

文章编号: 1672-2892(2011)03-0342-05

紧凑型自由电子激光太赫兹源研究进展

黎明¹, 柏伟^{1*}, 杨兴繁¹, 沈旭明¹, 王汉斌¹, 窦玉焕², 束小建²,
陈天才¹, 陈亚男¹, 刘婕¹

(1.中国工程物理研究院 应用电子学研究所, 四川 绵阳 621900; 2.北京应用物理与计算数学研究所, 北京 100088)

摘要: 研制了一种具有两路微波馈入的新型热阴极微波电子枪和满足实验要求的主加速器增能段, 介绍了该项目中的热阴极微波电子枪和主加速器的物理设计、数值模拟以及摇摆器测试结果等, 并进行了初步热测实验。测得电子束能量约 6.7 MeV, 能散 0.95%, 归一化发射度 13.5 π mm·mrad。

关键词: 太赫兹; 热阴极; 微波电子枪; 主加速器

中图分类号: TN248.6

文献标识码: A

Development of a compact Terahertz FEL source

LI Ming¹, BAI Wei^{1*}, YANG Xing-fan¹, SHEN Xu-ming¹, WANG Han-bin¹, DOU Yu-huan²,
SHU Xiao-jian², CHEN Tian-cai¹, CHEN Ya-nan¹, LIU Jie¹

(1.Institute of Applied Electronics, China Academy of Engineering Physics, Mianyang Sichuan 621900, China;
2.Institute of Applied Physics and Computational Mathematics, Beijing 100088, China)

Abstract: A project on compact Terahertz (THz) Free Electron Laser (FEL) source was performed. A novel thermionic cathode RF gun with two microwave feed-in ports and a main accelerator used for energy booster were developed, and the preliminary power test experiment was executed. This paper introduces the research progress of the project, including physical design, numerical simulation and preliminary power test results of the novel thermionic cathode RF gun and the main accelerator, as well as the experimental results of the wiggler. The measured beam energy is about 6.7 MeV, Energy spread 0.95% and normalized emittance 13.5 π mm·mrad.

Key words: terahertz; thermionic cathode; microwave RF gun; main accelerator

由于自由电子激光(FEL)具有波长可设计、连续快速可调的特性和高功率、高效率的潜力, 因此, 基于 FEL 的太赫兹辐射源的研制已成为国内外研究的热点。目前, 美国、日本和欧洲等都非常重视太赫兹技术的研究^[1], 国际上已有一百多个研究组从事有关 THz 相关领域的研究^[2]。太赫兹(THz)辐射在物理、化学、信息和生物等基础研究领域以及材料、通信、国家安全等技术领域具有重大的科学价值和广阔的应用前景^[3-4]。

1 物理设计与数值模拟

目前我所正在开展紧凑型 FEL 太赫兹源技术研究, 装置包括新型热阴极微波电子枪、主加速器、消色散传输系统、消色散束流传输线、光腔/摇摆器、测量诊断系统、微波功率源和控制系统等(见图 1)。该装置的主要技术指标如下:

辐射频率: 1 THz~3 THz;

宏脉冲平均功率: 0.5 kW~1 kW;

宏脉冲宽度: 4 μ s;

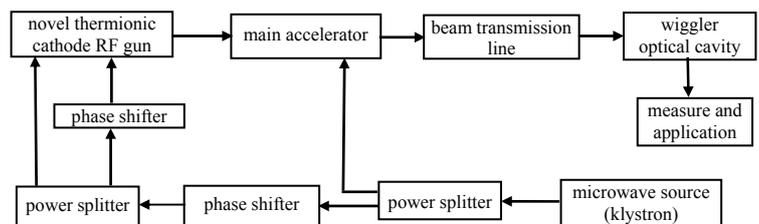


Fig.1 Schematic layout of the compact THz FEL device

图1 太赫兹装置原理图

收稿日期: 2011-03-20; 修回日期: 2011-05-06

* 通信作者: 柏伟: email:bweimail@163.com.

宏脉冲重复频率：1 Hz~10 Hz。

根据紧凑型自由电子激光太赫兹源总体设计(表1为设计参数),利用三维 OSIFEL 程序进行了三维模拟计算,得到 FEL 光场的各参数指标如表2所示,其中 r 为输出孔半径, N_{pass} 为光场达到饱和时的光程数, P_{in} 为饱和时腔内功率, P_{out} 为饱和时输出的峰值功率。

表1 紧凑型自由电子激光太赫兹源电子束参数(设计值)和摇摆器参数

parameters of beam		parameters of wiggler	
energy/MeV	6.5	length of period/cm	3.2
peak current/A	10	magnetic field/T	0.5
pulse width/ps	10	number of periods	40
emittance/ $\pi\text{mm}\cdot\text{mrad}$	20	parameters of optical cavity	
energy spread/(%)	1(FWHM)	length/m	2.52
frequency/MHz	2 856	curvature radius of cavity mirror/m	1.74
macro pulse width	4 μs	wave guide section/mm	20 \times 10

表2 定态时 FEL 光场的各参数指标

r/mm	total gain/(%)	net gain/(%)	N_{pass}	P_{in}/MW	P_{out}/kW	average power/kW	output energy/mJ
1.5 \times 0.75	294	255	34	3.04	105	2.79	11.2

由以上的计算可知,不考虑滑移效应时,定态模拟结果输出的平均功率是 2.79 kW,大于设计的指标 1 kW。另外,电子束质量品质对整个 FEL 系统的起振、增益等有重要的影响,因此需对电子束的品质进行考察计算,以保证装置获得足够大的增益,能够起振饱和。电子束的品质主要包括 2 个方面,即电子束的能散度和发射度及束流强度。

腔内净增益和输出功率依赖于能散度的变化,如图2所示,由于电流和磁场强度都比较高,定态结果的净增益也比较高,净增益和能散的变化关系基本呈线性关系。而饱和时的输出功率随能散的变化关系在能散由 1.25%减少到 0.75%时,其变化不是很明显,这主要是由于净增益很高,腔内功率基本已经接近电子束的抽取极限。另外从图2可看出其能散度最好不要超过 3%,否则系统由于增益太低而不能起振。

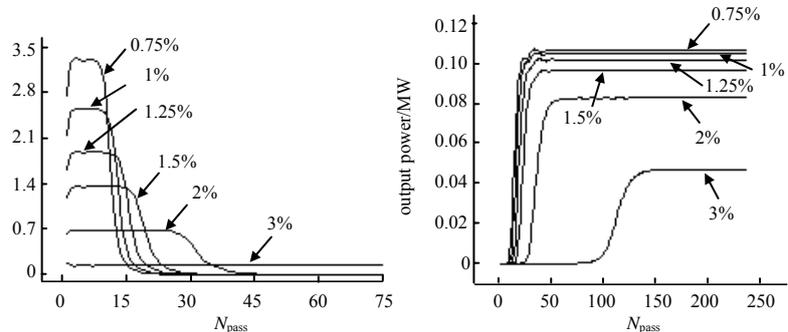


Fig.2 Variation of net gain within the cavity (left) and output power (right) in response to energy divergence
图2 腔内净增益(左)和输出功率(右)随能散度的变化

电子束的发射度对输出功率和净增益的变化如图3所示,从图中可看出,净增益和输出功率随发射度的变化基本呈线性关系,发射度不能超过 90π ,否则系统将不能起振。与能散度的影响比较可知,能散度的影响相对发射度的影响来说要更大一些。

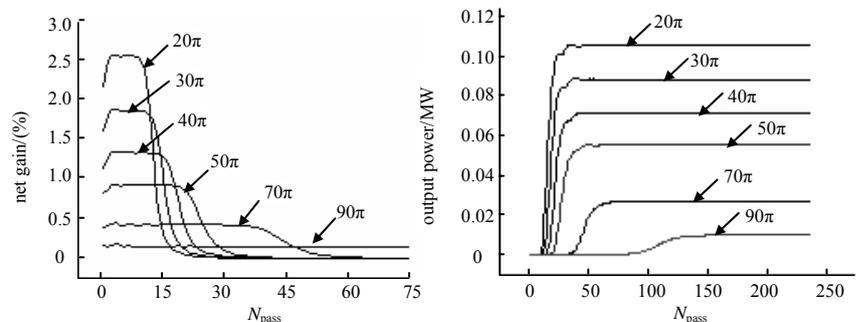


Fig.3 Variation of net gain within the cavity(left) and output power(right) in response to emittance
图3 腔内净增益(左)和输出功率(右)随发射度的变化

输出功率和净增益依赖于不同峰值电流的变化情况,如图4所示,从图中可看出,腔内净增益基本随着峰值电流呈线性增加,为保持较高的净增益和输出功率,并考虑到电子束流的实际产生的困难,比较合适的电子束流应在 8 A~12.5 A。

2 新型低反轰热阴极微波电子枪

新型低反轰热阴极微波电子枪在设计上采用了双路微波馈入的多腔热阴极微波电子枪的设计方案,即用2路微波馈入激励微波电子枪腔链,一路由首腔馈入激励微波电子枪腔链,一路由首腔馈入激励首腔,实现阴极表面建场引出电子;另一路由后续腔馈入并通过腔间耦合激励各腔。首腔和后续腔之间的微波场互不耦合,相移可以通过移相器实现 $0^{\circ}\sim 360^{\circ}$ 连续可调,这样使得离开首腔的电子在第2腔中得到较好的加速电场相位匹配,减小第2腔中由于加速电场相位不匹配而反轰的电子数,从而显著减小电子反轰功率。同时,通过波导衰减器可以调节首腔进腔功率,从而调节首腔与后续腔链的场强比,与移相器配合使用,使电子反轰功率最小。表3给出了微波电子枪出口处的束流动力学模拟结果^[5]。

图5是整体焊接后的热阴极微波电子枪照片,图6是热测实验波形,测得的束流强度约433 mA,利用偏转磁铁测得的电子束能量约1.5 MeV。在后续的工作中,还将开展进一步的实验研究工作,全面测试从微波电子枪出来的电子束的各项参数,同时进行实验研究和优化微波电子枪的各项参数,确定微波电子枪正常工作的优化工作点。

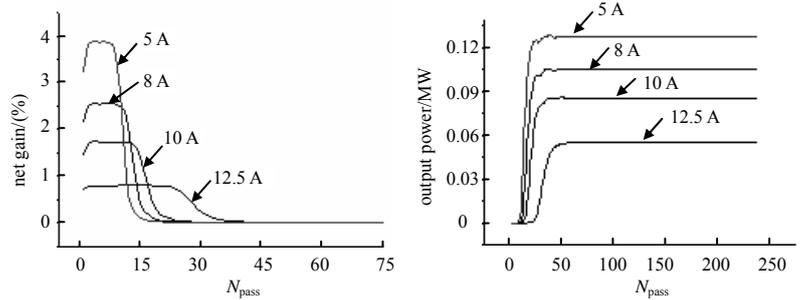


Fig.4 Variation of net gain within the cavity(left) and output power(right) in response to beam intensity

图4 腔内净增益(左)和输出功率(右)随束流强度的变化

表3 微波电子枪输出束流参数
Table3 Beam parameters of the microwave RF gun

energy/MeV	current/A	normalized emittance/ $\pi\text{mm}\cdot\text{mrad}$	rms length of bunch/ps
1.7	0.564	7.089	8.519

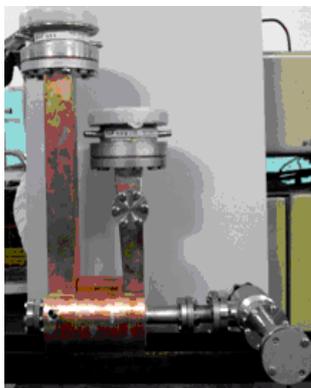


Fig.5 Welded thermionic cathode RF gun
图5 整体焊接后的热阴极微波电子枪



Fig.6 Tested waveform of thermionic cathode RF gun
图6 热阴极微波电子枪测试波形

3 主加速器

主加速器采用了高加速梯度、多腔结构的物理设计。利用 PARMELA 软件进行了数值模拟,表4给出了主加速器出口处的束流动力学模拟结果。比较表3和表4可以看出,主加速器能够将来自微波电子枪的电子束加速到平均能量为6 MeV~7 MeV,满足太赫兹系统的整体设计要求,且束流强度损失较小(通过率达90%以上),束流发射度增长也较小,同时,在主加速器出口处,束团长度小于10 ps,满足了系统设计要求。

表4 主加速器出口处束流参数
Table4 Beam parameters of main accelerator

energy/MeV	current/A	normalized emittance/ $\pi\text{mm}\cdot\text{mrad}$	rms length of bunch/ps
6.6	0.515	8.3	9.03

按照物理设计要求,进行了主加速器的加工、冷测调试和焊接等一系列工作,图7是主加速器焊接完成后的冷测实验结果。

目前,已经完成了主加速器的初步热测实验研究。图8是热测实验平台,表5给出了在主加速器后进行的热测实验的主要测试结果。热测实验结果表明,主加速器的主要参数的测试结果与物理设计结果吻合较好,满足太赫兹系统设计的整体要求。

接下来将开展进一步的热测实验研究,详细研究电子束的束流品质和各项工作参数之间的关系,同时开展摇摆器和光腔的相关工作,为本项目下一步的出光实验做好准备。

表5 主加速器热测实验结果

Table5 Power test results of the main accelerator

energy/MeV	energy spread/(%)	normalized emittance/ π mm·mrad
6.7	0.95	13.5

4 摇摆器

采用混合型结构的摇摆器,具有峰值磁场强度高,加工和调试准确、方便等优点。混合型摇摆器设计的关键技术在于磁极与永磁体结构尺寸的设计,以获得足够强的峰值磁场和尽量小的磁场谐波分量。实验测量了现有摇摆器的性能参数(图9、图10),摇摆器磁场峰值强度达到0.5 T(间隙12 mm),峰峰值衰减小于1%,单电子轨迹偏移小于0.1 mm,表明该摇摆器满足总体实验要求。

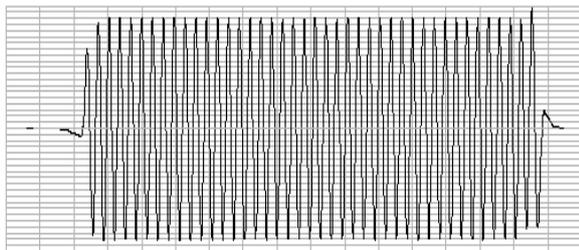


Fig.9 Magnetic field distribution of wiggler
图9 摇摆器磁场分布

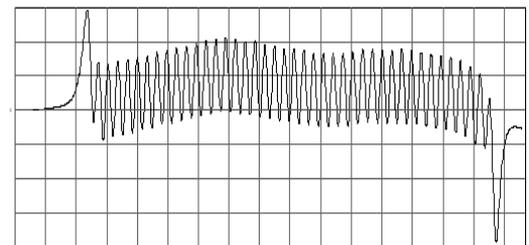


Fig.10 Trajectory deviation of single electron in wiggler
图10 摇摆器单电子轨迹偏移

5 结论

目前,已经完成了紧凑型自由电子激光太赫兹源装置各分系统的研制,测试结果达到总体设计要求。总体装置建立已在顺利进行,届时将深入开展太赫兹波测量和出光实验研究。

参考文献:

[1] 刘盛纲. 太赫兹科学技术的新发展[J]. 中国基础科学, 2006,8(1):7-12.
 [2] 姚建铨. 太赫兹技术及其发展前景[Z]. 2008.
 [3] Liu Shenggang. The possible contribution of vacuum electronics to THz radiation sources[C]// IEEE International Conference on Vacuum Electronics. Korea,[s.n.], 2003:357.
 [4] Neil G R,Bohn C L,Benson S V,et al. Sustained Kilowatt Lasing in a Free-Electron Laser with Same-Cell Energy Recovery[J]. Physical Review Letters, 2000,84(4):662-665.
 [5] 柏伟,黎明,杨兴繁,等. 低反轰多腔热阴极微波电子枪物理设计[J]. 强激光与粒子束, 2009,21(10):1589-1592.

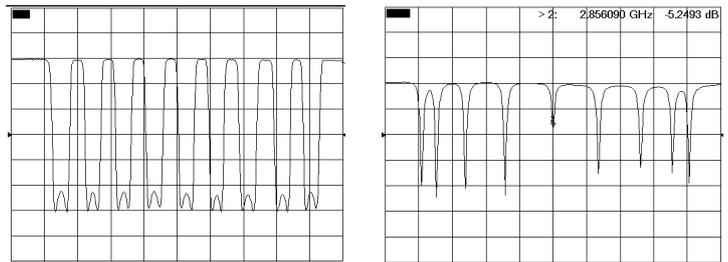


Fig.7 Cold test results of field distribution and frequency characteristics on the main accelerator
图7 主加速器腔链的场分布、频率特性冷测结果

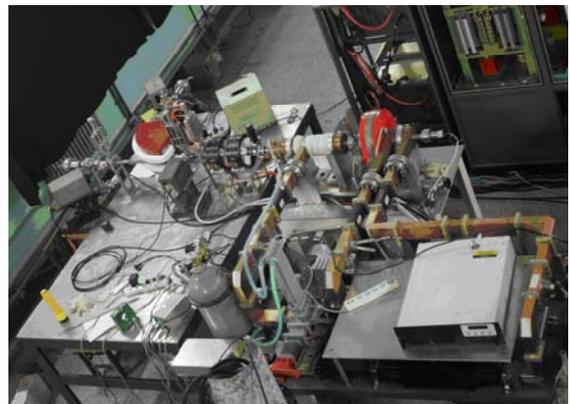


Fig.8 Power test platform of the main accelerator
图8 主加速器热测实验平台

作者简介:



黎明(1968-),男,湖北天门人,研究员,研究方向为核技术及研究.

沈旭明(1972-),男,重庆大足人,硕士,副研究员,主要研究方向为低温技术.

陈天才(1951-),男,云南永善人,高级技师,主要研究方向为自由电子激光运行维护.

刘婕(1974-),女,重庆潼南人,助理研究员,主要研究方向为微波测量技术.

柏伟(1974-),男,四川南部人,硕士,助理研究员,主要研究方向为加速器技术. email:bweimail@163.com.

杨兴繁(1969-),男,辽宁海城人,博士,研究员,主要研究方向为高平均功率自由电子激光技术.

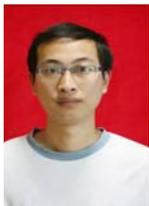
王汉斌(1976-),男,河南濮阳人,硕士,助理研究员,主要研究方向为高亮度电子源技术.

陈亚男(1978-),女,辽宁锦州人,学士,助理研究员,主要研究方向为光电子技术.

(上接第 335 页)

- [16] Tani M,Matsuura S,Sakai K,et al. Emission characteristics of photoconductive antennas based on low-temperature-grown GaAs and semi-insulating GaAs[J]. Appl. Opt., 1997,36(30):7853-7859.
- [17] Liu D,Qin J. Carrier dynamics of terahertz emission from low temperature-grown GaAs[J]. Appl. Opt., 2003,42(18): 3678-3683.
- [18] El-Ghazaly S,Joshi R,Grondin R. Electromagnetic and transport considerations in subpicosecond photoconductive switch modeling[J]. IEEE Trans. Microw. Theory Tech., 1990,38(5):629-637.
- [19] Yee K. Numerical solution of initial boundary value problems involving Maxwell's equations in isotropic media[J]. IEEE Trans. Antennas Propag., 1966,AP-14(3):302-307.
- [20] Taflove A,Hagness S C. Computational Electrodynamics:The Finite-Difference Time-Domain Method[M]. 3rd ed. Norwood, MA:Artech House, 2005.
- [21] Dreyhaupt A,Winnerl S,Dekorsy T, et al. High-intensity terahertz radiation from a microstructured large-area photoconductor[J]. Appl. Phys. Lett., 2005,86(12):114-121.
- [22] Caughey D M,Thomas R E. Carrier mobilities in silicon empirically related to doping and field[J]. Proc. IEEE, 1967,55(12):2192-2193.

作者简介:



陈琦(1981-),男,重庆永川人,助理研究员,硕士,主要研究方向为电磁场理论与仿真技术、太赫兹电子学、微波毫米波天线等. email:qchen1103@caep.ac.cn.

何晓阳(1983-),男,湖北咸宁人,在读博士研究生,主要研究方向为电磁场理论、人工电磁材料、太赫兹技术等.

赵永久(1964-),男,河北昌黎人,教授,博士生导师,主要研究方向为微波电路与子系统、现代微波测量技术、计算电磁学等.

杨阳(1973-),女,南京市人,副教授,硕士生导师,主要研究方向为计算电磁学、电磁场数值模拟等.