

更快、更高、更强——飞秒激光

席 炜



飞秒激光是 20 世纪 80 年代初期诞生并迅速发展起来的激光前沿研究领域和新的科学技术分支，它是目前人类观察微观世界，揭示超快运动过程的重要手段。科学家预测飞秒激光将为未来新能源的产生发挥重要作用。

一、飞秒激光的产生

根据激光器工作方式的不同，激光通常可分为连续激光和脉冲激光。脉冲激光是指以脉冲工作方式的激光器发出的光脉冲，简单地说，好比手电筒一样，合上开关立刻又关掉就是发出了一个“光脉冲”。用脉冲方式工作有它的必要性，比如发送信号、减少热量的产生等等。

近年来，超短光脉冲的产生、控制及应用获得了飞速地发展。人们通常将皮秒（ps， 10^{-12}s ）、飞秒（fs， 10^{-15}s ）光脉冲称之为超短光脉冲。从 20 世纪 60 年代激光的诞生到 20 世纪 80 年代，激光脉冲均处于皮秒量级。1981 年，弗克等人利用碰撞锁模技术从染料激光器中首次获得了飞秒激光脉冲，所谓锁模技术是指将激光器中同时存在的不同模式的激光脉冲实现相位锁定。通常飞秒激光系统由四部分组成：振荡器、展宽器、放大器和压缩器。在振荡器内，可利用锁模技术获得飞秒激光脉冲；展宽器将这个飞秒种子脉冲按不同波长在时间上拉开；放大器使这一展宽的脉冲获得充分能量；压缩器把放大后的不同成分的光谱再会聚到一起，恢复到飞秒宽度，从而形成具有极高瞬时功率的飞秒激光脉冲。20 世纪 90 年代以后，随着飞秒钛宝石激光器的研制成功，获得了高功率峰值、脉冲极短的飞秒激光，但其昂贵的成本，庞大的结构，复杂的操作严重阻碍了飞秒激光的应用。为了突破现有飞秒激光局限，随着光子晶体光纤的问世，新一代飞秒激光研究于 2000 年后蓬勃发展起来。在国际上，我国科学工作者首次实现了飞秒激光在 400~700nm 宽带连续可调谐，并研制成功国际上首台全光子晶体光纤飞秒激光放大系统，创造了 39fs 该技术当前最短脉宽纪录。近年来，科学工作者又将超短光脉冲推进到了阿秒（ 10^{-18}s ）量级。

二、飞秒激光的特点

第一，脉冲宽度极短。飞秒激光是一种以脉冲形式运转的激光，持续时间非常短，只有几个飞秒，飞秒的单位是 fs（femto-second）， $1\text{fs}=10^{-15}\text{s}$ ，光在真空中 1s 内传播的距离是 $3.0\times 10^8\text{m}$ ，而光在 1fs 内传播的距离仅为 $0.3\mu\text{m}$ ，比大多数细胞的直径还要短，相当于光的波长的距离，病毒的体长，CD 片的槽宽量级。

第二，经放大后峰值功率极高，可达太瓦（ 10^{12}W ）以上，经聚焦，峰值功率密度可达 $10^{18}\sim 10^{20}\text{W}/\text{cm}^2$ ，其强度超过了原子内部的库仑场，比目前全世界发电总功率还要多出百倍。

第三，它能聚焦到比头发的直径还要小的空间区域，使电磁场的强度比原子核对其周围电子的作用力还要高数倍。例如：将 1mJ 的能量集中在几个飞秒时间内并汇聚成直径为 $10\mu\text{m}$ 的光斑，其光功率密度可达到 $10^{18}\text{W}/\text{cm}^2$ ，将其换算成电场强度则为 $2\times 10^{12}\text{V}/\text{m}$ ，为氢原子中库仑场强（ $5\times 10^{11}\text{V}/\text{m}$ ）的 4 倍，这就有可能将电子从原子中直接剥离出来。

这些独有的特点使飞秒激光具有广泛而特殊的用途，它将对社会经济的发展起到巨大的带动作用。

三、飞秒激光的用途

飞秒激光在物理学、生物学、化学控制反应、光通信等领域中得到了广泛应用。飞秒激光的主要应用可以概括为四个方面，即飞秒激光在超快领域内的应用、在超强领域内的应用、在超微细加工中的应用和在光通信中的应用。

飞秒激光在超快现象研究领域中所起到的是一种快速过程诊断的作用。飞秒激光犹如一个极为精细的时钟和一架超高速的“相机”，可以将自然界中特别是原子、分子水平上的一些快速过程分析、记录下来，形成多种时间分辨光谱技术和泵浦探测技术。由于飞秒激光具有快速和高分辨率特性，它在病变早期诊断、医学成像和生物活体检测、外科医疗及超小型卫星的制造上都有着独特的优点和不可替代的作用。

飞秒激光在超强领域中的应用归因于具有一定

能量的飞秒脉冲的峰值功率和光强可以非常之高。这样的强光所对应的电磁场会远大于原子中的库仑场,从而很容易地将原子中的电子统统剥落出去,是产生激光等离子体、超短 X 光、新一代粒子加速器和激光核聚变快速点火的高新技术途径。物质在高强度飞秒激光的作用下会出现非常奇特的现象:气态、液态、固态的物质瞬息间变成了等离子体,这种等离子体可以辐射出各种波长的射线激光。高功率飞秒激光与电子束碰撞能够产生硬 X 射线飞秒激光、 β 射线激光以及正负电子对。高功率飞秒激光还可以将大气击穿,从而制造放电通道,实现人工引雷,避免飞机、火箭、发电厂等因天然雷击而造成的灾难性破坏。高功率飞秒激光与物质相互作用,能够产生足够数量的中子,实现激光受控核聚变的快速点火,从而为人类获得新一代能源开辟了一条崭新的途径。因此,飞秒激光是研究原子、分子体系高阶非线性、多光子过程的重要工具,与飞秒激光相应的能量密度只有在核爆炸中才可能存在。

飞秒激光用于超微细加工是飞秒激光用于超快现象研究和超强现象研究之外的又一重要应用领域。飞秒激光超微细加工是当今世界激光、光电子行业中的一个极为引人注目的前沿研究方向。与飞秒超快和飞秒超强研究有所不同的是飞秒激光超微细加工与先进的制造技术紧密相关,对某些关键工业生产技术的发展可以起到更直接的推动作用。用超短激光脉冲进行材料处理或加工,不仅可以改进用现有激光进行材料微加工的不足之处,而且还可以完成传统激光加工无法做到的事情。飞秒激光具有极高的三维光子密度,可以对各种材料实现逐层、微量加工;飞秒激光加工的热影响区域小,不存在长脉冲激光或连续激光加工中的等离子体屏蔽效应,这就使其能量利用效率和加工精度都非常高。例如,纳秒和皮秒激光加工时,在烧蚀区域周围融化层的污染会导致加工精度的降低。显微观测发现,纳秒和皮秒激光烧蚀孔的周围存在冠状物(图 1A、B),而飞秒激光烧蚀的孔洞外围非常平整(图 1C)。

当用飞秒激光加工透明介质材料时,加工过程不受材料本身的线性吸收系数的影响,同时,对材料表面或内部的缺陷不敏感。此外,从光和物质相互作用的角度来看,飞秒激光加工涉及的主要是多光子电离的过程,在机理上不同于传统激光加工。可以预见飞秒激光超微细加工技术在微电子、生物

芯片和新型材料等科学技术领域中都将是具有广泛应用。近日,南开大学现代光学研究所在飞秒激光对材料处理领域取得的创新科研成果,可望在以上方面取得重要应用。针对目前传统微细加工技术存在的诸多局限性,该项研究提出了利用飞秒激光超短持续时间和超高峰值功率的独特优势,通过控制脉冲参数,来实现金属表面自组织微米或纳米结构的快速、方便与灵活制备,并实验证实了激光诱导产生的多种微结构对入射光波具有非常显著的吸收性能。由于飞秒激光在金属表面诱导产生的微结构对入射光波具有增强吸收效应,这项研究结果有望在发展高效率太阳能电池和光学隐身等领域发挥重要作用。

另外,飞秒激光对超大容量光通信也起到了关键作用。人类正在步入知识经济时代与信息化社会,信息的流量以每年 34% 的速率增长。要有效地利用信息,就要不断提高信息的传输、交换与处理的速度。据预测,到 2010 年,通信系统的传输速率要求将达到 Tb/s 量级。由于受普通电磁波频率及电子在半导体中速度的限制,信息传输的速率和容量都受到限制。而光波的频率是普通电磁波的 10⁵ 倍,光速是半导体材料中电子速度的 1000 倍,光子还具有空间与波长方面的并行处理能力,因此,以光子作为信息载体的通信与信息处理技术将成为现代

通信的主体。飞秒技术为光通信提供了高重复频率的超短光源、超快速光开关、光调制器和光控测器。由于飞秒激光脉冲具有极短的脉冲宽度和与之相伴的宽带,它将为提高光时分复用和波分复用的信道数目提供方便,从而大大增加了光纤通信的容量。

(石家庄机械化步兵学院 050083)

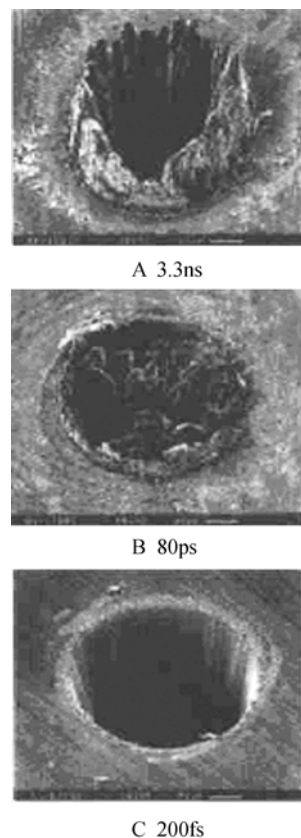


图 1 波长 780nm, 脉冲宽度不同的超快激光在 100 μ m 厚铜片上烧蚀的孔洞具有明显的差异