

# 微波脉冲与带介质孔缝矩形腔体耦合的数值模拟研究

李锐<sup>1)</sup> 钱宝良 朱占平 赵林 刘强

(国防科学技术大学, 光电科学与工程学院 长沙 410073)

**摘要** 利用时域有限差分(FDTD)方法对微波脉冲与带介质孔缝矩形腔体的耦合过程进行了数值模拟研究. 如果孔缝填有介质, 则预期对微波耦合进入腔体的物理过程有重要影响, 研究了微波与带介质孔缝矩形腔体耦合的过程中影响介质孔缝耦合共振峰和共振频率点的因素, 包括孔缝长度、宽度和介质相对介电常数等物理量的影响. 通过大量不同孔缝尺寸的模拟研究, 发现孔缝的介质对孔缝耦合共振频率有明显影响, 我们对微波与带介质孔缝耦合发生共振的公式进行了拟合, 最后得出了微波脉冲与带介质孔缝矩形腔体耦合的共振条件.

**关键词** 微波脉冲 带介质孔缝矩形腔体 数值模拟

## 1 引言

孔缝耦合是微波进入系统的主要途径之一<sup>[1]</sup>, 高功率微波与目标耦合的研究是高功率微波技术领域不可缺少的部分, 是高功率微波应用和系统抗高功率微波加固方面的重要课题. 现有许多学者大多围绕着孔缝耦合特性开展研究工作, 对微波与孔缝耦合的物理过程已经有了较深入的认识<sup>[2-4]</sup>.

在实际的电子系统中, 也经常存在填充介质的窗口或填充介质的孔缝, 而在公开的文献中还没有发现报导过微波脉冲与带介质窗口或带介质孔缝腔体耦合的研究工作. 本文利用时域有限差分(FDTD)<sup>[5]</sup>方法对微波脉冲与带介质孔缝矩形腔体的耦合过程进行了数值模拟研究. 如果孔缝填有介质, 则预期对微波耦合进入腔体的物理过程有重要影响, 研究了微波脉冲与带介质孔缝矩形腔体耦合的过程中影响介质孔缝耦合共振峰和耦合共振频率点<sup>[3]</sup>的因素, 包括孔缝长度、宽度和相对介电常数等物理量的影响. 通过大量不同孔缝尺寸的模拟研究, 发现孔缝的介质对孔缝耦合共振频率有很大影响, 我们对微波与带介质孔缝耦合发生共振的公式进行了拟合和研究, 最后得出了微波脉冲与带介质孔缝矩形腔体耦合的共振条件.

## 2 物理模型

微波脉冲与带介质孔缝矩形腔体的耦合模型如图1所示. 计算区域采用吸收边界(ABC)<sup>[6]</sup>截断, 其长

$S=85\text{cm}$ , 宽  $R=38\text{cm}$ , 高  $T=38\text{cm}$ ; 带介质孔缝腔体的长  $A=48\text{cm}$ , 宽  $B=24\text{cm}$ , 高  $C=24\text{cm}$ , 腔体壁厚度  $D=1\text{cm}$ ; 假设腔体壁为理想导体壁, 在腔体壁上存在一填充介质的矩形窄孔缝, 孔缝的厚度  $H=1\text{cm}$ , 孔缝长用  $L$  表示, 宽用  $K$  表示, 孔缝的长  $L$ 、宽  $K$  和孔缝介质的相对介电常数  $\epsilon_r$  在模拟过程中根据需要可以变化; 假设微波脉冲采用一矩形波导口向外辐射, 波导口长  $a=12\text{cm}$ 、宽  $b=6\text{cm}$ , 波导口面位于平面  $x=0$  内, 微波脉冲沿  $+x$  方向朝带介质孔缝矩形腔体辐射; 假设矩形波导激励源、矩形腔体和介质孔缝的中心轴线均与坐标轴  $x$  轴重合, 带介质孔缝矩形腔体与激励端口之间沿  $x$  轴方向的水平距离  $I$  满足一定的远场条件又不至于使计算区域过大, 取为  $I=30\text{cm}$ . 在以下的模拟过程中如果没有特殊说明, 各参数均保持不变.

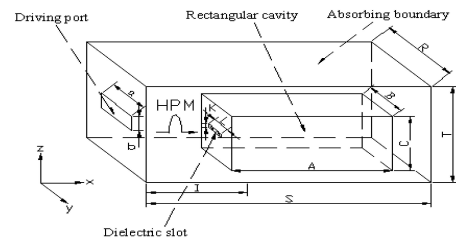


图1 微波脉冲与带介质孔缝矩形腔体的耦合模型

相比计算区域, 介质孔缝尺寸很小, 需要采用亚网格技术<sup>[7]</sup>进行网格划分. 假设入射的微波脉冲是正弦调制的高斯脉冲波:

$$E_{\text{in}}(t) = E_0 \sin(2\pi ft) \exp\left[-\frac{4\pi(t-t_0)^2}{\tau^2}\right], \quad (1)$$

其中  $f=2.0\text{GHz}$  为入射微波脉冲的载频,  $E_0=1.0\times 10^5\text{V/m}$ ,  $t_0=2.0\times 10^{-9}\text{s}$ , 入射波脉冲宽度  $\tau=2.5\times 10^{-9}\text{s}$ ; 激励源采用一矩形波导向外辐射  $TE_{10}$  模式.

### 3 模拟结果及分析

在腔体内壁设置了吸收边界, 消除了腔体效应<sup>[3, 4]</sup>之后, 介质孔缝耦合函数<sup>[3, 4]</sup>的耦合共振峰和耦合共振频率点就仅与介质孔缝的尺寸和孔缝介质的相对介电常数有关.

#### 3.1 孔缝长度对耦合共振峰和共振频率点的影响

保持孔缝的宽度和孔缝介质的相对介电常数不变, 仅改变孔缝长度的情况下对耦合过程进行计算, 孔缝长度从  $L_{\min}=2\text{cm}$  以  $0.5\text{cm}$  为步长逐步增大到  $L_{\max}=13\text{cm}$ , 得到孔缝中心的耦合共振频率点随孔缝长度变化的情况如图2所示. 图2表示了介质孔缝宽  $K=0.1\text{cm}$ , 孔缝介质为相对介电常数  $\varepsilon_r=4$  的麻粒玻璃 GLASS\_CORNING\_707 的条件下, 孔缝中心的耦合共振频率点随孔缝长度变化的情况.

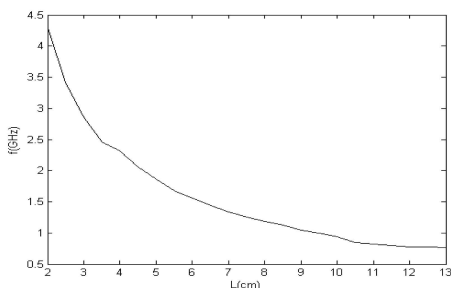


图2 耦合共振频率点随孔缝长度变化 ( $K=0.1\text{cm}$ ,  $\varepsilon_r=4$ )

从图2中可以看出, 随着孔缝长度的增加, 耦合共振频率点减小. 从大量模拟结果可知, 尽管不同长度孔缝耦合具有不同的共振峰, 但各自共振峰的峰值基本上保持不变, 大约在  $30\text{—}33\text{dB}$  之间, 它受孔缝长度的影响很小. 这与文献[3]中无介质孔缝得到的结论一致.

#### 3.2 孔缝宽度对耦合共振峰和共振频率点的影响

保持孔缝的长度和孔缝介质的相对介电常数不变, 仅改变孔缝宽度的情况下对耦合过程进行计算, 孔缝的宽度从  $K_{\min}=0.1\text{cm}$  开始, 以等间隔  $0.05\text{cm}$  逐渐变化到  $K=1\text{cm}$ ; 之后以  $0.1\text{cm}$  为间隔, 变化到  $K_{\max}=2\text{cm}$ . 发现孔缝中心点的耦合共振频率点随孔缝宽度的变化保持不变, 均为  $1.56\text{GHz}$ . 得到孔缝中心和腔体中心点的耦合共振峰值随孔缝宽度变化的情况如图3所示. 图3表示了介质孔缝长  $L=6\text{cm}$ , 孔缝介质仍为相对介电常数  $\varepsilon_r=4$  的麻粒玻璃 GLASS\_CORNING\_707 的条件下, 孔缝中心点和腔体中心点的耦合共振峰值随孔缝宽度变化的情况.

从图3中可以看出, 孔缝中心点的耦合函数共振峰的峰值随着孔缝宽度增大而减小, 场增强效应<sup>[3, 4]</sup>减弱; 而腔体中心点的耦合函数共振峰的峰值却随着孔缝宽度的增大而增大, 这是由于随着孔缝宽度的增大, 孔缝的面积也逐渐变大, 耦合进腔体的能量增多. 这也与文献[3]中无介质孔缝时得到的结论一致.

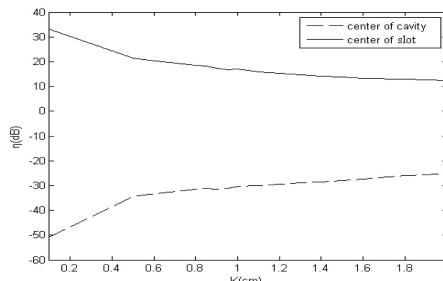


图3 孔缝和腔体中心点的耦合共振峰值随孔缝的宽度变化 ( $L=6\text{cm}$ ,  $\varepsilon_r=4$ )

#### 3.3 介质孔缝相对介电常数对耦合共振峰和耦合共振频率点的影响

最后, 我们考虑一下保持孔缝的长度和宽度不变, 仅介质孔缝的相对介电常数对耦合共振峰和耦合共振频率点的影响, 介质孔缝的相对介电常数从  $\varepsilon_r=1$  开始, 以等间隔  $0.1$  逐渐变化到  $\varepsilon_r=6$ , 之后以等间隔  $0.3$  逐渐变化到  $\varepsilon_r=12$ , 同时还对几种常用介质的情况进行了模拟, 得到孔缝中心点的耦合共振频率点随介质孔缝的相对介电常数的变化情况如图4所示. 图4表示了介质孔缝长  $L=6\text{cm}$ , 宽  $K=0.1\text{cm}$  的条件下, 孔缝中心点的耦合共振频率点随介质孔缝的相对介电常数的变化情况.

从图4中可以看出, 随着介质孔缝的相对介电常数的增加, 耦合共振频率点减小. 从大量模拟结果可知, 尽管不同相对介电常数介质孔缝耦合具有不同的共振峰, 但各自共振峰的峰值基本上保持不变, 大约在  $30\text{—}34\text{dB}$  之间.

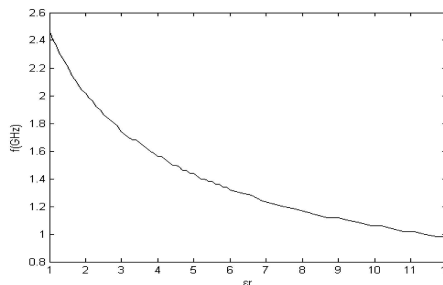


图4 耦合共振频率点随介质孔缝相对介电常数的变化 ( $L=6\text{cm}$ ,  $K=0.1\text{cm}$ )

为了验证以上规律的普遍性, 我们对长  $L=4\text{cm}$ , 宽  $K=0.1\text{cm}$  的孔缝通过改变介质孔缝的相对介电常

数,进行了同样的模拟. 介质孔缝的相对介电常数从  $\epsilon_r=1.1$  开始, 以等间隔0.3逐渐变化到  $\epsilon_r=6$ , 得到孔缝中心点的耦合共振频率点随介质孔缝的相对介电常数的变化情况如图5所示. 图5表示了介质孔缝长  $L=4\text{cm}$ , 宽  $K=0.1\text{cm}$  的条件下, 孔缝中心点的耦合共振频率点随介质孔缝的相对介电常数的变化情况.

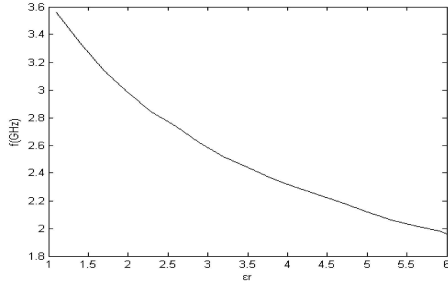


图5 耦合共振频率点随介质孔缝相对介电常数的变化 ( $L=4\text{cm}$ ,  $K=0.1\text{cm}$ )

目前已有关于孔缝耦合共振效应和共振条件的研究, 王建国等<sup>[4]</sup>通过数值方法研究不同形状孔缝的耦合过程后得出任意形状孔缝耦合发生共振的频率计算公式为

$$f = \frac{c}{2L}, \quad (2)$$

其中  $L$  表示垂直于入射电场偏振方向的孔缝最大的线长度,  $c$  表示真空中的光速.

由于介质孔缝存在相对介电常数, 对孔缝耦合发生共振的频率计算公式有明显影响, 通过大量的数值模拟研究, 可以用拟合的办法得到带介质孔缝的耦合共振频率公式为

$$f = \frac{5}{2+3\sqrt{\epsilon_r}} \frac{c}{2L}, \quad (3)$$

其中  $L$  表示垂直于入射电场偏振方向的孔缝最大的线长度,  $c$  表示真空中的光速,  $\epsilon_r$  表示介质孔缝的相对介电常数. 图6表示了介质孔缝宽  $K$  为  $0.1\text{cm}$ , 长  $L$  分别  $6\text{cm}$  和  $4\text{cm}$  两种情况下, 孔缝耦合共振频率点随相对介电常数变化的模拟结果与共振频率修正公式计算结果的比较情况; 而图7则表示了在介质孔缝宽为  $K=0.1\text{cm}$ , 介质相对介电常数  $\epsilon_r=4$  的情况下, 随着介质孔缝长度的变化, 耦合共振频率点的模拟结果与共振频率修正公式计算结果的比较情况. 由图6和图7可以看出, 耦合共振频率点的随孔缝长度和孔缝介质相对介电常数变化的模拟结果与计算公式符合的比较.

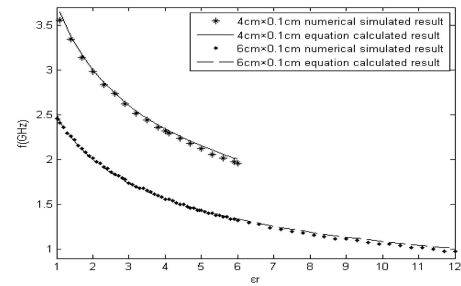


图6  $6\text{cm} \times 0.1\text{cm}$  介质孔缝与  $4\text{cm} \times 0.1\text{cm}$  介质孔缝耦合共振频率点随相对介电常数变化的模拟结果与公式计算结果的比较

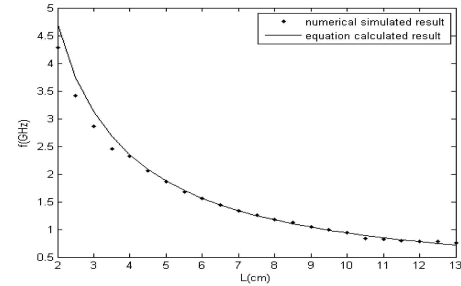


图7 耦合共振频率点随介质孔缝长度变化的模拟结果与公式计算结果的比较 ( $K=0.1\text{cm}$ ,  $\epsilon_r=4$ )

## 4 结论

本文利用时域有限差分 (FDTD) 方法对微波脉冲与带介质孔缝矩形腔体的耦合过程进行了数值模拟研究.

研究了微波脉冲与带介质孔缝矩形腔体耦合的过程中影响介质孔缝耦合共振峰和耦合共振频率点的因素, 结果表明, 在一定参量范围内, 随着孔缝长度的增加, 孔缝中心点的耦合共振频率点减小, 但共振峰的峰值基本上保持不变; 孔缝中心点的耦合共振频率点随孔缝宽度的变化保持不变, 孔缝中心点的耦合函数共振峰的峰值随着孔缝宽度增大而减小, 而腔体中心点的耦合函数共振峰的峰值却随着孔缝宽度的增大而增大; 随着介质孔缝的相对介电常数的增加, 孔缝中心点的耦合共振频率点减小, 但共振峰的峰值基本上保持不变.

通过大量不同孔缝尺寸的模拟研究, 对微波与带介质孔缝耦合发生共振的公式进行了拟合, 最后得出了微波脉冲与带介质孔缝矩形腔体耦合的共振条件.

## 参考文献(References)

- 1 James Benford, John Swgle. High Power Microwaves. Norwood: Artech House, Inc., 1992
- 2 ZHU Z P. The Study on Microwave Coupling into Slot on a Cavity with a Block Inside. Changsha: National University of Defense Technology, 2005 (in Chinese)  
(朱占平. 微波与内置物质块带缝腔体耦合的研究. 长沙: 国防科学技术大学, 2005)
- 3 LIU Q. Study on the Coupling of Microwave Pulses into Monolayer and Nested Cavities Through Slots. Changsha: National University of Defense Technology, 2006 (in Chinese)  
(刘强. 微波脉冲与带缝单层腔体、嵌套腔体耦合的研究. 长沙: 国防科学技术大学, 2006)
- 4 WANG J G, LIU G Z, ZHOU J S. Investigations Function for Linear Coupling of Microwave into Slots. High Power Laser and Particle Beams, 2003, **15**(11): 1093—1099 (in Chinese)  
(王建国, 刘国治, 周金山. 微波孔缝线性耦合函数研究. 强激光与粒子束, 2003, **15**(11): 1093—1099)
- 5 Yee K S. Numerical Solution of Initial Boundary Value Problems Involving Maxwell's Equations in Isotropic Media. IEEE, 1966, **14**: 320
- 6 Mur G. Absorbing Boundary Conditions for the Finite-Difference Approximation of the Time-Domain Electromagnetic Field Equations. IEEE Trans, Electromagn. Compat., 1981, **23**(4): 377—382
- 7 Kasher J C, Yee K S. A Numerical Example of a Two Dimensional Scattering Problem Using a Subgrid. Applied Computational Electromagnetic Society Journal and Newsletter, 1987, **2**(2): 75—102

## Numerical Simulation of Microwave Pulse Coupling into the Dielectric Slot on a Rectangular Cavity

LI Rui<sup>1)</sup> QIAN Bao-Liang ZHU Zhan-Ping ZHAO Lin LIU Qiang

(College of Optoelectronic Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

**Abstract** In this paper, the finite-difference time-domain (FDTD) algorithm is employed to simulate microwave pulse coupling into the dielectric slot on a rectangular cavity. We investigate the factors that influence the coupling resonant peak and resonant frequency of the dielectric slot, including the slot length, slot width, and relative dielectric constant. Numerical results show that the equation of resonant frequency for microwave coupling into the dielectric slot is modified. Finally, the resonant condition of rectangular cavity with a dielectric slot is provided.

**Key words** microwave pulse, rectangular cavity with dielectric slot, numerical simulation