

ИССЛЕДОВАНИЕ ИОННОЙ ЭМИССИИ НАТРИЯ В НАТРИЕВЫХ ЛАМПАХ

Свешников В. К., Васильченко В. Г.

ФГБОУ ВПО Мордовский государственный педагогический институт им. М. Е. Евсевьева, г. Саранск, Россия (430007, Саранск, ул. студенческая, 11а), e-mail: WWG_962@mail.ru

Контроль качества ламп, совершенствование их конструкции требуют установления зависимости эмиссионного тока натрия от коэффициента диффузии и других факторов. В работе приводится зависимость ионного тока эмиссии натрия с поверхности разрядных трубок (РТ) от коэффициента диффузии натрия и продолжительности работы, натриевых ламп. Исследования проводились на натриевых лампах ДнаТ-400. Разрядные трубки из поликристаллической окиси алюминия с мелкозернистой структурой при изготовлении наполнялись ксеноном до давления 2,6 кПа и амальгамой натрия массой $2,4 \cdot 10^{-5}$ кг с 30 % содержанием в ней натрия. Ток ионной утечки натрия из РТ лампы в заданном её режиме работы возрастает с увеличением коэффициента диффузии и снижается в процессе её работы. Расхождение между расчетными и экспериментальными данными в определении ионного тока утечки составляет 8 %. Результаты исследования могут быть использованы для косвенного контроля качества РТ натриевых ламп.

Ключевые слова: ионы натрия, разрядная трубка, коэффициент диффузии, ионный ток.

STUDY ION EMISSION SODIUM IN SODIUM LAMPS

Sveshnikov V. K., Vasilchenko V. G.

Mordovian Teachers Training Institute n.a. M. E. Evseyev, Saransk, Russia (430007, Saransk, street Studencheskaya, 11a), e-mail: WWG_962@mail.ru

Quality control of lamps and improving their design requires establishing of the linkage between the sodium emission current, the diffusion coefficient and other factors. The article shows the dependence of the emission current of sodium ion on the surface of discharge tubes (PT) on the coefficient of diffusion of sodium and duration of work of sodium lamps. The study was conducted on sodium lamps DNaT-400. The discharge tubes were produced of fine-grained polycrystalline alumina and were filled with xenon to a pressure of 2.6 kPa and 2.4×10^{-5} kg of 30% sodium amalgam. Ion current leakage of sodium from RT tubes in a given mode of operation increases with the diffusion coefficient and decreases in the course of its work. The difference between the calculated and experimental data is 8%. The results can be used in indirect quality control of PT sodium lamps.

Key words: sodium ions, discharge tube, the diffusion coefficient, the ion current.

В процессе эксплуатации натриевых ламп высокого давления происходит утечка натрия из объема разрядной трубки (РТ) в виде ионов. Следствием утечки натрия из разрядного канала является ухудшение электрических и световых характеристик ламп и их преждевременный выход из строя.

Контроль качества ламп, совершенствование их конструкции требуют установления зависимости эмиссионного тока натрия от коэффициента диффузии и других факторов.

В работе приводится зависимость ионного тока эмиссии натрия с поверхности разрядных трубок от коэффициента диффузии натрия и продолжительности работы, натриевых ламп.

Разрядная трубка натриевой лампы изготавливается на основе поликристаллической окиси алюминия. При рабочей температуре трубки свыше 1400 К эмиссия натрия с её поверхности носит ионный характер [5].

Для установления зависимости I от коэффициента диффузии и длительности разряда: примем следующие допущения:

Ионы натрия, диффундирующие через РТ, формируются из атомов на границе паровой фазы – поверхности керамической оболочки.

Значение коэффициента диффузии D ионов натрия через оболочку РТ постоянно во времени.

Допущение 1 справедливо, поскольку в рассматриваемой гетерогенной системе выполняется критерий, определяемый знаком величины энергии Гиббса, при котором возможен переход незаряженных частиц из одной фазы в другую за счет процессов растворения, окисления. Согласно [3] энергия Гиббса взаимодействия поликристаллической окиси алюминия с натрием при рабочей температуре РТ ламп отрицательна.

Допущение 2 имеет место в промежуток работы РТ, когда её температура практически постоянна. В этом случае, изменение содержания натрия в амальгаме при максимальной световой отдаче ламп за время её работы по данным [2] не должно превышать 0,1 атомной доли.

Поток ионов натрия из объема РТ, диффундирующих в вакуум, может быть найден на основе решения уравнения Фика. Для стационарного режима разряда можно полагать, что диффузия натрия происходит из постоянного источника с концентрацией натрия n . В этом случае, поток натрия с поверхности цилиндрической РТ единичной длины в вакуум будет равен:

$$v = \frac{2\pi Dn}{\ln r_2 - \ln r_1}, \quad (1)$$

здесь r_1, r_2 – соответственно внутренний и внешний радиусы трубки.

Величина I ионного тока, эмитируемого поверхностью трубки длиной l , будет равна:

$$I = CqDn, \quad (2)$$

где $C = 2\pi Dn / (\ln r_2 - \ln r_1)$.

Среднее значение концентрации $n = n_0$ атомов натрия по сечению цилиндрической РТ в случае постоянства температуры вдоль её оси определяется:

$$n_0 = \frac{P}{\pi r_1^2} \int_0^{r_1} \frac{2\pi r}{kT(r)} dr, \quad (3)$$

где r – текущий радиус трубки; k – постоянная Больцмана; $T(r)$ – функция распределения температуры вдоль радиуса трубки.

Распределение температуры по радиусу РТ имеет параболический характер [7]:

$$T(r) = T_0 - T_1 r^2. \quad (4)$$

Здесь T_0 – температура на оси РТ; T_1 – коэффициент пропорциональности [$\text{К} \cdot \text{м}^{-2}$].

Подставляя (4) в (3) и интегрируя, получим:

$$n_0 = \frac{P}{T_1 r_1^2} \left| \frac{\ln(T_0 - T_1 r_1^2)}{T_0} \right|. \quad (5)$$

Зависимость давления паров натрия от температуры T и состава амальгамы натрия на основе [6] аппроксимирована нами выражением, которое справедливо для диапазона изменения от 0,5 до 0,8.

$$P = 133,3 [a\mu^{3,1} + b(T - 873)] \quad (6)$$

где $a = 95$; $b = 0$ для температуры амальгамы 923 К и $a = 134$; $b = 0,1$ для температуры – 973 К.

Атомная доля μ натрия в амальгаме, входящая в (6) с учётом [1], определяется формулой:

$$\mu = (1 + 0,115 \frac{M_{Hg}}{M_{Na}})^{-1}. \quad (7)$$

Здесь M_{Hg} , M_{Na} – соответственно массы ртути и натрия, содержащиеся в амальгаме.

Атомная доля $\mu(t)$ натрия, содержащегося в РТ в момент времени t по (7), определяется формулой:

$$\mu(t) = \left[1 + 0,115 \frac{M_{Hg}}{(M_{Na} - Q)} \right]^{-1}, \quad (8)$$

где Q – масса диффундирующего через РТ за время t натрия. С учетом допущений 1 и 2 Q определяется из уравнения Фика и равна:

$$Q = \frac{2\pi A l D n_0 t}{Na(\ln r_2 - \ln r_1)}, \quad (9)$$

Здесь A – атомный вес натрия; Na – число Авогадро; n_0 – средняя концентрация атомов натрия по сечению.

Тогда из (2) с учетом (6), (8) и (9) ток утечки натрия в стационарном режиме разряда равен:

$$I = \frac{133,3}{k T_1 r_1^2} C q D \left[a \left(1 + 0,115 \frac{M_{Hg}}{M_{Na} - B D t} \right)^{-3,1} + b(T - 873) \right] \left| \frac{\ln(T_0 - T_1 r_1^2)}{T_0} \right|, \quad (10)$$

где $B = C \frac{An_0}{Na}$.

На рисунке 1. Приведены временные зависимости изменения тока утечки натрия в период работы лампы от 100 до 3000 часов.

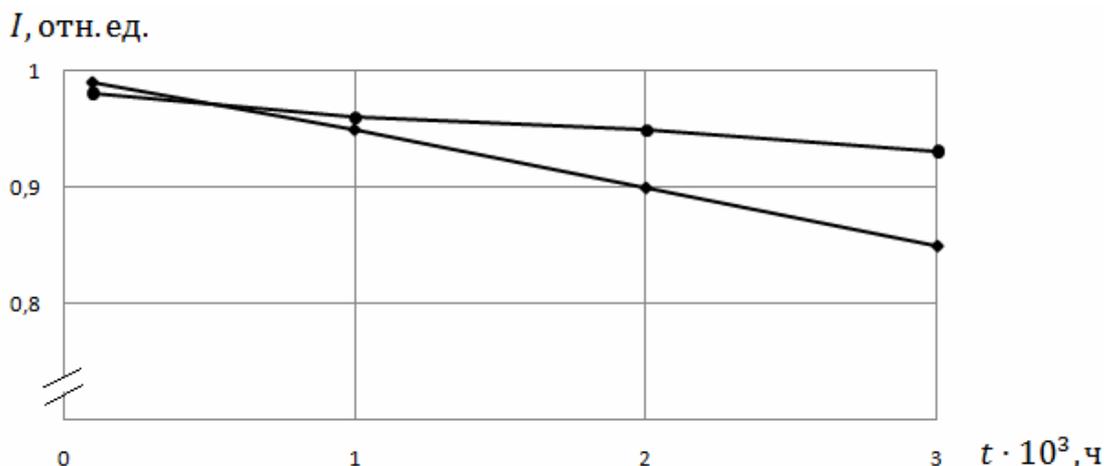


Рис. 1. Изменение ионного тока утечки натрия в зависимости от времени её горения:

◆ – экспериментальные данные; ● – расчетные данные

Расчет тока утечки проводился по формуле (10). Исходными данными являлись: внешний диаметр РТ – $8,85 \cdot 10^{-3}$ м; внутренний диаметр РТ – $7,5 \cdot 10^{-3}$; длина РТ – 0,11 м; $M_{Na} = 5,1 \cdot 10^{-6}$ кг; $M_{Hg} = 1,89 \cdot 10^{-5}$ кг; $\mu = 0,7$; $T = 923$ К; $D = 2,3 \cdot 10^{-12}$ м²с⁻¹. Концентрация n_0 атомов натрия бралась, равной среднему арифметическому значений концентраций n_1 и n_2 атомов натрия, соответствующих $\mu_1 = 0,6$ и $\mu_2 = 0,7$ (допущение 2).

Ток утечки натрия, как следует из рисунка 1. Монотонно снижается со временем из-за уменьшения концентрации натрия в разряде, вследствие утечки его через оболочку РТ в вакуумную колбу.

Экспериментальная проверка соотношения (10) осуществлялась на лампах ДнаТ-400. Разрядные трубки из поликристаллической окиси алюминия с мелкозернистой структурой при изготовлении наполнялись ксеноном до давления 2,6 кПа и амальгамой натрия массой $2,4 \cdot 10^{-5}$ кг с 30 % содержанием в ней натрия. Определение коэффициента диффузии и ионного тока натрия осуществлялось в камере, соединенной с омегатронным датчиком РМО - 4С [4], система откачивалась до вакуума 10^{-5} мм рт.ст.

Расхождение между расчетными и экспериментальными данными в определении ионного тока утечки составляет 8 %.

Таким образом, ток ионной утечки натрия из РТ лампы в заданном её режиме работы возрастает с увеличением коэффициента диффузии и снижается в процессе её работы.

Полученное выражение (10) может быть использовано для косвенного контроля качества РТ натриевых ламп.

Список литературы

1. Аносов В. Я., Озерова М. И., Фиалков Ю. Я. Основы физико-химического анализа. – М.: Наука, 1976. – 504 с.
2. Волкова Е. Б., Рохлин Г. Н. К вопросу о выборе и воспроизводимости рабочего режима натриевых ламп высокого давления // Светотехника. – 1980. – № 8. – С. 5–7.
3. Захарьевский А. В. Термодинамика взаимодействия прозрачных керамических материалов со щелочными металлами // Электрические источники света. Тр. ВНИИИС. – Саранск: 1976. – С. 146–152.
4. Свешников В. К. Метод определения коэффициента диффузии натрия через оболочку разрядной трубки // Известия вузов. Физика. – 1985. – № 3. – С. 62–65.
5. Свешников В. К. О контроле состояния поверхности разрядных трубок натриевых ламп методом экзоэлектронной эмиссии // Тезисы докладов второго всесоюзного симпозиума: «Экзоэлектронная эмиссия и её применение». – М.: МГУ, 1982. – С. 86.
6. Hirayama C., Andrew K. F., Kleinosky R. L. Activities and thermodynamic properties of sodium amalgams at 500–700°C // *Thermochimica Acta*, – 1981. – V. 45. – P. 23–27.
7. Ozaki N. Temperature distribution of high-pressure sodium vapour discharge plasma // *J. Quant Spectrosc. Radiat. Transfer*. – 1971. – Vol. 11. – №.8 – P. 1111–1123.

Рецензенты:

Малыханов Юрий Борисович, д.ф.-м.н., профессор, профессор кафедры физики и методики обучения физике, Мордовский государственный педагогический институт им. М. Е. Евсевьева, г. Саранск.

Шорохов Алексей Владимирович, д.ф.-м.н., доцент, профессор кафедры теоретической физики, НИ Мордовский государственный университет им. Н. П. Огарева, г. Саранск.