

螺旋线行波管中场的数值分析

胡玉禄 杨中海 李斌 李建清 黄桃 金晓林 梁献普
(电子科技大学大功率微波电真空器件技术国防科技重点实验室 成都 610054)

摘要: 该文对螺旋线行波管中的场进行了数值分析。研究表明数值求解时主从边界条件的位置决定场传播的方向,螺旋线旋转方向决定场的旋转变化方向。螺旋线外各类夹持杆和翼片对螺旋线内部场分布影响很小,场基本随贝塞尔函数分布,但耦合阻抗变化较大,这主要是由于场受螺旋线外结构影响而影响功率分配。同时,对场的各次空间谐波的研究,特别是零次和负一次空间谐波,有利于准确地求解各次空间谐波的耦合阻抗,对提高螺旋线行波管放大器和返波振荡的大信号注波相互作用计算的准确性有重要的意义。

关键词: 螺旋线行波管; 场分布; 螺带模型; 耦合阻抗; 注波相互作用

中图分类号: TN124

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2010)07-1721-05

DOI: 10.3724/SP.J.1146.2009.00883

Numerical Analysis of the Field in Helix Traveling Wave Tube

Hu Yu-lu Yang Zhong-hai Li Bin Li Jian-qing
Huang Tao Jin Xiao-lin Liang Xian-pu

(Vacuum Electronics National Lab, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 610054, China)

Abstract: The field in helix TWT (Traveling Wave Tube) is studied with numerical analysis. By Numerical field analysis, neglected in the theory's, the phenomenon is that, the master and slave face setting decides the wave propagation direction, and the helix rotation decides the field's rotation. Also, the cross-section distribution infection in helix with different rods and vanes outsides of helix are also studied. The field cross-section distribution changes very small, almost with the Bessel function. But the impedance changes much because of the electromagnetic energy re-distribution in rods or vanes. On the other hand, accurate spatial harmonious impedance can be obtained by the spatial harmonious field numerical analysis, especially the mostly used spatial harmonious wave, the 0 and -1 spatial harmonious wave. Above this, the accuracy of the forward and backward beam-wave interaction can be improved.

Key words: Helix TWT; Field distribution; Tape helix theory; Impedance; Beam wave interaction

1 引言

行波管由于可以工作在倍频程以上,且具有能够同时兼顾带宽和功率等特点,从而成为应用最广泛的真空电子器件,是当前真空电子器件领域中研究与发展最活跃的一类器件^[1]。

目前行波管研究中最重要方向是行波管非线性注波相互作用理论^[2-4]。为了准确地求解螺旋线行波管场的放大和返波振荡,必须准确地计算零次和负一次空间谐波的色散和耦合阻抗。色散和耦合阻抗的求解包括解析理论^[5,6]、实验测试^[7,8]和数值求解^[9]。目前数值求解主要利用国外的3维大型商业数

值求解软件HFSS^[10], CST MWS, MAFIA^[11]等和国内的3维数值求解软件微波管高频电路模拟器HFCS^[12]等进行求解。

本文主要从数值求解软件HFSS出发,通过研究场的传播方向、旋转方向以及场的横向分布等,对螺旋线行波管内的场进行了细致深入的研究计算,目前关于螺旋线内场的数值研究还未见报道。这些研究有利于准确地求解各次空间谐波的耦合阻抗,为提高大信号注波相互作用计算的准确性提供有力支持。

2 螺旋线内场的理论分析^[13]

利用螺旋线中 z 向周期和角向周期,根据 Floquet 定理,电场或磁场的任意分量可以展开成如下形式:

$$A = \sum_{n=-\infty}^{\infty} \sum_{m=-\infty}^{\infty} A_{nm}(r) e^{-j\beta_n z} e^{jm\theta} \quad (1)$$

2009-06-16 收到, 2010-01-19 改回

国家自然科学基金(10476004, 60601004)和国防科技重点实验室基金资助课题

通信作者: 胡玉禄 yuluhu@uestc.edu.cn

其中 $\beta_n = \beta_0 + nk_H$, $\beta_0 = \omega / v_{p0}$ 为零次空间谐波的波数, v_{p0} 为零次空间谐波的相速, $k_H = 2\pi / L$, L 为螺距长度。上述场分量省略了时间因子 $e^{j\omega t}$ 。也可以表示为

$$A = e^{-j\beta_0 z} \sum_{n=-\infty}^{\infty} \sum_{m=-\infty}^{\infty} A_{nm}(r) e^{-j(nk_H z - m\theta)} \quad (2)$$

利用螺旋线螺旋对称性, 也就是场沿 z 轴移动 $l < L$, 同时角度必须满足旋转 $2\pi l / L$ 。通过比较可以得到

$$A_{nm} = \begin{cases} 0, & m \neq n \\ A_n, & m = n \end{cases} \quad (3)$$

因此可以得到螺旋线行波管中的场为

$$A = e^{-j\beta_0 z} \sum_{n=-\infty}^{\infty} A_n(r) e^{-jn(k_H z - \theta)} \quad (4)$$

注波相互作用中我们关心螺旋线内 z 向分量的电场, 所以将式(4)代入冷腔中的 Helmholtz 方程可以得到电场的 z 向分量为

$$E_z = e^{-j\beta_0 z} \sum_{n=-\infty}^{\infty} A_n I_n(\gamma_n r) e^{-jn(k_H z - \theta)} \quad (5)$$

其中 $\gamma_n^2 = \beta_n^2 - \omega^2 / c^2$ 。

如果只考虑零次空间谐波, 和正负一次空间谐波, 那么场可表示为

$$E_z = \left[A_0 I_0(\gamma_0 r) + A_1 I_1(\gamma_1 r) e^{-j(k_H z - \theta)} + A_{-1} I_{-1}(\gamma_{-1} r) e^{j(k_H z - \theta)} \right] e^{-j\beta_0 z} \quad (6)$$

3 螺旋线内场的数值分析

上述理论分析了单根螺旋线内的场, 而实际上行波管中螺旋线外存在各种类型的夹持杆和翼片, 影响行波管内的场的相速和场的大小以及分布。本节通过数值分析研究了这些因素对螺旋线内场的影响, 有利于准确地求解各次空间谐波的场以及耦合阻抗, 进而提高注波相互作用的计算精度。

3.1 主从边界条件的位置决定场的传播方向

目前, 求解螺旋线行波管中的场主要通过建立一个螺距的模型, 同时设置主从边界条件, 求解结构矩阵的广义本征函数得到。本文采用此方法, 运

用电磁场数值求解软件 HFSS 进行了相关计算。

建立表 1 中参数的螺旋线结构模型, 定义不同的准周期边界条件相移 170° , 用 HFSS 计算可得到最低次模的轴上 z 向电场如图 1 所示。

表 1 螺旋线结构参数

螺旋线内半径(mm)	0.8
螺旋线厚度×宽度(mm)	0.2×0.55
螺距(mm)	1.0
管壳内半径(mm)	2

图 1(a)所示: 当边界条件 $Z_{\text{Master}} < Z_{\text{Slave}}$, E_z 虚部滞后于 E_z 实部, 即传播因子为 $e^{+j\beta_0 z}$ 。而图 1 (b) 边界条件为 $Z_{\text{Master}} > Z_{\text{Slave}}$, 可见 E_z 虚部超前 E_z 实部, 所以传播因子为 $e^{-j\beta_0 z}$ 。事实上, 由于

$$E_{\text{slave}} = E_{\text{master}} e^{j\phi} \quad (7)$$

而 $\beta_0 = \phi / L$, 可以得到

$$E_{\text{slave}} = E_{\text{master}} e^{j\beta_0 L} \quad (8)$$

所以当 $Z_{\text{Master}} < Z_{\text{Slave}}$, 传播因子为 $e^{+j\beta_0 z}$, $Z_{\text{Master}} > Z_{\text{Slave}}$, 传播因子为 $e^{-j\beta_0 z}$ 。

上面得到的是最低次模的场, 波传播方向的正负取决于主从面的位置设置。下面的讨论都以 $Z_{\text{Master}} < Z_{\text{Slave}}$ 为例, 我们研究相移的变化和模式的选取对场方向的影响。

通过相移参数扫描我们可以得到两个模式的色散图, 见图 2。可以看到频率是关于 180° 相移对称的。而且分析场的实部和虚部关系可以看出, 矩形符号线表示场的传播因子为 $e^{+j\beta_0 z}$, 三角形符号线表示场的传播因子为 $e^{-j\beta_0 z}$ 。因此场关于 180° 对称, 且方向相反。

从图 3 可以看出, 170° 相移下 $(2\pi/L)z_1 = 0$ 处场幅值的横向分布和不同半径下场随角向变化。显然当 $r=0$ 时也就是轴上场的幅值不随角度变化。随着半径的增大幅值越来越大。从图 4 可以看出, 170° 相移下 XZ 平面上场幅值的横向分布和不同半径下场随 z 轴的变化。与图 3 一样, 当 $r=0$ 时也就是轴

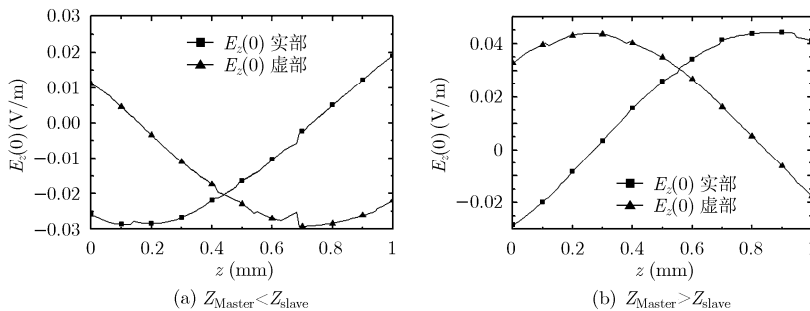


图 1 螺旋线内场实部虚部分布

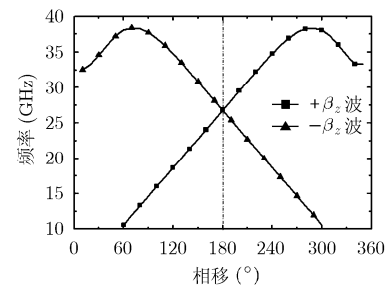


图 2 两个模式的色散图

上场的幅值不随角度变化。随着半径的增大幅值越来越大。比较理论公式(5)可以看出,这是由于场包含了各次空间谐波的缘故。非零次的空间谐波影响了轴外场的分布。

上面得到的 170° 相移下最低次模的场,也就是任意一个相移任意次模都包含了所有的空间谐波,即 $+\beta_0 z$ 的波包含零次、正负一次、正负二次等空间谐波, $-\beta_0 z$ 的波也是一样,只是这些空间谐波幅值的比例关系有待确定。

3.2 螺旋线旋转方向决定场的角向分布变化

本小节分析讨论螺旋线旋转方向对场分布的影响。以右旋螺旋线, 170° 相移为例,分别得到 $(2\pi/L)z_1 = 0$, $(2\pi/L)z_2 = \pi/4$, $(2\pi/L)z_3 = \pi/2$ 和 $(2\pi/L)z_4 = 3\pi/4$ 时,半径0~0.5 mm的横向场幅值分布。从图5(a)~5(d)上可以看到,随着 z 轴位置的

增加,场逆时针旋转。

为了保证场旋转对称,对某个位置的场其螺旋前进的变化必须满足:

$$k_H z \pm \psi = \text{const} \quad (9)$$

求导可得

$$d(k_H z) = \mp d\psi \quad (10)$$

当 z 增加时,逆时针旋转(正转),所以取 $k_H z - \psi$ 。当 z 增加时,顺时针旋转(反转),所以取 $k_H z + \psi$ 。显然顺时针旋转就是左旋螺旋线。

通过上述讨论,我们只有知道场的传播方向和旋转方向,才能准确地计算各次空间谐波的场,从而得到准确的耦合阻抗。

3.3 各次空间谐波场的计算以及其横向分布研究

以 170° 相移下最低模式的场为例(因为 170° 相

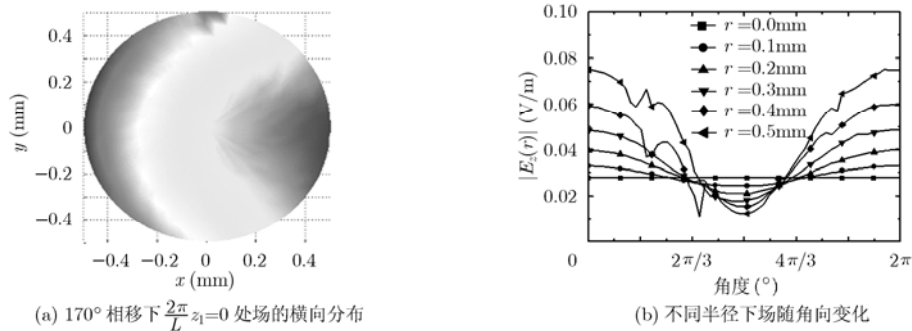


图 3 场的横向分布和场随角向的变化

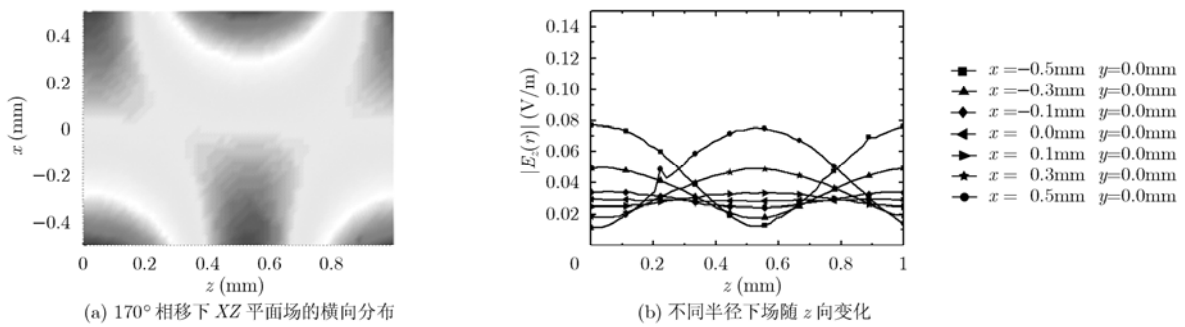


图 4 xz 平面场的横向分布和场随 z 向变化

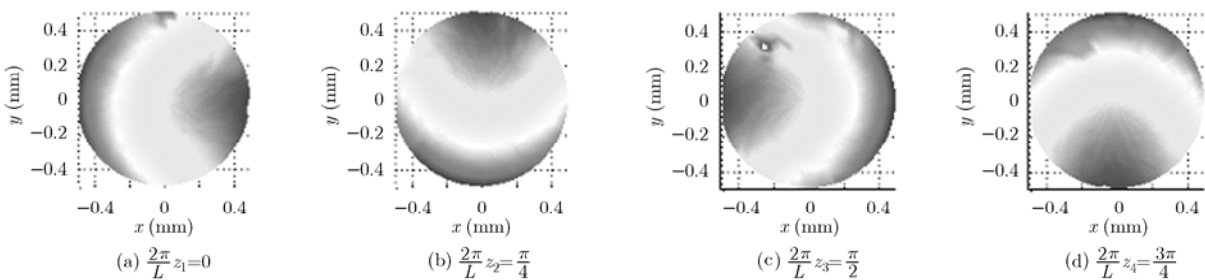


图 5 不同轴向位置处场的横向分布

移负一次空间谐波的场要明显一些), 计算各次空间谐波的场以及耦合阻抗。由于场的传播因子为 $e^{+j\beta_0 z}$, 且为右旋螺旋线, 只考虑零次和正负一次空间谐波, 这样可以得到场的表达式为

$$E_z = \left[E_{z0}(r) + E_{z1}(r)e^{j(k_H z - \theta)} + E_{z-1}(r)e^{-j(k_H z - \theta)} \right] e^{j\beta_0 z} \quad (11)$$

所以各次空间谐波的场为

$$E_{z0}(r) = \frac{1}{2\pi L} \int_0^{2\pi} \int_0^L E_z e^{-j\beta_0 z} dz d\theta \quad (12a)$$

$$E_{z1}(r) = \frac{1}{2\pi L} \int_0^{2\pi} \int_0^L E_z e^{-j(\beta_0 z + k_H z - \theta)} dz d\theta \quad (12b)$$

$$E_{z-1}(r) = \frac{1}{2\pi L} \int_0^{2\pi} \int_0^L E_z e^{-j(\beta_0 z - k_H z + \theta)} dz d\theta \quad (12c)$$

各次空间谐波的耦合阻抗为

$$Kc_n(r) = \frac{|E_n(r)|^2}{2\beta_n^2 P} \quad (13)$$

为了验证场在截面上的分布情况, 定义:

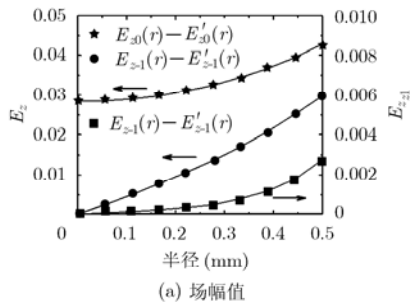
$$\bar{E}_{zn} = \frac{1}{r_b} \int_0^{r_b} \frac{E_{zn}(r)}{I_n(\gamma_n r)} dr \quad (14)$$

$$E'_{zn}(r) = \bar{E}_{zn} I_n(\gamma_n r) \quad (15)$$

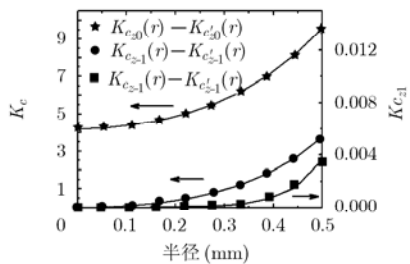
归一化场的标准差为

$$\sigma_n = \frac{1}{\bar{E}_{zn}} \left\{ \int_0^{r_b} \left[\frac{E_{zn}(r)}{I_n(\gamma_n r)} - \bar{E}_{zn} \right]^2 dr \right\}^{1/2} \quad (16)$$

$$\bar{K}c_n = \frac{|\bar{E}_{zn}|^2}{2\beta_n^2 P} \quad (17)$$



(a) 场幅值



(b) 耦合阻抗

图 6 各次空间谐波的场幅值和耦合阻抗随半径的变化

$$Kc'_n(r) = \bar{K}c_n I_n^2(\gamma_n r) \quad (18)$$

图 6(a), 6(b)所示, 零次和正负一次空间谐波的场基本随着贝塞尔函数 $I_0(\gamma_0 r)$ 和 $I_1(\gamma_1 r)$ 分布。其中正一次空间谐波的场很小。下面只讨论零次和负一次空间谐波的影响, 目前主要应用的也是这两个空间谐波。

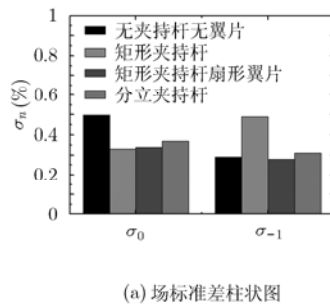
表 2 给出了螺旋线各类结构的主要参数。图 7, 图 8 给出了 170° 和 90° 相移下螺旋线外矩形夹持杆、扇形翼片和分立夹持杆结构下螺旋线内的场, 可以得到, 不同的外部结构对螺旋线内部场的横向分布几乎没有影响。因为归一化场的标准差 σ_n 在 1% 以内, 这种偏差很小, 横向场分布都非常接近贝塞尔函数。但是, 当加载不同的夹持杆后, 耦合阻抗均降低了 25% 左右。若在夹持杆上同时加载翼片后, 耦合阻抗降低更多, 值变得更小。这主要是由于场受螺旋线外结构损耗而降低。

表 2 螺旋线各类结构的主要参数

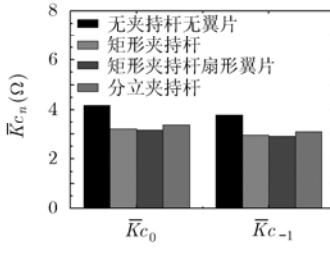
结构	主要参数
无夹持杆无翼片结构	螺距 1.0 mm, 螺旋线宽 0.55 mm
矩形夹持杆无翼片结构	螺距 1.0 mm, 螺旋线宽 0.55 mm, 夹持杆宽 0.6mm
矩形夹持杆扇形翼片结构	螺距 1.0 mm, 螺旋线宽 0.55 mm, 夹持杆宽 0.6 mm, 翼片 40 度
分立夹持杆无翼片结构	螺距 1.0 mm, 螺旋线宽 0.55 mm, 夹持杆宽 0.6 mm, 厚 0.7 mm

4 结束语

解析理论可以提供统一的认识, 但是数值研究

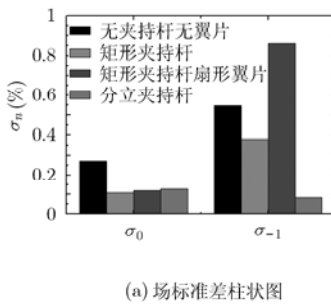


(a) 场标准差柱状图

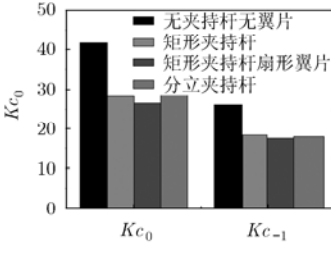


(b) 耦合阻抗柱状图

图 7 170° 相移下各类结构的 σ_n 和 $\bar{K}c$ 柱状图



(a) 场标准差柱状图



(b) 耦合阻抗柱状图

图 8 90° 相移下各类结构的 σ_n 和 Kc 柱状图

更利于直观研究。通过数值研究发现, 为了准确计算螺旋线内场的各次空间谐波, 应固定主从边界条件以及螺旋线旋转方向。当从面的位置大于主面的位置且相移小于 180° , 最低模式的场正向传播, 改变主从面位置或相移大于 180° 或改为二次模式, 场正向传播。通过相移扫描可以发现, 场关于 180° 相位对称且传播方向相反。任意模式的场都包含各次空间谐波, 只是这些空间谐波幅值的比例不同。对于场的非零次空间谐波, 当 z 增加时, 场逆时针旋转(正转), 所以取 $k_H z - \psi$ 。当 z 增加时, 场顺时针旋转(反转), 所以取 $k_H z + \psi$ 。

通过加载各类夹持杆和翼片, 归一化场的标准差 σ_n 都在 1%以内, 也就是螺旋线内场分布影响很小, 都满足贝塞尔函数 $I_n(\gamma_n r)$ 分布。但是, 当加载不同的夹持杆后, 耦合阻抗降低了 25%左右。若同时加载翼片, 耦合阻抗降低更多, 值变得更小。这主要是由于场受螺旋线外结构损耗而降低。

本文分析了螺旋线行波管内的场, 本文方法也可用于分析其他结构行波管的场, 比如耦合腔、环圈、环杆等行波管的场, 有利于完善此类管子的注波互作用理论。

参 考 文 献

- [1] 廖复疆, 孙振鹏, 闫铁昌. 真空电子技术: 信息化武器装备的心脏. 第二版, 北京: 国防工业出版社, 2008, 第 3 章.
- [2] Pierce J R. Traveling Wave Tubes. New York: Van Nostrand, 1950, Chapter 7.
- [3] Chernin D, Antonsen T M Jr, and Levush B. A three-dimensional multifrequency large signal model for helix traveling wave tubes. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 2001, 48(1): 3-11.
- [4] Hu Y L, Yang Z H, and Li Bin, *et al.*. Accurate large signal analysis of a wideband helix TWT using BWIS code. Tenth International Vacuum Electronics Conference, Rome, 2009: 441-442.
- [5] 肖刘, 苏小保, 刘濮鲲. 螺旋带色散特性和耦合阻抗的精确计算. *电子与信息学报*, 2007, 29(3): 751-755.
- [6] 周伟, 肖刘, 苏小保. 螺旋带行波管耦合磁导纳的计算. *强激光与粒子束*, 2009, 21(3): 434-438.
- [7] Soukhov A V, Jung Sun-shin, and Park Gun-sik. Method for measuring interaction impedance in helix TWT. International Vacuum Electronics Conference. Monterey, CA, 2000: 2.
- [8] 朱兆君, 贾宝富, 罗正祥, 王健. 微扰实验法测试螺旋线行波管耦合阻抗及模拟仿真. *强激光与粒子束*, 2008, 20(1): 118-122.
- [9] 雷文强, 杨中海. 三维螺旋慢波电路的精确的冷测模拟. *电子学报*, 2004, 32(3): 516-518.
- [10] Ansoft Corporation. Ansoft HFSS User Manual.(Version 11.0). America: Ansoft Inc., 2007.
- [11] The Mafia Collaboration. Mafia User Manual (Version 2008.00). Germany, CST Inc., 2007.
- [12] Xu Li, Yang ZhongHai, and Li Bin. High-frequency circuit simulator: An advanced three-dimensional finite-element electromagnetic-simulation tool for microwave tubes. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 2009, 56(5): 1141-1151.
- [13] 刘盛刚, 李宏福, 王文祥等. 微波电子学导论. 成都: 电子科技大学, 1985: 174-184.

胡玉禄: 男, 1981 年生, 博士生, 研究领域为物理电子学、计算电磁学、注-波互作用理论.

杨中海: 男, 1944 年生, 博士, 教授, 博士生导师, 研究领域为相对论电子学、微波电子学、等离子体电子学.

李 斌: 男, 1974 年生, 博士, 副教授, 研究领域为物理电子学、微波管 CAD.