

# 太赫兹扩展相互作用振荡器的 矩形耦合腔特性研究

张开春

(电子科技大学物理电子学院 THz 研究中心, 四川成都 610054)

**摘要:** 本文选用矩形耦合腔作为太赫兹扩展相互作用振荡器(EIO)的慢波结构, 鉴于其结构的复杂性, 采用等效电路方法计算其色散. 详细研究了腔体和耦合槽的电路参数, 计算了不同结构尺寸、圆形和矩形电子通道的 0.12THz 和 0.225THz 慢波结构的色散特性. 并采用专业电磁软件, 研究了不同结构参数下的色散特性、耦合阻抗和特征阻抗. 通过对色散特性的比较, 理论结果与电磁软件模拟结果相吻合.

**关键词:** 太赫兹; 矩形耦合腔; 慢波结构; 等效电路方法; 色散特性

**中图分类号:** TN12 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2011) 03-0632-04

## Study of Characteristic of Rectangular Coupled-Cavity Slow-Wave Structure for Extended Interaction Oscillator in Terahertz Band

ZHANG Kai-chun

(THz Research Center, School of Physical Electronics, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu, Sichuan 610054, China)

**Abstract:** A rectangular coupled-cavity was proposed as the slow-wave structure (SWS) for the extended interaction oscillator (EIO) in terahertz (THz) wave. Due to the complexity of the SWS, the equivalent circuit method (ECM) was adopted to calculate the dispersion of the SWS. The circuit parameters of the cavity and the coupling slot have been studied in detail. The dispersion of the SWS, which includes different dimension with a round or a rectangular beam tunnel at the frequency 0.12THz and 0.225THz, was theoretically calculated. Specified electromagnetic software was utilized to simulate the dispersion, the coupling impedance and the characteristic impedance of the SWS. By comparison, the theoretical results of the dispersion agree well with the simulation results.

**Key words:** Terahertz (THz); rectangular coupled-cavity; slow-wave structure (SWS); equivalent circuit method (ECM); dispersion

### 1 引言

太赫兹(Terahertz, THz)波具有非常重要的学术和应用价值<sup>[1]</sup>, 对国民经济发展也将起着重要的推动作用. 扩展相互作用振荡器(Extended Interaction Oscillator, EIO)是至关重要的太赫兹辐射源, 它的频率可以覆盖 0.1THz ~ 0.5THz<sup>[2~4]</sup>, 是一种结构紧凑、工作电压低、效率高的真空电子学太赫兹辐射源. 选择合适的谐振电路和电子枪是发展太赫兹辐射源的核心. EIO 的常规慢波电路为休斯结构, 该结构是一种圆柱同轴结构, 具有全金属结构、耦合阻抗高等特点, 但是鉴于其结构较复杂、加工难度大等特点, 一般只适合于微波管. 当频率扩展至太赫兹频段后, 休斯结构将不再适合. 考虑到结构复杂性、加

工难度、耦合阻抗等因素, 本文采用矩形耦合腔慢波结构作为太赫兹 EIO 的慢波电路. 矩形耦合腔慢波结构相对于休斯结构在加工上具有优势. 当前的微细加工技术

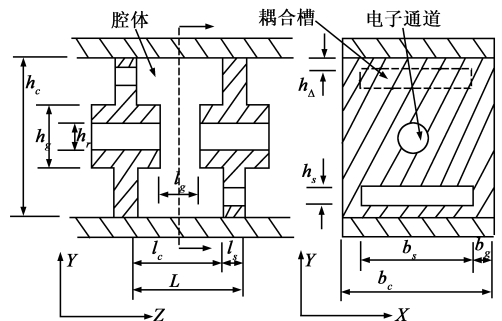


图1 矩形耦合腔慢波结构剖面示意图

更适合加工毫米级或亚毫米级的矩形片状金属,例如 LIGA 技术<sup>[5]</sup>. 矩形耦合腔慢波结构如图 1 所示,鉴于矩形耦合腔慢波结构较复杂,难以采用场匹配的方法进行场分布和色散特性研究,本文拟采用等效电路研究这种慢波结构在太赫兹频段下、不同结构尺寸、不同形状电子通道时的色散特性. 同时,采用专业电磁软件研究这种慢波结构的特性.

## 2 理论研究

慢波器件是微波管、太赫兹源的重要分支之一,它是通过周期慢波结构降低在其中传播的电磁波相速,使靠近慢波结构表面传输的电磁波与电子注同步,从而实现有效的注-波互作用,将电子注能量转化为电磁波能量. 获得周期慢波系统的色散特性是研究慢波器件的基础,慢波结构的色散关系可通过求解满足周期边界条件的 Maxwell 方程得到. 对于矩形耦合腔慢波结构,首先要分很多区域,研究每个区域内的不同模式的场分布,然后在不同区域的三维边界上进行边界匹配,同时还要考虑周期结构的边界条件. 由于分区数量多且需要三维边界匹配,数学上非常复杂. 鉴于此,本文拟采用等效电路研究其色散特性. 对于耦合腔慢波结构,一般采用 Cumow 给出的等效电路<sup>[6]</sup>来计算色散特性,其等效电路如图 2 所示,腔通带的色散关系为

$$\cos \phi = 1 - \frac{2}{Kk_c} \left( 1 - \frac{\omega_c^2}{\omega^2} \right) \left( 1 + k_c - \frac{\omega^2}{\omega_s^2} \right) \quad (1)$$

式中,  $k_c = KL_s/L_c$ ,  $\omega_c$ 、 $\omega_s$  分别为腔体和耦合槽的角频率,  $L_c$ 、 $L_s$  分别为腔体和耦合槽电感,  $K$  为耦合系数,表示流过耦合槽的电流与流过腔体的电流之比. 对色散特性进行量化计算的关键是建立腔体和耦合槽的等效电路模型,最终归结为求电路的电容和电感.

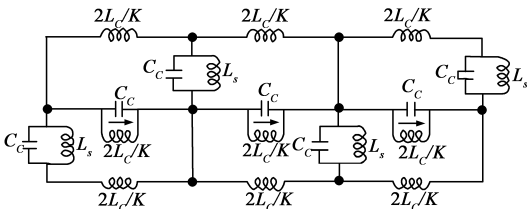


图2 耦合腔链慢波结构等效电路

首先研究腔体的电容和电感. 慢波电路的腔体是一种重入矩形谐振腔,可看作是将脊波导两端短路而构成的脊加载谐振腔. 假设电子注与该谐振腔的  $TM_{110}$  模的纵向电场  $E_z$  互作用,那么可通过计算脊波导的  $TE_{10}$  模的电路参数得到该谐振腔的  $TM_{110}$  模式的频率.

对于脊波导的  $TE_{10}$  模,  $C_g$  为间隙电容,  $C_d$  为间隙不连续性引起的电容,  $C_c = C_g + C_d$ ,  $C_g$ 、 $C_d$  分别为

$$C_g = \frac{\epsilon_0 b_c h_g}{l_g}$$

$$C_d = \frac{\epsilon}{\pi} \left[ \frac{x^2 + 1}{x} \operatorname{ch}^{-1} \left( \frac{1 + x^2}{1 - x^2} - 2 \ln \frac{4x}{1 - x^2} \right) \right] \quad (2)$$

式中  $x = h_g/h_c$ .

上式中的间隙电容没有考虑电子注通道的影响,实际计算中需要扣除电子通道的电容. 对于不同形状的电子注通道,其电容的计算也不一样. 对于圆形孔电子注通道和矩形孔电子注通道,间隙电容分别为

$$C_g = \frac{\epsilon_0 b_c h_g}{l_g} \left[ 1 - \frac{h_h^2 (l_c - l_p)}{l_c h_g^2} \right] \quad (3)$$

$$C_g = \frac{\epsilon_0 b_c h_g}{l_g} \left[ 1 - \frac{h_h b_h (l_c - l_p)}{l_c h_g b_c} \right]$$

脊波导的电感和截止角频率分别为

$$L_c = \frac{\mu_0 (h_c - h_g) l_c}{2b_c}, \quad \omega_{c0} = \frac{1}{\sqrt{L_c C_c}} \quad (4)$$

脊波导的  $TE_{10}$  模实际上是  $TM_{1(y)0(z)}$  模,所以谐振腔的  $TM_{110}$  模式的角频率为

$$\omega_c = \sqrt{\omega_{c0}^2 + c^2 k_x^2}, \quad k_x = \pi/b_c \quad (5)$$

对于慢波结构的耦合槽,可以采用边缘场模型<sup>[7,8]</sup>进行处理,这种方法考虑了耦合槽和腔体之间的场耦合效应. 其电容、电感和角频率分别为

$$C_s = \epsilon_0 b_s (l_s + h_s)/h_s \quad (6)$$

$$L_s = \frac{\mu_0 b_s h_s}{\pi^2 (l_s + h_s)}, \quad \omega_s = \frac{1}{\sqrt{L_s C_s}}$$

耦合系数  $K$  为流过耦合槽的电流与流过腔体的电流之比,近似为耦合槽的截面积与以耦合槽为基准在腔体所形成的矩形环的截面积之比,

$$K = \frac{b_s h_s}{2 [b_s h_s + h_s (h_c - 2h_\Delta - 2h_s)]} \quad (7)$$

## 3 结果和讨论

### 3.1 色散特性计算和比较

我们拟选择两个太赫兹频段和两种不同形状的电子通道的矩形耦合腔慢波结构,并采用上述公式对它们的腔色散进行计算. 为了验证本方法的正确性,采用电磁仿真软件 CST 和 MAGIC 对矩形耦合腔慢波结构的色散特性进行仿真,并与理论研究结果相比较. 对于不同结构的矩形耦合腔慢波结构,其主要参数如表 1 所示.

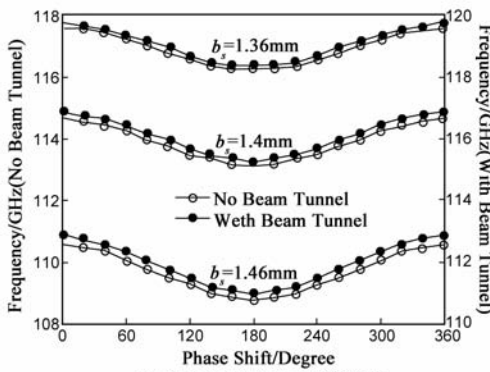
表 1 不同结构的矩形耦合腔慢波结构的主要参数

结构	参数	高度 $h_c$	宽度 $b_c$	周期	电子通道
		(mm)	(mm)	(mm)	(mm)
0.12THz	圆形电子通道	3.0	1.36 ~ 1.46	0.5	$\Phi 0.8$
	矩形电子通道	3.2	1.36 ~ 1.46	0.6	$1.2 \times 0.6$
0.225THz	圆形电子通道	1.6	0.7 ~ 0.8	0.3	$\Phi 0.5$
	矩形电子通道	2.0	0.7 ~ 0.8	0.3	$1 \times 0.4$

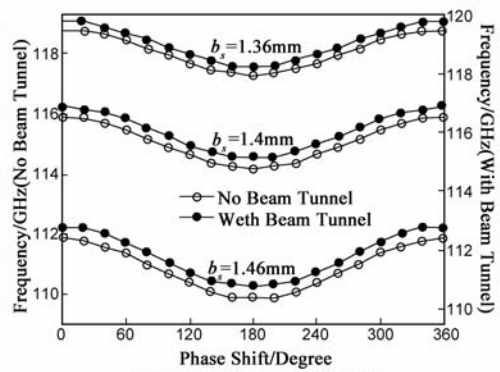
通过编制 Matlab 程序,得到矩形重入耦合腔慢波结构的腔通带色散曲线,如图 3(a)~(d)所示.从图中可以明显发现:腔通带色散曲线的基波为返波,这是由于耦合槽位于磁场最强的地方,属于磁耦合;相同结构尺寸以及相移下,有电子通道的频率高于无电子通道的,这是由于电容减小的缘故;色散曲线的位置随着腔体宽度的增加而降低,这是由于  $TM_{10}$  模的  $k_x$  增加了.

对于 0.225THz 圆形电子通道结构 ( $b_c = 0.76\text{mm}$ ),当其他参数保持不变、单独改变  $b_s$  和  $h_s$  时,腔通带色散曲线如图 4、图 5 所示.从图中可以明显发现:当  $b_s$  和  $h_s$  增加时,频率降低,这是由于耦合槽的体积减小,根据微扰原理,耦合槽处的磁能将减少,因此频率降低.

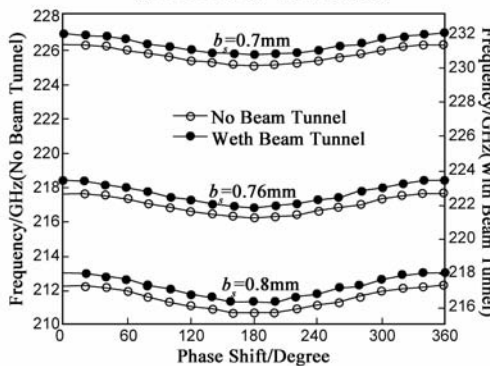
现在,利用 CST 和 MAGIC 分别模拟圆形电子通道



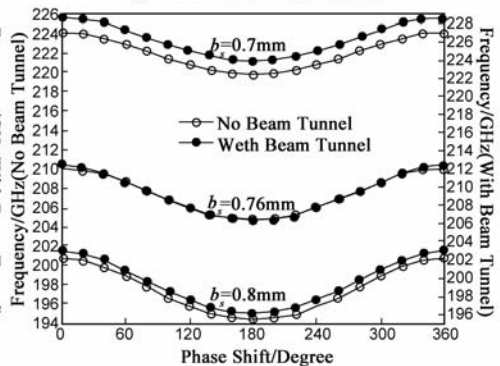
(a) 0.12THz 圆形电子通道结构



(b) 0.12THz 矩形电子通道结构



(c) 0.225THz 圆形电子通道结构



(d) 0.225THz 矩形电子通道结构

图3 矩形耦合腔的色散曲线

0.12THz ( $b_c = 1.4\text{mm}$ ) 和 0.225THz ( $b_c = 0.76\text{mm}$ ) 慢波结构的腔通带色散曲线并与理论结果进行比较,图 6、图 7 分别给出了它们的色散曲线的比较.从图中可以明显看出,模拟结果和理论计算结果比较吻合.

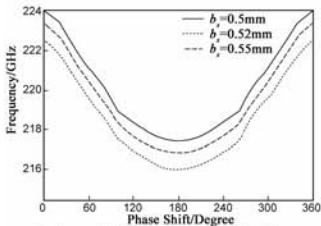


图4 色散曲线随  $b_s$  的变化

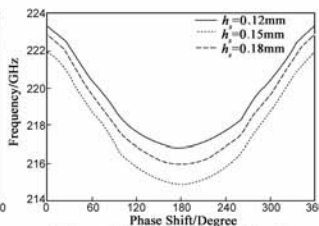


图5 色散曲线随  $h_s$  的变化

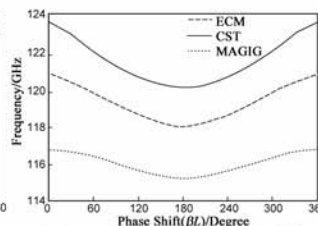


图6 0.12THz 圆形电子通道慢波系统

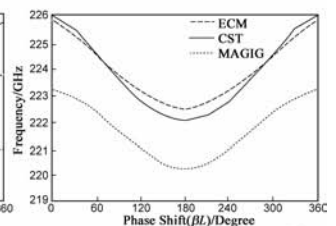


图7 0.225THz 圆形电子通道慢波系统

### 3.2 阻抗研究

耦合阻抗是衡量电子注与慢波系统中场相互作用的有效程度. EIO 的慢波系统是一种慢波谐振腔,除了研究其耦合阻抗外,还需要研究其特征阻抗. 根据耦合阻抗定义,在 CST 中编制后处理模块程序,计算耦合阻抗,再通过耦合阻抗和特征阻抗的关系,计算出相应的特征阻抗. 在周期慢波系统中,第  $n$  次空间谐波的耦合阻抗可表示为:

$$K_n = \frac{E_{zn}^2}{2\beta_n^2 P_{rf}}, \quad \beta_n = \beta_0 + \frac{2n\pi}{L} \quad (8)$$

式中  $E_{zn}$  为第  $n$  次空间谐波的纵向场的幅值,  $\beta_0$  为基波的传播常数,  $\beta_n$  为第  $n$  次空间谐波的传播常数,  $P_{rf}$  为轴

向传播的高频场功率流,  $L$  为结构周期.

特征阻抗定义为

$$\frac{R_s}{Q} = \frac{V^2}{2\omega W} \quad (9)$$

$W$  为储能,  $R_s$  是并联阻抗,  $Q$  是品质因数,  $V$  是电压. 在慢波结构谐振腔中,如果工作在  $2\pi$  模,那么谐振腔内的电场幅值是行波时的 2 倍. 在行波状态时,耦合阻抗<sup>[9]</sup>

$$K_n = \frac{E_{zn}^2}{2\beta_n^2 P_{rf}} = \frac{E_{zn}^2}{2\beta_n^2 v_g W} = \frac{E_0^2}{8\beta_n^2 v_g W} \quad (10)$$

$E_{zn}$  为行波场的幅值,  $E_0$  为驻波场的幅值. 那么,特征阻抗与耦合阻抗的关系为<sup>[9]</sup>

$$K_n = \frac{R_s v_p}{Q v_g} \frac{1}{n\pi} \quad (11)$$

式中,  $v_p$ 、 $v_g$  分别是电磁波的相速和群速。

在 CST 模拟中,通过测量在不同相移下空间谐波的高频场分布及功率流,就可以计算出所对应的耦合阻抗和特征阻抗.耦合阻抗和特征阻抗的计算结果如图 8 和图 9 所示,可以更清楚地发现阻抗较大且阻抗随相移的变化不是单调变化的,在  $2\pi$  附近,阻抗最大.这两图所对应的结构分别为 0.12THz ( $b_c = 1.4\text{mm}$ ) 圆形电子孔通道和 0.225THz ( $b_c = 0.76\text{mm}$ ) 圆形电子孔通道.

在 MAGIC 中,通过测量慢波谐振系统在  $2\pi$  模下的并联阻抗和品质因数就可以计算出特征阻抗.对于

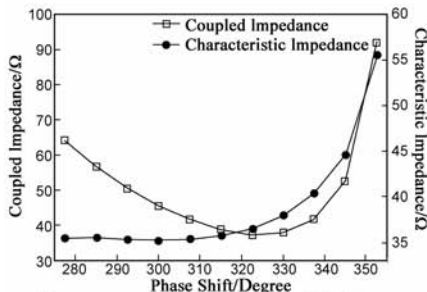


图8 0.12THz的阻抗随相移的变化

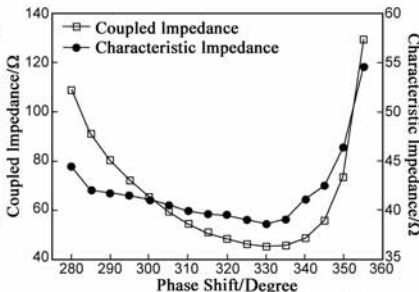


图9 0.225THz的阻抗随相移的变化

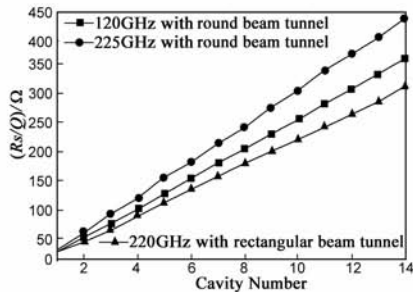


图10 不同结构的特征阻抗随谐振腔数的变化

## 4 结论

本文选用矩形耦合腔作为太赫兹 EIO 的慢波系统,在计算矩形耦合腔慢波结构的色散时,鉴于其结构的复杂性,难以采用场匹配进行理论研究,本文采用等效电路研究.计算了不同结构、0.12THz 和 0.225THz 矩形耦合腔慢波结构的色散特性.利用电磁软件 CST 和 MAGIC,研究了太赫兹频段下、特定结构慢波系统的特性,包括色散特性、耦合阻抗和特征阻抗.通过对特定结构的色散特性的比较,理论结构和模拟结果相吻合,误差较小,表明本文的等效电路模型是可行的.

## 参考文献

- [1] 刘盛纲. 太赫兹科学技术的新发展[J]. 中国基础科学, 2006, 8(1): 7-12.  
Liu Shenggang. Recent development of terahertz science and technology[J]. China Basic Science, 2006, 8(1): 7-12. (in Chinese)
- [2] 吴振华, 张开春, 刘盛纲. 折叠波导结构的 THz 震荡辐射源研究[J]. 电子学报, 2009, 37(12): 2677-2680.  
Wu Zhenhua, Zhang Kaichun, Liu Shenggang. Research of THz folded waveguide oscillator radiation source[J]. Acta Electronic Sinica, 2009, 37(12): 2677-2680. (in Chinese)
- [3] Roitman A, Berry D, Hyttinen M, et al. Sub-millimeter waves from a compact, low voltage extended interaction klystron[A]. IRMMW-THz, 2007[C]. Cardiff: IEEE, 2007. 892-894.
- [4] McMillan R W, Trussell C W, Bohlander R A, et al. An experi-

0.12THz ( $b_c = 1.4\text{mm}$ ) 圆形电子孔通道、0.225THz ( $b_c = 0.76\text{mm}$ ) 圆形电子孔通道和 0.22THz ( $b_c = 0.76\text{mm}$ ) 矩形电子孔通道的慢波谐振系统,从图 3 中可以大致估计出在  $2\pi$  模的谐振频率.在 MAGIC 中,利用 EIGENMODE 命令,设置此频率做参考值,并在此频率附近扫描谐振系统的谐振频率.对不同谐振腔数的谐振系统,分别进行模拟研究,通过计算,特征阻抗随谐振腔数的变化如图 10 所示.从图中,可以明显发现:特征阻抗与谐振腔数近似成正比,正好与文献[9]相吻合;MAGIC 对双腔、 $2\pi$  模的特征阻抗的模拟结果与 CST 模拟结果一致.

mental 225 GHz pulsed coherent radar[J]. IEEE Trans MTT, 1991, 39(3): 555-562.

- [5] Becker E W, Ehrfeld W, Hagmann P, et al. Fabrication of microstructures with high aspect ratios and structural heights by synchrotron radiation lithography, galvanofarming, and plastic molding (LIGA process) [J]. Microelectronic Engineering, 1986, 4(1): 35-56.
- [6] Curnow H J. A general equivalent circuit for coupled cavity slow-wave structures[J]. IEEE Trans MTT, 1965, 13(5): 671-675.
- [7] Allen M A, Kino G S. On the theory of strongly coupled cavity chains[J]. IRE Trans MTT, 1960, 8(3): 362-372.
- [8] Carter R G, Liu S K. Method for calculating the properties of coupled-cavity slow-wave structures from their dimensions[J]. IEE proceedings, 1986, 133: 330-334.
- [9] Chodorow M, Wessel-Berg T. A high-efficiency klystron with distributed interaction[J]. IRE Trans ED, 1961, 8(1): 44-55.

## 作者简介



张开春 男, 1972 年 3 月生于四川旺苍, 博士, 副研究员. 研究方向为物理电子学和太赫兹科学技术.

E-mail: zh.kch@163.com