

基于 Nd:YAG/Cr:YAG 复合晶体结构的被动调 Q 固体微片激光器

高旭恒^{**}, 吴立志^{*}

南京理工大学化工学院, 江苏 南京 210094

摘要 研究了一种基于 Nd:YAG/Cr:YAG 复合晶体结构的被动调 Q 固体微片激光器。以 Cr:YAG 可饱和吸收体为被动调 Q 器件,采用元件一体化设计,输出单脉冲能量为 3.5 mJ,脉宽为 2.1 ns,峰值功率为 1.67 MW,性能指标达到国际同类水平。利用被动调 Q 激光速率方程,计算了微片激光器的关键参数,脉冲能量的理论值与实验值基本一致。对复合微片激光器元件进行了集成和组装,得到了 Nd:YAG/Cr:YAG 微片激光器原理样机。样机能够成功击穿目标靶附近的空气并产生等离子体,初步满足了作为激光火花塞的技术要求。

关键词 激光技术; 被动调 Q 固体激光器; 复合微片激光器; 激光诱导等离子体点火; 被动调 Q 速率方程

中图分类号 TN242; TN248

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP56.061401

Passively Q-Switched Solid State Monolithic Laser Based on Composite Nd:YAG/Cr:YAG Crystal

Gao Xuheng^{**}, Wu Lizhi^{*}

School of Chemical Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing, Jiangsu 210094, China

Abstract A passively Q-switched solid state monolithic laser based on the composite Nd:YAG/Cr:YAG crystal is studied. A Cr:YAG saturable absorber is taken as the passively Q-switched unit and the component integration design is adopted. A laser with output energy of 3.5 mJ, pulse width of 2.1 ns and peak power of 1.67 MW is obtained. The performance factors reach the same level in the world. The key parameters of this monolithic laser are calculated based on the passively Q-switched rate equation, and the theoretical pulse energy value is basically consistent with the experimental value. A prototype of the Nd:YAG/Cr:YAG monolithic laser is obtained based on the integration and assembly of the components of a composite monolithic laser, which can successfully breakdown the air near the target and induce plasma. The preliminary requirement as a laser plug is satisfied.

Key words laser technique; passively Q-switched solid state laser; composite monolithic laser; laser induced plasma ignition; passively Q-switched rate equation

OCIS codes 140.3540; 140.3538; 140.3440

1 引言

激光诱导等离子体点火作为一种新型的内燃机点火手段受到了国内外研究人员的广泛关注。与传统的电火花点火技术相比,激光诱导等离子体点火具有点火能量和点火时间可控的优势^[1-3]。此外,激光诱导等离子体点火能够实现多点点火从而缩短燃烧时间,增大燃烧时产生的压力,提高发动机的能量利

用效率^[4-6]。

激光诱导等离子体点火系统通常使用半导体激光二极管抽运的固体激光器(DPSSL)作为光源^[7-8]。这种激光器结合了半导体激光器和固体激光器的优点,具有能量转换效率高、光束质量好、体积小、成本低的优势^[9],能够被安装在内燃机的气缸上从而实现商业化应用。根据增益介质的不同,DPSSL 通常有两种,一种使用 Yb:YAG 作为增益介质,另一种

收稿日期: 2018-09-27; 修回日期: 2018-09-29; 录用日期: 2018-10-17

基金项目: 国家自然科学基金(11672137,11202105)

* E-mail: wulizhi@njust.edu.cn; ** E-mail: 2277467689@qq.com

使用 Nd:YAG 作为增益介质。Yb:YAG 晶体吸收带宽较宽^[10],有利于抽运光能量的充分吸收,因而 Yb:YAG 激光器的光-光转换效率较高。Nd:YAG 晶体具有更大的受激发射截面^[10],阈值反转粒子数的密度较低,故实现激光发射所需的抽运功率的阈值较低。此外,Nd:YAG 晶体的荧光寿命为几百微秒^[10],有利于其在亚稳态能级积累足够的反转粒子数,因此,Nd:YAG 激光器可以输出较高的脉冲能量以产生激光诱导等离子体。在实际应用中,以 Nd:YAG 晶体作为增益介质的 DPSSL 被用作激光诱导等离子体点火系统光源的情况更为普遍。

为了能够击穿空气并产生等离子体,聚焦点处的激光辐照度需要达到 $100 \text{ GW} \cdot \text{cm}^{-2}$ 左右^[11]。相应地,DPSSL 产生的激光脉冲的能量应达到毫焦量级,脉宽约为几个纳秒。利用基于 Cr:YAG 晶体的被动调 Q 技术,可以获得满足激光诱导等离子体点火系统要求的激光脉冲。与主动调 Q 技术(如电光调 Q)相比,基于 Cr:YAG 可饱和吸收体的被动调 Q 技术的激光器结构简单、体积小,其产生的激光脉冲能量高、脉宽短^[12]。2007 年,Kofler 等^[13]利用 Nd:YAG 晶体作为增益介质,利用 Cr:YAG 晶体作为调 Q 器件,采用端面抽运的方式,获得了脉宽为 1.5 ns、单脉冲能量为 1.6 mJ 的激光脉冲输出。2010 年,Tsunekane 等^[14]研发了一种可用于激光诱导等离子体点火的小体积 DPSSL,其输出单脉冲能量为 2.7 mJ、脉宽为 600 ps。2011 年,Bhandari 等^[15]研发的小体积 DPSSL 输出的单脉冲能量为 3 mJ,脉宽 365 ps,峰值功率高达 8.2 MW。但是,上述 3 种激光器的光学元件均未得到集成,故激光器的体积较大,无法直接安装在内燃机气缸上。2012 年,Lee 等^[16]以初始透射率 $T_0 = 9.0\%$ 的 Cr:YAG 可饱和吸收体作为调 Q 元件,采用单侧抽运的方式获得了高功率的脉冲输出。Lee 等研制的激光器的单脉冲能量高达 53 mJ,脉宽为 10.4 ns,峰值功率为 5.1 MW,但是该激光器所需抽运功率高达 3880 W,并且激光器的腔长达 170 mm,系统体积较大。

为了缩小激光器体积、进一步提高激光器性能,基于微片技术的 DPSSL 在近些年受到了研究人员的关注^[17-18]。研究人员将增益介质与可饱和吸收体键合在一起,使激光器的性能得到了显著的提高。2008 年,Miao 等^[19]利用 Nd:YAG/Cr:YAG 复合晶体搭建了一台被动调 Q 激光器,该激光器的输出脉冲宽度为 6 ns,单脉冲能量为 38.5 μJ ,光-光转换

效率达 18%。Miao 等搭建的激光器单脉冲能量较低,不能满足等离子体产生的要求,且输出镜未与晶体集成。2009 年,Wang 等^[20]利用 Nd:YAG/Cr:YAG 复合晶体获得了脉宽为 2.05 ns、单脉冲能量为 67.3 μJ 的激光输出。Wang 等研制的激光器同样存在单脉冲能量低、腔镜未与晶体集成的缺点。基于微片技术的 DPSSL 可以用来实现激光多点点火和脉冲序列点火。2011 年,Pavel 等^[21]基于复合陶瓷开发的 Nd:YAG/Cr:YAG 微片激光器实现了三光束输出,输出激光的单脉冲能量为 2.4 mJ,峰值功率为 2.8 MW,可作为激光多点点火系统的光源使用。另外,通过调节抽运脉宽和抽运功率可以使微片激光器发射不同数目的脉冲,实现脉冲序列点火,从而增大点火成功率,提高燃烧效率。2010 年,Tsunekane 等^[14]利用可发射不同数量脉冲的小体积 DPSSL 点燃不同混合比的可燃气体混合物,结果表明脉冲序列点火能够提高点火成功率。2016 年,Lorenz 等^[22]利用可发射多脉冲的被动调 Q 激光火花塞进行了激光脉冲序列点火实验,提高了稀薄可燃气体混合物的燃烧效率。

本文报道了一种基于 Nd:YAG/Cr:YAG 复合微片结构的可用于内燃机激光诱导等离子体点火的微片激光器。该激光器以 Nd:YAG 晶体作为增益介质,以 Cr:YAG 晶体作为饱和吸收体。使用准连续的半导体二极管激光器作为抽运源,并将增益介质、可饱和吸收体、腔镜集成在一块单片上,提高了微片激光器的脉冲能量,缩短了输出激光的脉冲宽度。通过建立被动调 Q 激光器的理论模型,计算了该激光器的单脉冲能量、峰值功率和脉宽。基于被动调 Q 激光速率方程,得到了单个抽运周期内增益介质中的反转粒子数密度和腔内光子数密度随时间的变化曲线。脉冲能量的理论值与实验结果相符合。对基于 Nd:YAG/Cr:YAG 复合微片结构的单片激光器进行集成化和封装,得到了原理样机并测试了其性能。

2 实验装置

图 1(a)和(b)分别为基于 Nd:YAG/Cr:YAG 复合晶体结构的单片激光器的示意图和复合晶体的实物图。激光器使用半导体激光二极管作为抽运源,其波长为 808 nm,功率为 135 W,输出端光纤的纤芯直径为 400 μm 。通过准连续波(QCW)抽运的方式为增益介质提供输入能量。抽运源发出的波长为 808 nm 的抽运光经过输入耦合装置聚焦入射到增益介质中。

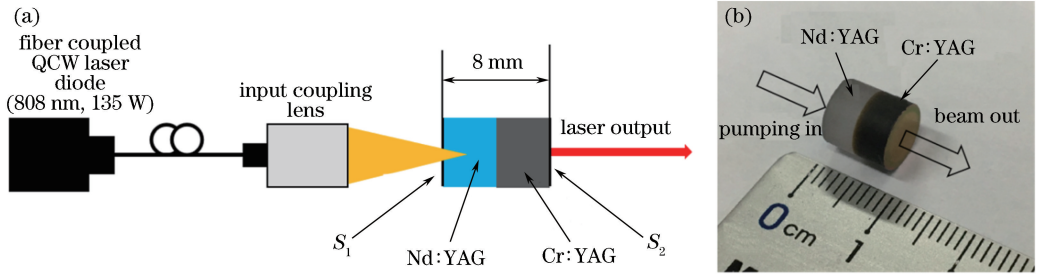


图 1 激光器示意图及增益介质。(a)基于 Nd:YAG/Cr:YAG 复合晶体结构的单片激光器示意图；
(b)与 Cr:YAG 可饱和吸收体键合在一起的 Nd:YAG 增益介质

Fig. 1 Schematic of laser and gain media. (a) Schematic of composite Nd:YAG/Cr:YAG monolithic laser; (b) Nd:YAG gain media bounded with Cr:YAG saturable absorber

激光器采用 Nd 粒子掺杂(原子数分数为 1.1%)的 Nd:YAG 晶体作为增益介质。Nd:YAG 晶体的直径为 8 mm,长为 4 mm。增益介质的入射面(图 1 中的 S_1 面)镀有 808 nm 波段的增透膜,透射率 T 大于 95%。同时, S_1 面还镀有 1064 nm 波段的全反膜,反射率 R 大于 99.8%。增透膜有利于提高增益介质对抽运光能量的吸收效率,进而可以提高激光器的光-光转换效率,全反膜则组成激光腔的一部分,相当于全反镜。可饱和吸收体采用 Cr:YAG 晶体,长度为 4 mm,直径为 8 mm。选用较低的初始透射率能够明显提高输出激光脉冲的能量并压缩脉宽,但同时要求抽运源的功率也随之增加。选用较高的初始透射率能够在较低功率下产生调 Q 激光脉冲,但是获得的脉冲能量较低,脉宽亦较大。综合之前的实验结果,本文选择初始透射率为 30%的 Cr:YAG 晶体进行实验。Cr:YAG 晶体与 Nd:YAG 晶体通过键合的方式集成在一起。Cr:YAG 晶体的输出面(S_2 面)镀有反射率为 50%的 1064 nm 波段的半反膜, S_2 面亦是激光器的输出镜。复合微片激光器的整体腔长为 8 mm,同时也是 Nd:YAG/Cr:YAG 复合晶体的长度。复合微片激光器产生的激光脉冲经过聚焦可在目标靶附近的空气中产生明显的等离子体击穿现象,因此可以通过放置于目标靶附近的光电传感器探测激光信号,同时可用示波器进行记录。激光脉冲的能量则可使用激光能量计进行测量。

3 实验结果及分析

图 2 为复合微片激光器的总输出能量、光-光转换效率随抽运光能量变化的曲线。抽运光的能量可通过改变其脉宽来调节。抽运源的重复频率固定为 1 Hz。如图 2 所示,Nd:YAG/Cr:YAG 复合微片

激光器在实验条件下的能量阈值为 122.1 mJ。当波长为 808 nm 的抽运光能量高于阈值时,复合微片激光器开始发射波长为 1064 nm 的激光脉冲。随着抽运光能量的增加,复合微片激光器输出的总激光能量呈台阶式增长,Tsunekane 等^[14]和 Lee 等^[16]亦报道过类似的实验现象。微片激光器输出的总激光能量呈台阶式增长的原因在于被动调 Q 复合微片激光器具有较高的能量阈值,激光器在输出一个脉冲之后,其上能级需要较长的抽运时间(一般为几百微秒)才能重新积累足够的达到脉冲发射阈值的反转粒子数^[14]。在这段抽运时间内,谐振腔内无新的脉冲产生,因此输出的总激光能量基本恒定,呈平台状。随着抽运时间继续增加,当上能级积累的反转粒子数重新达到阈值要求时,微片激光器开始发射第二个脉冲,新的平台也随之出现。

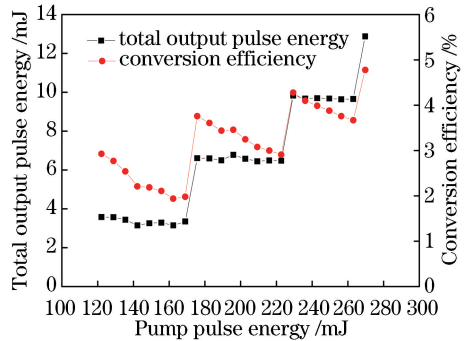


图 2 复合微片激光器的总输出能量、光-光转换效率随抽运光能量变化的曲线
Fig. 2 Total output pulse energy and conversion efficiency versus pump pulse energy

当抽运光能量为 175.7 mJ 时,单个抽运周期内的第二个输出脉冲出现。抽运光能量为 229.4 mJ 时,单个抽运周期内的第三个输出脉冲出现。因此

可以通过调节半导体激光抽运源的脉宽实现复合微片激光器的脉冲序列点火。当抽运光能量为 269.7 mJ 时,复合微片激光器的总输出能量达到 12.88 mJ,输出的脉冲串包含 4 个激光脉冲,光-光转换效率达到 4.78%。在每个台阶内部,光-光转换效率随着抽运光能量的增加而降低。这是由于当抽运光能量低于下一平台的阈值时,抽运光能量的增加并不能产生新的激光脉冲。

图 3 为 Nd:YAG/Cr:YAG 复合微片激光器的单脉冲能量、脉宽、输出脉冲数目和峰值功率随抽运光能量的变化。如图 3(a) 所示,随着半导体抽运光

能量的增加,复合微片激光器输出激光的单脉冲能量和脉宽基本保持不变。输出激光的单脉冲能量为 3.5 mJ,脉宽为 2.1 ns。由此可以得到复合微片激光器输出的激光脉冲的峰值功率随抽运光能量的变化,如图 3(b) 所示。根据图 3(b) 可知,输出激光脉冲的峰值功率维持在 1.67 MW 左右,随着抽运光能量的变化而小幅波动。另外,单个抽运周期内复合微片激光器产生的激光脉冲数目随抽运光能量的变化呈台阶式增长。当抽运光的脉冲能量为 269.7 mJ,对应抽运光的脉宽为 2 ms 时,输出脉冲序列包含 4 个激光脉冲。

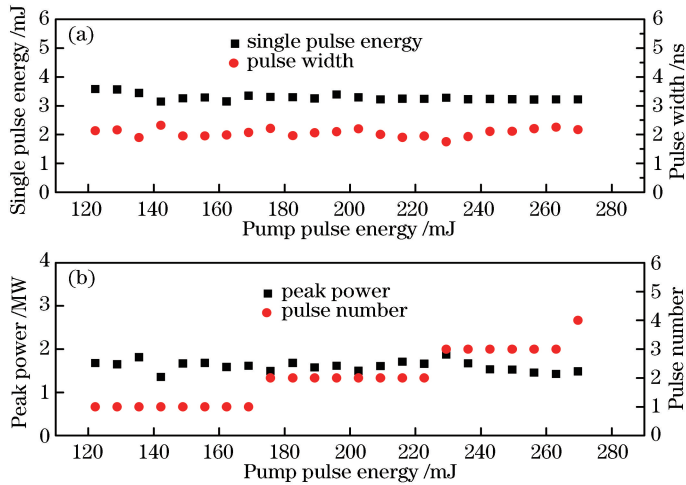


图 3 Nd:YAG/Cr:YAG 复合微片激光器输出光参数随抽运光能量的变化。(a)单脉冲能量和脉宽;
(b)输出脉冲数目和峰值功率

Fig. 3 Output parameters of composite Nd:YAG/Cr:YAG monolithic laser versus pump pulse energy.
(a) Single output pulse energy and pulse width; (b) output pulse number and peak power

另外,调节抽运光的功率和脉宽,可使微片激光器发射不同数目的脉冲,实现脉冲序列点火。图 4 所示为 Nd:YAG/Cr:YAG 复合微片激光器输出的

激光脉冲序列。如图 4(a) 所示,当抽运光脉宽为 0.9 ms,对应抽运光的脉冲能量为 122.1 mJ 时,微片激光器开始输出单个脉冲。得到的调 Q 激光脉

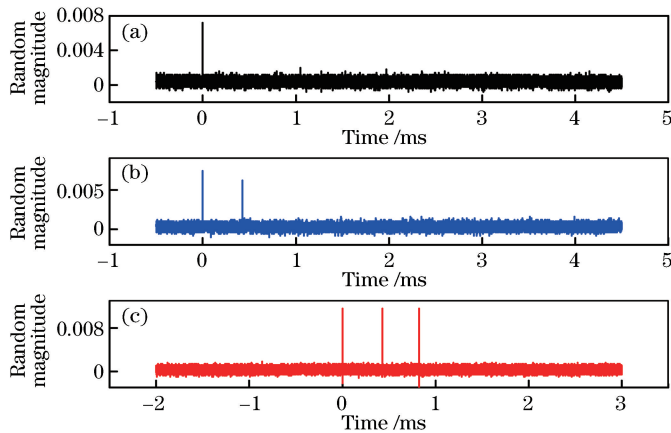


图 4 不同抽运光脉宽下,Nd:YAG/Cr:YAG 复合微片激光器的脉冲序列。(a) 0.9 ms;(b) 1.3 ms;(b) 1.7 ms
Fig. 4 Pulse trains of composite Nd:YAG/Cr:YAG monolithic laser under different pump laser durations.
(a) 0.9 ms; (b) 1.3 ms; (c) 1.7 ms

冲波形如图 5 所示,脉宽为 2.1 ns,对应的激光脉冲能量为 3.6 mJ,经计算可得峰值功率为 1.71 MW。当抽运光的脉宽为 1.3 ms,对应抽运光的脉冲能量为 175.7 mJ 时,微片激光器开始在单个抽运周期内输出 2 个脉冲,如图 4(b)所示,此时 2 个脉冲之间的间隔为 420 μ s。当抽运脉冲脉宽为 1.7 ms,对应抽运光的脉冲能量为 229.4 mJ 时,Nd:YAG/Cr:YAG 复合微片激光器在单个抽运周期内输出的脉冲序列包含 3 个脉冲,脉冲间隔为 420 μ s,脉冲频率为 2.22 kHz,如图 4(c)所示。

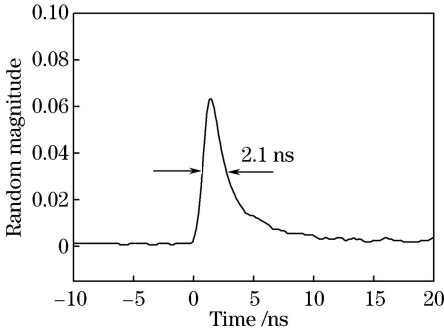


图 5 Nd:YAG/Cr:YAG 复合微片激光器的激光脉冲波形
Fig. 5 Temporal pulse profile of composite Nd:YAG/Cr:YAG monolithic laser

4 理论模型

被动调 Q 激光速率方程定量地描述了被动调 Q 激光脉冲的产生过程。利用此方程可以判断腔长、输出镜反射率、可饱和吸收体初始透射率等因素对被动调 Q 激光器性能的影响,计算特定参数下激光器的峰值功率、脉冲能量和脉宽,为被动调 Q 激光器的设计提供了理论指导。基于被动调 Q 激光器的速率方程,可以得到被动调 Q 激光器输出脉冲的主要参数的表达式^[23-24]

$$E = \frac{h\nu A}{2\sigma\gamma} \ln\left(\frac{1}{R}\right) \ln\left(\frac{N_i}{N_f}\right), \quad (1)$$

$$P = \frac{h\nu A l_g}{\gamma t_r} \ln\left(\frac{1}{R}\right) \left[N_i - N_{th} - N_{th} \ln\left(\frac{N_i}{N_{th}}\right) \right], \quad (2)$$

$$\tau_p = \frac{E}{P}, \quad (3)$$

式中: E 为输出脉冲的单脉冲能量; P 为输出脉冲的峰值功率; τ_p 为输出脉冲的脉宽; h 为普朗克常数; ν 为光的频率; A 为输出激光脉冲的有效光斑面积; σ 为激光增益介质的受激发射截面; l_g 为增益介质长度; R 为输出镜反射率; γ 为反转因子; $t_r = 2nL/c$,表示光子在腔体内经历一个来回所需的时间,

c 为光速, n 为介质的折射率, L 为腔长; N_i 表示初始反转粒子数密度,即调 Q 时刻增益介质中的反转粒子数密度; N_{th} 表示调 Q 之后增益介质的阈值反转粒子数密度; N_f 表示剩余反转粒子数密度,即脉冲发射终了时增益介质中的反转粒子数密度。对于 4 能级系统来说, $\gamma=1$ 。

将表 1 中的各项参数代入被动调 Q 激光速率方程,计算得到 Nd:YAG/Cr:YAG 复合微片激光器输出的激光脉冲能量 $E = 3.61$ mJ,脉宽 $\tau_p = 0.3$ ns。表 1 中各变量的含义如下: σ_{sg} 为饱和吸收体的基态吸收截面; σ_{se} 为饱和吸收体的激发态吸收截面; τ 为增益介质的上能级寿命; τ_s 为饱和吸收体的激发态寿命; l_s 为饱和吸收体的长度; N_0 为增益介质中的总工作粒子数密度; δ_L 为光子在腔内往返一周的耗散损耗; Φ 为腔内光子数密度。而实验得到的激光脉冲的脉冲能量为 3.5 mJ,脉宽为 2.1 ns。对比理论值和计算值可以发现,激光脉冲能量的理论值和计算值十分接近,而实际测得的脉冲宽度比计算结果要大。一般来说,有两个原因会影响实际激光脉冲的宽度^[25]。一方面,理论模型假设增益介质中的反转粒子数是均匀的,但实际上由于输入耦合系统的聚光作用,激活介质中的反转粒子数的分布并不是均匀的,这便造成激光脉宽的增加。另一方面,模型假设 Q 开关的作用是瞬时完成的,但实际上 Q 开关的作用需要一定的作用时间,而 Q 开关的速度会影响输出激光的脉宽和峰值功率,较慢的 Q 开关会使激光脉冲变宽,甚至会产生多脉冲现象。

表 1 Nd:YAG/Cr:YAG 复合微片激光器参数
Table 1 Parameters of composite Nd:YAG/Cr:YAG monolithic laser

| Parameter | Value | Parameter | Value |
|--------------------------------|------------------------|-------------------------|-----------------------|
| σ /cm ² | 2.35×10^{-19} | L /cm | 0.8 |
| σ_{sg} /cm ² | 4.3×10^{-18} | l_g /mm | 4 |
| σ_{se} /cm ² | 8.2×10^{-19} | l_s /mm | 4 |
| τ / μ s | 210 | R | 0.5 |
| τ_s / μ s | 3.4 | T_0 | 0.3 |
| γ | 1 | N_0 /cm ⁻³ | 1.52×10^{20} |
| n | 1.82 | A /mm ² | 0.283 |
| $h\nu$ /J | 1.87×10^{-19} | δ_L | 0.1 |
| c /(m·s ⁻¹) | 3×10^8 | | |

根据被动调 Q 激光器的速率方程,虽然无法得到反转粒子数密度、光子数密度随时间变化的解析解,但可以得到特定条件下的数值解。利用 Mathematica 软件求解上述微分方程,得到反转粒

子数密度、光子数密度随时间变化的曲线,如图6所示。图6(a)为复合微片激光器光腔中的光子数密度随反转粒子数密度变化的曲线,图6(b)为复合微片激光器增益介质中的反转粒子数密度随时间变化的曲线。初始反转粒子数密度为 $N_i = 1.74 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$, 阈值反转粒子数密度 $N_{th} = 4.31 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$, 剩余反转粒子数 $N_f = 3.32 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ 。超阈值 $N_i/N_{th} = 4.04$, 反转粒子数的利用率达到98.09%。图6(c)为复合微片激光器腔内的光子数密度随时间变化的曲线,其中最大光子数密度为 $1.94 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 。图6(d)为复合微片激光器增益介质中的反转粒子数密度和腔内光子数密度随时间变化的曲线,即图6(b)和(c)的合并后的图。由图6(d)可知,当反转粒子数密度等于阈值反转粒子

数密度时,腔内光子数密度达到最大值。当腔内光子数密度减小至零时,增益介质中的反转粒子数密度停止下降,此时的反转粒子数密度为剩余反转粒子数密度。另外,根据图6可以发现,调Q时刻(零时刻)之后,腔内光子数密度和增益介质中的反转粒子数密度并没有立即产生显著变化,这是因为此时腔内的光子数密度很小。据微分方程(1)式和(2)式,此时光子数密度变化率 $d\Phi/dt$ 和反转粒子数密度变化率 dN/dt 也很小。等腔内的光子数密度积累到一定程度后,反转粒子数密度和光子数密度才会产生明显的变化。计算表明,在Cr:YAG可饱和和吸收体达到饱和之后约2.5 ns时,增益介质中的反转粒子数密度开始显著下降,腔内光子数密度开始显著增大。

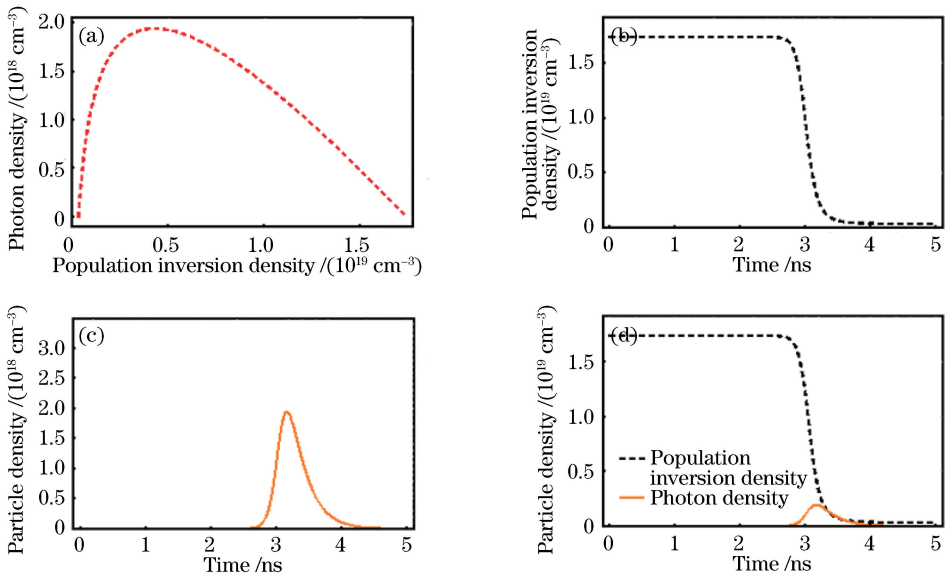


图6 模型解得的光子密度曲线和反转粒子数密度曲线。(a)腔内光子数密度随反转粒子数密度的变化; (b)反转粒子数密度随时间的变化;(c)光子数密度随时间的变化;(d)粒子数密度随时间的变化

Fig. 6 Curves of photon density and population inversion density calculated by model. (a) Photon density versus population inversion density; (b) population inversion density versus time; (c) photo density versus time; (d) particle density versus time

5 原理样机设计与集成

对复合微片激光器进行集成和组装。图7(a)

和(b)分别为复合微片激光器原理样机的设计图和实物图。激光器样机的直径为20 mm,长度为60 mm。当抽运光功率为135 W,抽运脉宽为1 ms

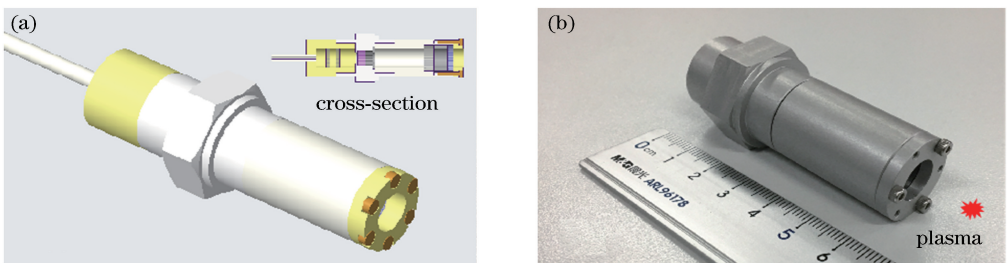


图7 Nd:YAG/Cr:YAG 复合微片激光器样机。(a)结构示意图;(b)实物图

Fig. 7 Prototype of composite Nd:YAG/Cr:YAG monolithic laser. (a) Structural diagram; (b) physical map

时,激光器输出激光的单脉冲能量为 3.4 mJ,脉宽为 2.1 ns,峰值功率为 1.62 MW。激光器内部安装有焦距为 30 mm 的凸透镜,用于对产生的调 Q 激光脉冲进行聚焦。在实验中,在激光器前端的白纸附近的空气中可以观察到明显的空气击穿现象。该激光器能够在空气中产生等离子体,可用于激光诱导等离子体点火。

6 结 论

报道了一种基于 Nd:YAG/Cr:YAG 复合晶体结构的 DPSSL。激光器使用 Nd:YAG 晶体作为增益介质,使用 Cr:YAG 可饱和吸收体($T_0=30\%$)作为被动调 Q 器件,实现了高能量、短脉宽的脉冲输出。使用准连续波抽运的半导体二极管激光器作为抽运源,提高了抽运效率和能量转换效率。通过将元器件进行集成,缩小了系统体积,提高了系统稳定性。尽管所研制的 DPSSL 的腔长被缩短了,但是其输出脉冲的能量得到了提高,脉宽也被压窄,输出激光脉冲的性能得到了提升。Nd:YAG/Cr:YAG 复合微片激光器的单脉冲能量为 3.6 mJ,脉宽为 2.1 ns,峰值功率可达 1.71 MW,这些输出参数达到了国外同等水平。通过调节抽运脉宽可以以脉冲序列模式发射激光脉冲,输出总脉冲能量最高可达 13 mJ,最高光-光转换效率为 4.78%。利用被动调 Q 激光速率方程计算了 Nd:YAG/Cr:YAG 复合微片激光器的主要性能参数。计算得到脉冲能量的理论值为 3.61 mJ,与实验值相符。激光器样机能够成功击穿目标靶附近空气并产生等离子体,有望作为激光火花塞应用于内燃机的点火系统。

参 考 文 献

[1] Dearden G, Shenton T. Laser ignited engines: Progress, challenges and prospects [J]. *Optics Express*, 2013, 21(S6): A1113-A1125.

[2] Tauer J, Kofler H, Wintner E. Laser-initiated ignition[J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2010, 4(1): 99-122.

[3] Chen M, Dou Z G, Xi W X. Advances in methods of laser-induced plasma ignition [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2018, 55(3): 030010.
陈梦, 窦志国, 席文雄. 激光诱导等离子体点火方法研究进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2018, 55(3): 030010.

[4] Nakaya S, Iseki S, Gu X J, *et al.* Flame kernel formation behaviors in close dual-point laser

breakdown spark ignition for lean methane/air mixtures [J]. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2017, 36(3): 3441-3449.

- [5] Phuoc T X. Single-point versus multi-point laser ignition: experimental measurements of combustion times and pressures [J]. *Combustion and Flame*, 2000, 122(4): 508-510.
- [6] Morsy M H, Ko Y S, Chung S H, *et al.* Laser-induced two-point ignition of premixture with a single-shot laser[J]. *Combustion and Flame*, 2001, 124(4): 724-727.
- [7] Myers M J, Myers J D, Guo B P, *et al.* Practical internal combustion engine laser spark plug development[J]. *Proceedings of SPIE*, 2007, 6662: 66620E.
- [8] Phuoc T X. Laser-induced spark ignition fundamental and applications [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2006, 44(5): 351-397.
- [9] Yang L, Dong J. Progress in laser ignition based on passively Q-switched solid-state lasers[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2015, 52(3): 030007.
杨林, 董俊. 基于被动调 Q 固体激光器的激光点火系统的研究进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2015, 52(3): 030007.
- [10] Geng A C. *Solid state laser and applications* [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2014: 57-67.
耿爱丛. *固体激光器及其应用* [M]. 北京: 国防工业出版社, 2014: 57-67.
- [11] Liedl G, Schuoecker D, Geringer B, *et al.* Laser-induced ignition of gasoline direct-injection engines [J]. *Proceedings of SPIE*, 2005, 5777: 955-961.
- [12] Gao P, Huang J H, Liu H G, *et al.* Passively Q-switched solid-state Tm:YAG laser with MoS₂ as saturable absorber [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2018, 45(7): 0701002.
高攀, 黄见洪, 刘华刚, 等. 基于可饱和吸收体 MoS₂ 的固态 Tm:YAG 被动调 Q 激光器[J]. *中国激光*, 2018, 45(7): 0701002.
- [13] Kofler H, Tauer J, Tartar G, *et al.* An innovative solid-state laser for engine ignition[J]. *Laser Physics Letters*, 2007, 4(4): 322-327.
- [14] Tsunekane M, Inohara T, Kanehara K, *et al.* Micro-solid-state laser for ignition of automobile engines [M] // *Advances in Solid State Lasers Development and Applications*. Tokyo: InTech, 2010: 195-210.
- [15] Bhandari R, Taira T. >6 MW peak power at 532 nm from passively Q-switched Nd:YAG/Cr⁴⁺:YAG

- microchip laser[J]. *Optics Express*, 2011, 19(20): 19135-19141.
- [16] Lee K, Lee H C, Cho J Y, *et al.* Passively Q-switched, high peak power Nd:YAG laser pumped by QCW diode laser [J]. *Optics & Laser Technology*, 2012, 44(7): 2053-2057.
- [17] Dong J, Wang G Y, Ren Y Y. Advances in passively Q-switched solid-state lasers based on composite materials[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2013, 40(6): 0601003.
董俊, 王光宇, 任滢滢. 基于复合材料的被动调Q固体激光器的研究进展[J]. *中国激光*, 2013, 40(6): 0601003.
- [18] Li L, Pan X R, Geng Y G. Temperature field of Nd:YAG microchip heat capacity laser end-pumped by LD[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2017, 54(12): 121404.
李隆, 潘晓瑞, 耿鹰鸽. LD端面抽运Nd:YAG微片热容激光器温度场[J]. *激光与光电子学进展*, 2017, 54(12): 121404.
- [19] Miao J G, Wang B S, Peng J Y, *et al.* Efficient diode-pumped passively Q-switched laser with Nd:YAG/Cr:YAG composite crystal [J]. *Optics & Laser Technology*, 2008, 40(1): 137-141.
- [20] Wang H X, Yang X Q, Zhao S, *et al.* 2 ns-pulse, compact and reliable microchip lasers by Nd:YAG/Cr⁴⁺:YAG composite crystal [J]. *Laser Physics*, 2009, 19(8): 1824-1827.
- [21] Pavel N, Tsunekane M, Taira T. Composite, all-ceramics, high-peak power Nd:YAG/Cr⁴⁺:YAG monolithic micro-laser with multiple-beam output for engine ignition[J]. *Optics Express*, 2011, 19(10): 9378-9384.
- [22] Lorenz S, Bärwinkel M, Mühlbauer W, *et al.* Pulse train ignition with passively Q-switched laser spark plugs under engine-like conditions[C] // Günther M, Sens M. *Ignition Systems for Gasoline Engines*. Cham: Springer, 2016: 254-259.
- [23] Dong J. Numerical modeling of CW-pumped repetitively passively Q-switched Yb:YAG lasers with Cr:YAG as saturable absorber [J]. *Optics Communications*, 2003, 226(1-6): 337-344.
- [24] Dong J, Lu J R, Ueda K I. Experiments and numerical simulation of a diode-laser-pumped Cr, Nd:YAG self-Q-switched laser [J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 2004, 21(12): 2130-2136.
- [25] Zhou B K, Gao Y Z, Chen Z R, *et al.* *Laser principles* [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2004: 226-227.
周炳琨, 高以智, 陈倜嵘, 等. *激光原理* [M]. 北京: 国防工业出版社, 2004: 226-227.