

Источники света на основе СВЧ-разряда малой мощности

А. Н. ДИДЕНКО, А. В. ПРОКОПЕНКО

НИЯУ «МИФИ», Москва
E-mail: pav14@mail.ru

Аннотация

В работе освещено развитие безэлектродных источников света на основе СВЧ-разряда с малой мощностью питания. Рассмотрены существующие источники света с СВЧ-мощностью менее 300 Вт. Выполнен анализ электродинамических характеристик рабочих камер таких источников света на основе диэлектрических резонаторов. Рассмотрена возможность использования цилиндрического диэлектрического резонатора с колебаниями E_{011} в качестве рабочей камеры источника света на основе СВЧ-разряда с малой мощностью питания.

Ключевые слова: источник света, световая отдача, разряд, сера, СВЧ, резонатор, штыревая система, диэлектрик, напряжённость электрического поля, добротность, мощность.

Создание новых источников света (ИС) всегда актуально. Каждое новое физическое явление, сопровождающееся видимым излучением, тщательно исследовалось на предмет разработки высокоэффективных ИС. В последнее десятилетие огромное внимание уделяется разработке ИС на светодиодах (СД). При этом утверждается, что таким образом можно создавать ИС со световой отдачей, всегда большей, чем у других ИС [1]. На наш взгляд, это — преувеличение, мешающее развитию других направлений светотехники. Реально на СД можно строить высокоэффективные ИС с большим сроком службы, но трудно — мощные ИС со световым потоком за 30000 лм. Кроме того, возникают сложности при создании мощных точечных ИС на СД с высоким качеством цветопередачи. Нам представляется, эти недостатки будут отсутствовать в ИС на основе СВЧ-разряда в парах серы. Такими ИС долгое время занимались в НИЯУ «МИФИ» и РАН [2]. К сожалению, при снижении СВЧ-мощности ниже 300 Вт

энергоэффективность таких ИС чрезмерно падает. В настоящей статье показано, как можно устранить этот недостаток.

Итак, в последние два десятилетия большой интерес вызывают ИС на основе СВЧ-разряда в разных средах. Первые эксперименты, проведённые фирмой *Fusion Lighting* (США), показали их высокую световую отдачу — выше 80 лм/Вт [3]. В ИС на основе безэлектродного СВЧ-разряда используется видимое излучение молекулярной серы. На базе серы созданы коммерческие ИС с СВЧ-мощностью питания от 0,4–1,2 кВт и рабочей частотой 2,45 ГГц. Однако их широкому распространению препятствовала трудность равномерного распределения большого светового потока (более 100000 лм). В разработку новых типов коммерческих ИС на основе СВЧ-разряда активно включилась фирма *LG Electronics* (Республика Корея), *Ceravision Lighting LTD* (Великобритания) и *Luxim Corporation* (США). С конца 2000-х гг. работы по созданию ИС на основе СВЧ-разряда проводятся и в России — в НИЯУ «МИФИ», ВЭИ им. В. И. Ленина и НИИИС им. А. Н. Лодыгина [3].

Принцип работы таких ИС состоит в создании СВЧ-разряда в кварцевой колбе, наполненной порошком полиморфной серы и буферным газом аргоном. При высоких значениях напряжённости электрического поля в аргоне возникает тлеющий разряд, который совместно с полем нагревает до испарения серу, молекулы которой активно начинают излучать в видимом диапазоне. (Широкий спектр излучения серного ИС — результат полиморфизма серы.) При этом давление аргона — порядка 1 мм рт. ст., что соответствует минимуму кривой Пашена для аргона на частотах 2–3 ГГц.

В настоящее время актуальна задача разработка ИС с малой мощностью СВЧ-питания с тем же световым потоком, что и у ИС с большей мощностью питания. Исследования показы-

вают, что для эффективного поджига и горения разряда в резонаторе необходимо возбуждать поле с напряжённостью электрической компоненты порядка 5 кВ/см [2]. Сохранять световой поток ИС с уменьшением СВЧ-мощности ниже 300 Вт (повышая световую отдачу ИС) можно, например, двумя следующими путями:

- С уменьшением мощности питания электрическая напряжённость порядка 5 В/см достижима лишь в резонаторах малого объёма [4]. (Выбор типа резонатора и вида колебаний в этом случае должны основываться на анализе электродинамических характеристик.) При этом повышать световую отдачу с уменьшением СВЧ-мощности можно, используя в качестве рабочего наполнения колбы ИС галогениды разных элементов.

- В работах [4, 5] предлагается для рабочих камер ИС использовать цилиндрические резонаторы с колебаниями E_{010} . Для повышения напряжённости электрического поля в месте размещения разрядной колбы в работе [5] применялась штыревая система, состоящая из двух одинаковых прямоугольных штырей, установленных широкими стенками параллельно друг другу и прикреплённых симметрично относительно центральной оси резонатора к его нижнему основанию (рис. 1). Введение штырей позволяет повышать напряжённость электрического поля и тем самым снижать мощность питания. Параметр напряжённости электрического поля $E/(P \times Q)^{1/2}$ для расчётного цилиндрического резонатора со штыревой системой составляет порядка 440 Ом^{1/2}/м, где E — напряжённость электрического поля, P — мощность СВЧ-питания, Q — собственная доб-

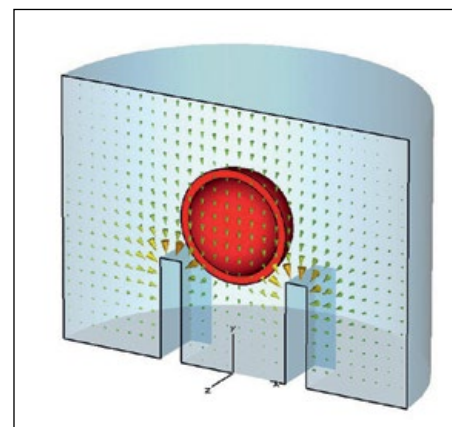
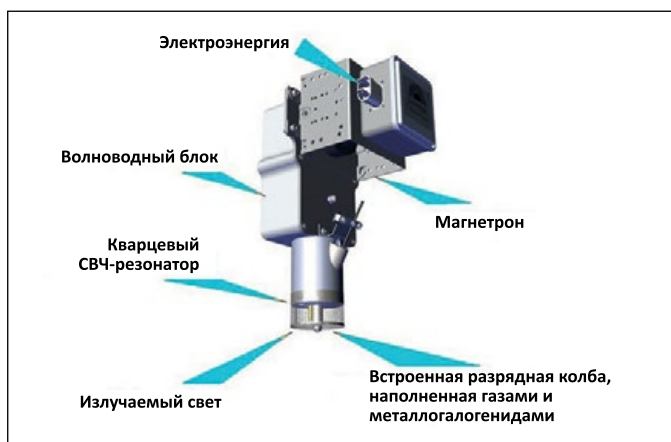


Рис. 1. Цилиндрический резонатор с системой прямоугольных штырей

Рис. 2. Источник света, выполненный по технологии «DayNow»



ротность резонатора. Таким образом, при мощности СВЧ-питания 220 Вт, подаваемой в резонатор, и добротности резонатора 1000 напряжённость электрического поля в нём составляет порядка 5 кВ/см.

Экспериментальное исследование данного варианта ИС показало, что при мощности СВЧ-питания 220 Вт световой поток составил 30000 лм, что соответствует световой отдаче до 80 лм/Вт при входной («от розетки») мощности питания порядка 400 Вт и коэффициенте преобразования электрической энергии в СВЧ-энергию 55%. В работе [5] с целью повышения эффективности рассмотрен вариант замены, в имеющемся резонаторе, двух прямоугольных штырей на один в виде кольца, расположенного симметрично на торцевой стенке резонатора. При этом электрическое поле сосредоточено между кольцевой вставкой и торцевой стенкой, направлено вдоль центральной оси резонатора и достигает максимума на краю кольцевой вставки. Параметр напряжённости электрического поля для данной системы составляет порядка $500 \text{ Ом}^{1/2}/\text{м}$, и световая отдача («от розетки») такого ИС повышается до 85 лм/Вт.

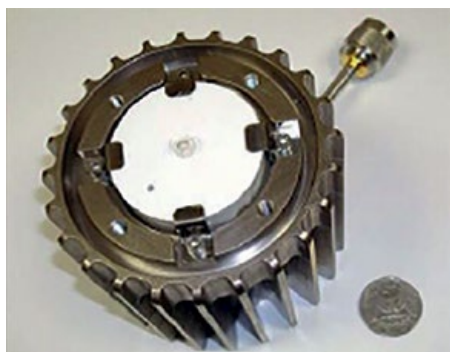


Рис. 3. Источник света «LIFI»

В работе [6] показано, что в качестве рабочих камер ИС на основе СВЧ-разряда можно использовать объёмные резонаторы с диэлектрическим заполнением. Применение их позволит уменьшить размеры ИС и повысить напряжённость электрического поля в месте размещения колбы. Диэлектрические резонаторы, используемые в ИС с СВЧ-мощностью питания менее 300 Вт, разрабатываются фирмами *Ceravision Lighting LTD* и *Luxim Corporation*.

Так, *Ceravision Lighting LTD* представила ИС под названием «*Ecolumination*», где вместо серы используются металлогалогениды, а колба имеет форму цилиндра и расположена по центру металлизированного диэлектрического керамического резонатора прямоугольной формы (вид колебаний H_{101}). В качестве источника СВЧ-энергии используется генератор на СВЧ-транзисторах (на арсениде галлия) мощностью до 300 Вт. Минимальная достигнутая мощность СВЧ-питания при сохранении высокого светового потока ИС – 50 Вт [2]. На сегодня этой фирмой представлен новый ИС по технологии «*DayNow*», выполненный на основе кварцевого резонатора с ин-

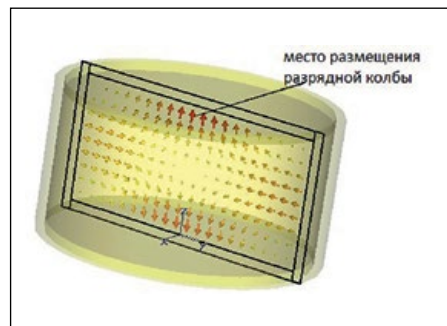


Рис. 4. Цилиндрический резонатор с колебанием вида E_{011}^0

тегрированной в нём разрядной колбой [7] (рис. 2). ИС работает от магнетрона на частоте 2,45 ГГц и имеет мощность 400 Вт. В качестве рабочего вещества используются металлогалогениды, и при этом возможно динамичное изменение светового потока.

А в рабочем наполнении колбы ИС малой мощности фирмы *Luxim Corporation* используются йодиды и бромиды натрия, индия, таллия, скандия, лития и редкоземельные металлы тулий и диспрозий [2, 8]. Рабочей камерой в этом ИС служит металлизированный тороидальный диэлектрический резонатор. Разработанная лампа под маркой «*LIFI*» состоит из колбы, твердотельного усилителя мощности, резонатора и устройства ввода мощности. Разрядная колба расположена в ёмкостном зазоре тороидального резонатора. Последний может иметь прямоугольную или цилиндрическую форму, и его корпус заключён в алюминиевый радиатор охлаждения (рис. 3). СВЧ-мощность питания опытных образцов варьируется от 180 до 400 Вт при общем индексе цветопередачи выше 80. В качестве СВЧ-генератора используется твердотельный усилитель, введённый в режим автогенерации благодаря наличию обратной связи. Помимо освещения, такие ИС разрабатываются и для эндоскопии, микроскопии и проекционных устройств.

В работе [6] приведён расчёт цилиндрического резонатора с диэлектрическим заполнением и видом колебаний E_{010} . В качестве материала рассматривались фторопластовое ($\epsilon=2,2$ и $tg\delta=2 \times 10^{-4}$) и керамическое ($\epsilon=8,5$ и $tg\delta=10^{-4}$) заполнения. Расчёты показывают преимущество использования керамического заполнения за счёт большого значения диэлектрической проницаемости. При частоте 2,45 ГГц керамический резонатор имеет диаметр 48,2 мм и осевое отверстие для колбы диаметром 9 мм. При высоте цилиндра 24 мм значение параметра напряжённости электрического поля достигает $560 \text{ Ом}^{1/2}/\text{м}$, что выше, чем у резонаторов со штырями. Таким образом, мощность питания ИС может быть снижена. Полученные результаты требуют дальнейших экспериментальных измерений, но уже сейчас можно говорить о наличии путей дальнейшего снижения мощности СВЧ-питания ИС. Например, с использованием ди-

электрических резонаторов со штыревой структурой.

Одна из проблем использования диэлектрических резонаторов – необходимость обеспечения эффективного вывода света из резонатора, который может обладать разной степенью прозрачности. Материал этих резонаторов, помимо малых диэлектрических потерь, должен обладать и значительной термостойкостью – до 800 °С. Из-за отсутствия светопрозрачного материала с такими свойствами для изготовления диэлектрических резонаторов применяются керамики с поверхностной металлизацией. В существующих ИС разрядные колбы располагаются на поверхности резонатора. Следовательно, необходим выбор вида колебаний с максимумом электрической составляющей поля вблизи поверхности резонатора.

Наиболее подходящим видом колебаний для этих целей является диэлектрический резонатор цилиндрической формы с колебаниями вида E_{011} [9]. В данном резонаторе – два максимума напряжённости электрического поля, расположенные на оси вблизи торцевых стенок (рис. 4). В одном из максимумов предполагается размещать цилиндрическую разрядную колбу, а в другом может коаксиально размещаться штыревой ввод мощности СВЧ-питания.

С использованием пакета прикладных программ «CST Studio Suite 2014» проведён расчёт энергетических характеристик диэлектрического цилиндрического E_{011}^0 -резонатора с фторопластовым ($\epsilon=2,2$), кварцевым ($\epsilon=4,2$) и керамическим ($\epsilon=8,0$ и $10,0$) заполнениями. На рис. 5 представлены зависимости геометрических размеров резонатора при частоте 2,45 ГГц. Расчётные резонаторы имеют разную зависимость высоты от радиуса и строго ограниченные интервалы значений этих параметров. Для резонатора из алюмооксидной керамики ($\epsilon=8$, $tg\delta=10^{-4}$) максимальный параметр напряжённости электрического поля на оси у торцевой стенки – 270 Ом^{1/2}/м.

Изготовленная модель фторопластового диэлектрического резонатора с колебаниями вида E_{011}^0 показала совпадение расчётных и измеренных значений резонансной частоты и собственной добротности, равной 2300. Таким образом, необходимая напряжённость электрического поля для

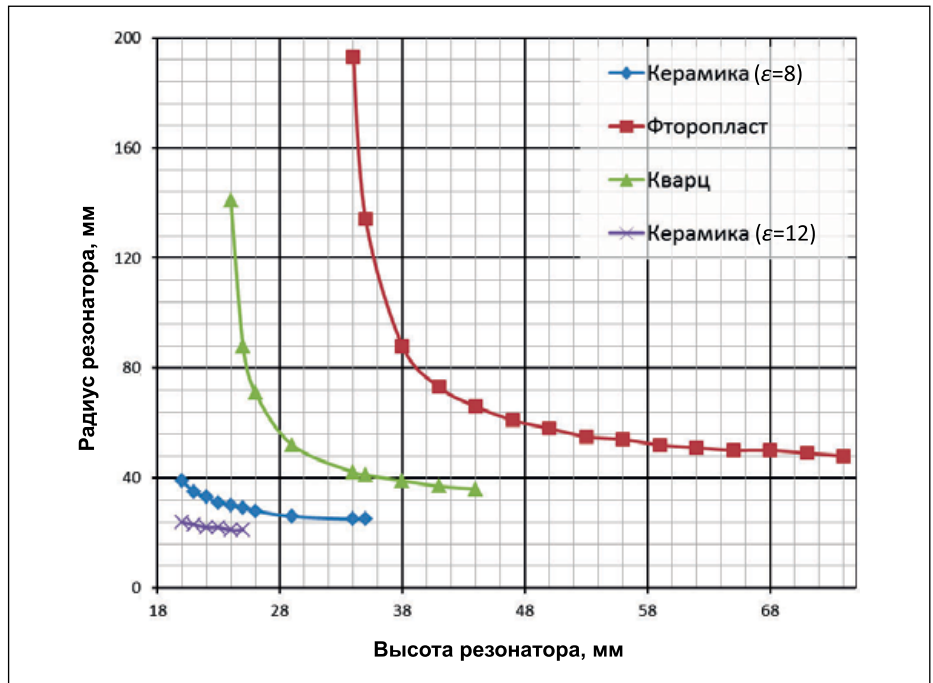


Рис. 5. Размеры диэлектрического цилиндрического резонатора

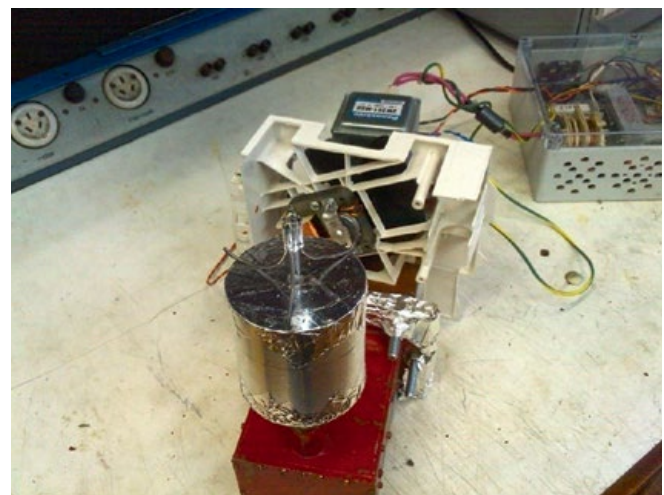


Рис. 6. Экспериментальный образец источника света с малой СВЧ-мощностью питания

поджига и эффективного горения разряда в серной лампе может гарантироваться уже при мощности СВЧ-питания в 150 Вт.

Выполнены также экспериментальные исследования по работе резонаторной рабочей камеры при малом уровне мощности. В качестве источника СВЧ-питания использовался магнетронный генератор с инверторным выпрямителем, который позволял снижать СВЧ-мощность до 150 Вт (рис. 6). В этой рабочей камере уверенно поджигался и разгорался разряд в цилиндрической колбе, однако низкая температурная стойкость фторопласта не позволяла поддерживать горение разряда больше минуты, что недостаточно для исследования световых характеристик ИС.

При дальнейших работах по созданию опытно-промышленного образца ИС такого рода планируется изготовление резонаторной рабочей камеры из керамики.

Таким образом, для создания эффективных безэлектродных ИС с малой мощностью питания на основе СВЧ-разряда в парах серы могут использоваться штыревые и диэлектрические резонаторы.

Работа выполнена при поддержке Программы повышения конкурентоспособности НИЯУ «МИФИ».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Закгейм А.Л. Светодиодные системы освещения: энергоэффективность, зрительное восприятие, безопасность

для здоровья // Светотехника. – 2012. – № 6. – С. 12–21.

2. Диденко А. Н., Зверев Б. В., Прокопенко А. В. Высокоэффективные источники света на основе использования СВЧ-разряда в аргон-серных смесях / Энциклопедическая серия «Энциклопедия низкотемпературной плазмы». Сер. Б. Под ред. Ю. А. Лебедева, Н. А. Платэ, В. Е. Фортова. – Т. XI-5. – М: Янус-К, 2006. – С. 345–363.

3. Александрова О. Ю., Бондаренко С. М., Гутцайт Э. М., Жидков Р. А. Современное состояние, перспективы развития и применения осветительных устройств на основе СВЧ разряда // Светотехника. – 2013. – № 2. – С. 37–40.

4. Щукин А. Ю., Денисов К. В. Выбор резонатора для эффективной СВЧ-лампы малой мощности // Известия РАН. Энергетика. – 2008. – № 2. – С. 9–16.

5. Didenko A. N., Prokopenko A. V., Shchukin A. Yu. High-efficiency sulfuric lamp of low power // Light & Engineering. – 2010. – Vol. 18, No. 2. – P. 21–24.

6. Didenko A. N., Shchukin A. Yu. Microwave sources of solar light // Journal of communications technology and electronics. – 2010. – Vol. 55, No. 4. – P. 359–374.

7. URL: <http://www.ceravision.com/day-now-technology/>.

8. URL: <http://www.luxim.com/>.

9. Didenko A. N., Prokopenko A. V., Smirnov K. D. Microwave resonator chambers for light source of low power // Proceedings of 2014 International Conference on Actual Problems of Electron Devices Engineering; Yuri Gagarin State Technical University of Saratov/ 25–26.09.2014, Saratov, Russia. – Vol. 1. – P. 249–253.



Диденко Андрей Николаевич,

доктор физ.-мат. наук, профессор. Заведующий кафедрой «Электрофизические установки» НИЯУ «МИФИ». Член-корреспондент РАН



Прокопенко Александр Валерьевич, кандидат техн. наук,

доцент. Окончил в 1998 г. МИФИ. Доцент кафедры «Электрофизические установки» НИЯУ «МИФИ»

Защита диссертации

23 июня 2016 г. в Московском энергетическом институте (ФГБОУ ВО «НИУ»МЭИ») защитил диссертацию на соискание учёной степени кандидата технических наук по специальности 05.09.07 – «Светотехника» – Гурин Сергей Юрьевич. Работа выполнена в Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет». Тема диссертации – «Принципы повышения энергоэффективности полупроводниковых световых приборов». Научный руководитель – доктор технических наук, доцент, профессор кафедры лазерной и световой техники ФГАОУ ВО «НИ ТПУ» Гриценко Борис Петрович. Официальные оппоненты – Овчаров Александр Тимофеевич, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Архитектурное проектирование» Томского государственного архитектурно-строительного университета, г. Томск (ФГБОУ ВПО «ТГАСУ»); Смирнов Серафим Всеволодович – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры физической электроники Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники, г. Томск (ФГБОУ ВО «ТУСУР»). Ведущая организация – Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарёва», г. Саранск.

Диссертационная работа посвящена исследованиям светодиодов и световых приборов на их основе и решению конструкторских и технологических проблем разработки светодиодных светильников высокой эффективности и надёжности на основе оптимизации их теплового режима. В работе применена методика измерений характеристик светодиодов при импульсном токе, позволившая разделить и исследовать влияние температуры и силы

тока на характеристики светодиодов и выбрать оптимальный режим работы светодиодов в светильнике. Экспериментальные исследования по этой методике позволили установить для светодиодов фирмы Cree граничные значения рабочих температур $p-n$ -переходов (не более 100 °С) и диапазон оптимальных значений силы тока (от 350 до 700 мА). Оптимизированные значения параметров заложены в основу конструирования светильника высокой эффективности со световой отдачей 115 лм/Вт.

Научную новизну работы составляют её следующие результаты:

- Эмпирическая методика расчёта теплового режима светодиода ($p-n$ -перехода) в корпусе светильника, основанная на определении температурных полей светового прибора, позволяющая строить эффективную систему теплоотвода и оптимизировать тепловой режим работы светового прибора.

- Оптико-электронный комплекс для экспериментальных исследований работоспособности светодиодов в широком диапазоне режимов эксплуатации и в реальных условиях работы в световом приборе.

- Светильник модульного типа для наружного освещения, реализующий теоретические и практические рекомендации исследований и обладающий технико-экономическими характеристиками, превосходящими современный уровень светодиодных светильников аналогичной категории.

В результате исследований разработаны и апробированы базовые критерии оптимизации конструкции светильника, которые составили методологические принципы научного и инженерного подхода к конструированию светильника высокой энергетической эффективности. Типоряд светодиодных светильников под маркой «Sunrays», реализующих идеологию диссертационной работы, освоен в производстве.