

准共轴多波长红外激光二极管的光束准直技术

薛明晰¹ 陈志斌¹ 王伟明¹ 王晓燕^{1,2}

(¹ 石家庄机械工程学院新技术应用研究所, 河北 石家庄 050003)
(² 中国电子科技集团公司第十三研究所, 河北 石家庄 050000)

摘要 提出了一种多波长红外激光二极管的封装结构, 为了提高该二极管输出的 860、905、1064 nm(脉冲/单模)等多种波长激光光束的平行性, 对该封装结构下几种光束的准直技术展开研究。通过对高斯光束在傍轴、离轴两种状态下的成像分析, 总结并提出了一种“准共轴”激光光束的成像理论, 在该理论基础之上设计了多波长激光二极管的准直光学系统, 并通过光学设计软件建立了相应的光路模型。在该光路模型指导下制备了多波长激光光源样机, 并通过实验对该样机输出的“准共轴”光束的平行性进行验证。实验结果表明, 该样机体积小、质量轻, 其输出的“准共轴”光束覆盖了 860、905、1064 nm(脉冲/单模)等多种波长, 并具备良好的平行性。

关键词 光学设计; 激光二极管; 多波长; 准共轴; 准直

中图分类号 O439 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201441.0502008

Research on Quasi-Coaxial Beams Collimation Technique of Multi-Wavelength Infrared Laser Diode

Xue Mingxi¹ Chen Zhibin¹ Wang Weiming¹ Wang Xiaoyan^{1,2}

(¹ College of Mechanical Engineering, Shijiazhuang New Technology Application Institute, Shijiazhuang, Hebei 050003, China)
(² The 13th Research Institute, China Electronics Technology Group Corporation, Shijiazhuang, Hebei 050000, China)

Abstract We present a packaging structure of multi-wavelength infrared laser diode and study the beams collimation techniques under this structure for improving beams parallelism of wavelengths at 860 nm, 905 nm and 1064 nm (pulse/single). By the imaging analysis of Gaussian beam in both paraxial and off-axial conditions, we summarize and present an imaging theory of “quasi-coaxial” laser beams. The collimating optical system is designed by this imaging theory, and corresponding optical paths are modeling by the optical-design software. A prototype of multi-wavelength laser source is prepared under the guidance of optical paths model, and the parallelisms of “quasi-coaxial” beams are tested by a verification experiment. The experimental results show that the “quasi-coaxial” beams of 860 nm, 905 nm and 1064 nm (pulse/single) have well parallelisms.

Key words optical design; laser diode; multi-wavelength; quasi-coaxial; collimation

OCIS codes 140.2020; 120.1680; 140.3295

1 引言

红外激光二极管(LD)光源广泛应用于测试红外波段激光设备的接收灵敏度、测量精度及抗干扰性等性能^[1-4], 这些光源仪器在使用过程中大多存在通用性和便携性不高的问题, 或波长单一, 或体积

庞大。因此, 如何扩大检测光谱的覆盖范围、压缩光源设备的体积质量一直是激光测试计量光源研发的主要方向之一。近年来, 国外某些光电子企业研制并生产了一批多色发光器件和多束激光二极管, 基本覆盖了 470 ~ 800 nm 的可见光和近红外光

收稿日期: 2013-12-05; **收到修改稿日期**: 2013-12-20

基金项目: 总装人才战略工程专项资助基金(装政[2013]714号)

作者简介: 薛明晰(1985—), 男, 博士研究生, 主要从事光电测试计量方面的研究。E-mail: shangxinboy@163.com

导师简介: 陈志斌(1965—), 男, 博士, 研究员, 主要从事光电测试计量及红外目标识别跟踪等方面的研究。

E-mail: czb1301@163.com(通信联系人)

谱^[5-7]。由于这些器件主要应用于 DVD/CD 的刻录、播放和激光打印,因此其中的某些技术指标无法满足红外激光检测对光源的精度要求(如峰值光谱半宽、焦平面及准直精度等)。本文基于上述需求提出一种能够集成 860、905、1064 nm(脉冲/单模)4 种半导体激光芯片的多波长红外激光二极管封装方案,并对影响该激光二极管发射精度的因素进行分析;通过对多波长激光二极管发射光路的建模求解影响其光束平行性的工艺参数,并对其输出光束平行性进行仿真分析;在该模型指导下,制备出一台具有良好便携性能的多波长激光二极管光源样机,并通过实验验证其输出光束的发射精度。

2 多波长激光二极管封装设计

根据几种常见待测激光设备的技术指标,初步选择 860、905、1064 nm 三种波长作为多波长激光二极管的工作波长,其中 860 nm 和 905 nm 两种波

长激光为脉冲工作模式,1064 nm 波长包括脉冲、单模两种工作模式。根据上述几种芯片的峰值波长、发散角、发光端面等光电特性,提出了多波长激光二极管的封装方案。

2.1 主要光电特性分析

待封装芯片的主要光电特性的测试结果如表 1 所示。其中 $\lambda_1 \sim \lambda_3$ 的测试条件为 $(25 \pm 3)^\circ\text{C}$,驱动电流为脉冲电流 ($I = 20\text{ A}$, $f = 5\text{ kHz}$,脉宽 100 ns); λ_4 的测试条件为常温 $(25 \pm 3)^\circ\text{C}$,驱动电流为直流 ($I = 50\text{ mA}$)。根据 $\lambda_1 \sim \lambda_4$ 的光电特性,并结合实际应用中的需求,总结并提出了多波长激光二极管的封装要求:1) 半导体激光芯片 $\lambda_1 \sim \lambda_4$ 封装于同一衬底,并可同时或单独驱动;2) $\lambda_1 \sim \lambda_4$ 发光端面位于各自焦平面内,确保发射精度;3) 发光端面与衬底之间保留足够空间,避免光束被衬底材料吸收而影响聚光效率。

表 1 几种半导体激光芯片的主要光电特性

Table 1 Main photoelectric characterizations of several semiconductor laser chips

Chips	Peak wavelengths /nm	Luminescent face /mm	Divergence (fast axis)	Divergence (slow axis)
λ_1	860 ± 5	0.190×0.001	25°	10°
λ_2	905 ± 5	0.190×0.001	25°	10°
λ_3	1064 ± 10	0.190×0.001	25°	10°
λ_4	1064 ± 10	0.003×0.001	30°	10°

2.2 封装方案设计

根据以上要求,提出了一种多波长激光二极管的封装方案,如图 1 所示:通过一定工艺,将半导体激光芯片 $\lambda_1 \sim \lambda_4$ 封装在四边形热沉衬底的 4 个侧面;通过激光二极管底座引出 5 路引脚,其中 1 路阴极引脚 $\lambda_1 \sim \lambda_4$ 共用,其他 4 路分别为 $\lambda_1 \sim \lambda_4$ 的正极; λ_1 (860 nm) 发光端面与衬底前端平齐, $\lambda_2 \sim \lambda_4$ 发

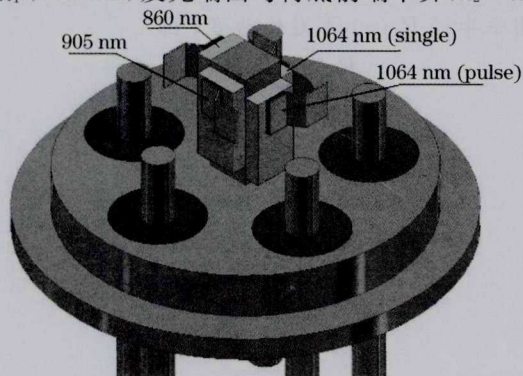


图 1 多波长激光二极管封装工艺示意图

Fig. 1 Packaging schematic diagram of multi-wavelength laser diode

光端面分别与 λ_1 后方的各焦平面重合;为了保证 $\lambda_2 \sim \lambda_4$ 在发射光束时发光端面下方保留足够空间,需在芯片和衬底间加入载体,载体厚度取决于 $\lambda_2 \sim \lambda_4$ 快轴方向上的半发散角 θ_i ($i=2,3,4$)。考虑到因中央四边形衬底截面尺寸所导致的 $\lambda_1 \sim \lambda_4$ 发射光束的离轴问题会对多波长激光二极管发射精度造成难以避免的影响,本方案中有两项工艺参数需要通过光路建模等方法进行论证和计算:1) 四边形衬底截面的尺寸;2) 半导体激光芯片 $\lambda_1 \sim \lambda_4$ 发光端面的相对距离。上述两项参数直接影响了多波长激光光源输出光束的平行性。

3 多波长激光二极管准直光路模型

通过对多波长激光二极管封装方案的分析可知,决定 $\lambda_1 \sim \lambda_4$ 光束平行性的因素除准直透镜组外,主要有两项参数:1) 半导体激光芯片的离轴参量,即四边形衬底截面的尺寸;2) $\lambda_1 \sim \lambda_4$ 在准直光学系统下的后截距,即各发光端面的相对距离。可以通过建立 $\lambda_1 \sim \lambda_4$ 光束的准直光路模型,对上述两项参数进行求解。

3.1 傍轴光束成像理论分析

激光光束经准直透镜变换后的发散角是评价光束平行性的重要参数。通过表 1 中两个正交方向的发散角参数可知,垂直于发光端面的发散角大,光束发散速度快,该方向被称为快轴;平行于发光端面的发散角小,因此被称为慢轴。当光束经过透镜变换后,在快轴、慢轴方向上的发散角变化情况如下。

3.1.1 快轴发散角分析

从 $\lambda_1 \sim \lambda_4$ 端面输出的激光光束在快轴方向上 ($y-z$ 平面) 可以近似为基模高斯光束^[5-6]。高斯光束在快轴上的发光端面尺寸近似于点光源,其传播和变换的过程如图 2 所示:孔径角 θ_1 (快轴全发散角的 1/2)、束腰半径 ω_0 的高斯光束经距离 z_1 到达焦距为 f'_1 的准直透镜,经透镜变换后物方主面和像方主面上的光束截面半径满足 $\omega_1 = \omega'_1$,变换前后的波面曲率半径分别为 R_1 和 R'_1 ,变换后的束腰半径为 ω'_0 ,从准直透镜的像方主面到束腰位置 z' 遵守符号规则。变换后的发散角 θ'_1 可以由(1)~(7)式计算。

$$\omega_0 = \frac{\lambda}{\pi\theta_1} \quad (1)$$

$$\omega_1 = \omega_0 \sqrt{1 + \left(\frac{\lambda z_1}{\pi\omega_0^2}\right)^2} \quad (2)$$

$$R_1 = z_1 \left[1 + \left(\frac{\pi\omega_0^2}{\lambda z_1}\right)^2 \right] \quad (3)$$

$$R'_1 = \frac{1}{(1/R_1) + (1/f'_1)} \quad (4)$$

$$\omega'_0 = \frac{\omega'_1}{\sqrt{1 + [\pi(\omega'_1)^2/\lambda R'_1]^2}} \quad (5)$$

$$z' = \frac{R'_1}{1 + [\lambda R'_1/\pi(\omega'_1)^2]^2} \quad (6)$$

$$\theta'_1 = \arctan\left(\frac{\lambda}{\pi\omega'_0}\right) \quad (7)$$

设准直透镜的焦距 $f'_1 = 60$ mm(d 光),根据多波长激光二极管封装方案, $\lambda_1 \sim \lambda_4$ 的发光端面均位于各自波长的焦平面内,即束腰位置 $z_1 = f'_1$ 。光束

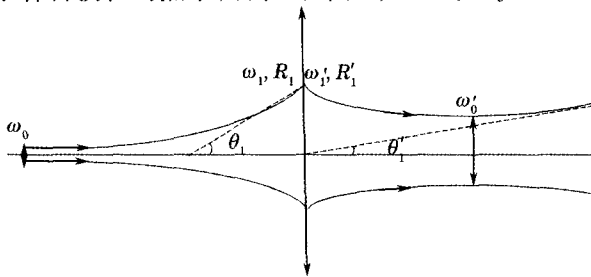


图 2 高斯光束传播和经过一次变换的原理图
Fig. 2 Principle diagram of propagation and once transmission by Gaussian beam

$\lambda_1 \sim \lambda_4$ 中快轴发散角最大的光束(波长 1064 nm,快轴孔径角 15° ,焦距略大于 60 mm)经准直透镜变换后,其快轴方向最大孔径角略大于 0.02 mrad。

3.1.2 慢轴发散角分析

由表 1 可知高斯光束在快轴上的发光端面尺寸远大于慢轴方向的尺寸,因此可按照置于焦平面的线光源近似。根据拉格朗日-亥母霍兹光学不变量原理,若采用有焦透镜系统进行准直,则准直后的孔径角 θ'_2 的大小为

$$\theta'_2 = \frac{h}{f'}, \quad (8)$$

式中 h 为线光源半长度, f' 为透镜焦距,光束 $\lambda_1 \sim \lambda_4$ 中慢轴方向最大线宽 $h = 0.095$ mm,取 d 光焦距 $f' = 60$ mm,经准直透镜变换后,慢轴方向最大孔径角略低于 1.58 mrad。不难看出慢轴方向的光束平行性取决于准直透镜的焦距, f' 越大光束发散角越小。以上快、慢轴发散角分析均建立在未考虑衬底尺寸的条件下。

3.2 “准共轴”光束成像理论分析

根据 3.1.1 节中的分析可知,基模高斯光束的发散角取决于该光束的波面曲率分布函数 $R(z)$ 和光束截面分布函数 $\omega(z)$ 。当尺寸为 $2l$ 的衬底前端置于中心光轴时,衬底四周的激光芯片 $\lambda_1 \sim \lambda_4$ 的发光端面均在各自的 y 方向偏离光轴,可以根据此时傍轴光束和离轴光束的几何关系来分析上述两种分布函数的变化。通过表 1 可知,快轴方向上发光端面尺寸近似于点光源,因此只考虑 $\omega(z)-z$ 面上的分布即可。

如图 3 所示,将傍轴光束 $\lambda_i (i = 1, 2, 3, 4)$ 平移到离轴坐标 $\omega(z) = l$ 平面内。根据几何关系,此时的离轴光束 $\lambda_j (j = 1, 2, 3, 4)$ 在物空间传播过程中,波面曲率半径 $R_j(z)$ 不发生改变,即

$$R_j(z) = R_i(z), \quad (9)$$

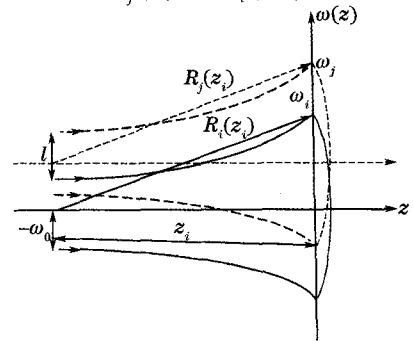


图 3 离轴高斯光束波面变化示意图
Fig. 3 Variation schematic diagram of off-axial Gaussian beam wave surface

当离轴光束 $\lambda_j (j = 1, 2, 3, 4)$ 经距离 z_i 到达焦距为 f'_i 的准直透镜时,其在透镜像方主面上的光束截面半径满足 $\omega'_j(z_i) = \omega_j(z_i)$ 。若准直透镜为球面系统,此时的离轴光束波面曲率半径 $R_j(z_j)$ 的大小为

$$R_j(z_j) = R_i(z_i) \pm [R_i(z_i) \mp \sqrt{R_i^2(z_i) - l^2}], \quad (10)$$

式中 z_j 的大小可由(3)式推算。设图3中 $\omega(z)$ 轴为准直透镜左侧第一球面(曲率半径 r_1),根据符号规则,当球面为凸面时,(10)式等号右边的符号关系为先正后负;当球面为凹面时,等号右边的符号关系为先负后正。由(2)式可知,此时离轴光束在透镜物方主面的曲率半径为:

$$\omega_j(z_j) = \omega_0 \sqrt{1 + \left(\frac{\lambda_j z_j}{\pi \omega_0^2}\right)^2}. \quad (11)$$

若离轴坐标 $y=l$ 位于近轴范围内,离轴光束在像空间内的波面曲率半径 $R'_j(z'_j)$ 仍满足近轴成像公式

$$\frac{1}{R'_j(z)} = \frac{1}{R_j(z_j)} + \frac{1}{f'_i}, \quad (12)$$

经透镜变换后物方主面和像方主面上的光束截面半径满足 $\omega_j(z_j) = \omega'_j(z'_j)$,其远场光束的束腰半径 $\omega'_{j0}(z'_j)$ 和束腰位置 z'_j 分别为

$$\omega'_{j0}(z'_j) = \frac{\omega'_j(z_j)}{\sqrt{1 + \{\pi[\omega'_j(z_j)]^2/\lambda_j R'_j(z'_j)\}^2}}, \quad (13)$$

$$z'_j = \frac{R'_j(z_i)}{1 + [\lambda_j R'_j(z'_j)/\pi \omega_j^2(z_i)]^2}, \quad (14)$$

从准直透镜的像方主面到束腰位置 z_j 遵守符号规则。则离轴光束经过透镜变换后的远场发散角 θ'_j 大小为

$$\theta'_j = \arctan\left[\frac{\lambda}{\pi \omega'_{j0}(z'_j)}\right]. \quad (15)$$

同理可知傍轴光束 λ_i 经透镜变换后的发散角为

$$\theta'_i = \arctan\left[\frac{\lambda}{\pi \omega'_{i0}(z'_i)}\right], \quad (16)$$

式中成像后的束腰半径 $\omega'_{i0}(z'_i)$ 可以由(1)~(5)式计算。

当傍轴光束 λ_i 的发光端面在垂直于光轴方向位移 l 变成离轴光束 λ_j 后,其准直成像后的发散角 θ'_j 和 θ'_i 相比并无明显变化,此时的离轴光束 λ_j 称为傍轴光束 λ_i 的“准共轴”光束。结合多波长激光二极管对光束发射精度的要求,多波长激光二极管的“准共轴”条件为

$$|\theta'_i - \theta'_j| \leq 0.1 \text{ mrad} (i, j = 1, 2, 3, 4), \quad (17)$$

(17)式的物理意义可以表述为:光束 λ_i 在垂直于光轴方向离轴时,其准直成像后的发散角变化不超过

0.1 mrad。能够满足(17)式的截面尺寸为 $2l$ 的衬底结构称为多波长激光二极管的“准共轴”结构,根据(9)~(17)式的分析可知, l 越小,(17)式中的差值越小,其输出光束的平行性越佳。

3.3 准共轴光学系统光路仿真

多波长激光二极管的初始准直光路如图4所示,由一片弯月镜和一组双胶合透镜组成。弯月镜的材料为ZF7,双胶合透镜的材料分别为F4和K9,透镜的入瞳直径为40 mm。准直光学系统的主要结构参数如表2所示。根据符号规则,表内曲面1~5按从左至右排列,弯月镜ZF7为负透镜,通过表中的参数可以计算该光学系统的可见光(d光)、860、905、1064 nm等波长的焦平面位置,即激光芯片 $\lambda_1 \sim \lambda_4$ 在光轴上的位置。

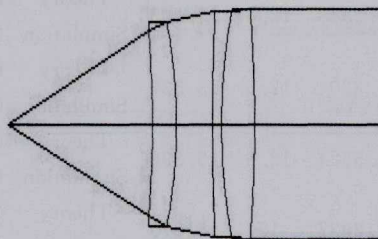


图4 准直光学系统的初始光路

Fig. 4 Initial optical path of collimating optical system

表2 准直光学系统的结构参数

Table 2 Structure parameters of collimating optical system

Surface	Radius /mm	Thickness /mm	Glass	Entrance pupil /mm
1	-78.89	8	ZF7	40
2	-38	12.033		
3	189.087	3	F4	
4	43.74	11	K9	
5	-105	44		

在上述初始光路的基础上,通过改变光学设计软件中光场参数中的物面高度,并运用软件中的倾

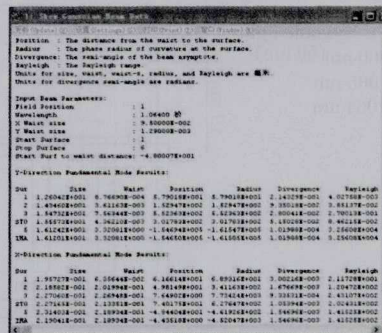


图5 1064 nm 离轴高斯光束的光路仿真结果

Fig. 5 Simulation results of 1064 nm off-axis Gaussian beam

斜高斯光束功能,对多波长激光二极管的准共轴光路进行建模和仿真:1)在波长参数设置发散角最大的光束 $\lambda_4(1064\text{ nm})$ 为主波长;2)综合考虑(17)式“准共轴”条件和现有机械加工工艺所能达到的最高精度,在光场参数中的物面高度参数中设置离轴坐标 $y=l=0.94\text{ mm}$;3)由(1)式和表1计算该光束在 y 方向和 x 方向上的大小,并求解该波长在准直透镜组物面内的截距位置,将以上参数输入到软件中的倾斜高斯光束程序中,得到离轴光束 λ_4

(1064nm)的光路仿真结果如图5所示。

结果显示: $\lambda_4(1064\text{ nm})$ 在快轴方向(y 方向)上的孔径角约为 0.1 mrad ;如果将光场参数中的物面高度改为0,即将光束 λ_4 恢复为傍轴状态,此时的快轴孔径角约为 0.02 mrad 。两者的差值满足(17)式的“准共轴”条件。同理可以按照上述步骤分别对光束 $\lambda_1\sim\lambda_3$ 的光路进行仿真,并将仿真结果和3.1节以及3.2节中的理论计算结果进行对比,如表3所示。

表3 多波长激光光源光束平行性参数($l=0.94\text{ mm}$)

Table 3 Beams parallelism parameters of multi-wavelength laser source ($l=0.94\text{ mm}$)

λ_i/nm	$\omega_{i0\perp}/\mu\text{m}$	$\theta_{i\perp}/^\circ$	$\omega'_{i0\perp}/\text{mm}$	Direction of fast axis				Direction of slow axis				
				Paraxial		Off-axial		h/mm	$\theta_{i\parallel}/^\circ$	$\theta'_{i\parallel}/\text{mrad}$		
860	1.2548	12.5	13.305	Theory	0.0206	14.245	Theory				0.0339	0.095
				Simulation	0.0205		Simulation	0.0859	Simulation	1.5579		
905	1.3204	12.5	13.327	Theory	0.0216	14.267	Theory	0.0341	0.095	5	Theory	1.5551
				Simulation	0.0216		Simulation	0.0857			Simulation	1.5553
1064 (pulse)	1.5524	12.5	13.399	Theory	0.0253	14.339	Theory	0.0362	0.095	5	Theory	1.5468
				Simulation	0.0253		Simulation	0.0868			Simulation	1.5470
1064 (single)	1.2937	15	16.079	Theory	0.0211	17.019	Theory	0.0381	0.095	5	Theory	0.0244
				Simulation	0.0210		Simulation	0.1017			Simulation	0.0382

仿真结果显示,光束 $\lambda_1\sim\lambda_4$ 在傍轴、离轴两种状态下经光学系统准直后的孔径角差值均能够满足(17)式的“准共轴”条件。因此,截面为 $1.98\text{ mm}\times 1.98\text{ mm}$ 的多波长激光二极管衬底符合“准共轴”结构要求。

均可以在多波长激光二极管光路模型的指导下完成。

4 多波长激光光源光束平行性验证实验

多波长激光二极管的“准共轴”结构对改善其光束平行性的实际效果需要制备原理样机并通过实验来验证。多波长二极管的封装乃至光源样机的制备

4.1 器件封装及光源样机制备

多波长激光二极管的芯片封装工艺如图6所示:1)发光端面: $\lambda_1\sim\lambda_4$ 的焦面位置可以根据3.3.1节准直光学系统下860、905、1064 nm三种波长的后截距(焦平面位置)来确定,此外在可见光焦平面位置设置一个十字分划板,用于光轴对准及校正;2)衬底:衬底尺寸符合“准共轴”结构要求,即 $2l=1.88\text{ mm}$ 。封装完毕的多波长激光二极管如图7(a)所示。

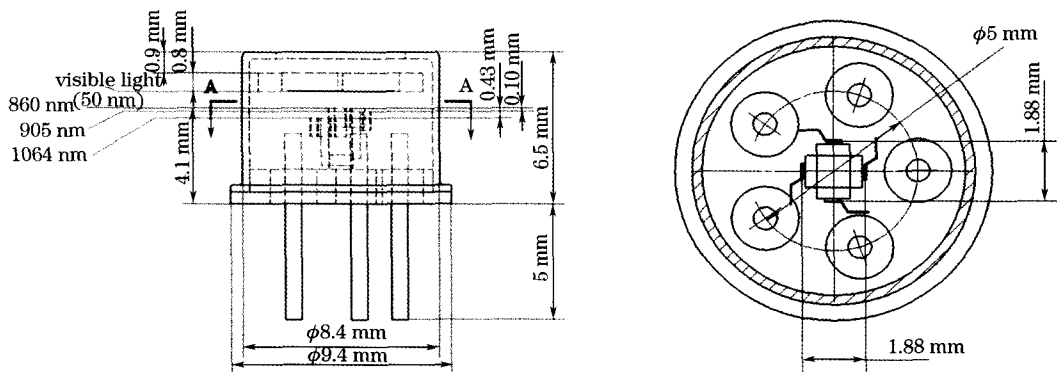


图6 多波长激光二极管封装工艺图。(a)焦平面位置;(b)衬底尺寸

Fig. 6 Packaging diagram of multi-wavelength laser diode. (a) Positions of focal planes; (b) size of substrate

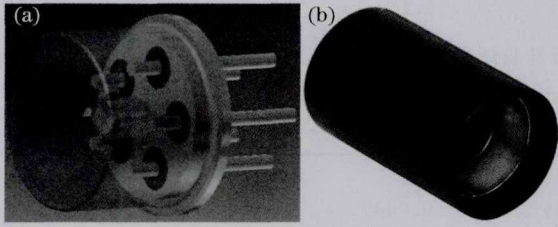


图 7 (a) 多波长激光二极管及(b) 其准直镜筒
三维效果图

Fig. 7 3D layout of (a) multi-wavelength laser diode and (b) drawtube

将准直透镜组和多波长激光二极管严格按照三种发射波长及可见光的焦平面位置固定在准直镜筒内,准直镜筒的三维效果如图 7(b)所示。将 $\lambda_1 \sim \lambda_4$ 各引脚连接到驱动电源,即可构成用于光束平行性验证实验的光源样机。

4.2 实验原理及方法

验证“准共轴”光束平行性的实验装置由脉冲/直流电源、多波长激光光源样机、激光束质量分析仪和计算机等模块组成,其实验原理如图 8 所示。

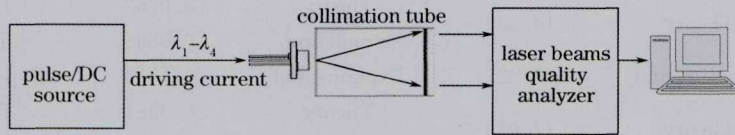


图 8 光束平行性验证实验原理图

Fig. 8 Principle diagram of beams parallelism verification experiment

实验方法如下:1) 根据多波长激光二极管芯片 $\lambda_1 \sim \lambda_4$ 的工作模式,由脉冲/直流电源提供相应的驱动电流;2) 多波长激光二极管的输出光束经镜筒前端的透镜组准直后,由激光束质量分析仪采集束腰光斑的光场分布并测算其快、慢轴方向的孔径角,并将显示结果保存至计算机;3) 整理准共轴光束 $\lambda_1 \sim$

λ_4 的实验数据,与表 2 中束腰光斑和发散角的理论计算及仿真数值进行对比,并分析误差。由计算机中相关软件拟合的 1064 nm(单模/脉冲)激光束腰光斑分布如图 9 所示,该软件可根据束腰光斑在快轴、慢轴上的分布情况,解算光束的发散角。

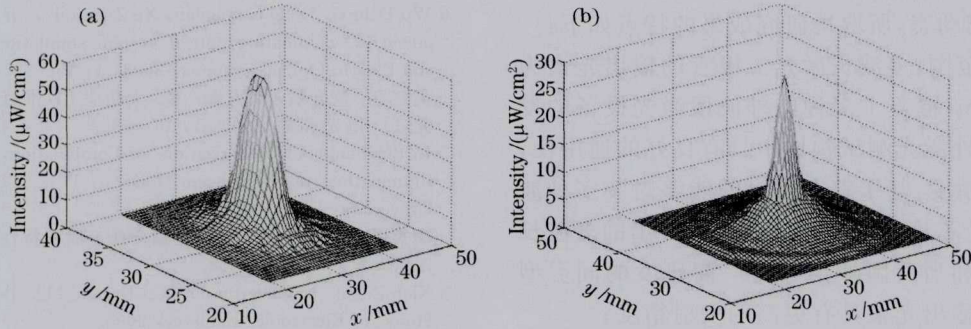


图 9 1064 nm(脉冲/单模)激光束腰光斑三维光强分布图。(a) 脉冲激光光斑; (b) 单模激光光斑

Fig. 9 3D intensity distribution of 1064 nm (single/pulse) laser beams waist spots. (a) Pulse laser spot; (b) single laser spot

4.3 误差分析

多波长激光二极管光束平行性参数的理论、仿真和实验值对比如表 4 所示。其实验值与理论/仿真值的误差主要由三部分组成:1) 加工误差:多波长激光二极管衬底制备过程中的加工误差,以及芯片封装过程中的装配误差,都会影响光束的发射精度;2) 建模误差:研究表明,半导体激光二极管的光场分布状况除高斯分布外,其法布里-珀罗腔缝隙狭窄导致的衍射光场还包含椭圆厄米分布的光场^[7],因此“准共轴”光路模型是未考虑椭圆厄米分布的初步模型;3) 测量误差:实验操作过程中的操作误差,

及光束质量分析仪的系统误差等。

通过和表 3 中傍轴状态下的发散角数值对比不难发现,虽然实验值与理论/仿真值存在一定误差,但仍然满足(17)式的“准共轴”条件。为了进一步降低上述三种误差,可以采取以下措施:1) 通过光学设计软件的优化函数功能对表 2 的准直光学系统的轴向球差等像差进行优化,可以提高光束的平行性^[8-11],再根据优化后的光学系统进一步规范制备工艺;2) 以椭圆厄米高斯光束为基本模型,建立精度更高的“准共轴”成像理论,可以使表 4 中理论值与实验值更加接近;3) 测试并调整图 8 中激光束质量分析仪的

光轴平行性,尽可能减小实验装置的系统误差。

表4 多波长激光光源光束平行性验证实验数据表

Table 4 Experimental data of multi-wavelength laser source beams parallelism

λ_i / nm	Direction of fast axis			Direction of slow axis		
	$\omega'_{j0\perp}$ / mm		$\theta'_{j\perp}$ / mrad		$\theta'_{j\parallel}$ / mrad	
860	Theory	14.245	Theory	0.0339	Theory	1.5577
			Simulation	0.0859	Simulation	1.5579
	Experimental	16.365	Experimental	0.1267	Experimental	1.7921
			Theory	0.0341	Theory	1.5551
905	Theory	14.267	Simulation	0.0857	Simulation	1.5553
			Experimental	0.1233	Experimental	1.7936
	Experimental	16.398	Experimental	0.1233	Experimental	1.7936
			Theory	0.0362	Theory	1.5468
1064(pulse)	Theory	14.339	Simulation	0.0868	Simulation	1.5470
			Experimental	0.1313	Experimental	1.7881
	Experimental	16.523	Experimental	0.1313	Experimental	1.7881
			Theory	0.0381	Theory	0.0244
1064(single)	Theory	17.019	Simulation	0.1017	Simulation	0.0382
			Experimental	0.1239	Experimental	0.0471
	Experimental	19.022	Experimental	0.1239	Experimental	0.0471
			Theory	0.0381	Theory	0.0244

5 结 论

提出了多波长激光二极管的封装结构,并建立了该结构下860、905、1064 nm(脉冲/单模)4种光束的准直光路模型,并在该模型的指导下制备了由多波长激光二极管及其准直镜筒组成的光源样机,经实验验证其输出光束具有良好的平行性。对比国内外相关研究动态,所取得研究成果的特点如下:

1) 光谱范围:多波长激光二极管的输出光谱为860~1064 nm,覆盖了多种红外波段激光设备的发射波长,在红外激光测试领域中具有良好的通用性;

2) 发射精度:基于首次提出的能够封装多种波长半导体激光芯片的“准共轴”结构设计出的多波长激光二极管,和当前国外半导体厂商研发的同类型产品相比,其输出光束具有更高的发射精度;

3) 便携性能:在“准共轴”光路模型指导下制备的多波长激光光源样机,和当前国内外激光器厂商研发的可调谐波长激光器相比体积更小、质量更轻,具有更好的便携性能及在线工作性能。

参 考 文 献

- 1 J Hecht. Solid-state high-energy laser weapons[J]. Optics and Photonics News, 2003, 14(1): 42-47.
- 2 Wang Xuanjun, Wang Yuangui, Cao Xiaoping. Military Metrology[M]. Beijing: Science Press, 2004.
王焯军,汪元贵,曹小平. 军事计量学[M]. 北京: 科学出版社, 2004.
- 3 Huai Guomo, Guo Qunfang. Defense Metrology[M]. Beijing: Defense Industry Press, 2003.
怀国模,郭群芳. 国防计量[M]. 北京: 国防工业出版社, 2003.

4 Yang Hongru. The novel high-energy laser weapons and optical metrology test technology for high-energy laser[J]. J Appl Opt, 2005, 26(2): 1-6.

杨鸿儒. 新概念高能激光武器与强激光光学计量检测技术[J]. 应用光学, 2005, 26(2): 1-6.

5 Zhao Hongwei, Yang Dalin. The methods for the collimating of strip-geometry laser[J]. Laser Journal, 2006, 27(4): 10-11.

赵洪卫, 杨大林. 条形半导体激光器准直方法研究[J]. 激光杂志, 2006, 27(4): 10-11.

6 Wu Dengxi, Dong Guangyan, Xu Zhanhui, et al.. Study on high-power LD collimating optical system simulation[J]. Electronic and Electro-Optical Systems, 2008, 1: 16-18.

吴登喜,董光焰,徐占辉,等. 大功率LD准直光学系统仿真研究[J]. 光电系统, 2008, 1: 16-18.

7 Li Binzhong. Characterizations of Combination, Propagation and Illumination of Multibeam Lasers [D]. Chengdu: Sichuan University, 2002. 30-38.

李宾中. 多束激光的并合、传输变换与照明特性研究[D]. 成都: 四川大学, 2002. 30-38.

8 Xiao Zexin. Engineering Optical Design[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2003.

萧泽新. 工程光学设计[M]. 北京: 电子工业出版社, 2003.

9 Wu Jiajie, Chen Jiabi, Xu Ancheng, et al.. Focal length measurement based on Hartmann-Shack principle [J]. Acta Photonica Sinica, 2011, 40(6): 912-915.

吴佳杰,陈家璧,徐安成,等. 基于哈特曼-夏克波前测量原理的焦距测量[J]. 光子学报, 2011, 40(6): 912-915.

10 Zhang Heyong, Guo Jin, Zhao Shuai, et al.. Experimental property research of far-field focusing of laser beam[J]. Chinese J Lasers, 2011, 38(3): 0302005.

张合勇,郭劲,赵帅,等. 激光远场聚焦特性实验研究[J]. 中国激光, 2011, 38(3): 0302005.

11 Peng Hangyu, Gu Yuanyuan, Shan Xiaonan, et al.. Study on beam shaping of high power diode lasers[J]. Chinese J Lasers, 2011, 38(2): 0202010.

彭航宇,顾媛媛,单肖楠,等. 大功率半导体激光光源光束整形技术研究[J]. 中国激光, 2011, 38(2): 0202010.

栏目编辑: 韩峰