

科技的宠儿——激光

李政勇

激光是 20 世纪人类值得骄傲的重大发明之一。它是迄今为止人类最优秀的光源。激光具有极高的亮度,其亮度比太阳的亮度高 10 万倍以上;它有优良的单色性和相干性,常用氦氖激光器的单色性($\Delta\lambda/\lambda$)就可达到 10^{-12} ,比最好的普通光源要高出百万倍,其相干长度可达数百千米,远胜于其他光源;激光还有极好的方向性,其发散角一般只有几个毫弧度甚至更小,若将一束激光射向月球(地月距离约为 40 万千米),则到达月球表面的光斑直径也不会超过 2 千米,而其他光源发出的光根本无法到达月球。正因为有如此非凡的品质,所以激光一经问世便迅速被应用到工业、军事、通信、医学、科学研究等诸多领域,给经典科学和传统工业以巨大的冲击,掀起了一股空前的激光浪潮,涌现出一大批新兴学科和产业,如激光物理、量子光学、激光光谱学、光子生物学、激光通信、激光医疗、激光微加工、先进制造技术等等,这些潜在的和现实的生产力,渗透于社会实践的方方面面,有力地推动着人类社会向激光新时代迈进……激光有着如此卓越的品质,对人类社会起着如此巨大的作用,理应为大众所熟知,然而一般人对激光却并不了解,有的甚至闻所未闻,因此迫切需要普及这方面的知识。本文作者尝试担此重任,愿尽绵薄之力,以使广大读者能熟悉激光的基本原理及其特性,认识激光出现的历史必然性和发展中的曲折性,了解应用和研究它的现状与前景,进而引起大众对激光的优良特性、重大作用和战略意义产生共鸣。

一、激光原理通释

激光的理论基础早在 1916 年左右就由爱因斯坦奠定完毕。爱因斯坦在 1916 年研究辐射问题时发表了《关于辐射的量子理论》一文,论述了辐射的两种基本形式,首次提出了受激辐射概念。此外,他还详细研究了光与物质(原子或分子等)的相互作用过程,特别是吸收、自发辐射、受激辐射这三种基本作用形式,导出了著名的爱因斯坦关系式,使受激辐射理论上升到了定量的高度。关于受激辐射,他曾深刻指出:如果光子能够被原子吸收,并且使原子上升到能量较高的状态,那么光也必须能够迫使原子失

去它的能量,掉到一个较低的能级。一个光子击中原子,然后出来两个光子。出射光子与入射光子的方向完全一样,而且精确地同步。用现在的话来说就是:对处于激发态(高能态)的原子,如果外来光子的能量恰好等于它的跃迁能,那么该光子就可以引起高能态原子向低能态跃迁,并把两个状态之间的能量差以辐射光子的形式发射出去,辐射光子与引发它的外来光子不仅发射方向相同,而且频率、相位和偏振态等属性都相同。于是,一个光子变成了两个相干光子。这就是受激辐射理论的精髓,未来激光领域的开山之斧。

一般说来,激光的产生必须具备以下几个条件。首先要实现粒子数的反转,也就是使上述处于激发态的原子数超过基态,这样,受激辐射才能胜过吸收和自发辐射,在光与原子的相互作用中居于主导地位。其次要有合适的工作物质和能量供应。选择工作物质主要看它是否具有适用的能级结构,是否有利于实现粒子数反转,获得所需频率的激光。能量供应过程又称“抽运”或“泵浦”,它是为工作物质提供跃迁所需的能量,真正实现粒子数反转的。另外,通常还要有一个谐振装置,即光学谐振腔,其作用类似于电子学中的选频放大器,它能使某些特定模式(频率、相位、偏振态及传播方向一定)的光子不断得到正反馈而加强,抑制其他模式光子的增长,而且使之很快衰减掉。最简单的光学谐振腔是由两块平行放置的反射镜构成的。

激光的产生过程可以唯象地描述如下:在外界泵浦源的不断激励下,工作物质中许多粒子就会从基态跃迁到不稳定的高能态,并很快无辐射地弛豫到一个亚稳态。粒子在亚稳态的寿命比较长,所以数目会不断积累增加,以致造成粒子数反转。一段时间后亚稳态粒子就会寿终正寝,纷纷向基态跌落,同时发射出自发辐射光子。这些光子射向四面八方,其中偏离轴向的光子很快就逸出了谐振腔。只有沿着轴向运动的光子,在谐振腔内由于两端反射镜的反射而不至于逸出腔外。这部分光子就成为引起受激辐射的外来光子,它们沿轴向不断地往复通过处于粒子数反转状态的工作物质,就会引发显著

的受激辐射。那些不满足谐振条件的辐射光子经过几次反射后就会因损耗而衰减掉,只有满足谐振条件的辐射光子会不断得到放大而加强。由于放大过程是雪崩式进行的,因而这种光在腔内就会骤然增加。当我们使其中一面反射镜具有一定的透过率时,便会从中射出激光。

要深入了解激光产生的机理,读者可参阅有关激光理论方面的文献。现有的激光理论主要有经典理论、速率方程理论、半经典激光理论和全量子激光理论,它们分别在不同的假设条件下创立了自己的模型与方程,对光与物质相互作用这一物理过程进行描述。经典理论将光视为经典电磁场,而把介质原子看作经典谐振子,其相互作用就是经典偶极子在光场中所作的强迫阻尼振荡。该模型简单直观,能解释某些实验现象。速率方程理论的核心是关于光强与反转粒子数的方程即速率方程,主要解决激光光强的特性以及与光强有直接关系的若干问题,譬如激光器的增益饱和、瞬态特性、调Q激光动力学、多模振荡及烧孔等。半经典激光理论是现阶段最成熟也最常用的激光理论,其特点是把光看作经典电磁场,用麦克斯韦方程描述;把介质看作量子化的粒子系统,用薛定谔方程描述,由此建立起激光的电磁场方程即兰姆自洽场方程,描述腔内激光行为。而目前研究得最热的全量子理论则进一步将光场也量子化了,并计及量子起伏,已经顺利解决了半经典理论所不能解决的激光线宽、光子统计等问题,前景十分乐观。

二、激光诞生史略

尽管爱因斯坦很早就提出了受激辐射理论,但一直没有人想到用它来实现光放大。因为物理学家都知道,处于平衡态的物质中低能级的粒子数总是比高能级的要多得多,靠受激辐射在平衡态物质中实现光放大实际上是不可能的。直到1940年,苏联物理学家法布里坎特明确提出了粒子数反转这一观念,并天才地预见到它的可行性,激光的出现才有了一丝希望。1947年,美国物理学家兰姆和雷瑟福在一篇著名论文中附注指出:通过粒子数反转可望实现受激辐射,由此暗示了激光产生的正确途径。1949年,法国物理学家卡斯特勒在实验中发展了光辐射改变原子能级布居数的光泵法,为产生激光提供了重要的抽运手段。不久,哈佛大学的珀赛尔和庞德实现了粒子数反转,向受激放大迈出了一大步,

遗憾的是信号太弱,无法加以利用。1951年,熟悉电子工程的物理学家汤斯设想:如果将介质置于谐振腔内,利用振荡和反馈,应该可以放大辐射信号。汤斯按这一设想拟定出新的方案并立即进行试验,几年后终于制成第一台微波激射器,彻底实现了受激辐射放大,为激光诞生铺平了道路。

由于微波激射器的发明对激光产生具有重要意义,有必要回顾一下它的历史背景。二次大战后,通信业的迅速发展迫切要求载波具有更高的频率,以容纳和传输更多的信息,来满足人们急剧增长的通信需求。同时雷达技术的进一步发展也要求工作电波的频率增大,以提高分辨能力,简化笨重的发射设备……这些现实需要极大地刺激了人们对高频电磁波放大的研究,并首先在微波领域取得了突破。1954年,汤斯研究小组设计的世界首台微波激射放大器(MASER)开始运转,标志着电磁波放大取得了阶段性的进展,激光的出现已是指日可待了。

1957年,汤斯和肖洛开始考虑“红外与可见光激光器”的可能性,决定将MASER原理推广到光频段,但他们遇到了一个实际困难,就是难以制成与光波波长同数量级线度的谐振腔。若像微波那样用毫米尺寸做成封闭腔,在光频范围内模的密度就会大得惊人,谐振腔的选模作用将失去意义。这一困难最终是由肖洛解决的。肖洛精通光谱方法,擅长于运用法布里-珀罗干涉仪,对该仪器尖锐的选频特性印象非常深刻,因此他决定采用法布里-珀罗式谐振腔,并将它做成开放式,从而攻克了光学谐振腔这一难关。此后,肖洛开始研究红宝石激光器,并于1959年在第一届国际量子电子学会议上明确指出:“固体脉塞可以做得非常简单。基本上它就是一根棒,一端全反射,另一端也差不多是全反射。侧面保持光泽,以便接受抽运辐射。”准确预言了第一台激光器的基本结构(参见图1),人们期待已久的激光快要呼之欲出了。然而肖洛误以为红宝石的R线(波长为693.4纳米与692.9纳米)不适于产生激光,因此无缘第一个做成红宝石激光器,为此也错过了与汤斯一起获得1964年的诺贝尔物理奖。光荣的使命落在了年轻的工程师梅曼身上。梅曼是美国休斯研究实验室量子电子部的负责人,他有用红宝石进行微波激射器研究的多年经验,更重要的是他有可贵的求实精神。当他从文献上得知红宝石的量子效率只有1%时,他没有迷信,而是亲自进行了测

量,结果发现它的荧光效率竟是75%,这样梅曼就毫不犹豫地选定了红宝石作激光介质。经过200多天的艰苦奋斗,终于在1960年5月15日点亮了世界第一台激光器,从此宣告了激光时代的到来。

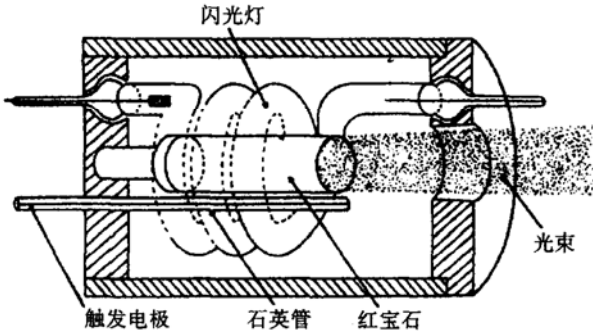


图1 梅曼的第一台红宝石激光器结构简图

三、激光变奏曲

自1960年第一台激光器诞生以来,人们对激光器的研制工作就从未间断过。随着生产的发展和科技的进步,不同工作物质、不同工作机理以及不同用途的激光器相继问世。典型的如掺钕钇铝石榴石(Nd:YAG)激光器、氦氖激光器、染料激光器、半导体激光器、光纤激光器、自由电子激光器等。它们的结构千差万别、机理大相径庭、应用场合也各不相同,但这些激光器有一个共同点就是,它们所发出的激光都具有本文引言中已指出的几大特性。然而,近年来出现的随机激光器,却引发了人们对激光特性的重新思考。

随机激光器是一种利用高度无序介质中的受激辐射效应制成的激光器,有的文献中也称之为无序激光器。这种激光器没有腔镜,代替腔镜起作用的是无序介质中的光子囚禁效应。随机激光现象首先由洛安迪(N. M. Lawandy)于1994年在有机掺杂胶体溶液的荧光实验中观察到,但未作深入研究。1998年,我国留美女学者曹惠在氧化锌半导体粉末的荧光实验中再次观察到这一现象,并对此做了较为透彻的研究。她发现:随机激光是一种高强度的受激辐射;在各个方向上都能观察到这种激光,或者说随机激光没有确定的发射方向;随机激光的纵模可以是一个、几个或多个,并且它们的频率和频率间距会随抽运光的位置及强度而变化。这些实验事实表明:激光的特性或者说激光与普通光的本质区别并不在于它的方向性好或单色性好,因为随机激光就没有确定的方向甚至不具有固定的频率。那么激光究竟特别在哪里呢?从微观角度来看,在普通光

束中,光子是非相干的,成团分布的,涨落很大;而在激光光束中,光子是相干的,随机分布的,涨落很小。至此,我们可以将激光的特点初步概括为光束强度高、光束质量高。

事物的属性总是多方面、多层次的,激光的特性也是相当丰富的,远不止于此。但深入的认识需要深入的实践,总结激光的其他特性还有待于实验事实的进一步积累。

四、激光交响曲

激光是高科技领域的急先锋,它的发展往往能带动一大批学科、产业迅速进步和崛起,甚至会引起某些领域的突破,产生深远影响。

随机激光的出现不仅迫使人们重新界定激光的特性,而且促使人们深入研究无序介质中的光子囚禁效应,一举推广了安德森(Anderson)电子局域化理论,创造性地提出了光子局域化思想,使局域化理论有了新的突破,同时也为相关的学科如纳米科学和无序科学等注入了新的活力,使之蓬勃发展起来。

不断刷新纪录的超短脉冲激光技术使人们可以对物理、化学和生物学的基本过程进行深入研究,以揭示其本质,从而根本上推动这些学科的发展。飞秒激光器已帮助人们认识了熔化、半导体物理、光合成、化学反应、视觉等基本过程,促成了一系列学科如飞秒光谱学、飞秒光电子学、飞秒半导体物理、飞秒等离子体物理的产生和发展。刚刚实现的单个阿秒(千分之一飞秒)脉冲又为超快光谱学打开了新的篇章,其应用前景将更加广阔。未来的超短脉冲将借助更短波长的载波如远紫外或X光波,这样人们就可以研究更基本的物理过程如内壳电子弛豫和光隧道电离,实现瞬态化学与生物过程的探测,从而将原子物理学、基础化学以及生命科学的发展推向纵深,有可能带来基础领域的一场新的革命,因而具有深远的战略意义。

半导体激光和光纤激光技术的成熟使光通信最终成为现实,从此拉开了建设“信息高速公路”的序幕;激光在一般工业领域的应用则掀起了一场新的产业革命,形成了以先进制造与微加工为代表的现代制造工业,使传统的机械、模具、加工行业获得了新生,而现代的芯片、微电子、计算机等行业则更加生机勃勃了。总之,激光出现在哪个领域,哪个领域就会出现奇迹。



海啸中的物理知识

陈建

2004年12月26日印尼苏门答腊岛附近海域强烈地震引发了海啸，这次海啸因其波及面之广、造成的破坏程度和人员伤亡数之众，被联合国称之为“近几世纪以来最严重的自然灾害”，一时间海啸成为全世界最关注的自然现象。本文就海啸中涉及的物理知识作简要分析。

海啸的形成

海啸是大规模的水波运动，在物理学上属于特长的长波能量传递，它是大量海水在短时间内突然迅速位移所造成的。水下地震、火山爆发或水下塌陷和滑坡等大地活动都可能引起海啸。这次印度洋大地震是在印度洋底部所谓“俯冲带”发生的，这一俯冲带是位于印度洋海面下约10000米深处的印度板块与缅甸板块发生上下错位运动构成的。印度板块原来以每年5厘米的速度向东北方向移动。12月26日，印度板块的大约1000千米长的一块向缅甸板块下方“俯冲”，造成印度洋洋底局部先向下再往上的运动，断层处数百立方千米的岩石陷落，出现一狭长空间；当海水填充这个空间时，产生巨大的海水波动；这种波动从深海传至浅海，海浪陡然升到几十米高，结局就是灾难性的大海啸。需要注意的是，海啸不同于风浪和潮汐——微风吹过海洋，泛起波浪，它一般只在水面附近起伏，涉及的深度不大，波动的振幅随水深衰减很快，地震引起的海啸则是从海底到海面整个水

放眼当今的科技社会，神奇的激光已是处处生根、遍地开花、硕果累累：激光冷却、激光光镊、激光分子剪裁、激光制导、激光核聚变、激光微加工、激光通信、激光检测、激光防伪、激光医疗、激光影视等等，遍及科研、军事、能源、生物、医学、信息、工业、生活娱乐等方方面面，奏响了一支以激光为主角的高科技交响曲。

立足激光的发展现状，展望它的研究前景，可以

体的波动；潮汐产生的海流能深入海洋底部，这与海啸一样，然而它是由月亮或太阳的引力引起的，而海啸则是海底地层发生断裂造成的波动。海啸中所含的能量惊人，震源断层倾滑的垂直差异运动越大，相对错动速度越大，面积越大，则海啸所含的能量就越大。

海啸要经历三个部分交叉却又有显著差异的物理过程——由某种搅动水体的力产生海啸，然后海啸从爆发源附近的深海处传到浅海地区，最后以波冲击和水淹没的方式产生与原子弹爆炸相比拟的巨大破坏力。从能量方面看，海啸是海底地震能量通过地壳和海水等介质向海岸传递的过程。由于海啸波长很大，可以传播几千千米而能量损失很小，所以这次印度洋地震震中在印尼苏门答腊岛附近，但距离震中很远的斯里兰卡却受灾最严重，连4500千米外的非洲国家索马里也产生了人员伤亡。

海啸的传播速度

波动有三个特征参数：波速、波长、周期（或频率）。海啸波的特点是波速快、波长及周期长，它在大洋中移行时，波长可达数十或数百千米（比海洋的最大深度还要大），波高仅为1米左右，周期2~200分钟，传播速度约每小时500~1000千米（与喷气式飞机的速度相当）。

海啸波是长波，回复力主要是重力，表面张力只产生次要的影响，故可以认为它是重力波。对这种长波来说，大洋算是浅水。研究指出，浅水面上水波波速 v 和波长无关，只由深度决定，其关系为

清楚地看到以下几个方向：①超强激光、②超快激光、③短波长激光、④宽调谐激光、⑤小型化和全固化激光器、⑥微型化和集成化激光技术，将是今后激光科研的主流。

科学技术的发展没有止境，激光科技的进展日新月异，可以预料：激光必将成为21世纪人类科技的宠儿。

（北京交通大学物理系 100044）