

W波段二次谐波回旋振荡器

史少辉^{1,3,4}, 刘濮鲲^{2*}, 杜朝海², 徐寿喜¹, 耿志辉¹, 李铮迪^{1,4}, 王虎^{1,4}

- (1. 中国科学院电子学研究所, 北京 100190;
2. 北京大学信息科学技术学院, 北京 100871;
3. 石家庄学院物理学系, 河北 石家庄 050035;
4. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要:针对谐波回旋管相互作用效率低的问题,以自洽非线性理论为基本工具,系统地分析了三个关键因素,即相互作用腔体长度(Q值)、电子注的横纵速度比和工作电压对二次谐波相互作用系统性能的影响.研究发现当工作磁场选择在硬激发区时,通过综合调节电子注的横纵速度比和工作电压能够获得较高的相互作用效率.基于自洽非线性理论优化设计了一个W波段二次谐波回旋振荡器,粒子模拟(PIC)结果显示当电子注速度离散3%,工作电压37 kV,电流4 A时,输出效率达到了39.5%.

关键词:W波段;二次谐波;自洽非线性计算;回旋振荡器

中图分类号:TN129 **文献标识码:**A

A W band second harmonic gyrotron oscillator

SHI Shao-Hui^{1,3,4}, LIU Pu-Kun^{2*}, DU Chao-Hai², XU Shou-Xi¹,
GENG Zhi-Hui¹, LI Zheng-Di^{1,4}, WANG Hu^{1,4}

- (1. Institute of Electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;
2. School of Electronics Engineering and Computer Science, Peking University, Beijing 100871, China;
3. Department of Physics, Shijiazhuang University, Shijiazhuang 050035, China;
4. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: To solve the problem of low interaction efficiency of harmonic gyrotrons, self-consistent theory was used to investigate the dependence of the interaction efficiency on three critical factors; cavity length (quality factor), electronic beam's velocity ratio and operating voltage. It was found that high efficiency can be achieved by adjusting beam voltage and velocity ratio when the working magnetic field was located at the hard excitation region. Based on the self-consistent nonlinear theory, a W band second harmonic gyrotron oscillator was optimized. Particle in cell computation showed that the efficiency was up to 39.5% when the beam voltage and current was 37kV and 4A, respectively, with velocity spread of 3%.

Key words: W-band; second harmonic; self-consistent nonlinear computation; gyrotron oscillator

PACS: 84.40. Ik

引言

回旋管是基于相对论电子回旋脉塞机理的高功率新型微波器件^[1],能够在毫米波、亚毫米波段产生高功率的电磁辐射.其利用高速旋转前进的电子

注与电磁场发生相互作用,通过受激辐射的方式将电子能量转换为电磁场能.由于回旋管工作频率范围大(几GHz~几THz),输出功率高(几十kW~几MW),已被广泛地应用于许多领域,如国际热核反应中的电子回旋谐振加热^[2]、粒子诊断和光谱学、

收稿日期:2012-10-30,修回日期:2013-06-05

Received date: 2012-10-30, revised date: 2013-06-05

基金项目:国家自然科学基金(61072024, 11275206, 60971072, 11178016, 61072026)

Foundation items: Supported by National Natural Science Foundation of China(61072024, 11275206, 60971072, 11178016, 61072026)

作者简介(Biography): 史少辉(1983-),男,石家庄市元氏县人,中国科学院电子学研究所博士生,主要从事高功率毫米波源技术的研究. E-mail: shishaohui-1983@163.com

* 通讯作者(Corresponding author); E-mail: pkliu@ieee.org

主动拒止武器^[2]、毫米波雷达、材料处理等. 近年来工作于高频段的回旋管应用越来越广泛, 要提高工作频率就要利用更强的磁场. 例如, 俄罗斯应用物理研究所 (IAP) 的 1 THz 回旋振荡器的工作磁场为 38.5 T^[3], 获得如此高的磁场是非常困难的, 为了克服该困难, 可以采用谐波模式工作 (回旋管的工作磁场与谐波次数成反比). 由于谐波回旋管在工作磁场方面的巨大优势, 世界上许多研究机构都开展了谐波回旋管的研究工作: 日本 Fukui 大学的远红外研究实验室已经成功研制了八个系列 (FU CW I-VIII) 的回旋振荡器^[4-6], 它们的工作频率涵盖了从 100 GHz 至 1.80 THz 几十个频点, 其中多个频点采用二次或更高次谐波模式工作. IAP 成功设计了 400 GHz 的三次谐波回旋振荡器^[7]. 美国麻省理工大学 (MIT) 也研制了 460 GHz 的二次谐波振荡器^[8-9]. 此外, 德国卡尔斯鲁厄研究中心^[10]、中国科学院电子学研究所^[11-18] 和电子科技大学^[19] 等研究机构都开展了许多回旋管的研究和实验工作. 虽然采用谐波工作能够减小工作磁场, 但是电子注与回旋谐波的耦合强度较弱, 互作用效率较低, 因此如何提高谐波回旋管的互作用效率是谐波回旋管发展过程中值得深入研究的问题.

针对谐波回旋管互作用效率低的问题, 使用自主开发的自洽非线性程序对影响回旋振荡器互作用效率的因素进行了研究, 揭示了各个因素之间的内在联系, 找到了提高互作用效率的方法. 第一部分介绍了回旋振荡器自洽非线性理论; 第二部介绍了如何确定电子注半径和工作磁场, 重点研究了腔体的品质因数及谐振频率与腔体结构的关系; 第三部分利用非线性理论研究了注-波互作用过程, 发现了互作用效率与腔体参数以及电子注参数的内在联系, 通过综合优化互作用电路和电子注的参数, 获得了较高的输出效率; 第四部分总结了本文的主要工作和成果.

1 回旋振荡器自洽非线性理论

回旋运动的电子以速度 v 通过腔体中的电磁场区域, 其所受电磁场的作用力可用洛伦兹力方程来描述:

$$\frac{d\vec{p}}{dt} = -e[\vec{E} + \vec{v} \times (\vec{B} + \vec{B}_0)] \quad (1)$$

式中 \vec{p} 为电子的动量, \vec{B} 和 \vec{E} 表示随时间变化的高频场的磁感应强度和电场强度, \vec{B}_0 为外加静磁场的磁感应强度.

将式(1)在导引坐标系中分解, 经过复杂的数学变换, 可以得到电子纵向动量和横向动量的演化方程:

$$\frac{d\vec{u}_z}{dt} = 0 \quad (2)$$

$$\frac{d\vec{P}}{dt} + \frac{i}{\vec{u}} \left(\frac{\omega\gamma}{sc} - \frac{eB_0}{m_0c} \right) \vec{P} = \frac{i\eta_0\gamma C_{mn} k_{mn} f(z)}{2\vec{u}_z c^2}$$

$$J_{m-s}(k_{mn}R_c) \frac{1}{(s-1)!} \left(\frac{k_{mn}\vec{P}^*}{2\Omega_0} \right)^{s-1} (i \cdot c)^{s-1}, \quad (3)$$

式中 $\vec{u}_z = u_z/c = \gamma v_z/c$ 为归一化纵向动量, 在推导过程中忽略了高频磁场对电子的作用力, 因此纵向动量不随时间变化. $f(z) = |f(z)| \exp(-i\psi(z))$ 为腔内电场幅值沿轴向的分布函数, $\vec{u}_t = u_t/c = \gamma v_t/c$ 为归一化横向动量, $\vec{P} = i\vec{u}_t \exp(-i\Lambda)$ 为归一化动量函数, $\Lambda = (\omega/s - \Omega)\tau - (\omega/s - 1)\phi_e$ 为慢变相位因子, τ 为时间, ϕ_e 为导引中心角, $\Omega_0 = eB_0/m_0$ 为初始时电子的回旋角频率, C_{mn} 为归一化常数, $\eta_0 = |e|/m_0$ 为电子荷质比, s 为谐波数, k_{mn} 为横向波数, m 为工作模式的角向指数, ω 为高频场的角频率.

利用有源麦克斯韦方程, 可以推导出电场幅值沿轴向的演化方程:

$$\left(\frac{d^2}{dz^2} + \frac{\omega^2}{c^2} - k_{mn}^2 \right) f(z) = -i\omega\mu_0 \frac{I_0 C_{mn} k_{mn}}{2}$$

$$J_{m-s}(k_{mn}R_c) \frac{1}{\vec{u}_z} \frac{1}{(s-1)!} \left(\frac{-ick_{mn}}{2\Omega_0} \right)^{s-1} \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \vec{p}^s d(\omega t), \quad (4)$$

式(2)~(4)就是描述回旋管中电子和场相互作用的自洽方程组, 利用三个方程就能够完全描述电子注与高频场互作用的过程.

2 冷腔的研究

本文以三段式互作用结构为研究对象, 其结构如图 1 所示, 由输入截止段、中间段和输出渐变段三部分组成. 回旋振荡器一般工作在截止频率附近, 因此中间段的半径可由下式计算:

$$r_0 = \frac{x_{mn}c}{2\pi f}, \quad (5)$$

式中 x_{mn} 为第 m 阶贝塞尔函数导数的第 n 个根, f 为工作频率, c 为真空中的光速. 为了减小欧姆损耗, 选择 TE_{02} 模作为工作模式. 图 2 画出了注波同步曲线和波导模色散曲线 (轴向波数对工作模式归一化), 其中 $s=2$ 的注波同步线和 TE_{02} 模色散曲线的交点就是振荡器的工作点. 从图中可以看出, 可能存在的二次谐波竞争模式主要有 TE_{61} 、 TE_{22} 和 TE_{51} , 基

波竞争模式有 TE_{01} 和 TE_{21} .

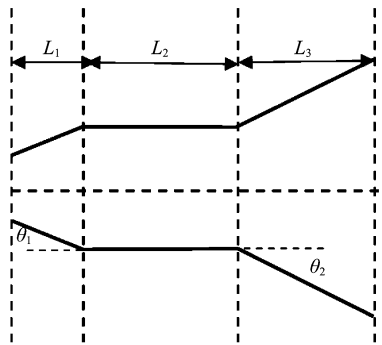


图1 三段式相互作用电路结构
Fig. 1 Interaction structure with three sections

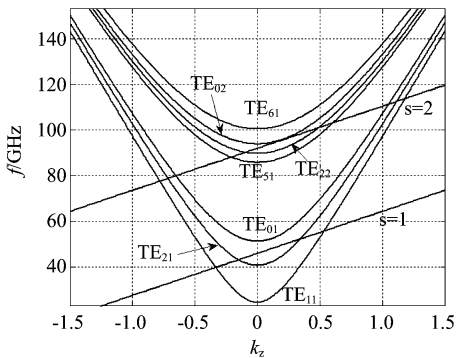


图2 归一化色散曲线和注-波同步条件
Fig. 2 Normalized dispersion relation and beam-wave synchronism lines

电子注与场之间相互作用的强弱程度可用电子注-波耦合系数来衡量,其表达式为:

$$C_{BF} = \frac{J_{m-2}^2(x_{mn}r_b/r_0)}{(x_{mn}^2 - m^2)J_m^2(x_{mn})} \quad (6)$$

式中 r_b 为电子注导引中心半径. 图3画出了二次谐波工作模式的耦合系数随电子注半径的变化情况,从图中可以看出 TE_{02} 模的耦合系数在 $r_b = 1.55$ mm 处最大,而在该位置处其它三个模式的耦合系数都非常低,因此选择 $r_b = 1.55$ mm 能有效地抑制近邻模式的竞争. 由线性理论得到的起振电流是判断模式能否起振的一个重要参数,其计算式为:

$$I_{st} = \frac{I_{stn}}{0.238 \times 10^{-3}} \left(\frac{2^s s!}{s^s}\right)^2 \left(\frac{L}{\lambda}\right) \frac{\gamma_0 \beta_{\perp 0}^{6-2s}}{Q_T} \times \frac{(\chi_{mn}^2 - m^2)J_m^2(\chi_{mn})}{J_{m-s}^2(k_{mn}r_b)} \quad (7)$$

其中, $I_{stn} = \frac{4}{\pi u^2} \frac{e^{2x^2}}{ux - s}$, $x = \frac{u\Delta}{4}$, $u = \pi \frac{L}{\lambda} \frac{\beta_{\perp 0}^2}{\beta_{\perp 0}}$, $\Delta = \frac{2}{\beta_{\perp 0}^2} \left(1 - s \frac{\Omega_0}{\omega}\right)$.

利用该式计算了当工作电压为 36 kV, 电子注速度比 $\alpha = 1.5$, 电子注半径 $r_b = 1.55$ mm 时起振电流随工作磁场的变化情况,如图4所示(实线代表二次谐波,虚线代表基波). 从图中可以看出,工作模式的工作磁场与近邻模式具有很好的分离度,为了得到最高的相互作用效率,我们将工作点选择在硬激发区(图4中的黑点),对应的工作磁场强度为 1.75 T.

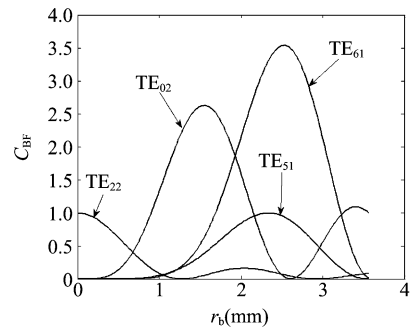


图3 耦合系数随电子注半径的变化情况
Fig. 3 Dependence of coupling coefficients on magnetic field

腔体的品质因数是影响相互作用效率的重要参数,选择合适的品质因数非常重要. 我们利用自编的冷腔程序研究了腔体品质因数 Q 随腔体参数的变化情况,发现 Q 受中间段长度及输入输出段倾角的影响较大. 图5画出了当 $L_1 = L_3 = 10$ mm、 $\theta_1 = 2.5^\circ$ 、 $\theta_2 = 3^\circ$ 时品质因数随中间段长度的变化情况,从图中可以看出, Q 值随 L_2 增加而迅速增加,这是由腔体中存储能量随腔体长度增加而增加引起的. 图5还画出了腔体的谐振频率随 L_2 的变化情况,从图中可以看出,谐振频率随 L_2 的增加而减小,这是由工作波长的增加而引起的. 图6画出了当 θ_1 和 θ_2 改变时 Q 的变化情况,从图中可以看出 Q 随 θ_1 的增加而减小,这是因为随 θ_1 的增加工作频率的截止点向中间腔方向移动,腔体的有效长度减小,腔体中存储的能量变小,因此 Q 值变小. 从图6还能看出 Q 随 θ_2 的增加而增大,这是由 L_3 端的反射系数增加引起的.

3 电子注-波互作用的研究

回旋管中高频场只吸收电子注的横向能量,因此相互作用效率受电子注速度比 α 的影响很大,另外相互作用腔的长度以及工作电压对相互作用效率也有较大影响. 实际上,三者对相互作用效率的影响是互相关

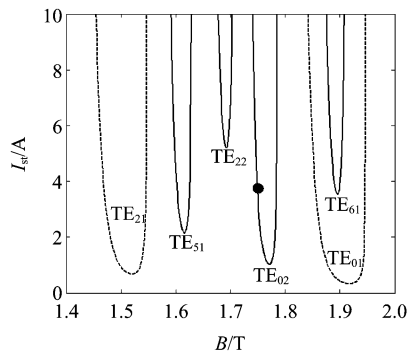


图4 起振电流随工作磁场的变化情况
Fig. 4 Dependence of starting current on beam radius

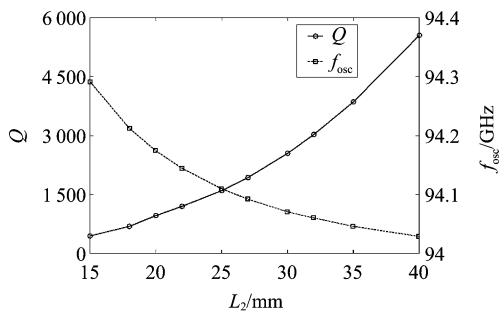


图5 品质因数和谐振频率随 L_2 的变化情况
Fig. 5 Dependence of quality factor and oscillation frequency on L_2

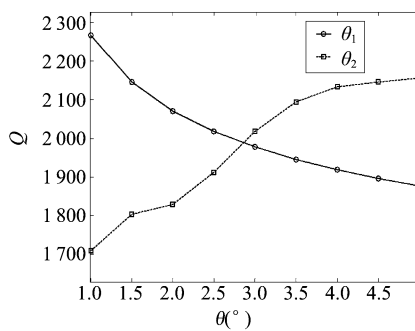


图6 品质因数随 θ_1 和 θ_2 的变化情况
Fig. 6 Dependence of quality factor on θ_1 and θ_2

联的,找到三者之间的内在联系对提高相互作用效率非常重要.针对这个问题,我们利用自洽非线性程序进行了研究.图7给出了当 $B = 1.75 \text{ T}$, $U = 36 \text{ kV}$, $I = 4 \text{ A}$, $L_2 = 27.5 \text{ mm}$ 时输出功率和效率随 α 的变化情况,从图中可以看出 $\alpha = 1.5$ 时输出效率最大,当 $\alpha > 1.5$ 后相互作用效率逐渐下降,这是因为不同 α 值对应不同的轴向速度, α 值增大则电子与场的相互作用时间变长,部分电子在交出能量后仍处于相互作用区,

就会从场中反吸能量(过群聚),降低了相互作用效率.当 $\alpha < 1.5$ 时,电子通过相互作用区的时间变短,电子与场还没有充分的交换能量就离开了相互作用区,因此效率也较低.图8给出了当 α 取不同值时相互作用效率随中间段长度的变化情况(其它工作参数同图7).从图中可以看出,当 α 取不同值(1.4、1.6和1.8)时,最大效率对应的 L_2 分别为 26 mm、24 mm 和 22 mm,即 α 越大,最大效率对应的 L_2 越小,这是因为 α 越大电子通过互作区的速度越慢,所以取得最大效率所需要的相互作用长度也就越短.

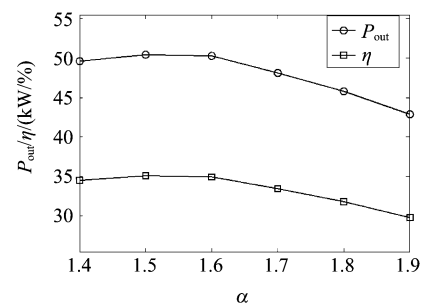


图7 输出功率和效率随 α 的变化
Fig. 7 Dependence of output power and efficiency on velocity ratio

为了进一步研究 α 值及相互作用区长度对相互作用效率的影响情况,我们用粒子模拟软件 CHIPIC 模拟了当 $B = 1.75 \text{ T}$, $U = 36 \text{ kV}$, $I = 4 \text{ A}$, $\alpha = 1.6$, $L_2 = 30 \text{ mm}$ 和 22 mm 时电子注与场的相互作用过程.图9画出了两种相互作用电路中电子注功率及场功率随轴向坐标的变化情况(两种电路中 L_1 和 L_2 均为 10 mm ,两种情况下谐振频率稍有不同).从图中可以看出电子与场的能量交换主要发生在中间段($L_2 = 30 \text{ mm}$ 时, $z = 15 \sim 40 \text{ mm}$; $L_2 = 22 \text{ mm}$ 时, $z = 15 \sim 30 \text{ mm}$),对于 $L_2 = 30 \text{ mm}$ 的情况,当 $z = 30 \text{ mm}$ 时,电子注功率达到了最小值,但是此时电子仍处于中间相互作用区,这时大部分电子由于能量损失过多已经进入加速相位,因此电子注开始从场中吸收能量,出现了电子注能量回升阶段($z = 30 \sim 40 \text{ mm}$).对于 $L_2 = 22 \text{ mm}$ 的情况,当 $z = 30 \text{ mm}$ 时,电子注功率也达到最小,但该位置已经处于中间腔的末端,从该位置到输出端的过程中电子与场的相互作用比较弱,因此两个功率都趋于稳定(稍有的波动).

另外,当 α 一定时,电子的轴向速度还与电子的加速电压有关,因此我们研究了不同加速电压情况下输出功率与腔体长度的关系.图10画出了当 $B = 1.75 \text{ T}$, $I = 4 \text{ A}$, $\alpha = 1.6$ 、加速电压取不同值时输

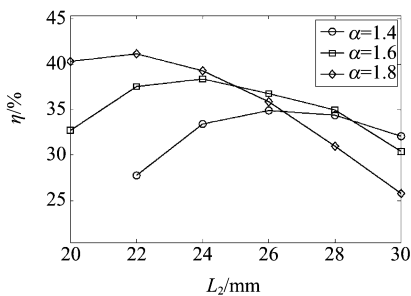


图 8 输出效率随 L_2 的变化情况
Fig. 8 Dependence of output efficiency on L_2

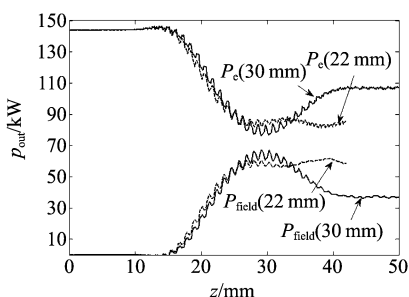


图 9 电子注功率和场功率沿轴向的变化情况
Fig. 9 Development of beam power and wave power along z axis

输出功率随 L_2 的变化情况. 从图中可以看出, 电压越高, 则最大输出功率对应的 L_2 越大, 这是因为电压越大, 电子的轴向速度越大, 取得最大效率所需要的相互作用长度也越大, 这与图 8 中 α 减小时的情况本质相同. 通过图 7-图 10 的分析可知, 腔体长度、电子注的加速电压和速度比与相互作用效率紧密相关, 要获得最高效率, 需要把三个因素结合起来综合考虑. 基于该思想, 通过优化, 获得了振荡器工作参数如表 1 所示 (表中结果考虑了电子枪的实际发射能力, 选择了 $\alpha = 1.6$).

表 1 回旋振荡器的工作参数

Table 1 Operating parameters of the gyrotron oscillator

工作频率 (GHz)	94.0	L_1 (mm)	10
工作模式	TE021	L_2 (mm)	24.5
谐波次数	2	L_3 (mm)	10
品质因数	2 133	工作电压 (kV)	37
磁场感应强度 (T)	1.753	电子注电流 (A)	4
腔体半径 (mm)	3.56	电子速度比 (α)	1.6
电子注半径 (mm)	1.55		

使用 CHIPIC 模拟了回旋振荡器的相互作用过程 (表 1 中参数). 图 11 和图 12 分别给出了输出端电

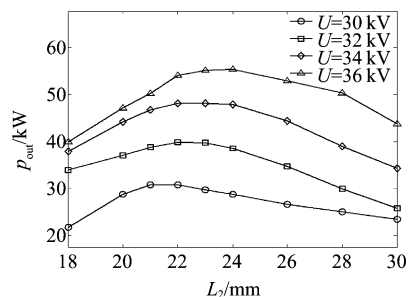


图 10 不同加速电压时输出功率随 L_2 的变化情况
Fig. 10 Curves of output power as a function of L_2 for different accelerating voltages

场的频谱和腔体中的模式分布图, 从图中可以看出工作频率为 94 GHz, 工作模式为 TE₀₂₁.

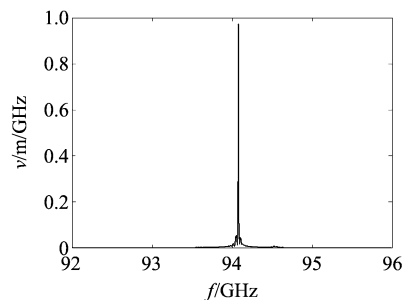


图 11 输出腔中的频谱图
Fig. 11 Frequency spectrum in the output cavity

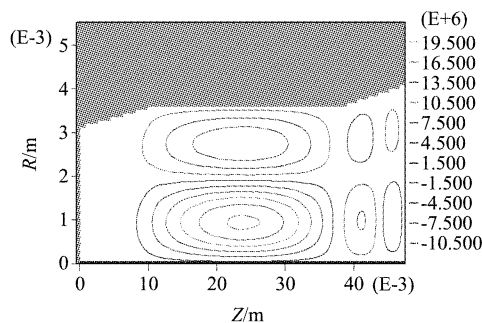


图 12 相互作用腔体中的模式图
Fig. 12 Mode profiles in the interaction cavity

图 13 所示为输出功率和效率随磁场的变化情况, 从图中可以看出, 当磁场强度为 1.753 T 时, 输出功率值为 58.6 kW, 对应效率为 39.5%. 图中没有给出 B 小于 1.753 T 的情况, 这是因为当 B 进一步减小时, 输出功率下降迅速, 而且会出现竞争模式 TE₀₂₂. 图 13 还画出了当电子注横向速度离散为 3% 时输出功率和效率的变化情况. 从图中可以看出, 输

输出功率和效率的变化较小,这是因为振荡器的工作点靠近截止频率($f/f_c = 1.0007$),电磁波的轴向传播常数很小,因此受速度离散的影响也较小.

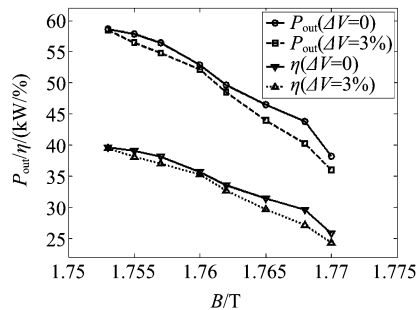


图 13 输出功率和效率随磁场强度的变化情况

Fig. 13 Dependence of output power and efficiency on magnetic field

4 结论

利用自洽非线性程序研究了二次谐波回旋振荡器的腔体结构和电子注参数对系统相互作用性能的影响.通过综合考虑腔体长度、电子注电压和速度比对相互作用效率的影响,发现当增大电压或者减小电子注横纵速度比时,获得最佳相互作用效率所需的相互作用腔体长度增长,当相互作用腔体长度一定时,需要综合调节工作电压和电子注横纵速度比才能获得最佳效率,在此基础上优化了一个 W 波段二次谐波回旋振荡器.粒子模拟显示,当 $\alpha = 1.6$ 时,回旋振荡器的工作效率为 39.5%,相应的输出功率为 58.6 kW.该研究工作对未来发展应用于拒止武器系统或工业医疗的低磁场强度回旋振荡器具有指导作用.

REFERENCES

- [1] Chu K R. The electron cyclotron master[J]. *Pre. Mod. Phys*, 2004, **76**(2):489-540.
- [2] Nitin Kumar, Udaybir Singh, Singh T P, et al. A review on the applications of high power, high frequency microwave source: gyrotron[J]. *J Fusion Energy*, 2011, **30**:257-276.
- [3] Glyavin M. Yu., Luchinin A. G., Golubiatnikov G. YU., Generation of 1.5-kW, 1-THz coherent radiation from a gyrotron with a pulsed magnetic field[J]. *Physics review letters*, 2008, **100**:015101.
- [4] Vladimir Bratman, Mikhail Glyavin, Toshitaka Idehara, et al. Review of subterahertz and terahertz gyrodevices at IAP RAS and FIR FU[J]. *IEEE Trans Plasma Sci*, 2009, **37**(1):36-43.
- [5] Toshitaka Idehara, Kosuke Kosuga, La Agusu, et al. Gyrotron FU CW VII for 300 MHz and 600 MHz DNP-NMR spectroscopy[J]. *J. Infrared Milli Terahz Waves*, 2010, **31**:763-774.
- [6] Idehara T., Tatsukawa T., Ogawa I., et al. Development of a second cyclotron harmonic gyrotron operating at submillimeter wavelengths[J]. *Phys. Fluids B*, 1992, **4**(1):267-273.
- [7] Mikhail Yu Glyavin, Alexey G. Luchinin, Vladimir N. Manuilov, et al. Design of a subterahertz, third-harmonic, continuous-wave gyrotrons[J]. *IEEE Trans. Plasma Sci*, 2008, **36**(3):591-596.
- [8] Antonio C. Torrezan, Seong-Tae Han, et al. Continuous-wave operation of a frequency-tunable 460-GHz second-harmonic gyrotron for enhanced nuclear magnetic resonance[J]. *IEEE Trans. Plasma Sci*, 2010, **38**(6):1150-1159.
- [9] Melissa K Hornstein, Vikram S Bajaj, Robert G Griffin, et al. Second harmonic operation at 460GHz and broadband continuous frequency tuning of a gyrotron oscillator[J]. *IEEE Trans Electron Devices*, 2005, **52**(5):798-807.
- [10] E. Borie. Self consistent code for a 150 GHz gyrotron[J]. *Int J. Infrared and Millimeter Waves*, 1986, **7**(12):1863-1879.
- [11] DU Chao-Hai, LIU Pu-Kun, Beam-wave coupling strength analysis in a gyrotron traveling-wave tube amplifier[J]. *J. Infrared Milli Terahz Waves*, 2010, **31**(6):714-723.
- [12] LIU Pu-Kun, Borie E., Thumm M., Mode selection of a moderate power gyrotron operating at the ISM frequency. [J] *J. Infrared Millim. Waves* (刘濮鲲, E. Borie, M. Thumm. ISM 频率中等功率回旋管的选模问题. *红外与毫米波学报*) 2002, **21**(4):289-292.
- [13] GENG Zhi-Hui, LIU Pu-Kun, SU Yi-Nong, et al. Design of a Ka band 35 kW CW low-voltage harmonic gyrotron[J]. *Int J. Infrared and Millimeter Waves*, 2010, **31**(1):41-47.
- [14] DU Chao-Hai, LIU Pu-Kun, XUE Qian-Zhong, et al. Modal mapping between periodic lossy dielectric loaded waveguide and uniform circular waveguide[J]. *J. Infrared Millim. Waves* (杜朝海, 刘濮鲲, 薛谦忠等. 周期损耗介质加载波导与均匀圆波导间的模式映射. *红外与毫米波学报*), 2010, **29**(4):273-277.
- [15] Chao-Hai Du, Qian-Zhong Xue, Pu-Kun Liu, Loss-induced modal transition in a dielectric-coated metal cylindrical waveguide for gyro-traveling-wave-tube applications[J]. *IEEE Electron Device Letters*, 2008, **29**(11):1256-1258.
- [16] CAO Xiao-Qin, LIU Pu-Kun. Self-consistent nonlinear computation of a 28GHz gyrotron at the second harmonic. [J] *J. Infrared Millim. Waves* (曹晓琴, 刘濮鲲. 28GHz 二次谐波回旋振荡管的自洽非线性计算. *红外与毫米波学报*) 2005, **24**(4):317-320.
- [17] DU Chao-Hai, LIU Pu-Kun, Stabilization of the potential multi-steady-state absolute instabilities in a gyrotron traveling-wave amplifier[J]. *Phys. Plasmas*, 2009, **16**(7):073104.
- [18] XU Shou-Xi, LIU Pu-Kun. ZHANG Shi-Chang, et al. Studies on 8mm second harmonic gyrotron amplifier. [J] *J. Infrared Millim. Waves* (徐寿喜, 刘濮鲲, 张世昌等. 8mm 二次谐波回旋速调放大器的研究. *红外与毫米波学报*) 2009, **28**(1):8-10.
- [19] YUAN Xue-Song, LAN Ying, MA Chun-Yan, et al. Theoretical study on a 0.6THz third harmonic gyrotron[J]. *Phys. Plasmas*, 2011, **18**:103115.