

直角棱镜腔偏振耦合输出特性研究

罗旭,王鹏飞

(华北光电研究所,北京 100015)

摘要:激光器采用直角棱镜腔具有较好的稳定性,在军用激光器中应用广泛,由于直角棱镜内发生全反射产生相移,耦合输出透过率与耦合波片的相移量、光轴方位角,以及直角棱镜材料和棱线方向有关,直角棱镜与波片的不同组合能够达到的最高耦合透过率不同;对直角棱镜偏振耦合特性进行了理论分析,并采用 MATLAB 软件计算不同相移波片的方位角与偏振透过率的关系,并对光波耦合过程中偏振状态变化进行了模拟,对不同材料直角棱镜的耦合特性进行了对比,并根据理论分析进行实验验证,这些研究对直角棱镜谐振腔的设计、调试以及直角棱镜材料的选择具有实际意义。

关键词:激光物理;直角棱镜;偏振耦合;透过率

中图分类号:TN 248.1 **文献标识码:**A **DOI:**10.3969/j.issn.1001-5078.2016.10.015

Research on polarization coupling output characteristics of porro prism cavity

LUO Xu, WANG Peng-fei

(North China Research Institute of Electro-optics, Beijing 100015, China)

Abstract: The laser with Porro prism resonator cavity has good stability, and this structure has been widely used in military lasers. The polarization coupling property of Porro prism was theoretically analyzed. The relationship of different phase shift wave plate azimuth angles and polarization transmissivity was calculated by MATLAB software, and the change of polarization state was simulated in the process of optical coupling. Coupling properties of Porro prism with different materials were compared, and the results were verified through the experiments. This study has practical significance for the design of Porro prism resonator cavity and the selection of Porro prism materials.

Key words: laser physics; Porro prism; polarization coupling; transmittance

1 引言

军用激光器系统通常工作环境复杂多变,例如测距机和照明器采用的激光器必须适应各种不同的工作环境,该类激光器的设计需要主要考虑激光器系统对冲击、振动以及温度波动能否保持不灵敏,因此光学系统的可靠性运转与性能相比显得更加重要。采用逆反射镜的自对准特性,将两直角棱镜作为腔镜能够提供较好的稳定性^[1-2]。

采用双直角棱镜作为腔镜的激光器通常需要偏振耦合输出光束,常见的双直角棱镜腔如图 1 和图 2 所示,图 1 所示为 Z 型正交直角棱镜腔,图 2 所示为直通直角棱镜腔。输出光束通过一个波片和偏振耦合器组成的耦合输出系统,这种结构简单也能够获得最佳耦合输出透过率,耦合输出端可以简化成如图 3 所示的结构;光波在直角棱镜内部发生全反射,使光波在平行棱线和垂直棱线方向之间产生了

相移,相移大小取决于棱镜所采用介质的折射率^[3],因此输出端也可以不需要耦合波片通过旋转直角棱镜的棱线方向实现耦合输出,实际应用中往往需要两个直角棱镜的两个棱线互相垂直,通过调节波片方位角耦合输出更加方便^[4]。利用 MATLAB 软件能够方便计算采用波片或只采用直角棱镜进行耦合时,调节波片方位角或直角棱镜棱线方向对应的耦合输出透过率,并模拟偏振光经过任意相位延迟波片和不同材料直角棱镜的最大可调透过率范围,同时模拟了旋转波片或直角棱镜时输出端的偏振状态变化。

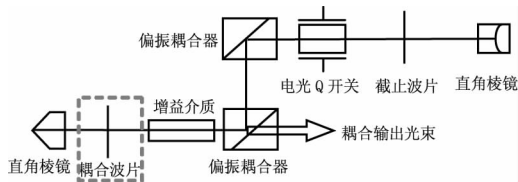


图1 Z型正交直角棱镜腔结构俯视图

Fig. 1 Top view of the structure of Z-shaped orthogonal porro-prism resonator

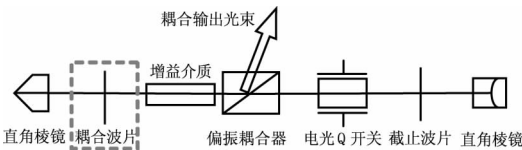


图2 直通正交直角棱镜腔结构俯视图

Fig. 2 Plan view of the structure of straight orthogonal porro-prism resonator

2 理论分析

本文分别讨论输出端采用任意相移波片耦合输出和只采用直角棱镜耦合输出两种情况,并对常见的四分之一波片和二分之一波片作为耦合波片的耦合输出特性和偏振状态进行模拟,对比了不同材料直角棱镜的耦合输出性能。

计算通过描绘电场矢量末端轨迹研究并模拟偏振光经过波片和不同材料直角棱镜的偏振状态变化规律。

光波在介质中传播电场可以表示为:

$$E_s = E_{os} \cos(\omega t - kz + \phi_s) \quad (1)$$

$$E_p = E_{op} \cos(\omega t - kz + \phi_p) \quad (2)$$

在空间电场矢量末端形成的轨迹可以描述为:

$$\left(\frac{E_s}{E_{os}}\right)^2 + \left(\frac{E_p}{E_{op}}\right)^2 - 2\frac{E_s}{E_{os}}\frac{E_p}{E_{op}}\cos\phi = \sin^2\phi \quad (3)$$

$$\phi = \phi_p - \phi_s \quad (4)$$

光波在腔内每次振荡由反射端经过偏振耦合器

为线偏光,若输出端采用旋转直角棱镜耦合输出,如图3所示,需要考虑随直角棱镜方位角的变化入射直角棱镜s分量和p分量的比例变化,s分量和p分量的相移只与棱镜材料有关。

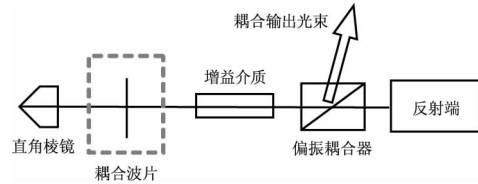


图3 直角棱镜偏振耦合输出端示意图

Fig. 3 Plan view of the structure of fold orthogonal porro-prism resonator

若输出端采用旋转波片的方式耦合输出,线偏光分别经过波片和直角棱镜,反射光再次通过波片,光波在第一次经过波片,入射线偏光与波片光轴存在夹角 θ ,在s分量和p分量之间产生了相移形成椭圆偏振光,经过直角棱镜在垂直棱线和平行棱线方向产生相移,反射后再次经过波片,利用两次坐标变换可以得到偏振耦合器之前的偏振状态,计算s分量和p分量的比例可以得到耦合系统的耦合透过率。

2.1 光波经过波片产生的相移

光波经过波片会在波片光轴与垂直光轴方向产生特定的相位延迟,经过波片后垂直波片光轴方向将产生 ϕ_w 的延迟。

设波片光轴与入射面夹角为 θ ,入射光波经分解到沿光轴和垂直光轴的两个方向,如图4所示,经过波片后垂直波片光轴方向相位将产生 ϕ_w 的延迟,可以得到入射光经波片的电场表达式:

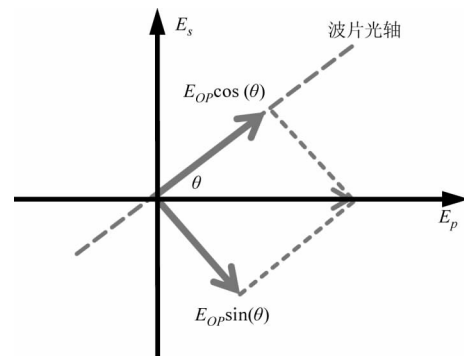


图4 入射光波沿波片光轴径向与法向分量

Fig. 4 Component of the incident light wave to normal direction and radial direction along the optical axis of the wave plate

$$E_p' = E_{op} \cos(\theta) \cos(\omega t - kz) \cos(\theta) + E_{op} \sin(\theta) \cos(\omega t - kz - \phi_w) \sin(\theta) + E_{os} \sin(\theta) \cos(\omega t -$$

$$kz) \cos(\theta) - E_{os} \cos(\theta) \cos(\omega t - kz - \phi_w) \sin(\theta) \quad (5)$$

$$E_s' = -E_{op} \sin(\theta) \cos(\omega t - kz - \phi_w) \cos(\theta) + E_{op} \cos(\theta) \cos(\omega t - kz) \sin(\theta) + E_{os} \sin(\theta) \cos(\omega t - kz) \sin(\theta) + E_{os} \cos(\theta) \cos(\omega t - kz - \phi_w) \cos(\theta) \quad (6)$$

当波片为四分之一波片和二分之一波片时 ϕ_w 分别为 $\pi/2$ 和 π 。

2.2 光波经过直角棱镜产生相移

光波直角棱镜内部发生两次全反射如图 5 所示。

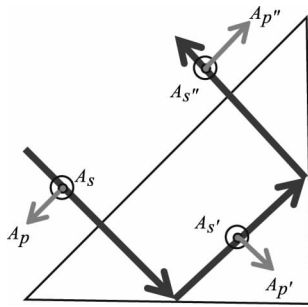


图5 直角棱镜内全反射示意图

Fig. 5 Schematic of total reflection in porro prism

入射光的振幅可以分解为平行和垂直入射面两个分量 A_p 和 A_s , 同样, 反射光可以分解为 R_p 和 R_s 。由菲涅尔公式可得^[5]:

$$\begin{cases} R_p = \frac{\cos\theta_i - in \sqrt{n^2 \sin^2\theta_i - 1}}{\cos\theta_i + in \sqrt{n^2 \sin^2\theta_i - 1}} A_p \\ R_s = \frac{n \cos\theta_i - i \sqrt{n^2 \sin^2\theta_i - 1}}{\cos\theta_i + i \sqrt{n^2 \sin^2\theta_i - 1}} A_s \end{cases} \quad (7)$$

$$\begin{cases} \tan \frac{\delta_p}{2} = -\frac{n \sqrt{n^2 \sin^2\theta_i - 1}}{\cos\theta_i} \\ \tan \frac{\delta_s}{2} = -\frac{\sqrt{n^2 \sin^2\theta_i - 1}}{n \cos\theta_i} \end{cases} \quad (8)$$

式中, δ_p, δ_s 分别为反射后两分量光的相位差; θ_i 为入射角; n 为棱镜的折射率, 市场所售直角棱镜折射率如表 1 所示。

设空气折射率为 1, $n_{K9} = 1.516, n_{BK7} = 1.506, n_{FS} = 1.449, \theta_i = 45^\circ$ 。

当满足全反射条件时, $|R_p| = |A_p|, |R_s| = |A_s|$, 且与 θ_i 和 n 的值无关, 说明全反射过程中反射光和入射光各分量的振幅相等 s 偏振方向不变, p 偏振方向相反, 即 $E_p = -E_p'', E_s = E_s''$ 。

表 1 市场所售直角棱镜折射率^[6]

Tab. 1 porro prism refractive index provided by the manufacturer

材料名称	厂家名称	折射率
K9	江阴香江光电、武汉优光、大恒光电	1.516
BK-7	福建福晶、北京创思工贸	1.506
FS(熔融石英)	福建福晶、肖特中国	1.449

不同材料折射率分别代入式 (8) 中, 得到经过一次全反射的相位 p 偏振与 s 偏振的相位延迟量, 经计算各材料单次全反射各分量的相位延迟量为:

K9:

$$\begin{cases} \delta_{pK9} = -0.4402 \times \pi \\ \delta_{sK9} = -0.2201 \times \pi \end{cases} \quad (9)$$

BK-7:

$$\begin{cases} \delta_{pBK7} = -0.4216 \times \pi \\ \delta_{sBK7} = -0.2108 \times \pi \end{cases} \quad (10)$$

熔融石英:

$$\begin{cases} \delta_{pFS} = -0.2731 \times \pi \\ \delta_{sFS} = -0.1365 \times \pi \end{cases} \quad (11)$$

2.3 直角棱镜耦合的电场描述

实际应用中采用旋转直角棱镜的方式耦合输出, 可以减少光学元件, 提高效率, 随着直角棱镜方位角的变化, 耦合输出前光波的电场描述为:

$$E_p' = E_{op} \cos(\theta) \cos(\omega t - kz - 2\delta_s) \cos(\theta) - E_{op} \sin(\theta) \cos(\omega t - kz - 2\delta_p) \sin(\theta) \quad (13)$$

$$E_s' = E_{op} \sin(\theta) \cos(\omega t - kz - 2\delta_p) \cos(\theta) + E_{op} \cos(\theta) \cos(\omega t - kz - 2\delta_s) \sin(\theta) \quad (14)$$

2.4 波片耦合的电场描述

实际应用中为了方便调节, 需要固定两正交直角棱镜的棱线方向来获得最佳对准稳定性, 经常以直角棱镜棱线平行或垂直腔内透过偏振耦合器的线偏光方向, 设输出端直角棱镜棱线平行反射端返回的线偏光方向, 光波经过波片和直角棱镜需要经过两次坐标变换, 传输到偏振器输出前的电矢量表达式如下:

$$\begin{aligned} E_p'' &= -E_{op} \cos^4(\theta) \cos(\omega t - kz - 2\delta_p) - 2E_{op} \sin^2(\theta) \cos^2(\theta) \cos(\omega t - kz - \phi_w - 2\delta_p) - E_{op} \sin^4(\theta) \cos(\omega t - kz - 2\phi_w - 2\delta_p) - 2E_{op} \sin^2(\theta) \cos^2(\theta) \cos(\omega t - kz - \phi_w - 2\delta_s) + E_{op} \sin^2(\theta) \cos^2(\theta) \cos(\omega t - kz - 2\delta_s) + E_{op} \sin^2(\theta) \cos^2(\theta) \cos(\omega t - kz - 2\phi_w - 2\delta_s) \\ E_s'' &= E_{op} \cos^3(\theta) \sin(\theta) \cos(\omega t - kz - \phi_w - 2\delta_p) \end{aligned} \quad (15)$$

$$\begin{aligned}
& - E_{op} \sin^3(\theta) \cos(\theta) \cos(\omega t - kz - 2\phi_w - 2\delta_p) - \\
& E_{op} \cos^3(\theta) \sin(\theta) \cos(\omega t - kz - 2\delta_p) - \\
& E_{op} \sin^3(\theta) \cos(\theta) \cos(\omega t - kz - \phi_w - 2\delta_s) - \\
& E_{op} \sin^3(\theta) \cos(\theta) \cos(\omega t - kz - \phi_w - 2\delta_s) + \\
& E_{op} \sin^3(\theta) \cos(\theta) \cos(\omega t - kz - 2\delta_s) - \\
& E_{op} \sin(\theta) \cos^3(\theta) \cos(\omega t - kz - 2\phi_w - 2\delta_s) + \\
& E_{op} \cos^3(\theta) \sin(\theta) \cos(\omega t - kz - \phi_w - 2\delta_s) \quad (16)
\end{aligned}$$

3 耦合输出特性分析

3.1 旋转直角棱镜输出特性分析

采用旋转直角棱镜耦合输出系统,通过描绘电场矢量末端轨迹,可以得到随直角棱镜棱线转动耦合输出前偏振状态,图6所示为直角棱镜旋转0°~95°,K9玻璃直角棱镜棱线方位角变化、耦合透过率和椭圆偏振状态关系。

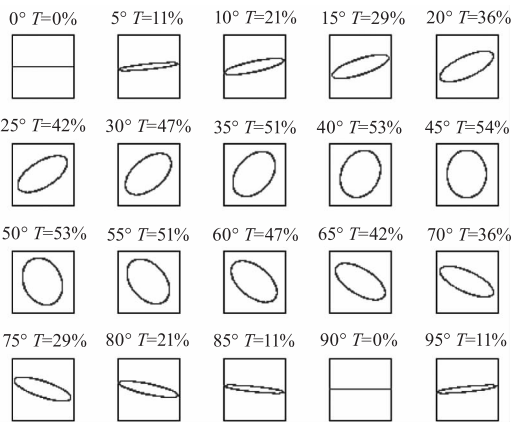


图6 退偏状态及耦合输出透过率随直角棱镜角度变化关系
Fig. 6 Depolarization state and output coupling transmission changing with porro prism angle

当波片方位角在0°~180°旋转过程中存在两个耦合透过率峰,当直角棱镜棱线与耦合输出棱镜耦合输出光偏振夹角为45°时,即直角棱镜旋转一周存在四个耦合输出最大值,根据所选材料不同能够达到的最高透过率不同,对于所计算的三种材料分别为: $T_{K9} = 54\%$, $T_{BK7} = 56\%$, $T_{FS} = 68\%$ 。

3.2 旋转波片输出特性分析

上述理论分析(15)(16)式给出了当直角棱镜棱线正交固定放置时,反射端返回的线偏光经过波片与直角棱镜组成的耦合输出系统,随波片方位角变化的电矢量表达式。根据表达式,利用MATLAB计算给出当采用任意波片数波片时,波片旋转一周能够得到的最大耦合透过率,如图7所示。

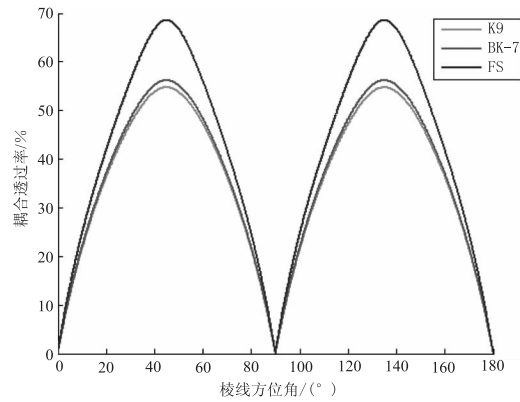


图7 耦合输出透过率随直角棱镜方位角的变化

Fig. 7 Coupling output transmission changing with porro prism angle

最高耦合透过率决定了耦合系统的耦合透过率可调范围,其中当波片采用常见的二分之一波片和四分之一波片,即波片数为0.5λ和0.25λ时,最高耦合透过率均小于70%,当波片在0°~180°旋转时,二分之一波片光轴方位角与耦合透过率的关系如图8所示,四分之一波片光轴方位角与耦合透过率的关系如图9所示。

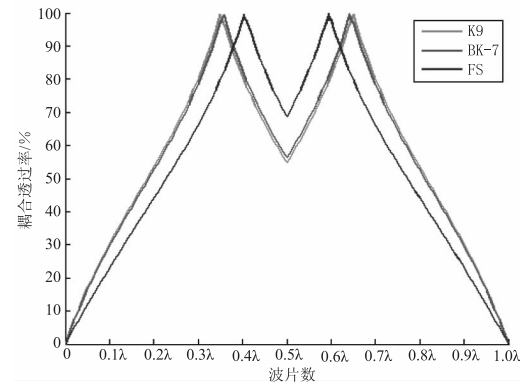


图8 不同波片数波片耦合输出与最高耦合透过率关系
Fig. 8 Relation between different number of wave plate and the highest output rate

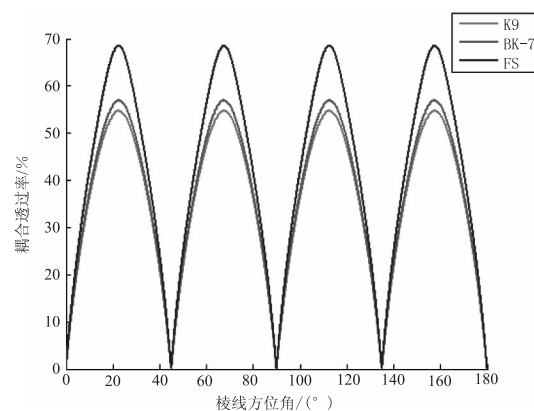


图9 耦合输出透过率与λ/2波片方位角的关系

Fig. 9 Coupling output transmission changing with λ/2 wave plate angle

采用经过 $\lambda/2$ 波片与直角棱镜组成的耦合输出系统,波片方位角在 $0^\circ \sim 45^\circ$ 旋转过程中耦合透过率的变化经过一个周期,如图 8,根据所选材料不同能够达到的最高透过率与旋转直角棱镜的棱线一致,分别为: $T_{K9} = 54\%$, $T_{BK7} = 56\%$, $T_{FS} = 68\%$ 。

经过 $\lambda/4$ 波片与直角棱镜组成的耦合输出系统耦合输出透过率,如图 10 所示。

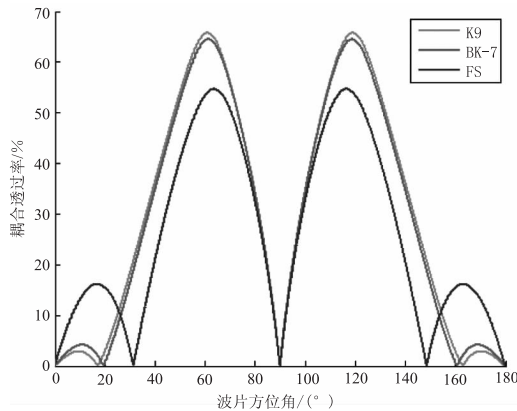


图 10 耦合输出透过率与 $\lambda/4$ 波片方位角的关系

Fig. 10 Coupling output transmission changing with $\lambda/4$ wave plate angle

采用经过 $\lambda/4$ 波片与直角棱镜组成的耦合输出系统,波片方位角在 $0^\circ \sim 180^\circ$ 旋转过程中经过一个周期,且一个周期内旋转波片等分为两个对称的区域,根据所选材料不同能够达到的最高透过率不同分别为: $T_{K9} = 65\%$, $T_{BK7} = 64\%$, $T_{FS} = 54\%$;

以上结果表明,采用 $\lambda/2$ 波片或 $\lambda/4$ 波片与直角棱镜组成的耦合输出系统,由于直角棱镜附加的相位延迟不能完全抵消,最高耦合通过率受总的相位延迟量影响,若希望获得更高耦合输出透过率可以通过定制适当相位延迟的波片来补偿直角棱镜产生的退偏。

经过计算,如图 7 所示结果可以采用能够补偿直角棱镜的相位延迟波片,可以使耦合透过率任意可调,每种材料对应的补偿波片数分别为 K9: 0.648λ 或 0.352λ ; BK7: 0.644λ 或 0.356λ ; 石英: 0.596λ 或 0.404λ ,采用对应的波片数或波片数整数倍的波片即可获得任意耦合透过率。例如: 0.352λ 波片和 K9 直角棱镜组成的耦合系统,波片方位角与耦合透过率关系如图 11 所示,可以实现任意耦合透过率可调输出。

3.3 实验结果

根据理论计算,我们对直角棱镜的静态耦合输出特性进行了实验研究,实验装置示意图,如图 12 所示。

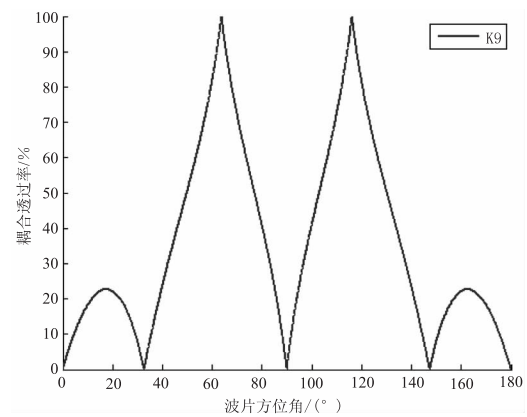


图 11 K9 直角棱镜腔耦合输出透过率与 0.352λ 波片方位角的关系

Fig. 11 Coupling output transmission changing with 0.352λ wave plate angle

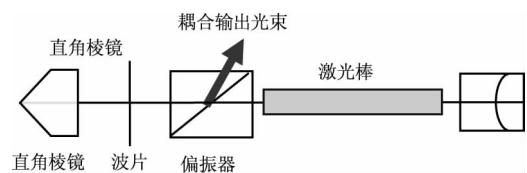


图 12 直角棱镜腔偏振输出端示意图

Fig. 12 Schematic of coupling output terminal of Porro prism polarization coupling output system

采用 $\lambda/4$ 波片作为耦合输出波片,为了能够获得较宽的耦合输出透过率范围,采用 K9 玻璃材质直角棱镜。我们将上述谐振腔中的输出端直角棱镜改为全反射,验证计算结果的准确性,对于全反射与 $\lambda/4$ 波片组成的耦合系统,能够得出角度与透过率关系:

$$T_{\text{平面全反}} = \frac{\tan 2\theta}{\tan 2\theta + 1} \quad (20)$$

使用平面全反耦合输出可以根据波片角度得到耦合透过率,实验得到了透过率与激光器输出能量的关系,如图 13 所示,透过率为 35% 附近时输出能量最大。

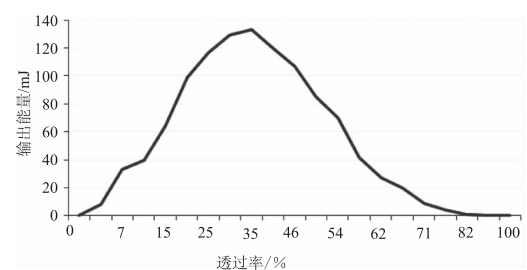


图 13 平面全反耦合输出透过率与输出能量关系

Fig. 13 Output energy changing with Coupling output transmission of plane HR mirror

图 14 所示为正交直角棱镜谐振腔耦合输出透过率理论值与实测输出能量随波片角度变化关系,平面全反耦合输出结果可知,激光器输出能量的最

大值对应的耦合透过率为 35%,而双直角棱镜腔输出极值对应波片角度为 11.25°和 50.5°对应的耦合透过率理论值分别为 37%和 35%,耦合透过率的理论计算值与实验验证结果相符。

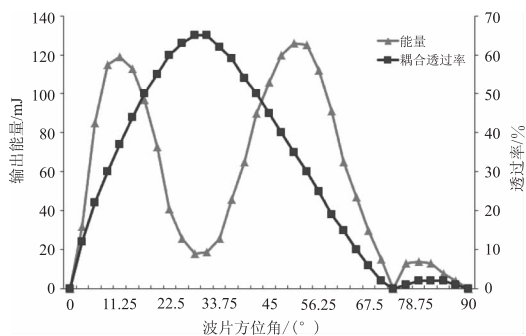


图 14 正交直角棱镜谐振腔耦合输出透过率与输出能量随波片角度变化

Fig. 14 Output energy and Coupling transmission changing with waveplate angle

4 总结

本文系统地分析了偏振光束通过直角棱镜后偏振状态的变化,利用 MATLAB 软件模拟了相位延迟引起的偏振状态随耦合波片方位角的变化规律,计算了棱镜的折射率对耦合透过率的影响。理论结果表明,耦合输出透过率与耦合波片的波片数和棱镜的折射率有关,当采用 $\lambda/4$ 波片耦合输出时 K9 和 BK-7 直角棱镜能够获得较高耦合透过率分别为 65%和 64%;当采用 $\lambda/2$ 波片耦合输出时熔融石英直角棱镜能获得较高耦合透过率约为 68%,不同材料直角棱镜可以采用特殊波片补偿延迟量,对应的补偿耦合波片分为 K9: 0.648λ 或 0.352λ ; BK7: 0.644λ 或 0.356λ ; 石英: 0.596λ 或 0.404λ ,采用对应的波片数或波片数整数倍的波片即可获得任意耦

合透过率可调输出。根据理论计算对双直角棱镜腔耦合输出能量和透过率的关系进行了测试。

参考文献:

- [1] Donald B Coyle, Richard B Kay, Paul R Stysley, et al. Efficient, reliable, long-lifetime, diode-pumped Nd: YAG laser for space-based vegetation topographical altimetry [J]. Applied Optics, 2004, 43(27): 5236 - 5242.
- [2] 邓仁亮, 徐荣普, 军用固体激光器谐振腔 [J]. 兵器激光, 1984, (2): 54 - 57.
- [3] LÜ Baida. Propagation and control of high-power laser [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1999: 65 - 68. (in Chinese)
吕百达. 强激光的传输与控制 [M]. 北京: 国防工业出版社, 1999: 65 - 68.
- [4] ZHANG Jing, LU Changyong, ZHANG Xi, et al. Laser-Diode pumped right-angle prism cavity electro-optic Q-switched solid state Laser [J]. Laser & Infrared, 2007, 37(7): 617 - 620. (in Chinese)
张晶, 卢常要, 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] M Born, E Wolf. Principles of optics [M]. Beijing: Science Press, 1978: 73. (in Chinese)
波恩 M, 沃耳夫 E. 光学原理 [M]. 北京: 科学出版社, 1978: 73.
- [6] SHEN Jianping, DING Chunfeng. Characteristic analysis of Z-shaped orthogonal Porro-prism resonator [J]. Laser & Infrared, 2012, 42(3): 283 - 287. (in Chinese)
沈建平, 丁春峰. Z 型正交波罗棱镜腔的特性研究 [J]. 激光与红外, 2012, 42(3): 283 - 287.