

共焦法布里-珀罗干涉显微测头光学特性分析

边文宾^{1,2} 高思田² 卢荣胜¹ 施玉书²

¹ 合肥工业大学仪器科学与光电工程学院, 安徽 合肥 230009
² 中国计量科学研究院长度计量科学与精密机械测量技术研究所, 北京 100013

摘要 根据纳米计量分辨力的要求,设计一套共焦法布里-珀罗(F-P)干涉显微测头。系统光源采用保偏光纤直接导入,从F-P腔外入射。光路设计成便于减小光学共模噪音的差动形式。通过建立模型分析系统光学特性,得出反射平板的最佳反射率以及共焦结构对干涉条纹的影响。实验验证表明反射平板反射率为40%时可以使系统得到对比度高,信噪比好的干涉条纹;针孔光阑可以方便寻找测量透镜的焦点和减小杂散光的噪音;系统轴向分辨力达到0.2 nm。

关键词 共焦法布里-珀罗干涉;反射率选择;干涉条纹分布;轴向分辨力

中图分类号 TB921 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/LOP49.051203

Analysis of Optical Characters of Confocal Fabry-Pérot Interference Microscopy Probe

Bian Wenbin^{1,2} Gao Sitian² Lu Rongsheng¹ Shi Yushu²

¹ School of Instrument Science and Opto-Electronic Engineering, Hefei University of Technology, Hefei, Anhui 230009, China

² Division of Metrology in Length and Precision Engineering, National Institute of Metrology, Beijing 100013, China

Abstract According to the requirements of resolution of nanometrology, a confocal Fabry-Pérot (F-P) interference microscopy probe is designed. The laser source is directly conveyed into the system by the single polarization-maintaining fiber, and passes through F-P cavity. In order to reduce the optical common mode noise, the differential optical path is designed. Through the establishment of model, the physics characters of the system are analyzed. The best reflectivity of the reflection plate can be obtained and how the confocal impacting the interference process can be found. The experiment results show that the system can get interference fringes with high-contrast and high signal to noise ratio when the reflectivity of the reflection plate is 40%. Pinhole aperture is favorable for finding the focus of the measure lens and reduces the noise of stray light. The axial resolution of the system can reach up to 0.2 nm.

Key words confocal Fabry-Pérot interference; reflectivity choose; distribution of interference; axial resolution

OCIS codes 120.3180; 180.3170

1 引言

在干涉显微测量表面形貌领域,常用的结构有 Linnik、Mechelson、Mirau。Linnik 结构受振动和气流干扰影响大, Mechelson 和 Mirau 结构抗干扰力强但物镜工作距离长、数值孔径小^[1~3]。借助 Mirau 结构测量光和参考光共光路可抗干扰的原理,应用法布里-珀罗(F-P)腔使所有出射光均为测量光,增大物镜数值孔径提高分辨力、使用稳频激光器使量值可溯源。F-P 干涉可形成锐度较高的干涉条纹,并且干涉条纹斜率较大,可以获得很高的分辨力,因此可以利用该段干涉条纹斜率大的特性实现纳米级的测量及标定。但现有的共焦 F-P 干涉仪多应用于激光稳频等领域^[4],其结构不能用于表面形貌测量。为了便于消除光学系统的共模噪音,设计了差动形式的光路结构。

干涉条纹的锐度与 F-P 腔反射镜的反射率有关。如果反射率太高,则干涉条纹过于锐利,不仅不利于

收稿日期: 2011-12-14; 收到修改稿日期: 2012-01-10; 网络出版日期: 2012-03-22

作者简介: 边文宾(1985—),男,硕士研究生,主要从事纳米计量方面的研究。E-mail: bianwb_nim@163.com

导师简介: 高思田(1962—),男,研究员,主要从事纳米计量方面的研究。E-mail: gaost@nim.ac.cn

寻找干涉条纹而且从腔外激光器入射到腔内的光能较少;如果太低则干涉效果不显著,因此应寻找合适的反射率。为了更精确地找到测量透镜的焦点,系统采用共焦形式。

2 系统光路原理及反射率选择

2.1 光路原理

系统基本结构如图 1 所示,由非偏振分光镜(NPBS)、偏振分光镜(PBS)、反射平板、 $\lambda/4$ 波片、测量透镜、采集透镜、针孔光阑、光电接收器组成。反射平板上表面镀增透膜,下表面镀反射膜。因为光线从反射膜两面入射时反射率会有少量误差,因此假设光密向光疏入射时的反射率为 r_1 ,透射率为 t_1 ;从光疏向光密入射时的反射率为 r_2 ,透射率为 t_2 。

激光器发出的光经过非偏振分光镜、偏振分光镜以 p 光的形式入射到反射平板上,其中一束被反射平板直接反射,另一束入射到 F-P 腔中。直接反射的那束光中一半被 NPBS 反射进入光电接收器,另一半透过 NPBS 回到光纤中,因此要在光源与光纤耦合器之间加隔离器以防止回光。入射到 F-P 腔中的 p 光经过 $\lambda/4$ 波片和聚光透镜会聚到样品表面,在样品表面被反射后再次通过透镜变为平行光并再次通过 $\lambda/4$ 波片。此时,由于样品表面的反射和两次经过 $\lambda/4$ 波片,使得 p 光的偏振特性发生变化而变为 s 光。s 光在反射平板处一部分反射,一部分透射。透射部分被 PBS 反射在接收器 2 处参与干涉,反射部分重复上述过程,s 光再次反射回反射平板时偏振特性再一次发生变化而变为 p 光。其透过反射平板的部分被非偏振分光镜部分反射在接收器 1 处参与干涉,被反射平板反射的部分重复前述过程。p 光或 s 光在 F-P 腔内被反射无数次,每次反射后光强都会有损失,但是相邻的 p 光或 s 光的光程差与光从反射平板到透镜焦点间的垂直距离所形成的光程成正比。

由上述分析得出,参与干涉的第一束 p 光未进入 F-P 腔直接反射,这束光与从 F-P 腔中出射的 p 光相比有半波损失,而所有参与干涉的 s 光都是从 F-P 腔中出射的,不存在半波损失,因此 p 光干涉与 s 光干涉是差动关系。

2.2 反射率选择

假设反射平板到透镜焦点间的垂直距离的光程为 s_0 ,则相邻的 p 光或 s 光的光程差为

$$\Delta_1 = 4s_0;$$

当样品移动一个微小位移 L 时,光程差变为

$$\Delta_2 = 4(s_0 + nL),$$

式中 n 为空气折射率;光程差的变化量为

$$d\Delta = \Delta_1 - \Delta_2 = 4nL;$$

干涉图样是各束参与干涉的光的振幅和相位的叠加。假设经过 $\lambda/4$ 波片、透镜和样品表面的光强损失为 r_3 ,初始光复振幅记为 U_0 。

可由斯托克斯倒逆关系得出 $r_1 = -r_2$,由此可以推导出 p 光的干涉光强:

$$I_p = \frac{U_0^2 r_2^2 \left[1 + r_3^4 (r_2^2 + t_1 t_2)^2 - 2r_3^2 (r_2^2 + t_1 t_2) \cos\left(\frac{8\pi d\Delta}{\lambda}\right) \right]}{1 + r_2^4 r_3^4 - 2r_2^2 r_3^2 \cos\left(\frac{8\pi d\Delta}{\lambda}\right)}, \quad (1)$$

s 光的干涉光强为

$$I_s = \frac{U_0^2 r_3^2 t_1^2 t_2^2}{1 + r_2^4 r_3^4 - 2r_2^2 r_3^2 \cos\left(\frac{8\pi d\Delta}{\lambda}\right)}, \quad (2)$$

p 光干涉后相位为

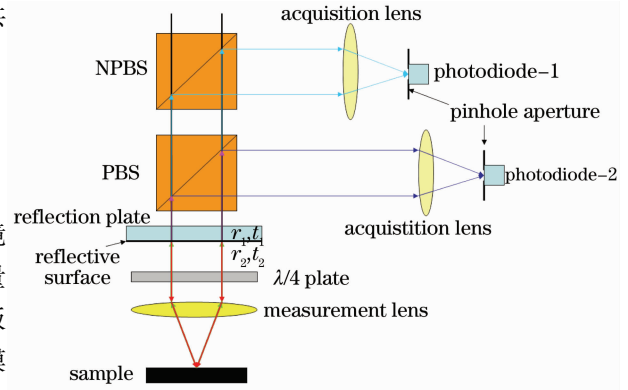


图 1 系统基本结构示意图

Fig. 1 Schematic of the system structure

$$\theta_p = -\pi + \sum_{i=1}^{\infty} \frac{2\pi i(4d\Delta + \lambda)}{\lambda}, \quad (3)$$

s 光干涉后相位为

$$\theta_s = \sum_{i=1}^{\infty} \frac{2\pi i(4d\Delta + \lambda)}{\lambda}. \quad (4)$$

由此得出, p 光干涉与 s 光干涉相位相差 π , 因此是差动的。

假设 $t_1 = t_2 = t = 0.6$, $r_3 = 0.8$, 归一化光强曲线如图 2 所示。用 Mathematica 软件画出 t 变化时被光电接收器接收的 p 光和 s 光的归一化干涉光强峰峰值曲线, 即 $I_{p_{\max-\min}}(t)$ 和 $I_{s_{\max-\min}}(t)$, 和 p 光和 s 光的干涉光强中值曲线, 即 $I_{p_{\frac{\max+\min}{2}}}(t)$ 和 $I_{s_{\frac{\max+\min}{2}}}(t)$, 如图 3 所示。

若峰峰值取的太小则会降低分辨力, 应取最大值的 90% 以上。由图 3, 对于 p 光, $t \in (0.36, 0.60)$, 对 s 光, $t \in (0.57, 0.75)$, 得出 $t \in (0.57, 0.60)$ 。s 光干涉光强比 p 光干涉光强小, 所以应使 s 光的干涉光强大些。当 $t \in (0.57, 0.60)$ 时, δI_s 单调递增, 因此 $t = 0.6$, 即反射率为 40%。此时即可保证干涉峰峰值都在最大值的 90% 以上, 又可保证 s 光干涉峰峰值不至于太小。为了消除共模光强的影响, 充分利用差动光强, 在信号调理电路中通过加减运算消除共模光强, 如果 p 光和 s 光的共模光强相差太大, 不利于信号调理电路调整。因此应使两路信号的共模光强相等, 由图 4 曲线可知, 当 $t = 0.6$, 即反射率为 40% 时, 两路干涉信号的共模光强相等。两种分析方法的结论相同。

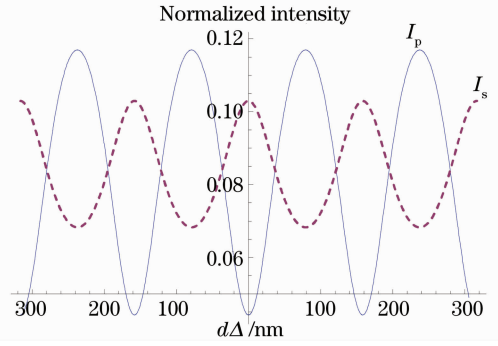


图 2 p 光和 s 光归一化差动光强分布
Fig. 2 Distribution of normalized intensity of p and s polarized light

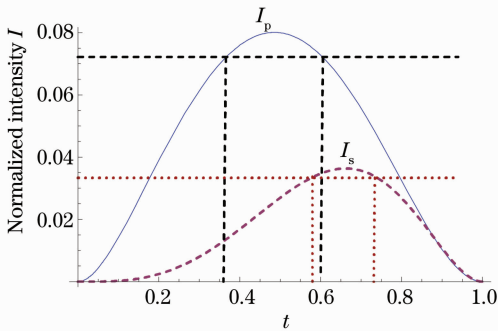


图 3 不同透射率 t 的 p 光和 s 光峰峰值曲线
Fig. 3 Peak to peak values of p and s polarized light versus transmittance t

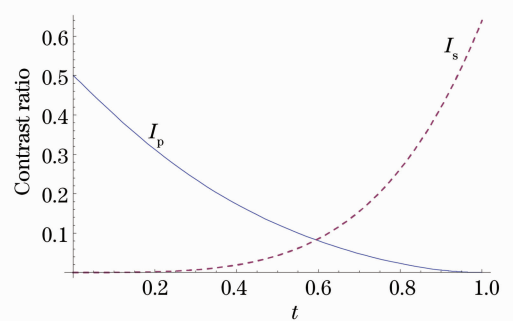


图 4 不同透射率 t 的 p 光和 s 光共模光强分布
Fig. 4 Common-mode intensity of p and s polarized light versus transmittance t

3 共焦 F-P 干涉系统的光强响应函数

为了便于寻找测量透镜的焦点, 系统采用共焦形式。在采集透镜焦点处加针孔光阑, 不但利于寻找测量透镜的焦点, 也利于消除杂散光产生的噪音。实际的针孔光阑都有一定的大小, 但系统轴向分辨力主要依靠干涉保证, 因此从理想的点探测器出发分析共焦对干涉的影响依然对实验有指导意义。

圆对称透镜的振幅点扩展函数为^[5]

$$h(v, u) = \int_0^1 P(\rho) \exp\left(\frac{iu}{2}\rho^2\right) J_0(\rho v) 2\pi\rho d\rho, \quad (5)$$

式中 $v = \frac{2\pi r}{\lambda} \frac{a}{d_{10}}$ 和 $u = \frac{2\pi z}{\lambda} \frac{a^2}{d_{10}^2}$ 分别为物空间归一化径向坐标和轴向离焦量。(5) 式中包含了共焦系统的轴向和横向光强响应。对于反射式共焦系统, 点探测器接收到的点光源所形成的像场为^[6]

$$U(v, u) = h_1(v, u)h_2(v, u), \quad (6)$$

式中 $h_1(v, u)$ 和 $h_2(v, u)$ 分别为点光源和点探测器在物空间的点扩展函数。

从样品上反射被针孔探测到的测量光不仅仅受反射平板反射率和光学系统光强损失的影响,而且还受到透镜的振幅点扩展函数的影响。假设针孔为一理想的点探测器,则反射式共焦系统的轴向响应振幅点扩展函数为

$$h_a(z) = h_1(v|_0, u|_z)h_2(v|_0, u|_z). \quad (7)$$

此时透过针孔的第 i 束 p 光和 s 光的复振幅是样品离焦量的函数,分别为

$$E_0 h_a(z) t_1 t_2 r_2 r_3^2 r_2^{2(i-1)} r_3^{2(i-1)} \exp\left[j \frac{2i\pi(4x+\lambda)}{\lambda}\right] \text{ 和 } E_0 h_a(z) t_1 t_2 r_3 r_2^{2(i-1)} r_3^{2(i-1)} \exp\left[j \frac{2i\pi(4x+\lambda)}{\lambda}\right],$$

其中 $x = s_0 + z$, z 为样品离焦量。

点探测器探测到的 p 光和 s 光的光复振幅分布分别为

$$U_{p1} = E_i \left\{ r_1 + h_a(z) t_1 t_2 r_2 r_3^2 \sum_{i=1}^{\infty} r_2^{2(i-1)} r_3^{2(i-1)} \exp\left[j \frac{2i\pi(4x+\lambda)}{\lambda}\right] \right\}, \quad (8)$$

$$U_{s1} = E_i \left\{ h_a(z) t_1 t_2 r_3 \sum_{i=1}^{\infty} r_2^{2(i-1)} r_3^{2(i-1)} \exp\left[j \frac{2i\pi(4x+\lambda)}{\lambda}\right] \right\}. \quad (9)$$

考虑到测量的是纳米级位移,样品位移时第一束 s 光始终在透镜的焦深之内,因此 s 光的复振幅函数(9)式修正为

$$U_{s1} = E_i \left\{ t_1 t_2 r_3 + h_a(z) t_1 t_2 r_3 \sum_{i=2}^{\infty} r_2^{2(i-1)} r_3^{2(i-1)} \exp\left[j \frac{2i\pi(4x+\lambda)}{\lambda}\right] \right\}. \quad (10)$$

实验中使用透镜的数值孔径 NA 为 0.6, 依然假定 $t_1 = t_2 = t = 0.6$, $r_3 = 0.8$, 此时 p 光和 s 光的干涉条纹分布曲线分别如图 5 和图 6 所示。

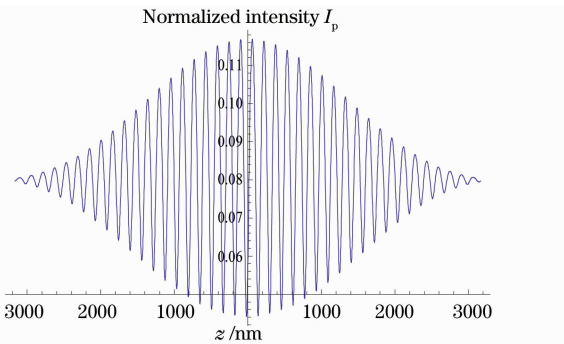


图 5 $t=0.6$ 时共焦 F-P 干涉 p 光干涉条纹分布
Fig. 5 Intensity distribution of p polarized light in confocal F-P interference with $t=0.6$

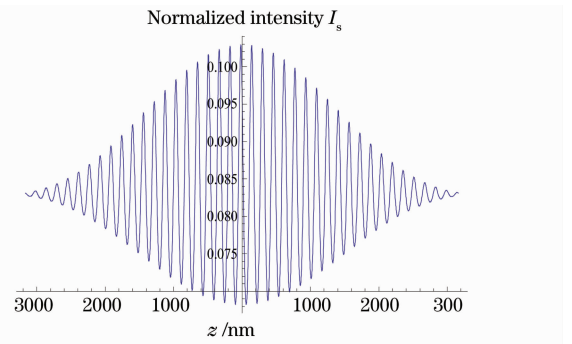


图 6 $t=0.6$ 时共焦 F-P 干涉 s 光干涉条纹分布
Fig. 6 Intensity distribution of s polarized light in confocal F-P interference with $t=0.6$

4 实验验证

实验中,依照图 1 搭建了如图 7 所示的多光束干涉显微测头,光源采用 $\lambda=633 \text{ nm}$ 的氦氖激光器(SIOS SL04),测量和采集透镜采用相同数值孔径的非球面透镜,构成对称的共焦系统。其中测量和采集透镜的数值孔径 NA 为 0.6, 焦距 $f=3.1 \text{ mm}$, 反射镜反射率 40%, 针孔光阑直径 $300 \mu\text{m}$; 采集透镜、针孔光阑和光电探测器组装在同一个机械机构中,以保证它们稳定地在一起,并且可以通过微调螺钉对轴向和横向位移微调。实验采用平面反射镜作为待测样品,使用纳米台(nPoint NPXYZ100B, Z 向位置精度小于 0.2 nm)实现待测样品纳米级的位移。图 8 为实验测得的纳米台轴向位移时 p 光与 s 光的轴向相应曲线(为便于观察,示波器两路信号的零位已经错开)。因为实际的针孔光阑总有一定的大小,样品离焦时的光总会有一部分被光电接收器接收,因此在测量范围内的干涉光强不会趋于无穷小,但从总的趋势来看,符合理论分析。

在实验中,由于关心的是系统的轴向分辨力,因此对系统轴向分辨力做实验评估。通过纳米台控制器实现纳米台在测量透镜焦点附近的台阶位移,每个台阶高度 0.2 nm 。由图 9 可以看出, 0.2 nm 时台阶信号信噪比为 1:1, 即系统可以获得 0.2 nm 的分辨力。

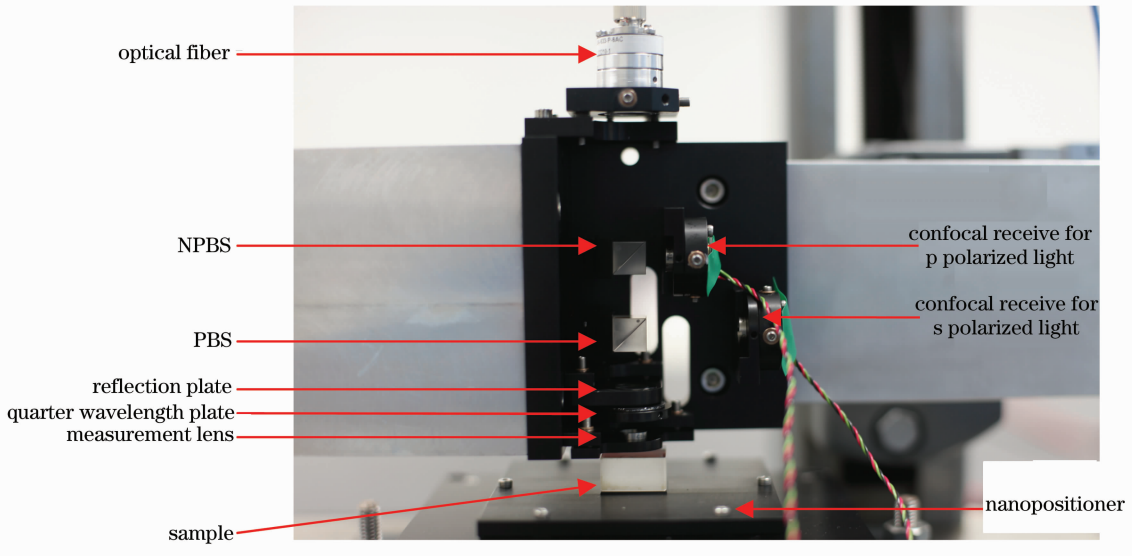


图 7 共焦 F-P 干涉显微测头实验装置

Fig. 7 Experimental device of confocal F-P interference microscopy probe

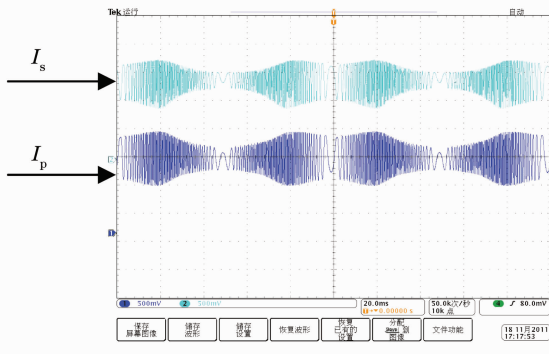


图 8 示波器上看到的干涉条纹分布

Fig. 8 Distribution of the intensity in oscilloscopy

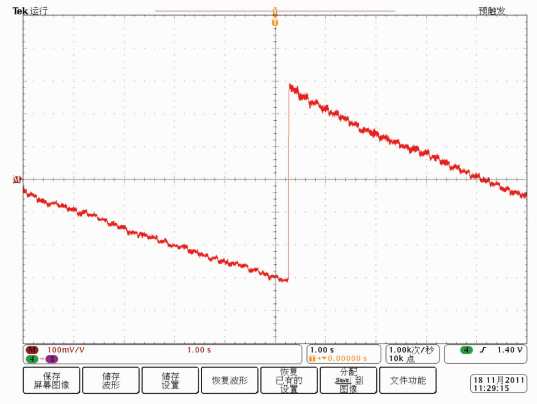


图 9 轴向分辨力实验台阶信号

Fig. 9 Step signal of the axial resolution

5 结 论

通过理论和实验对共焦 F-P 干涉显微测头的特性进行了分析和验证。共焦可以使测头的焦点便于寻找和调节,因为针孔总有一定的大小,所以轴向响应曲线形状与理想的点探测器值有偏差但不影响测头焦点的寻找和轴向分辨力。系统的轴向分辨力达到 0.2 nm。从 0.2 nm 的台阶信号看,信噪比为 1:1,如果进一步降低机械系统的振动、信号调理电路的噪音,则系统可以获得更高的轴向分辨力。另外本系统的差动光强可以为后续测量稳定性的研究提供基础。

参 考 文 献

- 1 A. Pfortner, J. Schwide. Dispersion error in white-light Linnik interferometers and its implications for evaluation procedures[J]. *Appl. Opt.*, 2001, **40**(34): 6223~6228
- 2 P. Pavlicek, J. Soubusta. Measurement of the influence of dispersion on white-light interferometry [J]. *Appl. Opt.*, 2004, **43**(4): 766~770
- 3 P. Groot, X. C. Lega. Signal modeling for low-coherence height-scanning interference microscopy [J]. *Appl. Opt.*, 2004, **43**(25): 4821~4830
- 4 Sun Sutao, Liu Jiqiao, Zhou Jun *et al.*. Confocal Fabry-Perot interferometer for frequency stabilization of laser [J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(7): 1005~1008

- 孙旭涛, 刘继桥, 周 军 等. 激光稳频的共焦法布里-珀罗干涉仪[J]. 中国激光, 2008, **35**(7): 1005~1008
- 5 Gu Min. Principles of Three Dimensional Imaging in Confocal Microscopes [M] . Wang Guiying Trans. . Beijing: New Times Press, 2000, 14~78
- 顾 敏. 共焦显微术的三维成像原理[M]. 王桂英等 译. 北京: 新时代出版社, 2000. 14~78
- 6 Jiang Qin, Qiu Lirong, Zhao Weiqian *et al.*. Effect of point detector position in dual-axes confocal microscopy [J]. *Laser & Optics Progress*, 2010, **47**(8): 081201
- 江 琴, 邱丽荣, 赵维谦 等. 点探测器位置对双轴共焦显微技术的影响[J]. 激光与光电子学进展, 2010, **47**(8): 081201