

文章编号: 1003-501X(2009)08-0023-04

棱镜折射率对光学加速作用的影响分析

王希军¹, 李德胜^{1,2}, 苏少昌^{1,2}, 岱 钦³

(1. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 长春 130031;

2. 中国科学院研究生院, 北京 100039;

3. 沈阳理工大学, 沈阳 110168)

摘要: 针对所设计的棱镜 Q 开关, 首次把棱镜的折射率考虑在内, 将折射率对棱镜转镜 Q 开关光学加速作用的影响进行了详细的推导计算与分析。计算结果表明: 考虑折射率影响后, 相对于平面镜而言, 棱镜旋转速度会等效减小, 说明折射率低的棱镜比折射率高的棱镜具有更明显的光学加速作用, 即棱镜折射率对光学加速作用有一定负作用。因此, 在选择光学加速装置时, 除了要从反射损失小、易于加工等角度考虑外, 还需将棱镜折射率因素考虑在内, 以期获得最佳光学加速作用。

关键词: 棱镜; 光学加速; 折射率

中图分类号: TN248

文献标志码: A

doi: 10.3969/j.issn.1003-501X.2009.08.005

Influence of the Refractive Index of Prism on the Optical Acceleration

WANG Xi-jun¹, LI De-sheng^{1,2}, SU Shao-chang^{1,2}, DAI Qin³

(1. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130031, China;

2. Graduate School of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China;

3. Shenyang LiGong University, Shenyang 110168, China)

Abstract: Aiming at the designed spinning prism Q-switch, the refractive index of the prism was considered for the first time in the optical acceleration, and the influence of the index of the prism was calculated in detail based on the theory of fourfold optical acceleration. The calculated results show that compared with the flat mirror, the rotating speed of the prism will “diminish” when the refractive index is considered, which means that the smaller refractive index of the prism have better optical acceleration. In one word, the refractive index of the prism has negative influence on the optical acceleration. Therefore, in the design of the optical acceleration device, the refractive index of the prism should be considered carefully in order to obtain the best optical acceleration.

Key words: prism; optical acceleration; refractive index

0 引 言

转镜调 Q 具有关断能力强的特点, 同时还拥有可控性好、结构和调整简单, 成本低, 对偏振不灵敏等优点^[1-2]。转镜调 Q 的实质是利用改变反射镜的平行度来控制 Q 值的方法^[3]。理论和实验均证明, 对于一定的器件有一个最佳的腔损耗速率, 相应地存在一个最佳转镜速度。一般 YAG 转镜调 Q 激光器的最佳转速都要在几十万转/分以上, 但受稳定性的限制, 单纯靠电机的提高转速远不能满足激光器最佳转速的要求。一个有效的解决办法是借助于光学装置变相地提高电机的转速。

在设计转镜调 Q 激光器时, 需要选择最佳的光学加速装置。所谓最佳, 即是此种光学加速装置对转镜

收稿日期: 2009-01-06; 收到修改稿日期: 2009-04-01

基金项目: 应用光学国家重点实验室应用光学基金资助项目 (DA04Q05)

作者简介: 王希军(1963-), 男(汉族), 吉林长春人。研究员, 博士后, 主要从事大功率固体激光器技术的研究。E-mail: xijwang@sklao.ac.cn。

转轴的抖动不敏感,对加工技术要求低、光学损失小、尺寸小重量轻、容易装配调制等。实现光学加速,原理上可以使用平面镜反射系统,但实际上平面镜系统无法克服电机转轴的抖动对激光性能的影响等缺点,而应该使用适当的棱镜代替。

现在已经发展了多种成熟的光学加速装置^[4-7],但据我们所知,所有的棱镜加速装置中,都没有考虑棱镜折射率对光学加速的影响。我们针对自己设计的棱镜 90°全反射技术方案,对转镜 Q 开关光学加速作用的影响因素进行了计算分析,发现折射率对光学加速有一定负作用。

1 折射率对光学加速作用的推导

下面以我们设计的谐振腔为例讨论棱镜折射率对光学加速作用的影响。所设计的谐振腔为折叠腔型,结构如图 1 所示。其中 M_1 为输出耦合镜, AB 为棱镜转镜 M_2 的反射面, M_3 为固定全反射镜。

当旋转棱镜转过 θ 角时,入射光线 1 被转镜 M_2 反射后,光线 2 以 2θ 角投射到反射镜 M_3 上,被反射后的光线 3 再经过 M_2 反射后变成光线 4。从图 1 中光线的几何关系可以计算出光线 1 和光线 4 的夹角为 4θ 。当转镜转过 θ 角,光线在谐振腔内往返一次时,反射回来的光线与入射光线偏离 4θ 角度。即所设计的谐振腔为 4 倍光学加速装置,激光在谐振腔中完成一次振荡,得到的有效光学转速为 4 倍的电机转速。但上面的分析并没有考虑棱镜折射率对入射光线和反射光线的影响,下面将详细推导分析。

当棱镜 BC 面相对于固定全反镜 M 平行时(即棱镜未旋转时),出射光线将按入射光线入射方向原路返回。当入射光线以一定角度(对应于棱镜旋转)入射时,出射光线除了相对入射光线有 4 倍的角度旋转外,其出射点相对入射点还将偏离一定的距离 d ,如图 2 所示。

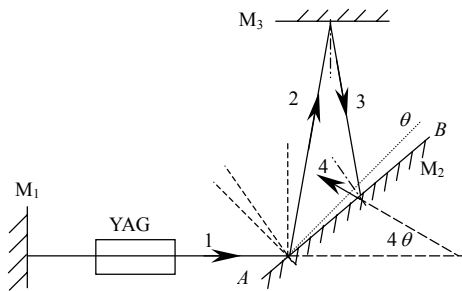


图 1 谐振腔内光路示意图
Fig.1 Optical path in the resonant cavity

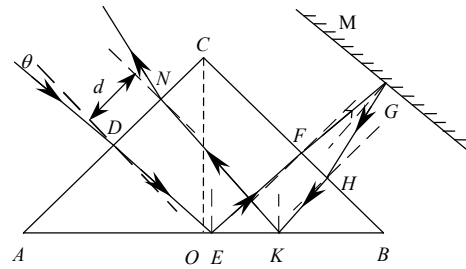


图 2 折射率对光学加速的影响示意图
Fig.2 Schematic diagram of the influence of refractive

下面推导偏转距离 d 与折射率 n 间的关系。推导中,由于谐振腔的失谐临界角很小,忽略反射棱镜的离轴旋转,认为棱镜以 O 点为轴心旋转。为简单起见,假定棱镜未旋转前光线入射点为 AC 的中心,则当棱镜转过 θ 角时(θ 很小,且此处推导是假定棱镜按顺时针方向旋转),光学入射点变为 D 点。由图 2 可得:

$$AD = \frac{AC}{2}(1 - \tan \theta) \quad (1)$$

采用光线追迹法求光线出射点相对入射点的偏移距离 DN ,需依次推导的量有 BF 、 FH 、 BH 、 AN 。

先推导 BF 。在 $\triangle ADE$ 和 $\triangle BEF$ 中,由正弦定理可分别求得:

$$AE = \frac{\sqrt{2}}{1 - \tan \theta_1} AD = \frac{1}{2} \cdot \frac{1 - \tan \theta}{1 - \tan \theta_1} AB \quad (2)$$

$$BF = \frac{\sqrt{2}}{2}(1 - \tan \theta_1)BE = \frac{\sqrt{2}}{2}(1 - \tan \theta_1)(AB - AE) = \sqrt{2}AC \frac{\sin(\pi/4 - \theta_1)}{\cos \theta_1} - \frac{AC}{2}(1 - \tan \theta) \quad (3)$$

其中 θ_1 为光线从 AC 面入射到棱镜后的折射角。由于忽略反射棱镜的离轴旋转,认为棱镜以 AB 中点 O 点为轴心旋转,设 O 点到固定全反镜的距离为 l_0 。又由于失谐临界角很小, FH 可近似表示为(最后结果可看出,其实 FH 大小并不左右我们要讨论的折射率对光学加速作用的影响趋势,只是对偏转距离大小有影响,因为 FH 与折射率 n 无关):

$$FH = 2(l_0 - \frac{AC}{2}) \tan(2\theta) \quad (4)$$

$$BH = BF - FH = AC \frac{\sin(\pi/4 - \theta_1)}{\cos \theta_1} - \frac{AC}{2} (1 - \tan \theta) - 2(l_0 - \frac{AC}{2}) \tan(2\theta) \quad (5)$$

由 $\triangle BKH$ 和 $\triangle AKN$ 近似最终可求得:

$$AN = \sqrt{2} AC \frac{\sin[\frac{\pi}{4} + \arcsin(\frac{n_0}{n} \sin 3\theta)]}{\cos[\arcsin(\frac{n_0}{n} \sin 3\theta)]} - BH \quad (6)$$

由于激光腔失谐角很小, 采用小角度近似进行简化最终得到:

$$DN = AN - AD = \sqrt{2} AC [\frac{\sin(\frac{\pi}{4} - \frac{3n_0}{n}\theta)}{\cos(\frac{3n_0}{n}\theta)} - \frac{\sin(\frac{\pi}{4} - \frac{n_0}{n}\theta)}{\cos(\frac{n_0}{n}\theta)}] + 2(l_0 - \frac{AC}{2}) \tan(2\theta) \quad (7)$$

进一步采用 $\sin \theta = 0$, $\cos \theta = 1$, 可得到棱镜折射率导致的偏转距离为

$$DN = 4\theta \cdot l_0 + 2AC(\frac{2n_0}{n} - 1)\theta \quad (8)$$

从式(8)中可以看出, 对应不同的棱镜折射率, 反射光束的谐振腔光轴偏离程度不同。棱镜折射率越小, 出射光线偏离入射光线越大。

2 折射率对光学加速的影响分析

为具体说明不同折射率对光线偏转距离的影响, 以我们所设计的棱镜光学加速装置($l_0=150$ mm, $AC=10$ mm)为例进行了数值模拟分析。考虑到激光谐振腔失谐角通常为 $10''\sim 40''$, 这里取 $\theta=20''=9.696\times 10^{-5}$ rad。图 3 为用 Matlab 模拟的棱镜出射光线与入射光线偏离的距离 d 随棱镜折射率的变化情况。

从图 3 中可以看出, 光线偏转距离随着折射率的增大而减小。由于棱镜是顺时针旋转(见图 2), 出射光线与入射光线偏离的距离越小, 则对光学加速越不利。即折射率低的棱镜相对折射率高的棱镜将具有更明显的光学加速作用。实验采用的棱镜光学加速装置, 其折射率为 1.5, 与平面镜(可等效折射率为 1)光学加速装置相比, 出射光线偏移量减小了 0.001 3 mm。

图 4 为入射角改变量(对应于棱镜旋转角度)不同时, 棱镜出射光线与入射光线的偏离程度的变化情况(取 n 为 1.5)。从图中可以看出当出射光线偏移 0.001 mm, 对应的入射角度的变化量为 $0.34''$, 因此 0.001 3 mm 相当于转镜反射面旋转了 $0.442''$, 这将对棱镜加速作用产生一定的负作用。以我们设计的棱镜转镜为例, 在转速为 43 000 转/分时, 获得了脉宽 89 ns, 重复频率 14.3 kHz 的 1064 nm 高重复频率脉冲输出^[8]。计算可知, 43 000 转/分相当于 $0.9288''/\text{ns}$, 考虑折射率影响后, 其旋转速度相对于平面镜而言等效减小了 20463 转/分, 其实际转速相当于 $0.4868''/\text{ns}$ 。考虑到失谐角是 $20''$, 理论计算得到脉宽应该为 82 ns, 与实际实验结果相符合。可见棱镜折射率对光学加速的影响非常大。

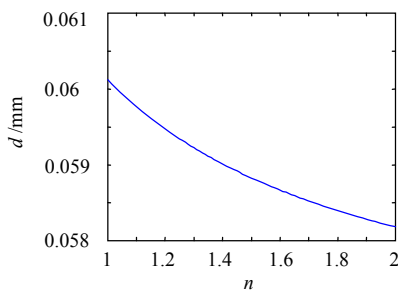


图 3 不同棱镜折射率对应的光线偏转距离

Fig.3 Ray-deviant relative different refractive index

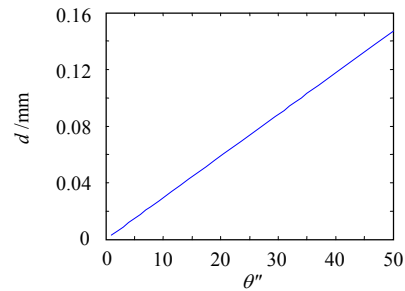


图 4 偏移距离随棱镜入射角变化量间的关系

Fig.4 Relationship between the incident angle and the deflexion distance

结束语

在设计转镜调 Q 激光器时,总是希望选择最佳的光学加速装置,现在已经发展了多种成熟的光学加速装置。从基于棱镜反射损失小及易于加工等角度出发,大都选择用棱镜代替平面镜,但所有的棱镜加速装置中,都没有考虑棱镜折射率对光学加速的影响。针对所设计的棱镜 90°全反射光学加速装置,将棱镜折射率考虑在内,对转镜 Q 开关光学加速作用的影响因素进行了详细地推导计算,发现折射率低的棱镜比折射率高的棱镜具有更明显的光学加速作用,即棱镜折射率对光学加速作用有一定负作用。因此,在选择光学加速装置时,需综合考虑各种因素,选择最合适的光学加速装置以获得最佳光学加速作用。

参考文献:

- [1] Lukac M. Output energy characteristics of optimally pumped rotating mirror Q-switch lasers [J]. **IEEE Journal of Quantum Electronics**(S0018-9197), 1991, **27**(9): 2094-2097.
- [2] Marincek M, Lukac M. Development of EM field in lasers with rotating mirror Q-switch [J]. **IEEE Journal of Quantum Electronics**(S0018-9197), 1993, **29**(8): 2405-2412.
- [3] 蓝信钜. 激光技术[M]. 北京: 科学出版社, 2005.
- [4] 高佩娟. 转镜调 Q 的有效加速[J]. 激光技术, 1981(3): 7-10.
GAO Pei-juan. Effective acceleration of tilting mirror Q-switch [J]. **Laser Technology**, 1981(3): 7-10.
- [5] Helena Jelinkov, Michal Nemec, Jan Sulc, *et al.* Er: YAG laser giant pulse generation [J]. **Proceedings of SPIE**(S0277-786X), 2002, **4**(3): 227-232.
- [6] 柳祝平, 唐景平, 胡丽丽, 等. Cr^{3+} , Yb^{3+} , Er^{3+} 共掺磷酸盐钕玻璃转镜调 Q 激光性质研究[J]. 物理学报, 2005, **54**(9): 4422-4426.
LIU Zhu-ping, TANG Jing-ping, HU Li-li, *et al.* Laser properties of rotating prism Q-switched Cr^{3+} , Yb^{3+} , Er^{3+} : phosphate glasses [J]. **Acta Physica Sinica**, 2005, **54**(9): 4422-4426.
- [7] 宋晏荣, 刘媛媛, 李瑞宁, 等. 同步双转镜调 Q 激光器[J]. 量子光子学报, 2000, **6**(3): 110-112.
SONG Yan-rong, LIU Yuan-yuan, LI Rui-ning, *et al.* Q-switch laser using two synchronizing turned mirrors [J]. **Acta Sinica Quantum Optica**, 2000, **6**(3): 110-112.
- [8] 王希军, 岱钦, 耿小涛, 等. 全固态激光器 14 kHz Q 脉冲实验研究[J]. 中国激光, 2008, **35**(7): 972-975.
WANG Xi-jun, DAI Qin, GENG Xiao-tao, *et al.* Laser Diode Pumped Solid State Laser with 14 kHz Q Pulse Output [J]. **Chinese Journal of Lasers**, 2008, **35**(7): 972-975.