

回旋行波放大器输出端反射对注-波互作用的影响

孙海燕^{1,2}† 焦重庆^{1,2} 罗积润¹

¹ 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 100049

(2008 年 5 月 4 日收到, 2008 年 7 月 1 日收到修改稿)

基于回旋行波放大器的非线性自洽理论, 研究渐变输出端反射对回旋行波放大器注-波互作用的影响. 数值模拟结果表明, 对于 Ka 波段 TE_{01} 模基波工作回旋行波放大器, 渐变输出端渐变角的变化以及相互作用长度的改变将导致不同的反射系数幅度和相位, 从而影响注-波互作用过程, 改变功率演化过程. 在输出饱和功率不变的情况下, 合理选择输出渐变角, 可能可以减小注-波互作用长度, 展宽互作用频带.

关键词: 回旋行波放大器, 注-波互作用, 反射系数

PACC: 4170, 5275

1. 引言

由于回旋行波放大器的高功率和宽频带等特性, 它是目前最具发展潜力的高功率微波源之一, 在等离子加热、材料处理、通信系统、雷达系统、加速器及等离子对撞机等领域得到了广泛的应用, 特别是在毫米波频段具有广泛的应用前景^[1-4]. 经过几十年的发展, 在理论和实践上均取得了长足的进步, 从而成为最具发展前景和应用价值的一种高功率宽带毫米波相干辐射源.

在回旋行波放大器的研究和设计中, 除了需要考虑工作磁场、波导半径渐变、速度零散、波导损耗、电子注参数、相互作用结构参数等对注-波互作用的影响外^[5-9], 局部和终端反射对回旋行波管注-波互作用和输出特性的影响也不可忽视. 理想情况下, 我们希望相互作用结构的输出端是完全匹配的, 但在实际情况下, 由于受结构、工艺材料以及工程设计条件等因素的限制存在一定的反射, 输出端是不可能完全匹配的. 近年来, 有关反射对回旋管工作性能影响的研究工作在理论和实验中都取得了一定进展, 如回旋管输出窗反射对模式竞争的影响, Borie 等通过 Rieke 图提供了一种有效方法来估算输出窗反射对回旋管工作性能的影响^[10-13]. 不过, 目前相关研究主要集中在回旋振荡器, 关于反射对回旋行波放大

器注-波互作用的影响, 目前还没有人进行详细研究. 反射系数的幅度和相位都会对注-波互作用产生影响, 因此分析输出端反射对注-波互作用的影响可以为回旋放大器的设计和优化提供重要参考依据.

本文采用非线性自洽方法, 基于注-波互作用方程和反射边界条件, 通过数值模拟研究输出端反射对 TE_{01} 模基波工作回旋行波放大器注-波互作用的影响.

2. 理论模型

图 1 所示是回旋行波放大器的结构示意图. 电子注从左端进入注-波相互作用区 AB , 在相互作用过程中, 回旋电子注发生群聚, 并与电磁波进行能量的交换, 电磁波从 D 端输出. BC 是输出渐变段, CD 是一段均匀波导, 后面接匹配负载.

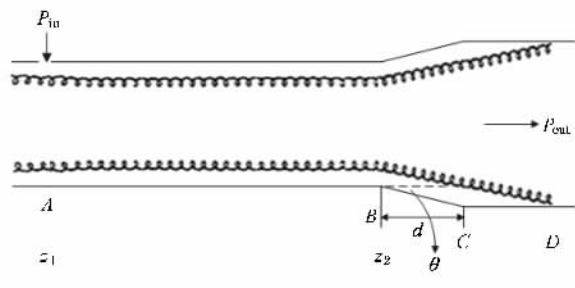


图 1 回旋行波管结构示意图

† E-mail: sunhaiyan80@gmail.com

假定电子注和单模(TE_{mn})相互作用,描述回旋行波放大器的注-波相互作用场方程为^[5,6,8]

$$\left(\frac{d^2}{dz^2} + k_z^2\right)f(z) = i \frac{8 |I_b|}{x_{mn}^2 K_{mn} \omega} \sum_{j=1}^n W_j \times \frac{\mathbf{v}(z) \cdot \mathbf{E}^*(r_j, \theta_j, t_j, z)}{v_{zj}(z) f^*(z)}, \quad (1)$$

其中 $f(z)$ 是轴向场分布函数, I_b 是电子注电流, x_{mn} 为 $J'_m(x) = 0$ 的第 n 个正根, E^* 是 E 的复共轭, W_j 是第 j 个电子的权重因子, $\mathbf{v}$ 是第 j 个电子的速度, v_{zj} 是第 j 个电子的轴向速度, 第 j 个电子横向坐标 r_j, θ_j 和时间坐标 t_j 都是 z 的方程. k_z 和 K_{mn} 表示为

$$k_z^2 = \frac{1}{c^2} \left\{ \omega^2 - \omega_{cnn}^2 \left[1 - (1+i) \times \frac{\delta}{r_w} \left(1 + \frac{m^2}{x_{mn}^2 - m^2} \frac{\omega^2}{\omega_{cnn}^2} \right) \right] \right\}, \quad (2)$$

$$K_{mn} = J_{mn}^2(x_{mn}) \left(1 - \frac{m^2}{x_{mn}^2} \right). \quad (3)$$

这里 $\omega_{cnn} = x_{mn}c/r_w$ 是截止频率, δ 是趋肤深度.

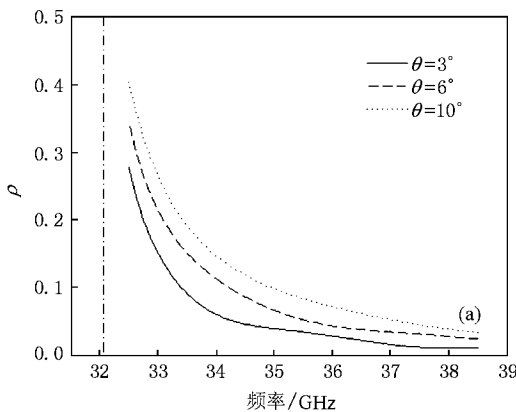
回旋行波放大器中,考虑输出端反射时,系统两端的边界条件必须满足稳态解,边界条件由两端的反射系数决定^[14].两端的边界条件在输入端 $z = z_1$ 处,其表达式为

$$f(z_1) = f_+ e^{ik_z z_1} + f_- e^{-ik_z z_1}, \quad (4a)$$

$$f'(z_1) = ik_z (f_+ e^{ik_z z_1} - f_- e^{-ik_z z_1}). \quad (4b)$$

这里将高频场分成前向波和反向波的叠加, f_+ 代表 z_1 处前向波的振幅, f_- 代表 z_1 处反向波的振幅.输出端 $z = z_2$ 处,其表达式为

$$f'(z_2) = ik_z \left(\frac{1 - \Gamma}{1 + \Gamma} \right) f(z_2), \quad (4c)$$



其中 k_z 是输入输出波导的传输常数, Γ 是 $z = z_2$ 处的复反射系数, AB 为相互作用段, BC 为输出渐变段.渐变段可以看成是渐变传输线,可以利用多点反射法计算渐变段 BC 的反射系数,反射系数 Γ 可以通过以下方程计算^[15]:

$$\frac{d\Gamma}{dz} = 2ik_z(z)\Gamma - \frac{1}{2}(1 - \Gamma^2) \frac{d}{dz} \ln Z_c(z). \quad (5)$$

这里 $Z_c(z)$ 是波导的特征阻抗,假设 CD 段接匹配负载.通过方程(5),我们就可以计算出 B 端面的反射系数.对于 $|\Gamma| \ll 1$ 时,可以忽略非线性项 Γ^2 ,为了准确的计算反射系数,以下计算中均考虑了非线性项 Γ^2 的影响.

在回旋行波放大器的注-波互作用的计算过程中,我们只考虑输出端反射的影响,结合方程(1),(4)(5)和电子的相对论运动方程编制计算程序,分析反射对注-波相互作用的影响.

3. 模拟结果与分析

我们以 TE₀₁ 模回旋行波放大器为例来研究反射对回旋行波放大器的注-波相互作用的影响,计算中选择 TE₀₁ 模回旋行波放大器工作参数为: $V = 100$ kV, $I_b = 10$ A, $\alpha = 1.0$, $s = 1$, $r_w = 5.7$ mm, $r_c = 0.48r_w$, $B_0 = 0.99B_g$, $P_{in} = 5$ W.

图2所示为渐变长度 $d = 25$ mm 时,渐变角不同时反射系数的幅度和相位随频率的变化,可以看出反射系数幅度随频率的增大而减小,随渐变角的增大而增大,在靠近截止频率处变化迅速,随频率增大变化趋于稳定,反射相位在渐变角不同时随频率的变化趋势都有所不同.图3所示为渐变角 $\theta = 6^\circ$ 时,反射系数幅度在不同频率下随渐变段长度的变化,

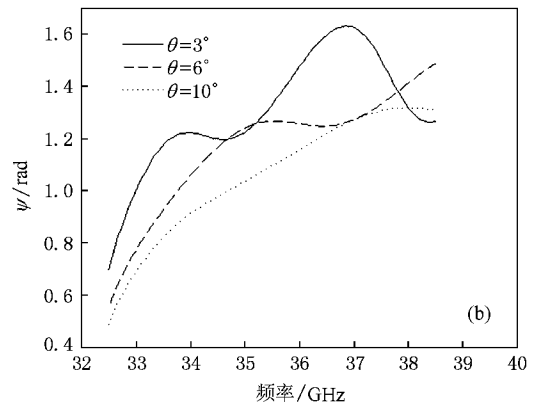


图2 反射系数的幅度 ρ (a) 和相位 ψ (b) 随频率的变化

随着渐变长度增加,反射系数幅度变化越来越缓慢,随频率的增大反射系数幅度减小,以下关于互作用的计算中,渐变长度均取为 25 mm.

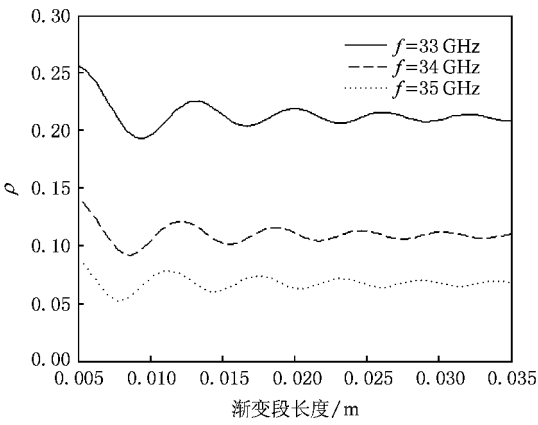


图 3 反射系数幅度 ρ 随渐变段长度的变化

图 4 所示为频率为 35 GHz 输入功率 $P_{in} = 5\text{ W}$, 互作用长度不同时的功率演化曲线. $\theta = 0^\circ$ 代表没有反射的情况,在不同的互作用长度下,输出功率达到饱和的位置基本一样,都在 0.23 m 附近,饱和功率的值也基本一致,均为 210 kW 左右,与互作用长度

的变化关系不大.与没有反射时相比,存在反射时功率演化有很大变化.互作用长度为 0.24 m 时,在渐变角 $\theta = 3^\circ, 6^\circ$ 时,在互作用长度分别为 0.215 m, 0.22 m 处,输出功率达到饱和,饱和输出功率大小与无反射时基本相同, $\theta = 10^\circ$ 时没有达到饱和;互作用长度为 0.25 m 时,功率在 $\theta = 3^\circ$ 时,互作用长度 0.23 m 处达到饱和,与没有反射时达到饱和的位置基本相同, $\theta = 6^\circ$ 时,互作用长度 0.245 m 处达到饱和,饱和推迟, $\theta = 10^\circ$ 时没有达到饱和;互作用长度为 0.26 m 时,功率在 $\theta = 3^\circ$ 时,互作用长度为 0.245 m 时达到饱和,饱和推迟, $\theta = 6^\circ, 10^\circ$ 时都没有达到饱和;互作用长度为 0.27 m 时,功率在 $\theta = 3^\circ$ 时,互作用长度为 0.26 m 时达到饱和,饱和推迟, $\theta = 6^\circ, 10^\circ$ 时没有达到饱和.同样的互作用长度下,渐变角不同时,功率达到饱和的位置不同,渐变角相同时,随互作用长度的改变,功率达到饱和的位置也不同.这是由于不同的渐变角对应不同的反射系数振幅和相位,互作用长度不同时,反射波的相位发生改变,这都将影响电子注与电磁波的相互作用过程,导致功率演化的改变.从图 4 还可以看出,反射会使电子注先吸收部分电磁能量进行预群聚,并且渐变角越

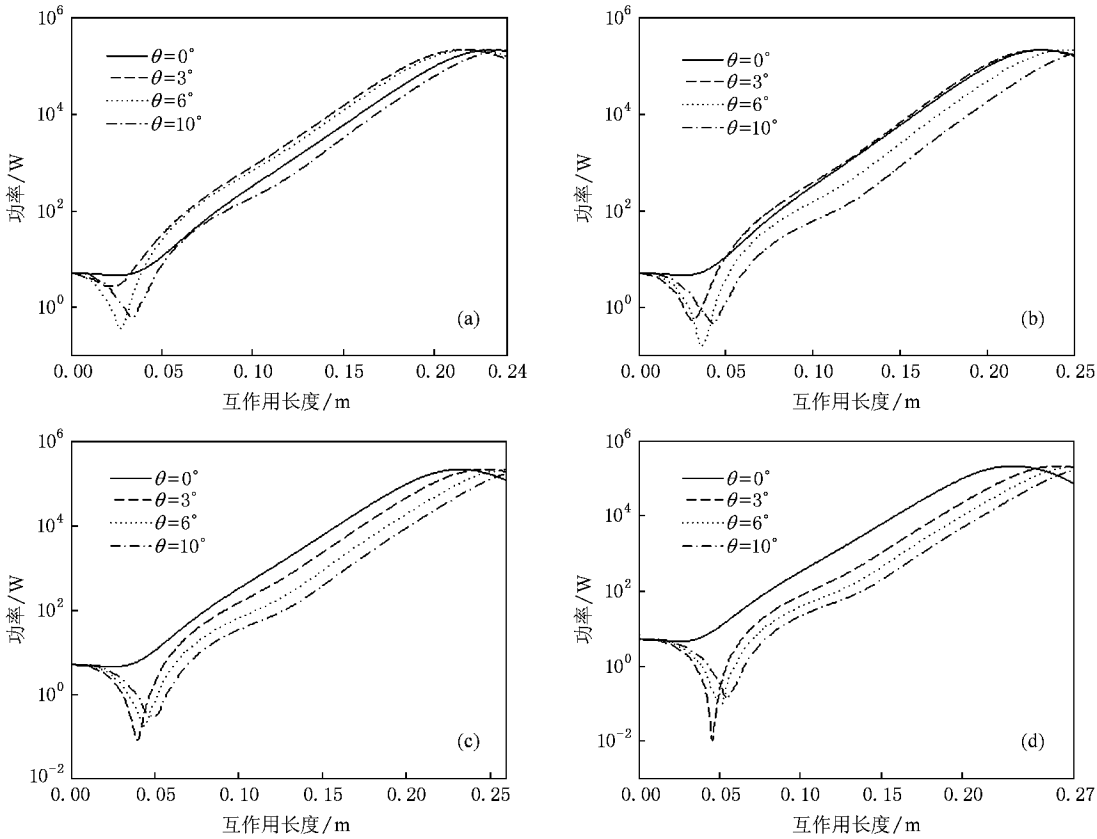
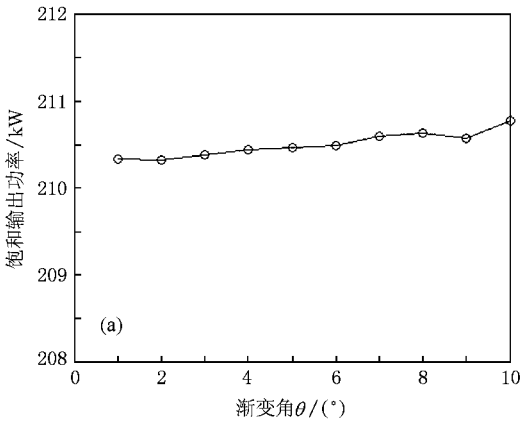


图 4 不同互作用长度下的功率演化 (a) $z = 0.24\text{ m}$ (b) $z = 0.25\text{ m}$ (c) $z = 0.26\text{ m}$ (d) $z = 0.27\text{ m}$

大这种预群聚过程越长,从而达到饱和输出最大点的相互作用长度越长.

图 5 所示是工作频率为 35 GHz,相互作用长度为 0.25 m,饱和输出功率和增益随渐变角的变化曲线.



不考虑反射时饱和输出功率和增益分别为 210.38 kW, 50.816 dB, 反射存在时,饱和输出功率均为 210 kW 左右,随渐变角增大基本保持不变,但饱和增益明显降低.

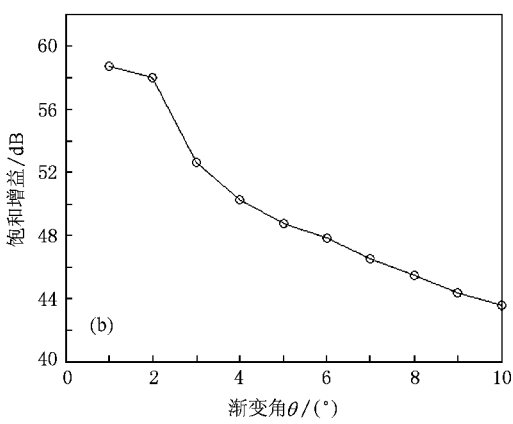


图 5 饱和输出功率(a)和增益(b)随渐变角的变化

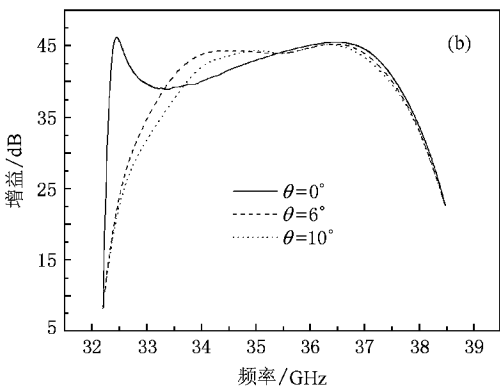
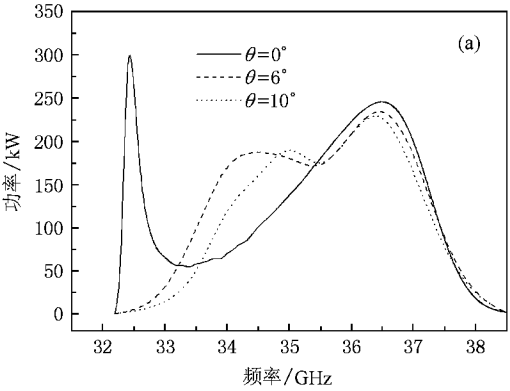


图 6 输出功率(a)和增益(b)随频率的变化

图 6 给出了输入功率为 7 W,相互作用长度为 0.25 m,渐变角 $\theta = 0^\circ, 6^\circ, 10^\circ$ 时输出功率和增益随频率的变化曲线.从图中可以看出,在靠近截止频率处,由于工作模式的轴向波数很小,波阻抗大, $\theta = 0^\circ$ 时注-波相互作用会在一个相对窄的频率范围内出现强耦合.对于 $\theta = 6^\circ, 10^\circ$,由于反射,这种波阻抗增大的作用已经大为削弱.随着频率增大,反射系数幅度减小,在频带中部, $\theta = 6^\circ, 10^\circ$ 时的输出功率、增益变化曲线比 $\theta = 0^\circ$ 时平坦.在频率大于 37 GHz 时,反射系数较小,对输出功率的影响很小. $\theta = 0^\circ$ 时,3 dB 带宽约为 2.5 GHz(~ 6.76%), $\theta = 6^\circ$ 时,3 dB 带宽约为 3.7 GHz,相对带宽大于 10%,渐变角继续增大,带宽将变小.计算表明,此时输入功率的减小和增大,最大输出功率基本保持不变,但工作频带宽度都会减小.

4. 结 论

本文研究了输出端反射对 Ka 波段 TE_{01} 模基波工作回旋波放大器注-波相互作用的影响,通过数值模拟发现,相互作用长度不变的情况下,随渐变角增大,功率达到饱和输出最大值的长度增加.相互作用长度增长会使功率达到饱和输出最大值的长度加长,而渐变角太大会使输出功率在设定相互作用长度内达不到最大值.反射存在时饱和增益随渐变角增大明显降低.无论反射是否存在,只要相互作用长度足够长,饱和输出功率基本保持不变.适当的输出渐变反射可能可以缩短饱和功率输出的相互作用长度,同时展宽相互作用工作频带.计算结果表明,在输出渐变角 θ

$\approx 6^\circ$ 、输入功率为 7 W 时,最大输出功率达到 230 kW, 3 dB 带宽约为 3.7 GHz (相对带宽大于 10%)。

-
- [1] Chu K R 2004 *Rev. Mod. Phys.* **76** 489
- [2] Thumm M 2007 *State-of-the-art of High Power Gyro-Devices and Free Electron Masers Update* 2006 (Karlsruhe : Forschungszentrum Karlsruhe)
- [3] Chu K R 2002 *IEEE T. Plasma Sci.* **30** 903
- [4] Nusinovich G S 2004 *Introduction to the Physics of Gyrotron* (Baltimore : The Johns Hopkins University Press)
- [5] Chu K R ,Chen H Y ,Hung C L 1999 *IEEE T. Plasma Sci.* **29** 391
- [6] Jiao C Q ,Luo J R 2007 *Int. J. Infrared Milli. Waves* **28** 1095
- [7] Chen N C ,Yu C F ,Chang T H 2007 *IEEE T. Plasma Sci.* **14** 123105
- [8] Jiao C Q ,Luo J R 2006 *Phys. Plasmas* **13** 113101
- [9] Jiao C Q ,Luo J R 2006 *Appl. Phys. Lett.* **88** 061115
- [10] Jiao C Q ,Luo J R 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 6360 (in Chinese) [焦重庆、罗积润 2006 物理学报 **55** 6360]
- [11] Antonsen T M ,Cai Jr A Y ,Nusinovich G S 1992 *Phys. Fluids B* **4** 4131
- [12] Dumbrajs O 2000 *IEEE T. Plasma Sci.* **28** 588
- [13] Borie E 2001 *IEEE T. Microwave Theory and Techniques* **49** 1342
- [14] Kou C S 1994 *Phys. Plasmas* **1** 3093
- [15] Li Q F ,Chu K R 1982 *Int. J. Infrared Millim. Waves* **3** 705

Influence of reflection of the output port on beam-wave interaction in gyrotron traveling wave amplifier

Sun Hai-Yan^{1,2)†} Jiao Chong-Qing^{1,2)} Luo Ji-Run¹⁾

1) *Institute of Electronics ,Chinese Academy of Sciences ,Beijing 100190 ,China*

2) *Graduate University of Chinese Academy of Sciences ,Beijing 100049 ,China*

(Received 4 May 2008 ; revised manuscript received 1 July 2008)

Abstract

Based on the nonlinear self-consistent theory of gyrotron traveling wave amplifier(gyro-TWA) ,the influence of the reflection from the tapering output port on the beam-wave interaction in the gyro-TWA is studied. The simulation results show that the amplitude and phase of the reflection coefficient resulting from the variation of the tapering angle at the output port and the beam-wave interaction length have great effect on the beam-wave interaction for a Ka band TE₀₁ gyro-TWA. Reasonably selecting the tapering angle at the output port may increase the beam-interaction frequency bandwidth with a relatively short beam-wave interaction length while keeping the saturated output power of the gyro-TWA at almost the same level.

Keywords : gyrotron traveling wave amplifier(gyro-TWA) , beam-wave interaction , reflection coefficient

PACC : 4170 , 5275

† E-mail : sunhaiyan80@gmail.com