

基于复振幅调制的半导体激光光束整形方法

陈本永, 徐哲毅, 张世华*, 陈瑞品, 严利平

浙江理工大学纳米测量技术实验室, 浙江 杭州 310018

摘要 为了改善半导体激光光束质量,使其能够满足大距离高精度干涉测量的要求,使用空间光调制器对半导体激光光束进行整形,提出了一种基于复振幅调制算法的光束整形方法。利用该方法可将半导体激光光束整形为准直性好、光强分布均匀的无像散基模高斯光束。通过光束质量分析对整形后的光束进行评估,实验结果显示整形后半导体激光光束在 x 和 y 方向的 M^2 因子均趋于 1,像散接近于 0,验证了该光束整形方法的有效性。将提出的半导体激光光束整形方法应用于大距离干涉测量中,在 8 m 处进行了微米级步进位移测量,与纳米位移工作台相比,所得结果达到了亚波长的测量精度。实验结果表明整形后的光束能够满足大距离高精度干涉测量的要求,验证了提出的半导体激光光束整形方法的可行性。

关键词 激光光学; 半导体激光器; 激光光束整形; 空间光调制器; 复振幅调制

中图分类号 TH741

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201845.0605005

Laser Diode Beam Shaping Method Based on Complex Amplitude Modulation

Chen Benyong, Xu Zheyi, Zhang Shihua, Chen Ruipin, Yan Liping

Nanometer Measurement Laboratory, Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou, Zhejiang 310018, China

Abstract In order to improve the beam quality of the laser diode and make it meet the requirement of high precision interferometric measurement for large distance, we propose a beam shaping method by using spatial light modulator based on the complex amplitude modulation algorithm. The laser diode beam is shaped to the non-astigmatic fundamental mode Gaussian beam, which has the advantages of good collimation and symmetrical spot shape. Experiment for analyzing the beam quality of the shaped beam is performed, and the results show that the M^2 factors in the x and y directions of the shaped beam are close to 1 and the astigmatism of the shaped beam is close to 0, which verify the effectiveness of the proposed beam shaping method. The beam shaping method is applied to large distance interferometric measurement. Displacement measurement with micrometer steps is carried out at a distance of 8 m, and sub-wavelength accuracy is achieved compared with a nanometer stage. Experimental results indicate that the shaped beam can meet the requirement of large distance interferometric measurement, which verify the feasibility of the proposed beam shaping method.

Key words laser optics; laser diode; laser beam shaping; spatial light modulator; complex amplitude modulation

OCIS codes 140.2020; 140.3300; 230.6120; 120.5060

1 引 言

由于半导体激光器具有波长可调谐范围大、易于调制等优点,已被广泛应用于干涉测量领域中,如绝对距离测量中的光强调制相移法^[1]、频率扫描干涉法^[2-3]和调频干涉法^[4]等技术都是依赖于半导体激光器发展起来的,通过将半导体激光器锁定至飞秒光学

频率梳还可实现距离测量至时间基准的直接溯源,故半导体激光器在高精度干涉测量中发挥着举足轻重的作用。但是,半导体激光器存在光斑形状不对称、发散角大、本征像散等缺点,无法直接用于干涉测量,特别是在大距离干涉测量中,要求光束具有良好的准直性,且光斑大小合适、光强分布均匀,因此需要先对半导体激光器的输出光束进行准直整形。

收稿日期: 2018-01-03; 收到修改稿日期: 2018-01-30

基金项目: 国家自然科学基金(51527807)

作者简介: 陈本永(1965—),男,教授,博士生导师,主要从事精密测量技术方面的研究。E-mail: chenby@zstu.edu.cn

* 通信联系人。E-mail: shihua1209@163.com

目前,半导体激光光束整形方法主要分为两大类:几何光学法和衍射光学法。在几何光学法中,圆柱透镜^[5]、非球面柱透镜^[6]、自聚焦透镜^[7]可以实现光束的准直;光纤耦合^[8-10]、阶梯反射镜^[11]、双折射透镜^[12]、异形棱镜^[13]、自由曲面透镜^[14]可实现光束光强的重新分布;柱面自聚焦透镜^[15]、经过优化设计的非球面柱透镜^[16]以及光纤耦合系统^[17]在准直整形的同时还可实现消像散的目的。几何光学方法设计简单,结构紧凑,但这些透镜对加工要求高,且无法对光强分布进行灵活控制。衍射光学法中,光栅元件^[18-19]和二元光学元件^[20]均可实现光束的整形,其中二元光学元件具有设计灵活、波前控制更为精确的优点,基于二元光学元件的消像散准直器件还可同时实现准直和消像散的目的^[21]。然而,无论是几何光学元件还是衍射光学元件,一旦设计成型便无法修改,对于具有不同参数的半导体激光器需要重新设计与制作。

液晶空间光调制器(SLM)是一种可编程的衍射光学元件,通过改变自身晶体特性来实现对光波参数的调制,主要有振幅型和相位型两种类型,相位型液晶 SLM 由于衍射效率更高、使用更为普遍,目前已广泛应用于光通信^[22]、全息显示^[23-24]、全息光镊^[25]、成像技术^[26]等领域。与其他光束整形元件相比,SLM具有可编程性,灵活性更高,对于不同参数的半导体激光器,只须重新设计加载到 SLM 的全息图,而无须重新制作光束整形元件,且 SLM 像素高,能够实现光束光强与相位的精确控制。

使用 SLM 进行光束整形,其核心在于设计相位分布函数,设计时除了要用到标量衍射理论外,还需要使用光束整形算法来求取相位分布函数的最优数值解,此数值解即为加载至 SLM 的全息图。光束整形算法主要分为两大类:迭代算法与非迭代算法。迭代算法根据目标光束的需要反复更新衍射光学元件上的相位分布,直到输出光束逼近目标光束时停止迭代。由其设计原理可知,迭代算法在调制光场振幅时无法保证光场相位分布符合设计要求^[27]。非迭代算法利用光栅衍射原理设计全息图,无需迭代即可计算出相位分布函数,在输出面上的某一衍射级可得到目标光场分布,该种算法可实现光场的复振幅调制,即可以同时实现光场振幅与相位的精确调制,故非迭代算法也可称作复振幅调制算法。非迭代算法主要有正弦光栅算法^[28-29]和闪耀光栅算法^[30-31],其中正弦光栅算法与闪耀光栅算法相比,目标衍射级更不易受其他级衍射光的影响。

基模高斯光束具有准直性好、光斑形状对称、相位分布在瑞利距离内接近平面波等优点,是一种较为理想的干涉光源。本文基于复振幅调制算法中的正弦光栅算法,使用 SLM 作为光束整形元件,将半导体激光光束整形为无像散的基模高斯光束,使得半导体激光光束能够满足大距离高精度干涉测量的应用要求。

2 基于复振幅调制的半导体激光光束整形原理

将半导体激光光束整形为无像散的基模高斯光束,主要包括光束整形和消像散两个步骤,影响整形效果的主要因素包括整形算法的选择以及整形光束与其他级次衍射光的分离,影响消像散效果的主要因素是整形光束束腰大小和束腰位置两个参数的精确测量。在设计整形全息图时采用复振幅调制算法中的正弦光栅算法,在衍射效率最高的零级处还原复振幅,并在全息图中叠加线性相位,使得目标衍射级次与其他级次分离;整形光束的束腰大小和束腰位置通过光束分析精确测得,用于消像散全息图的设计,最终将整形全息图和消像散全息图叠加,实现半导体激光光束至无像散的基模高斯光束的整形。

2.1 整形全息图的设计

为了在目标衍射级得到设定的基模高斯光束,将目标复振幅 $g(x, y)$ 设为基模高斯光束分布,即

$$g(x, y) = a_g(x, y) \exp[i\varphi_g(x, y)] = \frac{\omega_0^2}{\omega^2} \cdot \exp\left(-\frac{x^2 + y^2}{\omega^2}\right) \cdot \exp\left[-ikz - \frac{ik}{2R}(x^2 + y^2) + i\psi\right], \quad (1)$$

式中: $a_g(x, y)$ 和 $\varphi_g(x, y)$ 分别为目标光束的振幅和相位; ω 、 R 和 ψ 分别为高斯光束的束宽、曲率半径和相位因子; ω_0 为高斯光束的束腰大小; $k = 2\pi/\lambda$ 为波数, λ 为激光波长。

根据复振幅调制算法中的正弦光栅算法^[29],整形全息图的传递函数 h_g 可表示为

$$h_g(x, y) = \exp\{i\varphi_g(x, y) + if(a_g)\sin[2\pi(u_0x + v_0y)]\}, \quad (2)$$

式中: $f(a_g)$ 是目标振幅 $a_g(x, y)$ 的函数; u_0 、 v_0 分别为 x 、 y 方向线性相位的空间频率。由于正弦光栅零级衍射光的衍射效率最高,故在零级处还原目标复振幅,函数 $f(a_g)$ 需满足以下等式:

$$J_0[f(a_g)] = a_g, \quad (3)$$

式中: J_0 表示第0阶贝塞尔函数。根据 Jacobi-

Anger 恒等式,对(2)式展开得:

$$h_g(x, y) = \exp[i\varphi_g(x, y)] \times$$

$$\sum_{m=-\infty}^{\infty} J_m[f(a_g)] \exp[i2\pi m(u_0 x + v_0 y)], \quad (4)$$

式中: J_m 表示第 m 阶贝塞尔函数。由(4)式可知,线性相位的存在使得各级衍射光的衍射角不同,由此可相互分离,选择合适的空间频率便可使目标衍射级不受其他衍射级干扰。

取出(4)式中的零级项:

$$h_{g0}(x, y) = J_0[f(a_g)] \exp[i\varphi_g(x, y)]. \quad (5)$$

由于函数 $f(a_g)$ 满足(3)式,对比(5)式和(1)式可知,该零级项即为目标复振幅分布。若入射光为平面波,其振幅与相位可看作常数,则出射光的分布情况由传递函数 $h_g(x, y)$ 决定,于是在零级衍射处可得到设定的基模高斯光束。

2.2 消像散全息图的设计

由于半导体激光器的有源层呈矩形分布,出射光的发散角极不对称,快轴方向(x 方向)和慢轴方向(y 方向)的发散角分别为 $30^\circ \sim 60^\circ$ 和 $10^\circ \sim 15^\circ$,其远场呈椭圆分布,椭圆的长轴和短轴分别对应光束的 x 方向与 y 方向,其中 y 方向的束腰位置靠近激光器的出光面,而 x 方向的束腰位置在出光面内部,即出射光束存在本征像散,其光场特性可用像散椭圆高斯光束模型来描述^[32]。实际中为了保证入射光束能够照满整个 SLM 的液晶屏,半导体激光光束需要先经过一个扩束镜,将光束扩束到合适尺寸后再取其中心部分入射到 SLM 上。经过扩束后的半导体激光光束仍为像散椭圆高斯光束,但其中心部分的光强可近似看作常数,光强分布为

$$E_e(x, y, z) = a_e \exp\left[-ikz - i\frac{k}{2}\left(\frac{x^2}{R_{ex}} + \frac{y^2}{R_{ey}}\right) + i\frac{1}{2}(\psi_{ex} + \psi_{ey})\right] = a_e \exp[i\varphi_e(x, y)], \quad (6)$$

式中: a_e 为常数,表示光束的振幅; $\varphi_e(x, y)$ 为光束的相位; R_{ei}, ψ_{ei} ($i = x, y$) 分别表示光束在两个方向上的曲率半径和相位因子,它们与光束传输距离 z 的关系如下:

$$R_{ei}(z) = z \{1 + [\pi\omega_{0i}^2/\lambda(z - z_{0i})]^2\}, \quad i = x, y, \quad (7)$$

$$\psi_{ei}(z) = \arctan[\lambda(z - z_{0i})/(\pi\omega_{0i}^2)], \quad i = x, y, \quad (8)$$

式中: ω_{0i}, z_{0i} ($i = x, y$) 分别为 x 和 y 方向的束腰大小和束腰位置。由于光束中存在像散,故 $z_{0x} \neq z_{0y}$,像散可表示为 $\Delta z = |z_{0x} - z_{0y}|$ 。

将整形全息图加载至 SLM,扩束后的光束 $E_e(x, y, z)$ 通过 SLM 调制后,可得出射光束在零级衍射处的光场分布 E_0 ,其表达式为

$$E_0(x, y, z) = g(x, y) \cdot a_e \exp[i\varphi_e(x, y)] = a_e a_g(x, y) \exp\{i[\varphi_g(x, y) + \varphi_e(x, y)]\}. \quad (9)$$

由(9)式可知,在零级衍射处得到的光束并不是理想的基模高斯光束,其相位分布中还混叠了像散椭圆高斯光束的相位 $\varphi_e(x, y)$ 。

大距离干涉测量要求光源具有良好的准直性,要求测量范围内激光的相位分布为近似平面波、光斑对称、光强分布均匀等,使得激光传播过程中的相位变化仅与传播距离有关,从而建立传播距离与干涉信号相位变化的线性关系。基模高斯光束在瑞利距离内可满足上述要求,是进行大距离干涉测量的理想光源。(9)式中像散椭圆高斯光束的相位 $\varphi_e(x, y)$ 随传播距离的增加呈非线性变化,在进行干涉测量时会影响距离测量精度。另外,像散高斯光束在 x 方向和 y 方向的束腰位置不同,使得两方向的瑞利距离对应的测量区域不完全重合,在不重合区域内其中一个方向的光不具有准直性,在干涉测量时会引入误差。

为了消除零级衍射光相位中含有像散信息的相位,首先通过光束质量分析测出整形后光束的束腰大小 ω_{0i} 与束腰位置 z_{0i} ,再利用椭圆高斯光束模型计算整形后光束在 SLM 液晶屏上的相位分布 $\varphi_e(x, y)$,由此可以得到光束中含有像散信息的相位,只需在 SLM 上加载与之相反的相位分布便可实现光束消像散的功能,消像散全息图的传递函数 h_a 可表示为

$$h_a = \exp[-i\varphi_e(x, y)]. \quad (10)$$

将上述设计的消像散全息图叠加到整形全息图上可得到合成全息图,其传递函数 h_c 可表示为

$$h_c = h_g \cdot h_a = \exp\{i\varphi_g(x, y) + i f(a_g) \sin[2\pi(u_0 x + v_0 y)] - i\varphi_e(x, y)\}. \quad (11)$$

将合成全息图加载到 SLM 上,扩束后的半导体激光光束在经过 SLM 后,可同时实现光束整形与消像散,最终在零级衍射处得到光斑对称、发散角小的无像散基模高斯光束。

3 实验结果与讨论

为了验证所提出光束整形方法的有效性,搭建了光束整形系统实验平台,并对半导体激光光束进行整形,使用基于双曲线拟合法的光束质量

分析方法对整形后的光束质量进行评估,最后通过大距离干涉测量实验验证光束整形方法的可行性。

3.1 半导体激光光束整形实验

光束整形系统实验装置如图 1 所示,主要由光束整形模块与光束质量分析模块两个部分组成。光束整形模块用于半导体激光束的准直整形与消像散,并在出射光的零衍射级得到基模高斯光束,光束质量分析模块用于分析整形后的光束质量,并将光束的相关信息反馈给光束整形模块,以便更准确地设计光束整形全息图。

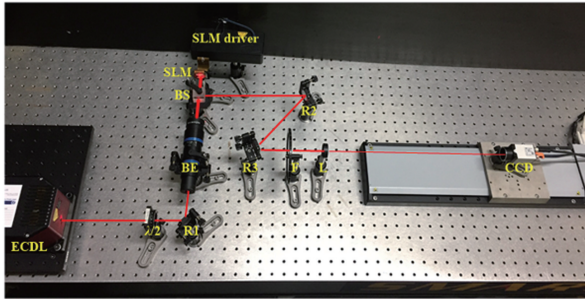


图 1 光束整形系统实验装置图

Fig. 1 Experimental setup of beam shaping system

光束整形模块的核心器件是一个反射式 SLM,且只对平行偏振方向的光束具有调制作用,而外腔式半导体激光器(ECDL)输出的光接近线偏振光,偏振方向与垂直方向有一定夹角。为了使得 ECDL 的输出光束偏振方向与 SLM 调制的偏振方向相同,光束从 ECDL 出射后,先经过一个 $1/2$ 波片再由反射镜 R1 反射至扩束器(BE),扩束后光束的中心部分入射至 SLM。在 SLM 上加载设计好的相位全息图(CGH),在衍射光零级处可得到目标光束。当光束斜入射到 SLM 上时,出射光束会变得椭圆化,为了防止这种现象的出现,在 SLM 前放置一个

分光镜(BS),使得光束正入射至 SLM 上。反射镜 R2 和 R3 配合使用,一方面分离出 SLM 零级衍射处的目标光束,另一方面用于光路准直调节。

整形光束经 R2 和 R3 准直后入射至光束质量分析模块,经可变衰减片(F)衰减后再通过薄透镜(L)将光束聚焦,并由安装在线性精密导轨上的图像传感器(CCD)接收光斑图像。光斑图像经滤波和轮廓检测等预处理后,通过高斯曲线拟合得到对应的束宽大小。设置精密导轨使其按照设定值步进运动,每次步进后同时记录导轨位置和与之对应的光斑束宽,通过双曲线拟合法得到光束的 M^2 因子,以及束腰大小和束腰位置。 M^2 因子用于评估整形光束的质量,束腰大小和束腰位置反馈给光束整形模块,用于设计消像散全息图。

实验装置中所用半导体激光器(New Focus, TLB6700)波长调节范围为 $632.5 \sim 637.0 \text{ nm}$; 纯相位液晶 SLM(Holoeye, LETO)的分辨率为 $1920 \text{ pixel} \times 1080 \text{ pixel}$,像素大小为 $6.4 \mu\text{m}$;扩束器(Jenoptik)的放大倍率 $2 \sim 10$ 倍可调; CCD(Baumer, VLG-20M)的分辨率为 $1624 \text{ pixel} \times 1228 \text{ pixel}$,像素间隔为 $4.4 \mu\text{m}$;线性精密导轨(PI, M-531, DD)的行程为 300 mm ,定位精度为 $0.1 \mu\text{m}$ 。

实验中将目标高斯光束的束腰大小及束腰位置分别设为 $\omega_0 = 1.5 \text{ mm}$, $z_0 = 0 \text{ mm}$,半导体激光器的波长设定为 633 nm 。半导体激光光束整形前后,在 $1, 5, 20 \text{ m}$ 处的光斑对比情况如图 2 所示,可以看出整形前半半导体激光光束的发散角较大,随着光束的传输,光斑迅速变大,且光斑形状的不对称性越来越明显;整形后半半导体激光光束的准直性明显提高,光斑形状对称。下面结合半导体激光光束的整形过程,对整形后的光束进行评估和分析。

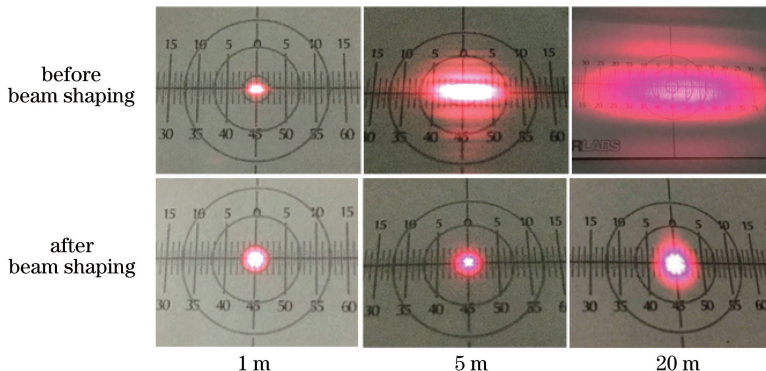


图 2 半导体激光光束整形前后的光斑对比图

Fig. 2 Comprison of the sports of the laser diode beam before and after beam shaping

为了消除初步整形后光束中的像散,根据表 1 中光束的束腰大小与束腰位置可计算得到初步整形后光束在 SLM 液晶屏上的相位分布,结合(6)式和(10)式可得到消像散全息图。将消像散全息图与整形全息图相叠加可得到合成全息图,其过程如图 3 所示。

表 1 经过全息图初步整形后的光束参数

Table 1 Beam parameters of the laser diode after initial beam shaping by the hologram

Direction	M^2	ω_0/mm	z_0/mm	$\Delta z/\text{mm}$
x	1.034	1.246	3891.260	1694.662
y	1.043	0.941	5585.992	



图 3 合成全息图生成示意图

Fig. 3 Generation schematic of the synthetic hologram

将合成全息图加载到 SLM 上得到的整形光束,再次使用光束质量分析模块对光束各参数进行测量,结果如表 2 所示。从表中可以看出,光束的像散减小到 0.903 mm,由此可见全息图起到了消像散的作用。另外,光束在两个方向上的 M^2 因子仍接近 1,两个方向的束腰大小分别为 1.399 mm 和 1.308 mm,说明在消像散时并未对光束质量造成影响,而且光束的对称性也得到了改善。

表 2 经过全息图整形后的光束参数

Table 2 Beam parameters of the laser diode after beam shaping by the hologram

Direction	M^2	ω_0/mm	z_0/mm	$\Delta z/\text{mm}$
x	1.016	1.399	358.029	
y	1.063	1.308	357.125	0.903

由以上分析可知,合成全息图能够将半导体激光光束整形为较为理想的无像散基模高斯光束,且消像散效果优于基于柱面自聚焦透镜的激光光学整形法^[15]。

3.2 整形光束在大距离干涉测量中的应用

为了验证所提出的半导体激光光束整形系统的可行性,将其应用于大距离干涉测量中进行位移测量实验。大距离干涉测量系统的实验装置如图 4 所示,测量系统的前端为光束整形模块,单独搭建在一个 50 mm×60 mm 的小光学平台上[图 4(a)],光束整形模块将半导体激光光束整形为无像散基模高斯光束,作为大距离干涉测量系统的光源;干涉测量系

首先根据复振幅调制原理设计整形全息图,将整形全息图加载到 SLM 上得到初步整形后的光束。通过光束质量分析模块对初步整形后的光束进行评估,测得的 M^2 因子、束腰大小、束腰位置等参数如表 1 所示。从表 1 中可以看出,光束经过整形全息图的初步整形后, x 和 y 方向的 M^2 因子分别为 1.034 和 1.043,说明两个方向的光束都非常接近基模高斯光束(理想的基模高斯光束 M^2 因子为 1),而两个方向的束腰大小分别为 1.246 mm 和 0.941 mm,仍存在一定差异,另外光束中的像散为 1694.662 mm。

统搭建在 9 m 长的气浮导轨的一端,测量镜安装在气浮导轨的滑块上[图 4(b)]。干涉测量系统的光路结构使用的是基于电光调制器(EOM)的迈克耳孙干涉仪,整形光束入射到分光镜(BS2)上被分为两路:BS2 的反射光经 EOM 正弦相位调制后射向参考角锥棱镜(M1),通过 M1 反射回 BS2,构成干涉仪的参考臂;BS2 的透射光经安装在测量目标上的测量角锥棱镜(M2)反射后返回至 BS2,构成干涉仪的测量臂。参考臂与测量臂的返回光束在 BS2 处发生干涉,干涉信号由光电探测器(PD)接收。PD 探测到的干涉信号与 EOM 的调制信号同时被数据采集卡采集至上位机,基于 LabVIEW 平台实

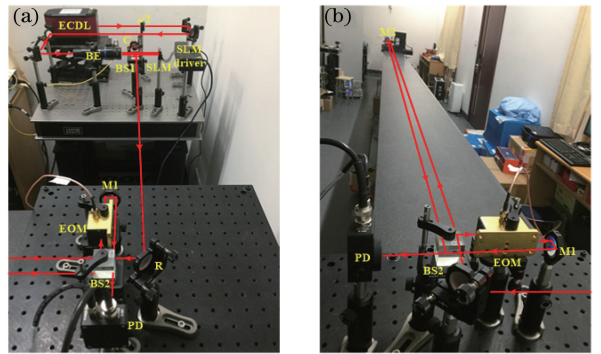


图 4 大距离干涉测量系统实验装置。(a)光源与干涉测量系统近端;(b)干涉测量系统远端

Fig. 4 Experimental setup of large distance interferometric system. (a) Laser source and interferometric system in the near end; (b) interferometric system in the far end

现载波相位生成(PGC)干涉信号相位解调^[33],得到测量目标的位移。

由于自由运转的 ECDL 频率稳定度大于 10^{-7} ,使用高精度波长计(HighFinesse, WSU30)通过比例-积分-微分(PID)控制将 ECDL 的频率稳定至波长计的设定值上,频率稳定后 ECDL 的频率稳定度优于 10^{-8} ;用于相位调制的 EOM(Thorlabs, EO-PM-NR-C1),最大调制频率可达 1 MHz;用于干涉信号探测的 PD 为可调增益硅基探测器(Thorlabs, PDA36A-EC),带宽为 10 MHz;用于干涉信号和调制信号采集的数据采集卡(Adlink, 981212 bit)可实现 20 MHz 采样率和 4 通道同步采集。

实验中将测量镜安装在行程为 15 μm 、定位精度为 1 nm 的纳米位移工作台(P-752.1CD)上,纳米位移

工作台固定在气浮导轨的滑块上,将滑块运动至气浮导轨的 8 m 处进行微米级步进位移测量。15 μm 范围内、1 μm 步进的位移测量结果和 10 μm 步进的 10 次重复性测量结果,以及它们与纳米位移工作台(P-752.1CD)的比对结果分别如图 5(a)和(b)所示。表 3 为测量数据统计结果,根据表 3 可知,1 μm 步进位移测量的误差最大值为 -107.578 nm,误差均值为 6.532 nm,标准差为 61.677 nm;10 μm 步进测量的误差最大值为 -108.560 nm,误差均值为 5.781 nm,标准差为 64.485 nm。

由上述位移测量实验结果可知,与纳米位移工作台相比,8 m 处 1 μm 和 10 μm 步进的位移测量结果均能达到亚波长的测量不确定度,验证了所提出的光束整形系统在大距离干涉测量中的可行性。

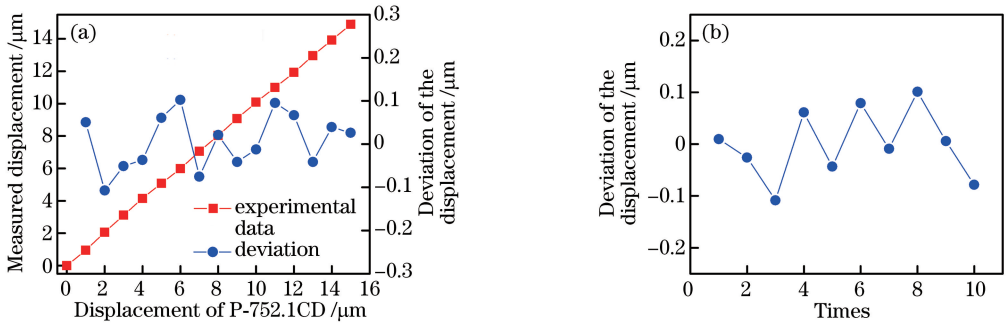


图 5 8 m 处位移测量实验结果。(a) 1 μm 步进测量结果;(b) 10 μm 步进测量结果

Fig. 5 Experimental results of displacement measurement at 8 m. (a) Step measurement results with the step of 1 μm ; (b) repeated measurement results with the step of 10 μm

表 3 8 m 处位移测量实验数据统计结果

Table 3 Statistical results of displacement measurement data at 8 m

Step of displacement measurement / μm	Maximum error / nm	Average error / nm	Standard deviation / nm
1	-107.578	6.532	61.677
10	-108.560	5.781	64.485

4 结 论

针对大距离干涉测量,提出了一种基于复振幅调制理论的半导体激光光束整形方法,将发散角大、光斑不对称、存在本征像散的半导体激光光束整形为无像散基模高斯光束,使得半导体激光能够满足大距离高精度干涉测量的应用要求。从实验结果可以看出:半导体激光光束经所提出的光束整形系统整形后,慢轴和快轴两个方向上的 M^2 因子分别达到了 1.016 和 1.063,光束质量接近理想的基模高斯光束;光束中存在的像散由 1694.662 mm 减小为 0.903 mm,对于干涉测量的影响可忽略不计。将该光束整形方法应用于大距离干涉测量,在 8 m 处分别进行 1 μm 步进的位移测量实验以及 10 μm 步进

重复性位移测量实验并与纳米位移工作台进行对比,实验结果显示:1 μm 步进测量的误差均值为 6.532 nm,标准差为 61.677 nm;10 μm 步进测量的误差均值为 5.781 nm,标准差为 64.485 nm,均达到了亚波长的测量不确定度,验证了所提出的光束整形方法的可行性。

参 考 文 献

[1] Wu X, Zhang J, Wei H, *et al.* Phase-shifting interferometer using a frequency-tunable diode laser calibrated by an optical frequency comb[J]. Review of Scientific Instruments, 2012, 83(7): 073107.
 [2] Prellinger G, Meiners-Hagen K, Pollinger F. Spectroscopically *in situ* traceable heterodyne frequency-scanning interferometry for distances up to

- 50 m [J]. *Measurement Science and Technology*, 2015, 26(8): 084003.
- [3] Medhat M, Sobee M, Hussein H M, *et al.* Distance measurement using frequency scanning interferometry with mode-hoped laser [J]. *Optics & Laser Technology*, 2016, 80: 209-213.
- [4] Baumann E, Giorgetta F R, Coddington I, *et al.* Comb-calibrated frequency-modulated continuous-wave lidar for absolute distance measurements [J]. *Optics Letters*, 2013, 38(12): 2026-2028.
- [5] Liang Y P, Dai T L. Improving on the collimating performance of cylindrical lens to the beam of laser diode bar [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2004, 31(11): 1305-1311.
梁一平, 戴特力. 圆柱透镜对半导体激光光束准直性能的改进 [J]. *中国激光*, 2004, 31(11): 1305-1311.
- [6] Snyder J J, Reichert P, Baer T M. Fast diffraction-limited cylindrical microlenses [J]. *Applied Optics*, 1991, 30(19): 2743-2747.
- [7] Sinzinger S, Brenner K H, Moisel J, *et al.* Astigmatic gradient-index elements for laser-diode collimation and beam shaping [J]. *Applied Optics*, 1995, 34(29): 6626-6632.
- [8] Graf T, Balmer J E. High-power Nd:YLF laser end pumped by a diode-laser bar [J]. *Optics Letters*, 1993, 18(16): 1317-1319.
- [9] Zhou C X, Liu Y H, Xie W M, *et al.* Analysis and design of fiber coupled high-power laser diode array [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2004, 31(11): 1296-1300.
周崇喜, 刘银辉, 谢伟民, 等. 大功率半导体激光器阵列光束光纤耦合研究 [J]. *中国激光*, 2004, 31(11): 1296-1300.
- [10] Yu H, Ma X H, Zhao X, *et al.* Fiber coupling technology based on diode laser stack [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2017, 44(11): 1101006.
于贺, 马晓辉, 赵鑫, 等. 基于半导体激光器堆栈的光纤耦合技术 [J]. *中国激光*, 2017, 44(11): 1101006.
- [11] Du K, Baumann M, Ehlers B, *et al.* Fiber-coupling technique with micro step-mirrors for high-power diode laser bars [C] // *Proceedings of the Advanced Solid State Lasers*, Florida, 1997: NA6.
- [12] Yang X T, Fan W. Spatial laser beam shaping using birefringent lenses [J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, 26(11): 1698-1704.
杨向通, 范薇. 利用双折射透镜组实现激光束空间整形 [J]. *光学学报*, 2006, 26(11): 1698-1704.
- [13] Gao Q H, Zeng X D, An Y Y. Beam shaping for high power diode lasers [J]. *Journal of Optoelectronics • Laser*, 2005, 16(6): 662-664.
- [14] Peng Y M, Su Z P. Design of freeform surface lens for shaping divergent laser beam [J]. *Acta Optica Sinica*, 2016, 36(5): 0522003.
彭亚蒙, 苏宙平. 用于发散激光光束整形的自由曲面透镜设计 [J]. *光学学报*, 2016, 36(5): 0522003.
- [15] Xie H B, Lü E Y, Zhu X C, *et al.* Shaping and collimation of LD beam with astigmatism [J]. *Laser Technology*, 2013, 37(4): 551-555.
谢洪波, 吕二阳, 祝晓晨, 等. 一种激光二极管像散光束准直整形方法研究 [J]. *激光技术*, 2013, 37(4): 551-555.
- [16] Zhou X Q, Ann B N K, Seong K S. Single aspherical lens for deastigmatism, collimation, and circularization of a laser beam [J]. *Applied Optics*, 2000, 39(7): 1148-1151.
- [17] Ou X, Xiong L L, Zhang P, *et al.* Design of high-brightness fiber-couple diode laser system based on astigmatism and ideal imaging theories [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2011, 40(11): 1718-1722.
欧翔, 熊玲玲, 张普, 等. 基于像散与理想光源成像原理的高亮度半导体激光器光纤耦合设计方法 [J]. *光子学报*, 2011, 40(11): 1718-1722.
- [18] Chann B, Goyal A K, Fan T Y, *et al.* Efficient, high-brightness wavelength-beam-combined commercial off-the-shelf diode stacks achieved by use of a wavelength-chirped volume Bragg grating [J]. *Optics Letters*, 2006, 31(9): 1253-1255.
- [19] Daneu V, Sanchez A, Fan T Y, *et al.* Spectral beam combining of a broad-stripe diode laser array in an external cavity [J]. *Optics Letters*, 2000, 25(6): 405-407.
- [20] Leger J R, Goltsov W C. Geometrical transformation of linear diode-laser arrays for longitudinal pumping of solid-state lasers [J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 1992, 28(4): 1088-1100.
- [21] Xie M, Zeng X D, An Y Y. Design of a binary optical element for collimation of high power laser diode beams with astigmatism [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2007, 36(1): 102-105.
谢梦, 曾晓东, 安毓英. 大功率半导体激光器二元光学消像散准直器件设计 [J]. *红外与激光工程*, 2007, 36(1): 102-105.
- [22] Lu H H, Lin Y P, Wu P Y, *et al.* A multiple-input-multiple-output visible light communication system based on VCSELs and spatial light modulators [J]. *Optics Express*, 2014, 22(3): 3468-3474.
- [23] Sasaki H, Yamamoto K, Wakunami K, *et al.* Large size three-dimensional video by electronic holography using multiple spatial light modulators [J]. *Scientific*

- Reports, 2014, 4: 6177.
- [24] Wang Y, Shen C, Zhang C, *et al.* Research on color holographic display with space division multiplexing based on liquid crystal on silicon[J]. Chinese Journal of Lasers, 2012, 39(12): 1209001.
王岳, 沈川, 张成, 等. 基于硅基液晶的空分复用彩色全息显示研究[J]. 中国激光, 2012, 39(12): 1209001.
- [25] Liang Y S, Yao B L, Ma B H, *et al.* Holographic optical trapping and manipulation based on phase-only liquid-crystal spatial light modulator[J]. Acta Optica Sinica, 2016, 36(3): 0309001.
梁言生, 姚保利, 马百恒, 等. 基于纯相位液晶空间光调制器的全息光学捕获与微操纵[J]. 光学学报, 2016, 36(3): 0309001.
- [26] Shrekenhamer D, Watts C M, Padilla W J. Terahertz single pixel imaging with an optically controlled dynamic spatial light modulator[J]. Optics Express, 2013, 21(10): 12507-12518.
- [27] Gerchberg R W. A practical algorithm for the determination of the phase from image and diffraction plane pictures[J]. Optik, 1972, 35(2): 237-246.
- [28] Arrizón V, Ruiz U, Carrada R, *et al.* Pixelated phase computer holograms for the accurate encoding of scalar complex fields[J]. Journal of the Optical Society of America A, 2007, 24(11): 3500-3507.
- [29] Arrizón V, Ruiz U, Mendez G, *et al.* Zero order synthetic hologram with a sinusoidal phase carrier for generation of multiple beams[J]. Optics Express, 2009, 17(4): 2663-2669.
- [30] Davis J A, Cottrell D M, Campos J, *et al.* Encoding amplitude information onto phase-only filters[J]. Applied Optics, 1999, 38(23): 5004-5013.
- [31] Bolduc E, Bent N, Santamato E, *et al.* Exact solution to simultaneous intensity and phase encryption with a single phase-only hologram[J]. Optics Letters, 2013, 38(18): 3546-3549.
- [32] Li Y M, Cao C S. The theoretical analysis and experimental simulation of astigmatic elliptic Gaussian beam[J]. Acta Optica Sinica, 1999, 19(3): 428-432.
李银妹, 操传顺. 像散椭球高斯光束的理论分析与实验模拟[J]. 光学学报, 1999, 19(3): 428-432.
- [33] Zhang S H, Yan L P, Chen B Y, *et al.* Real-time phase delay compensation of PGC demodulation in sinusoidal phase-modulation interferometer for nanometer displacement measurement [J]. Optics Express, 2017, 25(1): 472-485.