

自由电子激光

FREE ELECTRON LASER

徐孔义

一、引言

近十年来电子物理学中一个新开辟的领域——自由电子激光（缩写FEL），正在迅速地发展成一门热门学科。短短几年中，自由电子激光的专题国际会议已经开过9届，仅最近，在1987年9月在美国威廉斯堡召开的第九届FEL国际会议上，就有近200篇论文发表。在其他很多学术会议上也有FEL的专题分会（如国际红外与毫米波年会、等离子体物理学年会……）。此外，还举行过多次国际讨论会（如1987年6月在中国成都举行的国际回旋管、自由电子激光讨论会），出版过多次专集，开展FEL研究的国家越来越多，投入的人力物力也在迅速增长。FEL受到这样的重视，得到这样快的发展，主要是由于它自身固有的突出优点和巨大的应用前景。本文将对FEL作一简要介绍，并对我国如何开展FEL的科研工作提出个人的初浅意见。

二、FEL的特点及其发展过程

通常的激光器件都是利用电子在特定的工作物质（如红宝石，二氧化碳等）内不同能级上的跃迁而产生激光辐射，由于这些能级都是固定的，所以产生的激光频率也是固定的。顾名思义，自由电子激光的电子是自由的，而不是被束缚在固定能级上，因此所产生的激光频率也不受约束，只要简单地调节电子束的能量，就可以在大范围内连续地改变FEL的频率。这就是FEL固有的，最诱人的特点。为了更深入地了解这一特点的重要性，下面将简单介绍一下开拓电磁波频谱的重要意义。

人们熟知的无线电波，微波，红外线，可见光，紫外线，X射线， γ 射线（伽玛射线）等等，其本质都是一个东西——电磁波。它们之间的差别只有一点，即具有不同的振荡频率。通常无线电波的振荡频率是从每秒50万次到30亿次，微波从30亿次到3千亿次，红外线从3千亿次到4百万亿次，可见光从4百万亿次到6百万亿次，紫外线从6百万亿次到3千万亿次。再往上就是频带极广的X射线及 γ 射线。不同的振荡频率使电磁波具有不同的特性，例如不同频率的可见光具有不同的颜色，我们平时所见到的五彩缤纷的世界，在电磁波频谱上仅仅是非常窄的一段。自从赫芝在100年前证实电磁波存在以来，人们就在不断努力开发不同频段的电磁波资源。而每当人们成功开发一段频谱之后，必然带来难以估量的实用价值。无线电波和微波的成功开发导致了广播、电视、通讯、雷达、遥测、遥控……等一系列新科技的诞生，其重要意义已不必细说。50年代末激光的出现，是人类成功开发另一电磁频段的开端。30年后的今天，激光已渗入科学、技术、国民经济的各个领域。很多人都知道激光及其成功应用实例，但并非很多人都知道，至今人类能够顺利掌握并应用的激光频谱确少得可怜。这是因为大多数激光器件的频率都是固定的（染料激光除外）。换句话说，迄今为止，在国民经济中广泛应用的激光器件，在电磁波频谱上仅占屈指可数的几个点。那么如果人类掌握了能成片开发电磁频谱的激光器件（如FEL），其重要意义就不难想象了。

自由电子激光另一个特点是具有极大的功率。

徐孔义 (Xu Kongyi)博士 成都电讯工程学院高能所，美国麻省理工学院电子学实验室。

这是因为FEL的工作物质是电子,不象通常激光器件那样是原子或分子,而电子不存在化学稳定性问题,即不存在被烧毁的问题。因此它们的输出功率可以十分巨大。

FEL的效率也可以很高,目前美国洛仑兹利物莫国家实验室的FEL已达到40%的电子转换效率。各国学者仍在继续努力来进一步提高FEL的效率。

虽然有关的理论和相似的实验可以继续追溯到很多年以前,但通常都公认FEL的研究工作开始于1975年。当时美国斯坦福大学的约翰·默德(John M. Maday)用FEL放大了来自CO₂激光的10.6微米的红外辐射。虽然他们的实验结果看起来并不壮观——作为放大器,仅将CO₂激光输出放大了7%,作为振荡器,其电子转换效率只达到0.01%,而且为此动用了庞大的直线加速器。但是他们的实验却证明了理论的预计,自那时以后FEL的理论与实验研究就如雨后春笋一样地开展起来。在开始的四、五年内,理论的验证阶段即告完成。目前各国学者正在对FEL的特点进行更深入、更精细的探讨,如FEL的光导现象,边带不稳定性、脉冲压缩现象等等,同时各种新的方案、结构也在不断出现,以期获得更高的效果和开拓更广的频带。特别值得一提的是FEL目前已开始进入了实用阶段,除了大学和科研机构外,一些公司也都纷纷参与FEL的研究工作(如贝尔电话公司,波音飞机公司,TWR,洛克威尔飞机公司等等),FEL在生物医学研究中的应用也不少。从总的趋势来看,FEL的研究工作正在加速发展,FEL的技术也日趋成熟。

三、FEL的应用前景

设想一个高效率的激光器,它能工作在还没有别的器件能够工作的那些频段。那么就不难想象FEL的应用前景了。换句话说,不论在科技或国民经济哪一部分,如果需要一种电磁波源,只要其工作频率是在毫米波到紫外线,甚至X射线这样一个广阔的频段内,原则上讲,都可以采用FEL。目前FEL最引人注目的应用前景有以下几种。

等离子体加热 为了实现人类对于永恒清洁能源——受控核聚变的幻想,必需把热核燃料加热到难以想象的高温,以实现点火条件。利用大功率电磁波进行加热,是一种引人注目的方案。因而发展相应的波源也就成为一个关键的问题。由于等离子体加热所需电磁波频率较高,常规微波器件难以胜任。FEL不但能满足其频率的要求,而且功率大也正是FEL的特点。因此自然

受到特别的重视。

同位素分离 同位素(如铀²³⁵和铀²³⁸)的物理和化学性质都极相近,所以不易用通常的方法将它们分离。由于它们的原子量有所差别,所以对电磁波的共振频率也不相同。FEL的频率可以连续改变,所以可以调整到和某一同位素共振频率一致而使其电离,然后就可以用简单的办法将它们从中性原子中分离出来。因而同位素分离也是FEL引人注目的应用前景之一。

生物、医学应用 在这方面,最使人感兴趣的是0.7~0.0微米的频段。其低端是所谓的“治疗窗口”,在这段频带的电磁波通过生物体组织时衰减很少,因而可以直达体内目标,而3微米的激光主要为外科手术所重视,因为这一波长是水吸收峰值所在,所以可以使手术切口更为清晰并减少邻近组织的损伤。此外,为了达到最佳的生物医学效应,对激光束的宏观、微观脉冲结构也会有不同的要求。FEL在这方面的可调性也是其他激光源难以比拟的。

定向束武器 大功率的激光束可以作为武器这是众所周知的。因此,最为人们熟知的FEL的用途,可能是它在“星球大战”计划中用作反导弹系统了。将FEL产生的1微米左右的超强激光束,从地面穿过大气层射向空间轨道的反射镜上,然后再导向到敌方刚发射的导弹而将其摧毁。

FEL是最有希望的,在这频段上输出这样强大功率的激光器件。

光加速器 用FEL产生的短波长强辐射来加速带电粒子,可以大大缩小现代加速器的体积。建造庞大的加速器是十分费时耗资的。美国拟定的一个新加速器,其直径和美国首都华盛顿相似,因而其耗资之巨大就不言而喻了。用FEL加速带电粒子的实验室模型已经证明这种光加速器的优越性。目前提出的方案有多种,典型的一种是双电子注加速器,即使两个高速电子注平行前进,用其中之一产生自由电子激光,然后用这激光去加速另一束电子注。即将一束电子注的能量转移到另一束去,从而获得极高能量的电子束。

除上述之外,EFL在光谱学、光化学、固体物理以及通讯、雷达等方面的应用前景都是十分诱人的。随着FEL的发展和其他科技领域的发展,FEL的应用范围必将进一步扩大。

FEL的应用前景是十分光明的。目前FEL的技术也日趋成熟。笔者认为,我国有条件,也应该不失时机地开展FEL的研究工作。FEL的研究耗资是较大的,主要因为需要有适合的加速

(下转6页)

个观点。假如给基础研究下定义，就是一个人不知道他在干什么，他可能就是在做纯碎的研究，而不是应用研究。其实我认为，中国这么大，养一批人去做基础研究，随他们自己去做也未尝不可。当然这样的人应该是很优秀的，有自己的主张和意见，领导也应该信任他们。应用研究就有一定的目的性，包括做成什么器件，这当中牵涉到许多方面，可以是基础，也可以是应用，所以很难划分。此外，这也不是一成不变的，如超导的拉线问题，不同部门、不同层次对其看法就不同。当一个国家，一个单位真正

需要成品的时候，就应该投入一定资金生产，要按实际情况而定。

问：我想任何应用研究都应有基础研究作指导。

朱经武：一定要！一定要！但工业发展有不同的层次，对高技术一定要有，要有连带性，特别是对一个国家。但对低技术就不一定需要。

问：谢谢您给我介绍了许多，祝您在研究工作中取得更大成就。

朱经武：谢谢！

（本刊记者 朱世南）

（上接55页）器，以提供高质量的电子注，特别是在较短的波长上，不但要求更高的电子注能量，而且相应的诊断系统也很困难和昂贵，因此在我国现有条件下，是不可能也不必要遍地开花，最好能根据现有的加速器条件安排2~3个点，开展实验工作。实验也不必重复，有的以Raman（拉曼）型为主，有的以Campton（康普顿）型为主。工作频段的选择应根据加速器和诊断设备的条件并结果应用的需要来确定，比如可选在毫米波——远红外，及近红外波段，同时在有条件的高等院校建立小型装置，作有关基础性研究及培养专业人才，这样的小装置花钱不多，灵活性强，便于改装，特别适于进行探索性的研究。

应该看到在FEL的研究过程中，仍有很多需要解决的问题，特别是根据我国现有条件，要很快有明显的经济效益是不太可能的，但也不是遥遥无期。它应算一个中期项目，根据世界先进水平来看，近期内FEL就可能发挥巨大经济效益。

国内开展FEL研究的单位应互相支持，情报、资料要公开，交流；人力、设备也应交流配合，才能相互促进，减少重复性工作，充分利用人力、设备和科研成果。

FEL的研究也应对外开放，加强国际合作。目前我国还刚起步，充分吸收国外先进经验，广泛开展国际交流是十分有益的。

· 书讯 ·

欢迎订阅高中理科学习解疑丛书

为帮助高中学生解决在理科学习方面普遍存在的一些疑难问题，本社邀请《教学通报》《物理通报》、《化学通报》、《生物学通报》编辑部有关同志共同组织有经验的中学教师和大学教师，结合他们多年办刊和教学积累的资料，编写了一套高中理科学习解疑丛书。全书分：数学学习解疑、物理学习解疑、化学学习解疑和生物学习解疑等四册。这套书以现行高中教材为背景，对教学大纲规定的重点内容中的疑难问题作了针对性解释；对学生似是而非、容易混淆的概念加以辨析；并结合实例从思考和解决问题的方法上给予启发和点拨；在一些问题上作了深入的分析和讨论；本书按教材内容顺序编排。本丛书对提高青年教师和高中学生的教与学的水平，对高中学生的总复习是一套有价值的参考书，无疑也是自学和进修的一套好参考书。本丛书每册以问答形式解疑了150~200个教学中经常遇到的疑难问题。每个分册定价分别为：数学1.50元；物理1.30元；化学1.20元；生物1.50元。全套书于三月底出版。对订购数达到10套以上的订户，给予优惠价。欲购者请来信索取订购单。

北京海淀区学院南路86号

学术期刊出版社 发行部

电话：北京896731转595