

УДК 621.385.6:66.040:004.94

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ЛИНЕЙНО-ПИРАМИДАЛЬНОЙ КАМЕРЫ ДЛЯ СВЧ-НАГРЕВА И РАСЧЕТ ТЕПЛОВЫХ РЕЖИМОВ

И.Н. КИЖЛАЙ, А.К. СИНИЦЫН

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

Поступила в редакцию 11 марта 2011

Выполнены расчет фильтров высших мод и тепловые расчеты режимов работы пирамидально-прямоугольной СВЧ-камеры с линейным раскрытием рупора. Проведено экспериментальное исследование макета камеры. Показана необходимость решетчатых фильтров мод для обеспечения поперечной равномерности разогрева материала в рабочей области.

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

Введение

В работе [1,2] изложены электродинамические методы расчета и оптимизации пирамидально – прямоугольных камер с учетом диэлектрической нагрузки. Было, в частности, показано, что в камерах происходит возбуждение высших (паразитных) мод, что затрудняет обеспечение поперечной равномерности разогрева материала в рабочей области. В настоящей статье изложены результаты теплового расчета камеры с линейным раскрытием рупора, приведен расчет фильтров высших типов волн. Приведены результаты испытаний экспериментального макета камеры с установленными решетчатыми фильтрами высших мод, существенно улучшающих поперечную равномерность разогрева материала в рабочей области.

Расчет конструкции решетчатого поддона

По результатам предварительного испытания линейного рупора для улучшения равномерности распределения поля по оси y было принято решение о разработке и изготовлении фильтров высших типов волн (рис. 1).

Цель расчета и оптимизации конструкции решетчатого поддона (нижнего фильтра) состоит в таком оптимальном выборе его геометрии, которая обеспечивает стабилизацию основной рабочей моды H_{10} в области расположения обрабатываемого диэлектрического материала и предотвращении возбуждения паразитных высших волн E_{mn} , а также H_{mn} -волн с $m \neq 1$ и $n \neq 0$. В то же время при работе с верхним решетчатым фильтром необходимо в смешанных режимах обеспечить возбуждение и селекцию H_{32} и H_{20} мод. Кроме того, в рабочей области необходимо обеспечить максимум E_y составляющей и минимум H_y составляющей (для минимизации излучения через входную и выходную щели). Последнее условие определяет высоту ламели h_z :

$$h_z + \frac{L_d}{2} = (2k + 1) \Lambda / 4,$$

где L_d – ширина рабочей щели, k – целое число, Λ – длина волны H_{10} в поддоне:

$$\Lambda = \frac{\lambda_0}{\sqrt{1 - \left(\frac{m\pi}{a}\right)^2 - \left(\frac{n\pi}{b}\right)^2}}; \quad a = \frac{D'_x}{\lambda_0 / 2\pi}; \quad b = \frac{D'_y}{\lambda_0 / 2\pi}.$$

$\lambda_0 = 12,25\text{ см}$ – длина рабочей волны в пространстве, D'_x, D'_y – продольный (x) и поперечный (y) размеры поддона (для $D'_x = 40\text{ см}$, $D'_y = 20\text{ см}$ $\Lambda \cong 12,4\text{ см}$).

С точки зрения невозбуждения паразитных мод необходимо выбрать $k=0$, однако для улучшения теплоотвода выбрано $k=1$ ($h_z=8,3\text{ см}$).

Количество ламелей должно быть достаточно большим, чтобы обеспечить невозбуждение (закритичность) высших мод из-за малого расстояния между ламелями фильтра. С другой стороны, их большое число приводит к дополнительным потерям в металле.

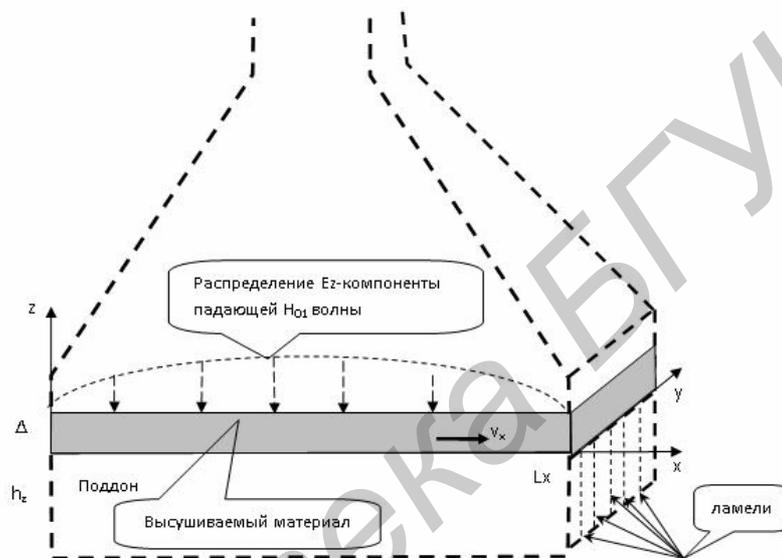


Рис. 1. Схема СВЧ обработки материала в рупорной камере

Условие невозбуждения высших H_{mn} мод ($m>1, n>0$) в пространстве между ламелями, заполненном воздухом ($\epsilon \cong 1$)

$$\left(\frac{m\pi}{a}\right)^2 + \left(\frac{n\pi(n_L + 1)}{b}\right)^2 > 1$$

выполняется для приведенных выше размеров уже при числе ламелей $n_L=2$.

Однако, если рабочее пространство заполнено диэлектрическим материалом с $\epsilon > 3$, расчет показывает, что в рабочей области возбуждаются высшие моды.

Если предположить, что область между ламелями заполнена диэлектрическим материалом, то условие невозбуждения высших H_{mn} мод имеет вид:

$$\left(\frac{m\pi}{a}\right)^2 + \left(\frac{n\pi(n_L + 1)}{b}\right)^2 > \epsilon.$$

Из него следует, что для $\epsilon=10$ в данном случае требуется не менее 9 ламелей.

Ввиду того, что диэлектрик расположен непосредственно над ламелями, а не между ними, их достаточное количество примерно вдвое меньше, чем прогнозируемое по приведенной формуле. Моделирование в среде FEMLAB показало, что минимальное число ламелей в конструкции может быть равно 5. Уменьшение их числа приводит к разрушению механизма селекции основных рабочих волн. При 5 ламелях возможны возбуждения лишь квази – H_{10}, H_{20} и H_{30} мод. Поэтому на основании перечисленных причин выбрана конструкция решетчатого поддона с пятью ламелями (ребрами).

Расчет теплового режима движущегося диэлектрика

В рассматриваемой рупорной камере реализуется равномерное по оси u распределение источников тепловыделения, что позволяет использовать при расчетах двумерную математическую модель разогрева материала, для которой разработана эффективная методика расчета описанная ниже.

Для описания распределения температуры в движущемся листовом материале (рис. 1) используем нестационарное двумерное уравнение теплопроводности с конвективным членом:

$$\rho(T)C(T)\left(\frac{\partial T}{\partial t'} + v'_x \frac{\partial T}{\partial x'}\right) = \frac{\partial}{\partial z'}\left(\lambda(T)\frac{\partial T}{\partial z'}\right) + \frac{\partial}{\partial x'}\left(\lambda(T)\frac{\partial T}{\partial x'}\right) + q(z', x'), \quad (1)$$

где ρ [кг / м³] – плотность материала, C [Дж / кг · град] – его теплоемкость, T [град] – температура, λ [Вт / м · град] – коэффициент теплопроводности, q [Вт / м³] – мощность источников, $0 \leq z' \leq L'_d$; $0 \leq x' \leq D'_x$.

Граничные условия:

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial z'} \Big|_{\Gamma_i} = -\alpha_{\Gamma_i} (T|_{\Gamma_i} - T^{\Gamma_i}), \quad (2)$$

α_{Γ_i} [Вт / м²град] – коэффициент теплообмена на i -й границе, T^{Γ_i} – температура воздуха, обдувающего i -ю границу. Введем следующие безразмерные переменные: $\Delta T = T_{\max} - T_0$; $u = (T - T_0) / \Delta T$; $t = t' \lambda_0 / L_d^2 \rho_0 C_0$; $v = v' \rho_c L_d \rho_0 C_0 / \lambda_0$; $g(u) = \lambda(u) / \lambda_0$; $\rho_c = \rho C / \rho_0 C_0$; $f = q L_d^2 / (\Delta T \lambda_0)$; $Bi = \alpha L_d / \lambda_0$; $z = z' / L_d$; $x = x' / L_d$; и запишем задачу в следующем безразмерном виде:

$$\rho_c(u) \frac{\partial u}{\partial t} + v \frac{\partial u}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial z} \left(g(u) \frac{\partial u}{\partial z} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left(g(u) \frac{\partial u}{\partial x} \right) + f(z, x); \quad 0 \leq z \leq 1; \quad 0 \leq x \leq L = D_x / L_d. \quad (3)$$

$$\frac{du}{dz} \Big|_{0,1} = Bi^{0,1} (u|_{0,1} + u^{0,1}); \quad \frac{du}{dx} \Big|_{0,L} = Bi^{0,L} (u|_{0,L} + u^{0,L}). \quad (4)$$

Для решения уравнения (4) использовался классический метод сеток. Строилась абсолютно-устойчивая неявная конечно-разностная схема.

$$\rho_c(u) \frac{u^{k+1} - u^k}{\tau} = \left[-v \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial z} \left(g(u) \frac{\partial u}{\partial z} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left(g(u) \frac{\partial u}{\partial x} \right) \right]^{k+1} + f(u^k, z, x),$$

которая после преобразований записывается в виде

$$\left[\frac{\partial}{\partial z} \left(g(u) \frac{\partial u}{\partial z} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left(g(u) \frac{\partial u}{\partial x} \right) - v \frac{\partial u}{\partial x} - \rho_c \frac{u}{\tau} \right]^{k+1} = -f(u^k, z, x) - \rho_c \frac{u^k}{\tau}. \quad (5)$$

Решение уравнения (5) на следующем слое производилось оригинальным прямым методом блочно-матричной прогонки, который детально изложен в работе [3]. Данный метод оказывается абсолютно устойчивым, экономичным и избавлен от основного недостатка методов расщепления, которые проявляются при расчете на области в виде длинного прямоугольника ($L \gg 1$).

Разработана программа, которая позволяет производить расчет времени разогрева материала, при заданной мощности и поперечном распределении тепловых источников. Для оценки предельных возможностей теплового модуля ниже приведены три варианта расчета прогрева слоя поглощающего диэлектрического материала распределенного в ближней зоне рупора прямоугольной области размером 2см×20см×40см при условии равномерного по пло-

пада и экспоненциально затухающего по глубине как e^{-Kz} теплового источника мощностью 1 кВт.

На рис. 2,а-в изображены 10 изотерм через равные промежутки времени для трех выбранных материалов и указано максимальное время, соответствующее последней изотерме. Расчет останавливался при достижении температуры 100 °С. Наличие такого программного модуля позволяет быстро производить оценку времени разогрева испытываемых материалов и вносить необходимые коррективы в процесс обработки.

Параметры выбранных материалов:

Вариант 1 (материал с теплофизическими свойствами воды – рис. 1,а)

$\rho_0[\text{кг/м}^3]=1000$; $C_0[\text{дж/кг град}]=4210$; $La_0[\text{вт/м град}]=0,551$; $Ld[\text{М}]=0,02$; $T_0[\text{ГрадС}]=20$; $T_{\text{max}}[\text{градС}]=120$; $T^0[\text{градС}]=30$; $T^L[\text{градС}]=30$; $al_0[\text{вт/м}^2 \text{град}]=30$; $Bi=1,1$; $al_L[\text{вт/м}^2 \text{град}]=30$; $q[\text{вт/м}^3]=1200000$; $Kz=0,5$.

Вариант 2 (мокрый песок с влажностью 50%, рис. 1,б)

$\rho_0[\text{кг/м}^3]=1750$; $C_0[\text{дж/кг град}]=2400$; $La_0[\text{вт/м град}]=0,65$; $Ld[\text{М}]=0,02$; $T_0[\text{ГрадС}]=20$; $T_{\text{max}}[\text{градС}]=120$; $T^0[\text{градС}]=30$; $T^L[\text{градС}]=30$; $al_0[\text{вт/м}^2 \text{град}]=30$; $Bi=0,92$; $al_L[\text{вт/м}^2 \text{град}]=30$; $q[\text{вт/м}^3]=1200000$; $Kz=0,5$.

Вариант 3 (песок 30% влажности, рис. 1,в)

$\rho_0[\text{кг/м}^3]=2000$; $C_0[\text{дж/кг град}]=1850$; $La_0[\text{вт/м град}]=0,68$; $Ld[\text{М}]=0,02$; $T_0[\text{ГрадС}]=20$; $T_{\text{max}}[\text{градС}]=120$; $T^0[\text{градС}]=30$; $T^L[\text{градС}]=30$; $al_0[\text{вт/м}^2 \text{град}]=30$; $Bi=0,88$; $al_L[\text{вт/м}^2 \text{град}]=30$; $q[\text{вт/м}^3]=1200000$; $Kz=0,5$.

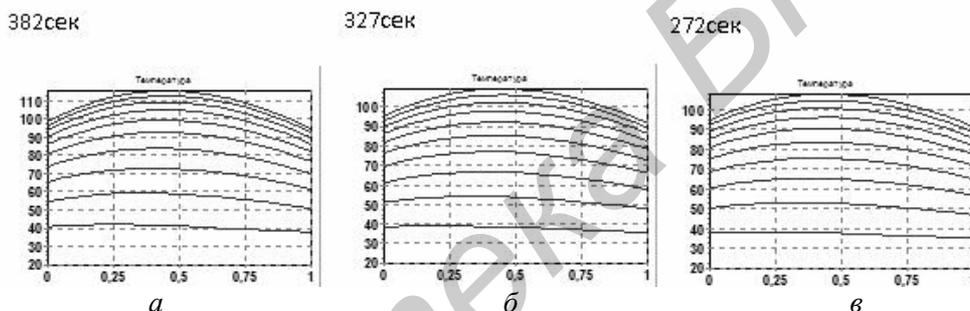


Рис. 2. Изотермы разогрева различных материалов

Расчет теплового режима в конвейерной конструкции

Тепловой источник в уравнениях (4–6) задается в виде:

$$f(z, x) = f_0 \sin^2(\pi z / L) ; f_0 = qL_d^2 / (\Delta T \lambda_0)$$

Безразмерная скорость движения конвейерной ленты

$$v = v' \rho_c L_d \rho_0 C_0 / \lambda_0 = v' / \Delta v ; \Delta v = \lambda_0 / \rho_c L_d \rho_0 C_0$$

для рассмотренных вариантов изменяется в пределах:

Вариант 1 (вода) $\Delta v = \lambda_0 / \rho_c L_d \rho_0 C_0 = 6,5 \times 10^{-6} \text{ м / с } ;$

Вариант 2 (песок 50% влажности) $\Delta v = \lambda_0 / \rho_c L_d \rho_0 C_0 = 7,7 \times 10^{-6} \text{ м / с } ;$

Вариант 3 (песок 30% влажности) $\Delta v = \lambda_0 / \rho_c L_d \rho_0 C_0 = 9,2 \times 10^{-6} \text{ м / с } .$

Расстояние, равное длине рабочей области 0,04 м, лента пройдет за 2–10 мин при $10 < v < 50$. Значение f_0 меняется в пределах $f_0 = qL_d^2 / (\Delta T \lambda_0) \approx 5 - 10$.

На рис. 3,а-б представлены характерные распределения температуры в слое материала толщиной 0,02 м и длиной 0,4 м ($L=20$) в десяти равноотстоящих сечениях для двух значений безразмерной скорости. Расчет занимает доли секунды. Наличие такой программы позволяет быстро производить тепловой расчет для конкретного материала.

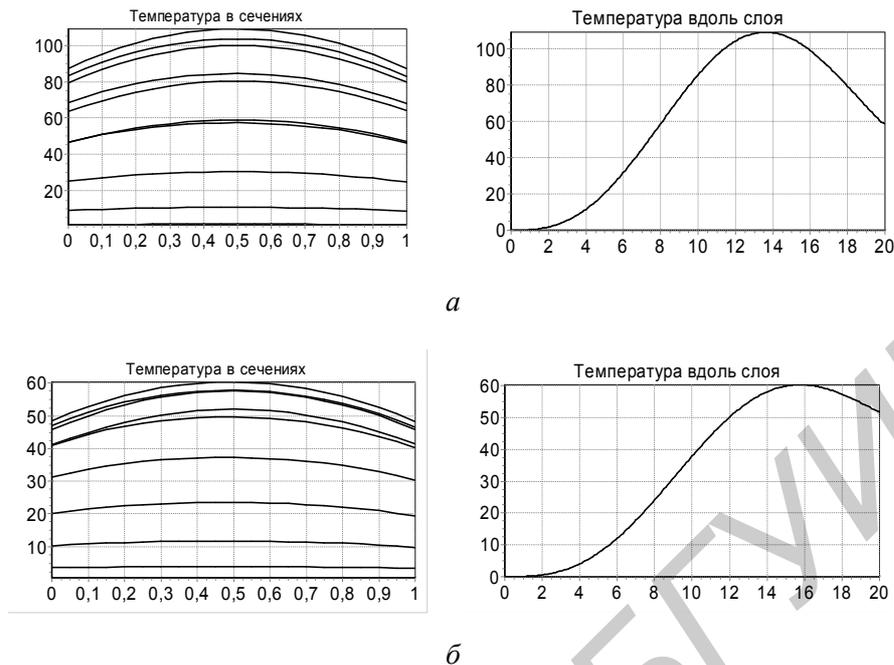


Рис. 3. Распределение температуры в слое материала: *а*: $v=10, f_0=5$, *б*: $v=30, f_0=5$

Экспериментальные исследования

Внешний вид камеры с установленными фильтрами высших типов показан на рис. 4. Камера изготавливалась на основе расчетов, проведенных в работе [2].

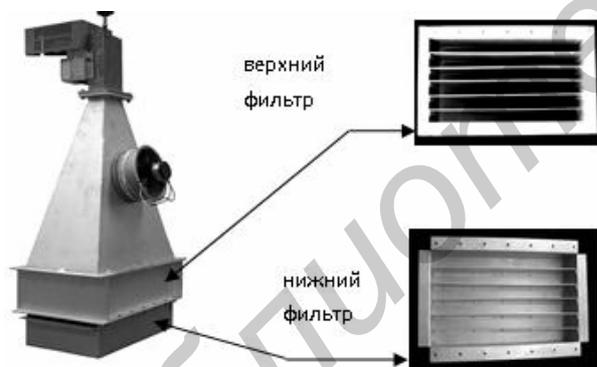


Рис. 4. Рупор с установленными нижним и верхним фильтрами. Раскрыт на диэлектрике 0,2м·0,4м

Исследования проводились при различной комбинации фильтров, при изменении числа ламелей в них или при отсутствии ламелей в одном из фильтров. Источником СВЧ-мощности служил магнетрон *OM 75P* (Samsung) с номинальной мощностью 800 Вт. В качестве подстройки камеры служил короткозамкнутый шлейф магнетрона. Расстояние от плоскости короткого замыкания до выходного штыря магнетрона менялось в процессе подстройки.

Поскольку длина волны в питающем волноводе $\lambda_g \approx 154,6$ мм, то при полностью согласованной нагрузке магнетрона $h \approx \lambda_g/4 = 38,65$ мм. При иных значениях шлейф компенсирует реактивную нагрузку камеры.

В качестве нагреваемого материала использовался влажный песок. Равномерность влажности обеспечивалась тщательным перемешиванием песка с последующим выдерживанием в плотно закрытой емкости. Толщина слоя песка $\Delta = 10$ мм. Температура нагрева и ее распределение по рабочей площади на поверхности материала фиксировалась с помощью термочувствительной бумаги. Области почернения бумаги соответствуют температуре выше 110°C .

Проведенные исследования привели к следующим результатам.

Камера с одним нижним фильтром на поддоне. Верхний фильтр снят.

На рис. 5 приведена эволюция картины разогрева (по границе $t = 100^\circ\text{C}$) при перемещении короткозамыкающего шлейфа и фиксированном времени разогрева t : рис. 5,*а*: $h = 28$ мм, $t = 3$ мин; рис. 5,*б*: $h = 28$ мм, $t = 10$ мин (область нагрева равномерно распределяется по длине камеры); рис. 5,*в*: $h = 32,5$ мм, $t = 3$ мин; рис. 5,*г*: $h = 40,75$ мм, $t = 3$ мин; рис. 5,*д*: $h = 46,75$ мм, $t = 3$ мин.

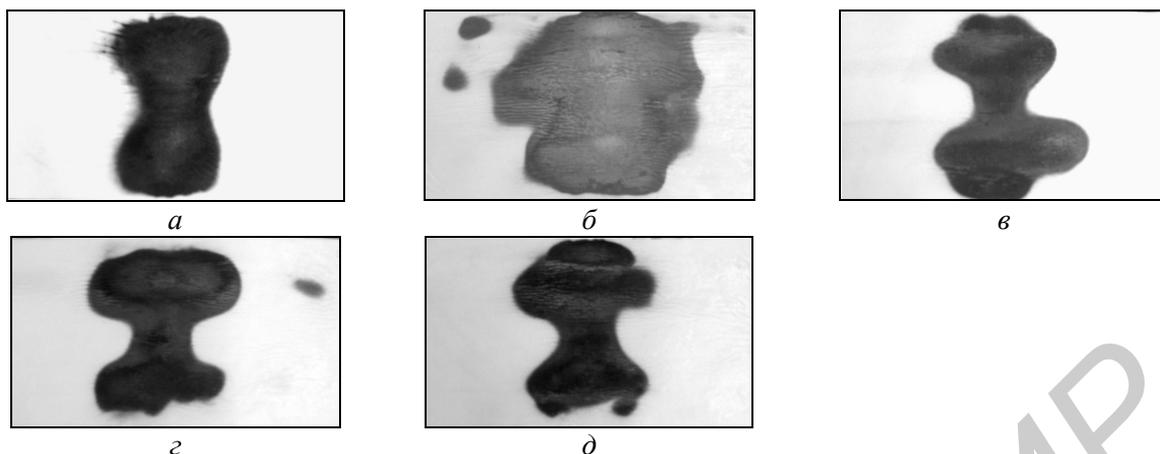


Рис. 5. Вид термобумаги после разогрева

Вывод: в широком диапазоне расстроек нижний фильтр обеспечивает полную фильтрацию паразитных мод, нагрев идет на основной моде H_{10} , чем создается поперечная равномерность разогрева материала. Это решает задачу создания конвейерной СВЧ-камеры с равномерным разогревом материала.

Камера с верхним и нижним фильтрами (рис. 6). Во всех случаях время нагрева 3 мин.

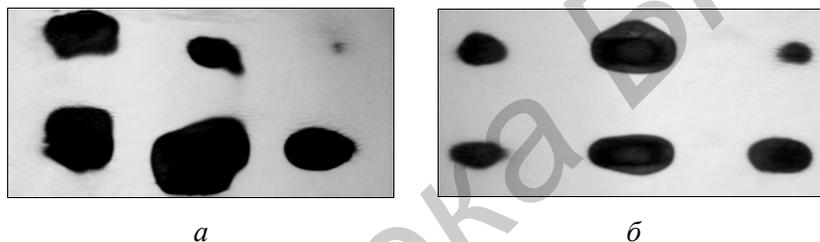


Рис. 6. Вид термобумаги после разогрева: $a - h = 28$; $б - h = 43$

Из приведенных результатов следует:

- благодаря верхнему фильтру выделяется мода H_{32} ;
- распределение температуры области разогрева более критично к оптимальному выбору h , чем в случаях одного нижнего фильтра;
- характер распределения областей максимального разогрева приближается к равномерному по всей рабочей области, что делает перспективной камеру с двумя фильтрами к использованию в циклическом режиме СВЧ-обработки материалов.

Камера с нижним фильтром и рамкой верхнего фильтра без ламелей (рис. 7). Время везде 3 мин.

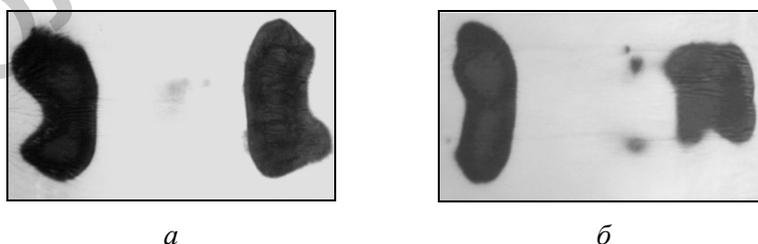


Рис. 7. Вид термобумаги после разогрева: $a - h = 28$ мм; $б - h = 22,5$ мм

Выводы:

- в диапазоне $h = 22,5-28$ мм в такой конструкции рабочей оказывается мода H_{20} ;
- распределение разогрева в таком варианте конструкции камеры позволяет использовать ее как в конвейерном варианте, так и в циклическом режимах работы.

Камера без фильтров. Для подтверждения важной роли фильтров в формировании оптимального распределения областей разогрева были проведены испытания камеры со снятыми ламелями фильтров – рис. 8.

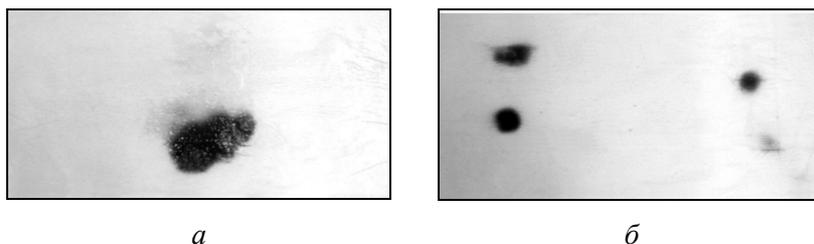


Рис. 8. Вид термобумаги после разогрева: *a* – $h=28$ мм, $t=10$ мин; *б* – $h=61$ мм, $t=3$ мин

Вывод: при отсутствии фильтров в широком диапазоне $h=28\dots61$ мм не удается не только получить приемлемую по распределению температуры область разогрева, но и согласовать магнетрон с камерой. Иначе говоря – фильтры совершенно необходимы в разработанной конструкции.

Камера с тремя ламелями в нижнем фильтре. Для подтверждения правильности выбора расстояния между ламелями нижнего фильтра (или, что-то же, числа ламелей) были проведены испытания камеры с 3 ламелями (вместо 5) в нижнем фильтре.

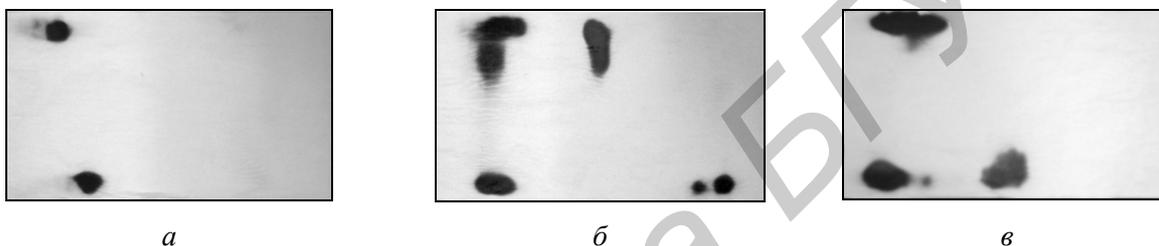


Рис. 9. Вид термобумаги после разогрева: *a* – верхний фильтр поставлен, $h=25,5$ мм, $t=3$ мин; *б* – верхнего фильтра нет, $h=31,75$ мм, $t=3$ мин; *в* – верхнего фильтра нет, $h=43$ мм, $t=3$ мин.

Вывод: число ламелей нижнего фильтра выбрано правильно, их уменьшение не позволяет сформировать желательную по форме и интенсивности область разогрева.

Заключение

Разработана и рассчитана конструкция, изготовлен поддон с фильтром высших мод для композитной пирамидально-прямоугольной камеры с линейным профилем. Разработана конструкция и изготовлен верхний фильтр высших МОД для композитной пирамидально-прямоугольной камеры. Проведены детальные экспериментальные исследования влияния фильтров высших мод, подтверждающих адекватность проведенных расчетов. Проведен расчет тепловых режимов камеры в стационарном и конвейерном режимах.

CALCULATION AND EXPERIMENTAL RESEARCH THE LINEARLY-PYRAMIDAL CHAMBER FOR UHF HEATING

I.N. KIZHLAI, A.K. SINITSYN

Abstract

Calculation of filters of the higher modes and thermal calculations of operating modes of compound pyramidal-rectangular UHF chamber with rectilinear horn operation were performed. The experimental investigation of this chamber was fulfilled. The need for the grid work modes filters was validated for provision of cross uniformity of material heating in operating area.

Литература

1. Кижлай И.Н., Кураев А.А., Сеницын А.К. и др. // Успехи современной радиоэлектроники. 2007. №10. С. 70–74.
2. Кижлай И.Н., Кураев А.А., Сеницын А.К. и др. // Докл. БГУИР. 2008. №6(36). С. 123–126.
3. Наранович О.И., Сеницын А.К. // ДАН БГУИР. 2007. №3(19). С. 18–23.