

## ТВЕРДОТЕЛЬНЫЕ ИСТОЧНИКИ ЭНЕРГИИ УСТАНОВОК СВЧ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОГО НАГРЕВА

**А.В. Федоров**

*Саратовский государственный технический университет им. Гагарина Ю.А.,  
г. Саратов, Россия*

Источники энергии установок СВЧ диэлектрического нагрева чаще всего строят на основе электровакуумных генераторов – магнетронов, однако такие источники СВЧ энергии обладают рядом недостатков. Как альтернатива магнетронным источникам энергии в работе рассмотрен принцип построения источника энергии установок СВЧ диэлектрического нагрева нового типа – на полупроводниковых приборах (твердотельные СВЧ генераторы). Показано, что твердотельный источник энергии обладает преимуществами по сравнению с магнетронными источниками энергии установок СВЧ диэлектрического нагрева: возможностью изменения уровня генерируемой мощности и меньшим напряжением питания. Кроме того, твердотельный генератор позволяет строить широкополосные установки СВЧ диэлектрического нагрева.

Даны рекомендации по подбору полупроводниковых приборов для применения в качестве генераторов в установках диэлектрического СВЧ нагрева, приведена методика расчёта мощности твердотельного источника СВЧ энергии, приведен пример расчёта твердотельного источника энергии, построенного на основе серийно выпускаемых полупроводниковых СВЧ приборов, мощность которого сравнима с мощностью источников энергии на магнетронах.

*Ключевые слова: СВЧ нагрев, источник энергии, установка СВЧ диэлектрического нагрева, твердотельный генератор, магнетрон, СВЧ-транзистор.*

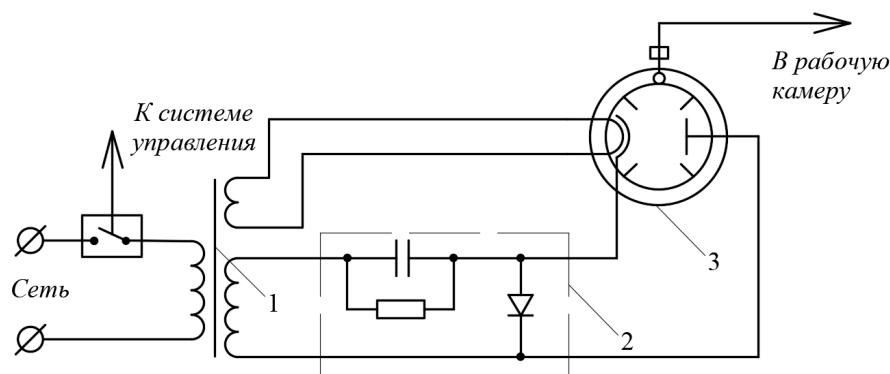
### Введение

Одним из основных компонентов всех установок СВЧ диэлектрического нагрева является источник СВЧ энергии, который преобразует энергию переменного или постоянного тока электрической сети в энергию СВЧ электромагнитных колебаний, вызывающих поляризацию обрабатываемого диэлектрика и, как следствие, достижение того или иного технологического эффекта (нагрев, сушка, плавление, отверждение, дефростация, полимеризация и др.). СВЧ электромагнитные колебания (СВЧ электромагнитные волны) от источника СВЧ энергии по волноводу поступают в рабочую камеру установки СВЧ диэлектрического нагрева, в которой поглощаются обрабатываемым диэлектриком. Различают традиционное (тепловое) действие СВЧ энергии на диэлектрик и нетради-

ционное (нетепловое) действие на полимеры, при котором происходит модификация свойств полимерного материала, сырья или изделия (полисульфидной смолы, поликапроамидных нитей и волокон, эпоксидных компаундов) без существенного нагрева [1, 2].

Рабочие камеры различаются конструкциями, характеристиками и подразделяются на рабочие камеры с бегущей волной (КБВ), камеры лучевого типа (КЛТ) и камеры со стоячей волной (КСВ) [3–5].

В подавляющем большинстве установок СВЧ диэлектрического нагрева в качестве СВЧ генератора применяют магнетроны – электровакуумные приборы [6]. Структурная схема источника СВЧ энергии с магнетроном показана на рис. 1. Для получения высокого анодного напряжения магнетрон использует повышающий трансформатор



**Рис. 1. Структурная схема источника энергии СВЧ на основе магнетрона:  
1 – повышающий трансформатор; 2 – удвоитель напряжения; 3 – магнетрон**

и удвоитель напряжения, собранный на высоковольтном диоде и конденсаторе. При такой схеме магнетрон работает лишь на одной полуволне питающего переменного напряжения, так как другая полуволна заряжает конденсатор удвоителя напряжения.

Показанная на рис. 1 схема получила широкое распространение благодаря простоте и невысокой стоимости. Однако источник СВЧ энергии на магнетроне имеет недостатки:

- невозможность перестройки по частоте;
- работа только на одной полуволне питающего напряжения;
- невозможность плавного регулирования выходной СВЧ мощности;
- высокое анодное напряжение;
- ограниченный срок службы.

Известны схемы питания магнетрона с выпрямителем анодного напряжения [5], однако они сложнее и дороже.

#### Постановка задачи

Альтернативой магнетрону в источниках СВЧ энергии в установках СВЧ диэлектрического нагрева могут стать твердотельные (полупроводниковые) СВЧ приборы, поскольку кроме традиционного применения мощных полупроводниковых СВЧ транзисторов в радиолокации, радиосвязи и базовых станциях мобильной связи появилась возможность построить полупроводниковые СВЧ генераторы технологического назначения. Первые работы, в которых предложено применение полупроводниковых приборов в качестве генераторов для установок диэлектрического нагрева, появились в конце 70-х годов [7, 8]. Однако применение твердотельных генераторов для диэлектрического нагрева в то время было нерациональным в связи с недостаточно высокой выходной мощностью таких генераторов, их низким КПД и высокой стоимостью.

В последние годы технические характеристики полупроводниковых СВЧ приборов позволяют фирмам-производителям выпускать транзисторы СВЧ диапазона с выходной непрерывной мощностью до 250 Вт [9, 10] в диапазонах частот, предназначенных для применения СВЧ энергии в промышленных, научных и медицинских целях (ISM-диапазон). Наиболее крупными производителями таких приборов на данный момент являются компании NXP (Китай) и Ampleon (Нидерланды). Характеристики выпускаемых этими компаниями мощных СВЧ транзисторов, предназначенных для технологических целей, показаны в таблице.

Применение мощных СВЧ транзисторов имеет преимущества перед магнетронами малой мощности:

– выходной мощностью транзистора можно управлять в широких пределах, что позволяет варьировать уровень выходной мощности источника СВЧ энергии в процессе его работы;

– специально разработанные СВЧ транзисторы могут работать при  $K_{стU}$  нагрузки до 5...30, что выше максимального значения этого параметра у магнетронов ( $K_{стU} \leq 3$ );

– напряжение питания транзисторов не более 50 В, что позволяет отказаться от высоковольтного трансформатора и использовать малогабаритные блоки питания при непрерывном излучении СВЧ энергии в рабочую камеру;

– СВЧ транзисторы могут работать в широкополосном режиме, а перестройка частоты СВЧ генератора даст возможность повысить равномерность термообработки [11, 12];

– СВЧ транзисторы более долговечны, имеют меньшие габариты и вес.

Рассмотрим принципы построения и методики расчета твердотельного СВЧ генератора установки СВЧ диэлектрического нагрева малой мощности.

Мощные СВЧ транзисторы для технологических целей производства компаний NXP и Ampleon

Тип	Тестовые частоты, МГц	$P_{СВЧ}$ , Вт	Усиление, дБ	$U_{пит}$ , В	КПД, %	$K_{стU}$ , max нагр.	Производитель	Источн. информ.
BLC2425M8LS300P	2450	300	17	32	58	10	Ampletron	[9]
BLF2425M7L250P	2450	250	15	28	51	5	Ampletron	[9]
BLC2425M9LS250	2450	250	18,5	32	61	5	Ampletron	[9]
BLF2425M6L180P	2450	180	13,3	28	53	5	Ampletron	[9]
BLF2425M7L140	2450	140	18,5	28	52	10	Ampletron	[9]
BLF2425M9LS140	2450	140	19	28	56	10	Ampletron	[9]
BLF10H6600PS	400–1000	600	20,8	50	46	40	Ampletron	[9]
BLF0910H6L500	900–930	500	18	50	61	30	Ampletron	[9]
MHE1003N	2400–2500	230	14	26	61,5	10	NXP	[10]
MHT1000H	2400–2500	140	13,2	28	45	10	NXP	[10]
MHT1001H	2400–2500	190	13,2	28	46,2	10	NXP	[10]
MHT1003N	2400–2500	250	15,9	32	59	10	NXP	[10]
MHT1004N	2400–2500	300	15,2	32	57,9	5	NXP	[10]
MHT1002N	915	350	20,7	48	66,9	10	NXP	[10]
MHT2001N	902–928	175	33,8	50	72,8	10	NXP	[10]

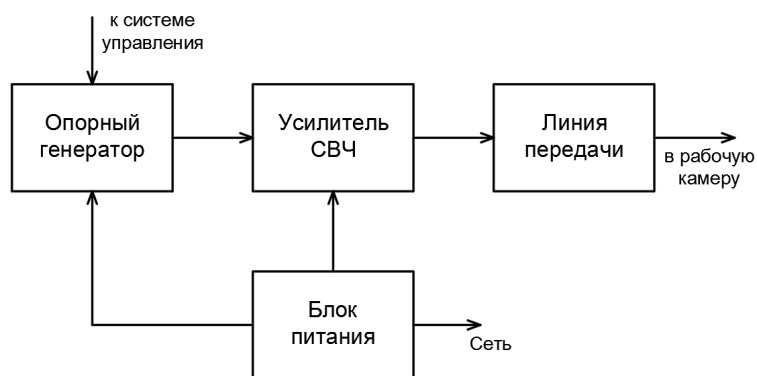


Рис. 2. Обобщенная структурная схема полупроводникового источника энергии установки СВЧ диэлектрического нагрева

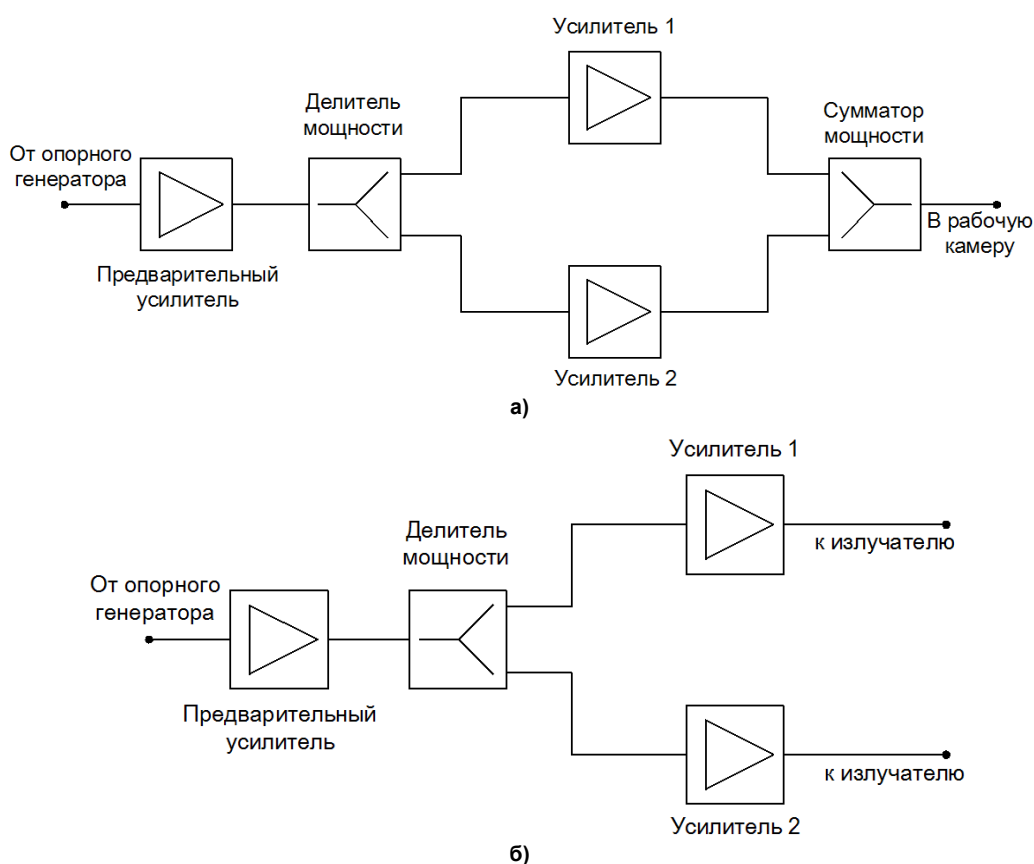


Рис. 3. Схемы увеличения выходной мощности твердотельного СВЧ генератора: а – с сумматором мощности; б – с несколькими излучателями

### Принципы построения твердотельного источника энергии

Так как СВЧ транзисторы являются усилителями, то для построения источника СВЧ энергии на их основе требуется опорный (задающий) генератор ЗГ, формирующий рабочую частоту установки диэлектрического нагрева. В качестве задающего генератора можно рекомендовать использовать генераторы, управляемые напряжением (ГУН) диапазона СВЧ [13]. В случае построения перестраиваемого источника СВЧ энергии [11] могут быть использованы синтезаторы частот на основе таких генераторов.

Чаще всего ГУН представляет собой автогенератор, в цепь положительной обратной связи которого включен перестраиваемый резонатор того или иного типа. В диапазоне СВЧ для целей СВЧ нагрева могут быть использованы резонаторы на основе варикапов или ЖИГ-резонаторы [14]. Наиболее простые и недорогие решения можно построить, используя резонатор на основе колебательного контура с перестройкой частоты варикапами. В этом случае ЗГ может быть выполнен в малогабаритном корпусе. Современные ГУН на варикапах выпускаются различными зарубежными

и отечественными компаниями в виде МИС для печатного монтажа либо в компактных корпусах с коаксиальным выходом.

Сигнал с выхода задающего генератора должен быть подан на мощный усилитель СВЧ, на выход которого подключается рабочая камера, с помощью линии передачи (чаще всего – прямоугольный волновод). Обобщенная структурная схема полупроводникового источника СВЧ энергии показана на рис. 2.

Для получения максимально возможной выходной мощности, при которой усилитель входит в режим насыщения (точка компрессии по уровню 1 дБ), требуется обеспечить на его входе уровень сигнала не менее:

$$P_W = 10^{\frac{P_{1dB} - G}{10}}, \quad (1)$$

где  $P_W$  – требуемая мощность на входе, Вт,  $P_{1dB}$  – мощность точки компрессии по уровню 1 дБ, обычно указываемая в справочных параметрах транзисторов в дБм,  $G$  – коэффициент усиления транзистора, дБ.

В случае если задающий генератор обладает выходной мощностью меньше  $P_W$ , необходимо установить предварительный усилитель, включаемый между задающим генератором и усилителем мощности. Если для технологического процесса необходима более высокая выходная мощность, возможна совместная работа нескольких транзисторов на одну нагрузку. В этом случае их выходная мощность складывается, при этом важна идентичность фаз колебаний обоих транзисторов. Возможны два варианта сложения мощности. В первом случае (рис. 3а) входной сигнал с задающего генератора с помощью делителя мощности подается на каждый из транзисторов, а затем усиленный сигнал суммируется и подается в рабочую камеру с помощью одного излучателя. Во втором случае (рис. 3б) усиленный сигнал с выхода каждого транзистора подается в рабочую камеру через отдельный излучатель. Этот вариант наиболее просто можно реализовать в рабочей камере лучевого типа.

#### Методика расчёта твердотельного источника СВЧ энергии установки диэлектрического нагрева

Для проведения расчёта важнейшим критерием является необходимая выходная СВЧ мощность твердотельного источника СВЧ энергии. Для выходной мощности, сравнимой с мощностью магнетрона ( $\approx 500$  Вт), требуется параллельное включение как минимум двух мощных транзисторов по схеме рис. 3а.

Проще всего провести расчет источника СВЧ энергии, используя относительные логарифмические единицы мощности – дБм, опорной мощностью которых является величина 1 мВт. В этом случае, выходная мощность источника СВЧ энергии на двух параллельно включенных транзисторах будет равна:

$$P_{amp.out} = P_{1dB} + 3, \quad (2)$$

здесь  $P_{amp.out}$  – СВЧ выходная мощность, подаваемая в рабочую камеру (дБм),  $P_{1dB}$  – мощность точки компрессии по уровню 1 дБ каждого из двух транзисторов. Уровень мощности на входе усилителя мощности на двух транзисторах для работы в режиме насыщения должен составлять не менее:

$$P_{amp.in} = P_{1dB} - 3 - G_{amp} + G_{div}, \quad (3)$$

где  $P_{amp.in}$  – минимальная мощность на входе (дБм),  $G_{amp}$  – коэффициент усиления транзистора (дБ),  $G_{div}$  – вносимые потери делителя мощности (дБ).

Если мощность ЗГ менее  $P_{amp.in}$ , то требуется предварительный усилитель с коэффициентом усиления не менее

$$G_{pr} = P_{3\Gamma} - P_{amp.in}, \quad (4)$$

где  $G_{pr}$  – коэффициент усиления предварительного усилителя (дБ),  $P_{3\Gamma}$  – минимальная выходная мощность задающего генератора (дБм).

В качестве примера рассмотрим структурную схему твердотельного источника СВЧ энергии (рис. 4), и проведём расчет её характеристик при использовании выпускаемых серийно полупроводниковых приборов.

Максимальная выходная мощность, поступающая в рабочую камеру источника СВЧ энергии, показанного на рис. 2, составляет около 500 Вт. Эта величина ограничена мощностью уровня компрессии выходных транзисторов ( $P_{1dB}$ ). В данном случае выходная мощность сравнима с выходной мощностью технологических магнетронов, применяемых в бытовых СВЧ печах.

В качестве задающего генератора был выбран ЖИГ-генератор MLTO-50204 производства Micro Lambda Wireless, inc [14]. Его выходная мощность не превышает  $P_G = 10 \pm 5$  мВт ( $10 \pm 3$  дБм). Генератор может перестраиваться в диапазоне 2–4 ГГц в зависимости от управляющих напряжений на обмотках резонатора.

В качестве транзисторов оконечного усилителя можно рекомендовать приборы, показанные в таблице. В качестве примера рассмотрим транзисторы MHT1003N производства NXP (рис. 5).

Коэффициент усиления на частоте 2450 МГц каждого такого транзистора составляет  $G = 15,9$  дБ, а максимальная выходная мощность  $P_{1dB} = 250$  Вт. Для получения выходной мощности  $P_{общ} = 500$  Вт (56,99 дБм) требуется суммировать выходные мощности двух транзисторов. Согласно (3), на входе усилителя мощности требуется обеспечить уровень входного сигнала не менее

$$P_{amp.in} = 56,99 - 3 - 15,9 + 3 = 41,09 \text{ дБм.}$$

Кроме того, в выходном спектре ЖИГ генератора имеются гармонические составляющие сигнала с частотами кратными выходной частоте, способные негативно повлиять на усилитель. Для их устранения обычно применяют фильтр нижних частот (2 на рис. 4) с частотой среза, находящейся в пределах  $F_{ген} < F_{cp} < 2F_{ген}$ , где  $F_{cp}$  – частота среза

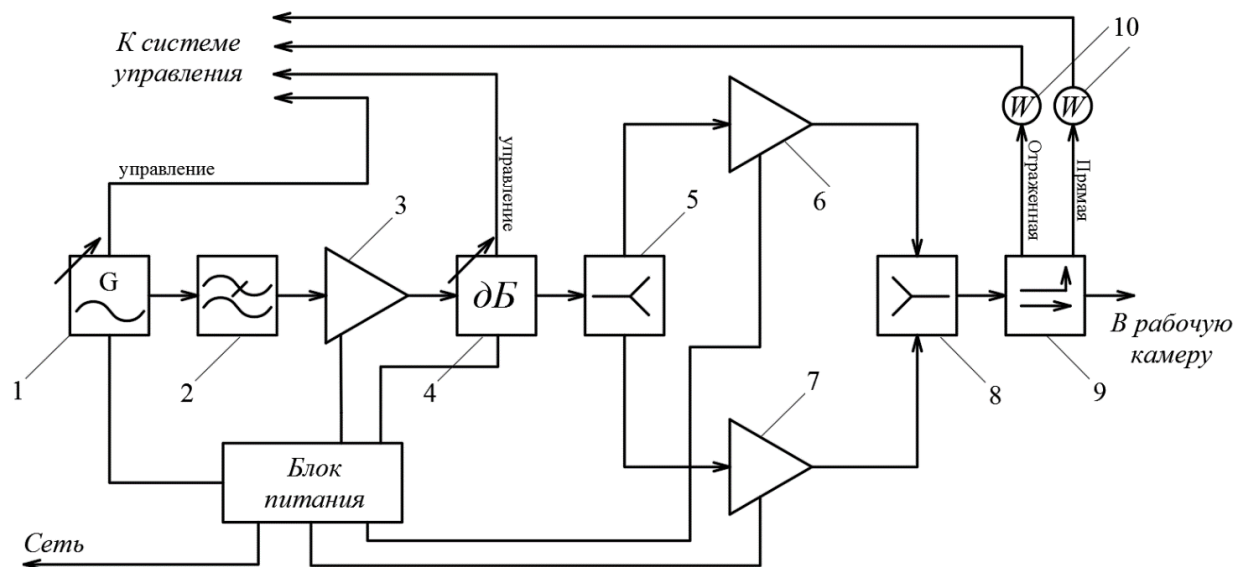


Рис. 4. Структурная схема источника СВЧ энергии для установки СВЧ диэлектрического нагрева на твердотельных приборах: 1 – опорный генератор; 2 – фильтр нижних частот; 3 – предварительный усилитель; 4 – управляемый аттенуатор; 5 – делитель мощности; 6, 7 – усилители мощности; 8 – сумматор мощности; 9 – рефлектометр; 10 – детекторы СВЧ мощности прямой и обратной волн

фильтра,  $F_{ген}$  – основная частота генератора (или максимальная частота, если генератор работает в широкополосном режиме).

В данном случае мощность сигнала с выхода опорного генератора недостаточна для работы выходных транзисторов в режиме насыщения, при котором достигается максимальная выходная мощность. Необходим дополнительный предусилитель СВЧ сигнала (3 на рис. 4), включаемый после СВЧ фильтра. Для рассчитываемой схемы источника СВЧ энергии, согласно (4), требуется предварительный усилитель с коэффициентом усиления не менее:

$$G_{pr} = 41,09 - 10 = 31,09 \text{ дБ.}$$

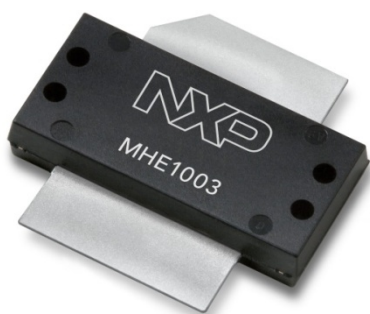


Рис. 5. Мощный кремневый LDMOS транзистор MHE1003N производства NXP для применения в технологических установках

Для гибкого управления технологическим процессом источник энергии может включать многоступенчатый СВЧ аттенуатор (4 на рис. 4) для регулировки выходной мощности СВЧ усилителя в широких пределах путём изменения управляющего напряжения на аттенуаторе. Если в установке предусмотрен широкополосный режим работы

[10], то от системы управления поступает управляющее напряжение на опорный генератор, осуществляя его перестройку в соответствии с алгоритмом работы системы управления.

Блок питания показанного на рис. 4 источника СВЧ энергии должен обеспечивать несколько питающих напряжений:

- выходных транзисторов (+26 В × 15,4 А, для каждого транзистора);
- задающего генератора (–5 В, +8 В);
- СВЧ предварительного усилителя (5–12 В, в зависимости от типа усилителя).

Для упрощения источника СВЧ энергии можно использовать только один выходной транзистор, что снизит требования к источнику питания. Такая замена возможна, если требуется более низкий уровень мощности энергии СВЧ в рабочей камере, который сможет обеспечить даже один прибор. Для увеличения выходной СВЧ мощности можно включать параллельно более двух выходных транзисторов, однако это приводит к большей сложности схемы и соответственно более высокой стоимости установки [15].

## Выводы

Полупроводниковые мощные СВЧ транзисторы могут быть использованы в качестве источника энергии СВЧ установок диэлектрического нагрева и имеют преимущества перед традиционными СВЧ генераторами на магнетронах. Для построения такого источника энергии требуется задающий генератор и усилитель мощности.

Важной задачей при проектировании твердотельного источника СВЧ энергии является верный расчёт схемы СВЧ усилителя для достижения требуемой выходной мощности СВЧ энергии в рабо-

чей камере. Предложенная методика расчёта позволяет определить необходимые значения параметров полупроводниковых приборов для достижения требуемой выходной мощности.

Приведенный пример расчёта показывает, что современные полупроводниковые приборы позволяют добиться выходной мощности в нагрузке, сравнимой с выходной мощностью магнетрона ( $\approx 500$  Вт) при параллельном включении двух транзисторов. Приведён перечень выпускаемых мощных СВЧ транзисторов, рекомендуемых для применения в установках СВЧ диэлектрического нагрева.

### Литература

1. Архангельский, Ю.С. *Сверхвысокочастотные нагревательные установки для интенсификации технологических процессов* / Ю.С. Архангельский, Н.И. Девяткин. – Саратов: Изд-во Саратов. ун-та, 1983. – 140 с.
2. Архангельский, Ю.С. *Рабочая камера СВЧ электротехнологической установки для модификации полимерных волокон* / Ю.С. Архангельский, С.Г. Калганова // *Вестник СГТУ «Энергетика и электротехника»*. – 2004. – № 1 (2). – С. 86–90.
3. Архангельский, Ю.С. *Элементная база СВЧ электротермического оборудования* / Ю.С. Архангельский, В.А. Воронкин. – Саратов: Саратов. гос. техн. ун-т, 2003. – 212 с.
4. Колесников, Е.В. *Проектирование электротехнологических установок: моногр.* / Е.В. Колесников; под общ. ред. Ю.С. Архангельского. – Саратов: Саратов. гос. техн. ун-т, 2006. – 283 с.
5. Архангельский, Ю.С. *Справочная книга по СВЧ электротермии* / Ю.С. Архангельский. – Саратов: Науч. кн., 2011. – 560 с.
6. Федоров, А.В. *Применение сверхвысокочастотных электронных приборов в установках диэлектрического нагрева* / А.В. Федоров, Ю.С. Архангельский // *Вопросы электротехнологии*. – 2017. – № 2 (15). – С. 80–86.
7. Mackay, A.B. *Frequency agile sources for microwave ovens* / A.B. Mackay, W.R. Tinga, W.A.G. Voss // *Journal of Microwave Power & Electromagnetic Energy*. – 1979. – Vol. 14. – P. 63–76.
8. Voss, W.A.G. *Solid state microwave oven development* / W.A.G. Voss // *Journal of Microwave Power & Electromagnetic Energy*. – 1986. – Vol. 21. – P. 188–189.
9. *Продукция компании «Ampleon»* // *Официальный сайт фирмы «Ampleon»*. – <http://www.ampleon.com> (дата обращения: 14.11.2017).
10. *Продукция компании NXP* // *Официальный сайт фирмы NXP® Semiconductors*. – <http://www.nxp.com> (дата обращения: 14.11.2017).
11. Федоров, А.В. *Установки СВЧ диэлектрического нагрева с перестраиваемой частотой* / А.В. Федоров // *Вестник СамГТУ. Серия «Технические науки»*. – 2017. – № 4 (57). – С. 106–113.
12. Федоров, А.В. *Улучшение параметров СВЧ рабочей камеры с бегущей волной путём перестройки частоты СВЧ генератора* / А.В. Федоров, Ю.С. Архангельский // *Вопросы электротехнологии*. – 2017. – № 1 (14). – С. 36–39.
13. Ченакин, А. *ГУН или ЖИГ? Проблема выбора при проектировании высококачественного синтезатора с ФАПЧ* / А. Ченакин // *Электроника НТБ*. – 2012. – № 6 (120). – С. 118–122.
14. Кувишинов, В. *ЖИГ-генераторы и синтезаторы частот компании Micro Lambda Wireless* / В. Кувишинов, А. Майстренко // *Компоненты и технологии*. – 2015. – № 9. – С. 34–38.
15. Colantonio, P. *High Efficiency RF and Microwave Solid State Power Amplifier* / P. Colantonio, F. Giannini, E. Limiti. – John Wiley & Sons Ltd., 2009. – 511 p.

**Федоров Антон Витальевич**, аспирант кафедры «Электроснабжение и электротехнология (ЭЛЭТ)», Саратовский государственный технический университет им. Гагарина Ю.А., г. Саратов; [faraday@nxt.ru](mailto:faraday@nxt.ru).

Поступила в редакцию 20 ноября 2017 г.

DOI: 10.14529/power180109

## SOLID STATE RF ENERGY SOURCES OF DIELECTRIC HEATING INSTALLATIONS

**A.V. Fedorov**, [faraday@nxt.ru](mailto:faraday@nxt.ru)

Yuri Gagarin Saratov State Technical University of Saratov, Saratov, Russian Federation

Energy sources for RF heating installations are often based on the vacuum generators – magnetrons, however, such sources of microwave energy have certain disadvantages. As an alternative option for a magnetron-based energy source, the scheme of a new energy source of microwave dielectric heating based on semiconductor

devices (solid-state microwave generators) is presented in this paper. It is shown that a solid-state source of RF energy has advantages compared with magnetron-based energy sources of dielectric heating installations: the possibility of gradual changes in the level of generated power and lower voltages power supply. In addition, the solid-state generator allows one to build a broadband microwave dielectric heating installation. The article provides recommendations for the use of semiconductor devices as a reference generator and a powerful amplifier of microwave energy. By applying the recommendations, a solid-state energy source was calculated on the basis of commercially available semiconductor devices. In addition, a microwave power solid state generator is designed comparable with magnetron-based energy sources in terms of their power.

*Keywords: dielectric heating, RF power source, dielectric heating installation, solid-state RF generator, magnetron, RF transistor.*

### References

1. Arkhangelskiy Yu.S., Devyatkin N.I. *Sverkhvysokochastotnye nagrevatel'nye ustanovki dlya intensivatsii tekhnologicheskikh protsessov* [Ultra-high-frequency Heating Plants for the Intensification of Technological Processes]. Saratov, Saratov University Publ., 1983. 140 p.
2. Arkhangelskiy Yu.S., Kalganova S.G. [The Working Chamber of The Microwave Electrotechnological Installation for Updating Polymeric Fibres]. *Vestnik Saratovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Vestnik Saratov State Technical University], 2004, no. 1 (2), pp. 86–90. (in Russ.)
3. Arkhangelskiy Yu.S., Voronkin V.A. *Elementnaya baza SVCh elektrotermicheskogo oborudovaniya* [Element Base of Microwave Electrothermal Equipment]. Saratov, 2003. 212 p.
4. Kolesnikov E.V.; Arkhangelskiy Yu.S. (Ed.) *Proektirovanie elektrotekhnologicheskikh ustanovok* [Design of Electrotechnological Installations]. Saratov, 2006. 283 p.
5. Arkhangelskiy Yu.S. *Spravochnaya kniga po SVCh elektrotermii* [Reference Book on Microwave Electrothermy]. Voronezh, Nauchnaya Kniga Publ., 2011. 560 p.
6. Fedorov A.V., Arkhangelskiy Yu.S. [Application of Microwave Electronic Devices for Dielectric Heating Units]. *Voprosy elektrotekhnologii* [Electrotechnology Problems], 2017, no. 2 (15), pp. 80–86. (in Russ.)
7. Mackay A.B., Tinga W.R., Voss W.A.G. Frequency Agile Sources for Microwave Ovens. *Journal of Microwave Power & Electromagnetic Energy*, 1979, vol. 14, pp. 63–76.
8. Voss W.A.G. Solid State Microwave Oven Development. *Journal of Microwave Power & Electromagnetic Energy*, 1986, vol. 21, pp. 188–189.
9. *Ampleon official site*. Available at: <http://www.ampleon.com> (accessed 14.11.2017).
10. *NXP® Semiconductors official site*. Available at: <http://www.nxp.com> (accessed 14.11.2017).
11. Fedorov A.V. [Installation of Microwave Dielectric Heating with Tunable Frequency]. *Vestnik of Samara State Technical University*, 2017, no. 4 (57), pp. 106–113. (in Russ.)
12. Fedorov A.V., Arkhangelskiy Yu.S. [Improving Parameters of the Working Chamber with the Traveling Wave of the Microwave Frequency by Tuning the Microwave Oscillator]. *Voprosy elektrotekhnologii* [Electrotechnology Problems], 2017, no. 1 (14), pp. 36–39. (in Russ.)
13. Chenakin A. VCO or YIG? Selection Problem in the Process of Developing High Quality Synthesizer with PLL. *Elektronika: NTB* [Electronics: STB], 2012, no. 6 (120), pp. 118–122. (in Russ.)
14. Kuvshinov V., Maistrenko A. [Iron-yttrium Garnet Generators and Frequency Synthesizers of Micro-Lambda Wireless Company]. *Komponenty i tekhnologii* [Components & Technologies], 2015, no. 9, pp. 34–38. (in Russ.)
15. Colantonio P, Giannini F., Limiti E. *High Efficiency RF and Microwave Solid State Power Amplifier*. John Wiley & Sons Ltd, 2009. 514 p.

*Received 20 November 2017*

---

### ОБРАЗЕЦ ЦИТИРОВАНИЯ

Федоров, А.В. Твердотельные источники энергии установок СВЧ диэлектрического нагрева / А.В. Федоров // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». – 2018. – Т. 18, № 1. – С. 68–74. DOI: 10.14529/power180109

### FOR CITATION

Fedorov A.V. Solid State RF Energy Sources of Dielectric Heating Installations. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Power Engineering*, 2018, vol. 18, no. 1, pp. 68–74. (in Russ.) DOI: 10.14529/power180109