

# 中国激光

## “极紫外光源及应用”专题前言

极紫外是现代科学技术研究和工业应用的重要光波段,其波长范围覆盖 10~121 nm,光子能量范围覆盖 10~124 eV。该光波段具有其他光波段没有的优秀特性:1) 元素周期表上几乎所有元素对该波段的光都有很强吸收,大多数元素的K或者L壳层电子在这个波段也都有着较为显著的特征吸收边,是探测和分辨元素的最佳光波段,因此在原子物理、等离子体物理和生物化学中都有着重要的应用价值;2) 纳米量级波长光是实现纳米结构 3D 成像的理想光波;3) 光子能量可以覆盖晶体材料的多个布里渊区,因此可以更加全面地探测纳米材料和量子器件的能带结构和量子特性。

但是该波段的光子能量大于原子的最低电离能,能发射这个波段光子的物质只能是等离子体或者自由电子,再加上任何物质对这个波段的光都有很强吸收,因此如何产生这个波段的光波一直以来都是科学家们面临的一个巨大挑战。20 世纪 50 年代,大型同步辐射极紫外光源的出现和发展初步满足了各类科学应用的迫切需求。极紫外光源在大型光源中的应用虽然斩获了巨大成功并得到了进一步发展,但光源体型巨大、造价昂贵,不便于普及使用。因此,人们同时也致力于小型极紫外光源的开发和应用。如早期(20 世纪 50 年代)小型化极紫外光源始于放电等离子体(Z-pinch DPP),以及稍后出现的激光等离子体(LPP)和激光维持放电等离子体(LSP)等非相干极紫外“灯泡”光源技术。

随着科技的进步,非相干极紫外(包括同步辐射和等离子体光源)已不能满足先进应用的需求,极紫外激光技术开始走向历史舞台。然而,极紫外激光技术面临着三个巨大挑战:1) 泵浦源。根据爱因斯坦 AB 系数公式,激光泵浦功率和激光输出波长的 5 次方成反比。例如一台功率为 10 W 的 10 nm 极紫外激光器就需要一座小型发电站专门为其提供能源。2) 激光增益介质。只有等离子体和自由电子才能作为激光增益介质,而且由于光子能量很高,上能级寿命很短,只有皮秒量级。3) 谐振腔。该波段光学镜片的反射率很低,上能级寿命为皮秒级,激光腔长不到 1 mm,实现产生激光振荡的激光腔十分困难。因此,虽然少数实验室已实现不稳定和无法长时使用的基于 LPP 或 DPP 自发辐射放大的相干极紫外光输出,但是目前只有大型自由电子激光器装置成功实现了真正稳定的可长时使用的极紫外激光输出。近 20 年来,随着飞秒激光技术的长足进步,基于极端非线性

性光学频率上转换的高次谐波技术为实现小型化极紫外激光带来了福音。高次谐波是通过高阶倍频方式产生相干极紫外光,该方法不但大大降低了产生高相干度极紫外光的成本和难度,而且通过使用少周期和载波包络相位(CEP)锁定的飞秒激光脉冲还可以产生亚飞秒(阿秒)量级的激光脉冲。阿秒脉冲的成功产生和应用还催生了2023年诺贝尔物理学奖。

为促进极紫外光源在世界科学前沿、国民经济主战场、信息与人工智能等领域中的全面发展,《中国激光》于2024年第7期出版了“极紫外光源及应用”专题。本专题在极紫外光源(包括激光等离子体、放电等离子体、自由电子激光、高次谐波和阿秒光源等),极紫外光学器件和探测器,以及极紫外光应用等领域中收录文章16篇,其中包括4篇特邀论文和8篇特邀综述,分别由国内有影响力的团队撰写,反映了我国本领域最新的研究成果及研究进展。

展望未来,为了满足先进人工智能(AI)技术对计算机算力呈爆炸性提升的需求以及对量子计算机芯片量产的需求,极紫外光刻技术被大量应用于先进半导体芯片制造领域,这必将推动极紫外光源技术向更高功率、更低能耗、更低成本、更短波长、更短脉冲和更高相干度等多个方向发展。面对这百年未有之大变局,我国的激光工作者只要抓住机遇,自力更生,不懈努力,必将突破技术瓶颈,在超短波长激光及其先进应用领域中取得卓越成就。

李儒新, 张晓世, 曾志男, 胡明列

2024年3月6日