

连续 Nd: YAG 激光器 FTIR 调 Q 技术方案

王自鑫, 黄绮雯, 陈文旋, 周达君

(中山大学超快速激光光谱学国家重点实验室, 广东 广州 510275)

摘 要: 比较了受抑全内反射棱镜和声光调制两种调 Q 技术的机理, 讨论了把前者用作连续 Nd: YAG 激光器 Q 开关的可行性以及对主要的技术指标的要求。

关键词: 受抑全内反射; 调 Q; 连续 Nd: YAG 激光器

中图分类号: TN248.34 文献标识码: A 文章编号: 0529-6579 (2002) 03-0030-04

在脉冲泵浦 Nd: YAG 激光器的多种 Q 开关技术方案中, 受抑全内反射 (frustrated total internal reflection, FTIR) 棱镜开关技术具有结构简单, 深调制, 效率高的优点, 已经用在激光测距的军事技术中^[1]。也有为数不多的文献^[2,3]一般性地讨论了 FTIR 的物理机制。

我们从已有的 FTIR 技术在脉冲泵浦 Nd:YAG 激光器调 Q 应用的基础上, 紧密结合连续泵浦的 Nd:YAG 激光器的工作条件, 讨论应用 FTIR 技术调 Q 的优点和必要条件, 目的是提出一个新的方案, 以期提高连续调 Q 的 Nd:YAG 激光器的峰功率, 并讨论新方案的一些主要技术参数。而高的峰功率在激光打标和激光雕刻的应用中, 是迫切需要解决的问题。

1 激光器基本构形和 FTR 开关的调制特性

标准的 FTIR 调 O 激光器结构如图 1。

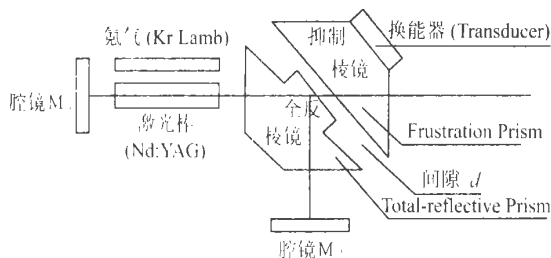


图 1 FTIR 棱镜调 Q 的 Nd: YAG 激光器结构

Fig. 1 The setup of FTIR Q-switched Nd: YAG laser

作的有很大的不同。脉冲泵浦的 Nd: YAG 激光器中, 腔镜 M_1 与 M_2 的反射率均是全反镜, 即 $R_1 = R_2 = 1$ 。激光脉冲的能量是穿过棱镜间隙输出。当棱镜间隙从高透过率状态 ($d=0$) 稍微拉开的同时, 腔内增益迅速提高, 巨脉冲同步建立。当间隙回复初始状态 ($d=0$), 光脉冲作倒空式输出。而对于连续 Nd: YAG 激光器, 针对激光器的增益相对于脉冲泵浦的情况来说较低, 我们设计激光能量从 M_2 输出, M_2 为部分透过。 d 的最大间隔要求达到或大于激光波长。而由于 M_2 的部分透过, d 的初始值可略大, 这对于避免 d 的过小所引起的光胶有利。

棱镜耦合面的要求很高，平面度和光洁度要保证两个面能够紧密的接触，间距 d 能达到 0.1 个波长。但随之而来的问题是紧接触所引起的光胶。为此，我们把两个面设计成非对称式，实际的通光面积约为 0.5 cm^2 ，比光斑稍大。在保证精度的前提下，缩小接触面积，很有效地避开光胶的麻烦。

棱镜的材料选用优质石英。棱镜整体安放在一套精密的调节架上, 棱镜间距 d 通过一精密螺杆由步进马达调节, 步进马达由计算机按设定程序驱动, 精度达 $0.1 \mu\text{m}$ 。

据理论计算, 当棱镜之间的间隙 d 小于激光波长的 $1/10$ 时, 其透过率接近 100% ^[4], 这是声光调制方法难以达到的优点。在实验条件内, 可达到 95% 。而目前连续 Nd: YAG 激光器中首要应用的声光 O 开关的调制深度不大于 50% 。

激光器的振荡条件为

$$\alpha L_r = \gamma_0 - \ln(1 - \gamma_0) - \ln(R_1 R_2) \quad (1)$$

脉冲方式工作的 Nd: YAG 激光器与连续工

* 收稿日期: 2001-11-26

基金项目: 广东省自然科学基金资助项目 (990224)

作者简介: 王自鑫 (1976—), 男, 硕士研究生; 通讯联系人: 周达君; E-mail: stils06@zsu.edu.cn

其中 R_1 和 R_2 是谐振腔两个端镜的反射率, 在脉冲式的激光器中, 均为全反射。而在我们目前的方案中, $R_1 = 1, R_2 = 0.8 \sim 0.9$, 符合连续泵浦的条件。 α 是 Nd: YAG 棒的增益系数。 L_r 是 Nd: YAG 棒的长度 γ_0 是谐振腔内除 Q 开关的总体单程损耗系数, 可取 $\gamma_0 = 0.08^{[2]}$ 。 γ_q 是 Q 开关的损耗系数, 也就是它的调制深度。

按我们的讨论, 在声光调制 Q 开关中, 取 $\gamma_{q1} = 0.5$; 在 FTIR 调 Q 方式中, 取 $\gamma_{q2} = 0.95$ 。

结合速率方程^[5]

$$T_1 = \frac{dN(t)}{dt} = -2\varphi(t)N(t) + \frac{2K_1}{K_1 + K_2} \cdot \frac{T_1 N_d(t)}{\tau_d} \quad (2)$$

$$T_1 \frac{dN_d(t)}{dt} = \varphi(t)N(t) - \frac{T_1 N_d(t)}{\tau} \quad (3)$$

$$T_1 \frac{d\varphi(t)}{dt} = \varphi(t)[N(t) - \gamma(t)] \quad (4)$$

其中, N 是归一化粒子数反转密度; N_d 是归一化下能级粒子数密度; φ 是归一化腔内光子数; $T_1 = [L_c + (n - 1)L_r]/C$, L_c 是腔长, C 是光速; τ_d 是激光下能级寿命; n 是激光棒的折射率; K_1 和 K_2 是与激光上下能级有关的常数。

考察在 FTIR 棱镜间隙拉开的时间演变过程中, 腔内光子数的变化, 我们得到在调 Q 激光脉冲峰值处的光子数为 (具体分析另文讨论)。

$$\Phi_{\max 1} = \frac{N_1(0) - \gamma_0}{2} + \frac{\ln(1 - \gamma_{q1})}{2} \ln \left[\frac{N_1(0)}{\gamma_0} \right] \quad (5)$$

$$\Phi_{\max 2} = \frac{N_2(0) - \gamma_0}{2} + \frac{\ln(1 - \gamma_{q2})}{2} \ln \left[\frac{N_2(0)}{\gamma_0} \right] \quad (6)$$

典型的 $\gamma_0 = 0.08$, 而 $\gamma_{q1} = 0.5, \gamma_{q2} = 0.95$, 代进 (5) 和 (6) 式, 得到

$$\Phi_{\max 2} : \Phi_{\max 1} \approx 9 : 1$$

$\Phi_{\max 1}$ 和 $\Phi_{\max 2}$ 分别是采用声光调 Q 和 FTIR 调 Q 技术得到的计算结果。

因而, 激光峰值高度将提高近一个数量级。如计及脉冲宽度的收窄, 峰值功率将有极大的提高。

2 FTIR 棱镜 Q 开关的运作时序及实现方案

已有的关于 FTIR 开关时间特性的分析都以棱镜内部超声频率 ω 作为分析的参量。其实, 驱动 FTIR 棱镜的是脉冲电压, 棱镜内部质点和两块棱镜耦合面的移动也都是脉冲的形式。因此, 用时间

参量去分析 FTIR 开关的时间特性更为直接和准确。

鉴于声光调制机理与 FTIR 调制机理回异, 两者的 Q 开关打开过程的时间轮廓截然不同。前者是一个矩形的时间窗口, Q 开关快速打开后, 保持一段时间间隔, 然后快速关闭。后者是靠石英介质内脉冲的弹性振动实现 Q 开关的动作, 其时间演变过程复杂得多, 为简单计, 以一个对称的三角波型的脉冲讨论 FTIR 调制的时间特性。

连续运转的 Nd: YAG 激光器调 Q 的重复频率或周期, 取决于 Nd^{3+} 离子的激光上能级寿命 τ_u 。在两次 Q 开关导通之间的时间间隔内, 激光器处于低 Q 状态。激光上能级粒子数不断积累, 并实现粒子数反转。这过程在激光上能级寿命终结时达到饱和。换言之, Q 开关开启的重复周期等于激光上能级寿命。从有关的文献 [6] 可知, Q 开关开启的重复频率不应大于 5 kHz, 常用的频率为 1 ~ 2 kHz。这个参数决定于激光工作物质, 所以, 无论是声光调制或 FTIR 技术, 都是一样的。

描述一个对称的三角波型脉冲用两个参数: 脉冲的高度和脉冲的上升时间。

按照 Nd: YAG 激光器的巨脉冲形成过程的分析, 由 Q 突变到巨脉冲输出, 中间有一个时间间隔 τ_p , 激光器需要在其间建立起足够的背景辐射, 以激发突发的受激辐射并进一步放大, 最终形成激光脉冲。为此, FTIR 棱镜间隙拉开的时间必须小于 τ_p 。然后, 按照激光能量输出方案要求, Q 突变完成后, 应保持在全开状态并延续一个 τ_p 的时间间隔, 以孕育巨脉冲的生成 (时序的进一步分析亦将另文讨论)。

图 2 是 FTIR 棱镜 Q 开关的时间特性以及巨脉冲生成的时序。驱动 FTIR 棱镜是借助换能器实现的。换能器的材料是压电陶瓷。显然, 换能器应具备宽带和响应时间特性好的物理性质。对于 Nd: YAG 激光工作物质, $\lambda = 1.06 \mu\text{m}$, $\tau_p = 1 \sim 2 \mu\text{s}^{[6]}$ 。扣除超声在石英内部的损耗和换能器连接层的阻抗, 要求压电陶瓷的伸缩幅度大于 $2 \mu\text{m}$, 中心响应频率为 1 MHz 左右。按照这些基本要求, 选取合适的压电陶瓷类型和计算电源的注入功率。在这里,

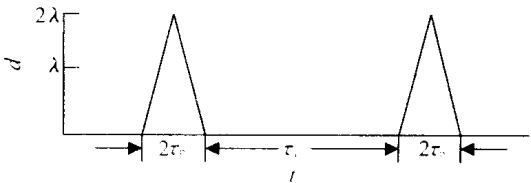


图 2 FTIR 棱镜间隙 d 随时间 t 的变化

Fig 2 Gap of FTIR prism vs time

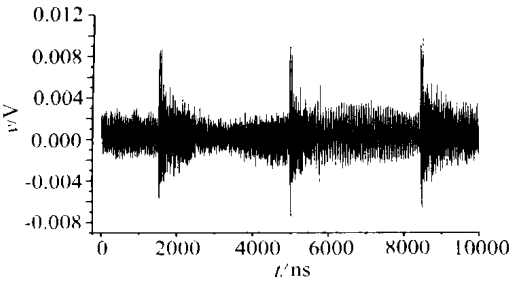


图 5 被调制的激光输出
Fig 5 Modulated laser signal output

参考文献:

[1] 时顺森, 屈乾华, 杜又文. FTIR-Q 开关 Nd: YAG 激光器巨脉冲特性的研究(II)[J]. 兵器激光, 1982(7): 22—26.

[2] 屈乾华, 时顺森. FTIR-Q 开关 Nd: YAG 激光器巨脉冲特性的研究(I) [J]. 兵器激光, 1982(2): 21—30.
[3] 程向明, 黄丽清, 王详林. 受抑全内反射 Q 开关性能研究 [J]. 激光杂志, 1997, 18(5): 32—34.
[4] COURT IN, WILLISEN F K V. Frustrated total internal reflection and application of its principle to laser cavity design [J]. Appl Opt, 1964, 3(6): 719—726.
[5] HILL K O, CAMPBELL C K. Studies of a porro prism Q-switched Nd³⁺: Glass giant pulse laser oscillator [J]. Canadian Journal of Physics, 1973, 51(1): 20—24.
[6] CHESLER R B, KARR M B, GEUSIC J E. An experimental and theoretical study of high repetition rate Q-switched Nd: YAG lasers [J]. Proceedings of The IEEE, 1970, 58(12): 1899—1913.

Study of Application of FTIR to
Continuously Pumped Nd: YAG Laser Q Switching

WANG Zhi xin, HUANG Qi wen, CHEN Wen xuan, ZHOU Da jun

(Institute of Laser and Spectroscopy, Sun Yat sen (Zhongshan) University, Guangzhou 510275, China)

Abstract: The mechanism of Q switching technology of FTIR and acoustooptic modulation are compared and the possibility of application of FTIR to continuously pumped Nd: YAG laser Q switching and the requirements of the key technical parameters was discussed.

Key words: FTIR; Q switching; CW Nd: YAG laser

(上接第 29 页)

参考文献:

[1] OGATA K. Modern control engineering [M]. Third ed. Prince Hall Inc, 1998.
[2] HANSELMAN D, LITTLEFIELD B. Mastering MAT-

LAB: a comprehensive tutorial and reference [M]. Prentice Hall Inc, 1996.
[3] RIMVALL C M. Computer-aided control system design [J]. IEEE Control Systems Magazine (Special issue on CACSD), 1993, 13: 14—16.

The CAD of State Feedback Regulation System Based on Prediction Observer

L ÜZhi min, L ÜJin, LIU Yang

(Department of Electronics and Communication Engineering,
Sun Yat sen (Zhongshan) University, Guangzhou 510275, China)

Abstract: A CAD method of state feedback regulation system based on prediction observer is presented by using the relational functions in MATLAB control system toolbox and symbolic math toolbox. The theoretical calculation values are the same in comparison with the simulation data, and the result shows that it is a correct and practical method.

Key words: prediction observer; state feedback; regulation system