

· 物理电子学 ·

Ka波段绕射辐射振荡器的辐射功率测量

兰 峰, 高 喜, 史宗君, 杨梓强, 梁 正

(电子科技大学物理电子学院 成都 610054)

【摘要】给出了Ka波段相对论绕射辐射振荡器(RDG)的辐射功率测量方法和实验结果。器件采用带反射器两段式过模慢波结构,由于器件的过模结构特点,实验选择用空间积分方法测试辐射功率。在准确标定测量系统的基础上进行了热测实验,得到了辐射模式图和辐射总功率。测试结果表明:微波辐射功率超过300 MW,信号脉宽大于10 ns,辐射频率介于34~38 GHz之间,辐射模式为 TM_{0n} 模。

关键词 绕射辐射振荡器; 辐射场测量; 辐射模式; 方向图
中图分类号 O413; TL56 文献标识码 A

Measurement of Radiation Power for Ka-Band Relativistic Diffraction Generator

LAN Feng, GAO Xi, SHI Zong-jun, YANG Zi-qiang, LIANG Zheng

(School of Physical Electronics, Univ. of Electron. Sci. & Tech. of China Chengdu 610054)

Abstract This paper presents the method and results of measurement of radiation power for Ka-band relativistic diffraction generator. The RDG device has two section slow wave structure. For the character of complete overmoded SWS, the spatial integral method of the radiation power measurement is carried out. The radiation mode image and total power are obtained by hot test, which is based on precisely calibrating of the measurement system. The measurement results show that the radiation power exceeds 300 MW with a frequency of 34~38 GHz and a pulse width exceeds 10 ns, and the radiation mode is TM_{0n} mode.

Key words relativistic diffraction generator; radiation field measurement; radiation mode; radiation pattern

多波契伦柯夫器件和相对论绕射辐射振荡器是目前功率最高的高功率微波(High Power Microwave, HPM)器件,这些器件的特点是采用过模结构和两段式慢波结构。文献[1]报道了绕射辐射振荡器(Relativistic Diffraction Generator, RDG)的实验结果:在波长为5 mm时获得了功率为1 GW、脉宽为0.7 μ s的电磁辐射。在国内,文献[2]报道了多波契伦柯夫器件在X波段获得了峰值功率为100 MW的电磁辐射。近年来本文进行了Ka波段两段式慢波结构相对论绕射辐射振荡器的研究工作,经过理论研究和PIC模拟,设计了一套结构参数如下的器件:高频系统波导直径 $D=39.6$ mm, $D/\lambda \leq 5$;慢波结构周期 $L=3$ mm;盘荷膜片厚度 $a=2$ mm;膜片间隙 $b=1$ mm;膜片高度 $h=1.8$ mm;前段慢波结构15个周期,后段6个周期;漂移段长度 $c=4$ mm;电子注输入端反射器半径 $r=14$ mm,长度 $l=40$ mm。该器件为采用相对论强流电子注驱动的单次短脉冲HPM器件,因此普通微波管中采用功率计直接测量功率的方法不适合。通常高功率微波功率测量采用如下方法:在真空系统中采用探针或定向耦合器^[3-4];通过测试辐射天线到接收天线之间的空间衰减来确定功率^[5];测试辐射场的空间功率密度分布,通过空间积分的方法确定功率^[6]。本文采用空间积分方法对该器件辐射功率进行准确测量,并给出了系统标定、模式分析、频率测量、天线有效截面确定的具体方法。

1 功率测量系统标定

要准确测量辐射场功率,需要测定辐射模式、频率、信号脉宽、接收天线有效面积等,测量系统组成

收稿日期:2006-05-17

基金项目:国家“863”计划资助项目;国家自然科学基金资助项目(60571020)

作者简介:兰 峰(1977-),男,在职博士生,主要从事高功率微波方面的研究。

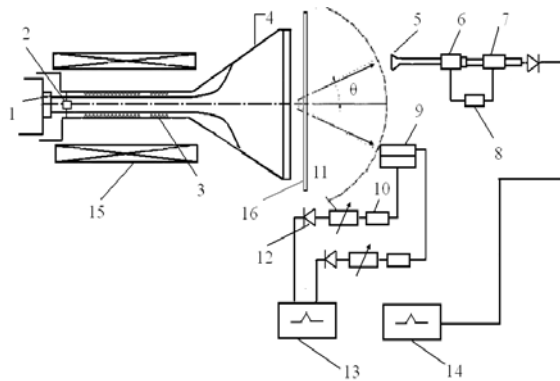


图1 辐射功率测量系统

如图1所示,各部分分别是:1为阴极;2为同轴反射器;3为慢波结构;4为辐射喇叭;5为8 mm波矩形喇叭;6为定向耦合器;7为魔T;8为波导延迟线;9为水平和垂直极化8 mm波开口波导;10为固定衰减器;11为可调衰减器;12为检波器;13为TDS5425示波器;14为TDS6604示波器;15为聚焦磁场;16为氖管阵列。其中,微波接收喇叭5、8 mm波开口波导9及其配套部分分别用于辐射频率和功率的测量。功率接收系统用BJ-320矩形开口波导(7.11 mm×3.56 mm)作为接收天线经衰减后用晶体管检波器检波。

在微波辐射功率测量系统中,导波系统的标定对于测量的准确度十分重要。由于辐射微波信号的峰值功率高、脉冲短,因此需要对其进行可靠、线性衰减,以达到测量仪器的可测范围。微波信号经几十分贝的衰减后,采用8 mm晶体检波器检波,脉冲直流信号通过带宽为6 GHz TDS6604数字示波器在无带宽限制下直接显示。

本文介绍晶体检波器和可变衰减器的标定方法。对检波器灵敏度的标定方法为:(1)采用中科院电子所的毫米波全境式功率计对Agilent E8257D扫频源的射频输出功率进行测试,功率计的测量误差为5%;(2)去掉毫米波全境式功率计,将E8257D扫频源的功率输出到检波器,并用1.5 GHz数字示波器测试检波器探测到的电压。图2所示是检波器对不同频率及输入功率情况下的响应情况。测试中使用的可变衰减器和固定衰减器的衰减量都采用矢量网络分析仪进行标定。通过矢量网络分析仪测试衰减器的 S_{21} 参数,即可得到其衰减量。为了考核衰减器对短脉冲的响应,采用扫频源并利用其短脉冲特性对固定衰减器进行检测,发现测试结果同矢网和厂家标定结果基本一致。图3所示给出了在36 GHz下不同刻度衰减量的变化曲线,测试结果发现不同频率下衰减器的衰减线性度良好。

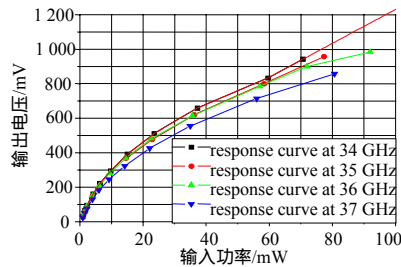


图2 检波器对不同输入功率的响应

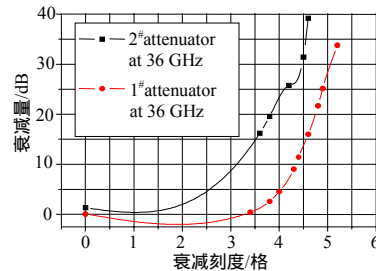


图3 可变衰减器在36 GHz频率下的衰减量

2 开口波导有效接收面积的确定

采用空间辐射场测量HPM源功率,需要已知接收天线在特定频率下的有效接收面积,得到空间功率密度分布,并通过空间积分的方法确定功率。通过天线增益的测量得到天线有效面积。本文采用两相同天线法测量增益,假定两天线完全相同,考虑馈线与天线之间的失配误差,由Friis传输方程^[7]可得匹配条件下绝对增益的分贝修正式为:

$$G = 1/2[10\lg(P_r/P_t)] + 10\lg(4\pi R/\lambda) + 1/2[10\lg(1/1-|\Gamma_r|^2)] + 1/2[10\lg(1/1-|\Gamma_r|^2)] \quad (1)$$

式中 P_r 、 P_t 分别为接收、发射功率; λ 表示工作波长; R 是收发天线之间的远场距离; Γ_r 、 Γ_t 分别为发射端馈线到天线、接收端天线到馈线的反射系数。 $10\lg(p_r/p_t)/\text{dB}$ 可由矢网测两波导间的 S_{21} 参数得到,对于矢量网络分析仪与馈线之间的反射系数可以通过电调谐置零, Γ_r 和 Γ_t 分别可以通过矢网测单个波导辐射时的 S_{11} 参数和 S_{22} 参数得到。为验证测试正确性,还利用软件对天线进行了模拟。在35~38 GHz增益实验值为6.8~7.6 dB,与模拟结果6.5~7.4 dB基本一致。开口波导口径利用系数随频率变化曲线如图4所示,图中 A_{eff} 、 A_{eff} 分别表示开口波导有效面积和实际面积。实验结果与模拟结果基本一致,BJ-320波导的口径利用系数在

1.5左右, 这为热测实验时计算辐射场功率密度提供了依据。Ka波段开口波导的有效接收面积大于实际的波导口径面积, 可能是由于开口波导端口附近的绕射辐射造成的。

3 辐射模式与频率测试

为了确定辐射模式, 热测实验时在喇叭轴线上放置氦管阵列。图5所示是氦管阵列上测试到的辐射模式情况, 经过计算发现亮点出现在 $\theta=3^\circ \sim 30^\circ$ 之间。由此可以确定经圆锥喇叭辐射出的模式为轴对称的 TM_{0n} 模式, 峰值点位置在 $\theta=3^\circ \sim 30^\circ$ 之间。辐射信号的频率测量采用传统的色散延时线方法, 色散延时线由8 mm矩形波导(7.11 mm × 3.56 mm)组成。信号频率由下式确定:

$$f = c / (2a\sqrt{1 - (L/Ct)^2}) \tag{2}$$

式中 C 为光速; a 为波导宽边长度; L 为色散线长度(40.44 m); t 为两个脉冲的时间间隔。实验中辐射频率一般处于34 ~ 38 GHz之间, 大部分炮次处于36 GHz左右, 图6所示是典型色散延时线的波形。



图5 微波辐射模式图

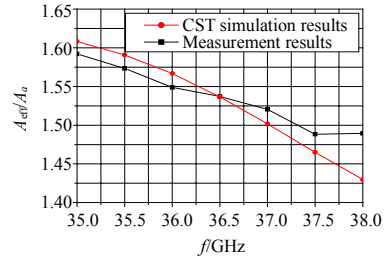


图4 口径利用系数实验值与理论计算值比较

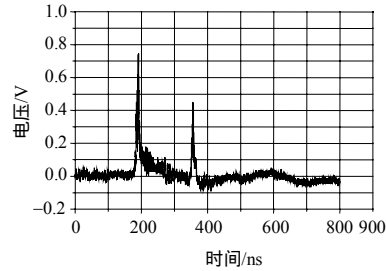


图6 典型的色散延时信号波形

4 功率测试

为了确定辐射总功率, 沿半径为1.5 m的圆弧测量辐射场的功率密度分布。由于辐射模式的对称性, 只需要测试1/4圆周上的有限点。在同一测试点采用两个BJ-320开口波导分别作为水平和垂直极化方向接收喇叭。两路微波信号分别经开口波导、衰减器、宽带检波器及同轴电缆送入示波器的两个测量通道。通过测试到的检波信号幅值 V_{det}/mV , 可得喇叭接收到的该点的微波功率密度为:

$$P_i = V_{det} / KA_{eff} \times 10^{[A_f + A_0 + \xi]/10} \tag{3}$$

式中 K 为检波器灵敏度(单位为mV/mW); A_f 和 A_0 分别为固定、可调衰减器的标定衰减量(单位为dB); ξ 为检波信号经过导波系统的衰减量。接收到的器件辐射总功率为:

$$P_{total} = \sum_{i=1}^n (P_i + P_{i+1} / 2) S_i \tag{4}$$

式中 P_i 、 P_{i+1} 是相邻的两个测试点的功率密度; S_i 是相邻两点间的球冠面积。

图7所示为测试到的典型微波信号, 信号半高宽大于10 ns, 信号幅度取值在辐射信号脉宽为3 ns左右的位置, 而不在峰值处, 从而保证测试功率的准确性和可靠性。器件辐射信号频率在34 ~ 38 GHz之间, 多数炮次的频率为36 GHz, 因此采用34、36 GHz的冷测参数分别计算器件的辐射功率。采用频率为34 GHz的冷测参数, 通过计算得到器件的辐射功率为353 MW, $5^\circ \sim 30^\circ$ 内的功率为345 MW; 采用频率为36 GHz的冷测参数, 计算得到辐射功率为357 MW, $5^\circ \sim 30^\circ$ 内的功率为347 MW。两者结果基本一致。

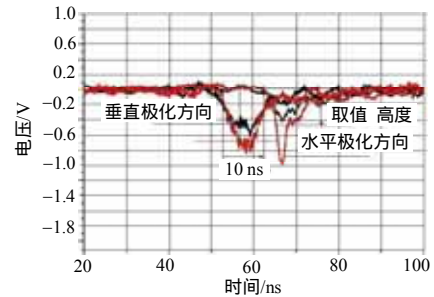


图7 实验中测试到的典型辐射信号

(下转第783页)

- [2] Richmond J H. A modulated scattering technique for the measurement of field distribution[J]. Inst. Radio Eng. Trans., 1955, MTT-3: 13-15.
- [3] Lizuka K. How to measure field patterns with photosensitive probes[J]. Electron, 1963, 36: 39-43.
- [4] Hanjnal J V. Compound modulated scatter measuring system[J]. IEEE Proc., 1987, 134:3 50-356.
- [5] Liang W, Hygate G, Nye J F, et al. A probe for making near-field measurements with minimal disturbance: The optically modulated scatterer [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 1997, 45(5): 772-779.
- [6] 杨顺平, 钟哲夫, 李浩. 光调制散射器辐射近场测试方法[C]//全国第六届高功率微波学术研讨会, 太原, 2004.

编辑 孙晓丹

(上接第779页)

图8所示为热测与模拟的归一化功率密度分布比较, 模拟计算频率为34 GHz, 激励模式为 TM_{04} 模, 实验结果和模拟结果在趋势上基本一致, 表明器件工作在 TM_{04} 模的可能性较大。辐射功率都主要集中在 $5^{\circ} \sim 30^{\circ}$ 的范围内, 恰好对应于模式辐射图的亮度区域。

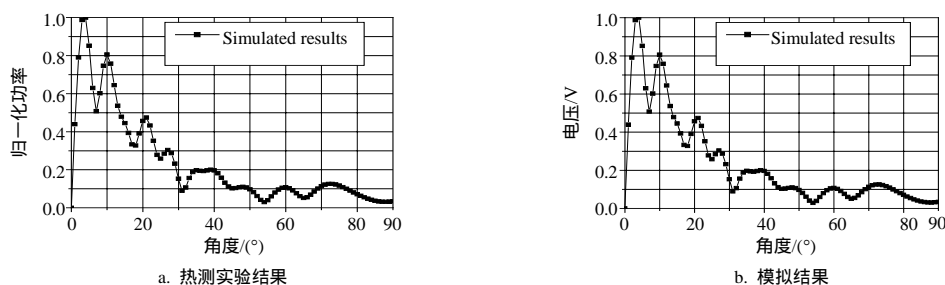


图8 归一化功率密度分布

5 结论

本文采用辐射场空间积分的方法对过模结构的相对论绕射辐射振荡器辐射功率进行了测量。在准确标定测试系统的基础上, 进行了多点、多炮次的热测实验, 得到了器件的辐射方向图。结合辐射模式图和辐射方向图分析, 辐射模式可能为 TM_{04} 模式。通过测试发现电子注的电流为8.1~9.4 kA, 电压560~670 kV, 器件输出功率大于300 MW, 辐射频率在34~38 GHz之间, 脉冲宽度大于10 ns, 功率效率大于5.5%。对于器件中还存在频率稳定性、效率提高、脉冲宽度增加以及辐射功率的测量中还存在如何更准确地测定辐射方向图、辐射模式等问题, 有待于今后进一步深入研究。

参 考 文 献

- [1] Bugaev S P, Cherepenin V A, Kanavets V I, et al. Relativistic multiwave cerenkov generators[J]. IEEE Trans. on Plasma Sci., 1990, 18(3): 525-536.
- [2] 舒挺, 刘永贵, 谭启美, 等. 多波契伦柯夫振荡器的实验研究[J]. 强激光与粒子束, 1999, 11(5): 619-622.
- [3] Earley L M, Ballard W P, Wharton C B. New directional couplers for multimode circular waveguides applied to intense pulsed microwave systems[J]. IEEE Trans. on Nucl. Sci., 1985, 32(5): 1985-1999.
- [4] Haworth M D, Englert T J, Lemke R W. Comprehensive diagnostic suite for a magnetically insulated transmission line oscillator[J]. Rev. Sci. Instrum, 2000, 71(3): 1539-1547.
- [5] 李家胤, 熊祥正, 杨梓强, 等. 相对论磁控管的实验研究[J]. 强激光与粒子束, 1997, 9(4): 563-567.
- [6] 杨梓强, 高喜, 兰峰, 等. 8毫米波段相对论过模慢波器件的实验研究[C]//第四届高能电子学学术交流会, 云南景洪, 2005: 200-203.
- [7] 林昌禄. 天线测量[M]. 成都: 成都电讯工程学院出版社, 1988.

编辑 孙晓丹