

Процессы развития и релаксации плазменного канала в импульсно-периодическом цезий–ртуть–ксеноновом разряде

С. В. Гавриш

Работа посвящена изучению теплофизических и радиационных процессов в ходе формирования плазменного канала при прохождении серии импульсов тока импульсно-периодического цезий–ртуть–ксенонового разряда.

Показано влияние на развитие и релаксацию плазменного канала режима вспомогательного разряда, температуры и давления паров металлов. Изучены спектральные характеристики при прохождении каждого из импульсов тока.

Ключевые слова: импульсный ток, цезий, разряд, плазма, серия импульсов, коэффициент поглощения, спектр излучения.

Ссылка: Гавриш С. В. // Прикладная физика. 2020. № 2. С. 34.

Reference: S. V. Gavrish, Applied Physics, No. 2, 34 (2020).

В настоящее время газоразрядная плазма как источник оптического излучения, по-прежнему, вызывает огромный практический интерес. Это связано с возможностью получения условно селективного излучения в различных спектральных интервалах путем подбора плазмообразующих сред и условий электрического питания газоразрядных ламп. Например, лампы переменного тока с разрядом в парах натрия являются самыми эффективными источниками света [1], а с плазмообразующей средой на основе калия и рубидия – источниками накачки твердотельных лазеров на АИГ:Nd⁺³ [2]. Процессы генерации излучения газоразрядной плазмой щелочных металлов при прохождении переменного и постоянного токов достаточно подробно изучены в работах [1–3].

В случае импульсного разряда общая картина состояния плазмы усложняется, так как она дополняется временным аспектом развития разряда в парах металлов. Ранее авто-

ром в работе [4] изучены теплофизические процессы, происходящие в течение одного импульса и приводящие в итоге к состоянию термической стабилизации параметров в максимуме тока (квазистационарная стадия [5, 6]). Переход к импульсно-периодической структуре (рис. 1) следования токовых импульсов еще более усложняет процессы формирования и релаксации разрядного канала, так как каждый импульс из серии имеет различное исходное состояние плазмы, и, следовательно, различные энергетические потери на достижение квазистационарного состояния.

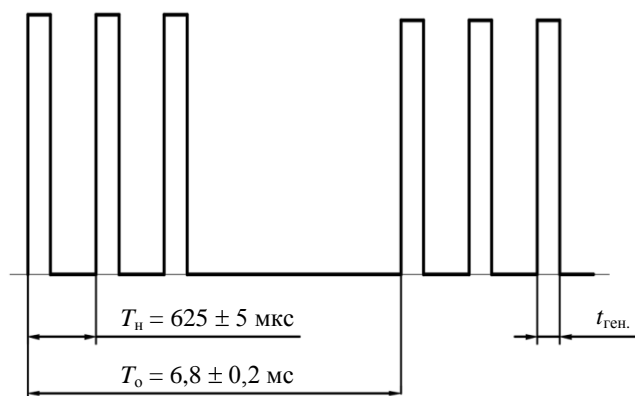


Рис. 1. Импульсно-периодическая структура импульсов напряжения: T_n – период несущей частоты; T_o – период огибающей частоты следования импульсов; $t_{ген}$ – длительность импульса напряжения.

Гавриш Сергей Викторович, нач. отдела, д.т.н.
ООО «НПП «Мелитга».
Россия, 117997, Москва, ул. Миклухо-Маклая, 16/10.
E-mail: svgavr@list.ru

Статья поступила в редакцию 16 марта 2020 г.

© Гавриш С. В., 2020

Данная работа посвящена исследованию временных зависимостей электрических параметров и спектральных характеристик излучения импульсных ламп с разрядом в цезий–ртуть–ксеноновой парогазовой смеси [7] как квазистационарном состоянии, так и при развитии и релаксации разрядного столба в процессе прохождения серии импульсов тока.

Особенности электрического питания лампы с разрядом в парах Cs–Hg–Xe смеси

Формирование токового импульса в плазменном канале в различных газоразрядных средах заключается в форсированной термической ионизации за счет приложенного электрического поля, используя уже созданную предыдущим импульсом остаточную ионизацию разрядного объема.

Если частота следования импульсов напряжения меньше определенной величины, обусловленной временем полной ионизационной релаксации плазмы, или работа газоразрядной лампы осуществляется при наличии значительных пауз (более $(2-3) \cdot t_{\text{ген.}}$, рис. 1) в следовании импульсов напряжения, то разряд гаснет. Избежать этого явления позволяет использование постоянно горящего слаботочного плазменного канала (вспомогательного разряда [8], дежурной дуги [9]), на который подается сформированная задающим генератором по требуемому закону структура импульсов напряжения (рис. 1).

Такое техническое решение имеет следующие преимущества:

1. В импульсных источниках различного назначения [5, 7], улучшается амплитудная и временная стабильность каждого импульса излучения, так как уменьшается время запаздывания зажигания лампы [8].

2. Использование такого способа электрического питания более энергоэкономично, так как для получения идентичных значений излучательных характеристик необходимо подать на лампу напряжение в 1,5 раза меньше, чем при работе без дежурной дуги [8, 9].

3. Срок службы газоразрядной лампы возрастает, так как исчезает катодное пятно и резко сокращается распыление электродов [8, 9].

Наличие вспомогательного разряда вносит некоторые коррективы в теорию послепробойного расширения электрической дуги в «холодных» инертных газах, которые подробно рассмотрены в [5, 8, 9]. В фактически уже сформированном дежурным режимом низкотемпературном разрядном канале под действием продольного градиента потенциала осуществляется форсированная термическая ионизация плазмообразующей среды.

Независимо от того, какие быстро сменяющиеся процессы элементарных взаимодействий атомов, ионов, электронов и фотонов происходят при формировании разрядного канала, важнее знать причины, приводящие к прекращению роста результирующей термической ионизации газа. Именно пиковое значение тока определяет импульсные характеристики излучения лампы. Для изучения характеристик излучения в низкотемпературной плазме целесообразно применять источники питания ламп с прямоугольными импульсами напряжения (рис. 1), подаваемого на лампу [4, 6]. Подобные установки дают возможность изучать не только ионизационные и релаксационные процессы на фронтах импульса, но и квазистационарную плазму на «плато» импульса. При этом необходимо, чтобы продолжительность импульса напряжения была меньше характерного времени переноса энергии диффузией и теплопроводностью. Это требуется для того, чтобы происходило преобладание объемных релаксационных процессов над обменом с ограничивающей его стенкой, например амбиполярной диффузией. По данным [6], время диффузии на длину в 1 см составляет $10^{-2}-10^{-3}$ сек. Поэтому длительность импульса тока для лампы с диаметром разрядного канала в 10 мм не должна превышать $5 \times 10^{-3} \div 5 \times 10^{-4}$ сек. Проведенная оценка дает верхний предел продолжительности импульса напряжения для объемных релаксационных процессов.

Как и в работе [4], для проведения спектральных и электрических исследований был использован специальный источник питания газоразрядной лампы, в котором стабилизированное напряжение от преобразователя при открытии транзисторного ключа в течение импульса длительностью $t_{\text{ген.}}$ (см. рис. 1) подавалось на вспомогательный разряд лампы.

Функционирование лампы в электрической цепи определяется следующими параметрами: составом и количеством плазмообразующих компонент (цезия, ртути), током дежурной дуги, индуктивностью и активным сопротивлением контура. В наших исследованиях параметры электрической цепи были следующие: напряжение на конденсаторе 120 В, индуктивность 8 мкГн, активное сопротивление контура 0,026 Ом, ток дежурной дуги – 1,1 А, а электрическая мощность до 1,5 кВт регулировалась изменением длительности $t_{\text{ген}}$ задающего генератора. Исследуемая лампа имела следующие конструктивные характеристики: радиус разрядного промежутка $R = 0,55$ см и длина $L = 3,5$ см, содержание цезия и ртути в разряде 1,3 и 2,0 мг, давление пускового газа (ксенона) в холодном состоянии – 70 мм рт. ст. Электрический режим реализовался в виде серий из трех импульсов с частотами следования импульсов в сериях и самих серий, определяемыми величинами T_n , T_0 и $t_{\text{ген}}$ (рис. 1).

Формирование сильноточного столба импульсно-периодического Cs–Hg–Xe разряда

На рисунке 2 приведена осциллограмма импульсов тока серии из трех импульсов при электрической мощности газоразрядной лампы 1500 Вт.

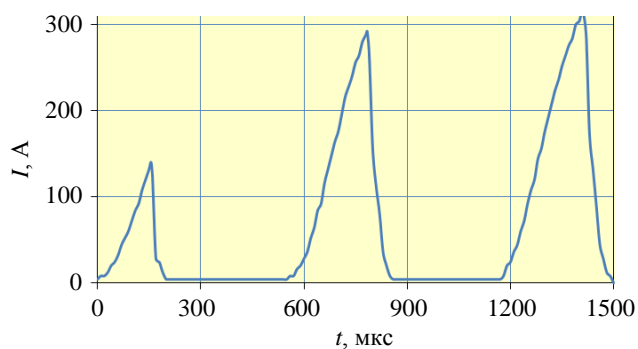


Рис. 2. Осциллограмма серии из трех импульсов тока.

Наибольшее значение тока в серии при заданном напряжении 120 В на конденсаторе достигается только в третьем импульсе и его амплитуда заметно превышает максимальное значение первого импульса. Это связано с тем, что начальное состояние разрядного проме-

жутка перед первым и последним импульсом существенно отличаются. Если третий импульс тока проходит по достаточно развитому каналу, подготовленному двумя предыдущими импульсами, то в начале серии разрядный промежуток оказывается срелаксировавшим до состояния дежурной дуги.

Спад тока на заднем фронте каждого импульса происходит за счет релаксации зарядов плазменного канала в течение 60–90 мкс. После прохождения первого импульса сопротивление успевает восстановиться до 10 Ом, далее следует очередной импульс, и сопротивление столба снова начинает падать. В итоге после окончания серии сопротивление плазменного канала восстанавливается от высокопроводящего состояния (0,2–0,4 Ом) до 70 Ом, что влечет за собой рост падения напряжения на разрядном промежутке до 75 В. В указанном поведении электрических параметров разряда проявляется нелинейная зависимость сопротивления столба разряда от тока и сказывается тепловая инерция плазмы.

Наблюдаемое явление можно объяснить следующими доводами. В течение импульса тока центральная осевая зона плазмообразующей среды, имеющая наименьшее электрическое сопротивление, на начальной стадии прогревается быстрее. Это проявляется в заметном отличии приосевых температур от средней температуры разряда. Особенно сильно данный эффект наблюдается при прохождении первого импульса тока, перед которым плазма успевает остыть до состояния, приближающегося к состоянию вспомогательного разряда. В таком проводящем состоянии находится узкая приосевая зона, в которую и начинает вводиться электрическая мощность при формировании следующего импульса тока. Именно для первого импульса имеется наибольшее отличие осевой и средней температур [10]. По мере нарастания тока температурное поле выравнивается по радиусу, а после окончания каждого импульса идет остывание. В итоге третий импульс начинается в условиях наименьшего сопротивления плазмы и наибольшей однородности температурного поля по сравнению с условиями двух предыдущих импульсов. Поэтому, как уже отмечалось, ток в данном импульсе успевает достичь заметно больших значений (рис. 2).

По истечении серии из трех импульсов осевая и средняя температуры плазмы быстро уменьшаются. Однако под действием тока дежурной дуги центральная зона снова начинает прогреваться, в то время как основная масса газа продолжает остывать. При этом проводящая зона сокращается в размерах, но, несмотря на это, в целом сопротивление столба продолжает уменьшаться.

Спектрально-временные характеристики импульсно-периодического Cs–Hg–Xe разряда

Как следует из предыдущего раздела, при прохождении каждого импульса тока из серии изменяется температурный профиль разряда. В соответствии с ходом средней температуры во времени ведет себя давление в разряде. В первом импульсе давление вырастает сравнительно мало (примерно на 70 %), во втором – уже в 3 раза, а в третьем – почти в 4 раза относительно начального уровня серии. В паузе между сериями давление, как и средняя температура, медленно релаксирует до уровня порядка 0,1 МПа. Это явление сказывается на коэффициенте поглощения плазмы и, как следствие, на спектральных характеристиках излучения газоразрядной лампы. Подробно зависимость коэффициента от температуры и давления паров нами рассмотрена в работе [10]. В частности, наиболее влияние указанные факторы оказывают на коэффициент поглощения в среднем ИК-диапазоне. Например, при изменении температуры от 2000 К до 7000 К (и соответствующем росте заселенностей верхних уровней атома цезия) коэффициент поглощения в диапазоне 3–6 мкм меняется почти на 2 порядка.

Таким образом, можно ожидать различие в спектрах излучения газоразрядной лампы при прохождении каждого импульса тока из серии. На рисунке 3 приведены спектральные характеристики Cs–Hg–Xe разряда в диапазоне 0,4–1,0 мкм.

Перед началом серии импульсов, когда плазма разрежена (порядка 0,1 МПа), линейчатая компонента спектра проявляется в полной мере в излучении вспомогательного режима. Но уже в течение первого импульса в ходе изменения термодинамического состава плазмы и смены механизмов формирования

излучения сильно меняется соотношение спектральных компонент. В результате многие линии спектра излучения Cs–Hg–Xe разряда самообращаются (рис. 3). Это явление обусловлено следующими причинами. По нашим расчетным оценкам [10] в конце 3-го импульса концентрация электронов достигает значительной $(0,5–0,9) \times 10^{18} \text{ см}^{-3}$. Электроны достаточно равномерно распределены по радиусу канала, зона проводимости составляет порядка 80 % от внутреннего диаметра разрядной трубки. Концентрации тяжелых частиц цезия, ртути и ксенона нарастают к холодным пристеночным областям. Повышенная концентрация частиц у стенок приводит к обращению резонансных линий всех элементов, а для цезия с его низким потенциалом ионизации и высокими коэффициентами поглощения в других линиях, данный эффект наблюдается и для нерезонансных линий. Например, на рис. 3 в области 0,6–0,9 мкм имеет место поглощение выходящего из горячей центральной области непрерывного излучения линиями в холодной пристеночной зоне. Данный эффект особенно заметен при увеличении давления. Линейчатая структура спектра, отчетливо выраженная в коэффициенте поглощения при малых давлениях, в ходе прохождения серии импульсов сильно сглаживается.

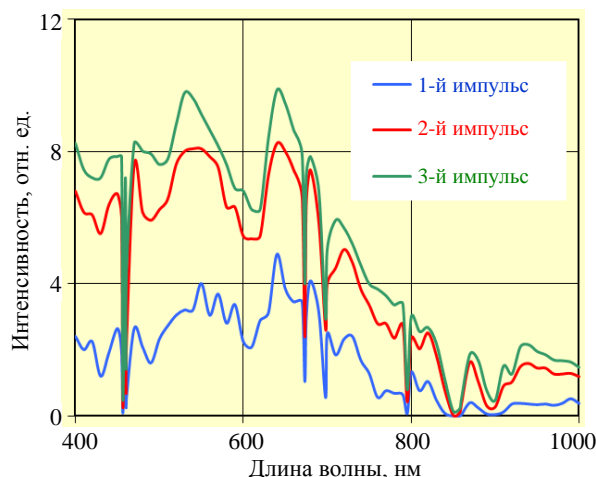


Рис. 3. Спектр излучения Cs–Hg–Xe разряда серии из трех импульсов тока при электрической мощности лампы 1500 Вт.

Заключение

Представленные результаты исследований в первую очередь важны для понимания принципа формирования помехового сигнала

в оптико-электронных системах, предназначенных для защиты летательных аппаратов от управляемых ракет. В данных системах эффективность противодействия определяется стабильностью пиковых значений импульсов излучения и постоянством спектральных характеристик [7]. С другой стороны, предложенная методология формирования импульсно-периодического разряда открывает широкие возможности применения излучения разряда в парах смеси металлов в других оптико-электронных системах гражданского и специального назначения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Рохлин Г. Н. Разрядные источники света. – М.: Энергоатомиздат, 1991.

2. Колтакова И. В. // Оптико-механическая промышленность. 1990. № 6. С. 3.

3. Уэймаус Д. Газоразрядные лампы / Пер. с англ. – М.: Энергия, 1977.

4. Гавриш С. В. // Светотехника. 2009. № 1. С. 27.

5. Маршак И. С., Дойников А. С., Жильцов В. П. и др. Импульсные источники света. 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергия, 1978.

6. Малкин О. А. Импульсный ток и релаксация в газе. – М.: Атомиздат, 1974.

7. Гавриш С. В., Логинов В. В., Пучнина С. В. // Успехи прикладной физики. 2018. Т. 6. № 4. С. 333.

8. Иванов В. В., Кашинцева Л. Ф. // Электронная техника. Сер. Электровакуумные и газоразрядные приборы. 1983. № 4. С. 17.

9. Басов Ю. Г., Михалина Т. И., Никифоров В. Г. и др. // ЖПС. 1980. Т. 32. № 4. С. 602.

10. Градов В. М., Гавриш С. В., Рудаков И. В. // Вестник МГТУ им. Н. Э. Баумана. Сер. Приборостроение. 2017. № 6. С. 130.

PACS: 07.50.-c

Processes of development and relaxation of plasma channel in pulse-periodic cesium–mercury–xenon discharge

S. V. Gavrish

Scientific and Production Enterprise "Melitta", Ltd
16/10 Miklukho-Maklaya st., Moscow, 117997, Russia

Received March 16, 2020

The work is devoted to the study of thermophysical and radiation processes during the formation of a plasma channel under the passage of a series of current pulses of pulsed-periodic cesium-xenon-mercury discharge.

The influence of the auxiliary discharge mode, temperature, and vapor pressure of metals on the development and relaxation of the plasma channel is shown. The spectral characteristics of the passage of each of the current pulses were studied.

Keywords: pulse current, cesium, discharge, plasma, series of pulses, absorption coefficient, radiation spectrum.

REFERENCES

1. G. N. Rokhlin, *Discharge light sources* (Energoatomizdat, Moscow, 1991).

2. I. V. Koltakova, OMP, No. 6, 3 (1990).

3. D. Weymaus, *Gas discharge lamps* / Trans. from English (Energy, Moscow, 1977).

4. S. V. Gavrish, *Lighting engineering*, No. 1, 27 (2009).

5. I. S. Marshak, A. S. Doinikov, V. P. Zhiltsov and others, *Pulse light sources* / 2nd ed., Rev. and add. (Energy, Moscow, 1978).

6. O. A. Malkin, *Impulse current and relaxation in gas* (Atomizdat, Moscow, 1974).

7. S. V. Gavrish, V. V. Loginov, and S. V. Puchnina, *Successes in Applied Physics* 6 (4), 333 (2018).

8. V. V. Ivanov and L. F. Kashitseva, *Electronic Engineering. Ser. Vacuum and gas discharge devices*, No. 4, 17 (1983).

9. Yu. G. Basov, T. I. Mikhailina, V. G. Nikiforov et al., *ZhPS* 32 (4), 602 (1980).

10. V. M. Gradov, S. V. Gavrish, and I. V. Rudakov, *Vestnik MGTU im. N. E. Bauman. Ser. Instrument making*, No. 6, 130 (2017).