

Безэлектродный газоразрядный источник света с полупроводниковым генератором накачки

ЩЕРБАКОВ А.В., ИРХИН И.В., ЕФАНОВ М.М.

Квазисолнечный спектр излучения осветителя является наиболее комфортным. Излучение получается с помощью безэлектродной газоразрядной серной лампы. Осветительное устройство состоит из источника света и источника УВЧ или СВЧ возбуждения. В области источников света с безэлектродными серными лампами широко исследована только область больших мощностей на разрешенной для технологических целей частоте. Это связано с широкой доступностью магнетронов, используемых в качестве источников СВЧ мощности, которые и определяют рабочую частоту и мощность источника света в целом. Источник света должен быть установлен в спиральном резонаторе, а в качестве источника возбуждения используется генератор УВЧ или СВЧ колебаний на основе полупроводникового генератора. Рассматриваются создание и оптимизация компактного резонатора и электрической схемы УВЧ генератора на частоте 915 МГц, мощностью более 30 Вт с узлами управления, защиты. Проведены расчёты и измерение параметров возбуждающих систем-резонаторов в УВЧ диапазоне с возможностью перестройки частоты 810-920 МГц, выходной мощностью 37 Вт, микропроцессорным блоком измерения коэффициента стоячей волны.

Ключевые слова: безэлектродная лампа, спиральный УВЧ резонатор, УВЧ источник питания, моделирование

Освещение, осуществляемое квазисолнечным спектром излучения, является наиболее комфортным. Излучение можно получить от осветительного устройства на основе безэлектродных газоразрядных серных ламп. Оно состоит из источника света и источника УВЧ или СВЧ возбуждения. В области источников света с безэлектродными серными лампами широко исследована только область больших мощностей (более 800 Вт) на разрешённой для технологических целей частоте (2450 МГц). Это связано с широкой доступностью магнетронов, используемых в качестве источников СВЧ мощности, которые и определяют рабочую частоту и мощность источника света в целом. Для возбуждения мощных светильников на основе безэлектродных ламп используется цилиндрический светопрозрачный (сетчатый) резонатор с рабочим видом колебаний TE_{111} . Безэлектродная серная лампа помещается в максимум электрического поля. Для равномерного распределения температуры по поверхности колбы лампы она вращается с частотой около 300 об/мин.

Маломощные (50, 200 Вт) безэлектродные источники света на данный момент менее распространены, и это объясняется:

- 1) отсутствием доступных серийных магнетронов мощностью менее 500 Вт;
- 2) отсутствием эффективных и компактных резонаторов, пригодных для возбуждения безэлектродных ламп;
- 3) недостаточным объемом экспериментальных данных о поведении безэлектродной серной лампы при низких мощностях накачки.

Разработан полупроводниковый генератор на разрешенную промышленную частоту 915 МГц с возможностью плавной регулировки мощности в интервале 10, 37 Вт, содержащий систему согласования, управления и защиты, который согласован с электродинамическим УВЧ резонатором, позволяющим наиболее эффективно передавать мощность от генератора к безэлектродной лампе [1].

Использование полупроводникового УВЧ генератора вместо магнетрона накладывает ограничения на рабочую частоту и КПД устройства [2]. Так, максимальный КПД полупроводникового усилителя в классе «С» может достигать 75% на частотах 800, 1000 МГц и до 53% на частоте 2450 МГц [3]. Таким образом, целесообразно использовать мощные УВЧ транзисторы на частоту не более 915 МГц.

Наиболее проработанная современная конструкция безэлектродного источника света с УВЧ накачкой мощностью до 200 Вт принадлежит компании Fusion Lighting, базирующегося на использовании резонаторов, заполненных диэлектриком (рис. 1). Миниатюрная безэлектродная лампа 1, содержащая газовую смесь 2, помещается в резонатор 5, заполненный диэлектриком 6 [4]. Резонатор – коаксиальный с заземленной центральной жилой 3; возбуждение осуществляется штырём 4. От задающего генератора 8 по коаксиальному кабелю УВЧ колебания поступают в усилитель мощности 9, откуда по кабелю через разъём 7 – в резонатор. Особенностью работы безэлектродной лампы является то, что её предельная мощность УВЧ возбуждения определяется той мощностью, при которой

мощность потерь, приводящая к нагреву безэлектродной лампы, отводится непосредственно через материал резонатора и рассеивается путём излучения. Это позволяет работать лампе без вращения в отличие от более мощного прототипа на магнетроне. Отсутствие движущихся частей и катодной СВЧ лампы – магнетрона – приводит, как следствие, к повышению надёжности и долговечности устройства. Практически предельное значение мощности зависит от конкретного конструкторского исполнения, материала резонатора, наличия обдува и температуры окружающей среды. Практически предельная мощность возбуждения такой конструкции – до 200 Вт.

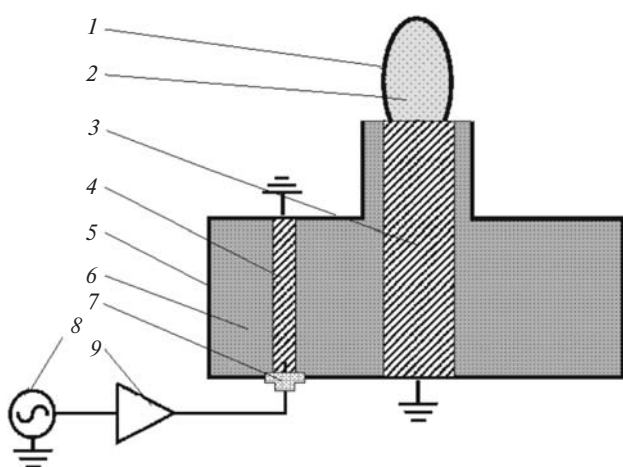


Рис. 1. Безэлектродная лампа в коаксиальном резонаторе

Основная функция резонатора – увеличение напряжённости электрического поля до уровня пробоя газа в колбе и передача энергии генератора в лампу. Увеличение напряжённости поля в резонаторе определяется его добротностью, а коэффициент передачи энергии в лампу – степенью согласования.

Для оптимизации параметров резонаторов и точного определения резонансной частоты применялась компьютерная система HFSS проектирования и трёхмерного моделирования ВЧ и СВЧ устройств для моделирования цепей согласования – программа Microwave Office [5].

Использовать цилиндрический резонатор целесообразно как в прототипе – в среде высокодобротного с высокой диэлектрической проницаемостью в СВЧ диапазоне диэлектрика; в воздушной среде на частоте возбуждения 915 МГц – нецелесообразно из-за его больших габаритов (его длина будет превышать 30 см). Поэтому изучались возможности применения ряда резонаторов на основе электрических замедляющих систем на частоте 915 МГц, которые компактны при работе в воздушной

среде. Наибольшей эффективности удалось достичь при использовании спирального резонатора.

Спиральный объёмный резонатор имеет цилиндрический или прямоугольный медный экран, внутри которого размещена однослойная катушка. Один конец её спирали замкнут на экран, а второй разомкнут. У основания спирали расположена петля возбуждения, также замкнутая на экран. Возможно использование переходящего в спираль внутри резонатора продолжения центральной жилы СВЧ кабеля.

Для исследования свойств спирального резонатора создана его модель в программе HFSS (рис. 2). Резонатор содержит четыре витка медной проволоки диаметром 1,4 мм, диаметр намотки – 8 мм; диаметр экрана – 15 мм. Анализ резонатора проводится в режиме Eigenmode с вычислением первой гармоники резонанса. Резонансная частота такого резонатора составила 848,3 МГц, а добротность – 874. Значение добротности соответствует материалу резонатора – медь с шероховатостью поверхности 10 мкм.

На основании компьютерной оптимизации создана физическая модель, позволяющая проводить оперативное изменение геометрических размеров. Достигнута частота резонанса около 915 МГц. Разработана конструкция резонатора (рис. 3.) С помощью анализатора цепей типа Agilent 8719ET измерены частота резонанса и добротность. Добротность определяется по ширине полосы по уровню –3 дБ и составляет, например, при минимальной частоте 835 МГц около 33:

$$Q = f_0 / df = 835 / (849,2 - 823,8) = 32,87.$$

На рис. 4 представлена экспериментально снятая АЧХ разработанного спирального резонатора.

Экспериментальные исследования проводились на лабораторном стенде, содержащем: макетный образец УВЧ генератора; анализатор цепей Agilent 8719ET; источник двух постоянных питающих на-

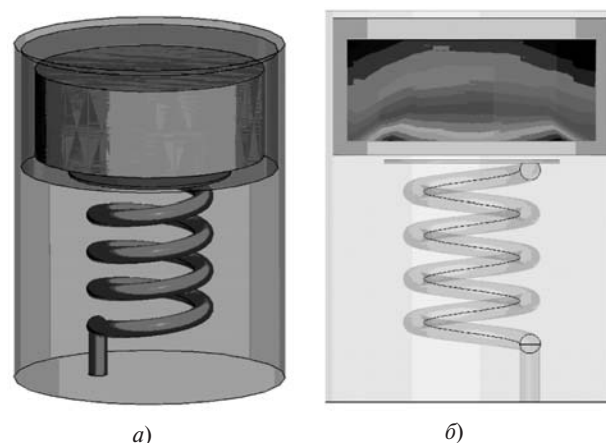


Рис. 2. Модель спирального резонатора (а) и структура поля в лампе (б)

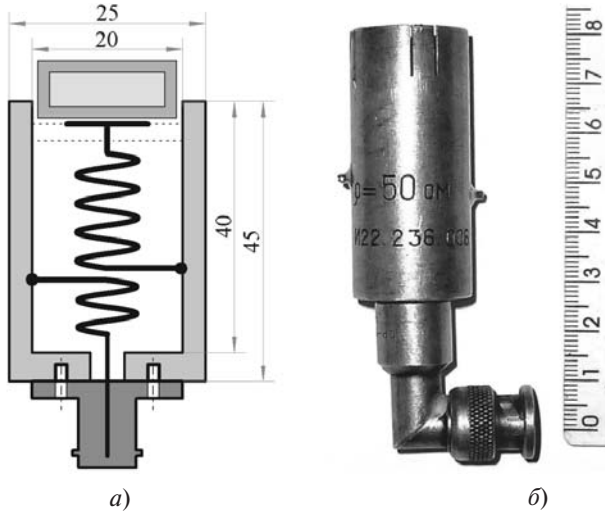


Рис. 3. Спиральный резонатор с входным разъёмом типа CP-50: а – схема конструкции; б – внешний вид

пряжений +5 В и +12 В; высокочастотный осциллограф Tektronix TDS 3054В; эквивалент нагрузки; измеритель мощности ВЧ–СВЧ колебаний типа Я2М-66; устройство измерения паразитного излучения ВЧ–СВЧ колебаний.

Полученный диапазон перестройки частоты УВЧ полупроводникового генератора составляет 810,0–926,5 МГц. Это является отличным показателем, так как позволяет даже при 10%-м уменьшении резонансной частоты резонатора обеспечить согласование по частоте и соответственно передать максимальную мощность в резонатор. Полученная выходная мощность физической модели устройства составляет 37 Вт. Дальнейшее увеличение мощности ограничено током, потребляемым от источника питания (8,2 А). Потребляемая мощность при этом составляет $P_{пот} = 12,5В \cdot 8,2А = 102,5$ Вт. Таким образом, электрический КПД генератора составляет:

$$h = \frac{100\% \cdot P_{в}}{P_{пот}} = \frac{100\% \cdot 73}{102,5} = 36,1\%$$

По результатам экспериментов сделан вывод, что наиболее подходящий для возбуждения безэлектродной лампы резонатор – спиральный. Не-

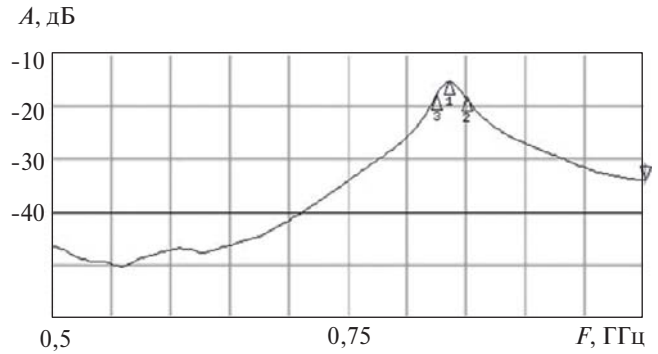


Рис. 4. АЧХ спирального резонатора

достаточная для первоначального пробоя газа напряженность устраняется кратковременным превышением подводимой мощности. Так, в эксперименте при подводимой мощности более 36 Вт резонатор зажигал установленную в него безэлектродную лампу в 97% включений с первого раза.

Источник питания лампы, обеспечивающий питание на частоте 915 МГц, построен по топологии «задающий генератор – усилитель мощности» (рис. 5). Отличительной особенностью УВЧ генератора является система непрерывного контроля коэффициента стоячей волны (КСВ) и блок защиты, уменьшающий выходную мощность при превышении КСВ установленного значения. Необходимость такого усложнения конструкции обусловлена тем, что резонатор с помещённой в него лампой в режиме поджига представляет собой сильно рассогласованную нагрузку, так как газ в лампе в этот момент не ионизирован и не поглощает энергию и мощность возвращается назад в усилитель, что может вывести выходной каскад из строя. Чтобы избежать этого, применяются направленный ответвитель (НО) на микрополосковых линиях и автоматическая регулировка выходной мощности.

Чтобы охватить возможно более широкий диапазон выходных импедансов, согласующее устройство рассчитано так, чтобы обеспечивать на выходе как положительную, так и отрицательную составляющие мнимой части импеданса и действительную составляющую как больше, так и меньше

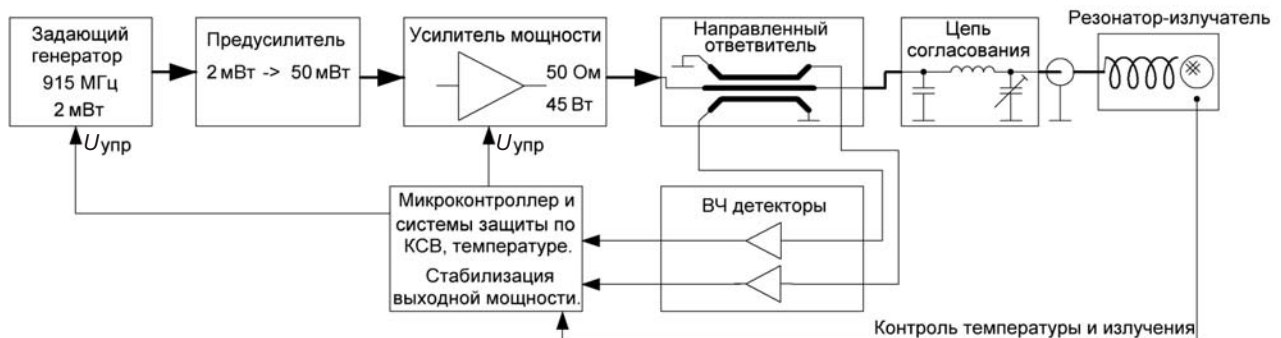


Рис. 5. Структурная схема УВЧ генератора для работы на несогласованную нагрузку

50 Ом. Практически при входном импедансе 50 Ом на выходе цепочки можно устанавливать импеданс в пределах 35,77 Ом активного сопротивления и $-50, +50$ Ом реактивного.

Технически задающий генератор выполнен на основе модуля ГУН типа MQE043-836: предусилитель – на микросборке PF08114, а усилитель мощности – на RA45H7687M1. Цифровой блок построен на микроконтроллере ATmega16 [6].

На основании проведенных исследований разработана физическая модель источника света на основе безэлектродной газонаполненной серной лампы с УВЧ генератором накачки (рис. 6).

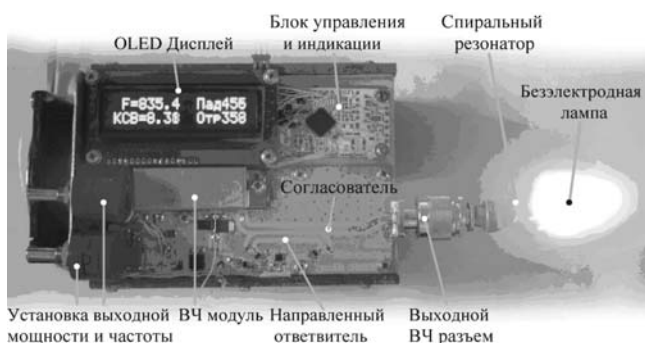


Рис. 6. Физическая модель безэлектродного источника света с УВЧ накачкой

Вывод. Разработанный УВЧ генератор имеет регулируемую выходную мощность до 37 Вт и диапазон перестройки частоты от 810,0 до 926,5 МГц, содержит микрополосковый блок согласования с выходным импедансом 35,77 Ом активного сопротивления и $-50, +50$ Ом реактивного сопротивления. УВЧ генератор содержит микропроцессорный блок измерения частоты, мощности КСВ и дисплей для индикации этих данных в реальном масштабе времени.

Elektrichestvo (Electricity), 2015, No. 4, pp. 34–38.

An Electrodeless Gas-Discharge Light Source with a Semiconductor Pump Oscillator

A.V. SHCHERBAKOV, I.V. IRKHIN, and M.M. EFANOV

A quasi solar radiation spectrum of an illuminator is the most comfortable one. Radiation is obtained by means of an electrodeless gas-discharge sulfur lamp. The illuminating device consists of a light source and a source of UHF or VHF excitation. In the field of light sources equipped with electrodeless sulfur lamps, only the region of high capacities at the frequency permitted for process needs has widely been studied. This situation is due to the fact that the magnetrons used as sources of VHF power, which just determine the working frequency and capacity of the light source as a whole, are widely accessible devices. The light source must be installed in a helical resonator, and a generator of UHF or VHF oscillations made on the basis of a superconductor generator is used as the excitation source. The development and optimization of a compact resonator and the electrical circuit of the VHF generator at a frequency of 915 MHz and capacity of more than 30 W with control and protection units are considered. The parameters of exciting resonator

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Щербаков А.В., Жидков Р.А., Ефанов М.М., Гузенко М.О. Безэлектродное плазменное светооптическое устройство квазисолнечного спектра с СВЧ возбуждением. – Вестник МЭИ, 2012, № 6, с. 209–212.
2. Щербаков А.В., Ирхин И.В., Ефанов М.М., Гузенко М.О. Полупроводниковый генератор для возбуждения безэлектродного плазменного светооптического устройства. – Вестник МЭИ, 2013, № 3, с. 89–95.
3. Mollee H., O’Shea S., Wilson P. and Vennema K. High Power RF LDMOS Transistors for Avionics Applications. – Microwave Journal, 2000.
4. Pat. 8294382 US. Low frequency electrodeless plasma lamp.: Luxim Corporation (Sunnyvale, CA). 23. 10. 2012.
5. Банков С.Е., Курушин А.А. Расчёт антенн и СВЧ структур с помощью HFSS Ansoft. – М.: ЗАО «НПП «РОДНИК», 2009, 256 с.
6. Ирхин И.В. Разработка полупроводникового ВЧ источника накачки и возбуждения безэлектродной аргонно-серной лампы. – Тез. докл. Девятнадцатой Международной научно-технической конференции студентов и аспирантов «Радиоэлектроника, электротехника и энергетика». Т. 1. – М.: Издат. дом МЭИ, 2013, 197 с.

[16.07.14]

Авторы: Щербаков Александр Владимирович окончил радиотехнический факультет Московского электротехнического института связи в 1969 г. В 2010 г. защитил докторскую диссертацию «Научно-технические основы создания систем питания высоковольтных устройств пыли- и газоочистки на основе электронно-лучевых вентилей и газоразрядных приборов» во Всероссийском электротехническом институте (ВЭИ). Начальник отдела ВЭИ.

Ирхин Игорь Вячеславович окончил магистратуру Московского энергетического института (МЭИ) в 2013 г. Инженер 3 категории, аспирант МЭИ.

Ефанов Михаил Михайлович окончил факультет электронной техники МЭИ в 1992 г. Главный специалист отдела ВЭИ.

systems in the VHF band with the possibility of adjusting the frequency in the range of 810–920 MHz, with an output capacity of 37 W were calculated and measured by means of a microprocessor unit for measuring the standing wave coefficient.

Key words: *electrodeless lamp, helical VHF resonator, VHF power source, modeling*

REFERENCES

1. **Shcherbakov A.V., Zhidkov R.A., Yefanov M.M., Guzenko M.O.** *Vestnik MEI – in Russ. (Bulletin of the Moscow Power Engineering Institute)*, 2012, No. 6, pp. 209–212.
2. **Shcherbakov A.V., Irkhin I.V., Yefanov M.M., Guzenko M.O.** *Vestnik MEI – in Russ. (Bulletin of the Moscow Power Engineering Institute)*, 2013, No. 3, pp. 89–95.
3. **Mollee H., O’Shea S., Wilson P. and Vennema K.** High Power RF LDMOS Transistors for Avionics Applications. – *Microwave Journal*, 2000.
4. **Pat. 8294382 US.** Low frequency electrodeless plasma lamp.: Luxim Corporation (Sunnyvale, CA). 23. 10. 2012.
5. **Bankov S.Ye., Kurushin A.A.** *Raschet antenn i SVCh struktur s pomoshch’yu HFSS Ansoft* (Calculation of antennas and microwave structures using Ansoft HFSS). Moscow, JSC «NPP» «Rodnik», 2009, 256 p.
6. **Irkhin I.V.** *Tezisy dokl. 19-i Mezhdunarodnoi nauchno-tehnicheskoi konferentsii studentov i aspirantov «Radioelektronika, elektrotehnika i energetika». T. 1* (Proc. of the 19th International Scientific-Technical Conference of Students and Post-Graduate Students «Radio Electronics, Electrical Engineering, and Power Engineering». Vol. 1). Moscow, Publ. House of Moscow Power Engineering Institute, 2013, 197 p.

Authors: Shcherbakov Aleksandr Vladimirovich (Moscow, Russia) – Dr. Sci. (Eng), Head of the Department in the All-Russian Electrotechnical Institute (AREI).

Irkhin Igor’ Vyacheslavovich (Moscow, Russia) – Ph. D. Student of the Moscow Power Engineering Institute, Engineer 3rd cat. at AREI.

Yefanov Mikhail Mikhailovich (Moscow, Russia) – Senior Specialist at the Department in the AREI.