

# 北京自由电子激光装置 发展回顾

戴建枰

(中国科学院高能物理研究所 100049)

## 一、前言

1993年12月28日,北京自由电子激光装置(BFEL)在亚洲率先获得饱和出光的红外自由电子激光,使我国的自由电子激光研究成果在国际上终于占有了一席之地。2002年7月,我回到高能所工作,有幸主持了BFEL的应用研究及搬迁改造项目,为BFEL的发展尽了一点微薄之力。值此高能所建所50周年之际,我应邀撰写此文,回顾BFEL的研制、应用及改进历程,以缅怀谢家麟先生等老一辈科学家爱国、奋斗、“不辍行”的精神风貌,并与高能所的同仁们共勉。

## 二、历史背景

在光源科学的发展史中,1947年出现的同步辐射和1960年出现的常规激光无疑具有里程碑的意义,但同步辐射不是相干光,常规激光的波长不易调节,因此,寻找波段覆盖范围广、波长易调节的相干光源成为上世纪数十年间科技工作者的一个重要努力方向,直至1977年出现了新的光源——自由电子激光(FEL)。

自由电子激光因其工作媒质是加速器产生的“自由电子”而得名。与常规激光的波长决定于原子、分子能级跃迁的原理不同,FEL的波长可方便地通过调节加速器产生的电子束能量、扭摆器(或波荡器)的工作磁间隙等参数加以调节,并产生从太赫兹到硬X射线的广谱激光。同时,FEL与同步

辐射光的不同之处在于,FEL是相干光源。另外,由于FEL的工作媒质是电子束,具有产生极高功率的潜力。

FEL的上述特性,使其在科技、国防、能源、医学等领域具有十分重要的应用前景,因此,FEL发明之后,国际上对FEL的研究风起云涌,长盛不衰。不过,在早期的众多研究者中,约有半数的装置未能成功。这也从侧面反映了FEL研制工作的难度。

受我国国情的影响,相较于世界科技先进国家,我国在FEL早期的研究中投入极少,直至1986年,在王大珩、王淦昌等前辈科学家的提议下,国务院启动“高技术研究发展计划”(“863计划”)后,这一情况才有所改观。1987年,高能所组织申请的“北京自由电子激光装置”因配备有谢家麟先生领衔的人才队伍以及谢先生1955年回国后研制成功的30MeV直线加速器等硬件条件,顺利通过了“863计划”的立项批准,BFEL研制正式启动。

## 三、研制历程

BFEL是一台综合性很强的科研实验装置,它对加速器技术和红外光学技术提出了严峻挑战。研究工作开展之后,几乎每前进一步都会遇到各种困难。

首先遇到的困难是研究经费短缺。当时我们国家百废待兴,科研经费极为紧张,BFEL也不例

外。对此,课题组采取了“因陋就简”,“好钢用在刀刃上”,把人力、物力、财力集中在与最终性能有直接关系环节的策略。

随后遇到的困难是机械加工进度缓慢。由于许多零部件的设计都是非标的,而且在工艺上还有许多特殊要求,这给加工方按时交件带来难度,通常一套零件在安装前后要几经反复才能通过验收。这一困难给装置的整体组装带来的影响是全方位的,它使得计划中要达到的目标一再被延迟。

真正的“拦路虎”还是出现在技术攻关的道路上。

BFEL有四大关键技术:高功率宽脉冲速调管调制器、以微波电子枪为核心的电子束注入器、钕铁硼永磁扭摆器和五维精密调节光学腔。

BFEL虽是一项“跟踪”研究,但当时国际上成功的例子较少,缺少可借鉴的经验。

以微波电子枪为例,这种新型电子枪的实验应用只有一个成功的先例。为了攻克难题,谢家麟先生将三位博士生的研究课题集中在了与此相关的方向上。由于三维微波计算技术在当时尚未发展成熟,在制作一个实用腔体之前,必须制作出模型腔体,并且在模型腔体上获取全部的测试数据,然后再根据这些数据对实用腔体的设计加以修改。这项工作不但需要细心和恒心的投入,还要求设计者能够随时积累经验,将理论运用到实践当中。除

此以外,阴极发射体的制备也给微波电子枪的研制设置了障碍,它使得微波电子枪无法正常出束。研究小组历经两年的探索终于找到一种成熟的方法,根除了热子短路、阴极脱落、发射不足、电流不稳等不利现象。国内第一台微波电子枪研制的成功,为BFEL出光提供了种子。

另外,BFEL在当时国际上普遍采用钕钴作为扭摆器材料的情况下,研究了具有剩余磁感应强度高、价格便宜、易加工等优点的钕铁硼材料,解决了在磁场巨大作用力下的精密安装和计算机模拟指导下的磁块渗合与微调等技术难题,在国内率先成功研制了达到国际先进水平的钕铁硼扭摆器。

1991年,课题组完成BFEL的整体装配,开始联机调试时,在实验中却发现了束流不稳定、时有时无等问题。经过几个月的努力,情况有所好转,但是依然无法捕捉到自发辐射信号。这个时候,南方某研究所的所长向“863”专题负责人投诉,认为BFEL课题选择了错误的技术路线,应该中断对它的支持。在课题组进退维谷之际,郑志鹏所长来实验室调研了BFEL的工作进展以及存在的问题。“自由电子激光,困难有希望”,郑所长的赠语给全体成员留下深刻印象。

1992年1月,从事BFEL研究的两个研究室(加速器和光学)合并为一体,庄杰佳研究员被任命为新研究室的主任。其后,全室范围内选拔出一批青

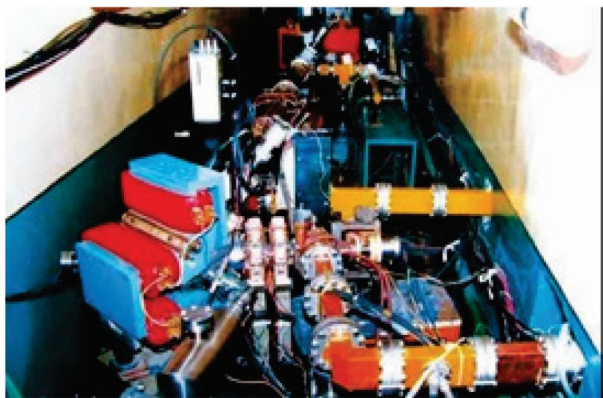


图1 BFEL加速器(左)及激光测试台(右)照片

年技术骨干组成了运行值班组,其他人员负责为机器正常运行提供保障。

运行值班的工作是枯燥的,它要求值班人员反复调节各种参数,通过仔细观察、鉴别、分析各种来源的信号做出准确的判断,一步一步地找到机器的最佳工作状态。在电子束首次抵达装置终端的时刻,第一个自发辐射信号终于被发现了,但这只是实现出光的第一步。

实现受激辐射振荡需要最大限度地满足同步辐射光与电子束在多次循环中保持时空交叠这一必要条件,为做到这一点,必须从驱动电子束的微波功率入手,尽可能地提高微波相位的均匀性。然而,要改善微波功率源的工作状态,就需要有人在电磁辐射的环境下,以微波相位的波形为判据,动态调节高压调制器的分布电感,而调节结果有可能不可逆地变差。

这是一项有风险的工作,它不但要求操作者克服心理障碍控制好手感,还需要有足够的经验以做出准确的预判。老职工林绍波挺身承担起这一任务,他穿上胶鞋,戴上胶皮手套站立在高台上,在隆隆机声中,小心翼翼地将绝缘调节杆插入在强电中工作的电感线圈……经过一周的实验,微波功率源被驯服了,满足出光条件的工作状态被找到了。

新一轮实验显然更加艰难,它需要交替调节加速器和光学器件,以获得幅度最高并且脉冲最宽的光信号,而一些微小的不稳定现象足以使已达到的状态无法恢复,许多操作不得不从头起步。在失败面前,值班组从未产生放弃的念头,他们相信那只是黎明前的黑暗。

1993年5月26日在看似徒劳的重复的调节过程中,值班人员下意识地转动某个旋钮,随后发现原本稳定的信号突然发生剧烈的抖动,抖动幅度从几倍迅速攀升到几千倍,然后稍微改变调谐即可恢复常态,这正是受激辐射的特征。

受激辐射信号是FEL实验的路标,沿着这个路标可以实现参数的优化,同时可以改进装置工作的



图2 1994年,BFEL出光后,王淦昌院士来访BFEL实验室,与部分工作人员合影(第一排左起第二位是庄杰佳研究员,第四位谢家麟院士,第五位王淦昌院士)

稳定性。在实验结果的引导下,课题组全面展开改进提高机器性能的工作,于1993年12月28日获得了饱和的FEL信号。实现饱和和受激辐射振荡是FEL研究的最终目标,达到这个目标意味着课题组圆满完成了任务。

1993年,BFEL被评为我国科技界十大新闻之一和电子工业部十大科技成果。1994年,BFEL通过了“863计划”的高技术的鉴定,同年被中国科学院授予科学技术进步奖特等奖。1995年,获得国家科学技术进步奖二等奖。

## 四、应用研究

BFEL是一台科研实验装置,但因BFEL具有脉冲功率较高、波长较大范围连续可调等特点,在红外光学的应用研究中,仍可用作不可替代的光源。1997年后,在来自多方面的支持和鼓励下,BFEL开始向用户装置的方向迈进。经过几年的努力,机器稳定性获得进一步提高,用户界面得到改善。2000—2004年,BFEL为上海技术物理研究所、四川大学等国内十多家单位的用户提供了约2000小时的实验用光。

BFEL主要应用领域选定在材料科学和生命科学方面。中红外光电功能材料研究,是最能发挥BFEL优势的领域之一。在这方面,利用BFEL分别

对高温超导 YBCO 薄膜材料、MCT 材料、InSe 和 InAs 材料、半导体量子阱材料、PZT 材料、硅桥等材料的线性与非线性光电转换性能、光谱响应、时间响应进行了测定。

自由电子激光诱导的化学分子结构变化也是极具挑战性和新意的研究领域之一。由于生物大分子、生化样品、有机物、聚合物的振动能级大都位于中红外谱区, BFEL 利用其特定的共振峰和波长选择吸收效应, 对大量的无机物、有机物、聚合物和生物样品, 用不同的波长、不同的能量进行了 FEL 辐照, 研究了 FEL 诱导的化学分子结构变化、结晶变化、构象变化、氢键破坏以及物性改变的机制。

## 五、搬迁改造

2002 年初, 根据我院“一所一址”的方针, BFEL 决定由高能所的中关村园区搬迁至玉泉路园区。在完成对高能所 1 号厅原 35MeV 质子直线加速器的腾退和基建改造后, BFEL 搬迁改造工程于 2005 年 4 月全面启动。

这次搬迁的目的是将 BFEL 机器拆散重新组装, 恢复出光并改进性能, 需在人员短缺、设备老化、经费不足的情况下克服诸多技术困难, 无疑具有较高的难度, 它在国内尚属首例。

2006 年 9 月, BFEL 所有主体设备安装完毕, 并首次观测到自发辐射信号。12 月 29 日首次观测到光存储信号。2007 年 8 月 21 日观测到受激辐射信号, 30 日成功获得最大 0.5mJ 的激光输出。10 月 16 日 BFEL 受激振荡实验取得重大进展, 成功获得最大 3mJ 的激光输出, 17 日观测到最大近 6mJ 的激光输出, 能量 3 小时稳定性优于 30%。10 月 18~22 日对 BFEL 激光进行了较全面的参数测量, BFEL 激光输出波长范围 9.5~15 $\mu\text{m}$ , 最大输出能量超过 8mJ, 比搬迁前相同条件下最大能量 5mJ 有较大提高。

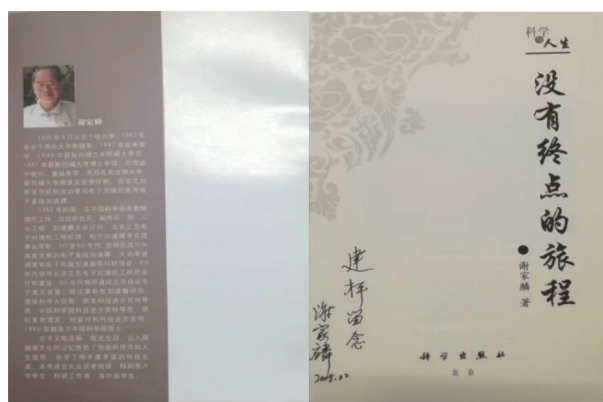


图3 2008年, BFEL 恢复出光后, 获谢家麟先生勉励及其签名的自传

至此, BFEL 搬迁改造任务顺利完成。

2008 年 8 月, BFEL 搬迁改造项目通过了工程验收。

## 六、结语

BFEL 是上世纪 90 年代亚洲地区研制的近十台红外谱区的 FEL 装置中, 第一个产生激光并实现饱和振荡的装置。该装置及其关键设备的性能均达到当时国际先进水平, 使我国在这一高技术领域占有了一席之地。1994—2009 年的 15 年间, BFEL 也一直是国内唯一能够稳定地实现饱和受激辐射振荡的自由电子激光装置。

BFEL 装置是多种尖端科技的综合, 需要将加速器物理、微波、磁学、激光、真空、计算机等学科和技术联系起来进行思考, 这对培养新一代从事大科学工程研究的队伍是十分必要和难得的。BFEL 以其艰难的攻关历程培养出许多专业人才, 近二十年来共有 20 多位青年人从这里起步, 走向了国内外多个科研单位。

此外, 受 BFEL 影响和推动, 高能所近年来在光阴极微波电子枪、高性能超长波荡器、光阴极直流高压电子枪等短波长自由激光关键技术和设备的研发方面以及 X 射线自由电子激光总体方案研究方面做了大量工作, 为我国自由电子激光的发展做出了重要贡献。