

基于自由电子激光的小型太赫兹源初步设计

熊永前^{1;1)} 秦斌¹ 冯光耀² 谭萍¹ 田家胜¹ 陈萍¹
杨军¹ 余调琴¹ 裴元吉^{2;2)} 樊明武¹

1 (华中科技大学 武汉 430074)
2 (中国科学技术大学 合肥 230029)

摘要 介绍了基于自由电子激光的太赫兹源的研究情况,提出了一种小型自由电子激光太赫兹源设计方案.采用独立调谐双腔热阴极微波电子枪,不需要 α -磁铁及其他束团压缩装置,能够达到所需的束流品质,达到减小系统尺寸的目的.加速结构采用对称输入耦合器和同轴吸收负载输出耦合器,减少加速器的横向尺寸.采用混合永磁型波荡器,孔耦合输出的稳定球面光学谐振腔.介绍了该方案的初步设计和仿真计算.

关键词 太赫兹源 自由电子激光 直线加速器 独立调谐微波电子枪

1 引言

在电磁波谱上,太赫兹(THz)波段介于电子学的微波波段与光学的红外波段之间,有学者定义其频率范围为300GHz—3THz(波长1mm—100 μ m)^[1],现在通常指频率范围为100GHz—10THz(波长3mm—30 μ m)^[2,3].由于该波段所处的特殊电磁波谱的位置,其性质表现出一系列不同于其他电磁辐射的特殊性,从而使太赫兹辐射成像技术及时域光谱技术在安全检查、反隐身高精度雷达、军事通讯、工业无损检测、空间物理和天文学、环境检测、化学分析、生物医学、网络通信等领域具有广阔的应用前景.目前,各国学者给予THz技术研究以极大的关注,形成了一个研究高潮.美国、欧洲和日本尤为重视,日本在未来十年科技战略规划中将其列为十项重大关键技术之首^[3].

THz技术的核心是辐射源和探测器技术的发展. THz辐射源的研究方向集中在两个方面:一方面是将光子学特别是激光技术向低频延伸,包括THz气体激光器、超短激光脉冲光电导天线和光整流、非线性差频过程(DFG)和参量振荡器^[4],其特点是可以产生方向性和相干性都很好的THz波,但输出功率小,适合产生1THz以上频率的THz波.另一方面是将电子学方法向高频延伸,包括真空电子器件、电子回旋脉塞、自由电子激光(FEL)、Cherenkov辐射、储存

环同步辐射、基于半导体技术的THz量子级联激光器等.在各种THz辐射源中,FEL具有高功率、高效率、波长在大范围内连续可调、波束质量好、光脉冲时间结构精细而且可调等突出优点,是目前可以获得最高输出功率的方法.

FEL从70年代开始就受到一些国家的重视,但是发展并不顺利,主要原因是FEL对电子束的品质要求太高,一般来说,要求能散度在0.5%以内,归一化发射度在5mm·mrad左右.普通电子直线加速器不可能稳定提供这样高品质的束流,所以直到上世纪90年代,世界上没有出现大功率的FEL.1995年以后,美国Jefferson实验室(JLab)的George Neil等人基于CEBAF所发展起来的超导直线加速器技术,研制了一台40MeV直线加速器,使红外FEL的平均功率稳定运行在700W,其研究很快获得海军支持.2006年10月30日,JLab获得14.2kW平均功率、波长1.61 μ m的红外激光^[5].由于JLab的突破,本世纪以来,FEL再次兴旺起来,基于FEL的THz源在众多THz源方案中又成为热点.

本文提出一种基于自由电子激光的小型THz源设计方案(如图1所示),旨在探索小型化、可移动的FEL-THz源的实现方法.

采用独立调谐双腔热阴极微波电子枪(ITC-RF Gun)和等梯度行波加速管.采取对称输入耦合器和以同轴吸收负载取代输出耦合器的加速结构,使场完

2008-01-07 收稿

1) E-mail: yqxiong@mail.hust.edu.cn

2) E-mail: yjpei@ustc.edu.cn

全对称, 克服了常规加速管输入、输出耦合器中场的不对称性对束流发射度的影响. 同时, 因不需外接吸收负载而使加速结构得到简化, 从而减少了加速器的横向尺寸, 有利聚焦线圈的安装和检修. 电子束经加速管加速到5—10MeV, 通过90°偏转磁铁1进入波荡器, 与光学谐振腔内的光场和波荡器的磁场相互作用, 产生1—3THz辐射波. 光学谐振腔由两个反射镜组成, 一个镜子的位置可调. 60°偏转磁铁2将束流引入束流垃圾箱. 微波功率源由2856MHz微波信号源、固态放大器、20MW速调管以及调制器、波导系统(功分器, 移相、衰减器等)等组成. 快速束流变压器(FCT)用于电荷量的测量, OTR和条纹相机用于测量束团长度.

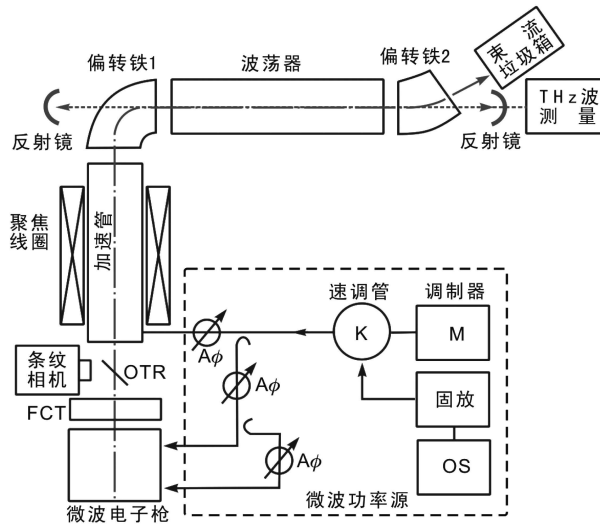


图1 基于FEL的小型THz源示意图

2 独立调谐微波电子枪

ITC-RF电子枪由两个腔组成, 第一腔为阴极腔, 引出束流, 第二腔为加速腔(如图2所示). 两个腔独立馈入不同大小和相位的微波功率, 利用速度聚束效应获得亚皮秒级束流^[6].

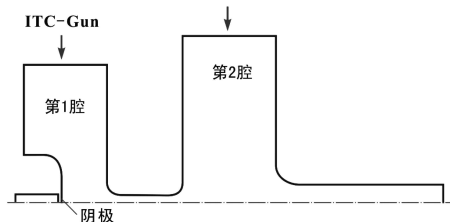


图2 独立调谐微波电子枪示意图

通过初步模拟计算, 采用ITC-RF电子枪, 在不需要 α -磁铁等磁压缩系统的情况下, 可以产生2ps、能散度小于0.5%、发射度小于2mm·mrad的束流脉冲. 因此, 采用ITC-RF电子枪减小了整个THz源装置的

尺寸, 为装置的小型化奠定了基础. ITC-RF电子枪的主要参数如表1所示.

表1 ITC-RF电子枪的主要参数

物理量	数值
工作频率/MHz	2856
第一腔最高场强/(MV/m)	35
第二腔最高场强/(MV/m)	46
阴极直径/mm	5
束团长度/ps	~2
束流能量/MeV	1.445
归一化束流发射度/(mm·mrad)	~1.7
能散度/rms	0.51%
总腔长/cm	12

3 波荡器

波荡器设计的主要目标是控制磁场峰值的均方根误差, 使得磁场垂直分量的一次积分和二次积分尽可能小, 以控制电子束的方向偏移和位置偏移. 针对小型THz源的要求, 采用了混合型永磁结构, 周期长度5cm, 周期数25, 偏转参数 $K=1.0$. 基于解析模型和经验选择了波荡器参数, 使用TOSCA程序针对其端部结构进行了三维分析与优化. 优化后的一次积分小于0.01Gs·m, 二次积分为0.005Gs·m². 通过对电子轨迹的数值跟踪, 得出电子束在屏蔽出口400mm处位置偏移小于0.02mm, 方向偏移0.05mrad.

4 光学谐振腔

采用孔耦合输出稳定球面腔结构, 腔镜由镀金的铜镜组成. 利用FEL一维仿真软件FELO仿真了所设计的FEL-THz源性能. FELO模拟开始于散射噪声, 可以模拟不同的电子脉冲电流分布、腔长失谐和电子束团之间的时间抖动对FEL振荡的影响^[7]. 光腔的主要设计参数为: 腔长2.1008m, 腔镜曲率半径1.4223m, 瑞利长度0.625m, 腔镜反射率95%. 仿真结果如图3所示, 在经过约400次回程后, 光脉冲峰值强度和光脉冲能量呈指数迅速增长, 约1000次回程后进入稳定区, 此时, 能够获得稳定的光脉冲输出.

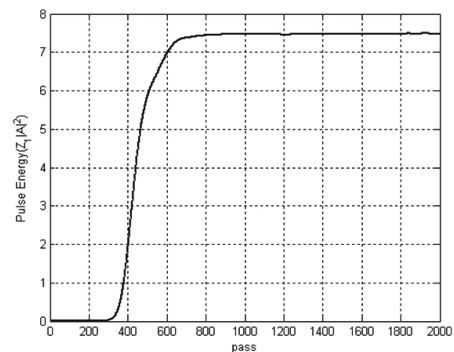


图3 光脉冲能量随回程数的变化

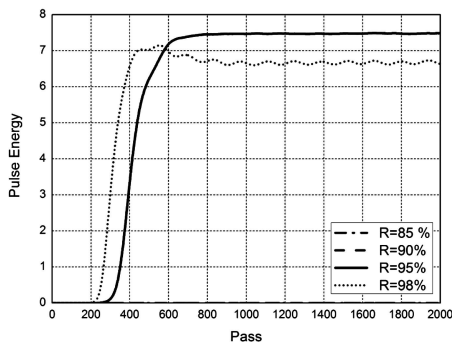


图 4 不同反射率下光脉冲能量随回程数的变化

为了使该 FEL-THz 源能达到较高的光腔增益和稳定的功率输出, 需对参数进行优化设计. 我们综合考虑了不同腔镜反射率、不同发射度和不同能散度对 FEL 输出光脉冲能量的影响. 反射率的影响如图 4 所示, 当反射率为 85% 和 90% 时, 系统不能起振; 反射率为 98% 时, 系统可以起振, 输出的光脉冲能量在很

小的范围内波动, 基本可以达到稳定输出; 反射率为 95% 时, 系统可达到稳定的饱和输出, 为最优的腔镜反射率. 不同发射度的仿真结果表明, 当发射度分别为 5, 10, 15 mm·mrad 时, 对光脉冲能量的稳定输出影响不是很大. 不同能散度的仿真结果表明, 电子束能散度越小, 输出的光脉冲能量越大, 且更容易达到饱和输出.

5 结论

本文给出了一种小型 FEL-THz 源的设计方案. 采用 ITC-RF 电子枪、对称输入耦合器和同轴吸收负载代替输出耦合器的加速结构, 减小了系统尺寸. 通过初步仿真计算, ITC-RF 电子枪能够达到所需的束流品质, 波荡器的磁场的一次积分和二次积分满足要求, 光学谐振腔能够获得稳定 THz 光脉冲输出, 为小型化 FEL-THz 源装置研究奠定了基础.

参考文献(References)

- Peter H S. Terahertz Technology. *IEEE Tran. on Microwave Theory and Technique*, **50**(3): 910—928
- Gallerano G P, Biedron S. Overview of Terahertz Radiation Source. *Proceedings of the 2004 FEL Conference. Italy: Trieste, 2004. 216—221*
- LIU Sheng-Gang. *China Basic Science*, 2006, **8**(1): 7—12 (in Chinese)
(刘盛钢. *中国基础科学*, 2006, **8**(1): 7—12)
- MA Cheng-Ju, CHEN Yan-Wei et al. *Laser & Optoelectronic Progress*, 2007, **44**(4): 56—61 (in Chinese)
(马成举, 陈延伟等. *中国基础科学*, 2007, **44**(4): 56—61)
- <http://www.jlab.org/FEL>
- Tanaka T, Hinode F, Kawai M et al. An Independently Tunable Cells Thermionic RF Gun for Sub-Picosecond Short Pulse. *Proceedings of the 2005 FEL Conference. USA: California, 2005. 142—145*
- McNeil B W J, Robb G R M. FELO: A One Dimensional Time-Dependent FEL Oscillator Code. *Proceeding of FEL 2006. Germany: BESSY, Berlin, 2006. 59—60*

Preliminary Design of Compact FEL Terahertz Radiation Source

XIONG Yong-Qian^{1;1)} QIN Bin¹ FENG Guang-Yao² TAN Ping¹ TIAN Jia-Shen¹ CHEN Ping¹
YANG Jun¹ YU Tiao-Qin¹ PEI Yuan-Ji^{2;2)} FAN Ming-Wu¹

1 (Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

2 (University of Science and Technology of China, Hefei 230029, China)

Abstract A new type of compact terahertz (THz) radiation source using free electron laser (FEL) is discussed in this paper. The concept machine consists of an independently tunable cell thermionic RF gun (ITC-RF Gun), an accelerating structure with symmetry RF-incoupler and a coaxial load RF-outcoupler, an undulator combined with an optical resonance cavity of hole-coupling mode. Without α -magnet and other bunch compressors, the size of this machine is decreased. The conceptual design and numerical simulation are presented.

Key words THz source, FEL, Linac, ITC-RF gun

Received 7 January 2008

1) E-mail: yqxiong@mail.hust.edu.cn

2) E-mail: yjpei@ustc.edu.cn