

## Процессы конденсации и испарения амальгамы цезия при выключении и зажигании газоразрядных ламп

С. В. Гавриш

*Работа посвящена изучению процессов конденсации пленки амальгамы цезия на поверхности оболочки разрядного объема и способов последующего испарения для формирования плазменного канала в газоразрядной лампе. Проанализированы факторы, определяющие скорость осаждения и равномерность пленки амальгамы, предложено устройство для испарения металлов и зажигания разряда в лампе.*

*Ключевые слова:* конденсация, испарение, амальгама цезия, ртуть, ксенон, амальгамная пленка, зажигание, разряд, электрический пробой.

*Ссылка:* Гавриш С. В. // Прикладная физика. 2018. № 6. С. 84.

*Reference:* S. V. Gavrish, Prikl. Fiz., No. 6, 84 (2018).

### Введение

Стабильность зажигания импульсных газоразрядных ламп с цезий-ртуть-ксеноновой плазмообразующей средой, ограниченной сапфировой оболочкой, обеспечивает функциональную надежность источника ИК-излучения. Трудность зажигания разряда обусловлена особенностью конструктивного исполнения данного класса источников ИК-излучения [1]. В рассматриваемом случае газоразрядная лампа представляет собой разрядную трубку (горелку) из монокристаллического сапфира, наполненную смесью ксенона с парами цезия и ртути, коаксиально размещенную в наружной термостатирующей сапфировой оболочке, которая заполнена газом-теплоносителем. Фактически описанная конструкция представляет собой две параллельно соединенные лампы. В случае затруднения пробоя горелки, разряд будет формироваться во внешней колбе лампы, что неизбежно приведет к ее разрушению. Поэтому задача обеспечения надежного зажигания разряда исключительно в разрядной трубке очень актуальна.

### Механизмы зажигания газоразрядных ламп с разрядом в парах цезия и ртути

Зажигание большинства газоразрядных ламп высокого давления обычно производят подачей высоковольтных импульсов от специального устройства [2]. В случае использования принудительного воздушного охлаждения для ламп с разрядом в парах щелочного металла и ртути такой способ зажигания не приводит к образованию плазменного канала между электродами. Это связано с конденсацией паров цезия и ртути в виде пленки амальгамы на электродах и внутренней поверхности разрядной трубки (горелки), приводящей к полному шунтированию или уменьшению межэлектродного промежутка в процессе остывания лампы.

Из приведенных на рис. 1 вариантов распределений амальгамной пленки на поверхности горелки, сформированной в процессе остывания лампы, можно ожидать различия в механизмах последующего зажигания разряда.

1. Для положения металлической пленки, приведенного на рис. 1, а, пробой межэлектродного промежутка возможен только после частичного испарения амальгамы.

2. При расположении амальгамной пленки по поверхности сапфировой трубки, как это отображено на рис. 1, б, можно ожидать каскадный пробой [3] при низком давлении паров компонентов наполнения лампы. Электроны, эмитируемые катодом, бомбардируют пленку амальгамы цезия и заряжают ее поверхность, вследствие чего усиливается поле в зазоре «катод – пленка амальгамы».

**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.

© Гавриш С. В., 2018

Благодаря усилению поля становится возможным полный пробой основного межэлектродного промежутка. Для данного случая механизм пробоя можно описать расчетной моделью, приведенной в работе [3].

3. В случае распределении амальгамной пленки по поверхности разрядной трубки, как показано на рис. 1, в–д, при приложении напряжения к электродам лампы развитие пробоя лампы происходит под действием объемных процессов инициирования термоэлектронов с поверхности амальгамной пленки (рис. 1, в, д), контактирующей с катодом или непосредственно с катодом для случая, изображенного на рис. 1, в. Подробно механизм пробоя в таком варианте рассмотрен в работах [2, 4, 5].

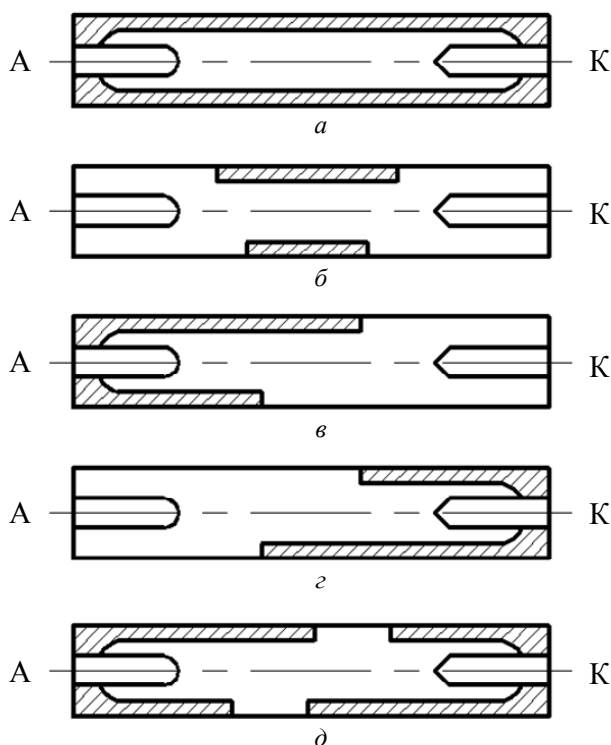


Рис. 1. Различные варианты конденсации амальгамы цезия на стенки разрядной трубки в процессе остывания лампы.

Из вышеизложенного видно, что на сегодняшний день для обеспечения надежного зажигания газоразрядной лампы, наполненной смесью ксенона с парами цезия и ртути, не решена задача пробоя разрядного промежутка при полном его шунтировании (см. рис. 1, а).

Для устранения данного эффекта «замыкания» нами предложено через образовавшуюся пленку амальгамы цезия пропускать ток, который вызывает быстрый нагрев образовавшегося металлического слоя и его испарение со стенок разрядной трубки [6]. В результате происходит формирование микроразряда в месте разрыва пленки с последующим переходом к основному разряду в

смеси ксенона с парами цезия и ртути. Так как вся используемая для нагрева мощность выделяется непосредственно в слое амальгамы, то для испарения пленки не требуется специального подогрева колбы.

### Физико-химический механизм конденсации пленки амальгамы цезия

На первом этапе для решения поставленной задачи необходимо понять теплофизические процессы, приводящие к образованию пленки амальгамы, и факторы, определяющие ее свойства.

Температурный профиль пара и оболочки определяется параметрами разряда, существующего к моменту отключения лампы, и дальнейшее изменение теплового состояния в разрядной трубке происходит за счет излучения, теплопроводности и теплоотдачи через окружающую оболочку газ. Одновременно со снижением температуры плазмы после отключения лампы происходит конденсация паров либо на оболочку в случае сохранения принудительного теплосъема с ее поверхности, либо в холодную зону разрядной трубки при естественном охлаждении [7].

Рельеф и смачиваемость поверхности, коэффициент поверхностного натяжения осаждаемого металла, наличие неконденсируемой примеси (в нашем случае, ксенон) определяют механизм конденсатного образования: пленочная или капельная конденсация [8, 9]. В обоих случаях результирующий поток конденсируемой массы каждого из металлов  $j$ , отнесенный к единице поверхности, определяется по формуле Герца-Кнудсена [9]:

$$j = f \sqrt{\frac{M}{2\pi k}} \left( \frac{p_{\text{п}}}{\sqrt{T_{\text{п}}}} - \frac{p_{\text{пов}}}{\sqrt{T_{\text{пов}}}} \right) \quad (1)$$

где  $T_{\text{п}}$ ,  $T_{\text{пов}}$  – соответственно температура пара и поверхности разрядной трубки;  $p_{\text{п}}$ ,  $p_{\text{пов}}$  – соответственно давление пара при температуре  $T_{\text{п}}$  и  $T_{\text{пов}}$ ;  $M$  – молекулярная масса;  $k$  – коэффициент конденсации.

Из уравнения (1) следует, чем меньше температура оболочки разрядной трубки, тем быстрее происходит формирование проводящей пленки и стабилизация ее сопротивления. Для пленочной конденсации характерно образование на охлаждаемой поверхности равномерной и устойчивой пленки. Расчетная оценка сопротивления пленки цезия  $R_{\text{пл}}$  массой 9 мг, равномерно распределенной по поверхности разрядного промежутка лампы диаметром 7 мм и межэлектродным расстоянием 90 мм (далее 7/90), составляет 0,36 Ом. Однако,

как показывают результаты измерений сопротивления цезиевой пленки у пятидесяти исследованных ламп, приведенные в таблице, реальное  $R_{пл}$  находится в интервале  $0,2 \div 60$  кОм, при этом наибольшее число ламп имеет  $R_{пл} = 1 \div 30$  кОм.

Из рис. 1 видно, что существуют различные варианты размещения конденсированной пленки амальгамы на поверхности разрядной трубки: от полного шунтирования (рис. 1, а) анода А и катода К (соответствует минимальному сопротивлению пленки) до различных вариантов осаждения металлических участков (рис. 1, б–д). Необходимо отметить, что в любом из приведенных вариантов конденсированная пленка не является равномерной. Прерывистая структура обусловлена услови-

ями конденсации и свойствами поверхности сапфировой разрядной трубки.

Изучение внутренней поверхности разрядной трубки под микроскопом показало, что амальгама цезия конденсируется, заполняя вогнутые площадки волнистого рельефа оболочки (дефекты, обусловленные вибрацией штока ростовой установки по методу А. В. Степанова). При этом образуется сложная проводящая структура из микрокапель, соединенных между собой ячеистыми перемычками. В дальнейшем эту структуру продолжим называть проводящей пленкой, хотя в строгом смысле слова она таковой не является. Наличие амальгамных перемычек свидетельствует о преобладании пленочной конденсации.

Таблица

Количественное соотношение ламп в зависимости от сопротивления пленки

$R_{пл}$ , кОм	0,2–1	1–10	11–20	21–30	31–40	40–60	Более 60
Кол-во, %	12	20	28	26	8	6	–

Формирование сложной ячеистой структуры, предположительно, связано с «миграцией» амальгамы цезия вплоть до установления состояния равновесия, определяемого формулой Лапласа [8]:

$$\ln \frac{p}{p_0} = \frac{2M\sigma}{\rho RT^2},$$

где  $p$ ,  $p_0$  – давления над выпуклой и вогнутой поверхностями,  $\sigma$  – коэффициент поверхностного натяжения;  $\rho$  – плотность жидкости;  $R$  – радиус кривизны;  $M$  – молекулярная масса,  $T$  – температура поверхности.

Таким образом, процесс формирования проводящей пленки можно разделить на два этапа. Первый – это быстрая конденсация, скорость которой определяется интенсивностью снижения температуры поверхности оболочки (см. уравнение (1)), а сопротивление лампы на этом этапе зависит от соотношения массы цезия в газообразном и конденсированном состоянии. Второй этап – перераспределение массы цезия по поверхности разрядной трубки, когда сопротивление лампы плавно уменьшается, стремясь к определенному значению, зависящему от температуры и внутреннего рельефа оболочки. В обоих случаях, условия теплосъема с внешней поверхности горелки являются определяющими, о чем свидетельствуют экспериментальные результаты, приведенные на рис. 2 и 3.

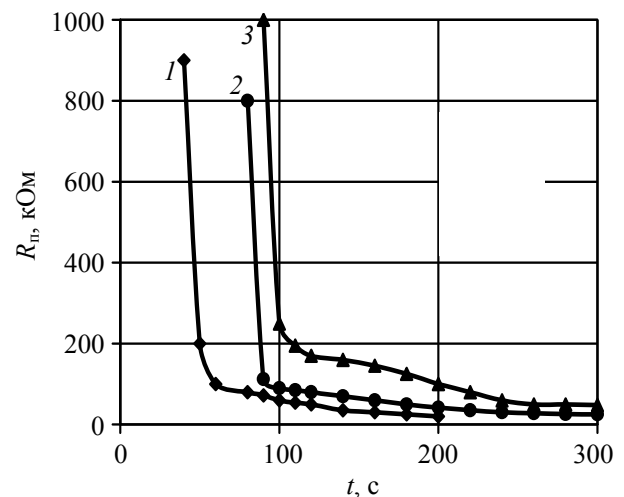


Рис. 2. Зависимость сопротивления лампы от времени остывания после выключения лампы при охлаждении сжатым воздухом через конфузур (кривая 1), тремя вентиляторами через кольцевое сопло (кривая 2) и тремя вентиляторами в цилиндрической трубе (кривая 3).

Из данных рис. 2 следует, что у кривых 1 и 2 стабилизация сопротивления пленки при 100 кОм происходит через 60 и 90 с соответственно, а для кривой 3 этот момент наступает через 100 с ( $R_{пл} = 240$  кОм). Этот результат свидетельствует о необходимости повышения скорости охлаждения потока. Во всех случаях, представленных на рис. 2, стабилизация пленки наступает после 100 секунд, т. е., начиная с этого времени, представляется возможность повторного зажигания газоразрядной лампы путем испарения амальгамной пленки по способу, предложенному в [6].

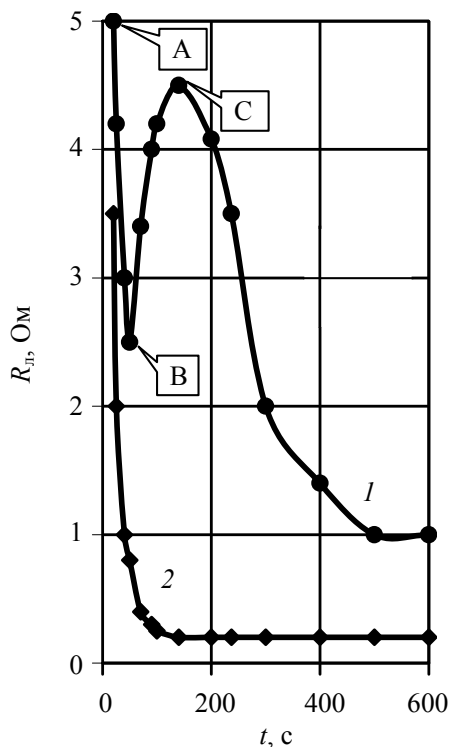


Рис. 3. Зависимость сопротивления лампы от времени остывания после выключения лампы при естественном остывании (кривая 1) и при охлаждении тремя вентиляторами через кольцевой конфузор (кривая 2).

При экстренном отключении электрического питания возникает ситуация, когда остывание лампы происходит в условиях естественного охлаждения. Поэтому вопрос повторного зажигания «горячей» лампы является актуальным. На рис. 3 представлено изменение сопротивления плазменного канала в процессе остывания лампы в отсутствие (кривая 1) и при наличии (кривая 2) принудительного охлаждения. Из приведенного рисунка видно, что при воздушном принудительном охлаждении сопротивление стабилизируется до величины 250 кОм примерно через 1,5 мин., а при естественном охлаждении только через 10 мин. достигается сопротивление 1 Мом. Характер кривой 1, а именно участок ABC, можно объяснить влиянием внешней оболочки на температуру разрядной трубки. В момент отключения лампы (точка А) температура внешней колбы соответствует рабочей температуре, и на участке АВ продолжается охлаждение горелки (конденсация паров цезия) за счет градиента температур в зазоре. Точка В соот-

ветствует равенству температур внешней оболочки и поверхности горелки. С этого момента внешняя колба играет роль термостата, температура пара и оболочки выравниваются, а участок ВС соответствует испарению частично сформированной пленки (см. уравнение Лапласа) и уходу паров в холодную зону. При этом сопротивление лампы возрастает за счет исчезновения «шунтирующего» эффекта. Точка С соответствует окончанию частичного испарения пленки и продолжению конденсации пара цезия в холодную зону. Сравнение кривых 1 и 2 на рис. 3 показывает, что падение сопротивления  $R_{л}$  продолжается до величины 1 Мом за время более 500 секунд, в то время как при принудительном охлаждении сопротивление лампы достигает стабилизированного значения 250 кОм за 100 секунд. Этот факт подтверждает необходимость сохранения принудительного охлаждения лампы после отключения для сокращения времени повторного зажигания разряда.

### Требования к источнику испарения амальгамной пленки

Процесс формирования проводящей пленки можно разделить на два этапа. Первый – это быстрая конденсация, скорость которой определяется интенсивностью снижения температуры поверхности оболочки, а сопротивление лампы на этом этапе зависит от соотношения массы цезия в газообразном и конденсированном состоянии. Второй этап – перераспределение массы цезия по поверхности разрядной трубки, когда сопротивление лампы плавно уменьшается, стремясь к определенному значению, зависящему от температуры и внутреннего рельефа оболочки. В обоих случаях условия теплосъема с внешней горелки являются определяющими, о чем свидетельствуют экспериментальные результаты, приведенные на рис. 2 и 3.

Из сказанного выше можно сделать предварительное заключение: в случае принудительного охлаждения минимальное сопротивление пленки составляет 200 Ом (см. таблицу), а усредненное значение  $R_{пл}$  (с учетом сопротивления пленки при естественном охлаждении) – примерно 150 кОм. Оценим нагрузочные характеристики блока зажигания по пленке для указанных граничных значений  $R_{пл}$ . Для этих целей был изготовлен универсальный источник питания лампы, блок-схема которого приведена на рис. 4.

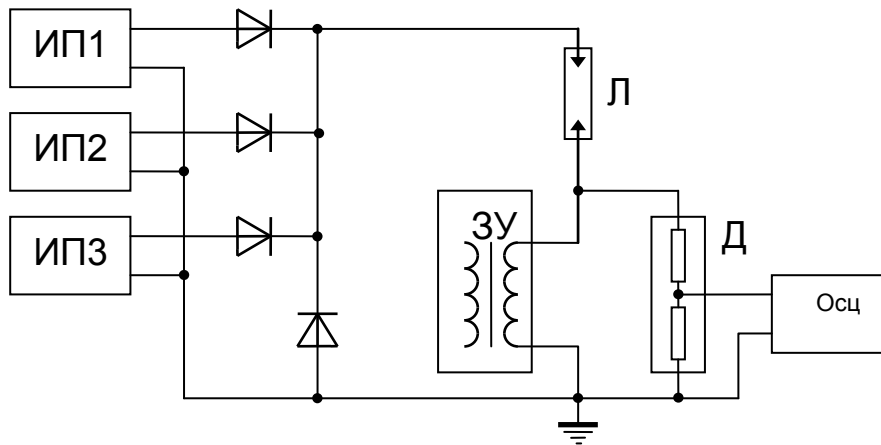


Рис. 4. Блок-схема экспериментальной установки для изучения зажигания сапфировой лампы с двумя оболочками.

Источники постоянного напряжения – ИП1 ( $U_{\max} = 1800 \text{ В}$  и  $I_{\max} = 0,3 \text{ А}$ ), ИП2 ( $U_{\max} = 3000 \text{ В}$  и  $I_{\max} = 0,1 \text{ А}$ ), ИП3 ( $U_{\max} = 300 \text{ В}$  и  $I_{\max} = 1,5 \text{ А}$ ), ЗУ – импульсное зажигающее устройство, Л – исследуемая лампа, Д – делитель напряжения, Осц – осциллограф.

Если к электродам лампы подключить источник напряжения, то по пленке пойдет ток и будет выделяться мощность:  $P_{\text{н}} = U^2 / R_{\text{пл}}$ , где  $U$  – напряжение, приложенное к электродам,  $R_{\text{пл}}$  – сопротивление пленки. Экспериментально установлено, что пленка наиболее интенсивно испаряется при мощности нагрева  $\sim 50 \text{ Вт}$ . Поэтому, исходя из этой мощности, для испарения пленки в  $200 \text{ Ом}$  необходимо к электродам приложить напряжение не менее  $100 \text{ В}$  (когда ток  $I_{\text{пл}} = 0,5 \text{ А}$ ). Это осуществляется посредством блока дежурной дуги ИП3 (см. рис. 4), основное функциональное назначение которого заключается в поддержании в проводящем состоянии плазменного канала между силовыми импульсами тока при работе лампы.

Для сопротивления  $R_{\text{пл}} = 150 \text{ кОм}$  на лампу требуется подать  $2700 \text{ В}$  (когда ток  $I_{\text{пл}} = 18 \text{ мА}$ ) от специального источника подпитки ИП2 (рис. 4). Эксперименты показали, что указанные блоки полностью испаряют пленку цезия, поэтому в использовании ИП1 нет необходимости.

В редких случаях, когда пары полностью конденсируются в заэлектродной зоне и лампа в холодном состоянии имеет сопротивление более  $150 \text{ кОм}$ , применяется подача высоковольтного импульса от трансформатора ЗУ. Именно в такой последовательности подключения (и с рассчитанными выше нагрузочными характеристиками) используются блоки в комбинированной системе зажигания в системах оптико-электронных помех.

Необходимо отметить, что нагрузочные характеристики указанных блоков определялись одновременно с оптимизацией наполнения разрядной трубки внешней колбы лампы. В результате проведенных исследований для исключения про-

боя в зазоре между оболочками давление неона, наполняющего данное пространство, выбрано в  $700 \text{ Торр}$ , а пускового газа ксенона –  $50 \text{ мм рт.ст.}$

### Заключение

В результате проведенных исследований выявлено, что формирование проводящей пленки на поверхности разрядной оболочки после выключения газоразрядной лампы происходит в два этапа, а именно, происходит пленочная конденсация цезия и ртути с последующей миграцией металлов по поверхности разрядной колбы и в холодную точку горелки. Данные процессы приводят к неравномерному распределению пленочного покрытия по поверхности и, как следствие, к различному сопротивлению лампы после завершения миграции металлов.

Для обеспечения надежного зажигания газоразрядной лампы в работе предложен способ испарения пленки амальгамы цезия путем пропуска через неё тока и определены нагрузочные характеристики такого зажигающего устройства для исследованного интервала сопротивлений источника излучения.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Гавриш С. В., Гайдуков Е. Н., Константинов Б. А., Никифоров В. Г., Самодёргин В. А. // Светотехника. 1998. № 3. С. 22.
2. Рохлин Г. Н. Разрядные источники света. – М.: Энергоатомиздат, 1991.
3. Анитов Н. М., Полякова А. А. // Электронная техника. Сер. Газоразрядные приборы. 1970. № 1 (17). С. 66.

4. Васильченко А. В., Николаев Ю. В., Шаповалов Ю. И. // ТВТ. 1986. Т. 24. № 1. С. 181.  
5. Фальковский Н. И., Божко И. В., Троицкий С. Р. и др. // ТВТ. 1985. Т. 23. № 2. С. 247.  
6. Гавриш С. В. Разработка и исследование импульсного источника ИК-излучения с разрядом в парах цезия: Автореф. дис.... канд. тех. наук. – М., 2005.

7. Андреев А. В., Карев А. В., Литвинов В. С. // Светотехника. 1989. № 1. С. 5.  
8. Ивановский М. Н., Сорокин В. П., Субботин В. И. Испарение и конденсация металлов. – М.: Атомиздат, 1976.  
9. Исаченко В. П. Теплообмен при конденсации. – М.: Энергия, 1977.

PACS: 07.50-e

## Cesium amalgam condensation and evaporation processes at gas discharge lamps shutdown and ignition

*S. V. Gavrish*

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

*Received August 9, 2018*

***The present work is devoted to studying the cesium amalgam film condensation on a surface of a discharge tube and evaporation ways to form a plasma channel within the discharge lamp. It is analyzed the factors defining precipitation rate and uniformity of the amalgam film. The devise for metal evaporation and discharge ignition of the cesium lamp is proposed.***

**Keywords:** condensation, evaporation, cesium amalgam, mercury, xenon, amalgam film, ignition, discharge, electrical breakdown.

### REFERENCES

1. S. V. Gavrish, E. N. Gaydukov, B. A. Constantinov, et al., *Lights & Engeneering*, No. 3, 22 (1998).
2. G. N. Rokhlin, *Discharge Sources of Light* (Moscow, Energoatomizdat Publ. 1991) [in Russian].
3. N. M. Anitov and A. A. Polyakova, *Elektronnaya Technika. Seriya 3. Gazorazryadnie Pribori*, No. 1, 66 (1970).
4. A. V. Vasil'chenko, Yu. V. Nikolaev, and Yu. I. Shapovalov, *Teplofizika Visokikh Temperatur (Sov. High Temperature)* **24** (1), 181 (1986).
5. N. I. Fal'kovskii, I. V. Bojko, C. R. Troitskii, et al., *Teplofizika Visokikh Temperatur (Sov. High Temperature)* **23**, 247 (1985).
6. S. V. Gavrish, *Development and investigation IR radiation pulse source with discharge in cesium vapor* (Abstract of Candidate Diss., Moscow, 2005) [in Russian].
7. A. V. Andreev, A. V. Karev, and V. S. Litvinov, *Svetotekhnika*, No. 1, 5 (1989).
8. M. N. Ivanovskiy, V. P. Sorokin, and V. I. Subbotin, *Evaporation and Condensation of Metals*. (Moscow, Atomizdat Publ., 1976) [in Russian].
9. V. P. Ysachenko, *Heat Exchange at Condensation* (Moscow, Energiya Publ. 1977) [in Russian].