

САМОСОГЛАСОВАННАЯ МОДЕЛЬ ИСТОЧНИКОВ ИЗЛУЧЕНИЯ НА ПАРАХ РТУТИ

Ануфрик С.С., Володенков А.П., Зноско К.Ф.

Гродненский государственный университет

Гродно, Республика Беларусь

Для расчета оптических характеристик плазмы на смеси аргона и ртути на длине волны 254 нм была использована упрощенная четырехуровневая схема энергетических переходов атома ртути, при этом учитывались основной уровень 6^1S_0 , уровни триплета $6^3P_{0,1,2}$. Такая модель позволяет определить максимально возможный выход резонансного излучения на длине волны 254 нм [1]. На рис. 1 представлена упрощенная четырехуровневая схема [1].

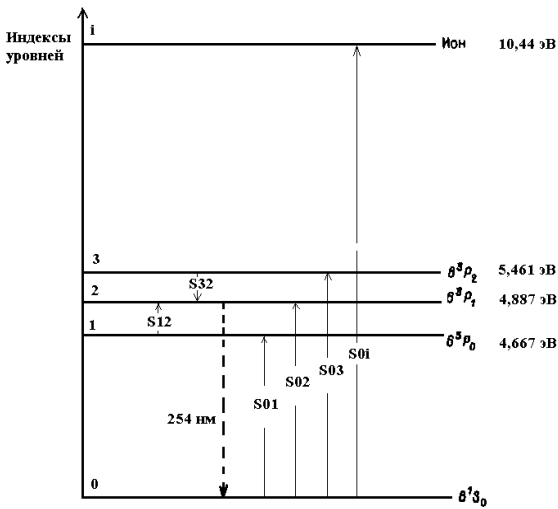


Рис.1 Упрощенная диаграмма уровней энергии ртути

При расчете заселенностей уровней учитывались следующие процессы с участием электронов.

А) Прямое возбуждение электронным ударом из основного состояния атома ртути 6^1S_0 на уровни триплета $6^3P_{0,1,2}$.

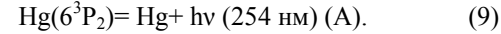
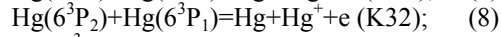
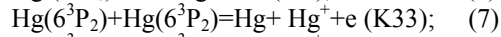
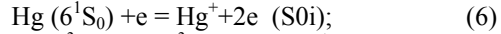
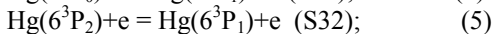
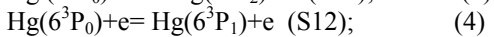
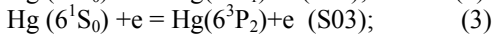
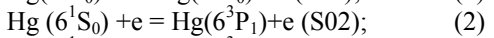
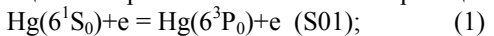
Б) Ионизации основного состояния атома ртути 6^1S_0 .

В) Заселенности уровня 6^3P_1 при переходах с уровней 6^3P_0 и 6^3P_2 .

Г) Ионизация Пеннинга при столкновении атомов ртути в состоянии 6^3P_2 . Ионизация Пеннинга при столкновении атомов ртути в состояниях 6^3P_1 и 6^3P_2 .

Д) Резонансное излучение с уровня 6^3P_1 на длине волны 254 нм.

Учет этих процессов может быть описан следующим набором плазмохимических реакций.



В скобках около реакций указаны обозначения скоростных коэффициентов.

При расчетах задавались следующие параметры. Амплитуда напряжения $U_0 = \sqrt{2} 220 \sim 310$ В. Частота сети $f=50$ Гц. Балластная индуктивность $L1=600$ мГн; $R1=10$ Ом, $C1=10^{-8}$ Ф. Межэлектродное расстояние $d=40$ см; радиус разрядной трубки $R=1,1$ см. Концентрация атомов аргона $9,9 \cdot 10^{16}$ 1/см³ (парциальное давление 3 Торр). При исследовании эмиссионных характеристик в зависимости от состава смеси концентрация атомов ртути менялась в пределах $1,5 \cdot 10^{14}$ 1/см³ – $3 \cdot 10^{14}$ 1/см³.

На рис/ 2 представлена зависимость мощности излучения (1) на длине волны 254 нм и мощности тепла, выделяемой в разряде (2), от концентрации атомов ртути.

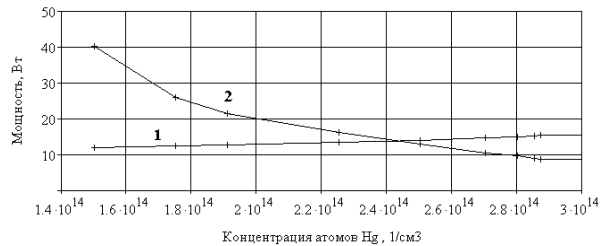


Рис.2 Зависимость мощности излучения (1) на длине волны 254 нм и мощности тепла, выделяемой в разряде (2), от концентрации атомов ртути

Для построения замкнутой модели источников излучения на парах ртути необходимо учесть зависимость концентрации атомов ртути от температуры внутренней поверхности излучателя, которая определяется мощностью тепла выделяемого в излучателе, параметрами излучателя и условиями теплообмена на внешней поверхности излучателя.

Считаем, что излучатель имеет следующие параметры: внутренний диаметр $D=2,2$ см; толщина стенок $d=0,2$ см; длина излучателя $L=40$ см; излучатель изготовлен из кварца с коэффициентом теплопроводности $\lambda=0,0138$ Вт/(см К). Предположим, что мы реализуем такой режим работы, что в установившемся случае температура внутренней поверхности излучателя равна $T_{вн}=43,3^0$ С. По графику зависимости концентрации атомов ртути (парциального давления) от

температуры (рис. 3) определяем, что концентрация атомов ртути равна $2.411 \cdot 10^{14} \text{ 1/см}^3$.

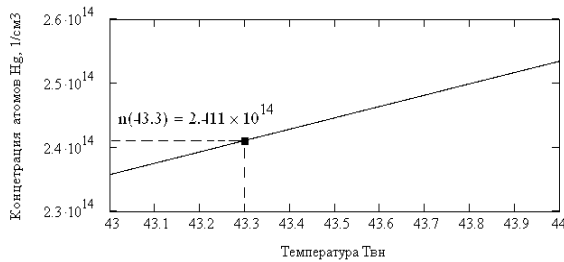


Рис. 3 Зависимость концентрации атомов ртути от температуры

По графику на рис.2 определяем, что при такой концентрации в разряде мощность тепловыделения равна $P=13,744 \text{ Вт}$. Эта мощность должна отводиться через стенки излучателя, поэтому

$$P = \lambda \cdot \pi \cdot D \cdot L \cdot \frac{(T_{вн} - T_{ст})}{d}$$

Отсюда определяем температуру внешней стенки излучателя $T_{ст}$.

$$T_{ст} = T_{вн} - \frac{P \cdot d}{\lambda \cdot \pi \cdot D \cdot L} = 42.5795^{\circ} \text{С}$$

Считаем, что теплообмен на внешней поверхности излучателя обусловлен продуванием потока воздуха с температурой $T_{в}=20^{\circ} \text{С}$ со скоростью W . Кинематическая вязкость воздуха при этой температуре равна $\nu = 15.06 \cdot 10^{-2} \text{ см}^2/\text{с}$, теплопроводность воздуха равна $\lambda_{в} = 0.0259 \cdot 10^{-2} \text{ Вт/см К}$. Число Прандтля для воздуха при этой температуре равно $Pr = 0,703$. Рассчитываем число Рейнольдса как функцию скорости потока W .

$$Re(W) = \frac{W \cdot (D + 2d)}{\nu}$$

По данным [2] экспериментальные данные по теплоотдаче при поперечном обтекании одиночной круглой трубы спокойным, нетурбулизированным потоком обобщаются следующей формулой.

$$Nu(W) = (0,43 + 0,55(Re(W))^{0,5} \cdot (Pr)^{0,38})$$

где $Nu(W)$ – число Нуссельта. Тогда коэффициент теплоотдачи как функцию скорости потока W на участке стабилизированного течения будет равен.

$$\alpha(W) = Nu(W) \cdot \frac{\lambda_{в}}{(D + 2d)}$$

Тогда тепловой поток будет равен как функция скорости потока W

$$P_T(W) = \alpha(W) \cdot \pi \cdot (D + 2d) \cdot L \cdot (T_{ст} - T_{в})$$

Подбираем такую скорость потока W , чтобы $P_T(W) = P = 13,744 \text{ Вт}$. Это равенство будет выполняться при $W = 83.56 \text{ см/с}$. Тогда $Re = 1.443 \cdot 10^3$; $Nu = 18,702$; $\alpha = 1.863 \cdot 10^{-3} \text{ Вт/см}^2 \text{ К}$;

$$P_T(83.56) = 13.744 \text{ Вт}$$

Рассмотрим случай конвективного теплообмена на внешней стенке излучателя.

Безразмерное число Грасгофа для воздуха равно

$$Gr(T_{в}) = \frac{g \cdot \beta \cdot (T_{ст} - T_{в}) \cdot (D + 2d)^3}{\nu^2}$$

Для расчета коэффициента теплоотдачи в условиях естественной конвекции обычно пользуются зависимостью следующего вида [2].

$$Nu(T_{в}) = B \cdot (Gr(T_{в}) \cdot Pr(T_{в}))^n \cdot \left(\frac{Pr(T_{в})}{Pr(T_{ст})} \right)^{0,25}$$

где величины B , n зависят от произведения $(Gr(T_{в}) Pr(T_{в}))$ и приведены в [2].

Тогда коэффициент теплоотдачи как функцию температуры воздуха $t_{в}$ будет равен.

$$\alpha(T_{в}) = Nu(T_{в}) \cdot \frac{\lambda_{в}}{(D + 2d)}$$

Тогда тепловой поток будет равен как функция температуры воздуха $t_{в}$ будет равен

$$P_T(T_{в}) = \alpha(T_{в}) \cdot \pi \cdot (D + 2d) \cdot L \cdot (T_{ст} - T_{в})$$

Приведенные выше соотношения позволяют построить самосогласованную модель для расчета мощности излучения люминесцентных ламп.

На основании разработанной модели рассчитаны эмиссионные характеристики разрядной плазмы в Ar-Hg смеси в ультрафиолетовой области спектра на длине волны 254 нм в зависимости от параметров системы возбуждения, параметров излучателя и условий теплообмена на поверхности излучателя. Показано, что КПД преобразования, мощности полученной от сети в излучение на длине волны 254 нм составляет ~25%. При этом полная средняя мощность излучения на длине волны 254 нм в условиях моделирования составляла ~13 Вт, при мощности вкладываемой в разряд ~34 Вт, и потребляемой от сети ~50 Вт. Установлено, что КПД преобразования и мощность излучения растут с увеличением концентрации паров ртути, поэтому целесообразно для охлаждения использовать естественную конвекцию.

1. Ануфрик С.С. Моделирование источников излучения на парах ртути / С.С. Ануфрик, А.П. Володенков, К.Ф. Зноско// 8-я Международная научно-техническая конференция «Приборостроение 2015», 25–27 ноября 2015 г., БНТУ, Минск, Беларусь.-2015.-Том 2, – с. 3-4.
2. Баскаков А. П. Теплотехника / А. П. Баскаков и др. – М.: Энергоатомиздат.1991. -224 с.