

波片提高声光 Q 开关关断 Nd : YAG 激光能力研究

李 港 王 菲 于 欣 陈 檬* 朱 琳 魏剑维

(北京工业大学 激光工程研究院, 北京 100022)

摘 要 采用琼斯矢量变换的方法, 分析了四分之一波片对入射椭圆偏振光偏振面的变换过程. 结合声光相互作用理论和声光介质熔石英在平行和垂直于声场的两个方向具有不同声光优值的特性, 理论推导了腔内引入四分之一波片后声光 Q 开关的布喇格衍射效率公式, 计算模拟得出引入四分之一波片能够有效地提高声光 Q 开关关断连续 Nd : YAG 激光的能力. 在理论分析的基础上进行了实验验证, 实验结果与理论分析符合得很好.

关键词 激光技术; 声光调 Q Nd : YAG 激光; 波片; 偏振面

中图分类号 TN248.1 **文献标识码** A

0 引言

为了获得窄脉宽、高峰值功率的激光脉冲, 需要对激光器进行调制, 常用的调制方法有转镜调 Q、声光调 Q、电光调 Q、饱和吸收调 Q 等^[1]. 声光调 Q 具有工作电压低、插入损耗小、重复频率高、高平均功率等^[2]优点, 已经被广泛应用于各类固体激光器中. 由于声光 Q 开关关断连续激光的能力有限, 如何提高其关断连续激光的能力愈来愈受到重视.

大功率声光 Q 开关的声光介质主要采用熔石英, 它的主要优点是光学均匀性好, 热性能稳定, 抗损伤阈值高; 缺点是声光优值小, 且与光的偏振态有关. 声光 Q 开关在超声纵波作用下, 偏振方向垂直于声场的偏振光束所对应的声光优值是平行情况下的 5 倍 ($M_{2\perp} = 1.51 \times 10^{-15} \text{ s}^3/\text{kg}$, $M_{2\parallel} = 0.3 \times 10^{-15} \text{ s}^3/\text{kg}$), 即声光 Q 开关衍射效率随光偏振态改变而变化. 因此, 国内外一些学者通过采用两维声光 Q 开关^[3]和双声光 Q 开关^[4~6]等方法来增加声光 Q 开关的衍射效率, 从而提高声光 Q 开关关断连续激光的能力.

根据熔石英声光 Q 开关的衍射特性和 $\lambda/4$ 波片的旋光特性^[7,8], 本文采用在腔内引入波片的方法来提声光 Q 开关关断连续 Nd : YAG 激光的能力, 并给出了详细的理论分析和实验研究.

1 理论分析

1.1 $\lambda/4$ 波片对椭圆偏振光偏振方向旋转特性分析

设沿 x 轴方向为入射正椭圆偏振光的长轴方向, 入射椭圆偏振光的琼斯矢量 E_1 为

$$E_1 = \begin{bmatrix} a_1 \\ -a_2 i \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中 $a_1 > a_2 > 0$. 当 $\lambda/4$ 波片的快轴与 x 轴成 $+45^\circ$ 角时, $\lambda/4$ 波片的琼斯矩阵^[9]

$$G = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 & -i \\ -i & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

对于偏振光 E_1 经过偏振器件 G_N 后出射光的琼斯矢量 E_2 满足

$$E_2 = G_N E_1 \quad (3)$$

由式(1)、(2)、(3)得入射椭圆偏振光 E_1 经过 $\lambda/4$ 波片后的出射光琼斯矢量 E_2 为

$$E_2 = G E_1 = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 & -i \\ -i & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_1 \\ -a_2 i \end{bmatrix} = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} a_1 - a_2 \\ -(a_1 + a_2) i \end{bmatrix} \quad (4)$$

即出射光 E_2 为长轴沿 y 轴方向的正椭圆. 当 E_2 再经过一个与其长轴方向成 $+45^\circ$ 角的 $\lambda/4$ 波片时, 由式(2)、(3)、(4)得出射光 E_3 为

$$E_3 = G E_2 = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 & -i \\ -i & 1 \end{bmatrix} \cdot \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} a_1 - a_2 \\ -(a_1 + a_2) i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -a_2 \\ -a_1 i \end{bmatrix} \quad (5)$$

出射光 E_3 为正椭圆偏振光, 与 E_1 相比, 长短轴方向旋转了 90° .

1.2 声光 Q 开关的衍射特性分析

当光束 E_i 以布喇格角入射到声光介质表面, 衍射光 E_d 及其衍射效率 η_s 可表示为^[10]

$$\eta_s = \frac{I_d}{I_i} = \left| \frac{E_d}{E_i} \right|^2 = \sin^2 \left[\frac{\pi}{\sqrt{2}\lambda} \sqrt{\left(\frac{L}{H} \right) M_2 P_s} \right] \quad (6)$$

式中 λ 是入射激光波长, L 和 H 分别为换能器的长度和宽度, M_2 为声光优值, P_s 为超声功率. 令 $K =$

$\frac{\pi}{\sqrt{2}\lambda} \sqrt{\frac{L}{H} P_s}$, 则式(6)变为

* Tel: 010-67396553 Email: chenmeng@bjut.edu.cn
收稿日期: 2005-01-28

$$\eta_s = \sin^2(K \sqrt{M_2}) \tag{7}$$

当 L 、 H 和 P_2 一定的情况下, 声光器件的 M_2 值越大, 则其布喇格衍射效率 η_s 越大. 由式(6)(7)可以得出

$$E_d = E_i \sin(K \sqrt{M_2}) \tag{8}$$

由于 Nd : YAG 晶体属于立方晶系, 其产生的激光是随机偏振光 E_i , 可将其分解为垂直 $E_{i\perp}$ 和水平 $E_{i\parallel}$ 的两束线偏振光分量, 且 $E_{2\perp} \parallel E_{i\perp}$, $M_{2\parallel} \parallel E_{i\parallel}$, 此时有

$$|E_{i\perp}| = |E_{i\parallel}| \tag{9}$$

对于线偏振光 E_{\perp} 、 E_{\parallel} , 由式(8)(9)得到单次通过声光 Q 开关衍射光分别为

$$E_{d\perp} = E_{i\perp} \sin(K \sqrt{M_{2\perp}}) \tag{10a}$$

$$E_{d\parallel} = E_{i\parallel} \sin(K \sqrt{M_{2\parallel}}) \tag{10b}$$

根据光功率守恒定律, 可以知道单次通过声光 Q 开关后的光为

$$E_{o\perp} = E_{i\perp} \sqrt{1 - \sin^2(K \sqrt{M_{2\perp}})} \tag{11a}$$

$$E_{o\parallel} = E_{i\parallel} \sqrt{1 - \sin^2(K \sqrt{M_{2\parallel}})} \tag{11b}$$

由于声光介质的两个方向的声光优值不同 ($M_{2\parallel} < M_{2\perp}$), 根据式(10a)、(10b)、(11a)和(11b)可以知道, 声光介质的两个方向上的布喇格衍射光强和单次通过声光 Q 开关后的出射光强都分别不相等, 即随机偏振光 E 经过声光 Q 开关后变成了椭圆偏振光, 长轴沿声场方向.

1.3 波片对提高声光 Q 开关衍射损耗的分析

1.3.1 腔内未引入 $\lambda/4$ 波片的情况

在未引入 $\lambda/4$ 波片的情况下, 谐振腔结构见图 1(a). 根据光守恒定律, 由式(6)、(7)、(8)、(9)、(10)

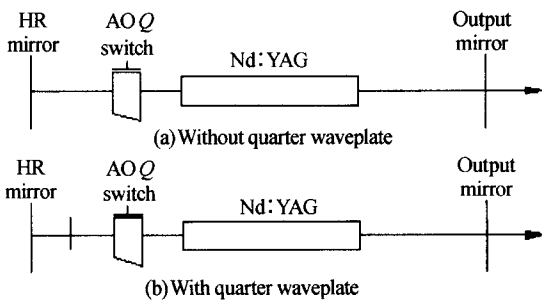


图 1 谐振腔结构
Fig. 1 Configuration of laser oscillator

和(11)可以得到从 Nd : YAG 输出的随机偏振光往返通过声光 Q 开关后总衍射效率

$$\eta_{s1} = \sin^2(K \sqrt{M_{2\perp}}) + \sin^2(K \sqrt{M_{2\parallel}}) - \frac{1}{2} [\sin^4(K \sqrt{M_{2\perp}}) + \sin^4(K \sqrt{M_{2\parallel}})] \tag{12}$$

1.3.2 腔内引入 $\lambda/4$ 波片的情况

在引入 $\lambda/4$ 波片的情况下, 谐振腔结构见图 1

(b). 设声光 Q 开关的声场方向与 $\lambda/4$ 波片快轴 (x 轴)成 $+45^\circ$ 角, 综合 $\lambda/4$ 波片对椭圆偏振光偏振方向的旋转特性分析和声光 Q 开关的衍射特性分析, 可以得出, 从 Nd : YAG 输出的随机偏振光先通过声光 Q 开关后变为椭圆偏振光 (见式(11a)和(11b)), E_1 经过一个快轴与椭圆长轴成 $+45^\circ$ 角的 $\lambda/4$ 波片后, 出射光 E_2 为椭圆偏振光且长短轴方向相对 E_1 旋转了 90° , 椭圆度 ϵ 也发生了变化. E_2 经过全反射镜反射后, 光的偏振态没有发生变化, 从而再次经过 $\lambda/4$ 波片时, $\lambda/4$ 波片的快轴与反射光长轴仍成 $+45^\circ$ 角, 此时从 $\lambda/4$ 波片出射的光为 E_3 (E_3 为一个和 E_1 的长短轴大小相等且分别互相垂直的正椭圆偏振光), 然后再次通过声光 Q 开关. 由式(6)、(7)、(8)、(9)、(10)和(11)可以得到总衍射效率

$$\eta_{s2} = \sin^2(K \sqrt{M_{2\perp}}) + \sin^2(K \sqrt{M_{2\parallel}}) - \sin^2(K \sqrt{M_{2\perp}}) + \sin^2(K \sqrt{M_{2\parallel}}) \tag{13}$$

由式(12)、(13)得衍射效率差值

$$\Delta\eta_s = \eta_{s2} - \eta_{s1} = \frac{1}{2} [\sin^2(K \sqrt{M_{2\perp}}) - \sin^2(K \sqrt{M_{2\parallel}})]^2 \tag{14}$$

即腔内引入 $\lambda/4$ 波片提高了声光 Q 开关的衍射损耗, 衍射效率相应提高了 $\Delta\eta_s$.

设换能器的长度和宽度分别为 $L=40$ mm 和 $H=4$ mm, 激光波长为 1064 nm, 根据式(14)模拟计算了 $\Delta\eta_s$ 与 P_s 之间理论曲线, 如图 2. 当声场强度为某些较大的特定值时, 此时声光 Q 开关在垂直和平行声场两个方向的布喇格衍射效率相等, 即引入 $\lambda/4$ 波片没有效果, 因此 $\Delta\eta_s/P_s$ 曲线表现为周期变化的. 事实上, 由于器件的特性, 声光驱动电源输出的射频功率转化为声功率的效率小于 50%. 因此对于最大输出的射频功率为 50W 的声光驱动电源, 只需要考虑 P_s 在(0~25 W)之间的部分即可. 在此范围内, $\Delta\eta_s$ 始终大于 0, 因此引入 $\lambda/4$ 波片有效的提高了声光 Q 开关的衍射效率. 当然, 如果声功率能达到 140~200 W, 声光 Q 开关衍射效率提

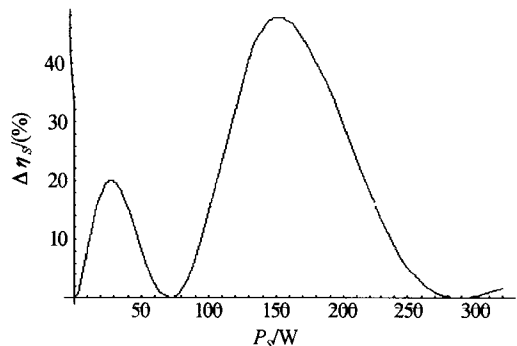


图 2 $\Delta\eta_s$ 与 P_s 关系曲线
Fig. 2 Function of $\Delta\eta_s$ vs P_s

高的幅度更大。

2 实验结果与分析

为了研究引入 $\lambda/4$ 波片提高声光 Q 开关关断连续 Nd:YAG 激光的能力,采用图 1 中(a)和(b)的谐振腔结构进行试验比较研究。激光器的谐振腔采用平平腔,双氦灯泵浦,激光介质的尺寸为 $\phi 6 \text{ mm} \times 120 \text{ mm}$,腔的光学长度为 600 mm,输出镜透过率为 20%,声光驱动源最大输出射频功率为 50 W,声光 Q 开关为 Gooch & Housego 生产的 QS27 系列,声场频率为 27 MHz。在声光驱动源射频功率输出一定的情况下,调整声光器件的布喇格角,使其衍射损耗达到最大,测出声光 Q 开关关断的连续激光功率 P_1 ,然后引入 $\lambda/4$ 波片并对其进行旋转,在旋转不同角度时声光 Q 开关关断连续激光的能力不同,当 $\lambda/4$ 波片快慢轴方向与从 Q 开关出射的椭圆偏振光的长短轴方向成 $+45^\circ$ 角时,声光 Q 开关关断连续激光的能力达到了极大值,测出引入 $\lambda/4$ 波片时声光关断的连续激光功率 P_2 。增加声光驱动源的输出射频功率,并调整相应的布喇格角,分别测量引入 $\lambda/4$ 波片前后声光 Q 开关的关断能力,实验数据见图 3。图 3 中横坐标为射频功率(对应着声功率),纵坐标为声光 Q 开关关断连续激光的功率,图中分别给出了腔内引入 $\lambda/4$ 波片前后的关断功率曲线。其中 $\lambda/4$ 波片的插入所引起的腔结构参量的变化忽略不计,实验测得 $\lambda/4$ 波片插入损耗约为 2% 左右。图 3 表明,腔内引入 $\lambda/4$ 波片有效地提高了声光 Q 开关关断连续激光的能力,与理论预测相符合。

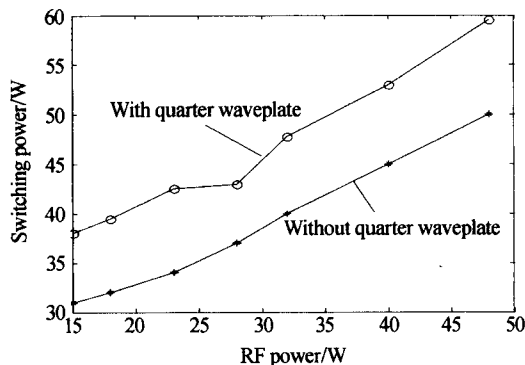


图 3 Q 开关关断能力/射频功率

Fig. 3 Q switch's switching capability vs RF power

3 结论

将 $\lambda/4$ 波片引入到谐振腔中来提高声光 Q 开关关断连续 Nd:YAG 激光能力的方法是充分利用熔石英在垂直和平行声场的两个方向的声光优值与

光的偏振态有关的特性,有效地提高了声光 Q 开关的衍射效率。声光 Q 开关采用的是布喇格衍射器件,使用时分别调整声光器件和 $\lambda/4$ 波片以达到最佳效果。理论计算和实验结果都证明采用 $\lambda/4$ 波片法可以有效地提高声光 Q 开关关断连续 Nd:YAG 激光的能力。

参考文献

- 田来科,田东涛,董庆彦,等. 激光调 Q CAI. 光子学报, 2002, **31**(19):1093~1096
Tian L K, Tian D T, Dong Q Y, et al. *Acta Photonica Sinica*, 2002, **31**(19):1093~1096
- 孙渝明,侯学元,李宇飞. LD 泵浦的声光调 Q 高重复率 Nd:GdVO₄ 激光器. 光子学报, 2004, **33**(6):645~647
Sun Y M, Hou X Y, Li Y F. *Acta Photonica Sinica*, 2004, **33**(6):645~647
- 张泽红,陈文友,柏福芬,等. 两维声光 Q 开关. 压电与声光, 1998, **20**(1): 7~13
Zhang Z H, Chen W Y, Bo F F, et al. *Piezoelectrics & Acoustooptics*, 1998, **20**(1): 7~13
- 陈莹,王立新,曾祥江,等. 双棒串接双声光器件调 Q Nd:YAG 激光器的研究. 中国激光, 2000, **27**(9):782~784
Chen Y, Wang L X, Zeng X J, et al. *Chinese Journal of Laser*, 2000, **27**(9): 782~784
- 李强,郑义军,王智勇,等. 双声光二维 Q 开关提高 Nd:YAG 激光器关断损耗. 中国激光, 2003, **30**(9):785~788
Li Q, Zheng Y J, Wang Z, et al. *Chinese Journal of Laser*, 2003, **30**(9):785~788
- Wang K, Yeonsoo S, Jung C. High Power acousto optic Q-switched Nd:YAG laser with two rod resonator. *Review of Laser Engineering*, 1998, **26**:19~21
- 孔伟金,吴福全,王吉明. 石英 $\lambda/4$ 波片旋光特性研究. 激光技术, 2003, **27**(4):377~379
Kong W J, Wu F Q, Wang J M. *Laser Technology*, 2003, **27**(4):377~379
- 白晋涛,王诺. 抑制 CW 锁模倍频 Nd:YAG 激光器绿光输出波动的研究. 光子学报, 1994, **23**(2):118~121
Bai J T, Wang N. *Acta Photonica Sinica*, 1994, **23**(2): 118-121
- 郁道银,谈恒英. 工程光学. 北京:机械工业出版社, 1999. 340~345
Yu D Y, Tan H Y. *Project Optics*. Beijing: Chinese Mechanical Industry Press, 1999. 340~345
- 徐介平. 声光器件原理、设计和应用. 北京:科学出版社, 1982. 50~66
Xu J P. *Principle, design and application of acousto-optics device*. Beijing Science Press, 1982. 50~66

The Research of Increasing AO Q-Switch's Ability of Switching in Nd : YAG Laser by Quarter-waveplate

Li Gang, Wang Fei, Yu Xin, Chen Meng, Zhu Lin, Wei Jianwei

The Institute of Laser Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100022

Received date: 2005-01-28

Abstract The transformation course of a quarter-waveplate's rotating polarization plane of elliptically polarized light is deeply analyzed by the Jones vector transformation. According to the principle of A-O interaction and quartz's different characteristic in the direction of parallel and perpendicular acoustics field, with a quarter-wave plate being inserted in an AO Q-switch Nd : YAG laser cavity between mirror and Q-switch, AO Q-switch's Bragg diffraction efficiency formula is put out theoretically. Consequently, the conclusion has been drawn by calculating simulation that the ability of a single AO Q-switch's switching CW Nd : YAG laser is increased. Furthermore, the experimental result is well in accord with theoretical analysis.

Keywords Laser technology; AO Q-switched Nd : YAG laser; Quarter-waveplate; Polarized plane



Li Gang received the B. S. degree in Department of Physics from Northwest University, M. E. degree from Tsinghua University, and Ph. D degree from Beijing University of Technology. Now, he is a professor in the institute of laser engineering, Beijing University of Technology. His interests are laser technology and its' application, including DPSSL, Ultra pulse laser, nonlinear optics, laser show and laser display. He has published more than 90 research papers.