

# W 波段损耗介质加载回旋返波振荡器中模式竞争的研究\*

杜朝海<sup>1)†</sup> 李铮迪<sup>1)2)</sup> 薛志浩<sup>1)2)</sup> 刘濮鲲<sup>1)</sup> 薛谦忠<sup>1)</sup> 张世昌<sup>1)</sup>  
徐寿喜<sup>1)</sup> 耿志辉<sup>1)</sup> 顾伟<sup>1)</sup> 栗亦农<sup>1)</sup> 刘高峰<sup>1)</sup>

1) (中国科学院高功率微波源与技术重点实验室, 中国科学院电子学研究所, 北京 100190)

2) (中国科学院研究生院, 北京 100190)

(2011 年 4 月 12 日收到; 2011 年 8 月 16 日收到修改稿)

本文采用自治非线性理论模型系统研究 W 波段基波  $TE_{01}$  模回旋返波振荡器模式竞争的物理机理. 通过采用特殊渐变的非谐振相互作用结构和加载损耗介质抑制相互作用系统中竞争模式, 从而防止系统出现非稳态振荡现象. 通过系统优化的相互作用结构可以抑制竞争模式, 能够稳定工作在  $TE_{01}$  模的轴向基模上. 计算表明系统输出峰值功率 105 kW,  $-3$  dB 调谐相对带宽为 5.4%. 这为发展应用于电子对抗、无损探测、等离子体诊断、材料处理等领域的宽带毫米回旋返波振荡器提供了理论基础, 具有借鉴意义.

**关键词:** 毫米波源, 电子回旋脉塞, 回旋返波振荡器, 模式竞争

**PACS:** 07.57.Hm, 42.72.Ai, 84.40.Ik

## 1 引言

具有高功率和宽带频率调谐特性的毫米波回旋返波振荡器 (gyrotron-backward-wave oscillator, Gyro-BWO) 在电子对抗系统、电子自旋共振 (electron spin resonance, ESR)、采用动态核极化增强核磁共振的敏感度、特种材料处理等领域都有重要的应用前景<sup>[1,2]</sup>. Gyro-BWO 基于相对论效应的电子回旋脉塞 (electron cyclotron maser, ECM) 原理工作, 采用回旋前进的电子注与返向波相互作用, 而形成内反馈, 建立自激振荡. 电子注通过横向相互作用将动能转化为高能微波辐射. ECM 辐射受电子注参数的影响, 所以通过控制工作磁场、电压等参数可以控制辐射的频率和功率, 从而实现宽带调谐<sup>[1]</sup>. 回旋返波振荡器中的模式竞争问题与回旋行波放大器类似<sup>[1-4]</sup>, 各次回谐波都可能和多个工作模式同步, 由于绝对不稳定性激励起自激振荡; 同一工作模式在相互作用电路中可能存在多个轴向模式, 这些模式都可能和某一次回旋谐波同步, 由于绝对不稳定性激励起自激振荡; 相互作用电路的

失配引起的终端反射使得系统自激振荡的物理过程变得更加复杂. 各种自激振荡导致系统出现非稳态振荡 (nonstationary oscillation), 影响系统的输出功率量级和频率调节范围, 影响工作模式正常工作<sup>[1-4]</sup>.

Gyro-BWO 是基于 ECM 原理的电子器件中具有频率调谐特性的振荡器. 理论研究 Gyro-BWO 最早出现在 20 世纪 60 年代<sup>[5]</sup>. 系统的 Gyro-BWO 实验研究始于 20 世纪 90 年代<sup>[1-3,6,7]</sup>. 最近中国台湾清华大学报到的  $K\alpha$  波段  $TE_{11}$  模式回旋返波振荡器获得了 3 dB 调谐带宽 1.3 GHz, 峰值功率 149 kW, 对应于 29.8% 的相互作用效率<sup>[8]</sup>. 此外, 英国 Strathclyde 大学和俄罗斯科学院应用物理研究所合作开展的 X 波段螺旋波纹波导 Gyro-BWO 实验获得相对调谐带宽约 17%<sup>[9]</sup>. 近年来, 理论和实验工作在探索增强 Gyro-BWO 的相互作用效率<sup>[1-3,6,8,10,11]</sup>、相互作用饱和机理<sup>[12]</sup>、稳态和非稳态振荡机理<sup>[6,8,10,12]</sup> 等方面取得了显著的成果. 国内在回旋振荡器方面已经开展了许多研究工作<sup>[13,14]</sup>, 但是回旋返波振荡器方面的研究起步较

\* 国家自然科学基金 (批准号: 61072024, 61072026, 60971072) 资助的课题

† E-mail: duchaohai@gmail.com

晚, 此前没有系统的研究报告公开发表。

本文探索将损耗介质应用于 Gyro-BWO, 互作用电路的结构如图 1 所示. 通过将渐变波导半径技术和损耗介质技术结合起来, 发展出既能够有效抑制竞争模式, 又兼具高平均功率承受能力的 W 波段回旋返波振荡器互作用电路. 论文首先从束-波色散关系和耦合强度分析出发, 对相互作用系统的模式竞争问题进行了系统分析, 并且定性确定最危险的几个竞争模式; 然后采用新近发展的损耗介质波导互作用系统中的 ECM 自洽理论对系统稳定性问题进行深入研究; 最后通过调整工作磁场等手段研究相互作用系统的宽带调谐特性. 此前国际上报道的基于损耗石墨涂层的 Gyro-BWO 互作用系统仅适用于实验室短脉冲测试和原理性验证<sup>[13]</sup>, 而本文将损耗介质引入 Gyro-BWO 互作用系统将推动具有工程实用性的高平均功率高稳定性 Gyro-BWO 的发展。

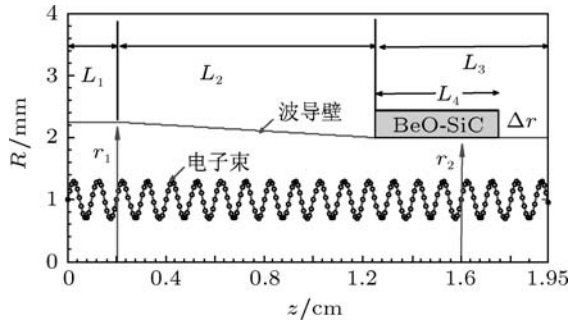


图 1 损耗介质加载回旋返波振荡器互作用系统示意图

## 2 理论模型

### 2.1 束波耦合阻抗

圆柱波导系统电子回旋脉塞互作用分析中, 耦合因子  $H_{sm} = |J'_s(k_{\perp 1} r_L) J_{m-s}(k_{\perp 1} r_c)|^2$ <sup>[1,15]</sup> 成为衡量不同模式与电子注耦合强度的参考值. 其中  $s$  表示电子注的回旋谐波数,  $m$  表示工作模式的角向指数,  $k_{\perp 1}$  表示工作模式的横向波数,  $r_L$  为电子的拉曼半径,  $r_c$  表示电子的引导中心半径,  $J_{m-s}$  表示  $m-s$  阶第一类贝塞尔函数.  $H_{sm}$  为注-波耦合系数. 本文将采用束-波耦合阻抗  $K$  来更加全面地分析模式耦合强度问题.  $K$  的定义如下<sup>[16]</sup>:

$$K = \frac{|U|^2}{2P} = \mu_1 H_{sm} \frac{r_L^2}{s^2} \frac{v_p}{G_{mn}}, \quad (1)$$

其中  $U$  和  $P$  分别是同步电压和波导内功率流,  $\mu_1$  为真空中磁导率,  $v_p$  为工作点模式的相速度,  $G_{mn}$

为波导系统的结构因子, 定义为对高频场在波导横截面上的积分, 表达式如下:

$$G_{mn} = \iint_S \left| \frac{j\omega\mu_1}{k_{\perp 1}^2} [\mathbf{e}_z \times \nabla_{\perp} \psi(r, \phi)] \right|^2 dS, \quad (2)$$

其中  $\psi(r, \phi)$  是高频场在波导横截面上的分布, 通常采用贝塞尔函数或贝塞尔函数的级数描述<sup>[16]</sup>. 耦合阻抗  $K$  不仅考虑了电子注参数、工作频率、波导结构等因素对束-波耦合强度的影响, 而且阻抗  $K$  具有固定的量纲, 能够定量比较不同模式在不同频率点上的束-波耦合强度差异, 具有更加广泛的实用性。

### 2.2 自洽非线性理论模型

基于损耗介质加载圆柱波导的电子回旋脉塞自洽非线性理论可以分为粒子追踪和束-波能量交换两部分. 其中基于相对论洛伦兹力方程的粒子追踪方法与常规的光滑圆柱波导类似<sup>[15]</sup>. 而计算束-波能量交换的相互作用方程的关键是要考虑介质层的能量分布和介质层对模式横向场的扰动等因素. 基于有源波动方程变换而来的相互作用方程如下<sup>[17]</sup>:

$$\begin{aligned} & \left( k_z^2 + \frac{d^2}{dz^2} \right) f(z) \\ &= - \frac{2|I_b|}{G_{mn}} \sum_{i=1}^N W_i \frac{v_{\theta i}}{v_{zi}} \left[ \frac{1}{k_{\perp 1}} \sum_{s=-\infty}^{\infty} J'_s(k_{\perp 1} r_i) \right. \\ & \quad \left. \times J_{m-s}(k_{\perp 1} r_{ci}) e^{i\Lambda_i} \right]^*, \end{aligned} \quad (3)$$

其中  $v_{\theta i}$ ,  $v_{zi}$ ,  $r_{Li}$ ,  $r_{ci}$  和  $\Lambda_i$  分别为单个粒子在相互作用空间的瞬时角向速度、轴向速度、拉曼半径、引导中心半径、和相位因子, 宏粒子的权重满足  $\sum_{i=1}^N W_i = 1$ ,  $k_z$  为传输常数,  $f(z)$  为高频场的轴向场幅度,  $I_b$  为工作电流. 结构因子  $G_{mn}$  在损耗介质波导中描述为对真空区域的高频场积分和损耗介质区域的高频场积分之和,  $G_{mn} = K_a + K_b$ . 其中  $K_a$  和  $K_b$  的表达式如下:

$$K_a = \frac{2\pi}{|k_{\perp 1}|^2} \int_0^a \left[ |J'_m(k_{\perp 1} r)|^2 + \left| \frac{m}{k_{\perp 1} r} J_m(k_{\perp 1} r) \right|^2 \right] r dr, \quad (4)$$

$$\begin{aligned} K_b = & \frac{2\pi}{|k_{\perp 2}|^2} \int_a^b \left[ |[\alpha J'_m(k_{\perp 2} r) + \beta N'_m(k_{\perp 2} r)]|^2 \right. \\ & \left. + \left| \frac{m}{k_{\perp 2} r} [\alpha J_m(k_{\perp 2} r) + \beta N_m(k_{\perp 2} r)] \right|^2 \right] r dr, \end{aligned} \quad (5)$$

其中  $a$  和  $b$  分别是真空介质波导的内半径和外半径,  $k_{\perp 2}$  是损耗介质区域的横向波数,  $N_m(k_{\perp 2}r)$  是  $m$  阶第二类贝塞尔函数,  $\alpha$  和  $\beta$  都是损耗介质波导中场分布的贝塞尔函数系数<sup>[17]</sup>. 运用自洽非线性理论可以较准确地分析损耗介质加载 Gyro-BWO 系统中竞争模式的起振电流和相互作用系统的调谐特性.

表 1 W 波段 Gyro-BWO 的工作参数

电压/kV	70	$r_1$ /mm	2.08
磁场/ $B_g$	(1.00—1.18)	$r_2$ /mm	2.0
电流/A	7	$r_2$ /mm	2.45
注倾角/ $\alpha = v_t/v_z$	1.4	$L_1$ /mm	2
注速度离散/%	5	$L_2$ /mm	10.5
BeO-SiC, $\epsilon_r$	$12 - j2.7$ ,	$L_3$ /mm	7
$\mu_r$	1	$L_4$ /mm	5
注引导中心, $r_c/r_w$	0.47		

注:  $B_g = 3.5683T, r_w = r_2$ .

### 3 数值模拟

#### 3.1 束-波色散关系和耦合阻抗

W 波段 Gyro-BWO 的相互作用系统的结构如图 1 所示, 工作参数如表 1 所示, 相互作用系统中的束波色散关系如图 2 所示 ( $B_0 = 1.08B_g$ ). 图 2 中给出与回旋基波  $s = 1$  和回旋谐波  $s = 2$  相交的前 11 个工作模式的色散曲线. 束-波交点及附近满足同步条件  $\omega - k_z v_z - s\Omega/\gamma \approx 0$  的有限频率范围内, 束-波之间能够进行有效的能量交换, 在此被称为束-波同步点. 同步点处于远离截止频率的模式由于具有较大的  $k_z$  值, ECM 相互作用过程中受电子注速度离散的影响大, 起振电流通常远高于工作电流, 可以忽略这些模式对电子注的影响, 这与回旋行波放大器中稳定性分析相同<sup>[1-4,15-17]</sup>. 因此, 稳定性分析中首先忽略图 2 中的  $TE_{11}, TE_{12}, TE_{41}, TE_{51}$  和  $TE_{22}$  等模式的影响, 主要分析  $TE_{01}^{(1)}$  比  $TE_{21}^{(1)}$ ,  $TE_{31}^{(1)}$ ,  $TE_{02}^{(2)}$  和  $TE_{61}^{(2)}$  等五个竞争模式的自激振荡问题.

图 3 进一步给出电子注引导中心对图 2 中最靠近截止频率的同步点耦合阻抗的影响. 由于电子注引导中心  $r_c = 0.47r_w$ , 电子注二次谐波与  $TE_{32}$  模式正好位于极小值附近, 所以稳定性分析可以进一步排除  $TE_{32}$  模式的影响. 结合图 1 可以发现  $B_0 = 1.05B_g$  时, 工作模式  $TE_{01}^{(1)}$  的同步点比较

靠近截止频率, 由于模式的耦合阻抗  $K$  正比于相速度  $v_p$ , 所以  $TE_{01}^{(1)}$  比  $TE_{21}^{(1)}, TE_{31}^{(1)}, TE_{02}^{(2)}$  和  $TE_{61}^{(2)}$  等竞争模式的同步点高出约 1 个数量级, 这为有效抑制竞争模式奠定了基础. 需要补充的是, 虽然图 3 表明工作模式的束-波耦合阻抗比其他竞争模式高, 但是还不能充分说明  $TE_{01}^{(1)}$  模比竞争模式容易起振. 相互作用电路中决定一个模式起振的因素很多, 包括束-波耦合阻抗、工作磁场、电路结构等. 采用自洽非线性理论计算特定模式的起振电流能够综合考虑各因素的影响.

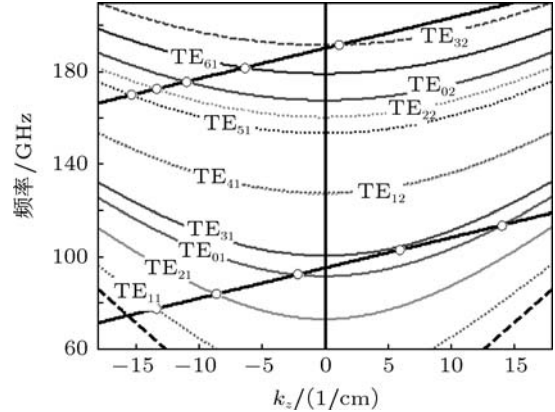


图 2 W 波段 Gyro-BWO 中的束-波色散关系

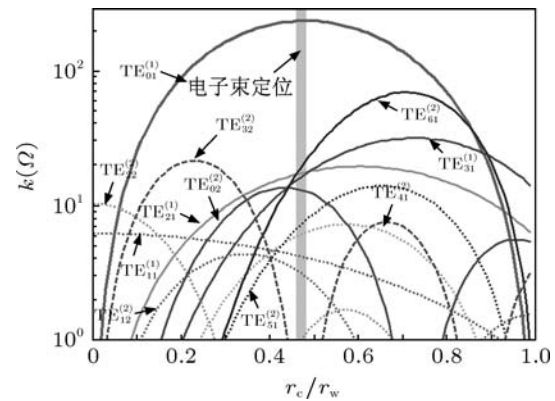


图 3 当  $B_0 = 1.05B_g$  时同步点处的束-波耦合阻抗

#### 3.2 稳定性分析

稳定性分析中首先研究无损耗介质加载条件下, 波导半径渐变对系统稳定性的影响. 设定半径  $r_1 = r_2(1 + 0.04M)$ , 由此调节  $M$  从 0 变化到 100% 的过程就是相互作用系统从均匀系统变化为图 1 所示的渐变波导系统的过程. 图 4 给出这一渐变过程中竞争模式的起振电流变化情况. 波导半径渐变使得电子注沿轴线前进的过程中不同位置的束-波同步条件不同, 导致同一个模式的有效反馈

长度变短, 模式起振电流升高. 所以, 总体上讲, 渐变波导半径不仅有助于提高 Gyro-BWO 的互作用效率 [1,2,5,7,11,12], 还有助于提高竞争模式的起振电流. 图 4 表明在无损耗介质加载条件下, 改变波导半径使得竞争模式  $TE_{21}^{(1)}$  的起振电流稍微增加, 接近工作电流 7A; 竞争模式  $TE_{31}^{(1)}$  的起振电流虽然随波导半径增加而增大, 但是低于工作电流 7A; 二次谐波竞争模式  $TE_{02}^{(2)}$  和  $TE_{61}^{(2)}$  的起振电流始终远高于工作电流 7A; 工作模式  $TE_{01}^{(1)}$  的起振电流始终低于 7A. 无损耗介质条件下, 竞争模式  $TE_{21}^{(1)}$  和  $TE_{31}^{(1)}$  都能够和工作模式  $TE_{01}^{(1)}$  竞争, 会引起非稳态振荡, 输出频谱不纯, 输出功率不稳定, 需要进一步引入损耗介质以抑制  $TE_{21}^{(1)}$  和  $TE_{31}^{(1)}$  模式绝对不稳定性引起的自激振荡.

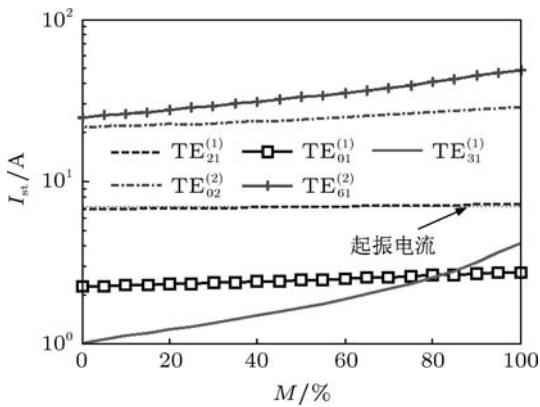


图 4 波导半径渐变对竞争模式起振电流的影响 ( $B_0 = 1.15B_g, \Delta v_z = 5\%v_z$ )

现在研究  $M = 100\%$  的渐变条件下, 加载损耗介质对相互作用系统稳定性的影响. 与文献 [17—19] 相似的分析方法和模式标识方法, 可以得到损耗介质波导与光滑圆波导  $TE_{21}, TE_{01}, TE_{31}, TE_{02}, TE_{61}$  等模式相对应的工作模式分别是  $HE_{22}^d, TE_{02}^d, HE_{32}^d, TE_{04}^d, HE_{63}^d$  等模式. 通过将工作磁场在  $(1.00—1.18)B_g$  范围内调节, 系统仿真得到  $TE_{21}^{(1)}, TE_{31}^{(1)}, TE_{02}^{(2)}$  和  $TE_{61}^{(2)}$  模式起振状态下的轴向场型分析和起振电流分别如图 5(a) 和 (b) 所示. 图 5 表明加载损耗介质可以扰动竞争模式的轴向分布, 吸收寄生振荡的功率, 抑制竞争模式起振, 使得竞争模式的起振电流在工作磁场强度范围内高于工作电流 7A, 不会与工作模式产生竞争.

在稳定性分析中, 除了考虑横向竞争模式之外, 还需要考虑工作模式  $TE_{01}^{(1)}$  本身的高阶轴向模式的竞争 [4,8,10]. 图 6(a) 给出如图 1 所示相互作用电路中工作模式  $TE_{01}^{(1)}$  的前三阶轴向场型分布. 工作模式的  $TE_{01}^{(1)}$  的高阶模式的峰值场强的位置更趋向

于分布在电路的下游端; 由于损耗介质位于电路的下游端, 所以损耗介质对高阶轴向模式具有更强的抑制作用. 分析表明当前电路结构和参数条件下, 所有的竞争模式的起振电流都高于工作电流 7A, 能够被有效抑制; 只有工作模式  $TE_{01}^{(1)}$  的轴向基模的起振电流低于工作电流 7A, 能够起振. 需要补充的是图 6(a) 进一步给出了  $TE_{01}^{(1)}$  轴向基模在工作电流 7A 时的轴向分布特性, 如虚线所示. 由于非线性场型压缩使得  $TE_{01}^{(1)}$  轴向基模的场型随工作电流的增加向电路的上游段压缩, 这同时减小了损耗介质对工作模式的影响, 降低系统的欧姆损耗, 有利于系统高平均功率工作. 图 6(b) 给出调节工作磁场对前三阶模式起振电流和起振频率的影响. 高阶模式具有更高的起振频率, 损耗介质所处的位置能够抑制高阶轴向模式起振. 在磁场从 3.56—4.2 T 范围内调谐, 系统中  $TE_{01}^{(1)}$  模的高阶轴向模式和其他竞争模式的起振电流都高于工作电流 7A, 仅有  $TE_{01}^{(1)}$  模式的轴向基模起振电流始终低于工作电流, 系统不会出现非稳态的振荡, 能够稳定地工作于  $TE_{01}^{(1)}$  模式的轴向基模上.

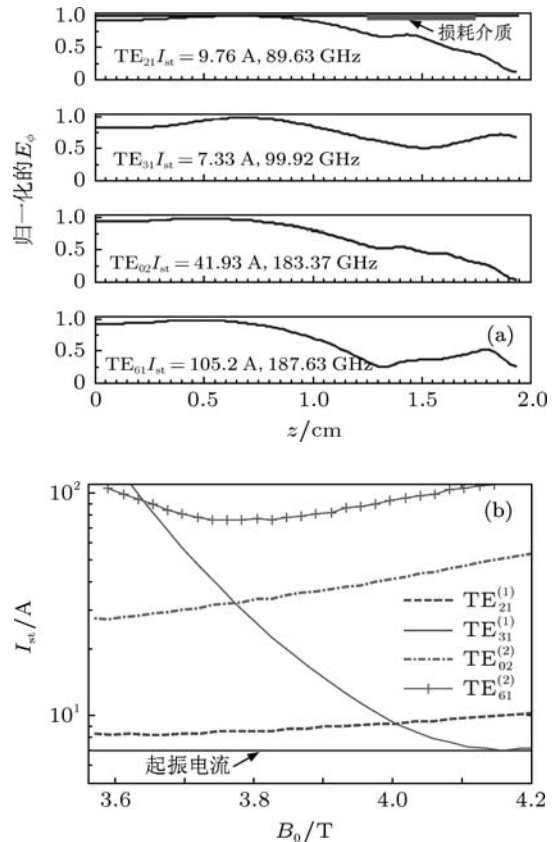


图 5  $TE_{21}^{(1)}, TE_{31}^{(1)}, TE_{02}^{(2)}$  和  $TE_{61}^{(2)}$  模式起振状态下的 (a) 轴向场型分析和 (b) 起振电流

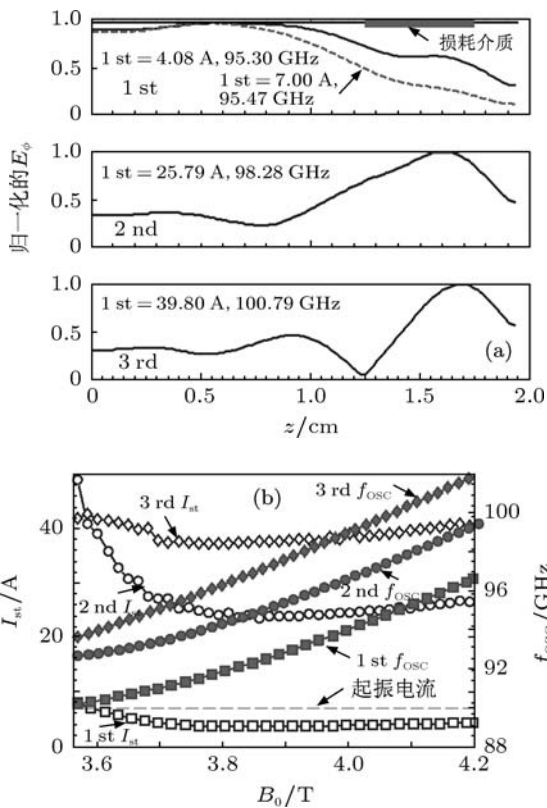


图6  $TE_{01}^{(1)}$  的前三阶轴向模式 (a) 场型; (b) 起振电流  $I_{st}$  和起振频率  $f_{osc}$

### 3.3 宽带调谐特性

频率调节特性是回旋返波振荡的独特优势, 可以通过调节工作电压、电流、工作磁场强度等参数调节系统的工作频率和输出功率量级. 调节相互作用回路的工作磁场强度对电子枪区的影响可以通过电子枪区的辅助磁场校正, 对电子注参数的影响小. 因此, 仅研究调节磁场强度对系统输出特性的影响. 当工作磁场在  $(1.00\text{--}1.18)B_g$  范围内变化时, 输出功率如图 7 所示. 系统的峰值输出功率为 105kW, 对应于相互作用效率 21.43%, 在 90.5—95.5 GHz 范围内输出功率高于 50.25 kW, 因此  $-3$  dB 调谐的相对调节带宽为 5.4%.

基于相对论电子回旋脉塞效应的回旋返波振荡器在毫米波频段能够产生高功率, 兼具宽带频率调谐的优点. 相互作用系统中回旋电子注可能与多个

模式耦合, 导致系统中存在丰富的潜在绝对不稳定性, 引起自激振荡. 竞争模式的影响导致系统不能稳定在单一模式上工作, 出现非稳态振荡现象. 本文通过渐变相互作用电路的半径, 形成非谐振的相互作用系统不仅可以获得高效率 and 宽带调谐, 更重要的是能够提高系统稳定性; 同时通过加载损耗介质, 增强相互作用系统的模式选择特性, 抑制竞争模式, 保证工作模式稳定工作. 研究表明回旋返波振荡器的设计过程需要考虑的因素很多, 可以通过调节各工作参数, 使系统存在一个稳定的参数窗, 在这个稳定的参数窗内只有工作模式能够起振, 其他竞争模式完全被抑制, 该参数窗决定了回旋返波振荡器的频率和功率调节范围.

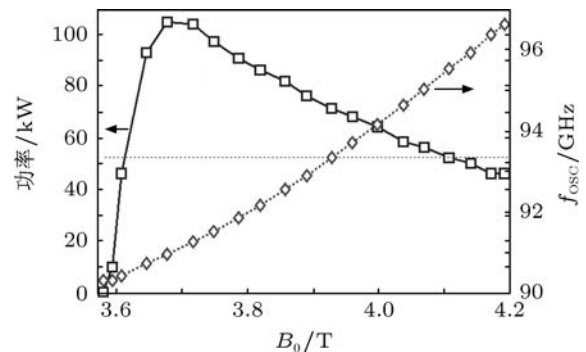


图7 W 波段回旋返波振荡器的频率调节特性

### 4 结论

本文将损耗介质引入毫米波 Gyro-BWO 系统, 并采用介质波导电子回旋脉塞的自洽非线性理论系统研究了 W 波段回旋返波振荡器中模式竞争的机理. 研究表明回旋返波振荡器的模式竞争问题涉及的因素较多, 相互作用电路的改变会影响所有竞争模式的起振特性, 通过采用基于损耗介质和非谐振电路可以抑制横向竞争模式和轴向竞争模式, 获得较大范围的稳定参数窗; 在此稳定参数窗内, 系统能够稳定工作在  $TE_{01}^{(1)}$  的轴向基模上, 输出工作峰值功率达到 105kW, 相对调谐带宽约 5.4%. 研究工作对我国启动 W 波段宽带频率调节的回旋返波振荡器研究工作具有参考价值.

[1] Chu K R 2004 *Rev. Mod. Phys.* **76**, 492  
 [2] Chen N C, Chang T H, Yuan C P, Idehara T, Ogawa Isamu 2010 *App. Phys. Lett.* **96** 161501

[3] Chen S H, Chang T H, Pao K F, Fan C T, Chu K R 2002 *Physical Review Lett.* **89** 268303  
 [4] Du C H, Liu P K, Xue Q Z 2010 *Acta. Phys. Sin.* **59** 4612 (in

- Chinese) [杜朝海, 刘濮鲲, 薛谦忠 2010 物理学报 **59** 4612]
- [5] Nusinovich G S, Dumbrajs O 1996 *IEEE Trans. Plasma Science*, **24** 620
- [6] Chang T H, Chen S H, Barnett L R, Chu K R 2001 *Physical Review Lett.* **87** 064802
- [7] Kou C S, Chen S H, Barnett L R, Chen H Y, Chu K R 1993 *Physical Review Lett.* **70** 924
- [8] Fan C T, Chang T H, Pao K F, Chu K R 2007 *Physics of Plasmas* **14** 093102
- [9] He W L, Ronald K, Youn A R, Cross A W, Phelps A D R, Whyte C G, Rafferty E G, Thomson J, Robertson C W, Speirs D C, Samsonov S V, Bratman V L, Denisov G G 2005 *IEEE Trans. on Electron Devices* **52** 839
- [10] Pao K F, Fan C T, Chang T H, Chiu C C, Chu K R 2007 *Physics of Plasmas*. **14** 093301
- [11] Kou C S, Chen C H, Wu T J 1998 *Physical Review E* **57** 7162
- [12] Chen S H, Chu K R, Chang T H 2000 *Physical Review Lett.* **85** 2633
- [13] Chang T H, Yu C F, Hung C L, Yeh Y S, Hsiao M C, Shin Y Y 2008 *Physics of Plasmas* **15** 073105
- [14] Luo Y T, Tang C J 2011 *Acta. Phys. Sin.* **60** 014104 (in Chinese) [罗尧天唐昌建 2011 物理学报 **60** 014104]
- [15] Chu K R, Chen H Y, Huang C L, Chang T H, Barnett L R, Chen S H, Yang T T, Dialectis D J 1999 *IEEE Trans. Plasma Sci.* **27** 391
- [16] Du C H, Liu P K 2010 *J. Infrared Milli Terahz Waves* **13** 714
- [17] Du C H, Liu P K 2010 *Physics of Plasmas* **17** 033104
- [18] Du C H, Xue Q Z, Liu P K 2008 *IEEE Electron Device Letters*, **29** 1256
- [19] Du C H, Liu P K 2009 *IEEE Transactions on Electron Devices*, **56** 2335

## Research on the mode competition in a w-band lossy ceramic-loaded gyrotron backward-wave oscillator\*

Du Chao-Hai<sup>1)†</sup> Li Zheng-Di<sup>1)2)</sup> Xue Zhi-Hao<sup>1)2)</sup> Liu Pu-Kun<sup>1)</sup> Xue Qian-Zhong<sup>1)</sup>  
 Zhang Shi-Chang<sup>1)</sup> Xu Shou-Xi<sup>1)</sup> Geng Zhi-Hui<sup>1)</sup> Gu Wei<sup>1)</sup> Su Yi-Nong<sup>1)</sup>  
 Liu Gao-Feng<sup>1)</sup>

1) (Key Laboratory of High Power Microwave Sources and Technologies, Institute of Electronics,  
 Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

2) (Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing, 100190 China)

(Received 21 April 2011; revised manuscript received 16 August 2011)

### Abstract

Mode competition induces non-stationary oscillations during the operation of a gyrotron backward-wave oscillator (gyro-BWO), which severely reduces its tunable bandwidth and output power. Self-consistent nonlinear theory is used to study the modes-competition mechanism of a W-band fundamental TE<sub>01</sub> mode gyro-BWO. Tapered non-resonant interaction circuit structure and loading lossy ceramic are employed to suppress the competing modes, as a way of preventing non-stationary oscillation in the circuit. Systematically optimized interaction circuit is capable of suppressing all the competing modes and can stably operate in the fundamental axial mode of the TE<sub>01</sub> mode. Calculation indicates that a peak power of 105 kW and a -3 dB tunable bandwidth of 5.4% are attainable. This is meaningful and provides a theoretical foundation for developing broadband millimeter gyro-BWOs in the applications of counter-measure system, non-destructive detection, plasma diagnosis, material processing, and so on.

**Keywords:** millimeter-wave source, electron cyclotron maser, gyro-BWO, lossy dielectric

**PACS:** 07. 57. Hm, 42. 72. Ai, 84. 40. Ik

\* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 61072024, 61072026, 60971072).

† E-mail: duchaochai@gmail.com