

# X波段介质和金属膜片混合加载行波加速结构的传播特性计算及模型腔的有关研究\*

吴丛凤<sup>1)</sup> 董赛 林辉 裴元吉

(中国科学技术大学国家同步辐射实验室 合肥 230029)

**摘要** 计算了X波段( $f = 9.37\text{GHz}$ )介质和金属膜片混合加载行波加速结构的 $TM_{01}$ 模和 $HEM_{11}$ 模的色散曲线,结果表明 $HEM_{11}$ 模的截止频率比 $TM_{01}$ 模的低,说明与盘荷波导相比,该种新加速结构单束团的BBU效应得到改善.实验研究优选得到了适用于该种新加速结构的介质( $\epsilon_r = 5.812$ ).采用MAFIA程序优化设计了模型腔,测试频率与设计的数值吻合得很好.

**关键词** 介质和金属膜片混合加载 高梯度 介电常数

## 1 引言

X波段高梯度加速结构已广泛应用在高能物理研究、医用和工业应用等领域.常用的盘荷波导的盘片处的峰值表面电场 $E_s$ 很大,大约皆是最大加速电场 $E_a$ 的2倍以上<sup>[1]</sup>.而且由于大的峰值表面电场而引起弧放电等而损坏盘片的现象已在高梯度(50MV/m以上)实验中观测到<sup>[2, 3]</sup>.介质线圆波导行波加速结构的轴向加速电场最大,而且实验已证实这种结构的高次模衰减得很快<sup>[4]</sup>,但该种结构的 $Q$ 值很低.兼顾上述两种结构的优点,可知采用介质和金属膜片混合加载行波加速结构具有一定优越性.目前国际上只有Argonne国家实验室对该种新加速结构<sup>[1]</sup>进行了初步数值计算.

盘荷波导 $TM_{01}$ 模的传播特性计算大家很熟悉,但是 $HEM_{11}$ 模对粒子加速来说是很有害的偏转模,本文用场匹配方法分析计算了X波段该种新加速结构的 $TM_{01}$ 模和 $HEM_{11}$ 模的传播特性,并与MAFIA程序的计算结果进行比较.采用自行研制的波导谐振腔,测量有无介质样品时谐振频率的偏移量,并用微扰理论计算介质的相对介电常数;而且实验研究它随频率变化的特性和同种介质不同样品的一致性.根据优选到的介质的介电常数值,用MAFIA程序,进行大量计

算、优化设计X波段( $f = 9.37\text{GHz}$ )新加速结构的模型腔,并用谐振方法测试谐振频率.

## 2 模的传播特性计算

该种新加速结构如图1所示, $a$ 是盘片半径, $b$ 是外半径, $h$ 是束流孔径, $t$ 是盘片厚度, $d = 10.67\text{mm}$ 是

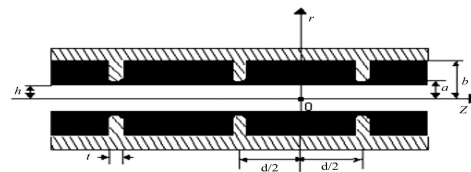


图1 新加速结构示意图

单元的长度.该结构须分为3个区域,根据Maxwell方程和Floquet定律可得:

区域 I ( $r \leq h$ ):

$$E_z^{(1)} = \sum_{n=-\infty}^{n=\infty} A_n^{(1)} J_m(k_{rn}^{(1)} r) e^{-i\beta_n z} \cos(m\theta), \quad (1)$$

$$H_z^{(1)} = \sum_{n=-\infty}^{n=\infty} B_n^{(1)} J_m(k_{rn}^{(1)} r) e^{-i\beta_n z} \sin(m\theta), \quad (2)$$

\* 国家自然科学基金(10375060, 10205014)和中国科学院知识创新课题基金资助

1) E-mail: cfwu@ustc.edu.cn

$$H_{\theta}^{(1)} = \sum_{n=-\infty}^{n=\infty} \frac{-i}{(k_{rn}^{(1)})^2} [A_n^{(1)} \omega \varepsilon_0 J'_m(k_{rn}^{(1)} r) + B_n^{(1)} \frac{\beta_n m}{r} J_m(k_{rn}^{(1)} r)] e^{-i\beta_n z} \cos(m\theta), \quad (3)$$

$$E_{\theta}^{(1)} = \sum_{n=-\infty}^{n=\infty} \frac{i}{(k_{rn}^{(1)})^2} [A_n^{(1)} \frac{\beta_n m}{r} J_m(k_{rn}^{(1)} r) + B_n^{(1)} \omega \mu J'_m(k_{rn}^{(1)} r)] e^{-i\beta_n z} \sin(m\theta), \quad (4)$$

区域II ( $h \leq r \leq a$ ):

$$E_z^{(2)} = \sum_{n=-\infty}^{n=\infty} [A_{1n}^{(2)} J_m(k_{rn}^{(2)} r) + A_{2n}^{(2)} Y_m(k_{rn}^{(2)} r)] \times e^{-i\beta_n z} \cos(m\theta), \quad (5)$$

$$H_z^{(2)} = \sum_{n=-\infty}^{n=\infty} [B_{1n}^{(2)} J_m(k_{rn}^{(2)} r) + B_{2n}^{(2)} Y_m(k_{rn}^{(2)} r)] \times e^{-i\beta_n z} \sin(m\theta), \quad (6)$$

区域III ( $a \leq r \leq b$ ):

$$E_z^{(3)} = \sum_{s=0}^{s=\infty} A_s^{(3)} F_0(k_{rs}^{(3)} r) \begin{Bmatrix} \cos(\eta_s z) \\ i \sin(\eta_s z) \end{Bmatrix} \cos(m\theta), \quad (7)$$

$$H_z^{(3)} = \sum_{s=1}^{s=\infty} B_s^{(3)} F_1(k_{rs}^{(3)} r) \begin{Bmatrix} i \sin(\eta_s z) \\ \cos(\eta_s z) \end{Bmatrix} \sin(m\theta), \quad (8)$$

其中,

$$F_0 = J_m(k_{rs}^{(3)} r) - \frac{J_m(k_{rs}^{(3)} b)}{Y_m(k_{rs}^{(3)} b)} Y_m(k_{rs}^{(3)} r),$$

$$F_1 = J_m(k_{rs}^{(3)} r) - \frac{J'_m(k_{rs}^{(3)} b)}{Y'_m(k_{rs}^{(3)} b)} Y_m(k_{rs}^{(3)} r),$$

$$(k_{rn}^{(1)})^2 = k^2 - \beta_n^2, \quad (k_{rn}^{(2)})^2 = \varepsilon_r k^2 - \beta_n^2,$$

$$(k_{rs}^{(3)})^2 = \varepsilon_r k^2 - \eta_s^2, \quad \beta_n = \beta_0 + \frac{2n\pi}{d},$$

$$\eta_s = \frac{s\pi}{d_0}, \quad d_0 = d - t.$$

$k$  是自由空间波数,  $\varepsilon_r$  是介质的相对介电常数,  $\beta_n$  是  $n$  阶空间谐波的传播常数,  $J_m, Y_m$  分别是  $m$  阶第一类和第二类贝塞尔函数,  $A_n^{(1)}, B_n^{(1)}, A_{1n}^{(2)}, A_{2n}^{(2)}, B_{1n}^{(2)}, B_{2n}^{(2)}, A_s^{(3)}$  和  $B_s^{(3)}$  是待定常数.

在边界  $r = h$  和  $r = a$  处, 由场的切向分量连续可得出齐次线性方程组:

$$U \begin{pmatrix} A_n^{(1)} & A_{1n}^{(2)} & A_{2n}^{(2)} & A_n^{(3)} & B_n^{(1)} & B_{1n}^{(2)} & B_{2n}^{(2)} & B_n^{(3)} \end{pmatrix}^T = 0. \quad (9)$$

(9)式有非零解的条件是系数行列式为零:

$$\text{Det}(U) = 0, \quad (10)$$

由(10)式可确定色散关系. 图2是当  $a = 5.5\text{mm}$ ,  $b = 6.764\text{mm}$ ,  $t = 1.5\text{mm}$ ,  $h = 2.5\text{mm}$ ,  $\varepsilon_r = 5.812$  时基模 ( $m = 0$ ) 和高次模 ( $m = 1$ ) 的色散曲线, 与用 MAFIA 程序计算的结果相一致, 有趣的是  $HEM_{11}$  模的截止频率比  $TM_{01}$  模的低(与盘荷波导的结果相反), 由于偏转力是  $\sin(kz)$  的函数, 这意味着该种新加速结构与盘荷波导相比, 能有效改善单粒子的 BBU 不稳定性.

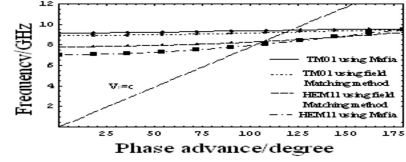


图2  $TM_{01}$  模的频率和相位的关系曲线

### 3 介质相对介电常数的实验研究

自行研制的 X 波段矩形波导谐振器, 长度  $L$  可调范围为  $104\text{--}120\text{mm}$ , 横截面: 宽  $a = 22.86\text{mm}$ , 高为  $10\text{mm}$ , 顶端用于插样品的裂缝宽为  $3\text{mm}$ . 测量有无介质样品时谐振频率的偏移量, 图3给出的是 HP8722D 网络分析仪测量的谐振器在有无介质样品两种状态时的 S21 参数, 谐振频率分别为  $f_0 = 9.412\text{GHz}$  和  $f = 9.163\text{GHz}$ . 根据微扰理论可计算出  $\varepsilon_r$ , 表1给出了一种介质介电常数  $\varepsilon_r$  在 X 波段随频率  $f$  的变化规律, 结果表明, 该种介质的  $\varepsilon_r$  随频率变化缓慢, 另外大量实验表明, 该种介质的不同样品的实验结果一致性好. 以上性质说明它适用于新加速结构中.

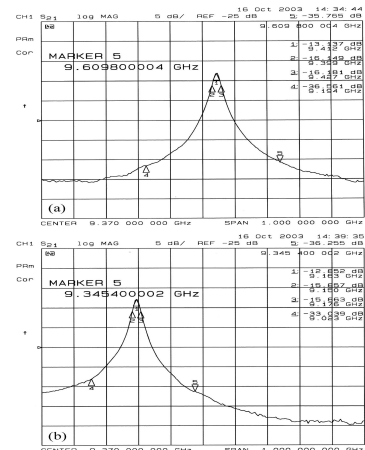


图3 测量的谐振器的传输参数S21

(a) 无介质样品; (b) 有介质样品.

表1 介质的相对介电常数与频率的关系

$f$	9.1199	9.2740	9.4120	9.6108	9.8055
$\varepsilon_r$	5.8046	5.8117	5.8129	5.8177	5.7977

## 4 模型腔的研制和测量

基于上述实验测得的  $\varepsilon_r = 5.812$ , 用 MAFIA 程序对结构的特性参数与结构尺寸的关系进行大量计算, 表 2 给出一组典型的数据(工作模式为  $2\pi/3$  模). 按照表 2 的数据加工了一组模型腔. 用谐振法对 3 个腔进行测量, 测得的  $S_{21}$  参数和频率的关系曲线如图 4 所示,  $2\pi/3$  模的谐振频率  $f_{\text{测}} = 9.373\text{GHz}$ , 与理论设计值吻合得较好. 但  $Q$  值较低, 正在改善条件, 作进一步测量.

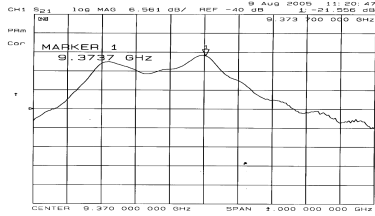


图 4 模型腔的  $S_{21}$  参数和频率的关系曲线

表 2 典型的结构尺寸和特性参数数据

$a/\text{mm}$	$b/\text{mm}$	$h/\text{mm}$	$\varepsilon_r$	$E_s/E_a$	$r/(\text{M}\Omega/\text{m})$	$Q$
5.5	6.764	2.5	5.812	0.9902	68.71	6011.81

## 5 结论

用场匹配方法推导计算了 X 波段介质和金属膜片混合加载行波加速结构的基模和高次模的色散曲线, 与用 MAFIA 程序计算的结果相一致, 结果表明,  $HEM_{11}$  模的截止频率比  $TM_{01}$  模的低, 说明新加速结构与盘荷波导相比具有明显优越性, 即有效改善单粒子 BBU 不稳定性. 实验研究表明, 在 X 波段存在合适相对介电常数 ( $\varepsilon_r = 5.81$ ) 的介质(陶瓷), 它的频带特性较稳定, 且该种介质的不同样品的一致性较好. 采用 MAFIA 程序优化设计了模型腔, 实验测试表明, 腔的谐振频率与设计的数值吻合得好. 以上计算和实验结果为实现高梯度加速的新加速结构的研制提供了重要依据.

## 参考文献(References)

- ZOU P, XIAO L L, SUN X et al. J. Appl. Phys., 2001, 90(4): 2017—2023
- Adolphsen C, Baumgartner W, Jobe K, Loewen et al. RF Processing of X-Band Accelerator Structures at the NLCTA. SLAC-PUB-8573, Stanford Linear Accelerator Center, Stanford University, August 2000
- Loewen R J, Menegat A, Vlieks A E et al. Proceedings of 1999 Particle Accelerator Conference. New York, 1999. 3420—3422
- Chojnacki E, Gai W, Ho C et al. J. Appl. Phys., 1991, 69(9): 6257—6260

# Calculations of Propagation Characteristics and the Model Cavity Investigations for a X-Band Hybrid Dielectric-Iris-Loaded Traveling Accelerating Structure\*

WU Cong-Feng<sup>1)</sup> DONG Sai LIN Hui PEI Yuan-Ji

(National Synchrotron Radiation Lab, USTC, Hefei 230029, China)

**Abstract** The dispersion curves of the  $TM_{01}$  and  $HEM_{11}$  modes for the X-band hybrid dielectric-iris-loaded travelling accelerating structure have been calculated. The results show that the cutoff frequency and the propagation constant of  $HEM_{11}$  mode are lower than those of the  $TM_{01}$  mode. We have found that the certain dielectric available with permittivity of 5.81 is applied to the design of the new accelerating structure. The MAFIA code has been used to optimize the model cavities, and the measurements indicate that the resonance frequency is consistent with the design frequency.

**Key words** hybrid dielectric-iris-loaded travelling accelerating structure, high gradient, permittivity

\*Supported by National Nature Science Foundation of China (10375060, 10205014) and CASKIP-NSRL

1) E-mail: cfwu@ustc.edu.cn