

左手介质对谐振腔谐振频率的影响

李培 王辅忠 张丽珠 张光璐

Influence of left-handed material on the resonant frequency of resonant cavity

Li Pei Wang Fu-Zhong Zhang Li-Zhu Zhang Guang-Lu

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 64, 124103 (2015) DOI: 10.7498/aps.64.124103

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.124103>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2015/V64/I12>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

高增益相对论速调管放大器相位特性的模拟与实验研究

Simulation and experimental study of phase characteristics in high-gain relativistic klystron amplifier

物理学报.2015, 64(8): 084102 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.084102>

介质涂覆位置对双S弯排气系统电磁散射特性影响研究

Electromagnetic scattering characteristics of double S-shape exhaust nozzle with different coating medium parts

物理学报.2015, 64(2): 024103 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.024103>

开孔矩形腔体电磁泄漏特性的解析研究

Analytical formulation for electromagnetic leakage from an apertured rectangular cavity

物理学报.2014, 63(21): 214103 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.214103>

含泡沫面元模型的海面电磁散射研究

Research on the facet model of electromagnetic scatterings from rough sea surface with foams

物理学报.2014, 63(21): 214104 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.214104>

早期乳腺肿瘤的超宽带微波稳健波束形成成像检测系统

Ultra-wideband microwave robust Capon beamforming imaging system for early breast cancer detection

物理学报.2014, 63(19): 194102 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.194102>

左手介质对谐振腔谐振频率的影响*

李培¹⁾ 王辅忠^{1)†} 张丽珠²⁾ 张光璐¹⁾

1)(天津工业大学理学院, 天津 300387)

2)(天津职业技术师范大学理学院, 天津 300222)

(2014年11月13日收到; 2014年12月22日收到修改稿)

在谐振腔设计过程中, 谐振腔的品质因数以及谐振频率都是需要考虑的关键因素. 传统的方法是通过减小谐振腔的尺寸或者利用高次模来提高谐振腔的谐振频率, 但是由于两种方法都有其局限性, 导致设计结果并不理想. 通过理论计算与模拟仿真相结合的方法, 对影响谐振腔谐振频率的因素进行分析, 得出了填充介质的材料属性与谐振腔谐振频率的关系. 理论计算显示: 当用“左手介质”作为谐振腔的填充物质时, 可以在不改变谐振腔尺寸的基础上提高谐振频率. 高频结构仿真器 (high frequency structure simulator) 的仿真数据也证明了以上结果, 从而得出谐振腔的谐振频率可以不受谐振腔尺寸的限制. 相较于传统理论而言, 研究结论有进一步的发展, 为探索和设计新颖的谐振腔提供了理论依据.

关键词: 谐振腔, 谐振频率, 右手介质, 左手介质

PACS: 41.20.-q, 41.20.Jb

DOI: 10.7498/aps.64.124103

1 引言

“左手介质”是相对于传统介质而言, 与传统介质的性质相悖的另外一种介质, 其磁导率 μ 和相对介电常数 ϵ 均为负值^[1,2], 具有负相速度、负折射率、理想成像等物理性质^[3-5]. 因其电磁性质符合左手定则, 命名为“左手介质”.

微波谐振腔是在LC谐振回路的基础上发展而来的. 最初的LC振荡回路主要工作在低频段, 当频率升高以后, 会导致回路损耗增加、Q值下降、频率选择性变差, 除此之外, 对元件的尺寸、储能、功率容量等都有要求, 这在工艺上难以实现. 为了克服上述问题, 应设法把电磁场封闭在一定体积内以减小损耗, 增加电流流过导体的表面积, 减小导体损耗, 增加板间距离等. 因此, LC回路就过渡为由导体封闭构成的谐振腔, 这在一段时间内满足了工业对高谐振频率的要求. 但随着工业发展, 对谐振腔的频率要求越来越高. 一般情况下, 可以通过减

小谐振腔的尺寸来提高频率, 但由于截止频率的限制, 谐振腔的尺寸不能无限减小, 加之尺寸越小, 对元件的精度以及制作工艺的要求也就越高, 因此, 通过尺寸的调节来提高谐振频率受到了限制.

由于随着模数的增大, 谐振腔的谐振频率也会增加, 因此有人提出将工作区域设置在高次模^[6]. 但随着模数的增大, 模式间隔会越来越小, 容易出现杂模^[7-9]. 除此之外, 由于高次模同轴腔耦合波导后, 极易引起腔体内部的纵向电场分布不均, 导致电子束与高频场的相互作用减弱, 甚至导致整个工作区的不稳定.

为了解决以上问题, 本文根据“左手介质”的性质, 提出了将“左手介质”填充在谐振腔内部以提高谐振频率的思路. 由于“左手介质”具有负的介电常数和磁导率^[10], 而这两者又是影响谐振腔谐振频率的关键因素, 因此, 在谐振腔内部填充“左手介质”, 有可能在不改变谐振腔尺寸的基础上提高谐振频率. 本文将理论计算与软件模拟相结合, 研究“左手介质”对谐振腔谐振频率的影响, 并

* 国家自然科学基金 (批准号: 61271011) 和天津市自然科学基金 (批准号: 14JCYBJC17100) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: wangfuzhong@163.com

将计算结果通过高频结构仿真器 (high frequency structure simulator, HFSS) 软件模拟, 进一步证明理论结果.

2 谐振频率理论与推导

2.1 真空谐振腔理论分析

在对谐振腔 f_0 和 Q_0 的分析过程中, 需要对腔体内部的电场以及磁场进行详细的计算 [11-13]. 麦克斯韦方程组 [14]:

$$\begin{cases} \nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}, \\ \nabla \times \mathbf{H} = \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t}, \\ \nabla \cdot \mathbf{D} = 0, \\ \nabla \cdot \mathbf{B} = 0, \end{cases} \quad (1)$$

其中, \mathbf{E} 为电场强度, \mathbf{H} 为磁场强度, \mathbf{D} 为电位移矢量, \mathbf{B} 为磁感应强度. 在真空 ($\mu = \mu_0, \varepsilon = \varepsilon_0, \sigma = 0$) 条件下, 对于各向同性的介质有 $\mathbf{D}_0 = \varepsilon_0 \mathbf{E}_0, \mathbf{B} = \mu_0 \mathbf{H}$, 因此得到 \mathbf{E} 和 \mathbf{H} 的方程如下 [15]:

$$\nabla^2 \mathbf{E} - \mu_0 \varepsilon_0 \frac{\partial^2 \mathbf{E}}{\partial t^2} = 0, \quad (2a)$$

$$\nabla^2 \mathbf{B} - \mu_0 \varepsilon_0 \frac{\partial^2 \mathbf{B}}{\partial t^2} = 0. \quad (2b)$$

将 $c = 1/\sqrt{\mu_0 \varepsilon_0}$ 代入 (2) 式, 得到电磁波在真空中传播的波动方程为

$$\nabla^2 \mathbf{E} - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \mathbf{E}}{\partial t^2} = 0, \quad (3a)$$

$$\nabla^2 \mathbf{B} - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \mathbf{B}}{\partial t^2} = 0. \quad (3b)$$

2.2 填充“右手介质”后的理论分析

真空谐振腔腔内电磁场满足的麦克斯韦方程为

$$\nabla \times \mathbf{E}_0 = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} = i\omega_0 \mu_0 \mathbf{H}_0, \quad (4a)$$

$$\nabla \times \mathbf{H}_0 = \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} = -i\omega_0 \varepsilon_0 \mathbf{E}_0. \quad (4b)$$

“右手介质”的介电常数与磁导率均为正值, 在腔内填充“右手介质”以后, (4) 式变为

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} = i\omega \mu \mathbf{H}, \quad (5a)$$

$$\nabla \times \mathbf{H} = \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} = -i\omega \varepsilon \mathbf{E}. \quad (5b)$$

对 (4b) 与 (5a) 式取共轭, 做内积运算得

$$\begin{aligned} (\nabla \times \mathbf{H}_0)^* \cdot \mathbf{E} &= i\omega_0 \varepsilon_0 \mathbf{E}_0^* \cdot \mathbf{E}, \\ -\mathbf{H}_0^* \cdot (\nabla \times \mathbf{E}) &= -i\omega \mu \mathbf{H}_0^* \cdot \mathbf{H}. \end{aligned} \quad (6)$$

因此,

$$\begin{aligned} \nabla \cdot (\mathbf{H}_0^* \times \mathbf{E}) &= (\nabla \times \mathbf{H}_0^*) \cdot \mathbf{E} - \mathbf{H}_0^* \cdot (\nabla \times \mathbf{E}) \\ &= i\omega_0 \varepsilon_0 \mathbf{E}_0^* \cdot \mathbf{E} - i\omega \mu \mathbf{H}_0^* \cdot \mathbf{H}. \end{aligned} \quad (7)$$

同理, 由 (4a) 与 (5b) 式得

$$\begin{aligned} \nabla \cdot (\mathbf{H} \times \mathbf{E}_0^*) &= (\nabla \times \mathbf{H}) \cdot \mathbf{E}_0^* - \mathbf{H} \cdot (\nabla \times \mathbf{E}_0^*) \\ &= i\omega \mu \mathbf{H}_0^* \cdot \mathbf{H} - i\omega_0 \varepsilon_0 \mathbf{E}_0^* \cdot \mathbf{E}. \end{aligned} \quad (8)$$

将 (7) 与 (8) 式进行积分变换得

$$\begin{aligned} \oint_V \nabla \cdot (\mathbf{H}_0^* \times \mathbf{E} + \mathbf{H} \times \mathbf{E}_0^*) dV &= \oint_S (\mathbf{H}_0^* \times \mathbf{E} + \mathbf{H} \times \mathbf{E}_0^*) \cdot d\mathbf{s} \\ &= \oint_V [(\omega \mu - \omega_0 \mu_0) \mathbf{H} \cdot \mathbf{H}_0^* \\ &\quad + (\omega \varepsilon - \omega_0 \varepsilon_0) \mathbf{E} \cdot \mathbf{E}_0^*] dV. \end{aligned} \quad (9)$$

(9) 式中, 左侧为零, 因此

$$\begin{aligned} \oint_V [(\omega \mu - \omega_0 \mu_0) \mathbf{H} \cdot \mathbf{H}_0^* \\ + (\omega \varepsilon - \omega_0 \varepsilon_0) \mathbf{E} \cdot \mathbf{E}_0^*] dV = 0. \end{aligned} \quad (10)$$

根据 (10) 的形式可以得到以下方程同样成立:

$$\oint_V (\omega \mu_0 \mathbf{H} \cdot \mathbf{H}_0^* + \omega \varepsilon_0 \mathbf{E} \cdot \mathbf{E}_0^*) dV = 0. \quad (11)$$

由 (10) 和 (11) 式可以得出

$$\begin{aligned} \oint_V [(\omega \mu - \omega_0 \mu_0 + \omega \mu_0) \mathbf{H} \cdot \mathbf{H}_0^* \\ + (\omega \varepsilon - \omega_0 \varepsilon_0 + \omega \varepsilon_0) \mathbf{E} \cdot \mathbf{E}_0^*] dV = 0. \end{aligned} \quad (12)$$

由 (12) 式可以得出

$$\frac{\omega - \omega_0}{\omega} = -\frac{1}{\omega} \frac{\oint_V (\omega \mu \mathbf{H} \cdot \mathbf{H}_0^* + \omega \varepsilon \mathbf{E}_0^* \cdot \mathbf{E}) dV}{\oint_V (\mu_0 \mathbf{H} \cdot \mathbf{H}_0^* + \varepsilon_0 \mathbf{E} \cdot \mathbf{E}_0^*) dV}$$

$$\begin{aligned}
 &= -\frac{1}{\omega} \frac{\oint_V (\omega\mu\mathbf{H} \cdot \mathbf{H}_0^* + \omega\varepsilon\mathbf{E}_0^* \cdot \mathbf{E})dV - \oint_V (\omega\mu_0\mathbf{H} \cdot \mathbf{H}_0^* + \omega\varepsilon_0\mathbf{E}_0^* \cdot \mathbf{E})dV}{\oint_V (\mu_0\mathbf{H} \cdot \mathbf{H}_0^* + \varepsilon_0\mathbf{E} \cdot \mathbf{E}_0^*)dV} \\
 &= -\frac{1}{\omega} \left\{ \frac{\oint_V [(\mu - \mu_0)\mathbf{H} \cdot \mathbf{H}_0^* + (\varepsilon - \varepsilon_0)\mathbf{E}_0^* \cdot \mathbf{E}]dV}{\oint_V (\mu_0\mathbf{H} \cdot \mathbf{H}_0^* + \varepsilon_0\mathbf{E} \cdot \mathbf{E}_0^*)dV} \right\} \\
 &= -\frac{\oint_V [(\mu - \mu_0)\mathbf{H} \cdot \mathbf{H}_0^* + (\varepsilon - \varepsilon_0)\mathbf{E}_0^* \cdot \mathbf{E}]dV}{\oint_V (\mu_0\mathbf{H} \cdot \mathbf{H}_0^* + \varepsilon_0\mathbf{E} \cdot \mathbf{E}_0^*)dV}. \tag{13}
 \end{aligned}$$

真空条件下, μ_0 与 ε_0 为定值. 根据“右手介质”的定义, 对于普通介质 μ 和 ε 均为正值, 且 $\mu > \mu_0$, $\varepsilon > \varepsilon_0$. 因此, 在 (13) 式中等号右侧为负值, 即

$$\frac{\omega - \omega_0}{\omega} < 0, \tag{14}$$

得到 $\omega < \omega_0$, 因此, 在谐振腔内填充“右手介质”会导致谐振腔的频率减小.

2.3 填充“左手介质”后的理论分析

“左手介质”是相对于普通介质而言(通常称普通介质为“右手介质”), 其 μ 和 ε 均为负值, 且 $\mu < \mu_0$, $\varepsilon < \varepsilon_0$, 因此在 (13) 式中, 等号右侧为正值, 即

$$\frac{\omega - \omega_0}{\omega} > 0, \tag{15}$$

得 $\omega > \omega_0$. 因此, 在谐振腔内填充“左手介质”可以提高谐振腔的谐振频率.

3 模型建立与模拟分析

3.1 模型理论依据

由 (13) 式可知, 在谐振腔内部, 谐振频率满足如下方程式:

$$\begin{aligned}
 &\frac{\omega - \omega_0}{\omega} \\
 &= -\frac{\oint_V [(\mu - \mu_0)\mathbf{H} \cdot \mathbf{H}_0^* + (\varepsilon - \varepsilon_0)\mathbf{E}_0^* \cdot \mathbf{E}]dV}{\oint_V (\mu_0\mathbf{H} \cdot \mathbf{H}_0^* + \varepsilon_0\mathbf{E} \cdot \mathbf{E}_0^*)dV}. \tag{16}
 \end{aligned}$$

对于“左手介质”而言, 由于其 μ 和 ε 均为负值, 且满足 $\mu < \mu_0$, $\varepsilon < \varepsilon_0$, 将其代入 (16) 式后, 在等号右侧积分所得结果为正值, 而等号左侧的 ω 为正

值, 进而可以得出 $\omega - \omega_0$ 的取值为正值, 因此在谐振腔内部填充“左手介质”会导致谐振腔的谐振频率增加.

3.2 模型建立

谐振腔有圆柱形、矩形以及椭球形等, 本文采用最常用的圆柱形谐振腔作为分析对象. HFSS 建立的基本圆柱形谐振腔的三维模型如图 1 所示.

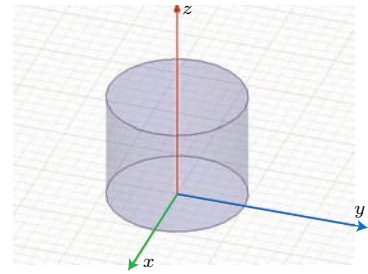


图1 HFSS 仿真模型图(高度为 40 mm, 半径为 25 mm, 有限导体边界特性与金属铜相同)

Fig. 1. The model diagram of the cylindrical cavity (the height of the cavity is 40 mm, the radius is 25 mm, the limited boundary property is similar to copper).

如图 1 所示, 谐振腔的外壁材料为铜, 其中铜的相对磁导率为 1, 相对介电常数为 0.999991, 电导率为 5.8×10^7 S/m. 仿真分析时, 为了使数据更精确, 设最小求解频率为 3 GHz, 最大迭代次数为 20.

3.3 仿真结果与数据分析

在工业生产中, 通常使用比较多的是真空或空气谐振腔, 当谐振腔腔内为真空时, 仿真结果见图 2. 从图 2 可以看出, 基模的频率最低, 模数越高, 谐振频率越大. 在工业上最常用的是基模, 尽管高次模的应用会提高谐振腔的频率, 但由于电子注在进入输出腔时, 已经含有丰富的谐波成分, 同时由

于谐振腔的多谐性, 电子注就有可能在输出腔中激发出非工作模式, 出现杂模, 它们对高频输出有很强的破坏性.

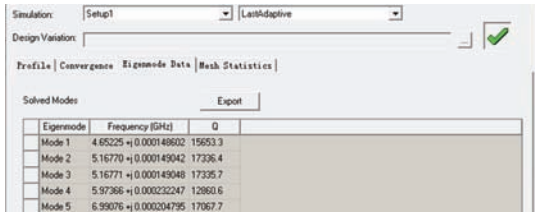


图2 真空条件下的仿真结果(谐振腔的频率变化范围为4—8 GHz)

Fig. 2. The simulation results under vacuum conditions (the frequency range of the resonant cavity is from 4 GHz to 8 GHz).

2002年底, 麻省理工学院孔金甄教授研究组从理论上证明了左手材料存在的合理性^[16], 在其后续的研究中提到“左手介质” μ 和 ϵ 的范围在-1到0之间^[17-19]. 当介质的 $\mu = -0.8$, $\epsilon = -0.8$ 时, HFSS显示结果如图3所示.

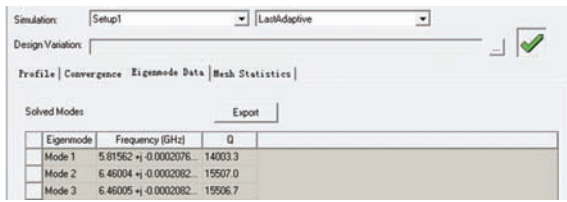


图3 填充“左手介质”的仿真结果

Fig. 3. The simulation results under left-handed material conditions.

由图3可以看出, “左手介质”的填充提高了谐振腔的谐振频率, 无论是基模还是高次模都有增加, 增加幅度大致在1.0—1.5 GHz之间.

由于模数越高, 出现杂模的概率越大^[20-25], 因此谐振腔大多工作在基模或二次模. 图4为谐振腔内部填充传统介质(PCL)、真空以及“左手介质”时基模以及二次模的频率对比图.

由图4可以看出: 填充介质为空气时, 谐振腔的频率变化很小, 与真空情况下基本一致, 大致在4.5—5.0 GHz之间; 填充传统介质(PCL的 $\mu = 1$, $\epsilon = 3.3$)时, 谐振频率比真空情况下要小, 大致在2.5—3.0 GHz之间, 因此传统介质的填充会导致谐振频率下降; 填充“左手介质”时, 谐振频率会增加, 增加的幅度与 μ 和 ϵ 的数值有关. 仿真数据与理论计算结果基本一致.

在图4中, LHM-1的 μ 和 ϵ 均为-0.8, LHM-2的 μ 和 ϵ 为-0.3, 由柱状图可以看出, 填充LHM-2时的谐振频率要远大于填充LHM-1的谐振频率.

将“左手介质”的参数细化, 相对介电常数与相对磁导率对频率的影响分布见图5.

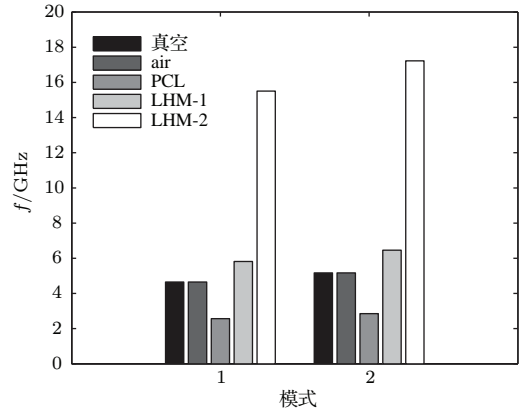


图4 频率对比图(air和PCL为“右手介质”, LHM-1以及LHM-2为“左手介质”)

Fig. 4. The comparison chart of the frequency (air and PCL are examples of traditional media, LHM-1 and LHM-2 are examples of left-handed material).

如图5所示, 介电常数与相对磁导率的范围为-1—0. 随着 μ 和 ϵ 绝对值的减小, 谐振腔的频率增大. 当 μ 和 ϵ 均为-1时, 谐振频率的值最小, 为5.168 GHz; 当 μ 和 ϵ 均为-0.1时, 谐振频率的值为51.6799 GHz. 因此可以得出: “左手介质”的 μ 和 ϵ 的绝对值越小、越接近0, 谐振腔的谐振频率越大.

HFSS显示的结果与理论计算结果基本一致, 因此可以得出: “左手介质”的填充会使谐振腔的谐振频率得到提高.

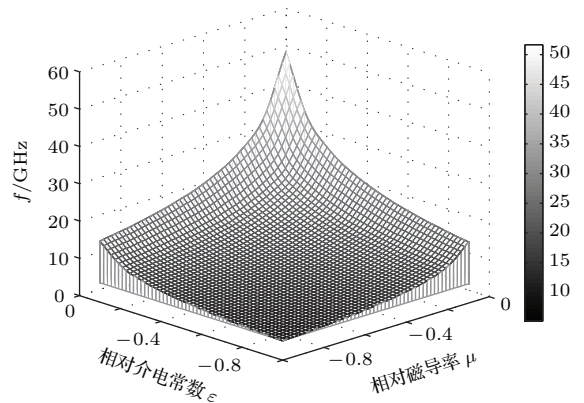


图5 谐振频率与“左手介质” μ , ϵ 的关系

Fig. 5. The relationship of the resonant frequency to permittivity and permeability of left-handed material.

4 结 论

在工业设计中, 通常通过改变谐振腔的尺寸来改变谐振腔的频率^[26–29], 要想得到较高频率的电磁波可以通过减小谐振腔的尺寸来实现. 但是, 由于截止频率的限制, 谐振腔的尺寸不能无限减小, 而高次模的应用又会有杂模, 对高频输出有很强的破坏性. 因此, 在谐振腔的谐振频率受到尺寸限制时, 可以通过填充“左手介质”来提高谐振腔的频率. 通过理论推导与模拟数据可以得出: 在谐振腔内部填充“左手介质”可以在不改变谐振腔尺寸的基础上提高谐振腔的谐振频率, 提高的幅度与“左手介质”的磁导率 μ 和相对介电常数 ε 的大小有关, μ 和 ε 的绝对值越小, 提高的幅度越大. 这在有关提高谐振腔谐振频率的设计中具有一定的应用价值.

感谢天津工业大学信息学院夏靖老师和理学院尚金红、卢欢欢的讨论.

参考文献

- [1] Veselago V G 1968 *Sov. Phys. Usp.* **10** 509
- [2] Caloz C 2009 *Mater. Today* **12** 12
- [3] Xu H X, Wang G M, Wang J F, Yang Z M 2012 *Chin. Phys. B* **21** 124101
- [4] Pendry J B, Holden A J, Stewart W J 1996 *Phys. Rev. Lett.* **76** 4773
- [5] Wang D, Qin F, Wen J, Chen D M, Jin X, An H S, Zhang X K 2012 *Chin. Phys. B* **21** 084101
- [6] Luo C, Johnson S G, Joannopoulos J D 2002 *Appl. Phys. Lett.* **81** 2352
- [7] Si L M, Hou J X, Liu Y, Lü X 2014 *Acta Phys. Sin.* **63** 027802 (in Chinese) [司黎明, 侯吉旋, 刘垆, 吕昕 2014 物理学报 **63** 027802]
- [8] Shelby R A, Smith D R, Schultz S 2001 *Science* **292** 77
- [9] Parazzoli C G, Greigor R B, Nielsen J A 2004 *Appl. Phys. Lett.* **84** 3232
- [10] Smith D R, Vier D C, Kroll N 2000 *Appl. Phys. Lett.* **77** 2246
- [11] Parazzoli C G, Greigor R B, Li K 2003 *Phys. Rev. Lett.* **90** 107401
- [12] Luo J R, Cui J, Zhu M 2013 *Chin. Phys. B* **22** 067803
- [13] Iyer A, Kremer P, Eleftheriades G 2003 *Opt. Express* **11** 696
- [14] Foteinopoulou S, Soukoulis C M 2003 *Phys. Rev. B* **67** 235107
- [15] Cubukcu E, Aydin K, Ozbay E, Foteinopoulou S, Soukoulis C M 2003 *Nature* **423** 604
- [16] Kong J A, Wu B I, Zhang Y 2002 *Microwave Opt. Technol. Lett.* **33** 136
- [17] Cui T J, Kong J A 2004 *Phys. Rev. B* **70** 205106
- [18] Cui T J, Kong J A 2004 *Phys. Rev. B* **70** 165113
- [19] Grzegorzczuk T M, Kong J A 2006 *Phys. Rev. B* **74** 033102
- [20] Pendry J B, Holden A J, Robbins D J 1998 *J. Phys.: Condens. Matter* **10** 4785
- [21] Chang Q Z, Cun J R, Ding Z 2014 *Chin. Phys. B* **23** 088401
- [22] Xiang Y J, Wen S C, Dai X Y 2008 *Chin. J. Lasers* **6** 002
- [23] Yamada H, Chayahara A, Mokuno Y 2006 *Diam. Relat. Mater.* **15** 1395
- [24] Wang Z P, Wu L H, Zhang X L 2008 *Metamaterials, 2008 International Workshop on Nanjing, China, November 9–12, 2008* p91
- [25] Hashemi M R, Itoh T 2008 *Microwave Symposium Digest, 2008 IEEE MTT-S International Atlanta, USA, June 15–20, 2008* p331
- [26] Chen B L 2005 *Optimization Theory and Algorithms* (Beijing: Tsinghua University Press Ltd.) pp203–243 (in Chinese) [陈宝林 2005 最优化理论与算法 (北京: 清华大学出版社) 第203–243页]
- [27] Cheng E 1994 *The Foundation of Microwave Technology* (Xi'an: Xidian University Press) pp220–264 (in Chinese) [承恩 1994 微波技术基础 (西安: 西安电子科技大学出版社) 第220–264页]
- [28] Fang S J, Jin H, Tai Y C 2009 *Microwave Technology* (Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications Press) pp109–129 (in Chinese) [房少军, 金红, 邵佑诚 2009 微波技术 (北京: 北京邮电大学出版社) 第109–129页]
- [29] Li M Y, Liu M 2010 *Detailed Design Applications HFSS Electromagnetic Simulation* (Beijing: The People's Posts and Telecommunications Press) pp267–283 (in Chinese) [李明洋, 刘敏 2010 HFSS 电磁仿真设计应用详解 (北京: 人民邮电出版社) 第267–283页]

Influence of left-handed material on the resonant frequency of resonant cavity*

Li Pei¹⁾ Wang Fu-Zhong^{1)†} Zhang Li-Zhu²⁾ Zhang Guang-Lu¹⁾

1) (College of Sciences, Tianjin Polytechnic University, Tianjin 300387, China)

2) (College of Sciences, Tianjin Vocational Technology Normal University, Tianjin 300222, China)

(Received 13 November 2014; revised manuscript received 22 December 2014)

Abstract

The quality factor and the resonant frequency of a resonant cavity are the key factors that need to be considered in the process of resonator design. The wall of cavity is composed of conductor materials which are effective tools to generate high-frequency oscillation. The microwave cavity is widely used. From the perspective of the circuit, it has almost all the properties of LC resonance unit, such as mode selection. Therefore, it is widely used in filters, matching circuits, and antenna design. In industrial applications, the demand for high-frequency resonant cavity is relatively large. A traditional method can increase the resonant frequency of the resonant cavity by reducing the size of the cavity or using the high-order modes. However, as both approaches have their limitations, the design results are not ideal. By combining theoretical calculation and simulation, the factors that affect the resonant frequency of the resonator are analyzed. The results show the relationship between material properties of the filling medium and the resonant frequency of the cavity. Theoretical calculations show that when the left-handed materials are used as filling materials in the cavity, the resonant frequency can be increased without changing the size of the cavity. The results of high frequency structure simulator also prove the above result. Therefore, the resonant frequency of the resonator cannot be limited by the cavity size. It can be seen from the data that compared with reducing the size of the resonator or using high-order modes, filling left-handed materials can improve resonant frequency to a greater extent. The obtained conclusion shows a further progress compared with the traditional theory and provides a theoretical basis for the exploration and design of novel resonators.

Keywords: resonator, resonant frequency, right-handed material, left-handed material

PACS: 41.20.-q, 41.20.Jb

DOI: 10.7498/aps.64.124103

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 61271011) and the National Natural Science Foundation of Tianjin, China (Grant No. 14JCYBJC17100).

† Corresponding author. E-mail: wangfuzhong@163.com