

激光——照亮我们的神奇之光

——纪念激光器诞生 60 周年

钟敏霖

(清华大学材料学院, 北京 100091)

今年是激光诞生 60 周年,是值得纪念的一年。激光是 20 世纪以来,继原子能、计算机、半导体之后,人类科学史上的又一重大发明,被称为“最快的刀”、“最准的尺”和“最亮的光”。激光的诞生使人类掌握了一种无与伦比的强大光源和工具,大大推进了我们的科技进步,也照亮了我们的生活。

美国当地时间 1960 年 5 月 15 日,33 岁的西奥多·梅曼(Theodore H. Maiman)博士抢在几个研究团队之前,在美国休斯飞机公司休斯实验室点亮了第一台激光器,这台红宝石激光器发出的第一束 $0.6943\ \mu\text{m}$ 的红色脉冲激光震惊了学术界,也开启了全新的激光新纪元。

梅曼研发的红宝石激光器结构简单但精巧,他在直径 10 mm、长 20 mm 的红宝石晶体两端镀上银膜,在一端开个小孔作为输出口;将红宝石晶体放在螺旋形的氙灯灯管中心,然后放进高反射的圆筒之内,这样就组成了激光器的三个基本单元,即红宝石晶体作为工作物质,脉冲氙灯作为激励电源,镀银的晶体两端作为谐振腔。当脉冲氙灯接通电源后,氙灯发出的光被红宝石晶体中的特定能级吸收,经受激辐射光放大产生 $0.6943\ \mu\text{m}$ 的激光输出。

激光是自然界中原本不存在的光,是完全由理论预言并经过大量科学家长期不断探索最终产生的光。1916—1917 年,爱因斯坦深入研究了光的辐射理论,提出自发辐射、受激辐射和受激吸收的概念。自然界中的发光现象,如阳光、月光、灯光、烛光、萤光、火光、闪光、磷光等,均可归入自发辐射范畴,其特征是产生的大量光子完全处于随机、无序、不同方向、各不相干的状态。而受激辐射概念则预言了一种全新的发光机理,但要实现这样一种有别于自然的发光现象,需要打破热力学平衡状态,解决一系列概念性和原理性问题,其中里程碑式的突破包括:1928 年 Ruldolph W. Landenburg 证实受激辐射的存在,1940 年 Valentin A. Fabrikant 提出粒子数反转方法,1950 年 Alfred Kastler 提出光学泵浦方法(1966 年获诺贝尔物理学奖),1951 年 Charles H. Townes 发明第一台波长 1.25 cm 的 NH_3 微波激射器(Maser),1956 年 Nicolas Bloembergen 首先建议三能级固态 Maser(1981 年获诺贝尔物理学奖),1958 年 C. H. Townes 和 A. L. Shawlow 在《物理评论》上发表文章提出激光产生的原理性方案(Shawlow 于 1981 年获诺贝尔物理学奖),1959 年 Gordon 提出 Laser 术语,1960 年 Theodore Maiman 研

制成功第一台红宝石激光器。1964年,麻省理工学院 Charles H. Townes 教授与前苏联莫斯科列别杰夫物理研究所 Nicolay Gennadiyevich Basov 博士和 Aleksandr Mikhailovich Prokhorov 博士,因为在与微波激射器和激光产生直接相关的量子电子学领域的基础性工作而获得诺贝尔物理学奖。一方面,梅曼作出了自己的杰出贡献;另一方面,梅曼是幸运的,经过无数学者在 44 年间的攻关突破,在通往激光器的道路上,前人已经为他扫清了主要障碍。梅曼曾两度获得诺贝尔奖提名,获得富兰克林学会、美国物理学会、光学学会和以色列沃尔夫基金会等多个奖项,1984 年入选“美国发明家名人堂”,是美国国家科学院和工程院院士,也是美国激光学会的发起人之一。

激光(Laser, Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation)是一种受激辐射放大的光,其基本特征是成千上万光子的光学特征(包括光子频率、相位、方向等)是一模一样、齐心协力、步调完全一致的,这促成了激光强大的威力和能力。受激辐射光放大的发光机理和光学谐振腔的作用使激光具备四大特性,即亮度高、方向性好、单色性好、相干性高,也使激光束在空间分布、时间分布和偏振方面具有特色,让激光成为一种神奇之光。

激光的强大之处在于可以将一束高功率的激光束聚焦成极小的焦斑(如微米级),形成极高的功率密度,可达 $10^{26} \sim 10^{28} \text{ W/cm}^2$ 。功率密度为 $10^6 \sim 10^9 \text{ W/cm}^2$ 的激光束足以在瞬间使金属表面局部区域熔化、气化、蒸发、电离,形成焊接、打孔、切割等材料加工过程;功率密度达到 $10^{26} \sim 10^{28} \text{ W/cm}^2$ 的激光束则具备核聚变所需的能量密度,可用于惯性约束核聚变研究,深入到与原子核的相互作用范畴。激光束是人类已知的最高能量密度的高能束流。激光的神奇之处在于可以连续或者脉冲输出,其脉冲宽度可以是毫秒级(10^{-3} s)、纳秒级(10^{-9} s)、皮秒级(10^{-12} s)、飞秒级(10^{-15} s)甚至阿秒级(10^{-18} s),这样的脉冲宽度短于自然界中的许多超快过程,比如光合作用过程和电子弛豫过程等,可用于极快作用过程的观测,分子级甚至原子级的材料去除和加工,也可用于极精密的过程比如近视眼的治疗等。激光的神奇之处在于可以输出不同的波长,从中红外(CO_2 激光,波长 $10.6 \mu\text{m}$),到近红外(Nd:YAG 激光,波长 $1.06 \mu\text{m}$),到可见光(绿光激光,波长 532 nm),到紫外(266 nm),到深紫外(134 nm)和极紫外区(13 nm)。目前已知高集成度、最小线宽(7 nm)的芯片只能由极紫外波长的光刻来实现。激光的神奇之处在于,激光可以作用和加工任何材料:从金属与合金材料,到无机非金属材料,到高分子材料,到复合材料等;从最硬的金刚石,到脆性的陶瓷和玻璃,到兼备强韧性的钨、钛合金、不锈钢、铜、铝合金等金属,到软性的橡胶、塑料、皮革,到天然的石材、木材等,甚至包括人体器官在内的各种生物材料,激光都能进行形状加工和性能改变,无所不包、无所不能。

神奇的激光照亮了我们的科学研究

激光的出现大大拓展了我们的研究领域,一系列新的学科和研究领域出现,如信息光电

子、激光医学与生物光子学、非线性光学、超快光子学、激光化学、量子光学、超快激光物理等，也衍生出一批新的技术研究，如激光制造、激光检测与计量、激光全息、激光光谱分析、激光雷达、激光制导、激光分离同位素、激光可控核聚变、激光武器等。以中国知网检索到的信息为例，从1987年至今，共有58112篇博士硕士学位论文从事与激光相关的研究，排名前40的学科有物理、电子科技、金属学及工艺、临床医学、控制工程、材料、计算机、信息通信、化学、通用技术、化学工程、仪器仪表、电气工程、基础医学、航空宇航、生物、测绘、交通运输、机械工程、环境、汽车工程、武器工业、动力工程、原子能、药学、建筑科学、地质、中医与中西医结合、力学、食品、冶金工程、矿业、石油天然气、中医与方剂、轻工、大气、工商管理、船舶工程、林学、工业经济等，包罗万象，覆盖面极为广泛。检索到中国期刊发表的涉及激光的论文有240900篇，从1979年的年发文量1000篇至2019年的年发文量10000篇，几乎呈线性增长。发文量超过1000篇的前15个主题包括激光、激光技术、激光熔覆、钕激光、激光雷达、激光器、激光焊接、护理、输尿管结石、输尿管镜、飞秒激光、显微组织、应用、测量和数值模拟，覆盖了多种学科。

神奇的激光照亮了我们的技术应用

经过60年的研究发展，激光应用无所不包、范围极广，涉及激光制造、通信、测量、信息处理、医疗、军事、农业、文化教育及科学研究等各个领域，是一项通用型技术，对促进科学技术进步与发展、形成新的产业、提高人类健康和生活水平作出了卓越贡献，并继续发挥着越来越重要的作用。2010年激光诞生50周年时，美国国际光学工程学会、光学学会和激光学会等机构，组织世界各地的激光领域科学家，从成千上万的激光应用中总结归纳了26项亮点应用，包括光学相干层析成像、光纤光通信、光腔环形衰荡光谱、激光切割、激光标记、飞秒频闪谱、条形码扫描器、激光笔、激光光刻、DVD和CD播放机、激光演示与全息术、激光眼科医疗、微波激光器与宇宙背景微波辐射、激光干涉仪、激光核聚变、激光雷达（光探测和测距）、激光陀螺、激光导星自适应光学、入侵者激光探测、光镊、量子信息处理、光速减慢、超快摄影、激光制导、激光冷冻、激光推进与加速。如果在激光60周年时要增加一些亮点应用，我个人觉得，至少我们可以添加军事领域的激光武器（激光炮、激光反导弹、反卫星武器），农业领域的激光育种，医疗领域的激光治疗癌症，测量领域的引力波干涉测量，制造领域的激光焊接、激光3D打印、激光微纳米制造、激光清洗，当然我们可以列出更长的单子。

激光制造一直是激光应用的重要领域，从制造角度讲，激光制造技术涵盖了三个尺度：1) 激光宏观材料加工（毫米级及以上尺度加工），包括激光表面工程（激光相变硬化、激光重熔、激光合金化、激光熔覆、激光非晶化、激光冲击硬化、激光毛化与织构化、激光清洗、激光抛光、LCVD、LPVD），激光焊接、激光切割、激光制孔、激光标记、激光雕刻，激光3D打印、激光烧结、激光折弯；2) 激光微加工（微米量级）：包括激光微焊接、激光精密切割、激光精密钻孔、激

光烧蚀、激光微熔覆、激光制备表面微米结构；3) 激光纳米制造(纳米量级):包括飞秒激光直写、双光子聚合、干涉光刻、接触离子透镜序列、激光诱导周期表面结构、纳米颗粒激光制备、表面纳米结构、激光纳米组装等,覆盖了非常广泛的制造技术。

神奇的激光照亮了我们的产业

经过 60 年的研究发展,与激光相关的产品、技术和服务已经遍布全球,形成了丰富和庞大的激光产业,渗透到各行各业,形成了较为完备的产业链分布。产业链上游主要包括光学材料及元器件,中游主要为各种激光器及其配套装置与设备,下游以激光应用产品、激光制造装备、消费产品、仪器设备为主。根据中国科学院武汉文献情报中心、中国激光杂志社和中国光学学会发布的《2020 中国激光产业发展报告》统计,2019 年,全球激光器销售额为 147.3 亿美元,包括材料加工与光刻市场、通信与光存储市场、科研与军事市场、医疗与美容市场、仪器与传感器市场、娱乐显示与打印市场,其中材料加工占 40.6%。2019 年中国的直接激光市场份额为 658 亿元,包括工业、信息、商业、医学和科研领域。中国规模以上激光企业超过 150 家,企业总数近千家,以激光加工和激光器相关领域为主。激光产业为中国制造、高端装备、智能制造的发展发挥了重要作用。

《中国激光》是一本历史悠久的知名优秀中文刊物,是中国激光领域的第一大刊,已发表近 9000 篇激光领域的学术论文,引领了学科的发展,培养了大批激光方面的人才,2019 年获得“中国科技期刊卓越行动计划”支持,必将为优秀论文发表在中国期刊上作出新的贡献。为纪念激光器诞生 60 周年,本刊邀请了活跃于科研第一线的知名中青年专家,撰写了一批有份量的综述和研究论文,组成“纪念激光器诞生 60 周年专题”,内容包括激光器研究与进展、激光材料、光场与激光束特性、激光制造、光子神经网络、激光空间应用与新应用、激光大科学装置等,展示了激光与相关领域的最新研究、进展和未来发展趋势,为激光器诞生 60 周年添上了亮点和色彩。

从爱因斯坦一个精心的理论预言,经过 44 年诞生了一个精致的激光器件,发出第一束精美的红色光束,激光束穿越了 60 年的时空,发出灿烂的光芒,带来了如此之多的惊喜和无所不在的影响。未来的岁月,鉴于其无与伦比的强大、精细、准确,激光无疑将会照亮科技进步的更多领域和我们生活的方方面面。