

文章编号: 1001-3806(2011)02-0218-04

调 Q 开关对无线光通信中信号脉冲的影响

侯军辉, 郭建强*, 王黎, 高晓蓉, 王泽勇

(西南交通大学 物理科学与技术学院, 成都 610031)

摘要: 为了分析激光器调 Q 开关对无线光通信中信号脉冲的影响, 从激光形成的基本速率方程组出发, 在不同的 Q 开关函数模型下, 采用数值计算的方法, 对调 Q 激光器输出脉冲的功率和波形特性进行了理论研究和仿真实验, 取得了信号脉冲功率密度、脉冲宽度等仿真数据, 并将脉冲各项参量与通信系统中常用的升余弦滚降信号进行比较。结果表明, 调 Q 激光器输出脉冲有着较高的功率和良好的波形特性, 因而能够很好地适应长距离无线光通信, 并有效抑制码间串扰, 降低误比特率。

关键词: 光通信; 调 Q 脉冲; 速率方程; 升余弦信号

中图分类号: TN248.1 **文献标识码:** A **doi:** 10.3969/j.issn.1001-3806.2011.02.021

Influence of Q -switch on signal pulse in wireless optical communication

HOU Jun-hui, GUO Jian-qiang, WANG Li, GAO Xiao-rong, WANG Ze-yong

(College of Physical Science and Technology, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

Abstract: In order to analyze the influence of Q -switch in a laser on the output signal pulse in wireless optical communication, on the basis of the rate equations, under different Q -switch function models, the power and waveform characteristics of the output signal were theoretically analyzed and simulated. Then the obtained data were compared with the raised cosine roll-off signal. The results indicate that the output pulse of a Q -switch laser has excellent power and waveform characteristics, which make it suitable for long distance wireless optical communication, restraining code intercross and reducing the bit error rate effectively.

Key words: optical communication; Q -switch pulse; rate equations; raised cosine roll-off signal

引言

近年来, 无线激光通信不断地向着长距离、高速率的方向发展, 这就应考虑大气信道环境对激光信号的衰减和信号脉冲之间的串扰。激光在大气中传输时, 由于受到气体分子对大气气溶胶粒子的散射和吸收, 其强度衰减得很快^[1], 这就要求激光器产生的脉冲要有很高的功率。调 Q 激光器能够将激光能量压缩到宽度极窄的脉冲中发射, 使光源的峰值功率可以提高几个数量级^[2], 因此, 可以用于长距离通信中的信号发射。

另外, 高速率的信号传输, 加大了接收端的判决压力, 误比特率增加。接收机频率特性不理想引起的波

形畸变, 是码元之间形成干扰的主要因素, 这就对脉冲信号的波形提出了一定的要求。近年发展起来的光纤-光栅对、自锁模压缩和脉冲后沿压缩等调 Q 脉冲压缩技术, 极大地提高了脉冲功率, 改善了脉冲的波形特性, 提高了通信容量, 降低了误比特率^[3-5]。

因此, 在长距离无线激光通信中, 研究激光器中调 Q 开关比特对输出信号脉冲功率和信号波形的影响, 具有重要意义。

1 升余弦滚降传输特性与大气传输的关系

对于无线光通信整个传输系统, 如果不考虑系统的频带, 从消除码间串扰来看, 其系统传输函数 $H(\omega)$ 有不同的形式, 升余弦滚降传输特性就是使用较多的一类。

升余弦滚降传输函数是对截止频率为 ω_0 的理想低通特性按余弦函数的滚降特性进行“圆滑”得到的。根据实际需要选择, 升余弦滚降传输特性函数可采用余弦函数^[6], 此时有:

作者简介: 侯军辉 (1983-), 男, 硕士研究生, 现主要从事光通信和光电检测方面的研究。

* 通讯联系人。E-mail: jianqguo@163.com

收稿日期: 2010-04-19; 收到修改稿日期: 2010-05-27

$$H(\omega) = \begin{cases} T, & (|\omega| \leq (1 - \alpha)\pi/T) \\ T \cos^2 \frac{T}{4\alpha} \left[|\omega| - \frac{\pi(1 - \alpha)}{T} \right], & ((1 - \alpha)\pi/T \leq |\omega| \leq (1 + \alpha)\pi/T) \\ 0, & (|\omega| \geq (1 + \alpha)\pi/T) \end{cases} \quad (1)$$

式中, T 为码元间隔, α 为滚降系数。在此系统中码元的速率为 $R_B = 1/T$ 时无码间串扰。它所对应的冲击响应为:

$$h(t) = \frac{\sin \frac{\pi t}{T} \left[\frac{\cos \frac{\pi \alpha t}{T}}{1 - \left(\frac{2\alpha t}{T}\right)^2} \right]}{\frac{\pi t}{T}} \quad (2)$$

当 α 取值为 1 时, 其波形如图 1 所示。由图上可以看出,

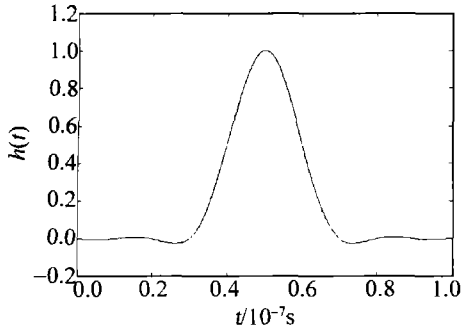


Fig. 1 Raised cosine roll-off signal

出, 升余弦滚降信号有着较好的衰减特性, 在主脉冲两侧, 波形很快衰减为 0, 因而可以有效地抑制码间串扰。升余弦滚降特性的实现比理想低通容易得多, 所以可作为无串扰传输的理想模型。

2 高速、长距离传输对光脉冲的要求

要研究调 Q 激光器信号脉冲在无线光通信中的特性, 首先应分析激光脉冲的形成过程, 以及脉冲特性的影响因素。

2.1 调 Q 激光器光脉冲的形成

激光形成的速率方程组是根据粒子数变化和腔内光子数变化之间的内在关系建立起来的。以 4 能级系统为例, 其粒子数反转和腔内光子数随时间变化的方程组^[7-8]为:

$$\begin{cases} \frac{d\Delta n}{dt} = n_1 W_{14} - \Delta n \frac{2B_{21}}{\pi\Delta\nu} \mu h\nu_0 \phi - n_2 A_{21} \\ \frac{d\phi}{dt} = \Delta n \frac{2B_{21}}{\pi\Delta\nu} \mu h\nu_0 \phi - a_1 \phi \end{cases} \quad (3)$$

式中, Δn 为反转粒子数密度, ϕ 为腔内光子数, B_{21} 为受激辐射系数, W_{14} 为受激吸收跃迁几率, A_{21} 为自发辐射几率, 为上能级寿命 τ 的倒数, $\Delta\nu$ 为线宽, n_1 和 n_2 分别为两个能级上的粒子数, h 为普朗克常数, ν_0 为光波中心频率, a_1 为单程总损耗, μ 为腔中介质折射率。

在 Q 值(或损耗)突变的过程中, 由于激光器处于急剧变化的瞬态过程, 所以光抽运激励和自发辐射两

个过程的影响可以忽略不计^[8], 则(3)式可以简化为:

$$\begin{cases} \frac{d\Delta n}{dt} = -\Delta n \frac{2B_{21}}{\pi\Delta\nu} \mu h\nu_0 \phi \\ \frac{d\phi}{dt} = \Delta n \frac{2B_{21}}{\pi\Delta\nu} \mu h\nu_0 \phi - a_1 \phi \end{cases} \quad (4)$$

为求得谐振腔的阈值反转粒子数密度 Δn_{th} , 令 $\frac{d\phi}{dt} = 0$,

则有:

$$\Delta n_{th} = \frac{\pi\Delta\nu a_1}{2B_{21}\mu h\nu_0 \phi} \quad (5)$$

式中^[4],

$$B_{21} = \frac{A_{21}c^3}{8\pi h\nu_0^3 \mu^3} = \frac{c^3}{8\pi h\nu_0^3 \mu^3 \tau} \quad (6)$$

式中, c 为真空中光速。将(6)式代入(5)式可得^[7]:

$$\Delta n_{th} = \frac{4\pi^2 \Delta\nu_0^2 \mu^2 \tau a_1}{c^2} \quad (7)$$

将(6)式和(7)式代入速率方程组(4)式可得:

$$\begin{cases} \frac{d\Delta n}{dt} = -2 \frac{\Delta n}{\Delta n_{th}} a_1 \phi \\ \frac{d\phi}{dt} = \left(\frac{\Delta n}{\Delta n_{th}} - 1 \right) a_1 \phi \end{cases} \quad (8)$$

(8)式即为调 Q 激光振荡的速率方程。为了对此方程组进行数值求解, 必须给出 Q 开关的具体形式(亦即腔内损耗 a_1 的函数表达式)。为了简单起见, 首先分析理想情况下的激光输出脉冲特性, 认为 Q 值(或损耗)是阶跃式变化的。

2.2 脉冲功率、延时与初始反转粒子数的关系

假定腔内损耗 a_1 在参考 0 时刻有一突变, 如图 2

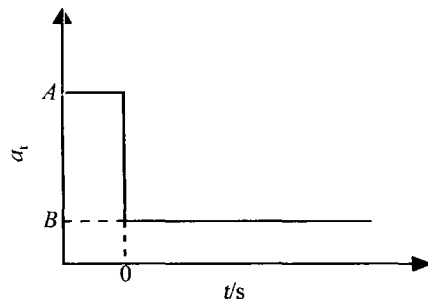


Fig. 2 Ideal Q-switch function

所示的阶跃函数。当 $t < 0$ 时, 损耗值为一较大值 A ; 从零时刻开始, 损耗突变为一较小值 B 。

采用 4 阶 Runge-Kutta 法^[9] 对速率方程组(6)式进行数值求解, 并画出腔内光子数密度曲线如图 3 所示。

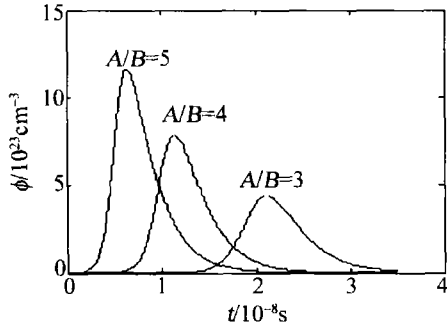


Fig. 3 Photon density curve under different initial inversion population density

计算中用到的参量^[7]有:激光频率 $\nu_0 = 4.32 \times 10^{14} \text{ s}^{-1}$, 介质折射率 $\mu = 1.76$, 激光线宽 $\Delta\nu = 3.3 \times 10^{11} \text{ s}^{-1}$, 能级寿命 $\tau = 3 \times 10^3 \text{ s}$, 开关开启以前激光器总损耗 $A = 17.3285 \text{ m}^{-1}$, 开关开启后激光器单程损耗 $B = 3.4657 \text{ m}^{-1}$, 阈值反转粒子数 $\Delta n_{th} = 8.7 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$, 总粒子数密度 $n = 1.58 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$, 初始反转粒子数密度 $\Delta n_i = 4.35 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$, 初始光子数密度 $\phi_i = 10^{14} \text{ cm}^{-3}$ 。

由图3中 $A/B = 5$ 对应的曲线可以看出, 0时刻起将腔内总损耗降低, 光子通过自发辐射缓慢增加。当光子数增加到一定程度后, 上能级反转粒子通过受激辐射迅速产生光子, 使得腔内光子数急剧增加, 从而在很短的时间内输出一个巨脉冲。从图上还可以看出, 脉冲的下降沿比上升沿缓慢, 这是因为在经历了受激辐射之后, 上能级反转粒子大量消耗, 剩余粒子主要通过自发辐射转化为光子。

改变初始损耗 A , 其它参量不变, 在图3中画出不同初始损耗下腔内光子数密度曲线。对比图中曲线可知, 降低初始损耗值, 输出脉冲的峰值光子数密度不断降低, 脉冲宽度不断增加。这时因为降低初始腔内初始损耗, 腔内初始反转粒子数密度也相应降低, 使得发生受激辐射时可供消耗的粒子数减小, 受激辐射效应减缓。

由图3还可以看出, 减小初始损耗后, 输出脉冲有不同程度的延迟。这是因为初始粒子数较低时, 最初靠自发辐射产生的光子增加较慢, 产生明显的受激辐射要经历较长的时间。

由以上分析可以得到以下结论: 对于调 Q 开关激光器, 为了增大输出脉冲峰值光子数密度, 首先应增大抽运速度, 以保证上能级有足够的反转粒子; 同时应增大开关开启前后腔内损耗的“落差”, 以使开关开启之前, 腔中上能级反转粒子数维持在一个较高的水平。

3 实际调 Q 开关对输出脉冲功率的影响

前面讨论的是在理想情况下, 调 Q 开关对输出光脉冲的影响。实际调 Q 开关转换时, 由于开关机械性能等原因, 损耗转换要经历相当的时间, 而且由于调 Q

方法不同, 损耗在转换时变化过程也各不相同, 有时其开关函数甚至难以用一个解析式表达^[8]。因此, 有必要在不同的开关函数模型下, 研究实际调 Q 激光器输出脉冲的特性。

采用直线型和 Gaussian 两种开关函数模型, 选定两个不同的开关时间 $t_s = 10 \text{ ns}$ 和 $t_s = 5 \text{ ns}$, 将两种开关函数代入(7)式, 并用 Runge-Kutta 法对方程组进行数值求解, 画出激光器腔内光子数密度曲线, 如图4(图4a与图4c对应, 图4b与图4d对应)所示。计算中用到的

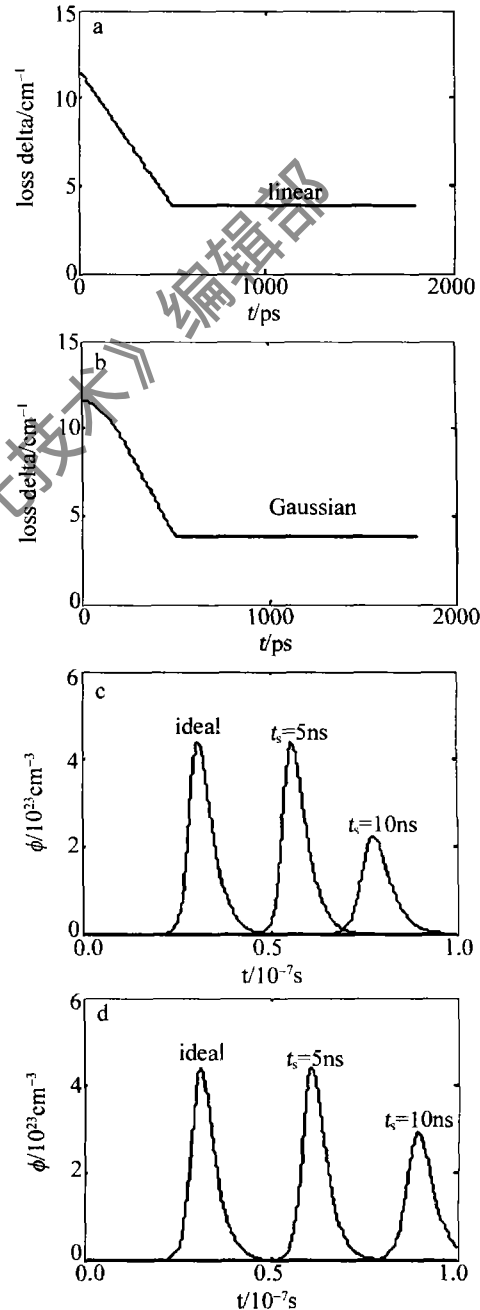


Fig. 4 Relationship between photon density and Q -switch time under different function models

a—the linear Q -switch function b—the Gaussian Q -switch function
c—photon density under linear Q -switch function model with different switch time d—photon density under Gaussian Q -switch function model with different switch time

参量有开关开启前损耗 $A = 13.86\text{m}^{-1}$, 初始反转粒子数密度 $\Delta n_i = 2.91 \times 10^{18}\text{cm}^{-3}$, 其它参量同前。

由图 4c、图 4d 可以看出, 当调 Q 开关时间 $t_s = 10\text{ns}$ 时, 直线型和高斯型两种开关函数下, 输出光脉冲较之理想开关情况下均有不同程度的恶化, 峰值光子数密度降低, 脉冲宽度增加^[10]。

缩短调 Q 开关时间, 令 $t_s = 5\text{ns}$, 并分别将光子数密度曲线画在图 4 中, 对比可知, 这时的输出脉冲较之理想情况并无变化, 只是相对于理想脉冲有一个约为开关时间的延迟。而其它特性, 诸如峰值光子数密度和脉冲宽度, 与理想情况下均没有本质改变。

图 5 中给出了直线型和高斯型两种开关函数模型

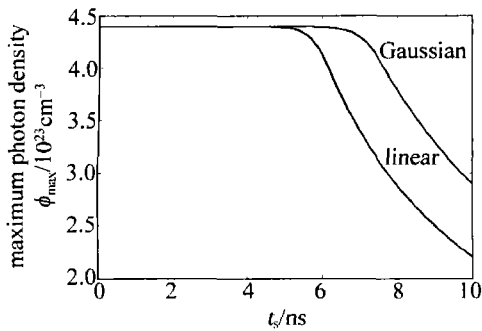


Fig. 5 Relationship between maximum photon density and switch time under different Q-switch functions

下, 最大光子数密度随开关时间的变化情况。由图中曲线可知, 当开关时间增大到 5ns 时, 直线型开关模型下, 最大光子数密度开始出现明显的下降, 而对于高斯型开关模型, 开关时间增大到 6ns 时, 峰值光子数密度开始下降, 由此看出, 高斯开关模型略优于直线型开关模型。

由以上分析可知, 对于实际的调 Q 开关, 只要开关时间足够短, 输出脉冲相比理想情况下就没有本质上的差别, 因此, 影响脉冲功率的关键因素是开关时间, 而非开关函数。所以在调 Q 激光器中, 为了提高输出脉冲的功率, 应努力改进技术, 缩短开关时间。

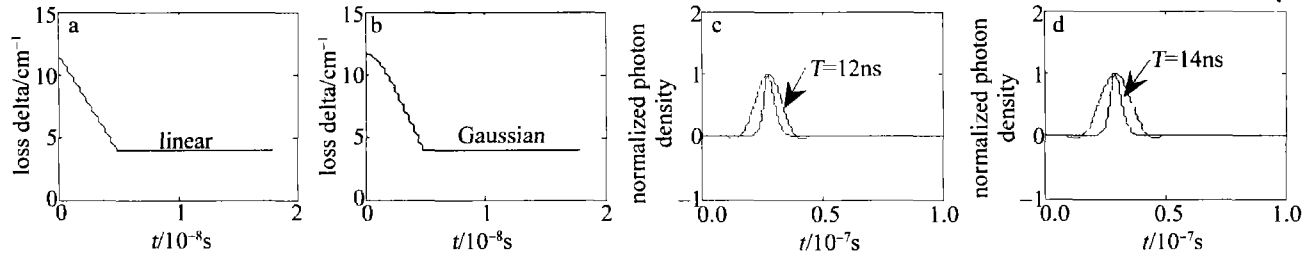


Fig. 7 Photon densities under different Q-switch functions

a—the linear Q-switch function b—the Gaussian Q-switch function c—photon density under linear Q-switch function d—photon density under Gaussian Q-switch function

可以看出, 在开关时间相同的情况下, 不同的 Q 开关函数, 其脉冲波形特性不同。在直线型函数模型下, 当 T 值为 12ns 时, 脉冲波形落在升余弦信号两个第 1 级两点之间; 而对于高斯型函数开关模型, 只有 T 的值增加到 14ns 时, 才可以有效抑制码间串扰。由此

4 调 Q 脉冲信号与升余弦信号波形的比较

在理想 Q 开关模型下画出输出脉冲光子数密度的归一化曲线, 并将升余弦滚降信号与其画在同一幅图上, 如图 6 所示。其中, 码元传输周期 $T = 4\text{ns}$ 。

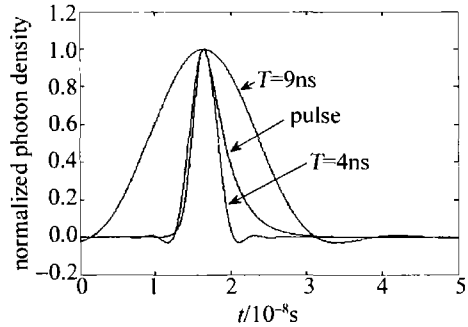


Fig. 6 The pulse and raised cosine roll-off signal

由图上可以看出, 当 $T = 4\text{ns}$ 时, 激光器脉冲的上升沿落在升余弦信号上升沿内侧, 而脉冲信号下降沿却落在升余弦信号下降沿外侧。这是因为在脉冲产生前期, 激光器上能级有大量的反转粒子, 光子主要是通过受激辐射产生, 所以上升沿较为“陡峭”; 而到了脉冲后端, 反转粒子已经大量消耗, 此时光子主要由自发辐射产生, 所以其光子数密度下降较为缓慢^[7]。若以此速率传输信号, 则会由于脉冲信号的功率不能及时衰减到 0 而产生一定的码间串扰。

降低码元传输速率, 将 T 值增大到 9ns, 把升余弦信号画在同一幅图上。此时由图上可以看出, 激光器输出的脉冲完全落在升余弦信号第 1 级零点内侧, 而且在功率上比升余弦信号衰减得还要快。这样, 系统以此速率传输信号, 可以有效抑制码间串扰^[11-12]。

在两种调 Q 开关函数模型下, 分别画出光子数密度的归一化曲线与升余弦信号进行比较, 如图 7 所示。其中, 两种模型的开关时间 $t_s = 5\text{ns}$ 。

可见, 直线型开关模型的特性略优于高斯型开关模型。

5 结论

长距离、大容量的无线光通信要求脉冲信号有较

(下转第 225 页)

高。例如,误比特率为 10^{-6} ,未编码系统的信噪比是编码系统的2.5倍。

5 结论

本文中设计的(3,1,1)卷积码避免了出现长“0”或“1”的发送序列,无论输入信息有多少个连续“0”或连续“1”,发送序列都不会超过3位连续“0”或连续“1”出现,防止了恶性码的出现,避免了系统由编码导致的出现无穷多错误的可能。同时,这种卷积码约束长度小,用Viterbi算法译码简单,硬件实现容易,符合水下光通信系统对器件简单、容易和低功耗等要求,具有一定地纠错能力,能改善系统的通信质量。

参考文献

- [1] ZHAO Y J, WANG J A, REN X C, *et al.* Effect of the atmospheric turbulence on the bit error rate of laser communication among the ships [J]. *Laser Technology*, 2010, 34(2): 261-264 (in Chinese).
- [2] YI M, LI T S, CHEN M S, *et al.* Frame synchronization for multi-pulse position modulation in optical communication [J]. *Laser Technology*, 2010, 34(2): 164-167 (in Chinese).
- [3] YANG M, HUANG B X, WANG F C, *et al.* The application of error-correcting codes in an underwater lasercom PPM system [J]. *Journal of Huazhong University of Science & Technology*, 1997, 25(7): 11-12 (in Chinese).
- [4] ZHAO L, KE X Zh, REN A H. Research and simulation of the influence of the scattering effect on FSO-OFDM system [J]. *Laser Technology*, 2010, 34(2): 185-188 (in Chinese).
- [5] FORESTIERI E, GANGPOADHYAY R, PARTI G. Performance of convolutional codes in a direct detection optical PPM channel [J]. *IEEE Transactions on Communication*, 1989, 37(12): 1303-1317.
- [6] TIAN L H. *Information Theory, code & cryptology* [M]. Xi'an: Xidian University Press, 2008: 268-288 (in Chinese).
- [7] QIU P L, CHEN H F, XIE L, *et al.* *Fundamentals of digital communications* [M]. Beijing: Publishing House of Electronics Press, 2007: 353-385 (in Chinese).
- [8] FAN C X. *Lectures on communication principles* [M]. Beijing: Publishing House of Electronics Press, 2006: 258-263 (in Chinese).
- [9] HAN X Ch, HAN X Ch. Vhdl realization of encoder and decoder for convolutional code in communication system [J]. *Communication Technology*, 2009, 42(10): 72-74 (in Chinese).
- [10] ZHU X M, KAHN J M. Performance bounds for coded free-space optical communications through atmospheric turbulence channels [J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2003, 51(8): 1233-1239.
- [11] PANG Z X, PIAO D Z, ZHOU C Y. Performance comparisons for several modulation schemes used in optical wireless communications [J]. *Journal of Guilin Institute of Electronic Technology*, 2002, 22(5): 1-4 (in Chinese).

(上接第221页)

高的功率和良好的波形特性。本文中首先介绍了激光调Q技术的基本原理,并在此基础上分析了调Q开关各要素对输出脉冲功率的影响;进而在不同调Q开关函数模型下,对其输出脉冲进行了数值模拟,并将模拟结果与升余弦信号进行了比较分析。结果表明,调Q开关开启前后激光器腔内损耗的“落差”、抽运功率和开关时间对输出脉冲的峰值光子数密度和脉冲宽度均有影响;调Q激光器输出脉冲有较好的波形特性,能够有效地抑制码间串扰。

参考文献

- [1] HUANG Y B, WEI H L, MEI H P, *et al.* Effects of atmospheric channel on system performance of infrared laser communication system [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2009, 38(3): 646-651 (in Chinese).
- [2] WU F T, YAO G Q, ZHANG J R, *et al.* Theoretical and experimental study on the enhancement of Q-switched laser output [J]. *Journal of Huaqiao University (Natural Science Edition)*, 2005, 26(1): 43-46 (in Chinese).
- [3] CHEN P F, LAN X J. Technology to reduce pulse-width of Q-switched pulse [J]. *Laser & Infrared*, 1994, 21(1): 36-37 (in Chinese).
- [4] LIU W J, LI H J, QU Sh L, *et al.* Fem to second pulse compressing in external cavity [J]. *Laser Technology*, 2007, 31(6): 665-670 (in Chinese).
- [5] PANG Ch L, SU Y, ZHENG Zh R. The stability of ultra short pulse output in self mode-locked lasers [J]. *Laser Technology*, 2007, 31(3): 271-273 (in Chinese).
- [6] DA X Y, CHEN Sh X. *The course of communication principles* [M]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications Press, 2005: 117-124 (in Chinese).
- [7] CHEN J B. *Laser principle and application* [M]. Beijing: Electronics Industry Press, 2004: 49-165 (in Chinese).
- [8] LAN X J. *Laser technology* [M]. Beijing: Science Press, 2000: 68-77 (in Chinese).
- [9] LI R X, HE Zh Q. *The numerical resolution of differential equations* [M]. Shanghai: East China University of Science and Technology Press, 2005: 1-29 (in Chinese).
- [10] LIU Q, LI Y C, ZHOU X, *et al.* The relation between the output pulse energy and width characteristics experiment [J]. *Laser Journal*, 2009, 30(1): 20-21 (in Chinese).
- [11] ZHANG Y L, WANG M G, ZHANG J Y, *et al.* Experiment and analysis of 10Gbit/s optical wireless communication systems [J]. *Optical Communication Technology*, 2007, 31(3): 57-58 (in Chinese).
- [12] YANG Y J, SUN P Y. Intersymbol interference of frequency band transmission [J]. *Journal of Liaoning Technical University*, 2004, 23(1): 188-189 (in Chinese).