

文章编号: 1001-3806(2016)03-0311-04

## 单光束叠加脉冲 Nd:YAG 激光器的研究

张 杨, 陈永骞, 朱广志, 郭 飞, 朱 晓\*

(华中科技大学 激光加工国家工程研究中心, 武汉 430074)

**摘要:** 在使用叠加脉冲方式进行激光打孔时, 为了在一台激光器上实现大能量的长脉冲与高峰值的短脉冲激光叠加输出, 采用同一工作物质不同增益区域来分别获得两种特性的脉冲激光同轴叠加输出的方法, 在单台激光器上获得了两种脉冲激光的叠加输出。结果表明, 在双氙灯脉冲抽运 Nd:YAG 激光器中, 腔长 840mm、使用双平-平腔结构、工作物质长度 150mm 的情况下, 采用高电阻率的磷酸钛氧钾电光  $Q$  开关对中心光束进行调  $Q$ , 得到了脉宽 10ms 的长脉冲与 63ns 窄脉宽脉冲序列的稳定叠加脉冲输出, 在抽运频率 9Hz 的情况下, 最高得到了 93.4W 的平均功率, 叠加脉冲包络能量 10.4J, 峰值功率 46.7kW。此结果说明输出的叠加脉冲激光可以很好地满足激光打孔的需求。

**关键词:** 激光器; 叠加脉冲; 激光打孔; 同轴输出; 电光调  $Q$

中图分类号: TN248.1 文献标志码: A doi:10.7510/jgjs.issn.1001-3806.2016.03.002

### Research of the superposed pulsed Nd:YAG laser in a single beam

ZHANG Yang, CHEN Yongqian, ZHU Guangzhi, GUO Fei, ZHU Xiao

(National Engineering Research Center for Laser Processing, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

**Abstract:** In order to get high energy long pulse and high peak power short pulse in one laser at the same time, coaxial superimposed pulse laser output with two characteristics was obtained in a single laser by using different gain areas of the same working material. The results show that by using potassium titanyl phosphate electro-optical  $Q$ -switch with high resistivity, the superimposed pulse with long pulsewidth of 10ms and short pulsewidth of 63ns is gotten in bi-xenon lamp pumped pulse Nd:YAG laser (cavity length of 840mm, double flat-flat cavity structure and working material length of 150mm). With pump frequency of 9Hz, peak power of 46.7kW, mean power of 93.4W and envelope energy of superimposed pulse of 10.4J were obtained. The experiment results show that the superimposed pulse laser output can reach the demands of laser drilling.

**Key words:** lasers; superimposed pulse; laser drilling; coaxial output; electro-optic  $Q$ -switch

### 引 言

目前, 激光打孔已经广泛地应用于各类高精尖领域中<sup>[1-2]</sup>。研究者们对影响激光打孔的因素如激光功率、脉冲宽度、脉冲形态、激光波长等进行了研究与实验。这些研究表明, 激光热去除过程需要大能量的激光照射来对材料进行加热熔化, 同时需要短脉宽、高峰值的激光来增加材料溶液的溅射以及材料汽化物的扩散<sup>[3-4]</sup>。为了提高激光打孔的效率, 出现了一系列的技术和方法。比如长脉冲打孔<sup>[5]</sup>、短脉冲序列打孔<sup>[6]</sup>、双脉冲打孔<sup>[7-9]</sup>等方法, 它们通过获得更大的能量, 改善短脉宽脉冲的波形或者增加脉冲序列来对激光加工的效率进行提升。而叠加脉冲打孔的方式与它们不同, 它是通过将短脉冲序列叠加到大能量的连续激光

或长脉冲上, 从而得到两种特性的叠加输出再聚焦于材料上来进行激光加工<sup>[10]</sup>。

美国的 FOX 首次使用脉冲 Nd:glass 激光器与连续 CO<sub>2</sub> 激光器的叠加输出对金属材料进行打孔实验, 将穿孔速率提高了 50% 以上之后, 脉冲叠加打孔方式便成为了一种可靠的提高激光打孔效率的方式。2006 年, 德国的 WALTHER 采用了两台 Nd:YAG 分别输出 0.5ms 长脉冲以及 17ns 窄脉宽脉冲并叠加进行激光打孔, 使得打孔效率及重复稳定性又得到了进一步的提高<sup>[11]</sup>。这些研究都证明了采用这种大脉冲能量或高平均功率激光与短脉冲高峰值激光的叠加输出能够有效地降低穿孔的时间以及所需要的能量<sup>[12]</sup>。而要实现这种特殊的脉冲叠加输出, 现在国内外多采用两台激光器分别输出两种特性的激光并进行空间合束的方式。

这种两台激光器合束的好处是: 两种特性的脉冲激光分别可控, 能够获得稳定的叠加脉冲。但同时也有以下两个方面的缺点: (1) 两束激光需要通过空间

作者简介: 张 杨(1988-), 男, 硕士研究生, 现主要从事高功率固体激光器的研究。

\* 通讯联系人。E-mail: zx@mail.hust.edu.cn

收稿日期: 2015-04-21; 收到修改稿日期: 2015-04-30

合束的方法来混合,既提高了技术难度,又提高了对合束器损伤阈值的要求;(2)需要至少两台激光器进行合束,既提高了成本,又增大了设备体积,限制了它在工业中的应用范围。因此对获得叠加脉冲的方法的研究有着重要意义。

本文中研究了一种新的产生叠加脉冲方式。这种方式通过对工作物质的不同区域进行划分,一部分自由运转产生长脉宽脉冲,另一部分进行调Q来产生短脉宽脉冲,并同轴输出来获得叠加脉冲。这种方法可以实现长脉冲与窄脉冲序列的叠加,也能使用在连续激光与窄脉冲序列的叠加输出,非常利于工业应用。

### 1 叠加脉冲激光器的基本结构及工作原理

对于脉冲抽运的激光器,要使得输出具有大的单脉冲能量,应该增加抽运功率,加长抽运时间,增加脉冲宽度,而要得到高的峰值功率,又需要压缩脉宽,使得能量集中在短时间内输出,得到高功率,这样单脉冲的能量又不会很高,因此要在一台激光器上同时得到这两种特性是很困难的,所以需要激光工作物质不同区域进行划分,并进行不同的操作来同时获得两种输出。

#### 1.1 叠加脉冲激光器的基本结构

激光器的基本结构如图1所示。谐振腔由3个腔镜组成, $M_1$ 为输出镜, $M_2$ 与 $M_3$ 为全反镜,棒状工作物质置于 $M_1$ 与 $M_2$ 之间,调Q器件置于 $M_2$ 与 $M_3$ 之间。 $M_2$ 中央打了一个通孔,通孔直径小于激光棒的直径,由此 $M_2$ 将谐振腔分隔成了两个子腔 $M_1$ - $M_2$ 与 $M_1$ - $M_3$ 。

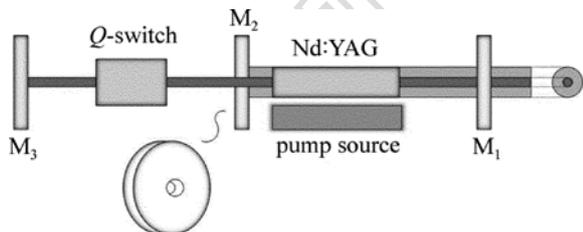


Fig. 1 Setup of the superposed pulse laser

#### 1.2 叠加脉冲激光器工作原理

由于腔内插入了带小孔全反镜 $M_2$ ,使得工作物质从空间上分隔成了两个区域,中心处以及外环处。当激光器开始工作,光在子腔 $M_1$ - $M_2$ 中自由运转,由于 $M_2$ 中央的通孔,那么工作物质中央部分无法形成谐振,就使得输出激光形成一个中空的光斑,这一部分得到长脉宽、大能量的脉冲输出光束。而穿过 $M_2$ 的光束被 $M_3$ 反射回来形成振荡,输出一个圆形的光斑,与外环光束同轴输出,填补了外环光斑的中空。这种分隔方式给叠加脉冲的操作带来了极大的好处,它

使得一束激光被分隔为两束,它们在腔内的运转有重叠的部分也有分开部分。分开的部分使得对中心光束的单独操作变为可能,在 $M_2$ 与 $M_3$ 之间加入调制器件便可以很轻松地对其进行调Q操作从而获得窄脉宽输出,而外环光束可以自由振荡输出大能量的激光。由于两束光处于同一抽运下,在脉冲抽运情况下,两束光可以很容易地获得时间上的同步叠加,叠加时序如图2所示。同时, $M_2$ 镜上小孔中心与工作物质的同轴性,又保证了中心光束与外环光束的同轴输出,避免了两台激光器空间合束再聚焦产生叠加脉冲输出时两光束不易同轴的问题。

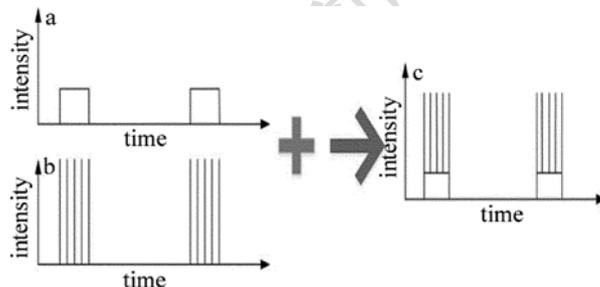


Fig. 2 Superposition of a long-duration pulse and a burst of short-duration pulses  
a—output intensity distribution in the time region of the pulse 1  
b—output intensity distribution in the time region of the pulse 2  
c—output intensity distribution in the time region of superposed pulse

### 2 叠加脉冲输出实验及结果

实验装置实物如图3所示,工作物质采用的是掺杂原子数分数为0.01的棒状Nd:YAG晶体,直径7mm,有效长度140mm。抽运源为两个脉冲氙灯,脉宽0.1ms到20ms可调。 $M_1$ , $M_2$ 与 $M_3$ 都是平面镜, $M_2$ 和 $M_3$ 为全反镜, $M_2$ 中央打有直径2mm通孔, $M_1$ 对于1064nm波长光的透过率为70%。腔长为840mm,Nd:YAG置于中央, $M_2$ 与 $M_3$ 之间距离210mm。调Q器件采用的是俄罗斯晶通公司生产的高电阻率的磷酸钛氧钾(high-resistivity  $\text{KTiPO}_4$ , RKTP)晶体与偏振片组成的光电(electro-optic, EO)Q开关进行降压式光电调Q, RKTP晶体Q开关的尺寸为6mm×6mm×20mm,驱动电源的下降沿为20ns。

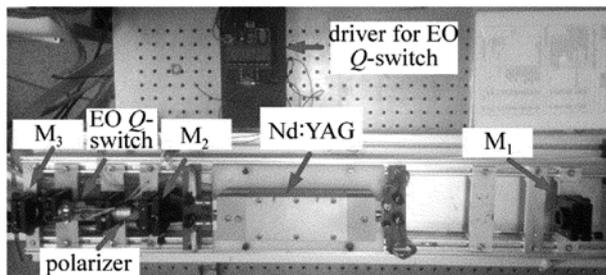


Fig. 3 Experiment device object graph of superposed pulsed laser

### 2.1 环形长脉冲输出

首先将子腔  $M_1-M_3$  阻断,那么只剩下子腔  $M_1-M_2$  在在脉冲抽运下自由运转,此时的实验装置如图 4 所示。

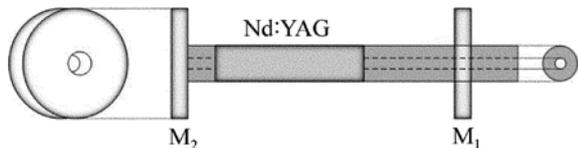


Fig. 4 Experiment setup of ring-shaped laser output

环形长脉冲的输出光斑如图 5 所示。可以看到,光斑能量沿环状分布较为均匀,腔内由于  $M_2$  中心处的通孔,中央部分不起振,有一个圆形的空洞。

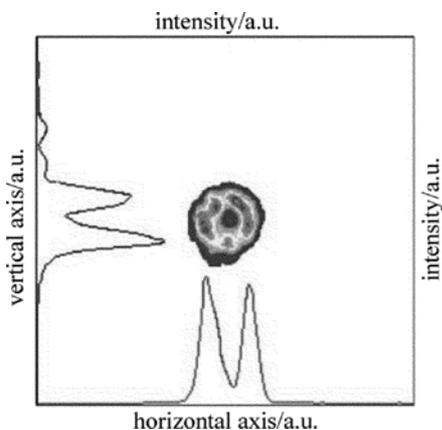


Fig. 5 Laser beam profile of the ring shaped laser output

由于脉冲很宽(10ms),输出波形与方波较为相近(如图 6 所示),那么对于窄脉宽脉冲来说,可以视为连续的输出。这样的波形可以保证在短脉冲序列叠加上去的时候,一段时间内照射到材料上的能量保持稳定,有利于提高激光打孔的重复稳定性。

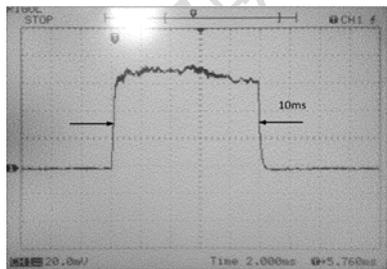


Fig. 6 Pulse profile of the ring shaped laser output

### 2.2 叠加脉冲输出实验

将子腔  $M_1-M_3$  的阻断撤去, $Q$  开关上不加电压,激光在两个子腔中自由振荡,输出的光斑如图 7 所示。可以看到,输出激光光斑分布中环形的光斑中央不再是空洞,而是由一个圆形的光斑所填补。中央光斑和外环光斑同心,实现了同轴输出,这就使得叠加脉冲的输出能够使用一套光学聚焦系统来聚焦到材料表面进行激光打孔。中央的尖峰与环状光斑之间有明显的凹

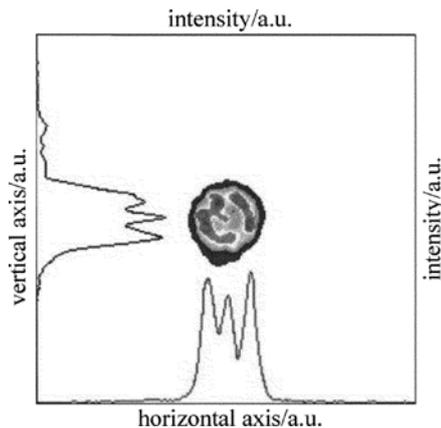


Fig. 7 Laser beam profile when center laser and ring shaped laser resonate together

陷,形成这样的光强分布是由于全反镜  $M_2$  上的小孔边缘的衍射损耗所导致。外环光束参量积 (beam parameter product, BPP) 经测量为  $7 \text{ mm} \cdot \text{mrad}$ ,中心光束 BPP 为  $2.2 \text{ mm} \cdot \text{mrad}$ 。在经过准直聚焦后,两束光的焦点会有几毫米的距离。在激光打孔应用中,将材料表面放置于中心光束焦点处,这样由外环光束产生的加热区增大,会在一定程度上对打孔更为有利。

$Q$  开关加上高压调制信号,将调制信号与抽运电源信号进行同步,调节抽运与调制信号可以获得不同的叠加脉冲输出。得到叠加脉冲输出波形如图 8 和图 9 所示。图 8 中叠加脉冲包络的总能量为  $7.1 \text{ J}$ ,脉宽  $10 \text{ ms}$ ,重复频率  $9 \text{ Hz}$ ,平均功率  $64 \text{ W}$ ,调  $Q$  频率  $1 \text{ kHz}$ ,脉冲宽度  $63 \text{ ns}$ ,峰值功率  $47.6 \text{ kW}$ 。图 9 中叠加脉冲包络的总能量为  $10.4 \text{ J}$ ,脉宽  $10 \text{ ms}$ ,重复频率  $9 \text{ Hz}$ ,平均功率  $93.4 \text{ W}$ ,调  $Q$  频率  $2 \text{ kHz}$ ,脉冲宽度  $60 \text{ ns}$ ,峰值功率  $46.7 \text{ kW}$ 。与普通调  $Q$  的情况相比,中央光束在积累粒子数阶段,由于存在外环振荡,会对中心反转粒子数产生争夺,会对  $Q$  开关打开时的超阈值有影响。而这个影响又由于弛豫振荡的存在具有一定的不确定

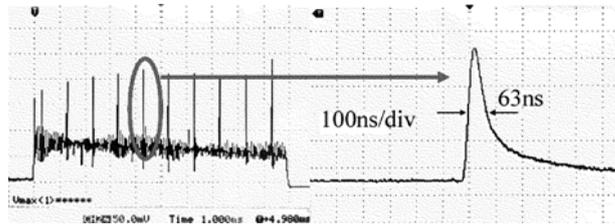


Fig. 8 Output pulse profile of the superposed pulse with 8kW pump power

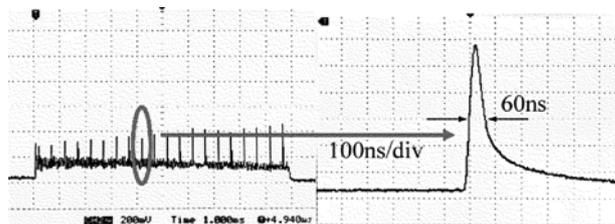


Fig. 9 Output pulse profile of the superposed pulse with 10kW pump power

性,因此在一定程度上影响了调  $Q$  脉冲输出的稳定性。

### 2.3 中央光束的输出对比

将抽运频率设置为 9Hz,调整抽运氙灯的注入功率,测量得到中央光束的平均功率。再将  $M_2$  镜撤去,用一个直径 2mm 的小孔光阑代替,调整光阑使之与之前  $M_2$  镜中央小孔位置相同(如图 10 所示)。

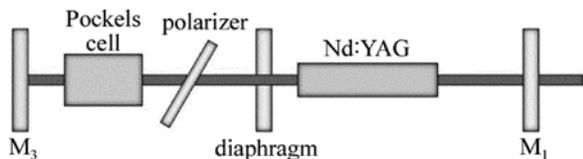


Fig. 10 Experiment setup of the sub-resonator  $M_1$ - $M_3$  and center laser

测量此时的中央光束的平均功率,结果如图 11 所示。可以看到,中央光束与外环光束共同振荡时,中央光束的功率比它单独振荡时低。而且随着抽运电流的增大,功率会在 2.5W 左右上下波动,并不会像单独振荡时那样随着抽运电流的增加而呈线性增长。

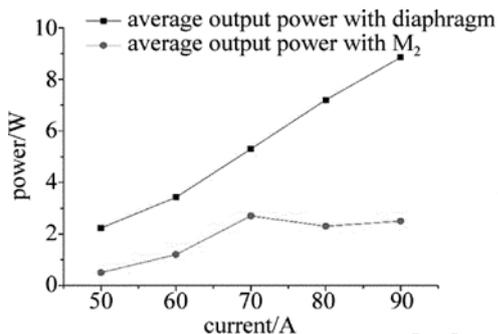


Fig. 11 Average output power of center laser beam versus injection power in different conditions

造成这个现象的原因是中央光束与外环光束同时振荡时,在工作物质的不同区域同时都在消耗上能级反转粒子数,各区域间的反转粒子会互相争夺,这就造成了中央光束和外环光束之间产生了一定的影响,使得中央光束的输出功率无法进一步提升,也在一定程度上限制了中央光束的调  $Q$  效果。

### 3 结 论

研究了一种利用同一工作物质不同增益区域来分别获得两种特性的同轴叠加输出的办法,在单台激光器上获得两种脉冲的叠加输出,所得结论如下。

(1) 获得了时间上叠加,空间上同轴输出的叠加脉冲,说明激光器结构能够代替以往两台激光器通过

空间合束的方法来获得叠加脉冲输出,避免了空间合束中的光束不同轴以及合束器抗损伤阈值需求较高的问题。

(2) 实验得到了最大脉冲能量 10.4J,脉宽 10ms,重复频率 9Hz,平均功率 93.4W,调  $Q$  频率 2kHz,脉冲宽度 60ns,峰值功率 46.7kW 的叠加脉冲输出,可以满足激光打孔加工的要求。

(3) 发现了光束在工作物质不同区域振荡时会产生反转粒子数争夺的现象,使得中央部分功率有所降低,同时影响了调  $Q$  脉冲的稳定性,针对这个现象的进一步研究还在进行中。

### 参 考 文 献

- [1] SCHULZ W, EPELT U, POPRAWA R. Review on laser drilling I. Fundamentals, modeling, and simulation[J]. Journal of Laser Applications, 2013, 25(1): 012006.
- [2] ASHKENASI D, KASZEMEIKAT T, MUELLER N, et al. Laser trepanning for industrial applications[J]. Physics Procedia, 2011, 12(1): 323-331.
- [3] SCHULZ W, EPELT U. The theory of laser materials processing [M]. Berlin, Germany: Springer Group, 2009: 129-165.
- [4] BRAJDIC M, WALTHER K, EPELT U. Analysis of laser drilled deep holes in stainless steel by superposed pulsed Nd:YAG laser radiation[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2008, 46(9): 648-655.
- [5] DAI G, LU J, NI X W, et al. Experiment of long pulse high energy laser drilling on silica glass[J]. Optics and Precision Engineering, 2011, 19(2): 380-386.
- [6] SOLOKHIN S A, SIROTKIN A A, GARNOV S. Diode pumped Nd:YAG laser with active Q-switching and mode locking for hole drilling [J]. Laser Physics, 2011, 21(6): 1145-1149.
- [7] LEHANE C, KWOK H S. Enhanced drilling using a dual-pulse Nd:YAG laser[J]. Applied Physics, 2001, A73(1): 45-48.
- [8] WANG X D, MICHALOWSKI A, DAUSINGER F, et al. Double-pulse technique for short pulse laser drilling[J]. Laser Technology, 2009, 33(3): 283-286 (in Chinese).
- [9] WANG X. Ablation mechanisms of double nanosecond pulses laser drilling[C]//Photonics and Optoelectronics (SOPO) 2012 Symposium. New York, USA: IEEE, 2012: 1-2.
- [10] WALTHER K, BRAJDIC M, WAWERS W. Tailored light 2[M]. Berlin, Germany: Springer Group, 2011: 365-393.
- [11] WALTHER K, BRAJDIC M, KREUTZ E W. Enhanced processing speed in laser drilling of stainless steel by spatially and temporally superposed pulsed Nd:YAG laser radiation[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2008, 35(9/10): 895-899.
- [12] ARRIZUBIETA I, LAMIKIZ A, MARTINEZ S, et al. Internal characterization and hole formation mechanism in the laser percussion drilling process [J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2013, 75(12): 55-62.