

光束特性对声光偏转相干光探测效率的影响

何 宁 谢朝玲

(桂林电子科技大学信息与通信学院, 广西 桂林 541004)

摘要 相干光探测中,信号光和参考光光斑匹配以及光束特性直接影响探测效率。应用 Matlab 软件对高斯光斑与平顶光斑的光强分布分别进行仿真,给出两种光斑的数学特征;以声光偏转效应的相干光探测为基础,建立高斯光斑与矩形光斑叠加模型,分析了光斑大小匹配、光轴平移对相干光探测效率的影响。研究表明,在保证两束光的准直性及总能量相等的情况下,矩形光斑的能量密度为高斯光斑中心位置的 0.8 倍时,可获得最佳重叠效率 79.6%;非准直状态下信号光与本振光在光敏面的探测效率将会降低,但高斯与矩形混频时在偏离光轴 ± 0.5 mm 内变化较平缓。

关键词 光通信;相干探测;光束特性;光强分布;重叠效率;探测效率

中图分类号 TN929.1 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS201333.0206007

Effect of Beam Characteristic on Detection Efficiency for the Coherent Optical Detection System Based on Acousto-Optic Deflection

He Ning Xie Zhaoling

(School of Information and Communication, Guilin University of Electronic Technology,
Guilin, Guangxi 541004, China)

Abstract In coherent detection system, the matching of signal beam and local oscillator and the beam characteristic have important effects on the detection efficiency. The light-intensity distributions of Gaussian beam and flat-top beam are simulated in Matlab respectively, and the mathematical feature of the two spots are provided. Based on the acousto-optic deflection effect, the effect of spot size matching and signal beam parallel moving along light axis on the coherent detection efficiency is analyzed by building overlay model between Gaussian beam and rectangle beam. The results show that, with the assurance of beam collimation and equivalence in the total energy of two spots, we can get the optimal overlapping efficiency of 79.6% when the energy density of rectangle spot is 0.8 times as the central energy density of Gaussian spot. The non-collimation of the beams will reduce the detection efficiency when the signal beam is mixed with the local-oscillator beam on the optoelectronic sensor surface. But while rectangle beam is mixed with Gaussian beam, the variation of detection efficiency tends to become gentle when beams deviate from optic axis within ± 0.5 mm.

Key words optical communications; coherent detection; beam characteristic; intensity distribution; overlapping efficiency; detection efficiency

OCIS codes 060.4510; 060.1660; 080.1665

1 引 言

相干光探测具有较强抗干扰能力和较高的探测灵敏度,适合弱信号环境下的光电探测^[1]。相干光探测需要信号光和参考光应满足光束的单频性、偏振性和准直性,与常规强度调制直接探测方式相比,其探测灵敏度可提高 20 dB 左右。在相干光通信的

实际应用中,由于存在光调制、光传输等环节对光束特性和光学匹配的影响,相干探测的信号光和参考光不能完全满足光混频的要求。如果失配程度过大,将导致相干光探测效率明显降低,不能发挥相干探测的优势^[2,3]。几十年来,光学匹配、探测器类型^[4,5]等对探测效率的影响在理论和实验上均已有

收稿日期: 2012-09-24; 收到修改稿日期: 2012-12-06

基金项目: 国家 863 计划(2007AA0860)资助课题。

作者简介: 何 宁(1958—),男,研究员,硕士生导师,主要从事光通信方面的研究。E-mail: eicnhe@guet.edu.cn

较多的研究。基于声光偏转器的相干光探测系统,具有高速并行处理能力、实时性好、截获率高、灵敏度高、带宽大和获得全息信息等优点,在电子战中具有广阔的发展前景。在声光偏转器系统中,信号光会随着射频信号在一定范围内动态变化,导致两束光重叠后的混频效果受到一定程度影响。本文针对所研究的声光偏转系统,通过仿真构建了一个本振均匀光斑,研究了参与混频两光束的匹配特性,分析了不同光束结构对相干光探测效率的影响。

2 声光偏转效应的相干光探测原理

声光偏转效应的相干光探测系统如图 1 所示。激光器 1 产生的光束经声光偏转器发生声光衍射互

作用后产生 0 级光和 1 级光,1 级光为调制光,通过光阑选择作为信号光。激光器 2 输出光束经过均匀化处理后作为本振参考光,利用分光片将信号光和参考光进行相干合路,然后通过光束准直和透镜压缩,使得叠加后的光斑与光电探测器的光敏面匹配,最后由探测器完成光电转换,输出一个中频光电流,系统中激光器为异源结构,也可采用同源方式。设同方向到达且同偏振方向的信号光和参考光的光场分别为^[6,7]

$$E_S(t) = A_S \cos(\omega_S t + \varphi_S),$$

$$E_L(t) = A_L \cos(\omega_L t + \varphi_L), \quad (1)$$

式中 A_S 和 A_L 、 ω_S 和 ω_L 、 φ_S 和 φ_L 分别是信号光和参考光的振幅、角频率和相位。相干混频后的光场为

$$E(t) = E_S(t) + E_L(t) = A_S \cos(\omega_S t + \varphi_S) + A_L \cos(\omega_L t + \varphi_L), \quad (2)$$

用平均光功率表示光电探测器输出的光电流为

$$I(t) = \alpha \overline{E^2(t)} = \alpha \{ A_S^2 \overline{\cos^2(\omega_S t + \varphi_S)} + A_L^2 \overline{\cos^2(\omega_L t + \varphi_L)} + A_S A_L \overline{\cos[(\omega_L + \omega_S)t + (\varphi_L + \varphi_S)]} + A_S A_L \overline{\cos[(\omega_L - \omega_S)t + (\varphi_L - \varphi_S)]} \}, \quad (3)$$

式中 α 为光电变换比例常数。当 $\omega_L \neq \omega_S$ 时,称为外差探测;当 $\omega_L = \omega_S$ 时,称为光零差探测。经过电信号处理后,可得到稳定的差频输出,并设信号光、参考光的平均光功率分别为 P_S 和 P_L , 则输出的信号电流为

$$I(t) = 2\alpha \sqrt{P_S P_L} \cos[(\omega_L - \omega_S)t + (\varphi_L - \varphi_S)], \quad (4)$$

式中 $P_S = A_S^2/2$, $P_L = A_L^2/2$ 。由以上分析可知,空间相干光探测需要两束光具有相同的特性,即单频性、偏振性和准直性,且要满足一定的光学匹配。(4)式表示,中频电流与本振光功率的平方根成正比。

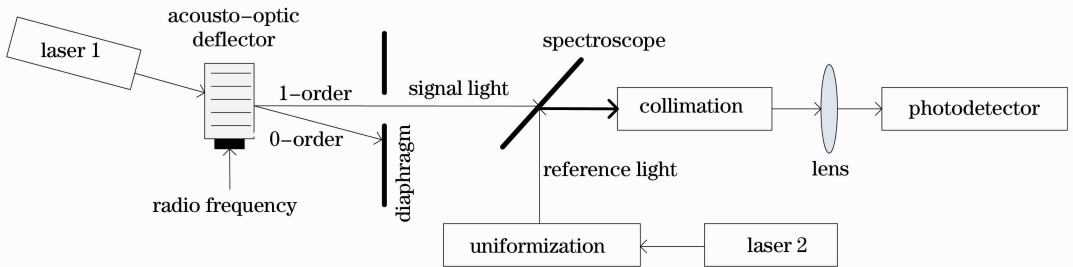


图 1 声光偏转效应的相干光探测原理框图

Fig. 1 Schematic of coherent optical detection based on the acousto-optic deflection effect

采用声光器件构建相干光探测,是利用声光互作用进行一定的信号处理,在保证高灵敏度的同时,可进行一定的噪声抑制,改善信噪比^[8]。系统中声光偏转器是频率调制器件,作用的射频信号(RF)为接收电信号,当射频信号频率发生变化时,1 级衍射光角度将在一定范围内变化,入射到光电探测器上的信号光准直性也将发生变化,通过光束准直器和透镜压缩可进行适当调整,而参考光传输方向是固定不变的,其光束的准直性和光斑均匀性可有效保

证。因此,依据系统的光路结构,从光斑光强分布对两相干光束的特性与位置关系进行讨论,获得合适的光束匹配,研究相干探测效率影响程度。

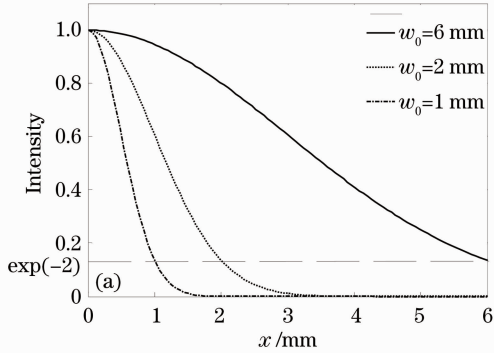
3 高斯光斑与平顶光斑

假设光强分布是连续的, ω_0 为高斯光束的束腰半径,即光强下降到 $1/e^2$ 时的光束半径,高斯光束的归一化光强分布^[9]表达式为

$$f_G(x) = \exp\left(\frac{-2x^2}{\omega_0^2}\right). \quad (5)$$

图 2(a)为(5)式的 Matlab 软件数值仿真,图中的原点表示光斑的中心位置。由(5)可知,光强分布曲线的扁平情况取决于高斯光束的束腰半径 ω_0 , ω_0 越大曲线越平缓, ω_0 越小曲线越陡峭。

对于平顶光斑采用 Fermi-Dirac 模型进行分析,设 R 为光强降低到其轴上值的一半时的光束半径,即光强半峰全宽, W 为光强下降指数。则平顶



光束的归一化光强分布^[10]为

$$f_P(x) = \{1 + \exp[(x - R)/W]\}^{-1}. \quad (6)$$

图 2(b)为 $R=3$ 时,不同 W 下 $f_P(x)$ 的曲线。分析得知, R 一定时,平顶光束的光强分布均匀性完全取决于 W 。 W 越小,表示光强下降的速度越快,光强分布就越接近均匀分布。在实际应用中不能实现理想的均匀分布,但可以通过一定的光学系统进行处理,获得较理想均匀分布的平顶光斑。

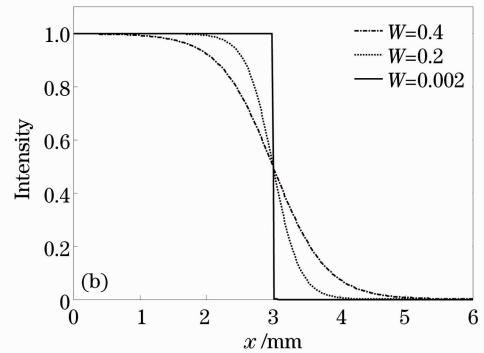


图 2 Matlab 软件仿真图。(a)高斯光斑光强分布; (b)平顶光斑光强分布

Fig. 2 Simulation in Matlab (a) intensity distribution of Gaussian beam; (b) intensity distribution of flattop beam

因此,高斯光斑光强分布是从中心往边缘渐变的,中间强两边弱,这将会给光功率稳定性的调整、定焦等带来不便;平顶光斑光强分布在光强半峰全宽 R 内接近均匀分布,光束的功率、能量和密度在这个区域内可以保持相对稳定,有利于光束的对准和匹配。

4 光学匹配对相干光探测效率影响分析

相干光探测是利用两个光斑的重叠部分进行相干,重叠部分的面积即为相干光探测的有效面积。光斑能量等同于光强分布下的面积,对于连续光来说能量等效为平均光功率,设重叠部分能量与两光斑的总能量之比 k ,即重叠效率。则 k 的表达式为

$$k = \frac{E_0}{E_1 + E_2}, \quad (7)$$

式中 E_0 为两光斑的重叠部分的能量, E_1 为光斑 1 的总能量, E_2 为光斑 2 的总能量。

由(7)式可知,重叠效率随着激光能量增加呈一定比例增加,一般情况下参考光的能量比信号光大一个数量级,当重叠效率增加时,进行光电转换效率也相应提高,但要求两光斑面积与探测器光敏面相匹配,且入射光功率不超出探测器的量子效率范围;当参考光的能量小于信号光时,重叠效率将会降低,相干作用不明显,此时探测效率主要取决于信号光,

相当于光强探测。下面以能量相等的情况来讨论探测效率。

4.1 光斑大小匹配

假设两个光斑共轴,且两个光斑总能量不变且相等。令 b 为矩形光斑单位面积上的能量密度,光斑面积与能量密度成反比。图 3 为以高斯光斑为参考的两光斑的重叠关系示意图,图 3(a)为矩形光斑单位面积上的能量密度小于高斯光斑中心位置的情况,图 3(b)为矩形光斑单位面积上的能量密度大于等于高斯光斑中心位置的情况。

图 4 为重叠效率 k 与矩形光斑单位面积上的能量密度 b 的关系。由图可见, k 并不是随着 b 的增大

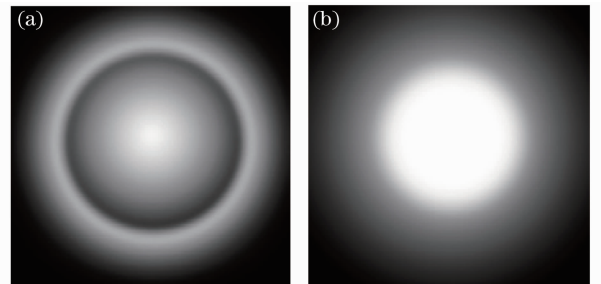


图 3 不同 b 下高斯光斑与矩形光斑的重叠关系。

(a) $b < 1$; (b) $b \geq 1$

Fig. 3 Overlapping of Gaussian beam and rectangular beam with different b (a) $b < 1$; (b) $b \geq 1$

而增大, 而 $b = 0.8$ 时 k 获得最大值 79.6%, b 在 $0.8 \sim 0.9$ 变化平缓。分析表明, 保证两光斑的总能量相等, 使矩形光斑单位面积上的能量密度为高斯光斑中心位置的 $0.8 \sim 0.9$ 倍, 系统将稳定地获得高达 79% 的相干光探测效率。

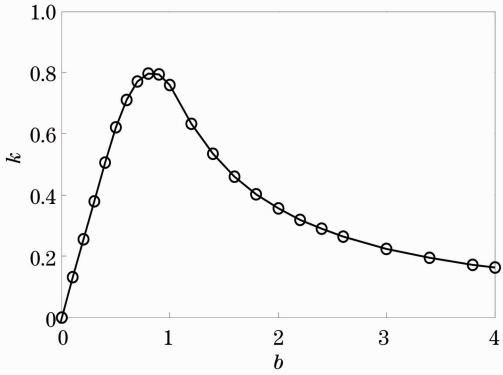


图 4 k 与 b 的关系

Fig. 4 Relation between k and b

4.2 光轴平移

设两混频光斑总能量相等, 光电探测器在光斑中心位置, 光敏面的大小等于共轴时两光斑重叠覆盖面, 则当光轴发生平移时有一部分重叠面积不能落到光敏面上。图 5(a) 为矩形本振光和高斯信号光混频时光轴平移情况; 图 5(b) 为高斯本振光和高斯信号光混频时光轴平移情况。

参与混频的光斑位置对探测效率影响较大, 图 6 为重叠效率 k 与平移量 δ 的关系, 图 6(a) 为矩形与高斯混频时的情况。由图 6(a) 可知, 重叠效率

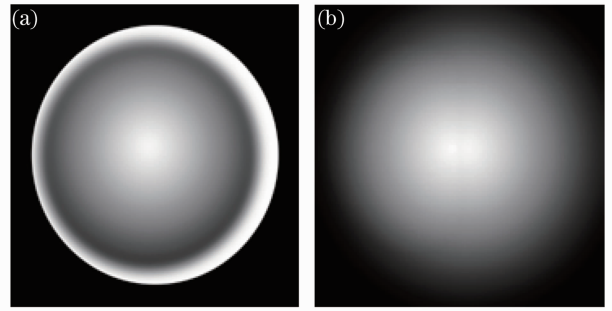


图 5 不同光斑垂叠时光轴平移情况。(a) 矩形光斑和高斯光斑; (b) 高斯光斑和高斯光斑

Fig. 5 Translation of optic axis as rectangular spot and Gaussian spot overlap. (a) Rectangular spot and Gaussian spot; (b) Gaussian spot and Gaussian spot

k 随平移量 δ 的增大由 0.796 开始减小, 当平移量增大到 0.5 mm 时, k 降低到 0.7 左右; 平移量增大到 1 mm, k 降低到 0.548。图 6(b) 为高斯与高斯混频时的情况, 由图 6(b) 可知, 曲线下降的速度较快, 在没有平移的理想情况下 k 为 1, 当平移量增大到 0.5 mm 时, k 就降低到 0.65 左右; 平移量增大到 1 mm, k 就已经降低到 0.45 左右。分析表明, 当平移量在 ± 0.5 mm 内时, 矩形光束与高斯光束混频的 k 随平移量下降比较平缓; 当信号光轴平移量较大时, 相干光探测效率则迅速下降; 实际上难以做到光斑共轴, 采用光强均匀分布的光束对相干光探测光路对准有利, 只要平移量控制在一定范围就可保持较高的探测效率。

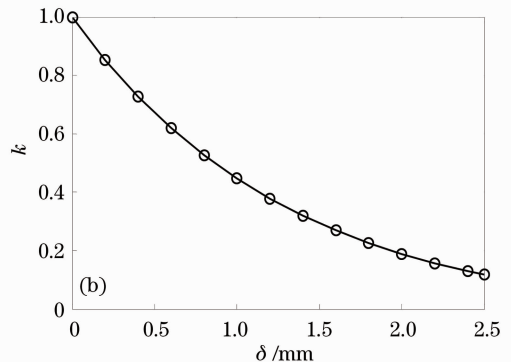
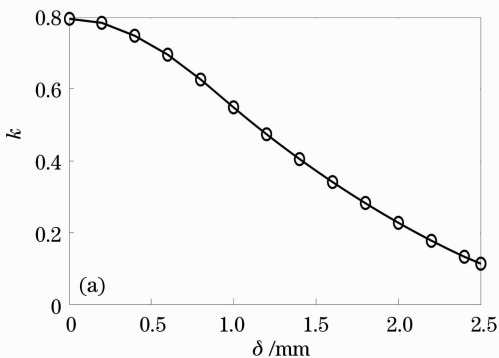


图 6 重叠效率 k 与平移量 δ 的关系。(a) 矩形光斑和高斯光斑; (b) 高斯光斑和高斯光斑

Fig. 6 Relationship between overlap efficiency k and translation δ (a) rectangle spot and Gaussian spot; (b) Gaussian spot and Gaussian spot

5 光斑重叠转化效率测试

依据以上给出的光束准直性以及光轴偏移对相干探测转换效率的分析, 实验上对到达光电探测器

两光斑的重叠与光电转换情况进行测试, 并给出对应关系曲线。实验中光电探测器有效光敏面尺寸为 2 mm, 声光偏转器工作频率为 400 MHz, 光束衍射

角为 21 mrad, 衍射光斑直径为 2 mm, 光强分布为高斯光斑; 高斯光斑经均匀化后直径为 4 mm 作为本振光斑, 合路压缩为 3 mm 入射到光电探测器, 实验中由射频信号作用声光偏转器, 使衍射信号光在 2 mm 左右横向移动。图 7 为相干光束到达光电探测器时拍到的光斑重叠图, 图 7(a) 为准直状态下的图, 此时重叠光斑可以全部落到光敏面; 图 7(b) 为信号光左平移 1 mm 的光斑, 图中左边部分的重叠光斑不能注入光敏面中, 因而不能被系统有效地利用。

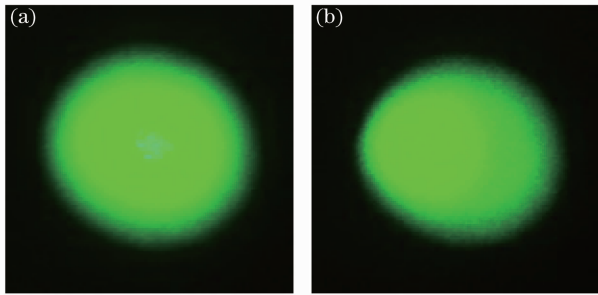


图 7 相干光束到达光电探测器光敏面的光斑图。

(a) 准直状态; (b) 非准直状态

Fig. 7 Images of coherent light beam arriving at photodetector photosensitive surface (a) collimated; (b) non-collimated

图 8 为光电探测器的光电转换效率曲线, 光电转换效率 η 等效为探测器输出电功率与照射到探测器光敏面之前的光功率之比。图 8 与图 6(a) 曲线形状相近, 可见 η 与 k 密切相关, 光电转换效率随光斑在光电探测光敏面上的重叠效率增加而增加。由于重叠光斑偏离光敏面, η 从光束完全准直状态下的 0.75 随着平移量 δ 的增大而降低, δ 越大对光斑相干混频的影响就越大。在 δ 为 0.1 mm 内 η 下降缓慢趋于平缓, 而大于 0.1 mm 时 η 迅速减小, 所以在某种程度上可以说 δ 为 0.1 mm 内时两光束都处

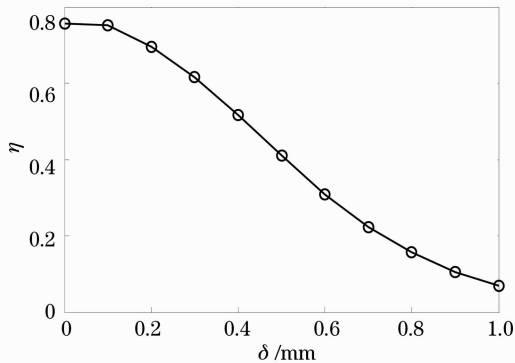


图 8 光电转换效率与平移量的关系

Fig. 8 Relation between optoelectric conversion efficiency η and translation δ

于准直状态, 选用光强分布均匀的光斑更有利于光束准直。重叠光斑对相干探测效率起主要贡献, 而无重叠部分对光电转换表现为噪声, 所以, 参与相干光探测的光斑大小与探测器光敏面要尽量匹配。实验测试表明, 重叠效率与光电转换效率不但在变化趋势一致, 而且数值上也接近, 用重叠效率来分析探测效率有一定的合理性。

6 结 论

从高斯光斑和矩形光斑混频出发, 分析了光斑能量大小匹配以及信号光光轴平移对相干光探测效率的影响, 为后续相干光通信系统的构建提供了一定的参考。结果表明, 激光光束的准直性和均匀性直接影响相干光探测性能, 采用光强分布均匀的光斑有利于光束对准和匹配。仿真和实验结果表明, 以光斑均匀化为基础的光斑重叠混频, 可获得较好的探测效果, 在满足一定的光束匹配条件下, 其相干光探测效率可大于 75%, 在激光特性稳定和光学系统合理条件下, 可有效保证探测效率的可靠性和稳定性。在实际应用中, 相干光探测效率还与探测器的特性参数和光敏面尺寸的利用率有关, 根据光电探测器的有效光孔可以适当调节光斑大小以及光轴位置, 以确保系统高效运行。开展激光光束的空间传输特性研究是有价值的, 特别是光强分布均匀的平顶光斑的应用研究, 具有一定的应用前景。

参 考 文 献

- 1 Wang Chunhui, Gao Long, Pang Yajun *et al.*. Experiment investigation for relation between beam splitter coefficient and signal-to-noise ratio of 2 μm balanced coherent system [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(11): 1104002
王春晖, 高 龙, 庞亚军等. 光束分束比对 2 μm 平衡式相干探测系统信噪比影响的实验研究[J]. *光学学报*, 2011, **31**(11): 1104002
- 2 Wang Qi, Wang Chunhui, Shang Tieliang. Heterodyne efficiency of coherent detection with Gaussian local-oscillator and Airy spot signal beam [J]. *Chinese J. Lasers*, 2003, **30** (Suppl.): 183~186
王 琪, 王春晖, 尚铁梁. 高斯本振光和爱里斑信号光相干探测的外差效率[J]. *中国激光*, 2003, **30**(增刊): 183~186
- 3 Liu Hongzhan, Ji Yuefeng, Xu Nan *et al.*. Effect of amplitude profile difference of signal and local oscillator wave on heterodyne efficiency in the inter-satellite coherent optical communication system [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(10): 1006001
刘宏展, 纪越峰, 许 楠等. 信号与本振光振幅分布对星间相干光通信系统混频效率的影响[J]. *光学学报*, 2011, **31**(10): 1006001
- 4 K. K. Das, K. M. Iftakharuddin. Heterodyne detection using hexagonal detector: effects of beam profiles and phase front misalignment [C]. *Proceedings of the IEEE*, 1997. 476~478
- 5 Zhang Huaiyong. Investigation on CO₂ Laser Heterodyne Detection Characteristic Using Rectangular Detector [D].

- Harbin; Harbin Institute of Technology, 2010. 8~37
- 张怀勇. 基于矩形探测器的 CO₂ 激光外差探测特性研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2010. 8~37
- 6 Ma Zongfeng, Zhang Chunxi, Zhang Zhaoyang *et al.*. Signal-noise ratio in optical heterodyne detection [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(5): 889~892
- 马宗峰, 张春熹, 张朝阳 等. 光学外差探测信噪比研究[J]. 光学学报, 2007, **27**(5): 889~892
- 7 Zhang Wenrui, Zeng Xiaodong, Man Xiangkun. Study on optical heterodyne detection [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2008, **37**(Suppl.): 146~148
- 张文睿, 曾晓东, 满祥坤. 激光外差实验研究[J]. 红外与激光工程, 2008, **37**(增刊): 146~148
- 8 Li Xiaona, He Ning, Deng Deying. Research on phenomenon of intermodulation in detection of multi-frequency signals based on acousto-optic deflection [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(9): 2504~2507
- 李小纳, 何 宁, 邓德迎. 声光偏转多频信号同时探测互调现象研究[J]. 光学学报, 2010, **30**(9): 2504~2507
- 9 Gao Yuhan, An Zhiyong, Li Na'na *et al.*. Optical design of Gaussian beam shaping [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2011, **19**(7): 1464~1470
- 高禹含, 安志勇, 李娜娜 等. 高斯光束整形系统的光学设计[J]. 光学 精密工程, 2011, **19**(7): 1464~1470
- 10 Chen Kai. The Research and Design of the System that Converting a Gaussian to a Flattop Beam [D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2011. 11~22
- 陈 凯. 高斯光束整形为平顶光束整形系统的研究与设计[D]. 北京: 北京工业大学, 2011. 11~22

栏目编辑: 王晓球