

ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК U-ОБРАЗНОГО ПЛАЗМЕННОГО КАНАЛА ИМПУЛЬСНЫХ КСЕНОНОВЫХ ЛАМП

С.В. Гавриш
Д.Н. Кугушев
Р.М. Ушаков

svgavr@list.ru
diamond030286@mail.ru
ushakov98@gmail.com

ООО «НПП «Мелитта», Москва, Российская Федерация

Аннотация

Приведены основные результаты исследований электрических параметров и характеристик ультрафиолетового излучения импульсной ксеноновой лампы с U-образным плазменным каналом и колпачково-стержневыми токовводами. Особенность конструкции газоразрядной лампы предполагает наличие балластных заэлектродных объемов, способствующих уходу ксенона из разряда и воздействию излучения одной части U-образного плазменного канала на другую. Выполнен анализ литературных источников, посвященных указанным явлениям. Установлены факторы, влияющие на теплофизическое состояние ксеноновой плазмы. В связи с отсутствием методик регистрации импульсного излучения в узком спектральном диапазоне 200...300 нм подробно рассмотрены методики измерений и аппаратное обеспечение исследований. Расчетным и экспериментальным путем определен временной интервал установления газодинамического равновесия в импульсной ксеноновой лампе в процессе ее выхода в номинальный режим работы. Исследования влияния заэлектродного объема V_3 на характеристики импульсной ксеноновой плазмы проведены в диапазоне значений $0,16 < V_3/V_p < 0,3$. Установлено, что возможными факторами, приводящими к снижению плотности тока и интенсивности УФ-излучения, являются режимы электрического питания и испарение кварцевой оболочки, ограничивающей разряд. Показано, что возврат в плазму собственного излучения способствует росту плотности тока импульсной ксеноновой лампы

Ключевые слова

Импульсный ксеноновый разряд, плотность тока, ультрафиолетовое излучение, балластный объем, U-образный плазменный канал, колпачково-стержневой токоввод

Поступила 30.09.2022

Принята 24.10.2022

© Автор(ы), 2023

Введение. Интерес к научным исследованиям характеристик и свойств импульсного ксенонового разряда к концу XX века постепенно снизился. Это обусловлено использованием для накачки активных элементов твердотельных лазеров светодиодов взамен ранее применяемого широкополосного некогерентного излучения импульсных ксеноновых ламп. Появление оптико-электронных систем (ОЭС) обеззараживания воздуха и поверхностей с использованием УФ-излучения импульсных ксеноновых ламп [1, 2] вновь сделало актуальной необходимость изучения явлений в ксеноновой плазме во взаимосвязи с ограничивающей разряд кварцевой оболочкой (колбой) и параметрами электрического источника питания. Этот класс импульсных газоразрядных ламп эксплуатируется в режимах редких вспышек, поэтому в плазмобразующей среде протекают теплофизические процессы, которые отличаются от явлений в разряде в импульсных лампах накачки лазеров, работающих в условиях малых удельных нагрузок и длительностях тока порядка нескольких сотен миллисекунд [3]. Публикаций, описывающих происходящие эффекты в плазме и кварцевой оболочке при режимах редких вспышек импульсного источника УФ-излучения, немного [4–6]. В связи с этим *цель работы* — частичное заполнение образовавшегося научного пробела.

Теоретический аспект проблемы. Для достижения высокой эффективности импульсного ксенонового разряда в УФ-области спектра требуется повышение оптической плотности плазменного столба, при которой спектральное распределение излучения ионизированного газа приближается к спектральному распределению излучения черного тела. Выполненная по формуле Планка оценка спектральной плотности энергетической яркости черного тела показывает, что максимальный КПД в спектральном диапазоне биоцидной эффективности 200...300 нм можно достичь при значениях яркостной температуры $T \sim 10\,000 \dots 12\,000$ К. Для достижения указанной температуры T_y требуется поступление в плазменный канал значительной энергии (60...200 Дж) за короткий промежуток времени (70...150 мкс).

В настоящее время в качестве источников УФ-излучения широкое распространение получило конструктивное исполнение газоразрядной лампы с фольговым токовводом, разработанной для накачки твердотельных лазеров. Опыт эксплуатации указанных газоразрядных источников излучения выявил несколько недостатков, снижающих их долговечность при работе в режиме редких вспышек.

1. При следовании импульсов тока с частотой 1...10 Гц пиковые значения тока достигают 1,5 кА при энергии импульсов до 200 Дж. В резуль-

тате мгновенного выделения энергии в единице объема металла происходит рост температуры фольги за счет джоулева нагрева проходящим током, что периодически приводит к разрушению лампы в зоне герметизации токоввода [3].

2. Для указанных режимов характерно наличие ударных волн [3], приводящих к деформации рекристаллизованной фольги в зоне ее соединения с электродом и, как следствие, к разрушению этой области токоввода.

Воздействие разряда в режимах редких вспышек вызывает усиление эрозии кварцевой оболочки, снижает прозрачность колбы в УФ-диапазоне и механическую прочность [3, 4].

Для повышения надежности лампы за счет устранения перечисленных недостатков некоторыми авторами предложены следующие технические решения.

1. Использовать колпачково-стержневой ввод, обеспечивающий высокие токовые нагрузки [3, 7].

Для деактивации эрозионных процессов кварцевой колбы рекомендуется оптимизировать размеры разрядного объема в целях снижения удельной электрической нагрузки $p_{уд}$ на внутреннюю поверхность оболочки. Для повышения КПД УФ-излучения требуется уменьшить диаметр разрядного канала [3], поэтому оптимизация $p_{уд}$ осуществляется увеличением длины межэлектродного расстояния. Одновременно, требования к эксплуатационным характеристикам ОЭС ставят задачу придания компактной конфигурации разрядной трубки (U-образной, спиральной, кольцевой и т. д.).

В результате научно-технического анализа всех преимуществ и недостатков существующих конструктивных исполнений импульсных ламп в качестве базового варианта выбрано техническое решение (рис. 1), основанное на использовании U-образной разрядной трубки (кварцевой оболочки) 1 с колпачково-стержневым токовводом. Токоввод представляет собой цилиндрический металлический держатель 3 электрода 2, герметично соединенный с колпачком 4, который образует с кварцевой оболочкой вакуумно-плотный спай посредством пластичного припоя с герметично спаянными колпачково-стержневыми токовводами [3, 7]. Представленная на рис. 1 конструкция импульсного источника УФ-излучения имеет несколько особенностей, влияющих на теплофизические процессы в плазме.

Во-первых, герметизация разрядного объема проводится на значительном удалении от рабочей поверхности электрода, что формирует

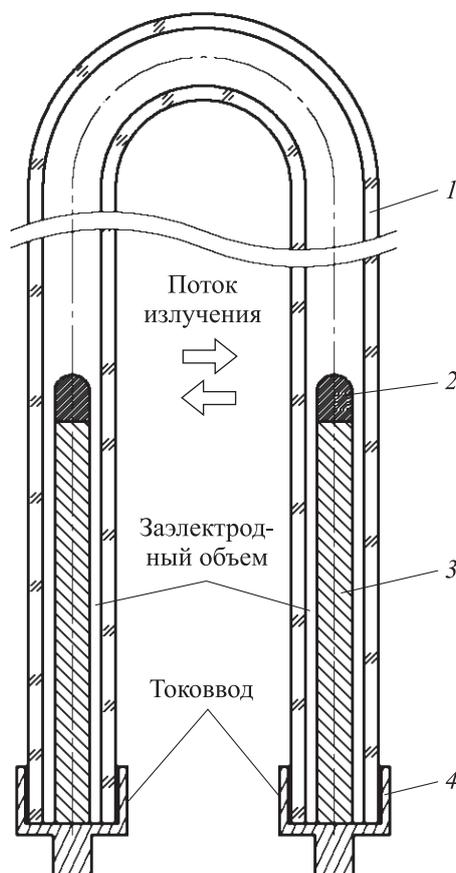


Рис. 1. Импульсный источник УФ-излучения с колпачково-стержневым токовводом

в заэлектродной области газонаполненные заэлектродные (балластные) объемы V_3 . Такое конструктивное решение по литературным данным приводит к следующим последствиям.

1. В импульсной лампе в начальный момент разряда значительная часть нейтральных атомов вытесняется из разрядного объема V_p в относительно холодные заэлектродные области [3, 8–10]. По расчетам, выполненным в [9], за время достижения максимума импульсом тока в заэлектродные области уходит около 40...50 % наполняющего газа. При увеличении балластных объемов импульсной лампы число нейтральных атомов, вытесненных из зоны разряда, возрастает по экспоненциальной зависимости [8].

2. После достижения максимума электронной концентрации, т. е. на спаде импульса тока, число тяжелых частиц в канале разряда практически не меняется [8] и температура в заэлектродной области достигает

примерно 30 % средней температуры разряда [9]. При этом температура и электропроводность плазменного канала возрастают с увеличением заэлектродного объема.

3. Электропроводность разряда наиболее резко повышается при соотношении $V_3/V_p = 0,1-0,3$, оставаясь постоянной при дальнейшем увеличении объема заэлектродной области [10].

Во-вторых, наличие параллельных частей плазменного канала приводит к их взаимному облучению собственным излучением, что, согласно работам [11, 12], аналогично работе импульсной лампы в осветителе лазера и приводит к перечисленным ниже явлениям.

1. Подогрев плазмы за счет поглощения собственного излучения приводит к изменению температурных полей разряда, электропроводности, плотности тока, длительности светового импульса, яркости разряда и его радиального профиля, а также к перераспределению энергетических потерь, определяющих КПД излучения и предельную энергию разряда, приводящего к разрушению лампы [11, 12].

2. Увеличение температуры разряда вызывает уменьшение сопротивления лампы, причем наличие заэлектродных объемов позволяет частично стабилизировать этот параметр за счет выноса части теплоты из межэлектродного пространства в заэлектродную область [12].

Перечисленные факторы, определяющие теплофизические процессы в ксеноновой плазме, подробно изучены в [3, 8–12] применительно к влиянию на характеристики излучения в видимом диапазоне. Опубликованных результатов исследований взаимосвязи характеристик УФ-излучения с конструктивными особенностями газоразрядной лампы с U-образным плазменным каналом и наличием заэлектродных объемов авторами не обнаружено. Поэтому далее приведены некоторые результаты экспериментов по изучению указанной проблемы.

Методика и аппаратное обеспечение исследований. В настоящее время вопросы регистрации импульсного излучения в УФ-диапазоне спектра представляют серьезную проблему. Во-первых, отсутствуют фотоприемные устройства, имеющие максимум спектральной чувствительности в исследуемом диапазоне длин волн 200...300 нм. Во-вторых, применение более широкополосных фотоприемников (фотодиодов, вакуумных фотоэлементов, ФЭУ и т. д.) также затруднено в силу отсутствия оптических светофильтров, позволяющих выделить поток излучения в указанном спектральном диапазоне. В-третьих, фронт нарастания фототока регистратора должен быть меньше времени переднего фронта импульса излучения.

В приведенных исследованиях использован сенсор UV Sensor TOCON-C6, регистрирующий излучение в диапазоне длин волн 220...275 нм с максимумом чувствительности на 255 нм и постоянной времени 31,4 мс. Подробно методика градуировки указанного фотодиода на спектральный диапазон приведена в [13]. В качестве характеристики УФ-излучения исследуемых импульсных ламп использована спектральная плотность энергетической экспозиции, которая наиболее полно отражает эффективность обеззараживания ОЭС.

Важная задача проводимых исследований — разработка импульсного источника УФ-излучения, позволяющего без существенных изменений конструкторских и схематических решений в составе ОЭС провести замену освоенной в серийном производстве импульсной газоразрядной лампы с фольговым токовводом. Для реализации поставленной цели применены две схемы электрического питания импульсных ксеноновых ламп.

1. Испытательный комплекс, включающий в себя описанную выше систему регистрации УФ-излучения и источник питания, который позволяет проводить исследования электрических характеристик импульсной лампы в широком диапазоне изменения параметров разрядного контура, а именно индуктивности 7...53 мкГн, сопротивления цепи 22...138 Ом, емкости накопительного конденсатора 10...120 мкФ. Подробно указанный измерительный комплекс описан в [14].

2. Источник питания газоразрядной лампы, входящий в состав серийной установки обеззараживания «Альфа-1» [1, 2].

В обоих случаях для измерения электрических характеристик применены малоиндуктивные делители напряжения смешанного типа *Pintek HVP-39Pro* со временем нарастания не более 2 нс и безындуктивные шунты, сигналы с которых регистрировались четырехканальным осциллографом TDS2024C. Измерение каждого исследуемого параметра проводили не менее 3 раз, после чего результаты усреднялись.

Важная особенность разрабатываемого источника УФ-излучения — наличие в зоне спая колпачка с кварцевой оболочкой (см. рис. 1) легкоплавкого припоя [7], поэтому во избежание разгерметизации лампы возникла необходимость регистрации температурных полей кварцевой оболочки при исследованиях в режимах флуктуации средней мощности газоразрядной лампы. Для этих целей применена разработанная в [15] методика пирометрической регистрации в спектральном диапазоне излучения 7...14 мкм нагретых полупрозрачных тел с использованием тепловизионной системы *SDS HotFind-LXT*.

Экспериментальное исследование влияния на электрофизические характеристики балластного объема. Как было отмечено ранее, имеется незначительное число исследований, посвященных изучению влияния балластного объема на электрофизические характеристики импульсных ксеноновых ламп [3, 8–10]. В качестве универсального критерия изменения объема заэлектродной области в экспериментах принят параметр V_3/V_p . Поэтому для сравнения полученных результатов с данными других работ будем использовать это соотношение.

Для проведения серии экспериментов изготовлена партия экспериментальных образцов импульсных ксеноновых ламп с колпачково-стержневым токовводом. Особенность каждой лампы — конструкция держателя электрода (см. рис. 1). Для плавного регулирования заэлектродного объема V_3 на держателе электрода выполнена технологическая проточка (рис. 2).



Рис. 2. Электродные узлы экспериментальных ламп

В результате конструкторской и технологической проработки газоразрядной лампы диаметром 7 мм и длиной 300 мм U-образного плазменного канала получен следующий диапазон значений: $0,16 < V_3/V_p < 0,3$. Дальнейшее увеличение V_3/V_p невозможно в силу конструктивных особенностей держателя электрода газоразрядной лампы.

Для повышения точности измерений возникла необходимость оценки времени для начала регистрации параметров с момента зажигания газоразрядной лампы. Полученные в [3, 8–10] расчетные и экспериментальные результаты связаны с установившимся теплофизическим состо-

янием лампы, т. е. стабилизированы средние значения температуры разряда и температуры заэлектродного объема. Дальнейшие изменения связаны с развитием импульса разрядного тока, в конце которого устанавливается газодинамическое равновесие. Поэтому критерием установившегося теплофизического состояния в лампе является время $t_{уст}$ достижения газодинамического равновесия, которое определяется длиной разрядного промежутка и концентрацией тяжелых частиц n_t при $t \rightarrow \infty$. Согласно [3], для импульсных трубчатых ламп с $0,04 < V_3/V_p < 1,0$ справедливо уравнение

$$t_{уст} = \frac{l(1 - n_t / n_0)}{2v_y}. \quad (1)$$

По данным [3], скорость ухода v_y газа в балластные объемы составляет около $5 \cdot 10^4$ см/с, что соответствует скорости звука при усредненной по объему канала температуре, а концентрация n_t определяется из выражения:

$$\frac{n_t}{n_0} = 0,65 \frac{1 + V_3/V_p}{1 + 4(V_3/V_p)}. \quad (2)$$

После совместного решения уравнений (1), (2) для граничных точек исследуемого диапазона $0,16 < V_3/V_p < 0,3$ время $t_{уст}$ должно равняться 150 и 160 мкс.

Осциллограммы импульсов тока и временная зависимость плотности тока в процессе выхода импульсной ксеноновой лампы с колпачково-стержневым токовводом в номинальный режим работы приведены на рис. 3.

Согласно данным на рис. 3, а, б, в ходе формирования теплофизического состояния газоразрядной лампы (прогрева) происходит падение амплитудного значения импульса тока и возрастание времени достижения газодинамического равновесия в разряде (максимума тока). Так, сразу после зажигания лампы амплитудное значение тока составляет $I_{max} = 1500$ А, а после работы в течение 300 с амплитуда I_{max} снижается до 1350 А, в то время как $t_{уст}$ приближается к расчетному значению 150 мкс.

Установленная тенденция трансформации токовых импульсов характерна для любого соотношения V_3/V_p (рис. 3, в). Практически для всех исследованных газоразрядных ламп после 300 с работы наблюдается стабилизация тока I_{max} , т. е. регистрацию параметров необходимо проводить по истечении указанного периода с момента зажигания разряда.

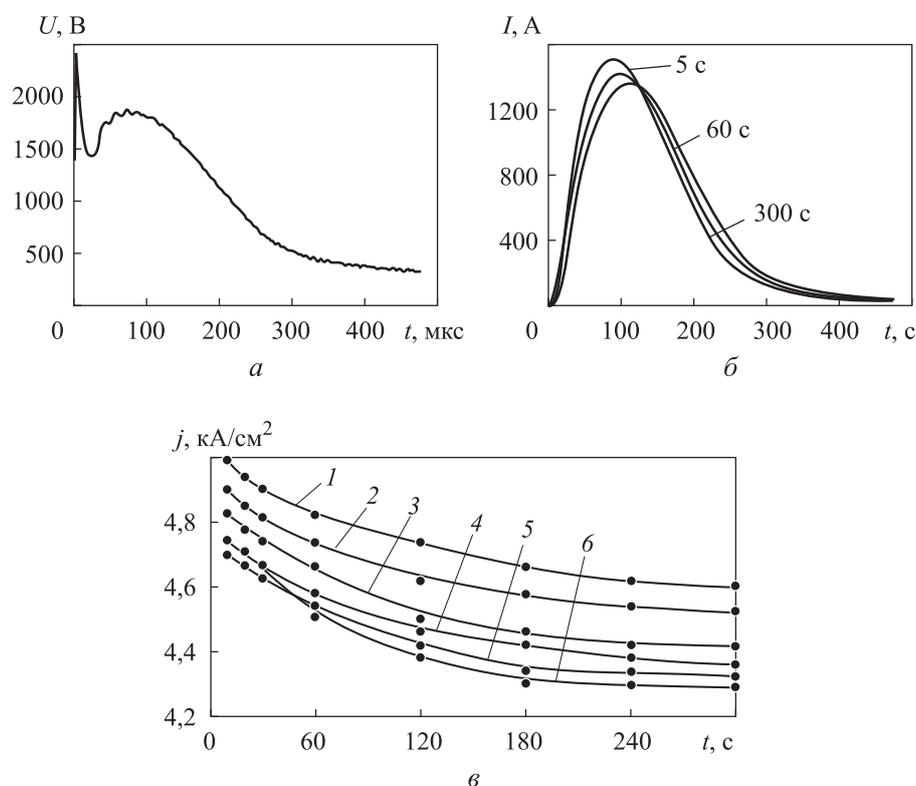


Рис. 3. Осциллограммы импульсов напряжения (а) и тока (б) ксеноновой лампы с U-образным плазменным каналом ($V_3/V_p = 0,16$), изменение плотности разрядного тока при выходе лампы в номинальный режим (в) для $V_3/V_p = 0,16$ (1), 0,19 (2), 0,22 (3), 0,24 (4), 0,27 (5) и 0,3 (6)

Зависимости плотности тока j_l в квазистационарной стадии разряда и энергетической экспозиции $W_{и}$ в спектральном диапазоне значений 200...300 нм от относительного балластного объема ламп V_3/V_p приведены на рис. 4.

Результаты проведенного анализа позволяют сделать следующие выводы:

- наблюдается корреляция между кривыми плотности тока и энергетической экспозиции, т. е. с увеличением заэлектродного объема наблюдается снижение значений j_l и $W_{и}$ по закону, близкому к линейному (см. рис. 4);
- снижение соотношения V_3/V_p в 2 раза способствует уменьшению плотности тока и энергетической экспозиции на 7 %;
- с момента зажигания разряда вплоть до выхода в номинальный режим наблюдается падение плотности тока по одинаковому закону (см. рис. 3, в) для любых соотношений V_3/V_p ;

– балластный объем влияет на установление теплофизического состояния импульсной лампы при выходе в номинальный режим работы. Результаты анализа данных на рис. 3, б показывают, что при соотношении $V_3/V_p = 0,15$ плотность тока снижается на 7 % за 300 мкс «разгорания» лампы, а для $V_3/V_p = 0,3$ уменьшение значения j_l приближается к 9 %.

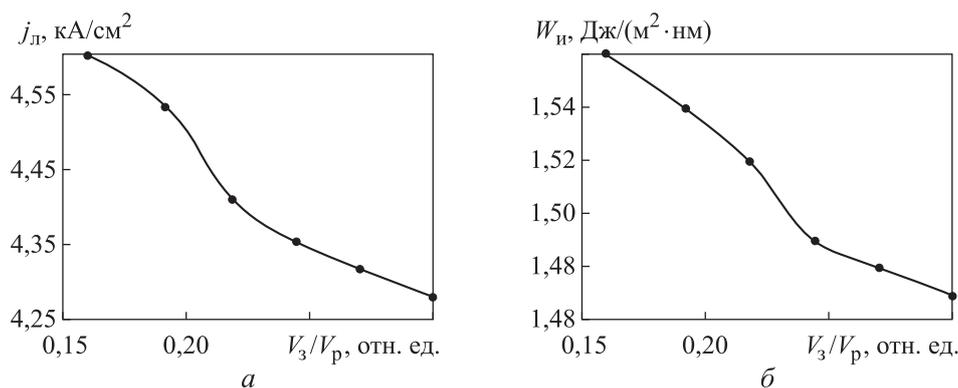


Рис. 4. Зависимость плотности тока j_l (а) и энергетической экспозиции излучения W_n (б) от соотношения V_3/V_p

Выполненный анализ результатов, представленных на рис. 3, 4, показывает, что они (см. рис. 4) противоречат данным, приведенным в [8–10], в которых с увеличением V_3/V_p наблюдается рост плотности тока. Для объяснения наблюдаемого явления необходимо сделать следующие предположения.

1. Параметры разрядного контура в [8–10] составляли $C = 600$ мкФ и $L = 100$ мкГн. При работе импульсных ксеноновых ламп в указанной электрической цепи реализуются токовые импульсы с длительностью по уровню 0,5 и более 10 мс [9], тогда как время ухода в заэлектродный объем составляет 50...100 мкс [8, 16], что достаточно для формирования установившегося теплофизического состояния лампы.

2. В рассматриваемом случае работа лампы осуществлялась в практически безындуктивном контуре ($L = 10$ мкГн) при разряде накопительного конденсатора емкостью $C = 100$ мкФ. Длительность тока по уровню 0,5 мс в зависимости от давления ксенона (рис. 5) находилась в диапазоне значений 100...120 мкс, что соизмеримо с полученными в [16] значениями 50...100 мкс.

Кроме того, выполненный расчет времени установления газодинамического равновесия позволил получить значения времени $t_{уст} = 150...160$ мкс. В результате можно сделать предположение, согласующееся

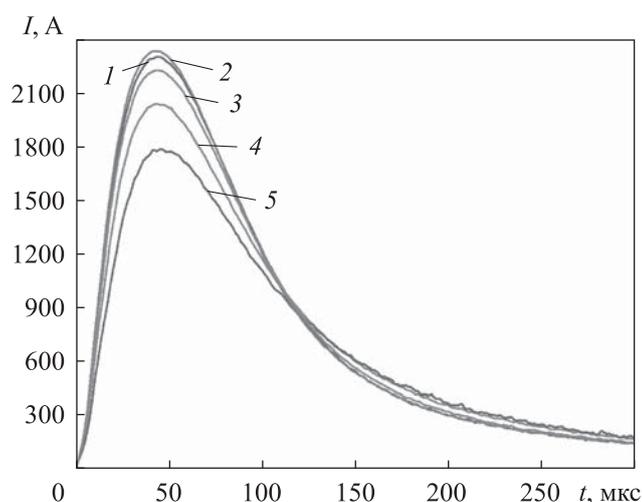


Рис. 5. Осциллограммы импульсов тока с различным давлением ксенона:

1 — серийная лампа с фольговым вводом и наполнением 210 мм рт. ст.;
 2–5 — лампа с U-образной конфигурацией плазменного канала
 и колпачково-стержневым токовводом 210 (2), 250 (3), 350 (4), 500 мм рт. ст. (5)

с данными из [16]: чем короче по времени разряд, тем меньшее количество газа успевает переместиться из V_p в V_3 , поэтому в разряде меньшей длительности давление выше, следовательно, и плотность тока меньше.

3. Несмотря на снижение количества уходящего газа в заэлектродный объем, давление в разряде должно падать. В то же время компенсация давления в межэлектродном пространстве возможна за счет испарения кварцевой оболочки [17] в режимах редких вспышек короткой длительности. Визуальный контроль трансформации структурного совершенства внутренней поверхности колбы в течение срока службы газоразрядной лампы подтвердил наличие эрозии кварцевого стекла. Кроме того, в этих режимах эксплуатации визуально наблюдается полное заполнение разрядного канала и контакт плазмы с оболочкой. Таким образом, повышение давления в плазменном столбе за счет образования парогазового слоя у поверхности колбы может компенсировать частичный уход ксенона в балластный объем. Согласно [17], поступление паров в разряд увеличивает суммарные потери на теплопроводность примерно в 2 раза, что также влияет на плотность тока импульсной лампы.

Необходимо отметить, что сделанное предположение требует спектрметрических исследований излучения приповерхностных слоев плазменного канала. В настоящее время авторами проводятся экспериментальные работы, результаты которых будут приведены в следующей публикации.

Влияние собственного излучения на электрофизические параметры импульсной лампы. В приведенном исследовании необходимо достичь двух целей. Во-первых, установить, как влияет самооблучение двух параллельных плазменных каналов на электрические параметры импульсной ксеноновой лампы. Во-вторых, не является ли возвращенное излучение причиной роста давления и снижения плотности тока.

Для этого была изготовлена прямая газоразрядная лампа с диаметром плазменного канала 7 мм и межэлектродным расстоянием 300 мм, наполненная ксеноном до давления 250 мм рт. ст. При работе в описанном разрядном контуре проведена регистрация импульса тока (см. рис. 5). Затем огневой обработкой разрядному промежутку придавалась U-образная конфигурация и эксперимент повторяли. В обоих случаях исследовали температурные поля на расстоянии 120 мм от поверхности электрода. Осциллограмма импульса тока в случае U-образной разрядной трубки показана на рис. 6.

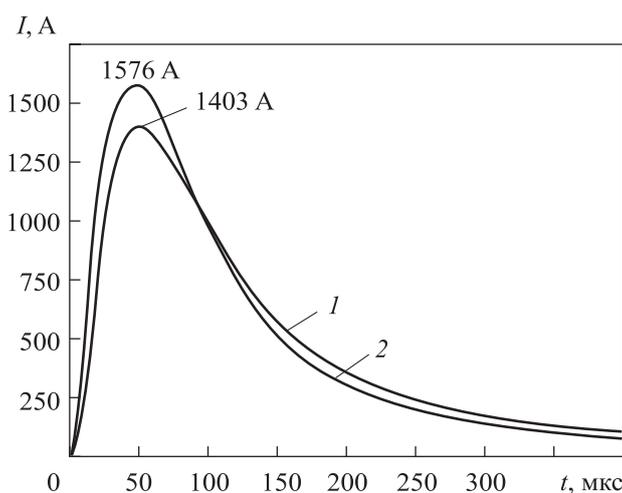


Рис. 6. Осциллограммы импульсов тока импульсной ксеноновой лампы с прямым (1) и U-образным (2) плазменным каналом

Сопоставление осциллограмм позволяет сделать следующие выводы:

- при удельной электрической мощности 30 Вт/см у лампы с U-образным плазменным каналом в квазистационарной стадии разрядный ток превышает примерно на 173 А значения для прямого разрядного столба и, соответственно, плотность тока выше на 430 А/см²;
- при нагреве плазмы собственным излучением скорость достижения квазистационарного состояния (максимума тока) возрастает. Так, в случае прямой газоразрядной лампы на стадии формирования изотер-

мической плазмы (см. рис. 6) скорость нарастания тока носит близкий к линейному характер и составляет 28 А/мкс, а в случае возврата излучения в разряд она достигает значений 32 А/мкс. Этот теплофизический процесс связан с повышением температуры разряда и, как следствие, с ростом проводимости плазмы;

– измеренная температура колбы на обозначенных ранее участках повышается на 40...60 °С за счет возврата собственного излучения в случае придания разрядному каналу U-образной конфигурации.

Приведенные результаты находятся в полном согласии с данными теоретического анализа и позволяют утверждать, что возврат излучения обратно в плазму исследованной лампы не оказывает существенного влияния на теплофизическое состояние разрядного канала.

Заключение. Установлено, что в случае U-образного плазменного канала и при наличии балластных объемов в интервале $0,16 < V_3/V_p < 0,3$ происходит снижение плотности тока с увеличением объема заэлектродных областей. Предположено, что наблюдаемое явление связано со снижением утечки газа в заэлектродный объем при переходе разряда в режим редких вспышек короткой длительности и повышением давления разряда за счет испарения оболочки.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Гольдштейн Я.А., Голубцов А.А., Киреев С.Г. и др. Новое поколение импульсных УФ-установок серии «Альфа» для оперативного обеззараживания воздуха и поверхностей помещений. *Медицинский альманах*, 2019, № 3, с. 95–98.
- [2] Шестопапов Н.В., Акимкин В.Г., Федорова Л.С. и др. Исследование бактерицидной эффективности обеззараживания воздуха и открытых поверхностей импульсным ультрафиолетовым излучением сплошного спектра. *Медицинский алфавит*, 2017, т. 2, № 18, с. 5–8.
- [3] Маршак И.С., ред. Импульсные источники света. М., Энергия, 1978.
- [4] Басов Ю.Г., Болдырев С.А., Токарева А.Н. Излучение импульсного разряда короткой длительности в смесях паров кремния и инертных газов. *ЖПС*, 1976, т. 24, № 3, с. 419–422.
- [5] Филиппов М.В., Коробков С.С., Градов В.М. и др. Ультрафиолетовое излучение импульсно-периодических разрядов высокого давления в ксеноне. *Математика и математическое моделирование*, 2017, № 6, с. 54–69.
DOI: <https://doi.org/10.24108/mathm.0617.0000095>
- [6] Киреев С.Г., Кулебякина А.И., Шашковский С.Г. и др. Алгоритм расчета характеристик импульсного газоразрядного источника УФ-излучения для проточных систем биоочистки. *Прикладная физика*, 2019, № 5, с. 71–77.

- [7] Гавриш С.В., Кугушев Д.Н., Пугачев Д.Ю. и др. Особенности технологии пайки металлическими припоями электродов газоразрядных приборов. *Электронная техника. Серия 1: СВЧ-техника*, 2020, № 3, с. 101–107.
- [8] Васьковский Ю.М., Кирсанов В.П., Нарожная Т.П. Влияние балластных объемов импульсных трубчатых ламп на их параметры. *Светотехника*, 1979, № 10, с. 19–20.
- [9] Градов В.М., Терентьев Ю.И., Щербаков А.А. Учет заэлектродных объемов при расчете характеристик импульсных ламп. *Электронная техника. Сер. Электрорадиоэлектронные и газоразрядные приборы*, 1981, № 6, с. 30–34.
- [10] Власов Ю.Н., Иконников В.П., Розанов А.Г. и др. Влияние приэлектродных балластных объемов на сопротивление импульсных ксеноновых ламп. *Оптико-механическая промышленность*, 1970, № 12, с. 23–24.
- [11] Градов В.М., Коробков С.С., Терентьев Ю.И. Моделирование нестационарных процессов в импульсных трубчатых ксеноновых лампах в условиях возврата в плазму отраженного излучения. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Приборостроение*, 2019, № 1 (124), с. 90–108.
DOI: <https://doi.org/10.18698/0236-3933-2019-1-90-108>
- [12] Басов Ю.Г. Влияние отраженного излучения на импульсный ксеноновый разряд в кварцевых трубках. *ЖПС*, 1981, т. 35, № 3, с. 389–402.
- [13] Киреев С.Г., Архипов В.П., Шашковский С.Г. и др. Измерение спектрально-энергетических характеристик импульсных источников излучения сплошного спектра. *Фотоника*, 2017, т. 6, № 8, с. 48–56.
DOI: <https://doi.org/10.22184/1993-7296.2017.68.8.48.56>
- [14] Киреев С.Г., Шашковский С.Г., Тумашевич К.А. и др. Метод вычисления энергоэффективности газоразрядных импульсных ламп. *Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики*, 2020, т. 20, № 1, с. 45–51.
DOI: <https://doi.org/10.17586/2226-1494-2020-20-1-45-51>
- [15] Гавриш С.В., Киреев С.Г., Кугушев Д.Н. и др. Температурные поля кварцевых и сапфировых оболочек газоразрядных источников излучения. *Успехи прикладной физики*, 2020, т. 8, № 4, с. 251–264.
- [16] Иванов В.В., Розанов А.Г. О давлении разряда в импульсной трубчатой лампе. *ТВТ*, 1972, т. 10, № 5, с. 1102–1104.
- [17] Градов В.М., Иванов В.В., Терентьев Ю.И. и др. К теории мощного нестационарного ксенонового разряда с учетом испарения стабилизирующих его стенок. *ТВТ*, 1981, т. 19, № 1, с. 28–35.

Гавриш Сергей Викторович — д-р техн. наук, начальник отдела источников света ООО «НПП «Мелитта» (Российская Федерация, 117997, Москва, ул. Миклухо-Маклая, д. 16/10).

Кугушев Дмитрий Николаевич — канд. техн. наук, заместитель начальника лаборатории источников света ООО «НПП «Мелитта» (Российская Федерация, 117997, Москва, ул. Миклухо-Маклая, д. 16/10).

Ушаков Роман Максимович — инженер лаборатории источников света ООО «НПП «Мелитта» (Российская Федерация, 117997, Москва, ул. Миклухо-Маклая, д. 16/10).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Гавриш С.В., Кугушев Д.Н., Ушаков Р.М. Исследование характеристик U-образного плазменного канала импульсных ксеноновых ламп. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Приборостроение*, 2023, № 1 (142), с. 15–31.

DOI: <https://doi.org/10.18698/0236-3933-2023-1-15-31>

INVESTIGATION OF CHARACTERISTICS OF THE U-SHAPED PLASMA CHANNEL OF THE PULSED XENON LAMPS

S.V. Gavrish

D.N. Kugushev

R.M. Ushakov

svgavr@list.ru

diamond030286@mail.ru

ushakov98@gmail.com

SIE “Melitta”, Moscow, Russian Federation

Abstract

The paper presents main results of investigating electrical parameters and characteristics of the pulsed xenon lamp ultraviolet radiation with a U-shaped plasma channel and cap-rod current leads. The gas-discharge lamp design feature suggests presence of the ballast transelectrode volumes contributing to the xenon escape from the discharge and the radiation acting from one part of the U-shaped plasma channel on the other. Literature sources devoted to the specified phenomena were analyzed. Factors influencing the xenon plasma thermophysical state were established. Due to the lack of techniques for registering the pulsed radiation in a narrow spectral range of 200–300 nm, measurement techniques and investigation hardware were considered in detail. The time interval for establishing the gas-dynamic equilibrium in a pulsed xenon lamp in the process of its entry into the nominal operating mode was determined by calculation and experiment. Studies of the V_t transelectrode volume effect on characteristics of the pulsed xenon plasma were carried out in the

Keywords

Pulsed xenon discharge, current density, ultraviolet radiation, ballast volume, U-shaped plasma channel, cap-rod current lead

range of $0.16 < V_t/V_i < 0.3$. It was established that the possible factors leading to a decrease in the current density and intensity of the UV radiation included the modes of electrical supply and evaporation of the quartz shell limiting the discharge. It was shown that self-radiation return in plasma contributed to an increase in the current density of the pulsed xenon lamp

Received 30.09.2022

Accepted 24.10.2022

© Author(s), 2023

REFERENCES

- [1] Goldshteyn Ya.A., Golubtsov A.A., Kireev S.G., et al. The new generation of pulsed ultraviolet systems of the alpha series for the operational disinfection of air and indoor surfaces. *Meditsinskiy almanakh* [Medical Almanac], 2019, no. 3, pp. 95–98 (in Russ.).
- [2] Shestopalov N.V., Akimkin V.G., Fedorova L.S., et al. Research of germicidal efficiency of air and open surfaces disinfection by pulsed ultraviolet light of continuous spectrum. *Meditsinskiy alfavit* [Medical Alphabet], 2017, vol. 2, no. 18, pp. 5–8 (in Russ.).
- [3] Marshak I.S., ed. *Impulsnye istochniki sveta* [Pulse light sources]. Moscow, Energiya Publ., 1978.
- [4] Basov Yu.G., Boldyrev S.A., Tokareva A.N. Short duration pulsed discharge radiation in mixtures of silicon vapor and noble gases. *ZhPS*, 1976, vol. 24, no. 3, pp. 419–422 (in Russ.).
- [5] Filippov M.V., Korobkov S.S., Gradov V.M., et al. Ultraviolet radiation of repetitively pulsed high-pressure discharges in xenon. *Matematika i matematicheskoe modelirovanie* [Mathematics and Mathematical Modeling], 2017, no. 6, pp. 54–69 (in Russ.). DOI: <https://doi.org/10.24108/mathm.0617.0000095>
- [6] Kireev S.G., Kulebyakina A.I., Shashkovskiy S.G., et al. Calculation algorithm for the characteristics of a pulsed discharge radiation source for flow-through systems. *Prikladnaya fizika* [Applied Physics], 2019, no. 5, pp. 71–77 (in Russ.).
- [7] Gavriish S.V., Kugushev D.N., Pugachev D.Yu., et al. The technology features of soldering electrodes of gas-discharge devices with metal solders. *Elektronnaya tekhnika. Seriya 1: SVCh-tekhnika* [Electronic Engineering. Ser. 1. Microwave Engineering], 2020, no. 3, pp. 101–107 (in Russ.).
- [8] Vaskovskiy Yu.M., Kirsanov V.P., Narozhnaya T.P. Influence of ballast volumes of pulsed tubular lamps on their parameters. *Svetotekhnika*, 1979, no. 10, pp. 19–20 (in Russ.).
- [9] Gradov V.M., Terentyev Yu.I., Shcherbakov A.A. Accounting for the electrode volumes when calculating the characteristics of pulsed lamps. *Elektronnaya tekhnika. Ser. Elektrovakuumnye i gazorazryadnye pribory*, 1981, no. 6, pp. 30–34 (in Russ.).
- [10] Vlasov Yu.N., Ikonnikov V.P., Rozanov A.G., et al. Influence of near-electrode ballast volumes on the resistance of pulsed xenon lamps. *Optiko-mekhanicheskaya promyshlennost*, 1970, no. 12, pp. 23–24 (in Russ.).

[11] Gradov V.M., Korobkov S.S., Terentyev Yu.I. Simulation of nonstationary processes in pulse tubular xenon lamps in conditions of return of reflected radiation into plasma. *Herald of the Bauman Moscow State Technical University, Series Instrument Engineering*, 2019, no. 1 (124), pp. 90–108 (in Russ.).

DOI: <https://doi.org/10.18698/0236-3933-2019-1-90-108>

[12] Basov Yu.G. Influence of reflected radiation on pulsed xenon discharge in quartz tubes. *ZhPS*, 1981, vol. 35, no. 3, pp. 389–402 (in Russ.).

[13] Kireev S.G., Arkhipov V.P., Shashkovskiy S.G., et al. Measurement of spectral and energy characteristics of pulsed radiation sources of continuous spectrum. *Fotonika [Photonics Russia]*, 2017, vol. 6, no. 8, pp. 48–56 (in Russ.).

DOI: <https://doi.org/10.22184/1993-7296.2017.68.8.48.56>

[14] Kireev S.G., Shashkovskiy S.G., Tumashevich K.A., et al. Energy efficiency calculation of gas-discharge flash lamps. *Nauchno-tekhnicheskiiy vestnik informatsionnykh tekhnologii, mekhaniki i optiki [Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics]*, 2020, vol. 20, no. 1, pp. 45–51 (in Russ.).

DOI: <https://doi.org/10.17586/2226-1494-2020-20-1-45-51>

[15] Gavrish S.V., Kireev S.G., Kugushev D.N., et al. Temperature fields of quartz and sapphire envelopes of gas discharge radiation sources. *Uspekhi prikladnoy fiziki [Advances in Applied Physics]*, 2020, vol. 8, no. 4, pp. 251–264 (in Russ.).

[16] Ivanov V.V., Rozanov A.G. On discharge pressure in a pulsed tube lamp. *TVT*, 1972, vol. 10, no. 5, pp. 1102–1104 (in Russ.).

[17] Gradov V.M., Ivanov V.V., Terentyev Yu.I., et al. Theory of powerful non-steady xenon discharge taking vaporization of its stabilizing walls into account. *High Temp.*, 1981, vol. 19, no. 1, pp. 22–28.

Gavrish S.V. — Dr. Sc. (Eng.), Head of the Department of Light Sources, SIE “Melitta” (Miklukho-Maklaya ul. 16/10, Moscow, 117997 Russian Federation).

Kugushev D.N. — Cand. Sc. (Eng.), Deputy Head of the Laboratory of Light Sources, SIE “Melitta” (Miklukho-Maklaya ul. 16/10, Moscow, 117997 Russian Federation).

Ushakov R.M. — Engineer, Laboratory of Light Sources, SIE “Melitta” (Miklukho-Maklaya ul. 16/10, Moscow, 117997 Russian Federation).

Please cite this article in English as:

Gavrish S.V., Kugushev D.N., Ushakov R.M. Investigation of characteristics of the U-shaped plasma channel of the pulsed xenon lamps. *Herald of the Bauman Moscow State Technical University, Series Instrument Engineering*, 2023, no. 1 (142), pp. 15–31 (in Russ.). DOI: <https://doi.org/10.18698/0236-3933-2023-1-15-31>