

БЕЗЭЛЕКТРОДНЫЕ ИСТОЧНИКИ ВИДИМОГО СВЕТА НА ОСНОВЕ СВЧ-РАЗРЯДА

А.Н. Диденко*, Б.В. Зверев**, А.В. Прокопенко**

* Отделение Физико-технических проблем энергетики РАН,
117334, Москва, Ленинский проспект, 32а. Didenko@ras.phys.msu.su

** Московский инженерно-физический институт (Государственный университет),
115409, Москва, Каширское шоссе, 31. prok@dinus.mephi.ru

В настоящее время научная общественность уделяет значительное внимание безэлектродным разрядам с парами молекулярных соединений, как перспективным источникам видимого света. Общепринято считать, что разработка высокоэффективных источников видимого света возможна только на основе использования атомных и молекулярных спектров излучения определенных элементов или их соединений. Возможным источником света может стать возбуждаемый СВЧ-излучением разряд в газовой смеси, основным компонентом которой служит испаряемая в процессе разряда сера [1, 2]. В СВЧ-поле помещается ампула, заполненная аргоном при давлении порядка 1 мм рт. ст. (что соответствует минимуму кривой Пашена) и порошком полиморфной серы. Аргон служит для инициирования СВЧ-разряда, и оторванные от него электроны возбуждают серу. Давление паров полиморфной серы в разряде может достигать нескольких атмосфер.

Молекулярное излучение серы носит комплексный характер [2]. При низких давлениях паров серы ~ 50 Па молекулярное излучение приходится на УФ диапазон. С ростом давления паров серы в СВЧ-разряде существенное влияние на излучение молекул начинают оказывать вторичные процессы, среди которых преобладает реабсорбция. Реабсорбция спектральных линий в разряде оказывает существенное влияние на форму линий излучения, выходящего из разряда, на распределение излучения в объеме разряда и на распределение выходящего излучения в пространстве и даже в ряде случаев на величину потока излучения. Реабсорбция особенно существенна для резонансных ультрафиолетовых линий, так как концентрация нормальных (невозбужденных) молекул, поглощающих это излучение, в разряде обычно на несколько порядков больше, чем концентрация возбужденных атомов. Ультрафиолетовое излучение, возникающее при переходах из верхних электронных состояний электронов в молекуле S_2 , возбуждает ниже лежащие колебательно-вращательные уровни в нижних электронных состояниях, которые в свою очередь излучают в видимой области спектра. Подобные явления реабсорбции резонансных линий хорошо изучены в ртутных лампах высокого давления. Таким образом, на основе молекулярной серы можно получить не только высоко эффективный источник света (КПД $\sim 20\%$), но и источник света со спектром состоящим из множества тесных линий огибающая которых весьма близка, как к солнечному спектру, так и к спектральной характеристике глаза. Спектр излучения таких ламп лежит преимущественно в видимой области с $T_{\text{цв}}$ от 4000 до 8000. Теоретический анализ плазменных процессов в СВЧ разряде свидетельствует о высокой энергетической эффективности таких источников [1]. Расчеты показывают, что на частоте 2450 МГц для поджига аргона необходима напряженность электрического поля порядка 1 кВ/см, а для горения разряда и возбуждения серы достаточно напряженность 150 В/см [1]. Такие напряженности при мощности питания в сотни ватт легко достигаются в объемных резонаторах.

Впервые высокоэффективный источник видимого света со спектральными характеристиками близкими к солнечным на базе СВЧ-разряда с парами серы был представлен фирмой Fussion Lighting (США) в 1992 году. Рабочая камера такой лампы была выполнена на основе цилиндрического резонатора с колебаниями H_{111} , а сферическая кварцевая колба располагалась в центре резонатора. Одним из важных

вопросов для серного источника света является поддержание приемлемого теплового режима оболочки колбы, который бы обеспечивал горение разряда без разрушения оболочки и необходимое давление паров серы внутри оболочки. Спектральные характеристики серного источника света существенно зависят от температуры оболочки. Приемлемый тепловой режим оболочки в источниках света фирмы "Fusion Lighting INC" обеспечивается принудительным конвективным охлаждением (вращением и обдувом) [2]. В качестве источника СВЧ питания применялся магнетрон используемый в СВЧ-печах. Первые промышленные образцы таких ламп SOLAR 1000™ уже использовались при современном внутреннем архитектурном освещении зданий в США и Скандинавских странах с применением световодов. Однако, практическая реализация такого СВЧ-источника света как показывает опыт Fusion Lighting связана с рядом проблем указанных ниже.

В России работы по созданию источников света в парах серы проводятся в Московском инженерно-физическом институте [3-6] и Всероссийском электротехническом институте [7]. При исследовании и практической реализации серных ламп возникают проблемы: обеспечения приемлемого теплового режима кварцевой оболочки колбы; вывода световой энергии из рабочей камеры при экологической безопасности по СВЧ-излучению; устойчивой работы питающего магнетрона на резонаторную нагрузку с переменным входным сопротивлением.

Для решения первой проблемы было предложено использование в качестве рабочих камер резонаторы с аксиально-симметричным электромагнитным полем [3]. Тепловой режим кварцевой колбы размещенной в цилиндрическом резонаторе с колебаниями H_{011} существенно облегчается в случае ее размещения соосно резонатору. Электрическое поле тангенциально поверхности колбы и это позволяет уменьшить потоки электронов на стенки, что дает возможность обеспечить приемлемый тепловой режим без вращения оболочки колбы и ее обдува, как это выполнено в SOLAR 1000™. Особенно хорошие результаты были получены в случае применения тороидальной кварцевой колбы.

При разработке серной лампы используются разные типы резонаторов способные обеспечить требуемые напряженности электрического поля при мощности СВЧ-питания ~ 500 Вт. Как уже отмечалось ранее, отдают предпочтение резонаторам с аксиально-симметричным электрическим полем [3]. Среди них можно выделить цилиндрический резонатор с колебаниями H_{011} , световывод из которого осуществляется множеством мелких отверстий в корпусе резонатора (рис. 1а). В этом резонаторе возможно использовать сферические и тороидальные колбы. Сферический резонатор с колебаниями типа H_{101} (рис. 1б) также обладает аксиальной симметрией поля и может использоваться совместно со сферической и тороидальной колбами [4]. Световывод из таких резонаторных камер осуществляется с помощью множества мелких отверстий в корпусе, за пределами для СВЧ-поля и занимающих не менее половины поверхности корпуса. Безопасный уровень СВЧ-излучения обеспечивается выбором параметров отверстий световывода и расстоянием от объекта до лампы. Распределение света от СВЧ-ламп проводится с применением специальных световодов и параболических отражателей.

Для рабочих камер серных ламп можно использовать также резонатор в виде параболоида вращения с колебаниями типа H_{011} , раскрыв зеркала параболоида перекрыт мелкой проводящей сеткой [5]. Сферическая колбочка с Ag-S смесью помещена в фокусе параболоида, а световой поток из него направленный прожекторным лучем и не требует фокусировки с помощью дополнительной системы отражателей (рис. 1в). Резонатор также обладает аксиально-симметричным электрическим полем E_φ .

Перспективным представляется диэлектрический резонатор (выполненный из полуволнового отрезка круглого диэлектрического волновода ограниченного металлическими кругами). Ненаправленный световывод возможно осуществить с боковой поверхности, в случае его изготовления из кварцевого стекла, (рис. 1г).

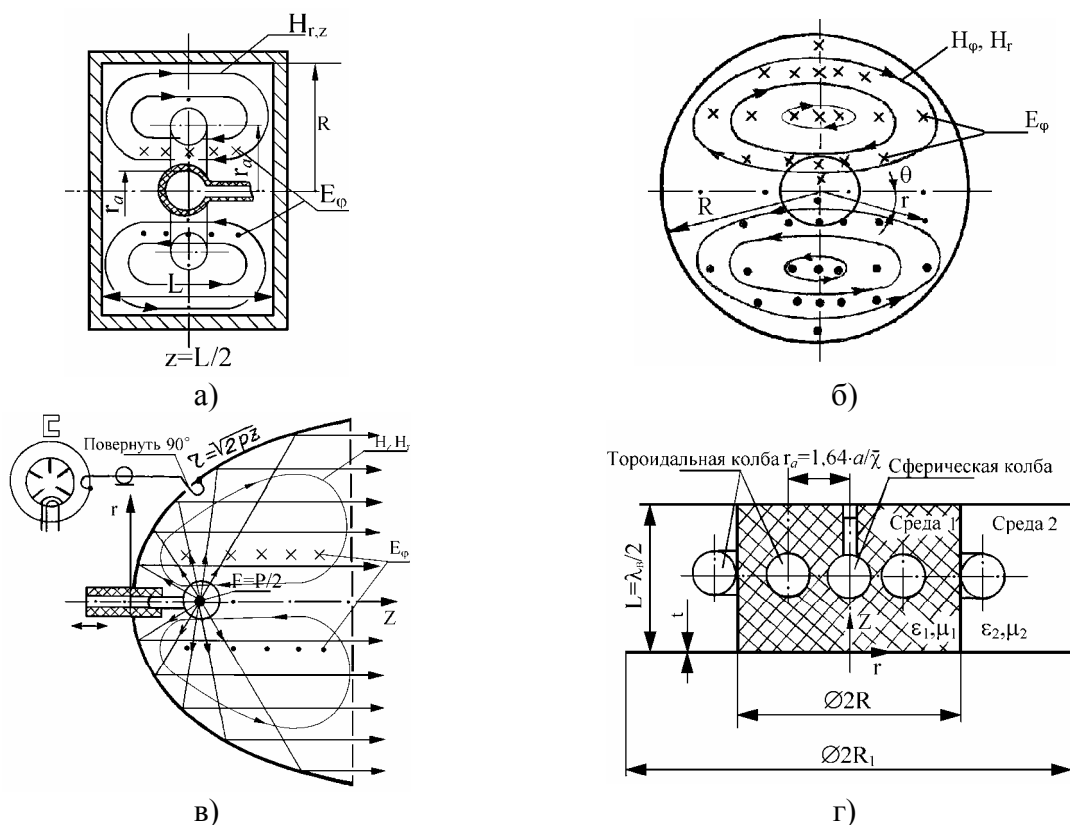


Рис. 1. Рабочие камеры серных СВЧ-ламп.

Использование резонаторных рабочих камер на основе светопрозрачных линиях передачи с волной ТЕМ-типа позволит существенно упростить и их конструктивное устройство, облегчить световывод и получить высокие напряженности электрического поля при мощности СВЧ-питания ~ 300 Вт. К оптически открытым рабочим камерам относятся резонатор на основе двухпроводной линии (рис. 2а) и резонатор на основе модифицированной полосковой линии с пластиной выгнутой по контуру параболоида (рис. 2б). Безопасность световывода по СВЧ-излучению обеспечивается выбором параметров ограничивающих пластин.

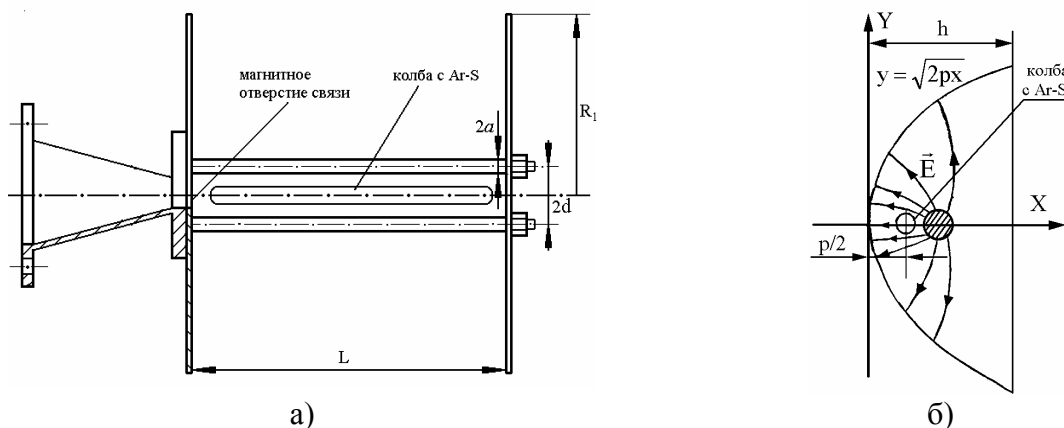


Рис. 2. Резонаторные рабочие камеры с колебаниями ТЕМ – типа.

При использовании резонаторной рабочей камеры возникает проблема обеспечения устойчивой работы питающего магнетрона на нагрузку с переменным входным сопротивлением, так как при поджиге и горении разряда изменяется собственная добротность камеры, ее резонансная частота и коэффициент связи с СВЧ-трактом. Для решения этой проблемы используется система стабилизации частоты питающего магнетрона самой резонаторной нагрузкой рис. 3. Высоковольтное питание магнетрона М105-1 обеспечивается однофазным источником с феррорезонансным стабилизатором и

двухполупериодным выпрямлением. Возможность стабильной и устойчивой работы СВЧ-лампы со схемой стабилизации частоты магнетрона М105-1 без ферритового вентиля с коэффициентом передачи мощности $\eta \geq 0,9\eta_0$ была доказана экспериментально для всех рабочих камер [7].

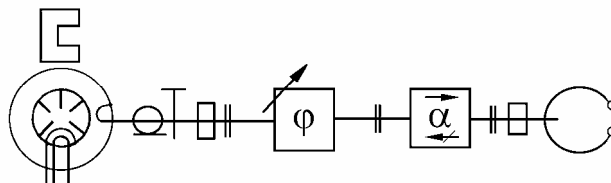


Рис. 3. Система стабилизации частоты магнетрона резонаторной нагрузкой.

Полученные результаты позволяют надеяться, что источники света на основе СВЧ-разряда получат широкое распространение для высококачественного освещения помещений.

Основные результаты и выводы:

1. На основе СВЧ-разряда в парах полиморфной серы возможно создать высокоэффективные источники видимого света с оптимальными энергетическими характеристиками.
2. Проведен анализ физических процессов в двухкомпонентной плазме и приводящих к процессу эффективного светоизлучения разряда. Выбраны давление Ag , частота и напряженность электрического СВЧ-поля, обеспечивающие гарантированный поджиг разряда.
3. Рассмотрена обширная номенклатура резонаторных рабочих камер серных источников света, пригодных для практического использования.
4. Разработана высокоэффективная система питания резонаторных рабочих камер от магнетронов применяемых в бытовых СВЧ-печах.
5. Накоплен значительный опыт по созданию СВЧ-плазменных систем, который может быть использован в новых плазмохимических установках.

Данная работа выполняется при поддержке РФФИ в рамках проекта № 00-02-16170.

ЛИТЕРАТУРА

1. Диденко А.Н., Зверев Б.В. СВЧ-энергетика. М.:Наука, 2000, 264 с.
2. Dolan J.T., Ury M.G., Wood C.Y. // VI Intern. symp. on science and technology of light sources. Budapest, 1992. P. 301.
3. Диденко А.Н., Зверев Б.В., Прокопенко А.В. // Научная сессия МИФИ-2000: Сб. науч. тр. М.:МИФИ, 2000. Т. 8. С. 56.
4. Диденко А.Н., Зверев Б.В. и др. // Известия РАН, серия Энергетика. 1997, № 6, С. 129.
5. Диденко А.Н., Зверев Б.В., Прокопенко А.В. // Журн. Инженерная физика. 1999. №2, С. 34.
6. Диденко А.Н., Зверев Б.В. и др. Известия РАН, серия Энергетика. 1998. № 1. С. 147.
7. Шлифер Э.Д. // Серия «Дом света». 1999. №2 (14). 24 с.