

角锥棱镜腔 Nd:YAG 固体激光器的电光调 Q

高伟清^{1,2}

(1. 特种显示技术教育部重点实验室 合肥工业大学光电技术研究院, 安徽 合肥 230009; 2. 中国科学技术大学物理系, 安徽 合肥 230026)

摘要:通过在腔内插入偏振分光镜,克服了角锥棱镜腔激光器不能进行电光调 Q 的弊端,实现了角锥棱镜腔 Nd:YAG 激光器的电光调 Q 脉冲输出。根据改进的速率方程对电光调 Q 特性进行分析,数值模拟表明,腔内阈值反转粒子数、脉冲峰值功率、脉宽和脉冲能量随角锥棱镜的转动呈周期性变化。实验获得电光调 Q 脉冲,最高能量高达 190mJ。转动角锥棱镜获得不同脉宽和能量的调 Q 脉冲,脉宽变化为 5.45ns,能量变化为 15mJ,与理论分析相一致。

关键词:角锥棱镜;电光调 Q;Nd:YAG;偏振态

中图分类号:TN248.1 **文献标识码:**A

Electro-optic Q-switched Nd:YAG Solid Laser with Corner Cube

GAO Wei-qing^{1,2}

(1. Key Laboratory of Special Display Technology of Ministry of Education, Academy of Opto Electronic Technology, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China; 2. Department of Physics, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China)

Abstract: Electro-optic Q-switched Nd:YAG solid laser with corner cube is realized by inserting a polarization beam splitter in cavity. By the modified rate equation, we come to a conclusion that the threshold inverted population, pulse peak power, pulse width and pulse energy change with the rotation of corner cube periodically. The Q-switched pulse is obtained experimentally, and the most pulse energy is as high as 190 mJ. By rotating corner cube, the pulses with different pulse width and pulse energy are obtained. The variation range of pulse width is 5.45 ns and that of pulse energy is 15 mJ, which is agree with the theoretical results.

Key words: corner cube; electro-optic Q-switch; Nd:YAG; polarization state

1 引言

传统的电光调 Q 固体激光器,由于腔内光场呈高斯型分布,能量集中在中心区域,容易造成光学元件特别是电光晶体及膜层的损伤^[1-3]。角锥棱镜腔电光调 Q 激光器中,由于角锥棱镜对光场的空间交换作用,使腔内能量分布均匀,避免了对电光晶体及其他光学元件的损伤;并充分利用了增益介质的模体积,有利于脉冲能量的增加。除此之外,角锥棱镜腔由于对振动、冲击和大的温度变化不敏感等特点,具有免调试功能,而且能够对腔内的折射率和增益不均匀、热畸变、热致双折射等造成的光学畸变进行补偿^[4-5]。

由于角锥棱镜的退偏效应,使得入射到角锥棱

镜的线偏振光出射时偏振态发生旋转或者变为椭圆偏振光,因此不能对角锥棱镜腔激光器直接进行电光调 Q。我们采用一种新型的角锥棱镜腔 Nd:YAG 电光调 Q 激光器结构,通过在电光晶体前插入偏振分光镜,克服了角锥棱镜腔激光器不能进行电光调 Q 的弊端,实现了电光调 Q 脉冲输出。理论分析表明,通过转动角锥棱镜改变腔内光场的偏振态,可调节腔内阈值反转粒子数,并能对输出脉冲的峰值功率、脉宽和能量进行调节。实验中转动角锥棱镜获

作者简介:高伟清(1979-),男,博士,助理研究员,主要从事激光器和光电显示方面的研究工作。E-mail:weikin@mail.ustc.edu.cn
收稿日期:2008-04-22

得了不同脉冲能量和脉宽的调 Q 脉冲,与理论分析相一致。

2 角锥棱镜转动对电光调 Q 输出特性的影响

角锥棱镜腔 Nd:YAG 电光调 Q 激光器的结构如图 1 所示。Nd:YAG 棒通过脉冲氙灯泵浦,角锥棱镜和全反射平面镜构成谐振腔,KTP 晶体作为电光调 Q 开关,在它的前面插入偏振分光镜,使振动面平行入射面的 P 偏振光透过,振动面垂直入射面的 S 偏振光反射输出。由于角锥棱镜的退偏作用,在 Nd:YAG 棒中存在着 P 分量和 S 分量的光场,当该光场到达偏振分光镜时,P 分量的光继续在腔内振荡并被放大,S 分量的光反射输出,这样通过 KTP 晶体的始终只有 P 分量的线偏振光,因此可以进行电光调 Q。

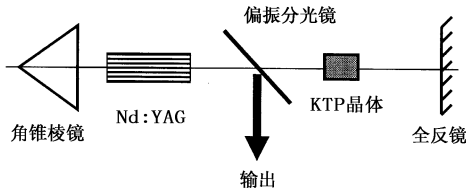


图1 角锥棱镜腔 Nd:YAG 电光调 Q 激光器结构图

为了分析角锥转动导致的偏振态变化对脉冲峰值功率、脉宽及能量的影响,将速率方程做了修改:第一,由于调 Q 脉冲的脉宽为纳秒量级,忽略泵浦项和自发辐射项;第二,对于角锥棱镜腔,光线在一个回程中四次经过工作物质和电光调 Q 晶体。因此得改进的速率方程如下^[6-7]:

$$\frac{dn}{dt} = -\gamma c \sigma \phi n \quad (1)$$

$$\frac{d\phi}{dt} = \frac{\phi}{t_r} \left\{ 4\sigma n l - 2 \ln \left[\frac{1}{r(\alpha)} \right] - 2\delta \right\} \quad (2)$$

其中,φ 为单位体积内的光子数密度;n 为反转粒子数密度;σ 为增益介质的有效发射截面;t_r = 4L/c 为激光在腔内的一个回程时间;L 为等效腔长;δ 为腔内的其他损耗总和;l 为增益介质的长度;γ 为反转粒子数的衰减因子(对于四能级系统 γ = 1,对于三能级系统 γ = 2),r(α) 为偏振分光镜与偏振有关的透过率,它随着角锥棱镜的旋转角度 α 而变化。

在稳态的时候, $\frac{d\phi}{dt} = 0$,由式(1)可解出阈值反转粒子数分布:

$$n_i(\alpha) = \frac{\ln \left[\frac{1}{r(\alpha)} \right] + \delta}{2\sigma l} \quad (3)$$

由式(1)和式(2)消去时间参数得:

$$\begin{aligned} \frac{d\phi}{dn} &= -\frac{l}{\gamma L} \left\{ 1 - \frac{\ln \left[\frac{1}{r(\alpha)} \right] + \delta}{2\sigma n l} \right\} \\ &= -\frac{l}{\gamma L} \left[1 - \frac{n_i(\alpha)}{n} \right] \end{aligned} \quad (4)$$

对式(4)两边积分,得:

$$\begin{aligned} \phi &= \phi_i + \frac{l}{\gamma L} \left[n_i - n - n_i(\alpha) \ln \frac{n_i}{n} \right] \\ &\approx \frac{l}{\gamma L} \left[n_i - n - n_i(\alpha) \ln \frac{n_i}{n} \right] \end{aligned} \quad (5)$$

并考虑 $n = n_i(\alpha)$ 时,得到腔内最大光子数密度:

$$\phi_{\max}(\alpha) = \frac{l}{\gamma L} \left[n_i - n_i(\alpha) - n_i(\alpha) \ln \frac{n_i}{n_i(\alpha)} \right] \quad (6)$$

其中,n_i 为初始反转粒子束密度。因此解得峰值功率为:

$$P(\alpha) = \frac{2h\nu A l}{\gamma t_r} \ln \left(\frac{1}{r(\alpha)} \right) \left[n_i - n_i(\alpha) - n_i(\alpha) \ln \frac{n_i}{n_i(\alpha)} \right] \quad (7)$$

当 $\phi = \frac{1}{2} \phi_{\max}(\alpha)$ 时,得到:

$$n_i + n_i(\alpha) - 2n = n_i(\alpha) \ln \frac{n_i n_i(\alpha)}{n^2} \quad (8)$$

由式(8)解出光子数下降到一半处对应的粒子反转数 n₁,n₂,则由式(1)解出脉冲宽度:

$$\tau(\alpha) = -\frac{L}{c\sigma l} \int_{n_1}^{n_2} \frac{dn}{n \left[n_i - n - n_i(\alpha) \ln \frac{n_i}{n} \right]} \quad (9)$$

输出能量为:

$$E(\alpha) = P(\alpha) \tau(\alpha) \quad (10)$$

光在角锥棱镜的三个面上反射有六种次序^[8],我们考虑其中的一种反射次序 123,根据式(3)、式(7)、式(9)和式(10),对角锥棱镜腔 Nd:YAG 激光器电光调 Q 的阈值反转粒子数、峰值功率、脉冲宽度及输出能量随 r(α) 的变化进行数值模拟。所取参数为:h = 6.63 × 10⁻³⁴,c = 3 × 10⁸ m/s,l = 8 cm,L = 38 cm,σ = 5 × 10⁻²³/m²,ν = c/(1053 × 10⁻⁹),A = 28 mm²,n_i = 8 × 10²³。模拟结果如图 2 所示,图 2

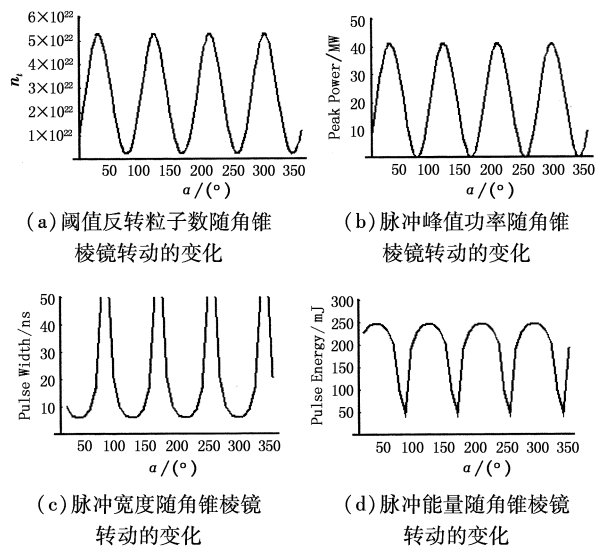


图2 角锥棱镜腔 Nd:YAG 激光器电光调 Q 的数值模拟结果

(a)为阈值反转粒子数随角锥棱镜的转角 α 的变化,图2(b)~图2(d)为脉冲峰值功率、脉宽和脉冲能量随角锥棱镜的转角 α 的变化。由图可看出,当角锥棱镜转动时,这些量都会发生周期性的改变。

3 电光调 Q 实验结果

实验装置如图1所示,工作物质为80mm长的Nd:YAG圆棒,其横截面半径约为6mm,工作物质通过脉冲式氙灯进行泵浦,其储能电容为110 μ F,角锥棱镜由武汉军械士官学校光电技术研究所提供,和全反射平面镜构成谐振腔,腔长约为380mm。实验中采用EPM1000型激光功率/能量计监测激光输出,用TEK-P6701A型光电探头和TDS3052型500MHz数字式存储示波器观察脉冲波形和测定脉宽。增加Q开关电压到3280V时开始出现调Q脉冲,实验记录的电光调Q脉冲如图3所示,图3(a)~图3(f)中的横坐标均为10ns/格,纵坐标为任意单位。转动角锥棱镜,脉冲宽度和能量发生变化。图3中从(a)~(f)的脉宽是在转动角锥棱镜到不同位置时所测得,其宽度分别为9.21ns,9.94ns,10.31ns,10.77ns,12.71ns和14.75ns,变化范围较大,为5.54ns。

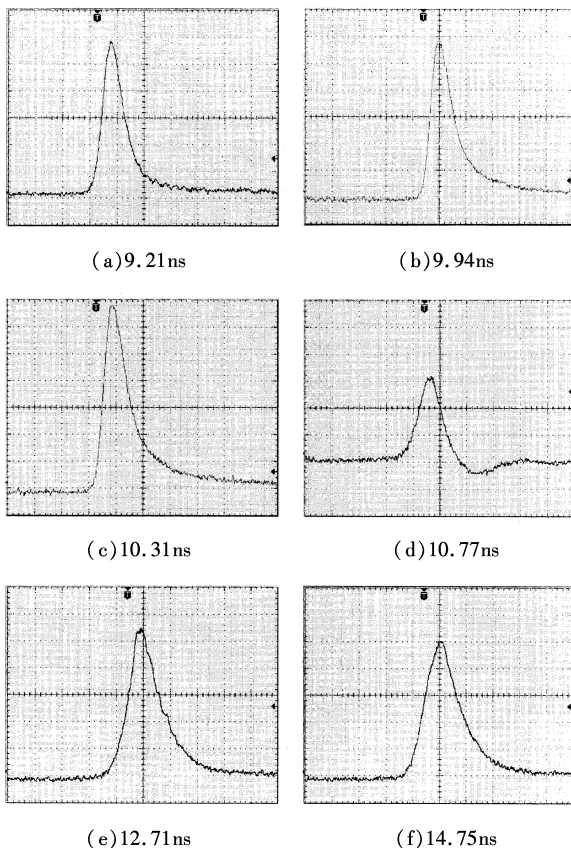


图3 角锥棱镜腔 Nd:YAG 激光器电光调 Q 脉冲图
(横坐标均为10ns/格,纵坐标为任意单位)

脉冲能量也随角锥棱镜的转动而变化,在脉冲宽度为9.21ns和10.77ns时测得的脉冲能量分别为175mJ和190mJ,变化15mJ。撤去KTP晶体,测

得静态能量为283mJ,对应脉冲宽度为9.21ns和10.77ns时的动静比分别为61.8%和67.1%。

由于角锥棱镜谐振腔对角锥棱镜的转动失调是完全不敏感的,所以角锥棱镜转动导致的脉冲能量变化是由于腔内的偏振变化引起的。图2(d)是针对光在角锥棱镜中的一种反射次序123分析的,而实际上光在角锥棱镜中存在六种不同的反射次序,这六种不同反射次序的光能量都会随角锥棱镜转动导致的偏振态变化而发生改变,实验测得的是这六种不同反射次序的光能量随角锥棱镜的转动而发生改变的,所以比理论上分析的一种反射次序的光能量变化要小。

4 结论

通过在电光调Q开关KTP晶体前加偏振分光镜,解决了由于角锥棱镜的退偏效应而不能进行电光调Q的问题。数值模拟结果表明,随着角锥棱镜的转动导致腔内偏振态的改变,腔内的阈值反转粒子数发生变化,并且调Q脉冲的峰值功率、脉宽和能量也随角锥棱镜的转动发生周期性变化。实验获得电光调Q脉冲,其最高能量为190mJ,转动角锥棱镜获得脉宽及能量不同的调Q脉冲,与理论分析相一致。

参考文献:

- [1] 宁国斌,梁柱,赵振明,等.连续Nd:YAG激光高重复率电光调Q研究[J].光学学报,2000,20(11):1481-1485.
- [2] 宁继平,张新杰,孙小卫,等.激光二极管泵浦的调Q Nd:YAG激光器的理论研究[J].量子电子学,1995,12(2):137-141.
- [3] 纪江华,漆云凤,孟俊清,等.输出5W的电光调Q Nd:YAG陶瓷激光器[J].中国激光,2006,33(2):157-160.
- [4] 张晶,卢常勇,张玺,等.LD抽运直角棱镜腔电光调Q固体激光器[J].激光与红外,2007,37(7):617-620.
- [5] 刘旭,卢常勇,王小兵,等.角锥棱镜腔Cr⁴⁺:YAG被动调Q内腔式光参量振荡器[J].中国激光,2007,34(4):485-490.
- [6] P Kundu, A D Shaligram, V N Saxen. Numerically calculated Q-switched laser output characteristics of high power diode laser-pumped Nd:YAG laser [J]. Proc of SPIE, 1997, 2989: 81-87.
- [7] R B Kay, G S Waldman. Complete solutions to the rate equations describing Q-spoiled and PTM laser operation [J]. Journal of Applied Physics, 1965, 36(4): 1319-1323.
- [8] W Q Gao, G M Yao, L X Xu, et al. Passively Q-switched Nd³⁺:YAG laser with corner cube [J]. Chinese Optics Letters, 2006, 4(6): 332-335.