



·激光传输与控制·

中物院 1~4.2 THz FEL 装置波导谐振腔优化设计

窦玉焕¹, 束小建¹, 吴岱², 徐勇², 杨兴繁², 黎明²

(1. 北京应用物理与计算数学研究所, 北京 100094; 2. 中国工程物理研究院应用电子学研究所, 四川 绵阳 621900)

摘要: 针对中物院高功率太赫兹自由电子激光 (THz FEL) 装置, 结合 FEL 光腔振荡器实验的实际情况, 提出了全波导近共心谐振腔设计方案。完成了 THz 波段波导光腔对光腔品质影响的理论分析和模拟计算, 确定了波导设计尺寸为 14 mm 和 22 mm。同时针对最初实验调试过程中无法出光饱和的问题, 提出将波导更换为 22 mm 大尺寸波导的建议, 波导更换后很快在 2.56 THz 获得饱和出光。另外针对实验频段无法覆盖到 1~2 THz 的问题, 我们通过波导内壁粗糙度进行分析判断, 提出采用 14 mm 铜材质的全波导 FEL 振荡器的设计方案, 采用该方案后, 实验成功将辐射频段拓展到 0.7~4.2 THz, 获得饱和输出。

关键词: 自由电子激光; 太赫兹; 光腔; 波导; 理论设计

中图分类号: TN248.6

文献标志码: A

doi: 10.11884/HPLPB202234.210270

Waveguide optical resonator optimization of CAEP THz-FEL in 1—4.2 THz

Dou Yuhuan¹, Shu Xiaojian¹, Wu Dai², Xu Yong², Yang Xingfan², Li Ming²

(1. Institute of Applied Physics and Computational Mathematics, P.O. Box 8009, Beijing 100094, China;

2. Institute of Applied Electronics, CAEP, Mianyang 621900, China)

Abstract: Investigations of waveguide application to the whole optical cavity of CAEP's high power THz-FEL device are achieved. The influence of waveguide on the quality of optical cavity is calculated by theoretic analysis and simulations. The waveguide gae size is designed to be 14 mm and 22 mm. In the experiment, we found it was have to get lasing in 1—2 THz. By analysis, we think the reason is that waveguide is made of Titanium and the waveguide wall roughness is unsuitable, which induce large diffraction loss of optical resonator. To reduce the loss, we use a new waveguide made of Cu to replace the old one. Using the new waveguide, lasing and saturation were attained in 1—2 THz in 2019. Then the whole facility could run stably in 0.7—4.2 THz using the 14 mm Cu wave-guide.

Key words: free-electron laser (FEL), terahertz, optical resonator, waveguide, numerical simulations

自由电子激光 (FEL) 作为一种新型的相干光源以其高亮度、优异的光束品质、波长连续可调等特性吸引了研究者的强烈研究兴趣。FEL 与常规的激光器相比, 尤其以波长连续可调而具有显著优点。但由于建造 FEL 耗资巨大, 其目前的主要发展方向是向其它激光器难以实现的波段发展, 即光谱的两个极端区域——太赫兹 (THz) FEL 和 X 射线 FEL。THz 源由于其本身的特殊性, 在通信、成像以及危险品检测、生物医学等方面有广泛的应用^[1]。目前其它产生 THz 源的方法主要有基于半导体机制的量子级联激光^[2]; 利用微电真空器件产生 THz 辐射^[3]; 利用超快飞秒激光泵浦铈酸锂或有机晶体产生太赫兹源^[4-6], 与这些常规方法相比, 利用 FEL 产生的 THz 源因具有功率高、波长大范围连续可调的特性而有独特的优势^[7]。美国、德国、俄国等世界各国都在积极进行 THz FEL 实验装置的建立和关键技术的研究^[8-13]。世界上最著名的长波 FEL 装置包括荷兰的 FELIX 装置^[12]、德国的 FELBE 装置^[13]和俄罗斯的 NovoFEL 装置^[9], 荷兰的 FELIX 装置升级后的装置频率总覆盖范围 0.2~100 THz^[12], 是目前全球覆盖范围最广的用户装置, 总的平均功率较低。德国的 FELBE 装置频率覆盖 1.2~75 THz, 最大平均功率大于 100 W^[13]。

* 收稿日期: 2021-07-12; 修订日期: 2021-11-05

基金项目: 中国工程物理研究院基金项目 (2015B0402091); 北京应用物理与计算数学研究所所长基金项目 (ZYSZ1518-09); 国家重大科学仪器设备开发和应

专项基金项目 (2011YQ1300180102)

联系方式: 窦玉焕, dou_yuhuan@163.com。

通信作者: 吴岱, wudai04@163.com。

中国工程物理研究院在国家科技部等支持下, 2011 年底开始建造 THz FEL 装置, 设计目标辐射频率在 1~3 THz, 输出功率在 10 W。

对 THz 波段的 FEL 装置来说, 由于其辐射波长在远红外光谱区, 波长较长, 光斑半径较大, 从而在腔壁的衍射损失较大, 这样会导致采用常规的光腔设计方案使得波荡器提供的增益无法补偿光腔的损失, 致使 FEL 系统不能起振^[14]。为了减少损失, 科学家们在常规的设计基础上引入一些新的设计方案。如荷兰 FOM 研究所的 FELIX 用户中心采用近共心稳定腔中间加平面波导的混合光腔^[12], 由于采用了常规加速器, 其输出功率较低, 大概 0.4 W。德国的 ELBE FIR FEL^[13] 也采用了这种混合光腔, 并在此基础上进行了改进, 提出了水平和竖直方向曲率不一样的镜子取代球面镜的改进方案, 但是其辐射频率最短到 1.2 THz。我们根据实验特点, 提出全波导近共心谐振腔方案即在光腔上全程加入波导管, 约束光束, 增加光束与电子束的耦合作用, 以提高光腔增益, 减少损失^[15-16]。进一步根据实验实际情况及要求, 需要在不同波段确定合适的波导尺寸, 并需要研究计算不同波导尺寸对光腔品质的影响, 以选择适合实验要求的波导尺寸。

针对 CAEP FIR FEL 装置, 结合目前 FEL 振荡器的实际情况, 提出了全波导近共心谐振腔设计方案。首先通过理论分析, 估计分析了光腔加入波导管对腔内增益的影响及波导损失的估计。然后通过三维数值模拟设计了两种波导尺寸间隙即 14 mm 和 22 mm 的波导, 并对比了两种波导尺寸在 1~3 THz 时对腔内功率的影响。但是在实验过程中, 针对实验出现的两个具体问题: 无法获得出光饱和及辐射频段无法覆盖到 1~2 THz 的问题, 有针对性地给出了相应的解决途径, 最终使实验输出频率成功覆盖到 0.7~4.2 THz 的范围内获得了饱和输出, 输出功率最高达到 50 W。

1 波导的影响及损失估计

我们知道, 波导管可以有效的约束光在光腔内的传输, 通过高导电率的导体即金属构成边界面, 近似实现短路面的边界条件。文献 [14] 采用横向叠合因子的方法对波导进行了理论计算, 充分表明了波导的良好约束作用。文献 [17] 对有无波导管进行了数值模拟计算对比, 结果也表明了引入波导设计后的光腔可以使光腔增益提高 20% 以上。但是对波导设计来说, 其材质、尺寸、粗糙度也会给系统带来很大影响, 如果选取不合适, 会直接导致系统不能起振, 这也是我们在后续的实验过程中发现的问题。针对这一问题, 我们首先对波导引入的损失进行理论估计。

采用波导后, 作为高频电磁场的光场在波导表面由于趋肤效应而有所损失。虽然用耦合孔输出对光场分布有不好的影响, 但由于电子束对光的光导效应, 特别是增益光导效应, 起振后光腔内仍然是基模为主, 达到 90% 以上。我们用平面波导基模估计了波导损失如下

$$\alpha = \alpha_0 \frac{\lambda^2}{2b^3} \quad (1)$$

$$\alpha_0 = \left(\frac{\omega \epsilon_0}{2\sigma} \right)^{1/2} \quad (2)$$

式中: b 是平面波导的间隙; λ 是光波长; ω 是光的圆频率; ϵ_0 是真空介电常数; σ 是波导材料的电导率。

往返一个 pass 的能量损失为

$$\chi = 1 - \exp(-4\alpha L) \quad (3)$$

式中: L 是平面波导管的长度; 在这里等于光腔长度。

电磁场的振幅衰减为初始时 $1/e$ 的距离定义为趋肤深度 δ , 金属材料的趋肤深度 $\delta = \sqrt{2/\omega\mu\sigma}$ 。电磁波频率较高时, 金属表面粗糙度会对传输损耗产生极大影响, 理论上可以通过将粗糙度引发的损耗计入电导率, 得到修正电导率 σ_c , 即

$$\sigma_c = \sigma/k^2 \quad (4)$$

$$k = 1 + \exp[-(\delta/2h)^{1.6}] \quad (5)$$

式中: k 为修正系数; h 为表面粗糙度。

可以看出, 当粗糙度 h 远小于趋肤深度 δ 时, 修正系数 k 接近最小值 1, 修正电导率 σ_c 几乎与材料电导率 σ 相等, 损耗仅来源于材料电导率; 当粗糙度 h 远大于趋肤深度 δ 时, 修正系数 k 接近最大值 2, 修正电导率 σ_c 接近材料

电导率 σ 的 1/4, 这时的损耗主要是由表面粗糙度引发的。

2 波导的设计

利用我们的三维振荡器自由电子激光程序(3D-OSIFEL)^[18], 采用表 1 所示参数, 我们前期对 1~3 THz 波导尺寸进行了设计。针对辐射频率为 2 THz, 波导尺寸范围在 10~28 mm 内, 给出了不同波导间隙下输出功率 P_{out} 和摇摆器增益 W_g 随光腔内光程的变化情况^[17]。综合考虑, 选取 14 mm 和 22 mm 两种尺寸的波导管进行了加工。

表 1 中物院 THz FEL 装置的主要设计参数
Table 1 Parameters of CAEP's THz free-electron laser(FEL)

electron beam		wiggler	
energy /MeV	7	period /cm	3.8
peak current /A	12.5	peak field strength /kG	3.3
micro bunch/ps	8	number of periods	42
emittance/(π mm-mrad)	10	optical cavity	
energy spread /%	0.75(FWHM)	cavity length /m	2.769
repetition rate/MHz	54.17	curvature radius/cm	221

利用我们的三维数值模拟程序, 并根据实验实际情况及要求, 我们分别计算了波导尺寸间隙在 14 mm 和 22 mm 时对光腔内功率 P_{in} 的影响。为了更全面的考察计算, 我们分别在不同的辐射频段进行了计算, 主要选取的频段有: 1, 2 和 3 THz。

图 1 为辐射频率分别在 1, 2, 3 THz 时光腔在波导间隙分别为 14 mm 和 22 mm 的腔内功率对比图。从图 1 中可以看出, 在 1 THz 时当波导间隙增大为 22 mm 后, 腔内功率没有提升, 光腔无法起振。因此, 在 THz FEL 实验的低频段 1 THz 附近, 波导尺寸必须选择为 14 mm, 采用 22 mm 的波导时应该在实验的较高频段进行调试。总的来说, 波导尺寸对光腔品质的影响随着辐射频率的减少而逐渐增大。辐射频率越小则需要越小的波导尺寸, 辐射频率较大时, 波导尺寸影响会变小。在高频段即 2~3 THz 时波导尺寸选择在 22 mm 时是可行的, 在低频段 1 THz 时则必须要较小的波导尺寸, 波导尺寸应该在 14 mm 左右较合适。综合考虑, 14 mm 波导可以在 1~3 THz 整个频段获得饱和输出, 22 mm 波导在 2~3 THz 可以获得饱和输出。

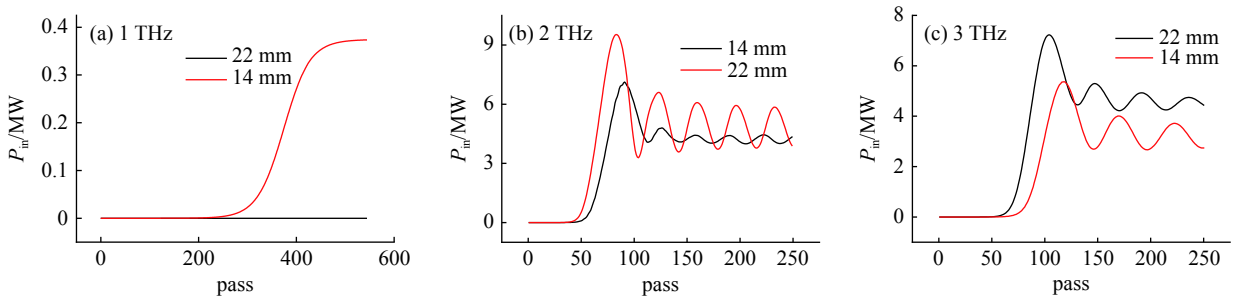


Fig. 1 Curve of power in the optical cavities (P_{in}) to the waveguide gap 22 mm and 14 mm in 1 THz vs pass

图 1 辐射频率分别为 (a) 1 THz, (b) 2 THz, (c) 3 THz 时不同波导尺寸对腔内功率影响的模拟计算结果

3 实验过程及解决途径

实验根据设计尺寸, 加工了两根 14 mm 和 22 mm 的钛材质波导, 为了增加进度, 首先选取了 14 mm 波导进行反复调试, 经过近半年的实验, 一直不能获得理想结果。经多方讨论, 根据实验准直条件及波导内壁条件判断, 提出将 14 mm 波导更换为 22 mm 波导, 实验很快于 2017 年在 2.56 THz 获得了饱和出光, 但是在 1~2 THz 还是无法出光。

为了解决问题, 我们首先通过计算分析波导内壁及材质的损失, 发现波导材质对波导的损耗至关重要。我们选取了几种损耗比较小的材质, 如银, 铜, 铝等。对于 THz 波段, 电磁波在金属波导中的传输损耗不能忽略, 在选用金属材料时尽量选用高电导率金属。图 2(a) 给出了 THz 波段 (1~3 THz) 不同材料趋肤深度随频率的变化关系, 可以看出, 趋肤深度随频率增加呈现减小趋势, 对于同一频率, 材料电导率越高趋肤深度越薄。综合考虑性

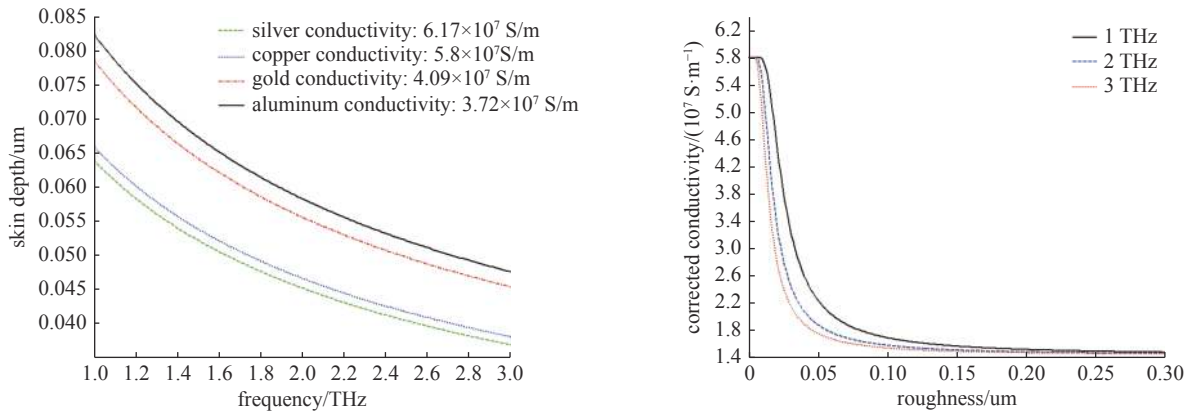


Fig. 2 (a) skin depth changes with frequency and conductivity and (b) corrected conductivity vs roughness of copper surface

图 2 (a) 趋肤深度随频率和材料电导率的变化 (b) 铜的粗糙度引起的修正电导率

能、成本等因素,无氧铜是最佳选择。图 2(b) 给出了无氧铜材料修正电导率在 1, 2 及 3 THz 三个频段随表面粗糙度的变化关系。可以发现,当表面粗糙度很小时(0.02 μm 以内),其修正电导率与材料电导率几乎相等,随着表面粗糙度的增加,在表面粗糙度 0.1 μm 范围以内时,修正电导率随表面粗糙度的增加迅速减小,当超过 0.1 μm 以后再增加表面粗糙度,修正电导率趋于饱和值。

基于以上分析及综合判断,我们提出将波导更换为 14 mm 铜介质波导,最终实验采用该方案,利用一根 14 mm 波导管,成功实现采用 14 mm 铜材质的全波导 FEL 振荡器,实验于 2019 年 6 月份成功将辐射频段拓展到 0.7~4.2 THz,获得饱和输出。分析其中的原因我们认为铜材质相比钛材质较软,可以加工的精度较高,因此铜材质波导表面能加工得比较光滑,粗糙度低。从图 2(b) 可看出,粗糙度越低,电导率越高,从而使铜材质波导的损耗较小。目前实验运行稳定,最高输出功率达到 50 W,实验指标处于国际先进水平。

4 结 论

本文针对我院高功率 THz FEL 装置,结合目前 FEL 振荡器的实际情况,完成了 THz 波段波导光腔对光腔品质影响的理论分析和模拟计算,确定了不同频段实验所需合适的波导尺寸。

完成了不同波导尺寸在不同频段的影响计算。分别考察了波导尺寸间隙在 14 mm 和 22 mm 时对光腔质量及品质的影响。发现波导尺寸对光腔品质的影响随着辐射频率的减少而逐渐增大。综合考虑,14 mm 波导可以在 1~3 THz 整个频段获得饱和输出,22 mm 波导在 2~3 THz 可以获得饱和输出。结合实验情况,考虑到调试方便及安全角度,可以先选取 22 mm 的波导在实验高频段进行调试。

但是在实验过程中,针对实验出现的具体问题如最初的不能出光饱和到 1~2 THz 无法出光的问题进行了分析和改进优化,最终使实验输出频率成功覆盖到 0.7~4.2 THz 的范围内获得了饱和输出。输出功率最高达到 50 W。

参考文献:

- [1] Tonouchi M. Cutting-edge Terahertz technology[J]. *Nature Photonics*, 2007, 1(2): 97-105.
- [2] Scalari G, Walther C, Faist J, et al. Electrically switchable, two-color quantum cascade laser emitting at 1.39 and 2.3 THz[J]. *Applied Physics Letters*, 2006, 88: 141102.
- [3] Bratman V, Glyavin M, Idehara T, et al. Review of subterahertz and terahertz gyrodevices at IAP RAS and FIR FU[J]. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2009, 37(1): 36-43.
- [4] Zhang Baolong, Ma Zhenzhe, Ma Jinglong, et al. 1.4-mJ high energy terahertz radiation from lithium niobates[J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2021, 15: 2000295.
- [5] Chiu Y C, Huang Y C, Wang T D, et al. Generation of 4 THz radiation from lithium-niobate off-axis THz parametric oscillator[C]//Proceedings of the 43rd International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves (IRMMW-THz2018). 2018.
- [6] 杨晶, 赵佳宇, 郭兰军, 等. 超快激光成丝产生太赫兹波的研究[J]. *红外与激光工程*, 2015, 44(3): 996-1007. (Yang Jing, Zhao Jiayu, Guo Lanjun, et al. Study of terahertz radiation from filamentation induced by ultrafast laser pulses[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(3): 996-1007)
- [7] Williams G P. FAR-IR/THz radiation from the Jefferson Laboratory, energy recovered linac, free electron laser[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2002, 73(3): 1461-1463.
- [8] Tecimer M, Holldack K, Elias L R. Dynamically tunable mirrors for THz free electron laser applications[J]. *Physical Review Special Topics - Accelerators and Beams*, 2010, 13: 030703.

- [9] Gavrilov N G, Knyazev B A, Kolobanov E I, et al. Status of the Novosibirsk high-power terahertz FEL[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 2007, 575(1/2): 54-57.
- [10] Jongma R T, Van Der Zande W J, Van Der Meer A F G, et al. Design of the Nijmegen high-resolution THz-FEL[C]//Proceedings of the 30th International Free Electron Laser Conference, FEL 2008. Gyeongju, Korea, 2008: 200-203.
- [11] Tecimer M, Brunel L C, Van Tol J. A design study of a FIR/THz FEL for high magnetic field research[C]//Proceedings of FEL 2006, BESSY. Berlin, Germany, 2006: 327-330.
- [12] Militsyn B L, von Helden G, Meijer G J M, et al. FELICE—the free electron laser for intra-cavity experiment[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 2003, 507(1/2): 494-497.
- [13] Klopff J M, Helm M, Kehr S C, et al. FELBE-upgrades and status of the IRITHz FEL user facility at HZDR[C]//Proceedings of the 43rd International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves (IRMMW-THz2018). 2018.
- [14] 窦玉焕, 束小建, 王元璋. 远红外自由电子激光光腔改进的模拟分析[J]. 强激光与粒子束, 2006, 18(8): 1345-1348. (Dou Yuhuan, Shu Xiaojian, Wang Yuanzhang. Analysis and simulation of optical cavity in CAEP far-infrared FEL[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2006, 18(8): 1345-1348)
- [15] 窦玉焕, 束小建, 邓德荣, 等. 中物院高功率THz FEL装置的理论分析和优化设计[J]. 强激光与粒子束, 2013, 25(3): 662-666. (Dou Yuhuan, Shu Xiaojian, Deng Derong, et al. Design and simulations of CAEP high power THz free-electron laser[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2013, 25(3): 662-666)
- [16] 窦玉焕, 束小建. THz自由电子激光椭圆型耦合输出光腔[J]. 强激光与粒子束, 2013, 25(6): 1455-1459. (Dou Yuhuan, Shu Xiaojian. Elliptical hole-coupling optical resonator in THz FEL[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2013, 25(6): 1455-1459)
- [17] 窦玉焕, 束小建, 徐勇, 等. 中物院高功率THz FEL装置波导的物理设计[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2017, 15(5): 702-706. (Dou Yuhuan, Shu Xiaojian, Xu Yong, et al. Effect investigation of waveguide for CAEP high power THz FEL[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2017, 15(5): 702-706)
- [18] Dou Y H, Shu X J, Wang Y Z. 3D-simulations of transverse optical modes of the free electron laser resonator with hole output coupling[J]. Communications in Computational Physics, 2006, 1(5): 920-929.