

文章编号: 0258-7025(2004)08-1013-05

# 用劳埃德镜干涉原理进行圆度误差测量

花世群

(江苏大学理学院, 江苏 镇江 212013)

**摘要** 提出一种应用线阵 CCD 自动测量圆度误差的新方法。论述了系统利用劳埃德镜干涉装置, 通过线阵 CCD 图像处理系统自动测量圆度误差的工作原理及过程设计。测量结果表明, 新的测量方法实现了圆度误差的实时精确在线测量。该测量系统具有一定的实用价值及较广阔的应用前景。

**关键词** 光学技术与仪器; 圆度误差; 激光干涉; 劳埃德镜; CCD

**中图分类号** TG 83 **文献标识码** A

## Method of Measuring Roundness Error by Interference of Lloyd Mirror

HUA Shi-qun

(Faculty of Science, Jiangsu University, Zhenjiang, Jiangsu 212013, China)

**Abstract** A new method of auto-measuring the roundness error by means of the linear CCD (charge coupled device) is proposed. The principle and design process of the system to measure the roundness error using the Lloyd mirror, linear CCD image-processing system are described. The measuring results indicate that the accurate, real-time and on-line measuring of the roundness error can be realized.

**Key words** optics technique and instrument; roundness error; laser interference; Lloyd mirror; CCD

## 1 引 言

圆度误差是指待测的实际圆轮廓对理想圆的变动量<sup>[1]</sup>。常用的圆度误差的测量方法有: 比较检验法、特征参数测量法和坐标测量法等。其中有些方法可简便快速地得到工件的圆度误差值; 有些方法则只判断工件是否合格, 而不需得到圆度值; 随着对加工精度和测量过程自动化要求的不断提高, 有时还需通过某些测量方法获得工件的精确轮廓图形, 在评定出工件的圆度误差值的同时, 对待测工件的加工工艺和加工过程进行分析和调整, 以促进成品质量的进一步提高。为此, 本文设计了圆度误差的自动测量系统。该系统利用劳埃德镜干涉装置, 将对待测工件圆度误差的测量, 转化成对相应干涉条纹间距的测量; 而对干涉条纹间距进行测量时, 又采用线阵 CCD 作为干涉条纹的光电接受装置, 并通过与微机相连, 对测量数据进行自动处理, 从而实现了

对圆度误差的自动化和高精度测量。

## 2 圆度误差测量方法

### 2.1 测量系统

如图 1 所示, 圆度误差测量系统<sup>[2~4]</sup>主要由光源(He-Ne 激光器)、狭缝、劳埃德镜(即平面反射镜)、芯轴、待测工件和 CCD 图像处理系统等主要部分组成。其中平面反射镜的左端固定在一个水平转轴上, 右端的测量头置于待测工件的外圆表面上。

### 2.2 测量原理

在图 1 所示测量装置中, 开始时测量头置于待测工件外圆表面上的第一个等分点处(设为基准位置), 并设狭缝 S 通过平面反射镜所成的像为 S'; 当 He-Ne 激光器发出的单色平行光在狭缝 S 上垂直入射时, 在线阵 CCD(即屏幕)上要形成一系列明暗相间、平行等间距的干涉条纹, 则由杨氏双缝干涉理

收稿日期: 2003-04-16; 收到修改稿日期: 2003-07-02

作者简介: 花世群(1965—), 男, 江苏海安人, 江苏大学理学院副教授, 硕士, 主要从事光学测试研究。E-mail: huasq@sina.com

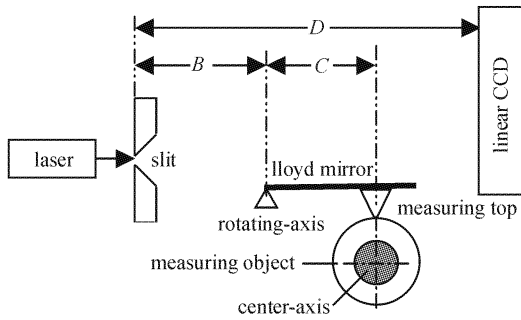


图 1 测量装置示意图

Fig. 1 Schematic of measuring device

论可知,干涉条纹的间距<sup>[5]</sup>

$$\Delta x = \frac{D\lambda}{d} \quad (1)$$

其中  $d$  为等效双狭缝  $S$  和  $S'$  的间距,  $D$  为双狭缝到线阵 CCD 的间距,  $\lambda$  为射入狭缝的光波波长。

现让待测工件绕芯轴旋转,由于被测工件圆度误差的存在,测量头在竖直方向的高度就要发生变化,从而使平面反射镜绕左端的转轴转动。若测量头位于待测工件上的第  $i$  个等分点处时,测量头在竖直方向相对于第一个等分点处的高度变化为  $h_i$  (即待测工件所在测点相对基准位置的半径差),平面反射镜绕左端转轴的转动角为  $\theta_i$ ,则

$$h_i \approx C\theta_i \quad (2)$$

其中  $C$  为测量头到转轴的间距。

设平面反射镜绕左端的转轴转动角为  $\theta_i$  时,等效双狭缝  $S$  和  $S'$  的间距变为  $d'$ ,由几何光学可知

$$d' \approx d \pm 2B\theta_i \approx d \pm 2Kh_i \quad (3)$$

(3) 式中的正号和负号分别对应于测量头向上移动 ( $h_i$  为正),测量头向下移动 ( $h_i$  为负) 的两种情形;  $B$  为双狭缝到转轴的间距;  $K$  为  $B$  和  $C$  两者之比。

当等效双狭缝间距变为  $d'$  时,则 CCD 上接受到的干涉条纹间距相应地变为

$$\Delta x_i = \frac{D\lambda}{d'} = \frac{D\lambda}{d \pm 2Kh_i} \quad (4)$$

将(1)和(4)两式合并得

$$h_i = \pm \frac{D\lambda}{2K} \left( \frac{1}{\Delta x_i} - \frac{1}{\Delta x} \right) \quad (5)$$

由(5)式可知,当待测工件旋转一周,测量头分别位于工件上的不同等分点处 ( $i = 1, 2, 3, \dots, N$ ) 时,只要能测量出相应位置处 CCD 上接受到的干涉条纹间距  $\Delta x_i$  ( $i = 1, 2, 3, \dots, N$ ),则可利用(5)式,分别计算出待测工件上的不同等分点相对于基准位置的半径差  $h_i$ ,进而对待测工件的圆度误差进行评定。

### 2.3 CCD 图像处理系统

图 2 中的 CCD 图像处理系统<sup>[6]</sup>,采用线阵 CCD 为光电传感器。像元尺寸为  $7 \mu\text{m}$ ,共含有 2048 个像元,每个像元在空间上彼此独立,其输出的电荷包空间分布与光强的空间分布成比例。当 CCD 接受到光信号时,它就在驱动脉冲作用下,将电荷包信号依次驱动出来,形成对应于干涉条纹的视频信号。把视频信号一路经图像采集卡直接送入视频监视器,供光路调节使用,另一路再经滤波放大和模数转换,形成便于微机处理的有规则的电压信号。

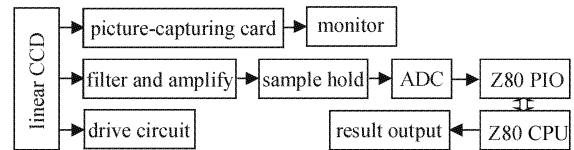


图 2 CCD 图像处理系统

Fig. 2 CCD image-processing system

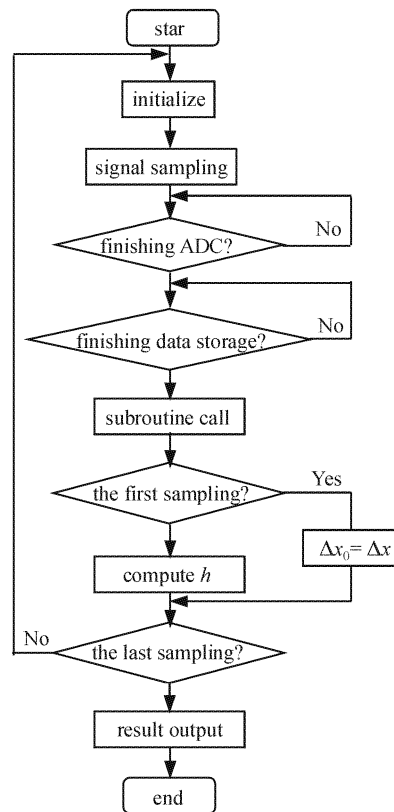


图 3 主程序流程图

Fig. 3 Flowchart of main routine

利用微机控制 PIO 接口,对干涉条纹间距进行测量的流程如图 3 所示<sup>[7]</sup>。测量时首先利用 PIO 初始化,设置输入输出并行接口的 A 口工作在位控方式, B 口工作在输入方式。通过软件控制 A 口的

PA<sub>4</sub> 端输出电平为 0 或 1;对 A/D 的时钟和起动信号进行控制。当被测信号到达后,程序使 A/D 时钟有效,起动信号为高电平,A/D 开始模数转换,当 A/D 转换结束时,BSTB 为低电平,微机从 B 口把转换数据循环读入内存,数据存完后,调用光强的峰值检测子程序,求得第一组采样信号的干涉条纹间距  $\Delta x$ ;然后从对第二组信号进行采样开始,每采样一次,便根据(5)式计算出相应等分点相对于基准位置的半径差  $h_i$ ,直到所有信号都采样完毕。

图 4 是检测干涉条纹光强峰值(即光强极大值)的流程图。它是通过比较程序,找到测量范围内的光强峰值总数,并把峰值地址依次存放在相连的  $n$  个单元中,设  $x_1$  和  $x_n$  分别是第一个和最后一个峰值地址, $M$  为 CCD 的像元中心距,则干涉条纹的间距为

$$\Delta x = \frac{x_n - x_1}{n - 1} M \quad (6)$$

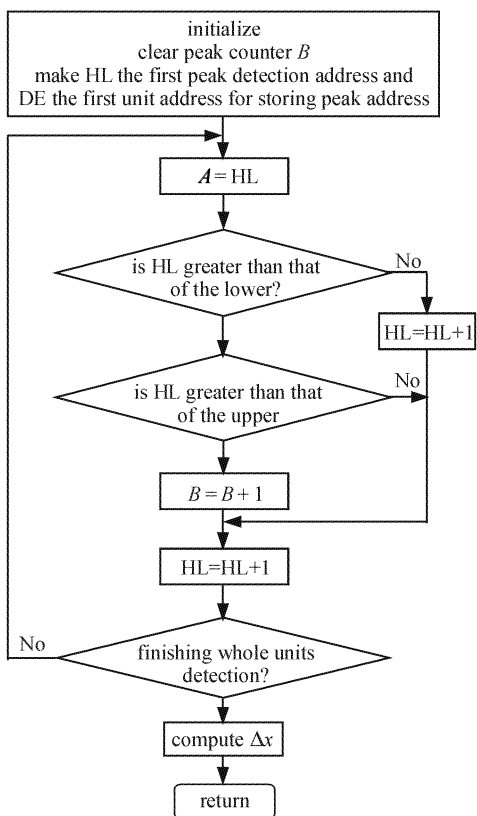


图 4 子程序流程图

Fig. 4 Flowchart of subroutine

### 3 圆度误差的测量与评定

#### 3.1 测量步骤

应用线阵 CCD 测量圆度误差的实验装置简图

如图 1 所示,测量的具体步骤是:

1) 先取一块长方形的平面反射镜,在左端用强力胶把它与灵活铰链仔细接好,并在右端固定一测量头;然后把待测工件安装在芯轴上(要求无间隙),并将芯轴置于两顶尖间,最后按图 1 所示把装置安装好,其中劳埃德镜左端转轴所在处水平固定,右端测量头置于待测工件的外圆表面上。

2) 调节狭缝  $S$  成水平,并调节 He-Ne 激光光源位置,使入射光正对并均匀照亮整个狭缝  $S$ ,并使光束在平面反射镜镜面上接近掠入射。

3) 改变狭缝宽度,直至从监视器中观察到清晰的干涉条纹。

4) 让测量头位于待测工件外圆表面上的第  $i$  ( $i = 1, 2, 3, \dots, N$ ) 个等分点处,然后利用 CCD 图像处理系统,测量出 CCD 上所接受到的与第  $i$  个等分点相应的干涉条纹间距  $\Delta x_i$  ( $i = 1, 2, 3, \dots, N$ )。

#### 3.2 测量结果

利用劳埃德镜干涉装置对一个工件外圆表面的圆度误差进行了测量。测量时从  $0^\circ$  开始,每隔  $30^\circ$  设置一个测量点,共测量了 12 个点。测量过程中,  $D = 895.6 \text{ mm}$ ,  $\lambda = 632.8 \text{ nm}$ ,  $K = 6$ 。其他测量数据如表 1,其中  $r_i = h_i + r_0$  (伪半径)。

#### 3.3 圆度误差的评定

目前,常用的圆度误差评定方法有四种,除了符合最小条件的最小区域圆法外,还有最小二乘圆法、最小外接圆法和最小内切圆法。我们本文提出的方法属于极坐标测量法,而极坐标测量法只能获得工件的轮廓曲线,所以还必须按一定的评定方法评定出待测工件的圆度误差值,这里选用最小二乘圆法。

设测量时的回转中心为  $O(0, 0)$ ,最小二乘中心为  $O'(a, b)$ ,则由最小二乘原理及表 1 测量数据可得

$$a = \frac{2}{N} \sum_{i=1}^N r_i \cos \beta_i = -0.0031 \text{ mm}$$

$$b = \frac{2}{N} \sum_{i=1}^N r_i \sin \beta_i = -0.0004 \text{ mm}$$

轮廓曲线上各测点至坐标原点  $O(0, 0)$  的平均距离

$$R_0 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N r_i = 15.0062 \text{ mm}$$

偏心量为

$$e = \sqrt{a^2 + b^2} = 0.0031 \text{ mm}$$

偏心角度为

$$\alpha = \arctan \frac{b}{a} = -7.35^\circ$$

轮廓曲线上各测点相对最小二乘圆的误差

表 1 干涉法测量数据(单位:mm)

Table 1 Measuring data of interference (units: mm)

No.	$\beta_i$	$\Delta x_i$	$r_i$	$r_i \cos \beta_i$	$r_i \sin \beta_i$	$e \cos(\beta_i - \alpha)$	$\Delta R_i$
1	0°	0.404	15.0000	15.0000	0	0.0031	-0.0093
2	30°	0.395	15.0027	12.9927	7.5014	0.0025	-0.0060
3	60°	0.378	15.0080	7.5040	12.9973	0.0012	0.0006
4	90°	0.373	15.0097	0	15.0097	-0.0004	0.0039
5	120°	0.387	15.0051	-7.5026	12.9948	-0.0019	0.0008
6	150°	0.382	15.0067	-12.9962	7.5034	-0.0029	0.0034
7	180°	0.371	15.0104	-15.0104	0	-0.0031	0.0073
8	210°	0.374	15.0094	-12.9985	-7.5047	-0.0025	0.0057
9	240°	0.380	15.0074	-7.5037	-12.9968	-0.0012	0.0024
10	270°	0.385	15.0058	0	-15.0058	0.0004	-0.0008
11	300°	0.386	15.0055	7.5028	-12.9951	0.0019	-0.0026
12	330°	0.393	15.0033	12.9932	-7.5017	0.0029	-0.0058

$$\Delta R_i = r_i - e \cos(\beta_i - \alpha) - R_0 \text{ (见表 1)}$$

则由表 1 可得,被测工件的圆度误差为

$$f = \Delta R_{\max} - \Delta R_{\min} =$$

$$0.0073 - (-0.0093) = 0.0166 \text{ mm}$$

根据方和根合成法可得,被测工件圆度误差的测量不确定度

$$\Delta f = \{(\Delta r_7)^2 + (\Delta r_1)^2 + [\cos(\beta_7 - \alpha) - \cos(\beta_1 - \alpha)]^2 (\Delta e)^2 + e^2 [\sin(\beta_7 - \alpha) - \sin(\beta_1 - \alpha)]^2 (\Delta \alpha)^2\}^{1/2} = 0.0004 \text{ mm}$$

### 3.4 测量方法的比较

为了验证测量结果的可靠性,利用 FAG32 型圆度仪对该被测工件进行了对比测量,其测量截面和测量点都与前面完全相同,同样用最小二乘圆法来评定其圆度误差,评定结果为  $f = 0.01653 \text{ mm}$ 。

### 3.5 测量精度分析

利用改进的劳埃德镜干涉装置,通过线阵 CCD 图像处理系统自动测量圆度误差时,系统的测量精度虽然受到环境温度、振动等因素影响,但主要取决于对干涉条纹间距的测量。考虑到等效双狭缝 S 和 S' 大的光强差异,会使线阵 CCD 上接受到的干涉条纹具有较低的对比度和较高的直流背景,从而降低输出信号的信噪比和幅度,影响干涉条纹的定位精度;一方面可在测量中所用的劳埃德镜表面喷涂一层厚度均匀的高反射膜,以提高干涉条纹的对比度,另一方面可利用先进的计算机图像处理技术,对干涉条纹进行细分<sup>[8]</sup>,通过提高条纹中心的定位精度,进而对干涉条纹间距进行精确测量。另外,通过调整测量头到转轴的间距 C 或改变双狭缝到转轴的

间距 B,即通过改变 K 大小的方法,也可使系统的测量精度得到更进一步的提高。

## 4 结 论

通过对两种方法的测量结果进行比较可见,新的圆度误差测量方法是切实可行的。另外,利用劳埃德镜干涉装置,并借助于 CCD 图像处理系统测量圆度误差的方法还可用于锥角、直线度等其他几何量的自动测量,不但系统的测量精度高,而且测量系统的价格便宜,因而具有较广阔的实际应用前景。

## 参 考 文 献

- 1 Wu Jinxie. Precision Measurement of the Geometric Quantity [M]. Heilongjiang: Harbin Institute of Technology Press, 1989. 202~216  
武晋燮. 几何量精密测量技术[M]. 黑龙江:哈尔滨工业大学出版社,1989. 202~216
- 2 Hua Shiqun. Method of measuring Young elastic modulus of steel wire by Lloyd mirror [J]. Measure Uechnique, 2002, (5): 27~28  
花世群. 利用洛埃镜测量钢丝的杨氏弹性模量[J]. 计量技术, 2002, (5):27~28
- 3 Chen Qianghua, Wu Jian, Yin Chunyong. Long range straightness/coaxiality measurement system using dual-frequency laser [J]. Chinese J. Lasers, 2002, A29(7):625~630  
陈强华,吴 健,殷纯永. 双频激光远程直线度/同轴度测量系统[J]. 中国激光, 2002, A29(7):625~630
- 4 Ge Aiming, Chen Jinbang, Chen Lei et al.. Automatic laser interference measurement of center length of gauge block [J]. Chinese J. Lasers, 2001, A28(6):537~540  
葛爱明,陈进榜,陈 磊等. 量块中心长度的自动激光干涉测量[J]. 中国激光, 2001, A28(6):537~540
- 5 Zao Kaihua, Zhong Xihua. Optics [M]. Beijing: Peking University Press, 1984. 270~272  
赵凯华,钟锡华. 光学(上册)[M]. 北京:北京大学出版社, 1984. 270~272
- 6 Wang Qingyou. CCD Application [M]. Tianjin: Publishing

Company of Tianjin University, 2000. 127~136  
王庆有. CCD 应用技术[M]. 天津:天津大学出版社, 2000. 127~136

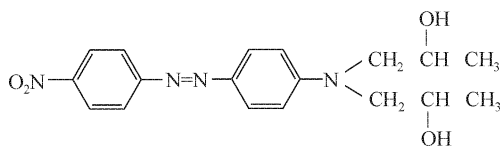
7 Li Wencheng, Qin Qiwen. Study on using CCD in real-time measurement of hologram grating constant [J]. *Optical Technique*, 1995, (4):36~37

李文成,秦绮雯. CCD 用于全息光栅常数实时测量研究[J]. *光学技术*, 1995, (4):36~37

8 Chen Tingzheng, Lü Haibo. CCD subdivision method and application [J]. *Acta Optica Sinica*, 2002, 22(11):1396~1399  
谌廷政,吕海宝. CCD 细分技术方法研究及应用[J]. *光学学报*, 2002, 22(11):1396~1399

### 一种新型偶氮染料的光致变色特性的研究\*

用于光存储材料的偶氮染料具有廉价易得、响应时间快、分辨率高、有较高的记录灵敏度、分子结构易调整等优点。目前报道的偶氮染料掺杂聚合物薄膜的掺杂浓度一般为 3%~20%，因为高的掺杂浓度容易使共混体系发生相分离，但掺杂浓度低会限制材料的记录密度。为此，我们合成了一种新的偶氮染料 4-硝基-4'-N,N-二(2-羟丙基)偶氮苯(NHPA)<sup>[1]</sup>，其分子结构如下所示。因为 NHPA 上含有硝基、羟基等强极性基团，可以按 1:1 的质量比和 PMMA 稳定掺杂。



虽然已经公认偶氮材料用于光存储的机理与它的光致变色特性有关，但研究光致变色的方法主要还是使用 UV-Vis 分光光度计来记录偶氮材料激发前后的吸收光谱，然后叠加到一起观察吸收光谱的变化<sup>[2~5]</sup>，这种方法有很大局限性：1) UV-Vis 分光光度计是一个独立的测试系统，样品激发后再放入 UV-Vis 分光光度计中必然有时间延迟，测试的实时性和真实性比较差。2) 测试过程中反复取放样品，很难保证测试点的唯一性，对样品薄膜的均匀性要求很高。

为了克服分光光度计测试光致变色的缺陷，我们组建了一套如图 1 所示的光致变色测试系统，对掺杂薄膜做了顺反异构光致变色特性的研究，得到了偶氮染料吸收光谱的实时差谱曲线，发现薄膜最多 0.6 s 左右就可以达到激发饱和。停止激发 0.8 s 后达到饱和衰减区，具有明显的光致变色效应。实验中用的激光为圆偏振光，偶氮分子被激发后会垂直于薄膜表面的取向。停止激光激发后，薄膜中的 NHPA 分子的取向状态被“冻结”，发生取向的这部分 NHPA 分子，对探测光没有吸收，只要高分子基质的温度保持在  $T_g$  以下，这种取向状态就能保持，但可以用加热或光照等方法使偶氮分子的取向状态发生松弛。所以偶氮染料的光致变色是由偶氮分子的光致异构引起的，但它实质上分为两个过程：光致异构为主的快过程和取向为主的慢过程(需要经过很多次光致异构的循环)。该薄膜具有可反复写入、

擦除的性能，经过几十次的循环也无疲劳产生，存储的图像可以保持数天以上。

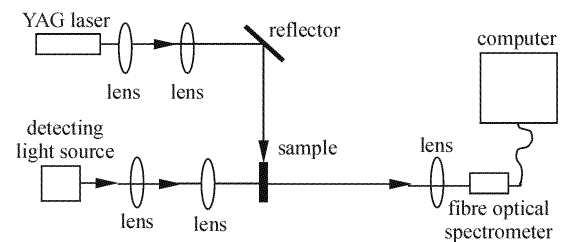


图 1 光致变色特性测试系统  
Fig. 1 Measuring system of photochromism

#### 参 考 文 献

1 Meng Lingjie, Wu Hongcai, Sun Jianping *et al.*. Synthesis and characterized of 4-Nitro-4'-N, N-di (2-hydroxypropyl) aminoazobenzene [J]. *Fine Chemicals*, 2003, 20(9):519~521  
孟令杰,吴洪才,孙建平 等. 4-硝基-4'-N,N-二(2-羟丙基)氨基偶氮苯的合成与表征[J]. *精细化工*, 2003, 20(9):519~521  
2 Izabella Zawisza, Renata Bilewicz, Krzysztof Janus *et al.*. Comparison of Z↔E isomerization in Langmuir-Blodgett layers and in solution [J]. *Materials Science and Engineering*, 2002, C22:91~98  
3 Yanjie Zhang, Zifeng Lu, Xuefeng Deng. Photochromism and holographic recording in polymer film containing chiral azo molecules derived from amino acid [J]. *Optical Materials*, 2003, 22:187~192  
4 Margaret S. Beattie, Christian Jackson, Gary D. Jaycox. Azobenzene modified poly(aryl ether ketone amide)s. 2. Photo and thermo-responsive behaviour in dilute solution [J]. *Polymer*, 1998, 39(12):2597~2605  
5 Wang Fengqi, Chen Hongfeng, Wu Wei *et al.*. The photoisomerization reaction of a novel type of azo-compounds [J]. *Photographic Science and Photochemistry*, 1996, 14(1):1~3  
王凤奇,陈宏峰,武卫 等. 新型偶氮化合物光致变色的研究[J]. *感光科学与光化学*, 1996, 14(1):1~3

<sup>1</sup> 西安交通大学电子与信息工程学院光电技术与太阳能研究所, 陕西 西安 710049  
<sup>2</sup> 中国科学院西安光学精密机械研究所瞬态光学技术重点实验室, 陕西 西安 710068  
孟令杰<sup>1</sup>, 吴洪才<sup>1</sup>, 易文辉<sup>1</sup>, 杨文正<sup>2</sup>  
收稿日期:2003-08-18;收到修改稿日期:2004-01-09

\* 国家自然科学基金(10075038)资助项目。