

文章编号: 0258-7025(2010)12-3081-05

# 抑制相干噪声的环形光源技术

徐建程<sup>1</sup> 王 辉<sup>1</sup> 柴立群<sup>2</sup> 许 乔<sup>2</sup>

(<sup>1</sup> 浙江师范大学信息光学研究所, 浙江 金华 321004)  
(<sup>2</sup> 成都精密光学工程研究中心, 四川 成都 610041)

**摘要** 为了提高干涉检测精度, 必须抑制系统的相干噪声。根据统计光学建立了带环形光源干涉仪系统信噪比的理论模型, 分析了环形光源参数、光场相干面积与系统信噪比之间的关系, 以提高信噪比为目标, 优化设计并采用计算全息方法控制环形光源的参数。分析结果表明, 光场的相干面积与环形光源面积成反比, 系统的信噪比主要由环形光源面积决定, 面积相等时环形光源抑制相干噪声的效果优于圆形空间扩展光源; 环形光源的参数由锥形波前的空间频谱宽度、毛玻璃与焦平面间的距离和计算全息图的空间载波频率控制。传统点光源和环形光源的对比实验表明, 环形光源有效地抑制了相干噪声, 将系统的平均信噪比从点光源的 5.2 dB 提高到 8.6 dB。

**关键词** 干涉测量; 环形光源; 相干噪声; 信噪比; 计算全息

**中图分类号** O436 **文献标识码** A **doi:** 10.3788/CJL20103712.3081

## Technique of Ring Source for Reducing Coherent Noise

Xu Jiancheng<sup>1</sup> Wang Hui<sup>1</sup> Chai Liqun<sup>2</sup> Xu Qiao<sup>2</sup>

(<sup>1</sup> Institute of Information Optics, Zhejiang Normal University, Jinhua, Zhejiang 321004, China)  
(<sup>2</sup> Chengdu Fine Optical Engineering Research Center, Chengdu, Sichuan 610041, China)

**Abstract** To improve measurement accuracy, the coherent noise of interferometric system should be reduced effectively. A theoretical model of signal-to-noise ratio (SNR) in interferometric system with ring source is proposed by means of statistical optics. The relations among parameters of ring source, coherent area of optical field and SNR of system are analyzed. By maximizing the objective function of SNR, optimization is employed to ring source and then the optimized parameters are controlled by computer generated holography. According to the theoretical model, the SNR of a given system depends on area of ring source, which is inverse proportion to coherent area of optical field. The parameters of ring source can be controlled by spectral width of conical wavefront, distance between rotating diffuser and focal plane, and spatial carrier frequency of computer generated hologram (CGH). Experimental comparison between point source and ring source shows that the average SNR of system increases from 5.2 dB to 8.6 dB by utilizing ring source.

**Key words** interferometry; ring source; coherent noise; signal-to-noise ratio; computer generated hologram

## 1 引 言

目前商用干涉仪的一个设计难题是如何高效抑制系统能测量空间频率范围内的本征噪声。因为激光作为干涉仪的标准光源, 具有很强的时间和空间相干性, 所以干涉系统里光学元件的缺陷(如灰尘、凹陷、伤痕和气泡等)会作为光散射的中心产生相干噪声, 在干涉图里形成“牛顿环”或靶心<sup>[1~3]</sup>。为此,

商用干涉仪通常采用低相干光源或白光作为干涉仪的光源<sup>[4]</sup>, 或在成像系统中加旋转毛玻璃<sup>[5]</sup>以降低光源的相干性。为有效抑制相干噪声, ZYGO 公司<sup>[1,2]</sup>提出了环形光源技术, 并应用到 VeriFire 系列干涉仪中。然而目前尚无相关理论模型指导环形光源的设计。本文从统计光学出发, 建立环形光源抑制相干噪声的理论模型, 分析环形光源参数、光场

收稿日期: 2010-04-26; 收到修改稿日期: 2010-05-28

基金项目: 浙江师范大学博士科研启动基金(ZC304010012)资助课题。

作者简介: 徐建程(1981—), 男, 博士, 讲师, 主要从事信息光学和精密光学检测等方面的研究。

E-mail: xujiancheng@zjnu.cn

相干面积与系统信噪比(SNR,  $R_{SN}$ )之间的关系,以提高信噪比为目标优化设计环形光源参数,为环形光源设计提供理论依据,并通过实验验证环形光源抑制相干噪声的有效性。

## 2 环形光源的产生

通常,产生环形光源的方法<sup>[1,2]</sup>有机械法、电光晶体调制法、多模光纤法和计算全息法等。为得到特定参数的环形光源,本文采用计算全息法。首先用计算机产生锥形波前,其相位函数为<sup>[6]</sup>

$$\phi(x, y) = 2\pi r/r_0, \quad (1)$$

式中  $r = \sqrt{x^2 + y^2}$ , 该相位函数的空间频谱宽度约为  $2/r_0$ , 其中  $r_0$  为常数。通过引入的适当倾斜的参考平

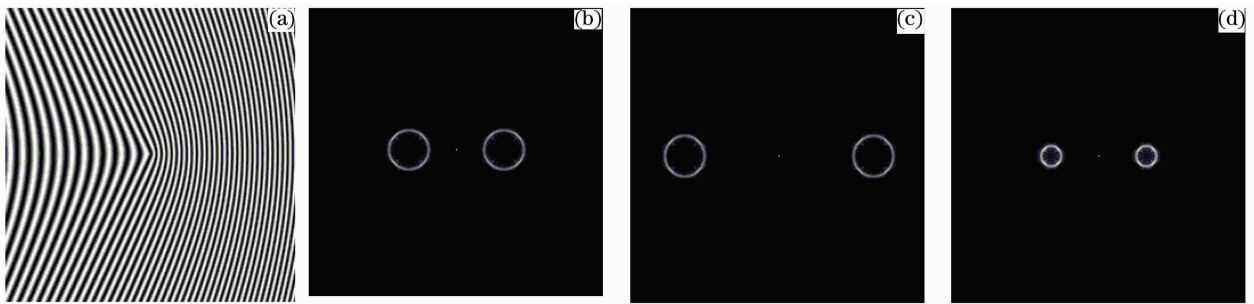


图 1 (a)计算全息图和(b)对应的环形光源,(c)计算全息图载波频率加倍后的环形光源,(d)锥形波前频谱带宽减半后的环形光源

Fig. 1 CGH image and (b) its corresponding ring source, (c) ring source of CGH whose carrier frequency is doubled, (d) ring source of CGH whose spectral width of conical wavefront is halved

通过计算机控制将编码好的计算全息图在绘图仪器上成图,然后制作掩模板,利用掩模板将全息干板曝光后处理得到全息光学元件(HOE)。将全息光学元件放置在激光器和聚焦透镜之间,如图 2 所示,使全息光学元件处在聚焦透镜的前焦面上,则在透镜的后焦面附近将产生如图 1(b)所示的环形光源。在焦平面处放置空间滤波器,滤除零级和负一级衍射,只让正一级衍射(环形光源)通过。在空间滤波器后放置旋转毛玻璃,设毛玻璃与焦平面的间距为  $t$ ,则环形光源的环厚度可表示为

$$\Delta R = tD/f, \quad (2)$$

式中  $D$  和  $f$  分别为准直镜的口径和焦距。假设毛玻璃表面为完全随机分布,则可将透过旋转毛玻璃的环形光斑看作为亮度均匀、非相干、准单色的环形光源,其光强度分布为

$$I(r) = I_0 \text{circ}\left(\frac{r}{R_2}\right) - I_0 \text{circ}\left(\frac{r}{R_1}\right), \quad (3)$$

式中圆函数  $\text{circ}\left(\frac{r}{R_2}\right)$  可表示为

面波可得如图 1(a)所示的计算全息图,全息图是灰度连续分布的振幅型全息图。将计算全息图(CGH)通过透镜得到其夫琅禾费衍射如图 1(b)所示,可知在透镜的后焦面上将得到环形光源,而且一级环形光源和零级噪声互相分开。若将锥形波前与参考平面波间的倾斜角增大 1 倍,即计算全息图的空间载波频率增大 1 倍,则其夫琅禾费衍射如图 1(c)所示,即环形光源与零级噪声的间距增大 1 倍。若将锥形波前的空间频谱宽度缩小一半,即  $\phi(x, y) = \pi r/r_0$ , 则其夫琅禾费衍射如图 1(d)所示,环形光源的平均环半径缩小了一半。所以由图 1 可知,环形光源的平均环半径由锥形波前的空间频谱宽度决定,环形光源和零级噪声的间距由计算全息图的空间载波频率决定。

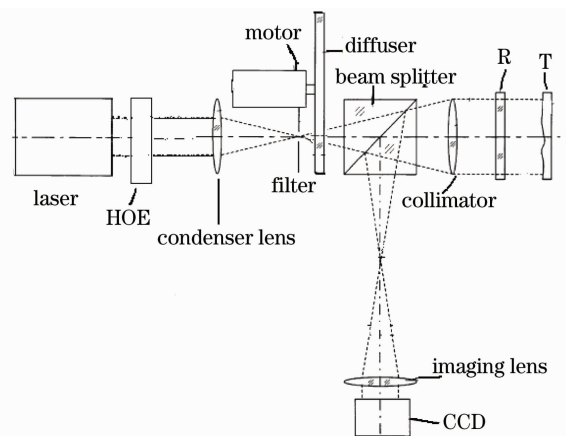


图 2 带环形光源菲佐干涉仪的示意图

Fig. 2 Schematic diagram of Fizeau interferometer with ring source

$$\text{circ}\left(\frac{r}{R_2}\right) = \begin{cases} 1, & r \leq R_2 \\ 0, & r > R_2 \end{cases} \quad (4)$$

式中  $R_1$  和  $R_2$  分别表示环形光源的内半径和外半径。环厚度  $\Delta R = R_2 - R_1$ , 平均环半径为  $\bar{R} = (R_1 + R_2)/2$ 。因为  $\Delta R$  可由毛玻璃与焦平面的间距  $t$  决定,

$\bar{R}$  由锥形波前的频谱带宽  $2/r_0$  决定,因此只要控制好  $t$  和  $r_0$  就可得到设计所需的环形光源。

### 3 环形光源抑制相干噪声的原理

由范西特-泽尼克定理<sup>[7]</sup>可知,一个非相干光源产生的复强度可表示为光源强度分布的二维傅里叶变换。因此环形光源在传播距离  $z$  处平面上任意两点相隔距离为  $l$  的复相干系数为

$$\mu_{12}(l) = \frac{\mathcal{F}[I(r)]}{2\pi \int_{R_1}^{R_2} rI(r) dr} = \frac{\mathcal{F}\left[I_0 \text{circ}\left(\frac{r}{R_2}\right)\right] - \mathcal{F}\left[I_0 \text{circ}\left(\frac{r}{R_1}\right)\right]}{I_0 \pi (R_2^2 - R_1^2)} = \frac{\pi R_2^2 I_0 \frac{2J_1(2\pi R_2 \rho)}{2\pi R_2 \rho} - \pi R_1^2 I_0 \frac{2J_1(2\pi R_1 \rho)}{2\pi R_1 \rho}}{I_0 \pi (R_2^2 - R_1^2)}, \quad (5)$$

式中  $\rho = l/(\lambda z)$ ,  $\lambda$  为光波长,  $\mathcal{F}$  表示傅里叶变换。如果  $R_1 = 0$ , 则环形光源将转变为圆形空间扩展光源, 则(5)式应改写为

$$\mu_{12}(l) = \frac{\mathcal{F}[I(r)]}{2\pi \int_0^{R_2} rI(r) dr} = \frac{\mathcal{F}\left[I_0 \text{circ}\left(\frac{r}{R_2}\right)\right]}{I_0 \pi (R_2^2)} = \frac{\pi R_2^2 I_0 \frac{2J_1(2\pi R_2 \rho)}{2\pi R_2 \rho}}{I_0 \pi (R_2^2)} = \frac{2J_1(2\pi R_2 \rho)}{2\pi R_2 \rho}. \quad (6)$$

当  $R_1 = 0$  和  $R_1 = 0.5R_2$  时的复相干系数分布如图 3 所示。当  $R_1 = 0$  时,  $\mu_{12}(l)$  的第一个零点为 3.83, 所以  $2\pi R_2 l_d / (\lambda z) = 3.83$ , 即  $l_d = 0.61\lambda z / R_2$ ; 当  $R_1 = 0.5R_2$  时, 由图 3 可知, 第一个零点为 3.10, 所以  $l_R = 0.49\lambda z / R_2$ , 其中  $l_d$  和  $l_R$  分别表示圆形空间扩展光源和环形光源复相干系数为零时对应的空间两

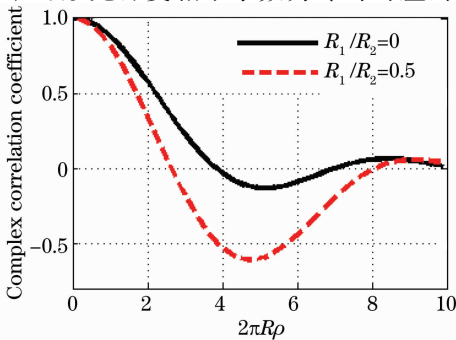


图 3 环形光源和空间扩展光源的复相干系数

Fig. 3 Complex degrees of coherence of ring source and spatially extended source

点相隔距离。根据图 3 可知  $l_R$  比  $l_d$  小, 环形光源复相干系数随空间间隔衰减较快, 所以干涉系统里光学元件缺陷引起的散射光与周围光场间的复相干系数较小, 因此有效地抑制了“牛顿环”噪声。

采用系统信噪比评价环形光源抑制相干噪声的效果, 并将其定义<sup>[8]</sup>为干涉条纹对比度和散斑对比度之比, 其中干涉条纹对比度和散斑对比度均与光场的相干面积有关<sup>[3,9]</sup>。根据相干面积定义<sup>[9]</sup>可得环形光源对应的相干面积为

$$S_C = \int_{-\infty-\infty}^{\infty} \int_{-\infty-\infty}^{\infty} |\mu_{12}(\Delta x, \Delta y)|^2 d\Delta x d\Delta y = \frac{(\lambda z)^2}{\pi(R_2^2 - R_1^2)}, \quad (7)$$

式中  $\pi(R_2^2 - R_1^2)$  表示环形光源的面积, 所以(7)式表明光场相干面积与环形光源面积成反比。环形光源照明被测光学元件, 然后成像到 CCD 上, 对 CCD 上某一点而言, 设成像系统点扩展函数的等效面积为  $A_R$ , 光场的相干面积为  $S_C$ , 则 CCD 上该点共收到  $N_R = A_R / S_C$  个不相干的散斑场。根据部分显现散斑的特点可知<sup>[9]</sup>, 其散斑对比度可表示为

$$C_n = \sqrt{\frac{8(N_R - 1)[N_R - 1 + \cosh(\sigma_\phi^2)] \sinh^2(\sigma_\phi^2/2)}{N_R [N_R - 1 + \exp(\sigma_\phi^2)]^2}}, \quad (8)$$

式中  $\sigma_\phi$  表示成像系统点扩展函数等效面积  $A_s$  内光学元件面形偏差引起的相位标准差。由(8)式可知, 当  $N_R$  较大时散斑对比度随着  $N_R$  的增大而减小。所以采用环形光源, 降低了光源的空间相干性, 减小了光场相干面积, 增大了不相干散斑场个数, 降低了散斑对比度, 从而抑制了相干噪声。

环形光源抑制相干噪声的同时, 也会降低干涉条纹的对比度。对于准直镜焦距  $f$ , 干涉腔长度为  $d$  的干涉仪, 环形光源会使得干涉条纹对比度降为<sup>[3]</sup>

$$C_s = \text{sinc}\left[\frac{dk(R_2^2 - R_1^2)}{2f^2}\right], \quad (9)$$

式中  $k = 2\pi/\lambda$ 。假设环形光源  $R_2 = 1 \text{ mm}$ ,  $R_1 = 0.9 \text{ mm}$ , 准直镜焦距  $f = 500 \text{ mm}$ , 波长  $\lambda = 633 \text{ nm}$ , 根据(9)式可得对比度为零所对应的干涉腔长度为 265 mm; 若干涉腔长度为 100 mm 时, 则干涉条纹对比度为 0.78。若采用圆形空间扩展光源,  $R_2 = 1 \text{ mm}$ ,  $R_1 = 0$ , 则条纹对比度为零所对应的干涉腔长度为 50 mm。所以环形光源可容忍的干涉腔长度要大于圆形空间扩展光源。

根据信噪比的定义<sup>[8]</sup>可得环形光源对应的系统信噪比为(略去系统相关的常数项)

$$R_{SN} = \frac{C_s}{C_n} \infty \frac{\text{sinc}\left(\frac{dS_R}{\lambda f^2}\right)}{\sqrt{\frac{8(N_R - 1)[N_R - 1 + \cosh(\sigma_\phi^2)] \sinh^2(\sigma_\phi^2/2)}{N_R[N_R - 1 + \exp(\sigma_\phi^2)]^2}}}, \quad (10)$$

对于给定的干涉仪系统,假设成像系统光学元件偏差引入相位标准差  $\sigma_\phi = \pi/4$ ,准直镜口径  $D=100$  mm,焦距  $f=500$  mm,波长  $\lambda=633$  nm,腔长  $d=100$  mm,设环形光源的面积  $S_R = M \times 10^{-4}$  mm<sup>2</sup>,  $M$  为变量,根据(10)式可得系统信噪比与  $M$  之间的关系如图 4 所示。当  $M=2$  时(近似为点光源),信噪比约为 4.7 dB;当  $M=6000$  时信噪比取最大值 18.3 dB,环形光源的面积等于 0.6 mm<sup>2</sup>。当  $M > 6000$  时,信噪比随着  $M$  的增大而减小。说明当系统参数确定后,为了达到最大信噪比,  $M$  将被唯一确定,从而确定了环形光源的面积;对同一系统,环形光源比传统点光源具有更高的信噪比。

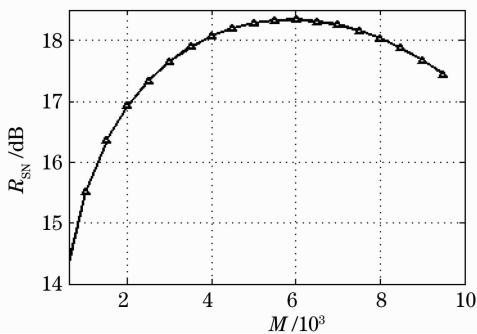


图 4 信噪比与环形光源面积的关系

Fig. 4 Relation between SNR and area of ring source

所以环形光源对应的系统信噪比主要由环形光源的面积决定。但是根据文献[3]可知,采用平均环半径为  $\bar{R}$  的环形光源时,可以抑制参考镜上周期小于  $2\rho_R$  的缺陷的影响,其中  $\rho_R$  正比于环形光源的平均环半径。说明环形光源的平均环半径越大,则抑制光学元件缺陷影响的效果越好,允许光学元件缺陷周期越长,这就是采用环形光源代替圆形空间扩展光源的原因。本例中取环形光源的面积为 0.6 mm<sup>2</sup>,如果  $R_1=0$ ,则  $R_2=0.44$  mm,平均环半径为 0.22 mm,如果  $R_1=0.6R_2$ ,则  $R_1=0.33$  mm,  $R_2=0.55$  mm,平均环半径为 0.44 mm。因此,在确定光源最佳面积后,采用环形光源代替圆形空间扩展光源,可使平均环半径增大 1 倍,能抑制成像系统中光学元件缺陷的长度也随之增大 1 倍,从而更有效地抑制相干噪声。

综上所述,干涉检测系统的信噪比主要由环形光源的面积决定,环形光源比点光源具有更高的系统信噪比;在光源面积相等时,平均环半径越大,抑制相干噪声效果越佳,所以环形光源抑制相干噪声的效果优于圆形扩展光源。

## 4 实验验证

采用 ZYGO 公司生产的 VeriFire AT™ 干涉仪进行实验,该干涉仪有两个可切换的光源模式,即传统点光源模式和环形光源模式,其中环形光源是通过全息光学元件实现的<sup>[1]</sup>。实验步骤如下:

1) 在传统点光源和环形光源模式下分别采集干涉图,求得干涉条纹对比度分别为 0.88 和 0.86,即环形光源模式下干涉条纹对比度略低于传统点光源模式。

2) 在两种光源模式下分别采集该干涉仪的背景光强分布,如图 5(a)和(b)所示。由图可知,环形光源模式下背景光强分布更均匀,而没有明显“牛顿环”。求得图 5(a)和(b)对应的散斑对比度分别为 0.07 和 0.06,即环形光源模式下背景散斑对比度低于传统点光源模式。

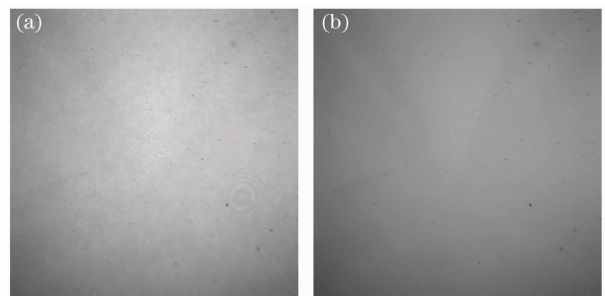


图 5 点光源(a)和环形光源(b)模式下的背景光强分布

Fig. 5 Background intensities with point source (a) and ring source (b)

3) 在两种光源模式下分别测得系统的本征噪声相位图<sup>[3]</sup>,如图 6(a)和(b)所示。环形光源模式下系统本征噪声峰谷值(PV)为  $0.006\lambda$ ,噪声相位图比较光滑,没有“牛顿环”;而传统点光源模式下系统本征噪声峰谷值为  $0.01\lambda$ ,噪声相位图中有明显的“牛顿环”。

4) 在两种模式下测得系统的本征噪声功率谱密度( $D_{SP}$ )和信噪比,如图 7(a)和(b)所示。由图 7 可知,环形光源模式本征噪声功率谱密度远小于点光源模式,在空间频率小于  $2.5$  mm<sup>-1</sup> 范围内两者的比值小于 0.1,同时环形光源模式下系统信噪比大于点光源模式,在空间频率小于  $2$  mm<sup>-1</sup> 范围内两



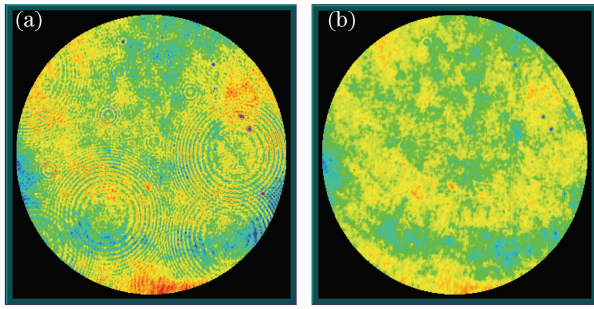


图 6 点光源 (a) 和环形光源 (b) 模式下的本征相位噪声  
Fig. 6 Intrinsic noise phases with point source (a) and ring source (b)

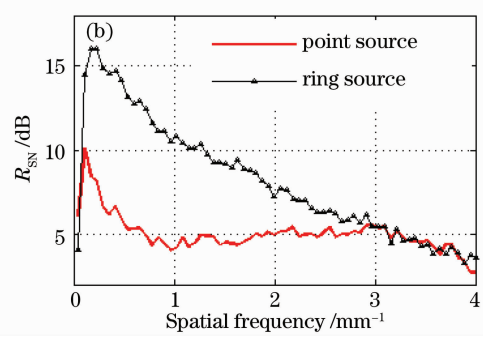
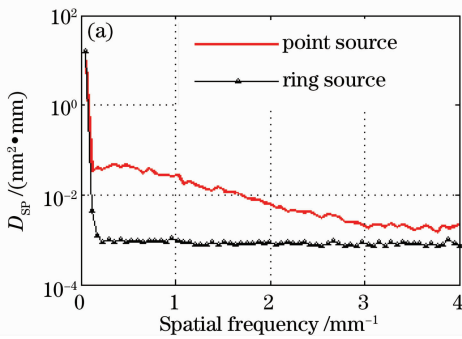


图 7 本征噪声功率谱密度 (a) 和系统信噪比 (b)  
Fig. 7 Power spectral density of intrinsic noise phases (a) and system's SNR (b)

### 5 结 论

从统计光学出发,建立了环形光源抑制相干噪声的理论模型。分析该模型表明环形光源降低了光源的空间相干性,减小了光场的相干面积,增大了不相干的散斑场个数,降低了散斑对比度,提高了系统的信噪比;系统的信噪比主要由环形光源的面积决定,面积相等时环形光源抑制相干噪声的效果优于圆形空间扩展光源。以提高信噪比为目标优化设计并采用计算全息法得到所需的环形光源。环形光源的平均环半径和环厚度分别由锥形波前的空间频谱宽度和毛玻璃与焦平面的间距决定,环形光源和零级噪声的间距由计算全息图的空间载波频率决定。传统点光源和环形光源的对比实验表明,环形光源降低了散斑对比度,有效地抑制了“牛顿环”噪声,虽然降低了干涉条纹对比度,但是系统的平均信噪比从点光源的 5.2 dB 提高到 8.6 dB,从而有效地提高了干涉测量的精度。

者差值大于 2 dB。该干涉仪的有效频谱宽度约为  $4 \text{ mm}^{-1}$ , 计算得到在点光源和环形光源模式下系统的平均信噪比分别为 5.2 dB 和 8.6 dB。

5) 在点光源和环形光源模式下对同一片光学元件进行 16 次测量,测量面形峰谷值的标准差分别为 2.07 nm 和 1.52 nm,测量值与平均值的最大偏差分别为 7.10 nm 和 5.22 nm,它表明环形光源模式下测量重复性和精度都高于点光源模式。

由上述实验结果可知,环形光源能有效地抑制相干噪声,虽然它也降低了干涉条纹对比度,但是它能将系统的平均信噪比从点光源的 5.2 dB 提高到 8.6 dB,从而提高了测量精度。

### 参 考 文 献

1 L. L. Deck. Apparatus and method for reducing the effects of

coherent artifact in an interferometer [P]. United States Patent: 6643024 B2, 2003  
 2 M. Kuechel. Apparatus and method(s) for reducing the effects of coherent artifacts in an interferometry [P]. United States Patent: 6804011 B2, 2004  
 3 Xu Jiancheng, Xu Qiao, Deng Yan *et al.*. Application of ring source in interferometer [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2008, **20**(3): 367~370  
 徐建程, 许 乔, 邓 燕 等. 环形光源在干涉仪系统中的应用 [J]. *强激光与粒子束*, 2008, **20**(3): 367~370  
 4 L. L. Deck. Interferometric methods and systems using low coherence illumination [P]. United States Patent: 6028670, 2000  
 5 K. R. Freischlad. Extended source low coherence interferometer for flatness [P]. United States Patent: 5737081, 1998  
 6 Waihon Lee. Computer-generated holograms: techniques and applications [J]. *Progress in Optics XVI*. E. Wolf, Editor, North-Holland, 1978, **16**: 119~232  
 7 Chen Xiaowen, Ji Xiaoling. Influence of turbulence on spatial correlation properties of partially coherent annular beams [J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(9): 2319~2325  
 陈晓文, 季小玲. 湍流对部分相干环状光束空间相干性的影响 [J]. *中国激光*, 2009, **36**(9): 2319~2325  
 8 Xu Jiancheng, Xu Qiao. Statistical analysis of SNR in interferometric imaging system [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2010, **22**(9): 2071~2074  
 徐建程, 许 乔. 干涉成像系统信噪比的统计分析 [J]. *强激光与粒子束*, 2010, **22**(9): 2071~2074  
 9 J. W. Goodman. *Speckle Phenomena in Optics* [M]. Englewood: Roberts & Company, 2006