

УДК 621.327

Разработка модулируемых цезиевых источников ИК-излучения повышенной мощности

С. В. Гавриш, А. И. Кобзарь, Д. Н. Кугушев, В. М. Градов

Приведены результаты теоретического анализа и экспериментального подтверждения возможности создания модулируемых цезиевых источников излучения мощностью до 3 кВт. Показана эффективность увеличения электрической мощности лампы и радиуса разрядного канала в целях повышения пиковой силы излучения в среднем ИК-диапазоне.

PACS: 07.50.-e

Ключевые слова: разряд, плазма, цезий, пиковая сила излучения, электрическая мощность, коэффициент поглощения плазмы, математическая модель.

Введение

Модуляция тока в лампах с разрядом в парах цезия высокого давления позволяет получить любую временную структуру сигнала излучения в среднем ИК-диапазоне. Это свойство плазмы широко используется в системах специального назначения, предназначенных для создания помех в оптическом интервале спектра [1].

В существующих приборах применяется в основном импульсная цезиевая лампа мощностью 1,5 кВт. Расширение областей использования ламп такого типа требует увеличения их мощности. Настоящая работа посвящена рассмотрению основных научно-технических предпосылок создания модулируемых цезиевых разрядных источников мощностью до 3 кВт и исследованию путей повышения их пиковой силы излучения в среднем ИК-диапазоне.

Теоретический анализ

В настоящее время в качестве основного источника модулированного ИК-излучения используется импульсная лампа мощностью 1,5 кВт с раз-

мерами разрядного промежутка 11/35 мм (диаметр/длина разрядного канала). Конструктивно эта лампа представляет собой сапфировую (корундовую) разрядную трубку (горелку), наполненную Cs : Hg : Хе-смесью и расположенную во внешней оболочке (колбе) из того же материала. Пространство между горелкой и наружной колбой заполнено газом с высокой теплопроводностью, например неон. Принудительное охлаждение воздухом внешней оболочки позволяет снять тепловую нагрузку с горелки. Непосредственное охлаждение разрядной трубки приводит к выходу из строя лампы, что связано с высокими значениями коэффициента термического расширения корунда. Поэтому рассматриваемая конструкция позволяет повысить удельную электрическую нагрузку P_{rev} на внутреннюю поверхность сапфировой трубки при сохранении габаритных размеров разрядного канала. Входящие в состав наполнения ртуть и ксенон предназначены для инициирования разряда в лампе и поддержания теплового режима горелки и при номинальном режиме работы не вносят вклад в спектральный состав излучения лампы. Подробно конструкция лампы рассмотрена в работе [2].

Другая важная предпосылка создания цезиевых ламп высокой мощности — возможность выращивания бездефектных корундовых труб. Предельное значение P_{rev} для разрядной трубки существенно зависит от степени блочности структуры монокристаллического сапфира. Проведенные авторами [3] исследования показали, что выращенная по методу А. В. Степанова безблочная сапфировая труба в качестве оболочки лампы способна выдерживать удельную электрическую нагрузку до 390 Вт/см².

Из полученных результатов следует вывод о возможности создания компактных источников ИК-излучения большой мощности при соответствующем контроле дефектности корунда. Однако даже при мелкосерийном производстве контроле

Гавриш Сергей Викторович, начальник лаборатории.
Кобзарь Александр Иванович, генеральный директор.
Кугушев Дмитрий Николаевич, инженер-конструктор.
ЗАО «СКБ "Зенит"».
Россия, 124489, Москва, Зеленоград, Панфиловский просп., 8, стр. 5.
Тел. (495) 983-01-94. E-mail: svgavr@list.ru
Градов Владимир Михайлович, профессор.
МГТУ им. Н. Э. Баумана.
Россия, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул. 5.
E-mail: gradov@bmstu.ru

Статья поступила в редакцию 14 сентября 2009 г.

© Гавриш С. В., Кобзарь А. И., Кугушев Д. Н., Градов В. М., 2010

блочности сапфировой трубы является трудоемким и дорогостоящим технологическим процессом. Поэтому многолетний опыт конструирования разрядных источников с сапфировой оболочкой показывает, что для обеспечения срока службы не менее 200 ч P_{rev} оболочки не должна превышать 150 Вт/см².

Важным аспектом разработки любого прибора является возможность выявить факторы, определяющие его характеристики, без проведения многочисленных дорогостоящих экспериментов. На этом пути весьма эффективным оказывается использование технологии математического моделирования.

Для рассматриваемого типа разрядов характерны диапазоны температур (3—10)·10³ К и давлений (0,01—0,5) МПа. Ранее в работе [4] 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 дало возможность авторам работы [5] построить модель разряда в приближении локального термодинамического равновесия (ЛТР), которая включает уравнения сохранения энергии, неразрывности, переноса излучения в плазме, сохранения массы в замкнутом объеме, закона Ома, уравнения внешней электрической цепи. Так как описанная выше конструкция лампы в данной работе была взята в качестве базовой при разработке математической модели, то для учета влияния излучения разогретых оболочек на состояние цезиевой плазмы система уравнений дополнена уравнениями энергии (теплопроводности) для двух оболочек с зазором между ними, заполненным газом. При этом спектральный поток излучения в оболочках в области полупрозрачности сапфира рассчитывается в приближении Шустера—Шварцшильда для цилиндрического слоя. Решение системы дифференциальных уравнений осуществлялось методом конечных разностей с применением итерационной процедуры, состоящей из множества вложенных циклов.

Для обеспечения работоспособности модели разряда необходимо располагать теплофизическими свойствами плазмообразующей среды: коэффициентами электро- и теплопроводности, теплоемкости, плотности плазмы и т. д. Некоторые данные брали из экспериментальных и теоретических работ различных авторов, другие рассчитывались авторами работ [4, 5]. Теплопроводность плазмы вычислялась с учетом электронной, атомной, ионной составляющих и переноса энергии ионизации. Для расчета электропроводности и электронной составляющей теплопроводности использован метод Фроста. При расчете коэффициента поглощения k_λ учитывались как отдельные спектральные линии, так и непрерывный фон.

Ранее в результате реализации математической модели было получено радиальное распределение температуры в плазме и системе двух поглощающе-излучающих оболочек при различных удельных электрических мощностях (мощность W на единицу длины разрядного столба l) $P_{sp} = W/l$ для радиуса разрядного канала $R = 3,5$ мм [5]. В настоящей работе проведен теоретический анализ влияния R и P_{sp} на температурное поле разряда. Как видно из полученных расчетных данных (рис. 1), увеличение удельной мощности разряда от 50 до 300 Вт/см для фиксированного радиуса приводит к росту осевой температуры T_{ax} на 2000 К. Однако с уменьшением радиуса плазменного столба T_{ax} зависит от уровня P_{sp} . Так, при удельной мощности менее 100 Вт/см увеличение r от 0,2 до 0,7 см приводит к незначительному падению осевой температуры ~250 К, в то время как при $P_{sp} \sim 300$ Вт/см эта разность составляет около 1000 К (см. рис. 1, а), причем при радиусах менее 0,35 см спад T_{ax} носит более резкий характер.

С увеличением удельной мощности происходит трансформация температурного поля разряда, при этом возрастают температурные градиенты и, как следствие, безизлучательные потери за счет теплопроводности плазмы. Поэтому надо ожидать, что при малых R будет происходить значительное возрастание температуры оболочки горелки. На рис. 1, б представлена расчетная зависимость температуры на внутренней поверхности разрядной колбы. Как видно из приведенных данных, для $R < 3,5$ мм потери тепла на оболочку значительно выше, чем при $R > 3,5$ мм.

Полученные в результате реализации математической модели зависимости КПД от R и P_{sp} (рис. 2) подтверждают необходимость увеличения радиуса разрядного канала. Коэффициент оптического поглощения Cs : Hg : Xe-плазмы k_λ в ближней ИК-области спектра достаточно высок [4], поэтому разряд излучает в этом диапазоне спектра относительно тонкий поверхностный слой. Следовательно, увеличивая радиус разряда, мы развиваем светящуюся поверхность и, как следствие, суммарный поток излучения. С другой стороны, повышение P_{sp} приводит к снижению КПД в ближнем ИК-диапазоне (см. рис. 2).

Как уже отмечалось, это связано температурной зависимостью коэффициента поглощения цезиевой плазмы, т. е. излучение из глубинных слоев плазмы в процессе диффузии к ее поверхности превращается в тепловую энергию и сбрасывается в дальнейшем на стенку горелки теплопроводностью. Тем не менее если рассматривать лампу 11/35, то при $P_{sp} = 100$ Вт/см КПД в ближней ИК-области составляет 6,2 % и мощность излучения 21,7 Вт, а при $P_{sp} = 300$ Вт/см — соответственно, 2,8 % и 29,4 Вт.

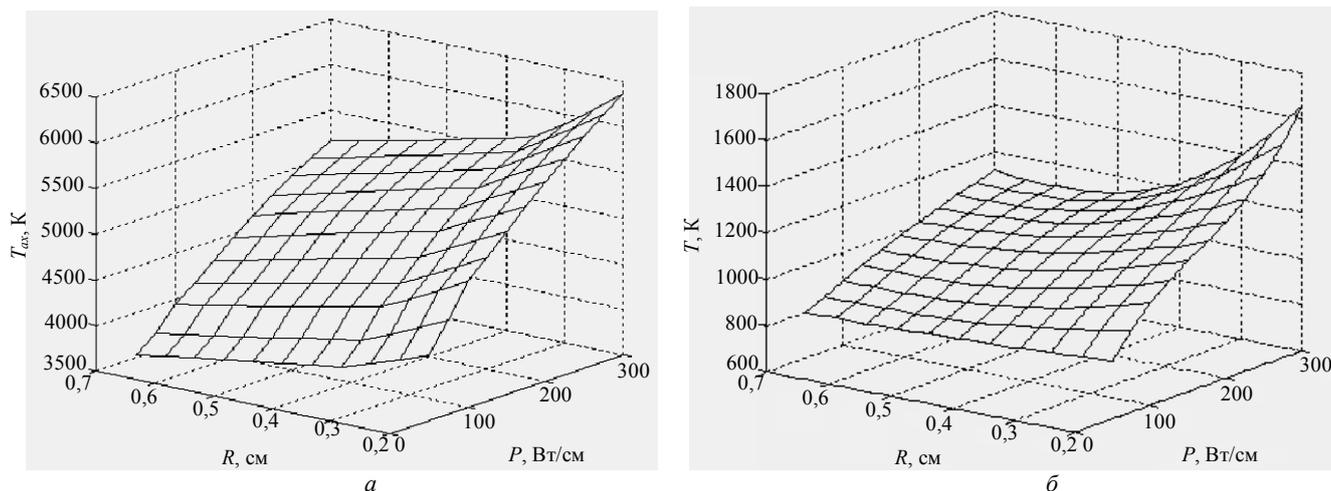


Рис. 1. Зависимость температуры от средней электрической мощности при соотношении компонент Cs:Hg:Xe — 5:1:1,5:
а — на оси разрядной трубки (и от радиуса разрядного промежутка);
б — на внутренней поверхности разрядной трубки (и от ее радиуса)

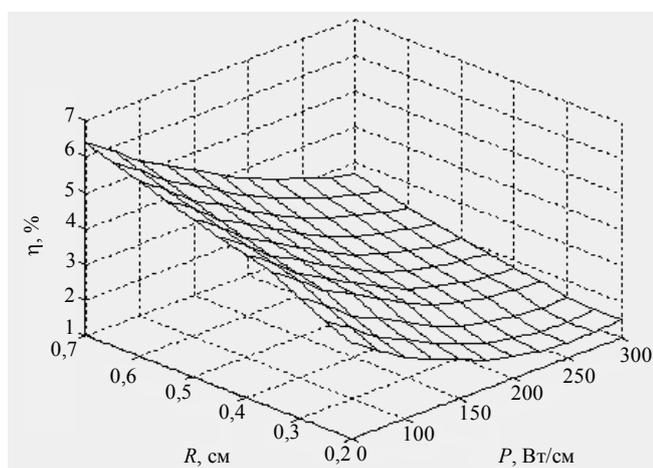


Рис. 2. Зависимость КПД излучения разряда в максимуме тока в среднем ИК-диапазоне при соотношении компонент Cs:Hg:Xe — 5:1:1,5

Итак, для создания высокоэффективных источников излучения с разрядом в парах цезия необходимо одновременно увеличивать удельную электрическую мощность и диаметр разряда.

Методика исследований

Для проверки сделанных предположений были изготовлены два типа ламп с радиусом разрядного канала $r_1 = 3,5$ и $r_2 = 5,5$ мм. Наполнение обеих ламп было одинаковым: 12 мг Cs+9 мг Hg + 70 мм рт. ст. Хе.

Спектральные измерения импульсных цезиевых ламп проводились на дифракционном монохроматоре МДР-23, выходной световой сигнал с которого регистрировался фотоэлектронным умножителем ФЭУ-62 (диапазон длин волн 400—1000 нм). Излучение лампы проецировалось на входную щель монохроматора кварцевой линзой

($f = 360$ мм), расположенной на расстоянии двойного фокусного расстояния.

Излучательные характеристики (пиковая сила излучения A , длительность импульса $t_{0,5}$ по уровню 0,5 в среднем ИК-диапазоне оптического спектра) исследовали с помощью фотодиода ФД119, сигнал с которого регистрировался осциллографом С9-8.

Для изучения излучательных характеристик в низкотемпературной плазме использован источник питания ламп с прямоугольными импульсами подаваемого на лампу напряжения [6]. Такой способ подачи и отключения прикладываемого к лампе напряжения от мощного выпрямителя позволил сформировать крутой задний фронт токового импульса, который в этом случае зависит от скорости остывания плазмы (от состава наполнения, охлаждения лампы и т. д.), а не от переходных процессов в коммутирующем элементе.

Параллельно лампе подключался блок "дежурной дуги", обеспечивающий проводящее состояние плазмы в промежутках между силовыми импульсами тока. В качестве такого источника обычно используется импульсный стабилизатор, способный фиксировать заданную величину тока в диапазоне выходного напряжения 50—360 В.

Кроме того, дежурная дуга выполняет дополнительные функции. При токе $I_{d.arc} 1—1,2$ А канал разряда дежурной дуги располагается concentric относительно оболочки горелки. Развитие основного разрядного импульса в этом случае происходит за счет симметричного расширения канала дежурной дуги, поэтому не происходит локального перегрева внутренней поверхности горелки, что повышает долговечность лампы. Формирование разрядного столба в уже частично ионизованной плазме приводит к амплитудной и временной стабильности импульса излучения.

Импульсы тока и напряжения регистрировали цифровым осциллографом С9-8 с помощью безиндуктивного токового шунта и делителя 1000:1, соответственно. Мощность на лампах, начиная с 1 кВт, ступенчато увеличивалась на 250 Вт за счет увеличения рабочего напряжения. После 5-минутного прогрева производили замеры пиковой силы излучения в среднем ИК-интервале спектра, регистрировали напряжение дежурной дуги и на осциллографе С9-8 фиксировались осциллограммы импульсов тока и напряжения. Далее расчетным путем определяли сопротивление лампы в максимуме тока.

Исследуемые лампы устанавливали в экспериментальную охлаждающую систему, формирующую воздушный поток от трех вентиляторов 2ДВО.07 посредством системы двух конусов, что обеспечивало равномерное температурное поле по длине разрядной части источника.

Экспериментальная часть

В результате проведенных исследований получена зависимость пиковой силы излучения и электрических характеристик от потребляемой мощности, приведенные на рис. 3 и в табл. 1.

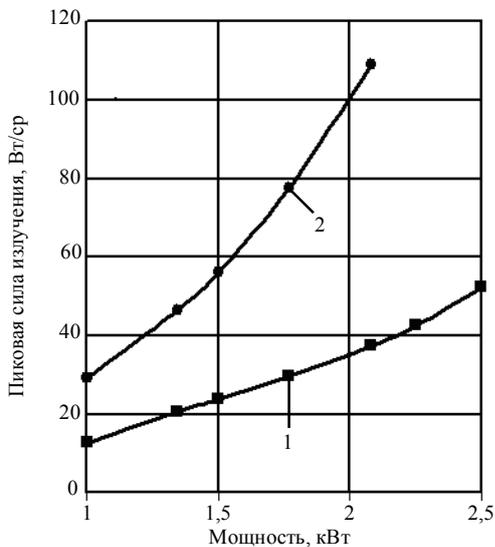


Рис. 3. Зависимость пиковой силы излучения в среднем ИК-диапазоне от мощности для Cs : Hg : Хе-ламп: 1 — тип 11/90; 2 — тип 7/90

Таблица 1

Зависимость электрических характеристик импульсной цезиевой лампы от мощности

Тип лампы	Параметр	Мощность, Вт							
		1,0	1,25	1,5	1,75	2,0	2,25	2,5	
7/90	I_p, A	104	127	138	148	158	174	194	
	U_{lamp}, B	120	140	150	160	170	180	200	
	$R, Ом$	1,15	1,1	1,09	1,08	1,07	1,03	1,03	
11/90	I_p, A	122	144	156	180	219	—	—	
	U_{lamp}, B	120	140	150	170	200	—	—	
	$R, Ом$	0,98	0,97	0,96	0,94	0,91	—	—	

Из рис. 3 видно, что уже при мощности 2 кВт у лампы типа 11/90 пиковая сила в два раза больше, чем у типа 7/90. Однако полученный результат связан не только с увеличением диаметра разрядного промежутка. В работе [7] показано, что увеличение давления паров цезия приводит к росту средней силы излучения в ИК-диапазоне. Авторами ранее показано [8], что напряжение дежурной дуги $U_{d.arc}$ существенно зависит от давления излучающей добавки.

Напряжение $U_{d.arc}$ у лампы типа 11/90 с увеличением электрической мощности возрастает быстрее, чем у лампы типа 7/90, и коррелирует с зависимостью пиковой силы излучения от мощности (рис. 4).

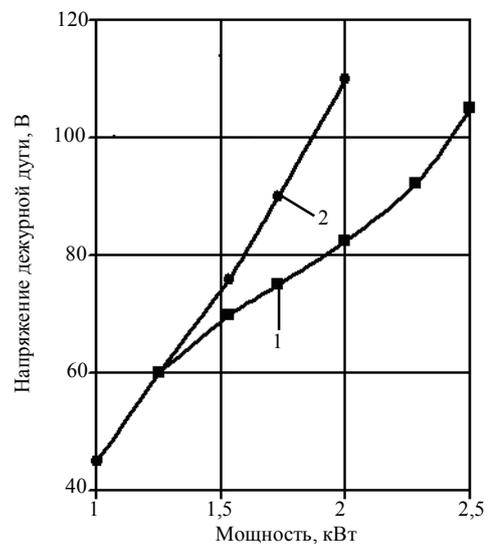


Рис. 4. Зависимость напряжения дежурной дуги от электрической мощности: 1 — тип 11/90; 2 — тип 7/90

Для проверки взаимосвязи напряжения дежурной дуги и давления паров цезия был исследован спектральный состав излучения. Известно [9], что в лампах высокого давления с разрядом в парах щелочных металлов наблюдается самообращение резонансной линии. Чем выше давление паров в разряде, тем больше расстояние между максимумами излучения в крыльях самообращенных линий $\Delta\lambda$.

На рис. 5 показано спектральное распределение реабсорбированной линии цезия 852,11 нм для трех значений электрической мощности. В табл. 2 приведено сопоставление $U_{d.arc}$ и $\Delta\lambda$. Анализ табл. 2 показывает, что с повышением мощности ламп напряжение дежурной дуги и давление паров имеют близкую к линейной тенденцию роста. Одной из причин такого поведения зависимостей является пропорциональное изменение температуры холодной точки (ХТ) лампы, определяющей давление паров излучающей добавки. Тепловое состояние ХТ определяется теплопроводностью

оболочки и катода, поэтому для повышения давления паров цезия и увеличения интенсивности ИК-излучения необходимо ХТ максимально приблизить к разряду. В настоящее время ведутся проработки такого катода.

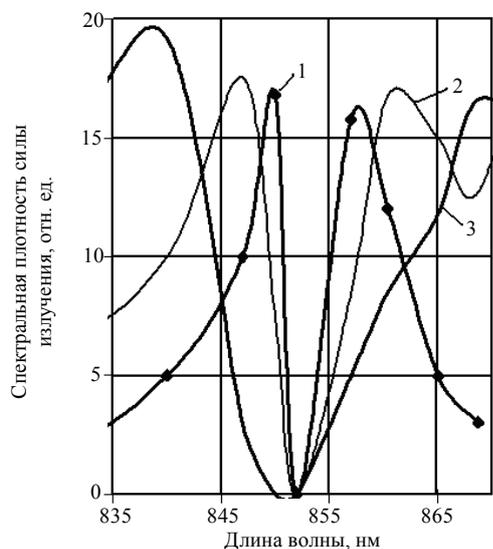


Рис. 5. Зависимость спектрального интервала между максимумами самообращенной резонансной линии 852,11 нм от мощности Cs : Hg : Хе-лампы типа 11/90: 1 — 1,0 кВт; 2 — 1,5 кВт; 3 — 2,0 кВт

Таблица 2

Зависимость $U_{d,arc}$ и $\Delta\lambda$ от мощности

Мощность, кВт	$U_{d,arc}$, В	$\Delta\lambda$, нм
1,0	45	10,4
1,5	70	18
2,0	110	28,5

Результаты и их обсуждение

Проведенный теоретический анализ позволил выявить основные факторы, определяющие пиковую силу излучения в среднем ИК-диапазоне оптического спектра: это радиус разрядного канала и потребляемая лампой электрическая мощность.

Как следует из рис. 1, увеличение P_{sp} приводит к возрастанию осевой температуры разряда и, следовательно, концентрации электронов и проводимости плазмы. Это подтверждается результатами, приведенными в табл. 1, где показано, что с ростом P_{sp} наблюдается падение сопротивления разряда в максимуме тока.

Однако увеличение электрической мощности лампы приводит к росту давления плазмообразующей Cs : Hg : Хе-среды, характеризуемой уширением спектрального интервала между максимумами самообращенной резонансной линии цезия 852,11 нм (см. рис. 5 и табл. 2). Это явление сопровождается ростом безызлучательных потерь, например теплопроводностью, и, соответственно, следующими негативными последствиями:

- повышением коэффициента поглощения Cs : Hg : Хе-плазмы [2] и снижением КПД излучения ламп в среднем ИК-диапазоне (см. рис. 2);

- увеличением температуры колбы (см. рис. 1, б), ограничивающей разряд, что влечет за собой рост интенсивности непрерывного излучения нагретого сапфира и снижение модуляционных характеристик лампы.

По этой причине одновременно с повышением электрической мощности обоснованным является увеличение радиуса разрядного канала, что приводит к следующим положительным факторам:

- возрастанию проводимости разряда (см. табл. 1) и пиковой силы излучения;
- падению температуры разрядной оболочки и усилению модуляционных свойств лампы;
- росту КПД разряда в среднем ИК-диапазоне за счет повышения площади излучающей поверхности;
- повышению надежности лампы вследствие снижения удельной электрической нагрузки на поверхность разрядной колбы.

Дополнительно необходимо отметить, что полученная качественная связь между величиной $\Delta\lambda$ самообращенной резонансной линии цезия 852,11 нм и напряжением дежурной дуги позволяет создать методику оперативного контроля давления паров в разряде.

Заключение

В работе теоретически обоснована и экспериментально подтверждена необходимость одновременного увеличения электрической мощности лампы и радиуса плазменного канала для повышения пиковой силы излучения модулируемых цезиевых источников среднего ИК-диапазона. При этом возрастание R приведет к снижению удельной электрической нагрузки на оболочку и обеспечению надежности лампы.

Приведенные результаты были использованы при разработке и освоении в производстве импульсной цезиевой лампы типа 11/90, у которой наблюдалось снижение пиковой силы излучения не более 3 % при непрерывной работе в течение 200 ч. Достигнутый уровень A удовлетворяет предъявляемым требованиям к модулируемым источникам среднего ИК-диапазона для систем специального назначения.

Авторы выражают благодарность В. Ю. Кустову за участие в проведении экспериментальных работ.

Литература

1. Гавриш С. В., Гайдуков Е. Н., Константинов Б. А., Никифоров В. Г., Самодёрган В. А. Разрядные источники инфракрасного излучения для специальных целей//Светотехника. 1998. № 3. С. 22—24
2. Гавриш С. В., Градов В. М., Терентьев Ю. И. Особенности конструкции и работы ламп с сапфировыми оболочками//Там же. 2008. № 2. С. 12—18.
3. Браиловский В. Б., Гавриш С. В., Рыжков А. Е. Дефекты структуры и диагностика характеристик труб из профилированных монокристаллов корунда для оболочек импульсных разрядных ламп ИК-излучения//Контроль. Диагностика. 2007. № 2. С. 49—59.
4. Градов В. М. Разработка методов расчета и исследования радиационных процессов в системах с разрядными источниками селективного излучения: Автореф. дис. ... д-ра техн. наук. — М., МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2002. — 32 с
5. Гавриш С. В., Градов В. М., Кузнецова А. В., Терентьев Ю. И. Математическое моделирование и исследование импульсных разрядных ламп инфракрасного излучения//Светотехника. 2008. № 5. С. 12—18.
6. Гавриш С. В., Жмаев В. С., Кобзарь А. И., Логинов В. В. Исследование факторов, определяющих модуляционные характеристики разрядных ИК-источников//Прикладная физика. 2009. № 1. С. 53—59.
7. Patent 487031 USA, Int. C 1⁴ H 01 J 17/20; H 01J 61/34. Pulsed alkali metal vapor discharge lamp with ceramics outer envelope/Katsuya Otani; Mitsubishi — No. 183533; Filed 14.03.88; Date of patent 26. 09. 89.
8. Bayha William T., Creedon John E. Schneider Sol. Alkali-vapor light sources as optical pumps for Nd:YAG lasers//IEEE-Trans. Electron Devices. 1970. V. 17. No. 8. P. 612—616.
9. Рохлин Г. Н. Разрядные источники света. — М.: Энергоатомиздат, 1991. — 720 с.

Development of high power modulated Cs-sources of IR radiation

S. V. Gavrish, A. I. Kobzar, D. N. Kugushev

«SKB "Zenith"», Closed Corp., 8/5 Panfilovsky av., Zelenograd, Moscow, 124489, Russia
E-mail: svgavr@list.ru

V. M. Gradov

Bauman Moscow State Technical University, 5 Second Bauman str., Moscow, 105005, Russia
E-mail: gradov@bmstu.ru

The theoretical prediction and experimental verification of developed modulated Cs light sources with output up to 3 kW are reported. Results show effective increase of lamp peak radiant intensity in middle IR with increasing lamp electrical power and discharge channel radius.

PACS: 07.50.-e

Keywords: discharge, plasma, cesium, peak radiant intensity, electrical power, plasma absorption factor, mathematical model.

Bibliography — 9 references.

Received 14 September 2009