

УДК 621.327

Исследование факторов, определяющих модуляционные характеристики разрядных ИК-источников

С. В. Гавриш, В. С. Жмаев, А. И. Кобзарь, В. В. Логинов
ОАО ПО "Завод Стелла", ЗАО «СКБ "Зенит"», Москва, Россия

Рассмотрено влияние конструктивных параметров и электрического питания импульсных цезиевых источников с сапфировой оболочкой на их модуляционные характеристики при следующих сочетаниях параметров включения ламп: в спектральном диапазоне 3—5 мкм при средних частотах следования токовых импульсов до $f_i = 1,0$ кГц и потребляемой электрической мощности до $P_l = 3$ кВт; в диапазоне 0,8—0,7 мкм при $f_i = 1,0—8,0$ кГц и P_l — до 1,0 кВт. Даны рекомендации по дальнейшему улучшению модуляционных характеристик ламп.

PACS: 07.50.-e

Введение

Модулируемые источники ИК-излучения широко используются в самых различных оптико-электронных системах (РОЭС) [1]. Источником ИК-излучения в таких системах являются, как правило, лампы с импульсным разрядом в парах цезия. Необходимая импульсно-периодическая структура ИК-излучения плазмы формируется за счет модуляции разрядного тока. При этом модуляционные характеристики ламп зависят от скорости нарастания переднего фронта импульса тока и времени спада его заднего крыла. Изучению факторов, определяющих указанные параметры, посвящена данная статья.

Наиболее теоретически и экспериментально изучены импульсные ксеноновые лампы с кварцевой оболочкой [2]. Модулируемые источники с разрядом в парах цезия существенно отличаются от последних теплофизическими процессами в разряде, конструктивным исполнением и режимами электрического питания.

Особенности конструкции и работы ламп с разрядом в парах цезия

Основные характеристики модулируемых ИК-излучателей — пиковая сила излучения A в заданном интервале спектра и глубина модуляции m , определяемая соотношением:

$$m = \frac{A - A_n}{A} \cdot 100 \%,$$

где A_n — постоянная составляющей излучения (свечение нагретых оболочек и электродов, перекрытие фронтов импульсов излучения и т. д.).

Достижение максимальных значений A и m в применяемом спектральном диапазоне РОЭС (0,8—5 мкм) рассматривается при следующих сочетаниях параметров режима включения ламп:

- в спектральном диапазоне 3—5 мкм при средних частотах следования токовых импульсов до $f_i = 1,0$ кГц и потребляемой электрической мощности до $P_l = 3$ кВт;
- в диапазоне 0,8—2,7 мкм при $f_i = 1,0—8,0$ кГц и P_l — до 1,0 кВт.

Очевидно, что такой диапазон изменения удельных электрических нагрузок требует различного конструктивного исполнения ИК-источников. На рис. 1 дано фото импульсной лампы мощностью до $P_l = 3$ кВт, которая представляет собой разрядную трубку из монокристаллического сапфира, наполненную парами цезия и расположенную в наружной термостатирующей сапфировой оболочке, заполненной газом-теплоносителем. Такая конструкция обеспечивает высокие удельные электрические нагрузки за счет теплоотвода потоком воздуха, направленным на наружную оболочку. При электрической мощности на лампе до 1,0 кВт достаточно использовать лампу с одной сапфировой оболочкой, работающей в условиях естественного охлаждения (см. рис. 1). Подробно с особенностями конструирования рассмотренных ламп можно ознакомиться в работах [1, 3].

Выбор цезия в качестве плазмообразующей среды обусловлен существенным энергетическим потоком излучения разряда: в диапазоне длин волн 0,8—1,2 мкм за счет наличия самообращенных резонансных линий 852,11 и 894,35 нм; в интервале 3—5 мкм излучения энергетического перехода $6n^2p \rightarrow 5n^2d$ с длинами волн 3,613 и 3,01 мкм.

Излучательная способность любого щелочного металла зависит от давления его паров в разряде,

Энергия разряда рабочего конденсатора (W) в приведенной схеме рассчитывается по формуле

$$W = \frac{C_1 U_p^2}{2},$$

где C_1 — емкость рабочего конденсатора;

U_p — напряжение на рабочем конденсаторе, примерно равное удвоенному напряжению (U_0) на выходе выпрямителя.

Средняя мощность P , потребляемая лампой, ориентировочно может быть рассчитана по формуле

$$P \approx \frac{C_1 U_p^2}{2} f \approx 2C_1 U_0^2 f,$$

где f — частота следования импульсов с блока управления.

Для более точного определения мощности параллельно испытуемой лампе подключается делитель напряжения, а последовательно с лампой безиндуктивный шунт, что позволяет фиксировать осциллограммы приложенного напряжения и тока, проходящего через лампу.

Параметры разработанного универсального экспериментального источника питания характеризуются следующими величинами:

потребляемая мощность до 5 кВт;

частота следования импульсов 400, 450 и 500 Гц, возможность подключения внешнего задающего генератора;

регулируемое напряжение на рабочих конденсаторах в диапазоне 0—560 В;

емкость рабочих конденсаторов в диапазоне 2—158 мкФ;

индуктивность разрядного контура 28,5—158 мкГн;

стабилизированный ток дежурной дуги в пределах 1,0—1,5 А;

регулируемое напряжение дежурной дуги в диапазоне 50—360 В.

Было проведено исследование влияния величины индуктивности на скорость нарастания переднего фронта импульса тока ламп диаметром $d = 7$ мм и межэлектродным расстоянием $l = 90$ мм (далее 7/90), наполненных смесью Cs (9 мг) + Hg (3 мг) + Xe (50 мм рт. ст.), в разрядном контуре с емкостью накопительного конденсатора 60 мкФ при фиксированной энергии импульса 4,5 Дж. Использовались три типа индуктивностей: $L_{k1} = 29$ мкГн ($R_{l1} = 0,017$ Ом), $L_{k2} = 44$ мкГн ($R_{l2} = 0,025$ Ом) и $L_{k3} = 73$ мкГн ($R_{l3} = 0,024$ Ом). Как и для разряда в ксеноне [2], увеличение индуктивности изменяет форму импульса тока через лампу, главным образом на первой стадии разряда, замедляя рост тока. Так, для $L_{k1} = 29$ мкГн скорость нарастания тока составляет 3,5 кА/с, а для $L_{k2} = 44$ мкГн и $L_{k3} = 73$ мкГн, соответственно, 2,5 и 2,2 кА/с. При этом использование корректирующей индуктивности 44 мкГн

приближало форму импульса тока к колоколообразной.

Зависимости сопротивления плазмы разряда от времени получались расчетным путем по осциллограммам тока и напряжения. Время установления минимального сопротивления плазмы (для лампы 7/90 — $R_l = 0,85$ Ом) равнялось для индуктивностей $L_{k1} = 29$ мкГн — 60 мкс, $L_{k2} = 44$ мкГн — 70 мкс, $L_{k3} = 73$ мкГн — 80 мкс, соответственно. Максимальное значение тока достигается при тех же индуктивностях, соответственно, за 80, 100 и 110 мкс. Поэтому после установления минимального сопротивления, согласно $t = \frac{(R_{pk} + R_l) \cdot C}{2}$ [2], основ-

ное влияние на амплитуду и длительность импульса тока будут оказывать активные потери в разрядной цепи, которые на данной стадии разряда превышают R_l .

Энергия, запасенная в разрядном контуре, будет использоваться наиболее полно в случае равенства волнового сопротивления контура $\sqrt{L/C}$ и сопротивления лампы R_l . Таким образом, для увеличения КПД разрядной цепи необходимо уменьшить волновое сопротивление контура или использовать лампы с большим R_l . Для ламп с разрядом в парах щелочных металлов увеличение R_l связано с увеличением давления добавок и, как следствие, повышением температуры холодной точки, что весьма проблематично в силу технологических и конструкционных проблем. Поэтому авторы исследовали влияние волнового сопротивления на характеристики импульсов излучения в спектральном диапазоне 3,5—5,5 мкм как один из способов повышения КПД разрядной цепи в указанном спектральном диапазоне излучения ламп. В качестве основных параметров рассматривались энергия разряда W и волновое сопротивление контура $\sqrt{L/C}$, в зависимости от которых исследовались пиковая сила, длительность импульса излучения и глубина модуляции.

Испытания лампы 7/90 с наполнением Cs (9 мг), Hg (3 мг), Xe (50 мм рт. ст.) проводились на экспериментальном блоке питания при частоте следования токовых импульсов 400 Гц со следующими переменными параметрами:

индуктивность: 29; 37; 44; 56; 73 мкГн;

емкость в диапазоне 20—70 мкФ через 10 мкФ;

напряжение на рабочем конденсаторе в диапазоне 200—260 В через 10 В.

Лампа охлаждалась тремя вентиляторами 2ДВО-0,7 через коническое сопло диаметром 30 мм со скоростью воздушного потока $v = 90$ м/с. При испытаниях регистрировались: пиковое значение импульса тока и излучения в спектральном диапазоне 3—5 мкм, постоянная составляющая

ИК-свечения лампы. Проведены исследования с более чем 50 вариациями значений емкостей и индуктивностей при различных величинах энергии, вкладываемой в разряд. На рис. 3 приведены зависимости пиковой силы излучения и глубины модуляции от энергии разряда в режиме принудительного воздушного охлаждения. Из приведенных данных видно, что наиболее пиковая сила излучения достигает максимума при волновом сопротивлении $\sqrt{L/C} = 0,85 \text{ Ом}$, т. е. при его равенстве сопротивлению лампы в максимуме тока (согласованный контур: $C = 40 \text{ мкФ}$, $L = 50 \text{ мкГн}$ и $P_l = 2,5 \text{ кВт}$). Из сопоставления двух графиков следует, что дальнейший спад глубины модуляции вероятнее всего связан с ростом постоянной составляющей свечения нагретых оболочек. Если учесть, что для обеспечения долговечности не менее 200 ч удельная нагрузка на оболочку $P_{ap} = \frac{Wf}{\pi dl}$ должна быть не более 100 Вт/см^2 [5], то предельное значение энергии разряда должно быть менее $\leq 5 \text{ Дж}$.

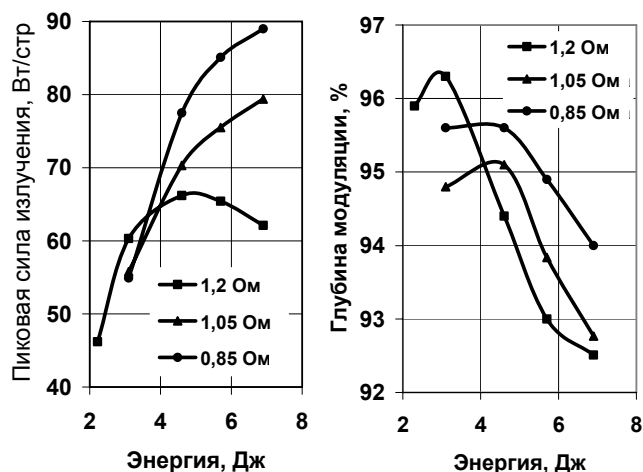


Рис. 3. Зависимость пиковой силы излучения от характеристик разрядного контура

Оптимизация разрядного контура позволила достичь на цезиевой лампе 7/90 пиковой силы излучения 85 Вт/стр и глубины модуляции $95,6 \%$ при электрической мощности на лампе $2,5 \text{ кВт}$. При этом, если учесть ранее рассмотренные результаты, использованная индуктивность 50 мкГн дала возможность получить колокообразную форму импульса тока, что позволило обеспечить наработку лампы 150 ч . Рассмотренный разрядный контур был использован в начале 90-х годов прошлого века при создании первой станции оптико-электронного подавления.

В процессе дальнейших исследований у рассмотренной выше схемы электрического питания лампы были выявлены следующие недостатки:

при установке лампы в изделие не контролируются значения индуктивности и емкости соеди-

няющих проводов, что требует последующей сложной оптимизации контура уже в аппаратуре;

временные характеристики импульсов излучения существенно зависят от скорости коммутации тиристорного ключа. Так, у примененного в схеме электрического питания лампы (см. рис. 2) тиристора ТБ271-200 время включения составляет $3,2 \text{ мкс}$, а выключения $25\text{—}32 \text{ мкс}$. При таких временных параметрах коммутатора затяжка фронтов импульса излучения неизбежна.

В последнее время появился целый класс силовых транзисторов (например IRG4PF50W), время открытия и закрытия которых составляют менее $0,3 \text{ мкс}$. Применение таких ключей позволяет существенно изменить схему электрического питания импульсной цезиевой лампы. Наиболее эффективным является способ подачи и отключения прикладываемого к лампе напряжения от мощного выпрямителя с помощью транзисторного ключа. При этом будет формироваться крутой задний фронт токового импульса, зависящий от скорости остывания плазмы (от состава наполнения, охлаждения лампы и т. д.), а не от переходных процессов в коммутирующем элементе. Авторы разработали новый источник питания импульсной цезиевой лампы, функциональная схема которого приведена на рис. 4. Такая схема электрического питания лампы обеспечивает:

регулируемое напряжение на выходе выпрямителя $U_{in} 100\text{—}200 \text{ В}$;

постепенное увеличение мощности на лампе P_l за счет ступенчатого роста длительности импульсов тока t_k с 4 до 270 мкс с шагом 4 мкс ;

напряжение холостого напряжения дежурной дуги $U_{or.ar}$ не менее 280 В ;

плавно регулируемый ток дежурной дуги $I_{or.ar}$ в диапазоне $1,0\text{—}1,5 \text{ А}$;

максимальную амплитуду импульсов тока до 600 А ;

плавное изменение длительности импульсов тока в диапазоне $4\text{—}270 \text{ мкс}$;

увеличение частоты модуляции тока от 400 до 450 Гц с шагом 5 Гц .

Исследования проводились с импульсными лампами с размерами разрядного промежутка $d = 7 \text{ мм}$, $l = 90 \text{ мм}$ и $d = 11 \text{ мм}$, $l = 90 \text{ мм}$. В работе [6] показано, что увеличение диаметра плазменного канала приводит к росту КПД излучения в диапазоне длин волн $3\text{—}5 \text{ мкм}$. Причина этого явления заключается в следующем. Так как в этом спектральном интервале коэффициент поглощения цезиевой плазмы больше, чем в видимой области, то ИК-излучение исходит только из приповерхностных слоев столба разряда. С увеличением диаметра лампы d возрастает рабочая поверхность разрядного канала и, следовательно, повышается интегральный поток излучения.

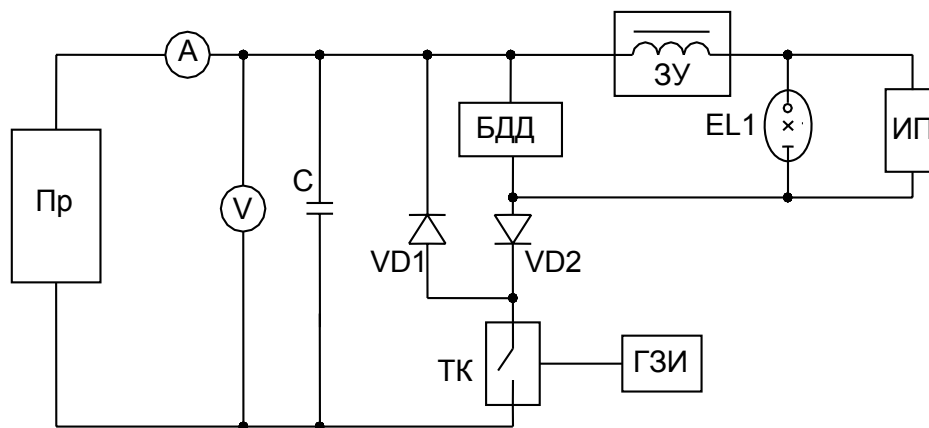


Рис. 4. Функциональная блок-схема включения лампы с транзисторным модулятором:

С — импульсный накопительный конденсатор; VD1, VD2 — диоды; А — амперметр; V — вольтметр; Пр — блок преобразователя; БДД — блок дежурной дуги; ЗУ — устройство зажигающее; ИП — источник подпитки; ТК — транзисторный коммутатор; ГЗИ — генератор задающих импульсов; EL1 — сапфировая лампа

Лампы устанавливались в охлаждающую систему, формирующую воздушный поток от трех вентиляторов 2ДВО.07 с помощью двух конусов [7]. Полученные результаты сведены в табл. 1, а осциллограммы тока и напряжения приведены на рис. 5.

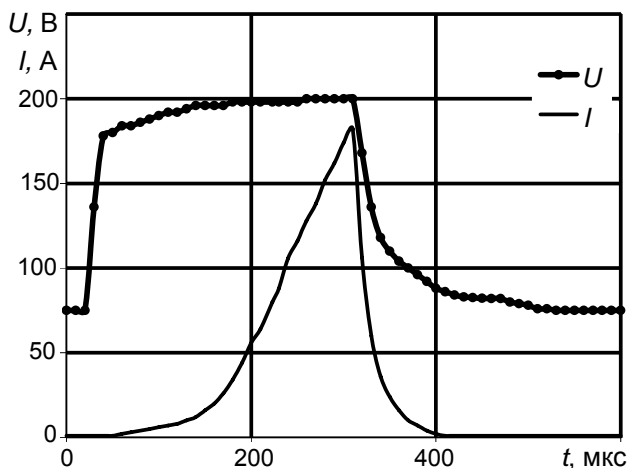


Рис. 5. Осциллограммы импульсов напряжения U и тока I при работе лампы с транзисторным модулятором

Таблица 1

Излучательные характеристики цезиевых ламп 11/90 при работе в схеме электрического питания с транзисторным модулятором

Параметры	Напряжение на выходе преобразователя U_{in} , В			
	140	180	190	200
t_k , мкс	280	280	280	280
P_l , кВт	1,46	1,9	1,98	2,05
$P_{oir.ar}$, Вт/см	162	210	220	227
$U_{or.ar}$, В	74	105	110	120
A , Вт/стр	63,3	105,5	114,5	124
m , %	95,7	96,5	96,2	96,0
$t_{0,5}$, мкс	187	170	164	161

Импульсная цезиевая лампа 11/90 работала в режиме: $U_{in} = 180$ В; $t_k = 280$ мкс; $U_{or.ar} = 75$ В;

$P_l = 1,5$ кВт. Как и предполагалось выше, у токового импульса наблюдается крутой спад заднего фронта — время снижения тока от максимального значения до уровня 0,3 составляло 20 мкс. Расчетная величина сопротивления разрядного промежутка в лампе 11/90 в максимуме импульса тока составляет 1,2 Ом, в отличие от 0,8 Ом для лампы 7/90, что скорее всего связано с малым значением $P_l = 1,5$ кВт. Тем не менее при таком режиме работы лампы достигнута пиковая сила излучения 87 Вт/стр при глубине модуляции 96,3 %.

Исследование влияния характеристик электрического питания на излучательные характеристики ламп проводилось при регулируемом напряжении на накопительном конденсаторе U_{in} и времени открытия ключа $t_k = 280$ мкс (см. табл. 1). Результаты эксперимента подтвердили, что с увеличением диаметра лампы растет пиковая сила излучения. У лампы 11/90 получено значение $A = 124$ Вт/стр при мощности $P_l = 2,05$ кВт, что в 1,5—2 раза выше пиковой силы излучения при работе наполненной парами цезия лампы 7/90 в оптимизированном разрядном контуре $C = 50$ мкФ, $L = 55$ мкГн и $P_l = 2,5$ кВт. Увеличение электрической мощности на лампе 11/90 от 1,46 до 2,05 кВт приводит почти к двукратному увеличению пиковой силы излучения (от 63,3 до 124 Вт/стр). Необходимо отметить, что при более высоких излучательных параметрах лампы 11/90 удельная нагрузка на поверхность оболочки при рабочей мощности $P_l = 2,5$ кВт составляет 80 Вт/см², а у лампы 7/90 — 125 Вт/см². Кроме этого, уменьшение удельной нагрузки на единицу поверхности разрядной трубки приводит к росту срока службы лампы.

Режим модуляции тока с частотой выше 1000 Гц

При таких режимах работы в соответствии с предъявляемыми требованиями источник ИК-излу-

чения должен обеспечивать глубину модуляции не менее 65 % в спектральном интервале 0,8—2,7 мкм.

На рабочих частотах $f_i = 1—8$ кГц наблюдалось перекрывание фронтов двух соседних импульсов излучения, приводящее к снижению глубины модуляции. Исследования проводились на импульсной цезиевой лампе 7/60 при рабочей мощности 500 Вт и скважности следования токовых импульсов $Q = 2,5$. Выше была рассмотрена схема включения, в которой "затягивание" фронтов токовых импульсов сведено к минимуму. Поэтому данное техническое решение было использовано при работе ламп на частотах выше 1000 Гц. В качестве генератора задающих импульсов лампы использовался генератор импульсов Г5-54, позволяющий плавно менять частоту. В результате исследований установлено, что глубина модуляции излучения снижается вдвое при увеличении частоты от 1 до 8 кГц: частота, кГц — глубина модуляции, %: 1 — 87; 3 — 62; 5 — 50; 8 — 46.

Авторы изучили причины, приводящие к затуханию импульса излучения в этом диапазоне рабочих частот.

Необходимые данные по времени затухания были получены на основе математической модели, учитывающей нестационарность процессов в разряде, периодичность импульсов тока, спектральные особенности излучения. Рассматривалась задача замкнутого расчета основных характеристик разряда, основывающаяся на известных характеристиках цезиевой плазмы: теплоемкости, состава, коэффициентах тепло- и электропроводности, коэффициентах оптического поглощения [6, 8].

Для рассматриваемого типа разрядов характерны диапазоны температур $(3—10) \cdot 10^3$ К и давлений $(0,01—0,5)$ МПа. В работе [8] показано, что наличие неравновесной пристеночной зоны (порядка 0,2—0,4 от внутреннего радиуса R разрядной трубки) не сказывается существенным образом на результатах расчетов, выполненных без учета неравновесности. Это позволило построить модель разряда в приближении локального термодинамического равновесия (ЛТР), которая включала уравнения сохранения энергии, неразрывности, переноса излучения в плазме, сохранения массы в замкнутом объеме, закона Ома, уравнения внешней электрической цепи для достаточно длинных разрядных промежутков в условиях цилиндрической симметрии. Подробно описание использованной математической модели и алгоритм ее реализации рассмотрены в работе [6].

В качестве параметра, характеризующего затухание излучения, принималось время, за которое интенсивность импульса излучения снижается вдвое от амплитудного значения — t_s . Исследовалось влияние на время затухания импульса излу-

чения следующих параметров: вводимой мощности, частоты следования токовых импульсов, скважности, формы импульса тока, давления буферного газа (ксенона). Рассматривались лампы с диаметром разрядного канала 5 и 7 мм, межэлектродным расстоянием 60 мм, давлением паров цезия $9 \cdot 10^3$ Па.

В результате проведенных расчетов выявлено, что наилучшие результаты дает форма импульса тока, характеризующаяся крутым задним фронтом (резкий обрыв тока до значений, соответствующих току дежурной дуги). Количественно результаты расчетов выглядят следующим образом. В случае прямоугольной формы импульса тока при $I = 35$ А время затухания светового импульса до уровня 0,5 в спектральном интервале 0,8—2,7 мкм составляет 80—100 мкс и слабо в пределах 10—15 % зависит от частоты f и скважности Q следования токовых импульсов. Приведенные результаты значений t_s соответствуют давлению ксенона в холодном состоянии $p_0 = 150$ мм рт. ст. Уменьшение давления ксенона в 2 раза снижает время затухания t_s в пределах 80—100 % (в зависимости от тока, частоты и скважности). Повышение тока в 2 раза снижает время затухания на 30 %.

При треугольной форме импульса тока с одинаковыми передним и задним фронтами импульса тока (случай разряда конденсатора) t_s заметно увеличивается. Например, при $I = 35$ А, $d = 7$ мм, $p_0 = 150$ мм рт. ст., $f = 2$ кГц, $Q = 5$ значения t_s при переходе от прямоугольной формы импульса тока к треугольной возрастают в 2,1 раза.

Таким образом, основными факторами, влияющими на длительность затухания импульса излучения в заданном диапазоне спектра, являются: форма импульса тока, давление ксенона и вводимая мощность. Форма импульса тока и время затухания импульса излучения в использованной схеме включения зависят только от конструктивных параметров лампы, а именно от ее наполнения.

В смеси буферный газ (ксенон) — пары щелочного металла происходит интенсивный обмен ударами тяжелых частиц, что приводит к выравниванию температур ксенона и пара металла. В этом случае можно говорить о теплоемкости смеси как единого целого. Буферный газ содержится в объеме в доминирующем количестве, поэтому снижение его содержания в смеси (уменьшение давления) будет способствовать понижению теплоемкости рабочего наполнения лампы и сокращению времени затухания в связи с уменьшением тепловой инерционности среды.

Приведенные оценки и расчетные результаты по влиянию на время затухания вводимой мощности и давления инертного газа проверялись экспериментально. Основные результаты приведены в табл. 2.

Таблица 2

Влияние давления газа и потребляемой мощности на время затухания импульса излучения

Давление инертного газа, мм рт. ст.	Пиковое значение тока лампы, А	Средняя мощность на лампе, Вт	Время затухания, мкс
50	22,0	117	50
50	27,7	177	40
50	33,3	230	30
100	18,8	125	65
100	20,5	138	50
100	26,6	196	40
150	13,3	98	60
150	22,0	184	55
150	28,8	218	50

Из табл. 2 следует, что увеличение средней мощности на лампе при фиксированном давлении приводит к уменьшению времени затухания на 10—20 мкс. Снижение давления буферного газа (ксенона) с 150 до 50 мм рт. ст. при фиксированной средней мощности на лампе снижает t_s на 15 мкс. Это связано, как отмечалось выше, с уменьшением теплоемкости смеси, снижением безызлучательных потерь и, как следствие, с ростом пиковых значений тока (см. табл. 2).

Необходимо отметить, что во всех проведенных исследованиях на частотах от 1 до 8 кГц форма импульса тока качественно совпадала с приведенной на рис. 5.

Заключение

Следует отметить, что передний фронт импульса излучения определяется временем разогрева плазмы, а задний — временем ее остывания. Эти процессы связаны с потерями в электрической цепи и в самом разряде (индуктивные и активные потери в контуре, безызлучательные потери в плазме и т. д.). Поэтому представляется перспективным использование в схеме питания лампы предимпульса (импульс короткой длительности и

повышенного напряжения), который за счет быстрого разогрева плазмы приблизит форму импульса тока к прямоугольной. Для частотных ламп (1—8 кГц) введение охлаждения оболочки приведет к повышенному температурному градиенту в разряде, что увеличит скорость остывания плазмы. Снижение активных и индуктивных потерь возможно за счет создания ИК-излучателя, включающего максимально приближенные источник питания и лампу.

Авторы выражают надежду, что приведенные результаты исследований и рекомендации будут полезны разработчикам модулируемых оптических систем, использующих в качестве источника излучения разрядную лампу.

Л и т е р а т у р а

1. Гавриш С. В., Гайдуков Е. Н., Константинов Б. А., Никифоров В. Г., Самодергин В. А. Разрядные источники инфракрасного излучения для специальных целей//Светотехника. 1998. № 3. С. 22—24.
2. Импульсные источники света/И. С. Маршак, А. С. Дойников, В. П. Жильцов и др. 2-е изд., перераб. и доп. — М.: Энергия, 1978. — 472 с.
3. Гавриш С. В., Цогоев И. Т., Кобзарь А. И. Новый класс импульсных цезиевых ламп высокого давления с сапфировой оболочкой специального применения: Тез. докл. VI Международ. светотехн. конф. — Калининград, 2006. С. 53, 54.
4. Вакуленко В. М., Иванов Л. П. Источники питания лазеров. — М.: Советское радио, 1980. — 102 с.
5. Сапфировая К-Rb-лампа — эффективный источник непрерывной накачки лазеров на основе АИГ:Nd³⁺/Е. Н. Гайдуков, Г. И. Кромский, Г. С. Леонов и др.//ОМП. 1984. № 3. С. 42—46.
6. Гавриш С. В. Разработка и исследование импульсного источника ИК-излучения с разрядом в парах цезия: Автореф... дис. канд. техн. наук. М., 2005. — 16 с.
7. Пат. 56 718 Россия, МПК⁷ Н 01 J 61/52. Разрядный источник инфракрасного излучения/С. В. Гавриш, В. С. Жмаев, А. И. Кобзарь В. А., Цогоев И. Т.; Опубл. 10.09. 2006. Бюл. № 25.
8. Gradov V. M., Gavrish S. V. Mathematical modeling of selective emitting nonequilibrium plasma in complex optical systems//Light & Engineering. 1997. V. 5. № 3. P. 16—19.

Статья поступила в редакцию 28 февраля 2008 г.

Research of the factors defining the modulation characteristics of gas-discharge IR sources

*S. V. Gavrish, V. S. Zhmaev, A. I. Kobzar, V. V. Loginov
STELLA Factory, ZENITH Special Design Bureau, Moscow, Russia*

The given publication is devoted to research of influence of design data and voltage for pulse cesium sources with a sapphire cover on them modulation characteristics at following combinations of parameters for energization of lamps: average frequencies of current impulses up to $f=1,0$ kHz and consumed electric power up to $P=3$ kW for the 3—5 μ m spectral range; $f=1.0—8.0$ kHz and P up to 1.0 kW for the 0.8—2.7 μ m spectral range. Recommendations on the further improvement of the modulation characteristics of lamps are given.