

CO₂ 激光器线偏振光输出腔内起偏器的研究

李晓平 周凤晴 明 军 卢 宏 许强华 王金华 陈清明

(华中理工大学激光技术国家重点实验室, 武汉, 430074)

摘要: 本文讨论了高功率 CO₂ 激光器线偏振光输出的获得途径和线偏振镜的设计理论及制备技术, 初步获得了多层介质结构的 CO₂ 激光器线偏振镜。

关键词: CO₂ 激光器 线偏振镜

Introcavity polarization mirror for high power CO₂ laser

*Li Xiaoping, Zhou Fengqing, Ming Jun, Lu Hong
Xu Qianghua, Wang Jinhua, Chen Qingming*

(National Laboratory of Laser Technology, HUST)

Abstract: The way to gain the high power CO₂ laser of linear polarization has been discussed in this paper, and the theoretical study of introcavity polarization mirror has been made too. With the multi-layer film coating, the preparation and measurement of the introcavity polarization mirror are described in detail.

Key words: CO₂ laser polarization locking mirror

一、引 言

自高功率激光器用于工业加工以后的很长一段时期内,人们忽略了激光束偏振状态的影响。一般认为,在激光加工过程中,激光束是以法线方式入射被加工材料表面的,光能在材料中耦合的大小与光束的偏振状态没有关系。80年代初丹麦技术大学的 Olsen 等人发现,光束法向入射材料表面的这一假设仅在光与材料相互作用的最初阶段是正确的,一旦切口形成以后,光束实际上是以掠射方向入射于被加工材料表面的。所以,材料对入射激光能量的反射和吸收受到激光束偏振状态的强烈制约^[1]。例如,激光切割或焊接时,不同方向切口或焊缝宽度不一致,切口或焊缝倾斜等等都是由光的偏振状态造成的。光的偏振状态不仅是激光加工中不可忽略的重要因素,在某些情况下甚至是决定因素。因此,偏振技术对激光加工是十分重要的。高功率 CO₂ 激光器的偏振技术包含两项内容,即圆偏振技术和线偏振技术,前者已得到解决,后者在国内尚属空白。

本文论述线偏振光的获得途径,研究高功率线偏振光束腔内起偏器(简称线偏振镜)设计

理论与制备技术。

二、原 理

1. 获得线偏振光的途径

产生线偏振的方法有两种,一是研制输出光为线偏振光的激光器。二是由激光器输出的混合偏振光经过光路元件转换变为线偏振光。

方法一的实质是研制出为线偏振光的谐振腔,即在一般的谐振腔中增加一个薄膜型起偏器形成折叠腔,如图 1 所示。它是利用光波垂直于入射面的分量 s 波和平行于入射面分量 p 波在倾斜入射于薄膜型反射式起偏器时存在显著反射率差别,造成两个光波分量在腔中双程损耗的显著差别,通过谐振腔的模式竞争机制,抑制低阶反射率分量的激光振荡,使输出为线偏振光。

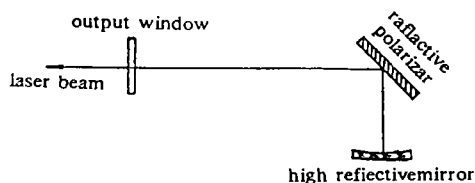


Fig. 1 Schematic diagram of the polarization locking cavity

方法二是研制放在激光器外面光路上的起偏器。但这种方法有两个缺点:一是激光器输出的混合偏振态的光束,经过该起偏器后,光功率降低一半左右。二是由于激光器中心波长为 10.6μm,在此波段内有显著双折射效应的晶体尚未发现,而采用多次叠加的长波通滤光片光学损耗太大,也不宜实用。

产生线偏振最好的方法是激光器直接输出线偏振光,即在谐振腔中增加一个薄膜型反射式起偏器形成折叠腔。

薄膜型腔内起偏器各膜层厚度是非四分之一波长厚度,且各层厚度都不一样,没有周期性,这给制备造成很大困难,使它进入最复杂最困难的光学薄膜之列。

2. 设计要求

第一,s 波和 p 波的反射率相差越大越好,同时由于谐振腔本身的模式选择作用(抑制损耗大的光波分量的振荡),所以两个反射分量的反射率差值只需大于 30% 即可。

第二,在最终激光振荡输出时,光腔的光强极大,为了使镜片不会因吸收而炸裂,必须使其中高反射率分量的反射率值大于 99.5%。

由此可以看出,设计条件为:

(1) 镜面对 s 波和 p 波的反射率差,即 $|R_s - R_p| \geq 30\%$, (2) R_s 和 R_p 中较高一个反射率分量应大于 99.5%, (3) 消光比 $K = (r_{sj}, r_{pj})_{\max} / (r_{sj}, r_{pj})_{\min} \geq 1.5$ 。

我们开始设计的线偏振的结构如下:基片为单晶硅 Si,衬底为钼 Mo 或金 Au 或银 Ag,介质材料为低折射率材料氟化钡 BaF₂ 与高折射率材料硒化锌 ZnSe,低折射率材料硫化锌 ZnS 与高折射率材料锗 Ge,介质膜层数都是偶数,分别是 8,10,12,如图 2 所示。

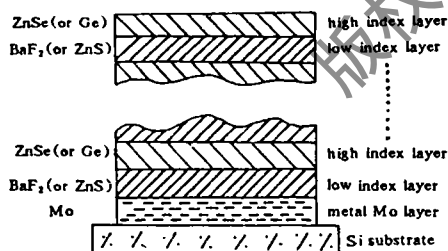


Fig. 2 Configuration of coated multi-layer film of the polarization locking mirror

3. 设计理论

由文献[2],膜系的特征矩阵为:

$$\begin{bmatrix} B \\ C \end{bmatrix} = \left\{ \prod_{j=1}^R \begin{bmatrix} \cos \delta_j & \frac{i}{\eta_j} \sin \delta_j \\ i \eta_j \sin \delta_j & \cos \delta_j \end{bmatrix} \right\} \begin{bmatrix} 1 \\ \eta_{k+1} \end{bmatrix}$$

对 s 波, p 波, 膜层位相厚度为: $\delta_j = 2\pi n_j d_j / \lambda$

折射角 θ_j 由折射定律确定, 导纳 η_j 由下面式子给出:

$$\eta_j = \begin{cases} n_j \cos \theta_j, & \text{s 波} \\ n_j / \cos \theta_j, & \text{p 波} \end{cases}$$

式中, n_j 为 j 层膜材料的折射率。考虑到吸收和金属层膜, n_j 为复数。多层介质膜和金属层的组合导纳 $Y=C/B$, 这样线偏振膜系的反射率为:

对 s 波:
$$R_s = \left(\frac{\eta_0 B_s - C_s}{\eta_0 B_s + C_s} \right) \left(\frac{\eta_0 B_s - C_s}{\eta_0 B_s + C_s} \right)^*$$

对 p 波:
$$R_p = \left(\frac{\eta_0 B_p - C_p}{\eta_0 B_p + C_p} \right) \left(\frac{\eta_0 B_p - C_p}{\eta_0 B_p + C_p} \right)^*$$

式中, R 为入射介质的等效导纳。用上两式分别算出 s 波和 p 波的对应值, 就得到 R_s, R_p 。

线偏振镜的膜系是用电脑优化, 自动设计出来的, 选择的光学厚度为 $f_j \cdot \lambda_0 / 4$, 其中, $f_j \in (0, 1.2)$, 称为第 j 层的厚度系数, λ_0 为中心波长(对 CO_2 激光为 $10.6\mu\text{m}$), 目的是在给定的薄膜层数和薄膜条件下找到一组 $\{f_j\}$, 使在 λ_0 附近的一个波长区域内, 满足上边的设计原则, 为此需构造下面的评价函数:

$$F = \frac{1}{M} \left\{ \sum_{j=1}^M W_{Rj} \left[\frac{(R_{sj}, R_{pj})_{\max} - 1}{\Delta R_j} \right]^2 + \sum_{j=1}^M W_{kj} \left[\frac{(R_{sj}, R_{pj})_{\min}}{(R_{sj}, R_{pj})_{\max}} \right]^2 \right\}$$

式中, R_{sj}, R_{pj} 分别为各波点 λ_j 高反射率, W_{Rj}, W_{kj} 分别为各波点 λ_j 高反射率与消光比的权重, ΔR_j 分别为各波点 λ_j 高反射率值允许的偏差。

该函数是平方和形式评价函数, 所以, 在用统计实验求总极值法寻优求得一系列中间解后, 采用最小二乘法 LESO 进一步的寻优, 可得到满足设计要求的解。

三、几个计算结果分析

1. 两组膜料优化结果的比较

开始选用低折射率材料氟化钡与高折射率材料硒化锌发现它比低折射率材料硫化锌与高折射率材料 Ge 组合好得多。关于衬底材料, 银反射率高, 但易发生化学反应, 金比较昂贵。所以, 我们优化设计的衬底全部采用性能稳定而又廉价的金属钼为反射层。

表 1 列出了八层氟化钡与硒化锌以及八层硫化锌与锆和钼反射层构成的腔内起偏器优化结构参数。图 3 则是相应的 s 波、p 波反射曲线。

图中曲线表明, 上述两种膜料构成的膜系的光学特性有很大差异, 由 BaF_2 与 ZnSe 构成的膜系, 高反射分量有很宽范围, 在 $10.3 \sim 10.9\mu\text{m}$ 波长范围内几乎是平稳的(长波处略有下降), 而 ZnSe 与 Ge 构成的膜

Table 1 Optimization results of the polarization locking mirror coated with different optical film system

	fractional quarter wave thickness		
	system 1	system 2	system 3
air	massive	massive	massive
H	1.053	0.986	1.305
L	1.160	0.903	0.993
H	0.978	0.969	0.884
L	1.106	0.870	0.863
H	1.152	0.855	0.793
L	0.840	0.830	0.759
H	0.913	0.700	0.658
L	0.219	0.402	0.601
substrate	massive	massive	massive

system 1: $n_k = 2.4, n_l = 1.4$, system 2: $n_k = 4, n_l = 2.2$

all substrates have n and k value of 13.4 and 58.4

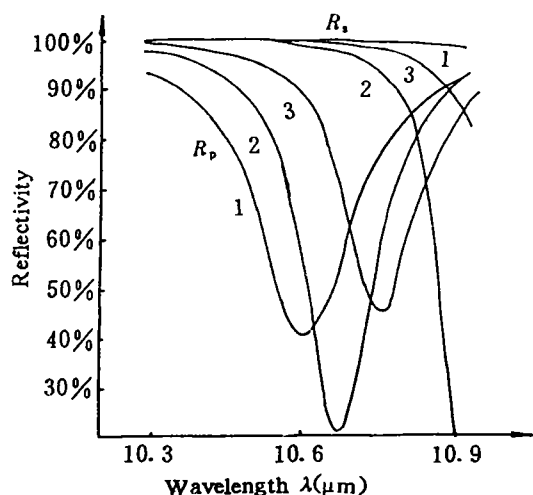


Fig. 3 Reflective spectra of the polarization locking mirrors with different optical film systems. Curve 1, 2 and 3 correspond to the system 1, 2 and 3 in table 1, respectively

2. 不同层数的优化结果

表 2 列出了 BaF₂, ZnSe 与 Mo 构成的八层、十层、十二层的腔内起偏器优化结构参数, 其 s 波和 p 波反射率曲线也绘于图 4。

Table 2 Optimization results of the polarization locking mirrors with the different film configuration

layer number	fractional quarter wave thickness		
	system 1 (n=8)	system 2 (n=10)	system 3 (n=12)
1	1.055	1.042	1.303
2	1.167	1.165	1.149
3	1.045	1.019	1.129
4	1.130	1.239	0.852
5	1.305	0.860	0.957
6	1.092	0.878	1.073
7	0.675	0.0884	0.136
8	0.32	0.131	0.136
9		0.822	1.029
10		0.215	1.067
11			0.794
12			0.207

Layer 1 is near the air, and higher index $n_h = 2.4$, as do all odd numbered layer; even numbered layers have index $n_l = 1.4$. The metallic substrate has n and k values of 13.4 and 58.4 respective

系, 高反射分量带宽却很窄, 且在长波处下降十分迅速, 致使中心波长 λ_0 处高反射分量达不到要求。

具体来说, 系统 1 的高反射偏振分量 (s 波) 可达 99.6%, 中心波长 λ_0 处的消光比也能符合要求 (>1.5) 高低反射分量相差 30%。而由 Ge, ZnS 与 Mo 构成的起偏器系统 2 与系统 3 的特性曲线表明, 系统 2 满足 $(R_s - R_p) > 30\%$ 要求。但是其高反射分量 R_s 仅有 98.2%; 系统 3 虽然高反射偏振分量值已有 99.3%, 其高低反射分量差值小于 30%。可见这组膜料构成的起偏器不可能同时达到两个设计指标, 即不宜用 Ge, ZnS 与 Mo 组合来制备 CO₂ 激光器的薄膜型腔内起偏器。

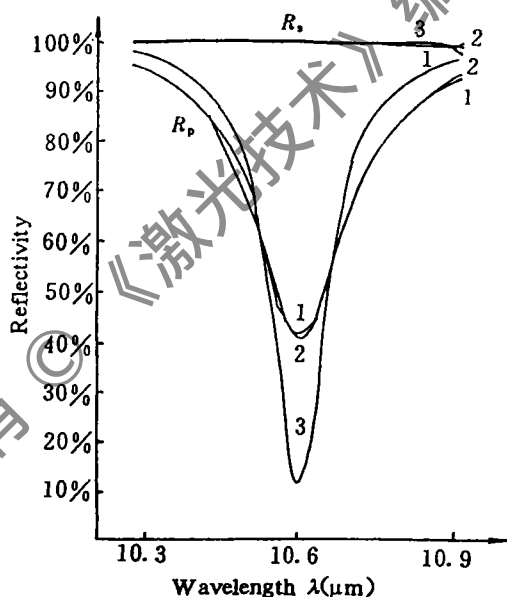


Fig. 4 Reflective spectra of the polarization locking mirror with the different film systems. Curve 1, 2 and 3 correspond to the system 1, 2 and 3 in table 2, respectively

由图 4 的反射曲线可以看出, 八层、十层特性相似, 具有相近的高、低反射偏振分量, 相近的带宽, 从而有相近的消光比, 它们与十二层结

构相比则存在较大的差异。直观看来,反射率曲线图上低反射分量曲线的中心凹陷越来越深。也就是说十二层结构的高反射偏振分量值提高到 99.8%,低反射分量降至 11%,而中心波长 $\lambda_0 = 10.6\mu\text{m}$ 处消光比 $K=9$,带宽变窄。

3. s 波高反射率起偏器与 p 波高反射率起偏器的比较

图 3 和图 4 均为 s 波高反射率起偏器。表 3 和图 5 给出了 p 波相应的结果。

Table 3 Optimization results of the s wave and p wave polarization locking mirror

	fractional quarter wave thickness	
	system 1	system 2
	$(R_h = R_s, R_l = R_p)$	$(R_h = R_p, R_l = R_s)$
air	massive	massive
H	1.064	1.194
L	1.138	0.775
H	1.051	1.018
L	1.102	0.873
H	0.878	0.933
L	1.162	0.798
H	0.844	0.843
L	0.208	0.286
substrate	massive	massive

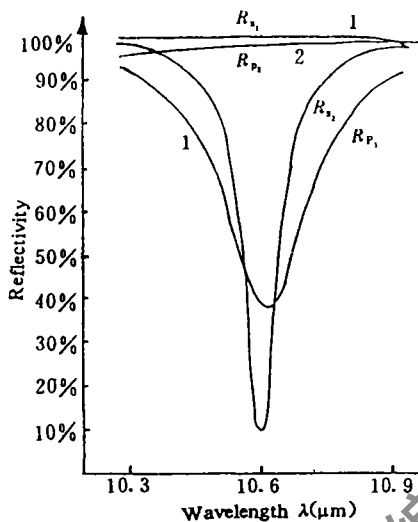


Fig. 5 Reflective spectra of the systems in table 3

For both system: $n_h = 2.4, n_l = 1.4, n_s = ik_s = 13.4 - 58.4i$ and here R_h is high reflectivity, R_l is low reflectivity

由图 5 可以看出, p 波高反射率起偏器的低分量曲线在中心波长 $\lambda_0 = 10.6\mu\text{m}$ 处有比 s 波高反射率起偏器深得多的凹陷,此时其消光比达 10(s 波高反射率起偏器仅有 2.2),但是带宽很窄,且高反射率偏振分量仅有 97.8%。这在高功率 CO_2 激光器谐振腔内是不实用的。因此,舍去了这种设计。

四、实验及结果

激光线偏振镜的实验研究分为镀膜和测试两部分。镀膜设备是由 DMDE-450 光学镀膜机改造而成的,主要特点是除普通的光学监控外,在真空室内配置了可实时测量任意物理厚度的石英晶振 IC6000 膜厚监控仪,辅以美国 Gaertner 手动椭圆仪保证了膜厚及折射率的精确控制与测量。

激光线偏振镜的特性测试是在如图 6 所示的装置上进行的,使用功率计分别测量 s 波、p 波入射样品前和反射后的功率,然后进行计算。

入射前 s 波、p 波测得功率分别为 W_{is}, W_{ip} , 反射后 s 波、p 波测得功率分别为 W_{os}, W_{op} , 则该样品的 s 波反射率 $R_s = W_{os}/W_{is}$, p 波反射率为 $R_p = W_{op}/W_{ip}$, 由 R_s, R_p 的粗测值可初步判断样品是

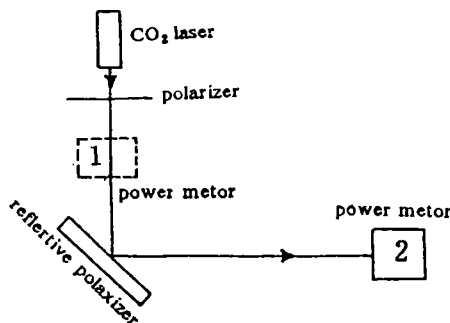


Fig. 6 Schematic diagram of measurement system for the polarization locking mirror

否能满足设计要求。

我们在国内率先进行的 CO₂ 激光线偏振镜研究工作,得到了较为满意的激光线偏振镜主要光学参数,为高功率 CO₂ 激光器的应用打下了良好的基础。

从发展看,激光偏振技术的应用前景是广阔的,激光加工中的主要工作是切割、焊接。目前,由于 CO₂ 激光器光束质量不高,大部分激光器用于热处理,这显然是应该改变的局面。将来我国自己生产的激光器也会应用偏振技术,改善光束质量,使激光器大部分用于切割、焊接。

参 考 文 献

- 1 Olsen F O. Cutting with polarized laser beams. 1st Ed. Lyngby/Denmark; DVS, 1980:197~200.
- 2 Macleod H A. Thin film optical filters. 2nd Ed. New York; Macmilan, 1986:18~30
- 3 周风晴,李晓平,陈清明. 科海百粟. 武汉:湖北科学技术出版社, 1993:186~197

* * *

作者简介:李晓平,男,1962年4月出生。工程师。现从事光学薄膜与激光技术的研究工作。

收稿日期:1993-11-22

· 广 告 ·

光华牌枪用瞄准镜系列产品

光华牌枪用瞄准镜系列产品是一种小型枪用瞄准镜,可与各种枪枝配套使用。它采用金属十字线代替传统的照门准星瞄准,能明显提高瞄准速度和精度,大大提高射击命中率。光学件采用全镀膜,外壳采用高强度铝合金材料,表面经精饰处理。环境适应性强,具有防水、防雾、防霉、抗震、耐冲击的能力。

光华牌系列双目望远镜

光华牌系列双目望远镜具有小巧轻便的特点,外观用橡胶全包裹,手感舒适。光学件全镀红宝石护眼膜,适应在高山、雪地、草原观赏大自然景色。无论是旅行,还是观看体育比赛,或是观赏大自然奇观,光华系列望远镜均能给您提供帮助,给您增添无限情趣。

重庆华光仪器厂

邮编: 630700

电话: (0811)864184, 863976, 863985

传真: (0811)864184

地 址: 重庆北碚双柏树

邮政信箱: 重庆市北碚 1541 信箱

电 挂: 北碚 0151

联 系 人: 尹江河