

超短脉冲激光及其相关应用的一些基本知识

朱晓农^{1,2*}, 包文霞^{1,3}

¹南开大学现代光学研究所, 天津 300350;

² AdValue Photonics Inc., USA AZ Tucson 85706;

³广东华快光子科技有限公司, 广东 中山 528437

摘要 从啁啾脉冲放大技术到精密光谱学光频梳, 从超分辨荧光显微术到飞秒化学, 这些(分别获得 2018、2005、2014、1998 年度诺贝尔物理学奖和化学奖)举世瞩目的科学成就, 无不彰显了超短脉冲激光对人类科技创新和认知力的深远影响。对超短脉冲激光的特点、表征方法、产生与放大途径等一些重要基础知识进行回顾, 对用于先进制造业中的超短脉冲激光系统的基本光学结构、各种主要技术指标及实际工业加工应用中一些关键激光参数的合理选择予以介绍。最后还呈现一幅在多年教学实践基础上绘制的“超快激光光学”学习路线图, 并以此作为对超短脉冲激光相关科学技术知识框架的一种整体描绘。

关键词 激光光学; 超短脉冲激光; 超快激光; 超快激光工业应用; 激光加工

中图分类号 O437; TN248; TN249

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201946.1200001

Fundamentals of Ultrashort Pulse Laser and Its Applications

Zhu Xiaonong^{1,2*}, Bao Wenxia^{1,3}

¹ Institute of Modern Optics, NanKai University, Tianjin, 300350, China;

² AdValue Photonics Inc., Tucson, AZ 85706, USA;

³ Guangdong Huakuai Photonics Technology Co., Ltd., Zhongshan, Guangdong 528437, China

Abstract Ultrashort pulse (USP) lasers have spearheaded great innovations in science and technology, as evidenced in their wide range of applications from chirped pulse amplification to optical frequency comb-associated precision spectroscopy and from super-resolution fluorescence microscopy to femtosecond chemistry. These outstanding scientific achievements (respectively awarded by the 2018 and 2005 Nobel Prizes in Physics, and 2014 and 1998 Nobel Prizes in Chemistry) have sufficed to evidence the profound and far reaching influence of USP laser on the innovations of science and technology, and the cognitive power of humankind. Herein, we review some of the fundamental knowledge regarding the main characteristics, characterization methods, and generation and amplification methods of USP lasers. Specifications and optical schematics of industrial USP laser systems, as well as the subject of how to select USP laser parameters for practical applications, are specially discussed. A pedagogical “ultrafast laser optics” learning map is also introduced for providing an overall picture of this fast advancing and extremely fascinating field.

Key words laser optics; ultrashort pulse laser; ultrafast laser; industrial applications of ultrafast lasers; laser processing

OCIS codes 140.7090; 320.7090; 140.3430

1 超短脉冲激光简介

1.1 超短脉冲激光和超快激光

超短脉冲(USP)激光的一大特点是脉宽非常

短, 是无比短暂的闪光。但究竟多短才称为“超短”, 在激光科技领域, 一般把时间宽度在百 ps 即 10^{-10} s ($1 \text{ ps} = 10^{-12}$ s) 至几 fs ($1 \text{ fs} = 10^{-15}$ s) 之间的脉冲激光称为超短脉冲激光^①。超短脉冲激光器则是通常

收稿日期: 2019-05-07; 修回日期: 2019-06-22; 录用日期: 2019-08-02

基金项目: 国家自然科学基金(11274185)

* E-mail: zhu@advaluephotonics.com

①实际应用中, 激光脉冲的长、短、超短是相对的, 并非严格界定。通常可认为, 脉宽小于 1 ns (10^{-9} s) 的脉冲即为“超短”脉冲, 在 ns 与 μs 之间的脉冲为“短”脉冲, 而 ms 和 ms 以上的脉冲为“长”脉冲。几个 fs 乃至亚 fs 或 as (10^{-18} s) 脉冲可称为“极短”脉冲。

所说的皮秒激光器和飞秒激光器的统称。由于超短脉冲激光被广泛用于探测科学与工程领域中的超快动态过程,如原子中电子态激发、分子振转动弛豫时间、材料与电子器件(乃至高速电子检测仪器)的动态响应及各种爆炸冲击波的瞬态记录等,因此超短脉冲激光也常称为超快激光^②。由此,重点研究超短脉冲激光的光学分支,也被称为“超快光学”或“超快激光光学”^{[1-10]③}。

理论上,超短脉冲激光在空间中某一固定点处所对应的光波电场 $E(t)$ 可表示为

$$E(t) = E_0(t) \cos[\omega_0 t + \varphi(t)], \quad (1)$$

式中, $E_0(t)$ 是振幅包络函数, ω_0 是载波的中心圆频率, $\varphi(t)$ 是缓变化的相位因子。一般情况下,振幅包络和相位因子都是随时间的变化量。振幅包络函数 $E_0(t)$ 的时域分布决定脉冲的形状,典型超短脉冲激光的形状有高斯型、双曲正割型、准方波型(或高阶高斯型)、抛物线型等。相位因子 $\varphi(t)$ 意味着脉冲的载频可能不是常量(或存在频移),它与脉冲频率啁啾直接相关。

图 1 为按照(1)式计算的脉宽为 15 fs、中心波长为 800 nm、脉冲形状为高斯型的超短脉冲激光的归一化电场和瞬态光强。瞬态光强正比于 $E_0(t)$ 的平方,其分布曲线的半峰全宽(FWHM)被定义为脉宽。这个计算结果显示,当脉宽很短时,在脉宽内所包含的光振荡周期数就会相应减少。如对于中心波长为 800 nm 的光,其光频振荡周期约为 2.67 fs,如果脉宽为 5.5 fs,则脉宽内仅含 2 个光周期。这样的超短脉冲有时也被称为少数周期脉冲,是超短脉冲中的短脉冲,如双周期脉冲或单周期脉冲。在脉宽内脉冲周期数给定的前提下,光周期越短(等同于光频越高或光波长越短),脉宽就越短。在双周期脉冲的例子中,如果中心波长不是 800 nm 而是 8 nm,则

光频周期将变为 0.027 fs,脉宽将会是 0.05 fs (50 as)。实际上,这也正是目前为止实验中获得的阿秒脉冲都处在 X 射线波段的一个原因。

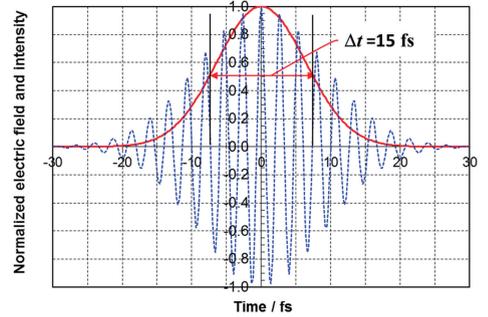


图 1 脉宽 15 fs、中心波长 800 nm、无啁啾高斯型超短脉冲激光的归一化电场(虚线)和瞬态光强(实线)

Fig. 1 Normalized electric-field strength (dashed curve) and transient intensity (solid curve) of 15-fs chirp-free Gaussian laser pulse with central wavelength of 800 nm

1.2 超短脉冲激光与超强激光

脉冲的峰值功率是脉冲能量与脉宽之比,即使在低能量的情况下,超短脉冲激光仍可以具有非常高的峰值功率。例如:脉冲能量为 100 μJ 、激光脉宽为 10 ps 时,峰值光功率为 100 $\mu\text{J}/10 \text{ ps} = 10 \text{ MW}$;脉冲能量为 10 μJ 、脉宽为 100 fs 时,峰值功率则达到 100 MW。(如果脉宽是 10 ns,则这两种脉冲能量的峰值光功率仅为 10 kW 和 1 kW,分别低了 3 个和 5 个数量级)。因此具有高峰值功率的激光脉冲经光束聚焦后,在焦点位置处的光强度极高。在这 2 个具体例子中,假定焦点处的光斑大小为 $10 \times 10 \mu\text{m}^2$,则焦点处的光强分别为 10^{13} W/cm^2 和 10^{14} W/cm^2 。目前世界上一些最强大的超短脉冲激光系统的峰值功率已经步入几十乃至上百 PW (1 PW = 10^{15} W),即 $10^{16} \sim 10^{17} \text{ W}$ 量级,其聚焦后的峰值光强预计在 $10^{22} \sim 10^{24} \text{ W/cm}^2$ ^[11]。这样高的光强^④所对应的电场强度将达到 $10^{12} \sim 10^{13} \text{ V/cm}$,高出原子内部电子与原子核之间的库仑场 3 个数量级。

值得指出的是,以微观层面参与相互作用的有效光子数目来划分,光与物质相互作用有 5 个截然不同的层次:1)单光子-线性光学区;2)少数光子(双

②应该指出,“超快激光”或“超快激光器”作为技术专用术语,在字面上也易导致一些误解,即使人误以为它是某种很快的光,而其实并非如此。超快激光即超短脉冲激光。

③与超短脉冲激光技术相关的科技文献(包括期刊论文、技术专著、会议论文、多媒体讲义、专利报告、学位论文等)的数量已经非常巨大。本文中引用的仅仅是其中我们相对熟悉并认为具有一定代表性的参考文献。对超短脉冲激光技术与科学最新发展有更多兴趣的读者,除可参加像 CLEO、Photonics West 等大型激光、光电会展外,还可以关注每两年召开一次、分别始于 1976、1997 年的系列专题国际会议, International Conference on Ultrafast Phenomena 和 Ultrafast Optics。前者 2018 年已是第 21 届,后者 2019 年为第 12 届。

④作为比较,不难估算出如果将太阳照射到整个地球表面的光聚焦到 1 cm^2 的面积上,则对应的光强约为 10^{17} W/cm^2 ,由此可以理解为何高能量超短脉冲激光被称为超强激光。

光子或三光子)-普通非线性光学区;3)多光子-强场区;4)极多光子-相对论场区;5)在光场作用下电子质动能高出其相对论能 $m_e c^2$ 的超相对论场区。这5个作用区所对应的光能密度由低到高不断增加,直至光强达到 10^{24} W/cm²。对从事研究光与物质相互作用的这5个区,尤其是后3个区域(或统称为高场物理)的科学家而言,超短脉冲激光是不可或缺的重要科学工具^[12]。在实际应用中,超短脉冲激光技术的发展与非线性光学技术相辅相成。通过用强 fs 激光在气体介质中产生多光子电离和极短波长的高次谐波,国际上已有多个研究团队获得了脉宽小于 100 as(即 10^{-16} s)的脉冲^[13]。

1.3 超连续光与光频梳

超短脉冲激光由于光强很强,在与稀有气体、玻璃材料或光学晶体相互作用过程中会伴随着各种非线性光学效应,如自相位调制、四波混频、自聚焦、光孤子自频移等。在一定条件下,这些非线性效应综合在一起会产生谱宽非常宽的新光谱成分,即所谓“超连续光”^[14]。与普通宽带光源不同,这种新型的超连续(或超宽带)光源不仅光谱强度高,而且可以保持(在一定程度上可控的)很强的时间、空间相干性,这决定了超连续光的作用不仅可以提高测量灵敏度和信噪比,而且可以扩大测量范围和适用性。因此,它可以用于光学相干层析、超快时间分辨光谱、光学参量放大器(可调谐相干光源)的种子光源、产生更短的激光超短脉冲等方面。因此,超连续光在计量、遥感、激光光谱学等各分支领域内得到了广泛的应用。

和任何其他形式的波动信号一样,超短脉冲激光作为光波段的短暂电磁波也存在时域与频域两种表述,两者互为傅里叶变换关系(图2中用双向箭头来表示)。对于单一光脉冲,其傅里叶频谱是具有一定宽度的单一平滑光谱线,脉冲越窄,谱线宽度越宽。当光脉冲为周期性脉冲序列时,其傅里叶频谱由一系列等间隔的窄谱线组成。脉冲周期 T 对应谱线间隔 $\Delta\nu_m$,即 $T=1/\Delta\nu_m$,脉宽则由所有窄谱线合在一起的光谱包络线的宽度来确定。由此可见,欲产生超短脉冲激光,尤其是要产生飞秒激光脉冲,激光器的增益谱宽必须足够宽。例如掺钛蓝宝石激光器,其增益谱宽可达到 200 nm 以上,可支持小于 10 fs 的激光脉冲。超短脉冲激光序列的等间隔频谱构成了极为精准的频率标尺^⑤,称为光频梳。脉冲越窄,频率梳也就越长。脉冲序列的重复性越好、越平稳,频率间隔则会越精准。超短脉冲激光光频

梳的产生为频率计量和超精密光谱学领域的发展带来了革命性的推动作用^[15]。

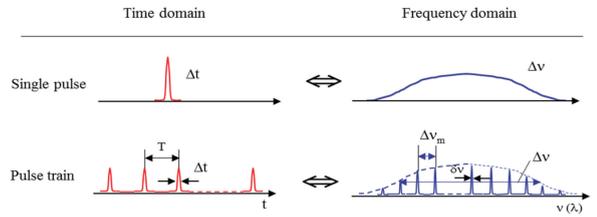


图2 超短脉冲激光时域、频域表述的对应关系示意图,两者间满足傅里叶变换关系

Fig. 2 Relationship between time- and frequency-domains of ultrashort laser pulses. Two domains form Fourier transform pairs

2 超短脉冲激光的表征

2.1 描述超短脉冲激光的主要技术参数

表1为超短脉冲激光的基本物理量及量与量之间的基本关系。实际应用中超短脉冲激光的空间特性十分重要,因为它会直接影响激光脉冲能流和激光脉冲强度。需要注意的是,脉冲激光的能流(密度)这个参数并不包含时间因素,但在光与物质相互作用或激光加工应用中,相同能流条件下,脉宽不同可能会产生截然不同的作用结果。

除脉宽、平均功率、脉冲重复频率外,衡量超短脉冲激光质量的两个非常重要的基本技术指标是时间带宽积(TBP, T_{BP})和光束参数积(BPP, B_{PP})。TBP是脉宽与相应光谱宽度的乘积,表征超短脉冲激光时间光谱特性;BPP是光束直径与光束发散角的乘积,描述激光脉冲的空间传输特性,理论上TBP和BPP各自均存在最小值,分别称为带宽(或傅里叶变换)极限和衍射极限,这两个极限条件对应理想情况。衍射极限也可等价于无量纲的物理量 M^2 。 M^2 与BPP的关系在表1中给出,通常 $M^2 \geq 1$, $M^2 = 1$ 即对应衍射极限。TBP在理想情况下的取值与具体脉冲波形有关,如达到带宽极限的高斯型脉冲的TBP为0.443,双曲正割型脉冲的TBP为0.315。

经过光放大系统放大后的超短脉冲激光与相应的入射光相比,一般情况下光束质量会有所下降。但通过设计与工程优化,大多数超短脉冲激光产品还是能够保持基模或准基模的线偏振高斯光束输出

⑤例如,对一台腔长在1~2 m的激光器而言,不难估算出其纵模间隔在75~150 MHz之间,即200 nm的增益线宽内可包含数十万计的激光纵模。基于激光实现受激辐射光,激光单一纵模的线宽一般很窄。

表 1 超短脉冲激光的常用技术参数

Table 1 Common technical parameters of ultrashort pulse laser

Laser parameter	[Unit], common unit	Relation
Central wavelength, λ	[m], nm, μm	
Pulse duration, Δt	[s], ps, fs	
Average power, P	[W], mW, W, kW	
Pulse repetition rate, F	[Hz], kHz, MHz	Also known as PRR
Bandwidth, $\Delta\lambda$ (or spectral width, $\Delta\nu$)	[m], nm, μm	$\Delta\nu = \Delta\lambda \times (c/\lambda^2)$ [Hz]
Polarization ratio, PR	(unitless)	
Radius of laser beam, w	[m], mm, μm	
Laser beam circularity, C	(unitless)	$w_x/w_y \leq 100\%$
Beam divergence, θ	[rad], rad, mrad	
Beam quality factor, M^2	(unitless)	$M^2 = \theta/(\lambda/\pi w) (\geq 1)$
Pulse energy, ΔE	[J], μJ , nJ	$\Delta E = P/F$
Peak power, P	[W], kW, MW	$P = \Delta E/\Delta t$
Pulse period, T	[s], ns	$T = 1/F$
Area of laser beam cross section, A	[m] ² , cm ²	$A = \pi w^2$
Energy fluence, F	[J]/[m] ² , J/cm ²	$F = 2 \times \Delta E/A$
Peak intensity, I	[W]/[m] ² , W/cm ²	$I = p/A = F/\Delta t$
Time bandwidth product, TBP	(unitless)	$T_{BP} = \Delta t \times \Delta\nu$
Beam parameter product, BPP	[m][rad], mm mrad	$B_{PP} = w \times \theta = (\lambda/\pi) \times M^2$
Pulse stability	(unitless), (p-p%) rms	
Beam pointing	[rad]/[°C], rad/°C	

状态[®], 根据需要, 通过光束变换也可以将高斯型分布的超短脉冲激光转变为类平顶光束及贝塞尔光束^[16]。在光偏振态敏感的应用中, 超短脉冲激光的偏振比, 即主要偏振方向能量与垂直方向的残余偏振分量光能量之比, 也是一个需要严格控制的技术指标。在某些应用中, 需要用到具有圆或椭圆偏振态的超短脉冲激光, 这可以在光路中加入 1/4 波片实现。不过, 需要额外注意的是, 当脉冲的宽度在几十 fs 以下时, 光路中任何器件及材料色散作用不能被忽略。

当飞秒激光脉冲的宽度短至仅含少数几个光场振荡周期时, 以 CEP (Carrier Envelop Phase) 描述的脉冲包络最大峰与脉冲载波振荡峰之间的时间差就变得十分重要。CEP 实际上也就是 (1) 式中相位 $\varphi(t)$ 为缓变量时所对应的常数项, CEP 的不同会导致一些非线性光学实验产生截然不同的效果。这就使得是否具有 CEP 锁定功能成为少数周期超短脉

冲激光器的一个重要的附加技术特征。在光频梳应用中, CEP 的稳定也至关重要。

2.2 两条反映脉冲激光重要基本关系的直线

图 3 为脉冲能量与脉冲重复频率的关系曲线, 其中假定平均功率为 30 W。对于平均功率高 (或低) 于 30 W 的情况, 只需向上 (或下) 适当平移图 3 中的曲线。该曲线表明, 对于给定的平均功率, 脉冲重复频率越高, 则单脉冲能量越低, 这一重要的基本规律与脉宽无关, 无论对 fs、ps、ns 脉冲均适用。对于超短脉冲激光系统而言, 通常光路前端的锁模激光器的工作点在脉冲能量-脉冲重复频率曲线的右下方区域, 而经过光放大器后, 其工作点会移至关系曲线的左上方区域。

类似于平均功率给定情况下脉冲能量与脉冲重复频率的关系, 光通量 (即脉冲能流) 确定时脉冲光强相对脉宽的关系, 是另一个对脉冲激光应用而言十分重要的关系曲线。图 4 为能流密度 F 分别为 100 J/cm²、10 J/cm² 和 1 J/cm² 三种情况下的光强脉宽曲线 (计算值), 同时标出几种典型应用的脉宽与光强的实验数据点。由图 4 可以明显看出, 脉冲能流密度一旦确定后, 脉宽越窄, 则脉冲峰值光强越强, 这也正是在激光加工过程中, 超

⑥ 激光谐振腔中的光场在空间上只能具有一些特定的分布, 简称“模式”或“激光模式”。它们分为纵模和横模两大类, 而横模又分为基模和高阶模。超短脉冲激光器一般仅以基模形式运转。

短脉冲激光所对应的峰值光强往往会远高于纳秒激光的原因。

在激光加工中光强不同时,激光与材料作用的物理过程往往不同(如相变、熔化、气化、电离、直接原子化等),从而导致最终加工效果不同。图4的实验数据点说明,不同的激光加工应用通常对应光强-脉宽曲线的不同区域。在某些要求特定光强的应用中,比如在金属表面生成接近完全无损的精细黑标,使用超短脉冲激光时(参见图4中部下方的星型标记),虽然其光强可与类似应用中的纳秒脉冲接近,但它的能流密度要明显低于纳秒脉冲激光。能够在较低能流密度的情况下仍然获得很高的峰值光强是超短脉冲激光加工的一个重要基本特征。

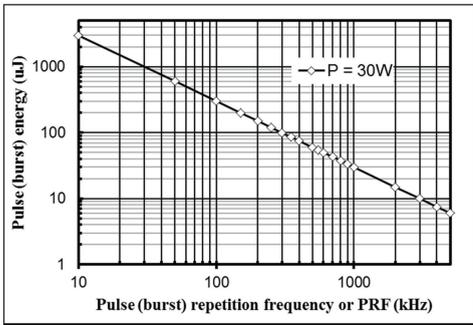


图3 脉冲能量相对脉冲重复频率的关系曲线,该关系也同样适用于脉冲串模式

Fig. 3 Laser pulse energy as a function of pulse repetition rate. Same relationship is found in pulse bursts

2.3 超短脉冲激光的量子图像

从量子理论的角度出发,可将经过透镜聚焦后的超短脉冲激光视为以光速传输的十分致密的“光子团”,如图5所示,图中 w 为入射光脉冲的半径, f 为透镜焦距, w_f 为透镜焦点处的光斑半径, δz 是光脉冲在传输方向上的空间尺度。脉冲越短, δz 将会越小。光子团在三维空间中任一瞬间的径向延展由光束聚焦条件给出,沿传输方向上则由脉宽乘以光速来确定。如一个10 ps的激光脉冲,其在传输方向上的空间尺度约为3 mm,而一个100 fs的激光脉冲则仅为30 μm 左右^⑦。超短脉冲激光的局域高密度光子团图像对于认识光

⑦由于光子的玻色子属性,空间微小区域内的光子密度几乎可以无限提高。这意味着尽管单个光子的能量很小(比如在可见光波段仅有几个eV),但巨大的光子密度仍然使得超短脉冲光子团的能量密度能够达到接近核爆中心的能量密度。

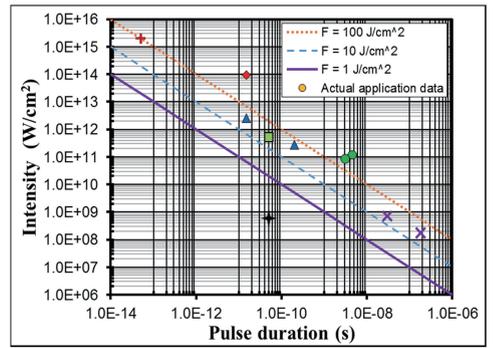


图4 峰值光强与脉宽的关系曲线。图中标出的实验数据点对应几种不同的激光应用。除中间靠下方的星型之外,自右下方至左上方,它们分别为:叉型,180 ns和30 ns,2 μm 激光PMMA透明塑料焊接;圆点,3 ns和5 ns,515 nm激光玻璃加工;三角,200 ps和15 ps,355 nm激光PI膜划线;方形,50 ps,515 nm激光在超薄玻璃上钻微孔;菱形,15 ps,1 μm 激光透明玻璃隐形切割;十字,50 fs,0.8 μm 激光真空条件下单脉冲烧蚀固体靶;星型,50 ps,1 μm 激光不锈钢等金属材料打黑标(中下方星型)

Fig. 4 Peak intensity as a function of pulse duration. Experimental data points correspond to different laser machining applications. From lower right to upper left: forks represent 180 ns and 30 ns pulses, and 2- μm laser is used for PMMA transparent plastic welding; solid circles represent 3 ns and 5 ns pulses, and 515 nm laser is used for glass machining; triangles represent 200 ps and 15 ps pulses, and 355 nm laser is used for scribing of PI film; square represents 50 ps pulse, and 515 nm laser is used for drilling micro holes in thin glass; rhombus represents 15 ps pulse, and 1 μm laser is used for stealth cutting of transparent glass; cross represents 50 fs pulse, and 0.8 μm laser is used for ablation of solid target in vacuum; star represents 50 ps pulse, and 1 μm laser is used for stain steel black marking

与物质相互作用的非线性现象、理解超短脉冲激光微细加工的基本原理大有裨益。光子密度越大,发生非线性作用的可能性越大,同时非线性效应的阶次也越高。正是由于这种很高的光能密度,超短脉冲激光可以在自身总能量并不高、甚至仅有 μJ 甚至nJ量级的情况下,仍然能够对材料产生烧蚀或其他改性效果,从而实现三维空间内近乎于数字化的微小尺度精准加工。

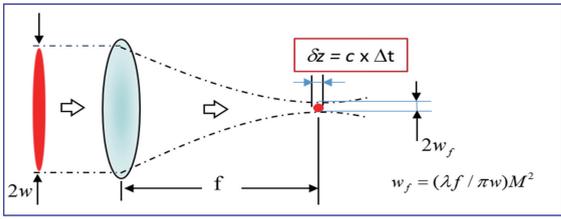


图 5 经过透镜会聚的超短脉冲激光等同于三维空间中的高密度光子团^⑧

Fig. 5 Ultrashort pulse laser that is focused by lens is equivalent to high density photon group in three-dimensional space

为说明聚焦后的超短脉冲激光作为三维空间中微小区域内高密度光子团,在与物质相互作用中的威力与加工精细度,给出会聚的近红外飞秒激光烧

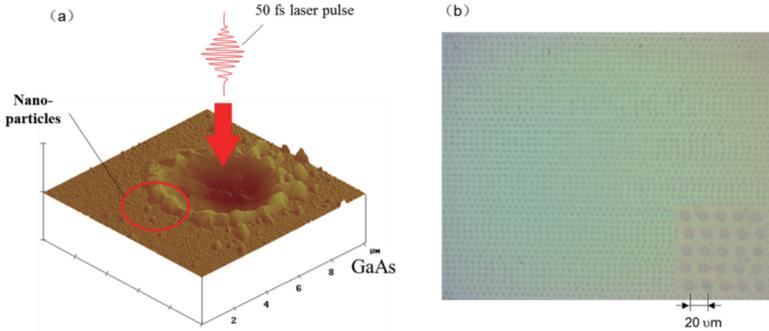


图 6 高密度光子团在与物质相互作用中的加工精细度的实例。(a)脉宽为 50 fs 的单脉冲飞秒激光在 GaAs 表面产生的微小烧蚀坑;(b) 50 ps 高重复频率脉冲串在 0.8 mm 厚硼硅玻璃表面产生的微型点阵,右下角方块为其中局部放大的区域

Fig. 6 Examples of processing fineness of high-density photon clusters interacting with matter. (a) Micro pits on GaAs sample surface produced by single 50-fs laser pulse; (b) micro dot matrix on 0.8 mm-thick borosilicate glass produced by high-repetition-rate 50-ps laser pulse. Inset on bottom right corner is local magnification region

3 超短脉冲激光的产生

3.1 锁模激光器

绝大多数超短脉冲激光器在稳定运行过程中,激光腔内仅存在一个光脉冲,如图 7 所示。每当该脉冲传输到激光谐振腔的输出端时,其中一部分透过输出镜,形成输出光脉冲。而剩余部分在激光腔内往返一次,并经过腔内光增益介质的放大后,再次回到输出镜时,又产生一次输出,如此周而复始,即

^⑧根据这样一个特点,有科学家将超短脉冲激光称为光子子弹,不过这个以光速飞行、由密集光子构成的子弹的空间尺度可以非常小,小到仅有几个 μm^3 的量级,但能量密度非常大。

^⑨类比于光栅器件的工作原理,这种特定条件下不同频率的简谐波相互叠加形成超短脉冲的现象也可理解为时域的多光束干涉。

蚀 GaAs 晶体表面和近红外皮秒激光刻写硼硅玻璃表面微点阵 2 个实例,如图 6 所示。前者是作用点的原子力显微镜扫描图像,后者是光学显微镜记录的照片。从图 6(a)中清楚地看到,在单个 50 fs 激光脉冲作用下,样品表面形成了直径 5~6 μm 的小烧蚀坑,在小坑周边有大量纳米尺度小颗粒存在。图 6(b)是高重复频率 50 ps 脉冲串通过光束焦点快速扫描玻璃样品上表面后产生的结果,其中点间距为 20 μm ,扫描速度为 4 m/s。每个点均由 3 个脉冲组成的脉冲串产生,每个脉冲串内相邻脉冲间隔为 12 ns。在更高倍显微镜下观测可以发现,这些直径约为 10 μm 的点表面烧蚀程度很微弱,产生小点的原因主要是临近表面下方区域玻璃折射率的改变。

产生了周期性的激光超短脉冲序列。相邻脉冲间的时间间隔(即脉冲周期)等于光脉冲在激光腔内往返一次的时间,简称为腔周期。在图 2 中,超短脉冲激光序列的频谱是由一系列非常接近单色波的谱线构成的,每条谱线对应激光器的纵模。所有纵模的整体频宽受限于激光增益介质的有效增益线宽。在特定条件下,这些频率不同的简谐波相干叠加便形成了超短脉冲,这个特定条件被称为“锁模”(Mode Locking),即相邻纵模间的频率间隔和相位差严格相等^⑨,所以一般情况下,超短脉冲激光器也常被称为“锁模激光器”。

脉宽大于 10 ps 的激光也可以通过“增益开关”(Gain Switching)法来产生。这种方法主要适用于电激励的半导体激光器,及光泵浦的具有薄层饱和吸收体的超短腔固态激光器。与锁模相比,增益开关法产生 ps 超短脉冲在技术上要相对简单,其核心是对激光腔内光场的有效增益实现快速调制。除了

脉宽不能做到很窄、脉冲的 TBP 值偏大外(一般高于锁模方法产生的脉冲),这种增益开关法的另一个局限性是输出激光的平均功率一般比较低,实际应用中还要另加前置光放大器。

在一台锁模激光器中,除了激光增益介质和腔镜外,还需要用到能够帮助实现锁模的专门器件,即锁模器(Mode Locker)。锁模器可以是声光调制器或饱和吸收体^⑩。声光调制器好比放在激光腔内的周期性光开关,其开、关光的周期等于腔周期;饱和吸收体则对自由运转激光腔内起伏光场中的强脉冲光近乎完全透明,而对连续本底光产生强吸收的脉冲自选择器件。与声光调制器不同,饱和吸收体不需要外加驱动信号。因此,采用声光调制器的锁模又被称作“主动锁模”,而通过使用饱和吸收体实现的锁模则被称为“被动锁模”。一般来说,单纯主动锁模产生的脉宽通常在 10 ps 以上。这主要是实际激光腔的等效长度始终处在微小变化当中,从而难以实现锁模器的外部

驱动信号与光脉冲在腔内往返时间的严格匹配。

20 世纪 80 年代末,英美科学家们发现,当把发生在激光增益介质中的克尔效应与激光腔内光束分布适当地结合在一起时,也可以起到等效于饱和吸收体的选脉冲作用,这种情况被称为“克尔透镜锁模”,其在掺钛蓝宝石飞秒激光器中被广泛应用。目前世界上作为产品出售的具有最短脉宽(脉宽小于 5.5 fs)的超短脉冲激光器^[17]采用的即是这种克尔透镜锁模技术。

对于飞秒激光器尤其是飞秒光纤激光器而言,激光腔内材料和器件的色散作用会严重影响脉宽和脉冲波形。因此,除锁模器之外,飞秒激光器还必须采用适当的色散补偿装置,如棱镜对、光栅对、啁啾镜、特种色散光纤等,如图 7 所示,对激光腔内的色散进行严格控制或调节,从而使激光器根据不同需求运转在特定的负、正色散区或零色散临近区,这是飞秒激光器与皮秒激光器的一个重要区别。

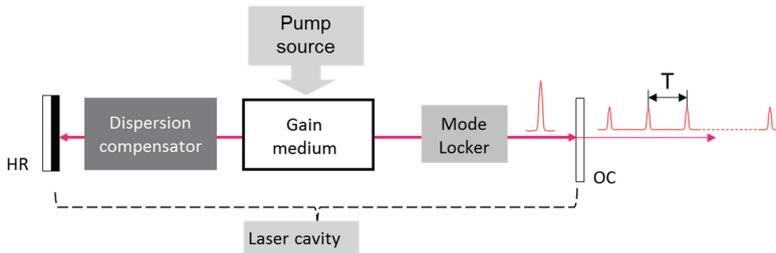


图 7 锁模激光器的构成:激光谐振腔(包含高反镜 HR,输出耦合镜 OC)、增益介质、泵浦源、锁模器、色散补偿器件

Fig. 7 Main parts of mode-locked laser: laser resonator (including HR and OC), gain medium, pump source, mode locker, and dispersion compensation device

通常情况下锁模激光器输出脉冲的重复频率较高,因此单脉冲能量会相对较低。如假定一台锁模激光器的平均功率为 10 W,脉冲频率为 100 MHz,那么单脉冲能量仅有 0.1 μJ。为获得较高能量的超短脉冲激光,曾经存在一种在脉冲激励激光器或脉宽较宽的调 Q 激光器内实现锁模的方法。这种情况下,长脉冲激光器的重复频率一般很低(比如只有 100 Hz 左右),因此以长脉冲作为包络的锁模脉冲的能量便能得到很大提高(一个长脉冲包络内所包含的超短脉冲个数可以有几十或上百个)。

为了对普通连续运转和脉冲运转激光器中实现锁模的两种情况有所区分,前者被称为“连续锁

模”,后者被称为“脉冲锁模”或“调 Q 锁模”。实际应用中,由于脉冲锁模激光器的脉冲稳定性一般比较难控制,现在这种方法已很少使用^⑩。而由连续锁模加脉冲选择器(pulse picker)和激光放大器的技术方案则被广泛采用。

^⑩值得指出的是,在对“脉冲锁模”方式下运转的超短脉冲激光器的研究中,科学家们不仅把握了如何产生间歇性激光脉冲串的方法,而且意识到周期性激光脉冲串与物质相互作用明显不同于单脉冲和连续锁模产生的周期性序列脉冲。

从脉冲序列可以存在很多不同形式这一思路出发,周期性的脉冲串代表更为广义的脉冲序列形式。它包含了脉冲串间隔和脉冲串内相邻脉冲间隔这两个重要的时间变量。调整这两个变量,如使周期性脉冲串中的脉冲个数减到 1 个脉冲时,可以获得与脉冲串的频率相等的低重复频率脉冲序列,而如果使脉冲串间的最小时间间隔等于脉冲串内相邻脉冲的间隔时,则得到周期等于脉冲串内脉冲间隔的高重复频率脉冲序列。

^⑩常用的饱和吸收体包括半导体饱和吸收镜(SESAM),碳纳米管涂层,特殊掺杂的光学晶体等。早年常用各种液体染料作为饱和吸收体。

3.2 超短脉冲激光放大器

对诸多应用而言,尤其对激光加工来说,直接由锁模激光器产生的激光单脉冲能量往往还不够高(一般在几到几十 nJ,最高可以到达上百 nJ),因此,通常要另加上激光放大器,组成主振荡器功率放大器(MOPA)结构。激光放大器一般可以包含多个放大模块,分别称为前级放大、预放,最后端为功率放大。为避免超短脉冲激光在放大过程中由于峰值功率过高而造成器件损伤,在脉冲被放大之前,需要先通过光学色散元件把脉冲展宽,而后再放大,放大之后再通过具有相反色散特性的色散器件,把脉冲压缩回原来或接近展宽前的宽度。这种情况下,被展宽的脉冲即为带频率啁啾的脉冲,啁啾脉冲被放大器放大之后,再通过压缩器将啁啾消除(或补偿)掉,这就

是获 2018 年诺贝尔物理奖的啁啾脉冲放大(CPA)技术。简言之,采用 CPA 技术的超短脉冲放大器包括激光脉冲展宽器、脉冲放大器和脉冲压缩器。

经常使用的脉冲展宽器由光栅-曲面反射镜-折返镜构成。对超短脉冲光纤激光器而言,展宽器也可以是特制的光纤光栅。脉冲压缩器常用光栅对或由单个光栅与屋脊反射镜组成的等效光栅对构成^[9],这是因为这些器件可以引入非常大的色散,相对而言比较方便(色散)调谐,这使得超短脉冲中不同频率成分的光通过这些器件时传输的距离不一样,由此形成低频光在前、高频光在后(或反之的啁啾脉冲)的情况,即在时间维度上,不同的光频成分被极大地错开(或错开后又被补偿到接近重合),从而实现脉冲展宽(或压缩)的目的。

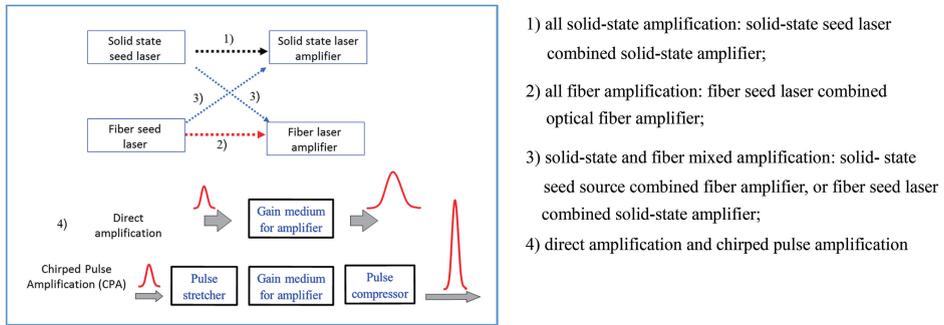


图 8 超短脉冲激光系统的几种不同光学结构

Fig. 8 Different optical architectures of USP laser system

传统超短脉冲激光放大装置大多采用块状固体器件。而块状增益材料一般很难做到又细又长^⑫,从而使得其单程增益往往不够高。这种情况下,为有效提高光放大倍率,同时避免采用复杂的光束折返来实现光束反复通过单块增益介质获得多次放大(即所谓多通放大)途径,人们经常采用一种“再生放大”的方法,即把提供光放大的增益晶体放在光谱腔内,使注入腔内的种子光脉冲在其中多次往返,当种子光脉冲被放大到最大值时,再借助电光开关将其导出腔外。从某种意义上来说,再生放大器也可以等效为一种更高效的多通放大器。再生放大器的光增益可高达 10^5 以上。在输入种子光比较微弱,放大器增益介质的单程增益不够高的情况下,使用再生放大将比较有优越性。根据需要,再生放大器之后可再加功率放大级。对工业超短脉冲激光系统而言,经过光放大后的激光超短脉冲能量可以达到几十至上百 μJ ,甚至 mJ 量级,这取决于放大器的效率和数量,并与脉宽和脉冲重复频率密切相关。

的快速发展,工业用超短脉冲激光系统的光学结构在基本技术方案上有了更多的选择,如图 8 所示。它们分别为固体种子源^⑬加固体放大器,光纤种子源加光纤放大器,及光纤种子源加固体放大器或固体种子源加光纤放大器。目前来看,这些光学结构的优劣,取决于对其中一些具体技术细节、成本等关键因素的把握程度。但对于既有高平均功率又有高脉冲能量的 fs 激光和短 ps 激光而言,固体激光器仍占主导,主要原因有:

1) 一般来说,固体种子源与固体放大的脉冲质量易于控制,尤其在色散管理方面,但缺点是物料和生产成本均较高,整机的集成难度较大。而全光纤

^⑫“细”可以降低成本和提高泵浦效率,“长”是为了提高增益距离。既细又长正是光纤激光放大器的特点,所以光纤放大器的单程增益可以很高。

^⑬在 MOPA 结构中,人们习惯将产生初始超短脉冲激光的锁模激光器或以增益开关方式工作的激光器称为(激光脉冲)种子源。

近十年来,鉴于光纤激光器和光纤激光放大器

结构对整个光学系统的色散平衡要求很高,难以同时获得高质量和高能量的超短脉冲激光。

2)与固体器件相比,由于光纤导光截面小、增益介质的长度长,较高脉冲能量的光纤放大器的非线性效应、色散影响、材料损伤问题都会变得更为严重。不过对于高重复频率、低脉冲能量的超短脉冲激光的放大来说,光纤结构具有比较显著的竞争力。

在此需要指出的是,光放大器并不仅限于基于原子中电子共振吸收和跃迁机理。实现光放大还可基于材料的非线性效应,即光学参量放大(OPA)^[18]。该技术通常采用一些特殊的非线性光学晶体(如LBO、BBO、KDP等)作为增益介质。当CPA技术用于参量放大过程时,人们便称其为光参量啁啾脉冲放大(OPCPA)^[19]。OPCPA的突出特点是能够适用于宽光谱范围,具有波长转换或调谐功能,同时由于几乎没有放大自发辐射的影响(增益介质没有储能),可以达到很高的信噪比。此外,因为没有吸收过程,所以其效率高,热管理简单。目前,OPCPA的超短脉冲激光系统的应用主要是科学研究中用于产生不同波长的激光超短脉冲,在工业加工中的应用尚为鲜见。

3.3 超短脉冲激光系统主要光学结构

图9为具有脉冲串选择功能的超短脉冲激光系统的典型光学结构原理框图。在采用锁模激光器的

方案中,为实现脉冲串内脉冲数的选择控制功能,在种子源与放大器之间加入一个光调制器1即脉冲选择器(通常使用声光或电光晶体)。而前端采用增益开关的方案中,脉冲串的产生可以直接通过调制半导体激光器的电驱动信号来实现。此外,为避免实际使用过程中由于高功率激光系统(特别是功率放大器部分)通过瞬间增减泵浦源电流实现快速开关光切换所伴随的热稳定性问题(光斑形状、大小、光束发散角、 M^2 等激光参数均随泵浦强度而变化),在激光放大器之后加入一个专用于调控输出光功率大小的光调制器2,从而使得在激光器运行中激光系统的泵浦电流始终保持恒定值。

使用光调制器不仅可使光脉冲灵活切换,为选单、选双、选 N 个脉冲提供方便,也使获得有任意脉冲幅度调制曲线的激光输出成为可能。这种调制不仅可以施加于如图9右端所示脉冲串内的脉冲,也可用于在更长时间范围内对不同脉冲串的幅度调制。对工业用USP激光器来说,其输出脉冲串内相邻脉冲的时间间隔(通常在10 ns左右)由锁模激光器的腔长所决定,因此一般情况下是一个不可调节量。此外,需要指出的是,为防止实际应用中发生部分光恰好返回超短脉冲激光器系统光路中,造成对光学元件的损伤或引起光学系统不稳定,一般会在各级激光放大器前后尤其是各级光纤放大器间加入光隔离器。

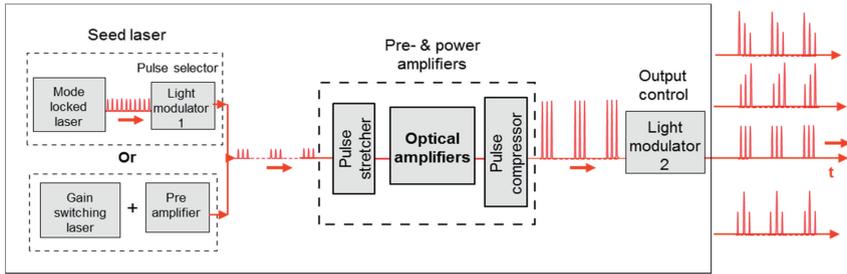


图9 具有脉冲串选择功能的工业用超短脉冲激光器的典型光学结构框图(图中假定脉冲串内包含3个脉冲。右端的多个脉冲图形说明输出脉冲串的幅度可根据实际应用的需要进行调制,如等高输出、由低到高、由高到低、低-高-低等不同的输出调制状态)

Fig. 9 Block diagram of typically optical layouts of industrial USP laser system with pulse burst selection function (three-pulse burst is assumed. As shown in pulse burst patterns at right, magnitudes of pulse bursts can be adjusted to equal-height, from low to high, from high to low, low-high-low, or other patterns needed in application)

显然,超短脉冲激光器系统是光、机、电、控和软件的综合系统。仅仅关注其光学结构和相关的光学原理还远远不够。在实际应用,尤其是激光加工应用中,需要考虑超短脉冲激光器的其他重要参量,包括外形尺寸、重量、功耗及能效、使用寿命、造价,安全性、动态特性、智能化程度(远程诊断与参数更新)等,及是否易维护、控制界面是否用户友好、能否有效避

免用户误操作、对使用环境要求是否苛刻,抗振、抗湿、抗电磁干扰能力,在供电起伏或电力冲击下能否做到不易损坏同时仍能保持正常运转等诸多方面。

图10为自1960年世界首台激光器问世以来,人类取得的最高峰值光强和最大峰值功率的大致增长曲线。从图中可以看出,在激光发明后的短短几年内,激光峰值功率和光强(即功率密度)有了快速

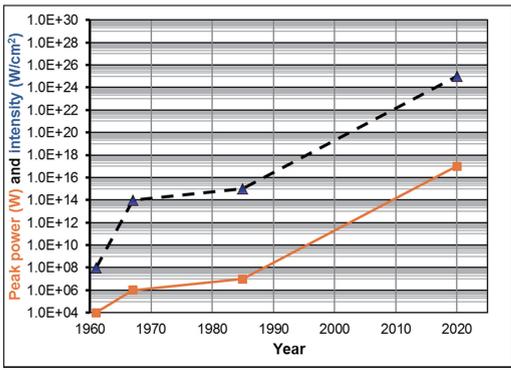


图 10 最大激光峰值功率(实线)^[20]和聚焦后的最高激光光强(虚线)增长趋势

Fig. 10 Rising tendency of achieved maximum laser peak power (solid line)^[20] and highest laser intensity after focusing (dashed line)

的提高,这主要源于调 Q 技术^⑭和锁模技术的出现;而在 20 世纪 60 年代中后期至 80 年代中期的较长一段时间内,最大激光峰值功率和光强的增长则相当缓慢,这主要是由于功率达到 MW 量级后,光路中的光学器件极易出现损伤;到了 1985 年,CPA 技术被提出后,光学器件损伤瓶颈才被成功克服,从而在此后最大激光峰值功率和光强得以保持持续增长,在 30 余年的时间中增加了约 10 个数量级,平均每年升高约 1 倍。

需要指出的是,图 10 中的结果并没有给出对应的脉宽的信息。对于许多工业加工应用而言,即使是超快激光,其激光功率密度往往并不需要超过 10^{15} W/cm^2 。图 10 所示结果说明,对超短脉冲激光系统而言,在皮秒激光下的有些情况可以不用 CPA 技术;而在飞秒激光下,由于材料损伤阈值对脉宽的依赖关系,及同样脉冲能量下飞秒激光对应更高的峰值功率,CPA 技术是必须的选择。

由图 10 还可以看到第 1 节中提到的光与物质相互作用的 5 个不同层次中的 3 个,即多光子-强场区(对应光强 $10^{14} \sim 10^{18} \text{ W/cm}^2$)、极多光子-相对

论场区(光强 $> 10^{18} \text{ W/cm}^2$)、超相对论场区(10^{24} W/cm^2)都需要有 CPA 技术的保障。不采用 CPA 技术所能达到的功率密度,人们基本上只能研究单光子-线性光学区(光强 $< 10^8 \text{ W/cm}^2$)和少数光子(双光子或三光子)-普通非线性光学区($10^8 \sim 10^{12} \text{ W/cm}^2$)中的问题。

4 超短脉冲激光应用中的激光参数选择

超短脉冲激光技术的影响极其广泛,如在精密测距、测时、测频,超高速时分复用光通信,强场与超强场,视力矫正,受控核聚变,微纳尺度加工等诸多领域均有非常重要的应用。在这些广泛的应用中,除在 2.1 节中列出的基本参数外,脉冲波形和脉冲组合也会起关键作用,本节结合快速发展的超短脉冲激光工业加工应用需求,给出关于激光波长、脉宽、能流等主要参数的基本性选择指南。

4.1 超短脉冲激光波形、脉冲串模式的重要性

根据经典的锁模激光器理论,稳定运转的锁模激光器内的光脉冲必须满足自洽条件,即超短脉冲激光在光谐振腔内每往返一次回到起始位置时,振幅和相位必须完全复现之前在同一位置上的状态。由此,科学家们推导出,主动锁模所产生的符合自再现条件、稳定的超短脉冲激光的脉冲波形为高斯型^[21-22],而被动锁模的光脉冲形状则是双曲正割型^[23-25]。近年来,锁模光纤激光器的发展和相应锁模理论模型的改进大大扩展了人们对激光谐振腔内可能存在的稳定激光脉冲形态的认识。除高斯型、双曲正割型外,它还可以是抛物线型及其他各种复杂的复合型脉冲形状^[26-27]。而这些复合脉冲波形一般都不具有解析表达式。

尽管如此,与超短脉冲激光波形的理论描述相比,真实的超短脉冲激光器的输出脉冲波形可能更复杂、更多样化,这一方面源于实际条件与理论假设的偏差;另一方面是那些未被纳入理论模型中的一些重要因素的影响,如实际光放大系统中的自发辐射及来自光路中任何光学界面的残余反射、法布里-珀罗调制效应等便是影响超短脉冲激光波形质量的重要因素。特别是当脉冲的基底较大时,以 FWHM 定义的 3 dB 脉宽将不足以描述激光超短脉冲的时域特性。对此,有必要关注其他不同定义下的脉宽,如 5 dB、10 dB、20 dB 宽度等,或是标示出给定脉宽内的脉冲能量占总能量的比例。当残余反射引入的次脉冲(又称卫星脉冲)不能被忽略时,则需对次脉冲的幅度及其与主脉冲的时间间隔甚至时

⑭所谓调 Q 技术(又称巨脉冲技术),是通过快速切换激光谐振腔的 Q 值,即在泵浦过程中使激光腔先处在低 Q 值状态,也就是光腔的损耗高,不能形成激光振荡,而当增益介质被充分激发、粒子反转达到最大时,突然使激光腔进入高 Q 值状态,形成激光振荡,从而在短暂的时间内产生巨脉冲激光输出。调 Q 激光器的输出脉宽大都在几十至几百 ns,特定条件下也可达到几个 ns,与增益介质储能特性、泵浦强度、脉冲重复频率密切相关。与锁模激光脉冲相比,除脉宽上的区别外,一般调 Q 脉冲的能量较高、脉冲重复频率低,且有较大的冗余频谱成分。

序加以明确的限定。在激光加工中,如果所用超短脉冲激光含有大的本底或次脉冲时,这意味着脉宽范围内的能量仅占整个脉冲能量的很小部分,即实际有效(或起加工作用的)脉宽将大大增加。

近年来,随着超短脉冲激光技术的不断进步,在工业加工应用中,可供选择的超短脉冲激光的参数范围及种类都得到了很大扩展,这当中最为重要的一个新加控制参量就是脉冲串(Pulse Burst)的脉冲个数。实践证明,在超短脉冲激光加工中,这是一个可以对加工效果产生很大影响的工艺参数^[28-29]。目前,国内外不少超快激光器的生产厂家都将这一功能集成到工业用皮秒或飞秒激光系统产品中(见表2)。当然,不同厂家的激光器在改变脉冲数后对系统平均功率的影响可能略有不同,可供选择的脉冲串内的最大脉冲数目也会不一样。

显然,如果平均功率保持不变,那么脉冲串内脉冲数目的增加则意味着单脉冲能量按比例减小,在脉宽和聚焦光斑均不变的前提下,等同于峰值光强与能流密度下降,对应于图4中的工作点垂直下移。在这种情况下,可将图3中所表达的脉冲能量与脉冲重复频率的关系理解为脉冲串(即多个脉冲组合的)能量与脉冲串重复频率之间的关系。不过,因为脉冲串重复频率和脉冲串总能量未改变(总平均功率未变),在图3曲线上对应的工作点将不会随着脉冲数的变化而移动。

一般来讲,脉冲串内脉冲数的选择与具体应用密切相关,和其他激光参数,尤其是平均功率和重复频率的设置也紧密关联。对于单脉冲能量过高的情况(对较低重复频率的超短脉冲激光这种情况比较常见),通过采用分脉冲的方法,即增加脉冲串内的

^⑮对高功率光纤放大器而言,由于非线性效应和材料损伤问题的存在,单脉冲能量难以达到很高,这种情况下,使用脉冲串则是保持重复频率不变、不增加单脉冲能量,同时提高系统平均功率的实际可行方案。在某种意义上,这相当于通过产生多个时间上比较临近的小(能量)脉冲来组合模拟一个大(能量)脉冲,这应该是选择脉冲串运转模式的另一个实际缘由。

^⑯此处需要指出的是,表2给出的数值差别还不足以衡量工业超短脉冲激光器的全貌,尤其是国内外厂家的USP激光器产品在其他相关技术参数上的差别。某种意义上来说,那些在公开的产品技术指标之外的技术细节、技术含量可能更重要,对实际应用的影响反而更大。毋庸置疑,工业超短脉冲激光器产品开发中需要的技术积累和科学支撑是非常之大的。

脉冲数来减少单脉冲能量,可以有效防止能流或光强太强造成的材料破坏,同时有利于提高加工精度和效率。反之,在单脉冲能量不够高的场合,通过增加脉冲串内的脉冲数,使多个小脉冲合并成一个大脉冲,也会提高激光作用下的材料烧蚀率^⑯。

4.2 激光波长、脉宽、脉冲能量与重复频率的选择

超短脉冲激光加工可谓是激光加工中的精密加工,因此激光参数及相应工艺参数的合理选择对于改善加工效果变得更加重要。表2汇总了国内外一些具有一定代表性的工业用超短脉冲激光器产品的主要技术指标。为易于比较,分别按皮秒红外激光器、飞秒红外激光器、皮秒绿光激光器、皮秒紫外激光器予以列出。关于USP激光器产品的更多信息,读者可参考厂家网站发布的技术指标页和相关介绍。从这些列出的技术指标看,如平均功率、单脉冲能量和脉宽这几个重要参数,国内的皮秒红外激光产品已在一定程度上接近国外产品,而飞秒红外激光器(除脉宽外)的差距尚较大,皮秒绿光和皮秒紫外激光器的整体差距(特别是单脉冲能量和脉冲稳定性方面)仍然比较明显^⑰。

实际激光加工应用中,经常会遇到如何选择合适的激光器或激光参数的问题,为了回答这一基本问题,需要了解具体加工要求、加工类型、材料(材质与材料结构)、加工速度与加工质量的量化指标。因材料对入射光的吸收特性与激光波长密切相关,此外聚焦光斑大小、光束发散度、单光子能量及材料去除机理也都受激光波长的影响,由此可以了解紫外激光在这些方面的显著优势。而超短脉冲激光与物质相互作用时间短,其高的峰值强度将引起多光子吸收和多光子电离,从而导致材料在微小局域内的快速升温 and 更大幅度的温升,乃至直接达到材料的某些极端热力学状态。

超短脉冲激光具有不同于ns脉冲和长脉冲激光的材料加工机理,决定了它可以实现nm级的微小尺度加工和最小化的热影响区。从材料传热特性的角度来说,超短脉冲激光的脉宽应该选择小于传统傅里叶热传导定律不再适用的情况下所对应的临近脉宽^[30]。对大多数金属材料,这个临界脉宽约在10ps左右。长脉冲激光加工中存在的等离子体屏蔽效应在超短脉冲激光加工中几乎不存在或大为削弱。飞秒激光加工情况下,多光子吸收、多光子电离引发的新的能量吸收耦合机制,使得材料波长相关的线性吸收特性变得不再重要。换言之,一定强度的飞秒激光可以有效地加工任何材料,从超硬陶瓷、金刚石,到超软的高分子透明薄膜,乃至易燃易爆的固体炸药。

表 2 国内外工业用某些超短脉冲激光器产品主要技术指标比较

Table 2 Comparison of major technical specifications of some USP laser products for industrial applications at home and abroad

皮秒红外激光器

Picosecond infrared laser

Item	Trumpf	Coherent	SP	PI	Huaray	Bellin	Huakuai	YSL
Model	TruMicro	HyperRapid	IceFyre	RGH-	Olive	Amber IR	YPP-IR-30	PicoYL-100
	5070	NX 1064-50	1064-50	1064-48	-1064-50			-100-100
Wavelength /nm	1030	1064	1064	1064	1064	1064	1064	1030
Average power /W	100	50	50	48	50	75	30	100
			@400 kHz	@400 kHz	@500 kHz	@1MHz	@100 kHz	
Pulse energy / μ J	250	220	200	420	200	250	200	100
		@200 kHz	@200 kHz	@100 kHz	@200 kHz	@300 kHz	@100 kHz	@100 ps
Repetition rate /kHz	400-1000	200-1000	0.001-10000	100-2000	0.001-1000	0.001-1000	100-1000	100-1000
Pulse duration /ps	<10	<15	<15	~10	<10	<15	<15	100-500
RMS of pulse energy stability	N/A	<1%	<1.5%	<2%	\leq 1%	<3%	<2%	<2%
Pulse selection	N/A	√	√	√	√	√	√	√
M^2	<1.3	\leq 1.3	<1.3	\leq 1.3	\leq 1.3	<1.3	<1.3	<1.3
Polarization ratio	N/A	>100:1	>100:1	>100:1	>100:1	>100:1	>100:1	N/A

飞秒红外激光器

Femtosecond infrared laser

Item	Trumpf	Coherent	SP	Huaray	Bellin	Huakuai	YSL
Model	TruMico 5070	Monaco	Spirit	HR-Femto-	Axinite	YPF-IR-20	Femto
	Femto Edition	1035-80-40	1030-100	IR-50-40	IR-20		YL TM -100
Wavelength /nm	1030	1035 \pm 5	1030 \pm 5	1035	1030	1030	030
Average power /W	80	40	100	40	20	20	100
Pulse energy / μ J	200	80	100	40	30	50	200
		@500 kHz	@1 MHz	@1 MHz	@1 MHz	@500 kHz	
Repetition rate /kHz	400-1000	0.001-1000	0.001-10000	100-5000	0.001-1000	50-500	25-5000
Pulse duration /ps	<900	<350	<400	<350	<500	<500	~400
RMS of pulse energy stability	N/A	1.5%	2%	<2%	<3%	<3%	<2%
Pulse selection	N/A	N/A	N/A	N/A	√	√	√
M^2	<1.3	<1.2	<1.2	\leq 1.3	<1.3	<1.3	<1.3
Polarization ratio	N/A	>100:1	>100:1	>100:1	>100:1	>100:1	N/A

皮秒绿光激光器

Picosecond green laser

Item	Trumpf	Coherent	PI	Huaray	Bellin	Huakuai	YSL
Model	TruMicro	Hyper Rapid	RGH-	Olive-	Amber GR	YPP-	PicoYL-
	5270	NX 532-25	532-20	532-15		GN-20	Green
Wavelength /nm	515	532	532	532	532	532	515
Average power /W	60	25	20	15	45	20	30
		@200 kHz	@100 kHz	@500 kHz	@500 kHz	@500 kHz	
Pulse energy / μ J	150	125	200	100	90	40	40
		@200 kHz	@100 kHz	@100 kHz	@500 kHz	@500 kHz	

续表

Item	Trumpf	Coherent	PI	Huaray	Bellin	Huakuai	YSL
Repetition rate /kHz	400-1000	200-1000	100-2000	0.001-1000	0.001-1000	400-1000	300-2500
Pulse duration /ps	<10	<15	~7	<10	<15	<15	800
RMS of pulse energy stability	N/A	<2%	<2%	≤1.5%	<3%	<2%	<2%
Pulse selection	N/A	√	√	√	√	√	√
M ²	<1.3	≤1.3	≤1.3	≤1.2	<1.3	<1.3	<1.3
Polarization Ratio	N/A	>100:1	>100:1	>100:1	>100:1	>100:1	N/A

皮秒紫外激光器

Picosecond UV laser

Item	Trumpf	Coherent	SP	PI	Huaray	Bellin	Huakuai	YSL
Model	TruMicro	HyperRapid	IceFyre	RGH-	Olive-	Amber UV	YPP-UV-10	PicoYL-UV
Wavelength /nm	5370	NX 355-15	355-30	355-12	355-10	355	355	343
Average power /W	30	15	30	12	10	30	15	15
Pulse energy /μJ	75	75	60	120	60	42	30	30
Repetition rate /kHz	400-1000	200-1000	@500 kHz	@100 kHz	@500 kHz	@700 kHz	@500 kHz	300-1200
Pulse duration /ps	<10	<15	<15	~7	<10	<15	<15	800
RMS of pulse energy stability	N/A	<2%	<2%	<3%	≤1.5%	<3%	<5%	<2%
Pulse selection	N/A	√	√	√	√	√	√	√
M ²	<1.3	≤1.3	<1.3	≤1.3	≤1.2	<1.3	<1.3	<1.3
Polarization ratio	N/A	>100:1	>100:1	>100:1	>100:1	>100:1	>100:1	N/A

图 11 为激光波长与脉宽在精密激光加工中的整体特性比较。其中,纵轴表示可以达到的加工精细度或质量,横轴代表加工速度和脉宽。就加工精度而言,飞秒激光高出皮秒激光,皮秒激光高于纳秒激光,粗略地认为这 3 个脉宽区域基本上分别对应 μm(或亚 μm)、十 μm 及百 μm 量级的精度。而从加工速度的角度来说,纳秒激光最快,皮秒激光次之,飞秒激光最慢^⑩。在脉宽相同的区域内,紫外激光的加工精度一般高于绿光加工精度,绿光加工的

精度一般高于红外激光的加工精度,即波长越短可能达到的加工精度越高。从图 11 中可以得知,单纯从加工精度的角度来看,紫外纳秒激光的某些应用,应该可由皮秒红外或皮秒绿光来实现,这的确已在实践中得到验证。

对超短脉冲工业激光器而言,波长与脉宽大都不是可调谐量^⑪,因此需在激光器选型时确定。虽然脉

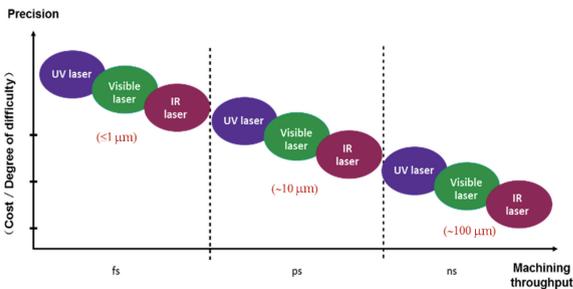


图 11 超短脉冲激光加工中激光波长与脉宽的大致选择指南

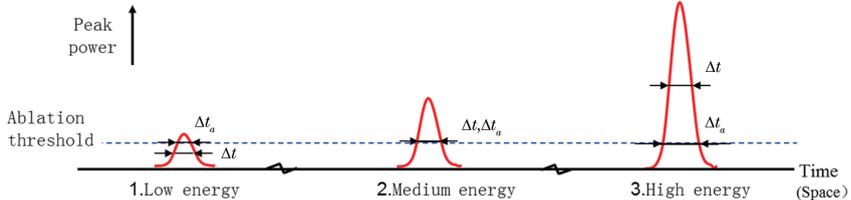
Fig. 11 Approximate selection guide of wavelength and pulse duration in USP laser machining

^⑩实际上,从传统机械加工的经验可知,加工精度越高,要求切削量越小,从而越费时。此外,加工精度越高,加工的难度和造价也就越高,这个规律对激光加工同样适用。如果将图 11 的坐标轴分别理解为相应激光器装置的制造难度和生产速度,其趋势也仍然成立。

^⑪国外有些企业生产的工业超短脉冲激光系统(例如 Light Conversion 公司的 Carbide 型号系列),其输出激光脉宽能够从十 ps 一直调到几百 fs。这样的系统实际上本身是飞秒激光系统,只是它能够通过调谐 CPA 中的脉冲压缩器,有意使脉冲啁啾得不到完全补偿,从而实现 ps 脉冲输出(显然这样的皮秒激光带有频率啁啾,有较大的时间带宽积)。一般来说,由于飞秒激光系统涉及更高的峰值功率和宽得多的谱宽,其制造成本与难度要远高于皮秒激光系统。这种脉宽可调谐的飞秒激光系统应代表工业用超短脉冲激光器的最高技术水准。

宽对加工来说很重要,但并非越窄越好。现实当中,脉宽的选择与具体应用密切相关。一旦波长和脉宽确定,平均功率和脉冲重复频率则是面临选择和优化的两个重要激光参数。如图 12 所示,在脉冲重复频率给定情况下,如果加工中脉冲能量(或平均功率)过高,则激光脉冲高出加工阈值部分对应的的时间宽度将会大于真实脉宽,这意味着实际有效脉宽的提高。换

言之,脉冲能量高出阈值能量越多,脉冲内超过加工阈值的时间宽度便越大,即这种能量相关的脉冲增宽效应将越显著^⑨。行业界时常会有超短脉冲激光加工是冷加工的说法,但这其实有严苛附加条件,这个附加条件就是其他激光工艺参数也必须选择得当,其中最为重要的是平均功率、脉冲重复频率和聚焦条件。如果这些参量选择不当,仍然会导致热加工现象。



- 1: low pulse energy. Effective ablation pulse duration Δt_a is less than real pulse duration Δt ;
- 2: medium pulse energy. Δt_a is close to Δt ;
- 3: high pulse energy. Δt_a is longer than Δt

图 12 脉冲能量对实际烧蚀宽度的影响(虚线代表烧蚀阈值)

Fig. 12 Effect of pulse energy on actual ablation pulse duration (dotted line represents ablation threshold)

激光加工中,脉冲重复频率的重要性往往还表现在可以通过增加重复频率来提高加工时效。但当重复频率和脉冲能量均很高,即平均功率很高时,超短脉冲激光亦会产生很强的热累积现象,使加工效果达不到或严重偏离所要实现的冷加工效果^[31]。由此可知,在单脉冲能量确定后,脉冲重复频率的选择并非越高越好。其他一些工艺参数如光束扫描速度、扫描图案、加工中产生的粉尘抽离效率、工件材料热特性及外部冷却速率等都将影响最佳重复频率的选取。实质上,最终脉冲重复频率的选择归结为加工速度与加工质量间的合理平衡。此外,高重复频率超短脉冲激光加工中的热累积效应并非都是坏事,在超短脉冲激光玻璃焊接的应用中,反而需要利用这种热累积效应^[32]。

5 “超快激光光学”学习路线图

综上所述,超短脉冲激光领域的科学技术内涵极其丰富。由于篇幅所限,本文只是对超短脉冲激

光及其应用的相关基本知识进行介绍,忽略了对产生超短脉冲激光的锁模机制的讨论,没有给出对飞秒激光色散补偿原理的分析,未涉及超短脉冲激光脉宽的测量方法,未能介绍超短脉冲激光工业应用中材料烧蚀的关键机理等诸多重要内容。

2003—2014 年间,笔者之一曾在南开大学现代光学研究所讲授《Fundamentals of Ultrafast Laser Optics(超快激光光学基础)》课程^[8]。作为光学和光学工程研究生的选修专业课,该课程以全英文授课,试图对超短脉冲激光的表征、测量、产生、传输、放大、频率转换及典型应用的相关科学与技术知识进行比较全面的介绍。为便于同学们对课程内容的学习交流和整体概览,笔者在对这一课程多年教学实践的基础上,编辑了一张“超快激光光学”学习路线图,如图 13 所示。此次,借此介绍超短脉冲激光相关基础知识之际,将该图中、英文版更新整理、公诸于众,希望能够对关注超快激光及其应用的专业人士有所裨益。

以下是对“超快激光光学”学习路线图的简要注释和说明。

《超快激光光学基础》课程共分八章,内容分别是:超短脉冲激光的基础、超短脉冲激光的测量、超短脉冲激光的产生、超短脉冲激光在线性系统的传播、超短脉冲激光在非线性系统的传播、超短脉冲激

^⑨值得指出的是,假如将图 12 中的横轴坐标理解为二维平面内的空间坐标,那么图中结果则表明与脉冲能流密切相关,实际加工点的尺度即可能大于、接近、也可能小于激光光斑。但这一点,事实上并不仅对超短脉冲激光成立。如果以为只有超短脉冲激光可以获得比激光焦点还要小的加工点,这其实是一种误解。

激光的频率转换)的关键词和重要概念,映射到9号线、14号线以及西南方向的房山线。这些也是北京地铁系统较新的几条线路。另一条新线路6号线,几乎与1号线平行但在几公里之外的北部,与第八章(超短脉冲激光的应用)的关键词相关联。沿着这条线,可以找到与应用相关的技术术语,如THz产生,fs-LASIK,TPF显微镜,频率梳等。

连接2号线、10号线和13号线的8号线曾是连接2008年奥林匹克公园为数不多的几个车站的专用线路,但后来进一步向北扩展。在“超快激光光学”学习路线图中,将一些与基本光学概念或独特光学现象相关的关键词如偏振比、数值孔径、超连续体、锥型辐射等加入到8号线。显然,这些术语及其内涵与超短脉冲激光有着密切的关系。但该条线路不是在一个更固定的主题下。至于独特的机场线,认为分配给两个终端的最好站名分别为“拍瓦激光”和“阿秒技术”,这意味着通过大量“超快激光光学”基本路线的旅行后,从这里可以出发进入到两个更加令人兴奋的和具有挑战性的科学领域。

显然,在构建“超快激光光学”学习路线图时,为确保相互关联的交叉站点使用的站名或关键词对所有在此交汇的线路都有意义,是需要做一些努力思考的。例如,13号线和10号线的两个关联站点,名称分别为:增益介质和增益窄化。显然,理解这两个术语对第三章(超短脉冲激光产生)和第六章(超短脉冲激光放大)都很重要。另一个例子,2号线、4号线以及13号线共同的交叉站点,命名为脉冲的“时空扭曲”,这意味着这种现象或相关技术问题在第二章、第四章以及第六章的内容中,应该同时被关注到。也就是说,时空畸变问题在这三章中都有重要的论述。

最后,超短脉冲激光除了在那些分别具有超强(能量密度)、超快(特性变化)、超精密(尺度和定位)特征的科学研究中的重要应用外,在大规模集成电路芯片模版修复、芯片内部缺陷无损检测、航空涡轮发动机叶片钻孔、燃油发动机喷嘴钻微孔、微流体生物芯片微加工、纳米尺度光电器件制造、视力矫正眼科手术、3C领域超薄或柔性显示屏和印刷线路版切割等关键工业技术领域中的应用也已是方兴未艾、影响重大,无可替代。超短脉冲激光相关应用技术的快速发展,从某些层面来看,甚至已经超过了人们对其中的诸多基本原理的理解步伐。为此,很有必要通过重温那些重要的相关基础知识,使我们能够站在更坚实的科学基础之上,在超短脉冲激光及其

相关应用的关键技术竞争中占有一席之地。

参 考 文 献

- [1] Akhmanov S A, Vysloukh V A, Chirkin A S. Optics of femtosecond laser pulses [M]. New York: American Institute of Physics, 1992.
- [2] Rullière C. Femtosecond laser pulses: principles and experiments [M]. New York: Springer-Verlag, 1998.
- [3] Fermann M E, Galvanauskas A, Sucha G. Ultrafast lasers[M]. USA: CRC Press, 2002.
- [4] Diels J C, Rudolph W. Ultrashort laser pulse phenomena[M]. 2nd ed. USA: Academic Press, 2006.
- [5] Weiner A M. Ultrafast optics [M]. Canada: John Wiley & Sons, Inc., 2009.
- [6] Chin S L. Femtosecond laser filamentation[M]. New York: Springer, 2010.
- [7] Trebino R. Ultrafast optics group[EB/OL]. [2019-04-10]. <http://frog.gatech.edu/tutorial.html>.
- [8] Zhu X N. Fundamentals of ultrafast laser optics[EB/OL]. [2019-04-10]. <http://mooc.chaoxing.com/course/79680.html>.
朱晓农. 超快激光光学基础[EB/OL]. [2019-04-10]. <http://mooc.chaoxing.com/course/79680.html>.
- [9] Zhang Z G. Femtosecond laser technique[M]. 2nd ed. Beijing: Science Press, 2019.
张志刚. 飞秒激光技术[M]. 2版. 北京: 科学出版社, 2019.
- [10] Wang Y, Zhao K X. Refractive surgery with femtosecond laser [M]. Beijing: People's Medical Publishing House(PMPH), 2014.
王雁, 赵堪兴. 飞秒激光屈光手术学[M]. 北京: 人民卫生出版社, 2014.
- [11] Extreme light[J]. Nature Materials, 2016, 15(1): 1.
- [12] Krushelnick K. What is high field science?[EB/OL]. [2019-04-10]. <https://cuos.engin.umich.edu/researchgroups/hfs/what-is-high-field-science/>.
- [13] Gaumnitz T, Jain A, Pertot Y, *et al.* Streaking of 43-attosecond soft-X-ray pulses generated by a passively CEP-stable mid-infrared driver[J]. Optics Express, 2017, 25(22): 27506-27518.
- [14] Rumala Y S, Dorsinville R, Alfano R R. Current applications of supercontinuum light [M] // The supercontinuum laser source. New York, NY: Springer, 2016: 405-424.
- [15] Picqué N, Hänsch T W. Frequency comb spectroscopy[J]. Nature Photonics, 2019, 13(3): 146-157.

- [16] Kaya N, Sayrac M, Kaya G, *et al.* Filament propagation length of femtosecond pulses with different transverse modes [J/OL]. (2014-06-24) [2019-04-10]. <https://arxiv.org/abs/1406.5570>.
- [17] Laser quantum-a novanta company. Venteon ultra [Z]. [2019-04-10]. <https://www.laserquantum.com/products/detail.cfm?id=74#tab-data>.
- [18] Baumgartner R, Byer R. Optical parametric amplification [J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 1979, 15(6): 432-444.
- [19] Witte S, Eikema K S E. Ultrafast optical parametric chirped-pulse amplification [J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2012, 18(1): 296-307.
- [20] Jarnestad J. Towards ever higher intensities [EB/OL]. [2019-04-10]. <https://www.nobelprize.org/uploads/2018/10/press-fig6-fy-en-timeaxis.pdf>.
- [21] Kuizenga D J, Siegman A E. FM and AM mode locking of the homogeneous laser-Part I: theory[J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 1970, 6(11): 694-708.
- [22] Kuizenga D, Siegman A. FM and AM mode locking of the homogeneous laser-Part II: experimental results in a Nd : YAG laser with internal FM modulation [J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 1970, 6(11): 709-715.
- [23] Haus H. Theory of mode locking with a slow saturable absorber [J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 1975, 11(9): 736-746.
- [24] New C. The generation of ultrashort laser pulses[J]. Reports on Progress in Physics, 1983, 46(8): 877-971.
- [25] Krausz F, Fermann M E, Brabec T, *et al.* Femtosecond solid-state lasers [J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 1992, 28(10): 2097-2122.
- [26] Wise F W, Chong A, Renninger W H. High-energy femtosecond fiber lasers based on pulse propagation at normal dispersion[J]. Laser & Photonics Review, 2008, 2(1/2): 58-73.
- [27] Grelu P, Akhmediev N. Dissipative solitons for mode-locked lasers [J]. Nature Photonics, 2012, 6(2): 84-92.
- [28] Herman P R, Marjoribanks R, Oetl A. Burst-ultrafast laser machining method: US6552301 [P/OL]. (2003-04-22) [2019-04-10]. <https://patents.glgoo.top/patent/US6552301B2/en>.
- [29] Sun Y L. Laser micromachining with tailored bursts of short laser pulses: US0246611 [P/OL]. (2010-09-30) [2019-04-10]. <https://patents.glgoo.top/patent/US20100246611A1/en>.
- [30] Corkum P B, Brunel F, Sherman N K, *et al.* Thermal response of metals to ultrashort-pulse laser excitation [J]. Physical Review Letters, 1988, 61(25): 2886-2889.
- [31] Weber R, Graf T, Berger P, *et al.* Heat accumulation during pulsed laser materials processing [J]. Optics Express, 2014, 22(9): 11312-11324.
- [32] Miyamoto I, Horn A, Gottmann J, *et al.* Fusion welding of glass using femtosecond laser pulses with high-repetition rates [J]. Journal of Laser Micro, 2007, 2(1): 57-63.