

Физическая аппаратура и её элементы

УДК 533.9

Увеличение физического срока службы мощных газоразрядных ламп низкого давления

В. А. Левченко, А. И. Васильев, Л. М. Василяк, С. В. Костюченко, Н. Н. Кудрявцев

Обнаружено и экспериментально подтверждено влияние на физический срок службы газоразрядных ламп низкого давления повышенной температуры кварца около электровводов, что ранее не принималось во внимание. Предложены и опробованы два способа уменьшения влияния данного фактора на срок службы газоразрядных ламп.

PACS: 42.72.Bj, 52.50.Dg

Ключевые слова: газоразрядные лампы, низкое давление, благородные газы, ресурс, электрод.

Введение

Газоразрядные источники плазмы низкого давления с накальными оксидными электродами уже достаточно давно находят широкое применение в ряде различных приложений, в том числе как источники излучения. Эти источники постоянно совершенствуются в соответствии с запросами их применения, при этом постоянно повышается как эффективность генерации излучения, так и удельная мощность разряда, которая растет, в основном, за счет увеличения силы разрядного тока. Данные источники имеют физический ресурс от нескольких часов до нескольких тысяч часов, который зависит от ряда факторов, например, таких как геометрия лампы, электрическая мощность,

частота включений/выключений, газовое наполнение лампы, материал стенок, наличие на стенке защитного слоя, тип электродов и пр. [1—5].

Исследования работы мощных газоразрядных ламп низкого давления (в т. ч. на основе дугового разряда в парах ртути) с кварцевыми колбами при токах несколько ампер показали, что ресурс лампы при увеличении тока резко снижается даже при неизменной величине плотности тока и наличии защитного покрытия на внутренней поверхности лампы. Исходя из этих фактов, можно предположить, что в данном случае взаимодействие плазмы со стенками кварцевой трубки вдали от электродов и последующее загрязнение разрядной среды продуктами этого взаимодействия не является решающим фактором при выработке лампы её ресурса, как это было предположено в работах [4—7].

Наши исследования показали, что погасание лампы происходит до разрушения электрода или полного расхода эмитирующего оксидного покрытия, а также не зависит от наличия защитных экранов на электродах. При этом влияние фазы тлеющего разряда, имеющей место при поджиге лампы [7, 8], тоже не имеет решающего значения, поскольку эффект наблюдается независимо от количества циклов запуска лампы, в том числе и при однократном поджиге и дальнейшей работы лампы в непрерывном режиме непосредственно до её погасания. Следовательно, погасание лампы может быть связано с изменением режима работы электрода, например, ухудшения эмиссионной способности оксидного слоя, или с изменением свойств или состава газовой смеси. В случае попа-

Левченко Владимир Александрович, аспирант¹.

Васильев Александр Иванович, зам. начальника Светотехнической службы².

Василяк Леонид Михайлович, главный научный сотрудник³.

Костюченко Сергей Владимирович, председатель совета директоров².

Кудрявцев Николай Николаевич, ректор, профессор¹.

¹Московский физико-технический институт.

Россия, 141701, Московской обл., г. Долгопрудный, Институтский пер., 9.

Тел. 8 (926) 608-59-94. E-mail: mscoff@mail.ru

²НПО «ЛИТ».

Россия, 107076, Москва, Краснобогатырская ул., 44.

E-mail: lit@npo.lit.ru

³Объединённый институт высоких температур РАН.

Россия, 125412, Москва, Ижорская ул., 13, стр. 2.

Тел. 8 (495) 484-18-10. E-mail: vasilyak@ihed.ras.ru

Статья поступила в редакцию 8 сентября 2015 г.

© Левченко В. А., Васильев А. И., Василяк Л. М., Костюченко С. В., Кудрявцев Н. Н., 2015

дания в лампу кислорода произойдет как "отравление" катода, так и увеличение падения напряжения на лампе, что и приведет к ее погасанию, поскольку источник питания поддерживает ток в ограниченном диапазоне рабочего напряжения.

Вышеуказанные факторы разрушения оксидного слоя и взаимодействия плазмы разряда со стенками являются важными факторами, влияющими на физический срок службы газоразрядных ламп, однако, ни один из них не являлся основной причиной резкого уменьшения ресурса лампы при увеличении разрядного тока от 1—3 до 4—5 А. В связи с этим основной целью данной работы являлось выяснение причин, приводящих к резкому снижению ресурса газоразрядных ламп с кварцевыми колбами при увеличении разрядного тока, а также поиск путей увеличения ресурса в этих условиях.

Эксперимент

Экспериментальные исследования производились на газоразрядных трубчатых лампах низкого давления при токах до 5 А. Конструктивно такая лампа, как и большинство других газоразрядных ламп с электродами, представляет собой кварцевую трубку, заполненную инертным газом (или смесью инертных газов), в торцах которой находятся оксидные электроды. Внешний вид электродного узла показан на рис. 1. Принципиально важно отметить, что в отличие от стекла, кварц не смачивает металл, и электрод технологически не может быть герметично впаян в лампу. По этой причине используется фольговый ввод, при котором тонкая молибденовая фольга специальной формы запрессовывается в толщу кварца при высокой температуре. Такой способ ввода электрода обеспечивает достаточную герметичность для нормальной работы газоразрядных ламп с накаливаемыми оксидными электродами, работающими при разрядных токах 1—3 А, в течение всего требуемого срока службы 8—12 тысяч часов.

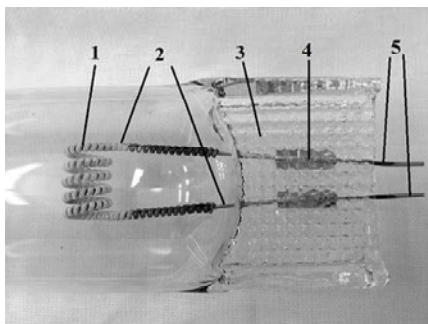


Рис. 1. Внешний вид заштампованного электродного узла: 1 — спираль оксидного электрода с нанесенным оксидом, 2 — ножки оксидного электрода, 3 — лопатка лампы, 4 — фольговый ввод, 5 — электроды для подключения источника питания

Для питания и поджига современных газоразрядных ламп низкого давления используют электронные пускорегулирующие аппараты (ЭПРА), обеспечивающих питание лампы стабилизированным переменным током до 8 А с частотой 30—80 кГц и подогрев катодов током накала (~0,5 А) в процессе работы лампы. С увеличением разрядного тока в лампах в настоящее время стали применять более мощные электроды, способные нести на себе большее количество эмиссионного оксидного покрытия и противостоять усилившейся электронной и ионной бомбардировке. Такой электрод значительно крупнее и имеет более высокое резистивное сопротивление. При повышении мощности лампы нагрев электрода и приэлектродной зоны возрастает за счет различных механизмов, а именно: возросшей мощности нагрева электродов током накала, увеличения электронной и ионной бомбардировки электродов вследствие роста тока разряда и увеличения приэлектродного падения напряжения при переходе к другим газам. При этом длина ножек электрода в лампе оставалась неизменной. Разогретые до более высокой температуры электрод и приэлектродная область создают гораздо более сильный тепловой поток на близлежащие стенки лампы, нежели ранее использовавшиеся электроды в лампах, работающих на токах до 3 А. В связи с этим авторами работы было сделано предположение, что основная причина резкого снижения срока службы при увеличении разрядного тока до 5 А может быть связана с перегревом лопаток лампы. Измеренные с помощью термопары температуры лопаток лампы на границе с разрядной колбой составляли 70—80 °С для ламп, работающих при разрядном токе до 3 А, и около 130—140 °С для ламп с током 5 А, что подтверждает предположение о перегреве лопаток и приэлектродной области кварцевой трубки.

Известно, что при нагреве кварца более 130 °С начинается интенсивное газоотделение в вакуум. Выделяющиеся пары воды и других газов будут вызывать "отравление" оксидного слоя, что, естественно, приведет к повышению приэлектродного падения. Неравномерное расширение толщи кварца и металлических вводов электрода может также приводить к образованию микроканалов вдоль последних, нарушая тем самым общую герметичность лампы. Проникновение воздуха внутрь колбы лампы "отравляет" оксид и изменяет химический состав плазмы, а поскольку кислород (молекулярный/атомарный) является достаточно хорошим акцептором электронов, то это приводит к увеличению напряжения на лампе и, соответственно, к увеличению мощности лампы. Этот процесс создаёт положительную обратную связь, поскольку увеличение мощности лампы приводит к

ещё большему перегреву лопаток и ускоренному проникновению воздуха внутрь лампы. При достижении предельной мощности, на которую рассчитан ЭПРА, лампа гаснет. Повторная попытка поджига лампы, как правило, является неудачной из-за того, что в изменённом газовом наполнении лампы (смесь инертных газов и воздуха) напряжение пробоя оказывается гораздо выше того, которое может обеспечить ЭПРА.

Для устранения описанной проблемы необходимо уменьшить температуру лопаток лампы. Одним из способов уменьшения температуры является уменьшение теплового потока по направлению к торцу лампы. Для этого было решено удлинить ножки электродов и отодвинуть раскалённую спираль электрода дальше от фольгового ввода. Результаты экспериментов с электродами различной длины приведены ниже.

Другим важным фактором, который следует учитывать при решении обозначенной проблемы, является рабочая смесь газов, в частности, для ламп, использующих неон. Лампы наполняются неоном с целью увеличения погонной мощности положительного столба разряда при том же токе и, как следствие, погонной мощности излучения источника. Однако, поскольку неон имеет существенно больший потенциал ионизации, нежели аргон, который часто использовался ранее ($\text{Ne} — 21,56 \text{ В}$, $\text{Ar} — 15,76 \text{ В}$), а также вследствие увеличения потерь зарядов на стенках вследствие более высокого коэффициента диффузии ионов и электронов в неооне по сравнению с аргонном, существенно возрастает не только напряженность электрического поля в положительном столбе разряда, но и приэлектродное падение напряжения и, соответственно, выделение мощности (в т. ч. тепловой) в приэлектродной зоне. Добавка относительно большого в процентном отношении количества аргона к неону (10 % и более в неон-аргоновой смеси) позволяет решить данную проблему, поскольку аргон ионизируется гораздо легче неона, но при этом неизбежно также уменьшается скорость дрейфа электронов и их убыль в разряде за счет рекомбинации на стенках. Это приводит к дополнительному снижению мощности разряда, уменьшению генерации излучения неона и появлению линий аргона. Следовательно, необходима добавка к неону такой малой примеси газа, который одновременно бы легко ионизировался, но при этом его процентная концентрация была бы настолько мала, что практически не замедляла бы скорость дрейфа электронов к стенкам, позволяя избежать дополнительного падения мощности в разряде. В настоящей работе авторами было предложено к неону добавлять криптон, имеющий потенциал ионизации 14 эВ.

Для проведения экспериментов были изготовлены газоразрядные лампы из кварцевых трубок с длиной разрядного промежутка 22 см и внутренним диаметром 29 мм, наполненных смесью неона, аргона и криптона до давления 0,5—1,0 Торр (газовое наполнение варьировалось). Для изготовления всех экспериментальных ламп был использован один тип электрода из одной партии. Защитное покрытие на внутреннюю поверхность колб ламп не наносилось для сокращения времени испытаний. Экспериментальные лампы зажигали при помощи ЭПРА, который обеспечивал питание лампы стабилизированным переменным током ($5,0 \pm 0,1$) А с частотой около 38 кГц.

После поджига лампы горели вплоть до их самопроизвольного погасания. Ключевым параметром эксперимента являлась продолжительность времени горения лампы. На лампе регистрировалось напряжение с помощью цифрового вольтметра UT 71E, подключенного к компьютеру-самописцу, на протяжении всего время её горения. Относительная погрешность измерения напряжения составила 2,5 %. Для контроля натекания воздуха в процессе горения лампы снимались спектры её излучения: непосредственно после начала испытания и при начале резкого роста напряжения на лампе. При резком росте напряжения были зарегистрированы характерные для азота и кислорода линии свечения в общем спектре излучения лампы, которые первоначально отсутствовали в неон-аргоновом разряде.

Результаты эксперимента

Для экспериментов с более длинными ножками электродов были изготовлены две группы ламп. Одна группа ламп наполнялась неон-аргоновой смесью (смесь А) до давления 1 Торр, длина ножек электродов от задней кромки спирали электрода до лопатки лампы составляла 22 и 33 мм. Другая группа ламп наполнялась до давления 0,7 Торр другой неон-аргоновой смесью (смесь Б) с более высоким по отношению к смеси А процентным содержанием неона. Длина ножек электродов в лампах группы Б составляла 33, 35 и 37 мм. Состав и давление смеси Б были изменены с целью ускорения испытаний. Результаты испытаний приведены на рис. 2.

Из полученных данных следует, что время жизни ламп при удлинении ножек электрода существенно увеличивается, а именно, в 3 раза при удлинении ножек с 22 до 33 мм и в 2 раза при удлинении с 33 до 37 мм. Измерения показали падение температуры кварца на границе между колбой и лопаткой лампы со 135 до 90 °С при увеличении длины ножек электрода с 22 до 33 мм. Чем дальше

расположена спираль электрода от лопатки лампы, тем меньше тепловой поток на торец лампы, и, соответственно, меньше температура, а также меньше образуется микротрещин в кварце, приводящих к нарушению герметичности колбы лампы. Факт погасания лампы вследствие нарушения её герметичности и натекания воздуха внутрь колбы лампы был установлен по появлению в спектрах излучения лампы линий азота.

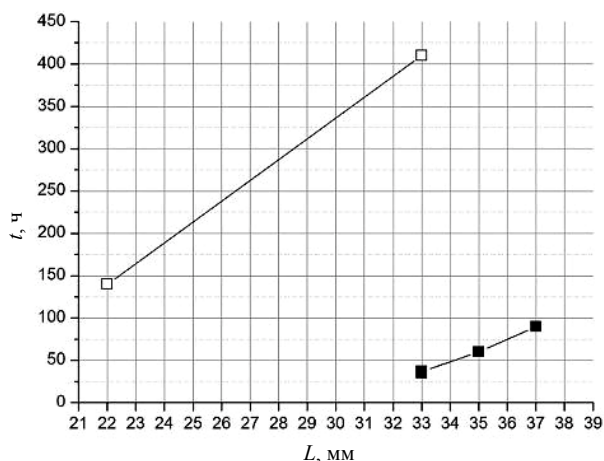


Рис. 2. Зависимость времени до погасания лампы t от длины ножек L электрода. Верхняя кривая — смесь А, 1 Торр; нижняя кривая — смесь Б, 0,7 Торр. Разрядный ток — 5 А

Для проведения экспериментов с добавками криптона были изготовлены лампы с длиной ножек электрода равной 35 мм. Лампы наполнялись различными газовыми смесями до давления 0,5 Торр в целях ускорения проведения испытаний. Результаты экспериментов представлены в таблице.

Таблица

Газовое наполнение	Время до погасания лампы, ч
Ne-Ar, Ne > 95 %	40
Ne — 90 %, Ar — 10 %	75
⁽¹⁾ Ne-Kr, Ne > 95 %	75
⁽²⁾ Ne-Kr, Ne > 95 %	110
Ne-Ar-Kr, Ne > 95 %	125

В смеси (2) процентное содержание криптона выше, чем в смеси (1).

Из полученных данных в таблице следует, что добавление достаточно большого количества аргона к неону (10 % и более в смеси) позволяет существенно увеличить время жизни источника, однако, как было указано выше, такие рабочие смеси с высоким содержанием аргона изменяют другие свойства источника. Более интересным представляется результат, что гораздо более малые в количественном отношении (менее 5 % в

смеси) добавки криптона к неону или неон-аргоновой смеси с небольшим процентным содержанием аргона позволяют существенно увеличить физическое время жизни лампы. При этом температура кварца на границе между колбой и лопаткой лампы снижается дополнительно на 10—15 °С. Еще раз подчеркнем, что использование малых добавок криптона к неону может быть более предпочтительным, чем увеличенное содержание аргона, поскольку добавка большого количества аргона к неону приводит к дополнительной потере лампой удельной мощности и изменению спектра.

Заключение

Исследования, проведенные в данной работе, показали, что при разработке мощных газоразрядных ламп низкого давления с оксидными катодами следует учитывать кроме основных известных факторов, влияющим на физический срок службы (разрушение оксидного электрода, взаимодействие плазмы с поверхностью колбы лампы, количество циклов и режим запуска и др.), ещё один, возникающий при работе мощных ламп при разрядных токах свыше 3 А, а именно, увеличение тепловой нагрузки на вакуумный фольговый ввод электрода в лампу и нагрев кварца до критических температур, связанных с повышенным газоотделением. Выяснено, что уменьшить перегрев в области ввода электродов в лампу можно двумя способами:

- а) удлинением ножек электрода, в результате чего уменьшается тепловой поток в сторону вакуумного фольгового ввода;
- б) применением малых добавок легко ионизирующихся инертных газов, например, криптона.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ультрафиолетовые технологии в современном мире. Сборник статей под ред. Ф. В. Кармазинова, С. В. Костюченко, Н. Н. Кудрявцева, С. В. Храменкова. — Долгопрудный: Издательский дом «Интеллект», 2012.
2. Рохлин Г. Н. Разрядные источники света. — М.: Энергоатомиздат, 1991.
3. Василяк Л. М., Дроздов Л. А., Соколов Д. В. и др. // Светотехника. 2008. № 6. С. 8.
4. Васильев А. И., Василяк Л. М., Костюченко С. В. и др. // Письма в ЖТФ. 2006. Т. 32. Вып. 1. С. 83.
5. Василяк Л. М., Васильев А. И., Дроздов Л. А. и др. // Прикладная физика. 2009. № 1. С. 120.
6. Vasilyak L. M., Pecherkin V. Ya. // Surf. Eng. Appl. Elect. 2012. V. 48. No. 3. P. 250.
7. Levchenko V. A., Vasilyak L. M., Kostyuchenko S. V., et al. // Surf. Eng. Appl. Elect. 2015. V. 51. No. 1. P. 54.
8. Костюченко С. В., Кудрявцев Н. Н., Микаева С. А. и др. // Инженерная физика. 2009. № 6. С. 19.
9. Васильев А. И., Василяк Л. М., Костюченко С. С. и др. // Светотехника. 2009. № 1. С. 4.

Increasing a lifetime of the powerful low-pressure discharge lamps

V. A. Levchenko¹, A. I. Vasil'ev², L. M. Vasilyak³, S. V. Kostyuchenko²,
and N. N. Kudryavtsev¹

¹Moscow Institute of Physics and Technology
9 Institute al., Dolgoprudny, Moscow Region, 141701, Russia
E-mail: mscoff@mail.ru

²LIT Technology
44/1 Krasnobogatyrskaya str., Moscow, 107076, Russia
E-mail: lit@npo.lit.ru

³Joint Institute for High Temperatures, Russian Academy of Sciences
13/2 Izhorskaya str., Moscow, 125412, Russia
E-mail: vasilyak@ihed.ras.ru

Received September 8, 2015

An influence of high temperature of quartz material around lamp electric inputs on a lifetime of the low-pressure discharge lamps has been confirmed experimentally. Two different ways to reduce the influence of this factor on the lifetime of powerful low-pressure discharge lamps have been proposed and tested.

PACS: 42.72.Bj, 52.50.Dg

Keywords: discharge lamps, low-pressure, inert gases, lifetime, electrode.

REFERENCES

1. *Ultraviolet Technologies in Modern World. Collected Articles.* Ed. by F. V. Karmazinov, S. V. Kostyuchenko, et al. (Izdat. Dom Intellekt, Dolgoprudny, 2012) [in Russian].
2. G. N. Rokhlin, *Discharge Sources of Light* (Energoatomizdat, Moscow, 1991) [in Russian].
3. L. M. Vasilyak, L. A. Drozdov, D. V. Sokolov, et al., *Svetotekhnika*, No. 6, 8 (2008).
4. A. I. Vasil'ev, L. M. Vasilyak, S. V. Kostyuchenko, et al., *Tech. Phys. Lett.* **32** (1), 83 (2006).
5. L. M. Vasilyak, A. I. Vasil'ev, L. A. Drozdov, et al., *Prikladnaya Fizika*, No. 1, 120 (2009).
6. L. M. Vasilyak and V. Ya. Pecherkin, *Surf. Eng. Appl. Elect.* **48**, 250 (2012).
7. V. A. Levchenko, L. M. Vasilyak, S. V. Kostyuchenko, et al., *Surf. Eng. Appl. Elect.* **51**, 54 (2015).
8. S. V. Kostyuchenko, N. N. Kudryavtsev, S. A. Miraeva, et al., *Inzhenernaya Fizika*, No. 6, 19 (2009).
9. A. I. Vasil'ev, L. M. Vasilyak, S. V. Kostyuchenko, et al., *Svetotekhnika*, No. 1, 4 (2009).