

МОДЕЛЬ РАСЧЕТА ДАВЛЕНИЯ НАСЫЩЕННЫХ ПАРОВ НАД АМАЛЬГАМОЙ В РАЗРЯДНЫХ ИСТОЧНИКАХ ИЗЛУЧЕНИЯ

© 2016 г. С.А. ГАВРИЛОВ, С.В. ГАВРИШ*, Н.Ю. ПЕТРЕНКО*, С.В. ПУЧНИНА

Национальный исследовательский университет «МИЭТ»,
*АО «СКБ «ЗЕНИТ», г. Москва, Зеленоград

Надежность инфракрасных источников с разрядом в парах щелочных металлов определяется стабильностью излучательных параметров в течение всего срока службы, которая, в свою очередь, зависит от постоянства давления компонентов плазмообразующей среды. В нашей работе [1] было показано, что главной причиной снижения давления рабочего вещества в разряде является утечка компонентов наполнения сквозь герметизирующий разрядную оболочку стеклокерамический припой. В качестве рекомендации в указанной работе предлагалось применять наполнение разрядного объема щелочным металлом в избытке. Так как в состав наполнения разрядных ламп [2] кроме щелочного металла входит ртуть, встал вопрос о разработке метода расчета давления компонентов над амальгамой с учетом особенностей конструкции и теплофизического состояния разрядной трубки.

В ходе испарения амальгамы объем лампы заполняется парами щелочной добавки и ртути, а при достаточном количестве вводимого вещества устанавливается динамическое равновесие жидкой и парообразной фаз. При этом реализуются такие давления пара щелочного металла P_M и ртути P_{pm} , которые определяются температурами в разрядном T_p и заэлектродном T_l объемах, величинами этих объемов V_p, V_l , исходным содержанием компонент в амальгаме g_M^o и g_{pm}^o и весом амальгамы G . В процессе испарения весовое содержание компонент в амальгаме вследствие большей летучести паров ртути меняется, и в равновесии доли компонент в амальгаме становятся другими (g_M и g_{pm}), отличными от начальных значений g_M^o и g_{pm}^o .

Для исследования влияния различных параметров на давление паров щелочной добавки и ртути была составлена система уравнений.

$$G_M + G_{pm} + G_{ам} = G \quad (1)$$

$$G_M = \frac{P_M \cdot V_p}{R_M \cdot T_p} + \frac{P_M \cdot V_l}{R_M \cdot T_l} \quad (2)$$

$$G_{pm} = \frac{P_{pm} \cdot V_p}{R_{pm} \cdot T_p} + \frac{P_{pm} \cdot V_l}{R_{pm} \cdot T_l} \quad (3)$$

$$P_M = P_M^o \cdot r_M \quad (4)$$

$$P_{pm} = P_{pm}^o \cdot r_{pm} \quad (5)$$

$$r_M + r_{pm} = 1 \quad (6)$$

$$g_M = \frac{G \cdot g_M^o - G_{ам}}{G_{ам}} \quad (7)$$

Введём дополнительные соотношения, связывающие молярные и весовые доли компонент в амальгаме в рабочем состоянии лампы:

$$r_m = \frac{g_m}{g_m + (1 - g_m) \frac{\mu_m}{\mu_{pm}}} \quad (8)$$

$$r_{pm} = \frac{1 - g_m}{\frac{\mu_{pm}}{\mu_m} g_m + (1 - g_m)} \quad (9)$$

В выражениях (1-9) приняты следующие обозначения:

G_m, r_m и G_{pm}, r_{pm} - вес пара и мольные доли щелочного металла и ртути, соответственно, в амальгаме массой $G_{ам}$ при работе лампы;

μ_m, μ_{pm} - молекулярные массы;

$R_m = R_o / \mu_m; R_{pm} = R_o / \mu_{pm}$ - газовые постоянные;

R_o - универсальная газовая постоянная;

V_p, V_l - объёмы разрядного промежутка и заэлектродных областей;

P_m^o, P_{pm}^o - давление насыщенных паров излучающей добавки и ртути, как индивидуальных веществ.

Преобразование выражения (2) с учётом (4) и (8) позволяет рассчитать массу пара щелочного металла при рабочих давлениях:

$$G_m = D \cdot \frac{g_m}{g_m + (1 - g_m) \frac{\mu_m}{\mu_{pm}}}, \quad (10)$$

где, $D = \frac{P_m^o \cdot V_p \cdot \mu_m}{R_o} \left(\frac{1}{T} + \frac{a_1}{T_1} \right)$ и $a_1 = \frac{V_l}{V_p}$.

Для массы пара ртути из уравнения (3) путём подстановки выражений (5) и (9) получаем:

$$G_{pm} = G_m \cdot \frac{P_{pm}^o}{P_m^o} \cdot \frac{(1 - g_m)}{g_m} \quad (11)$$

Таким образом, уравнение (1), с учётом полученных значений G_m, G_{pm} , преобразуется к виду, позволяющему определить g_m :

$$a \cdot g_m^2 + b \cdot g_m + c = 0 \quad (12)$$

где $a = D \cdot \left(\frac{P_{pm}^o}{P_m^o} - 1 \right) + \left(1 - \frac{\mu_m}{\mu_{pm}} \right) \cdot G,$

$$b = - \left[D \cdot \left(\frac{P_{pm}^o}{P_m^o} - 1 \right) - \frac{\mu_m}{\mu_{pm}} \cdot G \cdot (1 + g_m^o) + G \cdot g_m^o \right],$$

$$c = - \frac{\mu_m}{\mu_{pm}} \cdot G \cdot g_m^o.$$

Следует отметить, что уравнение (12) имеет одно решение $g_m = \frac{-b + \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a},$

так как произведение, $a \cdot c < 0$ ($a > 0, c < 0$).

В случае работы в ненасыщенных парах, то есть в условиях отсутствия амальгамы, система уравнений (1)-(9) упрощается:

$$G_m + G_{pm} = G$$

$$G_m = \frac{P_m^o \cdot V_p \cdot \mu_m}{R_o} \cdot \left(\frac{1}{T_p} + \frac{a_1}{T_1} \right) \quad (13)$$

$$G_{pm} = \frac{P_{pm}^o \cdot V_p \cdot \mu_{pm}}{R_o} \cdot \left(\frac{1}{T_p} + \frac{a_1}{T_1} \right) \quad (14)$$

В свою очередь, для ненасыщенных паров справедливы формулы $G_m = G \cdot g_m^o$, $G_{pm} = G \cdot g_{pm}^o$, подстановки которых в (13) и (14) дают следующие значения давлений плазмообразующих компонентов:

$$P_m = \frac{G \cdot g_m^o \cdot R_o}{V_p \cdot \mu_m} \cdot \frac{1}{d} \quad (15)$$

$$P_{pm} = \frac{G \cdot g_{pm}^o \cdot R_o}{V_p \cdot \mu_{pm}} \cdot \frac{1}{d}, \quad \text{где } d = \frac{1}{T_p} + \frac{a_1}{T_1}$$

Таким образом, приведённые выше выражения позволяют прогнозировать давление добавок в зависимости от конструктивных характеристик лампы (диаметр, межэлектродное расстояние, заэлектродный объём, температура холодной точки, вес амальгамы и т.д.). Алгоритм проведения расчётов имеет следующую последовательность: из (15) находим P_m и если $P_m > P_m^o$, то рассматриваем случай разряда в насыщенных парах, т.е. из (12) находим g_m ; (8) и (9) – r_m, r_{pm} ; (10) и (11) – G_m, G_{pm} ; (7) – $G_{ам}$.

Расчетные исследования факторов, определяющих давление паров цезия и ртути над амальгамой

В качестве исходных данных при расчете таких ламп приняты следующие исходные данные: размеры разрядного канала: $d=11$ мм и $l=35$ мм (далее лампа 11/35); масса амальгамы 10 мг. При расчетах температуры самой холодной точки варьировалась в диапазоне от 723 К до 923 К, осевая температура разряда от 4500 К до 6500 К, температура заэлектродного объема от 1000 К до 2500 К.

В результате реализации сформированной модели расчета давления насыщенных паров над амальгамой (уравнения 1-11) получены графические зависимости, представленные на рис. 1. На рис. 1, а показана зависимость давления насыщенных паров ртути в разрядной цезиевой лампе 11/35 от массы амальгамы. При расчетах принималось, что соотношение концентраций в исходной амальгаме Cs:Hg = 0,2:0,8 остается неизменным. Из приведенных данных следует, что P_{pm} возрастает по близкой к линейной зависимости и при трехкратном увеличении массы соединения происходит возрастание давления паров ртути в три раза. При этом давление насыщенных паров Cs хотя и незначительно, но снижается (от 40,0 до 43,9 кПа). Расчеты показывают, что при работе лампы в номинальном режиме, т.е. при фиксированной $T_{х.м.}$, с различной дозировкой амальгамы, её состав меняется. Процентное содержание цезия в разогретой амальгаме возрастает, а ртути уменьшается. Это связано с более высоким коэффициентом активности Hg. Если весовое содержание Cs в исходной дозировке лампы увеличить, то можно изменить картину в разрядном объеме. Давление насыщенного пара ртути упадет (см. рис. 1, б), а цезия поднимется от 33,25 до 49,2 кПа.

На рис. 1, в приведена графическая зависимость давления насыщенного пара цезия от температуры холодной точки. Видно, что рост $P_{цез.}$ носит экспоненциальный характер, а P_{pm} (на рис. 1, в не показано) остается практически неизменным. Это важный результат для конструирования источников излучения в среднем ИК диапазоне. Известно [2], что ртуть в разрядных лампах способствует снижению удельных потерь в разрядном столбе, так как имеет низкую теплопроводность. Кроме этого, в силу более высокого потенциала ионизации Hg, в сравнении с цезием, этот металл не участвует в излучении разряда, но способствует стабилизации теплофизического состояния плазмы. С другой стороны, как следует из [2], рост давления насыщенного пара цезия приводит к повышению силы излучения разряда в среднем ИК диапазоне. Это обусловлено увеличением вероятности свободно-связанных и свободно-свободных переходов в плазмообразующей среде. Поэтому повышение температуры холодной точки разрядного ИК источника является актуальной конструкторской задачей.

Можно предположить, что при фиксированной электрической мощности лампы, увеличение радиуса разрядного канала приводит к повышению выхода излучения в среднем ИК диапазоне. Это объяснимо следующими доводами.

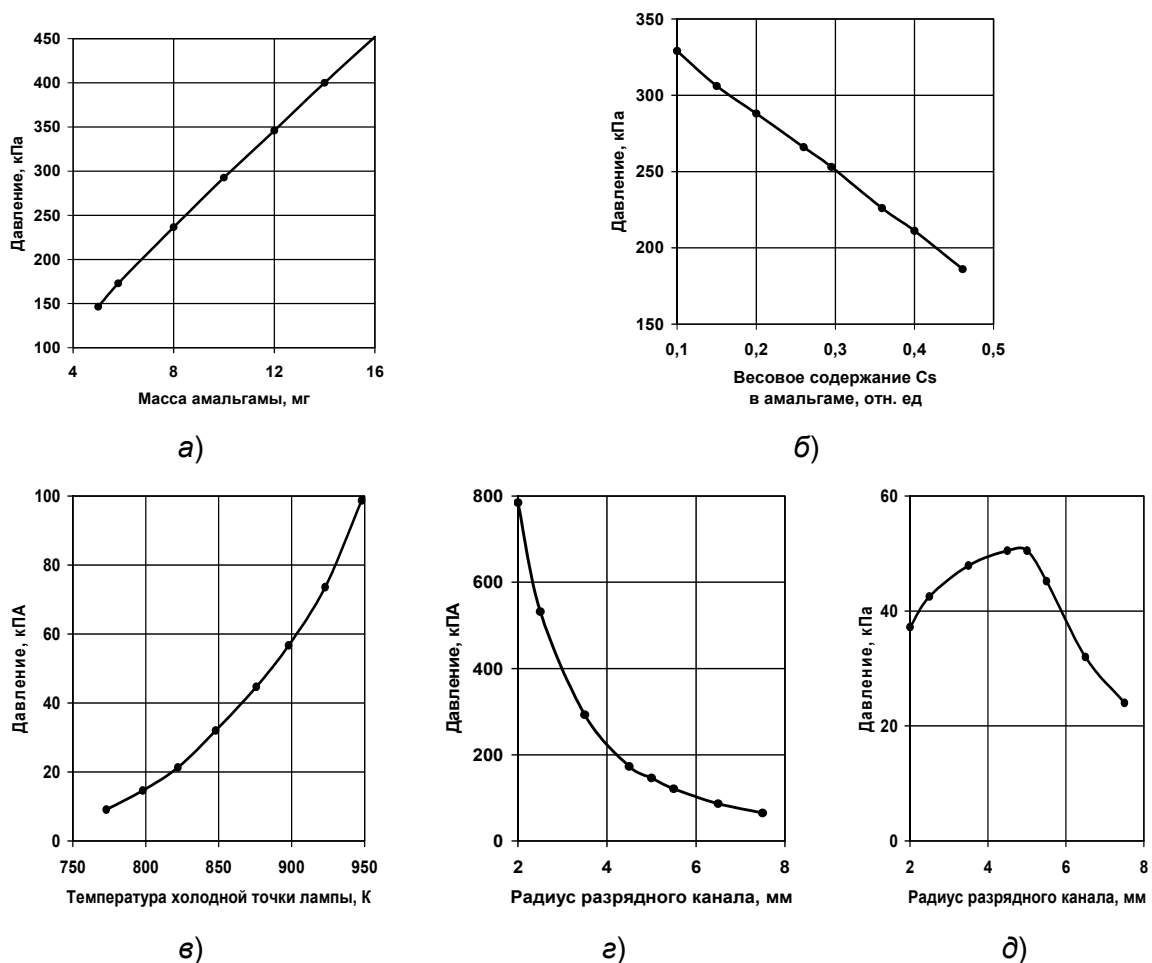


Рис. 1. Зависимость давления компонентов цезиевой амальгамы от конструктивных параметров разрядного источника.

Коэффициент оптического поглощения Cs-Hg-Xe плазмы k_{ν} в ближней ИК - области спектра достаточно высок [2], поэтому разряд излучает в этом диапазоне спектра относительно тонким поверхностным слоем. Следовательно, увеличивая радиус разряда, мы развиваем светящуюся поверхность, и, как следствие, суммарный поток излучения. Однако, как следует из полученных в данной работе результатов (рис. 1, д), давление паров ртути и цезия зависит от объема разрядного канала. При неизменных дозировке и составе амальгамы с увеличением радиуса наблюдается снижение давления насыщенных паров ртути. Это объясняется тем, что в силу высокого коэффициента активности ртути, при $T_{x.m.}$ 973 К в разряде находится фиксированная масса паров ртути, а увеличение внутренней поверхности разрядного канала приводит к снижению давления. В то же время цезий с более низкой активностью продолжает заполнять рабочий объем лампы до момента (в нашем случае $r=0,45$ см), когда наблюдается переход разряда в ненасыщенных парах. Поэтому для повышения выхода излучения в среднем ИК диапазоне необходимо с увеличением радиуса плазменного столба повышать массу дозировки и увеличивать концентрацию цезия в амальгаме.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гаврилов С.А., Гавриш С.В., Пучнина С.В. Анализ механизма утечки щелочного металла в стеклокерамических соединениях сапфира с ниобием // Известия вузов. Электроника. - 2016. Т. 21, № 1. - С. 13-19.
2. Гавриш С.В. Разрядные источники излучения с сапфировой оболочкой // Прикладная физика. - 2011. № 4. - С. 42-51.