

文章编号: 2095-4980(2017)05-0702-05

中物院高功率 THz FEL 装置波导的物理设计

窦玉焕¹, 束小建¹, 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 621999)

摘 要: 针对中物院高功率太赫兹自由电子激光(THz FEL)装置, 结合目前FEL实验的实际情况, 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间隙。理论分析与数值模拟表明, 光腔加入波导管后减少了腔损耗, 使腔内增益提高约30%。完成了不同波导间隙在不同频段的影响计算, 并确定了不同频段合适的波导间隙。进一步考察了波导间隙在14 mm和22 mm时对光腔质量及品质的影响。

关键词: 自由电子激光; 太赫兹; 光腔; 波导; 数值模拟

中图分类号: TN248.6

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA201705.0702

Effect investigation of waveguide for CAEP high power THz FEL

DOU Yuhuan¹, SHU Xiaojian¹, XU Yong², YANG Xingfan², LI Ming²

(1.Institute of Applied Physics and Computational Mathematics, Beijing 100094, China;

2.Institute of Applied Electron, China Academy of Engineering Physics, Mianyang Sichuan 621999, China)

Abstract: Investigations of using the waveguide in the whole optical cavity of CAEP high power THz-Free Electron Laser(FEL) device are carried out. The influences of waveguide on the quality of optical cavity, such as the loss, the gain and output power of THz laser at different frequencies are studied by calculation and theoretical analysis. The results show that the gain of optical cavity can be increased almost by 30%. Furthermore, the influences of two waveguide sizes, 14 mm and 22 mm, are compared. This work will be helpful to the designs of CAEP THz-FEL equipment.

Keywords: Free Electron Laser; Terahertz; optical resonator; waveguide; numerical simulations

太赫兹(THz)源的产生和利用有重大的科学价值, 在通信、探测、成像以及危险品检测、生物医学等方面有广泛而独特的应用前景^[1], 是国际上的前沿和热点。目前产生 THz 源的方法有很多, 如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]; 还有一种是利用相对论电子束即自由电子激光(FEL)来产生 THz 光^[4]。其中利用 FEL 产生的 THz 光因具有功率高、波长可设计及大范围连续可调的特性而有独特的优势。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^[5-8]。在国家科技部等支持下, 中国工程物理研究院正在建造一台辐射频率在 1~3 THz, 输出功率在 10 W 左右的 THz FEL 装置。

对 THz 波段的 FEL 装置来说, 其最突出的问题就是光腔损失大, 波荡器提供的增益无法补偿光腔的损失, 导致系统不能起振。损失较大的原因主要是辐射波长在远红外光谱区, 由于波长较长, 衍射损失大, 该装置中其衍射损失占总损失的比重较大^[9]。为减少损失, 需要在原有的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^[10-11]。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间隙, 并需要研究计算不同波导间隙对光腔品质的影响, 以选择适合实验要求的波导间隙。

针对 CAEP FIR FEL 装置, 结合目前 FEL 振荡器的实际情况, 通过理论分析, 利用计算光束与电子束横向叠合因子的办法来近似估计分析光腔加入波导管对腔内增益的影响。然后通过三维数值模拟分别计算了波导间隙在 14 mm 和 22 mm 时对光腔质量及品质的影响。由于 THz FEL 实验装置辐射频率较宽, 针对不同频段选择适合实验要求的波导间隙, 分别在不同的辐射频段进行了计算, 主要选取的频段有: 1 THz, 2 THz 和 3 THz。研究计算了波导间隙对光腔输出功率和增益的影响, 确定了不同频段采取的合适波导间隙。

收稿日期: 2016-09-02; 修回日期: 2016-12-27

基金项目: 中国工程物理研究院基金资助项目(2015B0402091); 北京应用物理与计算数学研究所所长基金资助项目(ZYSZ1518-09); 国家重大科学仪器设备开发和应用专项基金资助项目(2011YQ1300180102)

1 理论分析

根据实验实际情况及要求,目前在光腔设计中引入平面波导,波导主要在平行于摇摆器磁场方向即 y 方向进行约束,波导在 y 方向的尺寸称为波导间隙。需要根据情况确定合适的波导间隙,并考虑波导间隙改变对光腔品质的影响。

波导管就是利用具有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(略去导体表面损耗时,可将边界看作短路面),即在波导边界处,其电场的切向分量为零,磁场的法向导函数为零。

对平面波导,可写出光场矢势在 x 方向的表达式。

$$A_x(x, y, z) = \sum_n -\frac{i}{2} A_n(x, z) A_{yn}(y) e^{ik_{zn}z - i\omega t} + c.c \quad (1)$$

$$A_{yn}(y) = \begin{cases} \cos(k_{yn}y), & n = \text{odd} \\ \sin(k_{yn}y), & n = \text{even} \end{cases} \quad (2)$$

式中: $k_{yn} = n\pi/b$, b 是 y 方向的波导间隙; ω 是光频率; A_n 是 z 的慢变函数。

波导能对光束横向进行约束,保证了光束与电子束的良好耦合。文献[9]采用叠合因子的方法分析证明了采用波导后有利于光束与电子束的相互作用。

2 数值模拟

2.1 有无波导时的数值模拟结果对比

在已有的三维振荡器自由电子激光程序(3D-OSIFEL)^[12]上增加了模拟波导的功能。利用表1所示参数,首先模拟光腔不加波导时的情况。图1为光腔内无波导管和加入间隙为 14 mm 的波导管时腔增益和损耗情况。其中 G_w 是 wiggler 增益, G_{net} 是腔内净增益, T_{loss} 是腔内损耗。从图 1(a)可看出,光腔内无波导时, wiggler 增益 G_w 大约为 24%, 腔的增益即净增益 G_{net} 大约为 -6%。从图 1(b)看出,没有波导时腔的损耗大约为 30%。整个系统由于损耗较大,净增益为负值而不能起振,这是因为波长较长,衍射损耗大。

表1 中物院 THz FEL 装置的主要设计参数

Table1 Parameters of CAEP THz FEL

parameter	value	parameter	value
energy/MeV	7	period/cm	3.8
peak current/A	12.5	peak field strength/T	0.33
electron beam		wiggler	
micro bunch/ps	8	number of periods	42
emittance/ π mm mrad	10	optical	—
energy spread/%	0.75(FWHM)	cavity length/m	2.769
repetition frequency/MHz	54.17	mirror curvature/cm	185

在光腔内加入间隙为 14 mm 的波导管后,腔增益和损耗的情况见图 1(c)和图 1(d)。从图中可看出, wiggler 增益提高到 31%左右,腔的净增益约为 26%。腔净增益的提高是因为:一方面光腔的损耗从 30%下降到大约 5%;另一方面 wiggler 增益从约 24%增加到约 31%,这是由于光场向轴线集中,增强了辐射光场与电子束的叠合而增加了增益。因此在光腔中加入波导既可提高 wiggler 增益,也可以减少腔的损耗,腔的净增益 G_{net} 在辐射光的起振阶段大概为 24%,从而使系统光场能够起振放大。

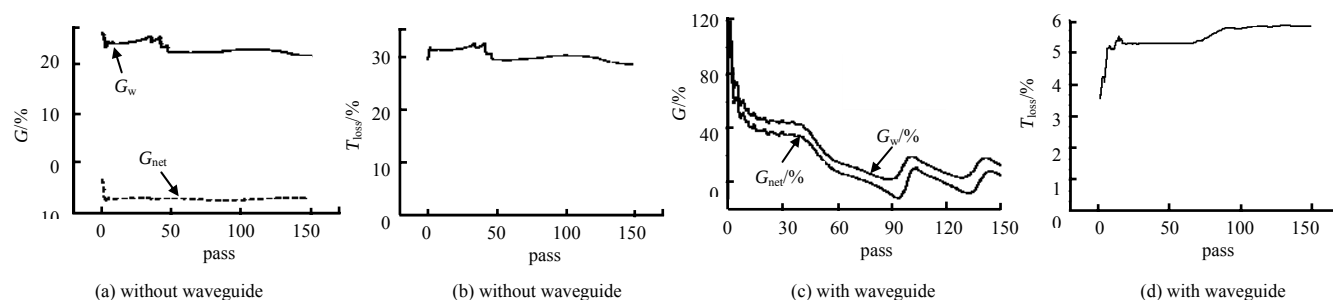


Fig.1 Curves of wiggler gain G_w , net gain G_{net} and resonator loss T_{loss} in optical cavities vs. pass

图1 有无波导管时摇摆器增益 G_w 、光腔增益 G_{net} 和腔损耗 T_{loss} 随光程的变化曲线图

2.2 波导间隙的影响计算

为了考察波导间隙对输出功率的影响, 选择 1~3 THz 辐射频段的中间频率 2 THz, 波导间隙分别为 10 mm, 14 mm, 22 mm, 28 mm, 计算了不同波导间隙下光腔品质情况, 如图 2 所示, 从图中可看出, 在一定范围内, 波导间隙越小, 输出功率越大, 摇摆器增益和光腔净增益也越大。但由于电子束具有一定的发射度, 为了安全考虑, 波导间隙不能选择太小, 初步选择波导间隙为 14 mm。同时根据实验具体情况, 波导间隙越小, 对光腔准直性及波导内壁的光滑性越高, 因此为了实验初始调试方便及综合考虑, 在实验初期调试时, 设计一个较大的波导间隙, 为 22 mm。

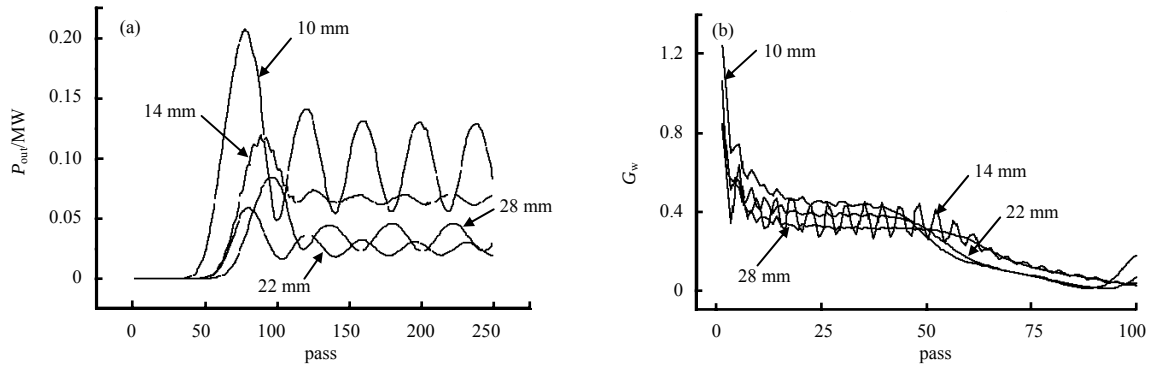


Fig.2 Curves of output power(a) and wiggler gain(b) in different waveguide gaps vs. pass
图 2 辐射频率在 2 THz 时不同波导间隙情况下: (a) 输出功率与 (b) 摇摆器增益对比图

利用三维数值模拟程序, 并根据实验实际情况及要求, 分别计算了波导间隙在 14 mm 和 22 mm 时对光腔质量及品质的影响。为更全面地考察, 分别在不同的辐射频段进行计算, 光腔内光斑半径随着辐射频率的增加而逐渐减小, 频率较低时, 需要更小的波导间隙进行约束; 随着频率的增加, 对波导的间隙要求会降低, 较大的波导尺寸也可以获得很好的增益和输出功率。因此主要选取 3 个频段即 1 THz, 2 THz 和 3 THz 进行模拟计算。

1) 1 THz 时 2 种波导间隙的对比

图 3 为辐射频率在 1 THz 时光腔各参数在波导间隙分别为 14 mm 和 22 mm 的对比图。从图中可以看出, 当波导间隙增大为 22 mm 后, 光腔净增益为负值, 光腔无法起振。这是因为在这个频段光斑半径较大, 波导间隙变大后, 波导对激光的约束能力减小, 场强不够集中, 光腔无法起振。因此, 在 THz FEL 实验的低频段 1 THz 附近, 波导间隙必须选择为 14 mm, 采用 22 mm 的波导时, 应该在实验的较高频段进行调试。

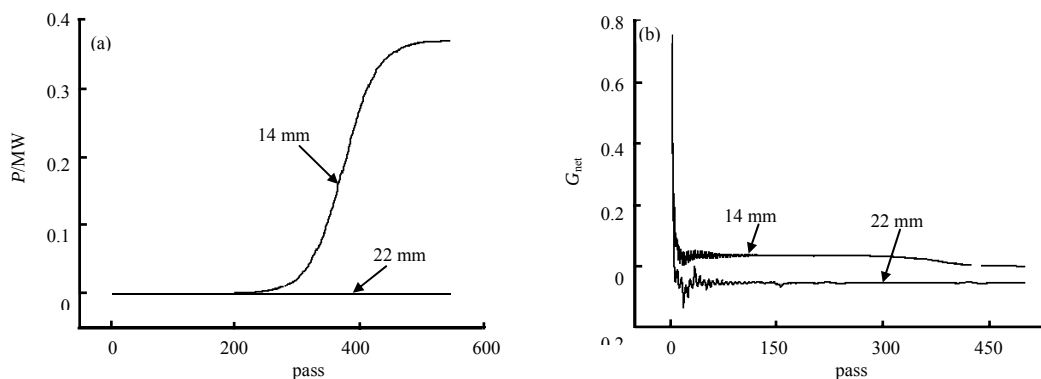


Fig.3 Curves of power in the optical cavities(a) and net gain (b) to the waveguide gap 22 mm and 14 mm in 1 THz vs. pass
图 3 辐射频率为 1 THz 时不同波导间隙对 (a) 腔内功率与 (b) 光腔增益影响的模拟计算结果

2) 2 THz 时 2 种波导间隙的对比

图 4 为辐射频率在 2 THz 时光腔各参数在波导间隙分别为 14 mm 和 22 mm 的对比图。从图 4 中的功率对比图可看出, 波导间隙改变后光腔内的功率变化不大, 而输出功率变化较大。主要是因为波导约束光斑半径较小, 输出较大所致。如果选择合适的输出孔尺寸, 这种差别会变小。从图 4 中光腔增益图中可看出, 光腔增益在 2 种波导间隙下的变化不大。因此可以在这个频段采用尺寸为 22 mm 的波导进行预先的实验调试。

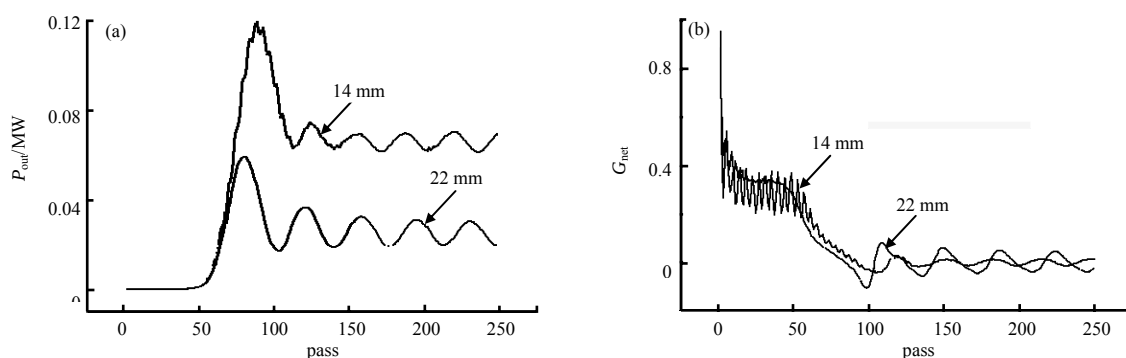


Fig.4 Curves of output power(a) and net gain(b) to the waveguide gap 22 mm and 14 mm in 2 THz vs. pass

图4 辐射频率在 2 THz 时不同波导间隙情况下: (a) 输出功率与(b) 光腔增益对比图

3) 3 THz 时 2 种波导间隙的对比

图 5 为辐射频率在 3 THz 时光腔各参数在波导间隙分别为 14 mm 和 22 mm 的对比图。从图中可以看出,在这个频率范围内,光腔内的功率和增益在 22 mm 时较大一些,输出功率的差别和 2 THz 时相比差别变小。这是因为在这个频段,波长相对较小,光斑半径较小,因此波导的约束力不是特别明显。在高频段 2 种尺寸的差别会变小,预先的实验调试选择在高频段 3 THz 左右调试最好。

总的来说,波导间隙对光腔品质的影响随着辐射频率的减小而逐渐增大。辐射频率越小,则需要越小的波导间隙;辐射频率较大时,波导间隙影响会变小。在高频段即 2~3 THz 时波导间隙选择在 22 mm 时是可行的,在低频段 1 THz 时则必须要较小的波导间隙,波导间隙在 14 mm 左右较合适。

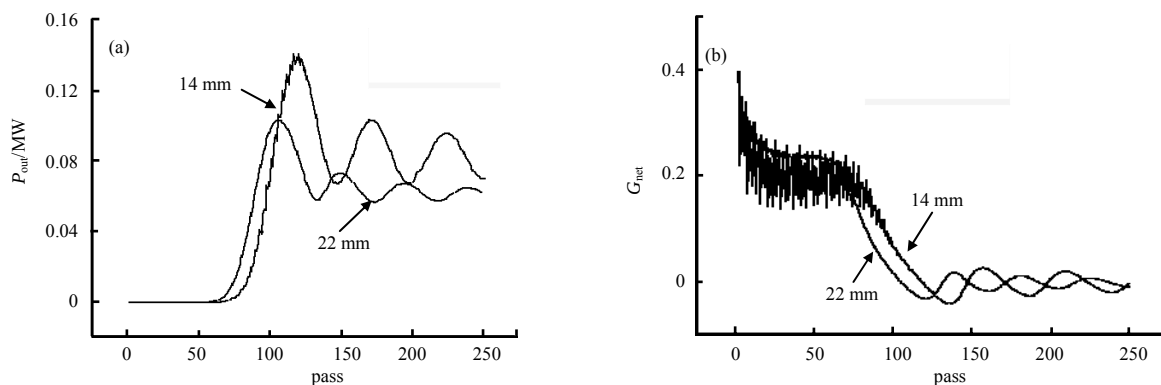


Fig.5 Curves of output power(a) and net gain(b) to the waveguide gap 22 mm and 14 mm in 3 THz vs. pass

图5 辐射频率为 3 THz 时不同波导间隙对(a) 输出功率与(b) 光腔增益影响的模拟计算结果

3 结论

本文针对中物院高功率 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间隙。

通过理论分析,利用计算光束与电子束横向叠合因子的办法,分析了光腔有无波导管时对腔内增益的影响。分析说明波导对光束有较好的约束作用,可增加光束与电子束的相互作用,从而提高了摇摆器增益。

通过三维数值模拟来对比有无波导管时腔内增益的情况,模拟表明无波导管只加遮挡管时,谐振腔净增益为负值,系统无法起振;加入了波导管后,腔损耗减少到 5% 左右,谐振腔的总增益和净增益分别提高到 31% 和 26% 左右。通过此模拟对比充分表明了波导管的优势。

完成了不同波导间隙在不同频段的影响计算,分别考察了波导间隙在 14 mm 和 22 mm 时对光腔质量及品质的影响,研究结果可为高功率 FEL 装置提供参考。

参考文献:

- [1] TONOUCHI M. Cutting-edge terahertz technology[J]. Nature Photo, 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(14):141102-1-141102-4.
- [3] BRATMAN V, GLYAVIN M, IDEHARA T, et al. Review of subterahertz and terahertz gyro devices at IAP RAS and FIR FU[J]. IEEE Transaction on Plasma Science, 2009, 37(1):36-43.
- [4] 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.
- [5] 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(3):1-10.
- [6] GAVRIOV N G, KNYAZEY B A, KOLOBANOV E I, et al. Status of the novosibirsk high-power terahertz FEL[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A, 2007, 575(1):54-57.
- [7] JONGMA R T, VAN W J, VAN A F G, et al. Design of the nijmegen high-resolution THz-FEL[C]// Proceedings of FEL 2008. Gyeongju, Korea:[s.n.], 2008:200-203.
- [8] TECIMER M, BRUNEL L C, TOL J V. A design study of a FIR/THz FEL for high magnetic field research[C]// Proceedings of FEL 2006. BESSY, Berlin, Germany:[s.n.], 2006:327-330.
- [9] 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.)
- [10] 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 simulation of CAEP high power THz free-electron laser[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2013, 25(3):662-666.)
- [11] 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.)
- [12] 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.

作者简介:



窦玉焕(1977-), 女, 山东省金乡县人, 博士, 副研究员, 主要研究方向为激光物理、THz、X-射线、自由电子激光等. email: dou_yuhuan@iapcm.ac.cn.

束小建(1963-), 男, 江苏省淮阴市人, 博士, 研究员, 主要研究方向为高能激光物理.

徐 勇(1964-), 男, 河南省洛阳市人, 高级工程师, 主要研究方向为太赫兹测量与腔镜调试.

杨兴繁(1969-), 男, 辽宁省海城市人, 博士, 研究员, 主要研究方向为加速器物理.

黎 明(1968-), 男, 湖北省天门市人, 硕士, 研究员, 主要研究方向为加速器物理.