

УДК 621.385.6:66.040:004.94

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ СВЧ-НАГРЕВА МАТЕРИАЛОВ С РАЗЛИЧНЫМИ ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИМИ ПАРАМЕТРАМИ В ПИРАМИДАЛЬНОЙ КАМЕРЕ

И.Н. КИЖЛАЙ, А.К. СИНИЦЫН, А.В. ЩЕРБАКОВ

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
П.Бровки, 6, Минск, 220013, Беларусь

Поступила в редакцию 8 сентября 2008

В среде FEMLAB проведено моделирование электромагнитных процессов и процессов СВЧ-нагрева в пирамидальной камере с одномерным раскрытием рупора в широком диапазоне изменения электрических параметров ϵ и σ нагрузки в виде диэлектрической пластины. Показано, что в диапазонах изменения $\epsilon=2-40$, $\sigma=0,1-10$ в указанной конструкции камеры сохраняются устойчивое распределение поля в виде стоячей квази- H_{10} волны и эффективный разогрев нагрузки при обеспечении однородности разогрева в поперечном относительно плоскости раскрытия рупора сечении.

Ключевые слова: СВЧ-камера, диэлектрическая проницаемость и проводимость материалов, мощность поглощения, распределение поля и мощность нагрева, моделирование.

Введение

Пирамидальная СВЧ-камера для нагрева и СВЧ-обработки материалов, предложенная в [1], обладает весьма важным для технологических целей свойством: по крайней мере в одном измерении обеспечивается равномерность разогрева. В работах [2–4] проведен электродинамический расчет ряда модификаций пирамидальной СВЧ-камеры. При этом, однако, остается мало исследованным вопрос о влиянии электрофизических параметров материалов на процессы их СВЧ-нагрева (т.е. поглощения СВЧ-мощности в объеме обрабатываемых материалов).

В данной статье с использованием простейшей модификации пирамидальной камеры с одномерным раскрытием рупора в среде FEMLAB проведено моделирование электродинамических процессов и процессов поглощения СВЧ-мощности в диэлектрической пластине в широком диапазоне изменения ее электрофизических параметров ϵ и σ . Для каждого значения ϵ найден оптимальный диапазон значений σ , при которых нагрев обрабатываемого СВЧ полем материала максимален.

Схема пирамидальной СВЧ-камеры с одномерным раскрытием рупора и нагрузкой в виде диэлектрической пластины с потерями

Чертеж камеры в плоскости раскрытия рупора приведен на рис. 1.

Масштаб ко всем элементам конструкции камеры указан на чертеже (15 см). Расстояние от штыря магнетрона 1 до короткозамыкающей стенки согласующего волновода фиксировано во всех вариантах и равно 4,38 см; рабочая частота — 2,45 ГГц; ВЧ-ток на штыре магнетрона фиксирован во всех вариантах и равен 1 А; ширина камеры (в нормальном к чертежу направлении Z) равна 4,5 см

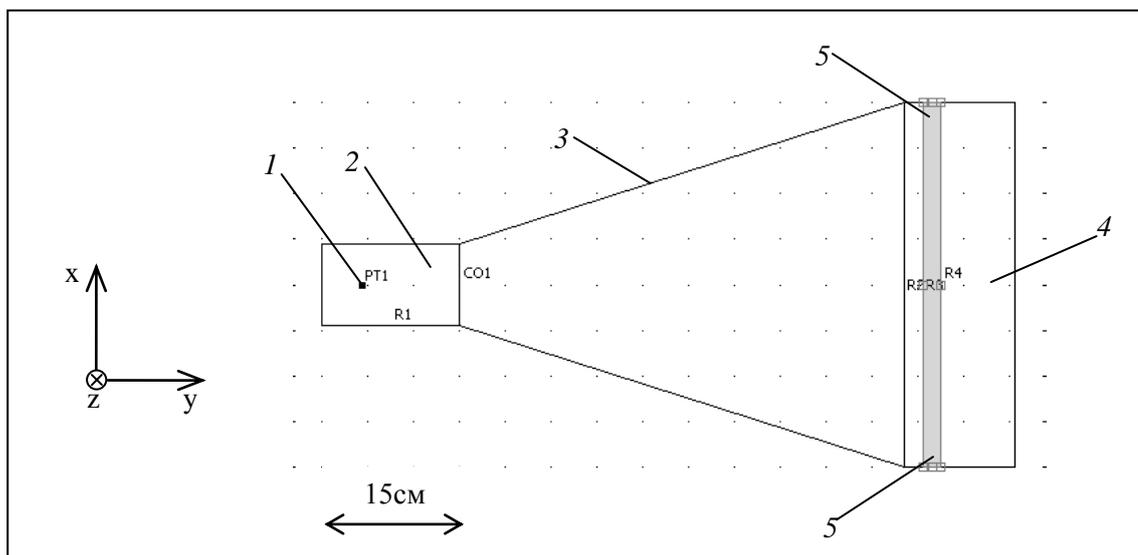


Рис. 1. Схема пирамидальной СВЧ — камеры в плоскости раскрыва рупора: 1 — штырь магнетрона (возбуждающий элемент камеры); 2 — согласующий волновод; 3 — рупорная часть камеры; 4 — прямоугольная рабочая область; 5 — диэлектрическая пластина (нагрузка камеры)

Результаты расчета режимов камеры при различных ϵ , σ

Расчеты проводились при трех значениях ϵ : 2, 20, 40 и в диапазоне изменения σ в пределах от 0,0001 до 100. Потери в стенках игнорировались. Во втором столбце таблиц приведены значения P — общей мощности, выделяемой в объеме пластины, в третьем столбце — максимальное значение E_z по всему объему камеры.

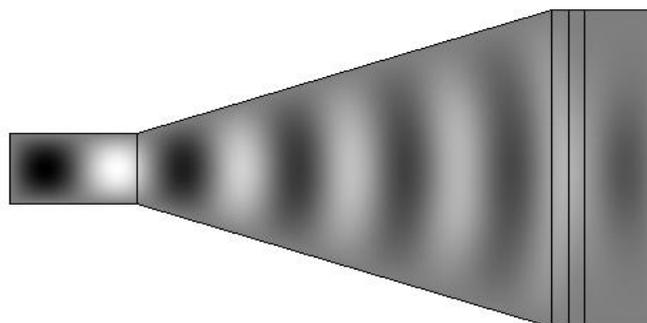
Результаты расчетов режимов камеры при различных ϵ , σ

$\epsilon=2$		
σ	$P(\text{Вт})$	$E_{z_max}(\text{В/м})$
0,0001	0,4	18
0,001	4	181
0,01	40	1795
0,1	244	10890
1	108	4810
10	29	1330
100	10	440
$\epsilon=20$		
0,0001	0,007	0,319
0,001	0,07	3,18
0,01	0,71	31
0,1	7,1	317
1	52	2320
10	32	1440
100	9,1	400
$\epsilon=40$		
0,0001	0,13	5,9
0,001	1,3	59
0,01	13	595
0,1	113	5048
1	91	4080
10	32	1470
100	9,2	408

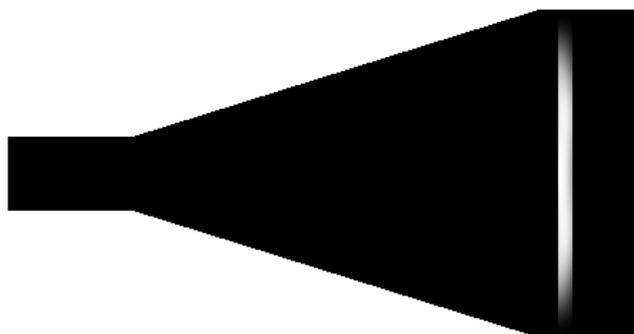
Как видно из приведенных данных, интенсивный нагрев пластины имеет место в широком диапазоне $\sigma=0,1-10$ для всех ϵ .

Электромагнитные и тепловые процессы в камере

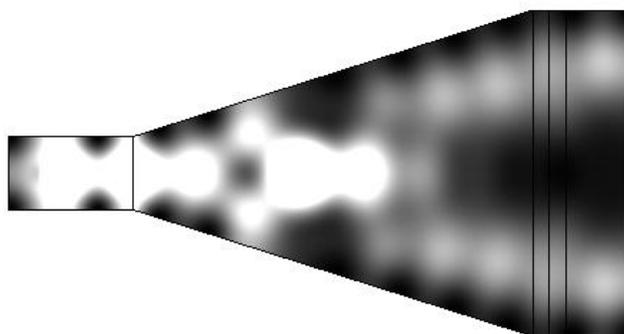
Большой интерес представляют результаты исследования особенностей электромагнитных и тепловых процессов в камере при различных значениях ϵ , σ нагружающей камеру пластины (рис. 2).



a



б



в

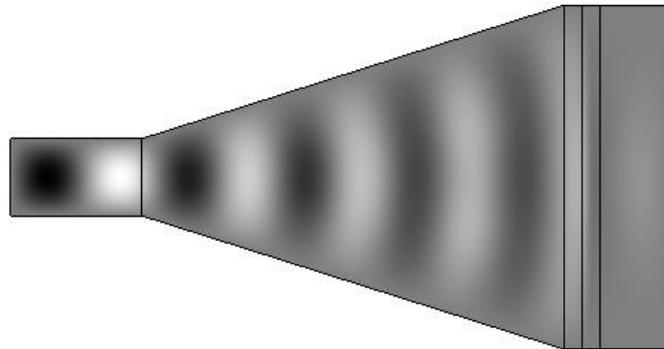
Рис. 2. Распределения следующих величин при $\epsilon=2$, $\sigma=0,1$: *a* — E_z ($E_{z\max}=10\ 890$ В/м),
б — удельного теплового нагрева (белому цвету соответствует 10^6 Вт/м³),
в — плотности запасенной энергии электромагнитного поля

Из анализа приведенных распределений следует:

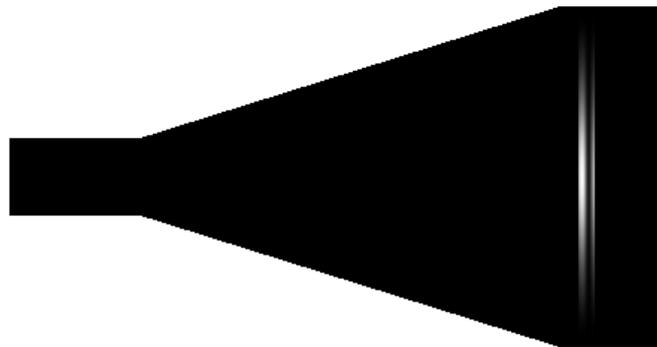
- а) сохраняется структура основной волны H_{10} (стоячая волна);
- б) нагрев диэлектрической пластины по толщине равномерный;

в) запасенная энергия распределяется симметрично; максимум распределения — в начальной области рупора; энергия накапливается также в прямоугольной (рабочей) части камеры.

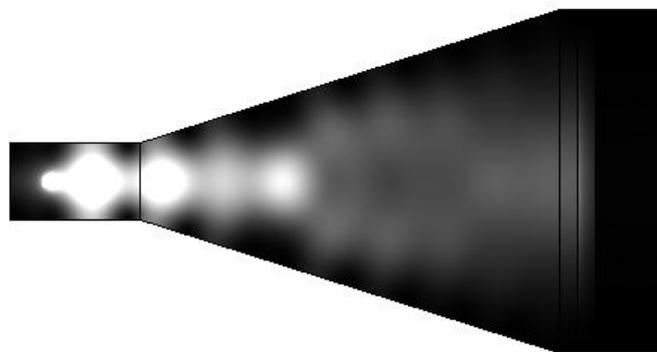
На рис. 3 представлены аналогичные предыдущему распределения при $\epsilon=20$, $\sigma=1$.



a



б



в

Рис. 3. Распределения следующих величин при $\epsilon=20$, $\sigma=1$: *a* — E_z , *б* — удельного теплового нагрева, *в* — плотности запасенной энергии электромагнитного поля

Из их анализа следует:

а) как и в предыдущем случае сохраняется структура стоячей H_{10} -волны (черному цвету на рис. 3, *a* соответствует $E_{z\max}=2300$ В/м),

б) в отличие от предыдущего случая область максимального нагрева по толщине пластины распределяется на две (белому цвету на рис. 3, *б* соответствует удельная мощность $5,7 \cdot 10^5$ Вт/м³);

в) СВЧ-энергия запасается в основном в рупорной части камеры и в самой пластине, в конце прямоугольной части накопление энергии, в отличие от предыдущего случая, практически отсутствует.

Указанные отличия частично обусловлены значительно большим значением ϵ : в толще пластины длина волны укорачивается пропорционально $1/\sqrt{\epsilon}$ — этим обусловлена двойная область нагрева внутри пластины; благодаря резкому изменению волнового сопротивления W^0 на границе пластины происходит частичное отражение волны от пластины (W^0 в камере равно 377 Ом, в пластине — $377/\sqrt{\epsilon}$ Ом).

Проходящая в пластину волна практически полностью поглощается. В результате за пластиной поле практически отсутствует.

На рис. 4 представлен случай $\epsilon=40$, $\sigma=0,1$.

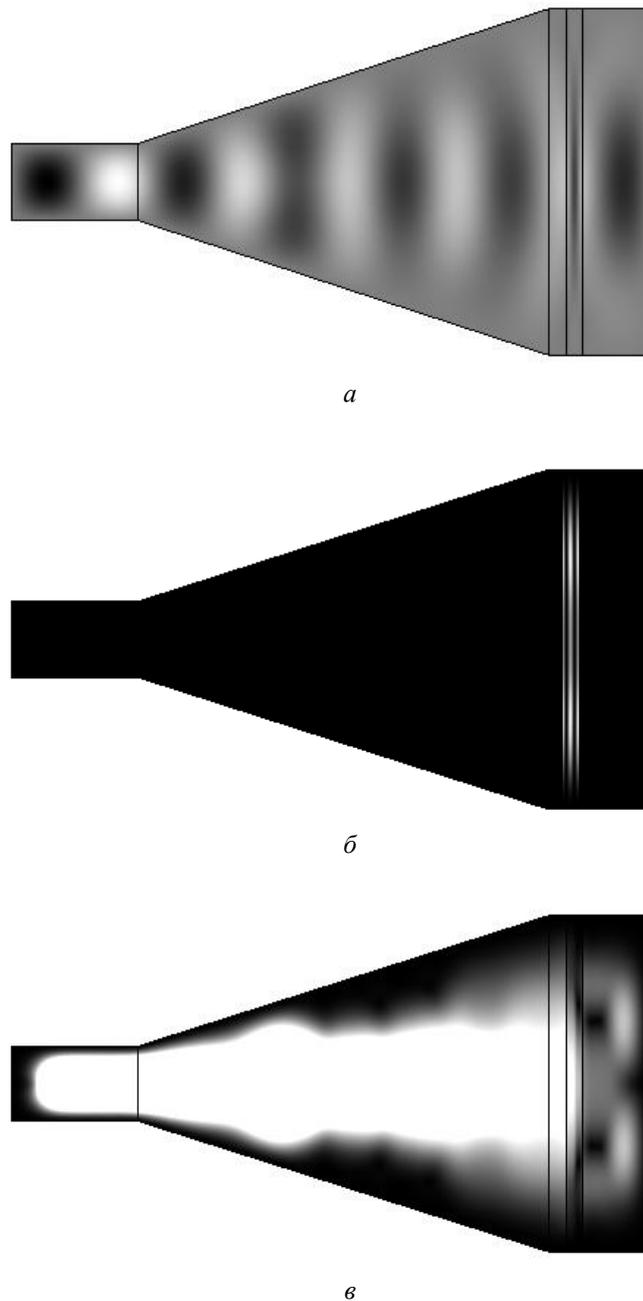


Рис. 4. Распределения следующих величин при $\epsilon=40$, $\sigma=0,1$: a — E_z , $б$ — удельного теплового нагрева, $в$ — плотности запасенной энергии электромагнитного поля

Здесь имеются отличия как от первого, так и от второго приведенных выше случаев:

а) несмотря на высокое значение ϵ , волна проходит через пластину (на рис. 4,а черный цвет соответствует $E_{z\max}=5000$ В/м); это обусловлено относительно малым (при $\epsilon=40$) значением σ : поглощение СВЧ-энергии в пластине относительно мало;

б) область максимального нагрева по толщине пластины расщепляется на три (белому цвету на рис. 4, б соответствует удельная мощность поглощения $9,6 \cdot 10^5$ Вт/м³); это обусловлено сильным укорочением длины волны внутри пластины, пропорционально $\epsilon^{-1/2}$: образуются три максимума стоячей волны непосредственно по толщине пластины.

Однако, как и в предыдущих случаях, структура поля не нарушается — она соответствует стоячей H_{10} -волне. Это весьма существенно, поскольку в данном случае распределение поля и разогрева обрабатываемого материала в Z-направлении однородно, что является важным достоинством пирамидально-прямоугольной СВЧ-камеры.

Заключение

Проведенные исследования подтвердили (вместе с результатами работ [2–4] высокую перспективность СВЧ-камеры пирамидально-прямоугольной конструкции, в которой обеспечивается устойчивое распределение поля типа стоячей H_{10} -волны в широком диапазоне изменения электрофизических параметров обрабатываемого материала. При этом в Z-направлении обеспечивается равномерный разогрев. Эффективный режим нагрева сохраняется в широком диапазоне изменения ϵ (2–40) и σ (0,1–10).

THE SIMULATION OF UHF-HEATING WITH DIFFERENT ELECTRO PHYSICAL PARAMETERS PROCESS IN PYRAMIDAL CHAMBER

I.N. KIZHLAI, A.K. SINITSYN, A.V. SHERBAKOV

Abstract

In FEMLAB the simulation of electromagnetic and UHF heating processes in pyramidal chamber with one- dimension horn aperture in wide band of change of electro physics parameters ϵ and σ of load. It is demonstrated that in bands of change $\epsilon = 2-40$, $\sigma = 0,1-10$ in pyramidal chamber the stable field distribution and effective heating of load are conserved.

Литература

1. Кураев А.А., Малевич И.Ю., Попкова Т.Л. // Радиотехника и электроника. Минск, 2000. Вып. 25. С. 129–135.
2. Kizhlai I.N., Kurayev A.A., Sinitsyn A.K., Sherbakov A.V. // 2006 IEEE Int. Vacuum Electr. Conf. — IVEC/IVESC 2006, April 25-27, Monterey, USA. P. 391–392.
3. Кижлай И.Н., Кураев А.А., Синицын А.К., Щербаков А.В. // Успехи современной радиоэлектроники. 2007. № 10. С. 70–74.
4. Кижлай И.Н., Кураев А.А., Синицын А.К., Щербаков А.В. // Докл. БГУИР. 2008. № 6. С. 123–126.