

# 超快强激光及其应用

## ——从2018年诺贝尔物理学奖谈起

常国庆<sup>1</sup> 魏志义<sup>1,2</sup>

(1. 中国科学院物理研究所 100190; 2. 中国科学院大学 100049)

激光是20世纪人类的重大发明之一,经过近60年的发展,已成为人们认识世界和改变世界的有力工具。由于其独特的性能,激光又有“最亮的光”、“最准的尺”以及“最快的刀”等美誉,并与我们的生活息息相关,如人们熟知的激光眼科手术、激光打印、激光武器、光纤通信、激光美容、激光测距等等。在科研领域,与激光物理相关的研究是非常活跃的内容,不断涌现出激动人心的发明和创造,与激光直接相关的诺贝尔奖已有十几项之多。2018年的诺贝尔物理学奖再一次颁给了从事激光技术研究的三位科学家:其中美国科学家阿瑟·阿斯金(Arthur Ashkin)因为发明光镊技术(Optical Tweezer)获得一半奖金;法国科学家杰拉德·穆鲁(Gérard Mourou)和加拿大科学家唐娜·斯特里克兰(Donna Strickland)因为发明啁啾脉冲放大(Chirped Pulse Amplification, CPA)技术而分享另一半奖金。实际上这两项发明相互之间没有多大关联,光镊技术大多用到低功率的连续激光,而啁啾脉冲放大技术针对的则是峰值功率极高的超短脉冲激光。超短脉冲激光,也被称为超快激光。经过激光物理学家的多年努力,超快激光技术已催生了多个崭新的学科,为我们认识世界提供了前所未有的强大工具。

### 一、啁啾脉冲放大技术发明之前的超快激光

激光的英文名称是LASER,全称是Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation,从英文名称的字面上解释,就是通过受激辐射对光进行

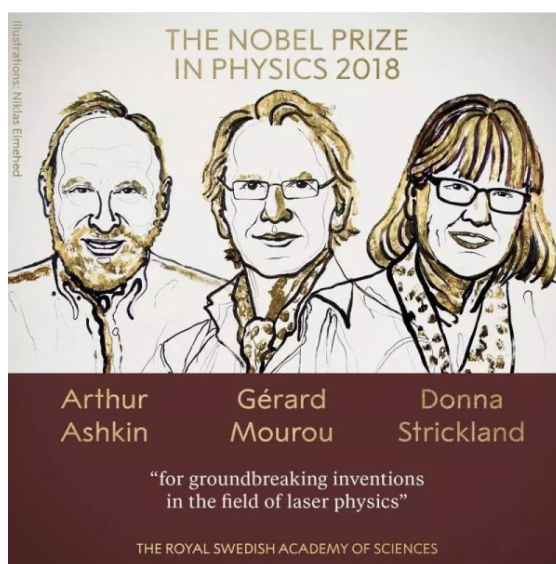


图1 2018年新获诺贝尔物理学奖的三位科学家

(图片来自 <http://prizenobel.org/>)

放大。在钱学森的建议下,LASER被翻译成激光。自梅曼(Maiman)发明第一台激光器迄今虽然已近60年,但激光器本身的基本结构变化不大,主要由增益介质、泵浦源和谐振腔三个部分组成。其中增益介质用于储存泵浦源提供的能量;谐振腔让光循环往复通过增益介质,从而将增益介质存储的能量转化为激光并输出到腔外;谐振腔可以容纳一系列分立的谐振频率,这样的谐振频率被称为激光的纵模(mode)。如果谐振腔中只有一个纵模起振,这种激光器称为单纵模激光器,或者单频激光器。如果让多个纵模在谐振腔内起振,并且通过锁模(mode locking)让这些模式之间具有固定的相位关系,那么输出的激光就是振幅随时间变化的序列脉冲,这

种脉冲激光人们称之为锁模激光。

锁模是产生超快激光脉冲的关键技术。1964年,在美国贝尔实验室工作的哈格罗夫(Hargrove)、福克(Fork)和波拉克(Pollack)率先报导了在氦氖激光器中实现的主动锁模。6年之后,奎赞加(Kuizenga)和西格曼(Siegman)发展了主动锁模理论,并获得了关于脉冲宽度的解析解,表明脉冲宽度与调制频率的平方根成反比。受限于调制频率,即使在主动锁模中使用高频(10 GHz以上)调制器,在时域上所形成的净增益窗口一般在几十皮秒(简写ps,  $1\text{ ps}=10^{-12}$ 秒,即万亿分之一秒)以上,因此难以获得脉宽更短的飞秒(简写fs,  $1\text{ fs}=10^{-15}$ 秒)量级的超快光脉冲。而另一种被动锁模技术摒弃了主动器件,代之以称为可饱和吸收体的被动器件。可饱和吸收体利用光和物质的某种非线性相互作用,使得在激光腔内运行的光脉冲功率高的部分经历的损耗小于功率低的部分,从而脉冲经过可饱和吸收体之后被压短。1972年,贝尔实验室的伊彭(Ippen)、尚克(Shank)和迪恩斯(Dienes)在染料激光器里实现了稳定的被动锁模,获得了长度为1.5 ps的光脉冲,这一实验结果可谓拉开了超快光学的帷幕,但被动锁模激光器产生超短脉冲的机制一直不明确,直到在美国麻省理工学院工作的豪斯(Haus)提出完整的被动锁模理论。根据响应速度的快慢,豪斯将可饱和吸收体分为快可饱和吸收体和慢可饱和吸收体两种。他在1975年发表两篇理论文章,分别讨论用这两种饱和吸收体实现被动锁模的物理机制。在理论指导之下,被动锁模染料激光器的工作性能不断获得提高,所能产生的脉冲也越来越短。1981年,贝尔实验室的福克等人发明了染料激光的碰撞脉冲锁模(Colliding Pulse Mode-locking, CPM)技术。他们通过特殊设计的环形腔Rh6G激光,使两个相反方向运行的脉冲在饱和吸收体中相撞,第一次将人们所能得到的超短光脉冲宽度推进到小于100 fs,标志着飞秒时代的到来。飞秒激光的出现可以说是超快激光发展史上的重大里程碑。虽然人们利用掺钕的钇铝石榴石晶体(Nd:YAG)、玻璃

(Nd:glass)、色心等材料作为增益介质也先后实现了这些激光的主动或被动锁模,但由于染料具有最宽的激光增益带宽,理论上支持最短激光脉冲的产生,因此飞秒染料激光器也就成为当时飞秒技术及超快现象研究的首选激光器。进一步通过对CPM染料激光进行腔内色散补偿并且利用外压缩技术,1986年人们创造了6 fs的最短脉冲宽度纪录,直到10年之后这一纪录才被固体掺钛蓝宝石激光所打破。

在超快激光研究中,一个恒久追求的前沿就是如何产生更短的光脉冲。然而对于特定的激光,其光脉冲的宽度有一个下限,该下限由脉冲的光谱形状及宽度决定;如果一个脉冲的宽度,即脉宽恰巧等于该下限,我们称其为变换极限脉冲。变换极限脉冲是一个给定光谱宽度所能允许的最短脉冲,光谱越宽,对应的变换极限脉冲也就越短。简而言之,产生更短光脉冲的关键在于获得更宽的脉冲光谱。但是激光增益介质具有一定的带宽,限制了锁模脉冲的光谱宽度,也必然限制了所能获得的变换极限脉冲的宽度。要想进一步缩短脉宽,必须想办法展宽脉冲的光谱。

1966年,高锟预言石英光纤的损耗可以降到20 dB/km,从此拉开了光纤通讯的帷幕,也直接促进了非线性光纤光学这一学科的快速发展。1978年,在贝尔实验室工作的斯奈伦(Stolen)等发现,将超短脉冲耦合到光纤中后,脉冲在传输过程中,会通过自相位调制这一非线性效应产生新的光谱成分,进而导致脉冲的光谱被展宽。由于光纤中的色散效应,该脉冲在时域上也被展宽了,比在光纤输入端的脉冲还要宽。1982年,该实验室的尚克等人利用一对光栅补偿光脉冲经过光纤之后产生的群延时色散,从而将脉冲压缩到变换极限。由于脉冲的光谱已经被自相位调制所展宽,那么压缩后的脉冲也就比入射到材料里的起始脉冲要短。他们利用该方案,将从CPM染料激光器输出的90 fs脉冲压缩到了27 fs。

激光脉冲与物质之间的相互作用依赖于光的峰值功率。由于超短激光脉冲将能量集中在很短

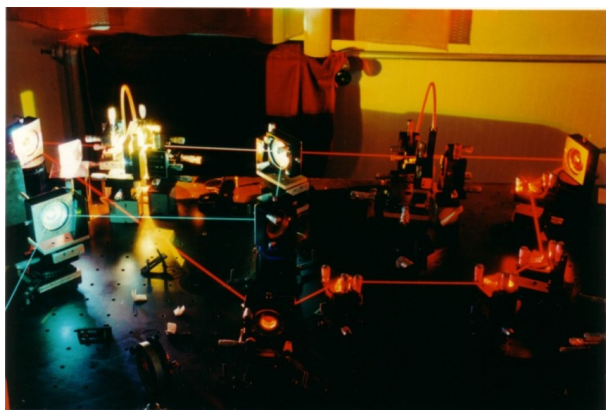


图2 典型CPM飞秒染料激光器(中国科学院西安光机所提供)

的时间内,对应着非常高的峰值功率,因此能够与物质进行非常强的非线性相互作用,从而直接催生了另外一门学科——极端非线性光学,极端非线性光学的发展,又反过来对超快激光脉冲的峰值功率提出了更高的要求。

激光脉冲的峰值功率正比于脉冲能量与脉冲宽度的比值。因此,除了不断减小脉冲宽度外,增加脉冲能量也能有效提高脉冲的峰值功率。但由锁模激光器直接产生的超快激光脉冲的能量一般都很低,增加脉冲能量需要利用后续的激光放大器来实现。与激光振荡器相比,激光放大器一般只需要增益介质和泵浦源,通过不断放大激光脉冲,可以将脉冲的峰值功率提高几个数量级。但到20世纪70年代,这一方案遇到了瓶颈,因为当脉冲峰值功率被放大到兆瓦(1兆瓦等于1百万瓦)量级后,会和增益介质本身产生非线性相互作用,所导致的自聚焦效应不但破坏光束质量,甚至损坏放大装置。正是因为这一难以逾越的障碍,导致超快激光脉冲的峰值功率在长达10多年的时间里基本停滞不前,如何解决该难题,需要崭新的激光放大技术。

## 二、啁啾脉冲放大技术的发明

1977年,穆鲁离开他的出生地法国,加入美国罗切斯特大学久负盛名的光科学中心,在那里创建了超快科学课题组,其研究方向包括太赫兹波(THz)产生、皮秒电子衍射、电光采样、时间分辨光谱学等

超快光学的前沿课题。穆鲁当然也一直苦苦思索如何突破非线性导致的放大器损坏问题,将超短激光脉冲的峰值功率放大到更高。1982年之后,为了将激光脉冲压缩的更短,国际上常用的技术是先利用光纤对激光脉冲进行光谱展宽、再利用光栅进行色散补偿。穆鲁意识到,激光脉冲的频谱包括不同的频率分量,不同的频率分量在光纤中传输的速度不同,因而脉冲会在传输过程中逐渐变宽,其峰值功率也会降低。因此,如果在放大一个超短脉冲之前,先用很长的光纤将脉冲在时域上展宽,降低其峰值功率,那么其后将该被展宽的脉冲进行放大,便可以有效抑制有害的非线性效应;放大之后,再利用光栅对将脉冲进行时域压缩。该技术的原理类似于雷达中的无线电信号放大,这样,通过展宽-放大-压缩就可以突破传统的直接放大所面临的瓶颈,得到峰值功率极高的超短光脉冲。

实验验证工作由刚加入穆鲁课题组的博士生斯特里克兰所完成。她首先利用康宁公司提供的1.4千米的单模光纤实现脉冲时域展宽,之后利用钎玻璃再生放大器对展宽后的脉冲进行放大,最后通过一组平行放置的光栅对压缩放大后的脉冲。在该实验中,斯特里克兰获得了单脉冲能量达到1毫焦的2皮秒脉冲,对应的峰值功率高达几百个兆瓦,远远超过由于自聚焦效应所限制的兆瓦量级峰值功率。这项技术有一个非常有趣的名字:啁啾脉冲放大(CPA)。啁啾(读作“zhōu jiū”)是chirp一词的中文翻译。被放大之前的脉冲经过光纤展宽后,由于不同频率成分传输速度不一样,导致脉冲的瞬时频率会随着时间变化。在中文里,啁啾是形容鸟叫的声音,如果仔细听,就会发现鸟叫的声音频率也会随时间变化,先低后高。在超快光学中,啁啾已经成为一个异常重要的物理术语。

穆鲁和斯特里克兰的实验结果于1985年发表在*Optics Communication*上。即使在那个时候,*Optics Communication*也是一份比较普通的光学期刊,但这丝毫没有影响到该工作的重要性。随后几年之中,越来越多的课题组利用CPA技术,不断刷

新超短脉冲峰值功率的世界纪录,也从而诞生了超强超快激光这一研究领域。

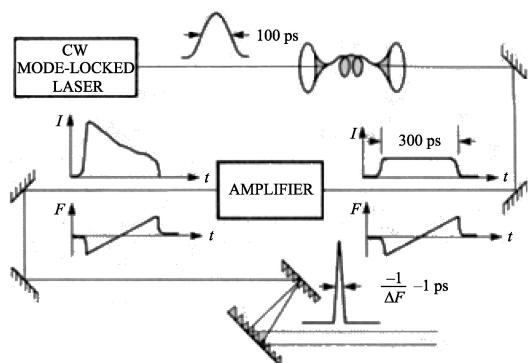


图3 啁啾激光脉冲放大原理结构图(来自穆鲁等人1986年*Laser Focus World*上的文章)。CW MODE-LOCKED LASER:连续锁模激光器,AMPLIFIER:放大器

斯特里克兰在穆鲁的指导下,于1988年从罗切斯特大学获得博士学位,之后在加拿大National Research Council、美国劳伦斯利弗莫尔国家实验室以及普林斯顿大学从事过科研工作。1997年,她作为助理教授加入加拿大滑铁卢大学,成为该校物理系历史上第一位女性全职教授。在该校工作后,她进一步开展了两台飞秒CPA系统同步、中红外飞秒激光产生等前沿工作的研究,并取得重要进展,于2013年当选为美国光学学会主席。当斯特里克兰获得2018年诺贝尔物理学奖时,她的职称还是副教授。当新闻记者问她为什么不是正教授时,斯特里克兰回答说“我从来没有去填那些申请正教授的表格。我做我想做的事情,而填那些表格不值得去做。”在诺贝尔物理学奖的历史上,斯特里克兰是第三位女性得主。第一位是1903年获奖的居里夫人,第二位是1936年获奖的玛丽亚·格佩特-梅耶(Maria Goeppert-Mayer)。

### 三、啁啾脉冲放大技术发明之后的超快激光以及应用

如前所述,如何产生更短的脉冲宽度和更高的峰值功率一直是超快激光发展中最受关注的前沿。利用飞秒量级的激光脉冲研究物质内的动态过程,可以对原子和分子进行拍照,让科学家们洞



图4 2011年穆鲁访问中国科学院物理研究所并做学术报告



图5 2013年时任美国光学学会主席的斯特里克兰访问中国科学院物理研究所

察微观世界的秘密。在加州理工学院工作的泽韦尔(Zewail)教授利用飞秒激光发展出超快激光光谱技术,用于研究化学反应动力学,该成就为他赢得了1999年的诺贝尔化学奖。为了研究自然界更快的过程及更为前沿的物理现象,科学家们需要发展新的超快激光技术,以获得更短更强的激光脉冲。

但是,20世纪80年代泽韦尔教授所使用的当时最先进的飞秒染料激光器存在着功率低、稳定性差等一系列固有不足。随着一种新的宽带固体增益介质——掺钛蓝宝石晶体的出现,飞秒激光的实用化发展迎来曙光。1991年,英国圣安德鲁斯大学西贝特(Sibbett)教授领导的研究组意外发现该激光器在特定的条件下能够稳定的实现自锁模运行,这种基于固体克尔透镜效应的锁模技术的横空出世,



图6 1999年诺贝尔化学奖获得者美国加州理工大学教授泽韦尔教授

很快改变了超快激光的整体格局,不仅使得多年来复杂的激光锁模技术变得非常简单,而且所产生的飞秒激光峰值功率及运行稳定性大为提高,短短几年之内就让风行一时的飞秒染料激光器成了历史。

由于钛宝石晶体能提供大于400 nm的增益带宽,因此非常适合产生超短激光脉冲。随着人们能够越来越精确地控制激光器内的净色散,钛宝石激光器直接输出的脉冲也越来越短——到2001年,利用钛宝石激光器已经能够产生短于5 fs的光脉冲。其800 nm左右的中心波长,对应着单个振荡周期(Optical Cycle)仅2.7 fs左右的载波(Carrier),因此5 fs的该激光脉冲,其包络只对应两个载波周期。在超快光学里,一般把这样脉冲长度为几个载波周期的光脉冲称为少周期(Few-cycle)脉冲。要进一步突破飞秒量级达到宽度更短的阿秒( $10^{-18}$  s)量级,



图7 首次实现掺钛蓝宝石激光克尔透镜锁模研究组的英国圣安德鲁斯大学西贝特教授

锁模激光器就无能为力了。到目前为止,产生阿秒脉冲最可行的方法是高次谐波产生(High Harmonic Generation, HHG)技术,而少周期脉冲正是激发HHG产生阿秒脉冲的不二之选。但利用钛宝石激光器直接产生的少周期脉冲只有纳焦级的脉冲能量,而激发HHG所需要的能量在百微焦量级,前者相比于后者差了5个数量级。

为了能够激发HHG产生更短更强的阿秒脉冲,需要利用CPA技术将钛宝石激光器直接输出的脉冲放大到百微焦乃至毫焦量级,从而获得高能量的少周期脉冲。经过多年的努力,科学家们将这种峰值功率极高的少周期激光脉冲聚焦到稀有气体中,通过HHG这一非线性光学过程已能获得宽度只有几十阿秒的超短脉冲,从而将超快科学推进到阿秒科学的新时代。

除了用于产生阿秒激光脉冲外,利用CPA技术所获得的高峰值功率飞秒脉冲在高新技术领域中也获得了广泛的应用。经过聚焦后,这种峰值功率极高的超短脉冲不仅能够将能量集中在飞秒量级的时间内,而且集中在微米范围的三维空间内。因此在加工材料时,激光能量被快速准确地集中在作用区域,被去除的材料将带走大部分的激光脉冲能量,热量缺乏足够的时间形成热影响区。这一特点让飞秒激光能够对几乎所有材料进行“冷加工”。加工后材料边缘平滑,无需后续繁琐的工艺处理,降低加工时间和成本。因此飞秒激光在材料的微细加工、纳米结构制作、近视和散光的屈光手术、航



图8 首次产生并测量到阿秒激光脉冲研究组的克劳茨(Krausz)教授

空航天、微电子等方面得到广泛应用。与传统激光相比,由于在高精度加工领域的广阔前景,飞秒激光正在成为高端智能加工制造装备的核心部件。

在基础研究领域,科学家们利用CPA技术,不断提升着飞秒激光脉冲的峰值功率。这样的超强超快激光脉冲,能够为人类在实验室里创造出以前只能在恒星内部或者黑洞附件才能存在的极端物理条件。在这种极端条件下,激光与物质进行由相对论效应主导的非线性相互作用;物理学家们预言,当飞秒脉冲的峰值功率足够高时,聚焦后的光强足以极化真空,从而产生正负电子对,实现能量到基本粒子的转化,做到“无中生有”。

目前许多国家正在建设这样的超强激光装置。在穆鲁的建议主导下,欧盟正在建设未来国际上最强的激光装置——ELI装置,其输出的超短脉冲可望具有200拍瓦(1拍瓦等于1千万亿瓦)的峰值功率,经过聚焦后有望得到近 $10^{25}$  W/cm<sup>2</sup>超高强度,这将开启崭新的物理研究,揭示极端条件下的物理规律。

我国在超快超强激光具有非常扎实的基础,已经取得了一批国际领先的成果。CPA技术发明后,科技部先后启动“攀登计划”、“973计划”等项目,系统支持了CPA等飞秒激光技术的研究。近年来,中

科院物理研究所、上海光机所及中国工程物理研究院等单位,相继取得了突破世界纪录及峰值功率数拍瓦的结果。2011年,中国科学院物理研究所基于高对比度CPA技术,率先在国际上利用钛宝石激光装置取得了峰值功率大于1拍瓦的结果;2013年、2016年和2017年,中国科学院上海光机所相继研制成功2拍瓦、5拍瓦和10拍瓦的CPA放大激光装置。毫无疑问,我国科学家取得的相关成果,已在国际上形成重要影响,极大地提高了我国在该领域的国际地位。

穆鲁虽然已经74岁,但一直活跃在超快超强激光的学术前沿。就在几年前,瞄着更高的仄瓦(1仄瓦等于1000拍瓦)峰值功率,他领导成立了一个新的国际研究中心——The International Center for Zetta-Exawatt Science and Technology (IZEST, 国际仄瓦科学技术中心),目前全世界已有30多家研究单位加盟。依托该中心,穆鲁希望研究出新一代的激光技术,能够将激光的峰值功率在现有的水平上继续提高3~5个数量级。在他看来,一切皆有可能。有理由相信,超快激光领域将会涌现出更多的科研成果,助力人类在认知未知世界的路上走得更高更远。



## 科苑快讯

### 能够防止你晒过多阳光的纽扣型设备

站在阳光下,你很难找到一个恰当的平衡点。接触的阳光太少会导致维生素D缺乏和睡眠紊乱,然而晒太阳时间长又会晒伤皮肤,面临罹患皮肤癌的高风险。

目前,需要测量紫外线照射量只能依靠一直称为剂量计的设备,它有胸牌或手表大小,利用感光材料计算不同类型辐射(包括阳光)的照射量。但是,这种设备通常很昂贵,依赖对水损害敏感的电池组,必须用带子或夹子固定于衣服上,这样在海

滩玩一天就很麻烦。

进入这个迷你剂量计(minidosimeter),这个设备看起来就像个纽扣,直接贴在皮肤或衣服上,即使衣服湿了也不怕。它使用光电二极管,一种将光转换为电的二极管,不仅仅是测量晒到了多少阳光,而且还不需要电池。一个微型天线将测量数据无线传输到用户的智能手机上。

(高凌云编译自2018年12月5日 [www.sciencemag.org](http://www.sciencemag.org))