

[19] 中华人民共和国国家知识产权局

[51] Int. Cl.

G01B 11/00 (2006.01)

G01S 17/06 (2006.01)



# [12] 发明专利说明书

专利号 ZL 200510011258.2

[45] 授权公告日 2007 年 8 月 22 日

[11] 授权公告号 CN 1333230C

[22] 申请日 2005.1.26

[21] 申请号 200510011258.2

[73] 专利权人 清华大学

地址 100084 北京市 100084 - 82 信箱

[72] 发明人 张书练 费立刚

[56] 参考文献

CN1280293 A 2001.1.17

CN2577236 Y 2003.10.1

CN1070152 C 2001.8.29

EP0653607 A2 1994.11.14

US5565987 A 1996.10.15

多重光反馈的激光自混合干涉 禹延光,  
程明, 强锡富, 光学学报, 第 21 卷第 9 期 2001

弱光反馈条件下多外腔自混合干涉 宦海, 王鸣, 郝辉, 南京师大学报 (自然科学版), 第 26 卷第 4 期 2003

用激光频差调谐曲线进行纳米位移测量的初步研究 张书练, 韩艳梅, 仪器仪表学报, 第 16 卷第 1 期 1995

审查员 张亚玲

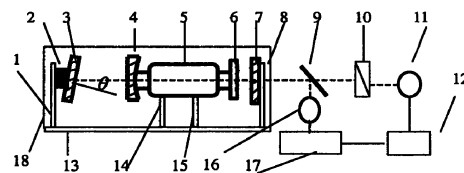
权利要求书 2 页 说明书 6 页 附图 2 页

[54] 发明名称

激光回馈纳米位移测量装置

[57] 摘要

本发明属于激光测量技术领域, 其特征是利用 632.8nm 的 He-Ne 激光器与外部高反射率的反射镜构成的非准直多重激光回馈系统, 外部反射镜固定在被测物体上, 当被测物移动时激光强度的波动频率可以达到传统回馈的几到几十倍, 即激光强度波动的高阶倍频效应, 此时光强的一个波动周期对应于外腔镜与激光器之间的距离变化可以达到纳米量级, 测量激光强度变化的周期数, 即可以得到被测物体的位移量; 当被测物体的移动的方向变化时, 激光的偏振态在两个正交方向发生跳变, 由此可以判别被测物体的移动方向。该位移测量方法及其实现装置具有结构简单、装配调整容易、测量精度高、成本低的特点。适用于纳米级分辨率位移测量的各种场合。



1、 激光回馈纳米位移测量装置，其特征在于，该装置是半内腔式的，含有非准直多重激光回馈系统和测量电路，其中：

a. 非准直多重激光回馈系统，包括 632.8nm 的 He-Ne 激光器、激光回馈外腔反射镜和压电陶瓷；

632.8nm 的 He-Ne 激光器，所述的激光器含有增益管、增透窗片和谐振腔；

增益管，内有 He、Ne 混合气体，He、Ne 混合气体的气压比为 7:1；

增透窗片，固定在上述增益管的一端；

谐振腔，包括第一内腔反射镜和第二内腔反射镜；

第一内腔反射镜，位于上述增透窗片的另一端；

第二内腔反射镜，固定在上述增益管的另一端；

激光回馈外腔反射镜，是一个高反射率的反射镜，其表面法线与激光束成一个夹角；

压电陶瓷，即 PZT，固定在上述激光回馈外腔反射镜上，在输入电压作用下，推动上述激光回馈外腔反射镜沿激光轴线方向左、右移动；

上述增益管、第一内腔反射镜和压电陶瓷各自经固定支架固定在装在罩子内的安装平台上；

b. 测量电路，包括：

分光镜，位于上述第一内腔反射镜的一侧，靠近上述第一内腔反射镜；

第一光电探测器，测量经上述分光镜反射后的激光输出的光强；

放大器和计数电路，对上述第一光电探测器的输出经放大后进行脉冲计数；

偏振片，对从上述分光镜透射过来的两正交偏振光进行分离；

第二光电探测器，探测通过偏振片后的激光光强；

电压比较器，所述的电压比较器的输入端与上述第二光电探测器的输出端相连，当上述激光回馈外腔反射镜朝远离上述激光器的方向移动时，所述的电压比较器输出高电平控制上述的计数电路进行加计数，反之，作减计数，所述电压比较器和上述第二光电探测器构成上述计数电路和加减控制单元。

2、 激光回馈纳米位移测量装置，其特征在于，该装置是全内腔式的，含有非准直多重激光回馈系统和测量电路，其中：

a. 非准直多重激光回馈系统，包括 632.8nm 的 He-Ne 激光器、激光回馈外腔反射镜和压电陶瓷；

632.8nm 的 He-Ne 激光器，所述的激光器含有增益管和谐振腔；

增益管，内有 He、Ne 混合气体，He、Ne 混合气体的气压比为 7:1；

谐振腔，包括第一内腔反射镜和第二内腔反射镜；

第一内腔反射镜，固定在上述增益管的一端；

第二内腔反射镜，位于上述增益管的另一端；

激光回馈外腔反射镜，是一个高反射率的反射镜，表面法线与激光束成一个夹角；

压电陶瓷，即 PZT，固定在上述激光回馈外腔反射镜上，在输入电压作用下，推动上述激光回馈外腔反射镜沿激光轴线方向左、右移动；

上述增益管、第一内腔反射镜和压电陶瓷各自经固定支架固定在装在罩子内的安装平台上；

b. 测量电路，包括：

分光镜，位于上述第一内腔反射镜的一侧，靠近上述第一内腔反射镜；

第一光电探测器，测量经上述分光镜反射后的激光输出的光强；

放大器和计数电路，对上述第一光电探测器的输出经放大后进行脉冲计数；

偏振片，对从上述分光镜透射过来的两正交偏振光进行分离；

第二光电探测器，探测通过偏振片后的激光光强；

电压比较器，所述的电压比较器的输入端与上述第二光电探测器的输出端相连，当上述激光回馈外腔反射镜朝远离上述激光器的方向移动时，电压比较器输出高电平进行控制上述的计数电路加计数，反之，作减计数，所述电压比较器和上述第二光电探测器构成上述计数电路和加减控制单元。

## 激光回馈纳米位移测量装置

### 技术领域

本发明属于激光测量技术领域。

### 背景技术

当前激光技术已成功地用于对许多物理量、几何量的高精度测量。一般常用的测量方法是利用激光的干涉现象，即激光干涉仪。其基本原理是将激光器输出的光束分为两束，一束是测量光束；另一束是参考光束，当被测物体发生位移时，这两束光的干涉条纹将发生移动，记录干涉条纹的移动数目即可转换成位移变化量。每移动一个干涉条纹对应于被测物体位移二分之一光波长，当使用 632.8nm 的 He-Ne 激光光源时，位移测量的分辨率为 316.8nm。为提高测量分辨率，目前广泛采用位相细分的技术，可以实现纳米级的位移测量。这类装置由激光器、分束器、干涉系统、稳频装置、位相细分装置和信号处理单元组成，其结构复杂，各组成部分精度要求高，整个装置价格昂贵。

由于激光回馈系统，也称自混合干涉系统，仅有一个光学通道，并且可以做到“绝对”的非接触测量，同时又具有结构简单、紧凑、易准直的优点，其成功后可解决传统激光干涉系统光路复杂、昂贵、准直不易等问题。回馈测量系统的这种潜在的优良性价比已成为巨大的推动力。它可用于位移、速度、Doppler 频移、绝对距离、精细加工零件表面的面形和形貌、置于激光束焦面上的细胞的三维形状等的测量，也可以用于三维图像数据重建、模具分析、探伤，等等。但是尽管世界各科技大国都进行了激光回馈效应及应用的研究，但是仍有两个十分重要问题没有解决。这是影响激光回馈系统实现高技术指标，进入实际应用的重要原因。第一，现有回馈干涉仪还没有办法对回馈反射镜的位移方向作出判断。自观察到回馈曲线的类锯齿现象（曲线上的锯齿倾斜方向和反射面移动方向有关）起，国内外的学者又力图使用类锯齿现象来解决激光回馈干涉仪测量位移方向的判断问题。但用这种方法判向将会使位移测量的分辨率受到限制，因为必须使用一个完整的周期才能判别出波形的倾斜方向，所以小于半波长的位移，对 632.8 纳米的 He-Ne 激光器半波长是 316 纳米，就难于测量了，纳米测量就不能实现。第二个重大的疑难问题是细分。细分问题就是解决如何实现比半波长更高分辨率的测量，或说把半波长以内的位移“切细”来进行测量。一些文献报道了在极弱回馈下，激光输出为准正弦波，想利用这种正弦性质，仿照普通激光干涉仪的位相测量技术实现细分。但由于这种“正弦波”不稳定，且回馈干涉只有一路信号，这使得电子细分难以实现。

## 发明内容

本发明提出了一种高分辨率、可以判别被测物移动方向的激光回馈位移测量装置，可以有效地解决上述两个问题。

本发明的特征在于，所述的激光回馈纳米位移测量装置含有非准直多重激光回馈系统和测量电路，其中：

a. 非准直多重激光回馈系统，包括 632.8nm 的 He-Ne 激光器、激光回馈外腔反射镜和压电陶瓷；

632.8nm 的 He-Ne 激光器，所述的激光器含有增益管、增透窗片和谐振腔；

增益管，内有 He、Ne 混合气体，He、Ne 混合气体的气压比为 7:1；

增透窗片，固定在上述增益管的一端；

谐振腔，包括第一内腔反射镜和第二内腔反射镜；

第一内腔反射镜，位于上述增透窗片的另一端；

第二内腔反射镜，固定在上述增益管的另一端；

激光回馈外腔反射镜，是一个高反射率的反射镜，其表面法线与激光束成一个夹角；

压电陶瓷，即 PZT，固定在上述激光回馈外腔反射镜上，在输入电压作用下，推动上述激光回馈外腔反射镜沿激光轴线方向左、右移动；

上述增益管、第一内腔反射镜和压电陶瓷各自经固定支架固定在装在罩子内的安装平台上；

b. 测量电路，包括：

分光镜，位于上述第一内腔反射镜的一侧，靠近上述第一内腔反射镜；

第一光电探测器，测量经上述分光镜反射后的激光输出的光强；

放大器和计数电路，对上述第一光电探测器的输出经放大后进行脉冲计数；

偏振片，对从上述分光镜透射过来的两正交偏振光进行分离；

第二光电探测器，探测通过偏振片后的激光光强；

电压比较器，所述的电压比较器的输入端分别与上述第二光电探测器、放大器的输出端相连，当上述激光回馈外腔反射镜朝远离上述激光器的方向移动时，所述的电压比较器输出高电平控制上述的计数电路进行加计数，反之，作减计数，所述电压比较器和上述第二光电探测器构成上述计数电路和加减控制单元。

本发明的特征，还在于，所述的激光回馈纳米位移测量装置含有非准直多重激光回馈系统和测量电路，其中：

a. 非准直多重激光回馈系统，包括 632.8nm 的 He-Ne 激光器、激光回馈外腔反射镜和压电陶瓷；

632.8nm 的 He-Ne 激光器，所述的激光器含有增益管和谐振腔；

增益管，内有 He、Ne 混合气体，He、Ne 混合气体的气压比为 7:1；

谐振腔，包括第一内腔反射镜和第二内腔反射镜；

第一内腔反射镜，固定在上述增益管的一端；

第二内腔反射镜，位于上述增益管的另一端；

激光回馈外腔反射镜，是一个高反射率的反射镜，其表面法线与激光束成一个夹角；

压电陶瓷，即 PZT，固定在上述激光回馈外腔反射镜上，在输入电压作用下，推动上述激光回馈外腔反射镜沿激光轴线方向左、右移动；

上述增益管、第一内腔反射镜和压电陶瓷各自经固定支架固定在装在罩子内的安装平台上；

b. 测量电路，包括：

分光镜，位于上述第一内腔反射镜的一侧，靠近上述第一内腔反射镜；

第一光电探测器，测量经上述分光镜反射后的激光输出的光强；

放大器和计数电路，对上述第一光电探测器的输出经放大后进行脉冲计数；

偏振片，对从上述分光镜透射过来的两正交偏振光进行分离；

第二光电探测器，探测通过偏振片后的激光光强；

电压比较器，所述的电压比较器的输入端与上述第二光电探测器的输出端相连，当上述激光回馈外腔反射镜朝远离上述激光器的方向移动时，电压比较器输出高电平进行控制上述的计数电路加计数，反之，作减计数，所述电压比较器和上述第二光电探测器构成上述计数电路和加减控制单元。

本发明可以实现能判向的纳米位移测量，并且装置简单，实施方便，价格也低廉。

## 附图说明

图 1：激光回馈系统示意图。

图 2：激光多重回馈光路示意图。

图 3：半外腔实验装置示意图。

图 4：全内腔实验装置示意图。

图 5：激光强度变化的高阶倍频曲线与激光偏振随外腔运动方向跳变的现象。

(a). 测量波形；(b). 时间轴展开波形。

图 6：激光强度变化的高阶倍频曲线。

(a). 测量波形；(b). 时间轴展开波形。

## 具体实施方式

本发明提出了一种纳米级分辨率的位移测量方法及其装置。其特征是利用半内腔或全内腔 632.8nm 的 He-Ne 激光器与高反射率的非准直的外部反射镜组成激光回馈系统。外部反射

镜与激光轴有一定的夹角，外部反射镜固定在被测物体上，若被测物体表面的反射率较高时，可以不加外部反射镜。外部反射镜将激光输出的光反射回激光器，在激光器的内部发生自混合干涉。当外部反射镜（或被测物体）沿激光轴线移动时，激光输出强度的变化频率是传统回馈干涉仪的高阶倍频，即激光输出强度每波动一个周期对应几十分之一光波长，直接对激光输出强度的波动周期计数即可以实现纳米级的位移测量。频率倍数与下列因素有关：1) 激光器与外部反射镜的初始距离；2) 激光器毛细管内径；3) 外部反射镜的表面法线与激光束的夹角；4) 外部反射镜或被测物体的反射率。

以上述的装置为基础，本发明还包括当被测物移动的方向发生变化时，激光的偏振态将发生跳变，即当外部反射镜靠近激光器时，激光是一种偏振态；当外部反射镜远离激光器时，激光是另一种与之正交的偏振态。在激光器与光电探测器之间插入分光镜，将激光输出分为两束光，一路光直接被探测器探测并对输出激光强度变化的周期数进行计数，另一路通过一个偏振片进行探测，其输出控制计数器的加减。当外部反射镜，即被测物体，朝靠近激光器的方向移动时，进行减计数；当外部反射镜朝远离激光器的方向移动时，进行加计数。可以实现对外部反射镜或被测物体位移的方向识别。

本发明进一步包括分别对两路光信号进行接收、放大、计数的光电探测器、放大电路、计数器，以及控制计数器加减的电压比较器。

本发明的原理如图1所示。图1为He-Ne激光器与高反射率的非准直的外部反射镜组成激光回馈系统示意图。图1中，半外腔激光器由增益管5、第一反射镜 $M_1$ 7和第二反射镜 $M_2$ 4组成，增益管5中充有He、Ne混合气体，其气压比7:1。增益管的一端固定增透窗片6。激光谐振腔由第一反射镜7和第二反射镜4组成，反射系数分别为 $r_1=0.999$ 和 $r_2=0.994$ ，它们构成了激光器的内腔；3是激光回馈外腔反射镜，反射系数为 $r_3$ ，它与第二反射镜4组成激光回馈的外腔，激光回馈外腔腔长为 $l$ ；2为压电陶瓷PZT或被测物体，用于推动回馈外腔反射镜 $M_3$ 3沿激光轴线运动。设回馈外腔反射镜3的表面法线与激光束的夹角为 $\theta$ ，则基本原理如下：

含回馈外腔的激光振荡条件由(1)式给出：

$$r_1 r_{eff} \exp[(g - \alpha)L] \exp(i\omega\tau) = 1 \quad (1)$$

式中： $r_{eff}$ 是外腔镜与激光耦合输出镜的等效反射率， $g$ 是激光的阈值增益， $\alpha$ 是激光内腔的损耗， $\omega$ 是光波的角频率， $\tau$ 是激光在内腔往返一周的时间。如果是准直外腔且 $r_3$ 很小时，多重回馈可以被忽略，则：

$$r_{eff} = r_2 [1 + \kappa \exp(i\omega\tau_1)] \quad (2)$$

式中： $\tau_1 = 2l/c$ 是激光在外腔往返一周的时间， $\kappa$ 代表回馈因子，由下式决定：

$$\kappa = (1 - r_2^2) \frac{r_3}{r_2} \quad (3)$$

由于 $r_3 \ll r_2$ ，所以 $\kappa \ll 1$ ，则：

$$|r_{eff}| \approx r_2 [1 + \kappa \cos(\omega\tau_1)] \quad (4)$$

我们定义归一化激光阈值增益的变化为  $\Delta G$ ，则：

$$\Delta G = (g - g_0)L = -\ln(|r_{eff}|/r_2) \approx \eta \cos(\omega\tau_1) \quad (5)$$

因为激光输出强度的变化正比于  $\Delta G$ ，所以激光强度随外腔长的变化呈正弦规律，且外腔长每变化  $\lambda/2$  激光强度波动一个周期，这与传统的自混合干涉相吻合，位移测量分辨率为  $\lambda/2$ 。

当回馈镜的反射系数很大，如的  $r_3 = 0.994$ ，则必须考虑多重回馈的影响，此时的等效反射系数为：

$$r_{eff} = r_2 - (1 - r_2^2)r_3 \sum_{m=1}^n (r_2 r_3)^{m-1} f_m \exp(im\omega\tau_1) \quad (6)$$

式中： $m$  代表光束在外腔的第  $m$  次往返， $n$  代表光束在外腔总的往返次数， $f_m$  代表第  $m$  次回馈光进入内腔的耦合效率。

当外腔倾斜时，将会影响各级回馈光进入内腔的耦合效率以及出射光束与返回光束相干的位相条件，并且，耦合进内腔的回馈光级数将受外腔镜倾斜角  $\theta$ 、外腔长  $l$  以及 He-Ne 激光器毛细管内径  $d$  的影响，如图 2 所示。

由于  $\theta$  很小，所以由外腔回馈镜  $M_e$  第  $m$  ( $m > 2$ ) 次反射的光能够与出射光形成干涉并耦合进内腔的条件可以近似表示为：

$$[2(tg2\theta + \dots + tg2(m-1)\theta) + tg2m\theta]l < d \quad (7)$$

由于回馈镜的倾斜且反射率很高，使谐振腔第二反射镜  $M_2$  与外腔回馈镜  $M_e$  构成了楔型干涉腔，出射光将与满足 (7) 式的各级回馈光在外腔干涉，形成等厚干涉条纹。由于各级回馈光的干涉因子与干涉条纹的间距不同，使各级回馈光耦合进内腔的效率产生差异。由于  $\theta$  很小，可以假设第  $m$  次回馈光的光程是单次往返光程的  $m$  倍，耦合效率  $f_m$  可以由下式近似表示：

$$f_m = \frac{2m\theta d}{\lambda} [d - 2(\dots + tg2(m-2)\theta) + tg(m-1)\theta] \quad (8)$$

当  $\theta = 40\mu rad$ ， $l = 190mm$  时，由 (7) 可以算出  $m=7$ ，即外腔位相每变化一个周期，光强共产生七个条纹，即七倍频，此时位移测量的分辨率为  $\lambda/14$ 。当  $\theta = 40\mu rad$ ， $l = 110mm$  时，由 (7) 可以算出  $m=10$ ，即外腔位相每变化一个周期，光强共产生十个条纹，即十倍频，此时位移测量的分辨率为  $\lambda/20$ 。当  $\theta = 10\mu rad$ ， $l = 30mm$  时，由 (7) 可以算出  $m=40$ ，即外腔位相每变化一个周期，光强共产生四十个条纹，即四十倍频，此时位移测量的分辨率为  $\lambda/80$ ，如果继续缩短外腔的初始长度，可以得到更高的位移测量分辨率。

在  $10 \sim 60\mu rad$  的角度范围内，当  $\theta$  增大时，等厚干涉条纹的间距减小，高次回馈光干涉条纹的耦合效率将大大增加，将会使输出光强的条纹强度更加接近。

激光输出光强高阶倍频的阶数与回馈光在外腔的往返次数是一致的，自混合干涉条纹的强度受外腔镜倾斜角与耦合效率的影响，在一定的倾斜范围，条纹强度趋于一致。

### 实例一

实验装置示意图如图 3 所示。图 3 中：半外腔激光器由增益管 5 和第二反射镜 4、第一



反射镜 7 组成，增益管 5 中充有 He、Ne 混合气体，其气压比为 7:1。增益管的一端固定增透窗片 6。谐振腔由第一反射镜 7 和第二反射镜 4 组成，反射系数分别为  $r_1=0.999$  和  $r_2=0.994$ ，它们构成了激光器的内腔；3 是激光回馈外腔反射镜，反射系数为  $r_3$ ，它与第二反射镜 4 组成激光回馈的外腔，激光回馈外腔腔长为  $l$ 。激光回馈外腔的初始腔长为  $l=190\text{mm}$ 。外腔回馈镜 3 的表面法线与激光束的夹角  $\theta=40\mu\text{rad}$ ；9 是分光镜 BS；10 是偏振片，用于将两正交偏振光分开；16 是第一光电探测器，11 是第二光电探测器，第一光电探测器 16 测量激光输出的光强，第二光电探测器 11 探测通过偏振片后的激光光强；17 是放大器和计数电路；12 是控制计数器加减的电压比较器，当外部反射镜（或被测物体）朝远离激光器的方向移动时，输出高电平进行加计数，反之减计数；第二光电探测器 11 与电压比较器 12 构成的计数器加减的控制单元；2 是压电陶瓷 PZT，推动外腔回馈镜 3 沿激光轴线方向运动。1 是 PZT 的固定支架；8 是激光腔镜 7 的固定支架；13 是安装平台；14、15 是激光增益管 5 的固定支架。激光谐振腔与外部反射镜可以放在罩子 18 内，以减少外部环境的扰动。

当在 PZT 上加三角波扫描电压后，测量的波形如图 5 所示，其中 (b) 是 (a) 的时间轴展开波形。图 5 中最下面的曲线是加在 PZT 上的电压。1# 曲线是由第一光电探测器 16 输出的激光强度，此时的激光强度的波动频率是传统自混合干涉的 7 倍，即激光强度波动一个周期对应于外腔长变化  $\lambda/14$ 。第二光电探测器 11 探测的是激光输出经过一个偏振片后的激光强度，对应图 5 中的 2# 曲线，3# 曲线是偏振片旋转 90 度后所得到的，2# 为垂直偏振光  $P_1$ ，3 为水平偏振光  $P_2$ 。由图 5 中的 2# 与 3# 曲线可以发现：当压电陶瓷的电压上升时，即回馈镜朝靠近激光器的方向移动时，激光的偏振态保持不变，仍然沿垂直方向振动，第二光电探测器 11 的输出控制计数器进行减计数；当压电陶瓷的电压下降时，即回馈镜朝远离激光器的方向移动时，激光的偏振态发生跳变，沿水平方向振动，电压比较器 12 的输出控制计数器进行加计数，可以识别被测目标的运动方向，同时位移的分辨率为  $\lambda/14$ 。

## 实例二

实验装置示意图仍然如图 3 所示。只是将回馈镜与激光器的初始距离缩短，使  $l=30\text{mm}$ 。此时的实验结果如图 6 所示，其中 (b) 是 (a) 的时间轴展开波形。图中的 1# 曲线是加在 PZT 上的电压，2# 曲线是由第一光电探测器 16 输出的激光强度。此时的激光强度的波动频率是传统自混合干涉的 40 倍，即激光强度波动一个周期对应于外腔长变化  $\lambda/80$ ，因为激光的波长为 632.8nm，所以位移测量的分辨率为 8nm。被测物体运动方向的识别同实例一。

使用全内腔激光器构成的测量系统，实验装置如图 4 所示，可以得到与上述相同的结果。因此本发明可以实现能判向的纳米位移测量，并且装置简单，实施方便，价格低廉。需

特别指出的是，当回馈镜与激光器的初始距离更近时，测量的分辨率可以更高。

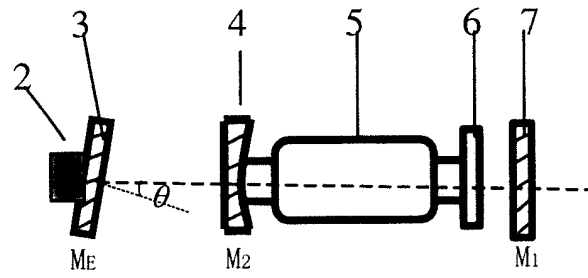


图 1

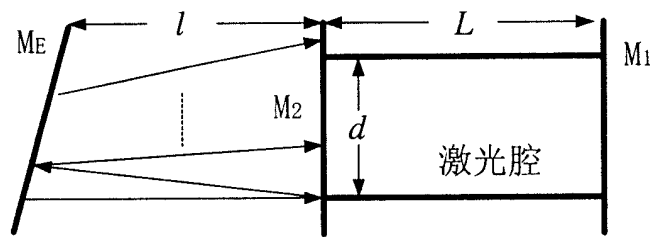


图 2

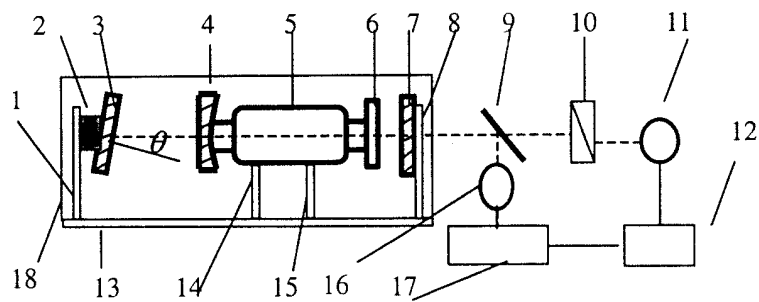


图 3

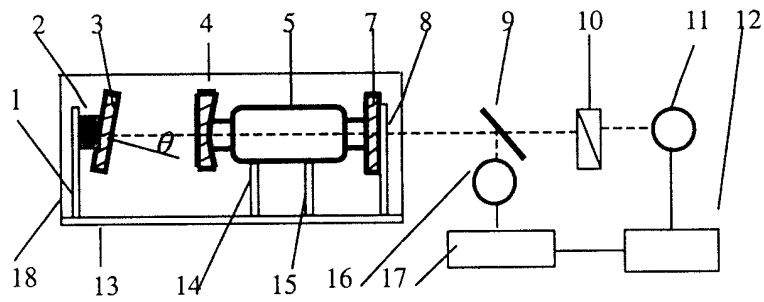


图 4

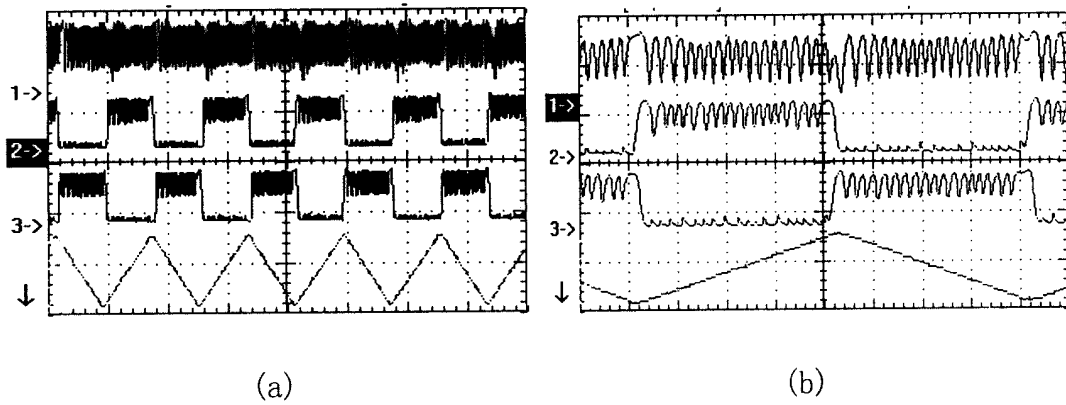


图 5

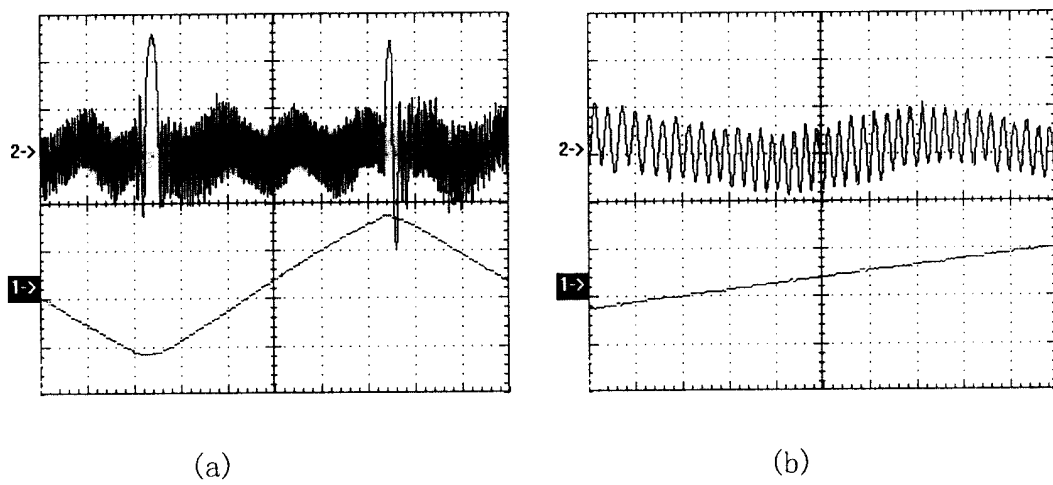


图 6