

文章编号: 0258-7025(2003)09-0795-04

双声光二维 Q 开关提高 Nd:YAG 激光器关断损耗

李 强, 郑义军, 王智勇, 李 港, 左铁钊

(北京工业大学 激光工程研究院 国家产学研激光技术中心, 北京 100022)

摘要 分析了单声光器件、超声场相互平行和正交两声光 Q 开关器件衍射损耗, 根据声光互作用理论, 给出拉曼-奈斯衍射的超声场相互正交和平行的两声光 Q 开关器件衍射损耗的表达式。采用功率分配器保证两声光 Q 开关的同步和有效功率驱动。Nd:YAG 激光器的实验结果表明, 超声场相互正交两声光 Q 开关的关断损耗比单声光器件提高近 3 倍、比超声场相互平行两声光 Q 开关器件提高 1 倍。

关键词 光电子技术; Nd:YAG 激光器; 声光调 Q; 关断损耗

中图分类号 TN 248.1 **文献标识码** A

Improving Switch Loss of Nd:YAG Laser by Double Acousto-optic Devices Two-dimensional Q-switch

LI Qiang, ZHENG Yi-jun, WANG Zhi-yong, LI Gang, ZUO Tie-chan

(College of Laser Engineering, Beijing Polytechnic University, Beijing 100022, China)

Abstract The switch-losses of one Q-switch, two Q-switches in acousto-field perpendicular or parallel are analyzed. According to the theory of acousto-optic (AO) interaction, the formulas of diffraction loss of two AO Q-switches, which acousto-field are perpendicular or parallel one another, in Raman-Nath diffraction are derived. The power divider for ensuring two AO Q-switch synchronization and effective power driving is designed. The calculation results are satisfied with Nd:YAG laser experimental results. It is shown that two AO Q-switches, which acousto-field are perpendicular each other, switch-loss is nearly three times large than one AO Q-switch, one time large than the two AO Q-switches which acousto-field are parallel.

Key words optoelectronic technique; Nd:YAG laser; acousto-optic Q-switch; switch-loss

1 引 言

通过在连续激光器中加入声光 Q 开关, 将连续输出的激光转化为峰值功率高、脉冲宽度窄的高频脉冲激光, 已在工业中得到广泛应用, 如激光打标、激光打孔、激光加工印刷陶瓷辊等。随着应用的拓展, 需要更高平均功率的调 Q 窄脉冲激光输出, 需要提高声光 Q 开关在腔内的关断能力。

声光调 Q Nd:YAG 激光器, 声光 Q 开关的声光互作用介质一般采用熔石英, 其主要优点是光学

均匀性好、热性能稳定、抗损伤阈值高, 但缺点是声光优值小, 且与光的偏振态有关。超声波为纵波时, 声波垂直于偏振光的声光优值是平行于偏振光的声光优值的 5 倍; 超声波为横波时, 声光优值与光的偏振态无关, 但声光优值是声波垂直于偏振光的 $1/3$ ^[1]。Nd:YAG 激光为非偏振光, 在腔内插入起偏元件, 虽然能提高衍射效率, 但由于插入损耗大, 同时, Nd:YAG 存在退偏现象, 大功率 Nd:YAG 激光腔内声光调 Q 时, 不宜采用插入起偏元件的方法提高声光 Q 开关的关断性能。采用二维声光 Q 开

收稿日期: 2002-09-13; 收到修改稿日期: 2002-11-15

基金项目: 国防重点实验室资助项目(编号: 00JS50.1.2.QT0101)。

作者简介: 李强(1965—), 男, 北京工业大学激光工程研究院教授, 硕士, 主要从事激光、光电子技术研究。E-mail: ncltlq@bjpu.edu.cn

关^[2,3],在两互相垂直的面上制作换能器,减小光偏振态对衍射损耗的影响,可提高衍射效率,但器件在两个面上制作换能器,制作工艺复杂,成品率低,成本高,且使用时需同时对准两个方向的布拉格角,使用不方便。已有采用双声光 Q 开关的报道^[4,5],激光器腔内的关断损耗得到提高,但没有考虑声光优值与光偏振态的关系,声光 Q 开关的关断损耗能力没有充分利用。

在大功率 Nd:YAG 激光器腔内,加入两超声场正交的声光 Q 开关器件,使原来平行和垂直的两部分偏振光都能垂直于声波波面通过介质,充分利用器件大的声光优值,减小光偏振态对衍射光的影响,提高声光 Q 开关在腔内的衍射效率。本文采用双声光二维 Q 开关,研究 Nd:YAG 激光器腔内调制特性,并给出理论分析和实验结果。

2 双声光调 Q 开关的衍射损耗分析

大功率 Nd:YAG 激光器的 Q 开关一般采用拉曼-奈斯衍射,根据声光相互作用理论^[6],0 级光和两侧的各级衍射光的光强关系为

$$J_0^2(\nu) + 2\sum J_m^2(\nu) = 1$$

$$\nu = \frac{\sqrt{2}\pi}{\lambda} \sqrt{\left(\frac{L}{H}\right)M_2 P_s} \quad (1)$$

其中, $J_0^2(\nu)$, $J_m^2(\nu)$ 分别为拉曼-奈斯衍射 0 级光和两侧的各级(第 m 级)衍射光的光强, M_2 为器件的声光优值,超声波为纵波时,声波垂直、平行于偏振光的声光优值不同。 P_s 为声功率, H, L 分别为声光器件换能器的宽度和长度, λ 为被调制激光波长。

由于声场与光的不同偏振方向, M_2 的值不同,将 I_0 分解为偏振方向互相垂直的(E_{\perp}, E_{\parallel})、等光强的两部分 I_{\perp}, I_{\parallel} , 且 $I_{\perp} = (E_{\perp})^2, I_{\parallel} = (E_{\parallel})^2, I_0 = I_{\perp} + I_{\parallel}$, 令 $I_{\perp} = I_{\parallel} = I_0/2$ 。光强为 I_0 的非偏振光经一声光器件调制后,与声场垂直和平行的 0 级光强分别为

$$I_{\perp} = \frac{1}{2}I_0 J_0^2(\nu_{\perp}), \quad I_{\parallel} = \frac{1}{2}I_0 J_0^2(\nu_{\parallel}) \quad (2)$$

则经过一声光器件调制后, 0 级光强 I_0' 为

$$I_0' = I_{\perp} + I_{\parallel} = \frac{1}{2}I_0 [J_0^2(\nu_{\perp}) + J_0^2(\nu_{\parallel})] \quad (3)$$

由(1)式, $2\sum J_m^2(\nu) = 1 - J_0^2(\nu) = \eta$, 衍射效率为

$$\eta_1 = 1 - \frac{I_0'}{I_0} = 1 - \frac{1}{2}[J_0^2(\nu_{\perp}) + J_0^2(\nu_{\parallel})] \quad (4)$$

2.1 光通过两声场互相垂直的器件

当光强为 I_0 的非偏振光经第一个声光器件调

制后,如图 1(a),与声场垂直和平行的 0 级光强分别为

$$I_{1\parallel} = \frac{1}{2}I_0 J_0^2(\nu_{1\parallel}), \quad I_{1\perp} = \frac{1}{2}I_0 J_0^2(\nu_{1\perp}) \quad (5)$$

0 级光强 I_0' 为

$$I_0' = I_{1\perp} + I_{1\parallel} = \frac{1}{2}I_0 [J_0^2(\nu_{1\perp}) + J_0^2(\nu_{1\parallel})] \quad (6)$$

当光强为 I_0' 的光经第二个声光器件调制后,如图 1(b),与声场垂直和平行的 0 级光强分别为

$$I_{2\parallel} = I_{1\perp} \frac{1}{2}I_0 J_0^2(\nu_{2\parallel}) = \frac{1}{2}I_0 J_0^2(\nu_{1\perp}) J_0^2(\nu_{2\parallel})$$

$$I_{2\perp} = I_{1\parallel} \frac{1}{2}I_0 J_0^2(\nu_{2\perp}) = \frac{1}{2}I_0 J_0^2(\nu_{1\parallel}) J_0^2(\nu_{2\perp}) \quad (7)$$

经两声光器件调制后, 0 级光强 I_0'' 为

$$I_0'' = I_{2\parallel} + I_{2\perp} = \frac{1}{2}I_0 [J_0^2(\nu_{1\perp}) J_0^2(\nu_{2\parallel}) + J_0^2(\nu_{1\parallel}) J_0^2(\nu_{2\perp})] \quad (8)$$

衍射效率为

$$\eta_2 = 1 - \frac{I_0''}{I_0} = 1 - \frac{1}{2}[J_0^2(\nu_{1\perp}) J_0^2(\nu_{2\parallel}) + J_0^2(\nu_{1\parallel}) J_0^2(\nu_{2\perp})] \quad (9)$$

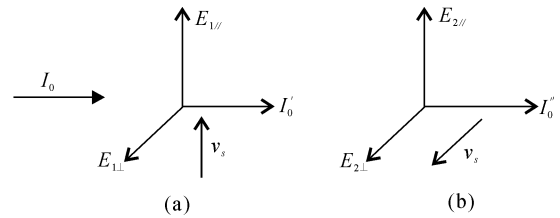


图 1 光强为 I_0 的非偏振光经两声场互相垂直的器件, 0 级光强分别为 I_0', I_0''

Fig. 1 Non-polarized light of light intensity I_0 via two devices of acousto-field perpendicular each other, zero order light are I_0', I_0'' , respectively

2.2 光通过两声场互相平行的器件

当光强为 I_0 的非偏振光经两声场互相平行的器件调制,如图 2,同理可推得(6)式。

经两声光器件调制后, 0 级光强 I_0'' 为

$$I_0'' = I_{2\parallel} + I_{2\perp} = \frac{1}{2}I_0 [J_0^2(\nu_{1\parallel}) J_0^2(\nu_{2\parallel}) + J_0^2(\nu_{1\perp}) J_0^2(\nu_{2\perp})] \quad (10)$$

衍射效率为

$$\eta_3 = 1 - \frac{1}{2}[J_0^2(\nu_{1\parallel}) J_0^2(\nu_{2\parallel}) + J_0^2(\nu_{1\perp}) J_0^2(\nu_{2\perp})] \quad (11)$$

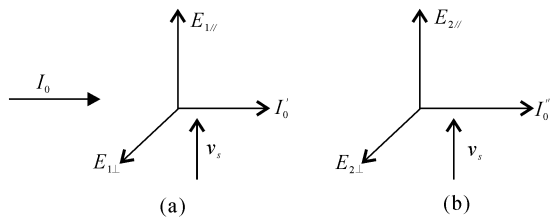


图 2 光强为 I_0 的非偏振光经两声场互相平行的器件，0 级光强分别为 I_0' 、 I_0''

Fig. 2 Non-polarized light of light intensity I_0 via two devices of acousto-field parallel each other, zero order light are I_0' 、 I_0'' , respectively

2.3 计算

若两器件的特性和驱动功率一致，有 $\nu_{1\parallel} = \nu_{2\parallel} = \nu_{\parallel}$ ， $\nu_{1\perp} = \nu_{2\perp} = \nu_{\perp}$ 。则(9)，(11)式变为

$$\eta_2 = 1 - J_0^2(\nu_{\perp})J_0^2(\nu_{\parallel}) \quad (12)$$

$$\eta_3 = 1 - \frac{1}{2}\{[J_0^2(\nu_{\parallel})]^2 + [J_0^2(\nu_{\perp})]^2\} \quad (13)$$

根据所设计的器件参数，熔石英的声光优值 $M_{2\perp} = 1.51 \times 10^{-15} \text{ s}^3/\text{kg}$ ， $M_{2\parallel} = 0.30 \times 10^{-15} \text{ s}^3/\text{kg}$ ，器件超声场的长度 $L = 40 \text{ mm}$ ，换能器的宽度 $H = 4 \text{ mm}$ ，驱动电功率为 40 W ，则声功率 $P_s = 12 \text{ W}$ ，激光波长为 $1.06 \mu\text{m}$ 。代入(1)式，计算得： $\nu_{\perp} = 1.87$ ， $\nu_{\parallel} = 0.84$ 。

代入(4)，(12)，(13)式，得： $\eta_1 = 60.8\%$ ， $\eta_2 = 93.8\%$ ， $\eta_3 = 75.6\%$ 。

显然，对非偏振的 Nd:YAG 激光，采用特性一致的声光 Q 开关，在驱动功率相同时，双声光 Q 开关的衍射损耗明显大于单声光的衍射损耗；声场互相垂直的双声光 Q 开关的衍射损耗明显大于声场互相平行的双声光 Q 开关的衍射损耗。

3 双声光 Q 开关腔内关断特性的实验结果

为研究双声光 Q 开关对大功率激光的关断特性，采用脉冲氙灯抽运 Nd:YAG 激光器。在此激光器中加入双声光 Q 开关，设计的新的激光器系统如图 3。激光器的谐振腔采用平平腔，双灯抽运的 Nd:YAG 激光棒位于谐振腔的光学中心，激光棒直径 6 mm ，长 110 mm ，腔长为 700 mm (光学长度)，激光谐振腔输出镜的反射率为 64% 。

为保证两声光 Q 开关的同步，两声光 Q 开关采用同一驱动源，经功率分配器将驱动功率加于两声光 Q 开关。同时，为保证两声光 Q 开关有足够的驱

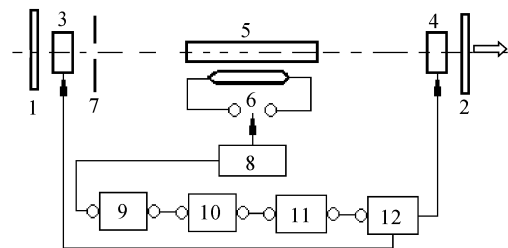


图 3 激光器原理结构图

1, 2: 腔镜; 3, 4: 声光 Q 开关; 5: 激光棒; 6: 抽运灯; 7: 光阑; 8: 激光电源; 9: 可调延时器; 10: 任意波形发生器; 11: Q 开关驱动源; 12: 功率分配器

Fig. 3 Configuration of laser principle

1, 2: resonator mirrors; 3, 4: AO Q-switches; 5: laser rod; 6: pump lamp; 7: diaphragm; 8: laser power supply; 9: adjustable delay; 10: random wave generator; 11: Q-switches driver; 12: RF power distributor

动功率，设计了功率损耗小的功率分配器，并与两声光 Q 开关的阻抗严格匹配。实验中采用的驱动源最大输出功率为 100 W ，频率 27 MHz ，调制频率 $5 \sim 50 \text{ kHz}$ ，功率分配器的衰减小于 1 dB ，驻波比小于 1.2 ，两声光 Q 开关开启时间差小于 1 ns 。

实验中，声光 Q 开关采用相同的驱动功率 40 W 。采用不同的抽运，对单声光 Q 开关、声场互相平行和垂直的双声光 Q 开关，分别测量腔内激光被关断时的抽运，及加上调制时的输出，实验数据列于表 1。

表 1 几种条件下的抽运和输出

Table 1 Pump and output energy under several conditions

	Only No. 1 Q-switch	Only No. 2 Q-switch	No. 1 and No. 2 Q-switch acousto-field parallel each other	No. 1 and No. 2 Q-switch acousto-field perpendicular each other
Pump pulse energy/J	18.0	18.0	22.8	30.0
Output pulse burst energy/mJ	65	68	101	204

4 分析与讨论

超声场相互正交两声光 Q 开关的特点是充分利用熔石英声光优值的特性，使原来平行和垂直的两部分偏振光都能垂直于声波波面通过介质，提高声光 Q 开关的衍射效率。

两声光 Q 开关采用常用的拉曼-奈斯衍射器件，器件易于实现。使用时在腔内可分别调整使超声场

相互正交,使用方便。为保证两声光 Q 开关的同步,需要设计相关的功率分配器,使两声光 Q 开关开启时间差小于 1 ns,这是采用双声光 Q 开关比采用单声光开关复杂的工作。与单声光二维 Q 开关的插入损耗相比,增加 5%,但超声场相互正交双声光 Q 开关可精确调整、可利用现有器件实现高衍射损耗。

实验结果证明,采用超声场相互正交两声光 Q 开关,在电功率 40 W 时(两器件均为 40 W),对非偏振的 Nd:YAG 激光,器件的衍射损耗比单声光器件提高 3 倍,比超声场相互平行两声光 Q 开关器件提高 1 倍。对脉冲声光调 Q 激光器,声光 Q 开关的衍射效率每提高 15%左右,器件在腔内的衍射损耗增强 1 倍左右,与理论计算基本一致。

参 考 文 献

1 W. Koechner. Solid-state Laser Engineering [M]. New

York, Heidelberg: Springer-Verlag, 1995

2 Zhang Zehong, Chen Wenyong, Bo Fufen *et al.*. The two-dimensional acoustooptic Q-switch [J]. *Piezoelectrics & Acoustooptics* (压电与声光), 1998, **20**(1):7~13 (in Chinese)

3 Zong Derong, Lou Bing, Jiang Jun *et al.*. A novel two-direction multifunctional acousto-optic modulator [J]. *Opto-Electronic Engineering* (光电工程), 1999, **26**(6):37~40 (in Chinese)

4 Kwang Suk, Yeon Soo, Cheol Jung. High-power acousto-optic Q-switched Nd:YAG laser with two-rod resonator [J]. *Review of Laser Engineering*, 1998, **26** (spec. suppl.):19~21

5 Chen Yin, Wang Lixin, Zeng Xiangjiang *et al.*. Research of the Q-switched Nd:YAG laser with two YAG-rods and two AO Q-switches [J]. *Chinese J. Lasers* (中国激光), 2000, **A27**(9):782~784 (in Chinese)

6 Xu Jianping. The Principle, Design and Application of Acousto-optic Devices [M]. Beijing: Science Book Concern, 1982 (in Chinese)

量子光学与光量子器件国家重点实验室

量子光学与光量子器件国家重点实验室,是在原山西大学量子光学教育部重点实验室的基础上,于 2001 年 8 月通过国家科技部基础研究司组织的专家论证,2001 年 10 月经国家科技部批准开始建设,并于 2002 年 12 月通过国家科技部组织的专家验收。依托单位是山西大学。

实验室的主要研究方向为:1) 量子光学基础和应用:以量子物理学为理论基础,运用现代光学与光电子学的实验手段,开展光场的非经典性质、量子态的产生、非经典光场的产生机制研究,开拓非经典光场在量子信息、基本量子物理问题的检验等领域的研究,目前正在开展纠缠态的产生及利用纠缠态进行连续变量量子通讯的实验研究;2) 光与原子相互作用:研究光与物质相互作用的基本量子现象,探索原子与光子作用的量子物理过程,进一步研究冷原子与光场作用过程中的量子现象,以期在获得超冷原子的基础上,实现单粒子水平上对光子与原子作用过程的观察和控制;3) 全固化激光技术和光量子器件:完善高性能全固化单频激光器,研制可调谐光学参量振荡器、全固化小型光压缩器、量子纠缠态源等光量子器件。

量子光学与光量子器件国家重点实验室主任和副主任分别由张宽收教授、彭堃堃教授、贾锁堂教授担任,学术委员会主任和副主任由王育竹院士、彭堃

堃教授担任。实验室以山西大学光电研究所为主体,以山西大学电子信息系、物理系、理论物理研究所以及“国家理科基础科学研究与教学人才培养基地”(物理学)为依托,有国家重点建设学科光学学科的支撑。实验室始终坚持进行量子光学前沿课题的研究,同时以“攀登、奉献”的学风作为实验室建设的灵魂,注重学术梯队的培养,已形成一支稳定的老中青三结合的科研队伍。特别是具有博士学位、高级技术职称的中青年学术骨干均在国外优秀的实验室经过 1 到 2 年的博士后训练,现已独立承担科研课题并主持课题组的研究工作。

近五年来,实验室承担“国家重大基础研究计划(973)项目”子项目 1 项,完成并承担国家自然科学基金重点项目 4 项、海外杰出青年基金 1 项及面上项目 16 项,完成并承担省部级科研项目 48 项。在国际与国内重要学术刊物上发表论文 200 余篇。获国家技术发明二等奖 1 项、省部级科研成果一等奖 2 项、省部级科研成果二等奖 6 项、国家级教学成果二等奖 1 项,获国家发明专利授权 2 项。

实验室在建设重视学术交流,在国际上先后与美国、法国、日本、澳大利亚、德国等国家的著名量子光学实验室建立了长期稳定的具有实质性的学术交流和学术互访关系。由中法互派学者访问的双边合作项目已经成功地进行了多年,取得了可喜的成果。