

№ 11111

621.38

3-43



Б.В. Зверев А.В. Прокопенко

РАСЧЕТ И КОНСТРУИРОВАНИЕ
РЕЗОНАТОРНЫХ РАБОЧИХ КАМЕР
СВЧ-УСТАНОВОК

Москва 2004

621.30
2/3

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

МОСКОВСКИЙ ИНЖЕНЕРНО-ФИЗИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ
(ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ)

Б.В. Зверев А.В. Прокопенко

РАСЧЕТ И КОНСТРУИРОВАНИЕ РЕЗОНАТОРНЫХ
РАБОЧИХ КАМЕР СВЧ-УСТАНОВОК

Рекомендовано УМО «Ядерные физика и технологии»
в качестве учебного пособия
для студентов высших учебных заведений



Москва 2004

УДК 621.3
ББК 31.264.5
3-43

Зверев Б.В., Прокопенко А.В. Расчет и конструирование резонаторных рабочих камер СВЧ-установок. М.:МИФИ, 2004.-92 с.

В пособие подробно изложены электродинамические основы расчета и конструирования резонаторных рабочих камер и рассмотрены конструкционно-технологические проблемы создания резонаторных рабочих камер, включающие вопросы выбора конструкционных материалов, технологии изготовления резонаторных рабочих камер, систем их охлаждения и обеспечения электромагнитной совместимости мощных технологических установок по СВЧ-облучению.

Пособие предназначено для студентов старших курсов и дипломников факультета «А», а также аспирантов и научных сотрудников, специализирующихся в области радиофизики и физики ускорителей заряженных частиц.

Рецензент Нечаев Н.Н.

© Московский центральный радиофизический институт
(государственный университет), 2004

Инициативный
фонд
НИЯУ МИФИ
г. Москва

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие.....	4
Глава 1. Электродинамические основы расчета и конструирования резонаторных рабочих камер.	
1.1. Типы резонаторов. Методика расчета геометрических размеров резонаторов.....	6
1.2. Энергетические характеристики резонаторов (ξ_0 , ξ_∞ , W_0 и Q).....	20
1.3. Оценка влияния конструктивных элементов резонатора на ЭДХ рабочей камеры.....	26
1.4. Устройства связи резонатора с передающими линиями.....	32
1.5. Настройка и исследование резонаторных рабочих камер.....	41
Глава 2. Конструкционно-технологические особенности создания резонаторных рабочих камер.	
2.1. Основы конструирования резонаторных рабочих камер.....	45
2.2. Материалы, используемые при конструировании резонаторных рабочих камер.....	48
2.3. Изготовление резонаторных рабочих камер. Коэффициент технологического качества.....	56
2.4. Конструирование отдельных элементов резонаторных рабочих камер.....	63
2.5. Системы охлаждения резонаторов.....	68
2.6. Электромагнитная безопасность СВЧ-установок.....	72
Список литературы.....	76
Приложение 1. Цилиндрические функции Бесселя.....	78
Приложение 2. Формулы для расчета энергетических характеристик резонаторов.....	81
Приложение 3. Физические свойства материалов.....	85

ПРЕДИСЛОВИЕ

Резонаторы являются важнейшими элементами практических всех основных приборов и электрофизических установок сверхвысоких частот. Они разнообразны по назначению, рабочим диапазонам длин волн, энергетическим характеристикам и конструкции. В этом учебном пособии рассмотрены вопросы расчета и конструирования резонаторных рабочих камер электрофизических установок. В нем объединены и обобщены (классифицированы) сведения об особенностях расчета и конструирования эффективных резонаторных рабочих камер в электрофизических установках.

Учебное пособие состоит из двух частей: электродинамические основы конструирования резонаторных рабочих камер и конструкционно-технологические проблемы создания резонаторных рабочих камер, включающие вопросы выбора конструкционных материалов, технологии изготовления резонаторных рабочих камер, систем их охлаждения и обеспечение экологической безопасности мощных технологических установок по СВЧ-облучению. Представленная методика расчета основных электродинамических характеристик резонаторов позволяет получать все решения в аналитическом виде. В пособии содержатся проверенные на практике рекомендации по конструированию резонаторных рабочих камер СВЧ-установок различного назначения. Как в тексте, так и в приложениях приводится обширный справочный материал, который может быть использован при разработке и конструировании высокочастотных резонаторных камер.

Основное назначение учебного пособия - научить студентов осмысленному расчету и конструированию резонаторных рабочих камер электрофизических СВЧ-установок с оптимальными энергетическими характеристиками. Оно предназначено для самостоятельной работы студентов по курсу «Конструирование радиоаппаратуры» по разделу «Конструирование и технология изготовления резонаторных установок СВЧ», а также для выполнения курсового проекта по «СВЧ-электронике». Настоящее пособие существенно дополняет основную литературу по курсу.

Авторы выражают глубокую признательность заведующему кафедрой электрофизических установок МИФИ, член-корреспонденту РАН А.Н. Диденко и профессору А.Г. Пономаренко за неоценимую научную помощь в работе и критические замечания к ней.

Создание учебного пособия было поддержано грантом Президента РФ Ведущие научные школы НШ-1991.2003.8.

Глава 1

Электродинамические основы расчета и конструирования резонаторных рабочих камер

1.1. Типы резонаторов. Методика расчета геометрических размеров резонаторов

При разработке резонаторных рабочих камер технологических установок СВЧ-энергетики в зависимости от поставленной задачи необходимо выбрать тип рабочей камеры и рабочую частоту, которая, как правило, определяется частотой имеющегося генератора. Далее следует на основании этих предпосылок определить геометрические размеры резонаторных рабочих камер и вывести соотношения изменения резонансной частоты от этих размеров, которые необходимы для быстрой настройки резонаторной рабочей камеры. В резонаторных установках СВЧ-энергетики используются разные типы рабочих камер, простейшими из которых являются резонаторы прямоугольной или цилиндрической формы, возбуждаемые в одномодовом режиме.

Объемные резонаторы представляют собой некоторую часть пространства с однородной средой (ϵ_c и μ_c не зависят от напряженности поля и постоянны во времени), частично или полностью ограниченного проводящей поверхностью. Процессы макроскопической электродинамики, протекающие в таких объемах, можно описать системой уравнений поля Максвелла в объеме с соответствующими граничными условиями:

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{rot} \vec{H} = J_{cr} + \epsilon_c \partial \vec{E} / \partial t; \\ \text{rot} \vec{E} = -\mu_c \partial \vec{H} / \partial t; \\ \text{div} \epsilon_c \vec{E} = \rho_{cr}; \\ \text{div} \mu_c \vec{H} = 0, \end{array} \right. \quad (1.1)$$

где \vec{E} и \vec{H} – векторы напряженности электрического и магнитного полей; J_{cr} – плотность стороннего электрического тока; ρ_{cr} – объемная плотность электрических зарядов; $\epsilon_c = \epsilon_0 \cdot \epsilon$ – абсолютная диэлектрическая проницаемость среды; $\mu_c = \mu_0 \cdot \mu$ – абсолютная магнитная проницаемость среды ($\epsilon_0 = 8,86 \cdot 10^{-12}$ Ф/м, $\mu_0 = 1,26 \cdot 10^{-6}$ Ги/м). В большинстве случаев проектирования

резонаторных рабочих камерах градиентные составляющие векторов \vec{E} и \vec{H} поля отсутствуют и, согласно теореме разложений Гельмгольца, будет присутствовать только вихревая часть, что равнозначно условию

$$\operatorname{div} \vec{E} = 0; \operatorname{div} \vec{H} = 0. \quad (1.2)$$

Для случая гармонической зависимости векторов \vec{E} и \vec{H} во времени (например, через $e^{j\omega t}$) система уравнений (1.1) переходит в систему однородных дифференциальных уравнений, называемых уравнениями Гельмгольца:

$$\begin{aligned} \nabla^2 \vec{E} + k^2 \vec{E} &= 0, \\ \nabla^2 \vec{H} + k^2 \vec{H} &= 0, \end{aligned} \quad (1.3)$$

где $\nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}$ – оператор Лапласа в декартовых координатах; $k = \sqrt{\omega^2 \epsilon_r \mu_r}$ – волновое число. Решение уравнений (1.3) ищется с учетом граничных условий для напряженности электрического и магнитного поля на ограничивающей резонатор поверхности:

$$[\vec{n} \vec{E}]_S = 0; [\vec{n} \vec{H}]_S = 0, \quad (1.4)$$

где \vec{n} – внешняя нормаль к поверхности резонатора S .

Это решение имеет важное практическое значение, так как позволяет получить резонансные частоты объемного резонатора и распределение электромагнитного поля, которое соответствует собственным векторным функциям. Аналитическое решение уравнений (1.3) даже в случае однородных граничных условий можно найти только в ограниченном числе случаев. Например, если поверхность, ограничивающая резонатор, является координатной, то для решения можно использовать метод разделения переменных. К таким резонаторам можно отнести прямоугольные призматические резонаторы (в декартовой системе координат); круглые цилиндрические резонаторы и коаксиальные резонаторы (в цилиндрической системе координат); сферические резонаторы (в сферической системе координат). Решение трехмерных уравнений Гельмгольца (1.3) с координатными границами, однородным заполнением и граничными условиями

методом разделения переменных приведено в большом количестве литературы [1-5] и не требует особого рассмотрения.

В резонаторе, как и в любом колебательном контуре, происходит непрерывный энергетический обмен между электрической и магнитной составляющими поля. При изменении частоты возбуждаемых колебаний в резонаторе образуются самые различные структуры электромагнитного поля. В общем случае в резонаторе может существовать бесконечное число резонансных видов колебаний. Низшим видом колебаний называется структура поля, которой соответствует минимальная частота. Если резонансные частоты двух или более видов колебаний с различной структурой полей совпадают, то такие колебания называются вырожденными.

При решении уравнений в прямоугольных (x, y, z) и цилиндрических (r, ϕ, z) координатах происходит выделение групп решений с различным компонентным составом электрических и магнитных полей. Колебания Н-типа имеют отличные от нуля продольные и поперечные компоненты магнитного поля, а электрическое поле имеет только поперечные компоненты. Колебания Е-типа имеют отличные от нуля продольные и поперечные компоненты электрического поля, а магнитное поле имеет только поперечные компоненты.

Таким образом, система решений векторных функций прямоугольного призматического резонатора, согласно [6, 3], записывается:

для $E_{\text{эл}}$ -колебаний –

$$E_x = B \frac{m \cdot p \pi^2}{k_{\text{up}}^2 \cdot a \cdot L} \cos \frac{m \pi x}{a} \sin \frac{n \pi y}{b} \sin \frac{p \pi z}{L};$$

$$E_y = B \frac{n \cdot p \pi^2}{k_{\text{up}}^2 \cdot b \cdot L} \sin \frac{m \pi x}{a} \cos \frac{n \pi y}{b} \sin \frac{p \pi z}{L};$$

$$E_z = B \sin \frac{m \pi x}{a} \sin \frac{n \pi y}{b} \cos \frac{p \pi z}{L}; \quad (1.5a)$$

$$H_x = -iB \frac{\omega_0}{k_{\text{up}}^2} \frac{p \pi}{b} \sin \frac{m \pi x}{a} \cos \frac{n \pi y}{b} \cos \frac{p \pi z}{L};$$

$$H_y = B \frac{\omega \epsilon_0 \pi}{k_{sp}^2} \cos \frac{m\pi x}{a} \sin \frac{n\pi y}{b} \cos \frac{p\pi z}{L};$$

$$H_z = 0;$$

для H_{mp} -колебаний –

$$E_x = B \frac{\omega \mu_0 \pi}{k_{sp}^2} \cos \frac{m\pi x}{b} \sin \frac{m\pi y}{a} \sin \frac{p\pi z}{L};$$

$$E_y = B \frac{\omega \mu_0 \pi}{k_{sp}^2} \sin \frac{m\pi x}{a} \sin \frac{m\pi y}{b} \sin \frac{p\pi z}{L};$$

$$E_z = 0;$$

$$H_x = iB \frac{m \cdot p\pi^2}{k_{sp}^2 \cdot a \cdot L} \sin \frac{m\pi x}{a} \cos \frac{n\pi y}{b} \cos \frac{p\pi z}{L}; \quad (1.56)$$

$$H_y = iB \frac{n \cdot p\pi^2}{k_{sp}^2 \cdot b \cdot L} \cos \frac{m\pi x}{a} \sin \frac{n\pi y}{b} \cos \frac{p\pi z}{L};$$

$$H_z = iB \cos \frac{m\pi x}{a} \cos \frac{n\pi y}{b} \sin \frac{p\pi z}{L},$$

где $a \times b$ – размеры поперечного сечения резонатора; λ_s – длина волны в волноводе данного поперечного сечения;

$$L = \frac{\lambda_s}{2} p = \frac{p}{2} \cdot \lambda_0 \sqrt{1 - \left(\frac{\lambda_0}{\lambda_{sp}} \right)^2} \quad - \quad \text{длина резонатора};$$

$$k_{sp} = \frac{2\pi}{\lambda_{sp}} = \sqrt{(m\pi/a)^2 + (n\pi/b)^2} \quad - \quad \text{поперечное волновое число};$$

ω – циклическая резонансная частота; $k = \sqrt{k_{sp}^2 + (p\pi/L)^2} = \omega/c$ – резонансное волновое число; m – число вариаций поля по размеру a (координата x); n – число вариаций поля по размеру b (координата y); p – число вариаций поля по L (продольная координата z); $c = 1/\sqrt{\epsilon_0 \mu_0} = 2,9979 \cdot 10^8$ м/с. Резонансная частота определяется через волновое число из условия $L = p\pi/k$ и составит

$$f = \frac{1}{2\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}} \sqrt{\left(\frac{m}{a}\right)^2 + \left(\frac{n}{b}\right)^2 + \left(\frac{p}{L}\right)^2} \quad (1.6)$$

Следует отметить, что частоты Е- и Н-видов колебаний при одинаковых индексах m , n , p совпадают, а также из физических соображений видно, что для Н-типа колебаний индекс p не может быть равным 0. Низшим типом колебаний для резонатора с размерами $a > b > L$ будет Е $_{110}$ -тип колебаний, который при переобозначении осей трансформируется в Н $_{101}$ или Н $_{011}$. Для резонатора с размерами $L > a > b$ низшим типом будет Н $_{101}$. Структура полей Н $_{101}$ имеет три компоненты: Н $_x$, Н $_y$, Е $_y$ и представлена на рис. 1.1.

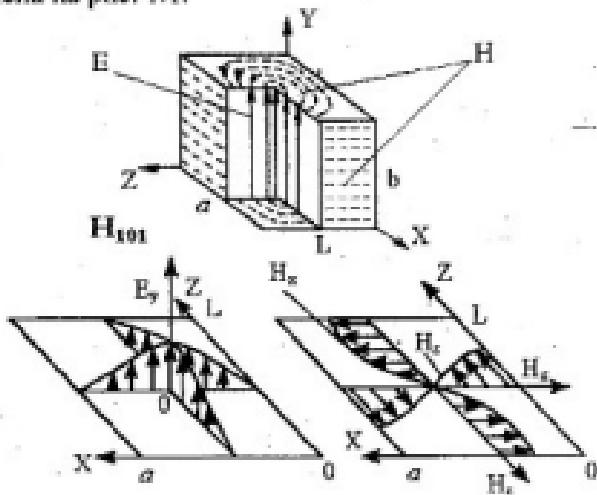


Рис. 1.1. Структура поля в прямоугольном резонаторе с колебаниями Н $_{101}$

Решение уравнений Гельмгольца (1.3) с цилиндрическими координатными границами в цилиндрической системе координат методом разделения переменных приводится к уравнению Бесселя (основные соотношения для функций Бесселя приведены в Приложении 1). Систему решений векторных функций

цилиндрического резонатора, согласно [6, 3], следует записать в виде:

– для $E_{\text{пар}}$ -колебаний –

$$E_r = -B \frac{1}{k_{\text{kpE}}} \frac{p\pi}{L} J'_n(k_{\text{kpE}}r) \cos(m\varphi) \sin \frac{p\pi}{L} z;$$

$$E_\varphi = -B \frac{m}{k_{\text{kpE}}^2} \frac{p\pi}{L} \frac{J_n(k_{\text{kpE}}r)}{r} \sin(m\varphi) \sin \frac{p\pi}{L} z;$$

$$E_z = BJ_n(k_{\text{kpE}}r) \cos(m\varphi) \cos \frac{p\pi}{L} z; \quad (1.7a)$$

$$H_r = iB \frac{\omega_0 m}{k_{\text{kpE}}^2} \frac{J_n(k_{\text{kpE}}r)}{r} \sin(m\varphi) \cos \frac{p\pi}{L} z;$$

$$H_\varphi = -iB \frac{\omega_0 m}{k_{\text{kpE}}^2} J'_n(k_{\text{kpE}}r) \cos(m\varphi) \cos \frac{p\pi}{L} z;$$

$$H_z = 0,$$

а для $H_{\text{пар}}$ -колебаний –

$$E_r = -iB \frac{\alpha \mu \mu_0 m}{k_{\text{kpH}}^2} \frac{J_n(k_{\text{kpH}}r)}{r} \sin(m\varphi) \sin \frac{p\pi}{L} z;$$

$$E_\varphi = iB \frac{\alpha \mu \mu_0 m}{k_{\text{kpH}}^2} J'_n(k_{\text{kpH}}r) \cos(m\varphi) \sin \frac{p\pi}{L} z;$$

$$E_z = 0;$$

$$H_r = B \frac{1}{k_{\text{kpH}}} \frac{p\pi}{L} J'_n(k_{\text{kpH}}r) \cos(m\varphi) \cos \frac{p\pi}{L} z; \quad (1.7b)$$

$$H_\varphi = B \frac{m}{k_{\text{kpH}}^2} \frac{p\pi}{L} \frac{J_n(k_{\text{kpH}}r)}{r} \sin(m\varphi) \cos \frac{p\pi}{L} z;$$

$$H_z = BJ_n(k_{\text{kpH}}r) \cos(m\varphi) \sin \frac{p\pi}{L} z,$$

где L – длина резонатора; R – радиус резонатора;

$k_E = \sqrt{(\nu_{mn}/R)^2 + (p\pi/L)^2}$ и $k_H = \sqrt{(\mu_{mn}/R)^2 + (p\pi/L)^2}$ –
 резонансные волновые числа для Е- и Н-волн; $k_{spE} = \nu_{mn}/R$ и
 $k_{spH} = \mu_{mn}/R$ – критические волновые числа для Е- и Н-волн;
 ν_{mn} – n-й корень функции Бесселя J_m m-го порядка; μ_{mn} – n-й корень
 производной функции Бесселя J'_m m-го порядка; m – число
 вариаций поля по азимуту; n – число вариаций поля по радиусу; p –
 число вариаций поля по длине резонатора, $p=2L/\lambda_0$, где
 $\lambda_0 = \frac{\lambda}{\sqrt{1-(\lambda/\lambda_{sp})^2}}$ – длина волны в резонаторе.

Резонансные частоты Е- и Н-видов колебаний в цилиндрическом резонаторе не совпадают и определяются через
 волновые числа и условия $L = p\pi/k$. Для колебаний вида E_{mnp}
 записывается

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{\mu\mu_0\varepsilon\varepsilon_0}} \sqrt{(\nu_{mn}/R)^2 + (p\pi/L)^2}, \quad (1.8a)$$

а для H_{mnp}

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{\mu\mu_0\varepsilon\varepsilon_0}} \sqrt{(\mu_{mn}/R)^2 + (p\pi/L)^2}. \quad (1.8b)$$

Низшие виды колебаний в цилиндрическом резонаторе – это E_{010} для плоского резонатора и H_{111} для вытянутого резонатора. Кроме того, частота E_{010} -вида колебаний не зависит от его длины и для пустого резонатора записывается $f = 2,405 \cdot c/R$. Частоты, на которых возбуждаются E_{111} - и H_{011} -виды колебаний совпадают, данные типы колебаний являются вырожденными, и только применяя специальные меры в резонаторе, можно возбудить лишь один из этих типов. В силу замкнутости линий токов на цилиндрической поверхности и нахождении максимума поля на оси, резонатор с колебаниями H_{011} имеет уникально высокую
 добротность. Структура силовых линий низших видов колебаний в цилиндрическом резонаторе изображена на рис. 1.2.

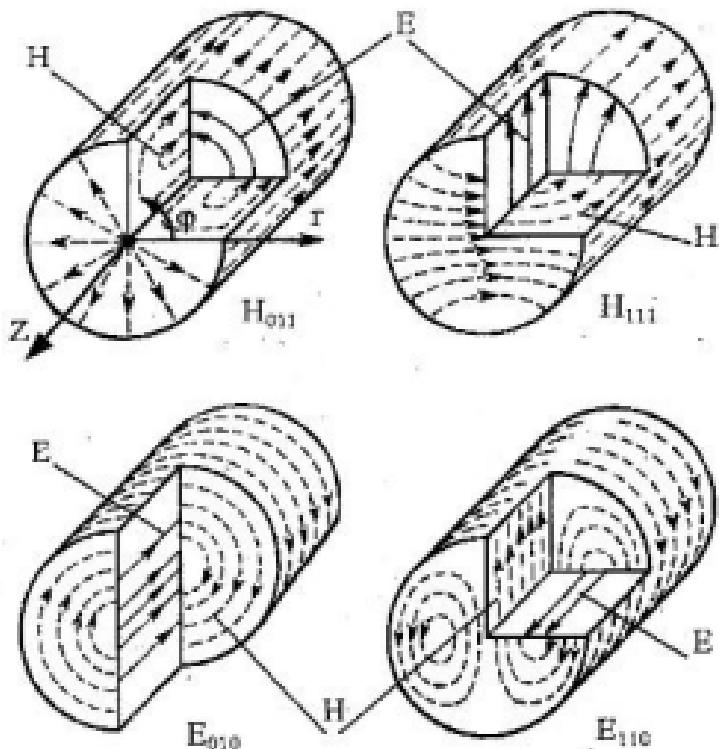


Рис. 1.2. Структуры электромагнитного поля в цилиндрических резонаторах на основных видах колебаний

В установках СВЧ-энергетики находят свое применение коаксиальные резонаторы, образованные из коаксиальной линии, закороченными идеально проводящими заглушками. Коаксиальные резонаторы бывают полуволновыми с Т-, Е- и Н-видами колебаний и четвертьволновыми с Т-видом. Решение уравнения Гельмгольца здесь проводится также в цилиндрической системе координат, но с граничными условиями $E_{\phi\phi}=0$ при $r=a, b$ и $\partial E_r / \partial r = 0$ и $H_z=0$ при $z=0, L$. Полуволновые резонаторы с колебаниями Т_р

возбуждаются на частоте $f = \frac{C \cdot p}{4L\pi\sqrt{\mu\varepsilon}}$ и обладают двумя поперечными компонентами поля:

$$E_r = -\frac{iB}{2\pi r} \sqrt{\frac{\mu\mu_0}{\varepsilon\varepsilon_0}} \sin \frac{px}{L}, \quad (1.9)$$

$$H_\varphi = B \frac{1}{2\pi r} \cos \frac{px}{L},$$

где p – число вариаций поля по длине резонатора; B – безразмерная амплитуда, численно равная току в пучности поля; L – длина резонатора, a – радиус внутреннего проводника, b – радиус внешнего проводника.

В полуволновом коаксиальном резонаторе могут существовать высшие колебания E - и H -вида. Резонансные частоты аксиально-симметричного E_{01p} -видов и H_{01p} -видов колебаний запишутся:

$$f_{E_{01p}} \approx \frac{v_\phi}{2} \sqrt{(b-a)^2 + (p/L)^2}; \quad (1.10a)$$

$$f_{H_{01p}} \approx \frac{v_\phi}{2} \sqrt{(2/(b-a))^2 + (p/L)^2}, \quad (1.10b)$$

где $v_\phi = 1/\sqrt{\mu\mu_0\varepsilon\varepsilon_0}$ – фазовая скорость в среде с диэлектрическим заполнением. При $L > b - a$ основным является колебание T_1 -вида, а при $L < b - a$ основным становится E_{01p} -колебание. Силовые линии поля в полуволновых коаксиальных резонаторах изображены на рис. 1.3.

Коаксиальные (четвертьволновые) резонаторы на колебаниях вида T , укороченные на емкость, применяются для практических целей в СВЧ-установках. Частота резонатора, с учетом наличия емкостного зазора, определяется из решения уравнения $2\pi l/\lambda_0 = \arctg(1/(e_0 C Z_0))$, где l – длина центрального проводника; C – емкость зазора. В емкостном зазоре такого резонатора возможно получение высоких значений напряженности поля [7].

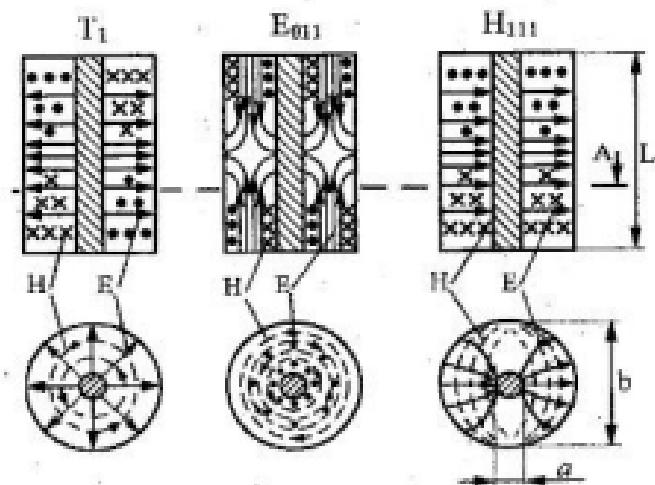


Рис. 1.3. Структуры электромагнитного поля в полуволновых коаксиальных резонаторах на основных видах колебаний

Сферические объемные резонаторы используются в установках СВЧ-энергетики, таких, как СВЧ-печи высокотемпературного спекания несовершенных диэлектриков и СВЧ-лампы дневного света. Для сферических резонаторов решение уравнения Гельмгольца в сферических координатах с граничными условиями на поверхности $r = R$ определяет резонансные длины волн для $E_{\text{ши}}$ - и $H_{\text{ши}}$ - видов колебаний:

$$\lambda_{l,\text{шE}} = 2\pi/k_{l,\text{шE}}; \quad (1.11a)$$

$$\lambda_{l,\text{шH}} = 2\pi/k_{l,\text{шH}}, \quad (1.11b)$$

где $k_{l,\text{шE}}$ – корень уравнения $\left[\frac{d}{dr} (\sqrt{r}) J_{n+1/2}(k_{l,\text{шE}} r) \right]_{r=R} = 0$ и $k_{l,\text{шH}}$

корень уравнения $J_{n+1/2}(k_{l,\text{шH}} R) = 0$, R – радиус резонатора.

Для сферического H_{101} резонатора $\lambda_0 = 1,398R$, что при $\lambda_0 = 12,24$ см (2450 МГц) дает $R = 8,76$ см, и имеются лишь 3 составляющие электромагнитного поля:

$$\begin{cases} E_\varphi = \frac{B \cdot \sin \theta \cdot J_{3/2}(k \cdot r)}{\sqrt{r}}; \\ H_r = i \cdot \frac{2 \cdot B \cdot \cos \theta}{Z_0 \cdot k \cdot r^{3/2}} \cdot J_{3/2}(k \cdot r); \\ H_\theta = -i \cdot \frac{B \cdot \sin \theta}{Z_0 \cdot k \cdot r^{3/2}} \cdot [k \cdot r \cdot J_{1/2}(k \cdot r) - J_{3/2}(k \cdot r)], \end{cases} \quad (1.12)$$

где B – амплитуда поля; $k = 2\pi/\lambda_0$ – волновое число среды, заполняющей резонатор; $J_{1/2}$ и $J_{3/2}$ – функции Бесселя с полупцелым индексом, рационально выражаемые через тригонометрические функции, как $J_{1/2}(x) = \sqrt{\frac{1}{\pi x}} \sin x$ и $J_{3/2}(x) = \sqrt{\frac{1}{\pi x}} \left(\frac{\sin x}{x} - \cos x \right)$.

Структура электромагнитного поля резонатора показана на рис. 1.4. Сферический резонатор имеет наибольший объем при наименьшей площади внутренней поверхности, поэтому он обладает высокой добротностью.

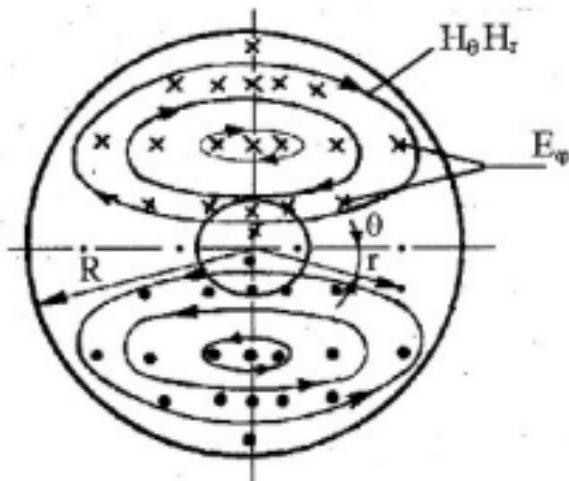


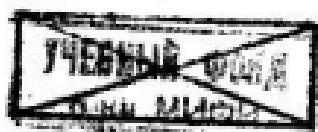
Рис. 1.4. Структура электромагнитного поля в сферическом резонаторе с колебаниями вида H_{011}

В установках СВЧ-энергетики находят применение диэлектрические резонаторы, которые позволяют уменьшить массогабаритные характеристики аппаратуры. Диэлектрические резонаторы делят на открытые и металлодиэлектрические. В открытых диэлектрических резонаторах границей раздела является диэлектрик-воздух, электромагнитное поле накапливается в диэлектрике и отчасти в окружающем его свободном пространстве. В качестве такого резонатора может выступить отрезок цилиндрического диэлектрического волновода длиной L . Металлодиэлектрический резонатор состоит из диэлектрического и металлических элементов. Отрезок диэлектрического цилиндрического волновода длиной L , с торцов (в поперечном сечении) закороченный металлическими пластинами, является таким резонатором. В данном резонаторе поле переотражается между пластинами, создавая резонанс. Металлоиолектрический цилиндрический H_{01} резонатор служит рабочей камерой серного СВЧ-источника света [7], обеспечивая эффективный световой выход. Резонансная длина волны находится из дисперсионного уравнения круглого диэлектрического волновода на колебаниях типа H_{01} .

В последнее время появилась тенденция к применению оптически открытых резонаторов в установках СВЧ-энергетики, которые традиционно используют в аппаратуре крайне высокочастотного (КВЧ – 30-300 ГГц) и гипервысокочастотного (ГВЧ – 300-3000 ГГц) диапазонов. Оптически открытые резонаторы могут быть выполнены на основе оптически открытых линий передач (линия поверхности волны, двухпроводная линия, полосковая линия) путем их закоротки металлическими пластинами или на основе двух параллельных расположенных против друг друга зеркал.

В источниках света на базе СВЧ-разряда в среде серы нашли применение оптически открытые резонаторные рабочие камеры [8]. Например, двухпроводная резонаторная рабочая камера на Т-виде колебаний образована двумя проводами радиуса a , разнесенными на расстояние $2d$. Закоротки резонатора, выполненные из двух медных дисков, расположены на расстоянии $L = p\lambda/2$, где p – библиотечный коэффициент для случая ТЕМ волны $\lambda_c = \lambda$.

ФОНД
НИЯ У МИФИ
г. Москва



Электромагнитное поле в открытом резонаторе с плоскими зеркалами многократно переотражается между металлическими пластинами. Структура электромагнитного поля в открытом резонаторе может быть T_{mp} , H_{mp} , E_{mp} -видов. Режим работы открытого резонатора следует считать одномодовым, если в нем возбуждается основной вид колебаний T_{0p} , резонансная частота которого $f_0^{00p} = p \cdot v_{rp} / (2L)$, где L – расстояние между зеркалами; p – число вариаций по оси z ; v_{rp} – групповая скорость Т-волны в среде между зеркалами (для свободного пространства $v_{rp} = c = 2,9979 \cdot 10^8$ м/с). При расчете собственных добротностей резонаторов необходимо учитывать дифракционные потери [5].

При практической работе с резонаторами следует вывести зависимости резонансной частоты от размеров резонатора, изменение которых поможет произвести настройку частоты рабочей камеры. Такие вариации размеров возможно использовать для подстройки частоты в процессе работы на высоком уровне мощности. Подстройку частоты в объемных резонаторах нужно осуществлять наиболее простой вариацией размеров (у прямоугольных и цилиндрических резонаторов – длиной резонатора L) или введением регулировочных элементов в объем резонатора (реактивных металлических стержней, диэлектрических элементов и вспомогательных связанных резонансных объемов).

Для вариации размерами соотношения резонансной частоты следует привести к безразмерному виду, проанализировать по данному размеру и вывести безразмерные соотношения, которые затем перевести в таблицу. Расчет геометрических размеров объемных резонаторов по заданной резонансной длине волны λ_0 может быть выполнен из представленных ранее соотношений (1.6), (1.8), приведенных к безразмерному виду.

В качестве примера проведем расчет геометрических размеров H_{011} – цилиндрического резонатора:

$$\frac{R}{\lambda_0} = \frac{1}{2} \sqrt{\left(\frac{\mu_{01}}{\pi}\right)^2 + \left(\frac{R}{L}\right)^2} = \frac{1}{2} \sqrt{1,4878 + \left(\frac{R}{L}\right)^2}. \quad (1.13a)$$

где $\mu_{01} = 3,8317$ – первый корень уравнения $J'_0(x) = 0$; R – радиус резонатора. Соотношение (1.13а) может быть преобразовано к виду

$$\frac{L}{\lambda_0} = \frac{1}{2(R/L)} \sqrt{1,4878 + \left(\frac{R}{L}\right)^2}, \quad (1.136)$$

и такая запись наиболее предпочтительна для расчетов при техническом проектировании рабочих камер технологических устройств, так как она безразмерна, позволяет варьировать размеры резонатора и может быть использована при анализе зависимости добротности резонатора от отношения его размеров. Минимальная величина относительного радиуса резонатора достигается при $L \gg R$ и составит $(R/\lambda_0)_{\min} = \mu_{01}/(2\pi) = 0,6149$.

Дифференцируя соотношения (1.13а) или (1.13б), можно найти производные резонансной частоты f_0 по размерам резонатора, которые целесообразно записать в виде, исключающем зависимость от частоты:

$$\begin{aligned} \frac{1}{f_0^2} \cdot \frac{\partial f_0}{\partial R} &= \frac{2(\mu_{01}/\pi)^2}{c \cdot \left[(R/L)^2 + (\mu_{01}/\pi)^2 \right]^{3/2}} = \\ &= -9,925 \cdot 10^{-6} \left[1/(\text{МГц} \cdot \text{мм}) \right], \end{aligned} \quad (1.14a)$$

$$\begin{aligned} \frac{1}{f_0^2} \cdot \frac{\partial f_0}{\partial L} &= -\frac{2}{c} \left[\frac{(R/L)^2}{(R/L)^2 + (\mu_{01}/\pi)^2} \right]^{3/2} = \\ &= -6,67 \cdot 10^{-6} \frac{(R/L)^3 \left[1/(\text{МГц} \cdot \text{мм}) \right]}{\left[1,4878 + (R/L)^2 \right]^{3/2}}. \end{aligned} \quad (1.14b)$$

Выбирая типичные значения относительных размеров резонатора на стандартной частоте промышленного магнетронного генератора $f_0 = 2450$ МГц ($R/L = 0,7$; $L/\lambda_0 = 1,005$; $R/\lambda_0 = 0,7032$), получаем по формулам (1.14а) и (1.14б) $\frac{\partial f_0}{\partial R} = -21,4 \frac{\text{МГц}}{\text{мм}}$ и $\frac{\partial f_0}{\partial L} = -4,9 \frac{\text{МГц}}{\text{мм}}$, где $R = 36,04$ мм, а $L = 122,91$ мм. В условиях опытного производства технологические допуски на размеры корпуса резонатора обычно составляют

$\Delta R = \Delta L \approx \pm 0,05$ мм и отклонение изделия от расчетной резонансной частоты $\Delta f_0 = f - f_0$ может составить $\Delta f_0 = \pm 1,07$ МГц за счет допуска на радиус R и $\Delta f_0 = \pm 0,25$ МГц за счет допуска на длину L . Следует также учесть возможность отклонения резонансной частоты рабочей камеры из-за влияния конструктивных элементов устройства (керамических тигелей, держателей, обрабатываемого вещества). Учет влияния указанных деталей может быть выполнен лишь в виде оценки, погрешность которой $|\Delta f_0/f_0| \leq 2 \cdot 10^{-3}$ достигает величины $|\Delta f_0| \leq 5,0$ МГц. Методика и способы такой оценки приведены в 1.3.

После изготовления H_{011} – рабочей камеры, как правило, требуется ее подстройка на заданную резонансную частоту $f_0 \pm 2$ МГц за счет коррекции размеров корпуса. Указанную коррекцию технически целесообразнее выполнить изменением длины корпуса L . При работе резонаторов на высоком уровне мощности происходит изменение собственной частоты резонатора за счет нагрева его стенок, что также нужно учитывать при конструировании устройства.

Аналогичным образом можно вывести соотношения для расчета и коррекции геометрических размеров прямоугольных, цилиндрических и коаксиальных резонаторов на других типах колебаний.

1.2. Энергетические характеристики резонаторов (E_s , ξ_m , W_s и Q)

Разрабатывая резонаторные рабочие камеры для СВЧ-установок, необходимо проводить расчеты их энергетических характеристик. К их числу относятся: собственная добротность резонатора Q_0 , величина которой в практических конструкциях зависит от коэффициента технологического качества изготовления резонатора; энергия, запасаемая в объеме резонатора W_s ; параметры напряженности электрического ξ_e и магнитного ξ_m поля, характеризующие величины напряженности полей от вводимой в резонатор мощности. Знание энергетических характеристик резонатора необходимо при анализе и оптимизации реализуемых технологических процессов и организации связи резонатора с СВЧ-

трактом ввода мощности.

Энергия, запасенная в резонаторе, складывается из равных в среднем запасов электрической \overline{W}_e и магнитной \overline{W}_m энергии и согласно [9]

$$W_s = \overline{W}_e + \overline{W}_m = 2\overline{W}_m = 2\overline{W}_s = \frac{\mu_0}{2} \int_V |\mathbf{H}|^2 dV = \frac{\epsilon_0}{2} \int_V |\mathbf{E}|^2 dV. \quad (1.15)$$

Запасенная энергия измеряется в джоулях. В качестве примера рассмотрим прямоугольный H_{101} -резонатор, изображенный на рис. 1.1. Используя соотношение (1.56), для этого резонатора найдем энергию, запасаемую в резонаторе с единственной компонентой электрического поля E_y .

В случае воздушного заполнения

$$W_s = \frac{\epsilon_0}{2} \int_V |E_y|^2 dV = \frac{\epsilon_0 B^2 \omega^2 \mu_0^2 a^2}{2 \pi^2} \int_V \sin^2(\frac{\pi}{a}x) \sin^2(\frac{\pi}{L}z) dx dy dz.$$

Применив табличный интеграл $\left(\int \sin^2(tx) = \frac{x}{2} - \frac{1}{4t} \sin(2tx) \right)$, получим

$$W_s = \frac{1}{8} \mu_0 B^2 \frac{a^3 b}{a^2 + L^2} L, \quad (1.16)$$

где $a \times b$ – поперечные размеры волновода, образующего резонатор; L – его длина; B – коэффициент амплитуды поля. Для цилиндрических резонаторов интеграл (1.15) для вычисления запасенной энергии берется в цилиндрических координатах с использованием формул, приведенных в Приложении 1 и, например, для H_{011} запасенная энергия составит

$$W_s = \frac{\epsilon_0 R^2 \pi L}{2} \int_0^R \int_0^{\pi} \int_0^{2\pi} |E_\phi|^2 r dr d\phi dz = \frac{\pi \epsilon_0}{4} \cdot L \cdot \left[Z_0 B \frac{\lambda_{cp}}{\lambda_0} R J_0(\mu_{01}) \right]^2, \quad (1.17)$$

где E_ϕ – единственная составляющая электрического поля; $Z_0 = \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}} = 120\pi = 377$ Ом – сопротивление свободного пространства; $\lambda_{cp} = 2\pi R / \mu_{01}$ – критическая длина волны в H_{011} -вольноводе и размеры резонатора R и L .

Резонаторы в СВЧ-диапазоне – это электродинамические

системы с распределенными параметрами, для описания которых невозможно однозначно использовать обычные колебательные контуры. В резонаторах трудно однозначно связать L и C с их размерами. Тем не менее физическая аналогия процессов энергообмена в радиотехническом колебательном контуре и в объемных резонаторах СВЧ, возбужденных на одном виде колебаний, позволяет поставить вопрос о нахождении эквивалентной схемы последних в виде цепи с сосредоточенными параметрами. В технике СВЧ непосредственное измерение R, L, C невозможно, поэтому в качестве основных параметров резонаторов используют частоту, добротность и входное сопротивление, которые доступны для расчета методами теории поля и измерения.

Собственная добротность резонатора на данном виде колебаний – это добротность резонатора, не связанного с другими элементами СВЧ-тракта. При расчете собственной добротности объемных резонаторов следует учитывать только омические потери в материалах стенок резонатора. Собственную добротность резонатора Q_0 , возбуждаемого на установленном виде колебаний, можно определить методами теории поля, используя классическое определение добротности:

$$Q_0 = 2\pi \frac{W_s}{W_n} = \omega_0 \frac{W_s}{P_n}, \quad (1.18)$$

где W_s – энергия, рассеиваемая в стенах за период высокочастотных колебаний на резонансной частоте $\omega = 2\pi f_0$; P_n – мощность омических потерь в стенах резонатора. Мощность потерь в проводящей оболочке определяется как

$$P_n = \operatorname{Re} \int_{\text{S}} \Pi_{\text{пр}} dS = \frac{1}{2} \int_{\text{S}} R_s |\vec{H}_t|^2 dS, \quad (1.19)$$

где H_t – тангенциальная к поверхности резонатора напряженность магнитного поля; $\vec{\Pi}_{\text{пр}} = [\vec{E} \vec{H}^*]$ – вектор Пойнтинга в проводящей

среде; $R_s = \frac{1}{\sigma \delta} = \sqrt{\frac{\pi \mu_0 \sigma_0}{\sigma}} = \sqrt{\frac{\pi Z_0}{\lambda_0 \sigma}}$ – поверхностное сопротивление материала корпуса резонатора для немагнитных материалов; σ – проводимость металла; δ – толщина скрип-слоя. Для примера найдем мощность, поглощаемую корпусом и торцевыми стенками

цилиндрического резонатора на виде колебаний H_{011} :

$$\begin{aligned}
 P_0 &= 2P_{ct} + P_{корп} = 2 \frac{R_{ct}}{2} \iint_S |H_r|^2 dS + \frac{R_{ct}}{2} \iint_S |H_z|^2 dS = \\
 &= R_{ct} \int_0^R B^2 \left(\frac{\lambda_{sp}}{\lambda_0} \right)^2 J_1^2(\mu_{01} r / R) 2\pi dr + \frac{R_{ct}}{2} \int_0^L B^2 J_0^2(\mu_{01}) \sin^2(\pi x / L) 2\pi R dx = \\
 &= B^2 \left[\frac{R_{ct}}{2} J_0^2(\mu_{01}) \pi RL + \frac{\pi^2 R_{ct}}{\mu_{01}^2} J_0^2(\mu_{01}) \frac{R^4}{L^2} \right], \quad (1.20)
 \end{aligned}$$

где R и L – размеры резонатора, а интегрирование проводилось по торцевой стенке и по корпусу резонатора с использованием табличных интегралов, приведенных в Приложении 1.

Собственная добротность цилиндрического H_{011} -резонатора Q_0 , согласно (1.18), (1.17), (1.20) записывается в виде

$$Q_0 = \frac{4\pi Z_0}{\lambda_0^3 R_{ct} \left[\left(\frac{\mu_{01}}{\pi} \right)^2 \frac{1}{R^3} + \frac{2}{L^3} \right]}. \quad (1.21)$$

Таким образом, можно найти собственную добротность пустого объемного резонатора. Расчет по формуле (1.21) без учета коэффициента технологического качества дает значение собственной добротности 60000, если он изготовлен из меди с удельной проводимостью $\sigma = 5,8 \cdot 10^7 \text{ } \text{1/(Ом·м)}$ и имеет соотношение размеров $R/L = 0,5$ на длине волны $\lambda_0 = 0,1224 \text{ м}$.

Добротность резонаторов, созданных на основе волноводных систем, можно рассчитывать другим способом. Вычисление собственной добротности резонатора с колебаниями вида B_{mp} , выполненного из волновода с волной B_{mp} , ограниченного с торцов на расстоянии $L = \lambda_{dp}/2$ металлическими заглушками, можно выполнить из хорошо известного коэффициента затухания волновода [9, 10]. Это позволяет избежать интегрирования выражений (1.17) и (1.19). Расчетные формулы для собственных добротностей прямоугольных и цилиндрических резонаторов на разных видах колебаний с коэффициентом качества $K_s = 1$ приведены в Приложении 2. При практических расчетах может быть выполнена оптимизация с целью увеличения собственной

добротности резонатора по размерам резонатора или их отношению.

При расчёте собственных добротностей резонаторов, используемых в СВЧ-установках, следует учитывать также мощность потерь в диэлектрике $P_{\text{ди}}$, частично или полностью заполняющем резонатор,

$$P_{\text{ди}} = \frac{\sigma}{2} \int_{V_d} \left| \vec{E}_a \right|^2 dV = \omega_0 \epsilon_0 \operatorname{tg} \delta \int_{V_d} \left| \vec{E}_a \right|^2 dV, \quad (1.22)$$

где интегрирование происходит по объему диэлектрика V_d , имеющего проницаемость $\epsilon_0 = \epsilon \epsilon_0$, с учетом напряженности стороннего электрического поля в диэлектрике и тангенса угла диэлектрических потерь $\operatorname{tg} \delta$. При расчёте Q_0 с диэлектрическим заполнением следует учитывать как $P_{\text{ди}}$, так и W , в диэлектрике.

Особо следует подходить к расчёту оптически открытых резонаторов, в которых потери вызываются затуханием волны в заполняющей среде и на его концах за счёт дифракции и неидеального отражения от краев зеркал [10]. Добротности подобных резонаторов могут быть весьма значительными из-за больших значений параметра r .

Важнейшими характеристиками для расчёта и конструирования резонаторов являются параметры напряженности электрического и магнитного полей, которые устанавливают зависимость величины напряженности электрического и магнитного полей от добротности резонатора и вводимой в резонатор мощности. Параметры напряженности электрического и магнитного поля – это функции, зависящие от вида колебаний в резонаторе (структуры полей) и его геометрических размеров. Параметры напряженности полей –

$$\xi_x = \frac{\sqrt{E_x^2 + E_y^2 + E_z^2}}{\sqrt{QP}} = \frac{\sqrt{E_x^2 + E_y^2 + E_z^2}}{\sqrt{\omega W_1}}, \quad (1.23a)$$

$$\xi_m = \frac{\sqrt{H_x^2 + H_y^2 + H_z^2}}{\sqrt{QP}} = \frac{\sqrt{H_x^2 + H_y^2 + H_z^2}}{\sqrt{\omega W_1}}, \quad (1.23b)$$

где ω – циклическая резонансная частота на данном виде колебаний; P – введенная в резонатор мощность. Компоненты электромагнитного поля могут быть представлены также в

цилиндрических и сферических координатах. Возможна некомпонентная запись параметров напряженности полей. Параметры напряженности позволяют судить о величине напряженности поля, нормированной на мощность, вводимую в резонатор и реальную добротность резонатора. Для примера рассмотрим цилиндрический резонатор с колебаниями H_{01} -вида, который, согласно (1.76), имеет лишь три составляющие электромагнитного поля: E_φ , H_z и H_r –

$$\begin{cases} H_z = BJ_0 \left(\frac{\mu_{01}}{R} r \right) \sin \frac{\pi}{L} z; \\ E_\varphi = -jZ_0 \frac{\lambda_{sp}}{\lambda_0} BJ_1 \left(\frac{\mu_{01}}{R} r \right) \sin \frac{\pi}{L} z; \\ H_r = j \frac{\lambda_{sp}}{\lambda_0} BJ_1 \left(\frac{\mu_{01}}{R} r \right) \cos \frac{\pi}{L} z; \end{cases} \quad (1.24)$$

где B – амплитуда поля; μ_{01} – первый корень уравнения $J'_0(x) = 0$;

$$Z_0 = 377 \text{ Ом}; \quad \lambda_{sp} = (2\pi R)/\mu_{01}; \quad \lambda_0 = \lambda_0 / \sqrt{1 - (\lambda_0/\lambda_{sp})^2};$$

$J_n(x)$ – функции Бесселя n -го порядка ($n = 0, 1$); $L = \lambda_0/2$. Найдем параметр напряженности электрического поля, используя (1.24) и полученное ранее выражение (1.17) для запасенной в пустом резонаторе энергии:

$$\xi_3^2 = \frac{E_\varphi^2}{\omega W_3} = \frac{Z_0^2 \left[\frac{\lambda_{sp}}{\lambda_0} \right]^2 B^2 J_1^2 \left(\frac{\mu_{01}}{R} r \right) \sin^2 \frac{\pi}{L} z}{\omega \frac{\pi \epsilon_0}{4} \cdot L \cdot \left[Z_0 B \frac{\lambda_{sp}}{\lambda_0} R J_0(\mu_{01}) \right]^2}. \quad (1.25)$$

Выполним преобразования с учетом $\omega = 2\pi / (\lambda_0 \sqrt{\epsilon_0 \mu_0})$ и $Z_0 = \sqrt{\mu_0 / \epsilon_0}$, извлечем квадратный корень и получим:

$$\xi_{sp} = \frac{E_\varphi}{\sqrt{PQ}} = \frac{E_\varphi}{\sqrt{\omega W_3}} = \sqrt{\frac{2\lambda_0 Z_0}{L} \frac{J_1(\mu_{01}r/R)}{\pi R J_0(\mu_{01})} \sin(\pi z/L)}. \quad (1.26)$$

Аналогичным образом можно вывести выражения для параметров напряженности магнитного поля. Полученные

подобным образом параметры напряженности электромагнитных полей прямоугольных и цилиндрических резонаторов приведены в Приложении 2. Параметры напряженности электромагнитных полей используются для расчетов резонаторов на требуемые величины напряженности полей, а также при расчетах коэффициентов связи резонатора с волноводным трактом СВЧ-питания. Энергетическая оптимизация в зависимости от размеров резонатора может выполняться по параметрам напряженности электромагнитных полей.

Таким образом, зная такие энергетические характеристики резонатора, как запасенная энергия W_0 , собственная добротность Q_0 , параметры напряженности электромагнитных полей, можно оптимизировать резонатор, оценить режимы его работы и выполнить расчет происходящих в нем процессов.

1.3. Оценка влияния конструктивных элементов резонатора на ЭДХ рабочей камеры

В СВЧ-установках резонаторные рабочие камеры применяются при фильтрации заданной частоты в радиотехнике, при создании необходимых значений напряженности полей в СВЧ-электронике и ускорительной технике и при обработке материалов в СВЧ-энергетике. Резонаторные рабочие камеры в установках СВЧ-энергетики используются для воздействия на материалы, размещаемые непосредственно в объеме резонатора с целью их диэлектрического нагрева или поджига разряда. При разработке резонаторных рабочих камер необходимо учитывать влияние этих материалов или сопутствующих конструктивных элементов на электродинамические характеристики (ЭДХ) резонаторов.

Значительное влияние на собственную резонансную частоту рабочей камеры могут оказывать сам обрабатываемый материал и его крепление в резонаторной рабочей камере, металлические элементы конструкции в объеме резонатора и технологические отверстия в корпусе резонаторной рабочей камеры, запредельные для СВЧ-колебаний. Для корректного технического проектирования рабочих камер установок СВЧ-энергетики

необходимо выполнение хотя бы приближенной оценки влияния этих устройств на ЭДХ резонатора.

Оценка этих возмущений может быть выполнена с использованием метода малых возмущений, в котором возмущение поля иносимым телом считается незначительным. Для диэлектрического тела объемом V_1 возмущение частоты составит:

$$\frac{f - f_0}{f_0} = -\frac{1}{4W_1} \left[\epsilon_0(\epsilon - 1) \int_{V_1} E E^* dv + \mu_0(\mu - 1) \int_{V_1} H H^* dv \right], \quad (1.27a)$$

а для идеально проводящего тела объемом V_2 –

$$\frac{f - f_0}{f_0} = \frac{1}{4W_1} \left[\mu_0 \int_{V_2} H_0^2 dv - \epsilon_0 \int_{V_2} E^2 dv \right], \quad (1.27b)$$

где E_0^* и H_0^* – комплексно-сопряженные величины полей без возмущающего тела; E и H – поля с возмущением; V – объем резонатора. Таким образом, если поместить идеально проводящее тело в область с преобладанием электрического поля, то собственная частота уменьшится, а при преобладании магнитного поля в месте размещения проводящего тела собственная частота возрастет. При внесении в объем резонатора тела из диэлектрика $\epsilon > 1$ и $\mu = 1$ собственная частота уменьшится.

Изменение резонансной частоты рабочей камеры с погрешностью не более 10 % целесообразно определить методом малых возмущений, с учетом непрерывности составляющей E поля к поверхности диэлектрика $\epsilon_1 > 1$ и $\mu = 1$: $\Delta f_0 = \Delta W_e / (2W_1)$, где ΔW_e – изменение запасенной энергии за счет введения диэлектрика; W_1 – запасенная в резонаторе энергия. Энергия, запасенная диэлектриком, $W_1 = \frac{\epsilon_0 \epsilon}{2} \int_{V_1} E^2 dv$, а $W_1 = PQ/\omega$. Тогда

$$\frac{\Delta f_0}{f_0} = -\frac{\alpha \epsilon_0 (\epsilon_1 - 1)}{4PQ} \int_{V_1} E^2 dv = -\frac{\pi (\epsilon_1 - 1)}{2J_0 Z_0} \int_{V_1} \xi_s^2 dv, \quad (1.28)$$

где $\xi_s(r, \phi, z) = E_\phi / \sqrt{PQ}$ – параметр напряженности электрического поля в резонаторе.

Например, рассмотрим цилиндрический E_{010} -резонатор с соосно размещенной керамической подставкой ($\epsilon_1 = 6$, $\operatorname{tg}\delta = 0,5 \cdot 10^{-3}$) радиусом R_1 и длиной L_1 , $R_1/L_1 \ll 1$, изображенной на рис. 1.5.

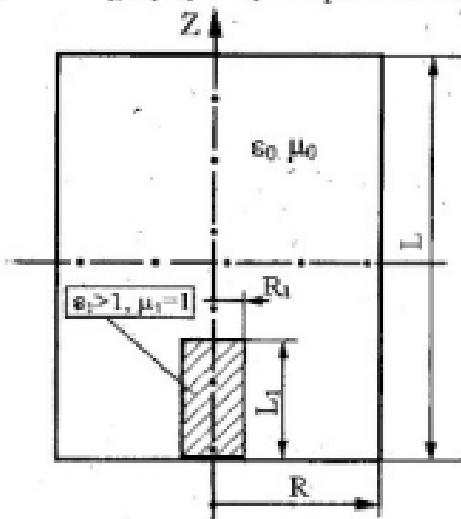


Рис. 1.5. Цилиндрический E_{010} -резонатор с керамической подставкой

Параметр напряженности электрического поля согласно (П.2.6а) записывается $\xi_x = \frac{2}{\nu_{01}} \sqrt{\frac{Z_0}{\lambda_0 L} \frac{J_0(\nu_{01}r/R)}{J_1(\nu_{01})}}$, интеграл по объему в цилиндрической системе координат составит $\int F dx dy dz = \int \int F r d\phi dr dz$, и тогда (1.28) примет вид:

$$\frac{\Delta f}{f_0} = -\frac{2\pi(\epsilon_1 - 1)}{\nu_{01}^2} \frac{1}{\lambda_0^2 L} \frac{1}{J_1^2(\nu_{01})} \int_0^{R_1} \int_0^{L_1} \int_0^{2\pi} J_0^2(\nu_{01}r/R) \cdot r dr d\phi dz = \\ = -\frac{(\epsilon_1 - 1)}{J_1^2(\nu_{01})} \frac{L_1}{R^2 L} \int_0^{R_1} J_0^2(\nu_{01}r/R) \cdot r dr =$$

$$= -\frac{(\varepsilon_1 - 1)}{2} \frac{V_1}{V} \frac{J_0^2(v_{01}R_1/R) + J_1^2(v_{01}R_1/R)}{J_1^2(v_{01})}, \quad (1.29)$$

где $V_1 = \pi L_1 R_1^2$ и $V = \pi LR^2$ – объем диэлектрика и объем резонатора, соответственно, а резонансная длина волны $\lambda_0 = 2\pi R / v_{01}$. При вычислении неопределенного интеграла с функциями Бесселя использовались формулы, приведенные в Приложении 1. Положим $\varepsilon_1 = 4$, $L = L_1$, а отношение $R_1/R = 0,1$, тогда смещение частоты составит $-0,054$. Такое смещение частоты вполне приемлемо, так как метод возмущений работает при изменении частоты до 20% и добротности до 10 раз. Точность вычисления $\Delta f/f_0$ в случае слабого изменения электрического поля в области интегрирования составит $\sim 10\%$, что является вполне приемлемым для проведения конструкторских работ, т.к. после изготовления рабочей камеры в любом случае требуется ее подстройка на резонансную частоту коррекцией размеров. Подобным образом можно оценить возмущения, вносимые проводящим телом, расположенным в объеме резонатора. Если диэлектрическое тело, расположенное в объеме резонатора, имеет сложную форму, трудную для интегрирования, его можно разбить на части и аппроксимировать простыми формами.

Влияние диэлектрических тел с потерями на собственную добротность резонатора можно оценить по отношениям (1.18) и (1.22).

Для учета влияния запредельных для СВЧ-поля технологических отверстий на резонансную частоту рабочей камеры также используют метод малых возмущений. Технологические отверстия в корпусе резонаторной рабочей камеры могут возбуждаться как электрическими, так и магнитными полями на волнах разного вида. В отверстиях запасается электромагнитная энергия, величина которой наибольшая на низшей волне H_{011} -вида, т.к. ее коэффициент затухания наименьший для запредельных отверстий и другими волнами можно пренебречь. Рассмотрим следующую модель: цилиндрический H_{011} -резонатор с отверстием в торцевой стенке.

Отверстие возбуждается тангенциальной составляющей \bar{H} магнитного поля рабочего вида колебаний (рис. 1.6).

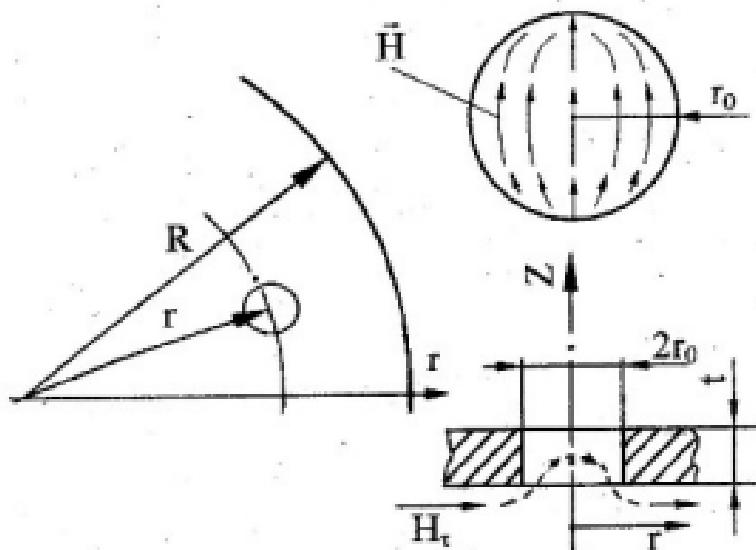


Рис. 1.6. Технологическое отверстие в торце цилиндрического H_{11} -резонатора

В нем может возбуждаться низшая волна H_{11}^0 -вида с магнитными составляющими:

$$\begin{cases} H_z = BJ_1(k_c r) \cos \varphi; \\ H_\varphi = -\frac{B}{k_c r} J_1(k_c r) \sin \varphi; \\ H_r = -BJ'_1(k_c r) \cos \varphi, \end{cases} \quad (1.30)$$

где $k_c = \mu_{11}/r_0$, r_0 – радиус отверстия; $\mu_{11} = 1.841$ – первый корень уравнения $J'_1(x) = 0$. Границное условие на поверхности торцевой стенки корпуса резонатора $H_z^{r=0} = H_r = H_0$, где H_0 – радиальная составляющая магнитного поля H_{11} -вида колебаний. Используя записанный в (П.2.7в) параметр напряженности магнитного поля, граничные условия можно записать в виде $H_z^{r=0} = \xi_m(r_0) \sqrt{PQ}$. Для

резонатора ($\lambda_0 = 122,36$ мм; $R/L = 0,70$; $R = 86,04$ мм) параметр $\xi_m(r;0) = 0,332 \left[\text{Ом}^{-1/2} \cdot \text{м}^{-1} \right] J_1 \left(\frac{\mu_{01}}{R} r \right)$. Последнее соотношение позволяет определить постоянную B в выражениях (1.30):

$$B = \frac{\xi_m(r;0)\sqrt{PQ}}{J_1(\mu_{01})} = 1,719 \xi_m(r;0)\sqrt{PQ}. \quad (1.31)$$

Для дальнейшего анализа и расчета влияния отверстия на ЭДХ резонатора понадобится формула запасенной в отверстии магнитной энергии:

$$\Delta W = \frac{\mu_0}{2} B^2 \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi} \left[J_1^2(k_0 r) \cos^2 \varphi + \frac{J_1^2(k_0 r)}{k_0^2 r^2} \sin^2 \varphi + J_1^2(k_0 r) \cos^2 \varphi \right] r dr d\varphi e^{-2ax} dz,$$

где $a = k_{sp} = \mu_{01}/r_0$ – коэффициент затухания волны H_{11}^0 в запредельном волноводе при $k_{sp} \gg k_0$. Интегралы, входящие в последнее уравнение, – табличные [11]. В итоге получается

$$\Delta W = 3,241 \cdot 10^{-3} \cdot \mu_0 B^2 r_0^3 [1 - e^{-2ax}], \quad (1.32)$$

где $\mu_{01} = 1,8412$; $J_1(\mu_{01}) = 0,5819$. Используя записанную в (1.31) постоянную B и учитывая соотношение $\mu_0 \lambda_0 = Z_0 / f_0$, выражение (1.31) приводится к удобному для расчетов виду:

$$\Delta W = \frac{0,295 \cdot PQ [1 - e^{-2ax}] \cdot r_0^3 \cdot J_1^2 \left(\frac{\mu_{01}}{R} r \right)}{f_0 V_p (L/\lambda_0)^2}, \quad (1.33)$$

где V_p – объем резонатора. Влияние отверстия, выполненного согласно рис. 1.6, оценивается согласно теореме о малых возмущениях $\Delta f/f_0 = -\Delta W/W_3$ в энергетической форме, где $W_3 = PQ/a$. Например, для отверстия $r_0 = 7,5$ мм и $t = 20$ мм, расположенного в $r = 0,48R$, смещение частоты будет незначительным $\Delta f/f_0 = -0,0001$. Однако в случае десятков отверстий их влияние на частоту следует учитывать.

На сегодняшний день существуют пакеты прикладных программ, позволяющие решить уравнения (1.3) в любых граничных условиях при любом заполнении. Задаваясь граничными условиями и диэлектрическим заполнением, можно получить резонансные частоты и соответствующие им любые

распределения электромагнитного поля. Решение (1.3) основывается на численных методах решения дифференциальных уравнений. Точность решения таких задач зависит от точности разбиения границ и величины сетки. В зависимости от метода программы позволяют выполнять расчеты ЭДХ видов колебаний в осесимметричных резонаторах и осенесимметричных резонаторах. К первым относится такой пакет прикладных программ, как POISSON-SUPERFISH (Los-Alamos National Laboratory). Программа SUPERFISH предназначена для вычисления ЭДХ азимутально-симметричных Е-видов колебаний в осесимметричных резонаторах. Она использует метод конечных элементов на регулярной триангулярной сетке, что позволяет с высокой точностью аппроксимировать границу области расчётов.

К более универсальным и современным пакетам прикладных программам относятся трехмерные программы, такие, как Microwave Studio (Computer Simulation Technology) и High Frequency Structure Simulator (ANSOFT), позволяющие проводить численную оптимизацию резонатора по многим параметрам. Данное программное обеспечение может использоваться на современных персональных компьютерах, однако, время расчета задач значительное и отсутствует аналитическая возможность оптимизации резонатора.

Таким образом, при расчете и конструировании резонаторных рабочих камер возможно учесть влияние конструктивных элементов резонатора на его электродинамические характеристики как аналитическими, так и программными методами.

1.4. Устройства связи резонатора с передающими линиями

Важнейшим вопросом, возникающим при конструировании резонаторов, является их связь с передающими линиями. Резонаторы не могут рассматриваться обособленными системами, не связанными с внешними цепями. Устройства связи служат для поступления или вывода энергии электромагнитных колебаний и являются неотъемлемой конструктивной частью резонаторов. Связь резонатора с СВЧ-трактом определенным образом влияет на

параметры самого резонатора, поэтому вводится определение нагруженной добротности резонатора Q_n [3, 9, 10]:

$$\frac{1}{Q_n} = \frac{1}{\omega_0} \frac{P_n + \sum P_{\text{пот}}}{W_s} = \frac{1}{Q_0} + \frac{1}{Q_{\text{вн}}}, \quad (1.34)$$

где P_n – мощность потерь в проводящей оболочке; $\sum P_{\text{пот}}$ – сумма потерь мощности во внешних цепях и в диэлектрике с значительным $\operatorname{tg}\delta$, размещенном в резонаторе; $Q_{\text{вн}}$ – внешняя добротность резонатора. В случае если $Q_{\text{вн}}=Q_0$, то такой режим связи резонатора с линиями передачи называется критическим режимом, $Q_n < Q_0$ – режим пересвязи, и $Q_n > Q_0$ – режим недосвязи. Коэффициент связи резонатора равен нормированному активному сопротивлению резонатора при резонансе и определяется как $K_{\text{св}}=Q_0/Q_{\text{вн}}$.

Как правило, в СВЧ-установках резонатор связан одним устройством связи с передающей линией для ввода-вывода СВЧ-энергии или иногда он подключается по проходной схеме с двумя и более устройствами связи. Наиболее распространена схема с внешним согласованным источником СВЧ-энергии, связанным с резонатором передающей линией (рис 1.7.).

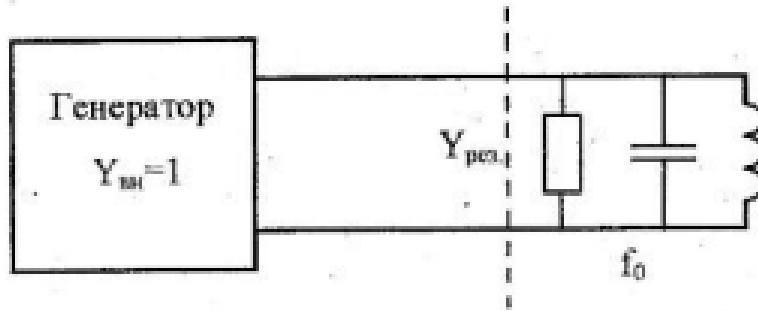


Рис. 1.7. Резонатор, связанный с согласованным генератором

Нормированная проводимость резонатора в сечении эквивалентного представления вблизи резонансной частотыносит комплексный характер, зависящий от частотной расстройки:

$$Y_{\text{рез}} = \frac{1}{K_{\text{св}}} (1 + jx), \quad (1.35)$$

где $x = 2Q_0\Delta\omega/\omega_0$ – нормированная частотная расстройка резонатора. Такая запись носит название импедансной характеристики резонатора и изображается кругом на диаграмме полных сопротивлений.

Коэффициент передачи мощности резонатору записывается как

$$K_p = \frac{P_{\text{рез}}}{P_{\text{ген}}} = 1 - |\Gamma_{\text{вх}}|^2 = \frac{K_{\text{п0}}}{1 + x_n^2}, \quad (1.36)$$

где $P_{\text{рез}}$ – мощность, поступающая в резонатор; $P_{\text{ген}}$ – мощность генератора; $\Gamma_{\text{вх}}$ – комплексный коэффициент отражения от входа в резонатор; $K_{\text{п0}}=4K_{\text{св}}/(1+K_{\text{св}})^2$ – коэффициент передачи на резонансной частоте; $x_n = 2Q_n\Delta\omega/\omega_0$ – обобщенная расстройка нагруженного резонатора. Таким образом, максимальное значение K_p достигается на резонансной частоте и коэффициенте связи $K_{\text{св}}=1$.

Коэффициент передачи η мощности, переданной в резонатор образцу, можно определить, зная нагруженные добротности резонатора без образца Q_n и с образцом $Q_{\text{рез}}$:

$$\eta = \frac{Q_n - Q_{\text{рез}}}{Q_n}. \quad (1.37)$$

Резонаторы, подключенные по проходной схеме, применяются чаще всего в частотных фильтрах, входных устройствах приемников СВЧ и резонансных волномерах.

Рассмотрим устройство связи резонатора с линиями СВЧ. Методы возбуждения объемных резонаторов такие же, как и у волноводов. Для возбуждения могут применяться штыри, петли связи, щели или отверстия. При проектировании устройств связи следует учитывать структуру полей в резонаторе. Это позволит получить нужную амплитуду и распределение поля в резонаторе при минимальных размерах узла связи и его максимальной электрической прочности. Для резонатора в многомодовом режиме, когда в нем существуют колебания нескольких типов на близких частотах, устройство связи должно обеспечивать избирательную по структуре поля связь линии с резонатором, не допуская возникновения колебаний нежелательных видов. Например, в цилиндрическом резонаторе с H_{011} - и E_{111} -видами колебаний можно организовать связь так, что один из этих видов практически не

будет возбуждаться данным устройством связи. Этот способ можно применить и для исключения поляризационного вырождения на колебаниях H_{111} -вида в цилиндрическом резонаторе. В этих случаях устройства связи фиксируют поле в определенном положении.

Наиболее часто для возбуждения колебаний в резонаторах используются отверстия связи с волноводом. Взаиморасположение волновода и резонатора должно быть таким, чтобы направление полей в окне отверстия связи в волноводе и в резонаторе совпадали. Резонаторы также можно возбуждать петлей связи, плоскость которой пронизывает магнитное поле, или штырями, расположеннымными параллельно электрическому полю.

Коэффициент связи K_s численно равен нормированному сопротивлению эквивалентного контура, подключенного к передающей линии в месте отверстия связи на резонансной частоте. Расчет волноводных устройств входа мощности может быть выполнен методом резонатора аналога [6] при условии совпадения амплитуд полей резонатора и его аналого в центре отверстия связи. Данный метод расчета без учета малостей вторых порядков с точностью до 10-12% дает верное решение. Простейшим узлом входа мощности в резонатор является индуктивная диафрагма связи в прямоугольном волноводе. Такое устройство связи наиболее часто используется, поскольку просто в изготовлении и обладает высокой электрической прочностью.

Эскиз магнитного устройства связи с H_{011} -резонатором приведен на рис. 1.8, где центр щели связи совпадает с точкой максимальной напряженности магнитного поля H_z на корпусе резонатора, а направления касательного диафрагме магнитного поля H_ϕ , H_τ со стороны резонатора и волновода, соответственно, совпадают. Размещение центра окна связи в координатах $z = L/2$, $r = R$, когда широкая стенка волновода параллельна оси резонатора, затрудняет возбуждение вырожденного паразитного вида колебаний E_{111} .

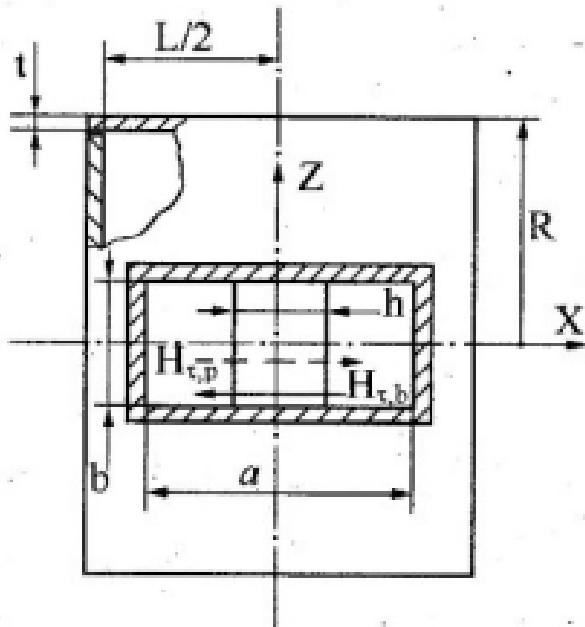


Рис. 1.8. Индуктивный узел связи прямоугольного волновода на H_{10} волне с H_{011}^0 -резонатором

Основная часть расчетов устройства связи состоит в определении ширины h индуктивной диафрагмы, обеспечивающей заданный коэффициент связи K_{cb} на резонансной частоте f_0 . В свою очередь, $K_{cb} = Z_s/Z_m$, где Z_m – сопротивление резонаторной нагрузки волновода. Соотношение для определения коэффициента связи согласно [6, 7] имеет вид:

$$K_{cb} = Z_{ss} = \left(\frac{\pi Z_0 \cdot V_m \cdot \xi_{mp} \cdot \xi_{mb}}{\lambda_0} \right)^2 Q, \quad (1.38)$$

где V_m – коэффициент магнитной поляризации индуктивной диафрагмы по направлению H , магнитного поля; ξ_{mp} и ξ_{mb} – параметры напряженности магнитного поля на диафрагме со стороны резонатора и волновода соответственно. Для

прямоугольных волноводов на основной H_{10} -волне с учетом расположения щели связи на короткозамыкающей пластине [6, 7]:

$$\xi_{\text{мв}}(x = 0; z = 0) = 2\sqrt{\lambda_0 / (a \cdot b \cdot \lambda_s \cdot Z_0)}, \quad (1.39)$$

что соответствует центру диафрагмы, а коэффициент магнитной поляризации прямоугольной щели

$$V_m = \pi b \cdot (h - t)^2 / 16 \text{ при } h \leq 0,1 \cdot a \quad (1.40)$$

и

$$V_m = \frac{\pi^2 b}{4\pi} \operatorname{tg}^2 \left(\frac{\pi(h-t)}{2a} \right) \text{ при } 0,1 \cdot a \leq h \leq 0,6 \cdot a,$$

где a и b – размеры широкой и узкой стенок прямоугольного волновода; t – толщина стенки окна связи, а параметр $\xi_{\text{мв}}$ для цилиндрического H_{011} -резонатора при условии на стенке $r = R$ и $z = L/2$ приведен в (П.2.7б-в). Таким образом, зная параметр напряженности магнитного поля на стенке резонатора, можно с хорошей точностью рассчитать коэффициент связи.

При разработке резонаторов необходимо учесть влияние окна связи на электродинамические характеристики резонатора. Относительную девиацию частоты можно выразить с помощью теоремы малых возмущений согласно [6]:

при $\pi(h-t)/2a < 0,4$

$$\frac{\Delta f}{f_0} = -\frac{a^2 b Z_0 \xi_{\text{мв}}^2}{8\lambda_0} \operatorname{tg}^2 \left[\frac{\pi(h-t)}{2a} \right] \approx -\frac{1}{2} \sqrt{\frac{K_{cb}}{K_b Q}} \frac{\xi_{\text{мв}}}{\xi_{\text{мв}}}; \quad (1.41a)$$

при $\pi(h-t)/2a \geq 0,4$

$$\frac{\Delta f}{f_0} = -\frac{ab\lambda_s Z_0 \xi_{\text{мв}}^2}{16\lambda_0} \operatorname{argctg} \left[\frac{2a}{\lambda_s} \operatorname{tg}^2 \left[\frac{\pi(h-t)}{2a} \right] \right] \left(\frac{\pi b / (2a)}{\sin[\pi b / (2a)]} \right)^2. \quad (1.41b)$$

Для большинства резонаторов с $K_{cb} \leq 3$ девиация частоты не превышает $1,0-5,0 \cdot 10^{-3}$. Следовательно, девиацию частоты также необходимо учитывать при расчете ЭДХ резонаторных рабочих камер.

Связь коаксиальной линии передач с резонаторной рабочей камерой можно осуществить непосредственно с помощью петлевого устройства связи, размещенного в резонаторе. Инженерная методика расчета геометрических размеров магнитно-

петлевых устройств связи может быть использована при техническом проектировании рабочих камер. Рассмотрим пример петлевого ввода мощности в цилиндрический H_{01} -резонатор. Эскизный чертеж такого ввода показан на рис. 1.9.

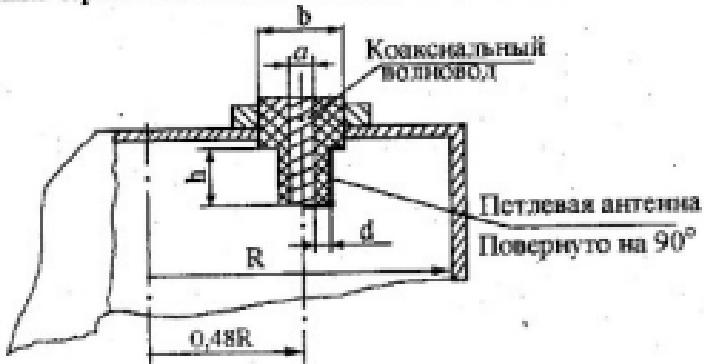


Рис. 1.9. Петлевой узел связи коаксиальной линии с H_{01} -резонатором

Он образуется проводником, концы которого присоединены пайкой к центральному проводнику коаксиала и корпусу резонатора. С конструктивной точки зрения, образованную проводником петлю связи целесообразно разместить на торцевой стенке H_{01} -резонатора в координате $r = 0.48R$, где магнитная составляющая H_r достигает максимального значения.

Если плоскость петли нормальна пересекающему ее магнитному полю, то относительное входное сопротивление петли определяется в виде

$$Z_{\text{вх}} = \frac{2Q}{R_0} \left(\frac{\pi \cdot Z_0 S_a \xi_{\text{шр}}}{\lambda_0} \right)^2, \quad (1.42)$$

где S_a – площадь петли; R_0 – волновое сопротивление коаксиальной линии, закороченной петлей. Для расчета площади петли связи $S_a = b \cdot d$ (см. рис. 1.9) выражение (1.42) следует записать в виде

$$S_a = 5.97 \cdot 10^{-4} [1/\Omega\text{м}] \frac{\lambda_0}{\xi_{\text{шр}}} \sqrt{\frac{Z_{\text{вх}}}{Q} R_0}. \quad (1.43)$$

При проектировании устройства связи необходимо также учитывать влияние индуктивности петли на частотные характеристики резонатора. Высокая электрическая прочность петли достигается фторопластовой оболочкой штыревого вывода, указанной на рис. 1.9.

Штыревые устройства связи также используются для подачи СВЧ-мощности в волноводный тракт и в резонаторные рабочие камеры СВЧ-устройств. Конструкция устройства показана на рис. 1.10.

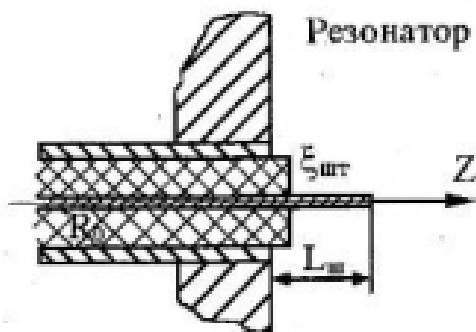


Рис. 1.10. Штыревой узел связи коаксиальной линии с резонатором

Зонд помещается по линиям электрического поля. Оценку коэффициента связи в такой системе можно сделать на основании работы [6]:

$$Z_{\text{ax}} = \frac{(E_{\text{ax}} l_a)^2}{2 R_0 P} \quad (1.44)$$

где E_{ax} – напряженность электрического поля вдоль штыря; l_a – действующая высота антенны. В общем случае $l_a = \frac{1}{I_0} \int I(x)dx$ и $I_0 L_{\text{in}}$

для синусоидального распределения тока $I=I_0 \sin(\pi x/2L)$ $l_a=0,637 l_{\text{in}}$, а для линейного – $l_a=0,5 l_{\text{in}}$. Напряженность электрического поля вычисляется с использованием параметра напряженности

электрического поля в месте расположения штыря $E_{\text{шт}} = \xi_{\text{шт}} \sqrt{PQ}$. В свою очередь $\xi_{\text{шт}}$ в области расположения штыря вычисляется численно с использованием пакетов прикладных программ или с использованием аналитических выражений для параметра напряженности электрического поля. Уравнение (1.44) переходит к виду

$$Z_{\text{вх}} = \frac{\xi_{\text{шт}}^2 Q_0 l_A^2}{2R_0}, \quad (1.45)$$

где Q_0 – собственная добротность резонатора; $\xi_{\text{шт}} = \frac{\xi_1 + \xi_0}{2}$;

ξ_0 – параметр напряженности у стенки резонатора. Данная формула не учитывает влияние емкостной составляющей толстого штыря относительно стенки резонатора. Таким образом, можно оценить ожидаемый коэффициент связи для разного размещения штыревой антенны с погрешностью 10-15 процентов. В качестве штыря входа мощности может быть использована штыревая антenna магнетрона. Штыревой ввод чаще используется для входа мощности в резонаторы с колебаниями Е-вида. В реальных конструкциях штыревых антенн узел входа мощности должен обладать достаточной электрической прочностью, обеспечивающей бесперерывную работу пробоя на стенку резонатора. Напряженность электрического поля в краевых областях не должна превышать 30 кВ/см. Чтобы избежать пробоя по границе коаксиального ввода, на антенну надевают фторопластовый наконечник.

Такой ввод мощности смешает резонансную частоту рабочей камеры из-за введения дополнительной ёмкости в резонансный контур. Поэтому корректирующую подстройку на требуемую частоту следует производить при экспериментальной настройке резонатора на малом уровне мощности.

4.5. Настройка и исследование резонаторных рабочих камер

Экспериментальное исследование и настройка изготовленной рабочей камеры является важнейшим этапом наладки СВЧ-установки. Исследования резонаторных рабочих камер могут быть «холодные», проводимые при комнатной температуре, и «горячие», при которых имеют место тепловые деформации корпуса резонатора за счет его нагрева СВЧ-мощностью. Методики проведения этих исследований не имеют существенных качественных отличий.

Измерения основных параметров резонаторов широко освещены в литературе по измерениям на СВЧ [6, 12]. В данном учебном пособии ограничимся лишь качественно-физическими изложением подхода к измерению основных параметров резонатора (резонансной частоты, собственной добротности и коэффициента связи). Методы измерения электрических полей в объемных резонаторах и параметров сверхпроводящих резонаторов также не рассматриваются в данном пособии. Резонаторы в установках СВЧ-энергетики, как правило, имеют однту связь, через которую осуществляется его питание СВЧ-мощностью от генераторов магнетронного типа. Существует два основных способа измерения параметров резонатора, а именно: по методу двухполюсника, и по методу четырехполюсника. Функциональная схема установки, реализующая эти методы, приведена на рис. 1.11. Данная установка [13] дает возможность исследовать ЭДХ резонаторных рабочих камер и настраивать установки СВЧ-энергетики на низком уровне мощности.

Опишем эту установку. В качестве источника СВЧ-сигнала здесь использовался генератор ГЧ-79 с рабочим диапазоном частот 1,75-2,55 ГГц, кратковременной нестабильностью частоты $\delta f/f_r \leq 10^{-6}$ и выходной мощностью $P_r \leq 60$ мВт. Электронно-счетный частотомер ЧЗ-49 с переносчиком частоты ЯЗЧ-51 обеспечивает точность измерения частот $\delta f/f_r \leq 5 \cdot 10^{-7}$ при мощности входного сигнала 50 мкВт. Волноводная измерительная линия Р1-7 (72x34 мм) или ее аналог позволяет измерять КСВ с погрешностью не более $\pm 6\%$ и координату минимума стоячей волны с погрешностью $|\Delta Z| \leq 0,15$ мм .

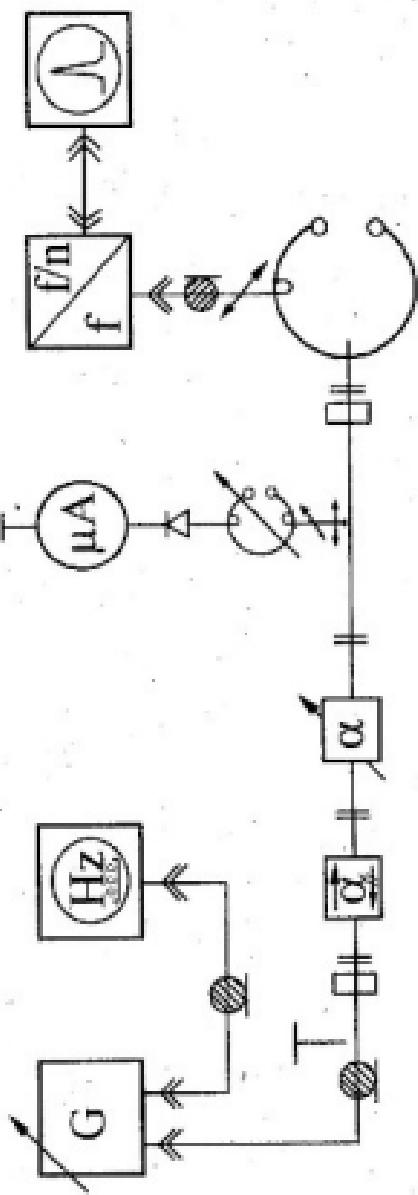


Рис. 1.11. Функциональная схема штатной измерительной установки

Ферритовый вентиль $0,5 \times 20$ дБ предотвращает затягивание частоты измерительного генератора при выполнении измерительных манипуляций, а аттенюатор используется для установки нужного уровня сигнала на микроамперметре измерительной линии. Сигнал-отклик с выхода резонатора четырехполюсника исследовался на экране анализатора спектра СЧ-27, который обеспечивает высоту пика сигнала ~ 100 мм без его заметного дрожания при входной мощности ≥ 5 мкВт. Высокая чувствительность анализатора спектра позволяет установить переходное ослабление резонатора ~ 40 дБ, что соответствует измерению собственной добротности по методу четырехполюсника с относительной погрешностью $Q_n/Q_0 = (1+10^{A/20})^{-1} = 0,990$. В случае симметричной проходной связи с резонатором переходное затухание

$$A = 20 \lg \frac{2Z_{\text{вх}}}{1 + 2Z_{\text{вх}}} \quad (1.46)$$

достигает величины 40 дБ при $Z_{\text{вх}} = 0,005$, что соответствует минимальной ширине магнитного окна связи с резонатором и наименьшей площади претали связи.

Погрешность измерения резонансной частоты в описанной установке определяется в основном ошибкой отсчета положения сигнала-отклика на экране СЧ-27 относительно амплитудного значения P_0 , так как ошибка из-за нестабильности генератора и частотомера пренебрежимо мала по сравнению с первой ошибкой. Таким образом,

$$\frac{\delta f_0}{f_0} = \frac{1}{2Q_n} \sqrt{\frac{\Delta P_0}{P_0}} \quad (1.47)$$

и целесообразно принять $\Delta P_0 \leq 2$ мм и $P_0 = 100$ мм. Тогда, согласно (1.47), $\delta f_0/f_0 \leq 0,07/Q_n$, или $\delta C/C_0 \leq 5 \cdot 10^{-6}$ при $Q_n = 1,5 \cdot 10^4$. Аналогично определяется погрешность измерения добротности резонатора по уровню половинной мощности выходного сигнала:

$$\frac{\delta Q_n}{Q_n} = \frac{2\Delta P_{0,5}}{P_{0,5}}, \quad (1.48)$$

где $\Delta P_{0,5}$ - ошибка оператора при установлении уровня половинной мощности на экране СЧ-27. При реальном $\Delta P_{0,5}/P_{0,5} \leq 2,5 \cdot 10^{-2}$

погрешность $\delta Q_r/Q_r \leq 5\%$. Следовательно, можно сделать вывод, что качество использованной экспериментальной установки обеспечивает получение результатов, пригодных для тонкой настройки рабочих камер установок СВЧ-энергетики.

Измерения и подстройку резонаторной рабочей камеры начинают с пустого резонатора с малым коэффициентом связи с СВЧ-трактом, используя установку, изображенную на рис. 1.11. При этом измеряют резонансную рабочую частоту, собственную добротность и коэффициент связи, используя его определение (на резонансной частоте $K_{cb}=1/p$ при недосвязи, $K_{cb}=1$ при критической связи и $K_{cb}=p$ при пересвязи). Затем последовательно измеряется резонансная частота резонатора и собственная добротность при монтаже конструктивных элементов рабочих камер и обрабатываемых тел. Далее изменением размеров щели или петли связи настраивается связь резонатора с СВЧ-трактом (как правило, на критическую или близкую к ней), при этом одновременно исследуется влияние узла связи на резонансную частоту рабочей камеры. Методом последовательных приближений производится итоговая настройка на резонансную частоту.

В качестве настроенных элементов могут выступать контактные и бесконтактные поршни, изменяющие объем резонатора, металлические штыри или диэлектрические вставки. Подстройка на резонансную частоту может также проводиться изменением геометрии структуры путем механического выгибания степок или конструктивных элементов резонатора.

Описанная выше методика экспериментальных исследований и аттестации резонаторных рабочих камер может быть использована при настройке рабочих камер СВЧ-ламп, установок по спеканию несовершенных диэлектриков и разрушению веществ. Применяя предложенную методику измерений, можно снизить объем подстроечно-наладочных работ до минимума при высоком качестве настройки.

Глава 2

Конструкционно-технологические особенности создания резонаторных рабочих камер

2.1. Основы конструирования резонаторных рабочих камер

Конструирование преследует цель создания технических проектов устройств. Технический проект должен удовлетворять ряду требований: физическим параметрам, техническим требованиям, требованиям ГОСТов, эксплуатационным требованиям, требованиям экологической безопасности и экономической целесообразности, простоте практической реализации.

В основу конструкции резонаторов закладываются предварительно рассчитанные внутренние размеры резонаторных рабочих камер. Конструирование осуществляется интерполяционными методами на основе рассмотрения множества возможных вариантов технических решений. Окончательный технический проект всегда является компромиссным решением, выбранным в результате анализа и синтеза и учитывающим все предъявляемые требования [14]. В табл. 2.1 представлены основные этапы работы на стадии проектирования.

Технический проект резонатора должен предусматривать метод его изготовления. Вопрос оптимального выбора метода изготовления резонаторов неразрывно связан с анализом конструктивного решения. Эта связь обусловлена тем, что метод изготовления во многом определяется конструкцией корпуса волноводного устройства и, наоборот, конкретный метод изготовления накладывает ограничения на конструкцию. Так, если корпус изготавливают пайкой или сваркой, он обязательно будет сборным; при изготовлении корпуса литьем у него появятся радиусы, уклоны, ребра жесткости для обеспечения плоскости поверхностей, может возрасти толщина стенок. Отличное значение имеет выбор материала, из которого изготавливается резонатор.

Отработка конструкции изделия по стадиям проектирования

Таблица 2.1

Техническое предложение		0-20%	20-50%	50-80%	80-90%	90-95%	95-100%
Стадия отработки базовых показателей технологич- ности изделия	Анализ вариантов СХС и комплекс- ной конструкции	Технический проект		Разработка рабочей документации		Массового производства	Завершение отработки конструкции с соответствую- щим уточне- нием
		Опытно- применитель- ных конструктив- ных решений	Основательные решения по техническо- сти	Опытного образца	Установочной серии		
		Анализ изделия по комплекс- ной конструкции	Окончательные решения по техническо- сти	Отработка конструкций данных на конкретных объектах	Отработка на конкретных объектах со указанием недостатков	Отработка на конкретных объектах с учетом указаний данных завода- изготовителя	Завершение отработки конструкции с соответствую- щим уточне- нием

При изготовлении резонаторов могут применяться комбинированные методы. Поэтому при конструкторско-технологической разработке необходимо использовать обобщенные критерии, позволяющие анализировать и сравнивать варианты решений для создания конструкции и выбора метода изготовления. Критерием такой оценки может быть техническая эффективность, зависящая от надежности, качества, массы и себестоимости корпуса резонаторного устройства.

При расчетах и изготовлении резонатора могут возникать погрешности в его размерах, поэтому уже на этапе конструирования необходимо предусматривать возможность перестройки его характеристик наиболее простыми методами. Собственная добротность резонатора — параметр, сильно зависящий от материала резонатора, частоты обработки поверхности и способа сборки резонатора.

На резонатор при его изготовлении должен быть подготовлен пакет конструкторской документации (в соответствии с Единой системой конструкторской документации). Он должен включать пояснительную записку, содержащую расчетные соотношения и описание изделия, сборочный чертеж со спецификацией и комплектом чертежей на составные части изделия. Чертежи необходимо выполнять согласно общим правилам выполнения чертежей изделий машиностроения (ГОСТ 2.319-81, ГОСТ 2.427-75). Все физические величины и размеры должны быть представлены в Международной системе единиц СИ. Для сопрягаемых деталей необходимо указывать систему допусков и посадок. На чертежах составных частей изделия следует указывать материал, чистоту обработки поверхности (шероховатость и волнистость поверхности), отклонение формы и расположения поверхностей, допуски на размеры и углы. На сборочных чертежах необходимо указывать габаритные размеры и способы соединения составных частей.

С развитием компьютерной техники и САПР появились пакеты прикладных программ Autocad, Photoshop, Adobe Illustrator, позволяющие автоматизировать процесс создания конструкторской документации и имеющие обширные библиотеки готовых элементов.

2.2. Материалы, используемые при конструировании резонаторных рабочих камер

При изготовлении резонаторных рабочих камер применяются металлы и диэлектрические материалы. В высокочастотных системах используются как чистые металлы (медь, молибден, вольфрам, серебро, золото), так и сплавы (бронзы, нержавеющие стали, латуни, ковар и т.п.). К материалам, применяемым для изготовления высокочастотных систем, предъявляются следующие требования:

1. Высокая механическая прочность, пригодность для изготовления деталей сложной формы с высокой точностью, удовлетворительная формоустойчивость.
2. Высокая допустимая рабочая температура, позволяющая, например, проводить обезгаживание во время откачки ($450\text{--}800^{\circ}\text{C}$).
3. Пригодность для соединения с другими материалами и диэлектриками путем шайки, сварки, скленования. Соединения должны выдерживать многократные нагревания в воздухе, в атмосфере газов и в вакуме. Для этого необходима согласованность коэффициентов линейного расширения соединяемых материалов.
4. Высокая теплопроводность, так как отвод тепла от места его выделения к местам теплоемкости осуществляется за счет теплопроводности.
5. Вакуумная плотность, высокая чистота и низкое газовыделение.
6. Малое удельное электрическое сопротивление, которое позволяет снизить собственные омические потери резонаторов, повысив энергетическую эффективность.
7. Отсутствие ферромагнитных свойств, влияющих на работу приборов в магнитном поле.

Механические и электрические свойства металлов не являются постоянными для данного конкретного металла, а являются функцией его состояния (температуры, механической нагрузки и т.п.). В зависимости от назначения и сферы применения резонаторные высокочастотные системы выполняются из разных материалов. Для изготовления резонансных структур в СВЧ-электронике и ускорителях заряженных частиц, как правило, применяется бескислородная медь. В установках СВЧ-энергетики

резонаторы изготавливаются из меди, алюминия и нержавеющих сталей. Основные физико-механические свойства металлов и их сплавов приведены в Приложении 3 [15, 16].

Наиболее часто используемым металлом для изготовления резонаторов и тепловых ускоряющих структур является медь. Высокая электропроводность и теплопроводность, удовлетворительная теплостойкость, малые значения проницаемости и газовыделения, немагнитность, относительная дешевизна обусловили широкое использование меди в производстве резонаторов и замедляющих систем электрофизических установок. Промышленность выпускает технически чистую (электролитическую), бескислородную и выплавленную в вакууме меди, сорта которой отличаются друг от друга содержанием кислорода: 0,035%, 0,003% и 0,001% соответственно. Для многих электровакуумных приборов отсутствие кислорода, служащего сильным окислителем, является положительным свойством. Благодаря высокой пластичности медь хорошо куется, прокатывается, штампуется и вытягивается даже в холодном состоянии. Основными способами прочного соединения меди с металлами служат сварка и пайка. Недостаточная твердость чистой меди является причиной применения специальных сортов меди с присадками из других элементов.

Алюминий и его сплавы нашли широкое применение в высокочастотных системах благодаря своей дешевизне, хорошим электрическим свойствам и низкой плотности. Он обладает высокой теплопроводностью и легко обрабатывается механически. Способ изготовления больших резонаторов из алюминия – это сварка. Однако применение алюминия в СВЧ-электронных приборах ограничивается вследствие его высокой газовой проницаемости сварных швов, низкой температуры плавления, низкой механической прочности, трудности электроконтактного соединения с другими материалами и высокой окислительной способности. Сплавы алюминия широко используются в установках СВЧ-энергетики, работающих в воздушной среде.

Молибден имеет тепло- и электропроводность, меньшую по сравнению с медью, но значительно большую формуустойчивость при высоких температурах. Область его применения – изготовление сеток в кристаллических резонаторах, держателей,

биметаллических ламелей магнетронов и спиральных замедляющих систем. Промышленностью выпускается молибден в виде проволоки, листа и жести. Он обрабатывается прокаткой и штамповкой.

Вольфрам характеризуется высокой температурой плавления (3410 °С) и удельным сопротивлением, значительно увеличивающимся с температурой. Из него изготавливают сетки в электронных приборах и держатели, не подверженные значительной деформации при высоких температурах. Вольфрам, как и молибден, достаточно хрупок и тяжело подвергается механической обработке.

В установках СВЧ-энергетики часто используются нержавеющие стали. Они обладают значительной вакуумной плотностью, достаточной электропроводностью, легко обрабатываются механически и не окисляются. Из листов нержавеющей стали методом сварки изготавливают многомодовые резонаторы СВЧ-печей, применяемых в пищевой промышленности.

Сплав ковар, в состав которого входит железо, никель, кобальт (Fe-53%, Cr-18%, Ni-19%), применяется для изготовления согласованных сплавов металла со стеклом и керамикой. Для обеспечения согласованности вакуумно-плотного спая металла со стеклом в широком интервале температур варьируют состав ковара, чтобы он как можно меньше отличался от стекла. Ковар используют при изготовлении вакуумных окон в системах вывода СВЧ-мощности. Для получения хорошей проводимости поверхность ковара покрывают амальгамой из серебра или золота.

В качестве покрытий в высокочастотных системах используются благородные металлы: золото и серебро. Серебро обладает высокой электропроводностью и входит в состав многих припоев. Обычно серебро наносится электролитическим способом. Серебро является пластичным металлом, оно легко обрабатывается. Теплопроводность и электропроводность компактного серебра выше чем у меди, однако, электропроводность тонких слоев серебра, нанесенных гальванически, ниже электропроводности меди из-за оксидных пленок на поверхности. Таким образом, покрывать медные детали, находящиеся в вакууме на СВЧ с целью увеличения

электропроводности, не следует. Золото чрезвычайно устойчиво химически. Оно легко диффундирует в медь, никель и некоторые другие металлы. Поэтому золото широко применяется для создания защитных покрытий металлов, по которым протекают токи СВЧ.

Инвары — сплавы с минимальным коэффициентом теплового расширения и малой теплопроводностью. Они используются для изготовления стабилизирующих резонаторов с минимальной зависимостью резонансной частоты от температуры, а также в качестве теплоизоляторов.

Бронзы и латуни — упрочненные сплавы на основе меди, наиболее распространены для изготовления резонаторов и замедляющих систем. Латуни — сплавы меди с Zn (до 50%), часто с добавками Al, Sn, Fe, Mn, Ni, Si, Pb и других элементов (в сумме до 10%). Благодаря хорошей обрабатываемости резьбом, давлением, широкому диапазону свойств, красивому цвету и сравнительной дешевизне латунь — наиболее распространенный медный сплав, который возможно использовать в СВЧ-установках. Хромовая бронза имеет высокую твердость и удивительную теплопроводность, но плохо сплавляется. Этот недостаток отсутствует у кобальтовой бронзы, хорошо сплавляемой серебряными припоями с медной поверхностью. Бронзы с добавками фосфора обладают повышенной упругостью и используются для изготовления контактных поршней в волноводах и подвижных регулирующих стенок резонаторов.

Таким образом, выбор материала, из которого выполняется резонатор и соответствующий технологии его изготовления, является важным вопросом конструирования резонаторных рабочих камер СВЧ-установок. Вопросы экономической целесообразности также существенны при изготовлении резонаторов.

В СВЧ-резонаторах применяют диэлектрические материалы, созданные на органической и неорганической основах. Диэлектрики используются для крепления высокочастотных систем, вывода электромагнитной энергии, для хранения нагреваемых веществ, а также для изготовления резонаторов и замедляющих систем. К применимым диэлектрическим материалам относятся разные марки стекла, кварц, сапфир,

керамика, ситаллы, высокочастотные глазури, вакуумные элементы и различные виды пластмасс. Диэлектрические материалы должны удовлетворять следующим требованиям:

1. Высокая механическая прочность, удовлетворительная обрабатываемость и формоустойчивость.
2. Высокая допустимая рабочая температура.
3. Пригодность для соединения с другими диэлектриками и металлами.
4. Высокая теплопроводность.
5. Низкое газовыделение и вакуумная плотность.
6. Высокое удельное электрическое сопротивление.
7. Низкий тангенс угла диэлектрических потерь.
8. Химическая стойкость.

Электродинамические характеристики диэлектриков ϵ и $\tan \delta$ имеют зависимость от рабочей частоты и температуры. Способы изготовления изделий из диэлектриков разнообразны: механическая обработка, формовка, спекание, литье. Физико-механические свойства основных диэлектриков приведены в Приложении 3 [15, 16].

Стекло – наиболее распространенный и дешевый материал для изготовления корпусов и выводов СВЧ-устройств. Технологии изготовления из стекла изделий сложной формы хорошо отработаны. Обладая хорошей вакуумной плотностью даже при толщине в несколько десятков микрометров, стекло хорошо соединяется с основными металлами. В зависимости от добавок оно имеет разный коэффициент линейного расширения и разделяется на группы: платиновая, молибденовая, вольфрамовая.

Кварцевое стекло (SiO_2) является одним из лучших диэлектриков, обладая низким тангенсом угла диэлектрических потерь, малой диэлектрической проницаемостью и высокой термостойкостью. Однако технология изготовления изделий из кварца из-за высоких температур плавления трудоемка и затратна. Техническими условиями допускается наличие в толщине кварцевого стекла газовых включений в виде пузырьков и капилляров. К недостаткам кварцевого стекла относятся трудности получения вакуумно-плотных его соединений с металлами и способность кристаллизоваться и растрескиваться при долгой выдержке при высоких температурах.

Для вакуумных окон в мощных СВЧ-приборах используются монокристаллические оксиды алюминия (искусственный сапфир), обладающая отличными диэлектрическими характеристиками, высокой прочностью и теплопроводностью. Применение этого материала ограничивается трудностями выращивания больших кристаллов и их механической обработки, а также высокой стоимостью сапфировых дисков.

Широкое распространение в технике СВЧ получила керамика. Керамика – это материал, получаемый в результате спекания смесей различных тугоплавких окислов (Al_2O_3 , MgO , BeO и др.) или минералов (тальк, глина), содержащих эти оксиды. Выбором состава и режима обработки могут быть созданы керамические материалы, обладающие различными свойствами. Для изготовления СВЧ-систем используются несколько видов керамики с низким тангенсом угла диэлектрических потерь и высокой электрической прочностью. Следует отметить, что в отличие от стекла керамика обладает меньшей вакуумной плотностью и керамические изделия, работающие в вакууме, получаются более толстостенными чем стеклянные. Методика изготовления изделий из керамики состоит в формировании изделий из керамических материалов (горячее литье под давлением, механическое прессование, гидростатическое прессование, выдавливание) и обжига. Обжиг керамических изделий осуществляется в две стадии, при которых происходит удаление пластификаторов (испарение или сжигание) с предварительным спеканием при температурах до 1250 °С и окончательный обжиг, формирующий свойства керамики при температурах до 1300-1900 °С. Спекание может выполняться как в окисленной атмосфере, так и в атмосфере инертного газа. При производстве изделий из керамики необходимо учитывать, что после спекания размеры изделия будут отличаться от первоначальной формы. Механическая обработка керамики, имеющей высокую твердость (до 9 по Моссу), до нужных размеров осуществляется шлифованием алмазным инструментом.

Материалы, полученные на основе минерала талька, образуют группу магнезиально-силикатных керамических материалов. В данную группу входят стеатитовая и форстеритовая керамика, возникающие при разложении талька в метасиликат магния. При

этом разложении кристаллы метасиликата магния ($MgO \cdot SiO_2$) цементируются стеклом (кремнозем SiO_2) или оксидами металлов (Al_2O_3 , BaO , CaO , B_2O_3).

Наибольшее распространение в электровакуумной технике получила керамика на основе оксида алюминия. Такая керамика (подобно сапфиру) обладает свойствами, позволяющими использовать ее в качестве кристаллической основы для высокочастотной керамики. Оксид алюминия (Al_2O_3) имеет высокую температуру плавления 2046,4 °C и, в основном, используется в качестве добавки в пластифицирующий материал. С развитием высокотемпературного оборудования появились керамики, состоящие из 95% оксида алюминия и более. Алюмосиликатная керамика содержит более 70% оксида алюминия и оксиды кремния, бария, кальция, магния. При температуре ~ 1300 °C оксиды взаимодействуют между собой, образуя жидкий расплав стекла, в котором растворяется Al_2O_3 . Такая керамика в отличие от стекловой керамики обладает большей механической прочностью и теплопроводностью. Алюмооксидная керамика – вид керамики, содержащей в своем составе более 90 % оксида алюминия. Спекание такой керамики происходит при температурах, превышающих 1600 °C, и ее уплотнение происходит за счет процессов рекристаллизации без жидкой фазы. Созданы дорогие сорта керамик, содержащие 98-100% оксида алюминия (А-995, сапфирит, поликор) и обладающие малыми диэлектрическими потерями.

Керамика на основе оксида берилля (BeO) сочетает очень низкие диэлектрические потери и повышенную теплопроводность. Однако высокая стоимость керамики и токсичность пылевидного оксида берилля затрудняют ее применение.

Сигналы – это диэлектрические материалы, представляющие собой продукт кристаллизации некоторых специальных стекол и использующиеся в окнах вывода СВЧ-энергии и для закрепления высокочастотных систем. Сигнал обладает высокой стабильностью диэлектрических свойств от температуры, низким газовыделением, вакуумно-плотными спаями с металлами и хорошей формоустойчивостью.

Для сплавления и закрепления керамик и металлов в высокочастотных системах могут применяться высокотемпературные глазури и вакуумные цементы. Соединения с помощью этих материалов обладают хорошими диэлектрическими свойствами, вакуумной плотностью и устойчивостью к изменению температуры.

В СВЧ-устройствах могут использоваться природные материалы, обладающие хорошими диэлектрическими свойствами и термостойкостью. Например, слюда применяется в СВЧ-печах для окон ввода мощности, что удешевляет их производство.

Широкое распространение получили искусственные органические диэлектрики. Наиболее известными синтетическими диэлектриками, используемыми в технике СВЧ, являются фторопласти, органические стекла, полизтилен, полистирол. Пластмассы являются наиболее легкими диэлектриками с малым удельным весом. В резонаторных рабочих камерах они могут применяться для перестройки частоты, хранения обрабатываемых веществ, держателей и окон ввода мощности. Диэлектрические характеристики некоторых органических веществ приведены в Приложении 3. Органические диэлектрики обладают достаточно низкими тангенсами диэлектрических потерь и хорошо подвергаются механической обработке. К основным недостаткам пластмасс относятся низкая теплопроводность и теплостойкость, большое газовыделение и малая механическая прочность. Технология производства пластмасс постоянно развивается и они уже заняли достойное место при конструировании СВЧ-устройств.

Фторопласти (тефлон) – общее название синтетических термопластичных полимеров, т.е. продуктов полимеризации фторпропиленовых, содержащих в молекуле один или несколько атомов фтора, непосредственно связанных с атомом углерода, и олефинов. Наиболее используется фторопласт-4, обладающий малым тангенсом угла диэлектрических потерь и небольшой диэлектрической проницаемостью. В промышленности он выпускается в виде пластин, прутков, труб, которые хорошо подвергаются механической обработке. Обладая значительной электрической прочностью, фторопласт может применяться для изоляции антенн ввода СВЧ-мощности в резонаторные рабочие камеры.

Полиэтилен и полистирол – продукты полимеризации этилена и стирола, соответственно, получили сегодня широкое применение в мировом производстве. Они обладают хорошими диэлектрическими характеристиками. Основные методы переработки термопластов – литье под давлением, экструзия, вакуумформование, пневмоформование. Пенопласт (производное полистирола) обладает наилучшими диэлектрическими характеристиками среди органических материалов ($\epsilon = 1,025$, $tgb = 6,4 \cdot 10^{-5}$ при 3 ГГц), тем не менее он имеет невысокую теплоустойчивость и низкую механическую прочность.

Из органических материалов следует отметить оргстекло (гексиглас). Наряду с малым тангенсом угла диэлектрических потерь он обладает прозрачностью, вакуумной плотностью и механической прочностью на сжатие.

Существует значительный класс органических диэлектриков (неводосодержащих), обладающих значительными диэлектрическими потерями: резина, текстолиты и т.д. Они относятся к классу несовершенных диэлектриков и, как правило, не применяются в резонаторных рабочих камерах электрофизических установок.

Таким образом, в резонаторных рабочих камерах СВЧ-установок может применяться широкий спектр диэлектрических материалов. Выбор конкретного материала зависит от многих факторов, включая физико-технические, конструкторские и экономические требования.

2.3. Изготовление резонаторных рабочих камер. Коэффициент технологического качества

Для изготовления сверхвысокочастотных систем используются различные технологические методы или их сочетания. Можно выделить следующие основные универсальные методы изготовления резонаторных рабочих камер из металла: обработка резанием, листовая штамповка, пайка, выдавливание, спекание, сварка, отливка под вакуумом, гальваническое осаждение. При изготовлении систем малых размеров и сложных форм применяют электроискровую и электрохимическую обработку, фототравление, фотоосаждение, обработку электронным и лазерным лучом.

Основные методы изготовления резонаторных рабочих камер широко используются в производстве.

Рассмотрим кратко основные технологические методы. Целью обработки металлов резанием является предание изделию требуемой формы путем механического удаления от заготовки ненужного материала. Существуют четыре основных метода механической обработки: токарная обработка, сверление отверстий, фрезерование и шлифование. Механическая обработка резанием выполняется соответственно с использованием токарных, сверлильных, фрезерных и шлифовальных станков. При механической обработке у большинства металлов наблюдается упрочнение. Технологические режимы обработки разных металлов имеют различия [17] (скорость вращения режущего инструмента, материал и геометрия режущего инструмента, скорость подачи резцов, тип охлаждающей жидкости и т.д.), которые должны учитываться при механической обработке резанием. Например, медь, обладающая повышенной вязкостью и текучестью при нагреве, должна обрабатываться на повышенных оборотах шпинделя и в присутствии смазочно-охлаждающей жидкости. В противном случае упадет производительность и изделие будет выполнено с меньшей точностью. Операция шлифования, как правило, осуществляется абразивными кругами или пастами на высоких оборотах. На крупных предприятиях за соблюдением технологических режимов изготовления изделий следят инженер-технологи.

При сборке высокочастотных систем, состоящих из отдельных деталей, применяется сварка и пайка. Сварка – процесс получения неразъемного соединения деталей машин, конструкций и сооружений при их местном или общем нагреве, пластическом деформировании или при совместном действии того и другого в результате установления межатомных связей в месте их соединения. Сваривают детали из металлов, керамических материалов, пластмасс, стекла и др. Существуют способы сварки, при которых материал расплавляется (дуговая, электроплаковая, электронно-лучевая, плазменная, лазерная, газовая и др.), нагревается и пластически деформируется (контактная, высокочастотная, газопрессовая и пр.) или деформируется без нагрева (холодная, взрывом и др.); способ диффузационного

соединения в вакууме. Различают также сварки: по виду используемого источника энергии – дуговая, газовая, электронно-лучевая и др.; по способу защиты материала – под флюсом (химикат, растворяющий оксиды, образующиеся на свариваемых поверхностях), в защитных газах (Ar , H_2), вакууме и др. Если при изготовлении резонаторов большого объема, выполненных из алюминия, нержавеющих сталей и меди, применяется сварка, то после нее выполняется механическая обработка шва.

Наиболее распространенный метод сборки СВЧ-систем это пайка. Пайка – процесс получения неразъемного соединения материалов (стали, чугуна, стекла, графита, керамики и др.), находящихся в твердом состоянии, расплавленным припоеем с его последующей кристаллизацией. По механизму образования шва различают пайку: готовым припоеем, контактно-реактивную, реактивно-флюсовую, металлокерамическую, диффузионную и др.; по источнику тепла – пайку паяльником, инфракрасными лучами, лазером, индукционную, газоплазменную и др. При пайке используются флюсы: расплавляемые неметаллические вещества (канифоль, бура, хлорид цинка и др.), служащие для очистки поверхности припоя и места пайки, а также улучшения смачиваемости места пайки расплавленным припоеем.

Пайка, как правило, используется при изготовлении сложных изделий с высокой точностью из меди и медно-содержащих сплавов без последующей механической обработки собранного изделия. Прецзионная пайка позволяет удешевить изготовление высокочастотных систем, обеспечить более качественную химическую обработку и обезгаживание системы и делает возможным изготовление пакетированных конструкций (ускоряющие системы с диафрагмами и ячейками). Метод прессионной пайки на оправках состоит в закреплении спаиваемых элементов в специальной оправке, которая может быть удалена после сборки или после пайки. Оправка, как и спаиваемые детали должны быть изготовлены с высокой точностью. Оправки, как правило, изготавливают из нержавеющей стали с окисленной поверхностью. Для упрощения сборки и повышения точности на спаиваемых деталях предусматривают специальные пазы, канавки, выступы, обеспечивающие фиксацию детали. Припой в виде контуров из проволоки или ленты прокладывается между деталями

ици в пазы и канавки. Пайку сверхвысокочистотных систем осуществляют в специальных печах с нейтральными (N_2 , Ar) или восстановительными (H_2 , формиргаз) средами, а также в вакууме. Нагревание проводится до температуры плавления припоя. Поверхности спаиваемых деталей должны быть обезжиренными, чистыми и плотно прижатыми. Припой может также наноситься в виде гальванического покрытия или пасты. При спаивании деталей из различных металлов охватывающая деталь должна иметь больший коэффициент расширения, чем внутренняя.

Рецептуры припоеv, изготавляемых на основе олова, серебра, свинца, никеля, цинка, различны. К применяемым припоям предъявляют ряд требований [17]: жидкотекучесть, смачиваемость, спаиваемость, механическая прочность, высокая проводимость, низкое давление насыщенных паров и т.д. Необходимо, чтобы температура плавления припоеv была на 50-100 °C выше температуры обезгаживания при эксплуатации изделия. Поэтому для пайки корпусов резонаторов, работающих в вакууме, используются серебряные припой $T_{mp} > 650$ °C. Температура плавления припоеv приведена в табл. 2.2.

Таблица 2.2
Температура плавления припоеv

Марка	ПОС 40	ПОССу 95	ПСр3	ПСр65	ПСр 12M	ПМ Ц36	ПМЦ 54
T_{mp} , °C	183	234	314	695	793	800	876

Пайка нержавеющей стали, ковара, вольфрама, молибдена выполняется высокотемпературными припоями типа ПЭз82Н с $T_{mp}=950$ °C. Перестройка резонансной частоты спаянной ускоряющей структуры и ее настройка выполняются путем ее пластической деформации.

При серийном изготовлении резонаторных рабочих камер применяется обработка металла давлением. Обработка давлением – это совокупность технологических процессов, в которых под действием внешних сил осуществляется пластическое формоизменение металлических заготовок без нарушения их сплошности. Основные виды: прокатка, прессование, волочение, ковка, штамповка, выдавливание. При изготовлении резонаторных

систем на анодных блоках магнетронов сантиметрового и миллиметрового диапазонов широко применяется выдавливание с использованием специально выточенных твердосплавных буафонов. Деформированный металл (медь), доведенный до высокой пластичности, интенсивно течет в незамкнутую полость штампа. Этот метод позволяет получить детали малых размеров с высокой точностью.

Для изготовления изделий из металлов, трудно поддающихся механической обработке (молибден, вольфрам), применяют порошковое спекание. Сущность метода заключается в прессовании тонких металлических порошков в специальном штампе, имеющем форму изготавливаемого изделия, и последующем нагреве до температур, при которых происходит склеивание отдельных частиц порошка.

Для изготовления биметаллических заготовок (молибден-медь), применяемых в электронных приборах СВЧ, используется отливка под вакуумом.

Кратко остановимся на нетрадиционных методах изготовления и обработки СВЧ-систем. Электроискровая обработка состоит в разрушении металла под действием электрического разряда, который идет по микронеровностям поверхности. Качество поверхности, после обработки достигающее $V10$ класса чистоты, определяется энергией отдельного импульса тока и частотой импульсов. Электроискровая обработка может применяться и для резания металла. Для некоторых металлов хорошую чистоту обработки поверхности обеспечивает метод электрохимической полировки, при котором происходит растворение тонкого слоя металла в электролите с осаждением его на катод.

Гальваническое нанесение покрытий широко распространено при изготовлении СВЧ-резонаторов. Оно служит как для уменьшения поверхностного сопротивления, так и для защиты поверхности от коррозии и окисления. В качестве электролита для меди часто служит ортофосфорная кислота, а катодом — углерод или нержавеющая сталь. В результате электролитического процесса образуется тонкая пленка, не повторяющая неровности металла.

При конструировании резонаторных рабочих камер большую роль играют токонесущие поверхности. Неровности и шероховатости поверхности увеличивают локальную напряженность поля, уменьшая электрическую прочность резонатора, и увеличивают полное сопротивление поверхности металла. Глубина погружения СВЧ-тока (глубина скин-слоя, на которой амплитуда плоской СВЧ-волны уменьшается в $e^{\lambda}=535$ раз)

$$\delta = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \mu_r \sigma}}, \quad (2.1)$$

где f_0 – рабочая частота; σ – проводимость металла. Так, для меди на частоте $f_0 = 3$ ГГц глубина скин-слоя составит 1,21 мкм. Понятно, что неровности поверхности, равные нескольким микрометрам, значительно удлиняют путь высокочастотного тока, а, следовательно, увеличиваются омические потери и уменьшается собственная добротность резонатора. Значит, энергетические характеристики резонаторов зависят от удельного сопротивления металла токонесущих корпусов и микрогеометрии поверхности.

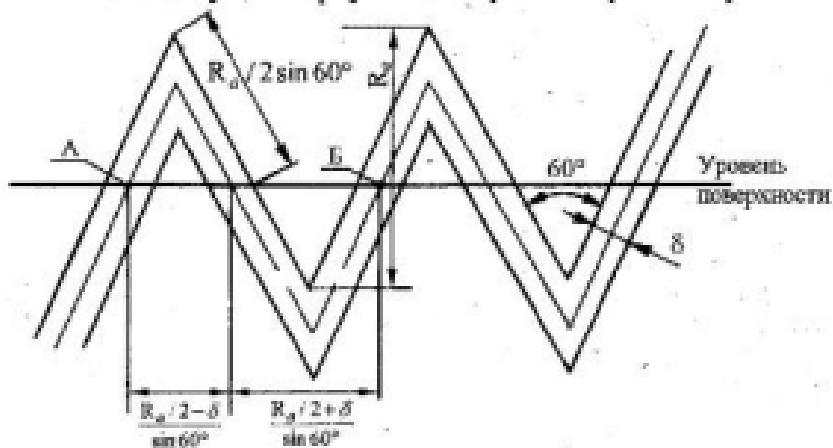


Рис. 2.1. Удлинение пути поверхностного тока при обходе микронеровностей в виде равностороннего треугольника

Для учета этого явления вводится коэффициент технологического качества изготовления резонатора – K_t ,

изменяющийся от нуля до единицы. Величина коэффициента технологического качества K_a , входящего в соотношение для расчета собственной добротности резонатора (см. Приложение 2), зависит в основном от шероховатости поверхности корпуса и качества изготовления резонатора. Суть этого явления раскрыта на рис. 2.1, где показано удлинение пути поверхностного тока в скин-слое при обходе треугольных микронеровностей, расположенных перпендикулярно току. Если, например, корпус проточен на токарном станке по 5-му классу шероховатости (V5), то согласно ГОСТ 2789-73 [14] средняя высота микронеровностей $R_a = 5 \text{ мкм}$ и, как видно из рис. 2.1, путь поверхностного тока, подсчитываемый по средней линии скин-слоя на частоте 2,45 ГГц толщиной $\delta = 1,34 \text{ мкм}$ от точки А до Б, удлиняется в два раза. Последнее соответствует росту омических потерь также в два раза и снижению добротности резонатора также в два раза, то есть обработка поверхности корпуса по классу чистоты V5 соответствует $K_a = 1/2$. Иногда в справочной литературе приводятся эффективные значения проводимости различных металлов с учетом их шероховатости [18]. Для меди приведено $\delta_{\text{эфф.}} = 3,5 \cdot 10^7 \text{ А/(Ом/м)}$, что соответствует коэффициенту качества $K_a = 0,78$.

Более строгий анализ при $\delta \gg R_a$ показывает, что для достижения $K_a \leq 0,9$ необходима обработка поверхности корпуса резонатора по V9 классу чистоты ($R_a \leq 0,25 \text{ мкм}$), что может быть достигнуто при полировке корпуса специальными абразивными пастами, электрохимической полировкой и т.д. В табл. 2.3 представлены классы шероховатости и способы обработки поверхности, где R_a – средняя высота всех неровностей профиля, R_z – средняя высота наибольших неровностей.

В условиях опытного производства на кафедре № 14 МИФИ возможно изготовить резонаторы, обработанные по V5 классу, и для них K_a составит не более 0,6.

Таким образом, способы изготовления резонаторных рабочих камер СВЧ-установок и способы обработки рабочей поверхности существенно влияют на энергетические характеристики резонаторов.

Таблица 2.3

Классы шероховатости поверхности
и методы ее обработки по ГОСТ 2789-73

Класс шероховатости	Параметры шероховатости		Способ обработки металла
	R _a , мкм	R _z , мкм	
1	80-40	320-160	Стогание, дробление, сверление, черновое точение, фрезерование
2	40-20	160-80	
3	20-10	80-40	
4	10-5	40-20	Чистовое точение, тонкое фрезерование, тонкое развертывание
5	5-2,5	20-10	Точное растачивание, абразивное шлифование
6	2,5-1,25	10-6,3	
7	1,25-0,63	6,3-3,2	Чистовое шлифование, пескоструйная обработка, шабрение
8	0,63-0,32	3,2-1,6	
9	0,32-0,16	1,6-0,8	
10	0,16-0,08	0,8-0,4	Электронскровая полировка, пылеструйная обработка
11	0,08-0,04	0,4-0,2	
12	0,04-0,02	0,2-0,1	Электрохимическая полировка
13	0,02-0,01	0,1-0,05	
14	0,01	0,05-0,025	

2.4. Конструирование отдельных элементов резонаторных рабочих камер

Резонаторные рабочие камеры технологических установок имеют устройства, перестройки частоты, ввода-вывода обрабатываемого материала и метрологические устройства связи для контроля частоты и настройки резонаторов. Каждый из этих элементов выполняет свою строго определенную функцию. Рассмотрим некоторые традиционные конструкции этих элементов.

Устройства ввода-вывода обрабатываемых материалов могут быть трех типов: непосредственно съемно-разборная стенка, канал

для введения кюветы с веществом и система транспортировки вещества в объеме резонатора. Устройства ввода-вывода должны обеспечивать легкий доступ к обрабатываемому веществу, не портить электродинамические характеристики резонаторов и обеспечивать безопасность по СВЧ-ислучению.

Наиболее распространена конструкция съемной стенки резонатора, подобная дверце резонаторной рабочей камеры бытовой СВЧ-печи с расположенным по периметру дроссельным зазором. Создание четвертьволнового дроссельного зазора является весьма распространенным способом обеспечить непрерывность токов СВЧ по поверхности резонатора. Схематическое изображение четвертьволнового зазора приведено на рис. 2.2.



Рис. 2.2. Четвертьволновой дроссель дверцы СВЧ-печи

Входные сопротивления в точках А и С равны между собой, т.к. волны (шадающая из точки В в С и отраженная от точки С к В) в точке В равны по амплитуде, но противоположны по фазе. Такой четвертьвольновый дроссель обладает определенной частотной селективностью. Для поглощения высших гармоник, генерируемых магнетроном, в четвертьвольновых отрезках могут помещаться селективно поглащающие ферромагнетики. Высококачественный гальванический пружинный контакт по всей поверхности выполняется из тонких пружинящих контактных лепестков, выполненных из бериллиевой бронзы. Диана

контактных лепестков делается, если это возможно, равной четверти длины волны в рассматриваемом прообразе линии передач. К поршню должны предъявляться весьма жесткие требования по отношению допусков на размеры и чистоту обработки поверхности. Типичные конструкции съемных короткозамыкающих стенок в цилиндрическом Н₁₁₁-резонаторе представлены на рис. 2.3.

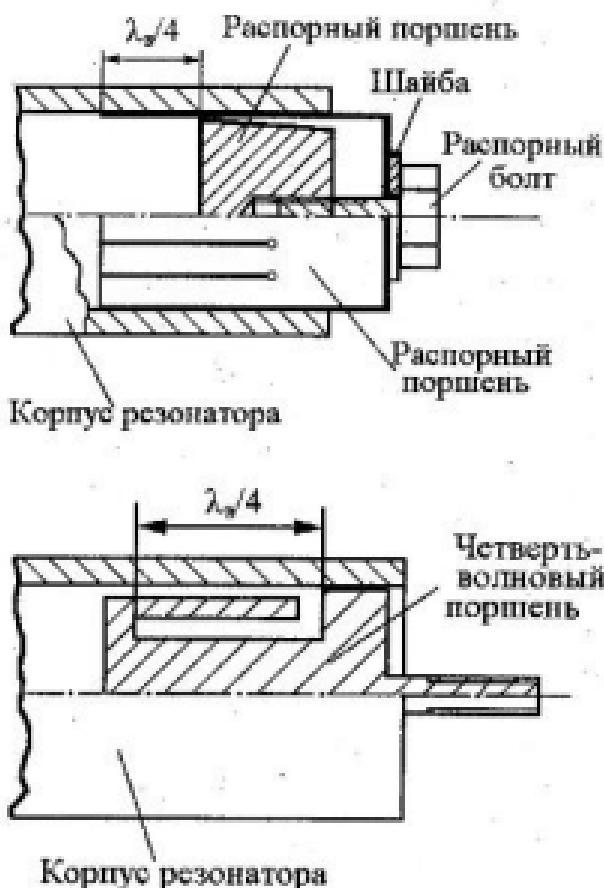


Рис. 2.3. Дроссельные стенки резонаторов

Канал для введения кюветы с веществом также используется в установках СВЧ-энергетики. Форма отверстия в стенке резонатора должна соответствовать форме кюветы. Кроме того, необходимо обеспечить запредельность этого канала для СВЧ-поля даже в случае помещения в ней диэлектрической кюветы. Высота запредельного фланца, присоединяемого к отверстию, должна быть выбрана так, чтобы минимизировать СВЧ-излучение из отверстия. Введение запредельного отверстия уменьшит собственную частоту резонатора. Расчет, учитывающей такое влияние, приведен в разд. 1.3.

Система принудительной транспортировки вещества в объеме резонатора может быть выполнена в виде транспортера с диэлектрической (фторопластовой) лентой или в виде диэлектрической трубы со спиралью Архимела. В настоящее время системы в виде транспортера применяются в установках СВЧ-энергетики для сушки сухарей и производстве поп-корна. Возможна разработка системы транспортировки, в которой обрабатываемые образцы под действием силы тяжести или внешнего давления, или потока воздуха будут сами передвигаться в системе.

Резонаторные рабочие камеры должны иметь устройства для перестройки частоты после загрузки образца или в процессе его нагрева. Система перестройки частоты важна в случае работы резонатора как в одномодовом, так и в многомодовом режимах. Типичным резонатором, работающим в многомодовом режиме, является рабочая камера бытовой СВЧ-печи. Многомодовый режим для СВЧ-печи необходим, во-первых, для того чтобы при разных загрузках обрабатываемого продукта резонансная частота оставалась в диапазоне рабочих частот магнетрона и, во-вторых, для обеспечения равномерности нагрева продукта на разных видах колебаний. Резонаторные рабочие камеры бытовых СВЧ-печей, имеющие, как правило, прямоугольную форму, возбуждаются на колебаниях типа E_{im} и H_{im} , где $i, m, n > 5$, и содержат в своем объеме дисектор. Дисектор – это выполненная из тонкой жести лопасть, расположенная в верхней части рабочей камеры, которая вращается от электропривода или под действием нагнетаемого в камеру воздушного потока, изменения граничные условия возбуждения видов колебаний в частотном диапазоне работы

Магнетрона. В современных СВЧ-печах в качестве дисектора используют поддоны, вращающиеся вместе с обрабатываемым продуктом с целью изменения структуры поля.

Для резонаторов, работающих в одномодовом режиме, важно перестроить частоту, сохранив требуемый вид колебаний. Систему изменения частоты можно создать, основываясь на теореме о малых возмущениях, с помощью специальных металлических или диэлектрических штырей, или изменения форму резонатора. Резонаторы, перестраиваемые изменением формы, широко используются в системах стабилизации частоты и в резонансных частотомерах. На основе цилиндрического резонатора с колебаниями H_{011} -вида, изменения его длину, можно изготовить перестраиваемый резонатор. Горцевые заглушки такого резонатора в принципе могут не иметь гальванического контакта с корпусом по окружностям, так как поверхностные токи, наведенные магнитными составляющими H_x и H_y , здесь отсутствуют. Данный конструктивный прием является стандартным для предотвращения возбуждения в резонаторе колебаний вида E_{111}^0 , которые являются вырожденными по отношению к колебаниям H_{011}^0 . Поэтому, перемещая микрометрическим винтом дисковую заглушку, изменяют длину резонатора, а, следовательно, резонансную частоту.

Каждый резонатор должен быть оборудован метрологическими устройствами связи, служащими для измерения частоты и индикации поступающей мощности. Узлы связи основываются на стандартных коаксиальных измерительных головках с волновым сопротивлением 50 Ом. Места расположения узлов связи определяются структурой поля в резонаторе и типом устройства. Штыревые антенны располагаются в максимуме электрического поля параллельно силовым линиям. Плоскость петлевой антенны должна пронизываться силовыми линиями магнитного поля. Коэффициенты связи этих устройств регулируются глубиной погружения антенн в СВЧ-поле. Для индикации мощности применяются диодные камеры, имеющие квадратичную характеристику тока. Для резонаторов, изготавляемых в промышленных целях, всегда требуется унификация всех этих узлов.

2.5. Системы охлаждения резонаторов

Процессы теплообмена играют важную роль при разработке установок СВЧ-электроники. Учет температурного режима корпусов резонаторных рабочих камер и их отдельных элементов весьма важен. При увеличении температуры может происходить изменение электродинамических характеристик резонатора, а затем последующее разрушение его корпуса.

При работе резонатора на высоком уровне мощности корпус рабочей камеры неминуемо нагревается, поглощая СВЧ-мощность и радиационный поток от обрабатываемого материала. Это приводит к изменению резонансной частоты рабочей камеры, уменьшению ее добротности и изменению коэффициента связи. Изменение резонансной частоты связано с тепловым расширением корпуса резонатора. Этот эффект особенно заметен для одномодовых систем большой протяженности, таких, как ускоряющая секция ускорителя. Большинство применяемых в резонаторах металлов имеет положительный градиент роста их сопротивления с увеличением температуры, что приводит к дополнительным омическим потерям в стенах резонатора и падению собственной добротности.

Рассмотрим линейный способ оценки температурного дрейфа частоты у цилиндрического резонатора с колебаниями H_{01} . Зависимость резонансной частоты имеет вид (1.8б); взяв частные производные по размерам резонатора (b – радиус и L – длина резонатора) и используя зависимость размеров от температуры через коэффициент линейного расширения, находим девиацию частоты:

$$\Delta f_{01} = -\beta_T \frac{bL}{b+L} \cdot \frac{\epsilon^2}{4f_0} \left[\left(\frac{\mu_{01}}{\pi} \right)^2 \frac{1}{b^3} + \frac{1}{L^3} \right] \Delta T, \quad (2.2)$$

где β_T – температурный коэффициент линейного расширения материала корпуса резонатора; ΔT – изменение температуры стенок. Используя уравнение теплового потока и (2.2), относительное изменение резонансной частоты примет вид:

$$\left(\frac{\Delta f}{f_0} \right)_c = -\beta_c \frac{P(1-\eta_s)}{a_c \cdot S_p} \left(\frac{c^2}{4f_0^2} \right) \frac{bL}{b+L} \left(\left(\frac{\mu_{01}}{\pi} \right)^2 \frac{1}{b^3} + \frac{1}{L^3} \right), \quad (2.3)$$

где η_s – КПД передачи вводимой мощности Р нагреваемому веществу; a_c – коэффициент конвективной теплоотдачи корпуса окружающему воздуху; S_p – площадь наружной поверхности корпуса резонатора, которая для цилиндрического резонатора (если пренебречь толщиной стенок корпуса) равна $2\pi R(R+L)$. Оценка относительного изменения резонансной частоты резонатора с начальной частотой 2450 МГц и $b/L = 0,7$, изготовленного из меди при $\beta_c(\text{Cu}) = 1,7 \cdot 10^{-3}$ $^{\circ}\text{C}$, $\eta_s=0,75$, $P \approx 500$ Вт, $a_c \approx 15$ Вт/(м²• $^{\circ}\text{C}$) (свободная конвекция в воздухе) и малой толщине стенок корпуса дает $(\Delta f/f_0)_c = -0,69 \cdot 10^{-3}$. Рассстройка частоты в один процент весьма существенна для одномодовых резонаторов с высокой добротностью.

Таким образом, вопрос обеспечения заданного температурного режима резонатором весьма существен. Отбор тепла в материальной среде осуществляется с помощью теплопроводности и конвективного теплообмена. При высоких температурах существенную роль начинает играть перенос тепла излучением. Единственным видом тепломатерией в непрозрачной твердой среде является теплопроводность, при которой тепло передается из низкотемпературной области в высокотемпературную. От внутренней поверхности резонатора, на которой и происходят омические потери, посредством теплопроводности тепло передается к внешней поверхности, на которой и осуществляется конвективный теплообмен. Конвективный теплообмен возникает при контакте жидкости или газа с поверхностью твердого тела, причем различают два типа конвекции: свободную и вынужденную. При свободной конвекции процесс теплообмена обусловлен разностью плотности жидкости или газа, контактирующих с нагретой поверхностью и удаленных от нее. В результате указанного различия плотностей возникают подъемные силы, создающие движение теплоносителя. При вынужденной конвекции движение теплоносителя (воды, воздуха) стимулируется внешней силой и его скорость больше, чем при свободной конвекции. Здесь возрастание теплового потока от поверхности к

теплоносителю происходит за счет работы, затраченной на приведение теплоносителя в движение. Уравнение теплового потока для конвекции $Q_{\text{конв}}$ [Вт] записывается:

$$Q_{\text{конв}} = \alpha_T S(T_s - T_\infty), \quad (2.4)$$

где α_T – средний коэффициент конвективной теплоотдачи, Вт/(К·м²); S – площадь омыываемой или обдуваемой поверхности; T_s – температура поверхности; T_∞ – температура теплоносителя вдали от омыываемой поверхности. Численные значения α_T можно найти теоретически, расчетным путем и экспериментально. Коэффициент α_T зависит от типа охлаждающей среды, скорости ее потока, структуры каналов. По тепловому расчету разных систем имеется обширная литература [7, 19].

Остановимся только на специфике создания систем охлаждения в резонаторах. Системы охлаждения корпуса резонатора должны удовлетворять ряду требований:

1. Поддержание заданной температуры, безопасной для корпуса резонатора.
2. Надежность.
3. Отсутствие локальных перегревов корпуса.
4. Конструктивная простота.
5. Экономичность.

Действительно, температура поверхности резонатора в процессе его работы должна быть ниже температуры размягчения материалов, из которых он изготовлен. Равномерность поддержания температуры резонатора системой охлаждения при работе на высоком уровне мощности обеспечит надежность и длительный срок его службы. Наиболее простым является воздушное конвективное охлаждение корпуса резонатора. Для создания эффективного охлаждения корпуса резонатора потоками воздуха необходимо предусматривать ребра (радиаторы) охлаждения, которые являются неотъемлемой частью корпуса резонатора и имеют хороший тепловой контакт с корпусом (сварки, пайка) резонатора. Система водяного охлаждения предусматривает в корпусе резонатора специально проточенные каналы. Для сложных конструкций структуру каналов делают многоконтурной. Она должна исключать застойные явления и перегрев отдельных элементов корпуса или внутренних деталей. В случае хорошей

импендронности материала, из которого изготовлен резонатор, структура каналов припаяется к корпусу резонатора. Для защиты резонаторов от отключения подачи теплоносителя на выходе системы охлаждения устанавливают контрольные датчики.

Приведем рекомендации для охлаждения анодных блоков магнетронов непрерывного режима, используемых в СВЧ-электронике. Для надежной работы магнетрона требуется, чтобы температура меди, из которой изготовлены элементы анодной системы, не превышала 500 °С. Это требует охлаждения анодного блока. При удельной нагрузке на поверхности анода, обращенной к катоду, менее 100 Вт/см² вполне достаточно использовать воздушное охлаждение; такое охлаждение применяется в магнетронах мощностью до 1 кВт, работающих на частоте 2450 МГц в СВЧ-печах. При удельной нагрузке порядка 100-500 Вт/см² следует использовать жидкое охлаждение анода. В этом случае корпус анода снабжен каналами, по которым протекает вода. Перечисленные способы предполагают, что анодная система формируется ламелями. При удельных нагрузках на аноде более 500 Вт/см² перепад температуры на длине ламели существенно возрастает и максимальная температура будет превышать допустимую. В этом случае каналы жидкостного охлаждения приходится подводить непосредственно к поверхности анода, подверженной электронной бомбардировке, что обуславливает переход к замедляющей системе, в которой резонаторы формируются трубками, по которым протекает охлаждающая жидкость. Каналы охлаждения в магнетронах сантиметрового диапазона оказываются малыми, а поэтому охлаждающая жидкость будет протекать по ним под давлением, что ведет к использованию специальных систем охлаждения. В качестве охлаждающей жидкости применяется дистилированная вода повышенной частоты. Замкнутая система должна содержать фильтр механической очистки. Это исключает выход прибора из строя при засорении каналов охлаждения или образовании на их внутренней поверхности налета, препятствующей эффективному теплоотводу. Практика конструирования систем охлаждения магнетронов с непрерывной мощностью ~ 5 кВт показывает, что анодный блок должен содержать несколько десятков каналов (до 64), которые

целесообразно объединить в параллельно-последовательные группы с температурой воды на выходе не более 80°C.

Аналитические решения теплофизических задач довольно сложны и трудоемки. Их точность не превышает двадцати процентов. С развитием компьютерной техники для облегчения проектирования резонаторов используются пакеты прикладных программ. Так, для решения теплофизических задач может служить пакет прикладных программ ANSYS, хорошо зарекомендовавший себя для инженерных теплофизических расчетов.

2.6. Электромагнитная безопасность СВЧ-установок

На современном этапе развития электротехники при разработке новых образцов техники значительное внимание уделяется вопросам их электромагнитной совместимости, связанной с применением микроволновых колебаний. Уже в процессе конструирования резонаторных рабочих камер, работающих на высоком уровне мощности, необходимо учитывать проблему их безопасной эксплуатации. Электромагнитная совместимость рассматривается не только как способность приборов, создающих электромагнитные поля, работать в едином комплексе, но также с учетом обеспечения безопасности по СВЧ-излучению при длительной работе.

Международной электротехнической комиссией (МЭК) специально для использования в промышленных и бытовых СВЧ-установках выделено несколько частотных диапазонов. Наиболее используемые из них это 2450 ± 50 МГц, 915 ± 20 МГц и 460 ± 10 МГц. Таким выбором обеспечивается помехобезопасность установок СВЧ-энергетики для радиосвязи. Однако наряду с основной частотой магнетрон генерирует паразитные излучения. Доля высших гармоник не превышает 1%. Наиболее опасной из высших гармоник является пятая гармоника, так как в области 12-13 ГГц могут создаваться помехи приемникам спутникового телевидения. Этую проблему предполагается решать размещением на внутренней поверхности волновода, подводящего СВЧ-энергию к резонаторной рабочей камере, композиционных гиromагнитных материалов, обладающих селективным поглощением и способных

работать на высоком уровне мощности без принудительного охлаждения.

Другой важной проблемой является обеспечение экологически безопасной эксплуатации резонатора. Предельно допустимые значения (ПДЗ) плотности потока мощности, напряженности электрических и магнитных СВЧ-полей в разных странах различаются. В России ПДЗ основываются на уровне напряженности поля, который не может вызывать заметных биологических эффектов. В других странах (США, ФРГ) исходят из значения напряженности полей, при превышении которой возникают опасные тепловые эффекты воздействия, а ПДЗ определяется введенным коэффициентом надежности, уменьшающим это значение. В последние десятилетия наблюдалась тенденция к росту ПДЗ в России. Согласно [20] для бытовых приборов, находящихся внутри помещений, предельно допустимые уровни плотности потока энергии для населения без учета времени воздействия составят 10 мкВт/см^2 в диапазоне $0.2 - 10 \text{ ГГц}$. В США эта ПДЗ в 50 раз больше. Области излучения делят на ближнюю, когда расстояние до объекта излучения сопоставимо с длиной волны, и дальнюю, где $r \gg \lambda/2\pi$ и энергия передается электромагнитной волной ТЕМ-типа в свободном пространстве. Для СВЧ-установки, работающей на частоте $2,45 \text{ ГГц}$ ($\lambda=122,36$), расстояние в $0,5 \text{ м}$ до любого участка уже будет являться дальней зоной.

СВЧ-энергия излучается из стыков и отверстий волноводов, высоковольтных выводов магнетронов и отверстий в стенах резонаторов. Для улучшения гальванического контакта во фланцевых соединениях применяются контактные прокладки, изготовленные из бериллиевой бронзы. Блок, содержащий магнетрон, должен иметь закрытый металлический корпус, который в целях безопасности должен быть заземлен. Технологические отверстия в резонаторной рабочей камере следует делать запредельными по СВЧ-волю. В современных конструкциях СВЧ-печей с целью визуального доступа к резонаторной рабочей камере дверцы выполняются из мелкой сетки или с использованием специального покрытия на стекле.

Рассмотрим способ аналитической оценки мощности, излучаемой из отверстия в резонаторной рабочей камере.

Мощность излучения из малого отверстия, возбуждаемого тангенциальным магнитным полем H_t , получается из выражения для электрического диполя Герца длиной l со сторонним током I_{ct} : $P = \pi Z_0 (I_{ct} l)^2 / (3\lambda_0^2)$. Используя принцип перестановочной двойственности ($Z_0 \leftrightarrow Z_0^{-1}$, $I_{ct} \leftrightarrow I_{ct}^{(mag)}$) и учитывая, что $(I_{ct} l)^{(mag)} = j\omega\mu_0 H_t V_m$ [10] и $H_t = \xi_m \sqrt{P_0 Q}$, находим среднюю мощность излучения из отверстия при $P \ll P_0$ в виде $P/P_0 = 4\pi^2 Z_0 \cdot Q \cdot (\xi_m \cdot V_m)^2 / (3\lambda_0^4)$, где V_m – коэффициент магнитной поляризуемости отверстия. Для круглого отверстия диаметром $d = 2r_0$, прорезанного в стенке резонатора толщиной t (рис. 1.6.), коэффициент магнитной поляризуемости отверстия будет $V_m = d^3 e^{-\alpha t} / 6$, где $\alpha = 2\pi / \lambda_{sp} = 2\mu_{11}/d$ – коэффициент затухания низшей волны H_{11}^0 в запредельном цилиндрическом волноводе (т.к. эта наиболее распространенный случай), $\mu_{11} = 1,841$. Тогда отношение мощности, излученной из такого отверстия, к мощности, поступившей в резонатор P_0 :

$$\frac{P}{P_0} = \frac{\pi^3 Z_0 Q d^6}{27 \lambda_0^4} e^{-2\alpha t} \xi_m^2. \quad (2.5)$$

В случае N одинаковых отверстий, выполненных в корпусе резонатора, (2.5) переходит в

$$\frac{P}{P_0} = \frac{\pi^3 Z_0 Q d^6}{27 \lambda_0^4} e^{-2\alpha t} \sum_{n=1}^N \xi_{m,n}^2. \quad (2.6)$$

Полагая, что фронт излучения вблизи резонатора близок к сферическому, плотность потока мощности F [Вт/см²] на расстоянии x [м] от резонатора составит:

$$F = \frac{P}{4\pi \cdot x^2 \cdot 10^4}. \quad (2.7)$$

Полученная формула дает возможность оценить экологическую безопасность СВЧ-установки. Лучшим способом защиты от источника СВЧ-излучения является расстояние. Следует отметить, что с медицинской точки зрения СВЧ-излучениеносит дозовый характер. Так, согласно ГОСТ 12.1.006-84 [20] предельно допустимая норма для работы персонала в течение часа составит 200 мкВт/см².

Приведенный расчет электромагнитной безопасности по СВЧ-излучению является лишь оценочным. Действительным критерием может являться только непосредственное измерение плотности потока на установке, работающей в штатном режиме. Измерения должны проводиться с помощью приборов, имеющих сертификат Ростеста. Измеритель плотности потока энергии электромагнитного поля ПЗ-19 служит для измерения средних значений плотности потока энергии ЭМП (от 0,5 до 10^3 мВт/см²) в дальней зоне СВЧ-источников излучения и непосредственно на рабочих местах персонала, обслуживающего радиотехнические установки в диапазоне 0,3-39,65 ГГц. На сегодняшний день этот прибор является наиболее современным для измерения электромагнитной совместимости. Опираясь на полученные результаты измерений, нужно модифицировать конструкции излучающих узлов всей установки. Поэтому уже в процессе конструирования резонаторной рабочей камеры необходимо предусмотреть возможность ее доработки путем введения дополнительных защитных экранов из сеток или специальной металлизированной резины.

Список литературы

1. Никольский В.В. Электродинамика и распространение радиоволни. М.:Наука, 1973. 608 с.
2. Вайнштейн Л.А. Электромагнитные волны. М.:Радио и связь, 1988. 440 с.
3. Милованов О.С., Собенин Н.П. Техника сверхвысоких частот. М.:Атомиздат, 1980. 462 с.
4. Петров Б.М. Электродинамика и распространение радиоволни. М: Горячая линия – Телеком, 2003. 558 с.
5. Неганов В.А., Нефедов Е.И., Яровой Г.П. Электродинамические методы проектирования устройств СВЧ и антенн. М.: Радио и связь, 2002. 416 с.
6. Зверев Б.В., Собенин Н.П. Электродинамические характеристики ускоряющих резонаторов. М:Энергоатомиздат, 1993. 240 с.
7. Диценко А.Н., Зверев Б.В. СВЧ-энергетика. 2-е изд. М.:Наука, 2000. 264 с.
8. Диценко А.Н., Зверев Б.В., Прокопенко А.В. Светопрозрачные резонаторные рабочие камеры для источников света на основе СВЧ-разряда в парах серы // Науч.-техн. журнал «Инженерная физика». 2002. №1. С. 48-53.
9. Ширмын Я.Д. Радиоволноводы и объемные резонаторы. М.:Радио и связь, 1959. 379 с.
10. Семенов Н.А. Техническая электродинамика. М.:Связь, 1973. 480 с.
11. Бронштейн И.Н., Семендяев К.А. Справочник по математике. М.: ГИТГЛ, 1953. 608 с.
12. Эвонарев И.А., Севрюкова Л.М. Измерение электрофизических параметров сверхпроводящих ускоряющих СВЧ-резонаторов: Лабораторный практикум. Протвино:ГНЦ РФ ИФВЭ, 1999. 30 с.
13. Справочник по радиозмерительным приборам. Т. II / Под ред. Насонова В.С. М.:Советское радио, 1977. 272 с.
14. Гжиров Р.И. Краткий справочник конструктора. Л.:Машиностроение, 1984. 464 с.

15. Голант Б.М., Маклаков А.А., Шур И.Б. Изготовление резонаторов и замедляющих систем электронных приборов. М.: Радио и связь, 1969. 408 с.
16. Физические величины: Справочник. / Под ред. Григорьева И.С., Мейлихова Е.З. М.:Энергоатомиздат, 1991. 1232 с.
17. Бушминский И.П. Изготовление элементов конструкций СВЧ. М.: Высшая школа, 1974. 304 с.
18. Готман П.Е., Березин В.Б., Хайкин А.М. Электротехнические материалы. М.: Энергия, 1969. 184 с.
19. Крейт Ф., Блек У. Основы теплопередачи / Пер. с англ.; Под ред. Анфимова Н.А. М.:Мир, 1983. 512 с.
20. Бадалов Д.А., Михайлов А.С. Нормы на параметры электромагнитной совместимости РЭС: Справочник. М.: Радио и связь, 1990. 187 с.

Цилиндрические функции Бесселя

Функциями Бесселя называются решения $J_v(x)$ дифференциального уравнения Бесселя:

$$x^2 \frac{d^2 F}{dx^2} + x \frac{dF}{dx} - (x^2 - v^2)F = 0, \quad (\text{П.1.1})$$

где x – переменная, v – число, называемое порядком. Если оно целое и действительное, то оно именуется порядком функции v . Функции Бесселя для целых v изображены на рис. П.1.1.

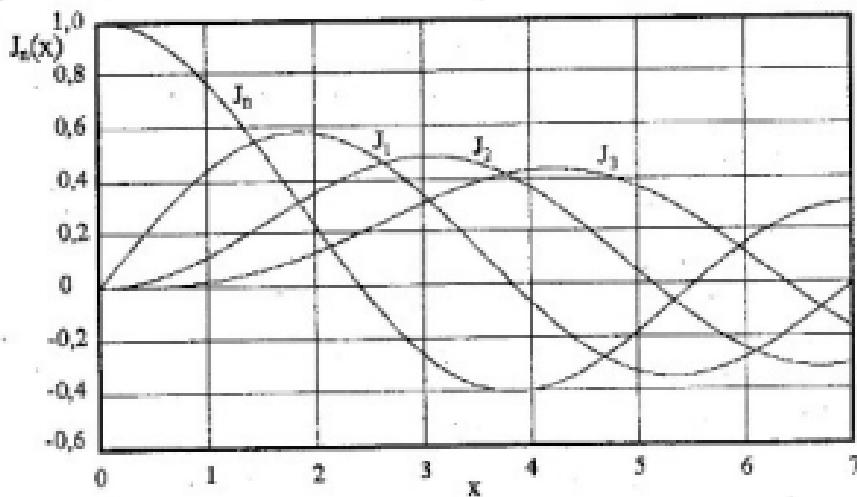


Рис. П.1.1. Функции Бесселя

Особый практический интерес представляют корни функции $J_v(v_{\text{ан}})=0$ и $J'_v(\mu_{\text{ан}})=0$. Значения нулей функций Бесселя приведены в табл. П.1.1.

Таблица П.1.1

n	m							
	v_m				μ_m			
	1	2	3	4	1	2	3	4
0	2,405	5,520	8,654	11,792	3,832	7,016	10,173	13,324
1	3,832	7,016	10,173	13,324	1,841	5,331	8,536	11,706
2	5,136	8,417	11,620	14,796	3,054	6,706	9,969	13,170
3	6,380	9,761	13,015	16,223	4,201	8,015	11,346	14,586
4	7,588	11,065	14,373	17,616	5,318	9,282	12,682	15,964
5	8,771	12,339	15,700	18,980	6,416	10,520	13,988	17,313

Для бесселевых функций справедливы следующие основные формулы, свидетельствующие о независимости лишь двух функций: $J_0(x)$ и $J_1(x)$

$$J_{n-1}(x) + J_{n+1}(x) = \frac{2n}{x} J_n(x), \quad (\text{П.1.2a})$$

$$\frac{dJ_n(x)}{dx} = -\frac{n}{x} J_n(x) + J_{n-1}(x). \quad (\text{П.1.2б})$$

Формулы дифференцирования бесселевых функций имеют вид:

$$J'_v(x) = -\frac{v}{x} J_v(x) + J_{v-1}(x) = \frac{v}{x} J_v(x) - J_{v+1}(x), \quad (\text{П.1.3a})$$

$$J'_0(x) = -J_1(x), \quad J'_1(x) = J_0(x) - \frac{1}{x} J_1(x), \quad (\text{П.1.3б})$$

$$\frac{d}{dx} [x^v J_v(\alpha x)] = \alpha x^{v-1} J_{v-1}(\alpha x), \quad (\text{П.1.3в})$$

$$\frac{d}{dx} [x^{-v} J_v(\alpha x)] = -\alpha x^{-v} J_{v+1}(\alpha x). \quad (\text{П.1.3г})$$

Формулы интегрирования бесселевых функций имеют вид:

$$\int J_v(x) dx = 2 \sum_{k=0}^{\infty} J_{v+2k+1}(x), \quad (\text{П.1.4a})$$

$$\int x^{\nu+1} J_{\nu}(x) dx = x^{\nu+1} J_{\nu+1}(x), \quad (\text{II.1.46})$$

$$\int x^{-\nu+1} J_{\nu}(x) dx = -x^{-\nu+1} J_{\nu-1}(x), \quad (\text{II.1.48})$$

$$\int J_1(x) dx = -J_0(x), \quad \int x J_0(x) dx = x J_1(x), \quad (\text{II.1.49})$$

$$\int x J_{\nu}(\alpha x) J_{\nu}(\beta x) dx = \frac{\beta x J_{\nu}(\alpha x) J_{\nu-1}(\beta x) - \alpha x J_{\nu-1}(\alpha x) J_{\nu}(\beta x)}{\alpha^2 - \beta^2}, \quad (\text{II.1.4A})$$

$$\begin{aligned} & \int_x^1 J_{\nu}(\alpha x) J_{\mu}(\alpha x) dx = \\ & = \frac{J_{\mu-1}(\alpha x) J_{\nu}(\alpha x) - J_{\mu}(\alpha x) J_{\nu-1}(\alpha x)}{\mu^2 - \nu^2} - \frac{J_{\mu}(\alpha x) J_{\nu}(\alpha x)}{\mu + \nu}, \quad (\text{II.1.4e}) \end{aligned}$$

$$\int x (J_{\mu}(\alpha x))^2 dx = \frac{x^2}{2} [J_{\mu}(\alpha x)^2 - J_{\mu-1}(\alpha x) J_{\mu+1}(\alpha x)]. \quad (\text{II.1.4ж})$$

Представленные отношения используются для расчета резонаторов в цилиндрической системе координат.

Приложение 2

Формулы для расчета энергетических характеристик резонаторов

Собственные добротности для колебаний Е- и Н-видов объемных прямоугольных и цилиндрических резонаторов.

Прямоугольные резонаторы. Колебания Н-вида:

$$Q_{\text{нр}} = \frac{\omega \mu_0}{R_{\text{ср}}} \frac{\sum_1}{aL\sqrt{\sum_2}}, \quad (\text{П.2.1a})$$

где

$$\begin{aligned} \sum_1 &= \frac{abL}{4} \left[\left(\frac{m}{a} \right)^2 + \left(\frac{n}{b} \right)^2 \right] \left[\left(\frac{m}{a} \right)^2 + \left(\frac{n}{b} \right)^2 + \left(\frac{p}{L} \right)^2 \right]^{3/2} + \\ &+ bL \left\{ \left(\frac{n}{b} \right)^2 \left(\frac{p}{L} \right)^2 + \left[\left(\frac{m}{a} \right)^2 + \left(\frac{n}{b} \right)^2 \right]^2 \right\} + ab \left(\frac{p}{L} \right)^2 \left[\left(\frac{m}{a} \right)^2 + \left(\frac{n}{b} \right)^2 \right], \\ \sum_2 &= \sqrt{\left(\frac{m}{a} \right)^2 + \left(\frac{n}{b} \right)^2 + \left(\frac{p}{L} \right)^2} \left[\left(\frac{m}{a} \right)^2 \left(\frac{p}{L} \right)^2 + \left[\left(\frac{m}{a} \right)^2 + \left(\frac{n}{b} \right)^2 \right]^2 \right]. \end{aligned}$$

Если $m=0$, а n и $p>0$, то

$$Q_{0np} = \frac{\omega \mu_0}{R_{\text{ср}}} \frac{abL}{2} \frac{\left| \left(n/b \right)^2 + \left(p/L \right)^2 \right|}{\left(n/b \right)^2 \left(b+2a \right) L + \left(p/L \right)^2 b \left(L+2a \right)}. \quad (\text{П.2.1б})$$

Если $n=0$, а m и $p>0$, то

$$Q_{m0p} = \frac{\omega \mu_0}{R_{\text{ср}}} \frac{abL}{2} \frac{\left| \left(m/a \right)^2 + \left(p/L \right)^2 \right|}{\left(m/a \right)^2 \left(a+2b \right) L + \left(p/L \right)^2 a \left(L+2b \right)}. \quad (\text{П.2.1в})$$

Прямоугольные резонаторы. Колебания Е-вида:

$$Q_{\text{нр}} = \frac{\omega \mu_0}{R_{\text{ср}}} \frac{\left| \left(m/a \right)^2 + \left(n/b \right)^2 \right|}{\left(m/a \right)^2 \left(a+L \right) b + \left(n/b \right)^2 \left(b+L \right) a}. \quad (\text{П.2.2a})$$

Если $p=0$, а m и $n>0$, то

$$Q_{mn0} = \frac{\omega \mu_0}{R_{cr}} \frac{abL}{2} \frac{|(m/a)^2 + (n/b)^2|}{(m/a)^2(\sigma + 2L)b + (n/b)^2(b + 2L)\alpha}. \quad (\text{II.2.26})$$

Цилиндрические резонаторы. Колебания Н-вида:

$$Q_{mn0} = \frac{\omega \mu_0 R}{2R_{cr}} \frac{\left|(\mu_{mn}/R)^2 + (p\pi/L)^2\right| |1 - (m/\mu_{mn})^2|}{\left(\frac{\mu_{mn}}{R}\right)^2 + \frac{2p^2\pi^2 R}{L^3} + \frac{p^2 m^2 \pi^2}{\mu_{mn}^2 L^2} \left(1 - \frac{2R}{L}\right)}. \quad (\text{II.2.3})$$

Цилиндрические резонаторы. Колебания Е-вида:

$$Q_{mn0} = \frac{\omega \mu_0}{2R_{cr}} \frac{R}{1 + 2R/L}, \quad (\text{II.2.4a})$$

$$Q_{mn0} = \frac{\omega \mu_0}{2R_{cr}} \frac{R}{1 + R/L}. \quad (\text{II.2.4b})$$

Параметры напряженности электрического и магнитного полей в резонаторах.

Прямоугольный резонатор с колебаниями Н₀₀₁:

$$\xi_{yy} = \frac{E_y}{\sqrt{PQ}} = \frac{2\sqrt{2}}{\sqrt{\pi}} \sqrt{Z_0} \frac{\sqrt{a^2 + L^2}}{\sqrt{abL}} \sin(\pi x/a) \sin(\pi z/L); \quad (\text{II.2.5a})$$

$$\xi_{yx} = \frac{H_x}{\sqrt{PQ}} = \frac{2\sqrt{2}}{\sqrt{\pi}} \frac{1}{\sqrt{Z_0}} \frac{(a^2 + L^2)^{3/4}}{\sqrt{abL^3}} \sin(\pi x/a) \cos(\pi z/L); \quad (\text{II.2.5b})$$

$$\xi_{xz} = \frac{H_z}{\sqrt{PQ}} = \frac{2\sqrt{2}}{\sqrt{\pi}} \frac{1}{\sqrt{Z_0}} \frac{(a^2 + L^2)^{3/4}}{\sqrt{a^2 bL}} \sin(\pi x/a) \cos(\pi z/L). \quad (\text{II.2.5c})$$

Цилиндрический резонатор с колебаниями Е₀₀₀:

$$\xi_{zz} = \frac{E_z}{\sqrt{PQ}} = \frac{2}{\nu_{01}} \sqrt{\frac{Z_0}{\lambda_0 L}} \frac{J_0(\nu_{01}r/R)}{J_1(\nu_{01})}; \quad (\text{II.2.6a})$$

$$\xi_{yy} = \frac{H_y}{\sqrt{PQ}} = \frac{2}{\nu_{01}} \sqrt{\frac{1}{\lambda_0 L Z_0}} \frac{J_1(\nu_{01}r/R)}{J_1(\nu_{01})}. \quad (\text{II.2.6b})$$

Цилиндрический резонатор с колебаниями H_{011} :

$$\xi_{\varphi \rho} = \frac{E_\varphi}{\sqrt{PQ}} = \sqrt{\frac{2\lambda_0 Z_0}{L}} \frac{J_1(\mu_{01}r/R)}{\pi R J_0(\mu_{01})} \sin(\pi z/L); \quad (\text{П.2.7а})$$

$$\xi_{uz} = \frac{H_z}{\sqrt{PQ}} = \sqrt{\frac{2\lambda_0}{L Z_0}} \frac{J_0(\mu_{01}r/R)}{\pi J_0(\mu_{01})R(\lambda_{sp}/\lambda_0)} \sin(\pi z/L); \quad (\text{П.2.7б})$$

$$\xi_{ur} = \frac{H_r}{\sqrt{PQ}} = \frac{J_1(\mu_{01}r/R)}{\sqrt{2\pi J_0(\mu_{01})R\sqrt{Z_0}}} \sqrt{\left(\frac{\lambda_0}{L}\right)^3} \cos(\pi z/L). \quad (\text{П.2.7в})$$

Цилиндрический резонатор с колебаниями H_{111} :

$$\begin{aligned} \xi_{uz} = \frac{H_z}{\sqrt{PQ}} &= \frac{\mu_{11}^2}{\pi^2} \frac{J_1(\mu_{11}r/R)}{J_1(\mu_{11})} \sqrt{\frac{\lambda_0^2}{Z_0 L(\mu_{11}^2 - 1)}} \times \\ &\times \frac{1}{R^2} \cos \varphi \sin(\pi z/L); \end{aligned} \quad (\text{П.2.8а})$$

$$\begin{aligned} \xi_{rl} (r, \varphi, z) &= \frac{\sqrt{E_\varphi^2 + E_r^2}}{\sqrt{PQ}} = \frac{2\mu_{11}}{\pi R J_1(\mu_{11})} \sqrt{\frac{\lambda_0 Z_0}{L(\mu_{11}^2 + 1)}} \times \\ &\times \sqrt{\left[\frac{J_1\left(\frac{\mu_{11}r}{R}\right)}{\left(\frac{\mu_{11}r}{R}\right)} \right]^2 + \left[J_0^2\left(\frac{\mu_{11}r}{R}\right) - 2J_0\left(\frac{\mu_{11}r}{R}\right) \frac{J_1\left(\frac{\mu_{11}r}{R}\right)}{\left(\frac{\mu_{11}r}{R}\right)} \right]} \times \\ &\times \sqrt{\cos^2(\varphi)} \cdot \sin(\pi z/L); \end{aligned} \quad (\text{П.2.8б})$$

$$\begin{aligned} \xi_{u\rho} &= \frac{H_\varphi}{\sqrt{PQ}} = \frac{\lambda_0 \mu_{11}}{\pi R L J_1(\mu_{11})} \sqrt{\frac{\lambda_0}{Z_0 L(\mu_{11}^2 - 1)}} \frac{J_1\left(\frac{\mu_{11}r}{R}\right)}{\left(\frac{\mu_{11}r}{R}\right)} \times \\ &\times \sin \varphi \cos(\pi z/L); \end{aligned} \quad (\text{П.2.8в})$$

$$\xi_{nr} = \frac{H_r}{\sqrt{PQ}} = \frac{\lambda_0 \mu_{11}}{\pi R L J_1(\mu_{11})} \sqrt{\frac{\lambda_0}{Z_0 L (\mu_{11}^2 - 1)}} \times$$

$$\times \left[J_1\left(\frac{\mu_{11} r}{R}\right) - \frac{J_1\left(\frac{\mu_{11} r}{R}\right)}{\left(\frac{\mu_{11} r}{R}\right)} \right] \cos \varphi \cos(\pi x / L) \quad (11.2.8r)$$

Примечания

Физико-химические свойства материалов

Таблица II.1
Физико-химические свойства материалов

Материал	Удельный вес, г/см ³ при 20°C	Усадка при нагреве до 200°C, %/мм (при 100)	Температура плавления, °C	Температура кипения, °C	Рекомендуемая температура хранения, °C	Газопроницаемость, л/см ² ·(с/см ²) при 150/500°C, норм. сущ. вес/(с/см ²)	Радиальная теплопроводность, Вт/м при 10° Ц	Давление насыщенных паров при 800° Ц
Алюминий	1	2.7	660	660	100	3.5·10 ⁻⁷	10-12	5·10 ³
Металлы	2	8.96	2.69	10.2	4.36	4.25	4.29	2·10 ⁻⁴
Сталь	3	7.83	873	239	170	2.10 ⁻⁹	1.5·10 ⁻⁹ /	3.5·10 ⁻⁷
Латунь	4	7.50	250-300	750	750	1.650		
Бронза	5	8.03	660-724	239	170	2.10 ⁻⁹	1.5·10 ⁻⁹ /	3.5·10 ⁻⁷
Медь	6	8.43	2520	4800	399	237	1.39	4.29
Магнезит	7	3.50	239	239	239	239	3.5·10 ⁻⁷	3.5·10 ⁻⁷
Серебро	8	10.5	660	660	700	239	2.08	5·10 ³
Марганец	9	7.83	239	239	239	239	2.08	5·10 ³
Молибден	10	5.8	3.57	4.25	4.36	4.25	4.29	2·10 ⁻⁴
Монель	11	8.03	2520	4800	399	237	1.39	4.29
Медь-никель	12	8.96	2.69	10.2	4.36	4.25	4.29	3.5·10 ⁻⁷
Марганец-никель	13	10.2	5·10 ³	5·10 ³	700	239	1.39	3.5·10 ⁻⁷

Продолжение табл. II.3.1

1	Коэф. 29НК	Средн ое	Норма стала	Заданное значение	Величина перем	Макс имум	Параметр 70% метра
2	8,3	10,5	8,1	19,32	19,3	8,1	8,5
3	590	235	461	128	132	487	385
4	550				1250		
5	1450	960,8	1500	1063	2410		900
6		2167		2966	5930		
7		4229	18,3	31,7	177	6,7	111
8	59,64	220	108	142	44	10	190
9	600	400	950	500	2250	600	
10	0,2	0,14	0,14	4,35	1,8	0,12	1,6
11		4,3		5,1	4,54		
12	1,5·10 ⁻⁴	4,5·10 ⁻⁴	2,5·10 ⁻⁴	0,9·10 ⁻⁶	1,5·10 ⁻⁴	1·10 ⁻⁴	10 ⁻⁴
13	5,5·10 ⁻⁶	5·10 ⁻³	5·10 ⁻³	10 ⁻³	1·10 ⁻⁴		

Продолжение табл. П.3.1

1	Способ	Литер	Железо	Хром
2	-	6,12	7,13	7,87
3	223	384	451	432
4				
5	231,9	491,5	1538	1877
6	2450	904,2	2872	2672
7	67	118	81,1	94
8	270		125	84
9	120	340	700	
10	0,82	1,8	1,2	0,7
11	4,38	4,24	4,5	4,28
12				
13			10 ³	

Таблица П 3.2
Физико-механические свойства эпоксидных полимеров

Диэлектрик	1	Стекло (С49-2)	Кварцевое стекло	Сапфир
Плотность, $10^3 \text{ кг}/\text{м}^3$	2	2,3	2,1-2,2	3,98
Температура плавления (сплавление), $^{\circ}\text{C}$	3	590	1300	1700
Максимальная рабочая температура, $^{\circ}\text{C}$	4	400	1000	1500
Упрочненный коэффициент линейного расширения ($\times 10^{-4}$), $1/\text{K}$ / температура, $^{\circ}\text{C}$	5	49,0 / 20-300	6,27 / 20-300	66,6 / 200 90,0 / 800
Теплопроводность, $\text{Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$	6	0,78	0,89	0,76
Удельное электрическое сопротивление при 20°C , $\Omega \text{м} \cdot \text{см}$	7	0,86	1,46	25,121
Диэлектрическая проницаемость	8	10^{11}	10^{17}	10^{11}
Гантенс угла диэлектрических потерь ($\times 10^4$) / частота, МГц	9	5,5	3,78	11,0-13,0
	10	$90 / 10^4$	$1,7 / 10^4$	$0,3 / 10^4$
				2,0 / 1

Продолжение табл. П.3.2

Керамиты					Стекла
1	Стекловолокно	Форсткертовоз	Альбоминитовая	Альбоминидиаг.	
2	2,1	2,3	102	A-995	2,8
3	<1300	<1400	3,51	9,9	
4	600	700	>1350	>1500	1600
5	85,0 / 20-500	95,0 / 20-500	1000	1400	900
6			55 / 20-200	62 / 20-200	0,88
7	3,73	4,86	0,65-1,35		0,88
8	100	10 ⁴	5,44	18,84	0,55
9	5,2	5,8	10 ⁹	10 ⁴	10 ¹³
10	30 / 10 ⁴	10 / 10 ⁴	8,2	10	5,4
			17 / 10 ⁴	17 / 1 - 10 ⁴	3,0 / 10 ⁴

Таблица П 3.2
Физико-механические свойства эпоксидных полимеров

Диэлектрик	1	Стекло (С49-2)	Кварцевое стекло	Сапфир
Плотность, $10^3 \text{ кг}/\text{м}^3$	2	2,3	2,1-2,2	3,98
Температура плавления (сплавление), $^{\circ}\text{C}$	3	590	1300	1700
Максимальная рабочая температура, $^{\circ}\text{C}$	4	400	1000	1500
Упрочненный коэффициент линейного расширения ($\times 10^{-4}$), $1^{\circ}\text{C} / \text{температура} - \text{C}$	5	49,0 / 20-300	6,27 / 20-300	66,6 / 200
Теплопроводность, $\text{Вт}/(\text{м} \cdot \text{K})$	6	0,78	0,89	0,76
Удельное электрическое сопротивление при 20°C , $\Omega \text{м} \cdot \text{см}$	7	0,86	1,46	25,121
Диэлектрическая проницаемость	8	10^{11}	10^{17}	10^{11}
Гантенс угла диэлектрических потерь ($\times 10^4$) / частота МГц	9	5,5	3,78	11,0-13,0
	10	$90 / 10^4$	$1,7 / 10^4$	$0,3 / 10^4$
				2,0 / 1

Продолжение табл. П.3.2

Керамиты					Стекла
1	Стекловолокно	Форсткертовоз	Альбоминитовая	Альбоминидиаг.	
2	2,1	2,3	102	A-995	2,8
3	<1300	<1400	3,51	9,9	
4	600	700	>1350	>1500	1600
5	85,0 / 20-500	95,0 / 20-500	1000	1400	900
6			55 / 20-200	62 / 20-200	0,88
7	3,73	4,86	0,65-1,35		0,88
8	100	10 ⁴	5,44	18,84	0,55
9	5,2	5,8	10 ⁹	10 ⁴	10 ¹³
10	30 / 10 ⁴	10 / 10 ⁴	8,2	10	5,4
			17 / 10 ⁴	17 / 1 - 10 ⁴	3,0 / 10 ⁴

Продолжение табл. II 3.2

1	Фторополистер-4	Полистирол	Полистилен	Эбонит	Текстолит	Оптическое	
2	2,2	1,06	0,95	1,15	1,4	1,8	
3	260	90	90	210	140	130	
4	120	45	45	90	60	50	
5	2,67	0,34	2,5	1,43	1,5	1,5	
6	1,7	1,9	2,5	1,43	1,5	1,5	
7	0,1	0,082	0,065	1,6	0,9	0,18	
8	10 ¹³	10 ¹²	10 ¹³	10 ⁹	10 ¹²	10 ¹⁰	
9	2,1	2,55	2,25	2,7	3,7	2,6	
10	3,7 / 10 ⁴	7,0 / 10 ⁴	5,0 / 10 ⁴	60 / 10 ⁴	600 / 10 ⁴	840 / 10 ⁴	60,0 / 3 · 10 ³