

潜式全息瞄准器的光学系统设计

张远颖 任雪畅 炉庆洪 刘嘉洲 刘 守

(厦门大学物理系, 福建 厦门 361005)

摘要 在折叠紧凑匹配型全息瞄准器的光学系统基础上设计了一种新型潜式激光全息瞄准器。瞄准器的核心部分是由两个衍射匹配的全息光学元件和光学拐角辅助系统组成。阐述了潜式全息瞄准器的原理、设计方案及制作方法。通过实验与分析说明了该系统能实现拐弯射击的功能, 达到隐蔽射击的效果。

关键词 全息; 全息瞄准器; 潜式光学系统; 全息光学元件

中图分类号 O436 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201441.0609005

Optical System Design of Shelter Holographic Sight

Zhang Yuanying Ren Xuechang Lu Qinghong Liu Jiazhou Liu Shou

(Department of Physics, Xiamen University, Xiamen, Fujian 361005, China)

Abstract Based on the optical system of compact matching holographic sight, a novel shelter holographic sight is proposed. The core of this equipment includes two parts. One part is the diffraction matching holographic optical elements, the other is the corner-turning optical auxiliary system. The holographic sight theory, the designing plan and the manufacturing method are introduced. Meanwhile, experiments and analysis on this system show that this optical system satisfies the corner shooting function without exposure.

Key words holography; holographic sight; shelter optical system; holographic optical element

OCIS codes 090.2890; 090.2870; 110.2945

1 引言

全息瞄准器是以全息术为理论基础的一种适合近距离作战的新型瞄准镜, 20 世纪末才走上应用。和红点瞄准器、激光导向瞄准器等其他光学瞄准器相比, 全息瞄准器具有具有快速、精确、隐蔽性好的瞄准特性, 并具有高冗余度的特点^[1-2]。

本实验室研究小组提出采用菲涅耳全息图作为核心元件的方案, 解决了激光二极管(LD)温度升高, 波长漂移的问题, 对全息元件的制作、系统物象关系、像差进行了充分研究, 并成功搭建了系统模型, 发明了紧凑匹配型全息瞄准器光学系统^[3]与折叠式全息瞄准器光学系统^[4]。以上全息瞄准器制作成本低, 工艺较为简单, 效果相比红点瞄准器具有极大优势, 但也存在无法克服的缺点。折叠式全息枪

瞄准器依然需要射击者位于射击轴线方向进行观察、瞄准与射击。在拐角视线受限时, 存在被预先设伏的猎杀者杀伤的危险^[5]。因此设计一种在拐角射击时, 不会将射击者暴露, 让射击者进行快速反应、瞄准、射击的新型瞄准器显得尤为重要。虽然用于拐角射击的专用枪械已经出现, 但对于持大量装备的制式武器的普通士兵而言, 普遍换装拐角射击专用枪械是不现实的。现有的拐角辅助装置, 如中国专利——《用于拐角射击的瞄准具辅助装置》CN:201425446Y是通过反光镜对光路的转折, 令射击者看到任意角度的视场并进行射击, 此拐角辅助装置仅仅是利用反光镜扩大了射击者的视野范围, 使射击者能隐藏于拐角处观察到周围环境, 但从视窗观察到的目标位置方向和枪口射击方向是不同

收稿日期: 2013-12-20; **收到修改稿日期**: 2014-01-20

基金项目: 福建省自然科学基金(2012J01285)

作者简介: 张远颖(1989—), 女, 硕士研究生, 主要从事光全息术及其应用等方面的研究。E-mail: zyy@stu.xmu.edu.cn

导师简介: 任雪畅(1978—), 女, 博士, 副教授, 主要从事光全息术及其应用等方面的研究。

E-mail: xuechangren@xmu.edu.cn(通信联系人)

的,即观察与瞄准不同步,故射击者需要重新定位射击目标,较浪费时间且危险性大,并没有真正实现潜伏时拐角射击的目的。故设计一种能精确实现拐角射击的瞄准器的需求十分迫切,潜式全息瞄准器就是在这种形势下提出来的。

本文根据对全息枪瞄准器的技术要求,在现有的折叠式全息瞄准器的基础上,增加一种新的光路拐角辅助系统,提出了一种潜式全息瞄准器的光学系统设计思路。与之前拐角射击系统最大的不同在于系统扩大了射击者拐角处视线范围的同时也实现了全息分划图像直接定位射击目标的功能,达到了直接潜伏在拐角处射击的目的,确保了射击的安全性和精度。

2 工作原理

2.1 全息瞄准器的工作原理

根据全息匹配元件的性质,全息瞄准器的系统设计方案分为反射式系统和透射式系统。由于反射式全息的干涉纹面与记录介质面平行,对记录材料的厚度和稳定度要求较高,而对于透射式全息图而言,其峰值条纹面接近于记录介质面垂直,对记录介质的厚度要求较低^[6],所以,这里以透射式系统为例。如图1所示,激光二极管(LD)用于发射可见光波,为系统提供光源,发散光的中心光线的水平方向,光束经过透射式全息匹配元件(HME)的准直、匹配、偏折以后出射的平行光照射在全息图上,人眼可在透射式全息图的前方观察到在水平方向的远处有个清晰的全息分划图像。这就像是将目标与武器之间用一条无形的直线连在了一起,如大家熟知的激光瞄准镜,激光器发出的红色激光照射到目标上就可以准确瞄准,只不过在这里红色激光变成了在无穷远处的分划图像。

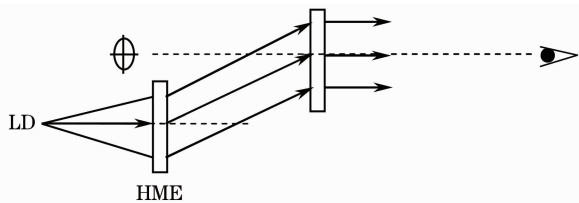


图1 透射式全息瞄准器系统

Fig. 1 Transmission holographic optical system

2.2 全息瞄准器光路设计要点

全息枪瞄系统采用LD(中心波长 650 nm)为系统提供光源。但是 LD 发出的是扩束光,存在相位差^[7-9],稳定性差,随着温度升高需要有更多载流子

注入来维持粒子数反转,LD的阈值电流升高,这会导致LD的能量转换效率降低,将电能转换为热能,发射波长也随着温度的变化发生漂移,波长的漂移量 $0.25 \text{ nm}/^\circ\text{C}$ 。波长漂移会导致衍射角变化,导致全息图分划像的位置随之改变^[10]。如图2所示,在全息瞄准器中,衍射光所成的虚像投射到无穷远处,角度的微小变化就意味着分划图像的位置会发生较大的变化,导致全息瞄准器不能有一个稳定位置的瞄准分划。图2中 θ 和 δ 分别为全息图的入射角和衍射角。

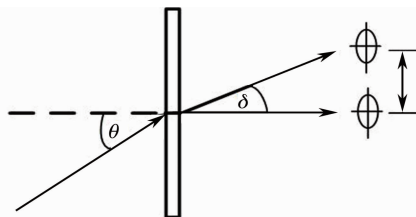


图2 全息图衍射角度随波长漂移变化示意图
Fig. 2 Lateral displacement of the image caused by wavelength change

由光栅方程可以推出

$$\sin \delta' = \frac{\lambda' - \lambda}{d} = \frac{\Delta\lambda}{d}. \quad (1)$$

由于波长的单位漂移量为 $0.25 \text{ nm}/^\circ\text{C}$,假设温度升高 10°C ,则波长漂移量 $\Delta\lambda = 2.5 \text{ nm}$,又光栅周期 $d = 618 \text{ nm}$,将 $\Delta\lambda$ 、 d 代入(1)式可得到 $\sin \delta' = 4.0 \times 10^{-3}$,则在射击距离为 100 m 时,分划图像偏移了约 40 cm ,严重影响了瞄准精度,而瞄准精度对瞄准系统而言是至关重要的^[11-12]。所以,由LD中心波长漂移造成重现分划图像偏离的影响是制作全息瞄准器必须解决的问题。

典型的解决方案是利用双全息光学元件控制色差^[13],如图3所示,通过同频率的全息图与全息匹配元件实现衍射匹配,以消除中心波长漂移的影响,从而减少全息图分划图像的像差,保证瞄准时有足够的精度。

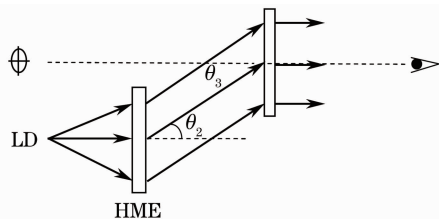


图3 全息瞄准器中消除波长漂移的光学装置
Fig. 3 Optical setup of the holographic sight with matching system

全息匹配元件一级衍射方程为

$$d(\sin \theta_1 + \sin \theta_2) = \lambda, \quad (2)$$

全息图一级衍射方程为

$$d'(\sin \theta_3 + \sin \theta_4) = \lambda, \quad (3)$$

式中 θ_1 、 θ_2 为全息匹配元件的入射角与衍射角, θ_3 、 θ_4 为全息图的入射角与衍射角。由于两个元件是平行放置故 $\theta_2 = \theta_3$, 当 θ_2 随着波长 λ 变化时, 全息图的入射角 θ_3 总是随着全息匹配图的衍射角 θ_2 改变, 且频率相同 $d = d'$, 令 (2) ~ (3) 式, 得到 $\sin \theta_1 = \sin \theta_4$, 进一步得到 $\theta_1 = \theta_4$, 说明水平入射的 LD 光源, 经过匹配元件与全息图的滤波、准直、偏折以后, 总是水平出射, 并在无限远处呈现清晰准确的分划图像, 消除了波长漂移所造成的影响。

3 光学元件的制作

折叠式全息瞄准器系统主要是由一块全息匹配元件和一块全息图组成的, 其中全息图不仅起着全息瞄准器视窗的作用, 还起着呈现分划图像的作用。全息匹配元件和全息图的配合使用能消除 LD 中心波长漂移引起的像偏差, 因此全息图和全息匹配元件的性能好坏直接影响着全息瞄准器性能的优劣, 他们必须满足: 1) 周期相同; 2) 全息图的衍射光必须平行。如果使全息匹配元件衍射出来的平行光以最大角度照射到全息图上, 系统显然会更加紧凑。但随着入射角度的增大, 制作全息光学元件的难度也加大, 难以制作出高质量的全息元件。反之, 如果全息匹配元件衍射出来的平行光以较小的角度照射全息图, 则会使系统不够紧凑。综合各项因素, 经过多次实验结果得出, 全息匹配元件衍射角为 62° 时最佳。

根据全息原理, 全息元件的周期由物光和参考光的夹角决定。为了得到相同周期的全息图和全息匹配元件, 在两个记录光路中两束光的夹角必须相等。实验中都采用波长为 632.8 nm 的氦氖激光器作为记录光源, 银盐干板作为记录介质。但由于瞄准器中是 LD 作为光源, 重现光源中心波长 650 nm 与记录波长 632.8 nm 不同, 故在全息图和全息匹配元件中参考光入射角不再是 62° , 必须由计算得到, 根据全息元件的物象关系

$$\sin \alpha_1 = \sin \alpha_C \pm (\sin \alpha_O - \sin \alpha_R), \quad (4)$$

式中 α_1 是重现图像与全息图法线的夹角即重现角, α_C 是重现光的入射角, α_O 是记录时物光的入射角, α_R 是记录时参考光的入射角, $\mu = \lambda_C / \lambda_O$ 再现波长与记录波长之比, 当要求重现光角度 $\alpha_1 = 0^\circ$, 重现光入射角 $\alpha_C = 62^\circ$, 物光的入射角 $\alpha_O = 0^\circ$, 代入 (4) 式, 可以得到参考光的入射角 $\alpha_R = 59.3^\circ$ 。

制作全息图的实验光路采取离轴全息术的办法记录^[10], 其记录系统如图 4 所示, 激光被可调分光镜 BS 分为两束, 其中一束光经过滤波器 (SF, SF₁) 后作为物光, 垂直入射到记录面上; 另一束光经过空间滤波器 SF₂ 和透镜 L₁ 准直成为平行光作为参考光, 以 59.3° 斜入射于记录面。和传统的记录二维透射全息图不同, 在枪瞄全息图的记录中必须满足全息瞄准器重现出的分划图像在无穷远处^[14]。根据高斯透镜公式, 可在原全息匹配元件的光路基础上, 在分划图像和记录版之间放置一透镜达到此效果, 制作时将分划图案的高反差片放置在透镜 L₁ 前焦点处, 物光与参考光的夹角为 59.3° , 实验光路如图 5 所示。

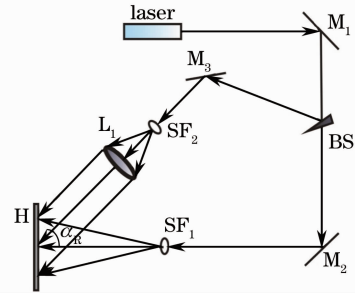


图 4 全息匹配元件制作实验光路图

Fig. 4 Fabrication geometry of holography matching element

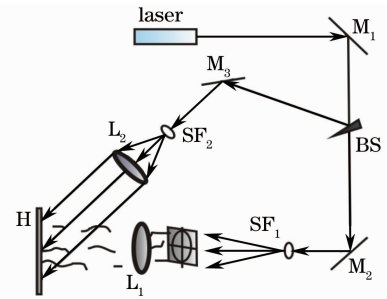


图 5 全息分划图像制作实验光路图

Fig. 5 Fabrication geometry of hologram

4 光学系统的设计

4.1 折叠式全息瞄准器的设计

折叠式全息瞄准器的工作原理如图 6 所示, LD 用于发射可见光波, 为系统提供光源; 第一反射镜 M₁ 位于 LD 的后方; 反射镜 M₂ 倾斜放置于 LD 前方上方。激光发射光波经过 M₁ 与 M₂ 的光路折叠以后, 垂直入射于全息匹配元件; 全息匹配元件与全息图垂直于水平方向放置; 入射光经过全息匹配元件后产生的衍射光波以 62° 入射于全息图, 作为分划

图像的重现光,此重现光与记录时的参考光相同;故经全息图衍射后,人眼可观察到在水平远处产生分划图像。

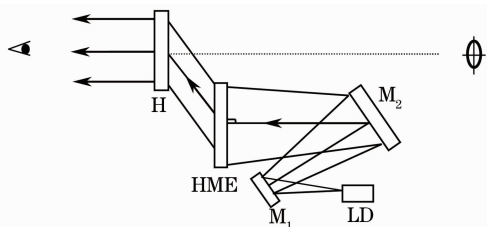


图 6 折叠式全息瞄准器的设计

Fig. 6 Design of folding holographic sight

4.2 光学拐角辅助系统的设计方案

图 7 为设计光路方案示意图,经过全息元件形成的分划图像沿水平方向到达的分光镜,分光镜以 60° 斜放置于光线入射方向,且光束入射方向经过分光镜的中心,分光镜的规格与分划图像的大小匹配。经过分光镜后按照 1:1 的光强分为两束,其中一束光经过透射,产生的分划图像呈现于视窗 1;另一束光经过分光镜反射后斜向上运行,入射于倾斜放置的全反镜上,分划图像经过全反镜沿垂直方向反射,在视窗 2 中呈现。所以,在两个垂直的视窗方向能同时看到可靠清晰的分划图像,实现光路拐角的效果。其中,用于连接分光镜与全反镜的挡板倾斜放置于二者之间,其特征长度满足一定条件是为了保证经分光镜反射到全反镜的分划图像能够在传播一

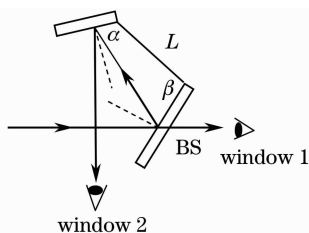


图 7 光路拐角辅助系统的设计示意图

Fig. 7 Schematic of corner-turning auxiliary system

定的光程后,完全覆盖于全反镜上,保证被偏折的光束经过全反镜以后产生明亮完整的分划图像于视窗 2,它与分光镜和全反镜的夹角条件应同时满足:1) 令系统结构最简单紧凑;2) 分划图像经过两次反射以后能完整呈现。综合各项因素,光路设计中具体角度与元件规格设置如下参数时能满足以上要求。

根据分划图像的大小规格,分光镜面积为 $2.4\text{ cm} \times 2.3\text{ cm}$ 全反镜面积约为 $1.6\text{ cm} \times 2.3\text{ cm}$,同时为了保证分划图像经过分光镜与全反镜的反射,图像不被遮挡且能在视窗 2 处得到完整的分划图像,设计时令与之间的挡板间隔 L 的长度为 2.2 cm 。其中全反镜与 L 的夹角 α 为 120° ,分光镜与 L 的夹角为 β 为 105° 。

4.3 潜式全息瞄准器的光学设计方案

潜式全息瞄准器是由折叠式全息瞄准器和光学拐弯辅助系统组成,其光学系统的设计如图 8(a) 所示,水平放置的 LD,其发射的激光沿水平方向运行,达到倾斜放置的 M_1 , M_1 的反射光斜向上入射到 M_2 。 M_2 的反射光垂直入射于全息匹配元件;全息匹配元件和全息图均垂直放置。从全息匹配元件出射的光束由发散光转变为平行光,以某一角度向上运行到达全息图;经衍射后在全息图后方产生水平方向的平行光;光束到达倾斜放置的分光镜;经过分光镜后分为透射和反射两束光,在视窗 1 可观察到透射光产生的全息分划图像;另一束反射光斜向下运行,入射于倾斜放置的 M_3 上,沿垂直方向出射,射击者可在视窗 2 中观察到全息分划图像。所以在两个垂直的视窗可同时看到清晰的全息分划图像,实现光路拐角的效果。

以上是系统的左拐弯设计,若要实现右拐弯,只要将辅助系统以入射光线方向为转轴翻转 180° ,令翻转后的分光镜、全反镜与原方向关于水平方向对称,如图 8(b) 所示。

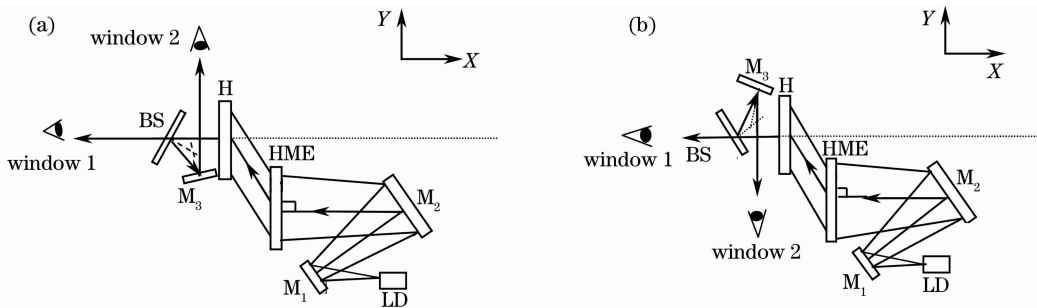


图 8 (a) 潜式全息瞄准器的左拐弯光学系统;(b) 潜式全息瞄准器的右拐弯光学系统

Fig. 8 (a) Left and (b) right turning optical system of shelter holographic sight

5 实验结果

实验用已装配好的折叠全息瞄准器和拐角辅助装置结合。如图 9 是全息折叠瞄准器和拐角辅助装置的外观图,图 10 是折叠式全息瞄准器的操作面板与视窗,人可以从视窗观察到由全息图产生的位于水平方向无限远处的红色分划图像。



图 9 全息折叠瞄准器与折叠辅助系统的外观图

Fig. 9 Appearance of the compact holographic sight and the auxiliary system



图 10 全息折叠瞄准器视窗

Fig. 10 Appearance of the compact holographic sight

图 11 是由折叠式全息瞄准器和拐角辅助装置组

合而成的潜式全息瞄准器的外观图,1 为第一视窗,2 为第二视窗,通过这两个视窗,射击者可以在两个方向观察到定位了同一个射击目标的分划图像。

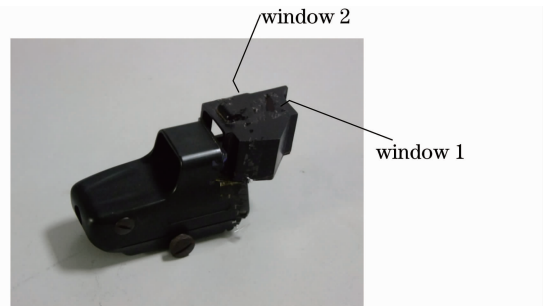


图 11 潜式全息瞄准器实物图

Fig. 11 Appearance of the shelter holographic sight

实验是在自然光的条件下进行观测的,根据外界光线调整激光输出功率以后,将目标瞄准位于远处的黑色光接收屏,并用相机透过瞄准器视窗拍摄下瞄准器的分划图像。如图 12(a)所示。图中红色部分是该系统在第一视窗重现并定位在目标上的分划图像,可以看到,该瞄准器在自然光下成像质量较为清晰,在分划图像下方的红色模糊部分是由于工作电流太高而产生的噪声。图 12(b)为用相机拍摄的通过第二视窗观察到的分划图像。第一视窗和第二视窗呈现的分划图像都定位瞄准了同一位置,且成像清晰;若要使分划图像左拐弯,只需要将辅助装置翻转 180° 即可实现。故此种系统不仅达到了扩大射击者拐弯射击时视野范围的目的,还实现使了分划图像拐弯且准确定位拐角处的射击目标的功能,避免了头部直接探出后被暴露的危险,真正实现拐弯射击的目的。

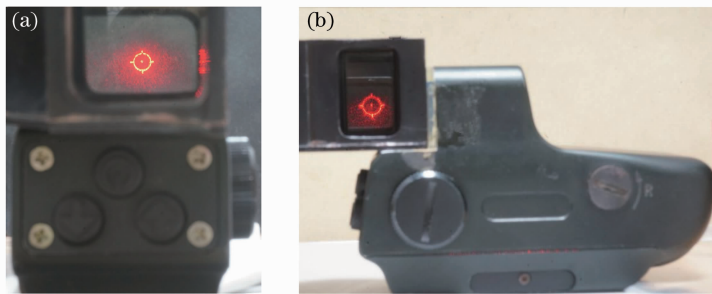


图 12 (a) 第一和(b) 第二视窗观察到的分划图像

Fig. 12 Image from (a) window 1 and (b) window 2 respectively

6 结 论

潜式全息瞄准器通过折叠式全息瞄准器产生的在水平方向无限远的分划图像,通过分光镜和全反镜对光束的引导,有效实现光路了转弯,让射击者在

水平和垂直方向能同时看到全息分划图像。对于不同方向的拐角,只需把辅助系统沿着水平方向翻转 180° 即可。此外,在不必要进行拐弯射击时可卸下本装置,对于瞄准器的正常使用和战术动作的完成不

产生不利影响。此结构装拆方便、可靠性好,只需低成本即可为射击者提供极大的安全保障,因此这种潜式全息枪瞄准器具有广阔的军事应用前景。

参 考 文 献

- 1 Tai Anthony M, Siczka Eric J, Radler Richard, *et al.*. Holographic gunsights for small arms[C]. SPIE, 1988, 2968: 210—219.
- 2 Anthony M Tai, Eric J Siczka, Juris Upatnieks. Holographic gunsight-the next generation[C]. SPIE, 2000, 3951: 84—91.
- 3 Liu Shou. Compact Matching Type Holographic Aiming Device Optical System: China, 200910250486[P]. [2014-03-07].
刘 守. 紧凑匹配型全息瞄准光学系统: 中国, 200910250486 [P]. [2014-03-07].
- 4 Zhang Xiangsu. Folding Holographic Sight Optical System: China, 201120039289[P]. [2014-03-07].
张向苏. 折叠式全息瞄准器光学系统: 中国, 201120039289[P]. [2014-03-07].
- 5 Xu Yigang, An Baolin. Sight Auxiliary Device Used for Cornershooting: China, 200920047219[P]. [2014-03-07].
徐毅刚, 安宝林. 用于拐角射击的瞄准具辅助装置: 中国, 200920047219[P]. [2014-03-07].
- 6 Yu Meiwen, Zhang Jingfang. Optical Holography[M]. Beijing: Beijing Education Press, 1995. 48—54.
于美文, 张静方. 光全息术[M]. 北京: 北京教育出版社, 1995. 48—54.
- 7 Zhou Haixian, Cheng Yunfang. Holography Technology-Design, Manufacture and Application[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 1983. 40—41.
周海宪, 程云芳. 光全息学-设计、制造和应用[M]. 北京: 化学工业出版社, 1983. 40—41.
- 8 Wang Xiaofei, Yi Hongjing, Qian Longsheng. Design of a semiconductor laser temperature control system[J]. Journal of Changchun University of Science and Technology, 2005, 28(1): 20—22.
王肖飞, 伊红晶, 钱龙生. 半导体激光器温度控制系统的设计[J]. 长春理工大学学报, 2005, 28(1): 20—22.
- 9 Xie Jianping, Wang Pei, Xu Lixin, *et al.*. Wavelength tuning and stabilizing techniques of semiconductor laser[J]. Chinese Journal of Quantum Electronics, 2002, 19(2): 97—103.
谢建平, 王 沛, 许立新, 等. 半导体激光器的波长调谐和波长稳定技术[J]. 量子电子学报, 2002, 19(2): 97—103.
- 10 Huang Shaoran. Optical Systems of Novel Holographic Sight-Design and Fabrication[D]. Xiamen: Xiamen University, 2009. 4—7.
黄少燃. 新型全息瞄准器光学系统的研制[D]. 厦门: 厦门大学, 2009. 4—7.
- 11 Li Yacan, Qiu Lirong, Zhang Pengsong, *et al.*. Development of portable multi-optical axes parallelism calibration system [J]. Chinese J Lasers, 2012, 39(10): 1008002.
李雅灿, 邱丽荣, 张鹏嵩, 等. 便携式多光轴平行性检校系统的研制[J]. 中国激光, 2012, 39(10): 1008002.
- 12 Zhou Lei, Ren Ge, Tan Yi, *et al.*. Maximum-like estimation of laser pointing errors using return photos[J]. Chinese J Lasers, 2012, 39(3): 0308003.
周 磊, 任 戈, 谭 毅, 等. 利用极大似然法统计回波信号实现光束闭环瞄准实验研究 [J]. 中国激光, 2012, 39(3): 0308003.
- 13 C S Ih, L Q Xiang, B H Zhuang, *et al.*. Optical Head Using HOE-Technology and Experiments[M]. OSA Annual Meeting Santa Clara, 1998.
- 14 Liu Shou, Zhang Xiangsu, Ren Xuechang. Optical matching system for eliminating lateral position displacement of holographic images under varying laser wavelength[C]. J Phys: Conf Ser, 2013, 415(1): 012080.

栏目编辑:何卓铭