

文章编号: 0529-6579 (2000) S2-0204-06

新型激光机械调 Q 的分析与研究*

叶小华, 周达君, 刘焰发, 余振新

(中山大学激光与光谱学研究所, 广州 510275)

摘 要: 采用高斯光束传输规律对转盘斩波式的机械调 Q 进行了分析, 得出了有关的各个参数. 建立了这种调 Q 方式的数学模型, 与实验结果比较吻合, 对于进一步提高 Q 开关的速度和收窄光脉冲的途径起指导作用. 对受抑内全反射式机械调 Q 方案也提供了初步实施结果.

关键词: Q 开关/受抑内全反射

中图分类号: TN248 **文献标识码:** A

激光调 Q 作为一种比较成熟的技术, 已广泛应用于测距、雷达、高速摄影、激光加工和核聚变中. 机械调 Q 相对于其它诸如声光、电光、染料调 Q 方式, 由于结构简单、成本较低、动静比高 (例如, 声光开关的动静比仅为 30% 左右, 而机械 Q 开关几乎可达 100%), 可实现较高重复频率 (例如电光开关重复频率仅为几十赫兹, 而机械开关可达几千赫兹), 在工业生产应用中愈来愈受到人们的关注. 本文分析的是利用高速马达和转盘进行机械斩波而达到调 Q 目的, 与传统转镜式调 Q 方式相比, 除了具备结构简单、操作方便、不给谐振腔引入附加损耗, 并且可承受较高功率等优点之外, 还可避免转镜开关输出激光方向的不稳定的缺点, 而且在工业应用中高速转镜容易沾上尘埃, 引起功率下降, 而斩波 Q 开关可避免此类问题, 但与转镜开关相比, 在机理上有不同之处, 本文建立相应数学模式, 对利用机械斩波而达到调 Q 目的的条件进行了理论阐述, 并得出了与实验相符的结果. 这对实现调 Q 目的具有关键作用. 在受抑内全反射式机械调 Q 方案方面, 开展了初步工作, 以压电陶瓷作驱动元件, 观察了棱镜组合体的透过率特性. 确定了进一步提高响应速度的方法.

利用转盘进行调 Q 的光路设计可采取两种方案 (如图 1, 图 2 所示), 为了避免在腔内引入附加透镜损耗, 实验中采用的是图 2 所示光路.

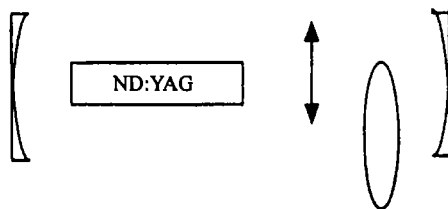


图 1 直腔示意图

* 基金项目: 广东省科学基金资助项目 (990224)

收稿日期: 2000-03-10; 作者简介: 叶小华 (1975~), 男, 硕士; 通讯联系人: 周达君.

- (1) 腔内加透镜, 如图 1.
 (2) 采用折叠腔方式, 如图 2 所示.

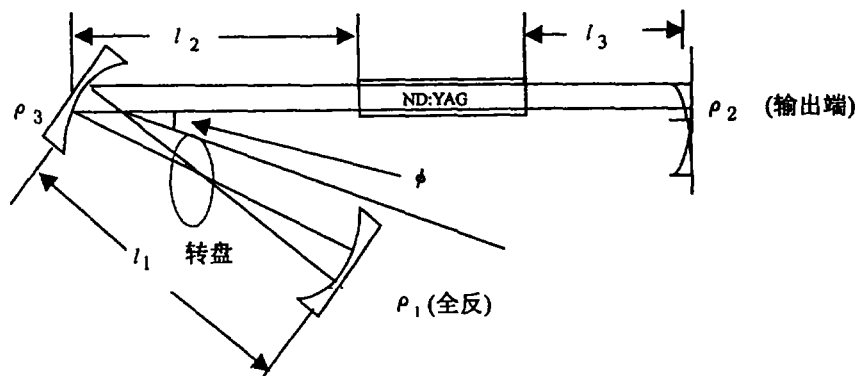


图2 折叠腔示意图

1 腔型分析

如图 2 设 3 个镜曲率半径分别为 ρ_1, ρ_2, ρ_3 , 各分臂长为 l_1, l_2, l_3 , 根据 ABCD 定则, 分析在稳定折叠腔中能够存在的高斯光束往返一周的自再现条件, 以 ρ_1 为参考面, 计算可得

$$a = \frac{(a_1\rho_3 - 2a_1l_1 - 2c_1l_2l_1 + c_1l_1\rho_3 + c_1l_2\rho_3)}{\rho_3} \quad (1)$$

$$b = \frac{l_3a_1\rho_3 - 2a_1l_1 + l_3c_1l_2\rho_3 - 2l_3c_1l_2l_1 + l_3c_1l_1\rho_3 + b_1\rho_3 - 2b_1l_1 - 2d_1l_2l_1 + d_1l_1\rho_3}{\rho_3} \quad (2)$$

$$c = \frac{(-2a_1 - 2c_1l_2 + c_1\rho_3)}{\rho_3} \quad (3)$$

$$d = \frac{(-2l_3a_1 - 2l_3c_1l_2 + l_3c_1\rho_3 - 2b_1 - 2d_1l_2 + d_1\rho_3)}{\rho_3} \quad (4)$$

采用 G 参数等价腔分析法

$$G_1 = a - \frac{b}{\rho_1} \quad (5)$$

$$G_2 = d - \frac{b}{\rho_2} \quad (6)$$

并考虑激光棒所产生的热透镜效应(实验中测得其等效焦距为 32 cm), 激光工作物质由于热效应形成的类透镜效应, 其光线传输矩阵可近似写成:

$$\begin{pmatrix} a_1 & b_1 \\ c_1 & d_1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sqrt{1 - \frac{n_2 l^2}{n_0}} & l/n_0 \\ -n_2 l & \sqrt{1 - \frac{n_2 l^2}{n_0}} \end{pmatrix} \quad (7)$$

式中 n_0 为工作物质的折射率, n_2 为类透镜系数, l 为工作物质长度。

(1) 由稳定性条件, $0 < G_1 G_2 < 1$ 可推得稳定性条件为: $-2 < A + D < 2$, 若考虑到了子午面及弧矢面内折叠腔镜等效焦距的不同, 在子午面内的焦距 $f_t = R \cos \phi / 2$, 在弧矢面内

的焦距($f_s = R/(2\cos\phi)$),应分别计算子午面和弧矢面的稳定区和光束参数.但实验中, ϕ 值通常很小,为 $2^\circ \sim 3^\circ$,因此与直腔差别甚微,可近似采用直腔进行等效分析.

(2) 以镜 ρ_1 为参考面,由ABCD定律并利用腰斑处高斯光束等相面曲率半径趋于无穷大条件得到两凹面镜间的最小光斑半径及位置.

利用(1)可求得稳定区范围如图3所示.

图3中, l_2, l_3 单位均为m,稳定区为两曲线所夹区域,但对 l_2 为负的稳定区,没有实际意义.

由(2)可求得:

$$\omega_0^2 = \frac{\lambda B \sqrt{4 - (A + D)^2}}{\pi^2 (1 - AD)} \quad (8)$$

由上式可得光斑半径平方 ω^2 与 l_2, l_3 关系图如图4所示.

图4中平面坐标轴分别为 l_2 ,纵轴为 ω^2 ,由图可看出 ω^2 有一最大值,实验中 ω^2 越小,越有利于实现调Q目的,因此应在保证较强输出的情况下,尽量使 ω^2 小.以上数据可为设计腔型提供依据.

2 调Q机理分析

以上所述调Q方式与传统有所不同,也即其他开关诸如声光、电光等调Q方式对整个光斑而言作用同时进行,而这里所述的开关对整个光斑的作用是逐步进行的,如图5所示.

可将激光光斑分成 n 个等份,当 n 趋近于无穷大时,可认为开关对某一等份的开关作用是同时进行的,所以对某一等份而言,对应其输出的脉冲应该与声光调Q脉冲的形状一致,对整个光斑利用转盘调Q的脉冲形状就是 n 个等份对应的脉冲的迭加.

根据实验所得声光调Q的输出脉冲的波形(如图6所示),采用拟合函数表达波形形状,如图7所示,拟合后可得如下函数形式:

$$f(t) = A_1 e^{-t/t_1} + A_2 e^{-t/t_2} \quad (9)$$

$$A_1 = 99.72047, A_2 = 36.61038, t_1 = 1537.48313,$$

$$t_2 = 11525.79932$$

t 以ns为单位.

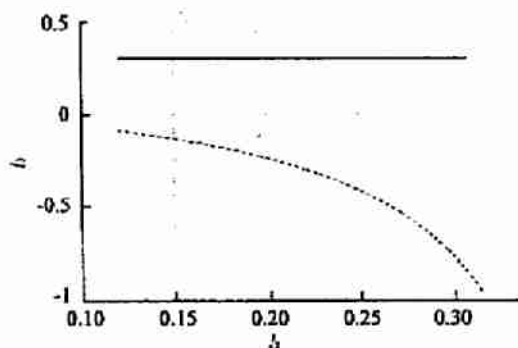


图3 稳定区示意图

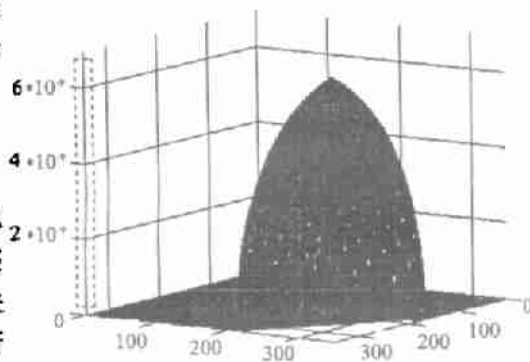


图4 最小光斑半径与 l_2, l_3 关系曲面图

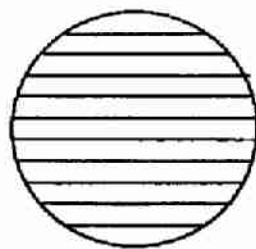


图5 光斑分析示意图



图 6 存储示波器记录图形

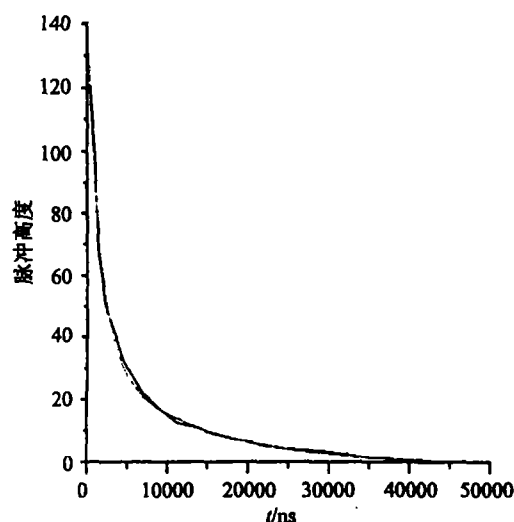


图 7 拟合函数与实验曲线的比较

利用转盘调 Q, 每一个小等份都可认为产生一个如上面函数形式描述的激光脉冲, 但各脉冲特性并不完全相同, 其不同之处主要在于起始 t 时刻的不同及指数前面的幅度值不同, 以下就分别对时间起始值及脉冲峰值加以讨论。

2.1 时间延时的讨论

这里应该考虑两种情况, 第一种是从开关开始对光斑进行作用时到完全打开时这段时间内激光脉冲输出形状的函数表达式; 第二是开关完全开后输出脉冲的函数表达式。

对应这两种情况, 可以写出两个不同的指数积分表达式如下:

$$h(t) = \int_0^t g(v, t_0, r) \cdot f(t_0 - t) dt_0 \quad 0 \leq t \leq t_1 \quad (10)$$

$$k(t) = \int_0^{t_1} g(v, t_0, r) \cdot f(t_0 + t - t_1) dt_0 \quad t \geq t_1 \quad (11)$$

上式中 $h(t), k(t)$ 对应 t 时刻点的脉冲高度; t_1 为 Q 开关从打开时刻起至完全打开的时间。 $g(v, t_0, r)$ 是对应某一等份的不同幅度值函数。其中, v 是转盘转速, r 是光斑半径。采用积分表达式是把 t 时刻之前所有脉冲在 t 时刻的贡献值累加起来, 从而形成 t 时刻的脉冲高度, 表达式的不同意味着迭加形式的不同; (10) 式表示 Q 开关尚未完全打开时的迭加方式, 此时从 $t_0 = 0$ 一直迭加到 t 时刻; (11) 式表示 Q 开关关闭后的脉冲迭加方式, 此时从 $t_0 = 0$ 一直迭加到 t_1 时刻, t_1 为光脉冲穿过一个孔隙的时间, 也即 Q 开关的打开时间。

2.2 幅度峰值的讨论

因为脉冲输出波形某点处的峰值高度与功率成正比, 而光斑某一等份的面积与能量成正比, 由此可推出, 输出波形某点的峰值与对应光斑某等份的面积除以时间的商值成正比。

由以上讨论可得幅度值的表达式为:

$$g(v, t, r) = \frac{2v \cdot \sqrt{2vtr - v^2 t^2} \cdot \Delta t}{\Delta t} = 2v \cdot \sqrt{2vtr - v^2 t^2} \quad (12)$$

由 (1), (2) 两部分的讨论可得开关打开后某一时刻 t 时的脉冲高度函数表达式为:

$$p(t) = \begin{cases} \int_0^t 2v \cdot \sqrt{2vtr - v^2 t^2} \cdot f(t_0 - t) dt_0 & 0 \leq t \leq t_1 \\ \int_0^{t_1} 2v \cdot \sqrt{2vtr - v^2 t^2} \cdot f(t_0 + t - t_0) dt_0 & t \geq t_1 \end{cases} \quad (13)$$

根据上式,代入实验的各数据 t_1, v, r 可得机械调 Q 输出脉冲的理论模型如图 8 所示.

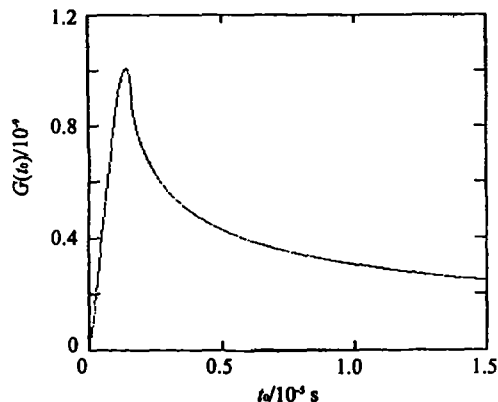


图 8 理论输出波形

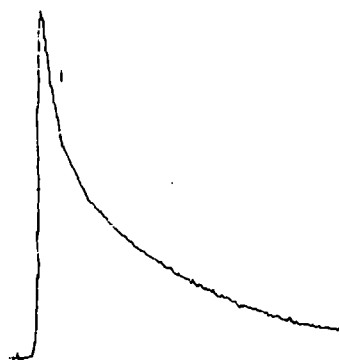


图 9 存储示波器记录图形

图 8 纵坐标为输出激光脉冲高度(相对值),横坐标为时间,实验中, v 值为 94.25 m/s , r 为 $7.75 \times 10^{-5} \text{ m}$, t_1 可根据 v, r 值推算出.

由上图可看出,理论输出波形形状及宽度(接近为 $5 \mu\text{s}$),与实验中所得结果(由示波器观察所得,见图 9)很接近,表明了理论假设的合理.在实验应用中,输出脉冲宽度为几百个 ns 才比较适宜,这可通过提高转速及调节最小光斑半径而得以实现,重复频率为 4000 多 Hz ,比较适合实际应用中的需要.理论分析与实验结果的吻合为利用斩波实现调 Q 目的提供了一种新方法.

受抑全内反射 (FTIR) Q 开关也是一种机械 Q 开关,但就其储能方式来说与前面所述的电光、声光、可饱和吸收等有所不同,FTIR 调 Q 是属于谐振腔储能方式,在输出激光时,其输出反射镜的反射率为零,即在透过率为 100% 的条件下实现激光输出.

FTIR 调 Q 光路可如图 10 所示.

其工作原理是:谐振腔内的光束经 Nd:YAG 放大后进入全反射棱镜 4' 的界面,如果此时棱镜间的缝隙 d 比波长大得多,则光束经全反射到镜 6,然后再经 4' 沿原光路返回,如果 d 与波长可以比拟,则光将一部分经 4' 反射至 6,另一部分穿过棱镜对间的缝隙经受抑元件 4 出射.其透射光的大小由棱镜对间隙的透过率决定.

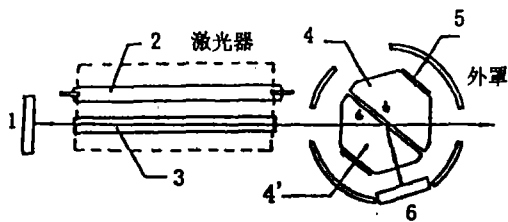


图 10 FTIR 调 Q 光路图

我们用一 He-Ne 激光入射棱镜组合体,用微位移压电陶瓷作为压电换能器,加一周期性的电信号,观察棱镜透过率的响应特性,发现对低频信号 (500 Hz 以下) 输入时,响应特性与输入信号基本保持一致.但如果输入信号频率超过 500 Hz 的话,响应特性曲线则

发生失真. Q 开关打开、关闭时间小于 $1\ \mu\text{s}$ 量级, 驱动源输出信号中对应于开关时的波形应是一个上升很陡的脉冲. 因此, 虽然压电陶瓷位移量能满足 FTIR 的需求, 但由于其响应速度不够快, 不能应用在 FTIR 的 Q 开关的设计方案中. 为了实现对高频成分的实时响应, 我们采用在棱镜端面熔焊一层声光换能器的方案, 由于声光换能器固有频率较高, 因此, 对驱动源的高频成分可望有不失真的实时响应. 声光换能器的制作和焊接正在进行.

参考文献:

- [1] HERWIG W KOGELNIK, ERICH P IPPEN, ANDREW DIENES, et al. Astigmatically compensated cavities for CW dye laser. IEEE Journal of Quantum Electronics, 1972, QE-8 (3): 373 ~ 379.
- [2] 魏光辉, 朱宝亮. 激光光束学. 北京: 北京工业学院出版社, 1988. 151 ~ 167, 305 ~ 326, 363 ~ 376.
- [3] CHESLER R B, KARR M A, GEUSIC J E. An experimental and theoretical study of high repetition rate Q-switched Nd: YAlG lasers. Proceedings of the IEEE, 1970, 58 (12): 1899 ~ 1914.
- [4] 魏志义. 含有热透镜的望远镜谐振腔的分析及设计. 激光杂志, 1990, 11 (6).
- [5] 吕百达. 激光光学. 成都: 四川大学出版社, 1992. 68 ~ 71, 234 ~ 238, 292 ~ 295, 363 ~ 366.

Analysis and Study on A New Type of Laser Q -switch with Machine

YE Xiao-hua^{*}, ZHOU Da-jun, LIU Yan-fa, YU Zhen-xin

Abstract: Chopping-machine Q -switch is analyzed and parameters concerned with Q -switch system are also presented. The mathematical theory mode is in good agreement with experimental results. For another new way of machine- Q -switch, Q -switch by frustration inner total reflection, the primary results are acquired.

Keywords: Q -switch/FTIR (frustration inner total reflection)

^{*} Institute of Laser and Spectroscopy, Zhongshan University, Guangzhou 510275, China