

激光与光电子学进展

基于折射棱镜的多波段激光合束方法

兰江, 何衡湘*, 陈俊, 王陈, 程帅, 张凌鹏, 石康旺, 邹硕颐, 丛俊凯

西南技术物理研究所, 四川 成都 610041

摘要 多波段激光合束技术在光电对抗领域的应用越来越受到重视, 基于此提出了一种使用折射棱镜组的多波段激光合束方法, 优选了牌号依次为 H-ZLaF92、D-ZLaF85LS、H-ZBaF21 的 3 种火石玻璃作为棱镜材料, 通过对棱镜组的顶角值、入射角度以及位置关系的计算和仿真, 设计了包含调整镜组、折射棱镜组、反射镜组和偏振滤光片的合束方案, 同时利用将单一线性偏振激光束电矢量方向调整为平行于入射面的方法减小反射损耗。分析计算表明: 在波长分别为 550 nm、1060 nm、2000 nm 情况下, 入射角分别选择 63.05°、61.35°、59.58°, 3 种材料的棱镜顶角值分别取 51°、55°、60°; 在光斑间距 ΔX_1 、 ΔX_2 分别为 10 mm、20 mm 的情况下, 3 种材料对应棱镜的远表面距离 D 、近表面距离 d 分别为 289 mm、83.5 mm、366.4 mm、107.7 mm、381.6 mm、103.6 mm; 在不进行光学镀膜的情况下, 仅使用单一线性偏振光以布儒斯特角入射, 也能够达到 92.8%~97.6% 的合束效率, 与现有多波段合束技术相比, 在成本方面有巨大的优势。

关键词 激光合束; 多波段合束; 折射棱镜; p 偏振; 合束效率

中图分类号 TN249

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP222301

Laser Multibeam Method Based on Refractive Prisms

Lan Jiang, He Hengxiang*, Chen Jun, Wang Chen, Cheng Shuai, Zhang Lingpeng,
Shi Kangwang, Zhou Shuoyi, Cong Junkai

Southwest Institute of Technical Physics, Chengdu 610041, Sichuan, China

Abstract The application of laser multibeam combining technology in the field of electro-optical countermeasures is receiving increased attention. This study proposes a laser multibeam method using a refractive prism group and three flint glasses (grades H-ZLaF92, D-ZLaF85LS, and H-ZBaF21) as the prism materials. By calculating and simulating the vertex angle, incident angle, and position relationship of the prism group, a beam combination scheme is designed based on the use of an adjusting mirror group, refracting prism group, reflecting mirror group, and polarizing filter. The reflection loss is reduced by adjusting the electric vector direction of a single, linearly polarized laser beam parallel to the incident plane. The analysis and calculations show that the wavelengths, incident angles, and apical prism angles of the three materials are 550, 1060, and 2000 nm; 63.05, 61.35, and 59.58; and 51, 55, and 60, respectively. When the spot distances ΔX_1 and ΔX_2 are 10 and 20 mm, respectively, the far surface distance D and near surface distance d values of the three materials corresponding to the prisms are 289 and 83.5 mm; 366.4 and 107.7 mm; and 381.6 and 103.6 mm, respectively. Without optical coating, a beam combining efficiency in the range of 92.8%–97.6% can be achieved using only a single linearly polarized light incident at the Brewster angle. Compared with the existing laser multibeam method, the proposed method has considerable cost advantages.

Key words laser beam combination; multibeam combining; refractive prism; p polarization; beam combining efficiency

1 引言

激光干扰技术采用激光束对光电目标进行照射使其光电传感器暂时“致盲”甚至永久失效, 失去捕捉、锁定和引导的能力, 达到干扰的目的, 被广泛应用于防空反导、平台光电防护等领域。由于目标光学传感器工

作波段不同, 为保证干扰效果, 发射的激光束波长需要与目标传感器工作波段相匹配, 但激光器输出波长与增益介质直接相关, 单个的激光器输出波长相对固定, 无法覆盖较宽的波长范围, 因此多波段激光合束技术应运而生。

多波段激光合束技术是指通过光学器件, 使得不

收稿日期: 2022-07-15; 修回日期: 2022-08-15; 录用日期: 2022-08-24; 网络首发日期: 2022-09-04

通信作者: hhxhyx@163.com

同光束在某指定区域重合,实现不同波长的激光束近平行或同轴输出。常见的多波段激光合束技术可以分为并行合束和串行合束两类^[1]。并行合束是指所有参与合束的激光同时通过合束器件后完成合束,比如使用光栅^[2]、透镜^[3]、偏转反射镜等^[4],具有合束功率大^[5]、参与合束的激光束多等优点^[6];串行合束是指让不同波长的激光束依次通过不同的合束器件后完成合束,常用的器件有反射棱镜^[7]、偏振分束镜^[8]、镀膜镜^[9]、滤波片^[10]等,其主要优点为合束效率高,但由于膜系设计困难和成本原因,难以提高合束激光束的数量。

棱镜是一种常见的光学器件,其对不同波长光线的折射角度不同,被广泛用于光谱仪器中。本文利用棱镜光谱仪的基本原理,设计了一种基于双折射棱镜的多波段激光合束方法,选择了成都光明公司的三款重火石玻璃,利用材料的色散数据对折射棱镜系统的顶角值、出射角度值等进行设计和优化,利用线性偏振光以布儒斯特角入射高透的原理,计算出合束系统的合束效率,同时使用 Zemax 软件来验证本方案的可行性,给出了可视化的结果,为后续工程的应用提供支撑。

2 合束基本原理

基于光的色散原理,光线通过折射率为 n 、顶角为 α 的单个棱镜时,出射光线相对于入射光线产生偏向角 δ ,波长 λ_1 和 λ_2 的偏向角分别用 δ_1 和 δ_2 表示,两个偏向角的差值为 $\Delta\delta$,激光在棱镜两次折射过程中的出射角和入射角依次为 i_1, i_2, i_3, i_4 ,如图 1 所示。理论上,如果设计不同波长的激光束以合适角度射入折射率为 n 和顶角为 α 的三棱镜,就能实现不同波长的激光同轴射出,实现合束。

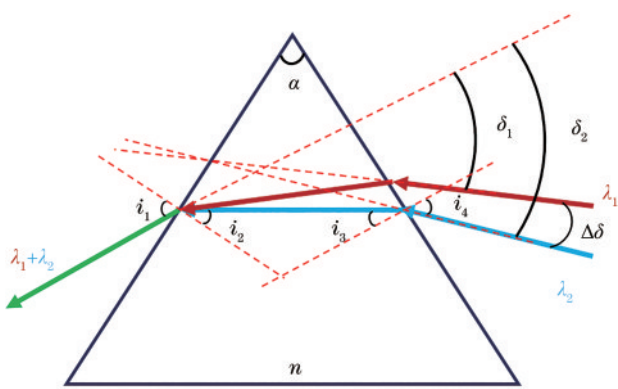


图 1 单棱镜折射分光原理图

Fig. 1 Schematic diagram of single prism beam split

由图 1 可以推导出偏向角表达式:

$$\delta = i_1 + \arcsin \left\{ n \cdot \sin \left[\alpha - \arcsin \left(\frac{\sin i_1}{n} \right) \right] \right\} - \alpha. \quad (1)$$

通过式(1)可以得到每束光线的偏向角 δ 是顶角 α 、出射角 i_1 、折射率 n 的函数,如果使用单棱镜对两束

光进行合束,不同波长入射光的夹角 $\Delta\delta$ 可由偏向角 δ 对波长 λ 求微分进行量化:

$$\frac{d\delta}{d\lambda} = \frac{d\delta}{dn} \cdot \frac{dn}{d\lambda} = \frac{\operatorname{darc} \sin \left\{ n \cdot \sin \left[\alpha - \arcsin \left(\frac{\sin i_1}{n} \right) \right] \right\}}{dn} \cdot \frac{dn}{d\lambda}. \quad (2)$$

通过式(2)可知,单个棱镜合束系统的决定项是棱镜材料的色散值,使用色散大的材料作为棱镜材料,能够增大入射光的夹角值。

但如果使用单棱镜设计合束系统,存在以下问题:

1) 单棱镜合束系统太过依赖棱镜材料本身的性能,在材料选定的前提下,难以通过设计对合束系统的性能进行优化和提升。2) 单棱镜的合光能力有限,相邻波长光束之间的夹角值一般只有几度,为此需要很大的空间来布置器件,不利于实际工程应用。以成都光明公司牌号为 H-ZBaF21 的玻璃为例,波长分别为 $0.68 \mu\text{m}$ 和 $1.064 \mu\text{m}$ 的两束激光以出射角 i_1 为 45° 通过顶角为 60° 的棱镜进行合束,折射率为 1.717、1.703,计算得到两束激光的入射夹角为 1.03° ,若想将两束直径为 50 mm 的光束同时射入棱镜进行合束,则需将出光口至少布置在 318 cm 以外,这将会使合束系统的体积十分庞大。3) 单棱镜合束系统对角度精度要求太高,在光电对抗的应用背景下,要求不同波长的激光束在几公里甚至几十公里外的光斑仍要重合在一起,但折射率数据是通过测量后进行拟合得到的近似数据,始终存在误差,因此每束光的入射夹角都是近似计算值,单棱镜合束系统也就很难保证出射的光斑在远点能够完全重合。

3 合束方案设计

为了解决单个棱镜合束系统合束性能不强、合束精度不高、尺寸太大等问题,提出了一种双折射棱镜合束方案,其结构如图 2 所示。主要包括两块顶角相同,斜边平行放置的折射棱镜、一组可以移动的反射镜和偏振滤光片以及三组缩束镜和一组扩束镜。所有激光和棱镜处于同一水平面,不同波长的激光经过缩束镜调整光束直径后射向反射镜,再一起平行射入棱镜 1 中,在两块棱镜之间经过四次折射后再从棱镜 2 平行射出,最后经过一组扩束镜对光束的直径和发散角进行调整;通过调节每个反射镜的上下位置,可以让不同波长的激光在合适位置射入棱镜 1,再从棱镜 2 的同一位置射出,达到合束的目的。

与单个棱镜合束系统相比,此设计方案将入射光束的角度控制转变为平行光束之间的距离控制,而对光束的距离微调要比角度微调简单很多,能够通过多组可平行移动的反射镜组实现;由于不再需要将光源位置布置很远来满足小夹角产生的分辨率

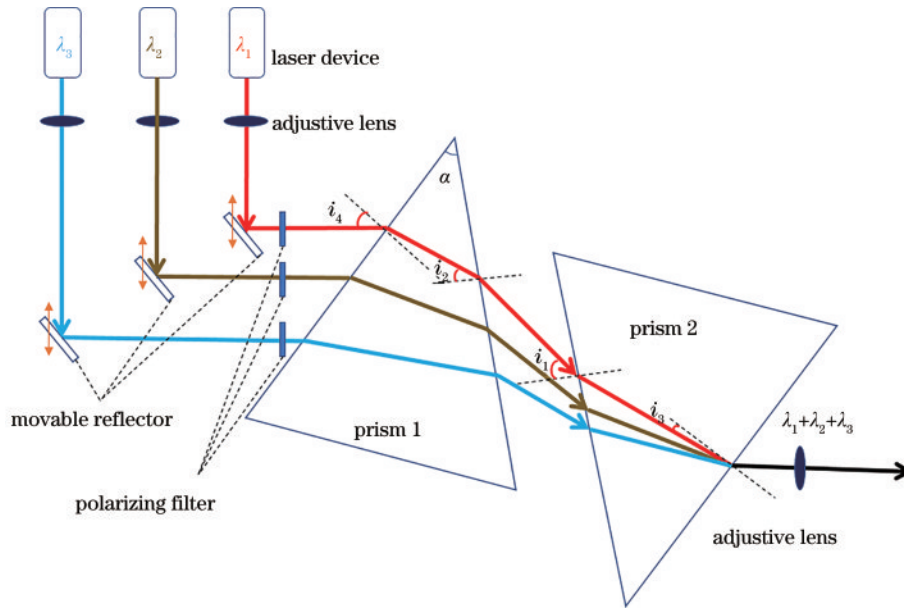


图 2 双折射棱镜组系统多波段激光合束原理图

Fig. 2 Schematic diagram of multi-band laser beam combination of birefringent prism system

问题,因此与单棱镜方案相比该合束方案能够有效减小合束系统的体积;相比单个棱镜系统,2个棱镜的组合让该系统有了更多变量,不再局限于棱镜材料的选择,这对合束系统设计和优化是十分有帮助的。

反射损耗是影响合束效率的主要因素,减小本合束系统中的4次反射损耗是提高系统合束效率的关键。根据布儒斯特角定律^[11]:当入射角与折射角之和为直角时,即反射光与折射光相互垂直,反射光中不存在振动方向的电矢量平行于入射面的分量(p分量),此时p分量入射波全部透射,这个入射角也被称作布儒斯特角 θ_B 。现有大多激光都是线偏振光,偏振比可达几百甚至上千^[12],如果将线性偏振激光器调整到p分量的振动方向,以布儒斯特角 θ_B 或接近 θ_B 的角度入射,就可以低成本并有效减小反射损耗^[13]。式(3)、式(4)分别是光束p分量的反射率 R_p 、透射率 T_p 的计算公式,在图1中,当光线从光疏介质射入光密介质时,入射角与出射角分别为 i_4 、 i_3 ;当光线从光密介

质射入光疏介质时,入射角与出射角分别为 i_2 、 i_1 。在不计材料的吸收和散射损耗时,反射率和透射率之和为1。

$$R_p = \frac{\tan^2(\theta_1 - \theta_2)}{\tan^2(\theta_1 + \theta_2)}, \quad (3)$$

$$T_p = \frac{\sin 2\theta_1 \sin 2\theta_2}{\sin^2(\theta_1 + \theta_2) \cos^2(\theta_1 - \theta_2)}, \quad (4)$$

式中: θ_1 、 θ_2 分别为折射过程中的入射角、出射角。

4 材料与波长选择

选用3种折射率较大的火石玻璃,牌号依次是H-ZLaF92、D-ZLaF85LS、H-ZBaF21,根据成都光明公司提供的材料折射率数据^[14],使用Sellmeier公式对其进行折射率拟合。

$$n^2 - 1 = \frac{k_1 \cdot \lambda^2}{\lambda^2 - L_1} + \frac{k_2 \cdot \lambda^2}{\lambda^2 - L_2} + \frac{k_3 \cdot \lambda^2}{\lambda^2 - L_3}, \quad (5)$$

式中: n 为材料折射率。常数 k_1 、 k_2 、 k_3 、 L_1 、 L_2 、 L_3 的拟合结果如表1所示。

表 1 Sellmeier公式拟合结果
Table 1 Sellmeier formula fitting result

Material	L_1	L_2	L_3	k_1	k_2	k_3
H-ZLaF92	123.0786	0.0597	0.0141	1.8676	0.3756	2.4593
D-ZLaF85LS	0.0080	0.0320	110.6793	1.7015	0.6333	1.4319
H-ZBaF21	0.0107	0.0536	127.6876	1.7145	0.1729	1.3759

根据表1的结果,绘制出3种材料的色散曲线,如图3所示。为得到间隔值合适的3组折射率参数,选取550 nm、1060 nm、2000 nm等3个波长作为本合束方案的激光光源。图4是这3种材料在厚度为10 mm时的

透射率曲线^[14],3种材料在550 nm、1060 nm、2000 nm等3个波段都具有95.9%以上的透射率,能够满足合束系统对透射率的基本需求。

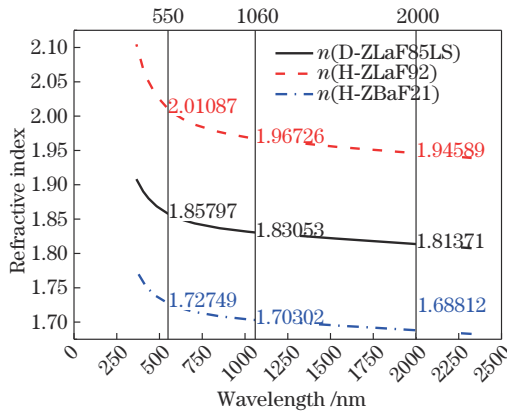


图 3 3 种玻璃材料的折射率拟合结果

Fig. 3 Refractive index fitting results of three kinds of glass materials

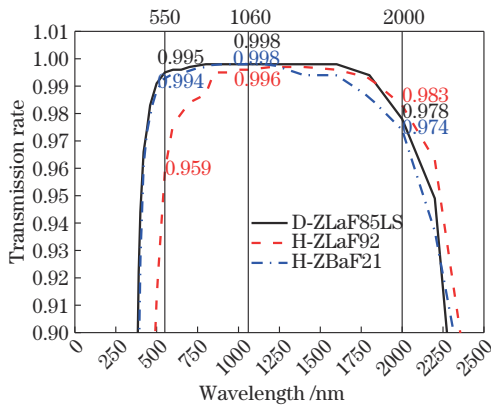


图 4 3 种玻璃材料的透过率曲线

Fig. 4 Transmittance curves of three kinds of glass materials

5 合束性能评价

5.1 合束效率

利用式(6)可以计算出 3 种材料对应不同波长的布儒斯特角 θ_B , 结果如表 2 所示。取中间波长值 1060 nm 对应的 θ_B 作为 3 种材料棱镜的入射角度 i_4 , 分别为 63.05° 、 61.35° 、 59.58° 。

$$\tan \theta_B = n_2/n_1 \quad (6)$$

表 2 不同材料在不同波长情况下的布儒斯特角 θ_B

Table 2 Brewster angle of different materials at different wavelengths unit: ($^\circ$)

Material	θ_B (500 nm)	θ_B (1060 nm)	θ_B (2000 nm)
H-ZLaF92	63.56	63.05	62.80
D-ZLaF85LS	61.71	61.35	61.13
H-ZBaF21	59.93	59.58	59.36

单个棱镜合束能力与棱镜顶角呈正相关, 如果棱镜顶角较小, 入射光线夹角比较小, 合束难度大, 但是如果棱镜顶角值过大, 光束在第二折射面会发生全反射现象, 阻碍合束, 因此, 棱镜顶角应该在避免全反射

的情况下尽量变大。如果两块一样的棱镜斜边平行放置, 则光束先后折射通过两块棱镜过程中的角度是对应且相等的, 即上一块的入(出)射角对应下一块棱镜的出(入)射角, 假设光束以 90° 在第一块棱镜入射来模拟光束在第二块棱镜出射面全反射的情况, 有以下关系式:

$$\begin{cases} n \cdot \sin(\alpha - i_3) = 1 \\ i_2 + i_3 = \alpha \\ \sin i_1 = n \cdot \sin i_2 \end{cases} \quad (7)$$

式中: i_1 、 i_2 、 i_3 、 i_4 分别如图 1 所示, 通过式(7)可以推导出全反射时的出射临界角的表达式:

$$i_1 = \arcsin\{n \cdot \sin[\alpha - \arcsin(1/n)]\} \quad (8)$$

H-ZLaF92、D-ZLaF85LS、H-ZBaF21 等 3 种玻璃材料的临界出射角图像如图 5 所示。3 种材料的棱镜在顶角依次大于 59.6° 、 65.1° 、 70.7° 的情况下, 光束由于全反射完全无法通过棱镜; 在顶角依次小于 29.9° 、 32.6° 、 35.4° 的情况下, 光束通过棱镜时不会发生全反射现象。

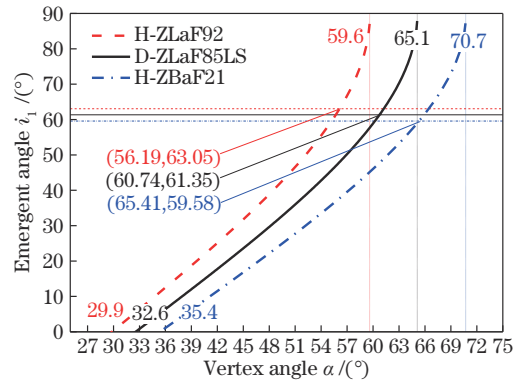


图 5 3 种玻璃材料棱镜对应的临界出射角

Fig. 5 Critical emergent angles corresponding to three kinds of glass prisms

出射角分别选择 63.05° 、 61.35° 、 59.58° , 根据图 5 得到在布儒斯特角作为出射角情况下临界顶角分别为 56.19° 、 60.74° 、 65.41° , 实际顶角 α 的选择要比临界顶角小一点, 按照小 5° 左右后凑整作为标准, 每种材料的 α 值分别取 51° 、 55° 、 60° 。在出射角和棱镜顶角确定后, 光束在棱镜中的各个入射角度都可以通过菲涅耳公式计算得出, 计算结果如表 3 所示, 表 3 中标注的 i_1 、 i_2 、 i_3 、 i_4 分别对应图 2 中的标注。

在已知 4 次折射的入射角后, 利用菲涅耳公式计算出对应的出射角, 再根据式(4)计算出 3 个波长的激光在折射通过棱镜过程中的透射率。取激光器的偏振比为 50:1, 即 p 偏振分量为 98%, 棱镜材料的吸收损耗如图 4 所示, 综合 4 次折射的透过率可以得到合束效率结果, 如表 4 所示, 可以看出双折射棱镜合束方案的最高合束效率可以达到 97.6%, 普遍的合束效率也在 92.8% 以上。

表 3 入射角计算结果
Table 3 Calculation results of incident angle

Material	Vertex angle $\alpha / (^\circ)$	Wavelength λ / nm	$i_4 / (^\circ)$	$i_3 / (^\circ)$	$i_2 / (^\circ)$	$i_1 / (^\circ)$
H-ZLaF92	51	550	63.05	24.69	26.31	57.16
		1060	63.05	24.06	26.94	53.33
		2000	63.05	23.74	27.26	51.57
D-ZLaF85LS	55	550	61.35	26.81	28.19	56.93
		1060	61.35	26.34	28.66	54.31
		2000	61.35	26.06	28.94	52.82
H-ZBaF21	60	550	59.58	30.05	29.95	59.89
		1060	59.58	29.96	30.42	58.26
		2000	59.58	29.29	30.71	55.68

表 4 合束效率计算结果
Table 4 Calculation results of beam combining efficiency

Material	Wavelength λ / nm	First refraction	Second refraction	Third refraction	Fourth refraction	Polarization ratio	Absorption ratio	Total efficiency
H-ZLaF92	550	0.99774	0.99166	0.99821	0.99993	50	0.959	0.92814
	1060	0.99741	0.98532	0.99253	0.99977		0.996	0.95188
	2000	0.99680	0.98085	0.99024	0.99999		0.983	0.93266
D-ZLaF85LS	550	0.99830	0.99595	0.99956	0.99997	50	0.995	0.96905
	1060	0.99735	0.99236	0.99708	0.99996		0.998	0.96512
	2000	0.99777	0.99018	0.99614	0.99999		0.978	0.94324
H-ZBaF21	550	0.99889	0.99995	0.99859	0.99998	50	0.994	0.97159
	1060	0.99866	0.99972	0.99963	0.99999		0.998	0.97608
	2000	0.99852	0.99809	0.99990	0.99999		0.974	0.95119

5.2 入射光束间距

张登玉等^[15]利用了双棱镜系统的色散量对其分光能力进行量化,主要描述了光束在棱镜间的距离 l 和分光能力呈正比关系,但应用于本课题存在以下的问题:1) 研究的参数较为单一,只有 l ,而 l 在实际工程应用中不易进行控制;2) 着重对棱镜间的部分进行讨论和计算,忽略了 2 个棱镜内部的光路;3) 本课题需要研究双棱镜系统的合束能力,与分光能力有一定区别,因此对双棱镜系统的理论进行分析。

在图 6 中,2 个棱镜出射、入射边平行放置,根据光

路可逆性原理,前一棱镜的光路可以看作后一棱镜的逆向光路,因此图 6 中棱镜 1 的入射角应等于棱镜 2 对应位置的出射角。由几何光学的知识可以得到以下的关系:

$$\begin{cases} \alpha = i_2 + i_3 \\ \sin i_1 = n \cdot \sin i_2, \\ \sin i_4 = n \cdot \sin i_3 \end{cases} \quad (9)$$

设置 i_4 为角度变量, i_1, i_2, i_3 都可以通过 i_4 进行表示:

$$i_1 = \arcsin\left\{n \cdot \sin\left[\alpha - \arcsin\left(\frac{\sin i_4}{n}\right)\right]\right\}, \quad (10)$$

$$i_2 = \alpha - \arcsin\left(\frac{\sin i_4}{n}\right), \quad (11)$$

$$i_3 = \arcsin\left(\frac{\sin i_4}{n}\right), \quad (12)$$

设两棱镜近表面和远表面的距离分别为 d, D , 在图 6 中,通过几何关系可以得到 m 和 h 的表达式为

$$m = D \cdot \tan i_3, \quad (13)$$

$$h = d / \cos i_1, \quad (14)$$

在图 6 的左下方三角形区域内运用正弦定理可以得到以下关系:

$$\frac{t}{\sin(i_1 - i_2)} = \frac{d}{\sin(90^\circ - i_1) \cdot \sin(90^\circ - i_3)}, \quad (15)$$

化简得到 t 的表达式为

$$t = \frac{d \cdot \sin(i_1 - i_2)}{\cos i_1 \cdot \cos i_3}, \quad (16)$$

式(13)~式(16)中的 i_1, i_2, i_3 由式(10)~式(12)进行替

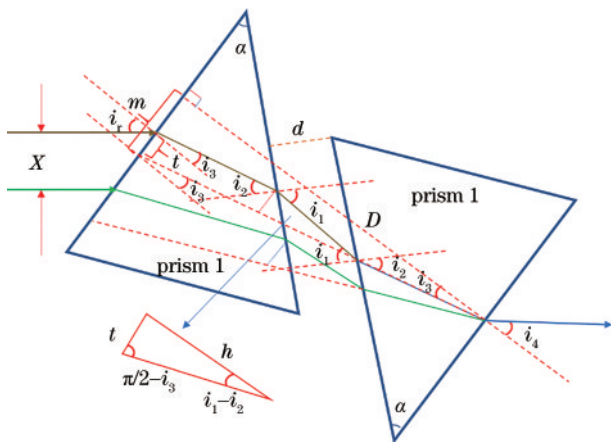


图 6 双棱镜系统光路示意图

Fig. 6 Schematic diagram of optical path of double prism system

换,在已知 m 和 t 的表达式后可以写出两条入射光束间距离 X 的表达式:

$$X = (\Delta m - \Delta t) \cdot \cos(90^\circ - i_4), \quad (17)$$

式中: Δm 、 Δt 分别为不同波长在棱镜组系统中的位置距离差,其表达式分别为

$$\Delta m = D \cdot \left\{ \tan \left[\arcsin \left(\frac{\sin i_4}{n_1} \right) \right] - \tan \left[\arcsin \left(\frac{\sin i_4}{n_2} \right) \right] \right\}, \quad (18)$$

$$\Delta t = d \cdot \Delta \left[\frac{\sin(i_1 - i_2)}{\cos i_1 \cdot \cos i_3} \right]_{n_1 - n_2}, \quad (19)$$

式中: n_1 、 n_2 分别为棱镜材料在这两种波长下对应的折射率。式(18)、式(19)具有相似的结构,都是距离常数乘以一个与折射率 n_1 、 n_2 相关的表达式,在棱镜材料、棱镜顶角、入射、出射角都不变的情况下,该表达式是一个确定的常数,如果分别用 y 和 z 替换,则 X 的表达式可以直接化简为

$$X = (D \cdot y - d \cdot z) \sin i_4, \quad (20)$$

入射光束间距 X 是衡量合束性能的重要指标之一, X 越大,则能够通过棱镜参与合束的光斑就越大,相同光斑大小情况下能够容纳更多的光束参与合束,系统的合束性能越好。通过化简后的式(20)可知:入射光束距离 X 与最远边的距离 D 呈正相关, D 越大则合束的性能越好;入射光束距离 X 与最近边的距离 d 呈负相关, d 越小则合束性能越好。在实际棱镜位置布置时,需要在保证光束全部通过某尺寸棱镜的情况下,使 D 尽可能大, d 尽可能小。

图 7 的两块棱镜可以沿 A 、 B 轨道滑动只改变 d ,沿 C 、 E 轨道滑动只改变 D 。如果 d 从 d_1 减小到 d_2 ,减少了两条光束在空气中的路径,而增加了在棱镜中的路径,如果 d 减小到 0,此时两块棱镜重合,等效于光束在一块矩形玻璃中进行了两次折射后射出,在这种情况下矩形的合束性能只和入射面和出射面的距离有关,此时只能增大两块棱镜的体积才能增加合束性能;如

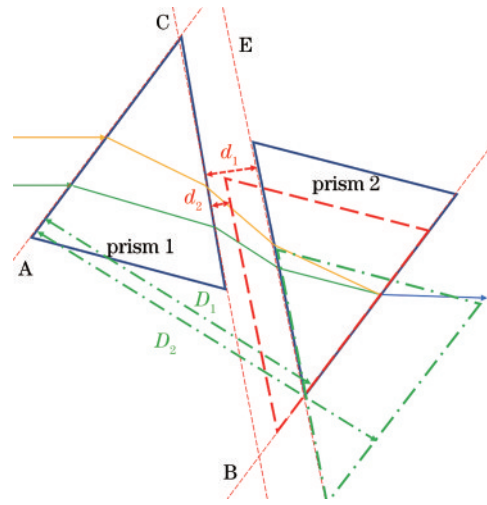


图 7 棱镜平移示意图

Fig 7 Schematic diagram of prism translation

果 D 从 D_1 增加到 D_2 ,部分光线无法正常从棱镜 2 的入射面进入,此时必须要增加这个等腰三角形棱镜的斜边长才可以让光束正常折射通过,同样变相增加了光束在棱镜内部的路径长度。综上,增加棱镜组系统合束性能的核心是增加光束在棱镜内的路径长度,实现该方法的方法有两种:1) 增大棱镜体积;2) 调整 d 和 D ,让光束尽量从靠近棱镜底边的部分通过。

根据表 2 中选择的棱镜顶角,导入 Zemax 软件顶角为 α ,腰长为 100 mm,厚度为 10 mm 的等腰三角形棱镜模型,设置波长分别为 550 nm、1060 nm、2000 nm,光束直径设置为 5 mm,入射角度分别为 63.05° 、 61.35° 、 59.58° ,得到其中一组仿真结果如图 8 所示。图 8(a) 为棱镜和光束分布的示意图,图 8(b) 为出射光斑在一个垂直于光束方向,直径为 60 mm 像面上的分布图,从上至下依次为波长为 2000 nm、1060 nm、550 nm 的光斑。在光斑间距 ΔX_1 、 ΔX_2 分别为 10 mm、20 mm 的情况下, H-ZLaF92、D-ZLaF85LS、H-ZBaF21 等 3 种材料的 D 、 d 分别为 289 mm、83.5 mm;366.4 mm、107.7 mm;

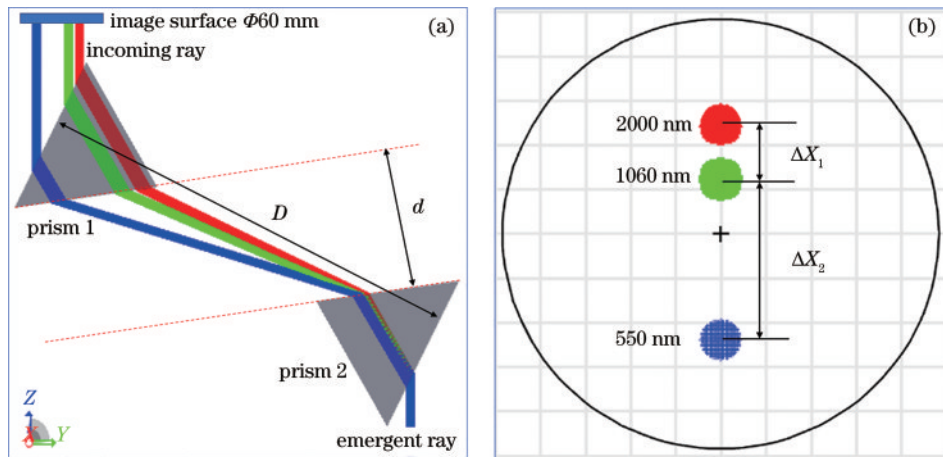


图 8 Zemax 仿真结果图。(a) 分布示意图;(b) 入射光斑分布

Fig. 8 Zemax simulation results diagram. (a) Distribution diagram; (b) incident spot distribution

381.6 mm、103.6 mm。3 种材料的 D 、 d 随折射率的增大而减小,因此使用折射率大的材料可以有效减小合束系统的体积。

6 结 论

设计了一种基于双折射棱镜的多波段激光合束系统,该系统采用了两块平行放置的折射棱镜,参与合束的激光束平行入射,通过调整反射镜的位置使参与合束的激光束在第二块棱镜同轴射出,完成合束。使用成都光明光电公司的三款高折射率光学玻璃进行计算,在入射角分别选择 63.05° 、 61.35° 、 59.58° 的情况下,3 种材料的棱镜顶角分别取 51° 、 55° 、 60° 。为了减小损耗,提高合束效率,利用 p 偏振光以布儒斯特角入射的原理,考虑 50:1 的偏振比和材料吸收损耗情况下,计算得到了本合束方案 550 nm、1060 nm、2000 nm 等 3 种波长的合束效率在 92.8% ~ 97.6% 之间。与传统双色片合束方案相比,本合束方案效率稍低一些,但不需要进行膜系的透射、反射窗口设计,降低了设计难度,极大降低了成本,同时折射棱镜组合束方案允许在材料的透射谱范围内插入不同波长的激光进行合束,无须像双色片那样重新设计膜系,避免了膜系设计的难度随参与合束激光数量的增加而几何增大的难题。

使用两块顶角为 α ,腰长为 100 mm,厚度为 10 mm 的等腰三角形棱镜模型进行仿真,在满足入射光斑间距 ΔX_1 、 ΔX_2 分别为 10mm、20mm 的情况下,H-ZLaF92、D-ZLaF85LS、H-ZBaF21 等 3 种材料的 D 、 d 分别为 289 mm、83.5 mm;366.4 mm、107.7 mm;381.6 mm、103.6 mm,在尺寸上能够满足实际工程应用的需求。同时注意到, D 、 d 随棱镜材料折射率的增大而减小,因此使用更高折射率的材料就可以使合束系统的尺寸进一步减小。

受限于材料的原因,设计参与合束的波长只到了 $2\ \mu\text{m}$,但如果考虑使用如 ZnSe、ZnS 等的红外玻璃材料,应该同样能够实现中红外甚至长波红外的折射棱镜合束,但由于材料的吸收损耗,合束的效率进一步降低。本研究着重于合束效率和尺寸的设计,合束系统热仿真和光束质量部分后续会深入研究。

参 考 文 献

- [1] Fan T Y. Laser beam combining for high-power, high-radiance sources[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2005, 11(3): 567-577.
- [2] Andrusyak O, Smirnov V, Venus G, et al. Applications of volume Bragg gratings for spectral control and beam combining of high power fiber lasers[J]. Proceedings of SPIE, 2009, 7195: 71951Q.
- [3] 王艺,雷广智,余立冬,等.高功率矩形光斑激光非相干空间合束[J].红外与激光工程,2022,51(4):20210268. Wang Y, Lei G Z, Yu L D, et al. High power laser

- incoherent spatial beam combining with rectangular spot [J]. Infrared and Laser Engineering, 2022, 51(4): 20210268.
- [4] 郭豹,张兵,黄伟,等.一种基于偏转镜的激光空间合束方法研究[J].电光与控制,2018,25(5):96-99,114. Guo B, Zhang B, Huang W, et al. A laser beam-combining method in space based on deflection mirror[J]. Electronics Optics & Control, 2018, 25(5): 96-99, 114.
- [5] 宁永强,陈泳屹,张俊,等.大功率半导体激光器发展及相关技术概述[J].光学学报,2021,41(1):0114001. Ning Y Q, Chen Y Y, Zhang J, et al. Brief review of development and techniques for high power semiconductor lasers[J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(1): 0114001.
- [6] 韩金樑,张俊,单肖楠,等.基于半导体激光合束技术的高功率加热光源[J].光学学报,2021,41(22):2214001. Han J L, Zhang J, Shan X N, et al. High power heating light source based on semiconductor laser beam combination technology[J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(22): 2214001.
- [7] Ohashi H, Gao X, Okamoto H, et al. Enhancement of emitting power density with a beam-shaping technique for a high-power laser-diode array stack[J]. Optical Engineering, 2004, 43(10): 2206-2207.
- [8] Shen Y J, Qian C P, Duan X M, et al. High-power long-wave infrared laser based on polarization beam coupling technique[J]. High Power Laser Science and Engineering, 2020, 8: e12.
- [9] Ludewigt K, Liem A, Stuhr U, et al. High-power laser development for laser weapons[J]. Proceedings of SPIE, 2019, 11162: 1116207.
- [10] Chen F, Zhang J Y, Ma J, et al. Beam quality analysis and optimization for 10 kW-level spectral beam combination system[J]. Optics Communications, 2019, 444: 45-55.
- [11] 叶玉堂,肖峻,饶建珍.光学教程[M].2版.北京:清华大学出版社,2011:132-140. Ye Y T, Xiao J, Rao J Z. Optics course[M]. 2nd ed. Beijing: Tsinghua University Press, 2011: 132-140.
- [12] 汤晓晖,陈险峰,胡企铨,等.提高LD端泵绿光激光器偏振比的方法[J].激光与红外,2009,39(9):931-933. Tang X H, Chen X F, Hu Q Q, et al. A way to increase polarization ratio of LD pumped green laser[J]. Laser & Infrared, 2009, 39(9): 931-933.
- [13] 李春,金春水,靳京城,等.193 nm P偏振光大角度减反射膜的实现[J].中国激光,2013,40(9):0907001. Li C, Jin C S, Jin J C, et al. Realization of antireflection coatings for 193 nm P-polarized light at large angle[J]. Chinese Journal of Lasers, 2013, 40(9): 0907001.
- [14] CDGM. CDGM 产品列表-光学玻璃-特种火石剥玻璃-下载 [EB/OL]. [2022-06-03]. http://www.cdgm.com/go.htm?k=te_zhong_huo_shi_bo_li&url=goods. CDGM. CDGM product list-optical glass-special flint peeling glass-download[EB/OL]. [2022-06-03]. http://www.cdgm.com/go.htm?k=te_zhong_huo_shi_bo_li&url=goods.
- [15] 张登玉,苏辉,郭萍.二棱镜系统二阶和三阶色散的理论计算[J].光学技术,2007,33(1):95-97,101. Zhang D Y, Su H, Guo P. Theory calculation for second and third order dispersion in two-prism device[J]. Optical Technique, 2007, 33(1): 95-97, 101.