней электрической мощности разряда показана на рис. 2. Параметры разряда при моделировании были аналогичны данным, используемым выше при расчетах температурного профиля лампы. С увеличением электрической мощности растет вклад в суммарный сброс лучистой составляющей, причем этот рост более существенен при меньшей интенсивности охлаждения (меньших коэффициентах теплоотдачи α). С увеличением α заметно возрастает роль конвективного теплоотвода и ослабляется вклад сброса мощности излучением. Данное обстоятельство является ключевым при рассмотрении способов и приемов повышения глубины модуляции излучения в нужных областях спектра. Именно поэтому необходимо провести экспериментальное исследование влияния режимов охлаждения при использовании существующих технических средств формирования воздушного потока.

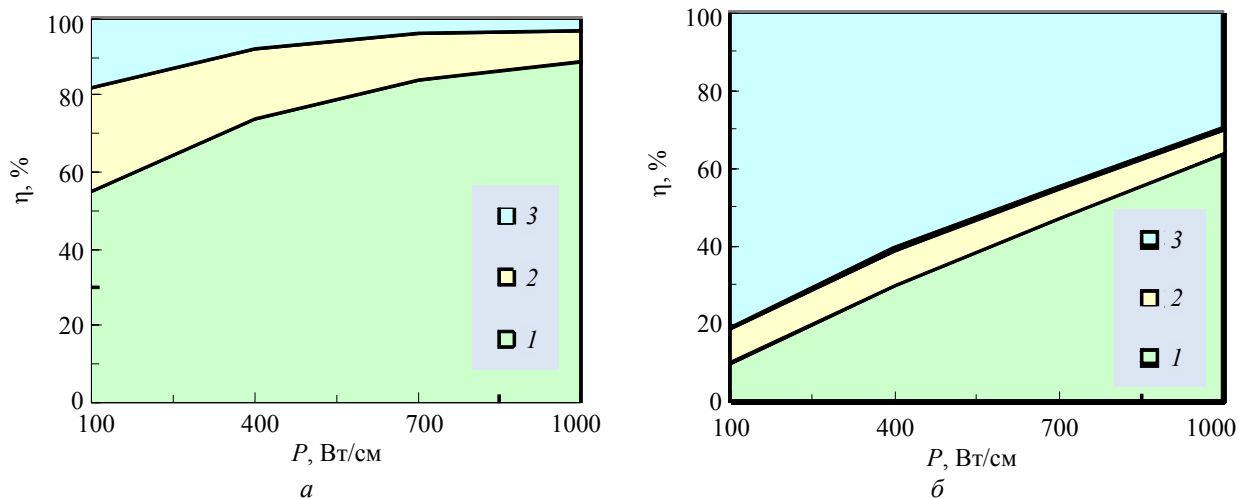


Рис. 2. Структура баланса мощности, сбрасываемой оболочками различными механизмами с вкладом η . Области диаграммы: доли мощности 1 – излучения оболочек в области полупрозрачности сапфира (до 6,5 мкм), 2 – излучения оболочек за длинноволновой границей пропускания сапфира, 3 – отводимой за счет конвективного теплообмена с коэффициентом теплоотдачи $\alpha = 0,001$ (а) и $0,01$ (б) Вт/см².

Экспериментальные исследования

Количество теплоты, удаляемое с нагретой поверхности, зависит от условий конвективного теплообмена и рассчитывается с использованием критериального уравнения теплоотдачи конвекцией $Nu = f(Gr \times Pr \times Re \times Fo)$, включающего критерии Грасгофа, Рейнольдса, зависящих от скорости

охлаждающего потока, и критерии Нуссельта, Прандтля, определяемые теплопроводностью веществ. Поэтому ниже приведены результаты исследования влияния охлаждающего потока воздуха и теплопроводности газа–теплоносителя между сапфировыми оболочками на тепловое поле внешней колбы газоразрядной лампы.

Влияние скорости воздушного потока

В качестве характеристик охлаждающего воздушного потока можно выделить два параметра: расход Q и скорость хладагента V вдоль обложки. Для определения влияния расхода на глубину модуляции была собрана экспериментальная установка на базе девяти малогабаритных электровентиляторов 2ДВО-07.60 ($Q = 70 \text{ м}^3/\text{час}$), которые формировали воздушный поток вокруг лампы, расположенной в кремниевой трубе диаметром 150 мм. Установка позволяла плавно наращивать расход воздуха за счет увеличения числа работающих вентиляторов от одного до девяти. Исследуемая лампа 7/60 мм работала при электрической мощности 1,5 кВт с частотой следования токовых импульсов 500 Гц в разрядном контуре с характеристиками: $C = 50 \text{ мкФ}$, $L = 20 \text{ мкГн}$. Из полученных результатов следует, что глубина модуляции и пиковая сила излучения достигают максимального значения при расходе воздуха $350 \text{ м}^3/\text{час}$. Причина прекращения роста m и A связана с предельным ограничением скорости воздушного потока от вентилятора 2ДВО-07.60, которая на выходе кремниевой трубы, согласно измерениям анемометром МС-13, составляет 20 м/с.

Для исследования влияния скорости воздушного потока на параметры излучения разработано специальное приспособление, позволяющее использовать магистральный сжатый воздух и ступенчато регулировать V . В результате градуировки получено, что при статическом давлении в приспособлении 0,2 и 0,3 атм. расход воздуха составляет соответственно 92 и 106 $\text{м}^3/\text{час}$, а скорость охлаждающего потока, по показаниям анемометра МС-13, достигает 180 м/с. Лампа работала в электрических режимах, описанных выше. Полученные результаты приведены в табл. 1.

Таблица 1

Влияние скорости воздушного потока на излучательные характеристики ламп

Вид охлаждения	m , %	$t_{0,5}$, мкс	Q , $\text{м}^3/\text{с}$	V , м/с
3 вентилятора 2ДВО-07.60	86,3	200	210	20
Сжатый воздух	90,0	190	74	150
Сжатый воздух	91,0	160	92	180

Из данных таблицы можно сделать вывод, что для повышения излучательных характеристик газоразрядной лампы требуется меньший расход воздуха ($Q = 92 \text{ м}^3/\text{час}$) при скорости охлаждающего потока $V = 150\text{--}180 \text{ м/с}$, который создается за счет использования конусного сопла (конфузора). Данный вариант конструкции охлаждающего

тракта, схематически показанный на рис. 3, а, дает возможность вернуться к идее использования электровентиляторов 2ДВО-07.60.

На первом этапе воздушный поток от трех вентиляторов 1 формировался вдоль поверхности лампы при помощи конфузора 2 с диаметром на срезе 25 мм. Так как входной диаметр сопла проходил через центры вентиляторов, то используемый расход воздуха от каждого вентилятора был равен половине паспортного значения. Скорость воздуха на срезе конфузора [5] определяется по формуле: $V = \frac{Q}{S} = \frac{4Q}{\pi(d_c^2 - d_l^2)}$, где Q – производи-

тельность вентилятора, d_c и S – диаметр и площадь среза сопла и d_l – внешний диаметр лампы.

По результатам расчетных оценок, скорость воздушного потока составила 90 м/с. Полученное распределение температуры вдоль колбы представлено на рис. 3, б для двух мощностей $P = 1,4 \text{ кВт}$ (кривая 1) и $P = 2,7 \text{ кВт}$ (кривая 2). Из представленных зависимостей видно, что на выходе из сопла воздушный поток обеспечивает температуру T_1 в диапазоне $100\text{--}150 \text{ }^\circ\text{C}$, которая к центру лампы T_3 возрастает до $200\text{--}300 \text{ }^\circ\text{C}$. Резкий скачок температуры в точке T_4 объясняется следующими соображениями. При продольном охлаждении вдоль поверхности колбы происходит образование гидродинамического пограничного слоя, в пределах которого вследствие сил вязкого трения скорость изменяется от значения невозмущенного потока на внешней поверхности слоя до нуля на самой поверхности трубки. По мере движения потока вдоль поверхности толщина пограничного слоя постепенно возрастает (точки $T_1\text{--}T_3$), воздействие стенки распространяется на все более дальние слои воздуха. В области ($T_1\text{--}T_3$) пограничный слой тонкий и поток имеет ламинарный характер. Далее на некотором расстоянии $X_{кр}$ (точка T_3) в пограничном слое возникают вихри и поток принимает турбулентный характер. Теплосъем с охлаждаемой поверхности при этом резко снижается. Переход к турбулентному режиму в пограничном слое определяется критическим значением числа Рейнольдса [6]:

$$Re_{кр} = \frac{V X_{кр}}{\nu}, \quad (2)$$

где ν – коэффициент кинематической вязкости. При продольном обтекании поверхности $Re_{кр}$ принимают равным 5×10^5 [7]. В нашем случае (при скорости воздушного потока $V = 90 \text{ м/с}$ и коэффициенте кинематической вязкости воздуха [7] $\nu = 1,5 \times 10^{-5}$) рассчитанное по формуле (2) $X_{кр}$ составляет 8,3 см, в то время точка T_3 , согласно рис. 3, а, находится на расстоянии $l = 7,5 \text{ мм}$ от начала

воздействия воздушного потока. Это объясняется тем, что переход от ламинарного к турбулентному потоку в пограничном слое происходит не в точке, а на некотором участке [6]. Падение температуры

на участке (T_1-T_3) обусловлено теплосъемом на металлический цанговый контакт, обеспечивающий электрическое соединение лампы с источником питания.

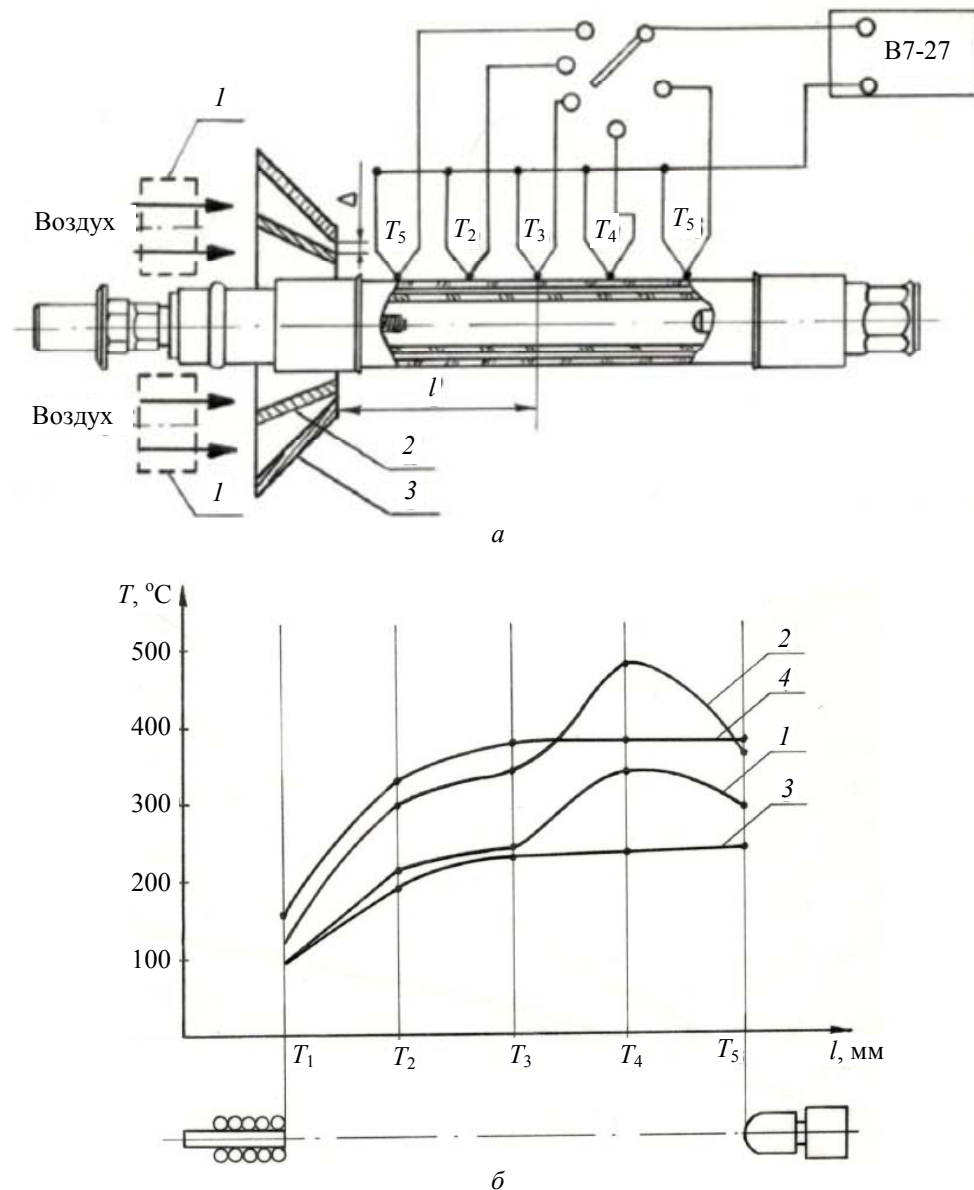


Рис. 3. Блок-схема экспериментальной установки (а) и продольное распределение температуры внешней колбы (б) при использовании конусного сопла 3 для $P_n = 1,4$ кВт (1); $P_n = 2,7$ кВт (2) и одновременно конфузоров 2 и 3 для $P_n = 1,4$ кВт (3); $P_n = 2,7$ кВт (4).

Таким образом, для предотвращения локального перегрева участка оболочки в точке T_4 необходимо ликвидировать образовавшийся турбулентный поток. Для этих целей использовался конфузор 3 с диаметром среза 35 мм, который через кольцевое сечение, образованное с конусом 2, направлял в точку T_3 поток воздуха от вентиляторов 1, сглаживая турбулентный вихрь и создавая новый ламинарный слой. Полученное распределение температуры внешней оболочки в описанной системе охлаждения приведено на рис. 3 для мощ-

ностей на лампе $P = 1,4$ кВт (кривая 3) и $P = 2,7$ кВт (кривая 4). Как видно из рисунка, на участке T_1-T_3 идет расширение пограничного слоя и, как следствие увеличение температуры, а затем наблюдается его стабилизация. Уменьшить пограничный слой ламинарного потока $h_{л}$ можно увеличением скорости потока воздуха V с учетом формулы [6]:

$$h_{л} = 5 \sqrt{\frac{Xv}{V}}$$

Как показали исследования излучательных характеристик лампы 7/90 с цезий-ртутным наполнением, при переходе от охлаждения с одним конфузуром к воздушному тракту с двумя конусами глубина модуляции возрастает от 94,4 до 95 %. Уменьшение зазора Δ и, следовательно, возрастание скорости воздушного потока не дает выигрыша по глубине модуляции и приводит только к увеличению механической нагрузки на вентиляторы. Поэтому можно предположить, что заметное влияние на охлаждение оказывает именно сопло 2 (рис. 3, а), а поток воздуха из конуса 3 лишь обеспечивает ламинарный слой. Следовательно, для получения высоких модуляционных характеристик импульсного источника ИК-излучения с двумя сапфировыми оболочками необходимо использовать систему охлаждения, представляющую собой совокупность двух конфузуров, формирующих воздушный поток от трех вентиляторов 2ДВО-07.60. Подробно предложенная система охлаждения рассмотрена в работе [8].

Влияние состава наполнения внешней оболочки

Как следует из уравнения (1), на температурное состояние лампы прежде всего влияет коэффициент теплопроводности оболочек и газ-теплоносителя между ними. С учетом конструктивных особенностей и функционального назначения импульсной газоразрядной лампы ИК-излучения, в качестве материала оболочек используется монокристаллический сапфир, теплофизические свойства которого подробно изучены в работе [9]. Поэтому дальнейшие наши исследования

были посвящены выбору теплопроводящей среды между сапфировыми оболочками.

Применяемые в газоразрядной лампе материалы (ниобий, титан и т. д.) не позволяли нам использовать все возможные варианты наполнения в силу их агрессивного химического воздействия на элементы конструкции. Дополнительная сложность выбора заключалась в исключении возможности электрического пробоя между оболочками при зажигании лампы. Поэтому после проведенного научного анализа типоряд гдагентов был сужен до трех инертных газов (гелий, неон, аргон) и азота. При этом теплопроводность каждого из перечисленных газов линейно возрастает с увеличением температуры, но с тенденцией уменьшения в следующей последовательности: гелий, неон, аргон, азот [10]. Увеличение давления газов даже на несколько порядков влияет несущественно на их теплопроводность.

Для проведения исследований была изготовлена экспериментальная установка (рис. 4), которая позволяла поэтапно откачивать и заполнять пространство между оболочками различными газами при варьировании их давления, которое контролировалось по мановакуумметру. Для электрического питания лампы в наших экспериментах использовано схемное решение, позволяющее (путем подачи и прерывания транзисторным ключом прикладываемого к лампе напряжения $U_{л}$ от мощного выпрямителя) формировать импульсы длительностью $t_{зад.}$ и частотой $f_{ср.}$ При этом крутой задний фронт токового импульса зависит только от скорости остывания плазмы, а не от переходных процессов в коммутирующем элементе [1, 2].

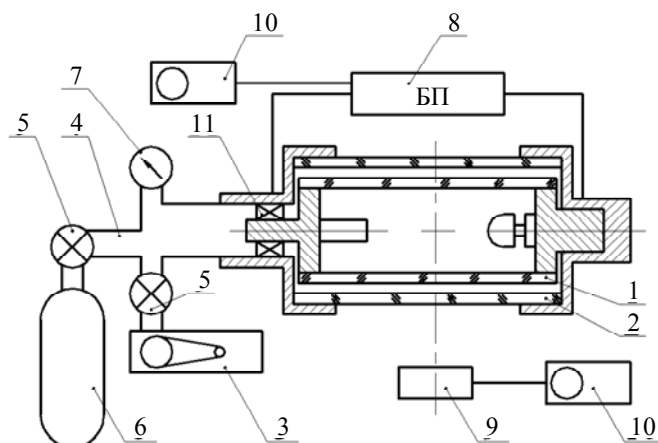


Рис. 4. Схема экспериментальной установки для исследования влияния газа – теплоносителя на параметры излучения лампы с двумя сапфировыми оболочками: 1 – разрядная горелка; 2 – внешняя оболочка; 3 – форвакуумный насос; 4 – система трубопроводов; 5 – вентили; 6 – баллон с исследуемым газом; 7 – манометр; 8 – блок питания лампы; 9 – инфракрасное фотоприемное устройство; 10 – осциллограф; 11 – электрический контакт горелки и внешней колбы.

В процессе исследований для каждого испытуемого газа и давления изучались осциллограммы импульсов тока ($I_{пик}, t_{0,5}$) и инфракрасного излучения ($A_{пик}, t_{0,5}, A_{п}$). В результате экспериментов получены данные, приведенные в табл. 2, анализ которых позволяет сделать следующие выводы.

1. При фиксированных параметрах электрического питания ($t_{зад.} = 252$ мкс, $U_{л} = 120$ В, $f_{ср.} = 425$ Гц) мощность лампы $P_{л}$ зависит только от рода газа-теплоносителя. Так, для гелия при указанных задающих параметрах электрического питания лампы мощность была равна 1,5 кВт, в то

время как для остальных наполнений она находилась в диапазоне 0,7–0,9 кВт. При этом увеличение мощности лампы идет в той же последовательности, как и рост теплопроводности газов [10].

2. При уменьшении теплопроводности газа между оболочками наблюдается снижение длительности $t_{0,5}$ и пикового значения $I_{\text{пик}}$ токового импульса. Данное явление можно объяснить возрастанием сопротивления плазменного канала вследствие увеличения давления паров цезия. Такой вывод обусловлен наблюдаемым нами ростом величины напряжения дежурной дуги $U_{\text{д.д.}}$, которая, по результатам исследований Дж. Гридона с коллегами [11], определяется через корень квадратный из давления паров щелочного металла.

3. Для ламп с гелиевым наполнением внешней колбы наблюдается нестабильность напряже-

ния дежурной дуги. Можно предположить, что, вследствие более высокой подвижности атомов гелия, в лампе происходит периодическое преобладание конвекции (сброс тепла в зону холодной точки) над теплопроводностью.

4. Между постоянной составляющей излучения нагретой сапфировой оболочки и температурой ее поверхности в центре разрядного канала наблюдается корреляция. При этом наиболее нагретой является внешняя колба лампы, заполненная гелием. Этот результат обусловлен тем, что у гелия наибольшая теплопроводность из всех изученных газов. Остальные газы одинаково влияют на температуру внешней оболочки, поэтому по совокупности параметров излучения нами был выбран неон.

Таблица 2

Зависимость электрических и излучательных характеристик от рода и давления газа – теплоносителя между оболочками

Род газа	Давление, мм. рт. ст	Электрические характеристики				Параметры излучения			Температура в центре оболочки, °С
		$I_{\text{пик}}$, А	$t_{0,5}$, мкс	$P_{\text{л}}$, кВт	$U_{\text{д.д.}}$, В	$A_{\text{пик}}$, Вт/ср	$t_{0,5}$, мкс	$A_{\text{ш}}$, Вт/ср	
Гелий	760	290,0	140	1,43	78	69,7	171	3,33	406
Неон		256	124	0,96	81	65,0	156	3,12	310
Аргон		244	124	0,86	84	63	155	3,12	309
Азот		242	116	0,89	84	62,4	157	3,12	309

Как и предполагалось ранее, в результате исследований выявлено, что давление газа–теплоносителя существенного влияния на электрические характеристики и параметры излучения не оказывает. В то же время вопрос о величине давления газа является актуальным. Это связано, прежде всего, с механизмом зажигания лампы.

В работе [2] показано, что для устойчивого зажигания описанной конструкции лампы требуется напряжение не менее 5000 В. В случае высокого сопротивления разрядной трубки, например, сразу после выключения, подача высокого напряжения на лампу приводит к пробую в газонаполненном зазоре между оболочками.

Нами была изготовлена по серийной технологии лампа, в которой разрядная горелка была вакуумирована до давления 5×10^{-5} мм рт. ст. Такое решение позволяет исключить пробой по межэлектродному промежутку разрядной трубки. Остальные конструктивные элементы были оставлены без изменения. Внешняя оболочка лампы через откачной штенгель присоединялась к экспериментальной установке, блок-схема которой приведена выше на рис. 4. В данной схеме источник электрического питания лампы был заменен на

зажигающее устройство с регулируемым значением напряжения поджига в диапазоне от 0 до 20 кВ.

В результате испытаний описанной конструкции лампы при варьировании давления в диапазоне 150–1500 мм рт. ст. пробивное напряжение неона в межэлектродном пространстве составило 7,0–8,0 кВ. В итоге, учитывая некоторые технологические особенности изготовления ламп, нами выбрано давление наполнения внешней колбы 700 мм рт. ст.

Заключение

В работе проведены теоретический анализ и экспериментальные исследования влияния условий теплосъема на температурное поле внешней оболочки импульсного газоразрядного источника ИК-излучения. Основные выводы работы сводятся к следующим позициям.

1. На основе математической модели выявлен радиальный профиль цезиевого разряда, ограниченного системой из двух сапфировых оболочек, рассчитан энергетический баланс излучения и конвективного теплосъема при различных уровнях

электрической мощности разряда и коэффициентах теплоотдачи с поверхности лампы.

2. Экспериментально изучено влияние на температурный профиль лампы расхода и скорости охлаждающего потока, предложено техническое решение, позволяющее обеспечить равномерный ламинарный поток охлаждающего потока воздуха вдоль внешней оболочки.

3. Исследовано влияние теплопроводности газа–теплоносителя, заполняющего зазор между сапфировыми оболочками, на постоянную составляющую излучения и температуру наружной колбы лампы. На основе научного анализа физических и химических свойств газов для наполнения внешней оболочки выбран неон при давлении 700 мм рт. ст.

4. Все полученные расчетные и экспериментальные результаты нашли практическую реализацию в прожекторных системах ИК-излучения специального назначения и могут быть использованы в дальнейшем при разработке различных принудительно охлаждаемых разрядных приборов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гавриш С. В., Кобзарь А. И., Жмаев В. С. и др. // Прикладная физика. 2009. № 1. С. 53.
2. Гавриш С. В., Градов В. М., Терентьев Ю. И. // Светотехника. 2008. № 2. С. 12.
3. Гавриш С. В., Градов В. М., Терентьев Ю. И. и др. // Светотехника. 2008. № 5. С. 12.
4. Гавриш С. В. // Прикладная физика. 2010. № 4. С. 45.
5. Семидуберский М. С. Насосы, компрессоры, вентиляторы. – М.: Высшая школа, 1974.
6. Михеев М. А., Михеева И. М. Основы теплопередачи. – М.: Энергия, 1973.
7. Уонг Х. Основные формулы и данные по теплообмену для инженеров: Справочник. – М.: Атомиздат, 1979.
8. Гавриш С. В., Кобзарь А. И., Цогоев И. Т. и др. Патент РФ (полезная модель) № 56718, МПК H01J 61/52. Разрядный источник инфракрасного излучения. 10.09.2006. Бюл. № 25.
9. Добровинская Е. Р., Литвинов Л. А., Пищик В. В. Энциклопедия сапфира. – Харьков: Институт монокристаллов, 2004.
10. Варгафтик Н. Б., Филиппов Л. П., Тарзиманов А. А. и др. Справочник по теплопроводности жидкостей и газов. – М.: Энергоатомиздат, 1990.
11. Bayha W. T., Creedon J. E., Schneider Sol. // IEEE-Trans. Electron Devices. 1970. Vol. 17. No. 8. P. 612.

PACS: 07.50-e

Heat sink conditions influence on pulsed discharge IR radiation source parameters

S. V. Gavrish

Special Design Bureau" ZENIT", JSC
10 Panfilovsky av., Zelenograd, Moscow, 124489, Russia
E-mail: svgavr@list.ru

Received August 9, 2018

Consideration is given to the results of theoretical analysis and experimental research of heat sink conditions influence on temperature field of the pulsed discharge IR radiation source. Based on a math model, a radial profile of the cesium discharge that bounded by a system of two sapphire shells has been obtained. The energy balance of irradiation and convective heat sink at different heat transfer coefficients has been calculated. The effect of a rate cooling flow and heat conductivity of a gas-coolant filling the gap between sapphire shells on a lamp temperature profile was experimentally studied.

Keywords: discharge, sapphire, shell, cesium, temperature, heat conductivity coefficient, heat transfer coefficient, peak power and constant component IR radiation.

REFERENCES

1. S. V. Gavrish, A. I. Kobzar, V. S. Jmayev, et al., Prikl. Fiz., No. 1, 53 (2009).
2. S. V. Gavrish, V. M. Gradov, and E. Y. Terent'ev, Svetotekhnika, No. 2, 12 (2008).
3. S. V. Gavrish, V. M. Gradov, and E. Y. Terent'ev, Svetotekhnika, No. 5, 12 (2008).
4. S. V. Gavrish, Prikl. Fiz., No. 4, 45 (2010).
5. M. S. Semiduberskiy, *Pumps, compressors, fans*. (Moscow, Vischaya shkola, 1974) [in Russian].
6. M. A. Mikcheev and I. M. Mikcheeva, *Foundations of heat transfer*. (Moscow, Energiya, 1973) [in Russian].
7. H. Wang, *Main formulas and data about heat exchange for engineers* (Moscow, Energoatomizdat, 1979) [in Russian].
8. S. V. Gavrish, A. I. Kobzar, I. T. Tsogoev, et al., RF Patent No. 56718, H01J 61/52. (2006).
9. E. R. Dobrovinskaya, L. A. Litvinov, and V. V. Pischik, *Encyclopedia of sapphire* (Kharkov, Institut monocrystallov, 2004) [in Russian].
10. N. B. Vargaftik, L. P. Filippov, and A. A. Tarzimanov, *Handbook on heat conductivity liquids and gases* (Moscow, Energoatomizdat, 1990) [in Russian].
11. W. T. Bayha, J. E. Creedon, and Sol. Schneider, IEEE-Trans. Electron Devices **17** (8), 612 (1970).