

doi: 10.3969/j.issn.1006-1576.2011.07.014

# Ka 波段同轴布喇格反射器参数的设计

王玲玲, 李社蕾, 丁学用

(海南大学三亚学院理工分院, 海南 三亚 572022)

**摘要:** 针对同轴布喇格结构的特点, 设计一种 Ka 波段正弦开槽同轴布喇格反射器。介绍多模耦合理论与 CST 商业软件, 在此基础上对其进行参数设计和数值模拟研究。结果表明: 多模耦合理论与 CST 商业软件两者吻合较好; 根据实际需要, 可通过改变初始相位、开槽深度、加坡度方式和坡度角以及加窗技术等来提高 Ka 波段同轴布喇格反射器频率响应的性能; 有利于改善同轴布喇格结构作为反射器或者滤波器的性能。

**关键词:** 同轴布喇格反射器; Ka 波段; 反射率

**中图分类号:** TP302 **文献标志码:** A

## Design of Parameters for a Coaxial Bragg Reflectors Operating at Ka-Band

Wang Lingling, Li Shelei, Ding Xueyong

(Dept. of Science & Technology, Sanya College, Hainan University, Sanya 572022, China)

**Abstract:** Aiming at the characteristic of coaxial Bragg structure, design a coaxial Bragg reflector corrugated with sinusoidal ripples operating at Ka-band. Introduce the coupled mode theory and the CST software, based on of this, research its parameter design and numerical simulation. Results show that good agreement between the multi-mode theory and the CST software; In fact, by changing the initial phase, sinusoidal ripple amplitude, shape of gradient and gradient angle and windowing-function technique can improve the capability of the frequency response. These characteristics of a coaxial Bragg structure are favorable to improvement of the performance as a reflector or a filter in its applications.

**Keywords:** coaxial Bragg reflector; Ka-Band; reflectivity

### 0 引言

布喇格反射器被广泛应用于自由电子激光、回旋自谐振脉塞和半导体激光器中<sup>[1-10]</sup>。布喇格结构周期性边界条件的选频特性所形成的禁带或者通带, 可用来制作反射器、滤波器、模式转换器等器件。传统的布喇格反射器由圆柱波导内壁开有周期性的正弦或矩形波纹槽组成。近年来, 由于同轴布喇格结构相比传统的圆柱布喇格结构可以提供更好的模式选择性, 而且具有大尺寸特点, 有利于机械加工和提高功率容量, 更适合高功率微波系统, 所以, 越来越受到人们的重视<sup>[5-10]</sup>。

由于毫米波频段具有更大的可用带宽、特殊的传播特性、更紧凑的元件、窄波束和高增益等优点, 越来越受到通信业的重视<sup>[4]</sup>。笔者用同轴布喇格反射器多模耦合理论, 对频率在 26.5~40.0 GHz 范围内的 Ka 波段同轴布喇格反射器外导体内壁和内导体外壁都有周期性波纹的情况, 进行数值分析和参数设计, 并利用 CST 微波工作室(MWS)的瞬时求解器(TD-S)<sup>[11]</sup>对 35 GHz 的这种同轴结构模拟仿真, 进行了比较研究。

### 1 理论模型

普通正弦开槽同轴布喇格反射器的结构如图 1, 在纵向上呈现周期性变化, 其结构外导体壁半径  $R_{out}$  和内导体壁半径  $R_{in}$  可分别表示成关于纵向位置  $z$  变化的函数<sup>[7]</sup>:

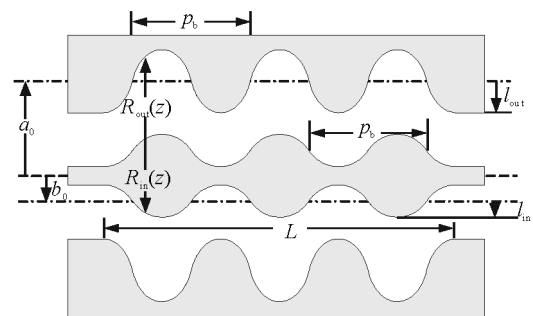


图 1 正弦开槽同轴布喇格反射器纵向剖面图

$$R_{out}(z) = a_0 - l_{out} \cos(k_{out}z + \phi_{out}) \quad (1)$$

$$R_{in}(z) = b_0 - l_{in} \cos(k_{in}z + \phi_{in}) \quad (2)$$

式中:  $k_{out} = 2\pi/p_{out}$ ,  $k_{in} = 2\pi/p_{in}$ ,  $a_0$ ,  $l_{out}$ ,  $\phi_{out}$ ,  $p_{out}$  分别代表外导体壁的平均半径、开槽波纹深度、初始相位和波纹周期;  $b_0$ ,  $l_{in}$ ,  $\phi_{in}$ ,  $p_{in}$  分别代表内

收稿日期: 2011-04-11; 修回日期: 2011-05-03

基金项目: 国家自然科学基金资助课题(60871023)

作者简介: 王玲玲(1985—), 女, 河南人, 硕士, 助教, 从事自动控制、信号处理等研究。

导体壁的平均半径、开槽波纹深度、初始相位和波纹周期。

假设同轴布喇格发射器中存在  $N$  种模式，根据同轴布喇格发射器多模耦合理论<sup>[8]</sup>，其中第  $i$  模式 ( $i=1, 2, \dots, N$ ) 的沿  $z$  正方向传播的波 (简称正传波) 和沿  $z$  负方向传播的波 (简称反传波)，由下述耦合方程决定：

$$\frac{df_i^+}{dz} = -(\alpha_i + j\Delta_i)f_i^+ + \sum_{k=1}^N jG_{ik}f_k^- \quad (3)$$

$$\frac{df_i^-}{dz} = (\alpha_i + j\Delta_i)f_i^- - \sum_{k=1}^N jG_{ik}^*f_k^+ \quad (4)$$

式中： $f_i^+ = A_i^+ e^{(jk_b z/2)}$ ， $f_i^- = A_i^- e^{(-jk_b z/2)}$ ， $A_i^\pm$  为正传波及反传波的幅度， $\Delta_i = \beta_i - k_b/2$ ，为布喇格失配量， $\beta_i$  是纵向波数， $\alpha_i$  是衰减常数； $G_{ik}$  和它的共轭  $G_{ik}^*$  代表第  $i$  模式和第  $k$  模式之间的耦合系数，对于各类 TEM、TE、TM 模式的具体表达式，见参考文献<sup>[8]</sup>。

## 2 参数设计和模拟对比研究

利用同轴布喇格反射器多模耦合理论<sup>[8]</sup>，设计了一个中心频率为 35 GHz，工作模式为  $TE_{11}$  的 Ka

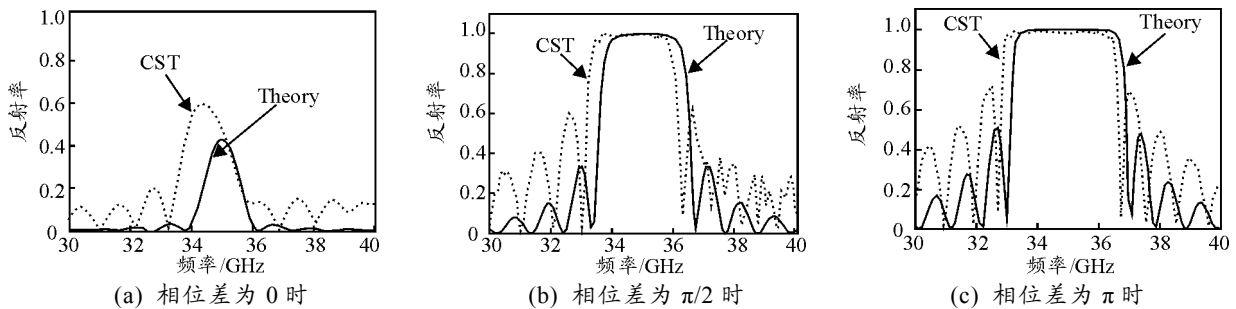


图 2 多模耦合理论与 CST 商业软件结果的比较

在同轴布喇格结构中，不仅波纹槽的相对相位差对带宽和反射性能有很大的影响，而且波纹槽的深度也对带宽有不可忽略的影响。一般来说，当波纹槽深度逐渐加深时，其带宽就会有明显的增加。

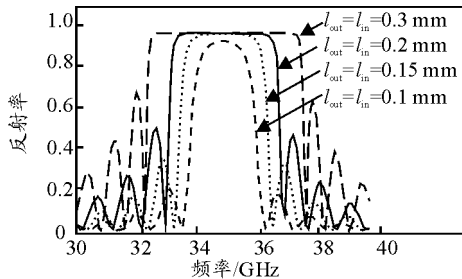


图 3 相位差  $\varphi_{in} - \varphi_{out} = \pi$  时，不同槽深的比较

图 3 给出了在内外导体壁波纹相位差为  $\pi$  时不同开槽深度的比较图，从图 3 可以看出，随着同轴

波段正弦开槽同轴布喇格反射器，具体的结构参数如表 1。

表 1 35 GHz 同轴布拉格反射器具体参数

名称	数值
中心频率/GHz	35
工作模式	$TE_{11}$
外壁平均半径/mm	14.0
内导体平均径/mm	9.8
波纹周期/mm	4.31
反射器长度/mm	129.3

图 2 给出了理论结果和 CST 软件模拟结果的对比。在图 2 中结构的外壁波纹初始相位始终保持 0 不变，内导体壁上的波纹初始相位分别为 0， $\pi/2$  和  $\pi$ ，也就是内外导体初始相位差  $\varphi_{out} - \varphi_{in}$  分别为 0， $\pi/2$  和  $\pi$ 。从图 2 可以看出，理论预测和 CST 软件模拟得到的曲线基本吻合，当相位差为  $\pi$  时吻合的更好，并且随着内外壁波纹的初始相位差从 0 变到  $\pi$ ，反射器的工作模式  $TE_{11}$  的反射率逐渐变大，接近于 1，带宽也变得越来越宽。故在设计 Ka 波段同轴布喇格反射器的时候，一般设计内外壁波纹的初始相位差为  $\pi$ 。从图 2 还可以得到理论模拟和 CST 软件模拟，相互论证了彼此的可行性。

布喇格反射器内外壁波纹槽深度的增加，其带宽也有明显的增加，而且当内外壁波纹槽深度大于 0.15 mm 时，可获得反射率接近 1 的最佳效果。所以在设计 Ka 波段同轴布喇格反射器的时候，一般设计内外壁波纹开槽深度大于 0.15 mm。

根据加不同坡度方式和加不同的坡度角对同轴布喇格反射器频率响应的影响<sup>[12-14]</sup>，笔者对 Ka 波段同轴布喇格反射器也引入坡度，图 4 给出了在正圆锥形和倒圆锥形坡度下，当所加不同坡度角时其反射率随频率的变化关系。从图 4 可以得到：具有正圆锥形坡度的同轴布喇格结构的带宽随着所加坡度角的增大而变窄，具有倒圆锥形坡度的同轴布喇格结构的带宽随着所加坡度角的增大而变宽。在设计 Ka 波段同轴布喇格反射器时，可以根据需要选

择不同的加坡度方式和坡度角。

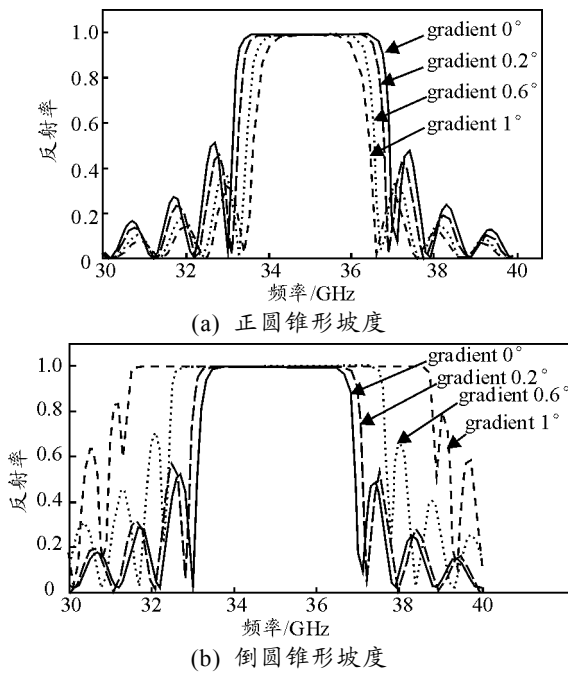


图 4 2 种加坡度同轴布喇格结构中 TE<sub>11</sub> 模的反射率随频率的变化关系

从上述结果可知: 所设计的 Ka 波段同轴布喇格反射器的反射率对频率的响应曲线, 存在比较严重的残余旁瓣现象。鉴于滤波器抑制边带的窗函数技术已经成功地用来抑制同轴布喇格反射器的残余旁瓣<sup>[9-12]</sup>, 笔者也采用该技术来抑制 Ka 波段同轴布喇格结构的残余旁瓣。

图 5 给出了 Ka 波段同轴布喇格反射器在内外壁波纹的初始相位差为  $\pi$  时, 不加窗和加载了汉明 (Hamming) 窗的对比, 此处所用参数与图 2(c) 相同。从图 5 可看出, 加载汉明窗后, 频率响应曲线的残余旁瓣得到了有效抑制。图 6 给出了分别加载汉宁 (Hamming) 窗、汉明 (Hamming) 窗以及布拉克曼 (Blackman) 窗的效果对比。结果显示这 3 种窗的效果差别不大, 但是加载汉明窗对同轴布喇格结构反射率的损耗最小, 所以在设计 Ka 波段同轴布喇格反射器时一般加载汉明 (Hamming) 窗。

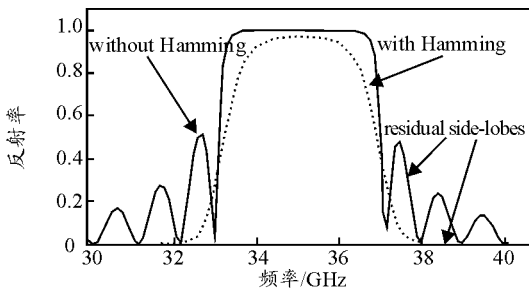


图 5 加载汉明窗对反射率频率响应曲线残余旁瓣的抑制作用

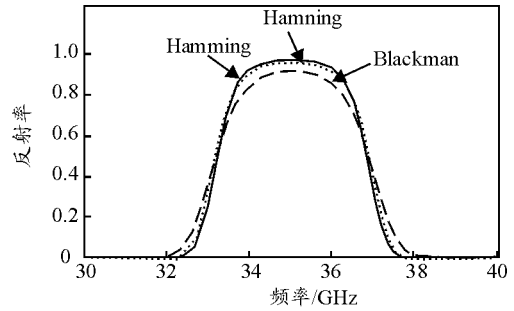


图 6 分别加载 3 种窗函数的效果比较

图 7、图 8 给出了在图 3、图 4 的基础上, 加载汉明窗后改善了的反射率随频率的变化曲线, 通过比较可以得出: 加载窗函数技术可以有效抑制频率响应曲线的残余旁瓣现象, 所以在设计 Ka 波段同轴布喇格反射器时考虑引进加载窗函数技术。

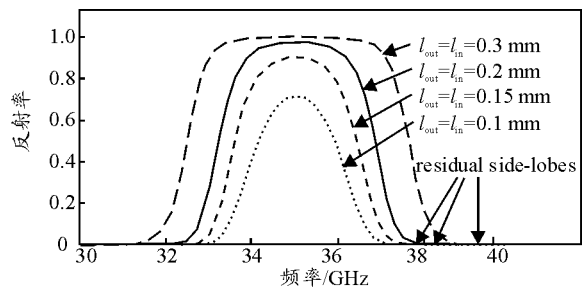


图 7 加载汉明窗后相位差  $\varphi_{in} - \varphi_{out} = \pi$  时, 不同槽深的比较

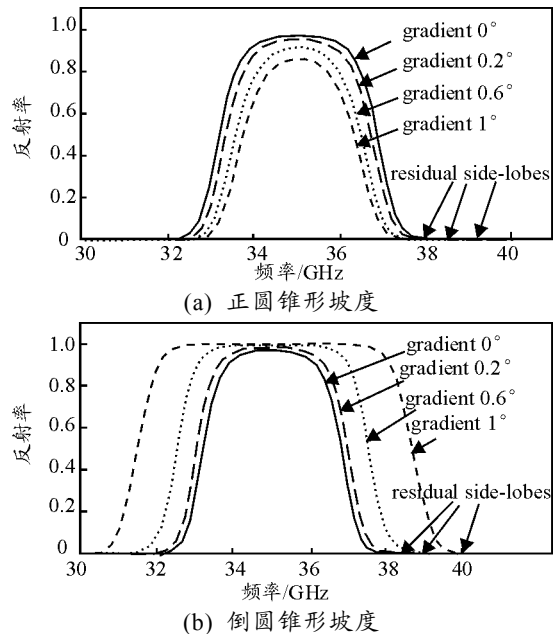


图 8 加载汉明窗后 2 种加坡度同轴布喇格结构中 TE<sub>11</sub> 模的反射率随频率的变化关系

### 3 结论

CST 模拟结果和理论结果比较表明: 理论计算值与 CST 软件模拟结果基本一致;