

光纤大气湍流折射率起伏测量仪

申请号: [200710022752.8](#)

申请日: 2007-05-29

申请(专利权)人 [中国科学院安徽光学精密机械研究所](#)
地址 [230031安徽省合肥市蜀山湖路350号](#)
发明(设计)人 [梅海平](#) [苑克娥](#) [饶瑞中](#)
主分类号 [G01N21/45 \(2006.01\) I](#)
分类号 [G01N21/45 \(2006.01\) I](#) [G01W1/00 \(2006.01\) I](#)
公开(公告)号 [101413887](#)
公开(公告)日 [2009-04-22](#)
专利代理机构 [安徽合肥华信知识产权代理有限公司](#)
代理人 [余成俊](#)

[19] 中华人民共和国国家知识产权局

[51] Int. Cl.
G01N 21/45 (2006.01)
G01W 1/00 (2006.01)



[12] 发明专利申请公布说明书

[21] 申请号 200710022752.8

[43] 公开日 2009年4月22日

[11] 公开号 CN 101413887A

[22] 申请日 2007.5.29
[21] 申请号 200710022752.8
[71] 申请人 中国科学院安徽光学精密机械研究所
地址 230031 安徽省合肥市蜀山湖路350号
[72] 发明人 梅海平 苑克娥 饶瑞中

[74] 专利代理机构 安徽合肥华信知识产权代理有限公司
代理人 余成俊

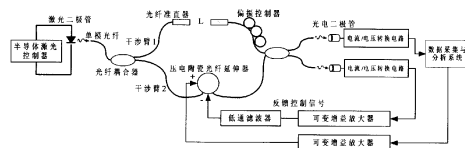
权利要求书 1 页 说明书 9 页 附图 2 页

[54] 发明名称

光纤大气湍流折射率起伏测量仪

[57] 摘要

本发明公开了一种光纤大气湍流折射率起伏测量仪，从激光光源发出的激光分成信号光与参考光由光纤分别导入测量臂和参考臂；测量臂上安装准直耦合光路和偏振控制器，参考臂中安装有压电陶瓷光纤延伸器；测量臂中出射的信号光与参考臂中出射的参考光接入 2×2 光纤耦合器合束，产生相干叠加，干涉信号分成二路分别通过尾纤输出到二个光电二极管产生的电流信号，经过电流/电压转换电路和放大电路转化成易于检测的电压信号，一路作为反馈控制信号输出到压电陶瓷光纤延伸器，一路送入计算机进行数据采集与处理，由计算机输出控制信号接入到压电陶瓷光纤延伸器。系统的工作波长为 $1.31 \mu\text{m}$ ，该仪器具有测量灵敏度高、隔温隔振性能好、系统集成度高、操作方便等特点，可用作大气湍流折射率测量的定标标准。



- 1、光纤大气湍流折射率起伏测量仪，其特征在于从激光光源发出的激光输出经过光纤接入1×2光纤耦合器，分成信号光与参考光由光纤分别导入测量臂和参考臂；测量臂上安装一对间隔但相互对准的光纤准直器构成准直耦合光路，信号光从前面的光纤准直器出射到空气中，再由后面的光纤准直器接收后经过偏振控制器输出；参考臂中安装有压电陶瓷光纤延伸器；测量臂中出射的信号光与参考臂中出射的参考光接入2×2光纤耦合器合束，产生相干叠加，干涉信号分成二路分别通过尾纤输出到二个光电二极管，光电二极管产生的电流信号，经过电流/电压转换电路和放大电路转化成易于检测的电压信号，一路作为反馈控制信号输出到压电陶瓷光纤延伸器，一路送入计算机进行数据采集与处理，由计算机输出控制信号接入到压电陶瓷光纤延伸器。
- 2、根据权利要求1所述的光纤大气湍流折射率起伏测量仪，其特征在于所述的激光光源选用Ortel公司的1612型分布反馈式二极管激光器，尾纤输出，带有光隔离器。
- 3、根据权利要求1所述的光纤大气湍流折射率起伏测量仪，其特征在于所述的光纤为单模光纤。
- 4、根据权利要求1所述的光纤大气湍流折射率起伏测量仪，其特征在于所述的光电二极管为PIN光电二极管。

光纤大气湍流折射率起伏测量仪

技术领域

本发明属于一种光学测量仪器，具体是一种测量光学湍流参数的标准仪器。

背景技术

在湍流大气光学研究中，需要关心的主要是湍流折射率起伏特性，包括折射率结构常数、特征尺度和湍流折射率谱等。现有的测量这些参数的方法主要有两种，即温度脉动法和光学方法。

温度脉动法是一种通过测量大气温度的起伏来获得大气湍流折射率起伏特性的间接测量法，其前提是假定空气折射率的起伏特性完全取决于温度的起伏特性。常用的温度脉动仪就是根据该原理发展起来的，该仪器使用直径只有几微米的铂丝作为传感探头，当湍流大气经过铂丝时引起铂丝电阻的变化，经放大电路将电阻的变化转化成可采集到的电压变化信号，便可获得大气温度的起伏特性，从而获得大气折射率起伏特性。

温度脉动法是人们无法直接用光学手段在近距离获得湍流信息时所采取的替代方法，尽管它是目前最常用的湍流光学参数测量方法，但是其本身存在一些固有的缺陷。首先温度脉动法使用的金属铂丝只有几微米的直径，特别容易被折断或被环境污染，若进行长时间的观测需要不断地检查仪器和经常性地更换铂丝，所以难以达到测量的实时性；其次它的空间分辨率和时间分辨率有限，因为铂丝长度方向的可分辨湍流尺度大于湍流内尺度，这给测量小尺度湍流脉动带来困难；此外，它是一种接触式测量手段，其响应速率直接决定于空气与金属丝的热交换速率（通常在几十 Hz 之内），它也不可避免地对会空气造成一定的扰动。

目前的光学方法基本上都是利用湍流大气中光的传播效应来测量湍流光学参数的。如今已经出现了多种不同的光学测量法，以激光闪烁法和到达角起伏法最为常见。激光闪烁法测量湍流强度的理论基础是弱起伏条件下的 Rytov 近似，当湍流足够强时，对数光强起伏不但不随湍流的增强而增强，而且有时还有所减小，这就是所谓的“闪烁饱和

效应”。受“闪烁饱和效应”的影响，在强起伏条件下，该方法即失效。此外，还有人利用激光雷达测量大气湍流，可是在实际大气中，用于推导雷达方程的湍流各向同性和平稳性假设条件很难得以满足，雷达方程本身的形式尚待进一步完善，因此该方法还处于初步的探索阶段。

通常大气折射率的起伏非常微小，只有当光波传播较长的路径后(通常为几百米以上)，湍流大气引起的光波相位和光强起伏方可便于检测。因此，目前根据湍流效应原理的光学方法测得的湍流光学参数都是进行路径平均的结果，该方法难以获得局部的折射率起伏特性。实际上，至今仍然没有一种光学手段能在短距离内，对湍流无扰动的前提下直接测量大气湍流折射率起伏。

此外有报道称，分别用温度脉动法和光学方法测得的湍流参数在数值上可相差四倍以上。所以若以其中任意一种测量方法为标准，则另一种方法的可靠性就值得怀疑。可见，目前还缺少一种在没有任何假设的前提下，通过直接的光学手段在短距离内获得光学湍流参数的标准仪器。

发明内容

本发明根据光纤传感技术的独特优点，设计了基于激光干涉原理的光纤大气湍流折射率起伏测量仪。系统的工作波长为 $1.31\mu\text{m}$ ，该仪器具有测量灵敏度高、隔温隔振性能好、系统集成度高、操作方便等特点，可用作大气湍流折射率测量的定标标准。

本发明的技术方案如下：

光纤大气湍流折射率起伏测量仪，其特征在于从激光光源发出的激光输出经过光纤接入 1×2 光纤耦合器，分成信号光与参考光由光纤分别导入测量臂和参考臂；测量臂上安装一对间隔但相互对准的光纤准直器构成准直耦合光路，信号光从前面的光纤准直器出射到空气中，再由后面的光纤准直器接收后经过偏振控制器输出；参考臂中安装有压电陶瓷光纤延伸器；测量臂中出射的信号光与参考臂中出射的参考光接入 2×2 光纤耦合器合束，产生相干叠加，干涉信号分成二路分别通过尾纤输出到二个光电二极管，光电二极管产生的电流信号，经过电流/电压转换电路和放大电路转化成易于检测的电压信号，一路作为反馈控制信号输出到压电陶瓷光纤延伸器，一路送入计算机进行数据采集与处理，由计算机输出控制信号接入到压电陶瓷光纤延伸器。

所述的激光光源选用 Ortel 公司的 1612 型分布反馈式二极管激光器，尾纤输出，带

有光隔离器。

所述的光纤为单模光纤。

所述的光电二极管为 PIN 光电二极管。

本发明其硬件配置主要有激光光源、单模光纤、光纤准直器及其调节装置、偏振控制器、压电陶瓷光纤延伸器及其反馈控制电路、密封箱、光探测器、数据采集器、电子计算机和相应的安装调节装置。各光纤元器件之间采用法兰盘连接，方便升级系统配置。独特的优化设计、全自动的软件定标、简单清晰的操作界面，增强了仪器的可靠性和实用性。

光纤大气湍流折射率起伏测量仪是一种基于激光干涉原理的湍流折射率起伏强度测量装置，其主体是一个光纤马赫-泽德干涉仪，该干涉仪通过分振幅干涉法将两个光路上的相位差 Δj 转化成输出光强。通常称通往待测环境下的光路为测量臂，用于工作点控制的光路为参考臂。如果测量臂未受扰动，则测量臂与参考臂之间的光程差稳定不变，因此光波在第二个光纤耦合器上相干叠加后，其输出光强也保持稳定。如果测量臂上的相位受环境的扰动发生变化，则测量臂与参考臂之间的光程差也发生相应的改变，最终导致干涉仪的输出光强也发生变化。该干涉仪的输出光强是相位差的函数，即

$$I_o = I_1 + I_2 \pm 2\sqrt{I_1 I_2} \cos(\Delta\varphi) \quad (1)$$

(1)式所表达的输出光强与相位的关系如图 2 所示，该图表明当 Δj 从 0 变化到 p 时，其

输出光强从最大值变化到最小值(或者相反)；当 $\Delta j = (m + 1/2)p$ (m 为整数)时，称干涉仪处于 Q 点，此时输出光强的变化量与相位差的变化量几乎呈线性关系，且光强变化对相位变化最为敏感。光纤大气湍流测量系统正是通过上述关系来检测微小相位起伏乃至微小折射率起伏的。设光探测器的电压光功率转换系数为 β ，则光纤干涉仪的两路输出电压 V_1 和 V_2 分别为

$$V_1 = a - b \cos(\Delta j) \quad (2)$$

和

$$V_2 = a + b \cos(\Delta j) \quad (3)$$

式中 $a = \beta(I_1 + I_2)$ ， $b = 2\beta\sqrt{I_1 I_2}$ ，所以软件中可采用如下算法进行定标和相位的获取：

首先根据光纤干涉仪输出电压与相位差之间的关系，通过输出一个周期性电压信号到相位调制器对相位进行扫描，然后采集得到输出电压时间序列，再搜索得到 $V_{\max} = a + b$ 和 $V_{\min} = a - b$ ，即可算出 $a = (V_{\max} + V_{\min})/2$ 和 $b = |V_{\max} - V_{\min}|/2$ 。将标定好的 a 和 b 带入公式 $Dj = \arccos[(a - V_1)/b]$ 即可获取瞬时相位差 Dj 及其在 Q 点附近的起伏量 $\Delta\phi'$ 。令光纤准直器间的空气间距为 L ，则可得到空间距离 L 上的平均折射率起伏量 Δn ：

$$\Delta n = \frac{\lambda}{2\pi L} \Delta\phi' \quad (4)$$

及其起伏方差：

$$\sigma_n^2 = \sum_{i=1}^N \left(\Delta n - \frac{\sum_{i=1}^N \Delta n}{N} \right)^2, \quad \text{其中 } \frac{\sum_{i=1}^N \Delta n}{N} \approx 0 \quad (5)$$

在光纤干涉仪中，当 Dj 偏离 Q 点 $\pi/2$ 时，便难以检测到相位的变化，称此现象为信号衰退。由于光纤对环境温度和压力的变化都较为敏感，因此若将光纤暴露于空气中，干涉仪将无法处于稳定的工作状态。将光纤及光纤元件密封于隔热隔震的箱体中，可大大减小工作点的漂移，但是该方法无法隔离缓变的低频相位漂移。于工作点漂移的不确定性，要达到理想的稳定效果，就必须采取主动相位反馈的方法。其工作原理如下：首先通过计算机D/A输出一个基准电压 V_{ref} ，将干涉仪调节到工作相位点；其次从光探测器上直接截取平均电压 V_{dc} ，再将 $\Delta V = V_{dc} - V_{ref}$ 按一定的比例放大后加到压电陶瓷控制端，调节放大倍数使得 ΔV 在压电陶瓷光纤延伸器上产生的相位差正好与相位偏移量相抵消。另外，在光纤干涉仪中，产生干涉的必要条件之一是参与干涉的光的振动方向必须一致。由于Mach-Zehnder干涉仪中的导光光纤一般采用普通低双折射单模光纤，其传输特性易受环境温度、光纤弯折等因素的影响，所以当偏振光在干涉仪中传播时，两束光的偏振态会因光纤传输特性的变化而发生随机改变，使干涉仪输出信号的可见度发生变化，从而引入偏振相位噪声，所以必须使用偏振控制器来提高干涉条纹对比度和抑制偏振噪声。

本发明具有以下特点：

- 1) 采用激光干涉测量原理，直接从激光相位的变化中提取大气中微小的折射率起伏信息，真正实现用光学手段在近距离内测量湍流光学参数的目标，其理论测量灵敏度可达 10^{-10} 量级。
- 2) 利用计算机进行数据采集和处理，高速数据采集器可保证有效获取任意频率的湍流信号，有效提高了湍流测量的时间分辨率。主体采用光纤马赫-泽德干涉仪结构，全光纤光学器件和半导体发光与接收器件，整机性能稳定可保证24小时连续运行。
- 3) 独特的探头设计，实现了大气湍流参数的非接触测量。探头采用光纤准直器件，具有结构稳固耐腐蚀性好等优点，可用于沿海地区或高腐蚀性环境下的湍流参数测量。
- 4) 模块化设计方案，方便调节，易于升级或拆卸。传感探头可与主体分离，并可独立安装于如风洞或湍流模拟池中，仅需用光纤与仪器主体连接，从而满足不同环境下的湍流测量需要。
- 5) 专门设计的密封箱具有很好的隔热隔振性，有效隔离了环境噪声。独特设计的光纤相位调节器连同反馈控制电路一起保证了仪器工作的稳定性。
- 6) 全自动软件定标，全自动的数据分析了处理，操作简单，使用方便。

附图说明

图1 光纤大气湍流折射率起伏测量仪的结构原理图。

图2 Mach-Zehnder干涉仪的输出光强与相位差的关系。

图3 光电探测器的线性响应曲线。

图4 扫描干涉条纹。

图5 (a) f_p 随 V_m 的变化曲线， (b) f_p 随 f_s 的变化曲线。

图6 光纤大气湍流折射率起伏测量仪检测到的相位变化，采样频率 16 Hz ，(a) 开环；(b) 闭环。

图7 温度脉动仪测得的 C_n^2 与大气湍流测量仪测得的 σ_n^2 时间序列的比较。

具体实施方式

参见附图。

光纤大气湍流折射率起伏测量仪的各部分设计如下：

光路设计

光路采取全光纤结构，FC/PC型法兰盘连接。各光学部件的具体参数如表1所示，详细描述如下：

- 1) 激光光源选用 Ortel 公司的 1612 型分布反馈式(DFB)二极管激光器, 尾纤输出, 带有光隔离器。激光器内嵌光电二极管可实时进行光功率的监控, 内嵌的热敏感电阻和制冷丝温度构成自动温控环路。使用 ILXLightwave 公司的 LDC-3700B 系列二极管激光控制器和 LDM-4980 系列二极管激光器底座, 即保证了稳定的激光输出, 又可根据测量环境的需要实时调节。

表 1 光纤大气湍流折射率起伏测量仪的系统参数

部件名称	技术参数	
光源 (DFB 激光二极管) (光隔离, 尾纤输出)	中心波长 λ_c	1310nm
	谱线宽 $\Delta\nu$	2MHz
	最大功率 P_{max}	8.4mW
光探测器 (PIN 光电二极管) (尾纤型)	响应度@1310nm	0.85A/W
	最大暗电流	1nA
	线性范围	-70dBm~10dBm
光纤准直器 (尾纤型)	封装尺寸	3.2mm×10mm
	光束直径	0.2mm
	插入损耗	<0.3dB(30mm 距离)
单模光纤	直径	125um

- 2) 激光通过光纤导入1×2 光纤耦合器(分光比 50/50), 分成两路分别导入测量臂和参考臂。测量臂上安装一对光纤准直器, 其作用是将激光发射到空气中, 再接收回光纤。该准直耦合光路相当于光纤探头, 待测的大气湍流信号就是从该处进入光纤干涉系统中的。偏振控制器和压电陶瓷光纤延伸器分别安装在测量臂和参考臂上, 是为了平衡干涉臂的长度。
- 3) 通过调节偏振控制器, 可以获得不同的干涉条纹对比度。测量前一般先将干涉条纹对比度调节到最大, 再进行定标计算。
- 4) 压电陶瓷光纤延伸器有两个作用, 一是产生仪器定标时所需要的周期性相位变化型号, 二是在仪器工作时通过反馈电路稳定工作点和抑止低频噪声。
- 5) 参考光和信号光在第二个光纤耦合器合束, 产生相干叠加。干涉信号通过尾纤输出到光电二极管中转化成电流信号, 再电流/电压转换和放大电路转化成易于检测的电

压信号。一路作为反馈控制信号，一路送入插接在计算机上的数据采集器中进行信号的采集和处理。

机械设计

- 1) 光纤准直耦合装置设计：光纤准直耦合装置由安装于一维精密平移台上的一对超精密光纤耦合器共同组成。其中一维平移台的调节分辨率为 $2.5\mu\text{m}$ ，重复定位精度 $<5\mu\text{m}$ ，行程 200mm ，因此可根据需要将空气间距在 $0\sim 200\text{mm}$ 之间任意调节。若以光纤轴向为 X 轴，则此光纤耦合器可沿 X、Y、Z 方向直线调整，绕 Y、Z 轴倾斜调整，粗调线性调节最小分辨率为 $1\mu\text{m}$ 角度调节的最小分辨率为 0.002° 。细调时使用超精细微调结构，它可在 Y、Z 方向调节，其线性调节分辨率为 $0.01\mu\text{m}$ ，角度调节分辨率 0.00001° 。精确调节后可达到很高的耦合效率，初步实验表明，当空气间隙为 20mm 时，其耦合损耗小于 0.2dB 。
- 2) 压电陶瓷光纤延伸器的设计：其机械构架主要包括盖板、压电陶瓷棒、两个半圆柱帽、底盘、支撑架和两个螺钉。将裸光纤缠绕在半圆柱帽上，即可形成完整的光纤相位调制器。在压电陶瓷棒上加控制电压即可改变其长度，从而改变两个半圆柱帽的间距，最终可改变缠绕在半圆柱帽上的光纤的长度。因此，当激光通过光纤时，其光程或相位都会得到控制。该相位调制器中除了压电陶瓷棒和螺钉外，其它部件全部使用有机玻璃材料，有重量轻、结构牢固、构形美观等优点。其中压电陶瓷棒的外观尺寸为 $\phi 14.5\text{mm}\times 57\text{mm}$ 。设计中还充分考虑了若干方面的问题，它们包括：
 - (1) 将圆柱帽的直径设计为 60mm 以减小光纤的微弯损耗，将其高度设计为稍小于支撑架的高度以防止它们与上下地板间发生机械摩擦，将其横截面设计为优弧的形状以防止圆柱帽的边缘与压迫光纤；
 - (2) 半圆柱帽的高度足以缠绕足够圈数的光纤，以便在特定的电压变化范围内可产生足够仪器使用的相移；
 - (3) 地板和盖板的尺寸要大于内部元件的尺寸，从而起到保护的作用，且地板上设有固定孔，方便与仪器整体连接。
- 3) 密封箱的设计：密封箱采用全有机玻璃结构，有机玻璃厚度 20mm 。整体结构坚固，抗震隔热性能好。独特的箱体底板设计可方便各种光纤元器件的固定。

电路设计

- 1) 光探测电路设计：利用 PIN 光电二极管暗噪声小、线性好、线性范围宽和易于集成等优点，独立设计了大气湍流测量仪的光探测电路。配置三端稳压器，可使用 $\pm 15V$ 或 $\pm 18V \sim \pm 36V$ 之间的任意直流电压供电。光电二极管采用光电流模式，有效地降低了电流噪声，使用 OPA128LM 低噪声运算放大器，仅需一级放大。整列式光电探测电路，可同时实现多路转化。对比实验表明，其噪声水平低于美国 Newport 公司的 Model1813C 型台式光功率计。
- 2) 相位控制电路设计：相位控制电路采取硬件反馈和软件控制相结合的方式。硬件反馈是从光电探测器上取电压信号，经过可变电阻分压，输入到压电陶瓷的正极。一般情况下，硬件反馈即可有效地稳定干涉仪的工作相位点。软件控制即用计算机通过 D/A 转换器发出电压信号，加载到压电陶瓷的负极，一方面可实现相位扫描，另一方面也可主动设置干涉仪的工作相位点，配合硬件反馈电路，实现湍流参数的准确测量。

软件设计

光纤大气湍流折射率起伏测量仪的数据采集和控制软件所依赖的硬件基础是台湾凌华公司的 PCI9118HG 型高速数据采集卡，软件设计中兼顾了设备调试、系统定标、实时数据显示、控制电压输出等功能，还预留了软件功能扩展的空间。

典型的实验结果

本发明进行了一些测试实验，其结果如下所列：

- 1) 光电二极管的线性响应测试：其结果见图 3，电压光功率转换系数 $\beta = 6.05mV/uW$ ，表现出很好的线性响应特征。
- 2) 相位扫描与系统参数定标实验：扫描干涉条纹如图 4 所示，系统在 2cm 的空气路径上的相位测量灵敏度为 $Dj' / D V = 0.8rad/V$ ，定义大气折射率检测灵敏度为单位电压变化对应的折射率变化，则有 $\Delta n / \Delta V = 2.1 \times 10^{-7} V^{-1}$ 。
- 3) 压电陶瓷光纤延伸器参数标定实验：将压电陶瓷光纤相位调制器连接到马赫-泽德干涉仪的一条干涉臂上，并在压电陶瓷上施加电压范围为 $0 \sim V_m$ ，频率为 f_s 的锯齿波信号，则光纤干涉仪也会输出频率为 f_p 的周期性干涉条纹。则相位调制器的相位

调制系数可表示为 $\eta = \frac{\pi f_p}{V_m f_s}$ 。通过频谱分析仪或用高速数据采集器获得的电压时间序列，进行快速傅立叶变换，即可测得 f_p 和 f_s 。通过调节 V_m 或 f_s 可得到多组数据，然后求平均值即可算出准确的 η 。根据图 5(a)和(b)所示的结果，分别为调节扫描电压和调节扫描频率时，获得的两组曲线，从中可计算出 $\bar{\eta} = 82.94 \text{rad/V}$ 。

- 4) 湍流测量仪工作点控制和相位反馈实验：当断开相位调制器的反馈控制电路时(开环)，可监测到环境引起的低频随机相位起伏，仪器的工作点也不能稳定，其结果如图 6(a)所示。当将反馈电路连接好时(闭环)，系统基本上被稳定在 $\Delta\varphi = \pi/2$ 的工作相位点，湍流大气折射率起伏引起的较高频率的相位变化在图 6(b)中有所体现。
- 5) 与温度脉动仪的对比实验：温度脉动仪测得的是湍流折射率结构常数 C_n^2 ，而大气湍流测量仪测得的是大气折射率起伏方差 σ_n^2 ，尽管它们不是同一物理量，但若能获得同样的变化趋势，则可验证仪器的可靠性。图 7 即是两者的对比结果，两者在变化趋势上表现出相当好的一致性。

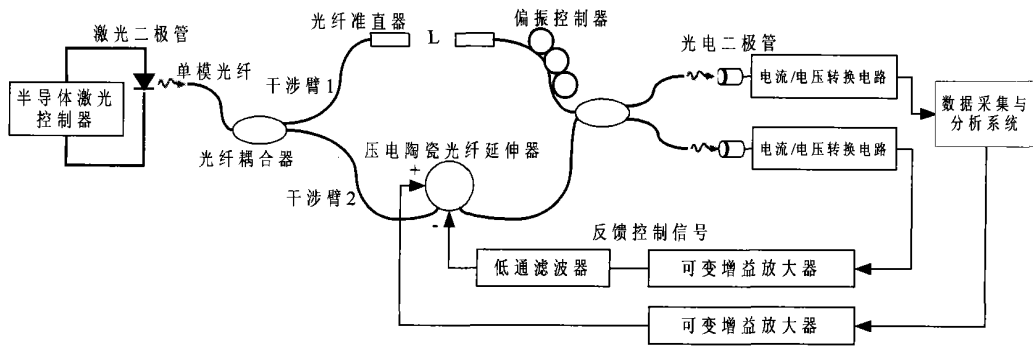


图 1

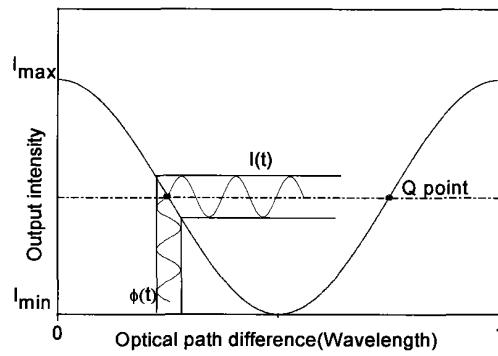


图 2

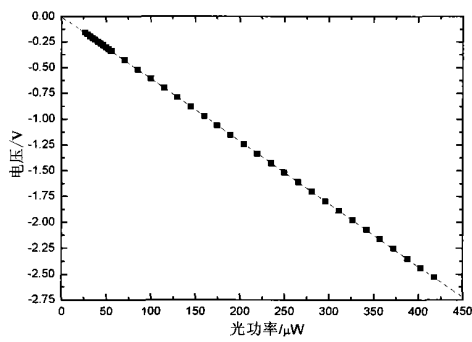


图 3

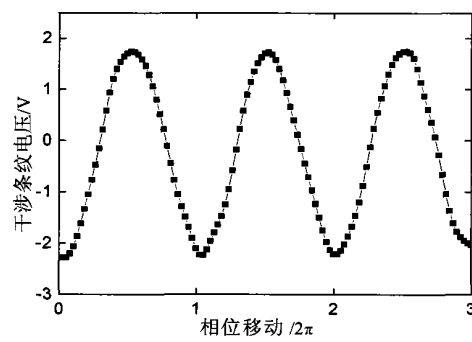


图 4

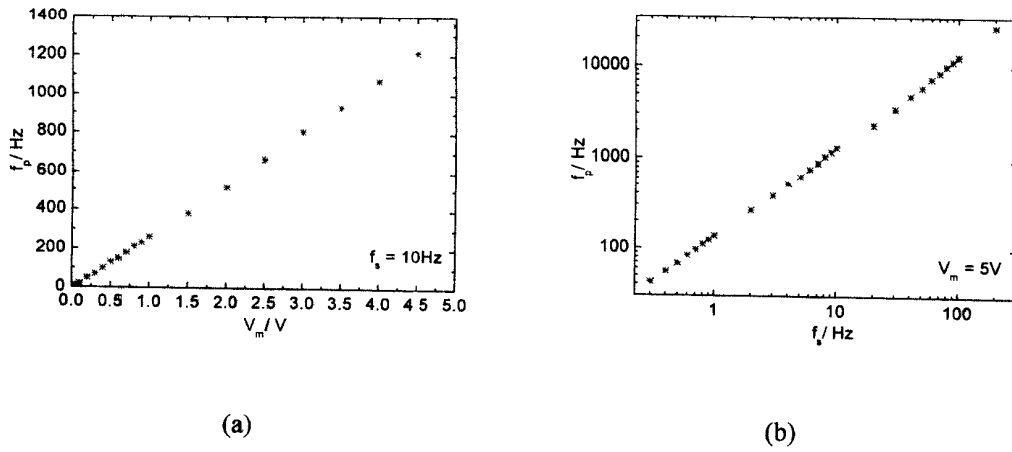


图 5

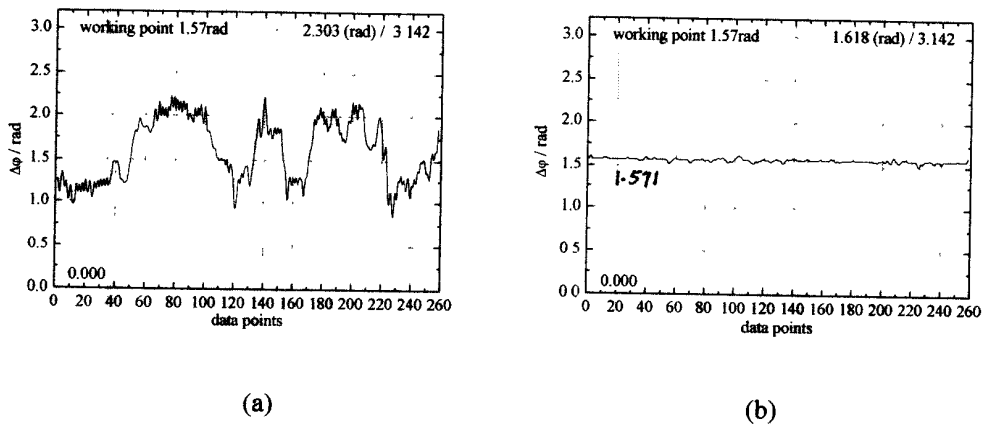


图 6

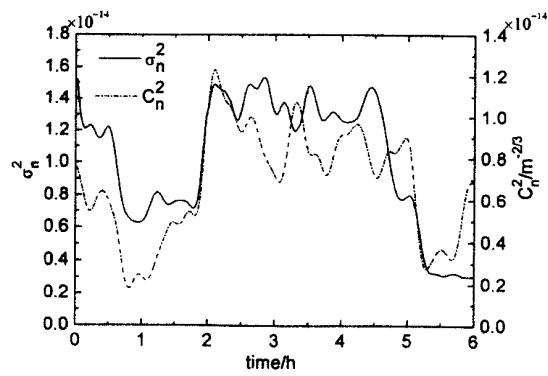


图 7