

УДК 533.9.01

Экспериментальное исследование влияния вращения разрядной колбы на характеристики серной СВЧ-лампы высокого давления

И. В. Ирхин, А. А. Сухачевский, О. А. Попов

Проведено экспериментальное исследование влияния скорости вращения разрядной колбы безэлектродной серной лампы высокого давления на её излучательные характеристики. Плазма возбуждалась в смеси паров серы (5—6 атм) и аргона (20 Торр) на сверхвысокой частоте (СВЧ) 2,45 ГГц и мощности магнетрона 90—540 Вт в кварцевой сферической колбе диаметром 35 мм, размещенной в цилиндрическом резонаторе диаметром 73 мм и высотой 147 мм. Установлено, что форма и положение плазмы СВЧ-разряда в колбе, а также спектр оптического излучения плазмы определяются скоростью вращения разрядной колбы. Увеличение скорости вращения сдвигает спектр плазмы в сторону длинных волн, повышает освещенность и снижает температуру стенок колбы, цветовую температуру и общий индекс цветопередачи плазмы. Экспериментально установлена граница устойчивого и неустойчивого режимов разряда, определяемая граничной мощностью магнетрона, уменьшающейся с увеличением скорости вращения разрядной колбы. Обсуждаются способы получения устойчивого СВЧ-разряда в парах серы высокого давления в неподвижной колбе.

PACS: 51.50.+v, 52.25.Fi, 52.80.Pi

Ключевые слова: серная лампа, СВЧ-плазма, высокое давление, спектр оптического излучения, вращение колбы.

Введение

В современных серных СВЧ-лампах высокого давления ($p = 2—6$ атм) используется кварцевая разрядная сферическая колба, размещенная в цилиндрическом светопрозрачном (сетчатом) резонаторе, как правило, типа TE₁₁₁, в области максимальной напряженности электрического СВЧ-поля. Лампы питаются от магнетрона, работающего на частоте $f = 2450$ МГц и мощностях от 500 до 3000 Вт. Для обеспечения однородности температуры стенок разрядной колбы последняя вращается вокруг своей оси [1—7].

После включения магнетрона, когда напряженность электрического СВЧ-поля в резонаторе, т.е. в области размещения колбы, достигает про-

бивной величины, в колбе возникает СВЧ-разряд. На начальной стадии его развития лампа излучает атомарный линейчатый спектр, характерный для плазмы низкого давления в смеси аргона (25 Торр) и насыщающих паров серы ($\sim 0,1$ Торр). По мере поглощения плазмой СВЧ-мощности растет плотность плазмы, температура ее компонентов и стенок колбы, а также давление паров серы. В установившемся режиме полностью испарившейся твердофазной серы давление ее ненасыщающих паров составляет несколько атмосфер (обычно 5—6 атм) [1, 2, 5].

Плазма СВЧ-разряда при этих давлениях изотермическая, а температура стенок колбы превышает 600 °С. Спектр излучения плазмы становится сплошным благодаря излучению полос димеров серы.

На рис. 1 приведены фотографии плазмы СВЧ-разряда в парах серы высокого давления, полученные нами в экспериментах с неподвижной и вращающейся разрядной колбой. Откуда видно, что форма плазмы и место ее расположения в неподвижной и во вращающейся колбе различны, что, очевидно, должно сказаться на электрических, температурных и излучательных характеристиках лампы. К сожалению, в литературе практически

Ирхин Игорь Вячеславович, аспирант¹, инженер².

Сухачевский Алексей Алексеевич, студент¹.

Попов Олег Алексеевич, профессор¹.

¹Московский энергетический институт.

Россия, 111250, Москва, ул. Красноказарменная, 14.

E-mail: popovoleg445@yahoo.com

²Всероссийский электротехнический институт.

Россия, 111250, Москва, ул. Красноказарменная, 12.

E-mail: terahertz494@gmail.com

Статья поступила в редакцию 22 июля 2016 г.

© Ирхин И. В., Сухачевский А. А., Попов О. А., 2016

отсутствуют работы, посвященные экспериментальному исследованию влияния скорости вращения разрядной колбы на структуру плазмы серного СВЧ-разряда высокого давления и на ее рабочие характеристики, в т.ч. излучательные.

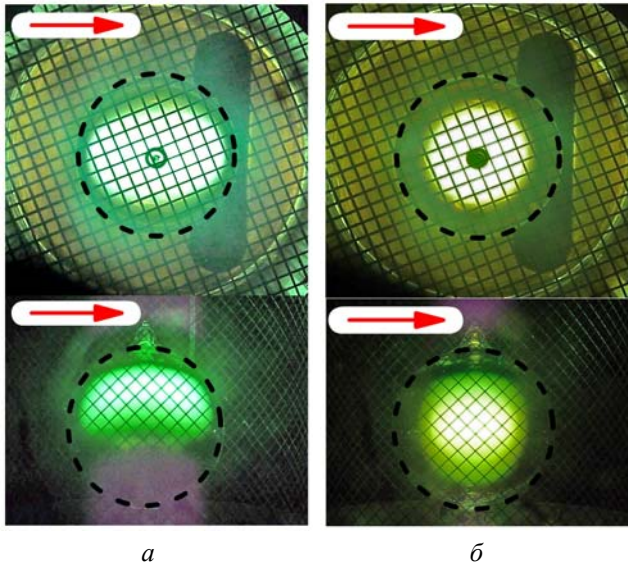


Рис. 1. Расположение плазмы в разрядной колбе. Верхние рисунки — вид сверху, нижние рисунки — вид сбоку. Мощность питания магнетрона $P = 250$ Вт. Пунктиром обозначены стенки разрядной колбы. Красная стрелка показывает направление СВЧ электрического поля. а — неврещающаяся колба; б — колба вращается со скоростью $v = 20$ об/с.

Целью данной работы является экспериментальное исследование влияния скорости вращения разрядной колбы серной СВЧ-лампы высокого давления на освещенность (фактически, на световой поток лампы), на температуру стенок колбы, спектр оптического излучения плазмы и цветовые характеристики лампы в установившемся режиме на различных уровнях мощности магнетрона.

Экспериментальная установка

Экспериментальные исследования проводились в сферической кварцевой колбе диаметром $d = 35$ мм (объем колбы — 19 см³), помещенной в центре цилиндрического резонатора диаметром $D = 73$ мм и высотой $H = 147$ мм. Давление аргона в колбе — 20 Торр, масса твердофазной серы, внесенной в колбу, 25 мг.

Схема питания и управления СВЧ-разряда и измерений параметров серной лампы приведена на рис. 2. В работе использовался магнетрон марки 2М236-М42, работающий на частоте 2450 МГц с коэффициентом полезного действия 72 % и максимальной выходной мощностью 900 Вт. Источник питания магнетрона собран по классической трансформаторной схеме и аналогичен устройству, описанному в [8]. Он позволял регулировать потребляемую магнетроном мощность P от 90 до 540 Вт изменением напряжения и тока магнетрона вплоть до 4,2 кВ и 200 мА соответственно.

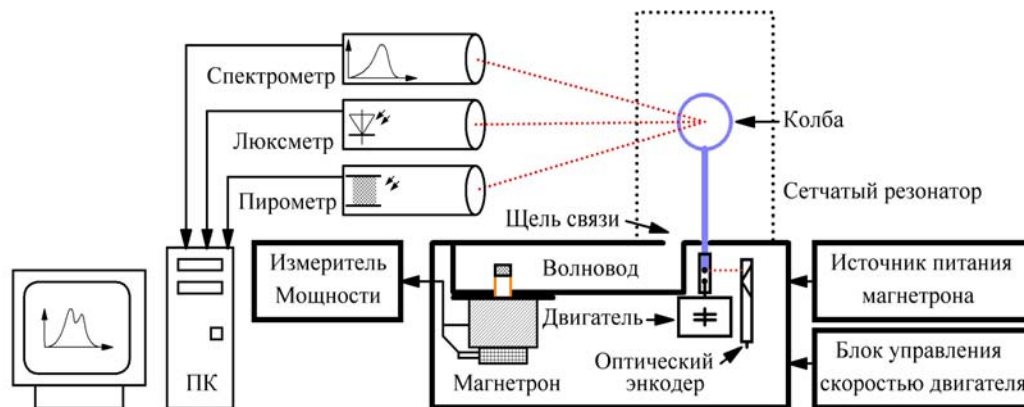


Рис. 2. Схема питания СВЧ серной лампы и измерений ее характеристик.

Блок управления скоростью позволял регулировать скорость вращения колбы v от 2 до 24 об/с. Для измерения скорости вращения лампы применялся оптический датчик угла (энкодер) модели RLV74RM, реагирующий на цветовую полосу на вращающейся муфте крепления лампы. Максимальная скорость вращения колбы была ограничена 24 об/с, поскольку при более высоких скоростях вращения (вплоть до 100 об/с) электрические,

излучательные и температурные параметры лампы практически не менялись.

Минимальная скорость вращения колбы, а именно, 2 об/с, выбрана исходя из необходимости усреднения измеряемых величин по поверхности колбы. (Заметим, что при неподвижной колбе невозможно однозначно сказать о температуре колбы и спектре излучения плазмы, поскольку они различны в разных областях поверхности колбы).

Чтобы обеспечить усреднение измеряемых величин, время одного измерения (~ 3 с) в несколько раз превышало время одного оборота колбы. Соответственно, все приведенные далее в статье результаты измерений являются средними по поверхности разрядной колбы и получены в установившемся режиме работы лампы.

Спектр оптического излучения плазмы, включающий ультрафиолетовый и инфракрасный диапазоны, измерялся с помощью спектрометра AvaSpec 3648. Измерение освещенности E проводилось люксметром ТКА-ПКМ. Температура стенок колбы T_w измерялась отъюстированным пирометром Raynger MX. Влияние сетчатого резонатора на результаты измерения температуры стенок было учтено введением экспериментально полученного коэффициента ослабления $\gamma = 1,12$.

Результаты измерений

На рис. 3 приведены зависимости освещенности E от скорости вращения колбы ν , измеренные при мощностях питания магнетрона P от 210 до 540 Вт. Видно, что освещенность достигает максимума при $\nu = 8$ – 9 об/с, а затем уменьшается и при $\nu > 12$ об/с практически не зависит от скорости вращения колбы. Нетрудно найти из рис. 3, что освещенность, в т.ч. максимальная, возрастает с увеличением мощности P «быстрее», чем линейно. Это указывает на то, что увеличение мощности питания магнетрона P (а, следовательно, и генерируемой им мощности P_{mag}) повышает эффективность генерации видимого излучения плазмы.

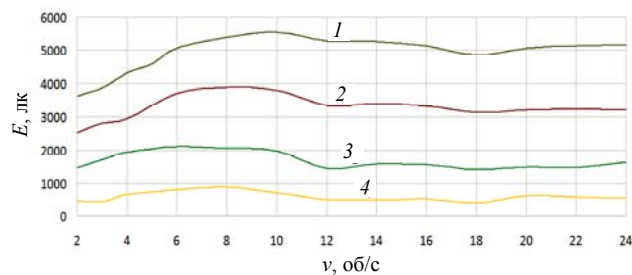


Рис. 3. Зависимость освещенности E от скорости вращения колбы ν . Мощность питания магнетрона P : 1 — 540 Вт, 2 — 430 Вт, 3 — 320 Вт, 4 — 210 Вт.

На рис. 4 приведены зависимости температуры стенки колбы T_w от скорости ее вращения ν , полученные при тех же значениях мощности P , что и на рис. 3. Видно, что при $P = 210$ – 540 Вт повышение скорости вращения колбы от 2 до 12–14 об/с снижает температуру стенки колбы на 130–150 °С, меняет форму плазмы с эллиптической на сферическую и «перемещает» плазму из верхней части колбы в ее центральную часть.

Дальнейшее повышение скорости вращения колбы не влияет на величину T_w .

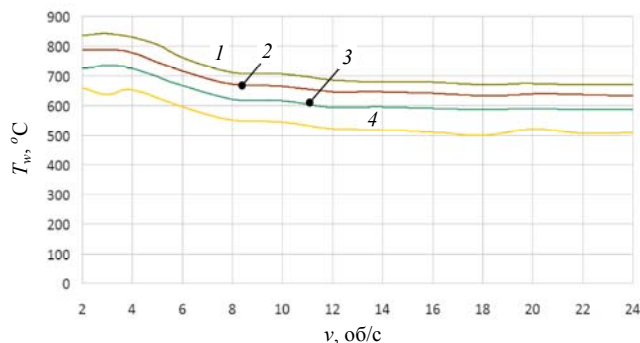


Рис. 4. Зависимость температуры стенок колбы T_w от скорости ее вращения ν . Обозначения, как на рис. 3.

Спектр излучения плазмы СВЧ-разряда, измеренный при различных скоростях вращения колбы $\nu = 4, 7, 10$ и 24 об/с и мощности питания магнетрона $P = 300$ Вт, приведен в относительных единицах на рис. 5. Из него видно, что увеличение скорости вращения колбы от 4 до 8 об/с сдвигает спектр излучения плазмы в область длинных волн, однако повышение ν от 8 до 24 об/с уже не меняет спектр излучения. Увеличение мощности питания магнетрона не меняет спектра лампы, но лишь повышает интенсивность излучения плазмы, что коррелирует с результатами измерения освещенности (см. рис. 3). Отметим, что для каждой скорости вращения колбы ν есть «пороговая» мощность питания магнетрона P_{thr} , ниже которой СВЧ-разряд в колбе становится неустойчивым, изменяет спектр излучения плазмы и сдвигает его в коротковолновую область.

С использованием измеренных в работе спектров излучения плазмы нами были рассчитаны цветовая температура излучения плазмы T_{col} и общий индекс цветопередачи R_a . На рис. 6 построена зависимость T_{col} от скорости вращения колбы ν для различных мощностей P . Видно, что на малых значениях $\nu = 2$ – 4 об/с цветовая температура излучения плазмы очень высока и снижается с увеличением мощности питания магнетрона от 20000 К ($P = 210$ Вт) до 10000 К ($P = 540$ Вт). С увеличением скорости вращения колбы ν разница в значениях цветовых температур уменьшается так, что начиная с $\nu = 8$ об/с, цветовая температура излучения плазмы перестает зависеть как от мощности питания магнетрона, так и от скорости вращения колбы, оставаясь близкой к температуре «холодного» света $T_{col} = 4500$ – 5500 К [9]. Отметим, что зависимости T_{col} от P и от ν коррелирует с результатами измерения спектров излучения плазмы (рис. 5).

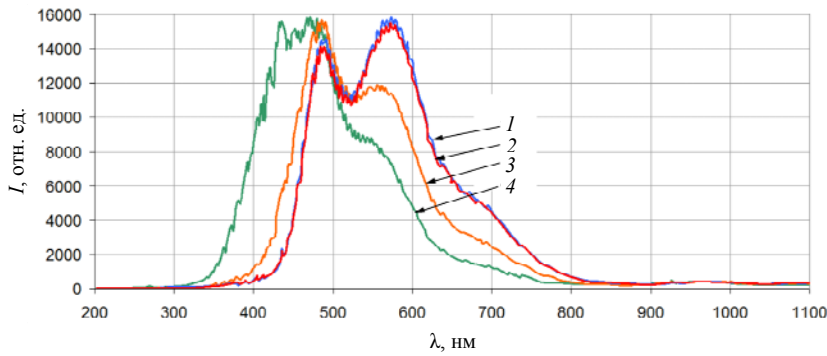


Рис. 5. Спектр излучения лампы, измеренный при разных скоростях вращения колбы ν : 1 — 24 об/с; 2 — 10 об/с; 3 — 7 об/с; 4 — 4 об/с. Мощность питания магнетрона $P = 300$ Вт.

Немонотонность кривых на рис. 6 при скоростях вращения колбы ниже 8 об/с связана с методической и случайной погрешностями. При небольших скоростях вращения колбы плазма расположена вне центральной области колбы и может менять свое положение от включения лампы к включению и даже во время работы лампы в установившемся режиме при неизменных скорости вращения колбы и мощности питания магнетрона. Различное положение плазмы в колбе при-

водит к несколько различающимся температурам T_w и T_{col} и спектрам излучения плазмы (рис. 5). Например, температура стенки колбы T_w выше, когда плазма располагается в верхней части колбы, и ниже, когда она находится в нижней части колбы, где расположен ее штенгель, через который осуществляется теплоотвод от ее стенок. Оценочная погрешность измерений спектров излучения плазмы и температур T_w и T_{col} составляет $\pm 7\%$.

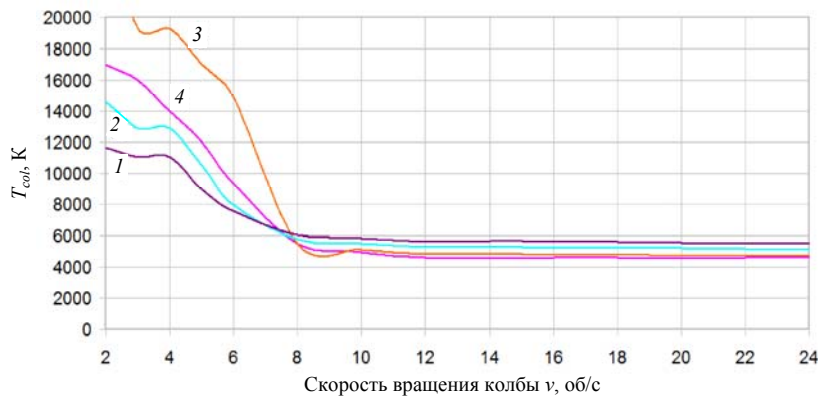


Рис. 6. Зависимость цветовой температуры излучения плазмы T_{col} от скорости вращения колбы ν . Обозначения, как на рис. 3.

Расчет общего индекса цветопередачи R_a показал, что при мощностях $P = 210\text{—}540$ Вт максимальные значения $R_a = 76\text{—}86$ достигаются при низкой скорости вращения колбы $\nu = 2\text{—}5$ об/с. Повышение скорости вращения до 8 об/с снижает R_a до 67—69 ($P = 400\text{—}500$ Вт) и 71 ($P = 210$ Вт). Увеличение ν свыше 8 об/с практически не влияет на величину общего индекса цветопередачи, который при всех исследованных в работе мощностях питания магнетрона P лежит в пределах $R_a = 67\text{—}71$. С учетом требования максимальной освещенности (см. рис. 3) и цветовой температуры излучения плазмы $T_{col} < 6000$ К (см. рис. 6), оптимальная скорость вращения колбы составляет $\nu = 8\text{—}10$ об/с.

Как отмечалось выше, при определенных значениях скорости вращения колбы и мощности питания магнетрона, СВЧ-разряд в колбе становится неустойчивым. Граница между устойчивым и неустойчивым режимами разряда, экспериментально

установленная в интервале скоростей вращения колбы $\nu = 2\text{—}24$ об/с, приведена на рис. 7 как зависимость пороговой («граничной») мощности питания магнетрона P_{thr} от скорости вращения колбы ν . Видно, что пороговая мощность P_{thr} снижается с увеличением скорости вращения колбы от 260 Вт ($\nu = 2$ об/с) до 50 Вт ($\nu = 24$ об/с).

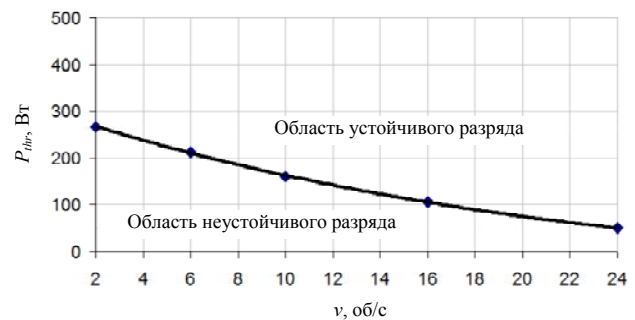


Рис. 7. Зависимость пороговой мощности питания магнетрона P_{thr} от скорости вращения колбы ν .

Обсуждение результатов эксперимента

Возбуждение в резонаторе стоячей волны моды TE_{111} , имеющей азимутальную составляющую электрического поля с двумя максимумами и минимумами, обусловило азимутальную неоднородность плазмы СВЧ-разряда высокого давления (см. рис. 1) и, как следствие, неравномерный нагрев стенок колбы. Для предотвращения локального перегрева стенок кварцевой колбы, приводящего к декристаллизации кварца и, в конечном счете, к сокращению срока службы лампы, колбу необходимо вращать [1—7].

Но есть и другая причина, вызывающая перегрев стенок колбы. Как видно из рис. 1, серная плазма СВЧ-разряда высокого давления в «неподвижной» разрядной колбе вследствие конвекции занимает лишь верхнюю часть колбы (около 1/3 ее объема). В результате, стенки верхней части колбы нагреваются выше $900\text{ }^{\circ}\text{C}$, в то время как нижняя часть колбы с теплоотводящим штенгелем нагревается лишь до температуры порядка $400\text{ }^{\circ}\text{C}$, образуя область «холодной точки», в которой конденсируются пары серы. В конечном итоге давление паров серы в колбе уменьшается и становится насыщающим (значительно ниже 5 атм), что приводит к снижению напряженности электрического поля в плазме. Соответственно снижается температура и плотность плазмы СВЧ-разряда, что приводит к уменьшению светового потока лампы и освещенности, как это экспериментально наблюдалось при разных мощностях питания магнетрона P (см. рис. 3).

При вращении разрядной колбы масса паров серы во всем объеме колбы увлекается вдоль вращающихся стенок колбы, в результате чего происходит ее перемешивание, и различные «области» паров серы «поочередно» попадают в область высокой напряженности электрического поля. В результате, как показали наши исследования, уже при скорости вращения колбы $\nu = 8\text{—}10$ об/с плазма СВЧ-разряда высокого давления принимает осесимметричную шарообразную форму с максимумом свечения и плотности плазмы в центре разрядной колбы.

Возможные альтернативные варианты повышения эффективности свечения лампы

Заметим, что с точки зрения повышения надёжности работы осветительного прибора, состоящего из нескольких узлов (магнетрон и источник его питания, резонатор, разрядная колба и устройство ее вращения), следует стремиться к минимальной частоте вращения колбы и даже к работе лампы с невращающейся колбой. Известны несколько способов получения сферически сим-

метричной и азимутально однородной плазмы СВЧ-разряда высокого давления в лампе с «неподвижной» колбой.

В [10] описан способ получения азимутально однородной и сферически симметричной плазмы в неподвижной колбе благодаря использованию вращающегося СВЧ-поля. Резонатор, в котором размещена разрядная колба, возбуждается четырьмя симметрично расположенными в нем антеннами, «сдвинутыми» по фазе на 90° , что вызывает «передвижение» максимума электрического поля (и, соответственно, максимума плотности СВЧ-плазмы) по круговой траектории. Такая конфигурация электромагнитного поля в резонаторе требует, как минимум, четырех СВЧ-генераторов, четырех коаксиальных (или волноводных) трактов и весьма сложную систему управления [10], что делает ее весьма громоздкой и дорогой, а потому и малоприменимой для массового производства.

Относительно недавно был предложен способ получения симметричного по отношению к центру колбы распределения плотности плазмы СВЧ-разряда в сферической разрядной колбе благодаря использованию акустического резонанса [11]. Модуляция генерируемой магнетроном и, следовательно, поглощаемой плазмой СВЧ-мощности вызывает колебания плотности плазмы, которые, в свою очередь, генерируют на этой же частоте акустические колебания. Отражаясь от стенок кварцевой колбы, акустические колебания могут создавать в объеме колбы стоячую волну с пучностью вблизи центра сферической колбы [11]. Этот способ не требует изменений в конструкции собственно лампы, но необходимы лишь изменения в конструкции и схеме высоковольтного источника питания магнетрона. Такой способ может стать весьма перспективным для решения практически важной задачи — создания разрядного безэлектродного серного СВЧ-источника света высокого давления с невращающейся («неподвижной») разрядной колбой.

Заключение

В результате проведенного в работе экспериментального исследования влияния скорости вращения разрядной сферической колбы на характеристики серной СВЧ-лампы высокого давления установлено, что увеличение скорости вращения колбы приводит к следующим эффектам:

- изменению формы разрядной плазмы от эллиптической к сферической;
- «передвижению» плазмы из верхней части колбы в ее центр;
- сдвигу спектра оптического излучения плазмы в длинноволновую область;

– повышению освещения и потока видимого излучения лампы;

– снижению температуры разрядной колбы, цветовой температуры излучения плазмы и общего индекса цветопередачи.

– снижению пороговой мощности питания магнетрона, при которой СВЧ-разряд в колбе становится неустойчивым.

Установлено, что в серной СВЧ-лампе высокого давления с заданными в работе конструктивными параметрами колбы и резонатора ее излучательные характеристики практически не изменяются при повышении скорости вращения колбы свыше 8—10 об/с.

В работе также рассмотрены и оценены возможные перспективные способы получения эффективного излучения серной СВЧ-лампы высокого давления со сферически симметричной плазмой в невращающейся разрядной сферической колбе.

ЛИТЕРАТУРА

1. Dolan J. T., Ury M. G., Wood C. H. / Proc. 6th Int. Symp. Sci. Technol. Light Sources. Budapest. 1992. P. 301.
2. Ury M. G., Wood C. H. / US Patent 4,859,906. July 3, 1992.
3. Шлиффер Э. Д. / Патент РФ 2,191,443. 10 ноября 2005.
4. Янг-Дзин / Патент РФ 2,225,659. 10 марта 2004.
5. Turner B. P., Ury M. G., Leng Y., and Love W. G. // J. Ill. Soc., Winter 1997. P. 10.
6. Диденко А. Н., Зверев Б. В., Прокопенко А. В. // Труды научных сессий МИФИ-2005. Том 8. С. 2.
7. Диденко А. Н., Прокопенко А. В., Шукин А. Ю. // Труды научных сессий МИФИ-2008. Том 5. С. 9.
8. Chilukuri S. and Lichten W. L. // Rev. Sci. Instr. 1979. Vol. 50. P. 256.
9. Рохлин Г. Н. Разрядные источники света. — М.: Энергоатомиздат, 1991.
10. Jin Joong Kim, Jung Tae Ko, Dong Ho Won, Jeong Won Kim, S. S. Kim, and Hong-Young Chang // Appl. Phys. Lett. 2004. Vol. 84. P. 2769.
11. Courret G., Croci M., Calame L., Meyer A. / Proc. IEA Annex 45 Expert Meeting. April 22–23, 2005. San Francisco.

Discharge bulb rotation effects on the high pressure sulfur microwave lamp characteristics

I. V. Irkhin^{1,2}, A. A. Sukhachevsky¹, and O. A. Popov¹

¹Moscow Power Engineering Institute
14 Krasnokazarmennaya str., Moscow, 111250, Russia
E-mail: popovoleg445@yahoo.com

²All-Russian Electrotechnical Institute
12 Krasnokazarmennaya str., Moscow, 111250, Russia
E-mail: terahertz494@gmail.com

Received July 22, 2016

Effects of the electrodeless high pressure sulfur discharge bulb rotation on lamp radiation characteristics were experimentally studied. Plasma was excited in the mixture of sulfur vapor pressure (5—6 Atm) and argon (20 Torr) at microwave frequency of 2.45 GHz and magnetron power of 90—540 W in the quartz spherical bulb of 35 mm in dia. inserted in the cylindrical resonator of 73 mm in dia. and 147 mm in height. It was found that the shape of the microwave discharge plasma and its location in the bulb as well as plasma optical radiation spectrum were determined by the bulb rotation speed. The increase of the bulb rotation speed shifted microwave plasma radiation spectrum to the larger wavelength region, increased lamp light output, and reduced bulb walls temperature, radiation color temperature and color rendering index. It was experimentally found that the boundary between stable and unstable regimes was characterized by the magnetron power threshold value that decreased as the bulb rotation speed increased. Technical solutions to generate and maintain stable high pressure sulfur microwave plasmas in non-rotated discharge bulb were discussed.

PACS: 51.50.+v, 52.25.Fi, 52.80.Pi

Keywords: sulfur lamp, microwave plasma, high pressure, optical radiation spectrum, bulb rotation.

REFERENCES

1. J. T. Dolan, M. G. Ury, and C. H. Wood, in *Proc. 6th Int. Symp. Sci. Technol. Light Sources* (Budapest, 1992). P. 301.
2. M. G. Ury and C. H. Wood. US Patent 4,859,906. July 3, 1972.
3. E. D. Shliffer. RF Patent 2,191,443 C1. November, 10, 2005.
4. Yang-Dzin. RF Patent 2,225,659 C2. March 10, 2004.
5. B. P. Turner, M. G. Ury, Y. Leng, and W. G. Love, J. Ill. Soc., 10 (Winter 1997).
6. A. N. Didenko, B. V. Zverev, and A. V. Prokopenko, in *Proc. Sci. Sessions MEPh* (Moscow, 2005). **8**. P. 2.
7. A. N. Didenko, A. V. Prokopenko, A. Y. Schchukin, in *Proc. Sci. Sessions MEPhI* (Moscow, 2008). **5**. P. 9.
8. S. Chilukuri and W. L. Lichten, *Rev. Sci. Instr.*, **50**. 256 (1979).
9. G. N. Rokhlin. *Discharge Light Sources* (Energoatomizdat, Moscow, 1991) [in Russian].
10. Jin Joong Kim, Jung Tae Ko, Dong Ho Won, Jeong Won Kim, S. S. Kim, and Hong-Young Chang, *Appl. Phys. Lett.*, **84**. 2769 (2004).
11. G. Courret, M. Croci, L. Calame, A. Meyer, in *Proc. IEA Annex 45 Expert Meeting* (San Francisco, April 22–23, 2005).