

## Вакуумная, плазменная и квантовая электроника

УДК 621.327.9

**А.И. Кузьмичёв**, канд. техн. наук, **В.В. Перевертайло**, **А.В. Мумладзе**

Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт»,  
пр. Победы, 37, г. Киев, 03056, Украина.

### СВЧ газоразрядный светильник на парах серы

*Проведены систематизация и анализ данных о газоразрядных СВЧ светильниках и сравнение существующих типов осветительных устройств с газоразрядными СВЧ светильниками. Доказана целесообразность применения этих светильников в определённых условиях, указаны их преимущества и перспективы исследований. Обоснован выбор плазмообразующей светящейся среды – паров серы и разработано предложение по выбору элементной базы для построения СВЧ плазменного газоразрядного светильника. Определены направления дальнейших исследований и разработок в данном направлении. Библ. 10, рис. 3, табл. 2.*

**Ключевые слова:** газоразрядные светильники; освещение; светоотдача; световой поток; СВЧ разряд; плазменные СВЧ светильники; непрерывный спектр излучения; температура цвета; серная лампа; магнетрон; безэлектродный СВЧ разряд.

#### Введение

В наше время постоянно совершенствуются системы освещения [1]. Вначале человечество использовало лампы накаливания. Затем была создана газоразрядная лампа, принцип работы которой основан на светящемся электрическом разряде в газах и парах металлов. Одной из разновидностей газоразрядных ламп является металлогалогенная лампа (МГЛ), в горелку которой добавляются галогениды некоторых металлов для того, чтобы получить излучение видимого спектра. Но свет, излучаемый МГЛ, является «неестественным». Предметы, освещённые такими лампами, теряют свой естественный (т.е. как под солнечными лучами) цвет. Соответственно, цветовые искажения весьма сильны.

Всё более широкое применение получают светодиоды как базовые элементы электрических светильников благодаря их отличным характеристикам: высокой светоотдаче, большому

сроку службы (около 50 000 часов), простоте конструкции светильников на их основе и малому энергопотреблению.

Но есть ещё одно весьма интересное направление – газоразрядные светильники (ГРС) с использованием паров серы в качестве плазмообразующего вещества [1-5]. Этот подход позволяет создавать осветительные приборы с высокой светоотдачей и естественным спектром излучения. Такие светильники не требуют специальных мероприятий по утилизации, как, например, лампы дневного света, содержащие ртуть.

На рис. 1 приведены спектральные характеристики излучения ламп, широко применяемых в наше время, в сравнении с ГРС [2]. Видно, что только серная лампа близка по спектру излучения к солнечному. Остальные лампы такие, как натриевая и ксеноновая, также сильно искажают качество воспринимаемого изображения. И приходится применять люминофор для коррекции спектра излучения. От него зависит срок службы ламп, в течение которого они обеспечивают спектр излучения, заявленный в паспорте. Металлогалогенная лампа имеет линейчатый спектр, что влияет на утомляемость глаза при длительной работе при такой лампе.

Светодиодные светильники также дают неестественный свет и обычно требуют применения люминофора [1].

Следует отметить, что информация о светильниках на основе серных ламп не достаточно представлена в литературе и не систематизирована, она опубликована в виде немногочисленных статей в малодоступных источниках [2-6, 8]. Целью данной работы является систематизация и сравнительный анализ информации о СВЧ ГРС, обоснование выбора плазмообразующей светящейся плазменной среды, а также определение направлений дальнейших исследований и разработок, в том числе предложений по выбору элементной базы для систем электрического питания ГРС.

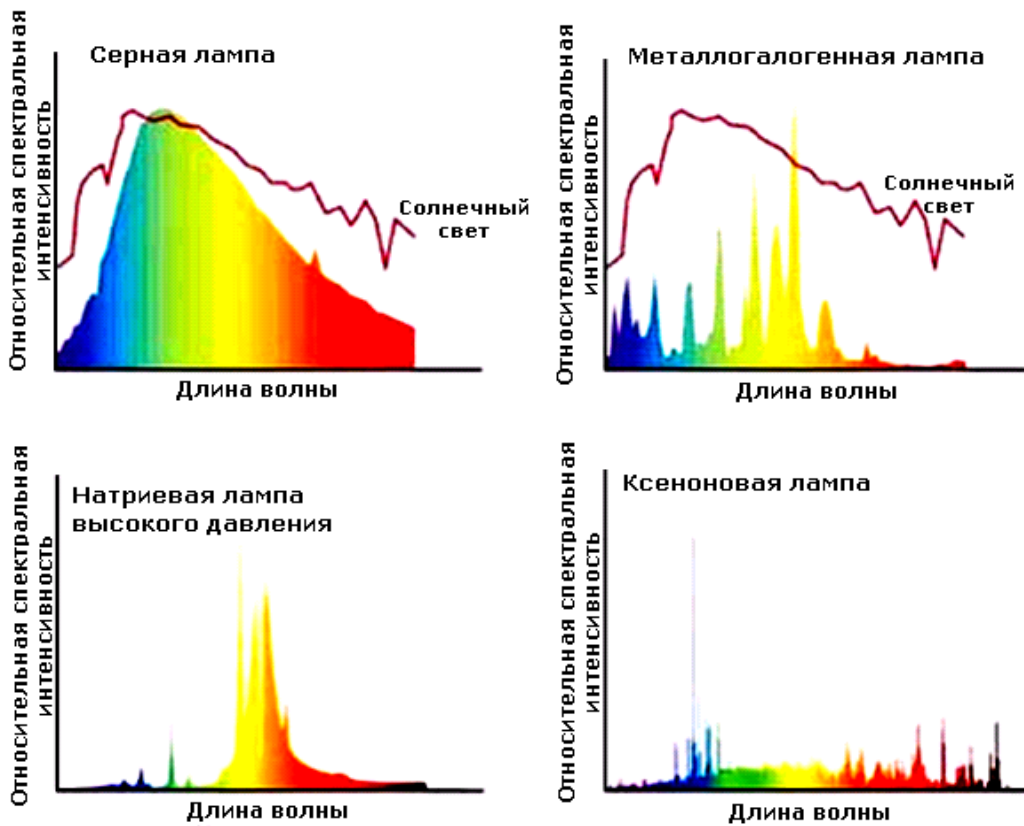


Рис. 1. Изображение примеров спектров излучения некоторых ламп [2]

### Принцип работы и особенности конструкции СВЧ газоразрядных светильников

Важным преимуществом ГРС является то, что спектр их излучения – непрерывный и близок к солнечному (рис. 1) [6]. Объяснить сказанное можно следующим [2]: "Линии в спектре газоразрядного (плазменного) источника света связаны с резонансом в атомах или молекулах вещества, излучающего свет. Высокое качество спектра, которое дает сера, обусловлено таким явлением как полиморфизм. Сера может образовывать молекулы в виде цепочек произвольной длины, каждая из которых имеет собственную резонансную частоту. Большое количество молекул разных размеров в сумме дает непрерывный спектр".

Таким образом, для получения плазмы, которая даёт непрерывный спектр излучения во всем видимом диапазоне, целесообразно применять пары серы [1-5]. Это объясняется тем, что сера в плазменном состоянии излучает свет в процессе молекулярной, а не атомной эмиссии. При этом 73% общей эмиссии излучается в видимом диапазоне, около 20% – в инфракрасном и менее 1% – в ультрафиолетовом!

Для возбуждения плазмы в данном случае целесообразно использовать СВЧ энергию и безэлектродный разряд, поскольку использование традиционных нагреваемых электродов повлечет их быстрое разрушение из-за реакции паров серы с раскалённым металлом электродов.

Итак, в основе работы ГРС лежит ионизация и возбуждение газообразного вещества под действием СВЧ энергии. Высокоионизованное вещество переходит в состояние плазмы, которая начинает постоянно излучать свет. В данном случае внутри колбы лампы образуются, возбуждаются и светятся пары серы в плазменной среде аргона. Для такого светильника фирма LG Electronics придумала новый термин — «лайтрон» [2].

На рис. 2 показана типичная конструкция излучателя на примере запаянной стеклянной (кварцевой) колбы диаметром около 30 мм, в которой находятся газ аргон и несколько миллиграммов серы. Для получения определенного спектра излучения внутрь колбы добавляют и другие вещества.

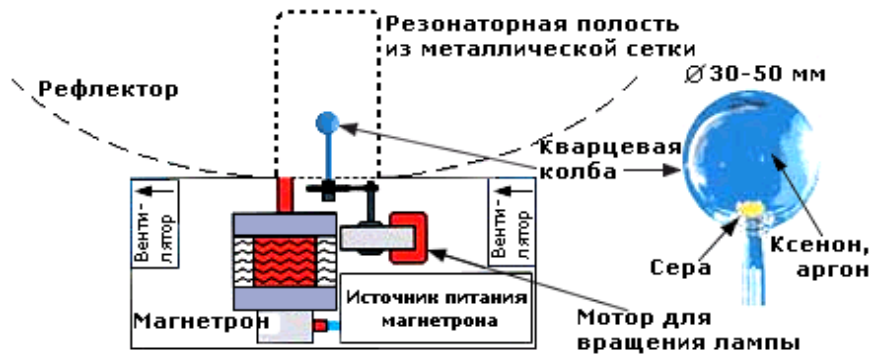


Рис. 2. Изображение конструкции серной лампы [5]

Колба размещается в СВЧ резонаторе, в который поступает СВЧ волна от электровакуумного магнетрона через волновод. Магнетрон работает на промышленной частоте 2,45 ГГц. Резонатор представляет собой «корзину» из мелкоячеистой сетки (рис. 2). Для того, чтобы электромагнитная волна не могла распространяться за пределы светильника дополнительно на выходной апертуре светильника установлена мелкоструктурная металлическая сетка (рис. 3). Размер ячейки сетки должен быть  $a \ll \lambda$ , где  $a$  – ширина элемента ячейки (рис. 3),  $\lambda$  – длина СВЧ волны.

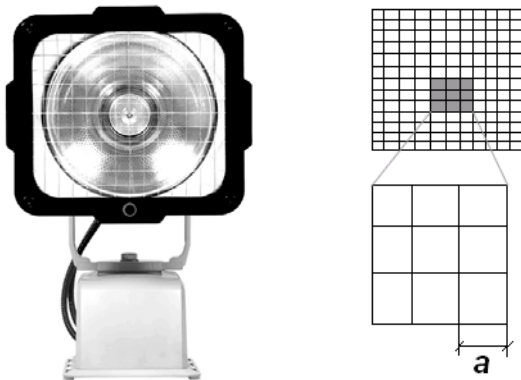


Рис. 3. Изображение прожектора ГРС (слева – вид спереди, справа – мелкоструктурная металлическая сетка, устанавливаемая на выходной апертуре ГРС)

Для равномерного нагрева колбы с содержимым её вращают. Но можно обойтись без вращения, используя волну с круговой поляризацией [2].

При разогреве давление паров серы в колбе может достигать 5 атм. Также важным моментом является необходимость охлаждения колбы [2], поскольку при слишком высоких температурах сера теряет полиморфные свойства, из-за чего спектр излучения может стать линейчатым.

### Параметры и применение различных светильников

По сравнению с различными существующими источниками света ГРС может создавать очень большой световой поток при высокой эффективности. Сравнение разных источников света приведем в табл. 1.

Из табл. 1 видно, что СВЧ ГРС, как источник света с большим световым потоком, может применяться для освещения больших территорий таких, как стадионы, горнолыжные комплексы, спортивные площадки, проезжие части дорог. Эти светильники также могут использоваться для подсветки флажков, рекламно-информационных щитов, зданий и сооружений, помещений с высотой потолков более 6 м, в которых сложно реализовать освещение иными способами. Такими объектами могут быть конференц-залы, общественные, торговые и спортивные здания и сооружения, промышленные и складские помещения. Кроме того, следует отметить, что для стадионов, конференц-залов и других общественных мест, откуда могут вестись телевизионные трансляции, ГРС представляются наилучшим вариантом освещения [2], поскольку обладают сплошным световым спектром и отсутствием пульсаций, что благотворно влияет на качество телевизионной «картинки». Также они хорошо подойдут для выставочного бизнеса, где востребованы высокая мощность, большой срок работы и качество светового потока.

Для сравнения отметим, что светодиодные светильники, имеют большую температуру цвета (5 600 К), чем газоразрядные (5 200 К); эффективность диодного светильника составляет 75-100 лм/Вт, а ГРС – 80-100 лм/Вт и более [1]. Температура окружающей среды для большинства светодиодов, как и в случае ГРС варьируется в широких пределах от -60 до +45°C.

При этом есть некоторые проблемы с отводом тепла от светодиодных светильников, которых

лишены плазменные приборы. Большинство характеристик обоих типов светильников близки друг к другу. Так, срок службы ламп составляет около 50 000 часов, пределы регулирования ин-

тенсивности светового потока 20...100 %, время выхода на рабочий режим меньше 1 минуты. Потребляемая мощность уличных ГРС уже начинают выходить на уровень светодиодных, т.е. 280-350 Вт, а в отдельных случаях превышают эту границу [2].

**Таблица 1. Сравнение различных источников света**

Тип светильника	Мощность $P$ , Вт	Световой поток $F$ , лм	Эффективность (светоотдача) $F/P$ , лм/Вт
лампа накаливания	100	1350	13,5
люминесцентная лампа	40	2000	50
газоразрядная лампа ("автомобильный ксенон")	35	3000-3400	80-95
светодиод	40-60	6000	75-100
СВЧ плазменный потолочный светильник PSH0731B фирмы LG Electronics	730	58500	80 (>100 для других типов [1,2,6,7])

Также используются плазменные осветительные и облучающие устройства для обеззараживания объектов при одновременном воздействии ультрафиолетового оптического излучения и озона [8]. В последнее время ГРС находят применение для освещения в теплицах, так как излучение такого светильника, как упоминалось ранее, близко к солнечному с непрерывным частотным спектром [3, 5].

#### **Преимущества газоразрядных СВЧ светильников**

Важное преимущество ГРС – быстрое действие. Так, для свечения светильника на 80% от номинальной мощности после включения, ему необходимо для разогрева всего 12 с. После выключения повторно можно включить светильник через 5 минут. Для сравнения, МГЛ требует на разогрев около 4 минут, а ее повторное включение возможно не раньше, чем через 15 мин.

Другим преимуществом ГРС является их длительный срок службы (средний срок службы лампы компании LG Electronics – 50 тыс. часов). Это возможно благодаря тому, что ГРС не имеет электродов, из-за которых в большинстве случаев выходят из строя газоразрядные и люминесцентные лампы.

ГРС в течение всего времени работы практически не подвержены «выработке». Так, светоотдача ГРС под конец срока службы может составить 90% от начального значения, в то время как у люминесцентных ламп она может упасть ниже 40%.

Сравним ГРС со светильником на основе МГЛ: они имеют близкую светоотдачу, но ГРС генерируют больший световой поток (табл. 1).

ГРС является более экологичным, чем ртутный, металлогалогенный и люминесцентный светильники. Так, в ртутной лампе содержится 200-250 мг ртути, в металлогалогенной – 100-150 мг, в люминесцентной – 10-20 мг. В ГРС ртути нет вообще, что ставит ГРС на одну ступень по экологичности со светодиодными. Также ГРС не содержит ни свинца, ни мышьяка.

Свет ГРС излучает в разы меньше ультрафиолета – на 92% меньше, чем галогенные лампы накаливания с колбой из кварцевого стекла, и на 66% меньше, чем люминесцентные лампы, что благотворно влияет на здоровье людей, работающих под светом таких ламп [2].

И, как уже упоминалось ранее, спектр излучения ГРС по своему спектральному составу весьма близок к естественному свету, частотный спектр излучения является сплошной, квазисолнечный. По данному параметру ГРС показал себя лучше всех среди присутствующих на рынке светильников. Кроме того, следует отметить возможность плазменного облучателя имитировать режимы восхода и захода солнца. Плазменный облучатель можно включать не сразу в номинальном режиме по мощности, а на 60% ниже, постепенно доводя до номинальной мощности, и наоборот. Плазмохимические процессы в лампе-горелке проходят таким образом, что повторяют солнечные спектры восхода и захода солнца. [3]. Поэтому, газоразрядная плазменная лампа оказалась прекрасным источником света для растений.

Это благотворно сказывается на ходе процессов фотосинтеза, которые обычно идут только под солнечным светом [2, 3, 5].

### Анализ возможных применений полупроводниковых генераторов СВЧ для питания газоразрядного светильника

Построение и дальнейшее применение СВЧ ГПС актуально и востребовано в наше время. Но, как и в любом еще не полностью изученном и разработанном устройстве, есть и свои недостатки. В частности ГПС присущи: громоздкость конструкции и, соответственно, повышенные масса и габариты, из-за необходимости использования тяжелого высоковольтного трансфор-

матора, недостаточно большие долговечность и надежность накаливаемого катода в СВЧ магнетроне. Поэтому для устранения этих недостатков следует рассмотреть вопрос оптимизации конструкции путём применения современной элементной базы, в частности, полупроводниковых электронных приборов вместо электровакуумного СВЧ магнетрона.

В настоящее время на рынке имеются СВЧ транзисторы большой мощности, параметры которых приведены в табл. 2 [10]. Поэтому целесообразно рассмотреть вопрос разработки СВЧ генераторов на основе этих транзисторов. Сведений о разработках таких генераторов для газоразрядных светильников в литературе пока не выявлено.

Таблица 2. Параметры мощных импортных СВЧ транзисторов

Наименование	Корпус	Частота $f$ , МГц	Мощность $P_L$ , Вт	КПД, %	Усиление по мощности $G_P$ , dB	Напряжение питания $V_{DS}$ , В
BLC2425M8LS300P	SOT1250-1	2400-2500	300	54,5	17,5	32
BLF2425M7L250P	SOT539A	2400-2500	250	51	15	28
BLF2425M7LS250P	SOT539B	2400-2500	250	51	15	28
BLS7G2729L-350	SOT539A	2700-2900	350	50	13	32
BLS7G2729LS-350P	SOT539B	2700-2900	350	50	13	32
BLS8G2731L-400P	SOT539A	2700-3100	400	47	13	32
BLS8G2731LS-400P	SOT539B	2700-3100	400	47	13	32

Для ГПС требуется мощность от 500 Вт, поэтому на базе двух или трёх транзисторов в схеме электропитания вполне удастся достичь требуемой мощности плазменного разряда на паре серы.

В сравнении с магнетронным СВЧ генератором данный путь усовершенствования ГПС позволит снизить мощность питания всего светильника и улучшить его массогабаритные показатели.

### Выводы

В статье рассмотрены различные типы осветительных устройств, проведено сравнение их параметров, на основе чего подтверждено, что для освещения объектов (помещений) большой площади и высоты целесообразно использовать газоразрядные СВЧ светильники на разряде в парах серы. Такие светильники в наше время являются конкурентоспособными как в ценовом, так и в конструктивном, экологическом и эстетическом аспектах.

Волноводно-резонаторный тракт для данного типа СВЧ светильника ещё не полностью ис-

следован и целесообразно дальнейшее его изучение с целью оптимизации и максимизации передачи электромагнитной волны в область генерации плазмы.

Перспективными направлениями последующих разработок также следует считать следующие: целесообразно ввести дополнительные элементы в волноводно-резонаторный тракт, а именно: пластины или цилиндрический штырь (противоантенны) или резонатор типа "разрезанное кольцо" [9], которые можно разместить в области входа электромагнитной волны в стеклянную колбу с серой для увеличения напряженности электромагнитного поля и снижения потребляемой СВЧ мощности. Также целесообразно разработать и применить транзисторный СВЧ генератор для замены электровакуумного прибора – СВЧ магнетрона. Использование СВЧ волны с круговой поляризацией позволит не использовать устройство вращения для равномерного нагрева колбы. В результате, упростится и удешевится конструкция светильника, уменьшатся его масса и габариты, снизится мощность электропитания.

**Список литературных источников**

1. *Рохлин Г. Н.* Справочная книга по светотехнике. Под ред. Айзенберга Ю.Б. / Г. Н. Рохлин // Москва: Знак, 2006. – 972 с.
2. Плазменные светильники: экологичность и сплошной спектр, [www.magazine-svet.ru/review/63804](http://www.magazine-svet.ru/review/63804). Дата обращения: 16.04.15.
3. *Жидков Р. А.* Плазменный облучатель для выращивания зеленных культур в теплицах / Р. А. Жидков, В. В. Малышев // Вестник ВИЭСХ. Москва, 2013. Вып. 1(10). С. 45-47.
4. *Александрова О. Ю.* Плазменные осветительные устройства на основе СВЧ-разряда. / О. Ю. Александрова, С. М. Бондаренко, Э. М. Гутцайт, Р. А. Жидков // Технологии информационного общества. Т-Comm. 2013. Вып. № 9. С. 9-11.
5. *Жидков Р. А.* Облучатель с серной лампой для растениеводства / Р. А. Жидков // Всероссийская научная конф. «Проблемы СВЧ Электроники»: сб. начн. трудов. Москва, 2013. С. 65-67.
6. Серная лампа. Многообещающее начало и... непрогнозируемое будущее? Часть I. Немного истории и про устройство лампы, [www.russianelectronics.ru:808/leader-r/review/2195/doc/56392](http://www.russianelectronics.ru:808/leader-r/review/2195/doc/56392). Дата обращения: 17.04.15.
7. Световой поток типичных источников света, [www.dpva.info/Guide/GuidePhysics/LightAndColor/LightFlowEfficiency](http://www.dpva.info/Guide/GuidePhysics/LightAndColor/LightFlowEfficiency). Дата обращения: 17.04.15.
8. *Жидков Р. А.* Камерные, погружённые и антенно-облучательные бактерицидные устройства комбинированного воздействия СВЧ-УФ-излучений и озона / Р. А. Жидков // Высоковольтная вакуумно-плазменная электроника: сб. трудов ВЭИ. Москва, 2008. С. 216-220.
9. *Вольпян О.Д.* Отрицательное преломление волн. Введение в физику и технологию электромагнитных материалов / О. Д. Вольпян, А. И. Кузьмичёв // Киев: Аверс, 2012. 360 с.
10. Транзисторы СВЧ, <http://www.ru.nxp.com/parametrics/16142/#/p=1,s=0,f=c54c27:1800;3100--c74923:250;450--cb6e65>. Дата обращения: 30.09.15

Поступила в редакцию 01 июля 2015 г.

УДК 621.327.9

**А.І. Кузьмичєв**, канд. техн. наук, **В.В. Перевертайло**, **А.В. Мумладзе**

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут».

пр. Перемоги, 37, м. Київ, 03056, Україна.

## **НВЧ газорозрядний світильник на парах сірки**

*Проведені систематизація та аналіз даних щодо газорозрядних (плазмових) НВЧ світильників, порівняння існуючих типів освітлювальних пристроїв із газорозрядними НВЧ світильниками, доведено доцільність застосування саме цих типів світильників у відповідних умовах, також вказані переваги та перспективи досліджень. Обґрунтовано вибір плазмоутворювального світлого середовища – сірки та розроблено пропозицію щодо вибору елементної бази для побудови НВЧ газорозрядних світильників. Визначено напрямки подальших досліджень і розробок у даному напрямку. Бібл. 10, рис. 3, табл. 2.*

**Ключові слова:** НВЧ; газорозрядні світильники; освітлення; світловіддача; світловий потік; плазмові НВЧ світильники; неперервний спектр випромінювання; температура кольору; сірчана лампа; магнетрон; безелектродний НВЧ розряд.

---

UDC 621.327.9

**A. Kuzmichev, Ph.D., V. Perevertaylo, A. Mumladze**

National Technical University of Ukraine "Kyiv Polytechnic Institute".

Polytechnichna street, 9/16, Kyiv, 03056, Ukraine.

## Microwave gas-discharge sulfur vapor lamp

*Systematization and analysis of data on microwave gas-discharge lamps and comparison of existing types of lighting devices with microwave gas-discharge plasma lamps were conducted. The feasibility of applying such types of lamps at certain conditions, their advantages and future prospects have been proved. Reasonable selection of sulfur vapor as a glowing plasma medium is made. The proposal for the choice of element base for building a microwave gas-discharge lamp is developed. The directions of further research and development in this field were determined. References 10, figures 3, tables 2.*

**Keywords:** *gas-discharge lamp; lighting; light output; luminous flux; plasma microwave lamps; continuous emission spectrum; color temperature; sulfur lamp; magnetron; electrodeless microwave discharge.*

### References

1. *Rokhlin, H. (2006). Enquiry volume in lighting engineering. Ed. by Aizenberg Yu. Moskva. Znak. P. 972 (Rus).*
2. *Plasma illuminating lamp: ecological compatibility and continuous spectrum. (2011). www.magazine-svet.ru/review/63804 (Rus).*
3. *Zhidkov, R. A., Malyshev, V. V. (2013). Plasma irradiator for growth of green planting in hothouse. Herald VIESH. Vol. 1(10), pp. 45-47 (Rus).*
4. *Alexandrova, O. Yu. Bondarenko, S. V. Gutsayt, E. M. Zhidkov, R. A. (2013). Plasma lighting devices based on microwave discharge. Technologies of information-oriented society. Vol. 9, pp. 9-11 (Rus).*
5. *Zhidkov, R. A. (2103). Irradiator with sulfur lamp for crop production. All-Russian scientific conference "Microwave electronics issues". Moskva, pp. 65-67 (Rus).*
6. *Sulfur lamp. Promissory commencement and... not predictable future? 1 part. Some history and about structure of the lamp, www.russianelectronics.ru:808/leader-r/review/2195/doc/56392 (Rus).*
7. *Luminous flux of typical light sources, www.dpva.info/Guide/GuidePhysics/LightAndColor/LightFlowEfficiency (Rus).*
8. *Zhidkov, R. A. (2008). Chamber, immersed and antenna-irradiating germicide devices combined action microwave-ultraviolet radiation an ozone. High-voltage vacuum-plasma electronics. Collected papers VEI. Moskva, pp. 216-220 (Rus).*
9. *Volpyan, O. D. Kuzmichev, A. I. (2012). Negative wave refraction. Introduction into physics and technology of electromagnetic materials. Kiev, Avers. P. 360 (Rus).*
10. *Microwave transistors, <http://www.ru.nxp.com/parametrics/16142/#/p=1,s=0,f=c54c27:1800;3100-c74923:250;450-cb6e65>. Дата обращения: 30.09.15*