

二极管侧面泵浦声光诱导单向运转的 Nd·YLF 环形腔激光器*

王 春 胡文涛 陈绍和 邓锡铭

(中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800)

摘 要 在半导体激光阵列侧面泵浦的 Nd·YLF 激光器中, 利用声光调制器控制激光单向运转, 消除空间烧孔效应, 获得单纵模输出, 通过预激光调 Q 获得脉宽为 50 ns, 能量为 1.2 mJ 的单纵模输出, 理论分析的结果在实验上得到很好的验证。

关键词 单纵模, 环形腔, 二极管泵浦。

1 引 言

在固体激光器中实现单纵模运转的主要途径是消除空间烧孔效应, 例如采用单向运转的环形腔结构。通常是在谐振腔中加入法拉第旋转器和偏振元件构成光二极管以实现单向运转, 但这种方法因插入元件多而增加了插入损耗^[1, 2], 降低了激光器的性能。采用激光介质加磁场作法拉第旋转器, 附加非平面环形腔结构实现单向运转。这种方法在一些情况下, 如介质费尔德常数太小、介质为双折射晶体、腔内有双折射元件时就不适用。最近, 人们提出一种新的环形腔单向运转机制即用动态声光效应控制单向运转^[3, 4]。这种方法对半导体激光器泵浦的小功率环形腔激光器, 具有运行稳定、损耗低等优点, 可适用于腔内有双折射元件和低增益的情形。此外声光调制器可兼作 Q 开关实现单频调 Q 脉冲输出。

Clarkson 等人在最近的一篇文章^[5]对声光诱导环形腔单向运转作了解释, 提出了两种机制, 一是本征机制, 二是反馈机制。本文根据本征机制设计了一种迄今结构最为简单的环形腔单纵模调 Q 激光器, 并在实验中得到验证。

2 声光诱导环形腔单向运转的本征机制

文献[5]提出的两种机制中, 本征机制具有较强的说服力并且在实际应用中较易实现, 下面从声光调制器的衍射作用出发来阐述这种机制。

声波在行波声光调制器中传播时, 由于介质的光弹效应, 在介质中形成动态的折射率光栅, 由于光栅的移动使具有同一频率的两列光波不能同时满足布拉格条件, 亦即它们各自满

* 国家科委 863 高科技项目。

收稿日期: 1996 年 6 月 12 日

足布拉格条件的入射角稍有差异, 为方便作如下假定:

θ_B^+ (θ_B^-) 分别为正(反) 向传播光的动态光栅布拉格入射角。所谓正向(反向) 是指入射光波的波矢在声波矢上的投影矢量与声波矢一致(相反)。 θ_B 为静止光栅的布拉格入射角。图 1 为声光调制器的示意图, 图 2 为正反方向传播光各自满足布拉格条件时的波矢图。

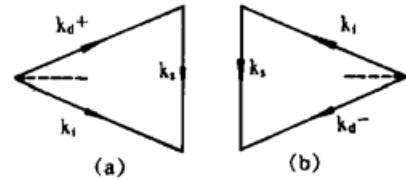
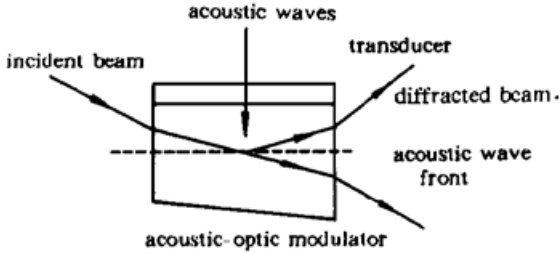


Fig. 1 Schematic diagram of a typical A-O modulator

Fig. 2 (a) and (b). Wave vector diagrams for forward (+) and counter-propagating (-) beams respectively at the Bragg condition

静止光栅的布拉格条件为:

$$\sin(\theta_B) = \lambda/2n\lambda_s \tag{1}$$

运动光栅的布拉格条件为:

$$\sin(\theta_B^\pm + \theta_{\pm d}) = \sin(2\theta_B) \approx \lambda/n\lambda_s \tag{2}$$

波长, λ_s 为声波在介质中的波长。根据动量守恒得: $\overline{K_i^\pm} \mp \overline{K_s} = \overline{K_d^\pm}$ (3)

由图 2 波矢图可得动量守恒的分量表达式: $K_i \cos(\theta_B^\pm) = K_d^\pm \cos(2\theta_B - \theta_B^\pm)$ (4)

式中 $K_i = |\overline{K_i^\pm}|$, 由于 $\lambda \ll \lambda_s$ 可知 $|\theta_B^\pm| \ll 1$, 由(4) 得:

$$\Delta\theta_B = \theta_B^+ - \theta_B^- \approx \frac{K_i(K_d^- - K_d^+)}{K_d^+ K_d^- \sin(2\theta_B)} \tag{5}$$

由能量守恒得:

$$K_i - K_d^\pm = \pm 2\pi n v_s / c \tag{6}$$

其中 v_s 为声频。由于 $K_i^2 \approx K_d^+ K_d^-$, 将(2)、(6) 式代入(5) 式得:

$$\Delta\theta_B \approx 2nV_s/c \tag{7}$$

式中 V_s 为介质中的声速。对一般的声光介质而言, $\Delta\theta_B$ 很小, $10 \mu\text{rad}$ 量级, 似乎可以忽略不计, 然而决定损耗差的不只是 $\Delta\theta_b$, 还有衍射角的带宽。

图 3(a)、图 3(b) 给出沿正反方向运行光的衍射损耗、衍射损耗差异($\Delta L_d = L_d^+ - L_d^-$) 分别与行波声光调制器倾角之间关系的示意图。

为计算 ΔL_d , 首先计算 L_d^\pm 与偏离布拉格角的位移量之间关系:

$$\Delta\theta^\pm = \theta_i - \theta_B^\pm \tag{8}$$

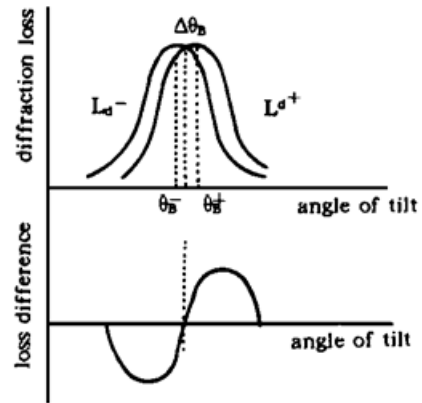


Fig. 3 (a) schematic diagram showing the diffraction loss for count-propagating beams of an angles of tilt of a traveling-wave AOM. The difference in the Bragg angles has been exaggerated for clarity. (b) Schematic diagram showing the difference in diffraction loss experienced by two counter-propagating beams in a traveling-wave AOM as a function of its angle of tilt

当 $\Delta\theta_B \ll 1$ 时, 由平面波耦合模理论^[6] 得:

$$L_d^\pm = \beta^2 l^2 \operatorname{sinc}^2(\beta l \sqrt{1 + (\pi\Delta\theta^\pm / \beta\lambda_s)^2}) \tag{9}$$

$$\beta = (\pi/\lambda) \sqrt{MI_A/2}, \quad M = n^6 P^2 / \rho V_s^3 \tag{10}$$

式中 l 为声-光作用长度, β 为耦合常数, I_A 为声波强度, P 为有效光弹系数, ρ 为介质密度。

在许多情况下 $L_d^\pm \ll 1$, 于是(9) 式可简化为:

$$L_d^\pm = L_{\max} \operatorname{sinc}^2(\pi l \Delta\theta^\pm / \lambda_s) = L_{\max} \operatorname{sinc}^2(0.89\pi l \Delta\theta^\pm / \Delta\theta_{\frac{1}{2}}) \tag{11}$$

式中 $\Delta\theta_{\frac{1}{2}} = 0.89\lambda_s/l$ 为角谱宽度, 其典型值为几个 $mrad$, 比 $\Delta\theta_B$ 大得多, 因此为获得较大损耗差, 可使声-光工作在 $\Delta\theta \gg \Delta\theta_B$ 的状态, 在这种情况下:

$$\Delta L_d \approx 2L_{\max} \operatorname{sinc}(\pi l \Delta\theta / \lambda_s) [\operatorname{sinc}(\pi l \Delta\theta / \lambda_s) - \cos(\pi l \Delta\theta / \lambda_s)] (\Delta\theta_B / \Delta\theta) \tag{12}$$

式中 $\Delta\theta = \theta - \theta_B$, 是入射角与布拉格角的偏差。由(12) 式可知:

$$\Delta\theta \approx \pm 0.415\lambda_s / l \tag{13}$$

时 ΔL_d 最大。然而应注意到在追求最大损耗差的同时, 衍射损耗值却在下降, 这对连续运转的器件是有利的, 而对调 Q 器件则不利。从激光设计观点出发, 可将(12) 式写成:

$$\frac{\Delta L_d}{L_d} \approx 2\Delta\theta_B \left[\frac{1}{\Delta\theta} - \frac{\pi l}{\lambda_s} \cos\left(\frac{\pi l \Delta\theta}{\lambda_s}\right) \right] \tag{14}$$

针对不同的实际情况, 可以根据上式来确定 $\Delta\theta$ 值, 以得到所需要的 L_d 和 ΔL_d 。对于本实验中的预激光调 Q 情形, 要求衍射损耗较大, 因此行波声光调制器应该工作在接近布拉格角的状态, 对于使用 LiNbO_3 声光调制器, $\Delta\theta_B = 0.25 \text{ mrad}$, 当 $\Delta\theta = 0.8\lambda_s/l = 0.8 * 92.25 * 10^{-3} * 2.25 * 57/20 = 0.47^\circ$ 时, 损耗差约为损耗值的 21%, 这足以使环形腔单向运转。因此作者认为, 在任意环形腔激光器中任意位置插入普通的行波声光调制器, 都能实现单向运转, 而无需像已往文献所述的那样使用棱镜形或菱形的声光调制器。

3 Nd·YLF 单纵模调 Q 环形腔激光器及实验结果

半导体激光阵列侧面泵浦、行波声光调制器控制单向运转的 Nd·YLF 环形腔激光器结构

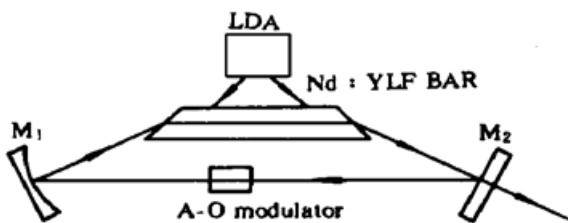


Fig. 4 Schematic diagram of unidirectional Nd·YLF ring-laser

如图 4 所示。泵浦源为 SDL³230-TZ 准连续 60 W 半导体激光器。通过温度控制使半导体激光阵列发射光谱的中心波长为 796 nm, 泵浦脉宽为 500 μs , 由于它的额定占空比为 2%, 为防止退化, 重复频率设在 30 Hz, 最大功率控制在 50 W。工作介质为 Nd·YLF 晶体, 沿 C 轴切割, 振荡激光呈 σ 偏振, 输出波长为 1.053 μm , 半导体激光阵列发光面为 10

$\text{mm} \times 1 \mu\text{m}$, 泵浦光为沿 10 mm 方向的线偏光, 所以在侧面泵浦情况下, 晶体对泵浦光为 π 偏振吸收, 吸收系数为 7 cm^{-1} , 晶体厚度为 2 mm, 两端面切成布儒斯特角, 半导体激光阵列紧贴晶体直接耦合, 估算被晶体吸收的泵浦光功率为 $50(1 - e^{-7 \times 0.2}) = 37.5 \text{ W}$, 相应的泵浦

能量 18.75 mJ。环形腔由晶体及腔镜 M₁、M₂ 实现，其中 M₂ 为曲率半径 R= 200 mm，对 1.053 μm 的全反镜，M₁ 为 T= 2% 的平面镜，在 M₁、M₂ 之间插入小型低损耗的行波声光调制器 A-O，它在该激光器中起两个作用，一是诱导环形腔单向运转使输出为单纵模，二是作为调 Q 开关。

当行波声光调制器不加射频功率时，环形腔呈双向运转，在 M₂ 外面可看到两个激光光斑，此时用 PIN 管观察激光波形，看到的是无规则的弛豫振荡，如图 5 所示。然后在行波声光调制器上加几百毫瓦的射频功率，并仔细调节其角度，使腔内光束通过它时接近布拉格角，此时可以得到稳定的单向输出，在 M₂ 后只有一个光斑同时从 PIN 管检测的波形来看，激光振荡的包络呈完全指数衰减形状。但当行波声光调制器沿两个相反的方向偏离布拉格角时，都可得到一个稳定输出单纵模的位置，但激光运转的方向相反。

当泵浦功率加到 50 W 时，实验给行波声光调制器加射频功率，使激光器在略高于阈值的状态下运转并以单纵模输出，在泵浦快要结束时打开 Q 开关，可以得到单纵模的调 Q 脉冲输出，其时序如图 6 所示，脉宽为 50 ns，能量为 1.2 mJ，相应的峰值功率为 24 kW，预激光能量与调 Q 能量基本相同。

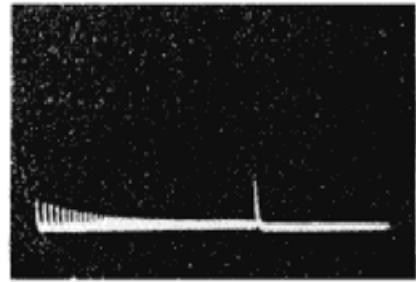
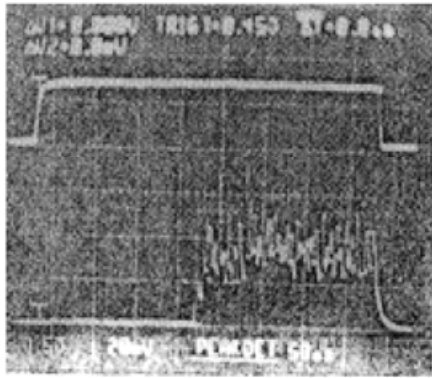


Fig. 5 Oscilloscope trace showing the wave form of laser output without RF signal to the A-O modulator

Fig. 6 Prelase Q-switched laser output with single-longitudinal mode when RF signal is applied to the AOM

图 7 的波形为 10 个脉冲叠加的结果，表明脉冲的稳定性较好。图 8 为行波声光调制器只作 Q 开关时调 Q 脉冲的时序图。

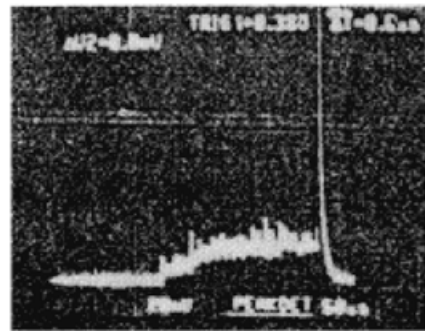
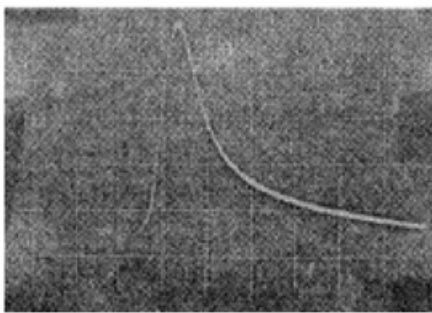


Fig. 7 Typical pulse shape of the single-longitudinal-mode prelate Q-switched laser. 10-shot accumulation was taken

Fig. 8 Prelase Q-switched laser output with multi-longitudinal mode. The A-O Modulator only act as Q-switch

器件的光-光转换效率较低，一方面由于晶体厚度仅 2 mm，而相对于半导体激光阵列表面又未镀泵浦光的反射膜，吸收效率较低；另一方面晶体是从边角料中截取的，性能较差。

此外这种环形腔结构同样适合于端面泵浦。

结 论 根据声光诱导环行腔单向运转的本征机制,设计并实现了半导体激光阵列侧面泵浦的 Nd:YLF 环形腔激光器获得了波长为 $1.053 \mu\text{m}$ 的单纵模调 Q 脉冲,器件结构简单,调整方便,运行稳定。

感谢马忠林高工、许世忠工程师、葛夏平工程师、许发明博士在本论文中提供的帮助。

参 考 文 献

- [1] T. J. Kane, R. L. Byre, Monolithic unidirectional single mode Nd:YAG laser. *Opt. Lett.*, 1985, **10** (1): 65~ 67
- [2] W. R. Trutna, D. K. Donald, M. Nazarathy, Unidirectional diode-laser-pumped Nd:YAG ring laser with a small magnetic field. *Opt. Lett.*, 1987, **12**(4): 248~ 250
- [3] R. Roy, P. A. Schulz, A. Walther, Acousto-optic modulator as an electronically selectable unidirectional device in a ring laser. *Opt. Lett.*, 1987, **12**(9): 672~ 674
- [4] J. Neev, F. V. Kowalski, Unidirectional device for a ring laser using an acousto-optic modulator. *Opt. Lett.*, 1988, **13**(5): 375~ 377
- [5] W. A. Clarkson, A. B. Neilson, D. C. Hanna, Unidirectional operation of ring laser via acousto-optic modulator. *IEEE. J. Quant. Electron.*, 1996, **QE-32**(2): 311~ 325
- [6] A. Yarif, P. Yeh, *Optical Waves in Crystals*. New York: Willy, 1992, ch.9, 318~ 347

Unidirectional Operation of LDA Side-Pumped Nd:YLF Ring Laser Via Acousto-Optic Effect

Wang Chun Hu Wentao Chen Shaohe Den Ximing

(Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, The Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800)

(Received 12 June 1996)

Abstract A traveling-wave acousto-optic modulator has been used to induce unidirectional operation in a laser diode array (LDA) side-pumped Nd:YLF ring laser. The laser can provide single-frequency output owing to the elimination of the hole burning effect. Via the pre-lase Q -switching, pulses with peak power of 24 kW (1.2 mJ, 50 ns) at $1.053 \mu\text{m}$ are obtained.

Key words single-longitudinal mode, ring laser, laser-diode pumping.