

亚太赫兹波折叠波导扩展相互作用振荡器研究*

张开春[†] 吴振华

(电子科技大学物理电子学院 THz 中心, 成都 610054)

(2012 年 5 月 30 日收到; 2012 年 8 月 24 日收到修改稿)

对于亚太赫兹波段扩展相互作用振荡器 (EIO), 本文采用折叠波导作为慢波谐振系统, 研究了周期数对高频特性的影响, 计算了特征阻抗、起振电流随周期数的变化规律, 为有效降低起振电流提供了途径. 在此基础上, 采用 PIC 进行模拟研究, 探讨了 EIO 在弱电流连续波和强电流脉冲工作方式下的注波相互作用和输出特性, 深入分析了 EIO 的周期数调谐、电压调谐的特性. 在连续波工作时, EIO 的输出功率约 2.5 W; 在脉冲工作方式下, 通过电压调谐, EIO 的输出功率约 26—50 W, 激发频率约 105.26—105.31 GHz. 采用慢走丝加工方法, 探讨了高频系统的两种加工方式, 测试了慢波系统的谐振特性、输出窗的传输特性, 并与模拟结果进行了对比分析, 验证了该加工方法在该频段的可行性和实用性, 为实用型整管研究提高了重要依据.

关键词: 扩展相互作用振荡器, 折叠波导, 输出窗, 起振电流

PACS: 41.80.D

DOI: 10.7498/aps.62.024103

1 引言

随着太赫兹科学技术的日益发展, 扩展相互作用振荡器 (extended interaction oscillator, EIO) 正发展为一种关键的中等功率电真空太赫兹辐射源^[1-9], 在 0.1—0.3 THz 上可以产生瓦级的输出, 美国陆军研究中心已将 CPI 公司研制的 0.225 THz EIO 作为发射机应用于脉冲极化相干雷达上, 获得优异的性能^[3]. 随着加工技术、电子光学技术等的改进和发展, CPI 公司已经将 0.3—0.7 THz 的 EIO 列为他们的研究重点^[2]. 对于 EIO 的慢波谐振系统主要有梯形线^[1,2]、耦合腔^[4-6]和折叠波导^[8,9], 本文采用折叠波导^[9-11]作为 EIO 的慢波谐振系统. 相比而言, 折叠波导阻抗偏低, 但是在加工方面更具有便利性, 可以一次成型将其加工而成; 而且在功率输出的结构设计方面也较为方便, 因而能够避免装配环节造成的误差, 因此具有独特的优点. 本文以太赫兹低频段电真空太赫兹辐射源为研究对象, 对 105 GHz 折叠波导 EIO 进行了理论计算、模拟研究, 探索了慢波系统的加工方法, 并进行了相关实

验研究.

2 高频特性分析和 PIC 模拟结果

结合矩形波导中 TE_{10} 模和慢波系统中 2π 模的特点, 频率 106 GHz 时折叠线的主要尺寸为: 高度 3.6 mm、宽度 1.6 mm、间隙 0.3 mm、漂移段 0.4 mm、电子通道直径 0.8 mm, 如图 1 所示, 图中显示部分为真空.

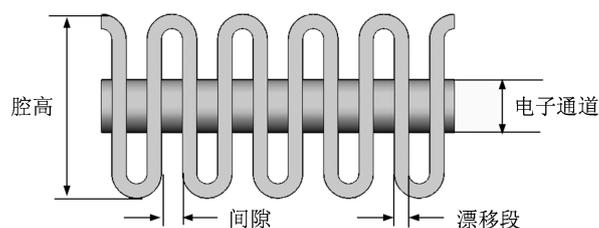


图 1 折叠波导结构示意图

EIO 的高频系统具有周期性, 因此周期数的变化对高频特性具有较大的影响, 下面将分析和讨论这种影响关系. 采用理论计算和电磁模拟方法^[12], 通过研究慢波谐振系统 2π 工作模的谐振频率、

* 中央高校基本科研业务费专项资金 (批准号: ZYGX2009J045) 和教育部博士点基金 (批准号: 20100185110022) 资助的课题.

[†] 通讯作者. E-mail: zh.kch@163.com

间隙电压、腔体损耗, 就可以获得品质因数 Q 和阻抗随周期数的变化关系, 如图 2 所示, 从图中可明显发现, 随周期数的增加, 2π 模的频率略微

减小、 Q 值略微增加, 而特征阻抗和并联阻抗随周期数基本呈线性增长, 这一特性有利于注波互作用.

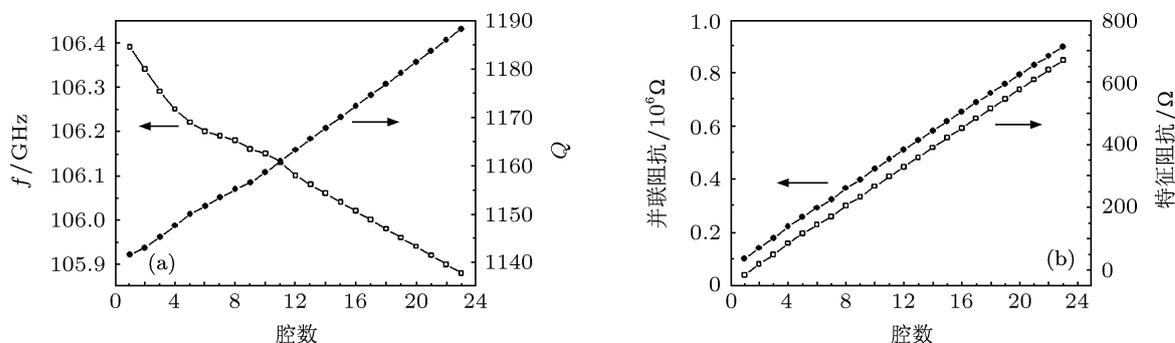


图 2 计算结果 (a) 频率和 Q 值随腔数的变化; (b) 阻抗随腔数的变化

对于振荡器, 起振电流是个非常重要的参数, 通过 EIO 起振电流的计算方法 [13], 可计算出起振电流随周期数的变化关系, 计算结果如图 3 所示, 可以明显看出: 起振电流随周期数的增加而减小, 当周期数分别为 20, 30, 40 时, 各自的起振电流约 70 mA, 15 mA, 10 mA. 这表明, 适当增加相互作用长度有利于减小起振电流, 能够简化电子枪的设计和阴极对中问题, 对于细电子通道时电子传输将非常有利, 同时可以保证阴极工作于连续波状态; 当相互作用长度较短时, 所需的起振电流较大, 必须采用会聚方式获得高电流密度电子注以便阴极工作于连续波状态, 或工作于脉冲状态使阴极发射高电流密度电子注. 下面我们将对这两种情况进行详细研究, 探讨研究弱电流连续波工作和强电流脉冲工作时各自特征.

图和电场频谱图. 此时, 电流密度为 30 A/cm^2 , 阴极工作于脉冲状态或电子注需要压缩.

对于 EIO 的调谐输出还没有相关文献探讨过, 下面我们将对此问题进行研究. 由于 EIO 工作在慢波系统的 2π 模附近, 因此不是点频工作, 应有一定的调谐带宽, 可以通过电压调谐和周期数调谐以获得 EIO 的宽带输出. 图 6 为 EIO 输出功率和信号频率与工作电压的关系图, 分别讨论了电流密度 40 A/cm^2 和 50 A/cm^2 两种情况的输出情况, 当 EIO 工作电压范围为 16.8—17.5 kV, 对应输出功率 26—60 W 和信号频率 105.26—105.31 GHz, 随工作电压的增加, 输出功率和信号频率随之增加, 表明工作在 2π 模的返波区; 当电流增加, 激发频率略微降低. 通过这些对比研究, 能够发现 EIO 可以工作在不同的状态下, 具有丰富的信息, 这是它的显著特点.

通过 PIC 粒子软件模拟研究, 当周期数 29、电压 17 kV、轴向磁场 0.2 T、电流 17 mA、阴极发射面直径 0.6 mm 时 (对应电流密度 6 A/cm^2), EIO 产生 2.5 W 的功率, 激发频率为 105.6 GHz, 电子注调制深度约 27.6%. 图 4 为 EIO 注波互作用结构示意图、 2π 模的 E_z 分布图、输出端处的功率波形图和电场频谱图, 在模拟时, 在电子注发射面与高频结构之间加了一段 Freespace 以便符合实际工作情况. 此时, 电流密度为 6 A/cm^2 , 阴极可以连续工作, 而且不必压缩电子注就能获得所需的电流密度.

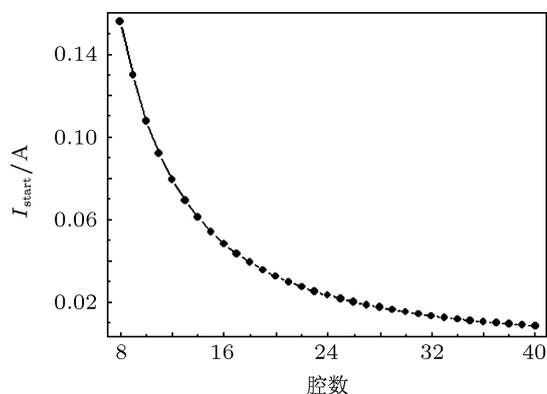


图 3 起振电流随腔数的变化

当周期数 21、电流 85 mA (对应电流密度 30 A/cm^2)、电压 17 kV、轴向磁场 0.2 T 时, 可以产生 40 W 的峰值功率, 输出波频率 105.35 GHz, 电子注调制深度在 20% 以上. 图 5 为 EIO 注波互作用结构示意图、 2π 模的 E_z 分布图、输出端处的功率波形

3 加工方案和冷测实验

对于该折叠波导, 由于尺寸很小, 很难保证加

工精度, 我们通过反复设计和探讨, 设计出了两种加工方法, 用于双端口折叠波导, 便于测试 S 参数, 通过测试电磁波在该系统中的传输和损耗, 能够验证这两种加工方法的可靠性.

3.1 加工方案 1

采用慢走丝加工, 先加工出折叠线包括渐变输出部分, 然后在两端盖上盖板加以封闭并焊接, 最后采用慢走丝将两端封闭部分割除, 以便与 3 mm 标准波导连接. 该方案的优点是可以保证慢波系统

不变形和均匀性, 缺点是二次加工时会污染高频系统并难以清除. 加工件经 50 倍高精度显微镜测量, 加工误差 $< 10 \mu\text{m}$, 表面粗糙度可达 $0.4 \mu\text{m}$. 我们也曾尝试采用特殊抛光工艺进行处理, 虽然表面光洁度有较大提高, 但是面形尺寸精确度难以保证. 加工件如图 7 所示, 整个测试系统包括: 16 个周期的慢波系统 (间隙 0.3 mm 、周期 0.7 mm)、渐变输出部分 (从 $0.3 \text{ mm} \times 1.6 \text{ mm}$ 渐变到 3 mm 波段标准矩形波导尺寸 $1.27 \text{ mm} \times 2.54 \text{ mm}$)、直波导部分 (3 mm 波段标准矩形波导).

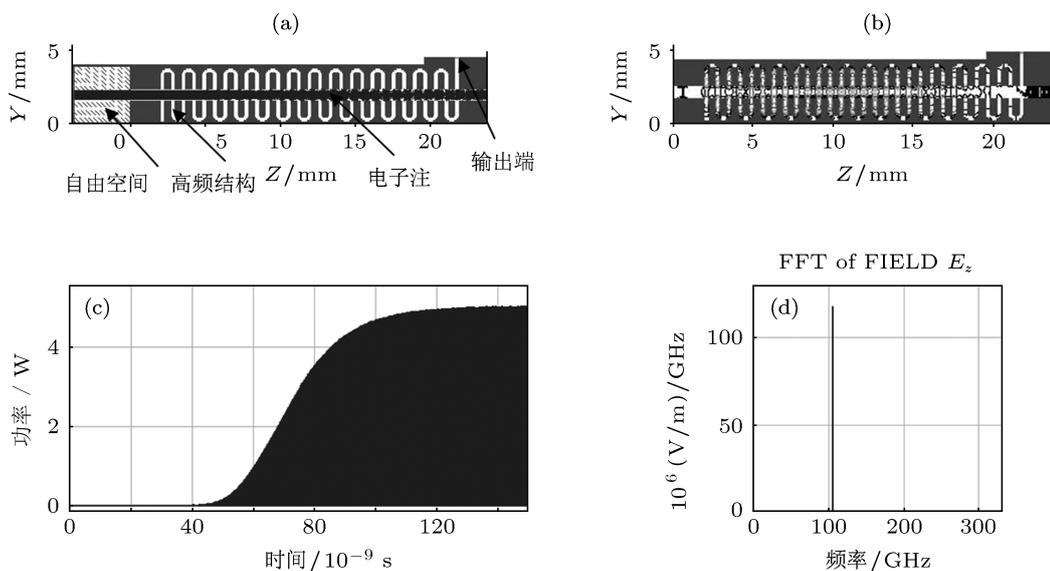


图 4 周期数 29 时模拟结果 (a) 电子注的群聚图; (b) E_z 场分布图; (c) 功率波形图; (d) 电场频谱图

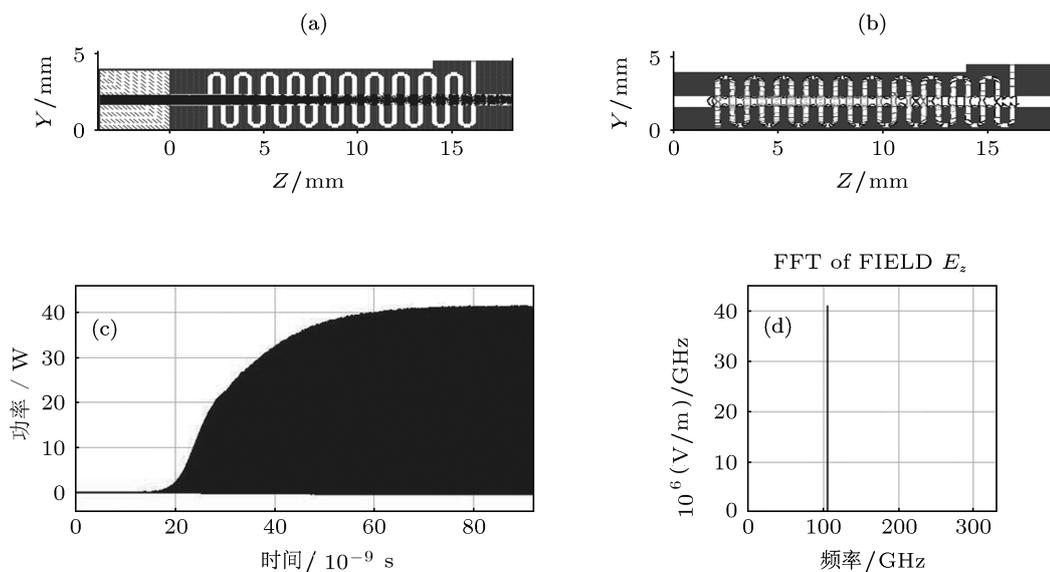


图 5 周期数 21 时模拟结果 (a) 电子注的群聚图; (b) E_z 场分布图; (c) 功率波形图; (d) 电场频谱图

采用 3 mm 矢量网络分析仪测试系统, 测试了慢波系统的 S 参数, 见图 8 中的曲线, 其频率范围为 90—110 GHz. 测试结果表明: 整个系统的传输损耗偏大; 在 97.5—99.5 GHz 内, 损耗曲线比较平坦, 约 5—7 dB, 该频段是折叠波导的基波; 在 106 GHz (2π 模) 的损耗较大, 107.5 GHz 处的损耗约 7 dB, 109 GHz (行波段) 处损耗约 2 dB. 从测试结果还可以发现: EIO 的 2π 工作模位于二次谐波上而不在基波上, 因此本论文中折叠波导 EIO 工作在二次谐波上.

为了验证测试结果的准确性, 我们采用电磁模

拟软件 CST 对测试结构进行研究. 在模拟中, 结构尺寸与实验保持一致, 选取 COPPER 为背景材料. 模拟结果为: 在 97.5—99.5 GHz 内, 损耗曲线比较平坦, 约 4 dB; 2π 点 105.77 GHz 处的损耗约 8 dB; 107.5 GHz 处的损耗约 2 dB; 在 109 GHz (行波段) 处损耗约 1.8 dB. 测试结果与模拟结果的损耗和变化趋势比较符合, 在某些频点的损耗偏大.

损耗偏大的主要原因包括: 慢波系统的表面光洁度不够高, 从加工件的表面放大图中也能发现, 这导致了表面损耗较大; 二次加工的污染将导致损耗增加; 测试时的装配失配也将导致损耗增加.

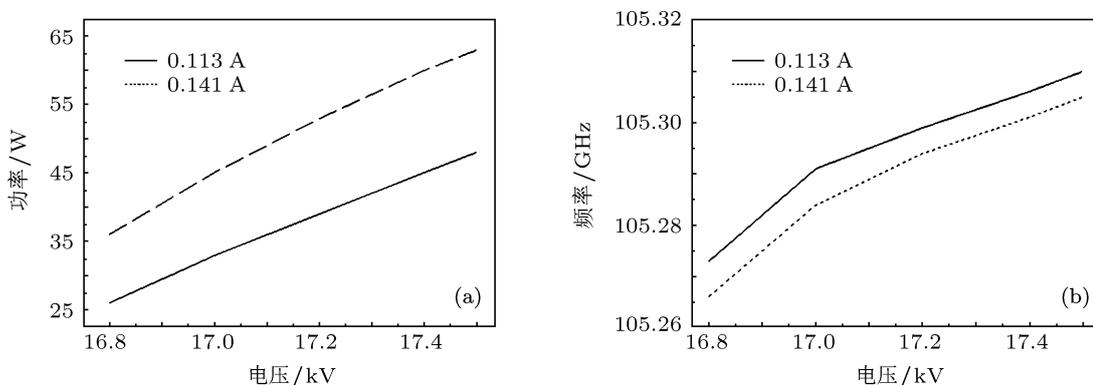


图 6 周期数 21 时 EIO 的调谐输出

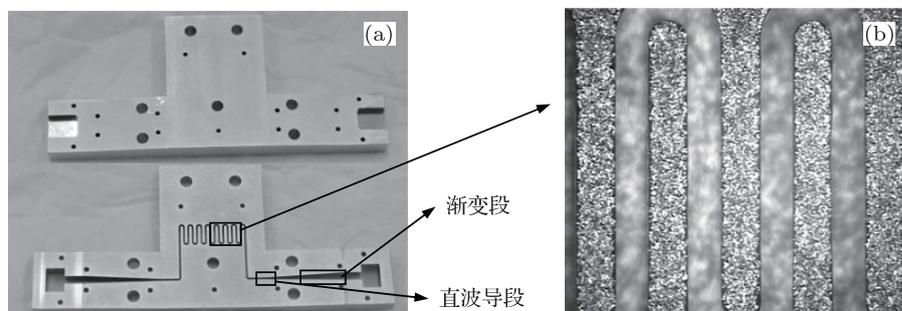


图 7 0.1 THz 折叠波导慢波系统 EDM 加工件

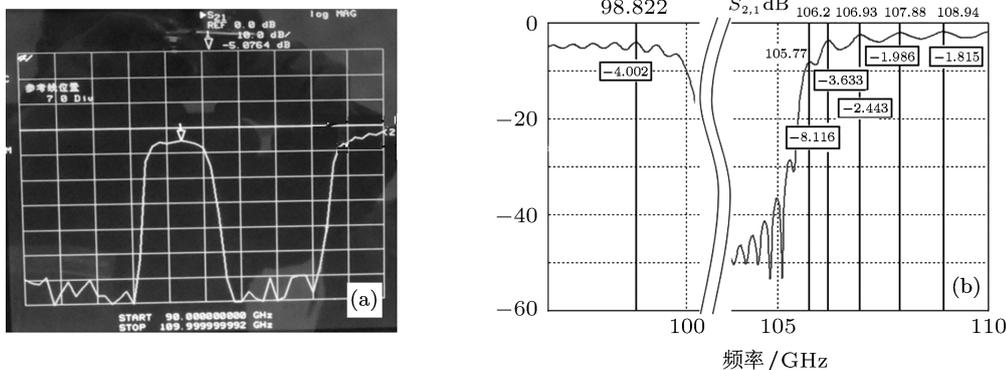


图 8 折叠波导慢波系统冷测和模拟结果

3.2 加工方案 2

也采用慢走丝加工, 先将慢波系统连同输出渐变部分一次性加工出来, 然后割除上下部分, 最后通过定位装置在其两端盖上盖板加以封闭并焊接, 这种方案的优点是可以保证折叠线的清洁度, 缺点是在割除上下部分后, 折叠线就会分成上下两部分, 在重新装配时会造成一定的错位, 给装配带来一定的难度. 加工件如图 9 所示, 整个测试系统包括: 13 个周期的慢波系统 (间隙 0.3 mm、周期 0.6 mm). 测试结果为: 2π 点 104 GHz 处的损耗约 6 dB; 105.6 GHz 处的损耗约 2.5 dB; 在 107.3 GHz (行波段) 处

损耗约 1.9 dB, 损耗较低, 可以应用于整管. 对该加工结构进行模拟研究, 在 2π 点 104.23 GHz 处的损耗约 3 dB; 105.6 GHz 处的损耗约 1.2 dB; 在 107.6 GHz (行波段) 处损耗约 0.8 dB.

通过比较, 测试结果和模拟结果比较符合, 表明这两种加工方案都比较好, 加工误差、表面光洁度、装配配合等引起的损耗较小, 可以用于整管的研制.

经过改进, 我们设计和加工 105 GHz EIO 折叠波导, 测试了单端口 S 参数, 如图 10 所示, 在工作点的 S_{11} 可达 20 dB 以上, 损耗较小. 屏上的频率范围为 75—110 GHz.

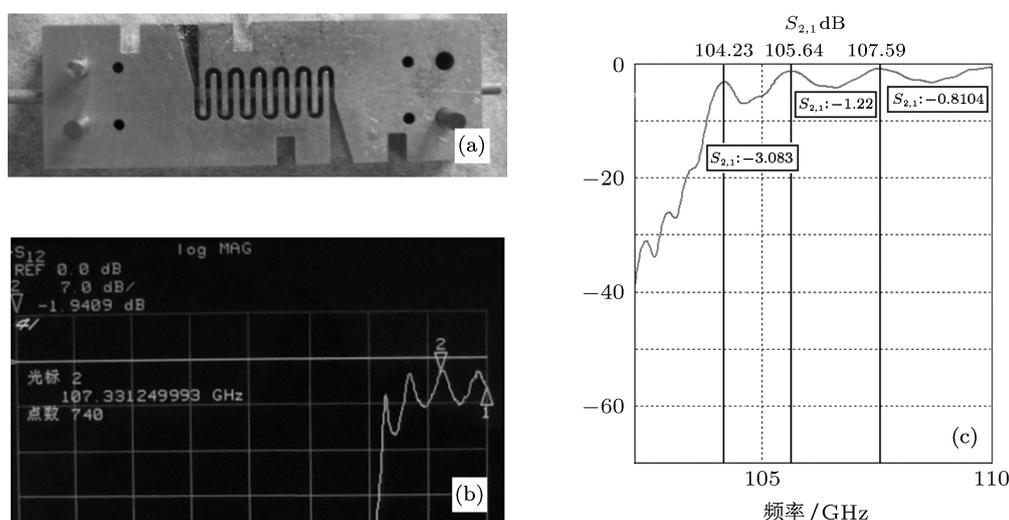


图 9 0.1 THz 折叠波导慢波系统加工件及测试结果

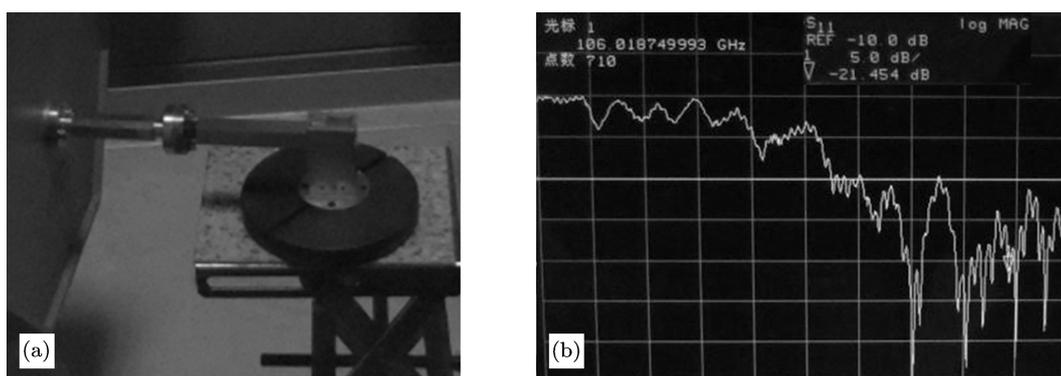


图 10 单端口 0.1 THz 折叠波导慢波系统测试结果

3.3 输出窗传输特性测试

输出窗是电真空器件很重要的一部分, 既要保证信号的顺利输出又要保证内外真空隔断. 本文采用盒型窗方法设计了 100—110 GHz 的输出窗, 窗

片为宝石窗片, 在该频段下其相对介电常数 ϵ_r 约为 9, 窗片的厚度按 $\lambda/4$ 来确定, 约为 0.25 mm. 输出窗两端为标准的 3 mm 矩形波导. 为了方便输出窗的测试, 在其一端接了一长段直波导 (长约 5 cm), 该直波导也采用慢走丝加工, 我们这儿将对该输出窗

和直波导进行测试, 测试它们的传输特性. 输出窗和直波导的结构图和测试结果如图 11 所示, 从 S_{21} 曲线可以看出: 从 100—107 GHz, 输出窗的衰减范

围为 1.5—3 dB; 从 90—110 GHz, 直波导衰减约 1 dB, 衰减率为 0.2 dB/cm; 扣除波导的衰减后, 输出窗的衰减约 0.5—1.5 dB.

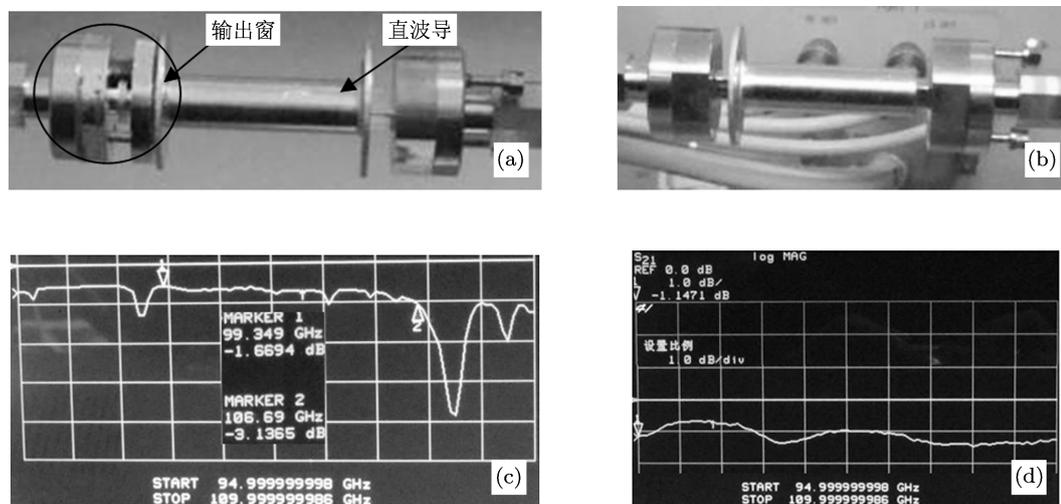


图 11 输出窗和直波导测试 (a) 输出窗; (b) 直波导; (c) 输出窗测试结果; (d) 直波导测试结果

4 结论

本文从中等功率电真空源出发, 考虑到高频结构加工的便利性, 选择折叠波导作为 EIO 的慢波谐振系统; 同时考虑测试的便利性, 频率选定在 105 GHz 附近, 它既位于亚太赫兹波段的低端又位于 3 mm 波段的频率高端, 方便采用网络分析仪和其他仪器进行冷测和热测. 研究了该慢波系统的高频特性分析, 特别是特征阻抗、谐振频率、起振电流随

周期数的变化规律, 为 PIC 模拟和实验研究提供了支持. 探讨了 EIO 弱电流连续波工作和强电流脉冲工作的各自特征. 分析了 EIO 的调谐输出, 电压调谐约 1 kV、调谐带宽约 50 MHz, 输出功率为几十 W 量级, 它工作在 2π 模的返波区. 探索了折叠波导的两种加工方法, 测试了该系统的传输和损耗, 验证了这两种加工方法的可靠性; 同时设计了该 EIO 的盒型输出窗, 经测试损耗较小. 通过本文的系统研究, 为后期实验奠定了基础.

- [1] Dave B, Peter H, Mark H, Albert R, Brian S 2005 *Conf. 30th Infrared and Millimeter Waves and 13th Terahertz Electronics* p84
- [2] Albert R, Dave B, Mark H, Brian S 2007 *Conf. 32th Infrared and Millimeter Waves and 15th Terahertz Electronics* p892
- [3] Mead J B, McIntosh R E 1990 *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.* **38** 1252
- [4] Zhang K C, Wu Z H, Liu S G 2009 *Journal of Infrared, Millimeter and Terahertz Waves* **30** 309
- [5] Zhang K C, Wu Z H, Liu S G 2008 *Chin. Phys. B* **17** 3402
- [6] Zhang K C 2011 *Acta Electronica Sinica* **39** 632 (in Chinese) [张开春 2011 电子学报 **39** 632]
- [7] Wu Z H, Zhang K C, Liu S G 2010 *Journal of University of Electronic Science and Technology of China* **39** 58 (in Chinese) [吴振华, 张开春, 刘盛纲 2010 电子科技大学学报 **39** 58]
- [8] Zhang K C, Wu Z H, Yan Y, Huang Y, Li X Y, Liu S G 2010 *Journal of Infrared, Millimeter and Terahertz Waves* **31** 543
- [9] Wu Z H, Zhang K C, Liu S G 2009 *Acta Electronica Sinica* **37** 2677 (in Chinese) [吴振华, 张开春, 刘盛纲 2009 电子学报 **37** 2677]
- [10] Billarrea S, Kory C L, Lee W J 2002 *IEEE Int. Conf. Vacuum Electronics* p26
- [11] Billarrea S, Booske J H, Kory C L 2004 *IEEE Trans. Plasma Science* **32** 1002
- [12] Zhang K C 2009 *Ph. D. Dissertation* (Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China) (in Chinese) [张开春 2009 博士学位论文 (成都: 电子科技大学)]
- [13] Preist D H, Leidigh W J 1963 *IEEE Trans. ED* **3** 201

Study of extended interaction oscillator with folded waveguide in sub-terahertz band*

Zhang Kai-Chun[†] Wu Zhen-Hua

(THz Research Center, School of Physical Electronics, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 610054, China)

(Received 30 May 2012; revised manuscript received 24 August 2012)

Abstract

In this paper, a folded waveguide is adopted as a slow wave structure (SWS) of the extended interaction oscillator (EIO). An EIO with frequency 105 GHz in sub-Terahertz band is studied in detail, including the dispersion relation and the impedance of the SWS, and the variation of starting current with the period number, which provides an effective way to reduce starting current. On this basis, from the PIC simulation studies are discussed the EIO beam-wave interaction and output characteristics under the operation modes of low current continuous wave and strong current pulse. Further, the tuning characteristic of the EIO is analyzed, showing that output power reaches 26–50 W and the corresponding frequency range is 105.26–105.31 GHz. By EDM technology two fabrication methods of the SWS are investigated and the transmission properties of the SWS and the window are tested indicating that they are in good agreement with the simulation results.

Keywords: extended interaction oscillator (EIO), folded waveguide, output window, starting current

PACS: 41.80.D

DOI: 10.7498/aps.62.024103

* Project supported by the Fundamental Research Funds for the Central Universities (Grant No. ZYGX2009J045), Doctoral Fund of Ministry of Education of China (Grant No. 20100185110022).

[†] Corresponding author. E-mail: zh.kch@163.com