

# Study on the Distortion of the Shape of Mach-Zehnder Interference Fringes

Dalin Liao, Zuo Li, Yun Liu\*

Guizhou University of Engineering Science, Bijie Guizhou  
Email: \*liuyun0865@163.com

Received: Jun. 9<sup>th</sup>, 2016; accepted: Jun. 27<sup>th</sup>, 2016; published: Jun. 30<sup>th</sup>, 2016

Copyright © 2016 by authors and Hans Publishers Inc.  
This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).  
<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

---

## Abstract

By observation experimental effect, the distortion of the shape of M-Z the interference fringes is found. Light intensity distribution of the interference fringes is analyzed using calculation software. And the reason that generates the distortion is solved by coherent theory, and the main factors that may affect M-Z interferometer fringe shape and contrast is analyzed from aspect emitting mechanism of the light source, the experimental optical path and the light utilization, etc. The improvement measures of corresponding have been presented. And the results that improved interference fringes are closer to the straight fringes than the interference fringes before improvement are obtained. The paper provides a useful reference for further improving fringe contrast and research areas of relate interference fringes.

## Keywords

M-Z Interferometer, Interference Fringes, Distortion, Contrast

---

# 马赫 - 曾德干涉条纹形状畸变研究

廖大麟, 李 佐, 刘 云\*

贵州工程应用技术学院, 贵州 毕节  
Email: \*liuyun0865@163.com

收稿日期: 2016年6月9日; 录用日期: 2016年6月27日; 发布日期: 2016年6月30日

---

\*通讯作者。

## 摘要

本文通过观察实验结果,发现M-Z干涉条纹形状发生了畸变,利用计算软件分析了干涉条纹的光强分布,运用相干理论分析了干涉条纹产生畸变的原因,并从光源的发光机制、实验光路、光的利用率等方面分析得出了可能影响M-Z干涉条纹形状和对比度的主要因素,提出了相应的改进措施并得出改进后的干涉条纹比改进前的干涉条纹更接近直条纹的结论,为进一步提高条纹的对比度,以及涉及干涉条纹研究的领域提供了有益的参考。

## 关键词

M-Z干涉仪, 干涉条纹, 畸变, 对比度

## 1. 引言

马赫-曾德干涉仪(以下简称 M-Z 干涉仪)因具有结构简单、调节方便、条纹对比度好、信噪比高、可以实现等厚干涉和等倾干涉、能测量白光干涉条纹特性、测量液体的折射率、测量空气的流速、测量光的偏振性、条纹强度的计算关系简单等优点而受到广泛的研究和应用[1][2]。再者, M-Z 干涉仪两臂可以组成矩形, 调节结构灵活, 实验原理与迈克尔逊干涉仪相一致, 容易理解, 但又避免了迈克尔逊干涉仪极高的环境和调整要求。它的应用可以延伸到许多涉及干涉条纹的研究领域, 因此, 马赫-曾德干涉条纹形状的研究尤为重要。在实验室, 我们通过 M-Z 干涉仪实验测定了 He-Ne 激光器产生的 6328Å 波长输出的干涉信号, 发现得到的干涉条纹不是明暗相间的直条纹, 而是条纹形状随着时间和空间位置以及小孔光阑宽度变化的干涉条纹, 即条纹发生了畸变。因此, 文章分析了干涉条纹产生畸变的原因, 研究了干涉条纹在垂直方向和水平方向的光强分布和条纹对比度, 找到可能影响 M-Z 干涉仪条纹形状和干涉信号对比度的主要因素。

## 2. 马赫-曾德干涉仪实验原理

M-Z 干涉仪的光路原理如图 1 所示。这种干涉仪的基本元件是两块反射镜  $M_1$  和  $M_2$ , 两块分束镜  $BS_1$  和  $BS_2$ , 这四块镜子成矩形布局。试验段 TS 置于反射镜  $BS_1$  与  $M_1$  之间。经扩束后的准直平行激光束入射到分光镜  $BS_1$  上被分成两束相互垂直的光束, 其中一束透射光射到反射镜  $M_1$  上, 再经反射镜  $M_1$  反射后射到分束镜  $BS_2$ , 该光束不穿越测试段, 故称参考光。另一束反射光经  $M_2$  反射后射到  $BS_2$ , 该光束穿越试验段, 故称物光。参考光与物光在同一接收屏幕上汇聚而产生干涉现象。

如果这四块镜子都精确地和平行入射光束成  $45^\circ$  角, 并且所有的光学元件都具有理想的质量。那么, 到达接收屏幕上的物光与参考光的波面将是严格平行的。在物光没有受到测试流场的扰动时, 屏幕上将呈现一个非常明亮的光场, 看不到干涉条纹。若物光受到二维流场的扰动, 则将呈现等密度线的明暗相间的直条纹分布, 如图 2 所示, 这就是由 M-Z 干涉仪所产生的无限宽条纹干涉场。

## 3. 实验结果

按照图 1 调节两分束镜和两反射镜, 直到观察到 CCD 采集到干涉条纹, 但是发现随着条纹的逐渐清晰的过程中, 同时, 干涉条纹也变得闪烁起来, 图 3 中的(a)、(b)、(c)就是小孔光阑通光部分较大时, 每相隔一定时间抓拍到的干涉条纹。而当调节小孔光阑使其通光部分逐渐减小时, 抓拍得到图 3 中的(d)、(e)、(f)图。

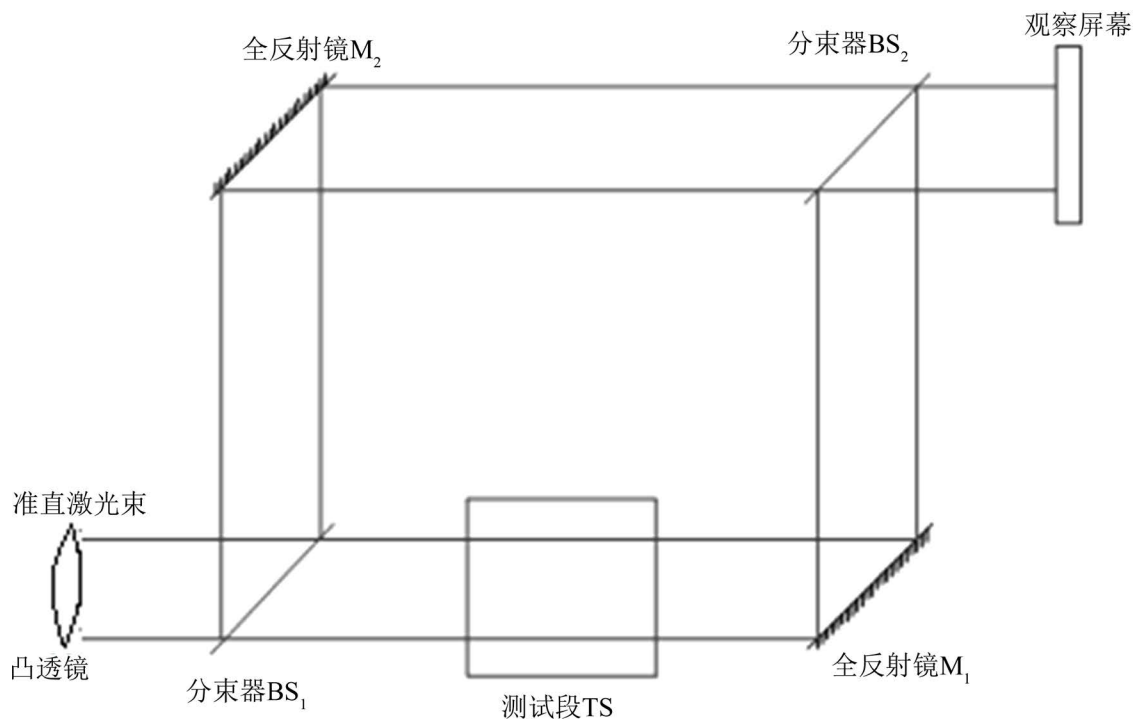


Figure 1. Diagram of optical path of M-Z interferometer  
图 1. M-Z 干涉仪的光路原理图

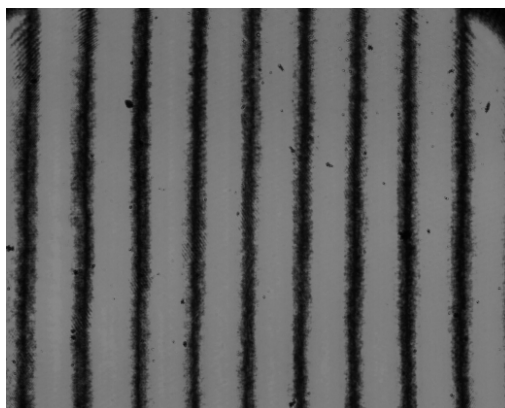


Figure 2. Diagram of M-Z interference fringes  
图 2. M-Z 干涉条纹图

## 4. 实验结果分析

### 4.1. 干涉条纹的光强分布分析

对图 3 中任意选某一时刻的干涉条纹图作光强分布的分析, 这里选图 3(b) (因为此条纹弯曲的幅度分布处于图 3 中(a)和(c)之间)分析, 其水平方向和垂直方向的光强分布如图 4(a)、(b)所示。

从图 4(a)可以看出沿水平方向每一条条纹的光强分布不相等, 条纹间距基本是等间距的, 说明形成水平方向的等周期的干涉条纹, 但条纹的强度不等, 且光强分布与空间位置有关。从图 4(b)可以看出某一条纹的光强分布不相等、不满足高斯分布、呈现明显的锯齿形、有展开, 说明条纹对比度不高, 信噪比低。

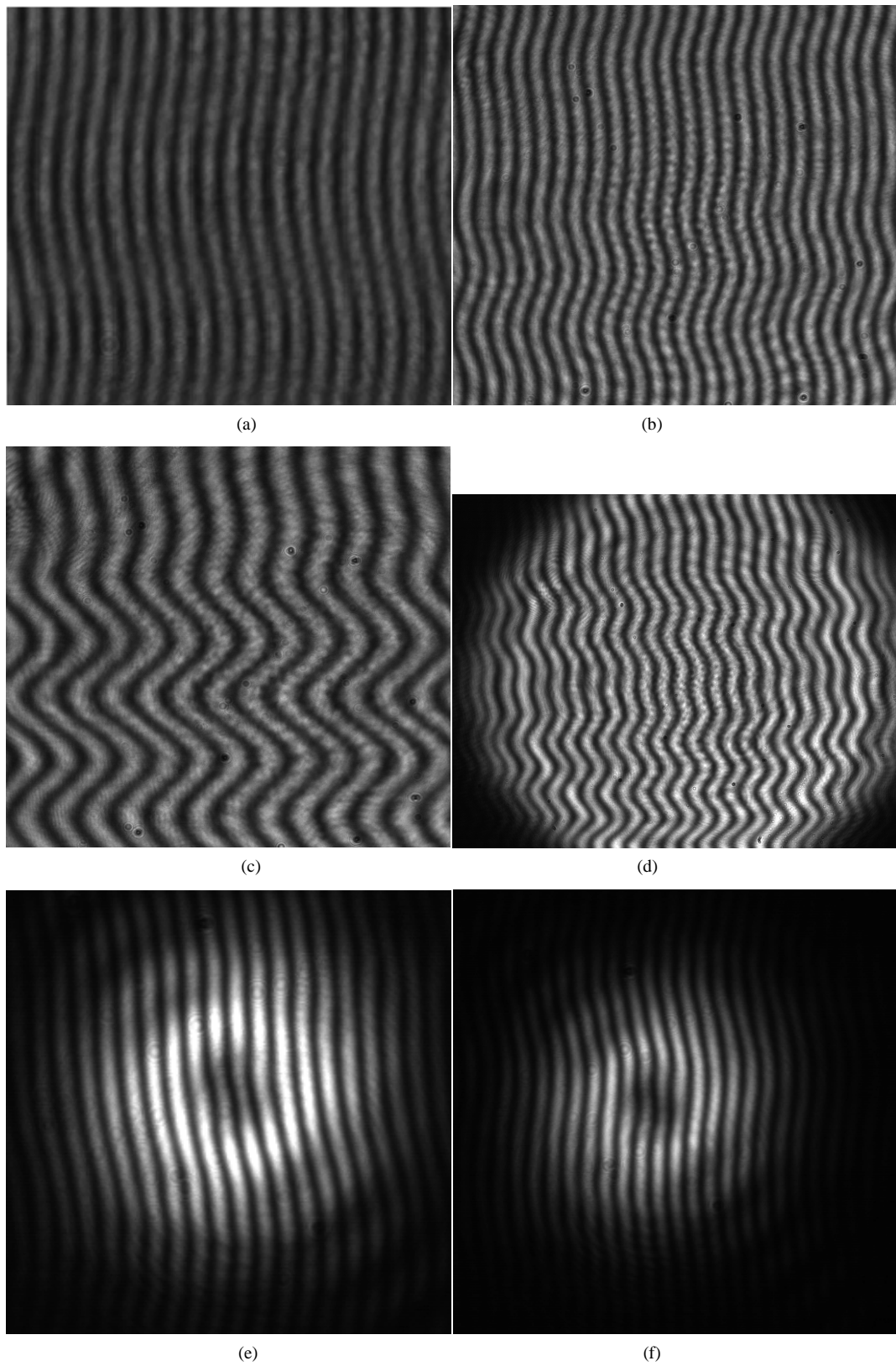
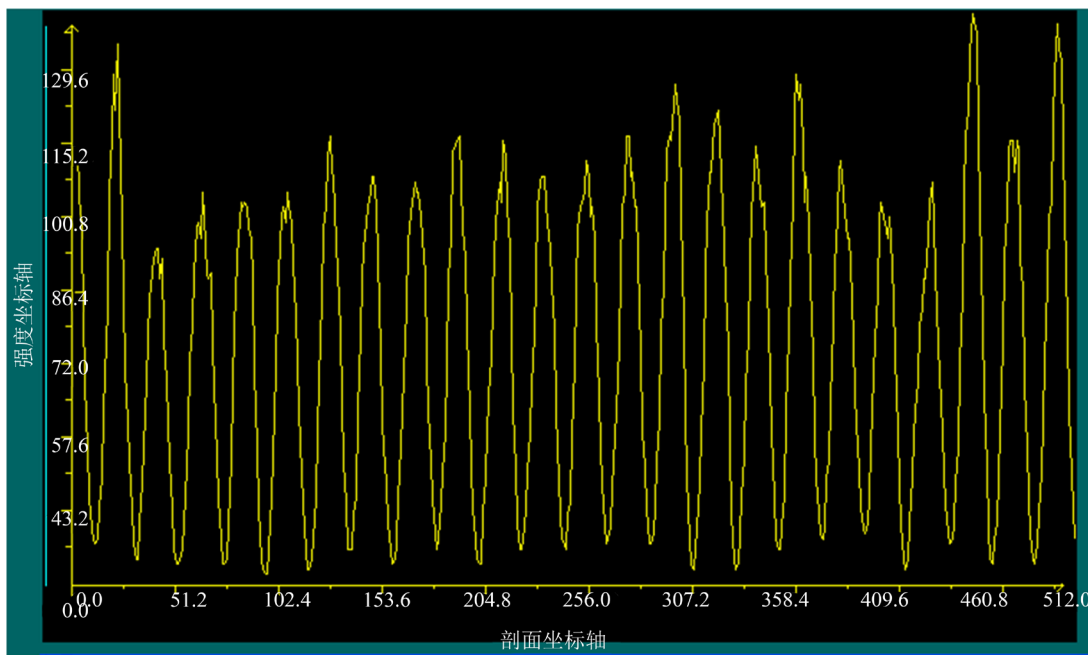
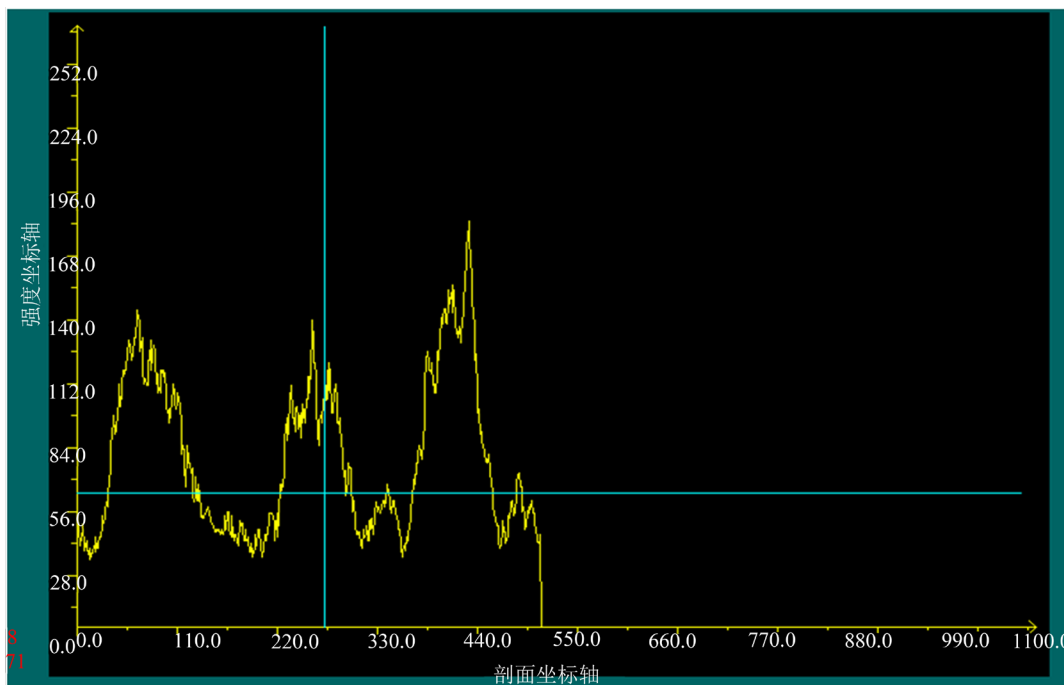


Figure 3. Diagram of M-Z experiment interference fringes  
图 3. M-Z 实验干涉条纹图



(a)



(b)

Figure 4. Diagram of intensity distribution of Figure 3(b) M-Z interference fringes. (a) Intensity distribution of horizontal direction, (b) intensity distribution of vertical direction

图 4. 图 3(b)干涉条纹的光强分布图。(a) 水平方向的光强分布, (b) 竖直方向的光强分布

#### 4.2. 干涉条纹畸变的理论分析

由于在原子发射辐射时, 每个原子在能级上有一定的寿命, 各原子间的碰撞以及原子运动的多普勒效应, 即使是最锐的光谱线也具有一定的谱线宽度, 激光谱线的宽度也会影响干涉结果。所以, 对于一

个严格的单色光场，其振幅不随时间变化，而相位随时间作线性变化，光振动在时间上是无限延伸的。这样，我们讨论光场的相干性问题，必然与光源的时间特性(光谱分布)和空间特性(光源的空间扩展)相联系，即时间相干性和空间相干性。

#### 4.2.1. 时间相干性分析

讨论在相干面上某点  $Q$  的相干性，设实验中射到分束镜  $BS_1$  上某点  $P$  的光，经反射和透射之前的光场分布为  $u(P, t)$ ，经图 1 中的矩形光路后  $t$  时刻在 CCD 上某点  $Q$  的光场为[3]

$$u(Q, t) = K_1 u(P_1, t - t_1) + K_2 u(P_2, t - t_2) \quad (1)$$

式中， $t_1$ 、 $t_2$  分别为光经过分束镜  $BS_1$  后的两光路到达  $Q$  点所用的时间， $K_1$ 、 $K_2$  分别为两光路的传播因子， $P_1$ 、 $P_2$  分别表示经分束镜  $BS_1$  后的两条光路。若光场是各态经历的，时间互相关函数等于统计互相关函数，因此得到互相干函数为

$$\Gamma_{12}(\tau) = \langle u(P_1, t + \tau) u^*(P_2, t) \rangle \quad (2)$$

式中， $\tau = t_2 - t_1$  为经矩形光路的两相干光的时间差。则  $Q$  点的光强为

$$I(Q) = I_1(Q) + I_2(Q) + 2K_1 K_2 \operatorname{Re}\{\Gamma_{12}(\tau)\} \quad (3)$$

式中， $I_1(Q)$ 、 $I_2(Q)$  分别为两相干光在  $Q$  点的光强， $I_1(Q) = K_1^2 I_0$ 、 $I_2(Q) = K_2^2 I_0$ 。假设光场是平稳的和各态经历的，统计量的平均与时间原点无关，时间平均与统计平均相同，只考虑干涉面上某点  $Q$  的时间相干性，则由  $P$  点发出的光强均为  $I_0$ ，则归一化的互相干函数为

$$\gamma_{12} = \frac{\Gamma_{12}(\tau)}{I_0} \quad (4)$$

显然，

$$0 \leq |\gamma_{12}| \leq 1 \quad (5)$$

则  $Q$  点的光强又为

$$I(Q) = (K_1^2 + K_2^2) I_0 + 2K_1 K_2 I_0 \operatorname{Re}\{\gamma_{12}(\tau)\} \quad (6)$$

考虑光源的光谱宽度时，对于平均频率为  $\bar{\nu}$  的窄带光，可将互相干函数和复相干度分别表示为[3]

$$\Gamma_{12}(\tau) = \Gamma_{12}(\tau) \exp\{j[2\pi\bar{\nu}\tau + \alpha_{12}(\tau)]\} \quad (7)$$

$$\gamma_{12}(\tau) = \gamma_{12}(\tau) \exp\{j[2\pi\bar{\nu}\tau + \alpha_{12}(\tau)]\} \quad (8)$$

式中， $2\pi\bar{\nu}\tau$  为光波从分束镜  $BS_1$  后表面到  $Q$  点的相位差，与光源性质无关； $\alpha_{12}(\tau)$  为两束窄带光的复相干度的相位，与光源性质有关。 $Q$  点干涉条纹的可见度为

$$\mathfrak{V} = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}} = \frac{2K_1 K_2}{K_1^2 + K_2^2} \operatorname{Re}\{\gamma_{12}(\tau)\} = \frac{2K_1 K_2}{K_1^2 + K_2^2} \gamma_{12}(\tau) \cos[2\pi\bar{\nu}\tau + \alpha_{12}(\tau)] \quad (9)$$

由(8)、(9)两式可知，在  $Q$  点的干涉条纹形状除了与光源的频谱宽度和两光束的时间差有关以外，还与两束窄带光的复相干度的相位  $\alpha_{12}(\tau)$  有关，干涉条纹的对比度与两光路的传播因子  $K_1$ 、 $K_2$  和时间差  $\tau$  有关，说明干涉面上某点的干涉条纹形状与随时间变化，所以看到呈余弦形的变化曲线。

#### 4.2.2. 空间相干性分析

这时，由(1)式得知： $\tau = t_2 - t_1 = 0$ ，同理推导出得到，在 CCD 上某点  $Q$  的干涉条纹的可见度为

$$\mathfrak{J} = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}} = \frac{2K_1K_2}{K_1^2 + K_2^2} \gamma_{12}(0) \cos[\alpha_{12}(0)] \quad (10)$$

(10)式中,  $\gamma_{12}(0)$  称为复(空间)相干度, 它描述在同一时刻  $t$ , 光场中两点的空间相干性;  $\alpha_{12}(0)$  表示在同一时刻  $t$  两窄带光的复相干度的相位。

可见, P 点光传播到干涉面 CCD 上的干涉条纹与光传播到的空间位置、光源性质有关, 还与两光路的传播因子  $K_1, K_2$  有关。所以, 干涉条纹随空间位置变化而呈余弦规律变化。

## 5. 影响因素及其改进措施

由图 4 可知, 实验中得到干涉图条纹不是明暗相间的直条纹, 每一条条纹光强分布不成高斯分布, 具有很明显的锯齿形, 呈弯曲的近似余弦规律的随时间变化的曲线, 造成这些现象的主要因素有:

### 5.1. 光源的影响

前面讨论了光源的光谱宽度, 这里讨论光源为非均匀加宽的情况, 由于不同粒子发出的光频率不同, 从线型函数  $g(\nu)$  [4]可知, 不同频率  $\nu$  的光的光强不同, 即在粒子反转的情况下, 高低能级间粒子数密度只差  $\Delta n$  也不同。非均匀加宽谱线里的每一个频率都可以辐射一条均匀加宽谱线, 则二能级粒子数密度差值中的  $\Delta n g(\nu) d\nu$  部分所引起的辐射频率  $\nu$  至  $\nu + d\nu$  的光是一条频率为  $\Delta\nu_H$  的均匀加宽谱线。当外来光的频率为  $\Delta\nu_H$  时, 对频率为  $\Delta\nu_H$  的粒子引起最强的饱和效应, 使其  $\Delta n$  下降到  $\Delta n / (1 + I/I_s)$ , 当外来光的频率接近  $\Delta\nu_H$  时, 对频率为  $\Delta\nu_H$  的粒子引起强饱和效应, 使其  $\Delta n$  下降小于  $\Delta n / (1 + I/I_s)$ , 导致光强发生锯齿形的分布。

调节图 1 中光路准直时回程到光源的光的影响, 导致 He-Ne 激光器在工作过程中输出功率会随着时间作周期性或者随机性的波动。尽管激光器功率的变化对相位的影响不显著, 但它会引起输出条纹信噪比的变化。可以在光源与衰减片之间加一光隔离器, 以消除光路中的回程光对整个系统产生的影响。

### 5.2. 偏振态的影响[5]

理想情况下的单模激光模式是线偏振的, 它的两个基模  $HE_{11}^{[x]}$  和  $HE_{11}^{[y]}$  是相互垂直的线偏振模。它们的传播常数相等, 故彼此简并( $n_x = n_y$ ), 在传播过程中, 保持彼此相位相同, 保持线偏振态不变。实际上, 一方面由于激光本身在调准直的过程中, 存在横截椭圆度以及残余内应力等引起折射率分布畸变; 另一方面由于外场微扰的作用, 折射率变化。上述这些变化因素会引起单模激光偏振态的变化, 而且单模激光在干涉仪的两干涉臂传播时, 不可避免地会使激光出现局部扭曲和弯曲应变, 从而引入无规则的双折射。此外, 弯曲或扭曲导致的线性双折射也使单模激光的两个正交偏振模之间发生无规则耦合。上述两种效应都将影响干涉仪的条纹对比度。因此, 可以考虑在光纤干涉仪的一臂中加入一个高频调制的法拉第旋转器和一个高频的 KDP 晶体[6]。两者共同作用的结果使该臂的偏振态得到适当的高频调制。

### 5.3. 光强度的误差

对于理想的相干点光源发出的光来说, 当矩形光路的反射系数和透射系数相同时, 物光和参考光两干涉臂之间光强度之比为 1:1, 干涉条纹对比度最高; 当物光和参考光两干涉臂之间光强度之比不满足 1:1 时; 当物光和参考光所经历的矩形回路不是严格的矩形时, 两干涉臂不等长, 对给定的波长就有一固定的相位, 从而导致仪器函数的不对称性, 这会直接影响到获得的测量干涉图的对称性, 均会导致干涉条纹对比度的下降。另外, 当小孔光阑通光量越大时, 难以保证物光和参考光两干涉臂之间光强度之比为 1:1, 条纹畸变越明显, 如图 3(a)、(b)、(c)所示。但是, 小孔光阑越小, 导致衍射明显, 如图 3(e)、(f)所示。两臂端面分束镜的反射透射系数和反射镜反射率的差异, 镀膜工艺所带来的两分束镜和两反射镜

反射率带来误差。可以考虑在两干涉臂都加上振幅调制器来调整物光和参考光的振幅[5]。

#### 5.4. 光的利用率[5]

从 M-Z 干涉仪的原理可知, 光经两分束镜和两反射镜后的光不是百分之百最后到达光电探测器, 另外的部分被反射回光源方向, 没有被利用。可以考虑用两个定向耦合器来提高光的利用率, 从而进一步提高条纹的对比度。M-Z 干涉仪的 CCD 光电探测器的影响, 探测器温度随时间漂移等因素会引起探测器探测率的漂移, 这使干涉仪信号强度产生起伏或漂移, 从而使干涉图的直流电平和交流调制都发生漂移和起伏, 也是 M-Z 干涉仪的一个重要的噪声来源, 也是产生干涉条纹畸变的一个原因。另外, 在实验过程中经常受到多种因素的干扰, 如热干扰和电干扰(主要来源于光源和电器件)、环境干扰(主要来源于杂散光、空气的扰动及外界的震动)等等。为了防止电干扰, 可以考虑将电器件与光学部分隔离组装。为了消除环境干扰, 可以考虑将干涉仪全密封, 可以通过提高整个系统的抗干扰性来改善条纹的对比度。

### 6. 改进后的实验结果

基于以上改进措施, 重新调整实验装置, 得到改进后的实验图片, 如图 5 所示, 这里, 相应的小孔光阑较大和较小各选取两幅图片(a)、(b)和(c)、(d)。同样选取小孔光阑较大的其中一幅图片(图 5(b))作水平方向和垂直方向的光强分布作对比分析, 如图 6 所示。从其结果看出: 作改进后的干涉条纹畸变远没

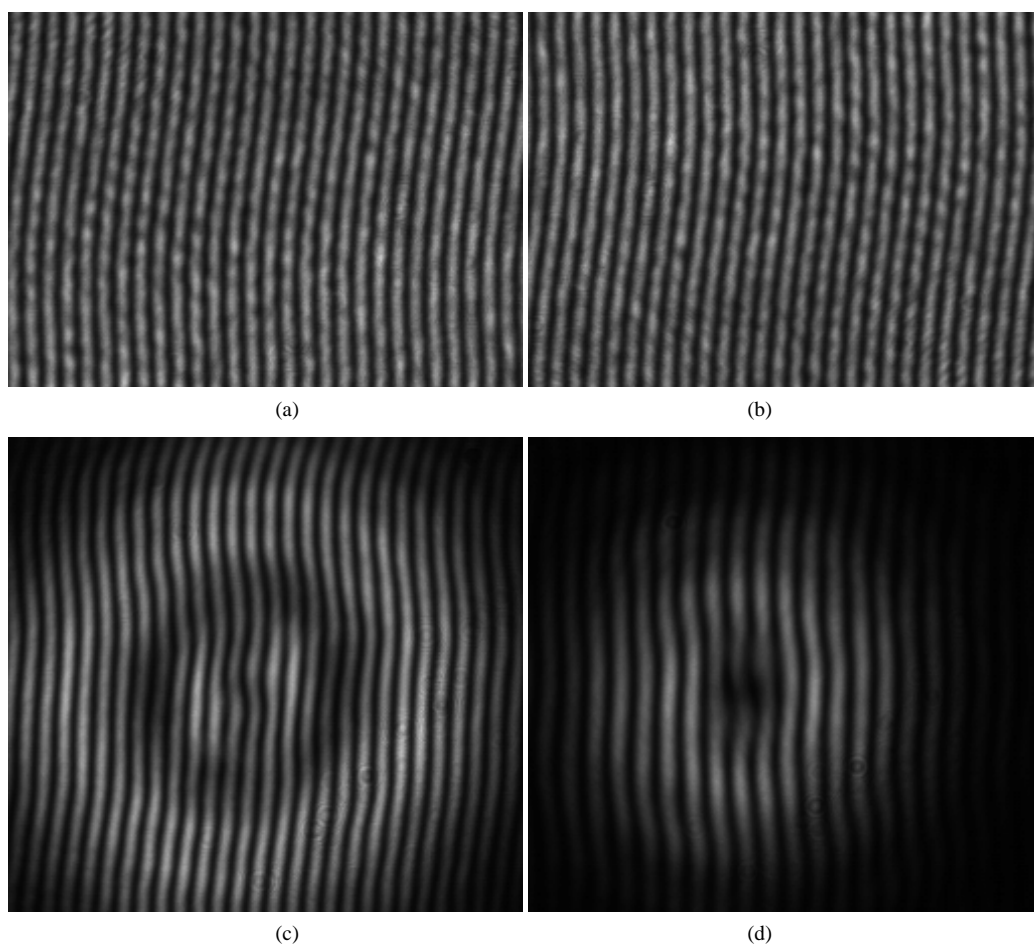
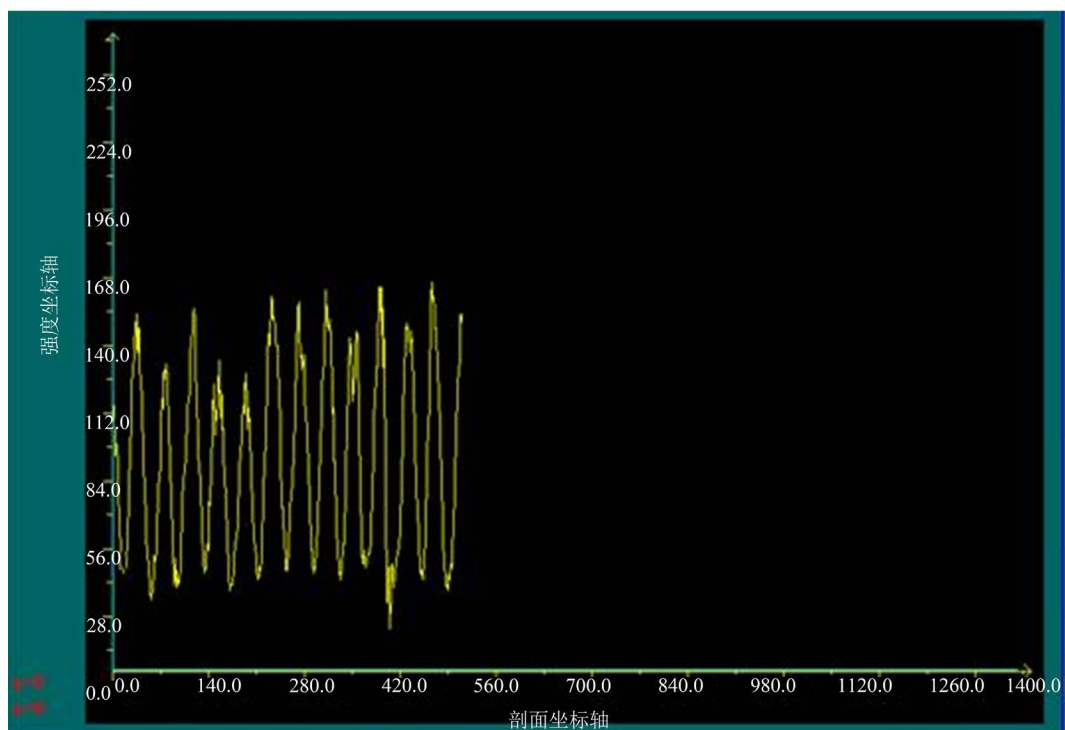
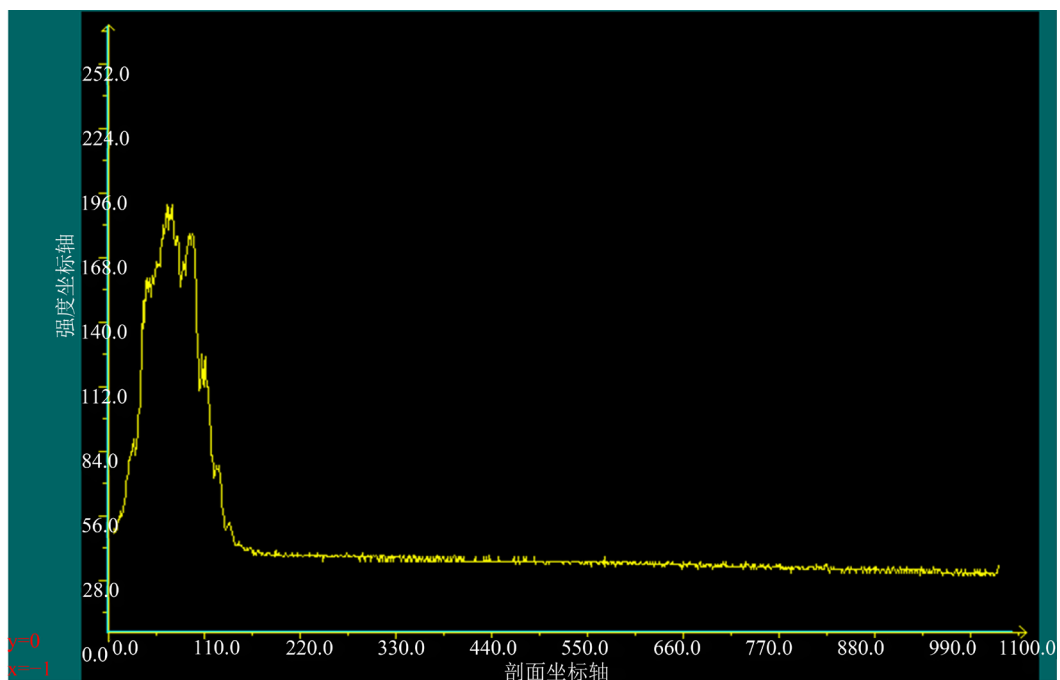


Figure 5. Diagram of M-Z experiment interference fringes was improved  
图 5. 改进后的 M-Z 实验干涉条纹图





(a)



(b)

**Figure 6.** Diagram of intensity distribution of Figure 5(b) M-Z interference fringes. (a) Intensity distribution of horizontal direction, (b) intensity distribution of vertical direction

**图 6.** 图 5(b)干涉条纹的光强分布图。(a)水平方向的光强分布, (b) 竖直方向的光强分布

有之前的那么明显, 条纹近乎为直线型的干涉条纹, 但是, 由于受到不可避免的空间滤波器的针孔的衍射和热干扰和电干扰(主要来源于光源和电器件)、环境干扰(主要来源于杂散光、空气的扰动及外界的震

动)的影响, 条纹还是有点畸变。

## 7. 结论

通过实验观察了 M-Z 干涉仪输出的干涉条纹, 发现干涉条纹形状发生了畸变, 利用分析软件分析了干涉条纹的水平方向和垂直方向的光强分布, 运用相干理论分析和软件仿真析了干涉条纹产生畸变的原因, 还进一步从光源的非均匀加宽、光源偏振态、矩形回路、光的利用率等方面分析得出了可能影响 M-Z 干涉仪干涉条纹形状和对比度的主要因素: 时间相干性和空间相干性、光源谱线宽度、光强度误差、光源和光电探测器的偏振态、色散等, 并提出了相应的改进措施, 并基于文中提出的改进措施重新作了改进后的实验结果, 为实验中进一步提高条纹的对比度和涉及干涉条纹研究的领域提供了有益的参考。

## 基金项目

贵州省科学技术厅、毕节市科学技术局、毕节学院科技联合基金资助黔科合 LH 字[2014]7525 号。

## 参考文献 (References)

- [1] 黄文生, 陈怀琳, 陈美章, 等. 关于马赫 - 曾德干涉仪白光条纹的调整[J]. 力学与实践, 1987(1): 25-29.
- [2] 徐燕, 万勇建, 吴永前. 基于空间相干性控制的环形光源技术[J]. 强激光与粒子束, 2011, 23(12): 3245-3249.
- [3] 苏显渝, 李继陶, 黄益平. 信息光学[M]. 北京: 科学出版社, 2011: 91-96.
- [4] 张季熊. 光电子学教程[M]. 广州: 华南大学出版社, 2001: 21-43.
- [5] 余瑞兰, 刘勇, 王安. 光纤 Michelson 干涉仪干涉条纹对比度的研究[J]. 大气与环境光学学报, 2007, 2(3): 231-235.
- [6] 周效东, 汤伟中. 偏振态调制的偏振无干涉型光纤传感器[J]. 光学学报, 1996, 16(2): 236-239.

再次投稿您将享受以下服务:

1. 投稿前咨询服务 (QQ、微信、邮箱皆可)
2. 为您匹配最合适的期刊
3. 24 小时以内解答您的所有疑问
4. 友好的在线投稿界面
5. 专业的同行评审
6. 知网检索
7. 全网络覆盖式推广您的研究

投稿请点击: <http://www.hanspub.org/Submission.aspx>