

带渐变过渡型提取结构的 Ku 波段磁绝缘线振荡器*

江涛, 贺军涛, 张建德, 李志强, 令钧溥
(国防科技大学 光电科学与工程学院, 湖南 长沙 410073)

摘要:提出了一种渐变过渡型的微波同轴提取结构,解决了采用传统的均匀同轴提取结构的 Ku 波段磁绝缘线振荡器中存在的输出模式不纯和 TEM 模传输效率较低的问题。模拟结果表明,渐变过渡型提取结构实现了微波的高效提取和单一的同轴 TEM 模输出;过渡后的同轴结构利于支撑杆的设计,满足了同轴 TEM 模的传输要求。与传统的均匀同轴提取结构相比,渐变过渡型提取结构能够适量提高器件的品质因数,进而加强束波作用,加快微波起振。

关键词: Ku 波段;磁绝缘线振荡器;提取结构;支撑杆;品质因数

中图分类号: TN127 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-2486(2015)02-024-04

Ku-band magnetically insulated transmission line oscillator with a gradual transitional extractor

JIANG Tao, HE Juntao, ZHANG Jiande, LI Zhiqiang, LING Junpu

(College of Optoelectronic Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: To solve the problems of impure output modes and inefficient TEM transmission in the Ku-band MILO with the conventional uniform coaxial extractor, a gradual transitional coaxial extractor was proposed. The simulation results show that: the gradual transitional coaxial extractor achieves efficient microwave extraction and a single output TEM; the transitional coaxial structure is conducive to the design of supports and meets TEM transmission requirements. Compared with the traditional extractor, the gradual transitional coaxial extractor can strengthen the beam-wave interaction and accelerate the microwave start-up through enhancing the quality factor of the Ku-band MILO in right amount.

Key words: Ku-band; magnetically insulated transmission line oscillator; extraction structure; supports; quality factor

磁绝缘线振荡器 (Magnetically Insulated transmission Line Oscillator, MILO) 因其无需外加磁场、体积小、重量轻等优点而成为一种非常有发展前景的高功率微波源^[1-4]。目前, MILO 在 L、S、C 等较低的微波频段的实验中已经实现了超过 1GW 的稳定微波输出^[5-7], 正朝着更高频段如 X、Ku 波段发展^[10-13]。由于 Ku 波段在通信领域具有广泛的应用, 因此开展 Ku 波段 MILO 的研究具有重要的意义。

Ku 波段频率高, 相应的器件尺寸较小, 为了提高功率容量, 拟采用一种具有大横向尺寸的过模慢波结构。若仍采用传统的均匀同轴提取结构, 则由于同轴提取结构内外导体间距较大, 旋转对称 TM_{01} 模在同轴结构中不截止, 会带来两方面的问题: 微波输出模式不纯; TEM 模传输效率太低。因此, 提出一种渐变过渡型同轴提取结构。

通过优化设计, 实现了微波的高效提取和单一的同轴 TEM 模输出; 另外, 这种渐变过渡型同轴提取结构还有利于提高束波作用效率和加快微波起振。

1 采用均匀同轴提取结构的 Ku-MILO

最初设计的采用传统的均匀同轴提取结构的 Ku 波段 MILO 的基本结构如图 1 所示, 其工作频率为 12.5GHz, 为了提高功率容量, 主慢波结构采用过模结构, 阴极半径 $R_c = 24\text{mm}$, 阳极外半径 $R_a = 40\text{mm}$ 。

通常, 负载阳极半径 R_d 与阴极半径 R_c 相同或比 R_c 略大, 在微波同轴输出区直接加两排支撑杆, 支撑杆和同轴传输线组成传统的均匀同轴提取结构。目前, 从文献中看到的 Ku 波段 MILO 均采用这种均匀同轴提取结构^[11,13]。然而, 在采用

* 收稿日期: 2015-01-05

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (11305263)

作者简介: 江涛 (1987—), 男, 重庆长寿人, 博士研究生, E-mail: 308104060@qq.com;

张建德 (通信作者), 男, 教授, 博士生导师, E-mail: jdzhang12@yahoo.com

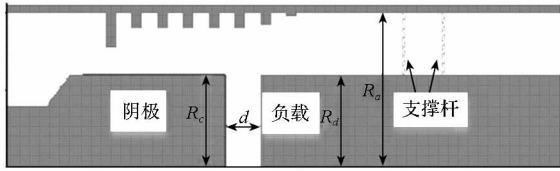


图1 采用传统提取结构的 Ku-MILO 结构示意图

Fig.1 Configuration of the Ku-MILO with traditional extractor

过模慢波结构的 Ku 波段 MILO 中,由于微波同轴提取结构内外导体间距较大, TM_{01} 模不截止,会带来如下两方面的问题。

一方面,对图1所示结构进行二维粒子模拟(不加支撑杆情况),采用文献[8]提出的模式成分分析方法对输出微波模式成分进行分析,发现微波耦合到提取结构时会同时产生 TEM 模和 TM_{01} 模,TEM 模只占 90% 的功率成分,而 TM_{01} 模占有约 10% 的功率成分。同轴 TM_{01} 模的存在以及输出模式不纯将会给微波提取结构中支撑杆的设计以及后续的模式转换结构设计带来困难。另一方面,在支撑杆设计时,由于同轴结构中 TM_{01} 模不截止,支撑杆的引入很容易激励起相当大部分的 TM_{01} 模,而使得 TEM 模的传输效率太低,无法满足设计要求。

因此,需要对这种均匀同轴提取结构进行改进设计,在保证主慢波结构不变的前提下使得新设计的提取结构能够解决上述问题。

2 提取结构的改进设计

根据上述分析,微波同轴提取结构中 TM_{01} 模不截止是使得微波输出模式不纯和 TEM 模传输效率较低的根本原因,因此,重新设计微波提取结构的关键在于截止 TM_{01} 模。为了使 TM_{01} 模截止,需要减小同轴提取结构内外导体间距,而具体减小值则需通过对同轴结构进行模式分析来确定。

2.1 同轴结构模式分析

同轴波导中 TM 波的特征方程为^[9]:

$$\frac{J_n(k_c R)}{N_n(k_c R)} = \frac{J_n(k_c r)}{N_n(k_c r)} \quad (1)$$

式中, R , r 分别为同轴波导的外导体内半径和内导体外半径, J_n 是贝塞尔函数, N_n 是诺埃曼函数, k_c 是截止波数。求解这个特征方程可以得到 k_c 的一系列根。 n 阶方程的第 i 个根就是同轴波导中 TM_{ni} 模的临界波数 $k_{cE_{ni}}$, 由此便可以求出 TM_{ni} 模的临界波长^[9]:

$$\lambda_{cE_{ni}} = \frac{2\pi}{k_{cE_{ni}}} \quad (2)$$

Ku 波段 MILO 的工作频率为 12.5GHz, 波长 $\lambda_0 \approx 24\text{mm}$, 当 $\lambda_{cE_{ni}} > \lambda_0$ 时, 该模式将在同轴波导中截止。通过对式(1)、式(2)进行数值计算发现, 保持外导体半径 R_o 不变, 当内导体半径 R_d 增大到 30mm 时, TM_{01} 模截止。

2.2 渐变过渡型同轴提取结构设计

根据同轴结构模式分析结果, 当内导体半径 R_d 从 24mm 增大到 30mm 时, TM_{01} 模在同轴结构中截止, 然而简单的增大同轴提取结构内导体半径, 而仍然采用均匀同轴提取结构, 其内导体比阴极高出的一个台阶会产生较大的微波的反射, 使得微波输出效率很低。因此, 需设计一种渐变过渡的内导体结构, 实现阻抗匹配, 减小对微波的反射。

另外, 平面二极管型负载(图1结构采用的负载结构)阴阳极间距 d 很小, 极易导致负载阴阳极烧蚀^[10-11], 为了保证良好的磁绝缘性, 故采用限制型负载, 通过增大阴阳极间距和电子收集极表面积来降低能量沉积密度, 避免负载阴阳极烧蚀^[12]。

结合以上分析, 在限制型负载结构的基础上, 设计了改进的渐变过渡型微波同轴提取结构。基本结构如图2所示, 把限制型负载的阳极收集筒设计成锥形结构, 其半径 R_d 渐变地从 24mm 过渡到 30mm。这个阳极收集筒也是微波提取结构的内导体, 与同轴外导体构成了改进的渐变过渡型微波同轴提取结构。其中, 为了确保负载阴极电流发射的均匀性, 收集筒内半径取均匀值 21mm; 伸入负载收集筒的小阴极半径 R_{c1} 取 10mm, 收集筒与小阴极的径向距离为 11mm。当收集筒端与小阴极端间距 d 取足够大时能避免负载阴阳极烧蚀。

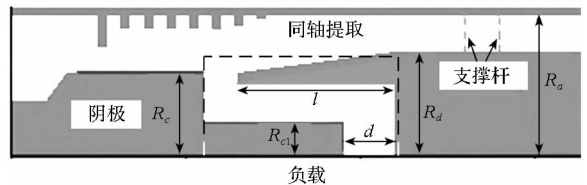


图2 改进的 Ku-MILO 结构示意图

Fig.2 Configuration of the improved Ku-MILO

结合改进的渐变过渡型提取结构, 对 MILO 整体结构进行粒子模拟优化, 当渐变过渡段长度 l 取 45mm 时, 获得了最大微波功率输出, 如图3所示。

对渐变过渡型提取结构进行支撑杆设计, 通过高频电磁场软件进行模拟优化。图4所示的为

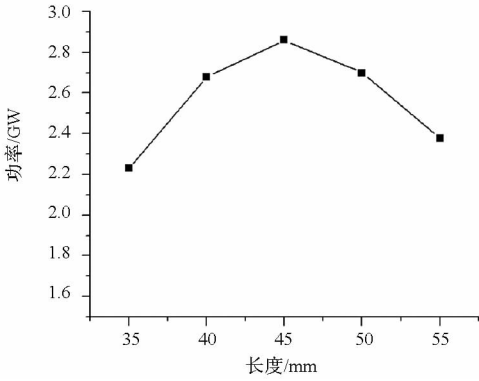


图 3 输出功率随过渡段长度的变化
Fig. 3 The output power versus the length of the transition section

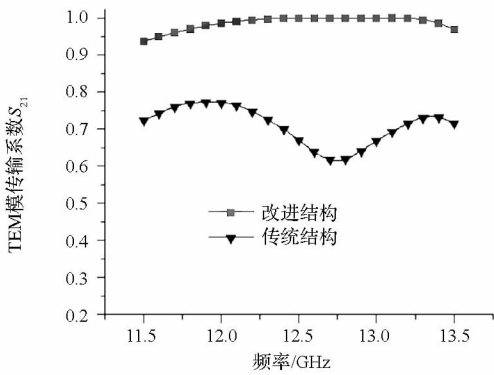


图 4 两种结构的 S₂₁ 曲线
Fig. 4 The S₂₁ curves of two different structures

两种提取结构中支撑杆结构的 TEM 模传输系数曲线。在传统的均匀同轴提取结构中,支撑杆的引入会在同轴波导中激励起大部分 TM₀₁ 模,而使得 TEM 模的传输效率只有 70% 左右,没有达到设计要求;在渐变过渡型同轴提取结构中,由于过渡后的同轴结构对 TM₀₁ 模截止,实现了 TEM 模 99.3% 的传输效率,满足设计要求。

3 粒子模拟

对渐变过渡型同轴提取结构的 Ku 波段 MILO 进行粒子模拟,结果如图 5 和图 6 所示。在输入电压 470kV 的条件下,得到微波输出平均功率约 2.86GW, 频率约 12.46GHz, 效率达到 12.7%。对输出微波进行模式成分分析,输出微波为纯 TEM 模。器件实现了高效率单模输出。

对图 1 和图 2 所示的两种 MILO 结构的微波输出功率进行比较,确保输入电压一致(470kV), 结果如图 7 所示。

从图 7 中可以看出,采用渐变过渡型同轴提取结构的 MILO 的微波输出功率比采用传统均匀同轴提取结构的 MILO 的微波输出功率要高

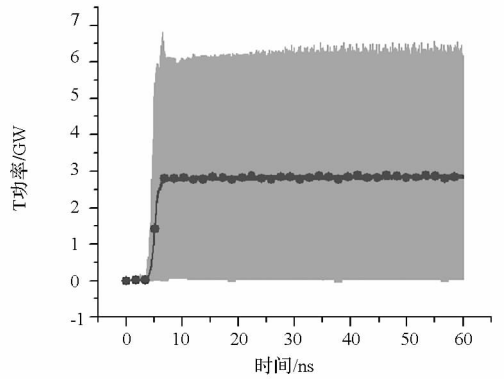


图 5 输出功率随时间变化
Fig. 5 The output power versus time

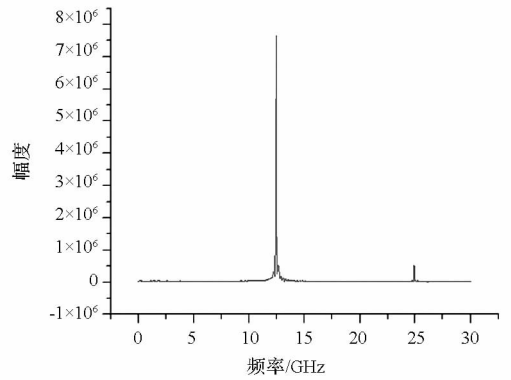


图 6 输出微波功率谱
Fig. 6 The power spectrum of output microwave

0.3GW,且起振和饱和要快约 1ns。分析其可能原因为微波传输到提取结构的渐变过渡段产生适量反射,有利于提高慢波谐振腔的品质因数,而通常情况下,品质因数越大,越有利于加强电子束的振荡调制,增强束波作用效率,使 MILO 快速起振和饱和^[6]。

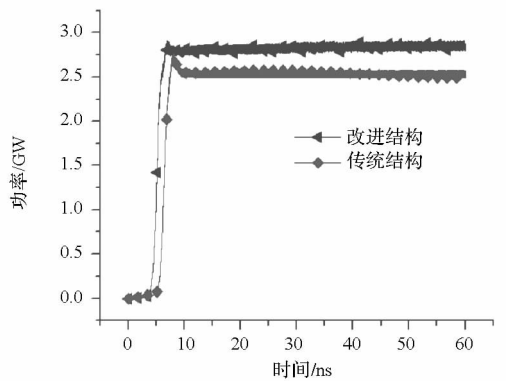


图 7 两种结构的输出功率
Fig. 7 The output power of the two structures

对两种结构的提取品质因数进行模拟分析,结果如图 8 所示。采用渐变型提取结构的 MILO 的品质因数为 106,采用传统提取结构的 MILO 的品质因数为 68,证实了上述分析的正确性。

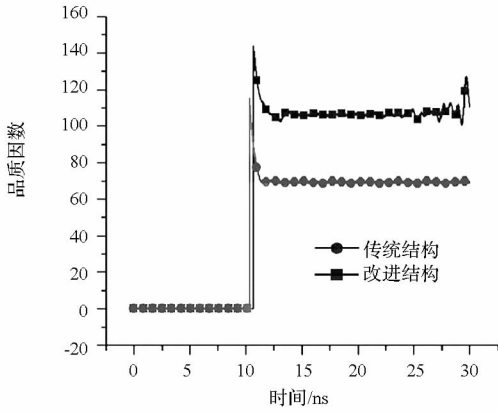


图8 两种结构的品质因数

Fig. 8 The quality factor of the two structures

4 结论

针对采用过模慢波结构的 Ku 波段 MILO,指出了其采用传统方法设计的微波提取结构存在输出微波模式不纯和 TEM 模传输效率较低的问题,并对此提出了一种改进的渐变过渡型的微波同轴提取结构。模拟结果表明,过渡后的同轴结构利于支撑杆的设计,实现了同轴 TEM 模的高效传输。对渐变过渡型同轴提取结构进行了优化,优化结构实现了微波的高效提取和单一的同轴 TEM 模输出。粒子模拟结果表明,在输入电压 470kV 的条件下,得到微波输出平均功率约 2.86GW,频率约 12.46GHz,效率达到 12.7%。通过与采用传统提取结构的 MILO 的粒子模拟结果比较发现,渐变型同轴提取结构能适量提高品质因数,从而有利于提高微波输出功率和加快微波起振。

参考文献 (References)

- [1] Barker R J, Schamiloglu E. High-power microwave sources and technologies[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2005.
- [2] Benford J, Swegle J A, Schamiloglu E. High power microwaves[M]. 2nd ed. New York: Taylor & Francis Group, 2007.
- [3] 周传明, 刘国治. 高功率微波源[M]. 北京: 原子能出版社, 2007.
ZHOU Chuanming, LIU Guozhi. High-power microwave sources[M]. Beijing: Atomic Energy Publishing Company, 2007. (in Chinese)
- [4] Barker R J, Schamiloglu E. High-power microwave sources and technologies[M]. New York: the Institute of Electrical and Electronics Engineer (Incorporated), 2001.
- [5] 张晓萍, 钟辉煌, 舒挺, 等. C 波段 MILO 的理论设计和实验研究[J]. 强激光与粒子束, 2005, 17(8): 1129 - 1132.
ZHANG Xiaoping, ZHONG Huihuang, SHU Ting, et al. Theoretical design and experimental studies of C-band MILO[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2005, 17(8): 1129 - 1132. (in Chinese)
- [6] 李志强. 新型电感储能脉冲功率源及其驱动 S 波段锥形 MILO 的研究[D]. 长沙: 国防科技大学, 2009.
LI Zhiqiang. Investigation of a novel inductive energy storage pulsed power source and its application of driving an S-band tapered MILO[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2009. (in Chinese)
- [7] 陈代兵, 范植开, 周海京, 等. L 波段硬管磁绝缘线振荡器的研制[J]. 强激光与粒子束, 2007, 19(8): 1352 - 1356.
CHEN Daibing, FAN Zhikai, ZHOU Haijing, et al. L-band hard-tube magnetically insulated line oscillator [J]. High Power Laser and Particle Beams, 2007, 19(8): 1352 - 1356. (in Chinese)
- [8] Zhang D, Zhang J, Zhong H H, et al. Analysis of the mode composition of an X-band overmoded O-type Cerenkov high-power microwave oscillator[J]. Physics of Plasma, 2012, 19(10): 103102.
- [9] 张晓萍. 新型磁绝缘线振荡器的研究[D]. 长沙: 国防科技大学, 2004.
ZHANG Xiaoping. Study on a novel magnetically insulated transmission line oscillator[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2004. (in Chinese)
- [10] Fan Y W, Zhong H H, Li Z Q, et al. Investigation of an X-band magnetically insulated transmission line oscillator[J]. Chinese Physics B, 2008, 17(5): 1801 - 1808.
- [11] Wen J, Chen D B, Wang D, et al. Preliminary experimental research on Ku-Band MILO [J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2013, 41(9): 2501 - 2505.
- [12] Fan Y W, Zhong H H, Yang H W, et al. Analysis and improvement of an X-band magnetically insulated transmission line oscillator [J]. Journal of Applied Physics, 2008, 103: 123301.
- [13] 文杰, 田扬超, 范植开, 等. Ku 波段磁绝缘线振荡器的数值模拟[J]. 强激光与粒子束, 2011, 23(11): 3047 - 3050.
WEN Jie, TIAN Yangchao, FAN Zhikai, et al. Simulation of Ku-band magnetically insulated transmission line oscillator[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2011, 23(11): 3047 - 3050. (in Chinese)
- [14] Eastwood J W, Hawkins K C, Hook M P. The tapered MILO[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 1998, 26(3): 698 - 713.