

欧洲自由电子激光研究进展

Research Development on Free Electron Laser in Europe

刘 静 舒 挺 张 军

(国防科技大学光电科学与工程学院, 长沙 410073)

LIU Jing SHU Ting ZHANG Jun

(College of Optoelectronic Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha 410073)

摘 要 介绍了欧洲从事自由电子激光研究的几个重要实验室的概况和研究进展。简要分析了近期欧洲在发展短波长、高输出功率、高效率自由电子激光方面的相关计划和发展情况。

关 键 词 自由电子激光; 同步辐射; X 射线; 能量回收

Abstract Several european key laboratories engaging in free electron laser and their developments are introduced generally. The latest advances in their research on the generation of free electron laser with short wavelength, high output power and high energy efficiency and relative schemes in the near future are presented.

Key words free electron lasers; synchrotron radiation; X-ray radiation; energy recovery

中图分类号 TN 248.6

1 引言

与传统激光器相比,自由电子激光(FEL)具有频谱范围广(厘米至软 X 射线波长范围)、频率可连续调谐、输出激光能量不受工作物质热破坏阈值的限制等优点。从 1971 年被 Madey^[1]正式命名后,自由电子激光的研究在世界范围内迅速发展。直到 20 世纪 90 年代,由于其能量转换效率低,输出功率远远达不到实际需求,自由电子激光的发展出现了瓶颈,很多实验室放弃了对它的研究。

但是,随着近年来超导加速器、新型光阴极注入器等相关技术的成功研制和能量回收装置与

自由电子激光器的有效结合,自由电子激光的研究突破了功率和效率低的限制,又进入了新一轮的高速发展,尤其体现在短波长(紫外、X 射线,已报道的最短波长为德国 DESY 实验室产生的 13 nm^[2])、高功率(最高平均功率是由美国 Jefferson 实验室产生的 10 kW^[3])、小型化、实用化等方面。美国、法国、日本、俄罗斯、德国、英国及意大利等 10 多个国家都开展了自由电子激光的理论和实验研究,已建成的装置有 40 多台,还有 40 多台正在建设中^[4]。

国内有关自由电子激光研究进展的文献都侧重于介绍美国和

日本的实验室^[5,6],对欧洲自由电子激光研究情况和进展报道很少。事实上,欧洲自由电子激光的相关工作在整个自由电子激光研究领域非常重要,如最著名的 X 射线自由电子激光计划(X-FEL)^[7]和能量回收自由电子激光计划(ERL-FEL)^[8],这两个计划将欧洲一些国家的著名实验室联系起来,他们的通力合作使得欧洲自由电子激光的研究处于世界领先水平^[9]。此外,他们将研发与应用紧密结合的发展模式也具有很好的借鉴意义。本文着重介绍在这两个计划下开展自由电子激光研究工作的几个重点实验室的研究进展。

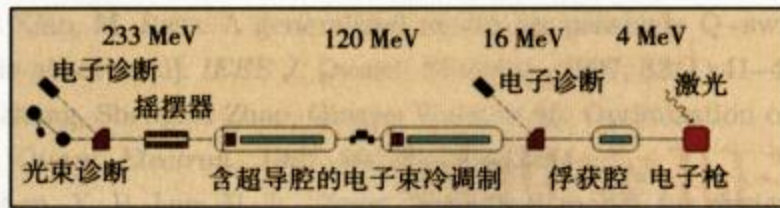


图1 TESLA-FEL 装置示意图

2 主要实验室研究现状

2.1 德国DESY 实验室

位于德国汉堡的电子同步辐射加速器中心^[10,11](DESY)是欧洲X-FEL计划的发起者,也是同步辐射和自由电子激光协会^[10]的成员之一,主要致力于短波长自由电子激光的研究。该实验室的自由电子激光器FLASH(前身即VUV-FEL)是世界上首台,也将是2009年以前世界上唯一一台紫外和软X射线波段的强激光器^[2]。表1给出了该实验室自2000年2月以来世界自由电子激光的发展情况。

该实验室研制的电子束源装置TESLA(Tev Energy Superconducting Linear Acceleration)能够

产生纳米波段自由电子激光所要求的高质量电子束。它全长33 m,由两个长15 m的直线加速器对接而成,横截面直径约为5 m,加速梯度大于25 MV/m,共有近20000个超导加速腔,工作温度在2 K左右,电子束能量为20 GeV。装置结构如图1所示。

用TESLA产生的强流束作为入射电子束源的自由电子激光装置要求电子的运动轨迹精度在10 μm 范围内,以便能在空间上与光束重叠。为此,DESY还研制出新型的电子束位置监控器,它能实现在精细的摇摆器间歇内对电子束在10 μm 精度的位置监控。

自2005年得到30 nm 激光输出后,DESY基于TTF(Tesla Test

Facility)的波长为6 nm 的真空紫外(VUV)和软X射线SASE-FEL装置就一直处于建设之中。而且经过实验努力,其30~45 nm 的自由电子激光单脉冲能量从几微焦提高到了100 μJ 。研究将继续朝着短波长、超短波长方向发展。

由于DESY实验室在短波长方面取得了巨大成功孕育了欧洲的X-FEL计划^[12]。该计划于2003年由德国政府正式提出:在汉堡市北部建立一个欧洲X射线自由电子激光器和一个新的国际科学组织。目标是利用该装置产生极高峰值亮度 $[10^{33} \text{ photons}/(\text{s} \cdot \text{mm}^2 \cdot \text{mrad}^2 \cdot 0.1\% \text{bw})]$,超短脉冲(100 fs 左右),波长小于0.1 nm 的空间干涉X射线,并将其发展成能为材料、等离子体、天文、化学生物结构学和生物化学等领域的实验研究提供光源的用户型装置。该装置主要是利用自放大自发辐射机制,超导直线加速器将高亮度电子枪产生的电子束加速到20 GeV,然后在长达200 m 的摇摆器中产生X射线。该计划预计投入10亿多欧元,于2007年1月正式启动,装置在2014年可望实现运转。

2.2 荷兰FOM 实验室

位于荷兰乌得勒支的FOM实验室^[13]是欧洲核物理和自由电子激光研究的重要成员之一。该实验室建于1959年,是一个政府机构,每年6500万美元的经费中大部分来自于荷兰国家基础性和战略性科学研究中心(NOW)。从1987年开始该实验室的工作具体分为等离子体物理、辐射源应用与发展、分子物理三个方面,并广泛地和Utrecht、Twente等大学合作。其研制的红外自由电子激光振荡器(IR-FEL)^[14]是欧洲另一

表1 DESY 实验室自由电子激光研究近况

时间	研究概况
2000.02	激光增益3000,波长109 nm 的远紫外振荡辐射首次出光
2000.04	SASE-FEL 成功辐射波长80~180 nm 强激光
2001.07	激光增益 10^6 ,波长100 nm,单脉冲能量10~15 μJ /pulse
2001.09	波长100 nm 激光达到饱和输出,单脉冲能量100 μJ /pulse
2002.12	建成TESLA-FEL,是X射线自由电子激光研究的基础
2003.02	欧洲X-FEL计划在DESY实验室的发展正式获得德国政府批准
2004.02	欧洲X-FEL计划正式开始
2004.12	TTF1 FEL的电子束在长30 m 的摇摆器上首次运行
2005.01	TTF2 VUV-FEL 首次出光,波长30 nm,峰值能量20 μJ
2005.06	首次实现饱和,并观察到产生高阶谐波,基波波长31.8 nm、二次谐波波长15.9 nm,三次谐波波长10.6 nm
2005.08	VUV-FEL 为用户提供同步辐射源
2005.11	VUV-FEL 产生波长25.5 nm 强激光
2006.04	VUV-FEL 产生波长13 nm 强激光,这也是自由电子激光获得的最短波长

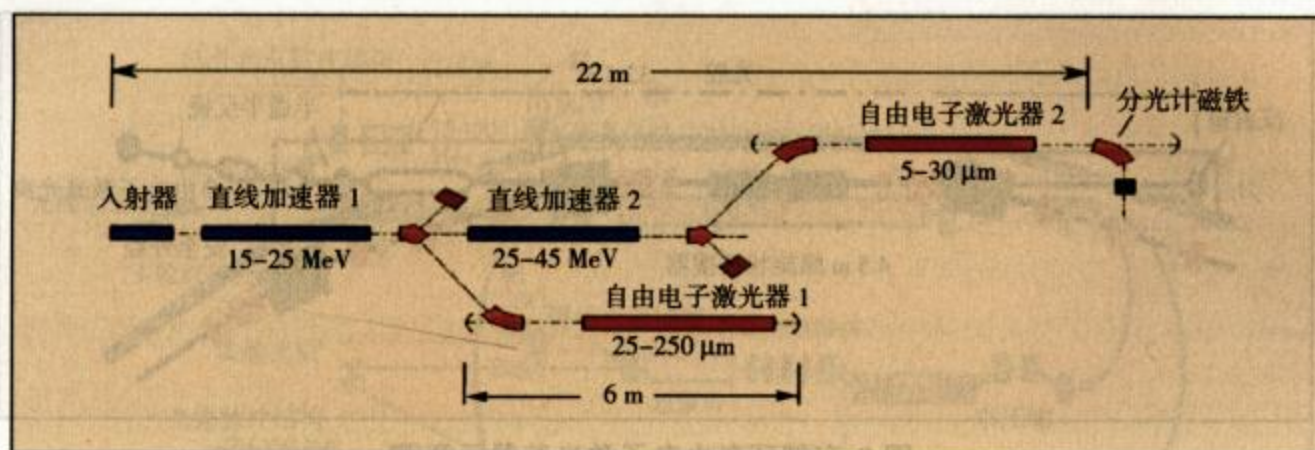


图2 红外自由电子激光振荡器装置示意图

个有名的自由电子激光装置,该装置的结构如图2所示。

从图2可以发现,电子加速部分由一个电子腔和两个直线加速器组成。其中,从第一个加速器出来的电子能量在25 MeV左右,而第二个加速器出来的电子能量可达50 MeV。再分别经两个摇摆器,形成两个自由电子激光通道:FEL-1、FEL-2,从而得到不同波长范围的激光输出。表2中列出了实验室最新的红外自由电子激光装置FELIX的主要参数。更高功率的新装置FELICE^[13]的建设也已列入FOM实验室的计划中。

在红外、远红外自由电子激光方面做得比较出色的还有法国奥赛LURE实验室,他们研制的CLIO也是很著名的自由电子激光装置之一^[14]。

2.3 意大利ELETTRA实验室

ELETTRA实验室^[16]主要致力于同步辐射与自由电子激光的研究,其研制的存储环紫外和深紫外(XUV)自由电子激光装置^[7]。结构如图3所示。该装置产生的

激光频谱能覆盖从紫外到X射线范围,目前由三个存储环提供电子能量达2.4 GeV的电子束,可供20个光源(能量从几个电子伏到几十电子伏)使用,其基本参数如表3所示。基于自由电子激光的第四代光源正在研究之中。

自由电子激光的峰值亮度大于 10^{30} photons/(s·mm²·mrad²·0.1%bw),每年装置运行的时间可达5000 h,为生物、物理、材料、环境和医药等专业的各国学者提供实验研究。它是欧洲首台第三代光源,并联合法国的LURE实验室、英国的Daresbury实验室、德国的Dortmund大学、意大利的ENEA实验室和瑞典的Max于1998年5月开始了欧洲真空紫外和X射线自由电子激光的研究计划。当时计划花三年时间实现波长小于200 nm的自由电子激光输出。但是,随着德国汉堡实验室的快速发展,新的欧洲X-FEL计划在该计划的基础上联合了更多实验室,短波长自由电子激光的研究得到进一步深入。

表2 FELIX装置的基本参数

总的波长范围	频谱宽度	微脉冲能量	微脉冲 ^[15] 功率	微脉冲重复频率	宏脉冲 ^[15] 宽度
4.5~250 μm	0.4%~7%	1~50 μJ	0.5~100 MW	25或1000 MHz	<10 μs

这些20世纪90年代的装置为了满足实际应用的需要都必须进一步提高输出功率和转换效率,因此ERL-自由电子激光计划在欧洲也迅速地开展起来,如英国Daresbury实验室的4-GLS和德国Erlangen实验室的ERLSYN,都是2000年以后将能量回收与自由电子激光成功结合的装置^[17]。

2.4 英国Daresbury实验室

Daresbury实验室^[18]是欧洲ERL-FEL计划的主要倡导者,在美国Jefferson实验室的协助下,他们建成的4-GLS是目前世界领先的自由电子激光装置,它将能量回收直线加速器和自由电子激光有效结合,能产生覆盖太赫兹到软X射线的强激光输出。标志着欧洲开始研究能量回收型自由电子激光。如图4所示为2001年4-GLS的装置示意图。

4-GLS装置是第一台融合了超导能量回收直线加速器、同步辐射、激光和自由电子激光技术的装置。2003年4月,该计划通过英国政府商务办公室(OGC)的审查,得到英国贸易工业部(DTI)的批准,随后用两年左右的时间建造了能量回收直线加速器样机、进行相对论性电子束运动的模拟实验、结构设计和装置选址,直到

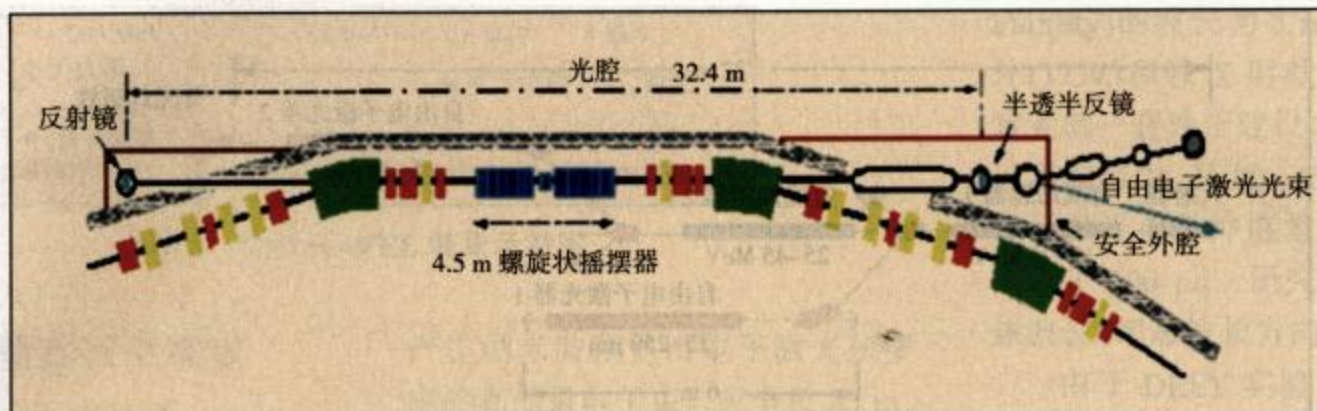


图3 存储环自由电子激光装置示意图

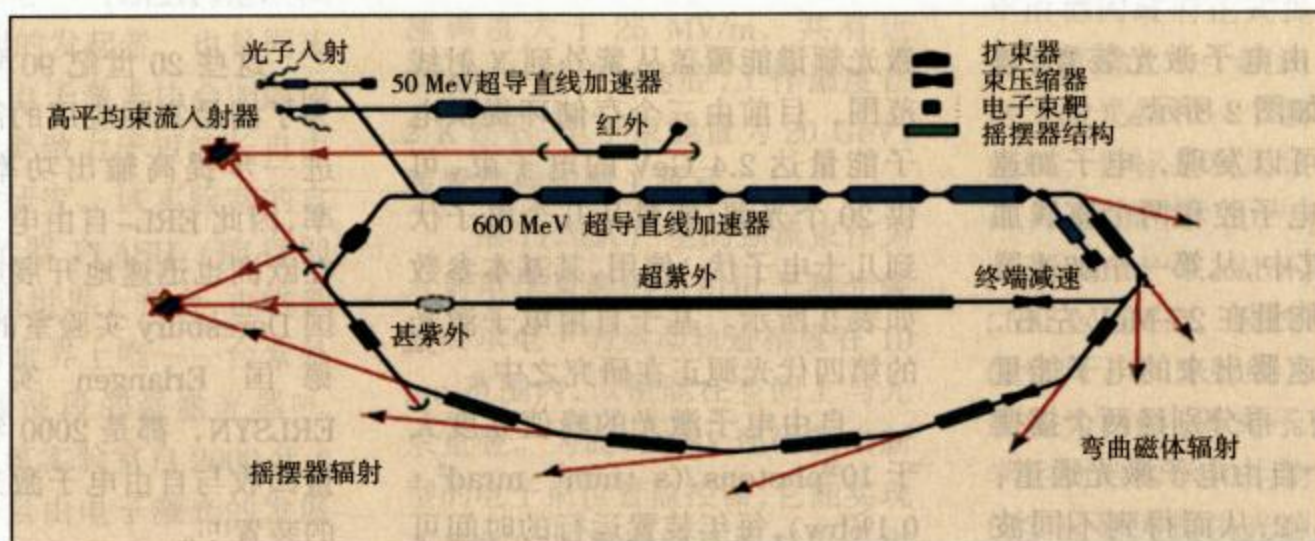


图4 4-GLS 装置设计简图

2005年初投入经费160万英镑，计划才有大规模的进展。4-GLS自由电子激光器的突出特点有：输出激光功率高（峰值功率密度达 $10^{16} \sim 10^{17} \text{ W/cm}^2$ ，紫外波段单脉冲能量在0.4 mJ/pulse左右）；是短脉冲同步辐射和自由电子激光的组合光源；极化方向可变化、频率可调谐；脉冲短（飞秒量级）、重复频率高、脉冲波形可控制、寿命长；还是目前欧洲亮度最高的宽带太赫兹辐射源，仪器的详细参数可参见文献[19]。

4-GLS也是目前欧洲应用最广泛的光源，不仅是TESLA XFEL的重要补充，也可以作为第三代光源使用。对理解生物分子函数，研究原子、分子运动，发展纳米材料，提高用于早期癌症诊断的动力学成像技术等发面都将

具有重大意义。

Daresbury实验室组织的“4-GLS工业会议”^[20]每年都会邀请大量的来自商业界的公司代表共同讨论4-GLS装置的技术发展和应用开发，会议所作的技术报告将直接指导第二年装置的改进和研究方向。

图5是2005年4-GLS为法国用户提供10 fs短脉冲光源的装置示意图^[21]。4-GLS装置还在发展之中，2006年7月正式完成了从能量回收激光样机到实际装置的建设。但是高平均功率输出的数据一直未见报道。

除了上面详细介绍的四个实

验室和文中曾提到的其它实验室外，德国的Bessy实验室、瑞士的Paul Scherrer研究所、德国的Erlangen大学等也都是研究自由电子激光的重要实验室^[22]。欧洲通过开展各种研究计划和成立研究机构将各国致力于自由电子激光研究的实验室紧密联系起来，相互合作，还充分利用已有装置广泛开发应用平台，为其它领域的实验研究和工业发展创造很好的条件。

3 结束语

X射线波段自由电子激光可望成为第四代光源，以及加速器-

表3 ELETTRA装置的基本参数

加速器类型	电子束能量	总的波长范围	脉宽	平均功率
储存环	1 GeV	189.7~350 nm	8 ps	10~200 W

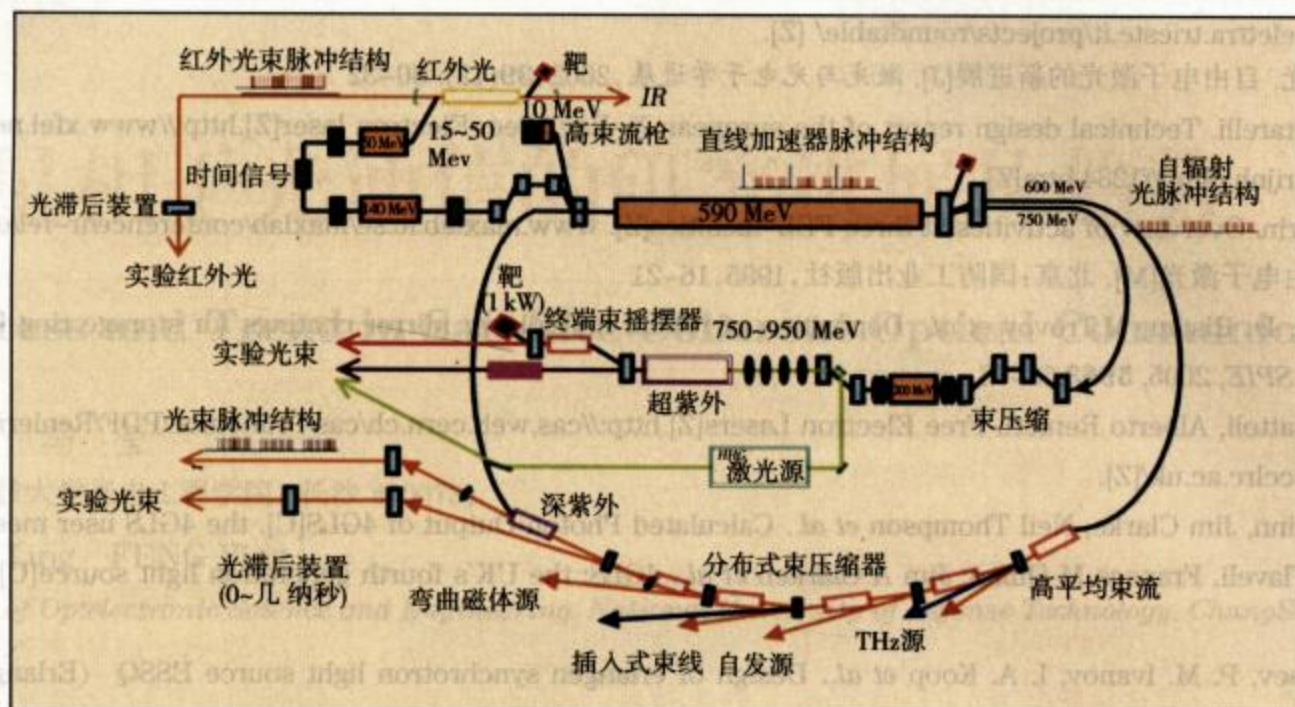


图5 巴黎 10 fs 4-GLS 装置示意图

能量回收多程循环自由电子激光,在军用、民用的很多领域有着广泛的用途^[22,23]。如:高平均功率红外(10 kW 量级)到紫外(千瓦量级)的自由电子激光,可以广泛用于聚合物生产,薄膜处理生产或者微细加工等方面;波长更短甚至短到 X 射线的自由电子激光,对于研究非常小的纳米或者亚纳米的活体运动过程有非常重要的应用价值。各实验室在发展自由电子激光装置的同时也很注重装置实用性的开发。欧洲在前三代

光源的研究中取得了令人瞩目的成绩,如第二代光源代表有德国柏林的 BESSY-I、法国奥赛的 SuperACO 等,而第三代光源代表有法国格勒诺布尔的 ESRF、意大利的里雅斯特的 Elettra、德国柏林的 BESSY-II、瑞典 Lund 大学的 Max-II、瑞士 Villigen 的 Swiss Light Source 等。这些成果和现有的在短波长及能量回收技术方面的优势技术,以及各国实验室之间有效的合作机制,必将为欧洲自由电子激光的研究带来更加快

速的发展,并继续保持其在全球范围的领先地位。

收稿日期:2006-08-09

作者简介:刘静(1984-),女,重庆人,博士研究生,主要从事高功率微波与自由电子激光器件研究。

Email:ljofyours@yahoo.com.cn

导师简介:舒挺(1965-),男,江西人,教授,博导,目前主要从事高功率微波与自由电子激光研究。

Email:mrtingshu@yahoo.com.cn

参考文献

- 1 Madey J.M. Stimulated emission of bremsstrahlung in a periodic magnetic field[J]. J. Appl. Phys, 1971,42(5): 1906~1909
- 2 S. Simrock. The RF control system for the DESY X-FEL[C]. SPIE, 2005, 5484, 55~68
- 3 B.W.Williams. Jefferson lab free electron laser 10 kW upgrade-lessons learned[D]. 2005
- 4 郑好望,任文辉,肖胜利. 谈谈自由电子激光[J]. 现代物理知识,2002,14(6):29~30
- 5 朱耗. 美国海军演示高能自由电子激光[J]. 舰船知识,2005,41(1): 48
- 6 傅恩生. 日本建造新的 X 射线自由电子激光器[J]. 激光与光电子学进展,2006,43(3): 75~76
- 7 [http://xfel.desy.de\[Z\]](http://xfel.desy.de[Z]).
- 8 Sverker Werin. Energy recovery linacs[Z]. <http://schools.web.cern.ch/schools/CAS>
- 9 王路威. 自由电子激光器的发展及其应用[J]. 成都大学学报(自然科学版),2005,24(3): 174~178

- 10 <http://www.elettra.trieste.it/projects/roundtable/> [Z].
- 11 郑翠微, 白光. 自由电子激光的新进展[J]. 激光与光电子学进展, 2002, 39(12): 30~32
- 12 Massimo Altarelli. Technical design report of the european X-Ray Free-Electron laser[Z]. <http://www.xfel.net>
- 13 <http://www.rijnh.nl/n0/f1234.htm> [Z].
- 14 Sverker Werin. Overview of activities at three FEL-facilities[Z]. www.maxlab.lu.se/maxlab/conference/ir-fel/overview.htm
- 15 惠钟锡, 自由电子激光[M]. 北京: 国防工业出版社, 1995, 16~21
- 16 St. Gunster, D. Ristau, M. Trovov *et al.*. Deposition of robust multiplayer mirror coatings for storage ring FEL lasing at 176 nm[C]. *SPIE*, 2005, 5963: 63~78
- 17 Giuseppe Dattoli, Alberto Renieri. Free Electron Lasers[Z]. <http://cas.web.cern.ch/cas/Pruhonice/PDF/Renieri.pdf>
- 18 <http://www.cclrc.ac.uk/> [Z].
- 19 Frances Quinn, Jim Clarke, Neil Thompson *et al.*. Calculated Photon Output of 4GLS[C]. the 4GLS user meeting, 2005
- 20 Wendy R. Flavell, Frances M Quinn, Jim A Clarke *et al.*. 4GLS: the UK's fourth generation light source[C]. *SPIE*, 5917, 31~45
- 21 D. E. Berkaev, P. M. Ivanov, I. A. Koop *et al.*. Design of erlangen synchrotron light source ESSQ (Erlangen Synchrotron Strahlung Quelle)[R]. www.erlsyn.uni-erlangen.de/publications/Report.pdf
- 22 傅恩生. 第四代衍射极限 X 射线光源计划-MARS[J]. 激光与光电子学进展, 2003, 40(2): 20~23
- 23 任国光. 自由电子激光为广泛应用开启大门[J]. 激光与光电子学进展, 2005, 42(1): 3~6

新书推荐

《科学研究的途径》——一个指导老师的札记

本书是作者作为一个指导教师在近 30 年的研究生指导实践中写下的有关研究生学习和科学方法的札记。诸凡青年学人,特别是研究生在学习与科学研究过程中的科学探索,为人与治学,以及论文写作方法等,著者都以亲身的经历阐述自己的认识和体会。其中很多内容都是应青年研究生的要求撰写的,非常符合青年学人的实际需要,能帮助初涉科研的青年学人较快地熟悉科研过程及方法,及早多出成果,出好成果。本书作为有志于从事科学研究的理工科大学生、研究生、青年教师和青年科技人员的一本参考书,将对青年学人成长为学者起到辅助作用,使他们在从事科学研究时少走些弯路。同时,它也是研究生指导教师交流指导心得的一个平台。另外,本书实际上也是一本论述科学方法的科普读物。

作者简介 周立伟,电子光学和光电子成像专家。北京理工大学首席专家、教授、博士生导师;中国工程院院士,俄罗斯联邦工程科学院外籍院士。长期在宽束电子光学、光电子成像领域从事教学与科研工作,研究成果曾多次获部和国家科技进步奖励。

本书由北京理工大学出版社出版,16 开,定价:25 元。联系人:郑京华,地址:100081 北京理工大学出版社人文社科事业部
电话:010-68945381 电子邮件:caizhengjinghua@126.com

