

**Характеристики разгорания серной СВЧ-лампы
высокого давления***И. В. Ирхин, А. А. Сухачевский, О. А. Попов, Р. А. Иликеева*

Проведено экспериментальное исследование разгорания безэлектродной серной СВЧ-лампы высокого давления. Разряд зажигался и поддерживался в парах серы и аргоне (20 Торр) в кварцевой колбе диаметром 35 мм, размещенной в цилиндрическом резонаторе диаметром 73 мм и высотой 147 мм. Колба вращалась с угловой скоростью ν от 0 до 24 об/с, плазма возбуждалась на частоте 2,45 ГГц при мощности магнетрона 200–740 Вт. Обнаружено, что появление светового потока (освещенности) лампы после зажигания в колбе СВЧ-разряда происходит с задержкой t_z , которая не зависит от скорости вращения колбы, но уменьшается с увеличением мощности магнетрона. В процессе разгорания лампы наблюдалось изменение формы плазмы СВЧ-разряда и ее положения в колбе, которые определялись скоростью вращения колбы и мощностью магнетрона. Зависимость освещенности лампы от времени ее разгорания t имела максимум E_{max} положение которого, t_{max} с увеличением мощности магнетрона и скорости вращения колбы сдвигалось в сторону меньших значений t . С увеличением скорости вращения колбы ν от 0 до 7–8 об/с уменьшалось время достижения лампой установившегося режима $t_{уст}$, возрастала максимальная освещенность E_{max} , а спектр излучения плазмы сдвигался в длинноволновую область. Увеличение скорости вращения колбы свыше 8 об/с вызывало снижение освещенности и рост $t_{уст}$.

Ключевые слова: серная лампа, СВЧ-плазма, разгорание разряда, вращение колбы, спектр оптического излучения.

Введение

Сегодня уровень развития безэлектродных источников оптического излучения, включая видимое, достиг промышленных масштабов. Ведутся работы по миниатюризации конструкций, повышению эффективности источников питания, увеличению КПД и световой отдаче излучателей, а также получению требуемого спектрального состава излучения. Области применения безэлектродных источников оптического излучения обширны, от лабораторных источников излучения для получения определенных спектральных линий

[1] до мощных источников света для освещения жилых и рабочих помещений [2–7], для выращивания садовых, овощных и других агрономических растений в контролируемой среде [8–11].

Одним из перспективных типов безэлектродных источников оптического излучения является серная лампа высокого давления, обладающая отличными техническими и эксплуатационными параметрами, причем во многом превосходящими таковые у традиционных разрядных источников оптического излучения, которые используют внутренние электроды.

Серные лампы работают в широком интервале мощностей, а именно, от сотен ватт до нескольких кВт, у них малый объем тела свечения (диаметр разрядной колбы 2–3 см), что дает возможность создания на их основе мощных прожекторных систем. Они имеют высокие световые отдачи (80–90 лм/Вт), большой срок службы разрядной кварцевой колбы (до 60000 ч), сплошной квазисолнечный спектр видимого излучения, высокий индекс цветопередачи ($R_a = 80–90$), широкий интервал цветовых температур ($T_{цв} = 3000–5000$ К). Отметим, что около 73 % излучения серной лампы лежит в видимом диапазоне, 20 % – в ИК-диапазоне, и лишь 1 % – в ультрафиолетовом диапазоне.

Ирхин Игорь Вячеславович^{1,2}, аспирант, инженер.

Сухачевский Алексей Алексеевич¹, студент.

Попов Олег Алексеевич¹, профессор.

Иликеева Римма Анваровна¹, студент.

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 27 марта 2017 г.

© Ирхин И. В., Сухачевский А. А., Попов О. А., Иликеева Р. А., 2017

Типовая конструкция светильника на основе серной лампы, работающей на разрешенной СВЧ-частоте $f = \omega/2\pi = 2,45$ ГГц ($\lambda = 12,4$ см), состоит из цилиндрического светопрозрачного (сетчатого) металлического СВЧ-резонатора с типом колебаний TE_{111} . Внутри него (в максимум напряженности электрического поля) помещается кварцевая сферическая колба, содержащая аргон при давлении 20 Торр и 20 мг твердофазной серы. В установленном режиме работы температура стенок колбы достигает 800 °С, давление паров серы 5–7 атм. В лампе, работающей на мощности магнетрона $P = 0,3–3,0$ кВт, концентрация электронов в плазме разрядной колбы составляет $n_e = 10^{12}–10^{14}$ см⁻³, толщина скин-слоя $\delta = 0,1–0,001$ см, частота упругих соударений электронов с атомами и молекулами рабочей смеси много больше круговой частоты колебаний электромагнитного поля ($v_c \gg \omega$) [12].

Серные СВЧ-лампы высокого давления имеют ряд недостатков, в частности, необходимо обеспечивать вращение разрядной колбы для равномерного охлаждения ее стенок. В известных нам конструкциях светильников, разработанных на основе серной лампы, скорость вращения колбы выбирается с учетом конструктивных особенностей и технических характеристик электродвигателя и меняется при изменении напряжения и частоты питающей сети. В то же время скорость вращения разрядной колбы влияет не только на тепловой режим колбы, но и на основные излучательные характеристики лампы: спектр излучения плазмы, световой поток, время разгорания лампы [13].

В предыдущей работе [13] нами были проведены экспериментальные исследования излучательных и электрических характеристик серной лампы высокого давления, работавшей в установленном режиме на частоте 2,45 ГГц и мощностях магнетрона от 200 до 540 Вт. Разрядная кварцевая колба, заполненная аргоном (20 Торр) и парами серы (4–6 атм), размещенная в СВЧ-резонаторе (мода TE_{111}), вращалась вокруг своей оси с различной скоростью v от 0 до 24 об/с. Было установлено, что увеличение скорости вращения колбы сдвигает спектр излучения плазмы в сторону длинных волн, повышает освещенность и снижает температуру стенок колбы, цветовую температуру и общий индекс цветопередачи плазмы.

В настоящей публикации приведены результаты экспериментального исследования разгорания серной СВЧ-лампы, в частности, влияния СВЧ-мощности и скорости вращения колбы на форму и размер плазменного образования и на его положение в разрядной колбе, на скорость роста освещения и температуры стенок колбы, на спектр

излучения плазмы и на время достижения лампой установленного режима.

Экспериментальная установка и методики измерений

Схема генерации СВЧ-разряда и его управления была аналогична той, что применялась для исследования серной СВЧ-лампы, работавшей в установленном режиме [13]. Источник питания магнетрона на частоте 2,45 ГГц был собран по схеме, аналогичной описанной в [14], и состоял из регулируемого автотрансформатора, повышающего и накального трансформаторов, мостового выпрямителя, фильтрующих емкостей и балластного сопротивления. Источник был оснащен высоковольтным делителем и датчиком тока для измерения тока и напряжения, приложенных к магнетрону, и обеспечивал постоянное напряжение на нем до 4,5 кВ, а ток до 250 мА.

Плазма возбуждалась на мощностях магнетрона от 200 до 740 Вт в кварцевой сферической колбе диаметром 35 мм, помещенной в цилиндрический сетчатый светопрозрачный металлический резонатор диаметром 73 мм и высотой 147 мм. Его расчетная резонансная частота составила 2469 МГц, а добротность – 749. Резонатор возбуждался с помощью щели связи в широкой стенке волновода сечением 70×41 мм.

Газоразрядная колба содержала аргон при давлении 20 Торр и 20 мг серы в твердой фазе; скорость вращения колбы задавалась коллекторным электродвигателем и фиксировалась оптическим энкодером. Диапазон скоростей вращения v , при которых проводились измерения, простирался от 0 до 24 об/с, но скорость вращения не изменялась в процессе разгорания лампы.

Фотографирование плазмы СВЧ-разряда, позволявшее определять размеры плазмы, ее форму и положение в разрядной колбе, проводилось с помощью фотокамеры Lumix TZ-7 с набором нейтральных светофильтров. Были проведены систематические измерения температуры стенок колбы, освещенности, спектра оптического излучения и коэффициента стоячей волны (КСВ) в волноводном тракте.

Для измерения КСВ в широкую стенку волновода были введены два зонда-антенны, разделенные расстоянием в 1,5 см, т. е. меньшим, чем четверть длины волны $\lambda/4 = 3,1$ см, соответствующей частоте возбуждения разряда $f = 2,45$ ГГц. Зонды выступали во внутреннее пространство волновода не более чем на 1 мм. При работе на согласованную нагрузку (СВЧ-плазма в колбе, размещенной в максимуме напряженности электрического поля стоячей волны, возбужденной в резонаторе

моды TE_{111}) в волноводе устанавливался режим бегущей волны, а напряженности электрического СВЧ-поля в местах расположения обоих зондов были практически одинаковы ($K_{СВ} \approx 1$). При расфокусировании и, соответственно, возникновении в волноводе отраженных волн образуются стоячие волны с пучностями и узлами напряженности электрического поля. В этом случае напряженности электрического поля в местах расположения зондов-антенн уже отличались друг от друга.

Из-за непостоянства фазы стоячих волн относительно положения зондов, измеренные значения КСВ являются приближенными. Более корректные значения КСВ можно получить, если установить в разрыв волноводного тракта направленные ответвители для измерения падающей и отраженной волн. В то же время для исследования процесса разгорания лампы, имеющего в значительной степени качественный характер, методику измерения КСВ с использованием пристеночных зондов можно считать достаточно корректной. Заметим, что примененный нами метод измерения КСВ сопряжен с минимальным вмешательством в волноводный тракт и, следовательно, не влияет на согласование тракта с нагрузкой (в виде СВЧ-плазмы).

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 $\gamma = 1,12$. Спектр оптического излучения плазмы, включающий ультрафиолетовый и инфракрасный диапазоны, измерялся с помощью спектрометра AvaSpec 3648. Приведенные спектрограммы являются интегральными по всему объёму колбы. Измерение освещенности E проводилось люксметром ТКА-ПКМ.

Экспериментальные результаты и их обсуждение

На рис. 1–3 приведены зависимости освещенности E от времени разгорания лампы t , измеренные на трех мощностях магнетрона $P = 200, 500$ и 740 Вт и четырех скоростях вращения разрядной колбы $\nu = 0, 4, 7$ и 20 об/с. Измерения в невращающейся ($\nu = 0$) серной лампе, работавшей на мощности 740 Вт, не были доведены до достижения установившегося режима из-за быстрого роста температуры стенок колбы, достигавшей высокой для кварца температуры 900 °С уже через 35 с после зажигания лампы, (см. рис. 6).

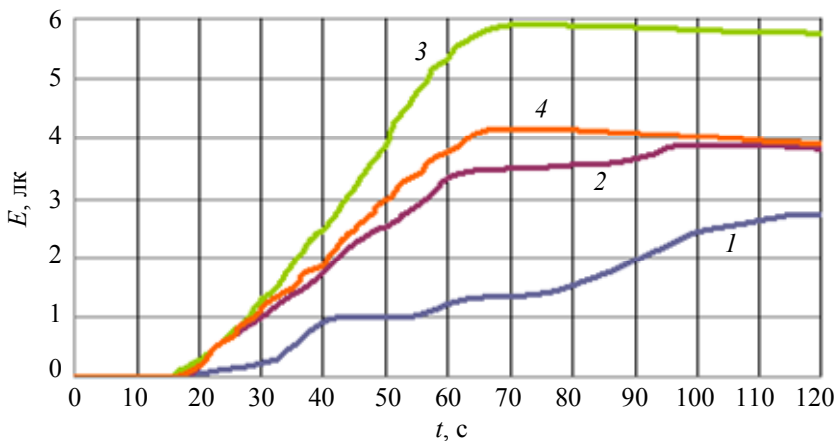


Рис. 1. Зависимость освещенности E от времени разгорания лампы t . Скорости вращения колбы ν , об/с: кривая 1 – 0; 2 – 4; 3 – 7; 4 – 20. Мощность магнетрона $P = 200$ Вт.

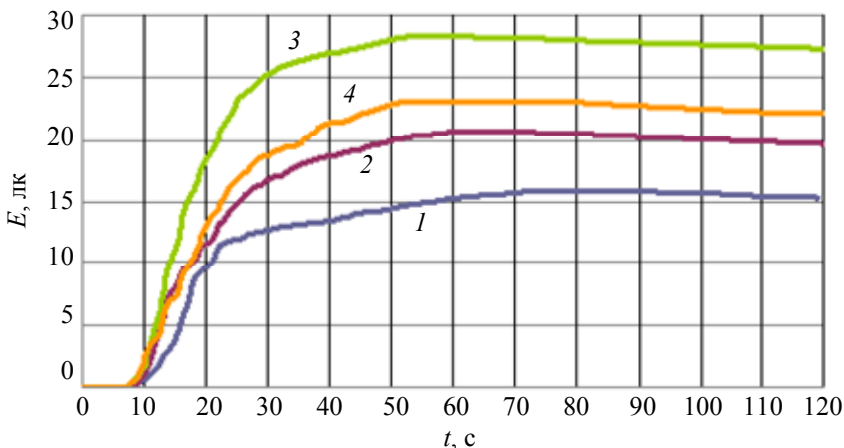


Рис. 2. Зависимость освещенности E от времени разгорания лампы t . Мощность магнетрона $P = 500$ Вт. Скорости вращения колбы ν , об/с: кривая 1 – 0; 2 – 4; 3 – 7; 4 – 20.

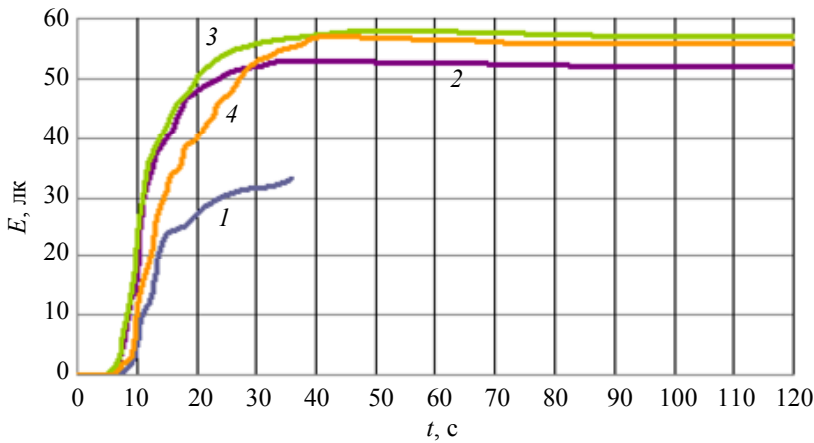


Рис. 3. Зависимость освещенности E от времени разгорания лампы t . Мощность $P = 740$ Вт. Скорости вращения колбы v , об/с: кривая 1 – 0; 2 – 4; 3 – 7; 4 – 20.

Как видно из рис. 1–3, освещенность, создаваемая плазмой СВЧ-разряда в парах серы, начинает расти не сразу после зажигания СВЧ-разряда в буферном газе (аргоне), а с задержкой, т. е. спустя некоторый период времени t_3 . Чем выше мощность магнетрона, тем меньше время «задержки освещения» (и светового потока лампы). В лампе, возбуждаемой на минимальной в наших экспериментах мощности $P = 200$ Вт, время задержки освещенности максимально, $t_3 = 17$ – 20 с. Увеличение мощности магнетрона до 500 Вт снижает t_3 до 8–10 с, а при работе на максимальной в наших экспериментах мощности 740 Вт задержка освещенности минимальна, $t_3 = 5$ –8 с.

Время задержки освещенности практически не зависит от скорости вращения колбы, но, пред-

положительно, зависит от температуры стенок колбы T_w в области «холодной точки», расположенной в нижней части колбы вблизи ее ножки. Температура холодной точки ($T_{х.т.}$) определяет давление насыщающих паров серы и зависит от мощности магнетрона и скорости вращения колбы. На рис. 4–6 приведены зависимости температуры стенки T_w от времени разгорания лампы t , полученные для тех же условий, что зависимости освещенности E от t (рис. 1–3). Сопоставляя обе эти зависимости легко обнаружить, что в момент t_3 температура стенок равна 200–220 °С на всех уровнях мощности $P = 200, 500$ и 740 Вт и при всех исследованных в работе скоростях вращения колбы $v = 0$ –20 об/с.

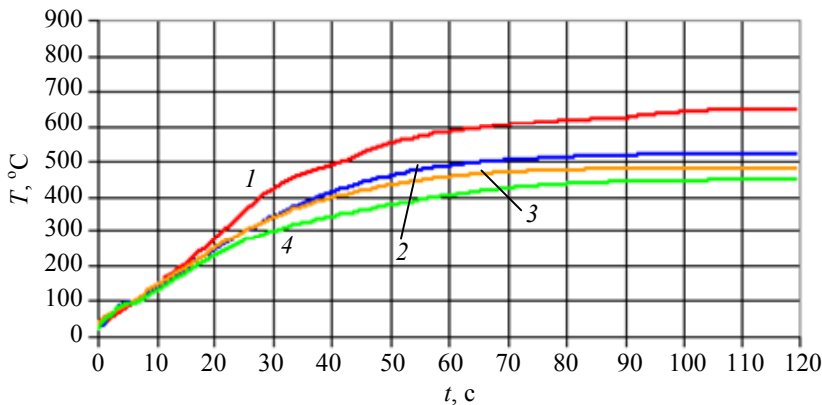


Рис. 4. Зависимость температуры стенок колбы T_w от времени разгорания лампы t . Скорости вращения колбы v , об/с: кривая 1 – 0; 2 – 4; 3 – 7; 4 – 20. Мощность магнетрона $P = 200$ Вт.

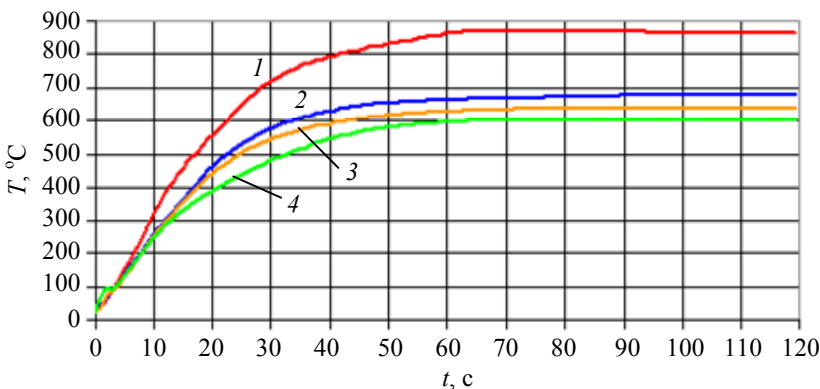


Рис. 5. Зависимость температуры стенок колбы T_w от времени разгорания лампы t . Мощность магнетрона $P = 500$ Вт. Скорости вращения колбы v , об/с: кривая 1 – 0; 2 – 4; 3 – 7; 4 – 20.

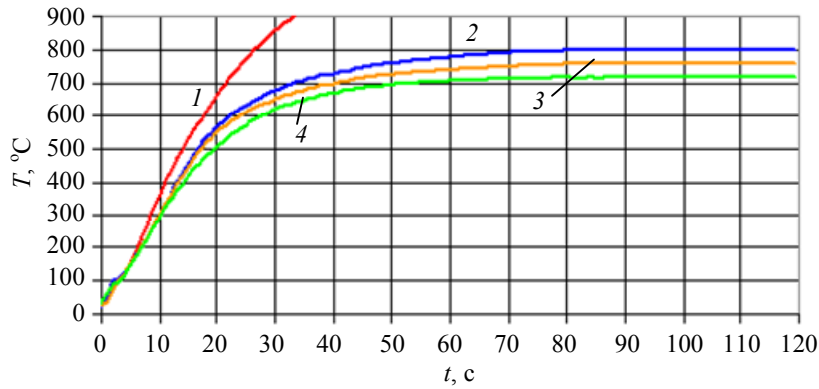


Рис. 6. Зависимость температуры стенок колбы T_w от времени разгорания лампы t . Мощность магнетрона $P = 740$ Вт. Скорости вращения колбы v , об/с: кривая 1 – 0; 2 – 4; 3 – 7; 4 – 20.

Известно, что в режиме насыщающих паров давление паров серы при температуре холодной точки $T_{х.т.} = 250$ °С составляет около 10 Торр [15], что весьма близко к давлению аргона (20 Торр). Поскольку давление паров серы быстро (почти экспоненциально) растет с увеличением температуры холодной точки, то при более низких температурах стенок колбы ($T_w < 200$ °С) ее давление ничтожно, и все процессы в плазме СВЧ-разряда, включая возбуждение и ионизацию атомов рабочей смеси, определяются давлением аргона. Так как потенциал ионизации атома аргона весьма высок, то относительно низка плотность аргоновой плазмы при давлении 20 Торр. Соответственно, мала поглощаемая плазмой СВЧ-мощность и велика отражаемая плазмой (нагрузкой) СВЧ-мощность, что фиксируется высокими значениями КСВ волноводного тракта, измеренными в первые секунды после зажигания СВЧ-разряда в аргоне (рис. 7). Из зависимостей КСВ от времени видно, что в начальный момент величина отраженной волны велика, что, очевидно, связано с малыми потерями энергии электронами в их столкновениях с атомами аргона и, соответственно, с малым поглощением СВЧ-мощности в аргоновой плазме.

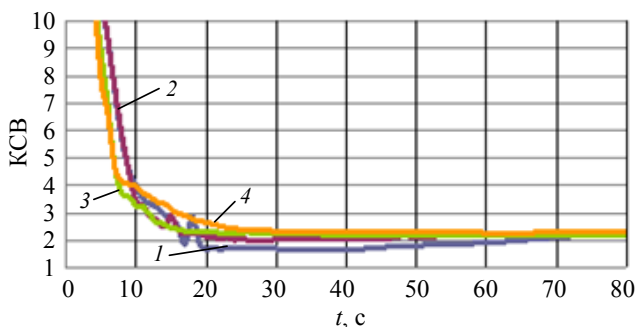


Рис. 7. Зависимость КСВ от времени разгорания лампы t . Скорости вращения колбы v , об/с: кривая 1 – 0; 2 – 4; 3 – 7; 4 – 20. Мощность магнетрона $P = 500$ Вт.

Повышение температуры стенок колбы выше 200 °С вызывает быстрое возрастание давления паров серы, атом которой имеет потенциалы возбуждения и ионизации более низкие, чем потен-

циал ионизации аргона. Это приводит к росту возбуждающих и ионизирующих соударений в серной плазме сначала среднего, а затем и высокого давления. В результате резко возрастает электропроводность СВЧ-плазмы, что ведет к падению КСВ при $t = 6-8$ с (рис. 7), практически совпадающему со временем задержки излучения $t_3 = 8-10$ с, экспериментально полученным в лампе, работающей на мощности 500 Вт (рис. 2). Как видно из рис. 7, в установившемся режиме работы серной лампы КСВ устанавливается на уровне 1,5–2,5, что вполне приемлемо в СВЧ-технологии.

Из рис. 1–3 видно, что на всех мощностях магнетрона $P = 200-740$ Вт и скоростях вращения колбы $v = 0-20$ об/с освещенность E (а, следовательно, и световой поток лампы) сначала быстро растет, а достигнув при $t = t_{max}$ своего максимального значения E_{max} , медленно снижается до установившегося значения $E_{уст.}$. Чем больше мощность магнетрона P (и, соответственно, поглощенная плазмой мощность) и чем выше скорость вращения колбы v , тем на меньших значениях $t = t_{max}$ расположен максимум освещенности E_{max} и тем раньше освещенность достигает установившегося значения $E_{уст.}$. Увеличение мощности магнетрона вызывает на всех стадиях разгорания рост освещенности, в том числе и ее максимальной величины E_{max} .

Зависимость E_{max} от скорости вращения колбы v имеет более сложный, немонотонный характер. Как следует из рис. 1–3, на малых скоростях вращения колбы максимальная освещенность возрастает, достигая максимума при $v = 7-8$ об/с, а затем снижается. При этом коэффициент увеличения освещенности тем больше, чем ниже подводимая мощность. Так, при мощности магнетрона $P = 200$ Вт увеличение скорости вращения с 4 до 7 об/с увеличивает освещенность в 1,5 раза, при мощности 500 Вт в 1,4 раза, а при мощности 740 Вт только в 1,1 раз. Заметим, что аналогичная зависимость освещенности от скорости вращения колбы наблюдалась нами в серных лампах высокого давления, работающих в установившемся режиме [13].

Из рис. 1–3 нетрудно видеть, что при всех уровнях мощности – от 200 до 740 Вт – характер зависимости освещенности E от времени разгорания t «неподвижной» лампы ($\nu = 0$) отличается от таковых, измеренных во вращающейся лампе ($\nu = 4, 7, 20$ об/с). На этой зависимости есть временной интервал (горизонтальная ступенька) Δt_{const} , где освещенность (а, следовательно, и световой поток лампы) практически неизменны. Чем выше поглощаемая плазмой мощность, тем «раньше» появляется эта ступенька и тем «уже» интервал Δt_{const} . Например, в лампе, работающей на мощности 200 Вт, $\Delta t_{\text{const}} = 13$ с и «расположен» он между $t = 42$ и $t = 55$ с. В лампе, работающей на мощности 500 Вт, «ступенька» появляется между $t = 32$ с и 41 с, а ширина его $\Delta t_{\text{const}} = 9$ с (рис. 2). Еще на более ранней стадии разгорания лампы «появляется» горизонтальная ступенька в зависимости E от t в лампе, работающей на максимальной в наших исследованиях мощности магнетрона $P = 740$ Вт, а именно, между 22 и 26 секундой разгорания, а его ширина – $\Delta t_{\text{const}} = 4$ с (рис. 3).

Нами было экспериментально установлено, что горизонтальная ступенька Δt_{const} в зависимости

E от t в невращающейся колбе вызвана возникновением неустойчивости СВЧ-разряда, продолжающейся в течение периода Δt_{const} . При $t = 55$ с неустойчивость исчезала, а плазма «перемещалась» в другую область колбы, что сопровождалось возрастанием освещенности и изменением спектра плазмы. Это проиллюстрировано на рис. 8, а, где приведены фотографии плазмы, снятые в различные моменты разгорания «невращающейся» ($\nu = 0$) лампы, работающей на мощности $P = 200$ Вт. Дальнейший процесс разгорания ($t > 60$ с) сопровождается ростом освещенности (см. рис. 1) и интенсивности излучения плазмы в видимом диапазоне длин волн (см. рис. 9) без появления неустойчивостей. На больших мощностях магнетрона $P = 500$ и 740 Вт процесс разгорания лампы имеет аналогичный характер, но происходит быстрее. При работе лампы на мощностях магнетрона меньших, чем 200 Вт, период неустойчивости Δt_{const} продолжался дольше, а при работе лампы на мощности 90 Вт происходил срыв разряда и он гас. Граница между стабильным и нестабильным СВЧ-разрядом была экспериментально определена для установившегося режима лампы в [13].

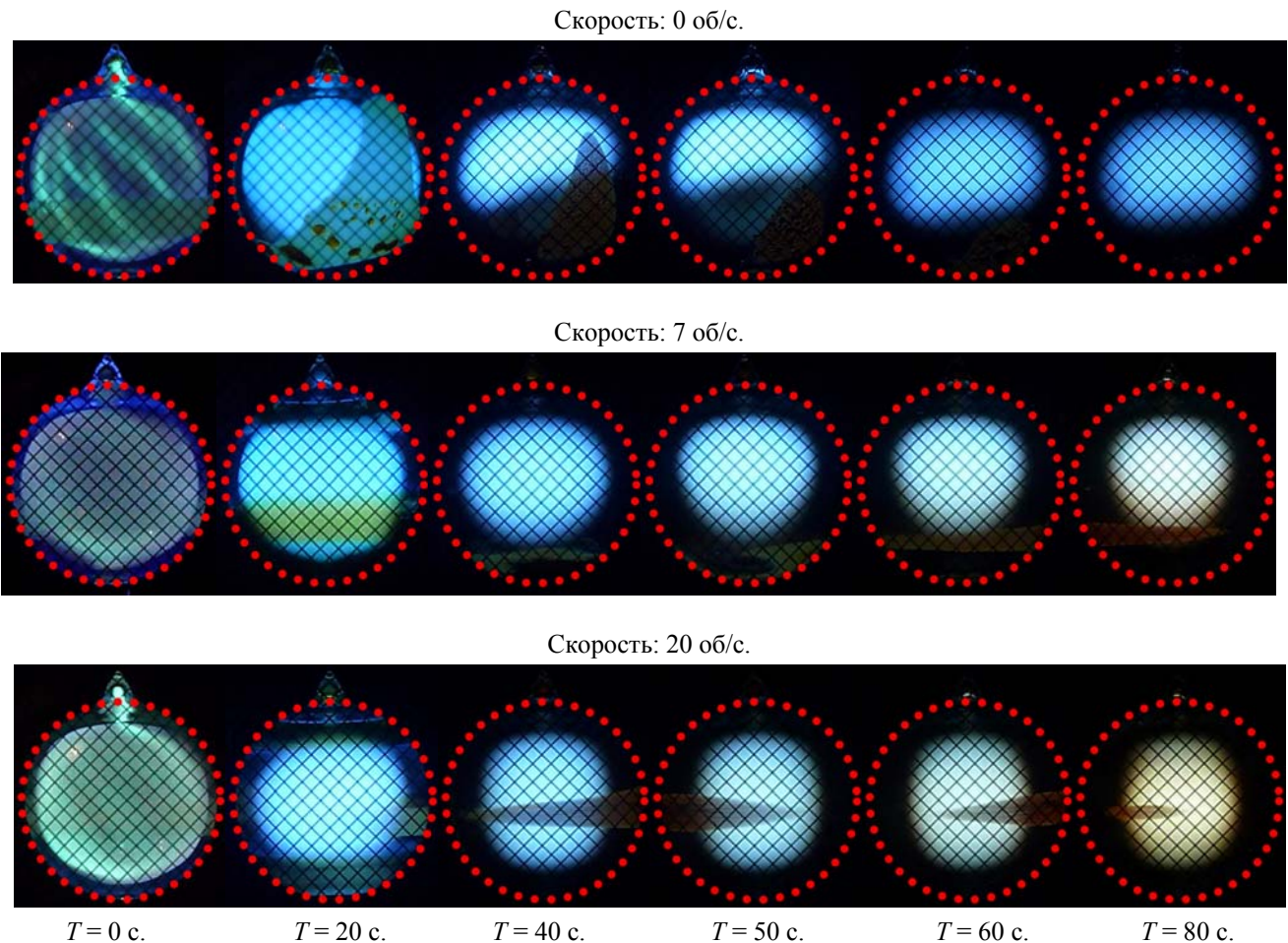


Рис. 8. Фотографии плазмы СВЧ-разряда в безэлектродной серной лампе, измеренные в процессе ее разгорания при различных скоростях вращения разрядной колбы. Мощность магнетрона $P = 200$ Вт.

Сравнивая зависимости КСВ от времени разгорания, полученные при различных скоростях вращения колбы, можно заметить, что в невращающейся колбе, а также в колбах с низкой скоростью вращения $\nu = 2\text{--}4$ об/с КСВ в процессе разгорания лампы тоже ведет себя неустойчиво. Это коррелирует с обнаруженной неустойчивостью СВЧ-разряда в разрядных колбах, вращающихся с малой скоростью (рис. 8, а). При повышении скорости вращения до 7 об/с и выше СВЧ-разряд стабилизируется, а плазма «перемещается» в центр колбы. При вращении колбы со скоростью большей, чем 4 об/с, неустойчивость разряда не наблюдалась на всех уровнях мощности. Соответственно, световой поток лампы и освещенность в процессе разгорания разряда возрастали практически монотонно.

В работе было сделано предположение, что наблюдаемое в процессе разгорания разряда изменение формы плазмы СВЧ-разряда и ее положения в невращающейся разрядной колбе связано с конвекцией, а во вращающейся колбе еще и с центробежной силой. В частности, в невращающейся колбе плазма из-за конвекции «горит» в верхней области колбы (рис. 8, ряд «0 об/с»). При повороте колбы на 90° вокруг горизонтальной оси плазма остаётся в верхней области колбы, что подтверждает роль конвекции. Действительно, когда плазма находится в верхней части колбы, температура стенок в этой части колбы значительно выше (а именно, на 134°C) температуры стенок в нижней части колбы. В результате, пары серы конденсируются в холодной зоне, находящейся в нижней части колбы, вблизи ножки, температура которой определяет давление паров серы. Даже при относительно большой поглощаемой плазмой мощности (500–740 Вт) доля внесенной в колбу твердофазной серы, испаряемой в объем колбы, не велика, так что давление ее паров не превышает 1 атм, а спектр излучения серной плазмы, сосредоточенный в синей области, существенно отличается от солнечного спектра, характерного для серных ламп высокого давления 4–5 атм.

При вращении колбы со скоростью 16 об/с и выше плазма СВЧ-разряда имеет сферическую форму и размещается в центре колбы. В процессе разгорания лампы сера переходит из твердой фазы в жидкую и вследствие центробежной силы распределяется по «экватору» стенок колбы (рис. 8, ряд «20 об/с»). Вращение колбы способствует равномерному распределению температуры по по-

верхности колбы, что приводит к повышению температуры холодной точки, росту давления паров серы и, в результате, к смещению излучения плазмы в красную область спектра. При меньших скоростях вращения колбы в интервале $\nu = 4\text{--}16$ об/с плазма СВЧ-разряда имеет форму конуса, либо «вихря» с основанием в верхней части колбы. Это проиллюстрировано на рис. 8 (ряд «7 об/с») для лампы с колбой, вращающейся со скоростью 7 об/с. Как показали наши спектроскопические измерения, спектр излучения плазмы СВЧ-разряда в этом случае различен по ее сечению. В верхней части колбы, где стенки имеют более высокую температуру, спектр смещен в синюю область спектра, в то время как в нижней части колбы, где ниже температура стенок, спектр смещен в красную область спектра. Таким образом, изменяя скорость вращения колбы мы можем при неизменной мощности магнетрона менять температуру холодной точки (давление паров серы) и, следовательно, изменять спектр излучения лампы.

Спектры плазмы, измеренные в разные моменты разгорания серной СВЧ-лампы, работающей с разной скоростью вращения колбы $\nu = 0; 7$ и 20 об/с, но на одинаковой мощности магнетрона $P = 200$ Вт, приведены на рис. 9–11. Из спектров излучения плазмы невращающейся колбы следует, что в процессе разгорания лампы происходит лишь постепенное увеличение интенсивности излучения, причем без изменения его спектра. В то время как во вращающейся колбе спектр излучения лампы по мере ее разгорания смещается в красную область. Спад интенсивности излучения, наблюдаемый в период разгорания «после» $t = 60$ с, можно объяснить небольшим увеличением КСВ, приведенным на рис. 4. Однако из-за смещения спектра в красную область, ближе к максимуму кривой видности, «результатирующая» освещенность уменьшается незначительно.

Колебательная структура спектра излучения серной плазмы, проявляющаяся в интервале длин волн 380–450 нм на всех стадиях разгорания лампы и на всех уровнях мощности, наблюдалась и другими авторами [6, 16, 17], что, по-видимому, является характерным для серной плазмы. В настоящей работе задача исследования природы этих колебаний и зависимости их частоты и амплитуды от скорости вращения колбы, уровня поглощенной плазмой мощности и частоты возбуждения СВЧ-разряда в парах серы не ставилась.

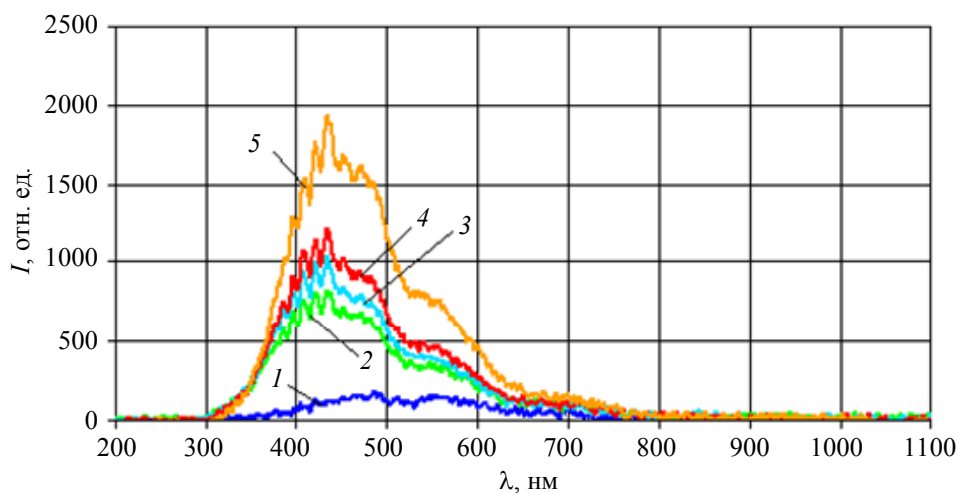


Рис. 9. Спектры излучения плазмы СВЧ-разряда серной лампы, измеренные на различных стадиях ее разгорания: кривая 1 – через 20 с; 2 – через 40 с; 3 – через 60 с; 4 – через 80 с; 5 – через 120 с. Скорость вращения колбы 0 об/с. Мощность магнетрона $P = 200$ Вт.

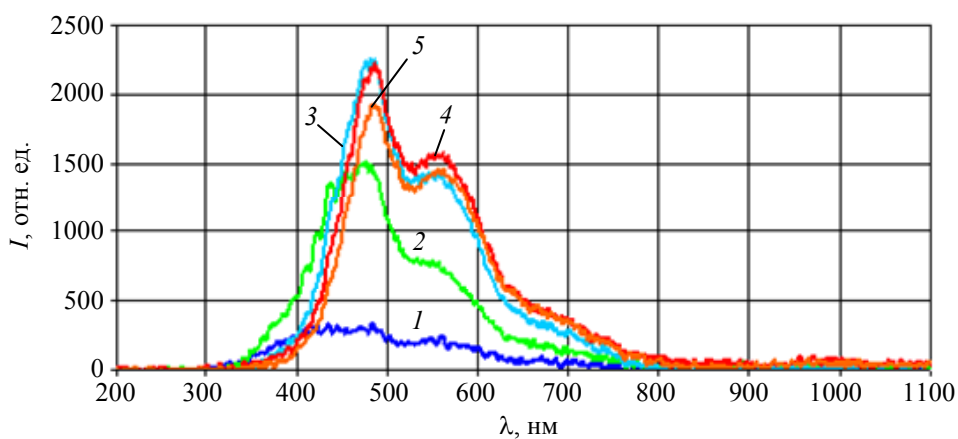


Рис. 10. Спектры излучения плазмы СВЧ-разряда серной лампы, измеренные на различных стадиях ее разгорания: кривая 1 – через 20 с; 2 – через 40 с; 3 – через 60 с; 4 – через 80 с; 5 – через 120 с. Скорость вращения колбы 7 об/с. Мощность магнетрона $P = 200$ Вт.

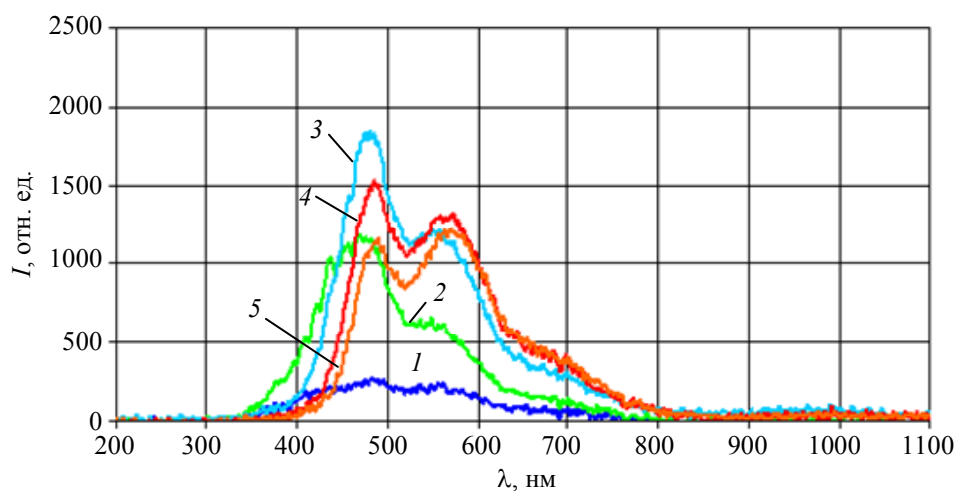


Рис. 11. Спектры излучения плазмы СВЧ-разряда серной лампы, измеренные на различных стадиях ее разгорания: кривая 1 – через 20 с; 2 – через 40 с; 3 – через 60 с; 4 – через 80 с; 5 – через 120 с. Скорость вращения колбы 20 об/с. Мощность магнетрона $P = 200$ Вт.

Заключение

Приведем основные результаты экспериментального исследования разгорания серной СВЧ-лампы высокого давления.

– Освещенность и световой поток серной плазмы генерируются плазмой лампы с временной задержкой t_3 , независящей от скорости вращения колбы, но уменьшающейся с ростом мощности магнетрона. Задержка определяется временем, в течение которого стенки колбы нагреваются аргонной плазмой до температур 200–250 °С, при которых процессы ионизации и возбуждения в плазме СВЧ-разряда определяются давлением паров серы.

– Зависимость освещенности E от времени разгорания лампы t имеет максимум E_{\max} , положение которого t_{\max} сдвигается в сторону меньших значений t с увеличением мощности магнетрона.

– Максимальная освещенность E_{\max} монотонно возрастает с увеличением мощности магнетрона, а ее зависимость от скорости вращения колбы ν имеет максимум при $\nu = 7\text{--}10$ об/с, а затем монотонно уменьшается.

– Время достижения установившегося режима работы лампы $t_{\text{уст}}$, определяемого достижением установившегося значения освещенности $E_{\text{уст}}$, уменьшается с увеличением мощности магнетрона и с увеличением вращения колбы ν от 0 до 7–8 об/с. Увеличение ν от 8 до 20 об/с незначительно повышает $t_{\text{уст}}$, а при больших скоростях вращения колбы ($\nu > 20$ об/с) она перестает влиять на время достижения установившегося режима $t_{\text{уст}}$.

– В зависимостях освещенности от времени разгорания t неврещающейся ($\nu = 0$) и вращающейся с малой скоростью ($\nu = 1\text{--}2$ об/с) лампы обнаружена область неустойчивости Δt_{inst} , где освещенность практически постоянна. С возрастанием мощности магнетрона область неустойчивости становится «уже» и сдвигается в сторону меньших значений t . По окончании периода неустойчивости освещенность начинает расти, а плазма СВЧ-разряда «перемещается» из верхней части колбы в ее центр.

– Излучение плазмы СВЧ-разряда, расположенной в верхней части колбы, где максимальная температура стенок, сдвинуто в синюю область спектра, в то время как излучение плазмы, расположенной в центре колбы с более низкой температурой стенки, сдвинуто в красную область спектра.

– Экспериментально показано, что, варьируя скорость вращения разрядной колбы, можно, не изменяя мощность магнетрона, перемещать плазму СВЧ-разряда из одной части колбы в другую и, таким образом, изменять спектр излучения серной плазмы высокого давления.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ubelis A., Silinsh J., Berzinsh U., Rachko Z. // *Zhrn. Prikl. Spectr.* 1981. Vol. 35. No. 2. P. 216.
2. Dolan J. T., Ury M. G., Wood C. H. / *Proc. 6th Int. Symp. Sci. Technol. Light Sources.* Budapest. 1992. P. 301.
3. Wagner M. // *Architecture: Technology collection.* 1995. Vol. 84. No. 1. P. 127.
4. Adams J. W. // *Electric Perspectives. Technology collection.* 1999. Vol. 24. No. 2. P. 70.
5. Диденко А. Н., Виноградов Е. А., Ляхов Г. А., Шупилов К. Ф. // *Докл. РАН.* 1995. Т. 334. № 2. С. 182.
6. Козлов А. Н., Ляхов Г. А., Павлов Ю. В., Резников А. Е., Умарходжаев Р. М., Шлифер Э. Д. // *Письма в ЖТФ.* 1999. Т. 25. № 13. С. 27.
7. Диденко А. Н., Зверев Б. В., Прокопенко А. В., Тагаченков Д. А. / *Научн. Сессия МИФИ-2001.* Москва. С. 58.
8. Britz S. J., Krizek D. T., Lee D. R., Harns W. G., Hungerford W. E., and Bailey W. A. // *HortScience.* 1993. Vol. 28. P. 538.
9. Both A. J., Albright L. D., Chou C. A., Langhans R. W. // *Acta Hort.* 1995. Vol. 440. P. 187.
10. Kozai T., Kotaya Y., and Oh Y. S. // *Acta Hort.* 1995. Vol. 399. P. 107.
11. Krizek D. T., Mirecki R. M., Bailey W. A. // *Biotronics.* 1998. Vol. 27. P. 81.
12. Диденко А. Н., Зверев Б. В. СВЧ-энергетика. – М.: Наука, 2000. .
13. Ирхин И. В., Сухачевский А. А., Попов О. А. // *Успехи прикладной физики.* 2016. Т. 4. № 5. С. 454.
14. Chilukuri S. and Lichten W. L. // *Rev. Sci. Instr.* 1979. Vol. 50. P. 256.
15. *Справочник химика.* – М.-Л.: Химия, 1982. Т. 1.
16. Mac Lennan D. A., Turner B. P., Dolan J. T., Ury M. G. / *Proc. Int'l. Lighting in Controlled Environments Workshop.* 1994. Madison. P. 243.
17. Johnston C. W., Jonkers J., van der Mullen J. A. M. // *J. Phys. D: Appl. Phys.* 2002. Vol. 35. P. 342.

High pressure sulfur microwave lamp run-up characteristics

I. V. Irkhin^{1,2}, A. A. Sukhachevsky¹, O. A. Popov¹, and R. A. Ilikeeva¹

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

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

Received March 27, 2017

Run-up characteristics of the high pressure sulfur plasma excited and maintained at a frequency of $f = 2450$ MHz and magnetron power of $P = 200\text{--}740$ W were studied. The microwave discharge was ignited in the mixture of sulfur vapor and argon (20 Torr) in the quartz spherical bulb of 35 mm in dia. inserted in the high transparency cylindrical metal resonator of 73 mm in dia. and 147 mm in height. The bulb was rotated around its vertical axis at the speed of $\nu = 0\text{--}24$ rpc. After the ignition, the sulfur lamp started to illuminate after «delay time», t_d , that did not depend on bulb rotation speed but decreased as magnetron power grew. It was found that the shape of the microwave discharge plasma and its location in the bulb changed during the lamp run-up by varying bulb rotation speed. The dependence of lamp illuminance, E , on run-up time, t , was found to have the maximum that shifted towards lower t as magnetron power and bulb rotation speed grew. The increase of bulb rotation speed from 0 to 7–8 rpc caused the growth of maximum illuminance, E_{max} , the decrease of the lamp stabilization time t_{st} , and shifted the lamp radiation spectrum to the red region. The increase of the bulb rotation speed from 8 to 24 rpc caused the decrease of E_{max} and the increase of the lamp stabilization time.

Keywords: sulfur lamp, microwave plasma, discharge run-up time, bulb rotation, optical radiation spectrum.

REFERENCES

1. A. Ubelis, J. Silinsh, U. Berzinsh, and Z. Rachko, *Zhrn. Prikl. Spectr.*, **35** (2), 216 (1981).
2. J. T. Dolan, M. G. Ury, and C. H. Wood, in *Proc. 6'th Int'l. Symp. Sci. Technol. Light Sources*. (Budapest, 1992). P. 301.
3. M. Wagner, *Architecture: Technology collection*. **84** (1), 127 (1995).
4. J. W. Adams, *Electric Perspectives. Technology collection*. **24** (2), 70 (1999).
5. A. N. Didenko, E. A. Vinogradov, G. A. Lyakhov, and K. F. Shipilov. *Dokl. RAN*. **334** (2), 182 (1995).
6. A. N. Kozlov, G. A. Lyakhov, Yu. V. Pavlov, A. E. Reznikov, R. M. Umarkhojaev, and E. D. Shlifer. *Tech. Phys. Letters*. **25** (13), 27 (1999).
7. A. N. Didenko, B. V. Zverev, A. V. Prokopenko, and D. A. Tagachenkov in *Proc. Sci. Sessions MEPh-2001* (Moscow, 2001) P. 58.
8. S. J. Britz, D. T. Krizek, D. R. Lee, W. G. Hams, W. E. Hunferford, and W. A. Bailey, *HortScience*. **28**, 538 (1993).
9. A. J. Both, L. D. Albright, C. A. Chou, and R. W. Langhans, *Acta Hort*. **440**, 187 (1995).
10. T. Kozai, Y. Kotaya, and Y. S. Oh. *Acta Hort*, **399**, 107 (1995).
11. D. T. Krizek, R. M. Mirecki, and W. A. Bailey, *Biotronics* **27**, 81 (1998).
12. A. N. Didenko and B. V. Zverev, *Microwave Power Engineering* (Nauka, Moscow, 2000) [in Russian].
13. I. V. Irkhin, A. A. Sukhachevsky, and O. A. Popov, *Usp. Prikl. Fiz.* **4** (5), 454 (2016).
14. S. Chilukuri and W. L. Lichten. *Rev. Sci. Instr.* **50**, 256 (1979).
15. *Chemistry handbook*. Ed. by B. P. Nikolsky (Khimiya, Moscow-Leningrad, 1982) [in Russian].
16. D. A. MacLennan, B. P. Turner, J. T. Dolan, and M. G. Ury, in *Proc. Int'l. Lighting in Controlled Environments Workshop* (Madison, 1994) P. 243.
17. C. W. Johnston, J. Jonkers, and J. A. M. van der Mullen, *J. Phys. D: Appl. Phys.* **35**, 342 (2002).