

具有坡度的同轴布喇格结构的频率响应特性*

丁学用, 张世昌, 谢永超

(西南交通大学 光电子学研究所, 成都 610031)

摘要: 在 CST 软件平台上,对具有坡度的同轴布喇格结构的频率响应特性进行了数值模拟。结果表明:具有正圆锥形坡度的同轴布喇格结构,其带宽随着所加坡度角的增大而变窄;而具有倒圆锥形坡度的同轴布喇格结构,其带宽随着所加坡度角的增大而变宽。采用窗函数技术可以有效地抑制具有坡度的同轴布喇格结构的频率响应曲线的残余旁瓣。汉明窗函数、汉宁窗函数及布拉克曼窗函数均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: 高功率微波; 同轴布喇格结构; 坡度正弦波纹壁; 残余旁瓣; 窗函数

中图分类号: TN129 **文献标志码:** A

布喇格结构由于其其在集成电路、光波以及微波器件中的广泛应用,受到科技工程界的关注^[1-13]。布喇格结构的周期性边界条件的选频特性所形成的禁带或者通带,可以用来制作反射器、滤波器、模式转换器等器件。例如作为反射器,它是布喇格谐振腔的重要组成部分,被广泛应用在回旋自谐振脉塞(CARM)和工作在毫米、亚毫米波范围内的自由电子激光(FEL)^[2-4]。通常,布喇格结构是由一段在圆柱波导的金属壁上开周期性正弦或矩形波纹槽构成。近年来,由于同轴布喇格结构比传统的圆柱布喇格结构具有优越性,所以,越来越受到人们的重视^[5-13]。本文将研究具有坡度的同轴布喇格结构。

1 理论模型

普通同轴布喇格结构^[10]中,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 的函数

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

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

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; $b_0, l_{in}, \phi_{in}, p_{in}$ 分别代表内导体壁的平均半径、开槽波纹深度、初始相位和波纹周期。

有两种形式对同轴布喇格结构的外导体壁和内导体壁添加坡度:第一种形式是外壁加正坡度角、内壁加负坡度角,其剖面结构如图 1(a)所示,称为正圆锥形坡度;第二种形式是外壁加负坡度角、内壁加正坡度角,其剖面结构如图 1(b)所示,称为倒圆锥形坡度。内外壁倾斜的坡度角分别用 θ_{out} 和 θ_{in} 表示。

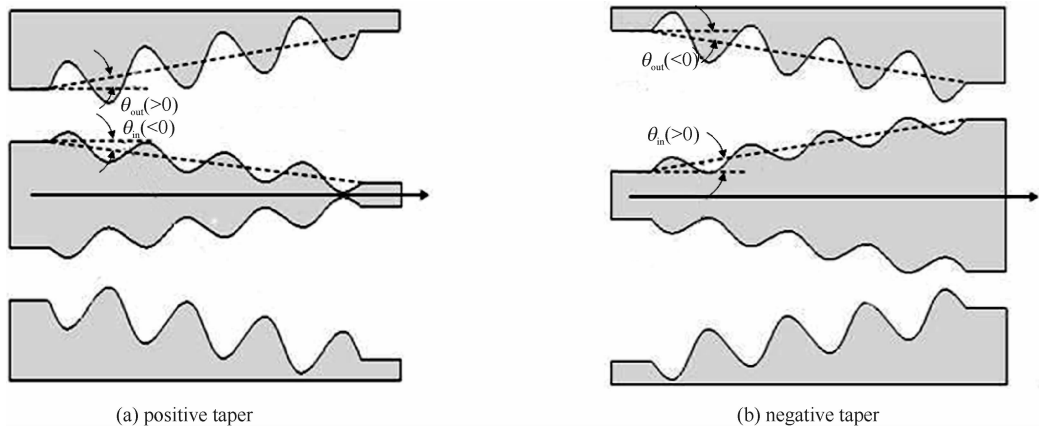


Fig. 1 Profile of two coaxial Bragg structures

图 1 具有正圆锥形坡度和倒圆锥形坡度的同轴布喇格结构剖面图

* 收稿日期:2008-07-21; 修订日期:2008-09-18

基金项目:国家自然科学基金项目(60870123)

作者简介:丁学用(1979—),男,硕士研究生,主要从事高功率微波源的研究;ding2008ding@163.com。

本文利用 CST 软件平台进行非线性数值模拟,采用该软件模拟无坡度同轴布喇格结构的可靠性已得到实验验证^[11]。利用 CST 软件平台时,经过程序调试后,将软件的 Lower mesh limit (结构线度上最低网格点数)设为 10, Mesh line ratio limit 设为 12,总网格数达到 3 346 560;为了减少总网格数,缩短仿真时间,在结构的 XY 平面设置了对称面(即磁对称面),并假设结构材料为理想导体。

2 波纹壁坡度对反射系数的影响

为了便于与无坡度情况比较,本文采用下面无坡度的一组典型参数^[14],对具有坡度的同轴布喇格结构的反射系数频率响应特性进行非线性模拟。外壁平均半径 $a_0 = 8.0$ mm,内导体平均半径 $b_0 = 5.6$ mm,内外壁开槽深度 $l_{out} = l_{in} = 0.3$ mm,开槽周期 $p_{out} = p_{in} = 11.32$ mm,初始相位 $\phi_{out} = 0$, $\phi_{in} = \pi$,布喇格结构长度 $L = 226.4$ mm,工作模式为 TE_{11} ,中心频率为 15 GHz,频率范围为 10~20 GHz。

图 2(a)是在正圆锥形坡度情况下所加不同坡度角时,反射系数随频率的变化;图 2(b)是在倒圆锥形坡度情况下所加不同坡度角时,反射系数随频率的变化。可明显看出:相对于一般的无坡度同轴布喇格结构(即内外导体波纹槽的轴线都平行于布喇格结构的对称轴,坡度角为零),当对布喇格结构加正圆锥形坡度时,其带宽随着所加坡度角的增大而变窄;当加倒圆锥形坡度时,其带宽随着所加坡度角的增大而变宽。因此,如果需要获得较窄的带宽(例如用于布喇格反射器),可采取正圆锥形坡度;如果需要获得较大的带宽(例如用于布喇格滤波器),则可采取倒圆锥形坡度。

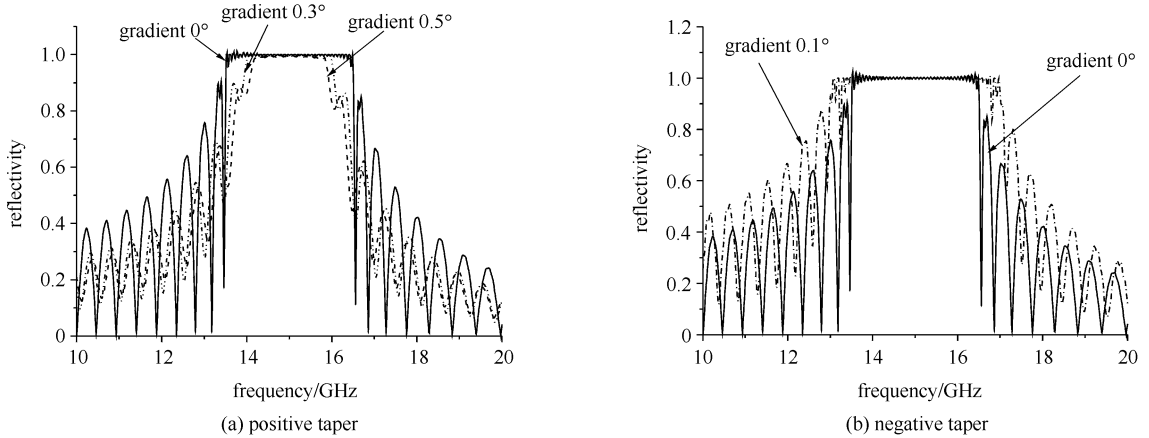


Fig. 2 Reflectivity versus the frequency for the TE_{11} mode in two coaxial Bragg structures

图 2 两种同轴布喇格结构中 TE_{11} 模的反射系数随频率的变化关系

3 残余旁瓣抑制

从上面的结果可以看到:具有坡度的同轴布喇格结构的反射系数对频率的响应曲线,与圆柱布喇格结构和一般的无坡度同轴布喇格结构类似,都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圆柱布喇格反射器的^[15]和无坡度同轴布喇格反射器的残余旁瓣^[12-13],我们也采用该技术来抑制具有坡度的同轴布喇格结构的残余旁瓣。设

$$R_{out}(z) = a_0 - l_{out} W(z) \cos(k_{out} z + \phi_{out}) \quad (3)$$

$$R_{in}(z) = b_0 - l_{in} W(z) \cos(k_{in} z + \phi_{in}) \quad (4)$$

式中: $W(z)$ 为窗函数,当 $W(z) = 1$,对应没有加载窗函数的情况,式(3)和(4)退回到式(1)和(2)的形式。本文讨论分别加载常用的 3 种窗函数^[16],即

汉宁(Hanning)窗函数

$$W(z) = 0.5 - 0.5 \cos(2\pi z/L) \quad (5)$$

汉明(Hamming)窗函数

$$W(z) = 0.54 - 0.46 \cos(2\pi z/L) \quad (6)$$

布拉克曼(Blackman)窗函数

$$W(z) = 0.42 - 0.5 \cos(2\pi z/L) + 0.08 \cos(4\pi z/L) \quad (7)$$

本节模拟中使用的参数与第 2 节中相同。

图 3 给出了坡度角为 0.3° 正圆锥坡度结构中, 不加窗和加载了汉明窗的对比, 此处所用参数与图 2(a) 相同。从图 3 可看出, 加载汉明窗后频率响应曲线的残余旁瓣得到有效抑制。图 4 给出了分别加载汉宁窗、汉明窗以及布拉克曼窗的效果对比, 结果显示这三种窗的效果, 彼此差别不大。

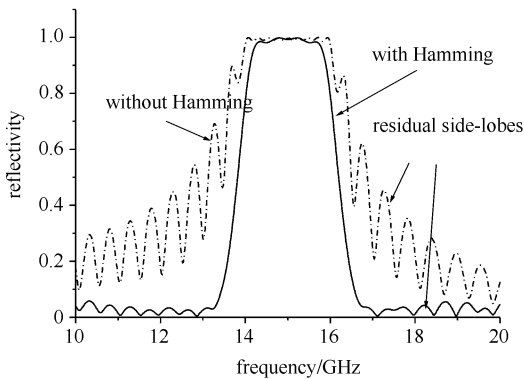


Fig. 3 Suppression of residual side-lobes of frequency response by employing Hamming window function, where the positive taper angle is 0.3°

图 3 坡度角为 0.3° 时正圆锥形结构加载汉明窗函数对反射系数的频率响应曲线残余旁瓣的抑制作用

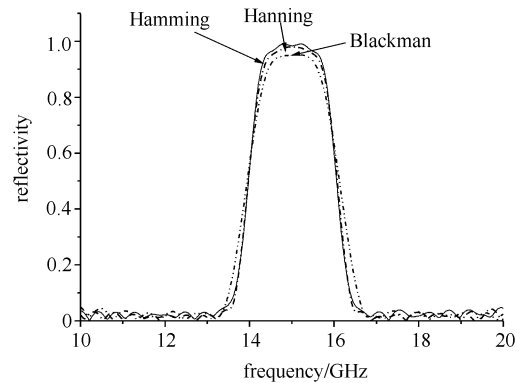


Fig. 4 Comparison of residual side-lobes suppression by respectively employing Hanning, Hamming, and Blackman Hanning window functions

图 4 分别加载汉宁窗函数、汉明窗函数和布拉克曼窗函数的效果比较

图 5 是图 2 所示的正圆锥坡度和倒圆锥坡度结构在不同坡度角情况下, 加载汉明窗后的反射系数频率响应曲线。结果进一步表明: 无论是正圆锥还是倒圆锥坡度, 窗函数技术都能有效抑制频率响应曲线的残余旁瓣现象。

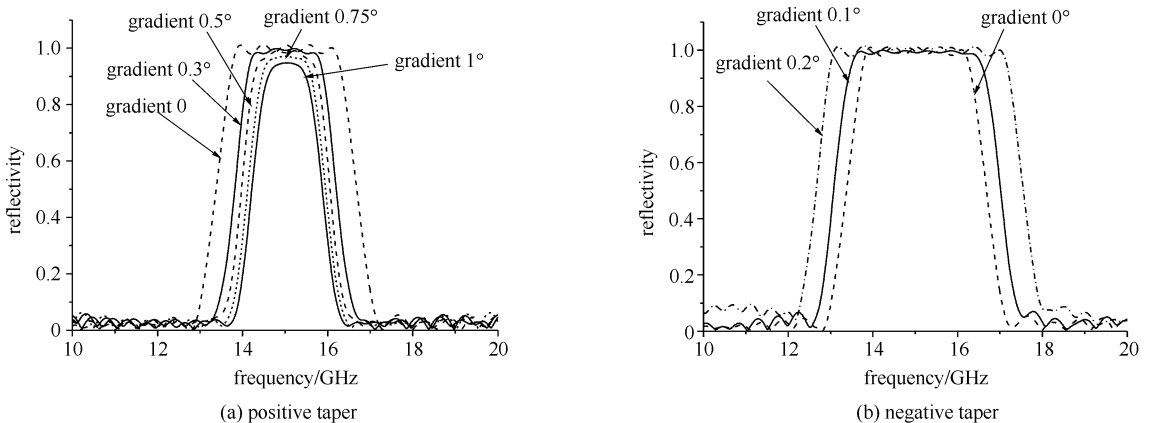


Fig. 5 Frequency response of the reflectivity improved by employing Hamming window function

图 5 加载汉明窗函数后改善了的反射系数频率响应曲线

4 结论

从本文在 CST 软件平台所进行的具有坡度的同轴布喇格结构非线性数值模拟结果, 可以得出如下结论: 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; 具有坡度的同轴布喇格结构的频率响应残余旁瓣现象, 可以通过采用窗函数技术得到有效抑制, 但常用的汉宁窗、汉明窗以及布拉克曼窗的效果, 彼此差别不大。

参考文献:

- [1] Yariv A, Nakamura M. Periodic structures for integrated optics[J]. *IEEE J Quantum Electron*, 1997, **13**:233.
- [2] Kogelnik H, Shank C V. Coupled-wave theory of distributed feedback laser[J]. *J Appl Phys*, 1972, **43**: 2327-2335.
- [3] Chong C K. Bragg reflectors[J]. *IEEE Trans on Plasma Sci*, 1992, **20**:393-402.
- [4] McCowan R B, Fliflet A W, Gold S H, et al. Design of a waveguide resonator with rippled wall reflectors for a 100 GHz CARM oscillator experiment[J]. *Int J Electron*, 1988, **65**:463-475.
- [5] Barroso J J, Leite Neto J P. Design of coaxial Bragg reflectors[J]. *IEEE Trans on Plasma Sci*, 2006, **34**:666-672.

- [6] Konoplev I V, McGrane P, Cross A W, et al. Wave interference and band control in multiconductor one-dimensional Bragg structures[J]. *J Appl Phys*, 2005, **97**:073101.
- [7] Cross A W, Konoplev I V, Phelps A D R, et al. Studies of surface two-dimensional photonic band-gap structures[J]. *J Appl Phys*, 2003, **93**:2208-2218.
- [8] Konoplev I V, McGrane P, Phelps A D R, et al. Observation of photonic band-gap control in one-dimensional Bragg structures[J]. *Appl Phys Lett*, 2005, **87**:121104.
- [9] Lai Y X, Zhang S C, Zhang H B. A coaxial Bragg reflector for cyclotron autoresonance maser oscillators[J]. *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, 2007, **17**:328 - 330.
- [10] Lai Y X, Zhang S C. Multiwave interaction formulation of a coaxial Bragg structure and its experimental verification[J]. *Phys Plasmas*, 2007, **14**:113301.
- [11] Zhang S C, Chen X H, Lai Y X. Effect of eccentricity on transmission in a coaxial Bragg structure[J]. *Int J Infrared Millimeter Waves*, 2007, **28**(12):1043-1050.
- [12] Lai Y X, Zhang S C. Separation of band-gap overlap in a coaxial Bragg structure operating in higher-order mode at Terahertz frequency[J]. *Phys Plasmas*, 2008, **15**: 033301.
- [13] Chen X H, Zhang S C, Lai Y X. Suppression of residual side-lobes in a coaxial Bragg reflector[J]. *Int J Infrared Millimeter Waves*, 2008, **29**(6):552-557.
- [14] Chen X H, Lai Y X, Zhang S C. Comparative study of a 15 GHz coaxial Bragg reflector[C]//The 2008 Global Symposium on Millimeter Waves Proc. 2008:369-371.
- [15] Pretterebner J, Thumm M. Design of improved Bragg reflectors for resonators in over-moded high-power microwave oscillators[C]//Proc of SPIE. 1990, **1514**: 298-300.
- [16] Williams C S. Designing digital filters[M]. New Jersey: Prentice-Hill Inc, 1986.

Characteristics of frequency response in a coaxial Bragg structure with tapered ripples

DING Xue-yong, ZHANG Shi-chang, XIE Yong-chao

(*Institute of Photoelectronics, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China*)

Abstract: Based on the CST software, numerical simulations are carried out for the frequency response in a coaxial Bragg structure with tapered ripples. The bandwidth of the coaxial Bragg structure with positive taper can be narrowed by increasing the tapering angle, whereas the bandwidth of the coaxial Bragg structure with negative taper can be expanded by increasing the tapering angle. The residual side-lobes of the frequency response can be effectively suppressed by employing the window function technique, using Hanning, Hamming and Blackman window functions. These characteristics of a tapered coaxial Bragg structure are favorable to improvement of its performance as a reflector or a filter.

Key words: high power microwave; coaxial Bragg-structure; tapered sinusoidal ripples; residual side-lobes; window function