

“超快激光非线性光学”专题

前 言

不断发掘新知识和创造新技术以满足人类对自然世界认识的好奇心和对美好生活的向往是科技工作永恒的主题,而超快激光则是推动现代科技不断突破人们认识世界和改造世界能力的的时间和空间尺度极限的关键力量。超快激光一般是指脉冲宽度在飞秒量级的激光。因为能量在时间尺度高度集中,超快激光既可作为超级快门,为分子、电子运动等过程"拍照",认识物质动态信息;又可产生超高光强,诱导电离、相变甚至核聚变等极端非线性过程,从分子和原子层面改变物质。

一百多年前,以玻尔和爱因斯坦为代表的科学家开创了原子物理、光量子物理的科学描述,使人类对物质的认识进入原子、分子内部的微观世界。在由基本粒子所组成的微观世界里,其运动状态的改变常常发生在飞秒这样极其短暂的时刻,如分子的能量转移,化学键的断裂和形成,原子的横向弛豫和纵向弛豫,半导体中载流子的激发和复合等等。认识这些微观世界快速运动过程的时间精度需要达到飞秒量级,但是传统电子学技术无法满足这一需求。利用激光的锁模技术,在 20 世纪 70 年代实现了皮秒脉冲激光的运转,又于 1981 年实现了利用染料作为增益介质的飞秒脉冲激光的运转。随后兴起的以掺钛蓝宝石激光为代表的第二代飞秒激光技术,用固体增益介质取代了液体染料增益介质,使飞秒激光运转的稳定性大大提高,同时还提高了峰值功率,为物理、化学、材料和生命等基础学科领域中原子、分子的快速运动过程提供了一种全新的探测手段,推进了超快现象这一新研究领域的发展。人类由此进入了崭新的飞秒时代,相关研究成果相继于 1999 年和 2005 年被授予诺贝尔化学奖和物理学奖。

飞秒激光技术发展的另一个里程碑是 1985 年提出的啁啾脉冲放大技术,该技术为激光的峰值功率突破当时的兆瓦量级极限提供了可靠的方法。以这一技术为基础,结合参量放大技术,目前的飞秒激光峰值功率已经突破 10 PW,正在向更高水平快速迈进。功率如此高的激光所产生的超高光强使多光子过程轻而易举地占据了主导地位,飞秒激光与物质相互作用的研究进入了非线性阶段。超强峰值功率的飞秒激光脉冲,聚焦之后其焦点区域内的电场强度已经远远超过原子核对其价电子的库仑力。在其作用下,任何固态、液态和气态的物质都会在瞬间变成等离子体。由此发展起来的超快超强激光物理正在形成物理领域一个新的分支。而正在兴起的飞秒激光微纳精细加工技术正是利用了飞秒激光超

高峰值功率这一特点,在晶格热传导过程还来不及发生时,飞秒激光已经在微纳尺度内完成去除物质或使其改性的物理过程。从此,飞秒激光不仅是从极端时空尺度观察自然世界的先进方法,更成为可以通过相变、烧蚀、分子解离、电离、核裂变、聚变等过程对物质进行改性的强大工具,成为激光受控核聚变快速点火、新一代加速器、超精密微纳加工、医学手术、超分辨成像、大气遥感、太赫兹科学技术等诸多领域中具有光明应用前景的前沿技术,从而开创飞秒激光技术应用的新时代。由于上述对科技发展的重大推动作用,超快激光啁啾脉冲放大技术于2018年被授予诺贝尔物理学奖。

展望未来,超快激光技术发展的主要追求是:功率更高,脉冲更短,频率范围更宽,集成度更高。由飞秒激光器直接输出的波长主要集中在 $0.8\sim 1.5\ \mu\text{m}$ 的近红外波段,但是通过非线性光学过程产生的飞秒激光脉冲却覆盖了从X射线到太赫兹波的超宽波段,利用超强飞秒激光和电子束相互作用的汤姆逊散射效应,可以产生相干的硬X射线,波长达 $0.04\ \text{nm}$ 。飞秒强激光与稀有气体原子的相互作用引发的高次谐波,可获得软X射线波段的相干辐射,波长覆盖数十纳米至几纳米。飞秒激光在晶体中的二倍频、四倍频、六倍频效应可将近红外飞秒激光变换至可见、紫外、极紫外和真空紫外波段,直至 $150\ \text{nm}$,与高次谐波的软X射线波段相接。利用飞秒激光在晶体中的非线性参量过程,可以在近红外甚至中红外波段实现宽频谱范围的调谐。除此之外,利用飞秒激光在非线性介质中的传输,可以产生自相位调制、四波混频、孤子自频移等多种非线性效应,这些效应都可以使飞秒激光器输出的光脉冲从单一波长变换到紫外至红外波段、太赫兹波段,甚至产生超宽带的超连续光谱。

另一方面,2000年以来以光纤激光为代表的新一代飞秒激光技术,在新型光纤中引入增益介质,代替原来的块状固体或普通光纤,使其具有高效率、高(平均)功率、高光束质量,结构简单,运转稳定,飞秒激光技术由此走向系统集成化和应用普及化的通用技术的发展道路。

《中国激光》适时开展了本期“超快激光非线性光学”专题的组织工作,收录了28篇高水平论文,内容涵盖飞秒光纤激光技术、新型锁模技术、超精细激光加工、超时空分辨成像、超连续谱激光、强太赫兹辐射、分子原子电离及应用、超快光谱、人工控制大气应用等多方向的前沿进展。愿通过中国科学家的视野报导超快激光非线性光学及应用的最新进展,并分析未来发展趋势,为国内相关领域研究工作的开展提供富有价值的参考。

胡明列 刘伟伟 徐淮良

2019-04-23