

## 带有锥度结构的同轴开槽布拉格反射器研究\*

兰峰<sup>†</sup> 杨梓强 史宗君

(电子科技大学物理电子学院, 成都 610054)

(2010年9月10日收到; 2010年11月22日收到修改稿)

本文提出在  $K\alpha$  波段圆柱过模结构绕射辐射器件(RDG)中引入一种带有锥度结构的同轴内开槽布拉格反射器. 采用复功率守恒技术(CCPT)对该反射器的频率响应特性进行分析. 研究了相位匹配段长度, 波纹槽深及锥度对反射器频率响应特性的影响, 分析了波纹初始相位对反射器选模特性的影响, 发现该反射器具有良好的模式选择特性. 本文的研究工作为同轴 Bragg 反射器结构的研究提供了重要的理论分析手段.

**关键词:** 同轴 Bragg 反射器, 频率响应特性, 复功率守恒, 绕射辐射振荡器

**PACS:** 11. 55. - m, 42. 79. Fm

## 1. 引言

毫米波段的相对论绕射辐射振荡器(RDG)中实现注波相互作用能量转换的高频系统通常采用大尺寸的过模慢波结构<sup>[1-4]</sup>, 因为增大尺寸能够增加电子束的注入电流并提高功率容量. 由于该器件通常工作在  $TM_{01}$  模的  $-1$  次空间谐波, 即电磁波的能量是逆电子束运动方向传输. 为了使高功率的电磁波能够有效输出, 需要在电子注进入高频系统的输入端采用反射器<sup>[5]</sup>, 使电磁波反射后沿电子束运动方向传输, 并通过喇叭天线输出. 由于高频系统采用大尺寸过模结构, 通常截止波导式反射器不能满足系统的要求, 为此本文提出了采用具有锥度结构的内开槽同轴 Bragg 反射器, 如图 1 所示, 实现对器件工作模式  $TM_{01}$  模的反射.

Bragg 反射器由于具有良好的频率选择特性, 已被广泛应用于光电子器件<sup>[6-8]</sup>及微波电子器件中<sup>[9-12]</sup>. 通常情况下采用商用软件如 HFSS, CST 等进行仿真<sup>[13-15]</sup>, 或采用耦合波理论(CWT)可以完成 Bragg 反射器的设计<sup>[16, 17]</sup>. 仿真技术结果可靠性高, 但费时长; 耦合波理论能有效处理传输波导中的微扰问题<sup>[18, 19]</sup>, 但是难以解决如图 1 所示的同轴线-圆波导这种突变结构, 特别是难以处理同轴 Bragg 正弦锥度结构中存在 TEM- $TM_{0n}$  模式不连续情

况<sup>[20]</sup>. 本文采用复功率守恒理论(CCPT)<sup>[21-24]</sup>, 基于微波网络观点对同轴 Bragg 反射器特性进行研究. 将传输波和凋落波共同组成系统  $S$  矩阵, 在求出一个周期单元传输矩阵的基础上, 通过级联方法求出 Bragg 周期结构的散射特性. 通过数值计算获得了带有锥度结构同轴内开槽 Bragg 反射器频率响应特性, 计算结果与仿真结果基本一致.

## 2. 物理模型

反射器由同轴正弦渐变段与光滑相位匹配段构成, 图 1(a)为具有 Bragg 反射器的毫米波相对论 RDG 的结构示意图. 反射器置于圆柱周期结构前端, 电子注通道内, 与器件共轴, 同轴正弦渐变段由周期波纹状的导体壁形成. 当电磁波沿  $-Z$  方向通过波纹周期结构时, 由于内壁波纹的不均匀性产生散射, 调节反射器的结构参数使正反向电磁波之间满足 Bragg 条件<sup>[10]</sup>, 则波在经过每一截面时都将产生反射, 即分布反馈式机理

$$K_{//}^{+} - K_{//}^{-} = 2\pi/P_b, \quad (1)$$

式中  $K_{//}^{+}$  为轴向的前向波和反向波波数,  $P_b$  为反射器波纹周期长度. 图 1(b)为 Bragg 反射器阶梯模型示意图, 其中  $b$  为外导体内壁平均半径,  $a_0$  为内导体外壁平均半径,  $h_0$  是波纹槽平均深度,  $l_p$  为相位匹配段长度,  $\Delta l$  为矩形阶梯长度,  $L$  为波纹段总长

\* 国家自然科学基金(批准号: 10975031, 11075032)资助的课题

<sup>†</sup> E-mail: lanf998@tom.com

度,  $\varphi_{in}$  为正弦波纹的初始相位,  $\theta$  为同轴内导体半径变化锥度,  $Z$  为反射器轴向距离. 同轴反射器内导体

半径随  $Z$  变化的函数式如下:

$$a_{in} - a_0 - z \tan(\theta) = h_0 \cos(2\pi z/P_b + \varphi_{in}). \quad (2)$$

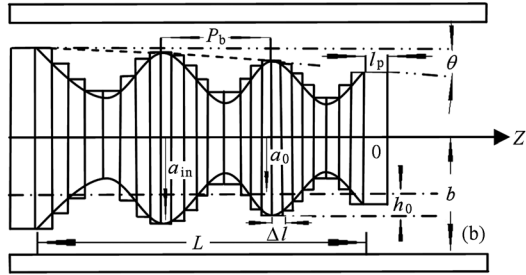
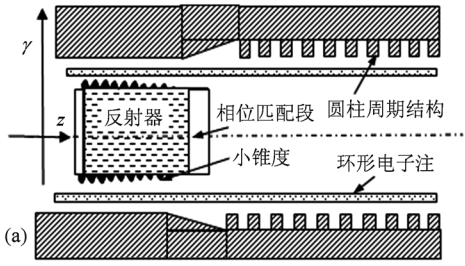


图1 毫米波相对论 RDG 中带有锥度结构的 Bragg 反射器示意图 (a)毫米波相对论 RDG 原理示意图;(b) Bragg 反射器阶梯近似模型示意图

由于反射器需要对  $TM_{01}$  模具有较高的反射率, 采用同轴结构将不可避免地产生 TEM 模, 因此在圆柱-同轴结构接头处将发生  $TM_{01}$ -TEM 的模式转换, 一部分  $TM_{01}$  模反射, 一部分转换为 TEM 模继续在同轴结构中传输. 为增强  $TM_{01}$  模的反射效率, 在反射器前端设置了光滑相位匹配段. 因此 TEM 模沿同轴 Bragg 结构传输过程中, 将被重新反射回同轴-圆柱结构接头处, 利用接头处突变引起的模式转换以及相位匹配段的相位重匹配作用, 将 TEM 模转换为  $TM_{01}$  模, 从而有效提高  $TM_{01}$  模的反射效率.

### 3. 基于 CCPT 的 Bragg 反射器基本理论

采用复功率守恒技术对正弦小锥度同轴内开槽 Bragg 反射器进行分析时, 将正弦波纹近似成多个微小的矩形阶梯级联, 对正弦波纹周期的散射参数可以进行级联迭代<sup>[25]</sup>.

与  $z=0_+$  处的横向电场和磁场表示如下:

$$\begin{aligned} \mathbf{E}_{t1} &= \sum_{m=1}^{\infty} (A_{1m}^+ + A_{1m}^-) \mathbf{e}_{1m}, \\ \mathbf{H}_{t1} &= \sum_{m=1}^{\infty} (A_{1m}^+ - A_{1m}^-) Y_{1m} \mathbf{z} \times \mathbf{e}_{1m}, \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \mathbf{E}_{t2} &= \sum_{n=1}^{\infty} (B_{1n}^- + B_{1n}^+) \mathbf{e}_{2n}, \\ \mathbf{H}_{t2} &= \sum_{n=1}^{\infty} (B_{1n}^- - B_{1n}^+) Y_{2n} \mathbf{z} \times \mathbf{e}_{2n}, \end{aligned} \quad (4)$$

式中“+”和“-”分别表示波导(Guide)接头处的入射波和反射波, 矢量函数  $\mathbf{e}_{1m}$  和  $\mathbf{e}_{2n}$  分别是波导 1,2 的横向电场,  $m$  和  $n$  表示对应波导 1 和 2 中考虑的模式数,  $Y_{1m}$  和  $Y_{2n}$  分别是波导 1,2 的模式导纳, 接头处各个模式的幅值通过接头  $J_1$  和  $J_2$  的散射矩阵  $[S^1]$  和  $[S^2]$  联系起来:

$$\begin{bmatrix} A_{1m}^+ \\ B_{1n}^- \end{bmatrix} = [S^1] \begin{bmatrix} A_{1m}^+ \\ B_{1n}^+ \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} B_{2n}^- \\ C_{2k}^- \end{bmatrix} = [S^2] \begin{bmatrix} B_{2n}^+ \\ C_{2k}^+ \end{bmatrix}, \quad (5)$$

$$\begin{aligned} A_{1m}^+ &= [A_{TM_{01}}^+ \quad A_{TM_{02}}^+ \quad \cdots \quad A_{TM_{0m}}^+]^T \\ &= [1 \quad 0 \quad \cdots \quad 0]^T. \end{aligned} \quad (6)$$

$\mathbf{e}_{1m}$  和  $\mathbf{e}_{2n}$  满足电场边界条件, 并由模式正交性可得波导接头处的电场模式匹配矩阵

$$B_{1n}^- + B_{1n}^+ = [M_{nm}^1] (A_{1m}^+ + A_{1m}^-), \quad (7)$$

根据接头处的复功率守恒原理, 即  $P_{1in} = P_{2out} + P_w$ , 假定内导体为理想金属, 则  $P_w = 0$ , 可从电场模式匹配矩阵得到  $J_1$  处的磁场模式匹配矩阵

$$\begin{aligned} [M_{nm}^1]^H [Y_{2n}] (B_{1n}^- - B_{1n}^+) \\ = [Y_{1m}] (A_{1m}^+ - A_{1m}^-), \end{aligned} \quad (8)$$

其中, 上标 H 表示 Hermitian 转置运算,  $M_{nm}^1$  为接头  $J_1$  (圆波导-同轴波导) 处的模式匹配矩阵.  $M_{nm}^1$  中的矩阵元素分别为<sup>[26]</sup>

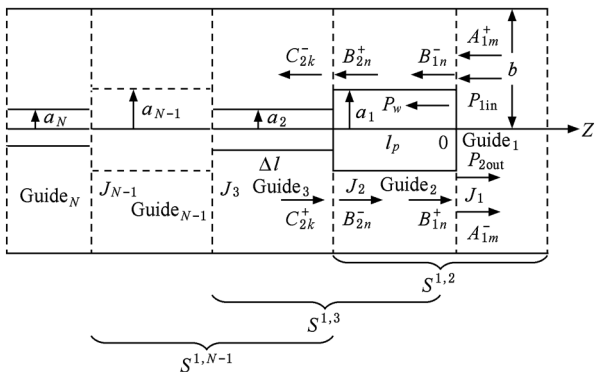


图2 同轴 Bragg 反射器阶梯模型的级联散射矩阵示意图

图2 所示圆波导与同轴波导突变处, 即  $z=0_+$

TM<sub>qm</sub> - TM<sub>qn</sub>

$$M_{nm}^1 = \frac{2K_{[2n]}k_{[1m]}a_1 J_q(K_{[2n]}a_1) D_q(k_{[1m]}a_1, k_{[1m]}a_1)}{(K_{[2n]}^2 - k_{[1m]}^2) J_{q+1}(x_{[2n]}) x_{[2n]} R_{[1m]}}; \quad (9)$$

TE<sub>qm</sub> - TE<sub>qn</sub>:

$$M_{nm}^1 = \frac{2k_{(1m)}^2 K_{(2n)} a_1 E_q(k_{(1m)} a_1, k_{(1m)} a_1) J'_q(K_{(2n)} a_1)}{(k_{(1m)}^2 - K_{(2n)}^2) R_{(1m)} (x_{(2n)}^2 - q^2)^{1/2} J_q(x_{(2n)})}; \quad (10)$$

TE<sub>qm</sub> - TM<sub>qn</sub>:

$$M_{nm}^1 = \frac{2q J_q(K_{[2n]} a_1) E_q(k_{(1m)} a_1, k_{(1m)} a_1)}{J_{q+1}(x_{[2n]}) x_{[2n]} R_{(1m)}}; \quad (11)$$

TEM-TM<sub>0n</sub>:

$$M_{0m}^1 = \frac{2\sqrt{\pi} J_q(K_{[2n]} a_1)}{J_{q+1}(x_{[2n]}) x_{[2n]} T_{[10]}}. \quad (12)$$

接头 J<sub>2</sub> (同轴波导-同轴波导) 处的模式匹配矩阵 M<sup>2</sup><sub>nm</sub> 中的矩阵元素分别为

TM<sub>qm</sub>-TM<sub>qn</sub>:

$$M_{nm}^2 = \frac{2k_{[2n]}^2 k_{[1m]} a_1 C_q(k_{[2n]} a_2, k_{[2n]} a_1) D_q(k_{[1m]} a_1, k_{[1m]} a_1)}{(k_{[2n]}^2 - k_{[1m]}^2) R_{[2n]} R_{[1m]}}; \quad (13)$$

TE<sub>qm</sub>-TE<sub>qn</sub>:

$$M_{nm}^2 = \frac{2k_{(1m)}^2 k_{(2n)} a_1 E_q(k_{(1m)} a_1, k_{(1m)} a_1) F_q(k_{(2n)} a_2, k_{(2n)} a_1)}{(k_{(1m)}^2 - k_{(2n)}^2) R_{(1m)} R_{(2n)}}; \quad (14)$$

TE<sub>qm</sub>-TM<sub>qn</sub>:

$$M_{nm}^2 = \frac{2q C_q(k_{[2n]} a_2, k_{[2n]} a_1) E_q(k_{(1m)} a_1, k_{(1m)} a_1)}{R_{[2n]} R_{(1m)}}; \quad (15)$$

TEM-TM<sub>0n</sub>:

$$M_{n0}^2 = 2\sqrt{\pi} C_q(k_{[2n]} a_2, k_{[2n]} a_1) / (R_{[2n]} T_{[10]}); \quad (16)$$

TEM-TEM:

$$M_{00}^2 = T_{[10]} / T_{[20]}. \quad (17)$$

其中

$$C_q(x, y) = J_q(x) Y_q(y) - Y_q(x) J_q(y), \quad (18)$$

$$D_q(x, y) = J_q(x) Y'_q(y) - Y_q(x) J'_q(y), \quad (19)$$

$$E_q(x, y) = J'_q(x) Y_q(y) - Y'_q(x) J_q(y), \quad (20)$$

$$F_q(x, y) = J'_q(x) Y'_q(y) - Y'_q(x) J'_q(y), \quad (21)$$

$$T_{[N0]} = [2\pi \ln(b/a_N)]^{1/2}, \quad (22)$$

$$R_{[qn]} = [(k_{[qn]} b)^2 D_q^2(k_{[qn]} a_N, k_{[qn]} b) - (k_{[qn]} a_N)^2 D_q^2(k_{[qn]} a_N, k_{[qn]} a_N)]^{1/2}, \quad (23)$$

$$R_{(qn)} = [((k_{(qn)} b)^2 - q^2) E_q^2(k_{(qn)} a_N, k_{(qn)} b) - ((k_{(qn)} a_N)^2 - q^2) E_q^2(k_{(qn)} a_N, k_{(qn)} a_N)]^{1/2}. \quad (24)$$

上述方程中 J<sub>q</sub> 和 Y<sub>q</sub> 为 q 阶的第一类 Bessel 和 Neumann 函数, J'<sub>q</sub> 和 Y'<sub>q</sub> 为 J<sub>q</sub> 和 Y<sub>q</sub> 的一阶微分, q = 0, 1, 2, ... K = x/b, K<sub>[1m]</sub> 和 K<sub>(1m)</sub> 分别是圆波导中 TM 模式和 TE 模式的截止波数, x<sub>[1m]</sub> 和 x<sub>(1m)</sub> 分别是 J<sub>q</sub> 和 J'<sub>q</sub> 的第 m 个零点. k = χ/b, k<sub>[1m]</sub> 和 k<sub>(1m)</sub> 分别是同轴波导中 TM 模式和 TE 模式的截止波数, χ<sub>[1m]</sub> 和 χ<sub>(1m)</sub> 分别是 C<sub>q</sub> 和 F<sub>q</sub> 的第 m 个零点.

根据电场模式匹配和复功率守恒原理求出圆-同轴波导接头的散射矩阵

$$S^1 = \begin{bmatrix} S_{11}^1 & S_{12}^1 \\ S_{21}^1 & S_{22}^1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (Y_1 + Y_{L1})^{-1} (Y_1 - Y_{L1}) & 2(Y_1 + Y_{L1})^{-1} (M^1)^H Y_2 \\ M^1 (S_{11}^1 + I) & M^1 S_{12}^1 - I \end{bmatrix}. \quad (25)$$

同理可推得同轴-同轴波导接头的散射矩阵[S<sup>2</sup>]. 利用广义散射矩阵技术, 通过

$$S^{1,2} = \begin{bmatrix} S_{11}^{1,2} & S_{12}^{1,2} \\ S_{21}^{1,2} & S_{22}^{1,2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11}^1 + S_{12}^1 G_1 L_2 S_{11}^2 L_2 S_{21}^1 & S_{12}^1 G_2 L_2 S_{12}^2 \\ S_{21}^2 L_2 G_2 S_{21}^1 & S_{22}^2 + S_{21}^2 L_2 G_1 S_{22}^1 L_2 S_{12}^2 \end{bmatrix} \quad (26)$$

级联得到 $[S^{1,2}]$ ,  $[S^{1,2}]$ 与 $[S^3]$ 级联得到 $[S^{1,3}]$ , 以此类推直到 $[S^{1,N-1}]$ , ( $N$ 为 Bragg 反射器的矩形阶梯划分总数, 由阶梯长度  $\Delta l$  决定), 从而得到整个同轴 Bragg 反射器的散射矩阵<sup>[27]</sup>.

(25), (26) 式中  $I$  为单位矩阵,  $Y_{L1} = (M^1)^H Y_2 M^1$  为接头网络的输入导纳矩阵,  $L_{2,nn} = \exp(-\gamma_{2,nn} L_p)$  为波导 2 的对角传输矩阵的对角元素,  $\gamma_{2n}$  为波导 2 中的各模式的传播常数,  $G_1 = (I - L_2 S_{11}^2 L_2 S_{11}^1)^{-1}$ ,  $G_2 = (I - S_{22}^1 L_2 S_{11}^2 L_2)^{-1}$ . 同轴 Bragg 反射器对  $TM_{01}$  入射波的反射率通过  $S_{11}^{1,N-1}$  反射系数矩阵获得

$$\Gamma = S_{11, nm}^{1, N-1} = S_{11, 01}^{1, N-1}. \quad (27)$$

#### 4. 反射器频率响应特性分析

##### 4.1. 反射器的结构与算法分析

毫米波相对论 RDG 高频系统的半径  $b$  为 18 mm, 中心频率  $f_c = 31\text{GHz}$ , 工作模式为  $TM_{01}$ . 假定同轴波导内导体平均半径  $a_0 = 14.4\text{mm}$ , 锥度为  $\theta = -1.25^\circ$ , 波纹周期 4.6 mm, 波纹槽深度 0.6 mm, 周期数为 10, 初始相位为 0.

图 3 给出带有锥度结构的同轴 Bragg 反射器中不同频率下  $TM_{01}$  模幅值随反射器长度的变化, 图中实线为同轴 Bragg 反射器内外半径比随反射器长度的波动. 从图中可以看出对于频率为 31GHz 的  $TM_{01}$  模的幅值随反射器长度的增加逐步消失, 说明对该频点具有很好地反射效果, 而对于频率为 35GHz 时  $TM_{01}$  模在整个反射器内都存在, 说明反射器对该频点反射效果较差. 研究表明只有当 Bragg 槽的深度较浅时单模近似才能很好的代表实际情况, 当 Bragg 槽的深度较深时应当考虑多模耦合问题<sup>[28]</sup>, 但是由于器件的工作模式为  $TM_{01}$  模式, 通过数值计算发现在同轴 Bragg 结构中没有激励起  $TE_{0n}$ ,  $TE_{qn}$  及  $TM_{qn}$  模式, 因此在后面的计算中没有考虑这些模式的影响. 此外对于我们所研究的结构, 槽深较深且  $TM_{0n}$  模式不连续, 采用耦合波理论只能考虑 TEM 波单模耦合, 进行极为粗略的计算; 而采用 CCPT 则可以对系统进行严格的全波分析. 分别采用 CCPT, CWT, HFSS 计算同轴正弦小锥度内开槽 Bragg 反射器在

完全同轴结构中对 TEM 波入射时的反射率频率响应. 由图 4 可见 CCPT 与 HFSS 结果基本一致, 验证了 CCPT 方法的可靠性, 但是 CCPT 的计算速度远远优于 HFSS. 而 CWT 由于只考虑了 TEM 正反向波的自耦合, 而未考虑 TEM- $TM_{0n}$  和  $TM_{0n}$ - $TM_{0n}$  耦合, 计算误差较大.

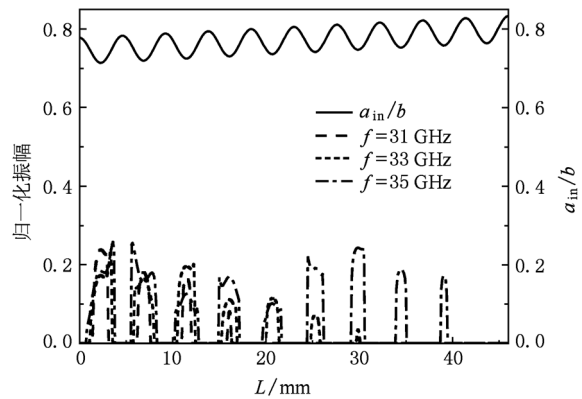


图 3 不同频率下  $TM_{01}$  模幅值随反射器长度和内外半径比变化曲线

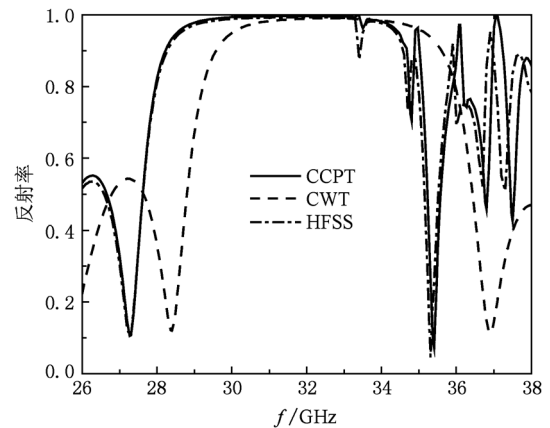


图 4 同轴结构中三种方法计算 TEM 模反射率随频率变化曲线

##### 4.2. 相位匹配段长度、波纹槽深、锥度对反射器频率响应的影响

在圆波导与同轴反射器接头处设置相位匹配段, 可增加同轴结构中反射回来的 TEM 波转换为圆波导  $TM_{01}$  反射波的效率, 并抑制圆波导中出现更高次模式. 图 5 (a) 所示为不同相位匹配段长度下

TM<sub>01</sub>模反射率随频率变化曲线,随相位匹配段长度的增加,中心频率逐步向低频方向移动.当 $l_p = 1$  mm时中心频率恰好落在31 GHz,并且此时带宽最宽,数值计算结果与HFSS仿真结果十分接近.选择适当的波纹槽深度对反射器性能影响较大,图5(b)给出了 $l_p = 1$  mm,槽深分别为0.3 mm,0.6 mm,0.9 mm时TM<sub>01</sub>模反射率随频率变化情况.随着槽深增加,反射率不断提高,但是中心频率逐步往低频方向移动,当槽深在0.6 mm时,反射率较高,带内波

动幅度小.图5(c)所示为不同锥度下TM<sub>01</sub>模反射率随频率变化曲线.无锥度情况下,反射性能最优,随着锥度的增加,反射器的频率响应特性显著变差.由于同轴Bragg反射器内外导体之间为电子注传输通道,无锥度情况下,电子注通过Bragg周期结构将产生较强扰动,从而影响电子注在器件高频系统中注波相互作用的效率.为了降低Bragg结构对电子注的扰动,同时保证反射器对TM<sub>01</sub>模有较好的反射特性,因此选择 $\theta = -1.25^\circ$ 比较合适.

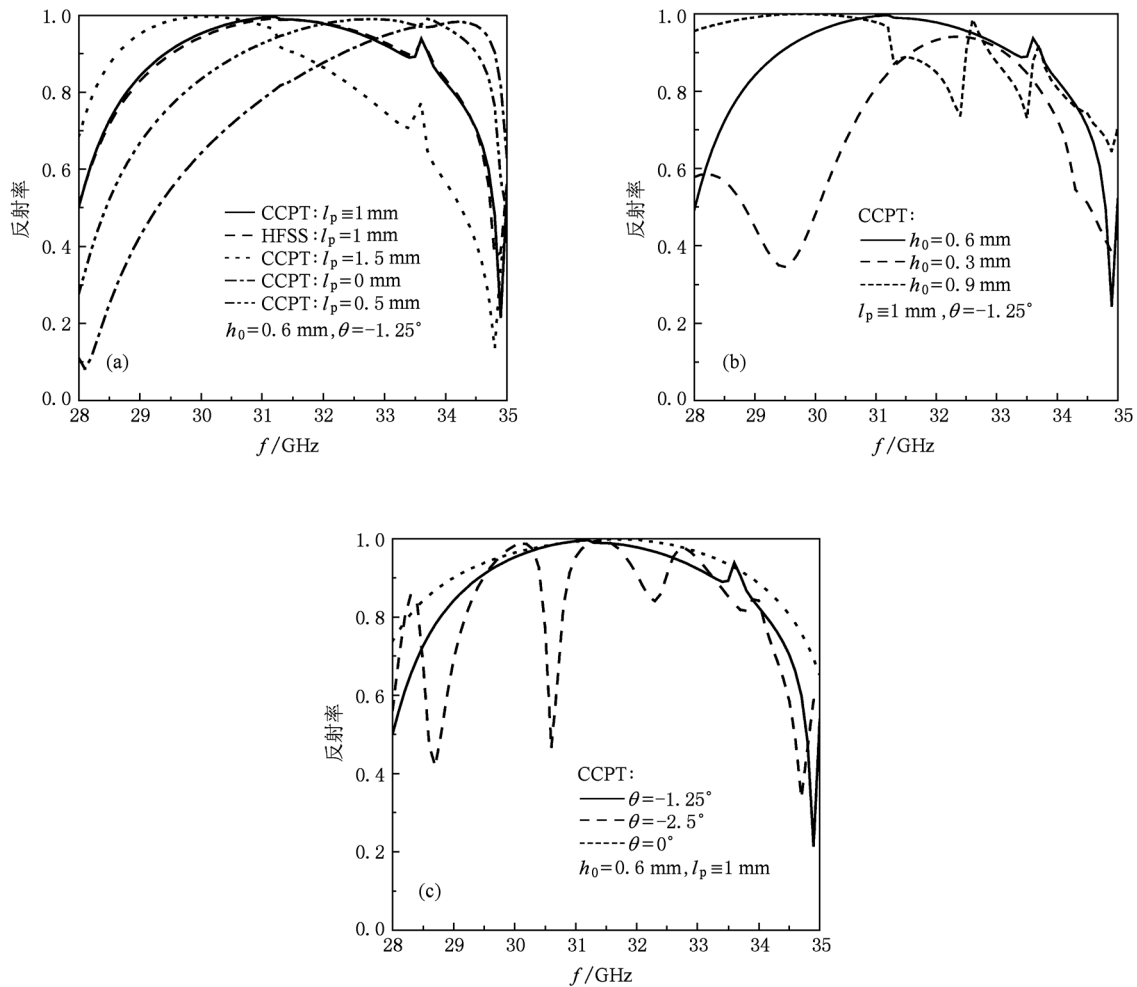


图5 圆柱结构中同轴反射器对TM<sub>01</sub>模的反射率随频率变化曲线 (a) 相位匹配段长度变化;(b) 波纹槽平均深度变化;(c) 锥度变化

### 4.3. 波纹初始相位对反射器选模特性的影响

调节反射器初始相位可以改变模式匹配系数大小,从而影响反射器选模特性,图6为 $f = 31$  GHz,  $h_0 = 0.6$  mm,  $l_p = 1$  mm,  $\theta = -1.25^\circ$ ,波纹初始相位 $\varphi_{in}$ 变化时反射器不同模式反射率随长度变化

曲线. $\varphi_{in} = 0$ 时,工作模式TM<sub>01</sub>的反射率随长度变化波动很小,反射率逐渐接近1,近邻模式TM<sub>02</sub>, TM<sub>03</sub>的反射率被削弱得很小,对主模已经失去竞争性,反射器具有很好的模式选择特性. $\varphi_{in} = \pi/2, \pi$ 时模式竞争加剧, TM<sub>01</sub>模的反射率下降, TM<sub>02</sub>模和 TM<sub>03</sub>模的反射率上升, TM<sub>02</sub>模成为主导模式.

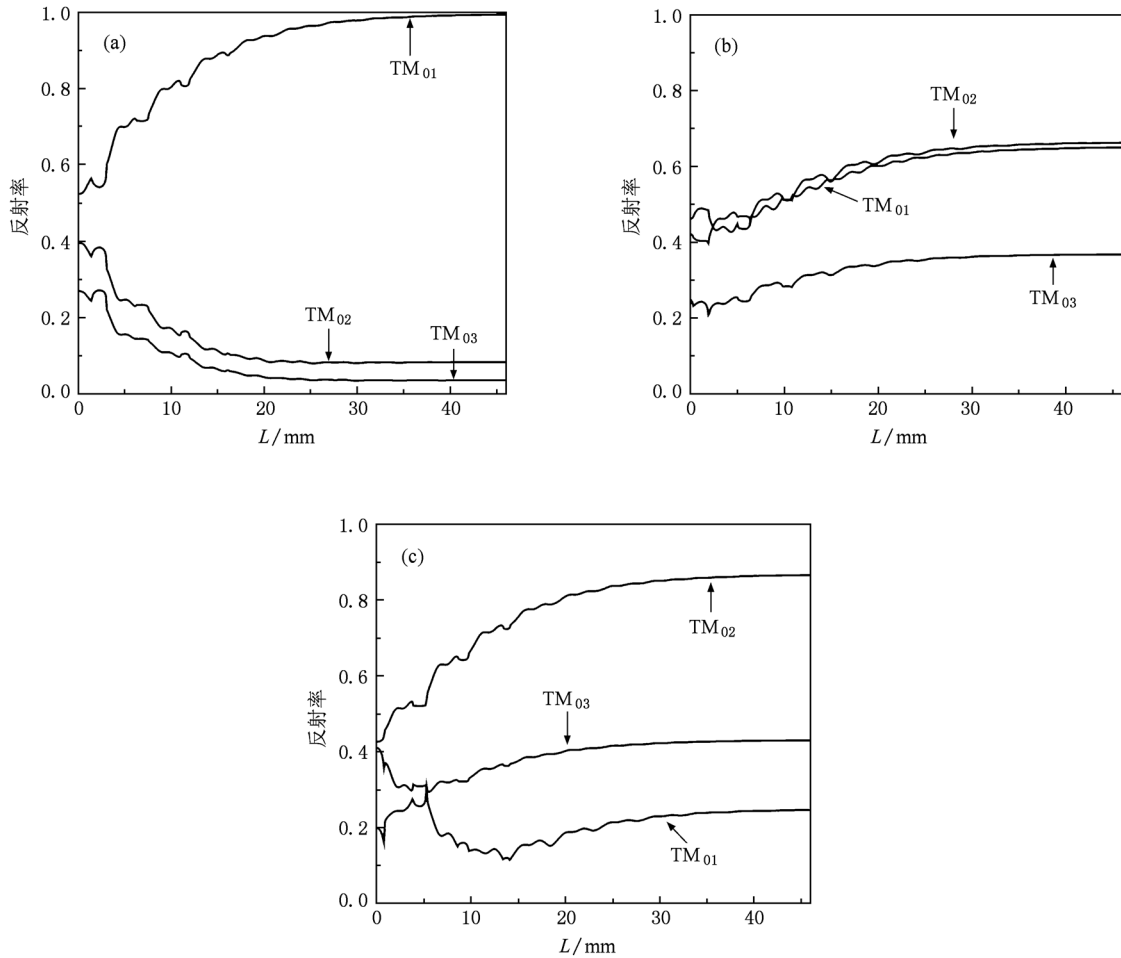


图6 圆柱结构中同轴反射器不同模式反射率随反射器长度变化曲线 (a)  $\varphi_{in} = 0$ ; (b)  $\varphi_{in} = \pi/2$ ; (c)  $\varphi_{in} = \pi$

## 5. 结 论

本文提出了在具有圆柱过模慢波结构的高功率毫米波器件中采用带有锥度结构的内开槽同轴 Bragg 反射器. 采用 CCPT 方法对该反射器的频率响应特性进行了分析, 研究了相位匹配段长度, 波纹槽深及锥度对反射器频率响应特性的影响. 分析了波纹初始相位对反射器选模特性的影响, 发现当初

始相位 0 时, 反射器对  $TM_{01}$  模具有良好的反射特性, 当初始相位为  $\pi/2$  和  $\pi$  时,  $TM_{02}$  模逐步成为反射器工作的主模, 因此该 Bragg 反射器具有一定的模式选择特性. 通过分析得到反射器的优化参数为: 相位匹配段长度为 1 mm, 内导体外壁半径变化锥度为  $-1.25^\circ$ , 在中心频率  $f_c = 31$  GHz 附近反射率接近 1, 90% 带宽超过 2.6 GHz, 而反射器长度仅为 46 mm. 本文的研究结果为设计具有同轴 Bragg 反射器结构的高功率毫米波源提供了一定的参考价值.

[1] Bugaev S P, Cherepenin V A, Kanavets V I, Klimov A I, Kopenkin A D, Koshelev V I, Popov V A, Slepov A I 1990 *IEEE Trans. Plasma Sci.* **18** 525  
 [2] Bugaev S P, Cherepenin V A, Kanavets V I, Koshelev V I, Popov V A, Vlasov A N 1990 *IEEE Trans. Plasma Sci.* **18** 518  
 [3] Moreland L D, Schamiloglu E, Lemke W 1994 *IEEE Trans. Plasma Sci.* **22** 554

[4] Vlasov A N, Shkvarunets A G, Rodgers J C 2000 *IEEE Trans. Plasma Sci.* **28** 556  
 [5] Gunin A V, Aleksei I K, Sergei D K, Ivan K K, Igor V P, Sergei D P, Albert M R, Vladislav V R, Aleksei S S, Evgenii M T 1998 *IEEE Trans. Plasma Sci.* **26** 326  
 [6] Zhao H D, Song D Y, Zhang Z F, Sun J, Sun M, Wu Y, Wen X R 2004 *Acta Phys. Sin.* **53** 3744 (in Chinese) [赵红东、宋殿友、张

- 智峰、孙 静、孙 梅、武 一、温幸饶 2004 物理学报 **53** 3744]
- [7] Wang X D, Wu X M, Wang Q, Cao Y L, He G R, Tan M Q 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 4983 (in Chinese) [王小东、吴旭明、王青、曹玉莲、何国荣、谭 满 2006 物理学报 **55** 4983]
- [8] Wang H, Zhu H L, Jia L H 2009 *Chin. Phys. B* **18** 2868
- [9] Bratman V L, Denisov G G, Ginzburg N S, Petelin M I 1983 *IEEE Journal of Quantum Electronics.* **19** 282
- [10] Chong C K, McDermott D B, Rzeghi M M, Luhmann N C, Jr. Pretterebner J, Wagner D, Thumm M, Caplan M, Kulke B 1992 *IEEE Trans. on Plasma Sci.* **20** 393
- [11] Konoplev I V, McGrane P, Cross A W, Ronald K 2005 *Appl. Phys. Lett.* **87** 121104
- [12] Barroso J J, Leite Neto J P 2006 *IEEE Trans. Plasma Sci.* **34** 666
- [13] Zhang S C, Chen X H, Lai Y X 2007 *Int. J. Infrared Millim. Waves* **28** 1043
- [14] Ding X Y, Zhang S C 2009 *Appl. Phys.* **42** 085104
- [15] Chen X H, Zhang S C, Lai Y X 2008 *Int. J. Infrared Millim. Waves.* **29** 552
- [16] Lai Y X, Zhang S C, Zhang H B 2007 *IEEE Microwave and Wireless Components Lett.* **17** 328
- [17] Lai Y X, Zhang S C 2007 *Phys. Plas.* **14** 113301
- [18] Niu X J, Li H F, Yu S, Xie Z L, Yang S W 2002 *Acta Phys. Sin.* **51** 2291 (in Chinese) [牛新建、李宏福、喻 胜、谢仲怜、杨仕文 2002 物理学报 **51** 2291]
- [19] Lawson W, Esteban M, Raghunathan H, Hogan B P, Bharathan K 2005 *IEEE Trans. MTT* **53** 372
- [20] Wagner D, Thumm M 1992 *Proceedings of SPIE-The International Society for Optical Engineering*, v 1929, 44—45
- [21] Macphie R H, Ries C R 1990 *IEEE Trans. MTT* **38** 334
- [22] Wade J D, Macphie R H 1990 *IEEE Trans. MTT* **38** 373
- [23] Omar A S, Schunemann K F 1987 *IEEE Trans. MTT* **35** 268
- [24] Safavi-Naini R, Macphie R H 1990 *IEEE Trans. MTT* **29** 337
- [25] Tanveer ul H, Kevin J W, Neal C G 1995 *IEEE Trans. MTT* **43** 559
- [26] Lan F, Gao X, Shi Z J 2009 *Journal of Electronic Science and Technology* **7** 180
- [27] Liu Y H, Li H F, Li H, Wang E F, Xu Y, Wang H, Wang L 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 1718 (in Chinese) [刘迎辉、李宏福、李浩、王峨锋、徐 勇、王 晖、王 丽 2006 物理学报 **55** 1718]
- [28] Xin Q, Zhang S C, Zhang H B, Kong Y Y, Chai B, Zhang Y 2010 *J. Infrared Millimeter & THz Waves* **31** 1278

## Coaxial Bragg reflector with small tapered inner rod corrugated ripples and phase matching section \*

Lan Feng<sup>†</sup> Yang Zi-Qiang Shi Zong-Jun

(Research Institute of High Energy Electronics, College of Physical Electronics University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 610054, China)

(Received 10 September 2010; revised manuscript received 22 November 2010)

### Abstract

A coaxial Bragg reflector with tapered inner rod corrugated ripples and phase matching section used in relativistic diffraction generator (RDG) with overmode cylindrical structure in Ka-band is presented and analyzed in this paper. The conservation of complex power technique (CCPT) is introduced to analyze the frequency response of the Bragg reflector. The influences of the phase matching section length, the corrugated sinusoidal slots depth and the tapered angle of the reflector on frequency response are studied. It is found by analyzing the influence of the initial ripple phase that the reflector has a favourable characteristic for mode selection. The research results provide important theoretical analysis and data reference for designing coaxial Bragg reflector structure.

**Keywords:** coaxial Bragg reflector, frequency response, CCPT, RDG

**PACS:** 11.55.-m, 42.79.Fm

\* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 10975031, 11075032).

<sup>†</sup> E-mail: lanf998@yahoo.cn