

双楔镜腔长微调节结构研究

张振国^{1,2,3}, 李英一³, 鞠有伦⁴, 吕志伟^{1,2}

1. 河北工业大学 先进激光技术研究中心, 天津 300401;
2. 河北省先进激光技术与装备重点实验室, 天津 300401;
3. 电磁空间安全全国重点实验室, 天津 300308;
4. 哈尔滨工业大学 可调谐激光技术国家重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150001)

摘要: 腔长微调节结构在光学谐振器里有重要应用。一种由双楔镜组成的腔长微调节结构被提出, 该结构可实现不依赖于腔镜的腔长调节。双楔镜结构由斜面平行对立放置的两个直角楔镜构成, 通过在垂直方向上驱动楔镜移动实现双楔镜内部光程改变, 进而改变所处谐振腔内光路的光程。双楔镜结构对光程改变量的理论计算公式被建立, 根据公式, 光程改变量与楔镜楔角大小成正相关关系, 与楔镜折射率成正相关关系, 与楔镜振幅成线性关系。楔镜的楔角和折射率共同决定双楔镜结构的光程调节效率。经理论设计, 楔角 29° 、折射率 1.81 的 YAG 双楔镜结构具有较高的调节效率和较小的光损耗, 调节系数为 0.53。实验上, 以双角锥环形腔为基础, 实现了双楔镜结构对腔长的调节, 验证确定了双楔镜结构对腔长调节的可行性和有效性。讨论分析了双楔镜结构的变形结构: 直角面对立双楔镜结构、基于正楔镜的双楔镜结构、多级双楔镜结构的光程调节性能。对比了双楔镜结构及其变形结构在光程调节效率、光损耗、光路调节难易程度的性能, 确定了各种双楔镜结构在实际应用中的优缺点, 为双楔镜结构的设计和选择提供了参考依据。

关键词: 双楔镜; 腔长调节; 楔角; PZT

中图分类号: TH112.7 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA20230422

0 引言

腔长微调节结构在光学谐振腔里有重要应用。在 Pound-Drever-Hall 稳频激光器里, 需要通过调节激光器腔长来锁定激光纵频率^[1-2]。在注入锁定激光里, 需要调节从激光器的腔长来匹配种子激光的纵模频率, 从而实现频率锁定^[3-4]。在 F-P 干涉仪里, 需要通过微调节干涉仪的腔长以实现频率扫描^[5-7]。在其他要求频率调谐的谐振腔内, 也需要进行腔长微调节。

该类腔长调节的调节量在微米量级, 调节频率在千赫兹以内。目前最主要的调节方法是在腔镜上装载压电陶瓷 (PZT), 利用 PZT 驱动腔镜运动, 实现特定频率和位移量的腔长调节^[8]。这种方法简单、高效、可靠性高, 不增加腔内损耗, 是腔长调节的优选方法。

然而, 在一些特殊结构的激光谐振腔或者光学腔

里, 这种方法并不适用。2018 年, 鞠有伦课题组报道了一种双角锥环形腔, 这种谐振腔不同于传统平面反射镜^[9], 其反射腔镜为角锥。相比于传统反射腔镜, 角锥质量大 (直径 40 mm、高 35 mm 的实心熔融石英角锥, 质量约 57 g, 而直径 20 mm、厚度 2 mm 的反射镜片质量约 1 g), 惯性大, 很难通过 PZT 直接驱动的方式进行百赫兹以上频率的调节, 且角锥结构后端形状为锥形, 非平面, 形状特殊, 无法直接与 PZT 安装粘贴。基于此, 文中提出了一种插入式的双楔镜腔长微调节结构, 以实现诸如双角锥环形腔之类的特殊光学腔的腔长微调节。

双楔镜腔长微调节法是将双楔镜结构插入腔内, 通过在光路传播的垂直方向上驱动楔镜改变穿过双楔镜结构的光程来实现光学腔内振荡光光程改变。该方法解决了无法使用 PZT 直接驱动角锥调节腔长

收稿日期: 2023-07-10; 修订日期: 2023-07-17

作者简介: 张振国, 男, 博士, 主要从事单脉冲固体激光方面的研究。

的问题。楔镜质量小,可以实现微振幅、高频率的腔长调节。此外,对于谐振腔或光学腔,双楔镜是独立的插入元件,插入位置灵活,不影响谐振腔原本设计。

1 双楔镜结构与工作原理

1.1 双楔镜腔长调节原理

双楔镜 (Double Optical Wedge, DOW) 腔长调节结构由两个楔角相同的楔镜组成,两楔镜以斜面平行对立的方式放置,如图 1 所示。双楔镜结构被放置于谐振腔光路中,光线以垂直楔镜直角面的方向穿过双楔镜。工作时,双楔镜结构通过楔镜在垂直方向的振动实现其内部光程的调节,即腔长(腔内光程)调节。

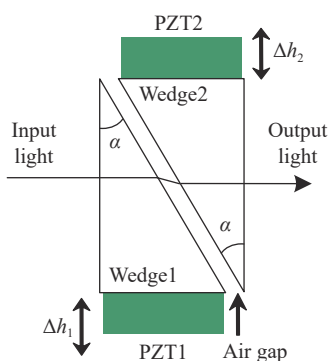


图 1 双楔镜结构示意图

Fig.1 Schematic of DOW

图 1 为双楔镜结构示意图,楔镜 1 和楔镜 2 的楔角相同,均为 α ,以斜面对立平行的方式放置,楔镜中间为空气隙,楔镜顶端绿色结构分别表示 PZT1 和 PZT2,用以驱动楔镜 1 和楔镜 2 产生垂直位移。在驱动楔镜的过程中,光路在双楔镜结构内部的光程发生变化。将双楔镜结构放置在光学腔中,可实现腔长的微调节。由于楔镜质量一般在 1 g 以内(底面 4 mm×4 mm、高 4 mm 的熔融石英楔镜,质量约为 0.06 g),可以实现数百赫兹甚至数千赫兹的高频率振动。

设楔镜振动使双楔镜内部产生的光程变化量为 ΔL 。理论上, ΔL 的大小与楔镜楔角角度 α 、楔镜折射率 n 、楔镜振动幅度 Δh 有关。假设双楔镜结构中楔镜 1 不动,楔镜 2 在 PZT2 的驱动下垂直振动,振幅为 Δh ,则楔镜 2 振动前后通过双楔镜内部的光路变化如图 2 所示。

图 2 中,左图实线表示静止时的楔镜对位置,虚

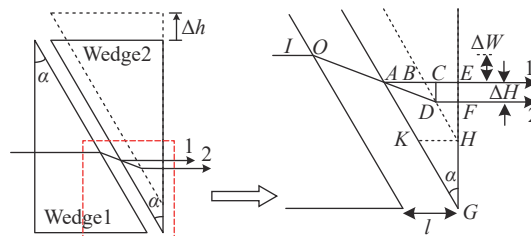


图 2 双楔镜内部光路图

Fig.2 Internal light path of DOW

线表示楔镜 2 垂直向上移动 Δh 后的位置,光线 1 和光线 2 分别表示楔镜 2 移动前和移动后通过楔镜内部的光线;右图为虚线框内光路详图。楔镜顶角为 $\angle HGK = \alpha$,移动后楔镜 2 的顶点 H 与移动前楔镜 2 的顶点 G 的距离为 $HG = \Delta h$,过 H 点做 $KH \perp HG$,垂线交移动前楔镜 2 斜边于点 K , $KH = HG \cdot \tan \alpha = \Delta h \tan \alpha$,是楔镜 2 水平直角边的移动距离。

光从楔镜 2 入射,楔镜 2 出射。楔镜对静止时光线经过路径为 $IOABE$,其中点 I 、 O 、 A 、 B 、 E 分别为入光线与楔镜 1 垂直面交点、斜面交点、楔镜 2 移动前斜面交点、楔镜 2 移动后的斜面交点、楔镜 2 垂直面交点;楔镜 2 向上移动后光线经过两个楔镜的路径为 $IOADF$,其中点 D 、 F 分别为光线与移动后楔镜 2 的斜面交点、垂直面交点。做 $DC \perp BE$,垂足为 C ,那么楔镜 2 移动前后,通过两楔镜的光程差为:

$$\Delta L = (IO \cdot n + OA + AB \cdot n + BC \cdot n + CE \cdot n) - (IO \cdot n + OA + AD + DF \cdot n)$$

$CDEF$ 为矩形,对边 $CE = DF$,据此化简上式得:

$$\Delta L = (AB + BC)n - AD = AC \cdot n - AD$$

在直角 $\triangle BCD$ 中, $\angle BDC$ 与楔镜顶角相等, $\angle BDC = \alpha$,那么直角 BC 边延长线与斜边 BD 组成的外角 $\angle ABD = \pi/2 + \alpha$ 。在 $\triangle ABD$ 中,令 $\angle BAD = \theta$, $\theta = \theta' - \alpha$,其中 θ' 为光线从空气中进入楔镜斜面发射折射的入射角, α 为折射角(α 也是楔镜的顶角)。三角形内角和为 π , $\angle ADB = \pi - (\angle BAD + \angle ABD) = \pi/2 - \theta'$ 。四边形 $ABHK$ 为平行四边形,所以 $AB = KH = \Delta h \cdot \tan \alpha$ 。综上,在 $\triangle ABD$ 中, $\angle ADB = \pi/2 - \theta'$, $\angle ABD = \pi/2 + \alpha$, $AB = \Delta h \cdot \tan \alpha$,根据余弦定理可知:

$$\frac{AD}{\sin \angle ABD} = \frac{AB}{\sin \angle ADB}$$

综合以上已知量可得:

$$AD = \frac{\sin \alpha}{\cos \theta'} \Delta h$$

在直角 $\triangle ACD$ 中:

$$AC = AD \cdot \cos \theta = \frac{\sin \alpha \cos \theta}{\cos \theta'} \Delta h$$

将 AC 、 AD 代入光程差 ΔL 得:

$$\Delta L = \Delta h \frac{\sin \alpha}{\cos \theta'} [n \cdot \cos(\theta' - \alpha) - 1] \quad (1)$$

式中: θ' 为空气中的折射角, 根据斯涅耳定律 (Snell's Law) 可知:

$$\theta' = \arcsin(n \sin \alpha) \quad (2)$$

式中: n 为楔镜材料折射率。结合公式 (1) 和 (2) 可求得楔镜 2 在垂直方向上的位移对楔镜对内部光程的改变量。

然而, 在实际使用过程中为了增加光程改变量 ΔL , 要求楔镜 1 和楔镜 2 均有位移量。经严格的数学推导, 楔镜 1 和楔镜 2 同时存在位移的情况下, 双楔镜内部光程改变量为:

$$\begin{cases} \Delta L = (\Delta h_1 + \Delta h_2) \frac{\sin \alpha}{\cos \theta'} [n \cos(\theta' - \alpha) - 1] \\ \theta' = \arcsin(n \sin \alpha) \end{cases} \quad (3)$$

式中: Δh_1 和 Δh_2 分别为楔镜 1 和楔镜 2 的振动幅度。公式 (3) 即为双楔镜腔长调节结构对腔长调节量的计算公式。

楔镜沿垂直方向振动实现内部光程调节的同时, 也会在垂直方向上对出射光产生位移 ΔH , 即图 2 中光线 2 相对于光线 1 的垂直位移。经推导计算, 垂直方向上的位移量为:

$$\begin{cases} \Delta H = (\Delta h_1 + \Delta h_2) \frac{\sin \alpha \sin(\theta' - \alpha)}{\cos \theta'} \\ \theta' = \arcsin(n \sin \alpha) \end{cases} \quad (4)$$

线性谐振腔内, 一般情况下, 垂直方向上的光路位移不改变腔内振荡光路, 不会造成谐振腔失调。环形谐振腔内, 垂直方向上的光路位移会造成振荡光路产生失调角, 但角度值极小, 不影响谐振腔出光效率与光束指向性。以插入双角锥环形腔内双楔镜腔长调节结果为例, 腔长 840 mm, 双楔镜参数 $\Delta h_1 + \Delta h_2 = 9 \mu\text{m}$, $n = 1.44$, $\alpha = 30^\circ$, 该情况下产生的振荡光失调角大小为 0.000415° ^[10], 角度极小, 不影响谐振腔运行效率。因此, 双楔镜腔长调节结构可以有效调节谐振腔内部光程, 且不对腔的稳定性和出光指向性造成影响。

此外, 需要注意的是, 双楔镜腔长调节结构要求楔镜 1 和楔镜 2 具有相同的折射率和楔角, 且斜面平行放置, 否则将导致出射光和入射光不平行, 使光路调节失去基准, 增加光路调节难度。楔角不同时, 相对于楔角较大楔镜一侧的光路, 楔角较小楔镜一侧的光路向下偏转, 如图 3(a) 所示, $\alpha_1 > \alpha_2$, 出射光相对于入射光向下偏转。折射率不同时, 相对于折射率较大楔镜一侧的光路, 折射率较小楔镜一侧的光路向下偏转, 如图 3(b) 所示, $n_1 > n_2$, 出射光相对于入射光向下偏转, $n_1 < n_2$, 出射光相对于入射光向上偏转。楔镜对斜面非平行放置情况如图 3(c) 所示, 楔镜 2 沿楔镜顶点顺时针旋转, 出射光相对于入射光向下偏转。

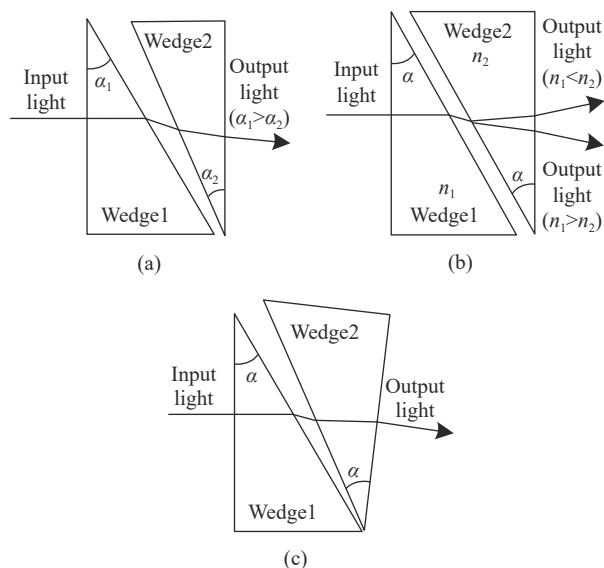


图 3 双楔镜楔角不同 (a)、折射率不同 (b)、斜面非平行放置 (c) 时出射光相对于入射光的偏转

Fig.3 Angles between the output light and the input light under DOW with different α (a), different n (b) and unparallel planes (c)

另外, 静止状态下双楔镜斜面之间的空气隙 (见图 1) 会在垂直方向上造成出射光相对于入射光的位移。根据计算, 位移量大小 ΔW (见图 2) 为:

$$\begin{cases} \Delta W = \frac{\cos \theta'}{\cos \alpha} \sin(\theta' - \alpha) l \\ \theta' = \arcsin(n \sin \alpha) \end{cases} \quad (5)$$

式中: l 为空气隙的宽度。根据公式 (5), ΔW 与 l 成线性关系。该位移量通常较小, 不超过 0.5 mm, 不会对光路调节造成影响。以楔角 $\alpha = 30^\circ$ 、折射率 $n = 1.5$ 的楔镜对为例, 空气隙 $l = 1 \text{ mm}$ 时, 出射光相对于

入射光的垂直位移量仅为 $\Delta W=0.0832\text{ mm}$ 。此外,公式 (5) 中不含 Δh , 与楔镜振动幅度无关, 不影响双楔镜结构对光程的调节。

1.2 双楔镜腔长调节量的影响因素分析

公式 (3) 给出了双楔镜结构对光程调节量 ΔL 的计算方法, 据此可知影响调节量 ΔL 的因素有三个: 楔镜楔角 α 、楔镜折射率 n 和楔镜振幅 $\Delta h_1+\Delta h_2$ 。下面针对这三个变量对光程调节量 ΔL 的影响做讨论分析。

1) 楔角 α 的大小对腔长调节量 ΔL 的影响。设楔镜基质材料为熔融石英, 折射率 $n=1.44$, 楔镜振幅 $\Delta h_1+\Delta h_2=1\text{ }\mu\text{m}$, 根据公式 (3) 可求得光程调节量 ΔL 与楔角 α 的关系, 结果如图 4 所示。图 4 中, α 从 0° 增加到 42° , 光程改变量从 $0\text{ }\mu\text{m}$ 增加到 $0.54\text{ }\mu\text{m}$ 。光程改变量 ΔL 与楔角 α 成正相关关系, 且 ΔL 相对于 α 的斜率随 α 增大而增大。

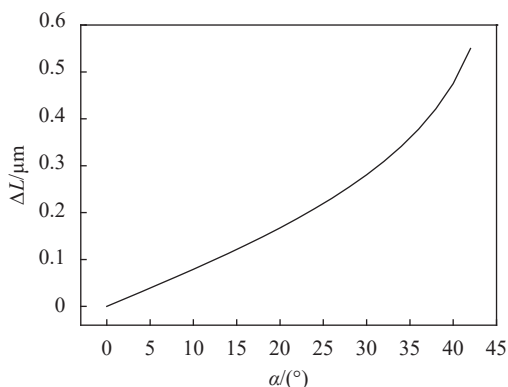


图 4 光程调节量 ΔL 与楔角 α 的关系

Fig.4 Values of ΔL in different α

2) 楔镜折射率 n 对腔长调节量 ΔL 的影响。设楔镜楔角 $\alpha=30^\circ$, 楔镜振幅 $\Delta h_1+\Delta h_2=1\text{ }\mu\text{m}$, 根据公式 (3) 可求得光程调节量 ΔL 与楔镜折射率 n 的关系, 结果如图 5 所示。根据图 5 所示结果, n 从 1.2 增加到 2.0, ΔL 从 0.12 增加到 0.86, 光程改变量 ΔL 与楔镜折射率 n 成正相关关系, 且 ΔL 相对于 n 的斜率随 n 增大而增大。

3) 楔镜振幅 $\Delta h_1+\Delta h_2$ 对腔长调节量 ΔL 的影响。根据公式 (3), ΔL 与 $\Delta h_1+\Delta h_2$ 成线性关系, $\Delta h_1+\Delta h_2$ 越大, ΔL 越大, 斜率大小由楔角 α 和折射率 n 决定。定义 ΔL 相对于 $\Delta h_1+\Delta h_2$ 的斜率为双楔镜结构的调节系数, 调节系数的大小表征了双楔镜结构光程调节量的高低。

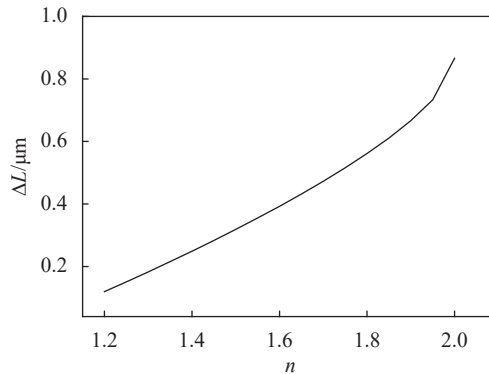


图 5 光程调节量 ΔL 与楔镜折射率 n 的关系

Fig.5 Values of ΔL in different n

设 $\alpha=30^\circ$, $n=1.44$, 根据公式 (3), ΔL 与 $\Delta h_1+\Delta h_2$ 的关系如图 6 所示, ΔL 相对于 $\Delta h_1+\Delta h_2$ 的斜率大小为 0.28。

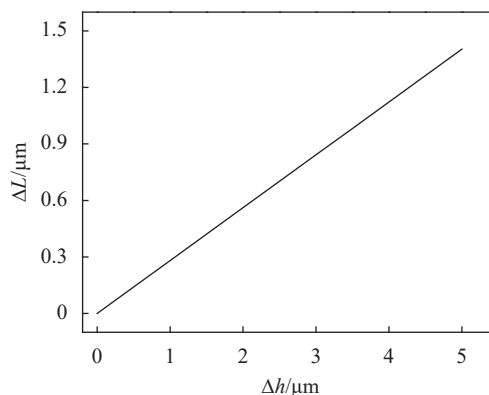


图 6 光程调节量 ΔL 与楔镜振幅 $\Delta h_1+\Delta h_2$ 的关系

Fig.6 Values of ΔL in different $\Delta h_1+\Delta h_2$

综上, 光程调节量 ΔL 与楔镜楔角 α 、楔镜折射率 n 、楔镜振幅 $\Delta h_1+\Delta h_2$ 均成正相关关系, 即 α 、 n 、 $\Delta h_1+\Delta h_2$ 越大, ΔL 越大。为了获得更高的光程调节效率 (即调节系数), 需选用楔角大、折射率大的楔镜。

1.3 楔镜参数的设计

在实际应用中, 驱动双楔镜振动的器件通常为压电陶瓷 (PZT), 即图 1 所示绿色结构。压电陶瓷是一个电容器件, 在电容量确定的情况下, 加载其上的驱动电压和驱动频率成负相关关系。驱动电压决定了双楔镜的振动幅度, 即 $\Delta h_1+\Delta h_2$, 驱动频率决定了双楔镜的调节频率。在高调节频率应用领域, 如高重频单频脉冲注入锁定激光器, 提高 PZT 调节频率且保持光程调节量 ΔL 不变, 需要提高腔长调节系数, 即 ΔL 相对于 $\Delta h_1+\Delta h_2$ 的斜率。

1) 折射率的设计。根据 1.2 节的结论, ΔL 相对于 $\Delta h_1 + \Delta h_2$ 的斜率大小由楔角 α 和折射率 n 决定, 选用折射率高的楔镜可获得更高的效率。表 1 给出了熔融石英 (JGS1)、N-BK7/K9、钇铝石榴石 (YAG)、金刚石 (Diamond) 四种常见光学材料的折射率^[11]。设 $\Delta h_1 + \Delta h_2 = 1 \mu\text{m}$, 根据公式 (3), 四种光学基质材料的双楔镜结构的光程调节效果如图 7 所示。

表 1 不同折射率光学材料楔镜对应的光学参数

Tab.1 Parameters of wedges with different refractive indices

Optical material	JGS1	N-BK7/K9	YAG	Diamond
Refractive index @1.6 μm	1.44	1.50	1.81	2.38
Total reflection critical angle	43.9°	41.8°	33.6°	24.7°
Maximum adjustment coefficient	0.59	0.63	0.73	0.78
Brewster angle (dense medium \rightarrow rarer medium)	34.7°	33.7°	29.0°	22.7°
Adjustment coefficient based on Brewster angle	0.33	0.37	0.53	0.65

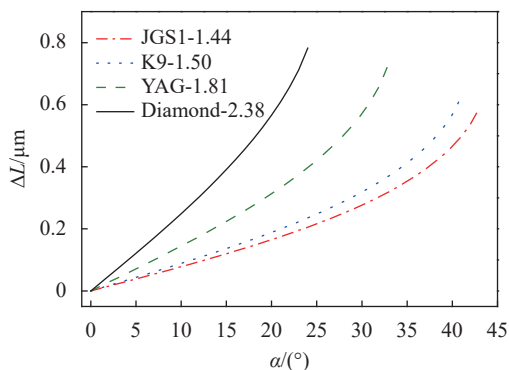


图 7 不同基质楔镜对应的光程量调节效果

Fig.7 ΔL produced by DOW with different optical material

从图 7 中可以明显看出, 基质材料折射率越大, 相同楔角情况下双楔镜结构获得的调节量越大。图中, JGS1 折射率 $n = 1.44$ 、楔角 $\alpha = 24^\circ$ 时的双楔镜光程调节量 $\Delta L = 0.205 \mu\text{m}$, 对应调节系数为 0.205, 即楔镜在垂直方向上移动 $\Delta h_1 + \Delta h_2 = 1 \mu\text{m}$ 可实现双楔镜内部光程的增加/减少量 $\Delta L = 0.205 \mu\text{m}$ 。同样楔角值情况下, 基质为金刚石 ($n = 2.38$) 的双楔镜结构可实现的调节量为 $0.782 \mu\text{m}$, 调节系数为 0.782。因此, 使用折射率大的楔镜可极大提高双楔镜的调节系数。

从折射率角度考虑, 金刚石基质的双楔镜结构可

以获得较高的调节系数。但在实际应用中, 金刚石加工困难, 价格高昂, 作为楔镜基质并不适合。YAG 折射率较大 (相比于 K9 和 JGS1), 价格适中, 加工难度低于金刚石, 最高调节系数可达 $0.735 (\alpha = 33^\circ)$ 时, 是优异的楔镜基质材料。

2) 楔角大小设计。根据 1.2 节的结论, 楔角 α 越大, 光程调节系数越大, 双楔镜结构可获得更高的调节系数。入射光在楔镜斜面上的入射角大小等于楔镜的楔角 α , 如图 8 所示。由于入射角不能超过全反射角, 楔角 α 不能大于楔镜的全反射角, 即楔角 α 的最大值为楔镜侧面上的全反射角值, 不同材料折射率见表 1。

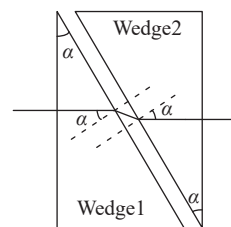


图 8 光线在楔镜斜面上的入射角度

Fig.8 Angle of incidence on inclined plane of wedge

此外, 楔角大小的设计还需考虑到双楔镜结构的光损耗率。为了减小光路的插入损耗, 要求在楔镜直角面上镀 0° 增透膜, 在斜面上镀光线入射方向为 α 的增透膜。对于一般光学材料, 布儒斯特角大小与全反射角接近 (见表 1), 因此可以将楔镜楔角 α 设计为布儒斯特角, 从而在斜面不镀膜的情况下实现水平偏振光 (p 光) 高透效果。在楔角为布儒斯特角的双楔镜结构中, 光路调节系数接近于最大光路调节系数, 尤其在折射率较大的情况下。另外, 表 1 中, 最大调节系数对应的楔镜楔角大小为全反射角, 在实验中无法精确达到, 所以将楔角设置为布儒斯特角, 从实际光路调试、调节系数两方面考虑都是合适的。对于激光谐振腔之类的应用场景, 这样的楔角设计可以帮助谐振腔实现水平偏振激光 (p 偏振) 的输出。对于非谐振腔且光路非水平偏振光的应用场景, 需要通过在楔镜斜面镀对应角度增透膜的方法来降低光损耗率。

上文确定了 YAG 为优异的楔镜基质材料, 折射率 $1.81 @ 1.6 \mu\text{m}$ 。根据楔角大小设计原则, 其楔角应为布儒斯特角 29.0° (见表 1)。因此, $\alpha = 29.0^\circ$ 、基质材料为 YAG 的双楔镜结构具有高调节效率和低光损耗

率,调节系数为 0.53。

综上,楔镜的折射率设计原则为:在不考虑加工难度和成本情况下, n 越大,双楔镜结构的调节系数越高;楔镜楔角设计原则为:楔角 α 越大,调节系数越高, α 最大值不超过楔镜全反射角, α 值以布儒斯特角大小为宜。

2 双楔镜腔长调节实验

此节将利用双楔镜腔长调节结构实现双角锥环形腔的腔长调节,以验证双楔镜腔长调节结构的效果。

根据上文的推导结果,楔角 $\alpha = 29.0^\circ$ 的 YAG 双楔镜腔长调节结构是较为合适的设计,具有较大的调节系数。但其所用楔镜需定制加工,成本依然不菲,因此实验采用了非定制的熔融石英楔镜,楔镜基质为 JGS1,折射率 $n = 1.44$,楔角 $\alpha = 30.0^\circ$ 。根据公式 (3) 的计算,双楔镜腔长调节结构的调节系数为 0.276。双楔镜腔长调节结构实物如图 9 所示。

图 9 中,双楔镜垂直对立放置,斜面平行。下楔镜上粘帖 PZT,为振动楔镜,PZT 最大行程 $9\ \mu\text{m}$,对应公式 (3) 中 $\Delta h_1 = 9\ \mu\text{m}$;上楔镜不粘帖 PZT,为静止楔镜,对应公式 (3) 中 $\Delta h_2 = 0\ \mu\text{m}$ 。楔镜整体最大振幅 $\Delta h_1 + \Delta h_2 = 9\ \mu\text{m}$,结合调节系数 0.278 可得,该结构的最大光场调节量为 $\Delta L = 2.5\ \mu\text{m}$ 。将该结构放置于双角锥环形腔中,利用注入腔内的 $1.6\ \mu\text{m}$ 种子激光可实现双楔镜对腔内光程调节的验证。验证装置结构如图 10 所示。

从图 10 可以看出,双角锥环形腔由两个角锥 (Corner Cube Retroreflector, CCR) 构成,角锥 1 和角锥 2 底面平行对立放置,腔内振荡光以垂直角锥底面方向往复振荡,振荡光在两底面之间分上光路和下光路。上光路放置偏振分束镜 (PBS) M1 和 M2, PBS 反射 s 偏振光,透射 p 偏振光;下光路放置双楔镜腔长调节结构和信号输出镜 M3, M3 对 $1.6\ \mu\text{m}$ 波段光有少量反射,该反射光可形成共振信号,以判别双楔镜对腔内光程的改变量。

双角锥环形腔验证结构整体,等效于一台 F-P 干涉仪^[10]。 s 偏振态的 $1.6\ \mu\text{m}$ 单频激光从 M1 注入腔内,在腔内逆时针行进,经角锥 1 和角锥 2 的偏振演化作用,在 M2 处生成一定分量的 p 偏振光, p 偏振光透过 M2 进入腔内形成稳定的循环^[12-13]。对于稳定后

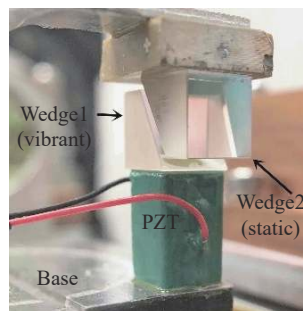


图 9 双楔镜装置实物图

Fig.9 Double optical wedges

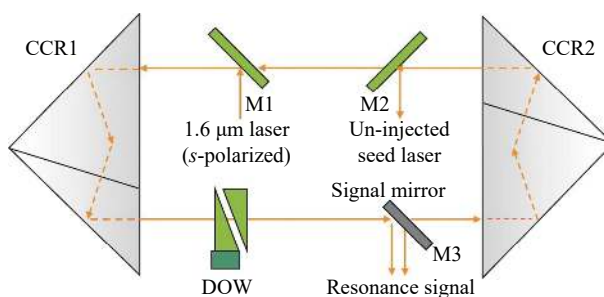


图 10 双角锥环形腔结构示意图

Fig.10 Schematic of double corner cube reflector ring cavity

的循环振荡光, M3 在每个循环过程中输出一束光,多个循环输出多束光,这些光具有相同的偏振态,经相干叠加便形成多光束干涉环,即共振信号。通过双楔镜腔长调节结构调节环形腔内光程,干涉环中心亮斑发生吞吐,在干涉环中央放置探测器,可测得中心亮环在时域上的明暗变化过程,即光强的变化过程,实验测量结果如图 11 所示。

图 11 为在示波器上显示的共振信号。绿色曲线表示 PZT 驱动电压,红色曲线为共振信号。PZT 的位移量 (振动幅度) 与加载电压成近似线性的关系,实验

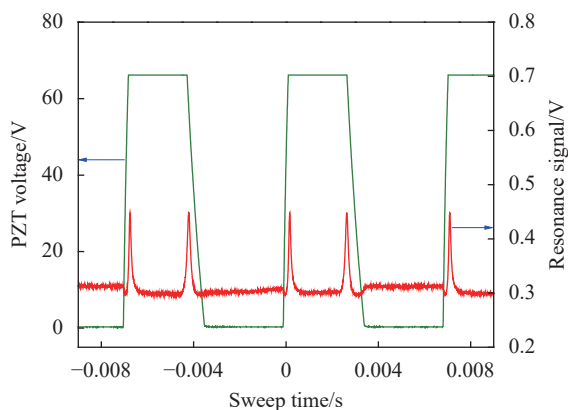


图 11 双楔镜结构调节光程产生的共振信号

Fig.11 Resonance signals based on DOW

所用 PZT 额定电压为 150 V, 对应位移量为 9 μm , 图 11 中 PZT 驱动电压幅值约为 65 V, 对应位移量为 3.9 μm 。该楔镜对的调节系数为 0.276, 根据公式 (3), 对应光程调节量 $\Delta L = 1.08 \mu\text{m}$, 则图中显示的共振信号为腔长调节量 1.08 μm 所得到的共振信号。腔长调节量的范围决定了生成共振信号的个数, 对于环形腔, 腔长每改变一个波长的长度会生成一个共振信号, 而实验中腔长调节量为 1.08 μm , 小于激光波长 (1.6 μm), 因此只能探测到一个共振信号, 实验测量值符合理论预期。

图 11 的实验结果验证了双楔镜结构对腔内光程的调节效果, 证明了双楔镜结构可以在无法通过驱动腔镜实现腔长调节的特殊情况中发挥有效作用。

3 双楔镜腔长调节结构的变形结构

图 1 所示结构为双楔镜结构的典型样式, 但双楔镜结构还存在其他不同的结构样式, 下面针对几种常见变形样式进行分析讨论。

1) 直角面对立结构。图 12 所示为直角面对立双楔镜结构, 这种结构是图 1 所示斜面对立双楔镜结构的变形, 即将图 1 中楔镜 1 和楔镜 2 互换位置后所得到的结构。

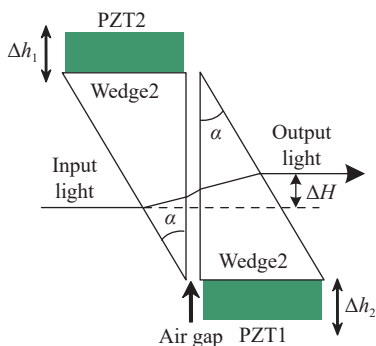


图 12 直角面对立的双楔镜结构

Fig.12 DOW with opposite vertical plane

相比于斜面对立双楔镜结构, 该结构的优点在于入射光线从楔镜斜面入射, 入射角不受全反射角限制, 角锥楔角大小不受全反射角限制; 其缺点在于调节效率低。调节量 ΔL 可用公式 (6) 进行计算, 其中 $\alpha > \theta'$ 。

$$\begin{cases} \Delta L = (\Delta h_1 + \Delta h_2) \frac{\sin \alpha}{\cos \theta'} [n - \cos(\alpha - \theta')] \\ \theta' = \arcsin\left(\frac{\sin \alpha}{n}\right) \end{cases} \quad (6)$$

图 13 所示为楔镜振幅 $\Delta h_1 + \Delta h_2 = 1 \mu\text{m}$ 情况下两种结构的光程调节效果。结果表明, 对于楔角确定的楔镜, 斜面对立结构调节系数要大于直角面对立结构所获得的调节系数。实际应用中, 楔角过大会导致斜面上增透膜透射效果较差, 因此楔角一般不超过 45° , 这种情况下斜面相对的双楔镜结构有明显的效率优势。此外, 直角面对立结构会导致出射光相对于入射光在垂直方向上产生较大位移, 即产生较大的 ΔH , 不利于光路调节。

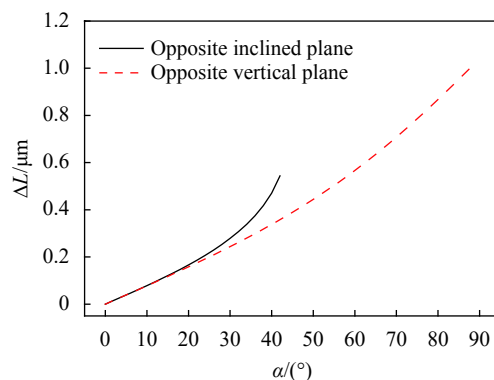


图 13 双楔镜斜面对立与直角面对立的光程调节结果

Fig.13 ΔL produced by DOW with opposite vertical plane and DOW with opposite inclined plane

2) 基于正楔镜的双楔镜结构。图 1 和图 12 结构中所用楔镜结构均为直角楔镜, 而基于正楔镜的双楔镜结构也可实现光程调节, 其结构分为图 14(a) 和图 14(b) 所示。图 14(a) 结构的调节效率与图 1 所示结构效率大致相同, 但出/入射光在垂直方向上的位移 ΔH 较大, 且入射光从楔镜斜面进入楔镜, 光路调节难度大; 图 14(b) 结构调节系数低于图 1 结构的调节系数, 在楔镜振幅相同的条件下, 其调节量为 $\cos(\alpha/2)\Delta L$ 。

3) 多级双楔镜结构。传统的腔长调节结构的工作方式是在腔镜粘贴 PZT, 直接驱动腔镜实现腔长调节, 调节量 $\Delta L = 2h\cos\theta$ (h 为 PZT 振幅, θ 为光线在腔镜上的入射角), 调节系数为 $2\cos\theta$ 。一般情况下, 光线在腔镜上的反射角小于 45° , 对应调节系数大于 1.4, 如果在 0° 反射镜粘贴 PZT, 调节系数可达 2, 即 PZT 推进 1 μm 可实现 2 μm 的腔长调节。而双楔镜结构的调节系数较低, 如图 7 所示的结果, 一般不超过 0.5, 很难实现较大的光程调节。为了实现较大的

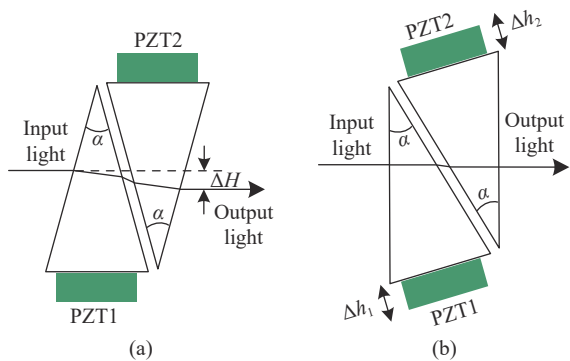


图 14 基于正楔镜的双楔镜结构

Fig.14 DOW based on regular wedge

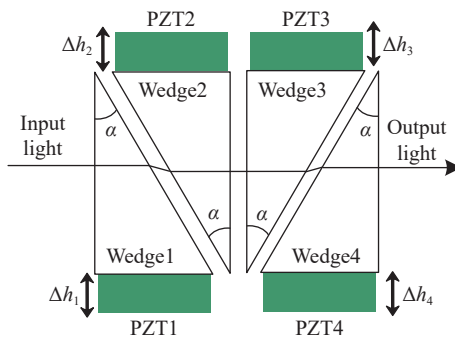


图 15 多级双楔镜结构

Fig.15 Cascaded DOWs

光程调节量, 可将多个双楔镜结构并列放置, 形成多级双楔镜结构, 如图 15 所示。多级双楔镜结构是通过增加楔镜行程的方式获得较大的光程调节量, 但不改变调节系数。图 15 结构中楔镜行程为 $\Delta h_1 + \Delta h_2 + \Delta h_3 + \Delta h_4$, 相比于图 1 结构, 楔镜振幅提高了一倍, 因此获得了多一倍的光程调节量。要获得更多的光程调节量, 可增加双楔镜结构的级数。需要说明的是,

多级双楔镜结构中, 楔镜的个数必须为偶数, 否则将造成出射光相对于入射光偏转, 增加光路调节难度。

对比不同双楔镜结构的性质, 图 1 所示斜面对立放置的双楔镜结构具有调节效率高、光损耗低 (尤其是以布儒斯特角为楔角的楔镜)、光路调节容易的特点, 是实际应用的最佳选择。要实现更大光程调节量, 可采用图 15 所示多级双楔镜结构。不同结构的双楔镜腔长调节性质如表 2 所示。

表 2 不同双楔镜结构的性能比较

Tab.2 Comparison of properties for different DOWs

DOWs	Adjustment coefficient	ΔH	Insertion loss	Optical path construction
	High	Small	Low	Easy
	Low	Large	High	Difficult
	High	Large	High	Difficult
	Low	Small	Middle	Middle
	High	Very small	Middle	Middle

4 结论

文中提出了一种双楔镜腔长微调节结构, 可用于无法通过驱动腔镜调节腔长的特殊场景。理论上给

出了双楔镜腔长调节结构调节量和调节系数的计算公式, 分析了楔镜楔角和折射率对调节效率的影响。设计了楔角为 29° 、基质为 YAG 的楔镜的双楔镜结构, 这种结构具有较大的调节效率 (调节系数为 0.53)

和较小的光损耗,是双楔镜结构的较优选。实验上,在双角锥形腔内实现了双楔镜结构对腔长的调节,验证了双楔镜结构的可行性和有效性。最后,给出了双楔镜结构的不同变形结构,并对比了各种变形结构的性质参数。相比于传统的腔长调节方式,双楔镜腔长调节结构的调节效率较低且存在一定的插入损耗,但其提供了一种不依赖于腔镜的独立调节方式,为特殊应用场景下的腔长调节提供了一种新选择。

参考文献:

- [1] Drever R W P, Hall J L, Kowalski F V, et al. Laser phase and frequency stabilization using an optical resonator [J]. *Appl Phys B*, 1983, 31(2): 97-105.
- [2] Chen C, Wang Q, Huang S, et al. Single-frequency Q-switched Er: YAG laser with high frequency and energy stability via the Pound-Drever-Hall locking method [J]. *Optics Letters*, 2020, 45(13): 3745-3748.
- [3] Henderson S W, Yuen E H, Fry E S. Fast resonance-detection technique for single-frequency operation of injection-seeded Nd: YAG lasers. [J]. *Optics Letters*, 1986, 11(11): 715-717.
- [4] Dai T Y, Ju Y L, Yao B Q, et al. Injection-seeded Ho: YAG laser at room temperature by monolithic nonplanar ring laser [J]. *Laser Physics Letters*, 2012, 9(10): 716-720.
- [5] Xue J, Chen W, Pan Y, et al. Pulsed laser linewidth measurement using Fabry-Perot scanning interferometer [J]. *Results in Physics*, 2016, 6: 698-703.
- [6] Ciurylo R, Brym S, Jurkowski J, et al. Response of scanning Fabry-Pérot interferometer to the speed dependent Voigt profile [J]. *Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer*, 1995, 53(5): 493-500.
- [7] Zavracky P M, Denis K L, Xie H K, et al. Micromachined scanning Fabry-Perot interferometer [C]//Proceedings of SPIE-The International Society for Optical Engineering, 1998, 3514: 179-187.
- [8] Wang K, Gao C, Lin Z, et al. 1 645 nm coherent Doppler wind lidar with a single-frequency Er: YAG laser [J]. *Optics Express*, 2020, 28(10): 14694-14704.
- [9] Wu J, Wang Y, Dai T, et al. Single-longitudinal-mode generation in a Ho: YLF ring laser with double corner cubes resonator [J]. *Infrared Physics & Technology*, 2018, 92: 367-371.
- [10] Zhang Z G. Research on double corner cube ring cavity and its application in pulsed injection-locking laser[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2022. (in Chinese)
- [11] RefractiveIndex. INFO. Refractive index database [EB/OL]. [2023-07-17]. <https://refractiveindex.info/>.
- [12] Zhang Z G, Ju Y L. Injection-seeded Q-switched laser based on a double corner cube retroreflector ring cavity [J]. *Optics Express*, 2021, 29(25): 41954-41963.
- [13] Zhang Z G, Ju Y L. Theoretical and experimental studies of output coupling ratio tunable double-corner-cube-retroreflector ring cavity [J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 2021, 38(10): 2847-2854.

Study on cavity length adjustment configuration of double optical wedge

Zhang Zhenguo^{1,2,3}, Li Yingyi³, Ju Youlun⁴, Lv Zhiwei^{1,2}

(1. Center for Advanced Laser Technology, Hebei University of Technology, Tianjin 300401, China;

2. Hebei Key Laboratory of Advanced Laser Technology and Equipment, Tianjin 300401, China;

3. National Key Laboratory of Electromagnetic Space Security, Tianjin 300308, China;

4. National Key Laboratory of Science and Technology on Tunable Laser, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

Abstract:

Objective The cavity length adjustment configuration has important applications in optical resonators. A cavity length adjustment configuration of double optical wedge (DOW) is proposed, which can adjust the cavity length independently of the cavity mirror. DOW configuration is composed of two right-angle wedges with beveled planes placed in parallel opposites. The optical path inside DOW is changed by driving the wedges to move in the vertical direction, and then the optical path in the resonator is changed. The theoretical formula for calculating the change of optical path of DOW configuration is established. According to the formula, the change of optical path

is positively correlated with the wedge angle, the refractive index of wedge and the wedge displacement in the vertical direction. The wedge angle and refractive index determine the optical path adjustment efficiency of DOW configuration. According to the theoretical design, the YAG DOW configuration with wedge angle of 29° and refractive index of 1.81 has higher adjustment efficiency and less optical loss, and the adjustment coefficient is 0.53. In the experiment, the double corner cube retroreflector (DCCR) ring cavity is used to verify the cavity length adjustment, and the feasibility and effectiveness of DOW configuration to adjust the cavity length are verified. The deformable structure of DOW configuration is discussed and analyzed. The optical path adjustment properties of DOW configuration with beveled planes placed in parallel opposites, regular optical wedges and cascaded DOW configuration are discussed. The performances of DOW configuration and its deformed configuration in optical path adjustment efficiency, optical loss and the complexity of the optical path construction are compared, and the advantages of these DOW configurations in practical application are determined, which provides a reference for the design and selection of DOW configuration.

Methods In theory, by geometric calculation, the calculation formula of the optical path adjustment of the DOW configuration is derived, and the results are shown in Eq.(3). According to Eq.(3), there are three factors affecting the adjustment ΔL , namely wedge angle α , wedge refractive index n , and wedge displacement $\Delta h_1 + \Delta h_2$ in the vertical direction. The larger the wedge angle value of α is, the higher the adjustment efficiency is, and the data results are shown (Fig.4); The greater the refractive index n is, the higher the adjustment efficiency is, and the data results are shown (Fig.5). The larger the displacement $\Delta h_1 + \Delta h_2$ is, the higher the adjustment efficiency is. According to these factors, a DOW configuration with wedge angle $\alpha = 29^\circ$ and material YAG is designed, and its adjustment coefficient is 0.53.

Results and Discussions The adjustment effect of DOW configuration to the cavity length is verified experimentally by using the DCCR ring cavity. The reflector of DCCR ring cavity is corner cube retroreflector, which can not be driven by PZT directly, thus the cavity length adjustment of DCCR ring cavity can be realized with DOW configuration. The experimental setup is shown (Fig.10). DOW configuration is inserted into the DCCR ring cavity, and $1.6 \mu\text{m}$ laser is injected into the cavity. When DOW configuration is operating, $1.6 \mu\text{m}$ laser will form a resonance signal and output from M3, through which the cavity length adjustment value ΔL caused by DOW configuration can be determined. The experimental results are shown (Fig.11). The appearance of resonance signal proves that the cavity length changes, and the change value ΔL is consistent with the theoretical expectation. The above experimental results prove that DOW configuration is effective in adjusting the cavity length.

Conclusions In this paper, a DOW configuration is proposed, which can be used in the special scenario where the cavity length cannot be adjusted by driving the cavity mirrors. The formula for calculating the adjustment value and adjustment coefficient of DOW configuration is given theoretically. The influence of wedge angle and refractive index on the adjustment efficiency is analyzed. DOW configuration with wedge angle of 29° and matrix of YAG is designed. DOW configuration has a large adjustment efficiency (adjustment coefficient is 0.53) and a small light loss, and is the better choice in various DOW configurations. The cavity length adjustment of the length of DOW configuration is realized experimentally in a double-corner cone ring cavity, which verifies the feasibility and effectiveness of the DOW configuration. Finally, different deformation structures of DOW configurations are given, and the property parameters of each deformation structure are compared. Compared with the traditional cavity length adjustment configuration, cavity length adjustment configurations of DOW has low adjustment efficiency and certain insertion loss, but it provides an adjustment mode independent of the cavity mirror, and provides a new choice for the cavity length adjustment in special application scenarios.

Key words: double optical wedge; cavity length adjustment; wedge prism; PZT