

# 内开槽螺纹波导冷腔色散特性模拟研究

张雅鑫<sup>1</sup>, 祝大军<sup>1</sup>, 贾佳<sup>2</sup>, 刘盛纲<sup>1</sup>

(1. 电子科技大学物理电子学院 成都 610054; 2. 成都信息工程学院学生工作处 成都 610225)

**【摘要】**根据螺纹波导中模式间的耦合方程组及冷腔色散方程进行了数值计算, 分析了2个模式的相互耦合机理。基于圆柱形波导中线性极化TE<sub>11</sub>模式存在极化简并的特性, 将线极化TE<sub>11</sub>脉冲作为1个探针, 采用粒子模拟软件对该腔体进行了3维冷腔模拟; 并将模拟结果与数值计算结果进行了比较, 两者基本一致。通过计算机模拟得出了混合模式的电场等位线分布图, 结合色散方程数值计算分析了内开槽螺纹几何特性变化对波导色散特性的影响规律。

**关键词** 色散特性; 模式耦合; 粒子模拟; 内开槽螺纹波导  
**中图分类号** TN129 **文献标识码** A

## Simulation of Dispersion Characteristic of the Spiral Waveguide

ZHANG Ya-xin<sup>1</sup>, ZHU Da-jun<sup>1</sup>, JIA Jia<sup>2</sup>, and LIU Sheng-gang<sup>1</sup>

(1. School of Physical Electronics, University of Electronics Science and Technology of China Chengdu 610054;

2. Student Affairs Office, Chengdu University of Information Technology Chengdu 610225)

**Abstract** Based on the coupled equations and dispersion equation of spiral waveguide, the numerical calculation is carried out to get the dispersion line and the coupling mechanism of the two modes is analyzed. Based on the characteristics of the linear polarization TE<sub>11</sub> mode, line polarization TE<sub>11</sub> pulse is applied as a probe to simulate the dispersion characteristics of the cold cavity with a three-dimensional particle in cell code. The results of computer simulations agree well with the numerical calculations. Moreover, by computer simulation a mixed mode of the electric field is obtained. Combined the computer simulations with the numerical calculations, the law of influence of the dispersion characteristics by adjusting the parameters of the slotted screw geometry is obtained.

**Key words** dispersion characteristic; mode coupling; pic-simulation; spiral corrugated waveguide

回旋行波管作为回旋管中重要的一员, 具有输出频率高、功率容量大、带宽较宽的优点, 因而在高分辨率和高容量密集新通信系统方面有很好的应用前景。近年来, 回旋行波管得到了一定的发展<sup>[1-4]</sup>。但是要充分发挥回旋行波管的潜力还需要做许多工作, 如何进一步提高回旋行波管的带宽、增益、效率成为热门的课题之一。俄罗斯科学家提出了内开槽螺纹波导回旋行波管, 该波导具有非对称结构, 因此使得光滑圆波导模式之间发生耦合, 改变了光滑圆波导在波数为零附近的色散特性, 大大增加了注波相互作用区宽度以及相互作用效率。因此自1998年以来, 该波导一直得到广泛的研究<sup>[5-8]</sup>。本文由螺纹波导中模式互相耦合的耦合方程组及冷腔色散方程进行了数值计算, 并且基于柱型波导中线性极化TE<sub>11</sub>模式存在极化简并的特性, 采用粒子模拟软件

进行了3维冷腔模拟。

### 1 内开槽螺纹波导冷腔色散方程

内开槽螺纹波导具有特殊的非对称结构, 如图1所示。其边界条件<sup>[1]</sup>为 $r=r_0+r_1\cos(m_B\varphi+k_Bz)$ , 其中,  $r_0$ 为光滑圆波导的半径;  $r_1$ 为开槽螺纹的幅度;  $m_B$ 为螺纹角向的变化数;  $k_B$ 为螺纹纵向波数。



图1 内开槽螺纹波导的横截面及立体图

由于内开槽螺纹的存在, 使得光滑圆波导中模式之间发生耦合现象。若选取光滑圆波导边界为参

收稿日期: 2007-02-27; 修回日期: 2007-07-11

项目基金: 自然科学基金重大基金子项目(10390160); 自然科学基金面上项目(60472013)

作者简介: 张雅鑫(1981-), 男, 博士, 主要从事太赫兹科学与技术等方面的研究。

考边界面, 将波导壁上螺线的几何特性考虑为参考边界面上的等效表面磁流, 为:

$$\mathbf{J}^* = -\mathbf{n} \times \Delta \mathbf{E} \quad (1)$$

式中  $\Delta \mathbf{E}$  为边界形变引起的微扰场<sup>[9]</sup>。运用阻抗微扰法<sup>[10]</sup>可得一组相互耦合的方程组及耦合条件为:

$$\begin{cases} \frac{dV_j}{dz} = i\omega\mu_0 I_j \pm i \frac{r_1 k_B}{r_0 \eta_k \eta_j} m_k m_j e^{\mp i k_B z} V_k \\ \frac{dI_j}{dz} = \frac{i k_{zj}^2}{\omega\mu_0} V_j + i \frac{r_1 k_{cj}^2 [(k_{ck} r_0)^2 - m_k m_j]}{\omega\mu_0 r_0 \eta_k \eta_j} e^{\mp i k_B z} V_k \\ \frac{dV_k}{dz} = i\omega\mu_0 I_k \pm i \frac{r_1 k_B}{r_0 \eta_k \eta_j} m_k m_j e^{\mp i k_B z} V_j \\ \frac{dI_k}{dz} = \frac{i k_{zk}^2}{\omega\mu_0} V_k + i \frac{r_1 k_{ck}^2 [(k_{cj} r_0)^2 - m_k m_j]}{\omega\mu_0 r_0 \eta_k \eta_j} e^{\mp i k_B z} V_j \end{cases} \quad (2)$$

式中 下标  $j$  和  $k$  分别为 2 个不同的模式;  $\eta_k = \sqrt{[(k_{ck} r_0)^2 - m_k^2]}$ ;  $\eta_j = \sqrt{[(k_{cj} r_0)^2 - m_j^2]}$ ;  $k_c$  为截止波数;  $m$  为波的角向变化数;  $V$  为波的电压幅度函数;  $I$  为波的电流幅度函数;  $m_j - m_k \pm m_B = 0$  为 2 种模式在  $m_B$  一定时的耦合条件, 即当且仅当 2 种模式角向变化次数  $m_j$ 、 $m_k$  满足该条件时, 该波导中才会出现模式间的耦合现象。由式(2)可得冷腔色散方程为<sup>[5-7]</sup>:

$$\begin{cases} (k_{zk}^2 - k_z^2)(k_{zj} - k_B - k_z) = \frac{\sigma_{kj} \sigma_{jk}}{k_{zj}} \\ \sigma_{jk} = \frac{1}{2} \frac{r_1 (k_{ck} r_0)^2 (k_{cj} r_0)^2 + r_0^2 m_k m_j (k_B k_{zj} + k_{cj}^2)}{r_0^3 \sqrt{[(k_{cj} r_0)^2 - m_j^2]} \sqrt{[(k_{ck} r_0)^2 - m_k^2]}} \\ \sigma_{kj} = \frac{r_1 (k_{ck} r_0)^2 (k_{cj} r_0)^2 + r_0^2 m_k m_j [k_B (k_{zj} - k_B) + k_{cj}^2]}{r_0^3 \sqrt{[(k_{cj} r_0)^2 - m_j^2]} \sqrt{[(k_{ck} r_0)^2 - m_k^2]}} \end{cases} \quad (3)$$

## 2 内开槽螺线波导3维冷腔模拟及色散特性分析

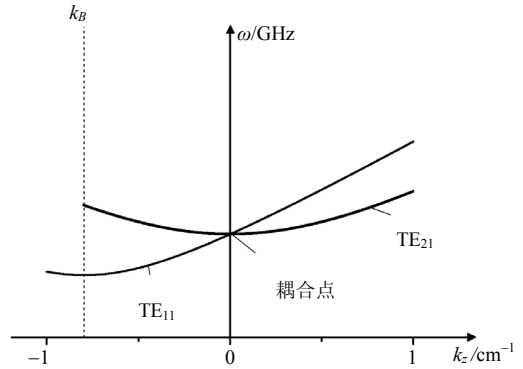
本文的数值计算采用文献[3-4]的实验模型参数, 具体参数如表1所示。通过对色散方程的数值计算, 可以得到内开槽螺线波导的冷腔色散曲线, 如图2所示。

表1 内开槽螺线波导结构参数

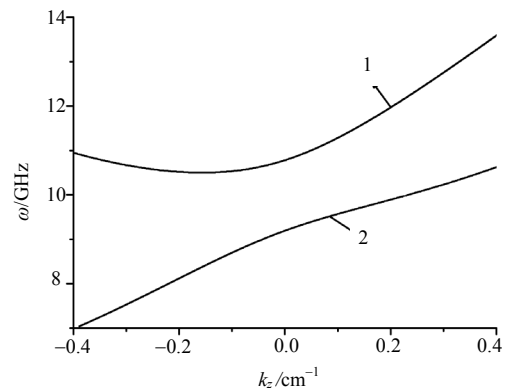
$r_1/\text{mm}$	$r_0/\text{mm}$	$m_B$	$d/\text{mm}$	模式 $k$	模式 $j$
1.5/1.4	14.5/14.7	3.0	37.5/29.0	TE <sub>21</sub> 右旋	TE <sub>11</sub> 左旋

图2a所示的曲线由2条曲线组成。将图2a与图2b比较可以发现, 在图2a中,  $k_z \approx 0$  的区域正是低次模和高次模在螺线边界影响下发生耦合的区域, 并且图2a中2条曲线交点处是图2b中耦合现象最明显的

地方。耦合后, 2条冷腔色散曲线在耦合点附近完全分离开, 低次模色散曲线变得更加平滑。因此, 当电子注速度与该区域群速度相匹配时, 该波导显示出了回旋电子注极宽相互作用区, 并且电子注与电磁波能持续相互作用, 从而也可以大大增加相互作用效率。



a. 光滑圆波导中2种模式的色散特性



b. 内开槽波导中2种模式的色散特性

图2 光滑圆波导及内开槽波导中, 2种模式的色散特性

本文在运用数值运算求解色散方程的同时, 也使用了粒子模拟软件对该波导进行了冷腔分析。在3维冷腔模拟分析时采用的方法为输入一线性极化的TE<sub>11</sub>模式宽带脉冲<sup>[4]</sup>。因为在柱型波导中线性极化的TE<sub>11</sub>模式存在极化简并, 当其在光滑圆柱波导中传输时由于圆波导的角向对称性, 该线极化TE<sub>11</sub>模式脉冲的极化方向不发生改变, 如图3所示。但是当该线极化TE<sub>11</sub>模式脉冲在螺线波导中传播时, 其极化方向会因为螺线波导边界的非对称性而发生旋转, 如图4所示, 从而使得该模式在螺线波导中传播的纵向波数与其在光滑圆波导中的纵向波数出现差别, 两者的关系满足以下条件<sup>[4]</sup>:

$$k_{z\text{TE}_{11}}(\omega_n) = k_{z\text{OTE}_{11}}(\omega_n) + \frac{\pi}{L}(2n-1) + \varphi_0$$

$$n=1,2,3,\dots \quad (4)$$

式中  $L$  为波导总长度;  $k_{z\text{TE}_{11}}(\omega_n)$  为TE<sub>11</sub>模在螺线波导中传播的纵向波数;  $k_{z\text{OTE}_{11}}(\omega_n)$  为TE<sub>11</sub>模在光滑圆

波导中传播的纵向波数;  $\varphi_0$ 为初始极化角度;  $n$ 为冷腔模拟中在某一垂直方向上对径向场进行傅里叶变化后得到的频率点个数。因此根据式(4), 通过对螺纹波导中某一垂直方向上线性极化TE<sub>11</sub>脉冲的径向场进行傅里叶变化分析计算, 就可以得到螺纹波导低次模式的色散曲线。

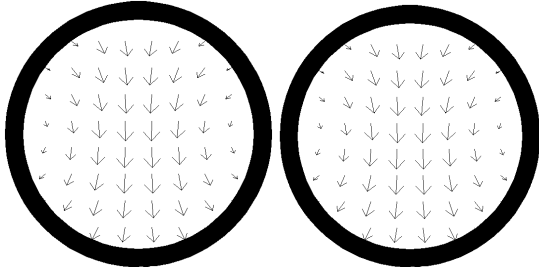


图3 光滑圆波导中不同位置TE<sub>11</sub>模式脉冲电场分布图

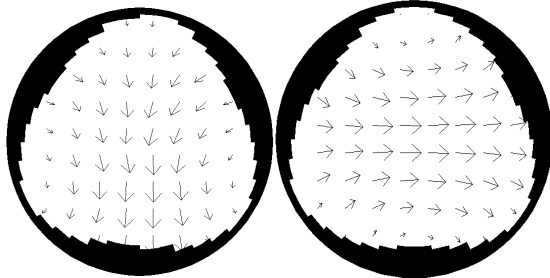
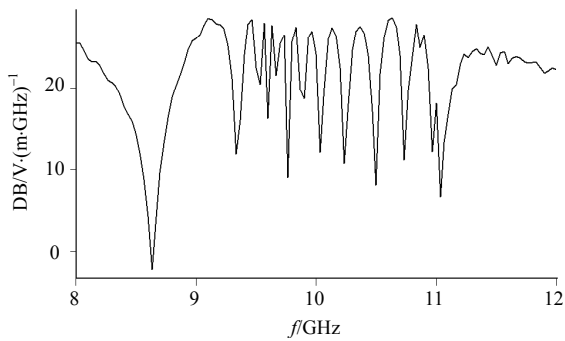
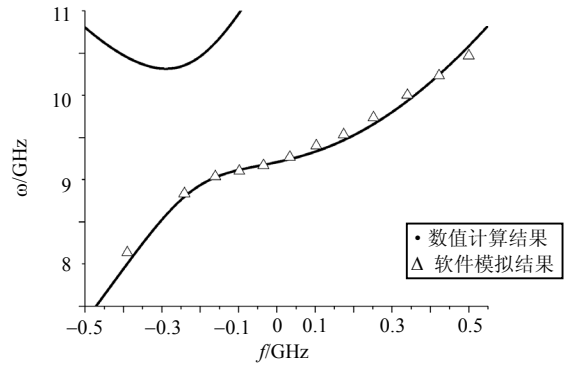


图4 螺纹波导中不同位置TE<sub>11</sub>模式脉冲电场分布图

根据该方法, 选取螺纹波导参数为 $r_1=0.14\text{ cm}$ 、 $r_0=1.47\text{ cm}$ 、 $d=2.9\text{ cm}$ , 在波导初始端口输入TE<sub>11</sub>脉冲, 在波导末端的垂直面上对径向场进行分析, 垂直方向上径向场傅里叶变化结果如图5a、图6a所示; 模拟结果与数值计算结果的比较如图5b、图6b所示; 模拟结果中得到的频率点个数与波导周期数相关。比较图5b与图6b可以看出, 图7所示采用的是19个周期, 图8所示采用的是13个周期。从图5a、6a中可以看到, 3维冷腔模拟结果同数值运算结果基本一致, 并且误差仅在0.02%~2.00%, 从而证明了本文推导及数值运算的正确性, 并且为进一步的注波相互作用模拟计算奠定了基础。

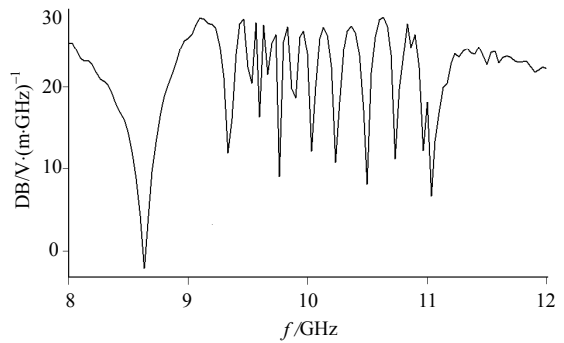


a. 径向场傅里叶变化

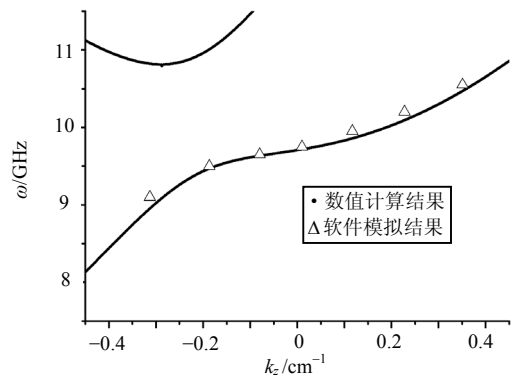


b. 数值运算结果同PIC软件模拟结果比较

图5 19个周期螺纹波导色散特性



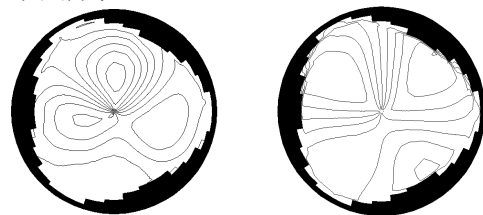
a. 径向场傅里叶变化



b. 数值运算结果同PIC软件模拟结果比较

图6 13个周期螺纹波导色散特性

通过3维模拟, 也得到了螺纹波导中右旋TE<sub>11</sub>和左旋TE<sub>21</sub>耦合后的混合模式的电场强度等位线分布, 如图7所示。



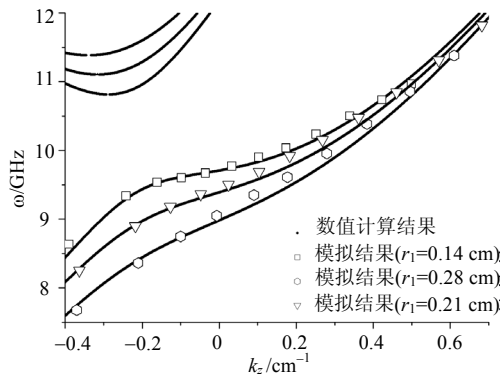
a. 角向场强等位线

b. 径向场强等位线

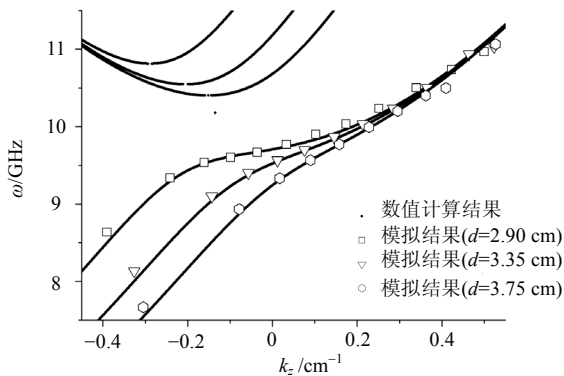
图7 等位线图

此外, 对具有不同螺纹周期及螺纹深度的波导

的色散特性分别进行3维冷腔模拟及计算,如图8所示。从图8a和8b中可看出,螺纹深度 $r_1$ 、螺纹周期 $d$ 的变化对螺纹波导冷腔色散特性的影响规律为螺纹深度越深、周期越大,耦合现象越明显,2条曲线分离越远,低次模的群速度越大,线性区域越宽。而线性区域宽度决定注波相互作用带宽,因此考虑波导中电子注与波相互作用时,需要注意螺纹几何特性与电子注的匹配问题。



a. 内开槽螺纹深度对波导色散特性的影响



b. 内开槽螺纹周期对波导色散特性的影响

图8 波导色散特性的影响因素

### 3 结束语

本文根据导出的螺纹波导中模式互相耦合的耦合条件、耦合方程组以及冷腔色散方程进行了数值计算;并且基于柱型波导中线性极化 $TE_{11}$ 模式存在极化简并的特性,采用粒子模拟软件进行了3维冷腔模拟。用两种不同的方法分析了该波导的色散特性,并得到了一致的色散曲线。同时本文通过软件模拟,

也得出了内开槽螺纹几何特性变化对最终波导色散特性影响的规律,螺纹深度和周期都对色散特性有一定的影响。

### 参考文献

- [1] 王华军, 李宏福, 王小林. 回旋管单阳极磁控注入电子枪的数值计算[J]. 电子科技大学学报, 2003, 32(4): 399-402. WANG Hua-jun, LI Hong-fu, WANG Xiao-ling. Design and calculation of a single anode magnetic injection electronic gun for gyrotron[J]. Journal of University of Electronic Science and Technology of China, 2003, 32(4): 399-402.
- [2] YEH Y S, CHENG J H, CHEN L K, et al. Stable harmonic multiplying gyrotron traveling-wave amplifier with distributed wall losses and attenuating severs[J]. Phys Plasmas, 2008, 023109(15): 1-9.
- [3] GLYAVIN M Y, LUCHININ A G, GOLUBIATNIKO G Y. Generation of 1.5-kW, 1-THz coherent radiation from a gyrotron with a pulsed magnetic field[J]. Phys Rev Lett, 2008, 015101(100): 1-3.
- [4] FAN C T, CHANG T H, PAO K F, et al. Stable, high efficiency gyrotron backward-wave oscillator[J]. Phys Plasmas, 2007, 093102(14): 1-8.
- [5] 王峨峰, 李宏福. 螺旋波纹波导研究[J]. 物理学报, 2005, 54(1): 5339-5342. WANG E F, LI H F. Study of the helical wave-guide[J]. Acta Physica Sinica, 2005, 54(11): 5339-5342.
- [6] DENISOV G G, BRATMAN V L. Gyro-TWT with a helical operating waveguide[J]. IEEE Trans Plasma Sci, 1998, 26: 508-518.
- [7] DENISOV G G, BRATMAN V L. Linear theory of a wide-band gyro-TWT[J]. IEEE Trans Plasma Sci, 1998, 26: 519-530.
- [8] BURT G, SAMSONOV S V. Microwave pulse compression using a helically corrugated waveguide[J]. IEEE Trans Plasma Sci, 2005, 33: 661-667.
- [9] 黄宏嘉. 微波原理(卷1)[M]. 北京: 北京科学出版社, 1965. HUANG Hong-jia. Principle of microwave[M]. Beijing: Beijing Science Press, 1965.
- [10] 钱景仁, 黄宏嘉. 阻抗微扰概念在计算中继圆波导不规则性中的应用[J]. 电子学报, 1965, 1: 67-72. QIAN Jing-ren, HUANG Hong-jia. Impedance perturbation in the calculation of the concept of meta irregular circular waveguide[J]. Acta Electronica Sinica, 1965, 1: 67-72.

编辑 黄莘