

## 飞秒激光器及其应用

飞秒激光是指利用锁模技术来获得的飞秒量级短脉冲的激光器。所谓飞秒，也叫做毫微微秒，即1飞秒只有10的负15次方秒。飞秒激光不是单色光，而是中心波长在800nm左右的一段波长连续变化光的组合，利用这段范围内连续波长光的空间相干来获得时间上极大的压缩，从而实现飞秒量级的脉冲输出。所采用的激光晶体为激光谱线很宽的钛宝石晶体。

高功率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。通过锁模技术将激光能量压缩到如此短的瞬间，再配合啁啾脉冲放大技术(CPA)，可以得到极高瞬间功率的输出激光，其激光的电场强度可以超过原子内原子核和电子之间的电场强度，可用于产生一些极端的物理条件，如天体中物理现象的模拟。

飞秒激光是过去20年间由激光科学发展起来的最强有力的新工具之一。飞秒脉冲是如此的短，目前已经达到了4fs以内(可见光-近红外波段)。1飞秒(fs)，即 $10^{-15}$ s，仅仅是1千万亿分之一秒，如果将10fs作为几何平均来衡量宇宙，其寿命仅不过1min而已；飞秒脉冲又是如此之强，采用多级啁啾脉冲放大(CPA)技术获得的最大脉冲峰值功率可达到百太瓦(TW，即 $10^{12}$ W)甚至拍瓦(PW，即 $10^{15}$ W)量级，其可聚焦强度比将太阳辐射到地球上的全部光聚焦成针尖般大小后的能量密度还要高。飞秒激光完全是人类创造的奇迹。

近二十年来，从染料激光器到克尔透镜锁模的钛宝石飞秒激光器，以及后来的二极管泵浦的全固态飞秒激光器和飞秒光纤激光器，虽然说飞秒激光的脉冲宽度和能量的记录在不断刷新，但最大进展莫过于获得超飞秒脉冲变得轻而易举了。桑迪亚国家实验室的R.Trebinio说：“过去10年中，(超快)技术已有显著改善，钛蓝宝石激光器和现在的光纤激光器正在使这种(飞秒)激光器的运转变得简洁和稳定。这种激光器现在人们已可买到，而10年前，你却必须自己建立。”比如，著名的飞秒激光系统生产商美国Clark-MXR公司将产生高功率飞秒脉冲的所有部件全部集成到一个箱子里，采用掺铒光纤飞秒激光器作为种子源，加上无需调整(NO Tweak)的特殊设计，形成了世界上独一无二，超稳定、超紧凑的CPA2000系列钛宝石啁啾脉冲放大系统。这种商品化的系统不需要飞秒专家来操作，完全可以广泛应用于科研和工业上的许多领域里。

根据飞秒激光超短和超强的特点，大体上可以将应用研究领域分成超快瞬态现象的研究和超强现象的研究。它们都是随着激光脉冲宽度的缩短和脉冲能量的增加而不断的得以深入和发展。

飞秒脉冲激光的最直接应用是人们利用它作为光源，形成多种时间分辨光谱技术和泵浦/探测技术。它的发展直接带动物理、化学、生物、材料与信息科学的研究进入微观超快过程领域，并开创了一些全新的研究领域，如飞秒化学、量子控制化学、半导体相干光谱等。飞秒脉冲激光与纳米显微术的结合，使人们可以研究半导体的纳米结构(量子线、量子点和纳米晶体)中的载流子动力学。在生物学方面，人们正在利用飞秒激光技术所提供的差异吸收光谱、泵浦/探测技术，研究光合作用反应中心的传能、转能与电荷分离过程。超短脉冲激光还被应用于信息的传输、处理与存贮方面。

第一台利用啁啾脉冲放大技术实现的台式太瓦激光的成功运转始于1988年，这一成果标志着在实验室内飞秒超强及超高强光物理研究的开始。在这一领域研究中，由于超短激光场的作用已相当于或者大大超过原子中电子所受到的束缚场，微扰论已不能成立，新的理论处理有待于发展。在 $10^{20}$ W/cm<sup>2</sup>的光强下，可以实现模拟天体物理现象的研究。 $10^{19}$ - $10^{21}$ W/cm<sup>2</sup>的超高强激光产生的热电子(200keV < E < 1MeV)可以加热大量离子而引发核聚变。这种惯性约束核聚变(ICF)快点火概念的最终实现将为国家安全和能源利用做出不可估量的贡献。

飞秒激光的另一个重要的应用就是微精细加工。通常，按激光脉冲标准来说，持续时间大于10皮秒(相当于热传导时间)的激光脉冲属于长脉冲，用它来加工材料，由于热效应使周围材料发生变化，从而影响加工精度。而脉冲宽度只有几千万亿分之一秒的飞秒激光脉冲则拥有独特的材料加工特性，如加工孔

径的熔融区很小或者没有；可以实现多种材料，如金属、半导体、透明材料内部甚至生物组织等的微机械加工、雕刻；加工区域可以小于聚焦尺寸，突破衍射极限等等。一些汽车制造厂和重型设备加工厂目前正研究用飞秒激光加工更好的发动机喷油嘴。使用超短脉冲激光，可在金属上打出几百纳米宽的小孔。在最近于奥兰多举行的美国光学学会会议上，IBM 公司的海特说，IBM 已将一种飞秒激光系统用于大规模集成电路芯片的光刻工艺中。用飞秒激光进行切割，几乎没有热传递。美国劳伦斯利弗莫尔国家实验室的研究人员发现，这种激光束能安全地切割高爆炸药。该实验室的洛斯克说：“飞秒激光有希望作为一种冷处理工具，用于拆除退役的火箭、火炮炮弹及其他武器。”飞秒激光能用于切割易碎的聚合物，而不改变其重要的生物化学特性。生物医学专家已将它作为超精密外科手术刀，用于视力矫正手术，既能减少组织损伤又不会留下手术后遗症，甚至可对单个细胞动精密手术或者用于基因疗法。目前人们还在研究如何将飞秒激光用于牙科治疗。有科学家发现，利用超短脉冲激光能去掉牙的一小块，而不影响周围的物质。美国 Clark-MXR 公司最近推出的 UMW 系列超快激光微加工工作台正是代表了各个领域里最前沿的商用飞秒激光微加工系统，它包括了用超短脉冲激光进行微加工所需的一切设备与配件，可用于微加工任何材料，生成亚微米精细结构，而不会对周边材料造成损害，不会造成材料飞溅，加工结果极其精确并具有高度可重复性。

我们相信，随着超短脉冲激光技术的进一步发展以及具有高可靠性的商用飞秒激光器的进一步完善，飞秒激光一定会在更多领域获得更为广泛的应用。