

60 GHz 缺陷态同轴布喇格波导窄带带通滤波器设计及性能分析

赖颖昕* 谭永明

(东莞理工学院电子工程学院 东莞 523808)

摘要: 基于缺陷态同轴布喇格波导的通带特性, 该文采用多波耦合理论及 Ansoft HFSS 对一种工作频率为 60 GHz 的新型波导滤波器原型进行了概念性设计, 并进行性能分析。结果表明: 大尺寸的缺陷态布喇格滤波器在高频工作时, 主模与竞争模式之间的寄生耦合会破坏通带结构; 当波纹幅度引入汉明窗分布, 可以有效地消除这一负面影响。该滤波器具有通带窄(相对带宽小于 0.1%)、中心插入损耗小(低于 1.5 dB)、结构横向大尺寸大(半径 7~10 mm)的优点, 能够适用于毫米波段高功率应用场合中对窄频带信号选择。

关键词: 带通滤波器; 窄带; 同轴布喇格结构; 波纹波导

中图分类号: TN814

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2012)08-2023-05

DOI: 10.3724/SP.J.1146.2012.00319

Design and Analysis of a 60 GHz Narrowband Band-pass Filter Based on Defected Coaxial Bragg Waveguide

Lai Ying-xin Tan Yong-ming

(School of Electronic Engineering, Dongguan University of Technology, Dongguan 523808, China)

Abstract: Based on the pass-band characters of defected coaxial Bragg waveguides, a novel topology of narrow-band, band-pass millimeter-wave filter at 60 GHz is designed and analyzed by making use of the multi-wave interaction formulation as well as software Ansoft HFSS. It is found that, if a defected Bragg filter with a large transverse dimensional size operates at high frequency, the spurious coupling between the operating mode and the competing modes will spoil the pass-band structure; but fortunately, this negative effect can be suppressed by applying Hamming-window-function distribution to the ripples amplitude of the filter. Results show the filter has a narrow fractional bandwidth less than 0.1% with a low insertion loss below 1.5 dB and large dimensional size, which favors to select the specified narrow-band signal in high power applications.

Key words: Band-pass filter; Narrow band; Coaxial Bragg structure; Corrugated waveguide

1 引言

在现代微波系统中, 带通滤波器是一类能够让某一段频率范围的信号通过, 而对通频带两边的信号进行抑制的选频器件, 其性能的优劣在很大程度上决定了微波信号质量的好坏, 从而直接影响到系统的性能。实际应用中的微波带通滤波器结构类型繁多。其中, 波导带通滤波器因具有插入损耗低、功率容量大、 Q 值高等优点, 在微波通信、卫星通信、遥感遥测、雷达、导航、电子对抗等领域均有广泛的应用。一般而言, 波导带通滤波器大多采用在矩形或者圆柱金属波导中设置一系列的电抗性膜片或者耦合孔, 通过相邻腔体的耦合来实现滤波作

用^[1,2]。

随着通信技术的迅猛发展, 传统的频谱资源日渐枯竭, 毫米波乃至太赫兹频段资源的开发受到了国际上的普遍重视。在毫米波通信中, 随着大容量、高密度频分复用技术的应用以及超窄带通信技术的发展, 人们希望能够研制出通带非常窄的毫米波带通滤波器, 用以排除相邻频段间的串扰; 此外, 在毫米波精密测量以及高精度传感器领域, 也希望能够有带宽更窄的窄带滤波技术, 以获得具有极窄频谱的信号。然而, 由于受到介质损耗的影响, 微带结构的滤波器工作于毫米波段时, 其相对带宽很难低于 5%^[1]。例如, 文献[3]所报道的一个工作于 28.7 GHz 的窄带滤波器, 尽管采用了低温共烧陶瓷(LTCC)技术, 其相对带宽仅为 4.5%。而如果要求滤波器相对带宽小于 1%, 则即使采用传统的波导滤波器结构, 也会遇到一些实质性困难^[4], 例如: 毫米波波长较短, 使得对应的波导结构横向尺寸很小,

2012-03-26 收到, 2012-05-28 改回

国家自然科学基金(60871023), 广东省高校优秀青年创新基金(LYM10126)和东莞市高等院校、科研机构科技计划项目(2011108102011)资助课题

*通信作者: 赖颖昕 yxlai@dgut.edu.cn

这不仅造成器件功率容量的急剧降低,也带来了较大的通带损耗,很多微波系统难以接受,而且所需的耦合机构尺寸更为细小,实现起来比较困难。

近年来,采用周期结构作为滤波器的研究受到了越来越多的关注,成为滤波技术的一个重要发展方向。目前,采用折射率呈周期性变化的介质结构(如光纤布喇格光栅、光子晶体、多层薄膜等),以及基于平面金属波导的表面等离子体布喇格结构来对光波信号滤波,已有较多的研究^[5-9],然而类似结构的金属波导在微波滤波中的应用却鲜有报道^[10,11]。最近,文献[11]采用具有周期性波纹槽内壁的圆柱布喇格波导构建了一种新型的波导滤波器,利用其禁带效应,为工作于Ka波段的高功率电子回旋辐射诊断系统提供多个频段的带阻滤波。研究表明,相比于圆柱布喇格波导,基于同轴金属波导的布喇格结构存在多方面的优势,如易与信号传输系统集成,通过调节内外导体的半径比可以获得更大模式谱间隔,采用具有波纹外壁的内导体可以带来额外的性能优化途径等^[12-14]。为此,本文采用内外导体具有正弦波纹壁的同轴布喇格波导作为滤波结构,在其波纹壁引入相位突变形成的缺陷,来达到极窄通带的滤波效果,并采用耦合波理论及Ansoft HFSS软件对一个工作频率为60 GHz的极窄带通滤波器进行了参数设计与性能分析。

2 缺陷态同轴布喇格波导窄带通滤波器原理

基于缺陷态同轴布喇格波导的滤波器结构如图1所示,其中, L 为滤波器的有效长度, p_b 为正弦波纹槽的空间周期, $a_0, l_{\text{out}}, \phi_{\text{out}}$ 分别是外导体内壁的平均半径,波纹幅度,波纹初始相位;而 $b_0, l_{\text{in}}, \phi_{\text{in}}$ 则分别是内导体外壁的平均半径,波纹幅度,波纹初始相位;波纹相位突变(变化量为 π)所致的缺陷位于滤波器的中间。此时滤波器的外导体内壁半径 R_{out} 与内导体外壁半径 R_{in} 与纵向位置 z 的关系可分别表示为

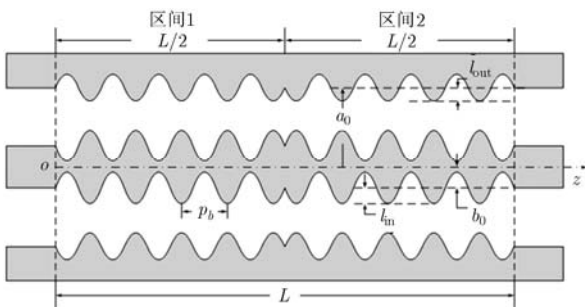


图1 基于缺陷态同轴布喇格波导的滤波器剖面结构示意图

$$R_{\text{out}}(z) = \begin{cases} a_0 - l_{\text{out}} \cos(k_b z + \phi_{\text{out}}), & 0 \leq z < L/2 \\ a_0 + l_{\text{out}} \cos(k_b z + \phi_{\text{out}}), & L/2 \leq z \leq L \end{cases} \quad (1)$$

$$R_{\text{in}}(z) = \begin{cases} b_0 - l_{\text{in}} \cos(k_b z + \phi_{\text{in}}), & 0 \leq z < L/2 \\ b_0 + l_{\text{in}} \cos(k_b z + \phi_{\text{in}}), & L/2 \leq z \leq L \end{cases} \quad (2)$$

其中 $k_b = 2\pi/p_b$ 。

从原理上来讲,缺陷态布喇格波导所具有的滤波作用来自波纹壁对入射波的布喇格散射效应,即入射电磁波在布喇格波导中传播时将被波纹壁连续地散射成一系列小幅度的反向波,当入射波的传播常数 k^+ 与反向波的传播常数 k^- 满足布喇格条件:

$$k^+ + k^- = 2\pi n/p_b, \quad n = 1, 2, 3, \dots \quad (3)$$

反向波之间能够获得匹配的相位条件以至相互叠加得到增强,进而在满足布喇格条件的频率附近形成一段入射波不能透过的区域,即电磁禁带(electromagnetic forbidden band);而当布喇格波导中间存在波纹相位跳变为 π 的缺陷时,原本匹配的相位条件则会失配,反向波之间将发生相消干涉,使得原有的禁带中间出现一个或多个很窄的透射窗口,从而达到极窄通带的滤波效果。

布喇格结构中入射波与散射波之间的相互作用关系可以通过耦合波方程组来研究。对基于介质材料的布喇格结构,因其电磁场分布比较简单,往往采用单模双波(工作模式的前向波与反向波)之间的耦合方程。而对于工作在高频段的大尺寸金属布喇格波导,由于入射的工作模式与临近模式的传播常数比较接近,入射波不但会与自身的反向波相互耦合,而且还会与相邻模式的反向波发生耦合,模式之间发生能量转移,因此,应当考虑多个模式的前向波与反向波之间的多模、多波耦合^[13-16],通常可以表示成如下形式^[13,15]:

$$\frac{df_i^+}{dz} = -(\alpha_i + j\Delta_i)f_i^+ + \sum_{k=1}^N jG_{ik}f_k^-, \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (4)$$

$$\frac{df_i^-}{dz} = (\alpha_i + j\Delta_i)f_i^- - \sum_{k=1}^N jG_{ik}^*f_k^+, \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (5)$$

其中 $f_i^+(z) = A_i^+(z)e^{jk_b z/2}$, $f_i^-(z) = A_i^-(z)e^{-jk_b z/2}$, 此处 $A_i^+(z)$ 和 $A_i^-(z)$ 分别为第 i 个模式的前向与反向行波分量的归一化复振幅,其幅度平方直接代表行波分量在对应波导截面的功率; $\Delta_i (= \beta_i - k_b/2)$, β_i , α_i 分别表示第 i 个模式的布喇格失配(Bragg mismatch)参数,纵向传播常数以及由金属波导壁的欧姆损耗带来的衰减系数; G_{ik} 及其共轭 G_{ik}^* 表示第 i 个模式与第 k 个模式间的耦合系数。同轴布喇格波导的耦合系数表达式由文献[13]中式(55)-式(70)给出。

3 60 GHz 窄带通滤波器设计与分析

本节采用缺陷态同轴布喇格波导构建一个具有极窄通带的带通滤波器, 在给出了该滤波器原型概念性参数设计的基础上, 利用耦合波理论及仿真软件 Ansoft HFSS 对设计结果的性能进行分析。

设滤波器以同轴波导最低阶的 TEM 模式工作于 60 GHz(对应工作波长约为 5 mm)。为了确保滤波器具备足够大的功率容量和较低的通带损耗, 采用较大的横向尺寸: 外导体平均半径 $a_0=10$ mm (波长的 2 倍), 引入一个较大的内外导体平均半径比 $b_0/a_0=0.7$ 来增加工作模式与高阶模之间的本征值间隔, 对应的同轴布喇格波导的内轴平均半径 $b_0=7$ mm。

为使滤波器达到预期的工作条件, 依据同轴布喇格波导的耦合特性对滤波器的波纹结构进行了参数设计。首先, 将波纹周期设置成 $p_b=2.5$ mm, 使得工作模式 TEM 能够在 60 GHz 处满足布喇格条件式(3)。其次, 根据单模状态下缺陷态布喇格波导绕射 Q 值(diffractive quality factor)的近似计算公式^[15]

$$Q_{\text{diffract}} = \frac{k_0^2 e^{|G|L}}{2k_b |G|} \quad (6)$$

式中 $k_0=2\pi f_0/c$, f_0 为工作频率, c 为真空中的光速。可以看出, 增加工作模式的自耦合系数 G 有利于提高缺陷态布喇格波导工作模式的绕射 Q 值, 从而使滤波器的总体 Q 值得以提升, 达到透过窗口变窄, 频率选择性提高的效果。由同轴布喇格结构中 TEM 模式自耦合系数的表达式^[13]

$$G_{\text{TEM-TEM}} = -\frac{k_b}{4 \ln(a_0/b_0)} \left(\frac{l_{\text{out}}}{a_0} e^{-j\phi_{\text{out}}} - \frac{l_{\text{in}}}{b_0} e^{-j\phi_{\text{in}}} \right) \quad (7)$$

可知, 在满足浅开槽的限制条件($l_{\text{in}}, l_{\text{out}} \ll p_b, \lambda$)下尽可能地增大内外导体的波纹幅度, 或者将外导体与内导体之间的波纹初始相位差 $\Delta\phi (= \phi_{\text{out}} - \phi_{\text{in}})$ 设置成 π , 都可以增加 TEM 模式自耦合系数。由此, 选取 $l_{\text{out}}=l_{\text{in}}=0.25$ mm, $\phi_{\text{out}}=\pi/2$, $\phi_{\text{in}}=-\pi/2$ 作为波纹壁的开槽幅度及初始相位。滤波器设计参数归纳列于表 1。

为分析滤波器性能, 现假设其入口 $z=0$ 处注入的信号波为频率在 56.5~63.5 GHz 范围内的正向传播 TEM 波, 输入功率 $|A_1^+(0)|^2 = 1$ W, 滤波器的作用就是只让频率为 60 GHz 附近的波通过。定义传输率为

$$T_i = \left| \frac{A_i^+(L)}{A_i^+(0)} \right|^2 = |A_i^+(L)|^2 \quad (8)$$

表 1 基于缺陷态同轴布喇格波导窄带滤波器设计参数

工作中心频率 f_0	60 GHz
工作模式	TEM
内外导体的电导率 σ	5.8×10^7 S/m (铜)
外导体内壁平均半径 a_0	10 mm
内导体外壁平均半径 b_0	7 mm
波纹周期 p_b	2.5 mm
外导体内壁波纹幅度 l_{out}	0.25 mm
内导体外壁波纹幅度 l_{in}	0.25 mm
外导体内壁波纹初始相位 ϕ_{out}	$\pi/2$
内导体外壁波纹幅度 ϕ_{in}	$-\pi/2$
滤波器有效长度 L	9 cm

采用耦合波理论计算出的滤波器传输率频率响应结果, 如图 2(a)所示, 其中虚线表示输入波的功率谱, 实线则表示输入波的传输率与频率之间的关系。为了与耦合波分析结果验证和比较, 采用 3 维结构电磁仿真软件 Ansoft HFSS 对该滤波器进行建模分析, 所得传输特性仿真结果示于图 2(b)。从图 2 中可以看出, 在整个的 56.5~63.5 GHz 范围内, 工作模式 TEM 与竞争模式 $\text{TM}_{0,1}$ 的传输率都处于较低的水平, 并未出现所预期的窄带透射窗口, 滤波器没起到窄带滤波作用。通过计算我们发现, 在仅考虑工作模式自耦合的单模状态下, 被缺陷分割的两段布喇格波导对入射波的复反射系数在布喇格频率处大小相等, 辐角相差为 π , 即入射波在被缺陷分割的前后两段布喇格波导中产生的散射波之间存在 180° 的相位差, 这样散射波之间能够发生相消干涉形成通带; 然而在考虑竞争模式 $\text{TM}_{0,1}$ 寄生耦合的情况下, 入射波在缺陷前后两段布喇格波导中的反射系数不再具有辐角相差为 π 的结果, 这就说明寄生耦合破坏了工作模式的散射波发生相消干涉的相位条件, 从而使得由相消干涉而产生的窄通带消失。为了消除这种寄生耦合对金属布喇格滤波器带来的负面影响, 切实可行的方法是降低工作模式与竞争模式之间的耦合强度。我们知道, 在金属布喇格反射器及谐振器中, 可以通过给波纹幅度引入一定的窗函数分布来削弱工作模式与竞争模式之间的耦合, 进而消除工作模式与竞争模式带隙的混叠 (bandgap overlap)^[16]。为此, 我们将常用的汉明窗函数分布引入滤波器内外导体缺陷两边的波纹区域中, 此时滤波器的内外导体壁波纹幅度与纵向位置之间的关系为

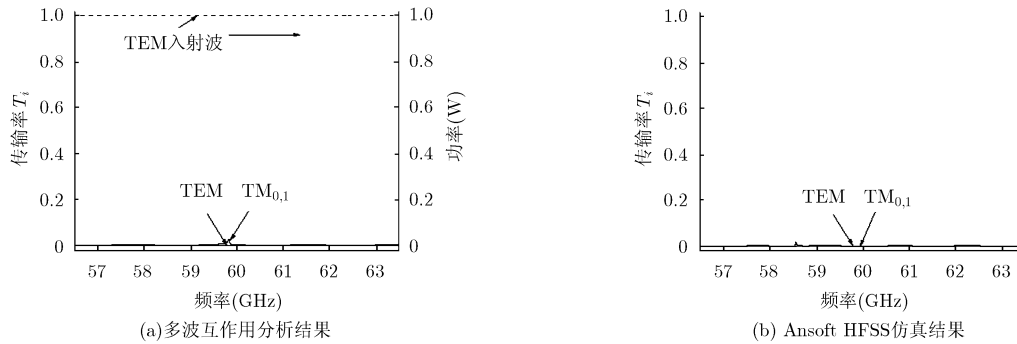


图 2 表 1 所示缺陷布喇格滤波器的传输响应曲线

$$l_{\text{out}}(z) = d_{\text{out}} \left\{ \begin{array}{l} 0.54 - 0.46 \cos \frac{2\pi z}{L/2}, \\ 0 \leq z < L/2 \\ 0.54 - 0.46 \cos \frac{2\pi \left(z - \frac{L}{2} \right)}{L/2}, \\ L/2 \leq z \leq L \end{array} \right\} \quad (9)$$

$$l_{\text{in}}(z) = d_{\text{in}} \left\{ \begin{array}{l} 0.54 - 0.46 \cos \frac{2\pi z}{L/2}, \\ 0 \leq z < L/2 \\ 0.54 - 0.46 \cos \frac{2\pi \left(z - \frac{L}{2} \right)}{L/2}, \\ L/2 \leq z \leq L \end{array} \right\} \quad (10)$$

引入窗函数分布后滤波器的剖面结构如图 3 所示, 其传输率频率响应如图 4 所示。通过与图 2 的对比可以看出, 此时竞争模式 $\text{TM}_{0,1}$ 与工作模式 TEM 之间的寄生耦合得到了很好的抑制, $\text{TM}_{0,1}$ 的传输率处于极低的水平, 而工作模式 TEM 则在 60 GHz 附近出现了一个很窄的尖峰。表 2 给出了滤波器的对应性能指标, 其在中心频率处的插入损耗低于 1.5 dB,

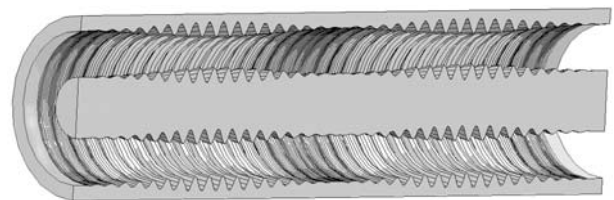


图 3 波纹幅度引入汉明窗分布后滤波器剖面结构图

表 2 波纹幅度引入汉明窗分布后窄带滤波器的性能

性能指标	数值分析结果	HFSS 仿真结果
中心频率(f_0) (GHz)	59.90	59.70
3 dB 带宽 (Δf) (MHz)	46.60	42.30
相对带宽 ($\Delta f/f_0$) (%)	0.08	0.07
中心频率处的插入损耗(dB)	1.14	1.27

相对带宽小于 0.1%, 表明该滤波器在较低的通带损耗条件下具有很好的窄带通滤波效果。

4 结论

本文提出采用缺陷态同轴布喇格波导构建毫米波段极窄带通滤波器的构想并对基于这一构想的滤波器原型进行了参数设计。通过对该原型的多波相互作用以及 Ansoft HFSS 软件分析, 我们可以得出以下结论: (1)金属布喇格波导中工作模式与竞争模式之间的寄生耦合会对引入缺陷后的通带结构造成

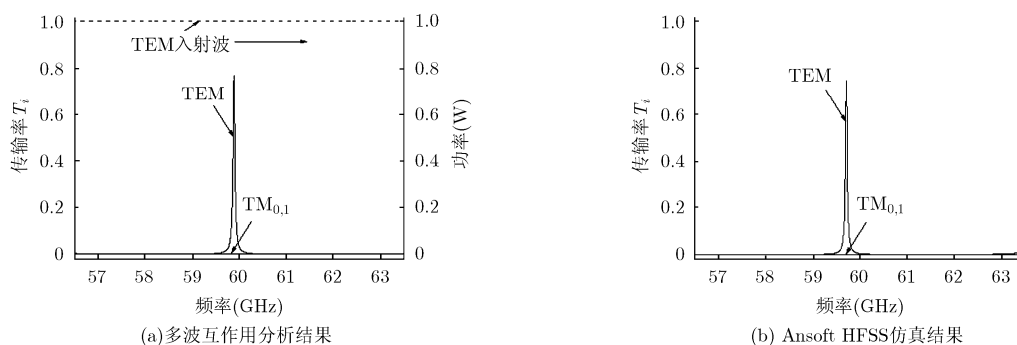


图 4 波纹幅度引入汉明窗分布后滤波器的传输响应曲线

破坏, 从而对滤波器的有效性带来严重的影响; (2) 通过对缺陷态同轴布喇格波导的波纹幅度引入汉明窗分布可以有效抑制寄生耦合效应, 从而达到极窄带滤波的效果并确保较高的输出模式纯度。与其他的滤波器结构相比, 本文结构不仅具有结构简单、功率容量大、便于集成的特点, 更为重要的是, 它能够在高频率工作时以较低的通带损耗实现极窄通带带宽的性能指标, 因而能够满足毫米波通信及精密测量技术中对极窄频带信号的需求, 也能够用于提高高功率自由电子脉塞器件输出波的单色性。

参 考 文 献

- [1] Hunter I C, Billonet L, Jarry B, *et al.* Microwave filters—applications and technology[J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2002, 50(3): 794–805.
 - [2] Boria V E and Gimeno B. Waveguide filters for satellites[J]. *IEEE Microwave Magazine*, 2007, 8(5): 60–70.
 - [3] Choi B G, Stubbs M G, and Park C S. A Ka-band narrow band pass filter using LTCC technology [J]. *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, 2003, 13(9): 388–389.
 - [4] 李胜先, 傅君眉, 吴须大. Ka 频段极窄通带波导滤波器[J]. *红外毫米波学报*, 2007, 26(5): 359–361.
Li S X, Fu J M, and Wu X D. Narrow pass-band waveguide filters in KA band[J]. *Journal of Infrared Millimeter Waves*, 2007, 26(5): 359–361.
 - [5] 欧阳征标, 刘海山, 李景镇. 光子晶体超窄带滤波器[J]. *光子学报*, 2002, 31(3): 281–284.
Ouyang Z B, Liu H S, and Li J Z. Photonic crystal supper narrow optical filters[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2002, 31(3): 281–284.
 - [6] Palaci J, Perez M P, Villanueva G E, *et al.* Tunable photonic microwave filter with single bandpass based on a phase-shifted fiber Bragg grating[J]. *IEEE Photonics Technology Letter*, 2010, 22(19): 1467–1469.
 - [7] Li J S. Terahertz wave narrow bandpass filter based on photonic crystal[J]. *Optics Communications*, 2010, 283(13): 2647–2650.
 - [8] Gerhard M, Imhof C, and Zengerle R. Compact three-dimensional terahertz resonators based on periodically corrugated metallic slit waveguides[J]. *Journal of Applied Physics*, 2010, 108(7): 026102.
 - [9] Neutens P, Lagae L, Borghs G, *et al.* Plasmon filters and resonators in metal-insulator-metal waveguides[J]. *Optics Express*, 2012, 20(4): 3408–3423.
 - [10] 张弛, 罗积润. UC-PBG 结构创建准 TEM 波导的仿真分析[J]. *电子与信息学报*, 2010, 32(2): 454–458.
Zhang C and Luo J R. Analysis and simulation of the quasi-TEM waveguide by using UC-PBG structure [J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2010, 32(2): 454–458.
 - [11] Wagner D, Kasperek W, Leuterer F, *et al.* Bragg reflection band stop filter for ECE on wega[J]. *Journal of Infrared Millimeter and Terahertz Waves*, 2011, 32(10): 1424–1433.
 - [12] 文光俊, 李家胤, 刘盛纲, 等. 同轴波纹波导的高频特性数值分析[J]. *电子与信息学报*, 1999, 21(2): 246–251.
Wen G J, Li J Y, Liu S G, *et al.* Numerical analysis of high frequency characteristics of coaxial corrugated wall waveguide[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 1999, 21(2): 246–251.
 - [13] Lai Y X and Zhang S C. Multiwave interaction formulation of a coaxial Bragg structure and its experimental verification[J]. *Physics of Plasmas*, 2007, 15(11): 113301.
 - [14] 兰峰, 杨梓强, 史宗君. 带有锥度结构的同轴开槽布拉格反射器研究[J]. *物理学报*, 2011, 60(9): 091101.
Lan F, Yang Z Q, and Shi Z J. Coaxial Bragg reflector with small tapered inner rode corrugated ripples and phase matching section[J]. *Acta Physica Sinica*, 2011, 60(9): 091101.
 - [15] Bratman V L, Denisov G G, Ginzburg N S, *et al.* FEL's with Bragg reflection resonators: cyclotron autoresonance masers vesus ubitrons[J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 1983, 19(3): 282–293.
 - [16] Ding X Y, Liu H, and Lü Z S. Effect of ripple taper on coupling modes[J]. *Journal of Infrared Millimeter and Terahertz Waves*, 2010, 31(8): 1156–1163.
- 赖颖昕: 男, 1983 年生, 博士, 研究方向为高功率微波器件及应用。
谭永明: 女, 1957 年生, 教授, 研究方向为通信电路与系统。