

自由电子激光的发展和未来

Development and Future of Free Electronic Laser

谢家麟

(中国科学院学部委员, 高能物理研究所研究员 北京 100039)

自由电子激光(以下简称 FEL)是基于使用高能电子直接产生相干辐射的新概念,不同于一般激光之基于能级跃迁的原理。它是加速器技术、激光技术、微波技术和一些其他高技术交融、交汇的综合体。它有优于其他光源的许多特点,如波长在一个波段内连续可调,功率潜力巨大,光束质量可达衍射极限,可产生超短脉冲等。它与一般激光相比,两者都是相干光,但它却有波长容易连续调变的优点;与同步辐射相比,两者都可覆盖宽广的波带,但它却是相干辐射,而相干电磁辐射对人类生活和科技进步已作出的贡献,如无线电、电视、雷达、激光等则是人所共知的。因此,自 1977 年红外 FEL 振荡器出现之后,引起科技界很大的重视,各科技先进国家纷纷投入研制,都首先在各已有的能提供电子束流的加速器上开展研究,使用的加速器计有脉冲产生器、静电加速器、感应直线加速器、射频直线加速器(包括超导直线加速器)、电子回旋加速器和储存环等。据统计,迄今各国共建成 FEL 40 台以上,其中射频直线加速器 19 台,感应直线加速器 11 台,储存环 7 台,静电加速器 2 台,电子回旋加速器 2 台。美国、欧洲各约有 14 台。正在建造 FEL 约为 40 台,拟建的约为 10 台。

通过 15 年来的实践,人们发现并不是所有建成的 FEL 都能产生激光,约有一半光波波段的装置未获成功,主要原因是 FEL 对电子束流的品质有十分苛刻的要求,已达当前加速器性能的极限。如果使用的加速器产生的束流品质不够好,则根本无法满足出光要求。现在已经明确,射频直线加速器是产生光波波段 FEL 的最佳选择。世界上目前有 5 台 FEL 用户装置,其中 4 台是使用射频直线加速器提供电子束流的。因此,下面的讨论以使用射频直线加速器产生激光为主,对于使用低能加速器产生毫米波的 FEL,为篇幅所限,这里就不拟涉及了。

由上可见,FEL 这个新兴的高技术领域,一方面技术难度很大,对研究者是一个严重的挑战;另一方面,它的特点表明它有广泛的诱人的应用前

景,是一块未开垦的处女地。下面将首先简单地阐述它的工作原理,讨论它的发展背景和前景;然后对我国最近在红外谱区出光的北京自由电子激光装置略加介绍;最后,试图在结论中谈谈从本文可以看到的一些带有普遍性的科研规律。

FEL 工作原理及发展历史

FEL 的工作原理有如图 1 所示。由加速器产生的高能电子经偏转磁铁注入到极性交替变换的扭摆磁铁中。电子因做扭摆运动而产生电磁辐射(光波),光经下游及上游两反射镜反射而与下一团电子发生作用。由于电子自身的横向速度,加上光波的磁场对电子的纵向作用力,而使电子与光波发生相对位移,群聚成尺寸远小于光波波长的微小的电子束团。这些微束团将它们的动能转换为光场的能量,使光场振幅增大。这个过程重复多次,直到光强达到饱和。作用后的电子则经下游的偏转磁铁偏到系统之外。这里一个最为关键的环节是电子要聚集成许多短于光波波长的小团,因为只有这样它的辐射才是相干的,才可称为激光。而 FEL 的技术难度恰恰也正在于此。为此,电子束性能必须十分优越

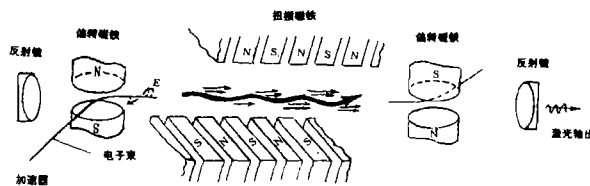


图 1 FEL 工作原理示意图

(能量分散小,方向分散小,时间稳定度高,流强尽可能大……),才能达到这个要求。很显然,FEL 工作波长愈短,技术难度也就愈大。以上对 FEL 工作原理的描述是一种形象化的描述,实际上的物理过程,若用电子束团对光波的受激康普顿散射来解释,则更为简明。

FEL 是在近 70 年来相关的研究工作的基础上

发展出来的。首先,1927年 Schrodinger 就提出了利用受激康普顿散射产生相干电磁辐射的概念。1933年 Kapitza 和迪拉克(Dirac)提出了使用低能电子观测受激康普顿散射的实验。1968年潘特(Pantell)等人建议使用电子散射微波以产生相干辐射并在作用区两端使用反射镜组成光腔。但理论计算表明,在当时微波能得到的功率密度下增益过低,不可能产生受激辐射。另一方面,1951年,莫茨(Motz)等人在斯坦福大学发明了扭摆磁铁,并让高能电子通过,产生了非相干的电磁辐射。1960年,菲利普斯(Phillips)把扭摆磁铁使用在一种叫做UBITRON的微波管上,其工作原理与FEL基本相仿。但他使用的是低能电子,由相对论效应导致的波长缩短很少,最短波长只做到6毫米。加之激光也是在当年才发明的,故他当时的研究成果并未引起应有的重视。

此后,人们进行了大量理论研究,1971年马迪(Madey)首先认识到如果使用扭摆磁铁代替潘特方案中的微波,就可以产生每平方厘米高达京瓦的功率密度,并获得足够的增益。在这个新认识的基础上,马迪和他的同事们开展了实验研究,利用斯坦福大学的超导直线加速器产生的束流与CO₂激光同时通过扭摆磁铁,观测到了激光信号的放大。此后,又经过一年的努力,他们终于在1977年研制成功了世界上第一台红外谱区的FEL振荡器。

FEL的出现当时在科技界引起了很大的轰动。这是可以理解的。相干辐射有多方面的重要应用,而红外和X光谱区还缺少合用的光源,FEL提供了填补空白的可能(图2)。

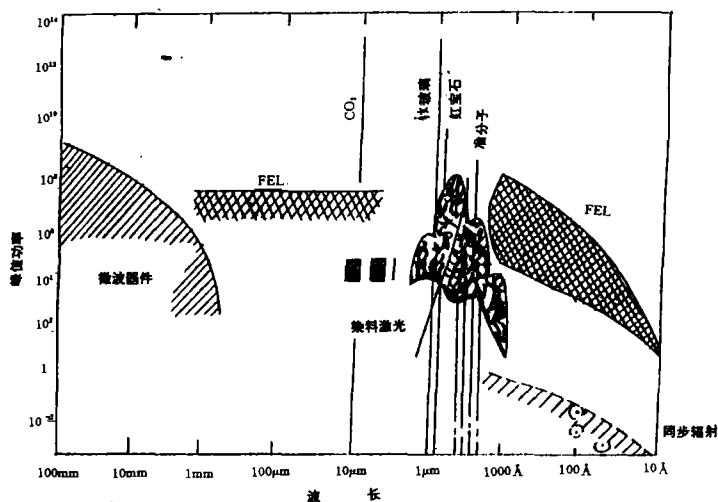


图2 相干电磁辐射谱示意图

关于应用,必须认识到新科技发展的应用本身就是一项研究课题,需要相当的时间和努力才能解决。例如,同步辐射光在电子同步加速器建造早期就被人发现了。记得直到50年代初期,大家还都把

由同步加速器真空盒窗口射出的耀眼亮光只当作一个新奇的、有意思的电子发光现象,谁能预料到40年后同步辐射光源已变成科学研究和实际应用的重要手段呢! FEL被称为未来的第四代同步辐射(目前正在建造的是第三代),它的作用必然会随着时间的推移和应用研究的进展而愈加突出地显现出的。

根据前述FEL的一些特点,可以预见,它的应用领域会是十分广阔的,如凝聚态物理的半导体、超导体、液体、磁性,材料科学的表面物理、表面化学、晶体成长,气相谱学的分子转动、振动谱,生物学的核酸、DNA,尤其是生物活体的X光全息影像,对生命科学研究的发展将是至关重要的。光化学的同位素分离和药品制备则关系到新兴的制药产业,而化学动力学则是其重要的基础研究。医学上FEL也可用于诊断、手术和治疗。此外,能源方面的激光聚变、等离子体的判识与加热、工程技术中的微加工、通讯、光刻等,FEL都提供了更广泛的可能性和机遇。

发展前景

FEL可以说正处于生命力旺盛的青年时期,具有很大的发展潜力。学术界每年都举行FEL国际会议,同时也在各种加速器会议、激光会议上也列为专题,每年都还有一些专题或地区性讨论会。研究单位遍布世界各科技先进国家,以日本为例,即有约24个科研单位进行FEL研究。目前FEL正沿着以下五个方面发展:

1. FEL物理研究。其内容是进一步了解能量转化的机制、束流品质的限制等问题,以达到提高总体性能的目的,如超辐射现象、光导效应、调频光脉冲、边带抑制、谐波利用等。

2. 发展FEL应用。美国斯坦福大学、Vanderbilt大学,荷兰FELIX装置、法国CLIO装置等在红外谱区工作、使用射频直线加速器的FEL都已先后向用户开放,提供使用。此后将有更多的用户装置出现,推动应用的开发。

3. 简易FEL的研制。要使FEL得到普遍的应用,必须先使装置结构简化,运行可靠,而且造价低廉。美国洛斯阿拉莫斯国家实验室和日本某些实验室正在进行这方面的工作。

4. 向更短波长推进。当前FEL波长的前沿是可见光,美国贝尔国家实验室正在研制紫外FEL,使用斯坦福直线加速器中心的加速器进行X光FEL研究的方案正在论证中。

5. 向高效率、高功率推进。一般FEL的电子-光转换效率为千分之几,但如采取特殊措施,如渐变扭摆磁铁、能量回收等,则效率可达十分之几,这

就使高功率FEL有可能实现。美国波音公司实验室和法国原子能委员会的研究所都在进行这方面的工作。但考虑到高功率FEL的技术困难和费用庞大,可以预言它的进展将是缓慢的。

我国情况

FEL这项有广阔研究和应用前景的新技术的出现,当然也吸引了我国科技界的注意,许多单位开展了有关的研究。在光波范围内的装置有中国科学院上海宽波段自由电子激光用户装置正在筹建,波长范围为1~25微米;原子能研究院已经建成一个工作在L-波段的注入器,有可能发展为红外谱区的FEL;北京大学正在进行FEL中一个关键部件超导微波电子枪的研究;中国工程物理研究院也在筹划光波光段的FEL的研制;北京应用物理与计算数学研究所进行了大量的理论工作,提出了新的理论方法。中国科学院高能物理研究所由国家863高技术项目资助研制了一台红外谱区振荡器(BFEL),并已于1993年5月26日出光。下面对它做一简单的介绍,以使读者对FEL具体装置的组成,有些感性的认识。

图3是这台FEL的总体安排。它主要由注入

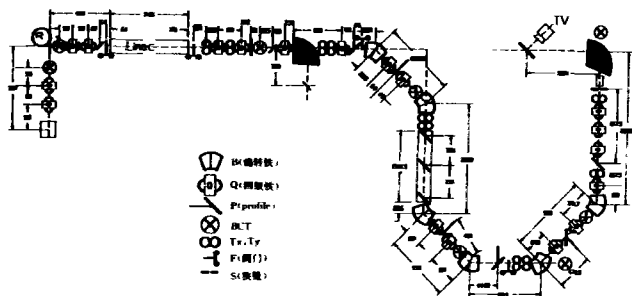


图3 北京自由电子激光装置示意图

器、射频电子直线加速器、电子输运系统、扭摆磁铁及光学谐振腔、电子时间分辨谱仪等组成。注入器中使用了热阴极微波电子枪,它配合一些特殊磁铁,可以产生高流强、低发射度,时间为几皮秒的电子束团,供加速之用。热阴极微波电子枪是1986年见于文献的新技术。我国是继美国之后,成功地把它使用于FEL装置中的。研制中另一个关键问题是我国现有电子直线加速器束流脉冲宽度一般是2~3微秒,而FEL却需要更宽的、质量更好的束流脉冲。为此,我们首先研制成功了一台高功率、宽脉冲、低纹波的调制器,对大功率速调管能够耐受的脉冲宽度进行了试验。试验结果表明,它可以长期工作于两倍于一般使用的脉冲宽度。这个结果对国际上FEL系统的研制有重要的参考意义。在扭摆磁铁的研制中,我们采用钹铁硼这种加工容易,价格

低廉的材料,通过实践掌握了在巨大磁力作用下的精密安装,计算机模拟指导下的磁块渗合与微调,以及精确的磁场测量方法,终于做出了电子轨迹偏移小于50微米的高质量扭摆磁铁,解决了上述和其他一系列技术问题后,BFEL终于达到调试阶段,于去年首次观测到自发辐射信号,今春观测到储存自发辐射信号,并于5月26日终于产生了激光(见图4),成为亚洲地区建造的近10台红外谱区的FEL中第一台出光的。

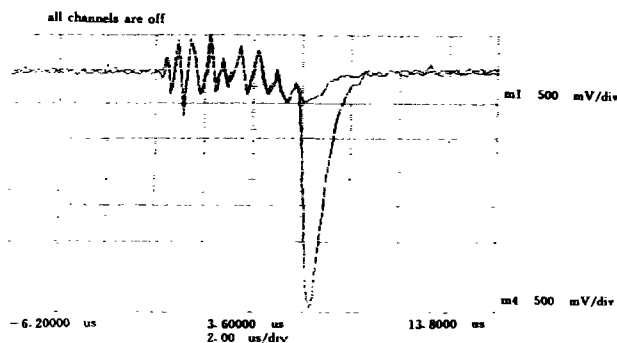


图4 北京自由电子激光波形

结 语

从上面介绍的FEL的发展历程和BFEL的研制经验,可以从中总结出科研领域中一些带有普遍性的规律。

首先,FEL的基本工作原理(受激康普顿散射)早在1927年就由Schrodinger提出过,并在1933年由Kapitea和迪拉克建议了观测非相对论电子受激康普顿散射的实验,但直到1953年莫茨才制成了扭摆磁铁,并用以产生了非相干电磁辐射;1960年菲利普将扭摆磁铁用于低能电子束产生了微波振荡;1968年潘特尔提出了使用反射镜组成光腔以便光波可与电子多次作用;最后马迪认识到扭摆磁铁等效于巨大的电磁场功率密度,并集前人研究成果的大成,终于1977年建成了红外FEL振荡器,开辟了一个重要的科研领域。由上可见FEL从概念孕育到建成出光,事实上经历了50年的漫长岁月。

这段科技发展史说明什么问题?第一就是概念和理论起着重要的指引方向的作用,它可很快地被提出,但要把它变为实际,却常常是受制于当时技术发展水平的缓慢的过程;第二就是一种新的高技术的出现是以许多其他高技术为基础的,没有几十年来加速器性能的提高、电子束流品质的改进、水

(下转第45页)

我们的“参考消息”引进了。

二年后,1990年12月,中国学者何祚麻等人在“科技导报”上发表文章,也指出脑体倒挂是1977年开始的。何文披露的数据对人们了解“倒挂”形成的历史沿革,很有帮助,摘要如下:

1927年,中国教授的最高工资是开滦煤矿工人的47倍。

1940年,中国教授的最高工资是开滦煤矿工人的10.7倍。

1957年,北京科技部门最高工资比工业部门高5.2元。

1975年,北京科技部门月均工资比工业部门仅高0.88元。

1977年,开始出现脑体收入差别“倒挂”现象。

进入80年代以后,“脑体倒挂”加剧。

中外学者研究“脑体倒挂”,都得出了1977年是中国“倒挂形成年”的结论。这个结论,和2000万中国知识分子的切身感受,也是吻合的。

“十年文革”把什么都颠倒了,而脑体差别却还没有颠倒。1977年“拨乱反正”,把很多事情都正过来了,但脑体差别却颠倒了,这是怎么回事呢?

很显然,“文革”结束了,极左并没有结束。自1957年后愈演愈烈的“左”持续了20年,不是一天就能化解的。加之当时又提出“两个凡是”,更增加了化解的困难。恰恰在这种情况下,长期冻结的工资在1977年作了一次大调整,知识分子当然是要吃亏的。由于“左”和极左,中国的知识分子已经吃了20年的亏了,再加上这次大的吃亏,“底气”终于亏光了。脑体收入差别也就终于从“正挂”变成为“倒挂”。

在“正挂”变“倒挂”的转折点上,处在一线的2000万知识分子是深有感受的。他们议论纷纷,上书中央。当时笔者也曾作了一番调查研究,写了一篇文章,并呈送最高决策层。

那篇文章,列举了“大学生毕业的哥哥收入不如当工人的妹妹高”等等不正常现象,指出了问题出在“左”字上;阐述了马克思复杂劳动的理论,提出了一些切实可行的弥补措施。可惜,2000万知识分子要求改变“脑体倒挂”的呼声和理论工作者的有关建议,似乎没有人听到。于是,本来有可能不发生的事情,终于发生了。

之后十年,脑体倒挂继续扩大。

有人说,这些年来什么都涨价,唯独知识和废品贬了值。1988年同30年前相比,一斤米从一角涨到了五角,一斤肉从五角涨到三元,而废牙膏皮却从二分钱一个颠倒为一分钱二个,高级知识分子的起薪也从150元降到了120元。于是,“脑体倒挂”日趋严重了。

据统计,1982年北京脑力劳动者比同龄体力劳动者月薪平均少8元。到1984年,《人民日报》有“大学生收入不如保姆高”,“40岁中年知识分子的收入不如20岁的临时工”的报道。到1987年,海外报刊介绍了“北京郊区20岁的女工月薪150元,卖冰棍的老奶奶一个月收入300元,出租司机月收入1000元”,全部比50岁才晋上高级职称的知识分子收入高。于是,“造导弹的不如卖鸡蛋的”一类讥讽民谣,也就盛传不衰了。

知识与废品为伍,这是对“尊重知识、尊重人才”的极大讽刺。可见,有了正确的口号,没有力挽狂澜的断然决心,仍是无济于事的。

解决脑体倒挂的关键在克服极左。

有人把这些年没有解决好脑体倒挂归因于“中国太穷”,“国家财政有困难”,是不正确的。

因为,30年代中国更穷、更困难,可以不“倒挂”。50年代中国刚打完几十年的仗,百废待举,而国家财政收入才百亿元左右,也可以不“倒挂”。80年代国家财政收入数千亿元,却反而解决不了“倒挂”,是讲不通的。

连吃饭都成问题的非洲国家也可以不倒挂,形势一年比一年好的中国,“倒挂”却一年比一年严重,是说过去的。把“倒挂”归因于客观,是没有道理的。

上面的调查考证已经很清楚;脑体倒挂与天地无关,纯是人为的;与洋人、古人、敌人、友人无关,百分之百是我们自己造成的;与钱多钱少关系也不大,关键是对待知识分子“左”的认识、态度和政策造成的。所以,我们不要怨天尤人,不要推给客观,不要推给将来。只要认真清除“左”的影响,把中国改革中“最重要的一条”——尊重知识、尊重人才很好地加以落实,问题是不难解决的。

(责任编辑 蔡德诚)

(上接第24页)

磁材料的发展、计算机的应用等,FEL今天的成就是绝不可能的。因此,要想开辟科研新领域,有所创造,有所发明,就必须注意技术积累,长期锲而不舍,精益求精,大处着眼,小处着手,才可能最后做到“会当凌绝顶,一览群山小”的境地。最后,应当指出,FEL的发展还说明了科研工作中的一个正反馈

现象。FEL需要加速器提供品质极好的电子束,而另一方面,高能电子加速器的发展(下一代的正负电子对撞机)也需要FEL研究的成果,如提供功率源、高亮度注入器等。两方面相互作用的结果,必将促进科学技术以更大的速度,向更高层次前进。

(责任编辑 蔡德诚)