

自由电子激光的可能应用

李士 李印华

(中国科学院高能物理研究所,北京 100080)

本文简要介绍了自由电子激光和 80 年代刚刚兴起的自由电子激光的应用,展望了它令人振奋的应用前景,并讨论了它在应用研究方面的深远意义。

一、激光的功绩和困惑

20 世纪 60 年代兴起的的最重大的科学技术成就之一——激光,它一诞生便深化了人们对于光的认识,并使光学同其它许多学科领域发生了密切联系,从而为光学的发展和光的应用开拓了极其广阔的前景。目前,激光已从实验室走向实际应用的各个方面,许多以往光学技术办不到的事情,现在能办到了;过去能办到的,由于引入激光技术之后,效果和精度大大提高了。例如,用调谐激光研究原子、分子能级的精细程度比传统光学方法提高了成千上万倍;用激光脉冲测量月球到地球的距离,可达到几个厘米的精度;激光全息方法给工业上的应力分析带来了重大革新;目前,在工业方面已形成高达数十亿美元的与激光有关的产业。总之,激光对自然科学各分支领域及技术科学发展的

在研究 K/T 界线生物灭绝的成因同时,人们自然会提出这样的问题:在地球演化过程中,其他几次大规模古生物灭绝的成因和机制是什么呢?它们是否与 K/T 界线一样是地外物质撞击造成?作者与国内外学者合作曾系统地研究了我国发育良好的前寒武纪/寒武纪、泥盆纪/石炭纪、二叠纪/三叠纪、以及晚泥盆纪中弗朗斯/法门等界线近 30 个剖面,获得了大量珍贵的数据,分析结果表明,虽然在界线层中也发现了铍比其上下伏地层的背景值高出几倍到几十倍,但是界线层铍的含量比 K/T 界线富

影响,将不亚于本世纪发现的 X 射线衍射对晶体学发展曾起到的重大影响。激光的功绩可谓显赫。

但自激光发现后 30 年的今天,人们对已进入“而立”之年的激光感到越来越不满意了,迫切希望它能有进一步的突破,以适应科学技术飞速发展的需要。例如希望普通激光的功率、效率和波长调谐范围有大幅度地提高。这些要求对普通的激光来说,简直是“天方夜谭”,这就像跳高一样,如果运动员跳到他本人的极限高度之后,再想提高成绩,不从技术方法上有新的突破,是很难实现的。探索新方法、新途径来提高激光的特性已提到日程上来了,诸如曾研究过相关自发辐射效应、切连科夫效应等。1984 年美国物理学家在加速器上利用电子束去放大一束微波辐射,获得了高功率、高效率、波长宽调谐范围的激光,这种激光称为自由电子激光(FEL)它是 80 年代物理学最重要的进展之一。

铍层中铍含量要低 2—3 个数量级,很难得出这些界线灾变事件的成因和机制与 K/T 界线事件一致的结论。那么,这些界线的地球灾变成因和机制到底是什么呢?这些问题还有待于进一步深入的研究。

- [1] L. W. Alvarez et al., *Science*, 208(1980), 1095
- [2] D. J. Nichol et al., *Science*, 231(1986), 714
- [3] C. F. Chai, *Isotopenpraxis*, 24(1988), 257.
- [4] Mao, X. Y. et al., *Meteoritics*, 24(1989), 298.
- [5] A. R. Hildebrand, et al., *Science*, 248(1990), 843.
- [6] P. Kong, et al., *Meteoritics*, 24(1989), 289.

二、自由电子激光的兴起

自由电子激光是一种将电子束能量直接转换为激光的装置。它是一种频率可调、高功率相干辐射的光源。图1是自由电子激光器的工作原理简图，它以电子加速器提供的电子束为工作物质，经过束流输运系统注入到带有扭摆

磁铁的光学腔中，这样电子束经过扭摆磁铁时受到周期性变化磁场的影响而做扭摆运动，产生横向速度分量，与此同时，一束相干光沿轴向通过扭摆磁铁，在一定的条件下光辐射可由电子束获得能量，并像普通激光器那样放大，放大后的光辐射经反射镜的反射，再一次与新的电子束混合放大，使光辐射得到相干放大，输出高功率的激光脉冲。

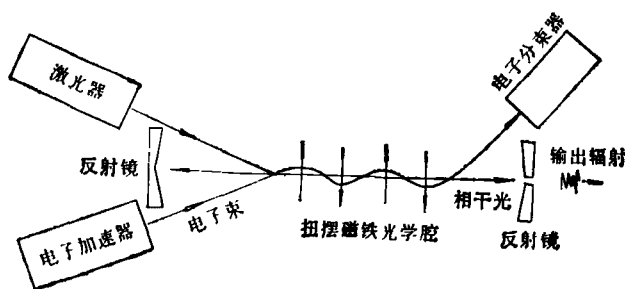


图1 自由电子激光器工作原理示意图

自由电子激光具有一系列的特点，首先是波长范围宽，频率连续可调(原则上可设计从X射线到毫米波任意波段的光源)；其次，由于自由电子激光器的工作物质是电子，不会产生普通激光器限制激光功率提高的现象，可获得足够高的输出功率；第三，自由电子激光器由于没有中间能量转换环节，故其效率高；此外，自由电子激光还具有窄的时间结构和输出频带、工作稳定和重复性好等特点，是一种十分理想的光源。

三、不容置疑的应用前景

由于自由电子激光具有许多一般激光器望尘莫及的优点，所以自由电子激光问世后不久，科学工作者就已开始考虑它的应用问题，并进行了许多尝试或试探性的应用研究工作，虽然目前还没有取得惊人的结果，但自由电子激光的应用前景和发展潜力从未受到过人们的置疑。自由电子激光特别适宜于研究光与原子、分子和凝固态物质的相互作用，这类研究涉及到物理、化学、生物学、医学、材料、能源、通信、

国防和技术科学等方面。所研究的现象从相干到非相干，从线性到非线性，从稳态到非稳态，从有序到无序，从连续到脉冲；从聚束到反聚束，从渐变到突变等等，都是当前物理学中十分活跃的领域，特别是在研究电子-电子、电子-声子、电子-磁子等相互作用方面能发挥更大的作用。

自由电子激光在固体物理中的应用的首次实验，是在美国加利福尼亚大学的自由电子激光器上进行的。该激光器可以提供高功率($\leq 10\text{kW}$)、频率可调($10-100\text{cm}^{-1}$)、线偏振的相干源。大家知道，大多数磁性材料的电子自旋激发能量在 $10^3-10^2\mu\text{m}$ ，过去只能对布里渊区中心进行研究，而利用自由电子激光高功率和波长可调的特性来研究这些材料将能扩大到整个布里渊区，能对磁子和声子的传播及相互作用进行研究。

Spector 等人利用自由电子激光研究了反铁磁性材料 $\text{FeF}_2:\text{Mn}$ 。他们开展了两方面的测量，一方面，以透射率作为磁场强度的函数，调节自由电子激光的波长，对布里渊中心区($K=0$)和磁杂质进行磁场扫描和频率扫描；另一

方面,测量透射率与功率的关系。由于自由电子激光脉宽足够窄,已测量到磁能带作用引起的宽度变化、磁极化快速变化引起的干涉、热饱和和非线性等。这个工作验证了自由电子激光对红外区的线性和非平衡问题研究的实用性,其意义在于高功率自由电子激光能激发磁子,可得到连续波矢的传播函数,可对整个布里渊区内磁子的传播进行研究,检验目前的磁弛豫理论^[4]。

在固体物理中应用的另一个比较成功的例子是 Dennis 等人对 $\text{LaF}_3:\text{Er}^{3+}$ 样品进行的能级动力学研究。我们知道,电子激发的动力学过程一直是人们感兴趣的课题,目前在光学区域研究动力学的问题经常采用时间分辨荧光谱仪。但在固体物理学中,红外波段的电子激发后,退激时发射声子的几率大于辐射光子,这对电子激发的动力学过程的研究带来不便,而利用自由电子激光可免去测量红外荧光。Dennis 等人利用自由电子激光对三能级结构的电子态能级的电子-声子相互作用进行了动力学研究。实验中先将自由电子激光调谐到 50.2cm^{-1} ,将基态 $|1\rangle$ 电子共振激发到 $|2\rangle$ 态,处于 $|2\rangle$ 态的电子由光学激光器激发到 $|3\rangle$ 态(图 2 所示),并测量 $|3\rangle$ 态的光学荧光积分谱,然后计算 $|1\rangle$ 和 $|2\rangle$ 态的电子占有率和 $|2\rangle$ 态的声子占有率方程,就可得到 $|1\rangle$ 态和 $|2\rangle$ 态的电子占有率和 $|2\rangle$

态的声子占有率,并得到 $|2\rangle$ 态的弛豫是从某一特征时间开始,这样就从瞬态实验得到电子和声子的弛豫时间,其时间分辨则由自由电子激光脉宽所决定^[5]。

在半导体材料的研究中自由电子激光也能发挥作用^[3,4]。目前,利用现有的研究手段使我们对电子空穴的电子能级状态有了一些了解,但是对于电子激发的瞬态过程却了解不多。这一瞬态过程搞不清楚,使许多现象都无法解释,阻碍了半导体技术的发展。利用自由电子激光波长范围可调的特性,可以选择激发能量,而利用自由电子激光的时间结构好的特性,可以对半导体材料中电子、声子及缺陷间的相互作用进行研究。例如对于 n 型 GaAs 半导体材料中电子从 $1s \rightarrow 2p^+$ 跃迁的动力学研究,过去只能在分子激光器的功率范围内进行研究,但因分子激光器脉宽的限制,不能进行高功率的稳态饱和行为的研究。自由电子激光比分子激光器的功率高数百倍,且有足够的脉宽,故可以很容易地进行这方面的研究,它不仅能给出以前无法得到的本底饱和,而且得出了在高功率时电子从 $1s \rightarrow 2p^+$ 态共振跃迁不能使用二能级系统来描述的结论^[5]。

在高温超导和光学材料领域,自由电子激光也将会发挥作用。我们知道,利用常规方法对 YBaCuO 超导材料声子谱的动态研究结果已表明,当转变温度高于 80K 时观察不到声子谱带;当转变温度低于 80K 时在超导材料中观察到了声子谱带。因此,如果利用自由电子激光研究超导材料中电子和声子相互作用,及对高温超导材料的影响方面将会起到十分重要的作用。在光学材料的自由电子激光的研究中,最近也作了一些工作,Baldacchini 等人提出了一个研究碱卤素光学材料缺陷的实验,可以对其电子和声子的耦合进行研究,这对远红外光学材料的发展有很大的帮助^[6]。此外,近年来发展起来的非线性光学是研制许多新型光学元件的基础,而自由电子激光为非线性光学研究提供了很好的光源。

在固体物理和磁学的自由电子激光研究

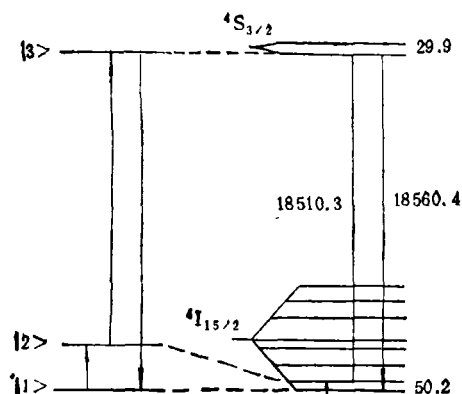


图 2 普通远红外光学三能级实验和 $\text{LaF}_3:\text{Er}^{3+}$ 的三能级实验能级图

中,除了以上介绍的几个方面外,它还可以进行磁激发时间分辨、磁模式局域化和传播的非线性、相干声子的产生、局域声子模式和仲电共振(paraelectric resonances)、FEL 感应相变、磁子、声子和极化声子的双光子谱学研究等^[7]。

在军事科学中,自由电子激光是最早考虑应用的领域之一。1983 年美国总统里根推出的战略防御创新计划、即所谓的“星球大战”计划中,自由电子激光是这个计划中的主要部分。这项计划是以发展高能激光器为核心的激光武器计划,每年投资约几十亿美元。目前也取得了一定的进展。

在医学中,利用自由电子激光制成激光手术器械,如激光手术刀、激光牙钻、进行激光视网膜“焊接”、激光“消除”血栓、软组织超声激光显示等。激光手术刀其特点是光斑小、深度可调节、进行外科手术使病人出血少,创面小,这样对正常组织能减少损伤,而对病变组织能起到治疗作用,促进了显微外科手术的发展。

在探索和开发新能源方面,自由电子激光也将发挥作用。我们知道,海水中含有大量的氢和它的同位素氘(即重氢),氧化氘(就是重水)。每一吨海水中含 140g 重水,如果我们将地球海水中所有的氘的核能都释放出来,那么它所产生的能量足以提供地球人类使用数千年。但氢的同位素氘和氚的原子核,在高温下才能聚合起来释放能量,这个过程称为热核反应,也叫做核聚变。聚变反应需要在极高的温度(例如一亿度)下才能发生,目前,在地球上只有在原子弹爆炸中心才具有这样高的温度。自从 1963 年巴索夫等人提出激光核聚变这一概念以来,世界上许多国家都竞相投入大量的人力物力,从事这一领域的的研究工作,尽管乐观和悲观论点不断交替出现,但总的来说,激光核聚变始终是磁约束核聚变的有力竞争者。人们正在努力探索利用自由电子激光引发核聚变的方法,目前已处于接近核点火的门槛。已有人计算,自由电子激光的功率可满足核聚变的要求,如能量为 250MeV 的电子束,通过强度为 1 nOe 的磁场,波长为 $1 \mu\text{m}$ 的光,所达到的光

物理

功率为 $5.3 \times 10^{12} \text{ W/cm}^2$ 。很有希望成为核聚变的光源。将这种光脉冲聚集在聚变物质表面上,便能使这一物质变成等离子体,并使其温度升高到产生热核反应的温度。如果能成功地实现激光核聚变,海洋中的氘将能为人类提供源源不断的能量,这功劳有可能首先应归功于自由电子激光。

四、深远的意义

科学技术的发展历史告诉我们,一个新效应的发现,一个新原理的提出,往往会对一门学科,甚至整个科学技术都带来一定的影响。同样,某种技术发展一定程度也会产生质的飞跃,激光技术的发展就是很好的例证。例如,HeNe 激光和 CO_2 激光的出现,促进了测试技术和加工技术的发展;可调谐激光的出现,发展了激光化学、激光光谱学;半导体激光与光纤的出现,发展了集成光学、光计算机技术和光纤通信。这充分说明,激光技术的任何突破,都会开发出一大批新应用,因此自由电子激光的出现一定会开拓出若干新兴学科与边缘交叉学科,一定会对科学研究、工农业生产、国防建设和医疗卫生等方面、甚至对整个社会带来巨大的效益。

自由电子激光及其应用研究是一项技术综合性强、理论和技术复杂、研究周期长、研究经费要有一定支持强度、并具有一定风险的高技术项目,在国际上开展的时间也并不长,但已有不少重大进展。当然,它毕竟还是一门发展中的年轻学科,现在还不够成熟和完善,许多方面还处于发展时期。但是,随着研究工作的深入,它的这些问题一定会得到解决,在这个领域中一定会有更多有意义的新发现诞生,可以说自由电子激光应用是 20 世纪 90 年代物理学的前沿领域之一。

我国自由电子激光装置研究的起步还不算晚,国家高技术计划已将自由电子激光做为高技术跟踪课题,中国科学院高能物理研究所正在建造一台红外直线加速器的自由电子激光装

微电子技术中的薄膜材料

曲喜新

(电子科技大学材料科学与工程系,成都 610054)

随着微电子技术的发展,各种电子整机的面貌发生着迅速的改变,并且还在不断地出现着前所未有的新型整机,因此人们越来越想了解导致这种情况的材料基础——薄膜材料。本文扼要地介绍了现在微电子技术中的常用薄膜及其制造技术的新进展,接着重点概述了在国际上特别受人重视的几种新型薄膜。

一、薄膜材料是微电子技术的基础

当人们漫步在高科技的商品市场上时,会惊奇地看到许多小巧美观、令人向往的电子整机,如袖珍型电视机,盒式录相机,微型计算机等等。这些产品之所以能够及时问世,是由于微电子技术的迅速发展,是由于微电子技术已经发展到现在的超大规模集成电路及其微组装阶段。在微组装中使用多层布线板、各种微型片式元器件(含各种集成电路)和表面安装技术(SMT)。

若剖析一下这些新奇的电子整机,不难发现,它们各个部分所用的材料基本上是薄膜材料,使用的技术属于微电子技术,因此可以说,薄膜材料是微电子技术的基础。

二、现在常用的薄膜材料

和其他材料一样,薄膜材料也可按成分、结构、性能、用途和制造方法来分类。按成分,现在用的薄膜有元素金属薄膜、合金薄膜、元素半导体薄膜、化合物半导体薄膜、氧化物薄膜、氮化物薄膜、有机聚合物薄膜、混合物薄膜等。按组织结构,则分为单晶薄膜、多晶薄膜和非晶薄膜。在多晶薄膜中,又按微小晶粒相互取向排列的情况,分为无规取向、一维择优取向和二维择优取向三种薄膜。对一维择优取向的薄膜常称为纤维状或柱状薄膜。二维择优取向的多晶薄膜虽然在结构上已经接近于单晶薄膜,但因为有晶界,所以还不是单晶薄膜。

对薄膜来说,现在广为采用的分类方法是

置。目前和国外最先进的实验室相比仍有较大的差距,但总的说来,还能跟得上国际先进潮流。从当前自由电子激光应用的形势看,我们国家还是一个空白,与国外相比已有了相当的差距。考虑到我们的国力,目前不可能花费巨资建造数台自由电子激光装置,应用研究领域也不可能全线出击,唯一可取的办法是花少量的经费进行跟踪研究,跟上该领域前进的步伐,参与世界对话,待北京建造的自由电子激光装置完工后,我们就能立即组织力量攻关突破,可以预计,自由电子激光一定是一门发展速度快、

成果多、学科渗透广、应用范围宽的综合性强技术,未来的诺贝尔奖的获得者或许会在该领域中产生。

- [1] J. Spector et al., *Solid State Commu.*, 69(1987), 1093.
- [2] W. M. Dennis et al., *J. Opt. Soc. Am. B.*, 6(1989), 1045.
- [3] J. Kaminski et al., *J. Opt. Soc. Am. B.*, 6(1989), 1030.
- [4] J. Ristein et al., *J. Opt. Soc. Am. B.*, 6(1989), 1003; 6(1989), 1045.
- [5] J. Kaminski et al., *Appl. Phys. Lett.*, 52(1988), 18.
- [6] G. Baldacchini et al., *Nucl. Instr. & Meth., A*, 239(1985), 421.
- [7] R. Luis et al., *Nucl. Instr. & Meth., A* 239(1985), 439