

增加回旋行波放大器带宽的一种新方法

杨蕴渊¹⁾ 丁武²⁾

¹⁾ (中国工程物理研究院北京研究生部, 北京 100088)

²⁾ (北京应用物理与计算数学研究所, 北京 100088)

(1999 年 7 月 8 日收到)

提出了一种增加回旋行波放大器带宽的新模型, 其特点是适当地选取轴向引导磁场的初值并从相互作用区的给定位置开始使其缓慢地线性减小. 该模型的输出带宽可达到已有宽带模型的水平, 但效率有较大提高. 对波束相互作用的物理机制进行了理论分析并用数值模拟的方法进行了证实. 当电子束的电流为 7 A, 电压为 90 kV, 速率比为 1.0, 纵向动量散度为 2% 时, 计算得到了 20% 的常数驱动带宽和 42% 的效率, 输出的峰值功率和增益分别为 260 kW 和 47 dB.

PACC: 5250; 5275; 2921; 8440

1 引 言

回旋行波放大器做为一种快波放大器件, 由于其输出频率高、功率容量大, 且与其他回旋管器件相比, 带宽比较宽, 因而在未来的高分辨率和高容量密集性通信系统方面有好的应用前景. 为满足需要, 上述应用要求更宽的带宽或在宽带条件下器件其他性能, 如增益和效率等的提高.

目前研究的比较多的增加带宽的模型有两个: 一是分布型回旋行波放大器^[1, 2], 它要求对波导管的半径和引导磁场同时锥化. 运用两级波导管^[1], 该模型已在 35 GHz 附近得到了 20% 带宽, 输出的峰值功率、增益和效率分别为 8 kW, 26 dB 和 16%. 在该模型中, 精确调节磁场大小比较复杂. 若采用一级波导管, 还需逆向注入微波信号. 二是填充介质的回旋行波放大器, 它通过在波导管管壁的内表面粘贴介质来减小色散. 目前已在 10 GHz 附近得到了 14% 的饱和带宽, 输出的峰值功率、增益和效率分别为 55 kW, 27 dB 和 11%^[3]. 该模型的输出频率比较低, 且可能出现介质放电现象. 最近文献^[4]提出了运用两束电子束产生宽带输出的双束回旋行波放大器. 另外还有运用周期性结构^[5]和双螺旋波导管^[6]来增加带宽的模型.

本文将提出一种增加回旋行波放大器带宽并提高其效率的新模型, 其中引导磁场在入口处的值 B_{0z} 略大于切点状态对应的磁场值 B_g , 并从相互作用

区的给定位置开始缓慢地线性较小, 器件的其他结构参数保持不变. 与分布型回旋行波放大器不同, 新模型中我们没有改变波导管的半径, 只是从相互作用区的给定位置开始对磁场进行了线性锥化; 它与为提高器件效率而对磁场进行锥化也不同^[7], 入口处磁场的选取使得电子可在更宽的频区内与辐射场共振. 下面我们将对该模型做理论分析和数值模拟, 并对模拟的结果做讨论.

2 模 型

2.1 模型介绍

新模型运行的基本原理与传统的回旋行波放大器完全相同, 即具有横向运动速度的电子束在轴向磁场的引导下, 通过半径均匀的波导管, 激发波导管中的本征模放大输入信号. 我们知道, 在回旋行波放大器中, 一般将工作点选在切点状态 (grazing condition), 所用的磁场略低于切点处所对应的磁场值, 从而获得尽可能高的增益和带宽. 为了进一步增加器件的带宽和效率, 我们运用一种新的磁场形式,

$$\mathbf{B}(z) = \begin{cases} B_{z0} \hat{z} & z < L_0, \\ -\frac{1}{2} B_{z0} \delta r \hat{r} + B_{z0} (1 + \delta(z - L_0)) \hat{z} & z \geq L_0, \end{cases} \quad (1)$$

即在靠近相互作用的入口处, 磁场 \mathbf{B} 恒定, $\mathbf{B} =$

$B_{z0} \gtrsim$ 同时要求 B_{z0} 略大于 B_g , $B_g = \frac{\omega_c mc \gamma}{s \gamma_z e}$, 其中 ω_c 为本征模的截止频率, γ 为电子的相对论因子, $\gamma_z = (1 - \beta_z^2)^{-\frac{1}{2}}$, $\beta_z = \frac{v_z}{c}$, v_z 为电子的轴向速度, c 为真空中的光速; 从相互作用区的某一位置 ($z = L_0$) 开始, 轴向磁场缓慢地线性减小, 同时产生小的径向分量, 在相互作用区的末段, 轴向磁场 B_z 小于 B_g , 我们称 $z < L_0$ 的作用区为场的常数区, $z > L_0$ 的作用区为场的锥化区。

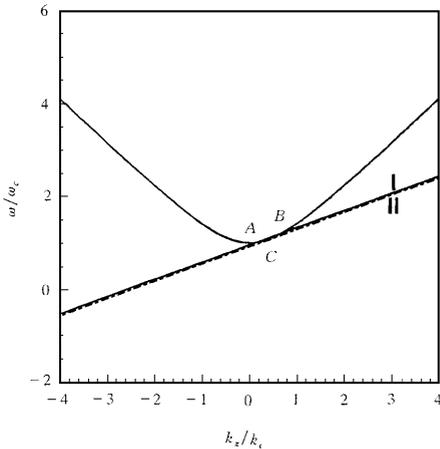


图1 电子回旋共振线与波导管色散曲线的关系图, I: $B_z = 1.032B_g$, II: $B_z = B_g$

在场的常数区, 由于 B_{z0} 大于 B_g , 因而电子的回旋共振线与波导管中本征模的色散曲线将有两个交点 A 和 B (图1), 它们所对应的频率 ω_{R_1} 和 ω_{R_2} 以及相应的纵向波数 k_{z_1} 和 k_{z_2} 可表示为^[8]

$$\omega_{R_1, R_2} = s \gamma_z^2 \Omega \left(1 \mp \beta_z \sqrt{1 - \frac{1}{\epsilon^2}} \right), \quad (2)$$

$$k_{z_1, z_2} = s \gamma_z^2 \frac{\Omega}{c} \left(\beta_z \mp \sqrt{1 - \frac{1}{\epsilon^2}} \right), \quad (3)$$

其中 s 为电子回旋共振谐波数, $\Omega = \frac{e B_{z0}}{mc \gamma}$, $\epsilon = \frac{s \gamma_z \Omega}{\omega_c} = \frac{B_{z0}}{B_g}$. 这里我们要求 k_{z_1} 和 k_{z_2} 都大于零, 即 A 和 B 两点所对应的模式均向前传播, 根据 (3) 式, 这要求 ϵ 满足

$$\epsilon < \gamma_z. \quad (4)$$

另外, 我们还要求 ϵ 足够小, 使得电子回旋共振线不

会与最临近工作模的高阶模的色散曲线相交. 由于我们只要求初始时轴向磁场 B_z 略大于 B_g , 即 ϵ 接近于 1, 因而对于中等电压与速率比的电子束, 为增加带宽所给的 ϵ 总满足上述要求。

进入场的锥化区后, 轴向磁场开始缓慢地线性减小, 电子的回旋共振线将随之缓慢向下平移, 平移过程中与波导管的色散曲线产生一系列交点. 当降至 $B_z = B_g$ 时, 两条色散线处于相切状态, 切点 C (图1) 所对应的频率 ω_{R_3} 为

$$\omega_{R_3} = s \gamma_z^2 \Omega_g = \gamma_z \omega_c, \quad (5)$$

继续减小磁场, 两条色散曲线不再产生共振点. 在磁场缓慢减小的过程中, 对于频率位于 ω_{R_1} 和 ω_{R_2} 之间的信号, 都存在一个局部的相互作用区, 其中电子能与该信号发生共振. 根据 (2) 式, 可以求出

$$\frac{\Delta \omega}{\omega_{R_3}} = \frac{\omega_{R_2} - \omega_{R_1}}{\omega_{R_3}} = 2 \beta_z \sqrt{\epsilon^2 - 1}. \quad (6)$$

由上式可以看到, 初始时轴向磁场稍微偏离 B_g , 就会使电子束在一个较宽的频率范围内与波导管的本征模发生共振. 例如, 当 $\epsilon = 1.032$, 电子束电压 $V = 90$ kV, 速率比 $\alpha = 1.0$ 时, $\frac{\Delta \omega}{\omega_{R_3}} = 19\%$; 当 $\epsilon = 1.024$, $V = 135$ kV, $\alpha = 1.0$ 时, $\frac{\Delta \omega}{\omega_{R_3}} = 19\%$. 如果整个频区内的信号均能得到有效放大, 器件将产生宽带输出。

2.2 理论分析

本节将从理论上指出, 频率位于 ω_{R_1} 到 ω_{R_2} 频区内的所有信号均有可能得到有效放大. 为了便于说明, 将整个频区划分为 ω_{R_1} 区、 ω_{R_2} 区和 ω_{R_3} 区. 对于频率位于 ω_{R_1} 区和 ω_{R_2} 区内的信号, 显然, 它们会在场的常数区 ($z < L_0$) 内得到一定的放大 (相当于 CARM-TWT). 相对于 ω_{R_1} 区, ω_{R_2} 区由于 k_z 较大, 轴向和角向两种群聚机制相互抑制^[9], 因而增益比较低. 如果从适当的位置开始减小轴向磁场, 那么, 不仅可以提高提取效率, 也可以降低器件对能散度的敏感程度^[7], 其中要求场的常数区的长度接近于 ω_{R_2} 区信号的饱和长度. 回旋波放大器中存在着惯性群聚和力群聚两种作用, 在惯性群聚过程中辐射场首先引起电子能量的变化, 在电子束的传播过程中, 能量调制逐渐变为相位调制, 在力群聚过程中辐射场直接引起电子相位的调制. 因此对于频率位于 ω_{R_3} 区的信号, 输入一定强度的微波后, 虽然在入口

区电子束与辐射场不会发生强烈共振,从而有效提取能量,但电子束本身可能得到较好的群聚^[10].这种被预群聚的电子束通过场的锥化区后,器件产生强的微波输出.总之,在 ω_{R_1} 区和 ω_{R_2} 区,辐射场首先在场的常数区得到放大,进入锥化区后得到进一步的放大.在 ω_{R_3} 区,电子在常数区预群聚,能量释放主要在锥化区进行.

基于以上的理论分析,适当选取磁场的初始值 B_{z0} ,场的常数区的长度(L_0)以及磁场的锥化幅度(δ),就会在一个宽的频区内得到强的微波输出.

3 模拟结果和讨论

本节对新模型做数值模拟,以便证实该模型可实现高的提取效率和宽带输出.在模拟过程中,假设电子束为无限薄的均匀圆环,其脉冲足够长,选取圆波导管中的 TE_{01} 模作为工作模,辐射场与电子一次回旋谐波共振,即 $s=1$,忽略空间电荷效应.除另有说明外,各物理量取如下值:电子束电压 V 为90 kV,电流 I 为7 A,速率比 α 为1.0,电子引导中心

的半径 $r_g=0.75 r_w$, r_w 为波导管的截面半径,纵向动量散度为2%,初始时 $B_{z0}=1.032 B_g$,锥化幅度 δ 为 $-0.184\%/r_w$ (cm),输入功率 P_{in} 为5 W, $L_0=54 r_w$.为了求得器件的带宽,我们在一个较宽的频区内进行了计算,得到了以下主要结果:

与理论分析一致,不同频区内的信号有着各自的放大特性.由图2(a)看到,当 $\omega \approx \omega_{R_1}$ 时,初始时增益较高,在 $z=L_0$ 之前,辐射功率有一个极值,饱和时的输出功率大于该极值;当 $\omega \approx \omega_{R_2}$ 时,除初始时有一个小的降落外,辐射功率随相互作用距离的增长而增长直至饱和;当 $\omega = \omega_{R_3}$ 时,由于初始时失谐较大,力群聚作用比惯性群聚强得多,因而辐射功率有一个较大的降落,随后发生小的振荡,最后辐射功率指数增长直至饱和.对应的群聚参数 b (图2(b))则随着相互作用距离的增长单调增加直至饱和.

由图2(a)还看到,新模型中,饱和后输出功率的振荡幅度比较小,因此器件的输出带宽和功率对相互作用区长度的变化并不敏感,取 $L=114 r_w$,器件的常数驱动带宽和效率分别达到20%和42%,输出功率和增益分别为260 kW和47 dB.

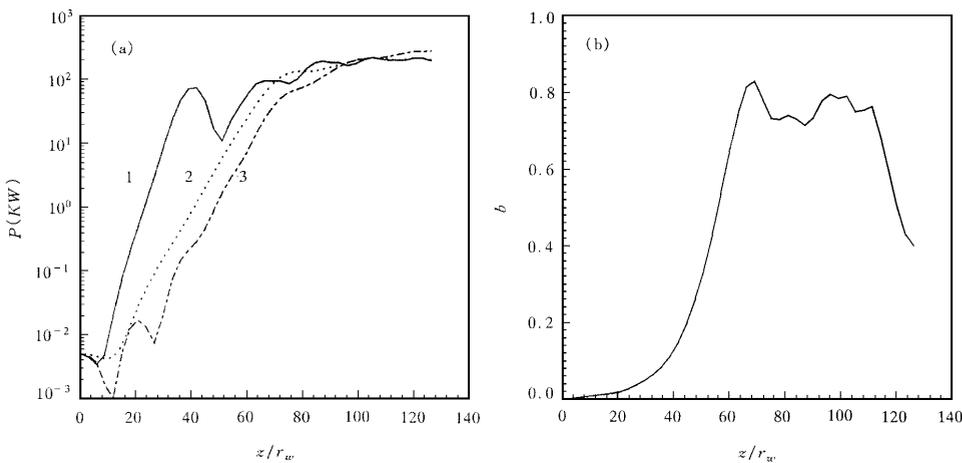


图2 (a)不同频率的信号辐射功率随空间的演化关系图,曲线1、2和3分别代表 $\omega/\omega_{R_3}=0.94$, $\omega/\omega_{R_3}=1.0$ 和 $\omega/\omega_{R_3}=1.12$ (b)给出了 $\omega = \omega_{R_3}$ 时,群聚参数 b 随空间的演化关系图

当输入功率 P_{in} 由5 W变为3 W和7 W时,由图2(a)看到,输出功率和带宽改变不大,当 $P_{in}=3$ W时,分别为260 kW和19%,当 $P_{in}=7$ W时,分别为268 kW和20%.当电子束的纵向动量散度由2%增加到3%时,对于低频区的信号,输出功率变

化不大,高频区信号尽管输出功率下降较大,但工作效率仍超过20%,与常磁场情况相比有很大提高^[7],器件的峰值功率和带宽分别为252 kW和18%(图2(b)).保持其他参数不变,改变磁场锥化的幅度,即 δ 由 $-0.184\%/r_w$ (cm)变为 $-0.155\%/r_w$

(cm) 输出的峰值功率和带宽基本保持不变(图 3(c));提高电子束的电流至 10 A,也可以得到宽带和高效的输出(图 3(d)). 以上结果表明,器件的运行结果对一些比较重要的参数如输入信号的强度、磁场的锥化幅度和电子束的电流等不敏感.

适当提高电子束的电压,器件的输出功率相应提高,当电子束的电压为 135 kV 时,选取 $\epsilon =$

1.024, L_0, δ, L 以及电子束的电流、动量散度和速率比保持不变,计算得到器件输出的峰值功率和带宽分别为 369 kW 和 18%,效率和增益分别为 39% 和 48 dB.

理论分析和数值计算表明,新模型确实可产生高效率(40%)的宽带输出($\sim 20\%$),其中所要求的磁场形式比较简单,在技术上实现它并不困难.

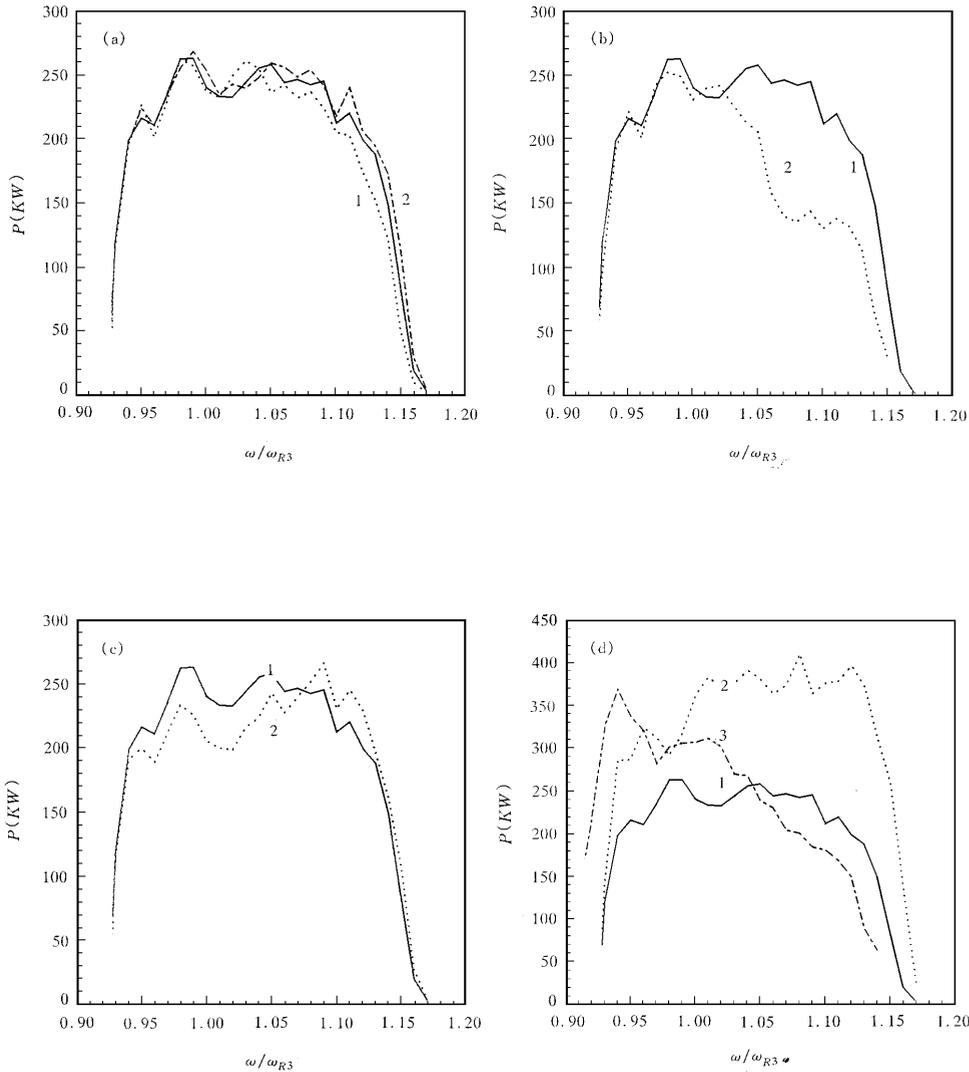


图 3 输出功率随频率的变化关系图 (a)中曲线 1 和 2 分别表示 P_{in} 为 3 W 和 7 W (b)中曲线 1 和 2 分别表示电子纵向动量散度分别为 2% 和 3%, 对应的输入功率分别为 5 W 和 9 W (c)中曲线 1 和 2 分别表示锥化幅度 δ 为 0.184% $/r_w$ (cm) 和 0.155% $/r_w$ (cm) (d)中曲线 1 和 2 分别表示电子束电流 $I = 7$ A 和 10 A, 曲线 3 表示电子束的电压为 135 kV

在新模型中,尽管在相互作用的入口区轴向磁场略大于切点状态所对应的磁场值,但由于经过一个较短的常数区后,磁场便开始缓慢地线性减小,因

此器件的稳定性不会受到太大的影响. 同时我们取 r_g 等于 $0.75 r_w$ 而非最佳值 $0.5 r_w$,也在一定程度上削弱了波束相互作用的强度从而提高了运行的稳

定性. 另外, 目前抑制回旋行波放大器中的不稳定性的方法较多, 其中最有效的方法之一就是运用有一定损耗的波导管^[11].

4 结 论

本文提出了一种增加回旋行波放大器带宽的新模型, 该模型的输出带宽达到了已有宽带模型的水平, 但效率有较大提高. 其特点是入口处轴向磁场值略大于切点状态对应的磁场值, 从相互作用区的给定位置开始使其缓慢地线性减小. 我们对波束相互作用的物理机制进行了理论分析并用数值模拟的方法进行了证实. 当电子束的电流为 7 A, 电压为 90 kV, 速率比为 1.0, 纵向动量散度为 2% 时, 计算得到了 20% 的常数驱动带宽和 42% 效率, 输出的峰值功率和增益分别为 260 kW 和 47 dB.

[1] G. S. Park, J. J. Choi, S. Y. Park, C. M. Armstrong *et al.*,

Phys. Rev. Lett. **74**(12)(1995) 2399.

- [2] Y. Y. Lau, K. R. Chu, *Int. J. Infra. and Milli. Waves*, **2**(3) (1981) 415.
- [3] K. C. Leou, D. B. McDermatt, C. K. Chong, N. C. Luhmann, *IEEE. Trans. Electro. Dev.* **43**(6)(1996) 1016.
- [4] 杨蕴渊, 丁武, *物理学报*, **48**(1999), 2275 [Yang Yun-yuan, Ding Wu, *Acta Physica Sinica* **48**(1999) 2275 (in Chinese)].
- [5] K. C. Leou, Tao Pi, D. B. McDermatt, N. C. Luhmann, *IEEE Tran. Plas. Sci.* **26**(3)(1998) 488.
- [6] Simon J. Cooke, G. G. Denisov, *IEEE Tran. Plas. Sci.* **26**(3) (1998) 519.
- [7] K. D. Pendergast, B. G. Danly, R. J. Temkin, J. S. Wurtele, *IEEE Trans. Plas. Sci.* **16**(2)(1998) 122.
- [8] "Applications of High Power Microwaves" ed. Andrei V. Gaponov Grekhov and Victor L. Granatstein, Artech house, INC 685 Canton-street Norwood, MA 02062 (1994), 77-79.
- [9] K. R. Chu, A. T. Lin, *IEEE Trans. Plas. Sci.* **16**(2)(1988), 90.
- [10] P. Sprangle, R. A. Smith, *J. Appl. Phys.* **51**(6)(1980) 3001.
- [11] V. L. Bratmann, G. G. Denisov, *Int. J. Electronics*, **72**(1992), 969.

A NEW MODEL FOR WIDEBAND GENERATION IN A GYRO-TWT AMPLIFIER

YANG YUN-YUAN¹⁾ DING WU²⁾

¹⁾ Graduate School, China Academy of Engineering and Physics, Beijing 100088)

²⁾ Institute of Applied Physics and Computational Mathematics, Beijing 100088)

(Received 8 July 1999)

ABSTRACT

A new model is presented for broadening the bandwidth of a Gyro-TWT amplifier. The output bandwidth is comparable to that of the existing wideband model, but the efficiency is much improved. In this model, after choosing a proper initial magnitude, the axial magnetic field has a slight linear decrease from a given position in the interaction section. The interaction mechanism of the beam-wave is analyzed and verified by numerical simulation. When the beam current is 7A, voltage is 90kV, the velocity ratio is 1.0 and the axial velocity spread is 2%, numerical results show a constant bandwidth of 20% with an efficiency 42%, the peak power and gain are, respectively, 260kW and 47dB.

PACC : 5250 ; 5275 ; 2921 ; 8440