

LD 泵浦的 Nd : YAG 调 Q 激光器 腔内倍频研究*

沈小华 周复正 朱三又** 杨香春 林尊琪

(中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800)

提 要

DPL 的调 Q 倍频是获得高重复率绿光输出的有效方法, 本文研究了这种激光器的动态特性, 提出存在使转换效率最高的最佳非线性耦合系数, 它是调 Q 时反转粒子数超阈值倍数的函数. 实验用国产 200mW 的 MQW-LDA 泵浦 Nd : YAG 激光器, 声光调 Q, KTP 腔内倍频, 输出 0.4 μ J 的倍频光, 脉宽 70 ns, 峰功率 6 W.

关键词 超阈值倍数, 最佳非线性耦合系数.

1 前 言

随着激光二极管(LD)性能的完善和功率的提高, LD 泵浦的固体激光器(DPL)已在许多领域崭露头角, 其中, 经倍频实现绿光输出的 DPL 器件尤为引人注目, 因为小型、稳定、高效的绿光相干光源, 在科学研究、光学存储、军事、水下搜索等领域有着广泛的应用前景^[1].

目前, 受 LD 泵浦源功率的限制, DPL 的倍频普遍采用腔内的二次谐波法, 腔内倍频使基波在非线性晶体内集中了相对高的功率密度, 有较高的转换效率, 但对 CW 的 DPL 腔内倍频, 基波一般为多纵模, 各纵模之间的和频优于倍频, 纵模竞争引起输出绿光大幅度的波动, 就是所谓的“绿光问题”^[2~4].

本文分析了 DPL 调 Q 腔内倍频的动态特性, 从理论上提出了存在使转换效率最高的最佳非线性耦合系数, 迄今在国内外未见类似的报导, 实验在最佳匹配条件下获得较高效率的绿光输出.

2 调 Q 腔内倍频的理论分析

目前, LD 的泵浦能量不及闪光灯, DPL 的调 Q 一般都采用插入损耗较小的声光 Q 开关, 而这种开关调 Q 时间较长, 整个过程可分为三个暂态: 1) 增益介质吸收泵浦光, 声光的衍射损耗使腔处于低 Q, 积累反转粒子数; 2) 调 Q 声光开关开启, 腔内 Q 值突变; 3) Q 开关完全打开, 形成调 Q 激光脉冲, 这三个过程相互衔接, 但腔的状态极不相同, 假定腔内只有单个 TEM₀₀ 起振, 腔内倍频的速率方程^[5,6]

收稿日期: 1992年4月30日.

* 本研究为上海市自然科学基金资助项目

** 上海激光技术研究所

$$\left. \begin{aligned} \frac{dN}{dt} &= R_p - \frac{\sigma c N I_1 k}{V_a} - \frac{N}{\tau_f}, \\ \frac{dI_1}{dt} &= -\frac{I_1}{\tau_{c1}} + \frac{\sigma c N [I_1 + (1/k)]}{V_a} - K I_1^2, \\ \frac{dI_2}{dt} &= K I_1^2 - \frac{I_2}{\tau_{c2}}, \\ R_p &= P_p \eta / h \nu, \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中 R_p 为泵浦速率, K 为非线性耦合系数, N 为反转粒子数, σ 为激光介质的增益截面, I_1, I_2 为腔内基波、二次谐波的强度, A 为基模截面积, τ_f 为介质的荧光寿命, τ_{c1}, τ_{c2} 为腔内基波、二次谐波的光子平均寿命, V_a 为基模体积, L 为腔长.

调 Q 前, 腔处于高损耗, 腔内光子数密度很低, 受激辐射和二次非线性耦合可忽略, 第一暂态速率方程可简化为

$$\frac{dN}{dt} = R_p - \frac{N}{\tau_f}, \quad \frac{dI_1}{dt} = \frac{\sigma c N}{k V_a} - \frac{I_1}{\tau_{c1}}, \quad I_2 = 0. \quad (2)$$

Q 开关被打开瞬间, 声场在振荡区的消失存在一定的渡越时间, 设声场按指数递减, 这个过程腔内损耗 $\delta_t = \delta_1 + \delta_a \exp(-2t/\tau_a)$. δ_1 为腔固有损耗, δ_a 为声光调制器的衍射损耗, τ_a 为调制信号完全消失的时间, 第二暂态时间非常短, 泵浦和自发辐射可忽略. 速率方程^[7]:

$$\left. \begin{aligned} (dN/dt) &= -2kI_1 N / N_m \tau_{c1}, \\ (dI_1/dt) &= -(I_1/\tau_{c1}) + (I_1 N / N_m \tau_{c1}) - K I_1^2, \\ (dI_2/dt) &= K I_1^2 - (I_2/\tau_{c2}). \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

Q 开关完全打开时, 腔为高 Q, 腔内只存在谐振腔的固有损耗 δ_1 . 方程与(3)式相同, 下面在计算机上对上述三个暂态方程求数值解, 研究 DPL 的调 Q 倍频的动态特性. 分析非线性耦合系数对输出的影响.

SHG 的输出功率是腔内基波功率的二次函数, 所以谐波的脉宽较窄, 基波向谐波转换效率远小于 1, 可以通过对两波设置不同的输出耦合, 使基波主要保持在腔内, 输出中以谐波占

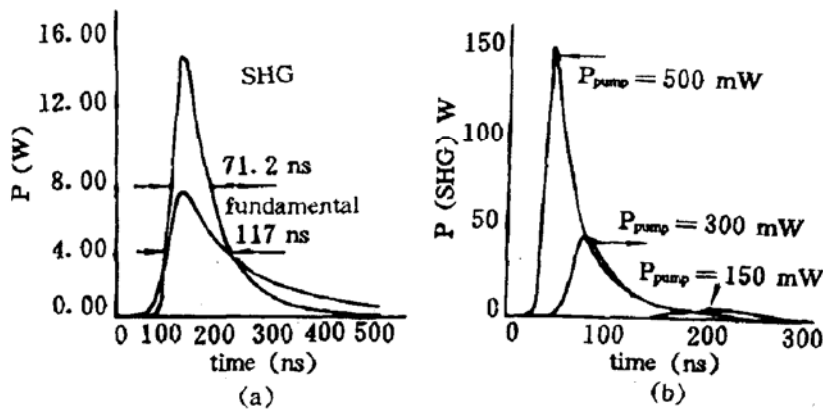


Fig. 1 Output characteristics of SHG

(a) pulse of SHG shortening ($P_{\text{pump}} = 200 \text{ mW}$)

(b) Variation of SHG peak power, width with pump power

优势,如图 1(a)所示,图 1(b)是不同泵浦功率下谐波的输出特性,谐波的峰值功率随光泵的增加而增加,脉宽变窄.图 2 是二次转换效率关于泵浦功率的函数曲线,在介质对泵浦光的吸收为 30%时,曲线趋于 5%.如果能增加介质有效吸收率,转换率还可以大大提高.腔内非线性

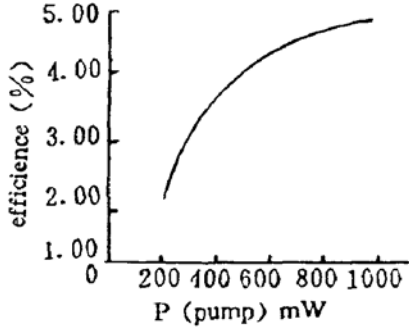


Fig. 2 Improving of SHG efficiency with increasing of pump power

元件既作为 SHG 的输出耦合,又是基波的二次非线性损耗元件.在调 Q 的腔内倍频激光器中,这种双重作用使倍频效率关于二次非线性耦合系数之间表现出一种复杂的函数关系,如图 3 这个曲线可以作这样的解释:在激光建立过程中,当腔内基波的增益等于总损耗时,基波、谐波都达到最大.基波的峰功率是关于 K 的函数, K 增加峰功率降低,脉宽增加;而 K 又代表了基波、谐波之间的功率转换效率.这两方面的因素相互牵制存在一个最佳的非线性耦合系数,使二次谐波的输出转换效率最高.这个系数是调 Q 时反转粒子数超阈值倍数的函数,对于高光泵相应的最佳非线性耦合系统可以较大.

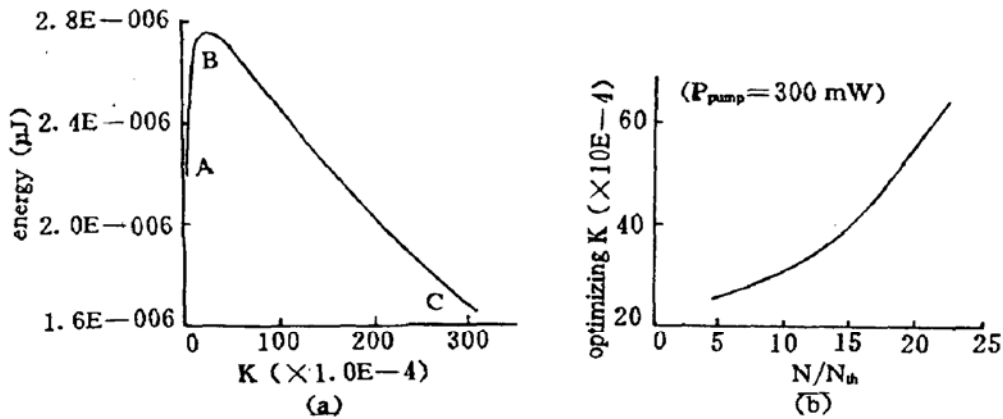


Fig. 3 Optimum nonlinear coupling coefficient (ONCC)

(a) Variations SHG energy with nonlinear coefficient

(b) Variations of ONCC as a function of N/N_{th}

3. 实验和结果

3.1 实验装置

实验用国产 MQW-LDA(二十条)作为泵浦源,脉冲工作,最大输出峰值功率 200 mW,用恒温控制装置使 LDA 的光谱落在 Nd:YAG 晶体的次吸收峰 795 nm 上.实验装置如图 4 所

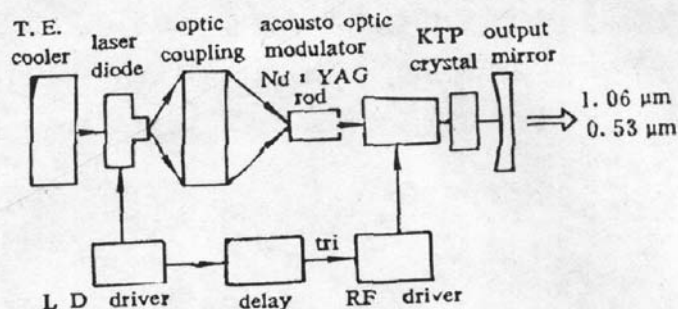


Fig. 4 Schematics diagram of the experiment

示. Nd:YAG 晶体的一个端面作为谐振腔的输入端面,为平面,对 $0.795 \mu\text{m}$ 增透, $1.06 \mu\text{m}$, $0.53 \mu\text{m}$ 全反,输出腔为凹面,曲率 $R = 50 \text{ mm}$,对 $1.06 \mu\text{m}$ 全反, $0.53 \mu\text{m}$ 透过 85% . 调 Q 元件为熔石英声光晶体,两端对 $1.06 \mu\text{m}$, $0.53 \mu\text{m}$ 增透,插入损耗小于 1% .

用 KTP 晶体用为倍频晶体. KTP 晶体属于 $\text{mm}2$ 晶类,透明区为 $0.35 \sim 4.5 \mu\text{m}$,有较高的非线性系数(为 KDP 的 15 倍),化学性能稳定,有较大的匹配角,特别适合于 DPL 的倍频. 其 I、II 类匹配的最大有效非线性系数分别为 $d_{1\text{eff}} = 0.7 \text{ pm/v}$, $d_{2\text{eff}} = 7.4 \text{ pm/v}$, $d_{2\text{eff}} \gg d_{1\text{eff}}$. 我们的实验 KTP 满足 II 类匹配条件 ($\theta = 90^\circ$, $\phi = 23.2^\circ$)

LD 直流驱动源脉宽 $300 \mu\text{s}$, 100 Hz 重复率工作. 在腔内不加声光调制器时, KTP 晶体在腔内对自由振荡的基波倍频,由于弛豫振荡的功率密度较低,实验中观察到微弱的绿光输出. 腔内插入声光调制器,调整调制器的位置和方位,使激光器的振荡区处于调制器的声光作用区内, 80 MC 的 RF 驱动源加在声光晶体上,满足布喇格衍射条件,腔处于低 Q 状态,来自 LD 驱动源的触发信号经延迟在泵浦脉冲的末端撤去 RF 调制信号,腔 Q 值突变,腔内建立高功率的基波振荡,调整整个激光器使输出绿光为基横模,再仔细调整 KTP 的相位匹配角和方位角,使 KTP 满足最佳匹配条件,输出绿光最强.

3.2. 结果与讨论

图 5 输出绿光为基模时基频光和倍频光的波形,基频光脉宽为 140 ns ,倍频光 70 ns . 用高灵敏度能量计测量 SHG 脉冲能量为 $0.4 \mu\text{J}$. 光-光斜率效率为 0.9% 小于理论计算值 ($1.1 \mu\text{J}$, 1.1%). 主要由两个因素造成的:本实验中的 LD 光谱较宽,泵浦光的实际利用率小于理论计算值 30% ;本实验中腔内对基频光不起偏,而作为调制器的熔石英对基波的偏振方向有选择性,导致调制能力降低. 实验中发现当泵浦功率大于 150 mW 时, Q 开关不能完全抑制基波振荡,影响二次谐波的输出能量和稳定性. 因此,改善泵浦光的光谱匹配,增加介质的吸收率,在腔内对基频光起偏,以及优化腔的结构,提高二次谐波的潜力很大.

非线性耦合系数暂不能从实验中得到直接测量,因此理论分析得到的最佳非线性耦合系数与泵浦功率的关系,还不能从实验中得到验证,有待于进一步的研究. 根据计算,本实验中 KTP 的最大非线性耦合系数为 $3.1 \times 10^{-4} (\text{W}^{-1} \text{S}^{-1} \text{m}^2)$,该点处于图 4 的上升段,所以最大的非线性系数就是能达到的最佳耦合系数. 对非线性系数值超过 B 点的激光器,上面的分析无疑是很重要的,因为减

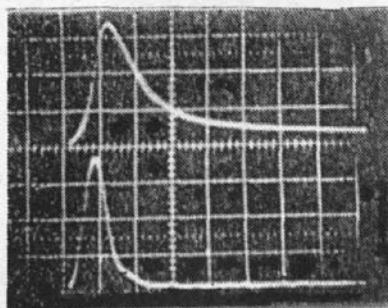


Fig. 5 Oscilloscope trace of fundamental SHG wave (the below-SHG)

小非线性系数不仅能提高输出转换效率,同时使脉宽变窄.

实验中得到沈丽青、马建伟、薛强等人的帮助,北京半导体所提供了 MQW-LDA 器件. 谨表衷心感谢!

参 考 文 献

- [1] J. T. Lin, Doubled jeopardy: the blue-green race's new platts. *Laser & Optronics*, 1990, (12):34~40
- [2] T. Baer, Large-amplitude fluctuations due to longitudinal mode coupling in diode-pumped intracavity-doubled Nd : YAG lasers. *J. Opt. Soc. Am. (B)*, 1986, 3(9):175~1180
- [3] Xiao-Guang Wu, Paul Mandel, Sccond-harmonic generation in a multimode laser cavity. *J. Opt. Soc. Am(B)*, 1987, 4 (11):1870~1877
- [4] Glenn E. James, Evans M. Harrell, Intermittency and in intracavity double laser II. *Phys. Rev. (A)*, 41(5): 2778~2790
- [5] P. E. Perkins, T. S. Fahlen, 20-W average-power KTP intracavity-doubled Nd : YAG laser. *J. Opt. Soc. Am. (B)*, 1987, 4(7):1066~1071
- [6] James E. Marry, S. E. Harris, Pulse lengthening via overcoupled internal second-harmonic generation. *J. Appl. Phys.*, 1970, 41(2):609~613
- [7] 邹英华,孙陶亨, 激光物理学. 北京:北京大学出版社,1991:194~208

Intracavity-doubling of a Q-switched Nd : YAG laser pumped by a LDA

SHEN Xiaohua ZHOU Fuzhen ZHU Sanyou
YANG Xiangchun LIN Zunqi

(Shanghai Institute of Optics & Fine Mechanics, Academia Sinica,
Shanghai 201800)

(Received 30 April 1992)

Abstract

Green light can be efficiently generated by intracavity-doubling under Q-switch at a high repetition. Its dynamic characteristics are studied in this paper. The optimum coupling coefficient is a function of initial inversion population. A home-made MQW-LDA with an output power of 200 mW is used in our experiment to pump a Nd : YAG laser with acousti-optics Q-switch and KTP intracavity-doubling. SHG output energy of 0.4 μ J has been obtained with the pulse width of 70 ns.

Key words scales over threshold, optimum nonlinear coupling coefficient.