

# МЕТОДИКА ВЫБОРА ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКИХ СИСТЕМ СВЧ УСТРОЙСТВ ТИПА БЕГУЩЕЙ ВОЛНЫ ДЛЯ ТЕРМООБРАБОТКИ МАТЕРИАЛОВ

С.Ю. Шахбазов<sup>1</sup>, И.В. Назаров<sup>2</sup>, В.Н. Нефедов<sup>2</sup>, А.С. Черкасов<sup>2</sup>  
<sup>1</sup>Научно-исследовательский институт перспективных материалов и технологий;  
<sup>2</sup>Московский государственный институт электроники и математики  
E-mail: [lmis@miem.ru](mailto:lmis@miem.ru)

New dielectric materials classification with complex part of specific conductivity as a basic parameter is suggested. The scientific substantiation is produced for dielectric materials division into three groups: with low, medium and high dielectric losses. Electrodynamic systems constructions for microwave heating devices are presented for materials with different dielectric losses.

На основании классификации диэлектриков, приведенных в работе Хиппеля [1], диэлектрики в зависимости от величины тангенса угла диэлектрических потерь классифицируются на диэлектрики с малыми потерями ( $tg\delta = 0,0001...0,05$ ), со средними потерями ( $tg\delta = 0,05...50$ ) и диэлектрики с высокими потерями ( $tg\delta > 50$ ).

Такая классификация не дает необходимой информации о величине комплексной части относительной диэлектрической проницаемости материала ( $\varepsilon''$ ) и о величине постоянной затухания ( $\alpha$ ) энергии электромагнитного поля сверхвысоких частот в обрабатываемом материале.

Современные научные публикации в области термообработки материалов показывают, что для классификации диэлектриков целесообразно использовать непосредственно величину комплексной части относительной диэлектрической проницаемости материала или фактор потерь ( $\varepsilon''$ ), который входит в основные уравнения, описывающие распределение, как величины СВЧ мощности удельных потерь, так и распределение температурного поля в материале.

В настоящее время отработаны методики определения комплексной части относительной диэлектрической проницаемости материала для диэлектриков с малыми, средними и высокими диэлектрическими потерями [2...5].

В многочисленных справочниках, например, [6...7] по диэлектрическим материалам, приводится зависимость параметра фактора потерь от температуры материала. В этой связи в настоящей работе предложена новая классификация диэлектрических материалов, которая основана на анализе многочисленных научных публикациях отечественных и за рубежом авторов. Согласно предлагаемой классификации диэлектрики также можно распределить на три основные группы:

1. Диэлектрики с малыми потерями  $\varepsilon'' < 0,12$  - радиопрозрачные материалы, которые не содержат свободной и связанной воды (пластические массы с различными наполнителями, полипропилен, фторопласт, полиэтилен и т.д.);

2. Диэлектрики со средними потерями  $0,12 < \varepsilon'' < 1,2$  - относительная влажность материалов не более 18% (материалы не содержат свободной воды, а содержат только связанную воду);

3. Диэлектрики с высокими потерями  $1,2 < \varepsilon'' \leq 12$  - высокая относительная влажность материалов до 100%.

Такая классификация более наглядна, так как она основана на изменении определенных физических параметров материала с точки зрения поглощения СВЧ энергии. Более того, в научных публикациях делались аналогичные попытки, например для материалов с малыми диэлектрическими потерями [8].

Из уравнений Максвелла для произвольной электродинамической системы, помещенной в изотропную среду с диэлектрическими потерями, показано, что если энергии электромагнитного поля распространяется в одном направлении, например, вдоль оси "z", то величина постоянной затухания ( $\alpha_z$ ) определяется выражением:

$$\alpha_z = \frac{\pi \cdot \varepsilon'' \cdot \lambda_{волн}}{\lambda^2}, \quad (1)$$

где:  $\lambda$  - длина волны источника СВЧ энергии;

$\lambda_{волн}$  - длина бегущей волны в электродинамической системе с обрабатываемым материалом;

$\varepsilon''$  - комплексная часть относительной диэлектрической проницаемости обрабатываемого материала (фактор потерь).

Из соотношения (1) следует основополагающий принцип построения СВЧ устройств термообработки диэлектрических материалов в режиме бегущей волны.

Постоянная затухания определяется произведением комплексной части относительной диэлектрической проницаемости обрабатываемого материала ( $\varepsilon''$ ) на длину волны в электродинамической системе ( $\lambda_{волн}$ ) при фиксированном значении длины волны источника СВЧ энергии ( $\lambda$ ).

В многочисленных научных публикациях показано, что при заданных геометрических и электрофизических параметрах обрабатываемого материала, а также коэффициента полезного действия СВЧ устройства типа бегущей волны, величина постоянной затухания энергии электромагнитного поля в материале имеет конкретное значение ( $\alpha_z = const$ ).

Из анализа классификации диэлектрических материалов следует, что комплексная составляющая относительной диэлектрической проницаемости обрабатываемых материалов может изменяться на два порядка. Следовательно, для того, чтобы разброс температурного поля в материале был минимальным, необходимо на два порядка менять и длину волны в электродинамической системе, чтобы величина постоянной затухания оставалась неизменной.

В настоящей статье представлены результаты анализа распространяющихся длин волн в различных конструкциях электродинамических систем СВЧ устройств.

1). Секции двумерно-периодических замедляющих систем.

Пусть энергия электромагнитного поля распространяется вдоль оси “z”. Двумерно-периодическая система характеризуется периодом  $L_z$  вдоль оси “z” и фазовым сдвигом  $\varphi_z$ , а в направлении оси “x” система характеризуется периодом  $L_x$  и фазовым сдвигом  $\varphi_x$ . В направлении оси “x” секция ограничена электрическими стенками, расположенными в плоскостях симметрии замедляющей системы и между этими стенками устанавливается стоячая замедленная волна. Обработываемый материал движется в направлении оси “x”, перпендикулярно направлению распространения энергии электромагнитного поля. Длина волны в двумерно-периодической системе определяется в виде:

$$\lambda_g = \frac{2\pi \cdot L_z}{\varphi_z} \quad (2)$$

Период замедляющей системы (из конструктивных соображений) обычно лежит в пределах:

$$L_z = (0,2 \dots 0,5) \cdot \lambda, \quad (3)$$

а фазовый сдвиг для реализации возможности широкополосного согласования лежит в пределах:

$$\varphi_z = (0,2 \dots 0,25) \cdot \pi \quad (4)$$

Подставляя эти значения в выражение (2), получим:

$$\lambda_g = (1,5 \dots 5) \cdot \lambda \quad (5)$$

2). Известно, что в волноводах длина волны на основном виде колебаний  $H_{10}$  определяется в виде:

$$\lambda_g = \frac{\pi \cdot d \cdot \lambda}{2 \cdot a \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{\lambda}{2a}\right)^2}} \quad (6)$$

Оценка этой величины при условии:

$$d = (0,1 \dots 0,3) \cdot a \quad (7)$$

для волновода  $a = 7,4 \text{ см}$ .

$$\lambda_g = (1,5 \dots 0,5) \cdot \lambda \quad (8)$$

3). Длина волны в одномерно-периодической замедляющей системе в направлении оси “z” определяется в виде:

$$\lambda_g = \frac{2\pi \cdot L_z}{\varphi_z} \quad (9)$$

Период пространства взаимодействия замедляющей системы при фазовом сдвиге  $\varphi_z \approx \pi$  обычно лежит в пределах:

$$L_z = (0,1 \dots 0,025) \cdot \lambda \quad (10)$$

$$\lambda_g = (0,2 \dots 0,05) \cdot \lambda, \quad (11)$$

при условии, что коэффициент замедления изменяется в пределах  $k_{зам} = 5 \dots 20$ .

Следовательно, показано, что длина волны в электродинамических системах также меняется на два порядка.

Таким образом, впервые в соответствии с классификацией материалов с различными диэлектрическими потерями, представлено научное обоснование методики выбора конструкции электродинамической системы СВЧ устройств.

Основные результаты методики выбора конструкции электродинамической системы СВЧ устройства для высокоэффективной термообработки материалов с различными диэлектрическими потерями сведены в таблицу 1.

Таблица 1. Конструкции электродинамических систем СВЧ устройств термообработки материалов с различными диэлектрическими потерями

Диэлектрики с малыми потерями $\varepsilon'' < 0,12$	Диэлектрики со средними потерями $0,12 < \varepsilon'' < 1,2$	Диэлектрики с высокими потерями $1,2 < \varepsilon'' < 12$
Двумерно-периодические замедляющие системы	Волноводные системы	Одномерно-периодические замедляющие системы
$\lambda_g = (1,5 \dots 5) \cdot \lambda$	$\lambda_g = (1,5 \dots 0,5) \cdot \lambda$	$\lambda_g = (0,2 \dots 0,05) \cdot \lambda$

2. Л.Р. Кирилло, В.Г. Лукьянец, М.Л. Чернух, В.В. Ярошевич. Определение комплексной диэлектрической проницаемости по результатам амплитудных измерений//Известия вузов. Сер. Радиоэлектроника. – 1984. – т. 27, № 1. – стр. 81-84.
3. В.И. Полищук. Метод и установка для измерения электрических параметров слабопоглощающих диэлектриков на базе панорамного измерителя КСВН и ослаблений // Электронная техника. Сер. 1, Электроника СВЧ. – 1988. – вып. 9. – стр. 52-56.
4. В.А. Перевошиков, А.Ю. Потапов. Метод измерения электрических параметров диэлектриков // Электронная техника. Сер. СВЧ – техника, вып. 1, 1992.
5. В.Н. Великоцкий, В.Я. Двадненко, В.А. Коробкин, И.Н. Ярмач. Определение тангенса угла потерь высококачественных диэлектриков // Электронная техника, Сер. Электроника СВЧ, вып. 6, 1988, стр. 32-35.
6. Справочник по электротехническим материалам//Под редакцией Ю.В. Корицкого, В.В. Пасынкова, Б.М. Тареева. Москва: Энергия. Т.1. 1974.
7. Справочник по электротехническим материалам//Под редакцией Ю.В. Корицкого, В.В. Пасынкова, Б.М. Тареева. Москва: Энергия. Т.2. 1974.
8. В.Н. Нефедов. Сверхвысокочастотные устройства для термообработки материалов больших площадей. Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук. Москва. 2001.