

文章编号:1001-9014(2010)04-0273-05

# 周期损耗介质加载波导与均匀圆波导间的模式映射

杜朝海<sup>1,2</sup>, 刘濮鲲<sup>1</sup>, 薛谦忠<sup>1</sup>, 王斌<sup>1,2</sup>, 黎燕林<sup>1,2</sup>

(1. 中国科学院电子学研究所 中国科学院高功率微波源与技术重点实验室,北京 100190;

2. 中国科学院研究生院,北京 100039)

**摘要:** 损耗介质环与金属环间隔加载的周期损耗介质波导能够有效地控制各种模式的衰减特性,这对于抑制毫米波回旋行波管放大器的绝对不稳定性 and 提高其性能具有重要作用. 针对应用于 Ka 波段、TE<sub>01</sub> 模的回旋行波管放大器的周期损耗介质加载圆波导,系统地分析了该周期系统与均匀系统间的模式映射关系. 研究表明,当介质层厚度一定时,均匀介质加载波导中的高阶模式可以映射为光滑波导中的低阶模式,且相互映射的模式在中空区域的场型一致. 周期系统中的模式表现出复合模式的分布. 在一个周期中,介质段和金属段的模式分别映射为均匀介质波导和金属波导中的模式. 明确周期介质加载波导系统与均匀波导系统间的模式映射关系是分析发生在这种复杂的相互作用回路中的回旋电子脉塞注波相互作用的前提,对简化其物理模型具有指导作用.

**关键词:** 毫米波; 回旋行波管; 损耗介质; 模式映射

**中图分类号:** TN129 **文献标识码:** A

## MODAL MAPPING BETWEEN PERIODIC LOSSY DIELECTRIC-LOADED WAVEGUIDE AND UNIFORM CIRCULAR WAVEGUIDE

DU Chao-Hai<sup>1,2</sup>, LIU Pu-Kun<sup>1</sup>, XUE Qian-Zhong<sup>1</sup>, WANG Bin<sup>1,2</sup>, LI Yan-Lin<sup>1,2</sup>

(1. Key Laboratory of High Power Microwave Sources and Technologies, Institute of Electronics,

Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;

2. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

**Abstract:** A waveguide periodically loaded with lossy dielectric rings and metal rings is able to effectively control the attenuation of each mode. This is important for suppressing the absolute instability and enhancing the performance of a millimeter-wave gyrotron traveling wave tube amplifier (gyro-TWT). The modal mapping between the periodic waveguide and the uniform waveguide was systematically studied for a periodic ceramic-loaded cylindrical waveguide applied in TE<sub>01</sub> mode gyro-TWT at Ka-band. It was revealed that, with a proper dielectric thickness, a higher order mode in uniform dielectric-loaded waveguide can be mapped to a lower order mode in smooth waveguide and the field distributions of the inter-mapped modes in vacuum region bear good resemblance to each other. A mode in periodic system exhibits complex mode distribution. In a period, the field distributions of the mode in the dielectric section and the metal ring section are mapped to those in uniform dielectric-loaded waveguide and smooth waveguide, respectively. The understanding of the modal mapping between the periodic dielectric-loaded waveguide and smooth waveguide is the precondition for the analysis of the complex electron cyclotron interaction in such a periodic system, which brings helpful guidance for the simplification of the physical model.

**Key words:** millimeter wave; gyrotron-traveling-wave tube (gyro-TWT) amplifier; lossy dielectric; modal mapping

### 引言

介质加载波导系统不仅被广泛地应用于微波功率传输系统,而且还可作为许多有源微波电子器件

的注波相互作用电路. 在这些应用中,波导系统的损耗特性始终是关注的热点之一<sup>[1-3]</sup>. 在微波功率传输系统中,主要研究介质加载波导的弱损耗特性以减小高能微波的传输损耗. 而在有源微波电子器件中,

收稿日期:2009-05-13,修回日期:2010-01-24

Received date: 2009-05-13, revised date: 2010-01-24

基金项目:国家自然科学基金(60871051,60871047,60971072)资助课题

作者简介:杜朝海(1982-),男,四川泸县人,博士研究生,主要从事毫米波技术研究.

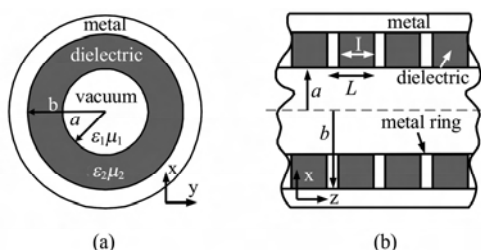


图1 周期损耗介质加载的分布损耗方案 (a)横截面图 (b)剖面图

Fig. 1 The distributed loss scheme of the periodic lossy dielectric loaded circuit (a) transverse structure (b) longitudinal structure

通常利用介质的强损耗特性为互作用系统,引入某种损耗机制,增强系统的稳定性<sup>[1,3-6]</sup>. 基于电子回旋脉塞(ECM; Electron Cyclotron Maser)原理的回旋行波管放大器是一种具有高功率、高频率和宽频带特性的毫米波微波源,是下一代高分辨率成像雷达系统首选的微波功率放大器<sup>[1]</sup>. 经过几十年的发展,回旋行波管放大器在理论和实验上都取得了重要的突破. 但是受稳定性的严重影响,器件性能远低于理论值. 上世纪末,台湾清华大学的朱国瑞教授成功地展示了分布损耗技术在抑制回旋行波管放大器的寄生振荡方面的积极作用,极大地提高了器件的稳定性,推动了器件的实用化进程<sup>[1,7-9]</sup>. 此后,一系列的实验已经证明,分布损耗技术是抑制寄生振荡和提高器件稳定性广泛适用的方法<sup>[4,5,10,11]</sup>.

由于陶瓷具有高热导率的特点,因此基于损耗陶瓷波导分布损耗技术的回旋行波管放大器具有高

$$\left[ \frac{1}{k_{\perp 2}} \frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1} \frac{Q'(k_{\perp 2}a)}{Q(k_{\perp 2}a)} - \frac{1}{k_{\perp 1}} \frac{J'_n(k_{\perp 1}a)}{J_n(k_{\perp 1}a)} \right] \cdot \left[ \frac{1}{k_{\perp 2}} \frac{\mu_2}{\mu_1} \frac{P'(k_{\perp 2}a)}{P(k_{\perp 2}a)} - \frac{1}{k_{\perp 1}} \frac{J'(k_{\perp 1}a)}{J(k_{\perp 1}a)} \right] - \frac{1}{\varepsilon_1 \mu_1} \left( \frac{k_z n}{\omega a} \right)^2 \left( \frac{1}{k_{\perp 1}^2} - \frac{1}{k_{\perp 2}^2} \right) = 0 \quad (1)$$

其中,  $J_n(x)$  和  $N_n(x)$  分别是  $n$  阶第一类和第二类贝塞尔函数,  $P(x) = J_n(x)N'_n(k_{\perp 2}b) - N_n(x)J'_n(k_{\perp 2}b)$ ,  $Q(x) = J_n(x)N'_n(k_{\perp 1}b) - N_n(x)J'_n(k_{\perp 1}b)$ , 常数  $k_{\perp 1}$  和  $k_{\perp 2}$  分别表示真空区域和介质区域的横向波数.

周期损耗介质加载的圆波导是一种介质填充的盘荷波导,其分析方法可以简要地概括为:首先采用弗洛奎定理和模式匹配法,把中空区域的高频场展开为一系列的空间谐波,把介质槽中的高频场展开为一系列的驻波谐波;然后根据界面上切向场量连续性的边界条件,建立关于各次谐波幅值的线性方程组;最后通过数值求解满足其系数矩阵的行列式为零的根,据此解出周期系统中存在的模式<sup>[12]</sup>.

基于上述两种理论,分别编制了两套专用程序

平均功率工作的优点<sup>[4,5]</sup>. 该方案结构如图1所示,在金属波导内壁加载一层衰减陶瓷构成分布损耗,采用金属环将该均匀系统周期截断以防止静电积累<sup>[4,5]</sup>. 该方案的基本要求包括:在中空区域,所加载的损耗介质对工作模式的衰减和场型的扰动尽可能小;对竞争模式的衰减必须达到某个设计的阈值,以有效抑制寄生振荡<sup>[4]</sup>. 对于工作在 Ka 波段  $TE_{01}$  模的回旋行波管放大器,利用损耗介质加载方案提供的多维自由度可以灵活地调整波导系统对各个模式的衰减量,使得工作模式受到弱扰动,竞争模式受到强衰减,保证器件具有高稳定性<sup>[4,5]</sup>.

基于周期损耗陶瓷的分布损耗方案虽然带来多维的调整自由度和高平均功率工作等优点,但是增加了波导系统的复杂度,为器件的设计和回旋电子脉塞互作用的分析带来困难<sup>[4-11]</sup>. 本文集中研究了陶瓷损耗特性对波导传输特性的影响,详细地阐述了基于 AlN-SiC 损耗陶瓷加载的分布损耗方案的设计和分析过程,系统地研究了周期加载波导系统与均匀波导系统间的模式映射关系. 这种映射关系不仅揭示了介质损耗影响波导传输特性的物理规律,而且对于进一步研究发生在这种复杂的损耗周期系统中的回旋电子脉塞不稳定性具有指导意义.

## 1 理论模型

均匀的介质加载金属圆波导系统是一种经典的传输系统<sup>[2,3]</sup>,其中存在的电磁模式由如下本征方程确定.

Uniform Dielectric Waveguide Code (UDW) 和 Periodic Dielectric Waveguide Code (PDW) 分别用于研究均匀损耗介质波导和周期损耗介质波导的传输特性. 下文的数值分析是基于 Ka 波段回旋行波管放大器实验的结构参数进行的,波导内半径  $a = 5.495\text{mm}$ ,损耗介质 80% AlN 的 20% SiC 在 Ka 波段的复数介电常数为  $11 - 2.2j$ <sup>[4,5]</sup>. 均匀介质加载波导中的模式以符号  $HE_{mn}^d$  或者  $TE_{0n}^d$  标识<sup>[3]</sup>;周期系统中的模式以映射关系标识,例如周期系统中的  $\sim TE_{mn}$  映射于光滑波导中的  $TE_{mn}$  模式<sup>[4]</sup>. 在周期系统的计算中,由于受到计算资源的限制,中空区域的空间谐波数和介质区域的驻波谐波数都截取前 8 阶. 计算所得到的高频场的切向分量在介质真空表面的连续性表明计算的可靠性.

## 2 数值分析

基波 Ka 波段  $TE_{01}$  模回旋波管基于光滑圆波导的冷注波色散关系如图 2 所示. 分布损耗加载的基本思路是对工作模式  $TE_{01}$  模的扰动最小, 且对竞争模式  $TE_{11}$ 、 $TE_{21}$  和  $TE_{02}$  模的衰减足够强. 在均匀的损耗介质加载的波导中, 介质厚度对前两个圆电模的传输特性的影响如图 3 所示. 由于本文的分析基于文献[4,5]中的实验参数, 图 3 的计算结果与文献[4]中的计算结果完全一致, 这说明本文分析的可靠性. 随着介质厚度  $T$  的增加,  $TE_{01}^d$  模式被吸入介质层变为慢波, 且受到很强的衰减; 而  $TE_{02}^d$  模在薄介质层条件下表现为截止, 随介质层厚度的增加, 才逐渐表现出传输特性. 当  $b - a = 1.41\text{mm}$  时,  $TE_{02}^d$  模的衰减出现极小值, 此时其主要能量集中在波导中空区域, 场型分布与光滑圆波导中的  $TE_{01}$  模一致. 因此, 当介质层厚度为  $1.41\text{mm}$  时, 均匀介质波导中的工作主模实际是  $TE_{02}^d$  模. 此时, 光滑圆波导与均匀介质加载波导之间的模式映射关系如图 4 所示. 在均匀损耗介质加载的波导中, 由于波导的横尺寸比对应的光滑圆波导大, 所以光滑波导中的模式映射到均匀损耗介质加载波导中的某个高阶模式.  $TE_{01}$  和  $TE_{02}$  分别映射到  $TE_{02}^d$  和  $TE_{04}^d$  模式, 而低阶的  $TE_{11}$  和  $TE_{21}$  则分别映射到混合模式  $HE_{12}^d$  和  $HE_{22}^d$  模式. 此外, 在均匀介质波导中还有许多低阶模式, 例如  $HE_{11}^d$ 、 $HE_{21}^d$  等, 这些模式的表现类似于  $TE_{01}^d$ , 由于主要能量分布在介质层中, 且受到强衰减作用, 因此, 这些低阶模式在互作用系统中不会产生绝对不稳定性. 均匀损耗介质加载波导中的四个关键模式的场型分布如图 5 所示. 由图 5 可以看到这四个关键模式  $HE_{12}^d$ 、 $HE_{22}^d$ 、 $TE_{02}^d$  和  $TE_{04}^d$  在中空区域的场型分布分别与光滑圆波导中的四个模式  $TE_{11}$ 、 $TE_{21}$ 、 $TE_{01}$  和  $TE_{02}$  一致. 对比可以发现, 均匀损耗介质加载波导中的高阶模式具有更大的径向指数, 这主要体现为介质层中的场型分布.

均匀损耗介质加载波导中, 介质层与真空区域传输的相对功率如图 6 所示. 总体来讲, 均匀损耗介质加载的波导系统中, 关键模式的主要能量分布在中空区域. 由图 6 可见, 在工作频带内工作模式  $TE_{02}^d$  模具有高达 98% 的相对功率分布在中空区域. 高阶  $TE_{04}^d$  模分布在中空区域的相对功率也较高, 但是从图 2 可以看出该模式的注波冷色散曲线相交点靠近截止频率, 在损耗系统中受到很强的截止衰减和损耗衰减, 所以  $TE_{04}^d$  模在注波互作用系统中损耗段不

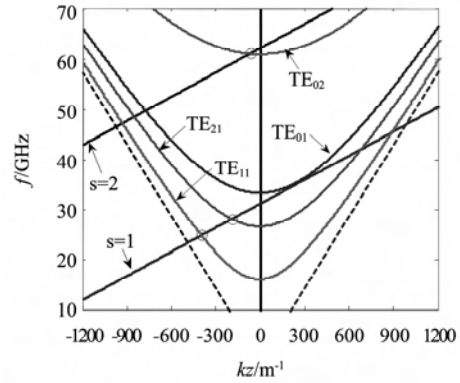


图 2 Ka 波段  $TE_{01}$  模回旋波管注波冷色散关系  
Fig. 2 The cold dispersion curves of the Ka-band  $TE_{01}$  mode gyro-TWT

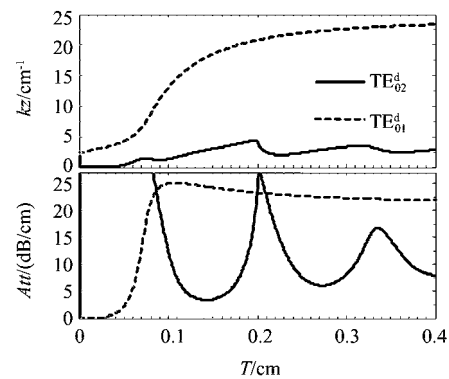


图 3 介质层厚度  $T$  对均匀介质加载波导传输常数  $kz$  和衰减率  $Att$  的影响 (35GHz, UDW 计算)  
Fig. 3 The effect of the dielectric thickness  $T$  on the propagation constant  $kz$  and attenuation rate  $Att$  of the dielectric-loaded waveguide (35GHz, UDW calculated)

会产生绝对不稳定性. 混合模式  $HE_{12}^d$  和  $HE_{22}^d$  在介质层中的相对功率比工作主模高出 1 倍, 受到较强的衰减, 因此注波互作用系统中也不会产生绝对不稳定性. 从场分量表达式上讲, 混合模式可以分解成为一个 TE 模分量和 TM 模分量; 从传输功率上讲, 混合模式可以分解成为一个 TE 模分量功率流、一个 TM 模分量功率流和分量互耦功率流. 图 7 给出了混合模式  $HE_{12}^d$ 、 $HE_{22}^d$  中 TE 模和 TM 模分量的归一化功率. 总体来讲, 这两个混合模式在快波区主要功率集中在 TE 模分量上. 因此, 在均匀损耗介质加载波导系统中回旋电子脉塞互作用可以将混合模式近似处理为横电模式, 即 TE 模式.

回旋电子脉塞互作用系统中, 利用金属环将上述均匀的损耗介质加载波导周期截断, 所加载金属环可收集零散电子, 以防止介质表面静电积累<sup>[4,5]</sup>. 金属环的引入使得均匀系统转换为周期系统, 具有如图 1(b) 所示的结构. 图 8 给出了介质槽的百分

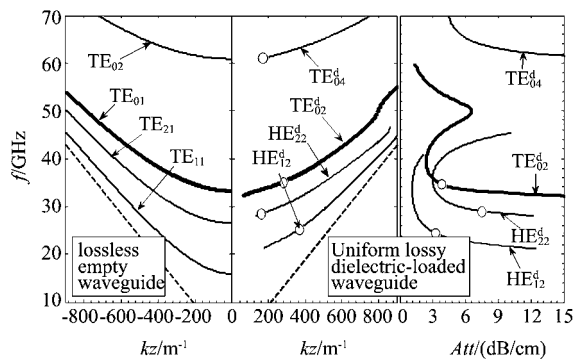


图4 均匀损耗介质加载波导与光滑波导之间的模式映射关系(UDW 计算)

Fig. 4 Modal mapping between the uniform dielectric-loaded waveguide and the empty waveguide(UDW calculated)

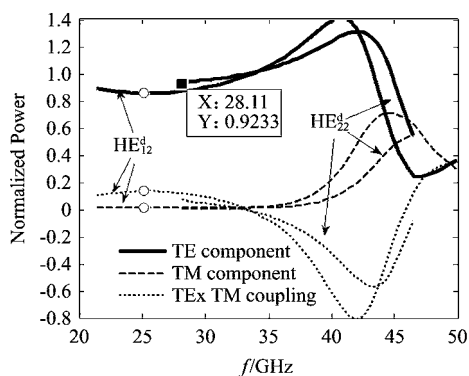


图7 混合模式中 TE 和 TM 模分量的相对功率(UDW 计算)

Fig. 7 The relative TE and TM power components in the hybrid modes (UDW calculated)

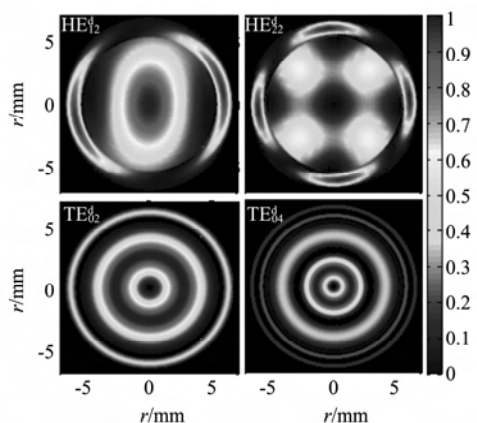


图5 均匀介质加载波导中四个关键模式的横向功率密度分布(UDW 计算)

Fig. 5 The transverse power density distribution of the four key modes in uniform dielectric-loaded waveguide(UDW calculated)

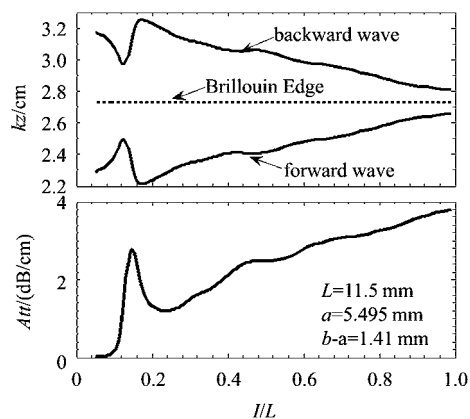


图8 介质槽百分比  $I/L$  对传输特性的影响(35GHz, PDW 计算)

Fig. 8 The effect of the dielectric-slot ratio  $I/L$  on the propagation characteristics(35GHz, PDW calculated)

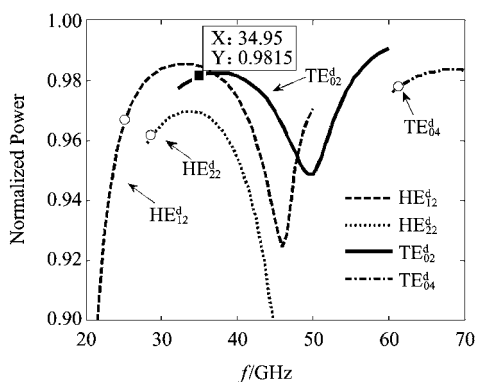


图6 均匀介质加载波导中真空区域的相对功率(UDW 计算)

Fig. 6 The normalized power in vacuum region in the uniform dielectric-loaded waveguide(UDW calculated)

比(简称槽比,  $I/L$ )对工作主模传输特性的影响. 由图可见,低槽比时具有衰减峰值,但总体来讲,随着

槽比的增加工作主模的衰减也相应地增加,前向波和返波的传输常数以 Brillouin 边界对称地变化. 图9给出了工作主模的  $E_z$  分量在三组典型的参数条件下的场分布图. 综合分析图8和图9表明,低槽比时的衰减峰主要是由介质槽内的谐振基模引起的. 随槽比增加介质槽内的高阶模式相继出现,且场强降低. 分析图9表明,周期系统中的模式是一个复合模式. 一个周期中,损耗介质段的模式映射于均匀损耗介质加载波导中的  $TE_{02}^d$  模式,而金属段则映射于光滑波导中的  $TE_{01}$  模式.

基于上述分析方法,计算得到槽比  $I/L = 0.87$  ( $I = 10\text{mm}, L = 11.5\text{mm}$ )的周期系统与光滑圆波导之间的模式映射关系如图10所示. 结合图4、图9和图10可以看出,由于金属环相对较窄,介质槽内的微波能量可以通过真空区域有效地耦合到下一个周期,金属环对波导的传输特性产生较弱的周期微

表 1 3 种波导间的模式映射关系

Table 1 The modal mappings between the three different kinds of waveguides

周期损耗介质加载波导	均匀损耗介质波导	光滑圆波导
$\sim \text{TE}_{01}$	$\text{TE}_{02}^d$	$\text{TE}_{01}$
$\sim \text{TE}_{02}$	$\text{TE}_{04}^d$	$\text{TE}_{02}$
$\sim \text{TE}_{21}$	$\text{TE}_{12}^d$	$\text{TE}_{21}$
$\sim \text{TE}_{11}$	$\text{TE}_{22}^d$	$\text{TE}_{11}$

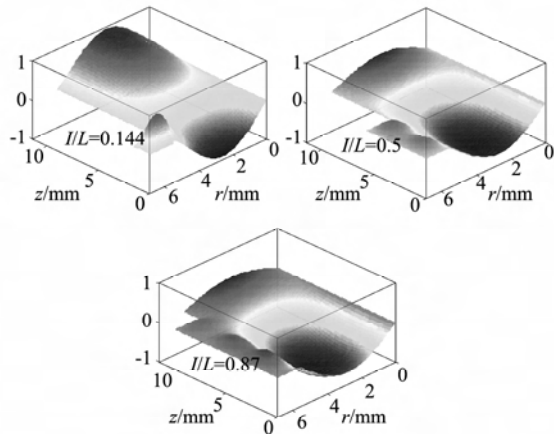
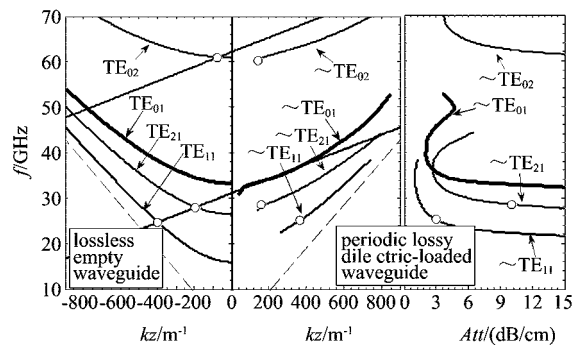
图 9 工作主模在周期系统中的归一化  $E_\phi$  的分布 (35GHz, PDW 计算)Fig. 9 The  $E_\phi$  component distribution of the operating mode in the periodic system (35GHz, PDW calculated)

图 10 周期损耗介质加载波导与光滑波导之间的模式映射关系 (PDW 计算)

Fig. 10 Modal mapping between the periodic dielectric-loaded waveguide and the empty waveguide (PDW calculated)

扰,因此图 4 中均匀损耗介质加载的波导与图 10 中周期系统中模式的传输特性相近似. 最终,周期损耗介质加载波导、均匀损耗介质加载波导和光滑圆波导三者之间的模式映射关系如表 1 所示.

### 3 结论

系统地研究了应用于 Ka 波段的  $\text{TE}_{01}$  模回旋行波管放大器的周期损耗介质加载圆波导互作用电路.

研究表明,周期损耗介质加载波导系统中的模式可以映射为均匀损耗介质加载波导和光滑波导中对应的模式. 由于介质的强损耗作用,周期介质系统的主要能量被限制在中空区域中传输,波导的传输特性受到弱周期微扰,其中传输的波导模式类似于均匀传输系统中的快波. 上述三种波导间的模式映射关系以及对传输特性的相似性表明,在高槽比  $I/L$  的周期损耗介质加载互作用回路中,回旋电子脉塞注波互作用可以忽略金属环的影响,近似地将周期系统中的模式采用均匀损耗介质加载波导中的模式近似. 这可以简化复杂的周期系统中的中电子回旋脉塞互作用的物理模型,对推广基于周期损耗介质方案的分布损耗技术在高稳定性回旋行波管放大器中的应用具有推动作用.

### REFERENCES

- [1] Chu K R, The electron cyclotron maser[J]. *Rev. Mod. Phys.*, 2004, **76**(2):489—540.
- [2] Luo J R, Jiao C Q. Effect of the lossy layer thickness of metal cylindrical waveguide wall on the propagation constant of electromagnetic modes[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2006, **88**(06115):1—3.
- [3] Du C H, Xue Q Z, Liu P K. Loss-induced modal transition in a dielectric-coated metal cylindrical waveguide for gyrotraveling-wave-tube applications[J]. *IEEE Electron Device Lett.*, 2008, **29**(11):1256—1258.
- [4] Calame J P, Garven M, Danly B G, et al. Gyrotron-traveling wave-tube circuit based on lossy ceramics[J]. *IEEE Trans. Electron Devices*, 2002, **49**(8):1469—1477.
- [5] Garven M, Calame J P, Danly B G, et al. A gyrotron-traveling-wave tube amplifier experiment with a ceramic loaded interaction region[J]. *IEEE Trans. Plasma Sci.*, 2002, **30**(3):885—893.
- [6] Du C H, Liu P K, Xue Q Z, et al. Effect of a backward wave on the stability of an ultrahigh gain gyrotron traveling-wave amplifier[J]. *Phys. Plasmas*, 15(123107):1—8.
- [7] Chu K R, Barnett L R, Chen H Y, et al. Stabilization of absolute instabilities in the gyrotron traveling wave amplifier[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1995, **74**(7):1103—1106.
- [8] Chu K R, Chen H Y, Hung C L, et al. Ultrahigh gain gyrotron traveling wave amplifier[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1998, **81**(21):4760—4763.
- [9] Chu K R, Chen H Y, Hung C L, et al. Theory and experiment of ultrahigh-gain gyrotron traveling wave amplifier[J]. *IEEE Trans. Plasma Sci.*, 1999, **27**(2):391—404.
- [10] Pershing D E, Nguyen K T, Calame J P, et al. A TE<sub>11</sub> Ka-band gyro-TWT amplifier with high-average power compatible distributed loss[J]. *IEEE Trans. Plasma Sci.*, 2004, **32**(3):947—956.
- [11] Nguyen K T, Calame J P, Pershing D E, et al. Design of a Ka-band gyro-TWT for radar applications[J]. *IEEE Trans. Electron Dev.*, 2001, **48**(1):108—115.
- [12] Tigelis I G, Vomvoridis J L, Tzima S, et al. High-frequency electromagnetic modes in a dielectric-ring loaded beam tunnel[J]. *IEEE Trans. Plasma Sci.*, 1998, **26**(3):992—930.