

ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ВЫСОКОЭФФЕКТИВНЫХ ИСТОЧНИКОВ СВЕТА: ОТ ТЕОРИИ К РЕАЛЬНЫМ ОСВЕТИТЕЛЬНЫМ СИСТЕМАМ

Т. И. ФРОЛОВА, Г. И. ЧУРЮМОВ

В данной работе показано, что для решения проблемы рационального использования энергетических ресурсов в области светотехники необходима замена устаревших источников света на более энергоэффективные. Проанализированы основные характеристики существующих источников света и осветительных устройств на их основе. Показана перспективность применения и дальнейшего усовершенствования осветительных устройств на основе безэлектродных серных ламп с СВЧ накачкой. Описаны теоретические основы физики работы серной лампы и представлены основные соотношения ее математической модели. Показаны основные области применения осветительных устройств на основе серных ламп и созданные коммерческие образцы.

Ключевые слова: микроволновые технологии, источник света, спектральная характеристика, безэлектродная серная лампа, осветительное устройство, энергетический баланс.

ВВЕДЕНИЕ

Проблема рационального использования энергетических ресурсов приобретает все большую актуальность для мирового сообщества, а ее решение становится стратегической задачей для энергозависимых стран и, в частности, для Украины. Анализ показывает [1], что за последние 5 лет объем потребления электроэнергии в Украине в целом увеличился почти на 3 % и в 2011-2012 гг. превысил 150 млрд кВт · год, а в 2013 г. сократился на 2,3 %, или 3,5 млрд кВт · год, и вернулся на уровень 2008 и 2010 гг. (рис. 1). Как видно, наметившаяся тенденция к сокращению потребления электроэнергии в Украине является позитивным моментом, но явно недостаточной с точки зрения оптимизации в целом уровня потребления.



Рис. 1. Объем потребления электроэнергии в Украине за период 2009-2013 гг

Согласно оценке Международного энергетического агентства (МЭА), пятая часть всей потребляемой электроэнергии в мире (это около 19%) расходуется на освещение. Так, например, по разным источникам в Украине на освещение уходит около 20-25 % электроэнергии, а в России эта цифра составляет от 13 до 16 %.

Целью данной работы является анализ перспективных источников света (ИС), включая сравнительную оценку их технических характе-

ристик, а также рассматриваются особенности развития теории и практического применения различных конструкций осветительных устройств (ОУ) на основе серной лампы с СВЧ накачкой.

1. ОСНОВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ ЭКОНОМИИ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ

Применение современных световых технологий позволит сэкономить до 40% потребляемой электроэнергии, что в мировом масштабе эквивалентно 106 млрд евро экономии в год.

Экономия электроэнергии заключается в создании и расширении промышленного производства нового оборудования и комплектующих для выпуска эффективных источников света и их области применения (до 14 %).

Основные направления для экономии электроэнергии связаны с такими мероприятиями, как:

- замена стандартных ламп на более энергоэффективные лампы (от 30 % для наружного и до 75 % для внутреннего освещения);
- модернизация осветительных систем (от 20 до 30%);
- применение систем общего локализованного освещения (до 6 %);
- регулирование светового потока в зависимости от уровня естественной освещенности (до 10 %).

На рис. 2 представлены результаты сравнительного анализа потребления электроэнергии в различных сферах деятельности в Украине, Западной Европе и Северной Америке [2]. Как видно, в промышленности этот показатель составляет примерно 30 % по всем странам. В освещении административных зданий показатель для Украины ниже примерно на 6 %, а в жилых зданиях он самый высокий и составляет 32 %, что на 7 % выше чем в Европе.

Опыт, накопленный некоторыми странами мира, показывает, что экономия электроэнергии

в осветительных системах с целью снижения капитальных затрат на каждый киловатт мощности с экономической точки зрения вполне оправдана, но для максимальной эффективности внедряемых энергосберегающих технологий требуется активное вмешательство государства.

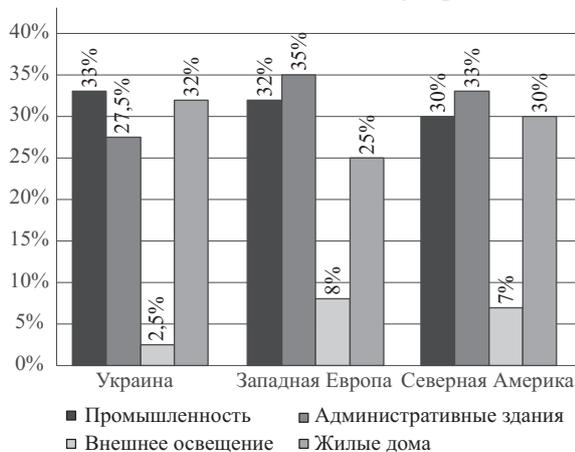


Рис. 2. Распределение систем освещения по разным отраслям

На сегодняшний день в 14 странах мира действуют государственные программы по энергосбережению в системах освещения, например, в Японии с 1998 года, в США с 2005 г., Европейская программа начала работу с 2000 г. Светодиодная тематика включена в 5-летние планы Китая с 2004 г., а в Корею аналогичная государственная программа была принята в 2003 году.

В Украине была разработана Экономическая стратегия развития в 2006 г. [3]. Ее обновленная версия была утверждена 24 июля 2013 г. распоряжением Кабинета Министров № 1071-р, которая вызвала много критики. В принятой Энергетической стратегии Украины до 2030 г. определено, что вместо обеспечения экстенсивного развития, которым экономика Украины двигалась в течение последних десятилетий, энергетика должна перейти на более эффективные и энергосберегающие технологии, чтобы обеспечить устойчивое развитие и подъем экономики. В этих условиях актуальным является поиск альтернативных энергосберегающих источников электроэнергии и их развитие.

В ноябре 2008 г. вышло Постановление правительства Украины о том, что, начиная с 2009 г.,

во всех государственных зданиях лампы накаливания должны быть заменены на более энергоэффективные ИС. Значительно более жесткие меры по обеспечению экономии электроэнергии приняты в США, где начиная с 2011 г. запрещается производство и применение ламп накаливания мощностью 100 Вт, с 2012 г. – 75 Вт и так далее до 2014 г, когда лампы накаливания должны быть полностью заменены на более экономичные. Так, в Австралии издано Постановление правительства о переходе на компактные люминесцентные лампы (КЛЛ) к 2012 г.

В табл. 1 показана оценка усредненных параметров осветительных установок в ведущих странах-членах МЭА [4]. Видно, что наиболее эффективный расход электроэнергии в ОУ имеет место в Японии и Дании, при этом наименьшие значения мощности и удельного годового потребления электроэнергии имеет Дания.

На рис. 3 показано сравнение затрат электроэнергии различными лампами для освещения [5]. Видно, что если принять за единицу потребление электроэнергии лампой накаливания, то их замена позволит в 2-3 раза экономить электроэнергию. В этом плане особо хочется выделить экономичность двух последних источников света: светодиода и безэлектродной серной лампы с СВЧ накачкой.

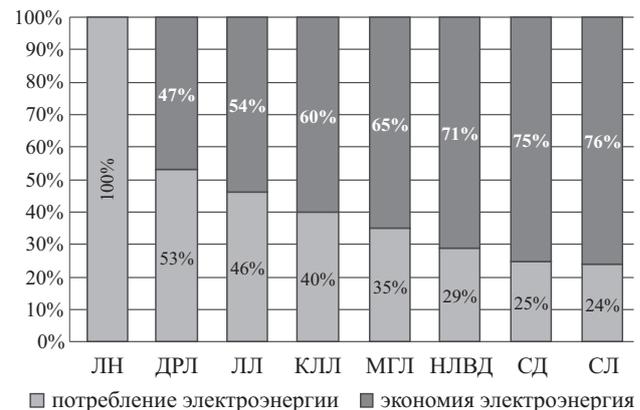


Рис. 3. Оценка эффективности источников света
ЛН – лампы накаливания; ДРЛ – ртутные лампы; ЛЛ – люминесцентные лампы; МГЛ – металлогалогенные лампы; НЛВД – натриевые лампы высокого давления; СД – светодиодные лампы; СЛ – безэлектродные серные лампы с СВЧ накачкой

Оценка усредненных параметров осветительных систем в странах-членах МЭА

Таблица 1

Страна	Годовое потребление электроэнергии, кВт·ч, в жилых домах	Количество ламп в доме, шт.	Средняя световая отдача, лм/Вт	Установленная мощность, Вт/м ²	Удельное годовое потребление электроэнергии, кВт·ч/м ²	Площадь жилого дома (помещения), м ²
Великобритания	720	20,1	25	14,7	8,6	84
Швеция	760	40,4	24	14,0	6,9	110
Германия	775	30,3	27	15,6	9,3	83
Дания	426	23,7	32	5,7	3,3	134
Греция	381	10,4	26	7,8	3,7	113
Италия	375	14,0	27	10,6	4,0	108
Франция	465	18,5	18	16,1	5,7	81
США	1 946	43	18	21,5	15,1	132
Япония	939	17,0	49	8,1	10,0	94

2. ТРЕБОВАНИЯ К ХАРАКТЕРИСТИКАМ ИС И ОУ

Процесс создания перспективных образцов ИС и ОУ представляет собой сложную и наукоемкую проблему. В этой связи выбор современных ИС, проектирование современных ОУ и комплексов на их основе, создание оптимальной световой среды и светового дизайна необходимо проводить с учетом соблюдения принципа энергосбережения. Поэтому проектирование осветительной системы предполагает учитывать не только характеристики ИС — необходимо учитывать и параметры ОУ в целом, включая срок службы, цветопередачу и ряд других параметров. Как видно из таблицы 2 [6], светоотдача ИС и ОУ отличаются примерно в 2 раза. При этом необходимо отметить, что некоторые ИС (например, натриевая лампа высокого давления (НЛВД) и металлогалогенная лампа (МГЛ)) содержат ртуть, что требует дополнительных затрат на их дальнейшую утилизацию.

На рис. 4 показаны спектральные характеристики различных ИС [7]. Сравнение спектральных характеристик ИС с солнечным спектром показывает, что оптимальным с точки зрения близости спектров является спектр безэлектродной серной лампы с СВЧ накачкой. В отличие от

спектров других ИС (например, МГЛ, имеющая квазинепрерывный спектр, НЛВД, ксеноновая лампа и белый светодиод, который имеет узкую полосу оптического излучения), спектр серной лампы является непрерывным в полосе частот, практически покрывающей видимую часть оптического диапазона.

На рис. 5 показано распределение энергии излучения в видимом, инфракрасном (ИК) и ультрафиолетовом (УФ) диапазонах (в процентном отношении) для разных видов ИС [8].

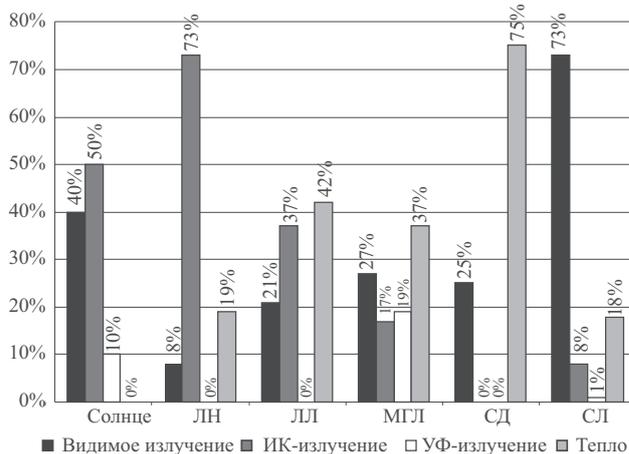


Рис. 5. Распределение энергии излучения в ИС

Таблица 2

Характеристики ИС и ОУ

Типы ИС	Светоотдача ИС, лм/Вт	Светоотдача ОУ, лм/Вт	Индекс цветопередачи, Ra	Срок службы ИС, тыс. ч	Содержание ртути, мг	Масса ОУ, кг
НЛВД	≤ 150	≤ 80	≈ 25	28	< 35	≈ 8
МГЛ	≤ 120	≤ 75	> 75	16	< 40	≈ 8
СД	≤ 150	≤ 75	> 75	50	0	≈ 15
ИЛ	≤ 80	≤ 50	> 75	60	< 1	≈ 10
СЛ	≤ 110	≤ 75	> 90	50	0	> 20
БМГЛ	≤ 115	≤ 75	72...94	50	< 1	> 15

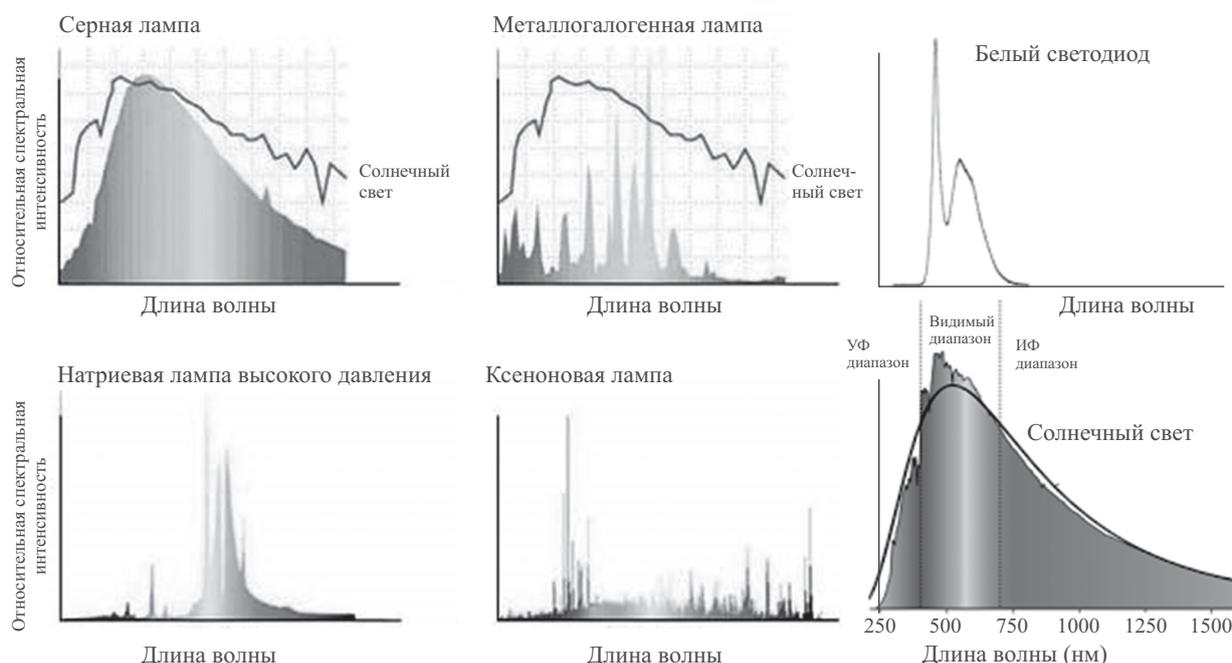


Рис. 4. Спектральные характеристики ИС

Анализ распределения энергии излучения между видимым участком спектра, ИК и УФ-излучениями и энергией, преобразуемой в тепло, показывает, что наилучшими показателями обладает безэлектродная серная лампа с СВЧ накачкой (73% излучения лампы приходится на долю видимого участка спектра излучения и лишь незначительная его часть приходится на ИК и УФ-излучения).

Если величину световой энергии от лампы накаливания принять за единицу, то можно видеть, что все остальные типы ламп многократно (в разы или даже на порядок) вырабатывают больше световой энергии.

Особое внимание следует обратить на светодиод, в котором отсутствуют ИК и УФ составляющие излучения, но данный ИС имеет очень существенный недостаток, связанный с тепловыми потерями (до 75 % энергии). Тем не менее необходимо отметить, что светодиодная энергетика достаточно быстро развивается и в ближайшем будущем объем рынка потребления светодиодной продукции на внутреннем рынке Украины может составить 1,5 млрд. грн. Рост рынка светодиодных ИС связан с их высокой надежностью (срок использования – до 10 лет), высоким качеством освещения и быстрой окупаемостью (2-3 года). Кроме того, потребление энергии светодиодной лампой сегодня меньше в 1,5-2 раза, чем люминесцентной, и в 10-12 раз – чем лампой накаливания. В то же время светодиодные ИС (лампы и модули) уступают по ряду параметров значительно более мощным ОУ, реализуемым на основе серных ламп с СВЧ накачкой, к основным преимуществам которых можно отнести:

- высокую светоотдачу (80 ... 100 Лм/Вт);
- сплошной квазисолнечный спектр оптического излучения (естественная цветопередача);
- малые габариты, высокую яркость и симметричность формы светящегося тела;
- длительный срок службы ламп (~ 45000-50000 часов);
- экологическую чистоту излучения и материалов горелки;
- возможность управления силой света путем изменения уровня мощности СВЧ накачки,

Данные преимущества серной лампы с СВЧ накачкой расширяют диапазон применения ОУ на ее основе и включают их применение:

- для уличного освещения;
- для освещения больших промышленных цехов, складов и т.п.;
- в сельском хозяйстве (освещение теплиц);
- в автомобильной промышленности (автофары);
- в качестве имитаторов солнечного излучения.

С другой стороны, имеющие место недостатки ИС на основе серной лампы с СВЧ накачкой связаны с:

- высокой температурой колбы (более 1000 °С);
- необходимостью вращения колбы для ее охлаждения;
- необходимостью стабилизации частоты генерации магнетрона;
- сложностью конструкции ОУ;
- высокой стоимостью ОУ в целом (более US \$ 2000).

Анализ недостатков показывает, что в основном они связаны со стабилизацией температурного режима работы лампы. Необходимо отметить, что управление температурным режимом усложняет конструкцию ОУ в целом и делает необходимым применение различных методов охлаждения колбы лампы – от ее обдува до вращения, чтобы исключить перегрев колбы и ее преждевременное разрушение. Поэтому для повышения эффективности применения ИС на основе серной лампы необходимо более детальное изучение физики газового разряда в низкотемпературной плазме, ограниченной стенками кварцевой колбы, а также исследование спектральных и цветовых характеристик оптического излучения при изменении параметров СВЧ поля и компонентного газового состава колбы.

3. ОСНОВЫ ТЕОРИИ И ПРАКТИКИ ПРИМЕНЕНИЯ БЕЗЭЛЕКТРОДНОЙ СЕРНОЙ ЛАМПЫ С СВЧ НАКАЧКОЙ

Первое сообщение о создании нового высокоэффективного ОУ на основе безэлектродной серной лампы с СВЧ накачкой было сделано американскими учеными корпорации «Фьюжен Систем» (FSC) в сентябре 1992 г. на VI Международном симпозиуме по науке и технологии источников света в Будапеште [9]. Изучению физических процессов, протекающих в серной лампе, а также исследованию различных режимов ее работы посвящено большое количество работ [см., напр., 10-15]. В последнее время особое внимание уделяется исследованиям температурного режима серных ламп, совершенствованию схем их включения и конструкции колб [16].

Схематично конструкция ОУ на основе серной лампы с СВЧ накачкой (а) и колба лампы (б) представлены на рис. 6.

В качестве рабочей среды в колбе серной лампы находятся инертный газ (аргон, неон и т.п.) и сера в твердой фазе. Под действием внешнего электромагнитного поля инертный газ ионизируется, появляются свободные заряженные частицы (электроны и ионы), соударения которых с внутренней поверхностью колбы приводят к преобразованию кинетической энергии частиц в тепловую энергию, что вызывает повышение температуры поверхности колбы. С другой стороны, рост температуры при фиксированном давлении внутри колбы приводит к изменению фазового состояния серы и обуславливает пере-

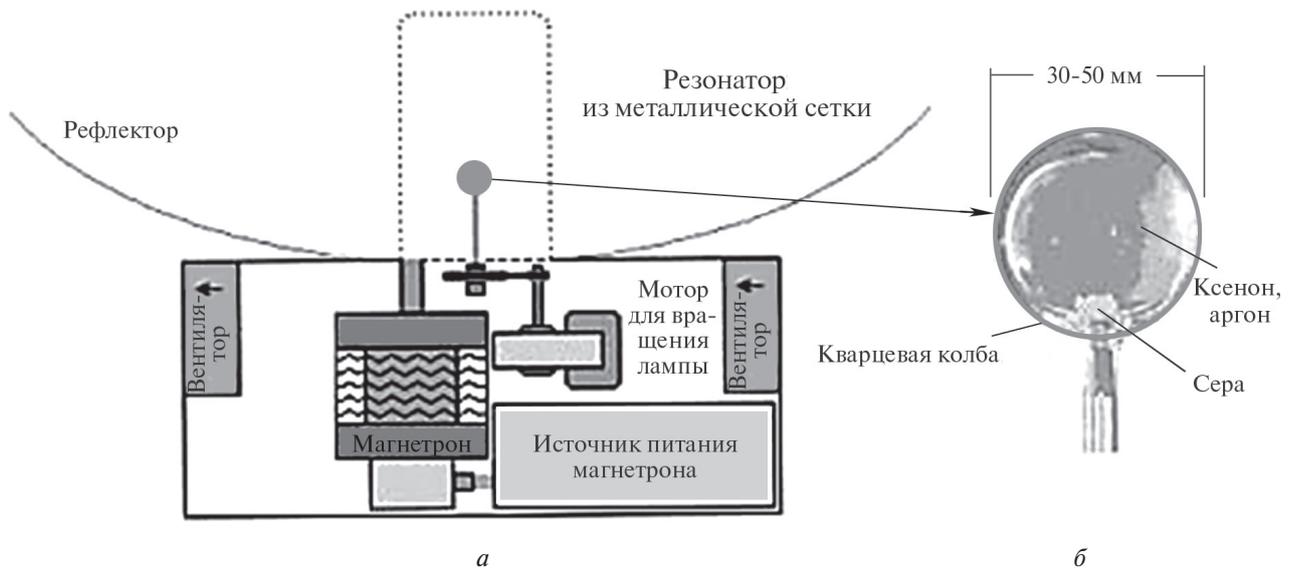


Рис. 6. Устройство безэлектродной серной лампы с СВЧ-накачкой

ход ее в парообразное состояние при $T > 446$ °С. Этот момент является началом включения основного режима работы серной лампы. При этом наблюдается дальнейший рост температуры колбы лампы.

Математическое моделирование физических процессов в серной лампе с возбуждением внешним СВЧ полем представляет собой сложный процесс, в котором можно выделить два последовательно связанных между собой этапа:

1. Установление электромагнитного поля в резонаторной системе с частичным заполнением с последующим возбуждением газового разряда в колбе лампы и образованием плазмы.

2. Фазовый переход серы, находящейся изначально в твердой фазе, в парообразное состояние с модифицированным строением молекулы, содержащей 6, 4 и 2 атомов в зависимости от температуры (вместо 8 атомов в обычном состоянии), и генерация оптического излучения в широкой полосе частот.

Методика моделирования первого этапа описывается в настоящей статье. При этом просматривается решение двух задач.

С одной стороны, это задача выбора рабочего вида колебания используемой резонаторной системы, определения частоты и распределения напряженностей электромагнитного поля данного вида. Данная задача решается при условии изменения электрофизических свойств пространства резонатора (диэлектрической $\epsilon = \epsilon(\vec{r}, t)$ и магнитной $\mu = \mu(\vec{r}, t)$ проницаемостей), т.е. с учетом частичного заполнения объема резонатора колбой серной лампы, которая, в свою очередь, заполнена ионизированным инертным газом с давлением в 100-400 Па. С другой стороны, рассматриваются физические процессы в плазме инертного газа, возбужденного внешним СВЧ полем. В этом случае задача рассматривается в приближении идеального газа, т.е. не рассматриваются столкновения частиц, а учитывается

лишь парное кулоновское взаимодействие между заряженными частицами.

На рис. 7 схематично представлен оптически прозрачный (сеточный) цилиндрический резонатор с находящейся внутри него колбой серной лампы (а), а также отдельно показано сечение колбы относительно прямоугольной системы координат для решения уравнений движения заряженных частиц (б). Как видно, колба находится в максимуме вихревой электрической компоненты электромагнитного поля резонатора для случая E_{011} вида колебания.

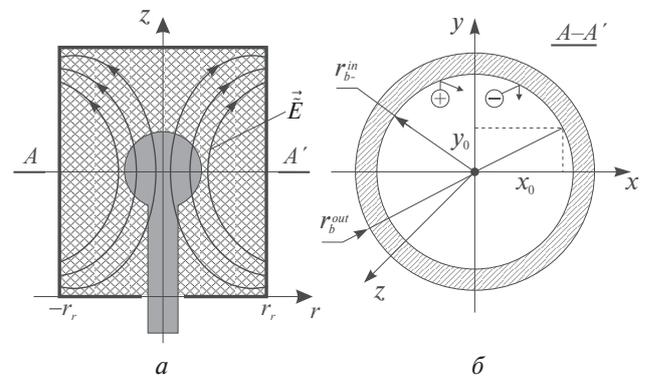


Рис. 7

Основу математической модели решения электродинамической задачи возбуждения инертного газа в колбе серной лампы внешним электромагнитным полем составляет система уравнений для электромагнитного поля, которая включает в себя неоднородные уравнения Максвелла

$$\nabla \times \vec{H} = \rho^+ \cdot \vec{v}^+ + \rho^- \cdot \vec{v}^- + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t}; \quad (1)$$

$$\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}; \quad (2)$$

$$\nabla \cdot \vec{D} = \rho^+ + \rho^-; \quad (3)$$

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0; \quad (4)$$

и материальные уравнения для неоднородной среды резонатора

$$\vec{D} = \varepsilon(\vec{r}, t) \cdot \vec{E}; \quad (5)$$

$$\vec{B} = \mu(\vec{r}, t) \cdot \vec{H}; \quad (6)$$

где \vec{E} и \vec{H} – напряженности электрического и магнитного полей; $\rho^+ = \rho^+(\vec{r}, t)$ и $\rho^- = \rho^-(\vec{r}, t)$ – объемная плотность положительно заряженных частиц (ионов) одного сорта и электронов; $\vec{v}^+ = \vec{v}^+(\vec{r}, t)$ и $\vec{v}^- = \vec{v}^-(\vec{r}, t)$ – скорости движения положительно (ионы) и отрицательно (электроны) заряженных частиц.

Для определения распределения скоростей \vec{v}^+ и \vec{v}^- , а также плотностей объемного заряда заряженных частиц ρ^+ и ρ^- в правых частях уравнений Максвелла (1) – (4), решается уравнение движения для каждой заряженной частицы

$$\frac{d\vec{r}}{dt} = \vec{v}; \quad (7)$$

$$\frac{d\vec{v}}{dt} = \eta \cdot (\vec{E} + \vec{E}), \quad (8)$$

где \vec{E} – напряженность вихревого электромагнитного поля, возбуждаемого в резонаторной системе; \vec{E} – напряженность поля кулоновских сил; $\vec{r} = x\vec{i} + y\vec{j} + z\vec{k}$ – радиус вектор частиц; $\vec{v} = v_x\vec{i} + v_y\vec{j} + v_z\vec{k}$ – вектор скорости частиц; η – отношение заряда частицы к ее массе (приведенный заряд частицы).

Решение уравнения движения (7) – (8) проводится численно с использованием метода крупных частиц.

Рассматривая парные взаимодействия частиц одного сорта (например, электрон – электрон или ион – ион) для определения сил кулоновского взаимодействия между i -ой и j -ой заряженными частицами \vec{F}_{ij} воспользуемся законом Кулона. Окончательно выражение для напряженности поля кулоновских сил частиц одного сорта, действующего на отдельную i -ую частицу, имеет вид

$$\vec{E} = \sum_{j=1}^N \frac{\vec{F}_{ij}}{q_i} = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0} \cdot \sum_{j=1}^N \frac{q_j}{|r_{ij}|^3} \vec{r}_{ij}, \quad (9)$$

где q_j – заряд j -ой частицы; $|r_{ij}|$ – расстояние между i -ой и j -ой частицами; $\varepsilon_0 \approx 8,85 \cdot 10^{-12}$ ф/м – диэлектрическая постоянная вакуума, $i=1,2,3, \dots, N_e$; $j=1,2,3, \dots, N_i$; N_e и N_i – полное количество электронов и ионов в объеме колбы лампы.

Для учета тепловых процессов и связанных с нагревом колбы серной лампы представленная выше самосогласованная система уравнений (1)–(6) и (7)–(8) дополняется уравнением теплопроводности, которое записывается в виде

$$c\rho \frac{\partial T}{\partial t} = c\rho K \cdot \Delta T + Q_V, \quad (10)$$

где c – удельная теплоемкость материала колбы (кварц); $\rho = \rho^+ + \rho^-$ – плотность плазмы; K – коэффициент теплопроводности материала колбы; Q_V – удельная мощность источников тепловыделения.

В качестве источников тепла в (10) рассматриваются заряженные частицы (ионы и электроны) внутри колбы серной лампы и обладающие кинетическими энергиями W_i и W_e , соответственно. Предполагается, что при ударе о внутреннюю поверхность колбы лампы их кинетические энергии переходят во внутреннюю энергию материала колбы, что вызывает повышение ее температуры. Таким образом, величина Q_V связана с разогревом плазмы внешним электромагнитным полем и определяется как суммарное количество теплоты, выделяемой на поверхности колбы серной лампы заряженными частицами за единицу времени, т.е.

$$Q_V = W_+ + W_- = \frac{1}{2} \cdot \left[\sum_{j=1}^{N_b^+} m_j \cdot |\vec{v}_j^+|^2 + \sum_{i=1}^{N_b^-} m_i \cdot |\vec{v}_i^-|^2 \right], \quad (11)$$

где N_b^+ и N_b^- – количество заряженных частиц (ионов и электронов), вылетевших на поверхность колбы за время Δt , т.е. при выполнении условия

$$r = \sqrt{x_0^2 + y_0^2 + z_0^2} \geq r_b^{in}, \quad (12)$$

где r_b^{in} – внутренний радиус колбы.

Самосогласованное численное решение уравнений для поля (1)–(6), среды (7)–(8) и теплопроводности (10) возможно при соответствующих граничных и начальных условиях. Граничные условия зависят от типа используемой резонаторной системы и формы колбы серной лампы. Для определения начальных условий исходим из предположения о равномерном пространственном распределении заряженных частиц в объеме колбы и случайном характере их начальных (тепловых) скоростей.

Полученное полное решение самосогласованной системы уравнений для электромагнитного поля и среды учитывает возможные изменения резонансной частоты резонаторной системы (единицы и десятки мегагерц) благодаря нестационарным процессам, которые обусловлены изменениями электрофизических параметров среды (плазмы) в колбе серной лампы.

Рассмотрение установившегося режима работы серной лампы возможно провести в приближении заданного поля и таким образом значительно упростить ее математическую модель. В этом случае для выбранной конструкции резонаторной системы решается волновое уравнение и определяются возможные виды колебаний, резонансные частоты которых близки к частоте генерации источника электромагнитных колебаний (магнетрона), т.е. $f = 2,45$ ГГц. Выбор рабочего вида колебания (например, H_{111} для цилиндрического резонатора) позволяет задать распределение вихревой компоненты электромагнитного

поля в правой части уравнений движения (7) – (8). Такой подход значительно упрощает задачу моделирования физических процессов в серной лампе, позволяя рассматривать движение заряженных частиц в заданном внешнем СВЧ поле постоянной амплитуды и мощностью, равной

$$P_{res} = k \cdot P_{magn}$$

где $P_{magn} \approx 800$ Вт – мощность, генерируемая источником колебаний (магнетроном); $k = 0,9 \dots 1$ – коэффициент, характеризующий потери энергии в тракте.

Для определения эффективности ОУ на основе серной лампы с СВЧ накачкой необходимо отметить, что данное ОУ состоит из источника питания, СВЧ генератора (магнетрон) и электродинамической системы, которая служит для транспортировки СВЧ энергии к лампе и формирования в зоне расположения колбы лампы необходимой стационарной или динамически изменяющейся топографии СВЧ поля, а также колбы с наполнителем и формирователя диаграммы направленности оптического излучения (отражателя). Поэтому эффективность преобразования энергии ОУ в целом зависит от эффективности работы составляющих его элементов и отдельных функциональных блоков.

В табл. 3 представлен сравнительный анализ энергетического баланса ОУ на основе серной лампы корпораций «Фьюжен Систем» и LG [17]. Как видно, мощность, потребляемая осветительной системой «от розетки» включает в себя потери различного рода. С одной стороны, это потери, связанные с работой магнетронного генератора и генерацией СВЧ излучения, что составляет приблизительно (30-40) %. Энергия электромагнитного СВЧ поля преобразуется в энергию оптического (видимого) излучения с эффективностью (25-30) %. Среди потерь энергии, сопровождающих такое преобразование, следует отметить потери, затрачиваемые на вращение и обдув колбы, наличие теплового ИК излучения, потери в экранирующих сетках, а также потери на генерацию лампой УФ излучения.

В настоящее время исследования по совершенствованию конструкции безэлектродной серной лампы и ОУ на ее основе продолжают интенсивно развиваться. При этом появились первые коммерческие варианты конструкций таких ламп. Так, например, в компании LG в серийном производстве появились два ОУ на основе серной лампы: потолочное ОУ PSH0731В мощностью 730 Вт со световой отдачей 80 лм/Вт и ОУ прожекторного типа PSF1032А мощностью 1050 Вт со световой отдачей 82 лм/Вт (рис. 8) [18].



Рис. 8. ОУ прожекторного типа на основе серной лампы (LG, Корея)

В Европе создана специальная исследовательская группа по изучению процессов СВЧ разряда в серных лампах – Plasma International Group. Основной задачей данной группы является разработка перспективных конструкций ОУ на основе серной лампы с максимальной световой отдачей. Разработанная данной группой конструкция лампы ОУ AS1300 приведена на рис. 9. Данная конструкция имеет светоотдачу до 120 лм/Вт и состоит из блока питания СВЧ генератора (магнетрона) и светоизлучающего узла [19].

Таблица 3

Баланс энергии ОУ на основе безэлектродных серных ламп с СВЧ накачкой

Характеристики	Лампа 1992-1993 гг.		Лампа LG 2012 г.	
	Мощность, Вт	%	Мощность, Вт	%
Потребляемая от сети мощность	6000	100	2000	100
Потери на охлаждение магнетрона и колбы	~500	8	100	5
Потери в трансформаторе	600	10	120	6
Потери в магнетроне	1500	25	600	30
Потери колбы за счет обдува и теплового излучения	1100	18	400	20
Потери в экранирующих сетках	400	7	60	3
УФ и ИК-излучение	400	7	120	6
Видимое излучение	1500	25	600	30
Световой поток, клм	410		145	
Светоотдача лампы, лм/Вт	68		86	
Доля видимого излучения в общем потоке излучения, %	79		73	



Рис. 9. ОУ на основе серной лампы (Plasma International Group)

ВЫВОДЫ

Таким образом, для решения проблемы рационального использования энергетических ресурсов в области светотехники необходимо создание и расширение промышленного производства нового оборудования и комплектующих для выпуска эффективных ИС. С одной стороны, это связано с модернизацией существующих ОУ и получением экономии электроэнергии от 20 до 30 %, а с другой – с заменой существующих осветительных ламп на более энергоэффективные, что позволит экономить от 30 % до 75 % энергии. Современные ОУ представляют собой достаточно сложные конструкции, и их дальнейшее усовершенствование требует дополнительного финансирования, в том числе и на государственном уровне.

Проведенный анализ ИС позволил определить основные направления их развития. Показано, что среди выделенных направлений особое внимание уделяется перспективным ОУ на основе безэлектродных серных ламп с СВЧ накачкой. В работе приведены основные проблемы, с которыми столкнулись разработчики при коммерческой реализации подобных конструкций ОУ. Показано, что для решения этих проблем необходимо проведение фундаментальных теоретических исследований, направленных на изучение сложных плазменных процессов. Сформулированы основы построения математических моделей физических процессов, протекающих в низкотемпературной плазме, возбуждаемой в колбе лампы внешним СВЧ полем. Особое внимание обращается на моделирование температурного режима работы лампы в зависимости от параметров газовой среды и уровня СВЧ поля.

Приводятся краткая характеристика ОУ на основе серной лампы с СВЧ накачкой и конструкции ОУ, разработанные ведущими производителями мира.

Литература

[1] Аналіз споживання електроенергії в Україні [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [www/URL: http://www.ukrenergo.energy.gov.ua/ukrenergo/control/uk/publish/category?cat_id=35379](http://www.ukrenergo.energy.gov.ua/ukrenergo/control/uk/publish/category?cat_id=35379) – Загл. с экрана.

[2] Пилипчук Р.В., Яремчук Р.Ю. Проблема энергоэкономии в осветительных установках // Светотехника. – 2003. – № 2. – С. 10-13.

[3] Энергетична стратегія України на період до 2030 р. СХВАЛЕНО розпорядженням Кабінету Міністрів України від 24.07.2013 № 1071. [Электронный ресурс] – Режим доступа: [www/URL: http://www.kmu.gov.ua/fuel/doccatalog/document?id=260994/](http://www.kmu.gov.ua/fuel/doccatalog/document?id=260994/) – Загл. с экрана.

[4] Айзенберг Ю.Б. Современные проблемы энергоэффективного освещения / Ю.Б. Айзенберг // Энергосбережение. – 2009, № 1. – С. 42-47.

[5] Сапрыка А.В. Повышение энергоэффективности осветительных комплексов с учетом качества электрической энергии. Монография. – Харьков: ХНАМГ, 2009. – С. 126.

[6] Зотин О. Технологии автоматизации в энергоресурсосберегающих сетях освещения /О. Зотов // Современные технологии автоматизации. – 2012, №4. – С. 6-17.

[7] Plasma International Lighting Systems [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.plasma-i.com> – Загл. с экрана.

[8] Почему необходимо отводить тепло [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.lighting.philips.com/ru_ru/lightcommunity/trends/led/anatomy/heat.wpd - Загл. с экрана.

[9] Dolan I.T., Ury M.G., Wood C.H. A Novel High Efficacy Microwave Powered Light Source. Presented as a Land-mark Paper on September 2, 1992 Sixth International Symposium on the Science and Technology of Light Sources Technical University of Budapest. – Budapest, 1992.

[10] Шлиффер Э.Д. Некоторые особенности и проблемы создания осветительных и облучательных устройств на базе безэлектродных газоразрядных ламп с СВЧ накачкой // Светотехника. – 1999, № 1. – С. 6-9.

[11] Прокопенко А.В. Разработка высокоэффективных источников видимого света на базе серных ламп: Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. – М., 2001. – 152 с.

[12] Диденко А.Н. СВЧ энергетика. Теория и практика. – М.: Наука, 2003. – 264 с.

[13] Гутцайт Э.М. Безэлектродные источники света, использующие электромагнитную энергию высоких и сверхвысоких частот // Радиотехника и электроника. – 2003. – Т. 7 48, № 1. С. 5–38.

[14] Мачехин Ю.П., Чурюмов Г.И., Одаренко Е.Н., Фролова Т.И., Старчевский Ю.Л., Экезли А.И. Безэлектродная лампа с СВЧ накачкой // Светотехника. – 2008. – № 3. – С. 9-14.

[15] Шукин А.Ю. СВЧ разряд в аргон-серной смеси в высокоэффективном источнике света с малой мощностью питания. Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. – М.: 2009. – 143 с.

[16] Чурюмов Г.И., Одаренко Е.Н., Фролова Т.И., Старчевский Ю.Л., Герасимов В.П., Иванцов В.П., Экезли А.И. Качественный анализ теплового режима работы безэлектродной серной лампы с СВЧ накачкой // Прикладная радиоэлектроника. – 2010. – № 2. – С. 232-239.

[17] Мальков М. Серная лампа. Многообещающее начало и ...непрогнозируемое будущее? Часть 3.

Технические характеристики ламп и системы светораспределения / М. Мальков // Современная светотехника. – 2011. – № 5. – С. 52-59.

[18] Flood Lighting - PSF Series [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.100cds.com/outdoorlight.html> - Загл. с экрана.

[19] Plasma International AS1300 - The Sun on Earth [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://plasma-i.com/plasma-i-products.htm> - Загл. с экрана.

Поступила в редколлегию 29.04.2014



Фролова Татьяна Ивановна, кандидат физ.-мат. наук, доцент, докторант кафедры ФОЭТ Харьковского национального университета радиозлектроники. Научные интересы: моделирование физических процессов плазмы; новые типы СВЧ приборов; газоразрядные СВЧ лампы.



Чурюмов Геннадий Иванович, доктор физико-математических наук, профессор, профессор кафедры физических основ электронной техники Харьковского национального университета радиозлектроники. Научные интересы: математическое моделирование нелинейных процессов; теория и техника СВЧ, применение микроволновых технологий.

УДК 621.321

Перспективы розвитку високоефективних джерел світла: від теорії до реальних освітлювальних систем / Т.І. Фролова, Г.І. Чурюмов // Прикладна радіоелектроніка: наук.-техн. журнал. – 2014. – Том 13. – № 2. – С. 135–143.

У даній роботі показано, що для вирішення проблеми раціонального використання енергетичних ресурсів у галузі світлотехніки необхідна заміна застарілих джерел світла на більш енергоефективні. Проаналізовано основні характеристики існуючих джерел світла та освітлювальних пристроїв на їх основі. Показано перспективність застосування та подальше вдосконалення освітлювальних пристроїв на основі безелектродних сірчаних ламп з НВЧ накачуванням. Описано теоретичні основи фізики роботи сірчаної лампи і представлені основні співвідношення її математичної моделі. Показані основні області застосування освітлювальних пристроїв на основі сірчаних ламп і створені комерційні зразки.

Ключові слова: мікрохвильові технології, джерело світла, спектральна характеристика, безелектродна сірчана лампа, освітлювальний пристрій, енергетичний баланс.

Табл.: 3. Іл.: 9. Бібліогр.: 19 найм.

UDC 621.321

Perspectives of developing highly efficient light sources: from theory to real lighting systems / T. I. Frolova, G. I. Churyumov // Applied Radio Electronics: Sci. Journ. – 2014. – Vol. 13. – № 2. – P. 135–143.

This paper shows that for solving a problem of rational utilization of energy resources in the field lighting technology it is necessary to bring outdated light sources up to modern standards. The basic characteristics of existing light sources and lighting devices on their base are analyzed. The promising applications and further improvement of the lighting devices based on an electrodeless sulfuric lamp using microwave pumping are shown. The theoretical fundamentals of physics of operating of a sulfuric lamp and basic equations of its mathematical model are described. The main areas of applications of the lighting devices based on sulfuric lamps and created commercial samples are presented.

Keywords: microwave technologies, light source, spectral characteristic, electrodeless sulfuric lamp, lighting device, energy balance.

Tab.: 3. Fig.: 9. Ref.: 19 items.