

强流相对论电子束双腔纵向自调制研究*

胡 旻† 祝大军 刘盛纲

(电子科技大学物理电子学院, 成都 610054)

(2004 年 9 月 20 日收到, 2004 年 11 月 6 日收到修改稿)

当强流相对论电子束在类双腔速调管系统中传输时, 会发生自调制现象. 利用这一现象可以在无微波注入的情况下得到较好的微波输出, 这是一种由强流相对论效应引起的自激振荡. 利用这一原理有可能研制出一类新型的微波器件. 对强流相对论电子束在这种物理机制作用下发生起振的条件及传输机理进行了理论分析, 并进行了数值模拟. 优化结果显示, 利用 4kA, 500kV 的强流相对论电子束, 可得到 0.99GHz, 800MW 的微波输出, 效率约 40%.

关键词: 强流相对论电子束, 自调制, 反馈机制, 数值模拟

PACC: 3130J, 4180D, 5265

1. 引 言

近年来, 高功率微波 (HPM) 器件发展非常迅速, 而产生 HPM 的机制有很多. 相对论速调管是一种重要的 HPM 源. 在其研究中, 强流相对论电子束 (IREB) 自激振荡的抑制是器件设计的一个重要参考. 合理利用强流相对论电子束的纵向的自调制, 就可能获得较好的微波输出. 为此, 我们专门设计了一种利于其自激振荡效应的双腔结构 (如图 1 所示) 在平滑的漂移管中加入两个的谐振腔, 当强流相对论电子束 (IREB) 在其中传输时, 能够产生相干的电流和能量振荡. 这一自调制振荡的频率是单一的, 并不随着电子束电流、电压的变化而变化. 而电子束的起振却同电子束的电流、电压相关. 理论分析和数值模拟的结果都表明正是在漂移管中插入的谐振腔改变了 IREB 的简单运动, 从而导致了这一非线性行为的出现.

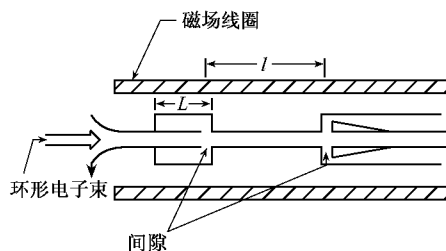


图 1 器件的结构图

解释. 考虑反射速调管, 其等效电路如图 2 所示. 电子束传输至漂移区尾部被反射, 反射回的电子束经过漂移区到达间隙, 从而发生了群聚现象. 如果返回间隙的电子束相位合适, 就可以从电子束中得到能量, 从而产生振荡, 并得以维持.

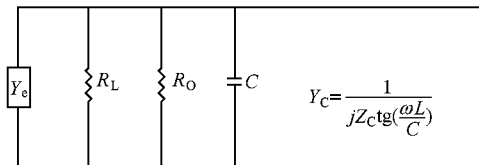


图 2 反射速调管等效电路

2. 理论分析

2.1. 强流相对论电子束中的自激调制

对于 IREB 的自激行为, 可以用反射机制进行

若要满足反射机制, 则必须满足如下两个公式^[1-5]:

* 国家 863 高技术发展计划项目(批准号 2004AA832102)资助的课题.

† E-mail: hu.m@tom.com

$$j \ln(Y) \equiv j \ln(Y_e) + j\omega C + \frac{1}{jZ_c \operatorname{tg}(\omega L/c)} = 0, \quad (1)$$

$$\operatorname{Re}(Y) \equiv \operatorname{Re}(Y_e) + (1/R_0) < 0, \quad (2)$$

其中 Y_e 是电子导纳, 实部、虚部定义如下:

$$\operatorname{Im}(Y_e) = \frac{1}{Z(1-\xi^2)} \left[(1+\psi\xi) \sin(\alpha\mu\theta) \cos\theta - (\xi+\psi) \cos(\alpha\mu\theta) \sin\theta \right], \quad (3)$$

$$\operatorname{Re}(Y_e) = \frac{1}{Z(1-\xi^2)} \left[(1+\psi\xi) \sin(\alpha\mu\theta) \sin\theta + (\psi+\xi) \cos(\alpha\mu\theta) \cos\theta \right], \quad (4)$$

R_0, C 分别是加载的并联阻抗和电容, L 是腔长, Z_c 是腔的特征阻抗.

若要满足反射机制, 除了要满足上面两式外, 电子束的直流电流 I_0 还应该大于截止电流 I_c . 而截止电流 I_c 满足如下已知等式:

$$I_c \approx I_S (\gamma^{2/3} - 1)^{3/2}, \quad (5)$$

其中 $I_S = \frac{2\pi\epsilon_0 m_0 c^3}{e \ln(r_w/r_b)}$.

当入射电流超过截止电流时, 即 $I_0 > I_c$, 将在间隙间形成一个虚阴极. 电子束通过时会发生波动, 这些波动能激励腔体, 但在没有交流能量注入腔体的情况下, 这些波动最终将衰减. 最初, 电子入射到器件, 由于自身的压缩而减速. 当入射电流超过截止电流时, 在第二个间隙形成虚阴极, 并造成了电子的返回. 这样, 两间隙间的总电子数将突然增加, 从而产生一个电位的“前沿”. 这个前沿反向运动, 并反射电子. 当此前沿穿过第一个腔时将减速, 在腔中产生一个电压, 这个电压将加速新的电子向第二腔运动. 运动至第二腔的电子会导致虚阴极的重建, 从而继续这一个过程. 只要到达腔体的电子的相位正确, 这一过程就将持续下去.

2.2. 强流相对论电子束中的波

这一器件仍然是利用波与电子束的纵向相互作用, 因此电子束的调制是纵向的. 当强流相对论电子束在漂移管中传输时, 将产生一个电势 V_ϕ , 使电子束的动能从 T_k 减小到 $T_{k0}^{[1-6]}$, 即 $T_{k0} = T_k - eV_\phi$.

纵向波满足如下色散方程:

$$(\omega - kv_0)^2 = (\omega^2 - k^2 c^2) \alpha, \quad (6)$$

其中

$$\alpha = \frac{I_0}{\beta_0 \gamma_0^3 I_S}, I_S = \frac{2\pi\epsilon_0 m_0 c^3}{e \ln(r_w/r_b)}, I_0 \text{ 是半径为 } r_b \text{ 的}$$

IREB 的电流, $\gamma_0 = (1 - \beta_0^2)^{-1/2}$ 即 $\gamma_0 = T_{k0}/m_0 c^2 + 1$.

由色散方程, 我们可以得到两个解, 即空间电荷快波 k_f 和空间电荷慢波 k_s :

$$k_f = \frac{\omega\delta}{\beta_0 c} (1 - \alpha\mu), \quad k_s = \frac{\omega\delta}{\beta_0 c} (1 + \alpha\mu), \quad (7)$$

其中

$$\delta = \beta_0^2 (\beta_0^2 - \alpha),$$

$$\alpha\mu = (\alpha^2 + \alpha/\gamma_0 + 1)^{1/2} / \beta_0.$$

可以看出引入了 δ 和 $\alpha\mu$ 两个修正因子, 以适用于相对论情况下的空间电荷波. 与传统非相对论的空间电荷波相比, 快波与慢波不再是对称的.

当在 $z=0$ 处的输入电压为 $V_1 e^{j\omega t}$ 时, 可以得到交流电流、交流电压和动电压:

$$\delta E = V_1 e^{j\omega t} = m_0 c^2 \frac{\partial \gamma}{\partial \gamma_0} \frac{\partial \gamma_0}{\partial \beta_0} \partial \beta_0, \quad (8)$$

$$\delta \beta_0 = \frac{v_1}{c} = \frac{V_1}{m_0 c^2 [\beta_0 \gamma_0^3 - (I_0/I_S / \beta_0^2)]}, \quad (9)$$

则 $v_1 = \frac{eV_1}{m_0 c \gamma_0^3 \beta_0}$ 且 $\gamma = \gamma_0 + \alpha\gamma_0^3$.

得到波动电流和动电压为

$$I_1(z, t) = j \frac{V_1}{Z(1-\xi^2)} \left[(1+\psi\xi) \sin(\alpha\mu\theta) - (\xi+\psi) \cos(\alpha\mu\theta) \right] e^{j(\omega t - \theta)} \quad (10)$$

$$V_1(z, t) = V_1 [\cos(\alpha\mu\theta) - j\psi \sin(\alpha\mu\theta)] \times e^{j(\omega t - \theta)}, \quad (11)$$

其中,

$$\xi = \frac{1 - \delta}{\alpha\mu\delta}.$$

当电流 I_0 小于截止电流 I_c , $I_0 < I_c$ 时

$$Z = \left(\frac{V_0}{I_0} \right) \left(\frac{mc^2 \beta_0^2 \gamma_0^3}{eV_0} \right) (\alpha\mu), \quad (12)$$

$I_0 \approx I_c$ 时

$$Z = \left(\frac{V_0}{I_0} \right) \left(\frac{3mc^2 \beta_0^2 \gamma_0^5}{eV_0} \right) (\alpha\mu). \quad (13)$$

总之, 动功率为

$$P_{ak} = I_1(z, t) V_1^*(z, t) = \frac{V_1^2}{Z(1-\xi^2)} \times [(\xi+\psi) \cos^2(\alpha\mu\theta) - (1+\xi\psi) \psi \sin^2(\alpha\mu\theta)] \neq 0. \quad (14)$$

由此可以看出, 同非相对论情况下电子束传输不同, 在相对论情况下动能量不再处处为零, 而是 z 的函数. 也就是说, 在强流相对论电子束传输的过程中存在有直流能量和交流能量的交换.

综上所述可以看出,在强流相对论情况下,只要满足一定的条件,电子束就可以发生自调制的现象,而且在一定条件下,这种自调制是可以维持的.同样,通过对强流相对论电子束中波的分析,可以看到同传统的非相对论情况不同,强流相对论电子束传输过程中,直流能量同交流能量发生了交换.因此,两腔间的电子束不再只是进行简单的密度调制.

下面,我们就对这一非线性相互作用过程进行粒子模拟,从而验证上述物理过程,并进一步揭示其中的规律.

3. 数值模拟

我们使用 2.5 维 MAGIC^[7]软件进行数值模拟. MAGIC 软件是美国 MISSION RESEARCH 公司经过二十余年不断开发完善的一个电磁粒子模拟软件,能从初始时刻开始模拟带电粒子与电磁场相互作用随时间变化的整个物理过程.其中,空间各点的电磁场完全由 Maxwell 方程组求得,相对论粒子轨迹由 Lorentz 力运动方程求得,而 Maxwell 方程组中的电流和电荷密度则由连续性方程求得.

我们对一个带有双腔的漂移管注入环形电子束进行仿真,工作在 L 波段,工作频率为 990MHz. 总体结构^[8-10]如图 3 所示,其中第一腔为 1/4 波长谐振腔,在其后 25cm 处插入第二腔,同时也作为输出腔,输出微波.加入的引导磁场为 0.6T.

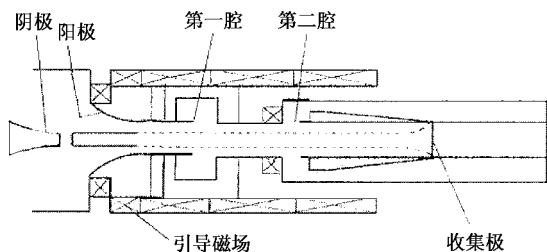


图 3 总体结构图

阴极产生厚度为 4.5mm 的环形电子束,其半径为 2cm,电压为 500kV,电流为 4kA. 由图 4 所示,在其第二腔的输出端可以有较为理想的微波输出.

图 5 所示为电子运动的相空间图.从相空间图中可以看出,正是在第二腔的位置形成了虚阴极,从而造成了电子被反射.这些被反射回的电子向阴极作反向运动,并反射回部分电子,当到达第一腔后先减速,从而在第一腔形成一个间隙电压.这一间隙

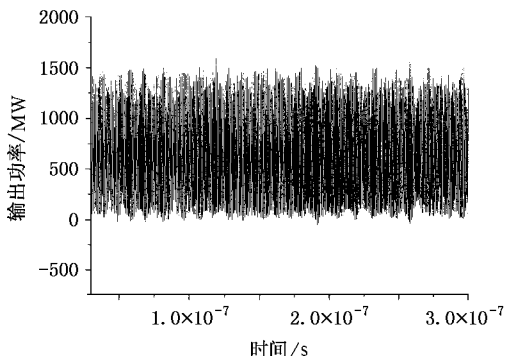


图 4 微波输出图(30ns—300ns)

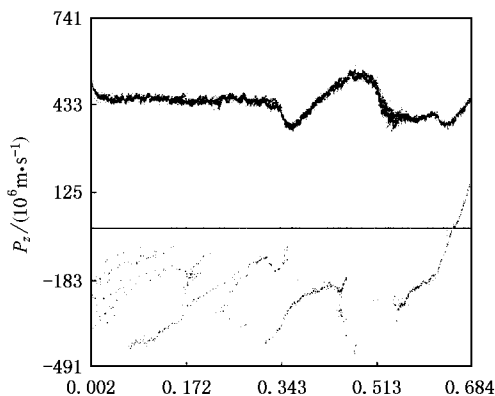


图 5 电子运动相空间图

电压又加速新的电子,使电子向第二腔运动.当电子到达第二腔又再次形成新的虚阴极,并重复上述运动.只要电子的相位合适,此过程就能维持往复进行.

我们对电子束电流的影响进行模拟.图 6 是电流与输出功率的图,从中可以看出当电流小于 3.9kA 时,自激振荡无法维持下去,也就没有微波输出.由上述截止电流公式可以推导出 500kV, 4kA 的

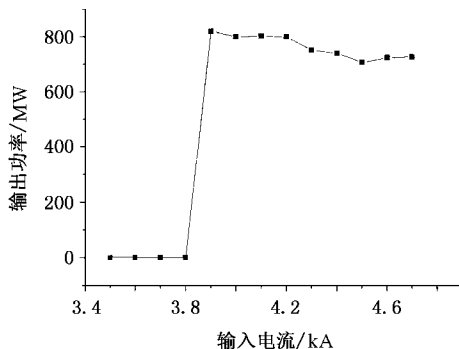


图 6 输入电流与输出功率图

条件下,截止电流约为 5.4kA 左右.而在同等情况,电子束电压为 500kV,束半径为 2.5cm 时,我们模拟得到在第二腔处的截止电流为 3.9kA.虽然同解析计算结果存在一定的偏差,但是合理的.当电流大于 3.9kA 的电子束注入腔体后,经第一腔的扰动,部分电子束加速并群聚,使局部电流提升.当电子束到达第二腔时,这一局部电流超过截止电流,从而造成部分电子束的反射.因此,我们认为数值模拟结果同解析计算结果还是基本吻合的.同样,电子束的电压也对输出结果有影响.图 7 是电压与输出功率的图,可以看出当电压超过 540kV 时,也没有输出功率.由截止电流的计算公式看出,影响起振的除电压和电流外,还有电子束的半径,腔的半径等一些量.

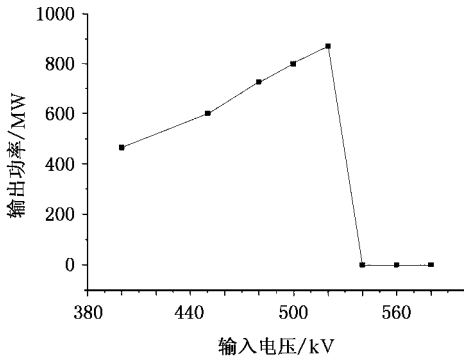


图 7 输入电压与输出功率图

我们还模拟结构对输出功率和频率的影响.改

变第一腔与第二腔间漂移区的长度,发现只有此长度在 24cm—30cm 之间时,才会有持续稳定的输出.可见,只有电子的相位达到一个合适的值时,电子束才能发生自振荡并维持,这同解析理论分析也是吻合的.在此范围内改变长度,输出功率略有改变,但对输出频率没有影响.

从上述看出,无论是电子束的电压、电流、半径,还是漂移区的长度对输出微波的频率都没有影响.对频率有影响的是腔的尺寸.改变腔的长度,输出微波的频率也随之改变.

4. 结 论

本文主要研究了强流相对论电子束的自调制现象,分析了电子束起振条件,维持振荡的机理,通过修正空间电荷波理论,得到了在强流相对论情况下电子束波的传播公式,对自调制现象进行了数值模拟,分析并验证了电子束电压、电流、器件的结构对输出微波的影响.最终,我们优化出一种基于强流相对论电子束纵向自调制原理的新型 HPM 振荡器件.利用 4kA, 500kV 的 IREB 得到了频率为 990MHz,输出功率为 800MW 的微波,效率约为 40%.

作者感谢黄华副研究员、李正红副研究员的有益讨论.

- [1] Friedman M 1984 *Appl. Phys.* **56** 2459
- [2] Xie Jialin 1966 *Theory of Klystron Modulation* (Beijing :Science Press) p38 (in Chinese) [谢家麟 1966 速调管群聚理论(北京:科学出版社)38]
- [3] Liu Shenggang 1985 *Introduction to Microwave Electronics* (Beijing : Defence Industry Publishing House) p6 (in Chinese) [刘盛纲 1985 微波电子学导论(北京:国防工业出版社)6]
- [4] Friedman M 1984 *Appl. Phys.* **44** 1278
- [5] Friedman M 1983 *Phys. Rev. Lett.* **50** 1257
- [6] Huang H *et al* 1998 *Journal of Electronics* **20** 852 (in Chinese) [黄华等 1998 电子科学学刊 **20** 852]
- [7] Huang H *et al* 1998 *High Power Laser and Particle Beams* **10** 135 (in Chinese) [黄华等 1998 强激光与粒子束 **10** 135]
- [8] Liu S G 1987 *Relativistic Electronics* (Beijing :Science Press) p87 (in Chinese) [刘盛纲 1987 相对论电子学(北京:科学出版社)87]
- [9] Bruce Goplen 1997 *Magic User 's Manual*.
- [10] Huang H *et al* 2004 *Acta Phys. Sin.* **53** 1129 (in Chinese) [黄华等 2004 物理学报 **53** 1129]



Longitudinal self-modulation of an intense relativistic electron beam in a two-cavity system^{*}

Hu Min Zhu Da-Jun Liu Sheng-Gang

(School of Physical Electronics , University of Electronics Science and Technology of China , Chengdu 610054 , China)

(Received 20 September 2004 ; revised manuscript received 6 November 2004)

Abstract

Self-modulation may appear on an intense relativistic electron beam (IREB) traversing a two-cavity klystron system. It is caused by the intense relativistic effect. RF output can be obtained without RF input. Based on this mechanism , a new type of high-power microwave source is suggested. The oscillation condition of the intense relativistic electron beam , traverse mechanism and PIC simulation are presented. After optimization design , a 800MW output peak microwave power was observed at a frequency of 0.99GHz , while an electron beam of voltage 500kV , current 4kA is injected. The efficiency is about 40% .

Keywords : intense relativistic electron beam , self-modulation , feedback mechanism , simulation

PACC : 3130J , 4180D , 5265

^{*} Project supported by the National High Technology Research and Development Program of China (Grant : 2004AA832102).

[†]E-mail hu.m@tom.com