

УДК 621.385.735

ВЛИЯНИЕ СТРУКТУРЫ ОБОЛОЧКИ РАЗРЯДНОЙ ТРУБКИ НАТРИЕВОЙ ЛАМПЫ НА ИОННУЮ ЭМИССИЮ НАТРИЯ

Свешников В.К., Базаркин А.Ф., Сенькина Т.А.

ФГБОУ ВО «Мордовский государственный педагогический институт имени М.Е. Евсевьева»,
Саранск, e-mail: sveshnikovmgpi@mail.ru

В процессе эксплуатации натриевых ламп высокого давления происходит диффузионная утечка натрия из газоразрядного канала разрядной трубки в виде ионов. Ионный ток эмиссии натрия из разрядных трубок приводит к ухудшению электрических и световых характеристик ламп и их преждевременному выходу из строя. Эмиссия ионов натрия из разрядной трубки зависит от качества изготовленных трубок. По параметрам структуры оболочек трубок можно косвенно оценить качество изготовленных трубок. В работе учтено влияние размеров зерен, ширины границ между зернами и коэффициента диффузии натрия на ионный ток эмиссии натрия из разрядной трубки. Приводятся расчетные и экспериментальные результаты зависимости ионного тока от структуры керамической оболочки разрядной трубки. Установленную зависимость ионного тока натрия совместно с падением напряжения на лампе можно использовать для косвенной оценки качества ламп.

Ключевые слова: структура, газоразрядный канал, прогнозирование, ионная эмиссия, коэффициент диффузии, амальгама натрия, внешний электрод, граница зерен

INFLUENCE OF THE STRUCTURE OF SHELL DISCHARGE TUBE SODIUM LAMP ON SODIUM ION EMISSION

Sveshnikov V.K., Bazarkin A.F., Senkina T.A.

Mordovian State Pedagogical Institute named after M.E. Evsevev,
Saransk, e-mail: sveshnikovmgpi@mail.ru

In the operation of high-pressure sodium lamps occurs diffusion of sodium leaked from the gas discharge channel of the discharge tube in the form of ions. Sodium ion current issue of discharge tubes leads to deterioration of the electrical characteristics and light lamps and premature failure. Emission of sodium ions from the RT depends on the quality of manufactured tubes. According to the parameters of tube membranes structures can indirectly measure the quality of manufactured tubes. In the account of the effect on sodium ion current emission from the discharge tube grain size, grain boundaries between the width of the diffusion coefficient and sodium. The calculated and experimental results of the ion current depending on the structure of the ceramic envelope of the discharge tube. Establish the dependence of the ion sodium current in conjunction with the voltage drop across the lamp can be used for indirect estimation of quality lamps.

Keywords: structure, gas discharge channel, forecasting, ion emission, diffusion coefficient, sodium amalgam, the external electrode, grain boundary

В процессе эксплуатации натриевых ламп высокого давления (НЛВД) происходит диффузионная утечка натрия из газоразрядного канала разрядной трубки в виде ионов. Следствием потери натрия из разрядной трубки (РТ) является ухудшение электрических и световых характеристик ламп и их преждевременный выход из строя. В связи с этим одной из актуальных проблем является прогнозирование продолжительности работы изготовленных НЛВД с целью исключения поступления к потребителю потенциально негодных ламп.

Поликристаллические трубки из оксида алюминия для НЛВД получают методом порошковой металлургии. Конечная структура трубок формируется в результате процессов: межзеренных прослоек, коэффициентом диффузии по границам зерен. Различные структуры

поликристаллического оксида алюминия представлены на рис. 1.

Эти процессы зависят от чистоты исходного сырья и технологических факторов. Поэтому достаточно сложно получить стабильное воспроизведение процесса изготовления РТ.

Известно, что на диффузионную утечку натрия из поликоровой керамической оболочки РТ существенную роль оказывают «*m*» – размеры кристаллов, ширина «*d*» межзеренных прослоек и коэффициент диффузии натрия по границам зерен $D_{гр}$. Другие характеристики поликоровой оболочки РТ практически не влияют на утечку натрия. В частности, дислокации, как дефекты структуры, вызывают внутренние напряжения в образце, оказывают влияние на термостойкость трубки. Объемная пористость оболочки сказывается на свето-пропускании РТ [2].

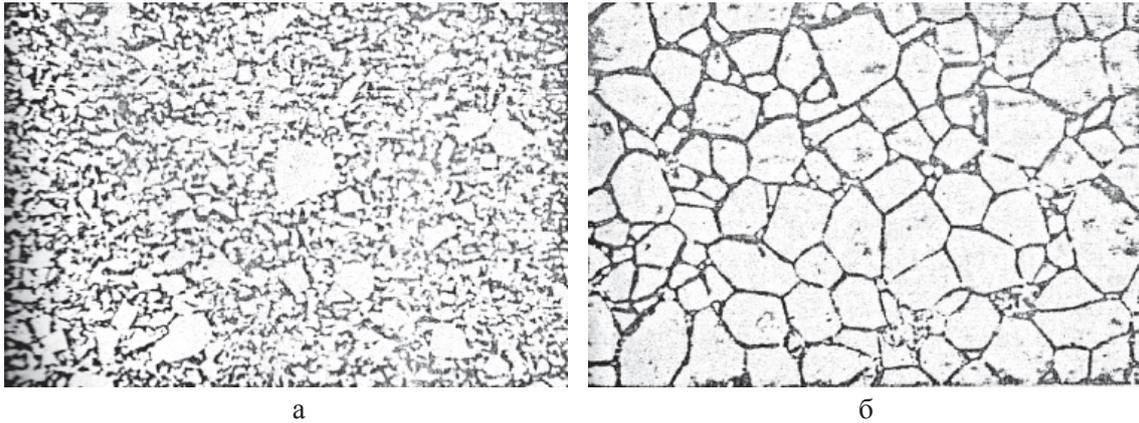


Рис. 1. Структура поликристаллического оксида алюминия:
а – мелкозернистая; б – крупнозернистая

Ионный ток эмиссии натрия из РТ зависит от качества изготовленных трубок, связанных с соблюдением технических процессов производства НЛВД [4]. По найденным значениям параметров структуры « m », « d » и $D_{\text{гп}}$ можно косвенно оценить качество РТ. Ниже в дополнении к [3] учтено влияние размеров « m » зерен, шириной « d » границ между зернами и коэффициента диффузии $D_{\text{гп}}$.

Зависимость тока утечки натрия из разрядной трубки от параметров структуры оболочки

Связь I ионного тока утечки натрия из РТ от эффективного коэффициента диффузии D равна [3]

$$I = ZD \cdot \left[a \left(1 + 0,115 \frac{M_{\text{Hg}}}{M_{\text{Na}} - M_{\text{Hg}}} \right)^{-3,1} + b(T - 871) \right]; \quad (1)$$

$$Z = \frac{133,3}{kT_1 r_1^2} C \left| \frac{\ln(T_0 - T_1 r_1^2)}{T_0} \right|;$$

$$C = \frac{2\pi l}{\ln r_2 - \ln r_1}; \quad B = C \frac{A n_0}{N_A},$$

где k – постоянная Больцмана; T_1 – коэффициент пропорциональности; r_1, r_2 – соот-

ветственно внутренний и внешний радиусы РТ; T_0 – температура на оси РТ; l – длина разрядной трубки; A – атомный вес натрия; n_0 – концентрация атомов натрия по сечению РТ; N_A – число Авогадро; q – заряд иона натрия, $M_{\text{Hg}}, M_{\text{Na}}$ соответственно массы ртути и натрия содержащиеся в амальгаме; t – время; T – температура холодной зоны; a, b – постоянные.

Эффективный коэффициент диффузии D , входящий в (1), связан с параметрами структуры оболочки РТ « a », « b » и коэффициентом диффузии натрия $D_{\text{об}}$ по объему и по границам зерен следующим выражением:

$$D = \left(\sqrt{D_{\text{об}}} + 2 \frac{d}{m} \sqrt{D_{\text{гп}}} \right)^2. \quad (2)$$

Так же как и в [2], учитывая, что для большего интервала температур $\frac{D_{\text{гп}}}{D_{\text{об}}} = 10^3 \dots 10^5$, то для случая, когда оболочка РТ представляет собой поликристаллическую окись алюминия, первым слагаемым в выражении (2) можно пренебречь [1, с. 50]. Тогда:

$$D \approx 4 \left(\frac{d}{m} \right)^2 D_{\text{гп}}. \quad (3)$$

Подставляя (3) в (1), окончательно получим

$$I = 4 \left(\frac{d}{m} \right)^2 D_{\text{гп}} Z \cdot \left[a \left(1 + 0,115 \frac{M_{\text{Hg}}}{M_{\text{Na}} - 4B(d/m)^2 D_{\text{гп}} t} \right)^{-3,1} + b(T - 871) \right]. \quad (4)$$

Анализ формулы (4) показывает, что ток положительных ионов натрия эмитируемых разрядной трубкой с течением времени снижается. Увеличение размера зерен «*m*», уменьшение ширины «*d*» границы между зернами и коэффициента диффузии $D_{пр}$ приводит к уменьшению ионного тока с оболочки РТ.

Сопоставление расчетных и экспериментальных результатов

Экспериментальное подтверждение влияния параметров структуры оболочки трубки НЛВД на ток ионной эмиссии натрия из РТ осуществлялось в партии натриевых ламп типа ДНаТ-400. Партия состояла из пяти штук. Разрядные трубки дозировались ксеноном до давления 2,6 кПа и амальгамой натрия массой $2,4 \cdot 10^{-5}$ кг, с 30% содержания в ней натрия.

Дефектная партия РТ имела мелкозернистую недоспеченную структуру оболочки с размерами зерен от 5 до 60 мкм. Трубки этой партии имеют сравнительно высокое значение коэффициента диффузии. Усредненное значение коэффициента диффузии для партии ламп составляет $2,3 \cdot 10^{-12} \text{ м}^2\text{с}^{-1}$. Разрядные трубки были наполнены амальгамой натрия, содержание которой составляло 0,6 ат. долей.

Контрольная партия РТ имела крупнозернистую структуру с размерами зерен от

40 до 100 мкм. Амальгама натрия содержала 0,72 ат. долей натрия. Усредненный коэффициент диффузии составлял $6 \cdot 10^{-13} \text{ м}^2\text{с}^{-1}$.

Для тренировки РТ и для определения коэффициента диффузии натрия через их оболочку РТ помещались в вакуумную камеру. Камера, соединенная с омегатронным датчиком РМО-4С, откачивалась до вакуума 10^{-5} Па. Тренировка РТ осуществлялась на переменном токе частотой 50 Гц и при номинальной мощности разряда 400 Вт.

Коэффициент диффузии натрия через оболочку РТ определяется омегатронным датчиком РМО-4С масс-спектрометра ИПДО-4С [5]. Для этого разрядная трубка 1 монтировалась в стеклянной камере 2, к которой затем приваривается датчик 3 (рис. 2). Внутренний объем колбы откачивался магнитным электроразрядным насосом НОРД-250.

Трубка питается переменным током через разделительный трансформатор Тр. Стабилизация разряда в трубке осуществлялась дросселем Др. К датчику относительной газоразрядной плазмы прикладывалось ускоряющее электрическое поле. При работе лампы часть ионов натрия из общего потока, эмитируемого трубкой, поступает в рабочую камеру датчика.

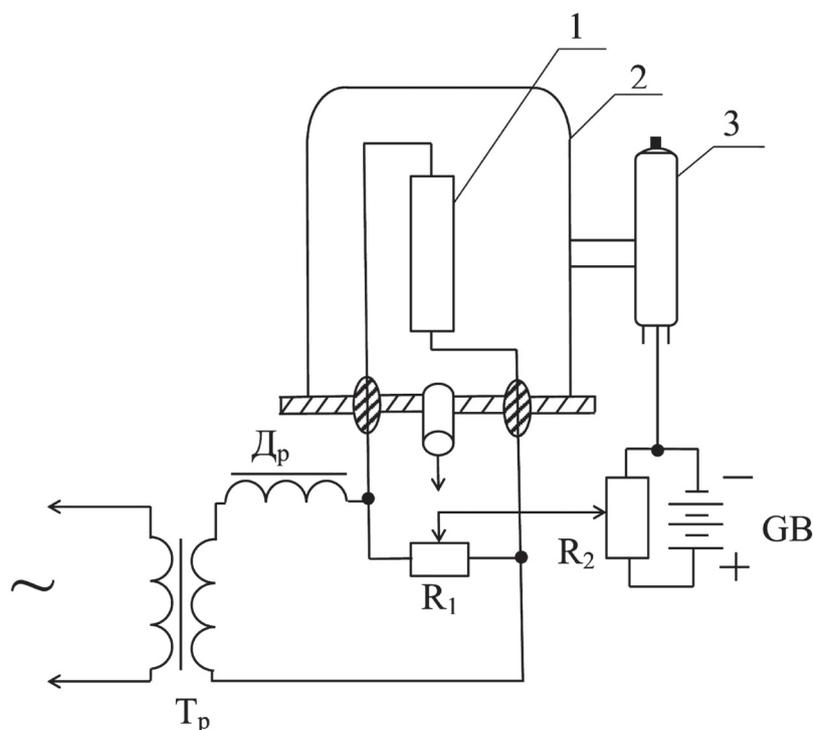


Рис. 2. Схема для определения коэффициента диффузии натрия через оболочку разрядной трубки: 1 – разрядная трубка; 2 – камера; 3 – датчик РМО-4С

Коэффициент диффузии определяется по формуле

$$D = I_0 \frac{(\ln r_2 - \ln r_1)}{2\pi N q l K_0}, \quad (5)$$

где I_0 – ток насыщения ионов натрия, регистрируемого датчиком РМО-4С; r_1 , r_2 – соответственно внутренний и внешний радиусы трубки; N – концентрация ионов в трубке; q – заряд иона натрия; K_0 – коэффициент передачи датчика для ионов натрия.

После определения коэффициента диффузии разрядные трубки монтировались в колбы ламп ДНаТ-400 и ставились для испытания. Ионный ток утечки натрия из РТ регистрировался с помощью внешнего электрода, расположенного на колбе лампы [6].

Для расчета тока эмиссии натрия из РТ брались следующие исходные данные: внешний диаметр РТ – $8,85 \cdot 10^{-3}$ м; внутренний – $7,5 \cdot 10^{-3}$ м; длина РТ – $l = 0,075$ м; $a = 40$; $T_1 = 1,9 \cdot 10^8$ км⁻²; $T_0 = 4120$ К; $T = 923$ К; $n_0 = 3,91 \cdot 10^{23}$ м⁻³; $q = 1,6 \cdot 10^{-19}$ к; $M_{\text{Hg}} = 1,89 \cdot 10^{-5}$ кг; $M_{\text{Na}} = 5,1 \cdot 10^{-6}$ кг.

В таблице приведены экспериментальные и расчетные значения измерения ионного тока натрия из РТ от времени работы лампы соответственно для дефектной и контрольной партий.

что в лампах с дефектными трубками к концу испытаний, во внешней колбе лампы обнаружены следы натрия. Расхождение между расчетными и экспериментальными данными в определении тока утечки натрия составляет менее 10%. Что касается ионного тока утечки натрия из РТ контрольной партии ламп, то за столь короткий промежуток времени он практически не изменяется. Срок службы НЛВД, изготовленных в соответствии с соблюдением ТУ, составляет свыше 20 тыс. ч.

Таким образом, по ионному току натрия, эмитируемого разрядной трубкой, а также параметрам структуры керамической оболочки РТ можно косвенно судить о продолжительности работы лампы.

Выводы

1. Получена временная зависимость ионного тока утечки натрия, эмитируемого разрядной трубкой натриевой лампы высокого давления, от коэффициента диффузии и параметров структуры m и d керамической оболочки РТ.

2. По ионному току натрия, имитируемого разрядной трубкой, а также параметрам структуры керамической оболочки РТ можно косвенно судить о продолжительности работы лампы.

Данные	Ионный ток утечки натрия $I_y \cdot 10^7$ А							
	Продолжительность работы лампы, ч							
	100		1000		2000		3000	
	Дефектная	Контрольная	Дефектная	Контрольная	Дефектная	Контрольная	Дефектная	Контрольная
Расчетные	8,45	1,10	8,20	1,15	7,90	1,20	7,54	1,30
Экспериментальные	8,80	1,10	8,30	1,10	8,0	1,10	7,20	1,10

Из таблицы следует, что ток утечки натрия из дефектных ламп монотонно снижается со временем. Снижение тока обусловлено уменьшением концентрации натрия в разряде вследствие утечки его через оболочку РТ в вакуумную колбу. Это косвенно подтверждается и тем,

3. Выражение для временной зависимости ионного тока натрия совместно с выражением для падения напряжения на лампе могут быть положены в основу создания методик контроля качества натриевых ламп высокого давления.

Список литературы

1. Герцрикен С.Д., Дяхтер И.Я. Диффузия в металлах и сплавах в твердой фазе. – М.: Государственное издательство физико-математической литературы, 1960. – 564 с.
2. Забродина Л.А., Конищенко В.С., Лаврентьев Б.В., Мальцев А.Н., Мордюк В.С., Пуставит В.М. Расчет спада световой отдачи натриевой лампы высокого давления при различной структуре трубок из окиси алюминия // Светотехника. – 1977. – № 6. – С. 15–16.
3. Свешников В.К., Васильченко В.Г. Влияние утечки натрия в натриевых лампах // Современные проблемы науки и образования. – 2012. – № 6. – www.science-education.ru/106-7922.
4. Свешников В.К., Васильев Б.Д., Громова С.Н. О контроле разрядных трубок натриевых ламп высокого давления в производстве // Состояние разработок и производства газоразрядных источников света, пути их дальнейшего совершенствования: Всесоюзное научно-техническое совещание. – Полтава, 1982. – С. 21.
5. Свешников В.К., Метод определения коэффициента диффузии натрия через оболочки разрядных трубок // Известия вузов. Физика. – 1985. – С. 62–65.
6. Способ контроля качества разрядных трубок газоразрядных ламп / Свешников В.К., Мордюк В.С., Громова С.Н. // А.С. 1285443 СССР, М.Кл. H01 K 9/42; опубл. 23.01.87. Бюл. № 3.

References

1. Gercriken S.D., Djahter I.Ja. Diffuzija v metallah i splavah v tverdoj faze. M.: Gosudarstvennoe izdatelstvo fiziko-matematicheskoy literatury, 1960. 564 p.
2. Zabrodina L.A., Konichenko V.S., Lavrentev B.V., Malcev A.N., Mordjuk V.S., Pustavit V.M. Raschet spada svetovoj otдачи natrievoy lampy vysokogo davlenija pri razlichnoj strukture trubok iz okisi aljuminija // Svetotehnika, 1977. no. 6. pp. 15–16.
3. Sveshnikov V.K., Vasilchenko V.G. Vlijanie utechki natrija v natrievyh lampah // Sovremennye problemy nauki i obrazovanija: Internet-zhurnal, 2012. no. 6. www.science-education.ru/106-7922.
4. Sveshnikov V.K., Vasilev B.D., Gromova S.N. O kontrole razrjadnyh trubok natrievyh lamp vysokogo davlenija v proizvodstve // Vsesojuznoe nauchno-tehnicheskoe soveshhanie «Sostojanie razrobotok i proizvodstva gazorazrjadnyh istochnikov sveta, puti ih dalnejshego sovershenstvovanija». Poltava, 1982. pp. 21.
5. Sveshnikov V.K., Metod opredelenija koeficienta dif-fuzii natrija cherez obolochki razrjadnyh trubok // Izvestija vuzov. Fizika, 1985. pp. 62–65.
6. Sposob kontrolja kachestva razrjadnyh trubok gazorazrjadnyh lamp / Sveshnikov V.K., Mordjuk V.S., Gromova S.N. // A.S. 1285443 SSSR, M.Kl. H01 K 9/42; opubl. 23.01.87. Bjul. no. 3.