

文章编号: 2095-4980(2019)02-0283-05

针对锁相的相对论返波管优化设计

吴 洋

(中国工程物理研究院 应用电子学研究所 高功率微波技术重点实验室, 四川 绵阳 621999)

摘 要: 为实现基于相对论返波管振荡器的高功率微波相干合成, 开展了针对锁相的低磁场返波管优化设计。通过优化中间调制腔的位置, 降低工作模式的 Q 值, 达到降低种子微波功率的目的。以外注入微波锁相方式为例, 优化后的器件锁定增益大于 20 dB, 20 MW 的注入微波功率即可实现对 GW 级的微波输出的相位控制。研究结果对调制电子束锁相也具有参考价值。

关键词: 相对论返波管振荡器; 锁相; X 波段

中图分类号: TN125

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA201902.0283

Optimal design of a Relativistic Backward Wave Oscillator for phase locking operation

WU Yang

(Key Laboratory of High Power Microwave Technology, Institute of Applied Electronics, China Academy of Engineering Physics, Mianyang Sichuan 621999, China)

Abstract: For the purpose of coherent high power microwave combining based on Relativistic Backward Wave Oscillator(RBWO), an optimal design of a low magnetic field RBWO is present. In order to decrease the requirement on the seed RF power for phase locking, the axial position of the intermediate bunch cavity of the RBWO is optimized to decrease the Q -value of the working mode. Particle In Cell(PIC) simulation shows that an input power of 20 MW is sufficient to lock the frequency and phase of the output. And the corresponding gain is higher than 20 dB. The result is also valuable for phase locking by modulated electron beams.

Keywords: Relativistic Backward Wave Oscillator; phase locking; X-band

通过近 20 年的高功率微波(High Power Microwave, HPM)技术研究, HPM 源的输出水平已得到很大提高。但受物理机理和技术工艺等多方面的制约, 单个微波器件的输出功率越来越接近其理论极限, 提高 HPM 源输出水平的难度也越来越大^[1-3]。在目前的技术水平下, 多台 HPM 源的相干功率合成被视作提高 HPM 系统等效辐射功率的有效途径^[4-9]。这对 HPM 源输出微波的频率和相位稳定性提出了很高的要求, 因此 HPM 源的相位控制也成为 HPM 研究领域的热点问题。

相对论返波管振荡器(RBWO)作为一种典型的 HPM 振荡器, 具有高功率容量、高束波转换效率等优点, 是 HPM 研究中产生 X 波段、数 GW 高功率微波的热点器件^[10-14]。如果 RBWO 能够实现锁相工作, 那么在高频段(如 X, Ku 波段等)微波相干合成方面, 锁相 RBWO 将是一个较为理想的功率合成器件。因此利用 RBWO 锁相工作, 实现高频段的功率合成, 是当前高频段 HPM 合成技术研究中的热点, 很多单位在开展这方面的研究。目前针对 RBWO 的研究多集中在提高器件的输出微波功率、束波转换效率以及工作稳定性等方面。而锁相 RBWO 面临的主要难题却是种子微波功率要求过高、锁相状态较难建立, 这在诸多研究报告中均有提及。如何根据锁相工作的特点, 对振荡器进行针对性优化设计以降低锁相的实现难度, 这方面的研究报道却较少。因此开展针对锁相的 RBWO 优化设计, 研究降低实现锁相的种子微波功率的措施, 对发展基于 RBWO 的高频段功率合成研究具有重要意义。

1 X 波段锁相返波管的物理模型

振荡器锁相是指通过外加激励信号或耦合等方式, 控制振荡器高频输出的相位和频率。主要的锁相方式包括强耦合互锁和外注入锁相 2 种。对于外注入锁相, Adler 采用等效电路理论, 给出了锁相的实现条件, 即著名的 Adler 公式^[15]:

$$|\Delta\omega| \leq \frac{\omega_0 \rho}{Q} \quad (1)$$

式中: Q 是振荡器的品质因数; ω_0 是振荡器的自由振荡频率; $\rho = \frac{E_i}{E_0} = \sqrt{\frac{P_i}{P_0}}$ 即注入比。

振荡器达到锁相状态的特征时间可表示为:

$$\tau_{\text{lock}} = \frac{Q}{\omega_0 \rho} \quad (2)$$

从 Adler 公式可知, 在同等的输出功率水平下, 要增大振荡器的锁相带宽, 缩短振荡器达到锁相状态的时间, 需要增大注入微波功率, 即提高注入比 ρ 。

对于常规电真空器件, 由于器件输出脉冲宽度通常在 ms 量级甚至是连续波工作, 对达到锁相状态的时间要求不高。再加之振荡器本身输出功率并不高, 因此对种子源的要求较低, 采用外注入法较容易实现振荡器输出微波的相位锁定。但对于 HPM 振荡器, 由于其输出脉宽通常在百 ns 量级, 为使振荡器锁相状态尽快建立, 需要有较高的注入比。已有研究表明, 采用外注入法锁相, 锁定增益通常在 10 dB 左右。要实现对 3 GW 输出微波的频率、相位锁定, 种子微波的功率要求约 300 MW。作为外注入锁相方式的变种, 采用调制电子束锁相通过调制腔增强电子束的调制深度, 达到放大种子微波信号的目的, 可以在一定程度上降低对种子微波的需求, 但降低种子源微波功率的压力依然存在。

本文对锁相的振荡器优化设计采用外注入微波锁相方式, 研究结果对于调制电子束锁相也有参考意义。图 1 是 X 波段锁相 RBWO 模拟模型, 种子微波从器件后端的漂移管注入, 实现对 GW 级输出微波的相位控制。不同于传统的反射腔+慢波结构的 2 段式结构, 器件在漂移管中引入了中间调制腔, 用于增强电子束的调制深度, 以解决低磁场条件下电子束调制深度不足的问题, 使得器件在低磁场下也可以维持较高的束波转换效率。器件的工作原理如下: 谐振反射腔工作于 TM_{02} 模式, 可对工作模式 TM_{01} 有效反射, 提高了漂移管的半径。同时谐振反射腔的间隙电场可对电子束进行预调制, 经预调制的电子束通过中间调制腔的进一步调制, 在漂移管群聚放大后, 在慢波腔链中换能输出。在器件设计过程中, 为解决过模器件的模式竞争问题, 器件的冷腔谐振频率与热腔工作频率很接近。通过提高工作模式的 Q 值, 缩短工作模式从噪声信号中建立直至饱和的时间, 实现器件的模式选择和模式控制。

器件在引导磁场 0.6 T, 电子束电压 850 kV、电流 9.5 kA 条件下, 输出微波功率 2.35 GW, 频率 9.30 GHz。进一步模拟表明, 器件在注入微波功率 500 MW 的条件下可以实现频率锁定, 对应的锁定增益为 6.7 dB。

2 锁相返波管优化设计思路

对于采用外注入方式的振荡器锁相, 提高种子信号的功率即注入比可以促使振荡器锁相状态建立, 但种子源功率的提高存在诸多限制。另一方面, 根据 Adler 公式, 振荡器的锁相带宽反比于振荡器的 Q 值。理论上, 降低振荡器工作模式 Q 值也可以达到降低种子信号功率的目的。但对于传统的振荡器设计, 如磁控管、磁绝缘线振荡器等, 通常要求工作模式的 Q 值较高, 以实现器件的模式控制。降低工作模式 Q 值, 将导致器件的模式竞争和工作模式起振困难。同时 Q 值降低会导致器件内驻波电场减弱, 由此可能导致器件的束波转换效率降低。如何在降低工作模式 Q 值的同时, 实现器件的模式控制, 维持工作模式的束波转换效率, 是锁相的低磁场返波管优化设计的重点。

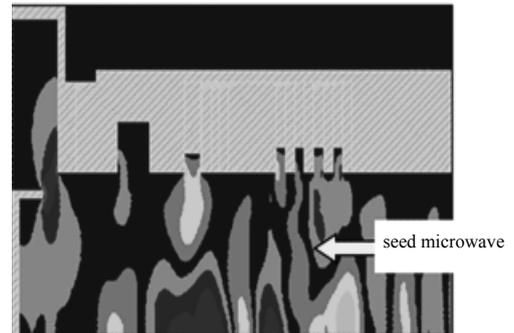


Fig.1 Simulation model of an X-band phase-locked RBWO
图 1 X 波段锁相相对论返波管模拟模型

对于图 1 的模拟模型，一方面中间调制腔可以对电子束进一步调制，提高进入到换能段中的电子束调制深度。更重要的是，通过改变中间调制腔的位置可以调整返波管的冷腔谐振频率。图 2 是中间调制腔处于不同轴向位置时返波管的冷腔谐振特性曲线，可以看到，在一定范围内，随着中间腔距谐振反射腔距离的增加，返波管的冷腔谐振频率逐渐降低。

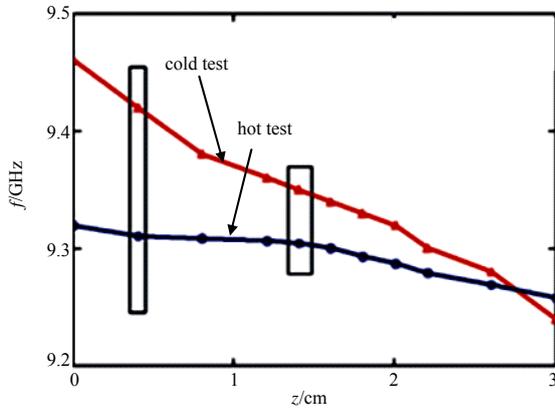


Fig.2 Relationship between axial position of idler cavity and resonant characteristics of RBWO

图 2 返波管谐振特性与中间调制腔轴向位置的关系

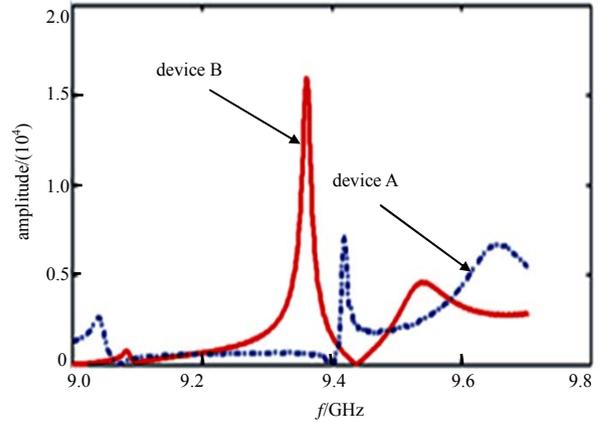


Fig.3 Cold resonant characteristics of the device A and B

图 3 返波管 A,B 的冷腔谐振特性

另一方面，由于器件的热腔频率主要由第二段慢波结构(即换能段)参数决定，对于图 1 所示器件模型，换能段慢波结构参数选择工作在 π 模，具有较高的相互作用阻抗和品质因子，器件的输出微波频率基本锁定在慢波结构 π 模的谐振频率，因此器件的热腔频率基本不随中间调制腔位置移动的影响。图 2 给出了器件热腔频率与中间调制腔轴向位置的关系，可以看到器件的热腔频率对中间调制腔轴向位置不敏感，热腔频率基本维持在 9.30 GHz 附近，与第二段慢波结构 π 模的谐振频率相符。因此在器件优化设计过程中，可以通过调整中间腔的位置使得器件的冷腔谐振频率与热腔频率间隔增大，则器件的 Q 值可以有效降低。当然，中间调制腔位置的改变不仅会影响到器件的谐振特性，也会改变调制电子束进入到第二段慢波结构的相位，从而影响器件的束波转换效率。在图 2 标注的不同中间调制腔位置中，选取器件工作较好的 2 组参数，分别标注为器件 A 和器件 B。图 3 为器件 A,B 的冷腔频率响应曲线，其中器件 A 的冷腔频率为 9.42 GHz，器件 B 的冷腔频率为 9.35 GHz。

3 锁相返波管优化设计结果

由于器件 A,B 的热腔频率均在 9.30 GHz 附近，因此冷腔频率为 9.42 GHz 的器件 A 的频率间隔更大， Q 值更低。根据振荡器锁相的 Adler 公式，其锁相所需的功率也可能更低。本节详细对比器件 A,B 的工作特性和锁相输出特性，以验证通过增大冷、热腔频率间隔，降低 Q 值来降低锁相所需种子微波功率的可行性。

图 4 为器件输出微波的包络波形，可以看到，由于器件 A 的 Q 值更低，其起振较慢，模拟时间 20 ns 时输出微波才达到稳定，相比于器件 B 达到稳定状态的时间推迟了 10 ns。器件 A 在引导磁场 0.6 T，电子束参数 840 kV,9.5 kA 条件下，输出微波功率 3.05 GW，效率 38%。

图 5 为器件内的正向功率流分布，可以看到，由于器件 B 的冷腔谐振频率靠近热腔频率，其 Q 值更高，器件 B 内部的正向功率流分布存在明显的驻波增强，导致调制电子束的过群聚，进入到慢波换能段中的电子束调制深度因过群聚而降低，从而导致器件 B 的效率低于器件 A。

为验证器件的锁相特性，在模拟中研究了输出微波与注入种子信号相对相差随脉冲持续时间的变化关系，相对相差定义为：

$$\Delta\phi = 2\pi \int (f_{\text{out}} - f_{\text{in}}) dt \quad (3)$$

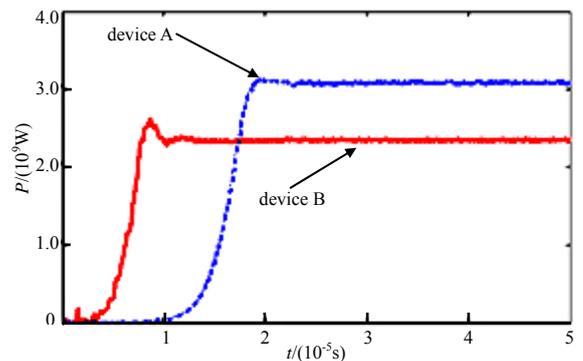


Fig.4 Envelope waveforms of the output of the device A and B

图 4 返波管 A,B 的输出微波包络波形

式中： f_{out} 是输出微波的频率； f_{in} 是注入种子微波的频率。若两者频率一致，则相对相差将保持恒定，器件达到锁相状态；反之，则器件未能锁相。

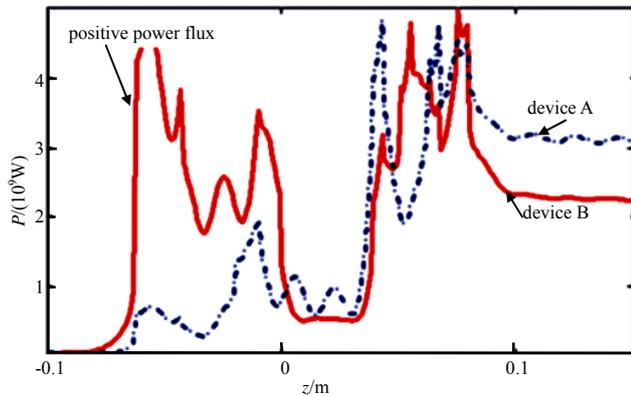


Fig.5 Positive power flux in the device A and B
图 5 返波管 A,B 内的正向功率流

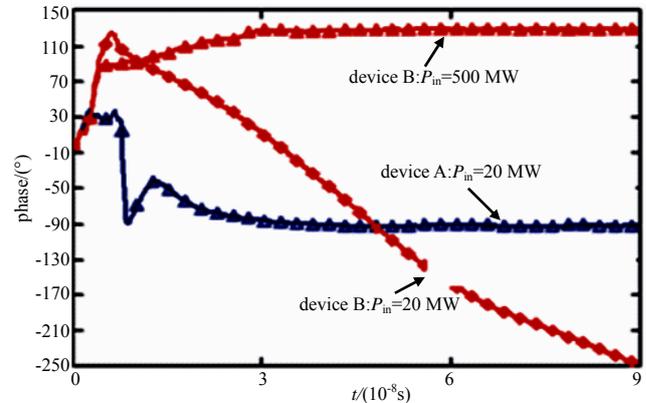


Fig.6 Phase characteristics of the phase-locked RBWO
图 6 锁相返波管输出微波的相位特性

图 6 对比了采用外注入法的锁相方式，器件 A,B 在不同注入微波功率下的输出微波相位特性。可以看到，器件 A 由于 Q 值较低，注入功率 20 MW 就可以实现频率锁定。而器件 B 由于 Q 值较高，同样的 20 MW 注入微波功率不足以锁定输出微波的频率，需要 500 MW 的注入微波才能实现频率锁定。相比于器件 B，器件 A 的锁定增益提高了约 15 dB。采用器件 A 作为锁相器件的主振荡器，可以有效降低对种子源微波功率的要求。

4 结论

为了实现高频段高功率微波的相干合成，本文开展了针对锁相的返波管优化设计。通过调整中间调制腔的轴向位置，降低工作模式 Q 值，达到降低锁相对注入微波功率需求的目的。通过优化，器件的锁定增益提高约 15 dB，研究结果对于调制电子束锁相也具有参考意义。

参考文献：

- [1] BENFORD J, SWEGLE J A, SCHAMIOGLU E. High Power Microwaves[M]. 2nd ed. New York: Taylor & Francis, 2006.
- [2] FRIEDMAN M, KRALL J, LAU Y Y, et al. Efficient generation of multi-gigawatt RF power by a RKA[J]. Review of Scientific Instruments, 1990, 61(1): 171-174.
- [3] HUANG H, FENG D C, LUO Guangyao, et al. Repetitive operation of an S-Band, 1 GW relativistic klystron amplifier[J]. IEEE Transactions Plasma Science, 2007, 35(2): 384-387.
- [4] XIAO R Z, CHEN C H, ZHANG X W, et al. Efficiency enhancement of a high power microwave generator based on a relativistic backward wave oscillator with a resonant reflector[J]. Journal of Applied Physics, 2009, 105(5): 053306.
- [5] GE X J, ZHONG H H, QIAN B L, et al. Asymmetric-mode competition in a relativistic backward wave oscillator with a coaxial slow-wave structure[J]. Applied Physics Letters, 2010, 97(24): 241501.
- [6] XIAO R Z, CHEN C H, SONG W, et al. RF phase control in a high-power high-efficiency klystron-like relativistic backward wave oscillator[J]. Journal of Applied Physics, 2011, 110(1): 013301.
- [7] 邵剑波, 谢鸿全, 李正红, 等. Ku 波段低磁场返波管振荡器的模拟与实验[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2015, 13(1): 80-85. (SHAO Jianbo, XIE Hongquan, LI Zhenghong, et al. Simulation and experiment of Ku-band backward wave oscillator with low magnetic field[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2015, 13(1): 80-85.)
- [8] 陈永东, 谢鸿全, 李正红, 等. 电子回流对相对论速调管稳定工作的影响[J]. 强激光与粒子束, 2013, 25(7): 1770-1773. (CHEN Yongdong, XIE Hongquan, LI Zhenghong, et al. Effect of returning electrons on stability of relativistic klystron amplifier[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2013, 25(7): 1770-1773.)
- [9] 袁欢, 刘振邦, 黄华, 等. 强流脉冲驱动的 X 波段多注相对论速调管相位特性[J]. 强激光与粒子束, 2017, 29(9): 093005. (YUAN Huan, LIU Zhengbang, HUANG Hua, et al. Phase characteristics of X-band multiple beams relativistic klystron driven by intense pulse electron beams[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2017, 29(9): 093005.)
- [10] BUGAEV S P, CHEREPENIN V A, KANAVETS V I. Relativistic multiwave Cherenkov generators[J]. IEEE Transactions Plasma Science, 1990, 18(3): 525-536.

- [11] ZHANG J, JIN Z X, YANG J H, et al. Successful suppression of pulse shortening in an X-band overmoded relativistic backward-wave oscillator with pure TM_{01} mode output[J]. IEEE Transactions Plasma Science, 2015, 43(2):528.
- [12] MCCURDY A H, ARMSTRONG C M, BOLLEN W M, et al. Mode selection by application of an external signal in an overmoded gyrotron oscillator[J]. Physical Review Letters, 1988, 61(20):2316–2319.
- [13] TENG Y, SONG W, SUN J, et al. Phase locking of high power relativistic backward wave oscillator using priming effect[J]. Journal of Applied Physics, 2012, 111(4):043303.
- [14] SONG W, SUN J, SHAO H, et al. Inducing phase locking of multiple oscillators beyond the Adler's condition[J]. Journal of Applied Physics, 2012, 111(2):023302.
- [15] WOO W, BENFORD J, FITTINGHOFF D, et al. Phase locking of high-power microwave oscillators[J]. Journal of Applied Physics, 1989, 65(2):861–866.

作者简介：



吴 洋(1985–), 四川省剑阁县人, 博士, 副研究员, 主要从事高功率微波放大器、锁相高功率微波振荡器的理论和实验研究.email:wuyang_851219@163.com.

(上接第 282 页)

- [11] 庄茁, 由小川, 廖剑晖, 等. 基于Abaqus的有限元分析和应用[M]. 北京:清华大学出版社, 2009:150–200. (ZHUANG Zhuo, YOU Xiaochuan, LIAO Jianhui, et al. Finite element analysis and application based on Abaqus[M]. Beijing:Tsinghua University Press, 2009:150–200.)
- [12] 丁飞, 张农, 韩旭. 安装液压互联悬架货车的机械液压多体系统建模及模态分析[J]. 机械工程学报, 2012, 48(6):116–123. (DING Fei, ZHANG Nong, HAN Xu. Modeling and modal analysis of mechanical-hydraulic multi-body system for trucks with hydraulic interconnected suspension[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2012, 48(6):116–123.)
- [13] 刘尚合, 刘卫东. 电磁兼容与电磁防护相关研究进展[J]. 高电压技术, 2014, 40(6):1605–1613. (LIU Shanghe, LIU Weidong. Research progress of electromagnetic compatibility and electromagnetic protection[J]. High Voltage Technology, 2014, 40(6):1605–1613.)
- [14] 刘莹, 谢拥军, 张勇. 车载集群通信系统"自顶向下"电磁兼容设计[J]. 电子科技大学学报, 2010, 39(5):720–724. (LIU Ying, XIE Yongjun, ZHANG Yong, et al. Top-down EMC design of trucking communication system in vehicle[J]. Journal of University of Electronic Science and Technology of China, 2010, 39(5):720–724.)
- [15] 吴中川. 一种220 GHz滤波器的设计[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2013, 11(3):355–358. (WU Zhongchuan. Design of a 220 GHz filter[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2013, 11(3):355–358.)

作者简介：



夏旭光(1988–), 男, 河南省周口市人, 硕士, 主要研究方向为机械结构设计.email:brokenblue@126.com.

姚红萍(1965–), 男, 郑州市人, 硕士, 主要研究方向为伺服控制.

刘朝阳(1965–), 男, 郑州市人, 硕士, 主要研究方向为高功率微波.