

doi:10.3788/gzxb20184712.1212003

基于法布里-珀罗干涉的微悬臂偏移检测系统

黄剑, 詹维纳, 陈杨黎, 卢景琦

(武汉理工大学 理学院 物理系, 武汉 430070)

摘要:提出了一种基于法布里-珀罗干涉的方法用于原子力显微镜微悬臂偏移量的检测.设计了一个球面反射镜与微悬臂组成的半球面布里-珀罗腔,并利用高单色性的激光器作为光源,激光光束在半球面布里-珀罗腔中多次反射并原路返回形成干涉.根据多光束干涉原理确定干涉光强与腔长之间的关系,利用强度解调的方法计算微悬臂的偏移量并反馈给原子力显微镜系统.最后根据该方案搭建一套微悬臂偏移检测系统,实验获得 30 nm 的工作范围内 99.9% 的线性拟合度,微悬臂最小位移分辨力为 0.26 nm,实验结果和理论分析一致,证明了该系统的实用性.

关键词:位移测量;法布里-珀罗干涉仪;原子力显微镜;微悬臂;强度解调

中图分类号:O436.1

文献标识码:A

文章编号:1004-4213(2018)12-1212003-7

Micro-cantilever Displacement Detection System Based on Fabry-Perot Interference

HUANG Jian, ZHAN Wei-na, CHEN Yang-li, LU Jing-qi

(Department of Physics, School of Science, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China)

Abstract: A method based on Fabry-Perot (F-P) interferometer is proposed to detect the displacement of the micro-cantilever of atomic force microscopy. A hemispherical F-P cavity composed of a spherical mirror and a micro-cantilever is designed. A single frequency laser is used as the light source. The laser beam is reflected multiple times in the hemispherical F-P cavity and returned to the original path to form an interference. According to the principle of multi-beam interference, the relationship between the interference intensity and the cavity length has been determined and the deflection of the micro-cantilever has been calculated by using the intensity demodulation method. Finally, a micro-cantilever displacement detection system has been built. The experiment obtained a linear fit of 99.9% in the working range of 30 nm, and the minimum displacement resolution of the micro-cantilever was 0.26 nm. The experimental results are consistent with the theoretical analysis, which proves the practicability of the system.

Key words: Displacement measurement; Fabry-Perot interferometer; Atomic force microscope; Micro-cantilever; Intensity demodulation

OCIS Codes: 120.3180; 180.5810; 230.004

0 引言

原子力显微镜(Atomic Force Microscope, AFM)是一种高准确度计量型仪器,可用来研究包括绝缘体在内的固体材料表面结构,凭借其超高的计量准确度、实时成像且对样品几乎无损伤的优势在表面探测以及纳米材料加工等领域广泛应用^[1-3].它通过检测待测样品表面和一个微型力敏感元件之间的极微弱的原子间相互作用力来研究物质的表面结构及性质.将一对微弱力极端敏感的微悬臂一端固定,另一端的微小针尖接近样品,这时它将与样品相互作用,作用力将使微悬臂发生形变或运动状态发生变化,因而能否精确探测微悬

基金项目:国家重大科学仪器设备开发项目(No.2013YQ160551)资助

第一作者:黄剑(1992-),男,硕士研究生,主要研究方向为激光原理与应用等. Email:709008668@qq.com

导师(通讯作者):卢景琦(1972-),男,教授,博士,主要研究方向为激光原理与应用等. Email: lujingqi@whut.edu.cn

收稿日期:2018-08-11;录用日期:2018-10-12

<http://www.photon.ac.cn>

臂的偏移量是原子力显微镜对待测样品准确成像的关键。目前,国内外研究人员已提出并发展了多种检测微悬臂形变的方法^[4],如隧道电流法^[5]、电容检测法^[6]、光束偏转法^[7-8]、光干涉法^[9]。隧道电流法根据电极间距离的微小变化会引起隧道电流的显著变化的原理,通过检测弹性微悬臂与隧道电极间的电流变化来获得其偏移量,具有较高的检测准确度,分辨力可以达到原子级水平,但是检测过程较复杂,而且信噪比通常较低,微悬臂上的微小污染物会降低隧道电流的测量准确度,环境中的震动和热漂移也会造成隧道电流较大变化,进而影响 AFM 的性能;电容检测法有较高的分辨力,但是两个极板间的距离较小,电容的大小在皮法量级,精确检测的难度较大。微悬臂表面的粗糙度会影响检测的灵敏度,同时极板移动产生的温度也会限制对距离检测的灵敏度,导致检测的准确度较差。李晓辉等设计了一种球型羁绊结构型式的电容式位移传感器在 10 μm 的测量范围内,分辨力达到 20 nm^[10]。光学干涉检测法是目前分辨力最高的一种方法^[11],研究较多的为光纤法布里珀罗干涉的方法,该方法利用光纤端面和微悬臂构成平面 F-P 腔,但由于微悬臂发生位移时会产生一定偏转角,进而导致误差的产生。而光束偏转法则是目前最常见的一种方法^[12-14],但是传统的光束偏转法为了能够在位置灵敏探测器上灵敏的探测到光斑位置的变化,要求微悬臂具有较高的反射率以及激光器的光斑尺寸较小^[15],并且要求杠杆具有足够的长度,因而会不可避免地引入大气漂移,限制了其应用范围。本课题采用基于法布里-珀罗干涉(Fabry-Perot, F-P)原理的光学检测器系统来检测微悬臂的偏移,以弥补光束偏转法在某些情况下不能应用的不足,且具有更高的分辨力,扩大了 AFM 的应用领域。

基于多光束干涉原理的 F-P 干涉仪作为一种高准确度的传感装置,已被广泛应用于位移、应变、密度和折射等物理量的微小变化的测量^[16-18]。法布里-珀罗干涉仪主要有两种:一种是基于两平行平板构成的平面 F-P 干涉,另一种是基于两个共焦球面镜构成的共焦球面 F-P 干涉。二者本质都是波动光学中谐振腔多光束干涉。平面 F-P 干涉结构较为简单,通常采用光纤传输光束并以光纤的端面作为反射镜,而本文的微悬臂检测系统基于共焦球面 F-P 干涉仪进行了一定的改进,将原子力显微镜的微悬臂置于球面反射镜的圆心处组成半球面共焦 F-P 腔。球面反射镜的圆心在光轴上,具有高单色性的激光光束进入 F-P 腔中被多次反射发生干涉。最后根据干涉光强和腔长在一定区间内存在接近线性的关系,由探测到的光强的变化量转化为微悬臂的偏移量,并反馈给原子力显微镜系统,该方法具有纳米级的分辨力,且能克服微悬臂有偏转角时带来的影响。

1 基本原理

常用的共焦球面 F-P 干涉仪由两个具有相同曲率和焦距的球面反射镜共同组成,其中以球面镜的曲率半径中心位于另一球面镜的中心处,焦点重合,两镜心的连线与几何轴共轴,属无源共焦球面腔,其内表面都镀有反射膜。如图 1,不计系统像差,光束由近轴由点 A 入射到球面 F-P 干涉仪谐振腔中,入射光将会两个球面反射镜之间依次经过点 B、C 和 D 多次反射,形成一个“8”字型回路^[19]。在其基础上,将共焦球面中的一个球面反射镜用装有探针的微悬臂代替,微悬臂位于球面镜的圆心位置,两者构成一个半球面谐振腔。入射光束由近轴透过球面镜打到微悬臂上,微悬臂表面镀有反射膜,其反射率由镀膜决定,因而入射光束打到微悬臂上时,能够反射回部分光束,其效果类似于平面镜,其结构尺寸参量如图 2,且具有一个初始倾斜角,使得入射光束在球面反射镜和微悬臂之间来回反射,再由原路反射出半球面谐振腔,形成干涉,如图 3。

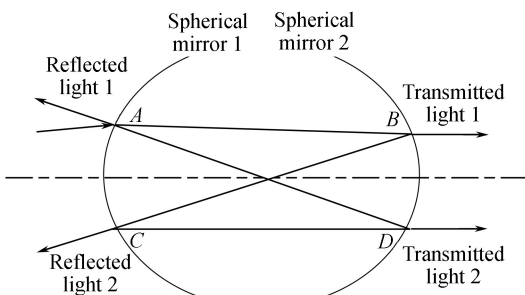


图 1 球面 F-P 干涉原理图

Fig.1 Schematic diagram of spherical F-P interference

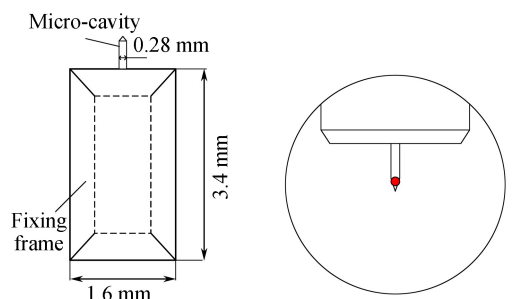


图 2 微悬臂结构尺寸实物外形图

Fig.2 Schematic diagram of micro cantilever structure and size

为了防止光束在球面镜的外表面与内表面之间干涉,球面反射镜的外表面镀 99% 的增透膜.若球面反射镜和微悬臂的反射率分别为 R_1, R_2 , 球面镜与微悬臂的距离为 L , 即半球面 F-P 腔腔长, 则相邻光束之间的光程差为 $4L$, 位相差为

$$\Delta\varphi = \frac{2\pi}{\lambda} \cdot 4L = \frac{8\pi L}{\lambda} \quad (1)$$

式中, λ 为入射光波长, 其光强为 I_0 .

根据多光束干涉原理^[20], 在不考虑损耗的情况下, 可以得反射光的光强分布为

$$I = \frac{R_1 + R_1 R_2^2 - 2R_1 R_2 \cos\left(\frac{8\pi L}{\lambda}\right)}{1 - 2R_1 R_2 \cos\left(\frac{8\pi L}{\lambda}\right) + R_1^2 R_2^2} I_0 \quad (2)$$

由式(2)可知, 球面 F-P 腔的干涉光强与腔长 L 有关, 因此可以通过检测干涉光强的变化来确定腔长的变化, 即强度解调法.

令 $R_1 = R_2 = 0.5, I_0 = 1$, 在 Matlab 中画出干涉光强和腔长之间的关系曲线, 见图 4. 图 4 中光强随着腔长周期性变化, 且两者之间为多值关系, 即一个光强对应多个腔长, 这种状态下无法确定腔长. 但根据式(2)可知光强随腔长变化的周期为 $\lambda/4$. 因而, 将腔长的变化范围选择在半个周期之内时, 光强-腔长曲线是单调的, 可以保证干涉光强与腔长之间具有一一对应的值.

当腔长 L 为 $\lambda/8$ 的奇数倍, 即 $L = (2m + 1)\lambda/8$ 时干涉光强达到最大值; 当腔长 L 为 $\lambda/8$ 的偶数倍时, 也即 $L = 2m\lambda/8$ 时干涉光强最小. 这两种情况下的输出信号都是非线性的, 系统的灵敏度最低. 而在信号曲线斜率最大的位置, 光强信号的线性最好, 此时系统的灵敏度也最高. 因此在采用 F-P 干涉检测微悬臂的偏移时, 将参考点设置在信号线性斜率最大的位置, 即图 4 中所示的 Q 点. 将该点对应的 F-P 干涉仪腔长定义为参考点腔长, F-P 干涉仪工作之前的腔长定义为初始腔长, 微悬臂偏移时的腔长定义为工作腔长.

进一步地, 将 F-P 腔的最大腔长变化范围限定在参考点附近 $\lambda/12$ 以内, 定义为工作范围, 如图 5 所示, 在该范围内进行线性拟合, 拟合度为 99.371%, 可见该范围内既可以保证光强与腔长之间的单值性, 也能保证检测系统对微悬臂的偏移有较高的分辨力. 由于在参考点附近的曲线斜率较高, 因此微小的偏移所导致的光强的变化可以被光电探测器探测出来, 使得 AFM 在探测样品表面的形貌特征时有较高的灵敏度. 同时因为工作区域的曲线接近线性, 所以可以根据探测光强与参考点光强的差值近似计算腔长的变化

$$\Delta I = \partial \Delta L \quad (3)$$

式中, ∂ 为线性系数, 可以根据光强检测仪器的分辨力结合线性系数, 估算检测系统检测微悬臂偏移的分辨力. 检测系统并不需要计算出实际的腔长, 只需在当微悬臂的偏移造成 F-P 干涉仪的腔长改变而偏离参考点

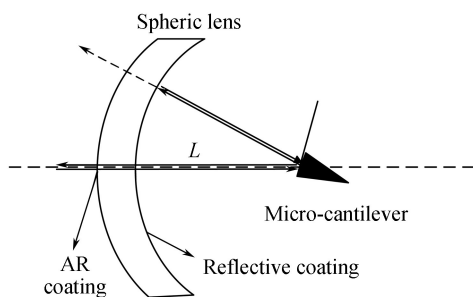


图 3 半球面 F-P 干涉原理图

Fig.3 Schematic diagram of hemispherical F-P interference

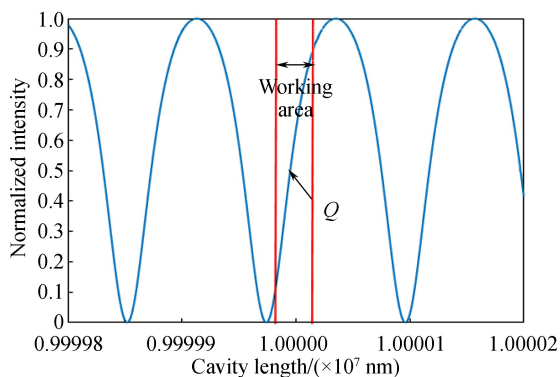


图 4 归一化干涉光强曲线

Fig.4 Normalized intensity distribution curve

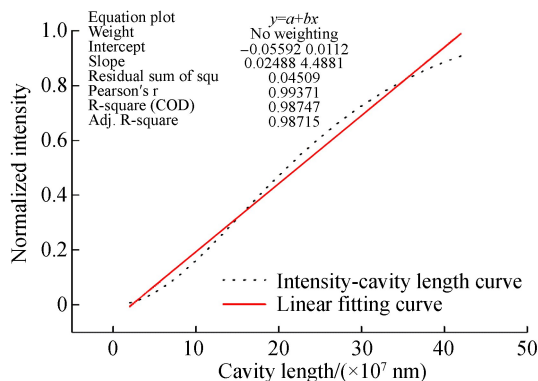


图 5 工作范围内光强曲线线性拟合

Fig.5 Linear fitting curve of intensity in working area

腔长时,将偏移量反馈给 AFM 系统中.

同时由式(2)可知,光源波长和球面镜反射率和微悬臂反射率都会影响干涉光强-腔长曲线,曲线斜率则关系着检测的灵敏度,斜率越大,灵敏度越高,进而影响系统的分辨力.本文使用微悬臂为广州本原科技提供的商用微悬臂,其背面镀有反射膜,反射率 $R_2=0.5$,以反射率 R_1 为自变量,分别画出五组不同反射率组的归一化光强-腔长曲线,观察球面镜的反射率对分辨力的影响,如图 6.

由五组不同球面镜反射率画出的光强腔长曲线可知,当球面镜反射率 R_1 较小时,曲线趋于平坦,变化幅度较小,不能看到明显的波形,不适用于检测系统;当反射率过高时,曲线趋于平顶,虽然在一定范围内有较高的斜率,但范围较小,使得检测系统的工作范围太小,也不适用于检测系统.因而,选用反射率 $R_1=0.5$ 的球面镜最为合适.

在光源的选择上,首先需要考虑激光的波长对系统的影响.如图 7 所示,分别以常用的中心波长为 325 nm、488 nm 和 632 nm 的单色激光作为光源,在 matlab 中画出归一化光强随腔长变化的曲线.根据式(2)可得,光强的极大值和极小值分别为

$$I_{\max} = \frac{R_1 + R_1 R_2^2 + 2R_1 R_2}{1 + R_1^2 R_2^2 + 2R_1 R_2} I_0 \quad (4)$$

$$I_{\min} = \frac{R_1 + R_1 R_2^2 - 2R_1 R_2}{1 + R_1^2 R_2^2 - 2R_1 R_2} I_0 \quad (5)$$

则线性斜率可由半周期内的斜率大致表示为

$$k = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{\frac{T}{2}} = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{\frac{\lambda}{8}} \quad (6)$$

计算可得,当光源中心波长分别为 325 nm、488 nm 和 632 nm 时,半周期内的线性斜率分别为 0.123 0、0.008 2、0.006 3.可知中心波长越长,系统的工作范围越大,但会降低线性斜率导致系统分辨力下降.在选择光源的时候,一方面要求系统的工作范围适中,另一方面又要求有足够高的斜率来保证系统的分辨力.因而,本文系统中选用中心波长为 488 nm 的激光器作为光源.

其次,在实际应用中,由于光源并不是理想的单色光,一般具有一定的光谱宽度,因而采用各波长强度呈现高斯分布的宽带光源,其表达式为

$$I_0(\lambda) = I_0 \exp\left[-\frac{(\lambda - \lambda_p)^2}{B_\lambda^2}\right] \quad (7)$$

式中, λ_p 为光源光谱的峰值波长, B_λ 是光源光谱带宽所决定的高斯函数的半峰全宽.则球面 F-P 干涉仪探测的干涉信号光强为

$$I = \frac{R_1 + R_1 R_2^2 - 2R_1 R_2 \cos\left(\frac{8\pi L}{\lambda}\right)}{1 - 2R_1 R_2 \cos\left(\frac{8\pi L}{\lambda}\right) + R_1^2 R_2^2} I_0 \exp\left[-\frac{(\lambda - \lambda_p)^2}{B_\lambda^2}\right] \quad (8)$$

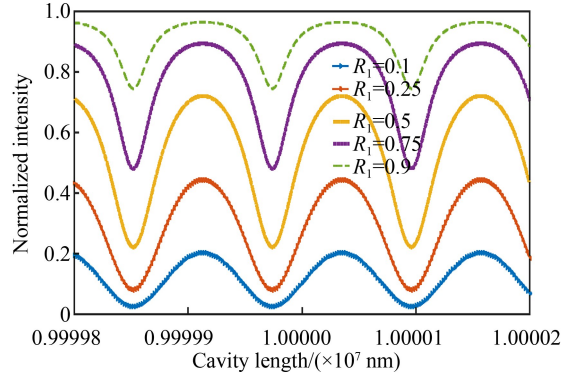


图 6 不同球面镜反射率的光强-腔长曲线
Fig.6 Curves of Interference intensity versus cavity length at different reflectivity

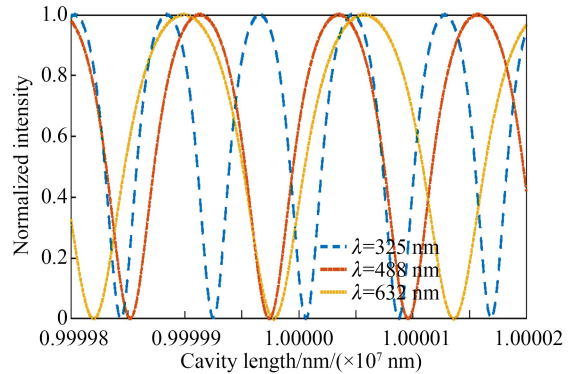


图 7 不同波长的归一化干涉光强曲线
Fig.7 Normalized intensity distribution curve with different wavelength

因而,此时干涉信号会受到光源带宽的影响,如图 8 所示,分别以不同的半峰全宽对光强腔长曲线进行仿真,进一步分析其对干涉信号的影响。

由图 8 可知,当光源的半峰全宽为 30 nm 时,干涉光强信号曲线周期性完全破坏,从 0.000 001 nm 到 1 nm 时,工作区域的斜率降低,对微悬臂偏移检测的灵敏度降低。 B_λ 由光源光谱的带宽决定,光源的光谱带宽大于 B_λ ,而在选择光源时更关注光源的光谱带宽,光谱带宽小于 0.000 001 nm(即 1.26 MHz)的光源对检测系统更有利,因而在选择光源时,需要选择具有高单色性的激光器。

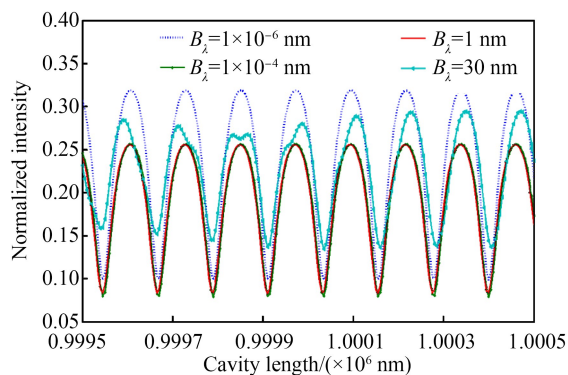


图 8 不同半峰全宽的干涉光强腔长曲线
Fig.8 Interference intensity-cavity length curves with different full width at half maximum

2 实验系统设计

基于以上理论分析,按照如图 9 搭建一套基于 F-P 腔干涉的微悬臂偏移检测系统.一束激光光束经过衰减片,被分光棱镜(轴向纵向分光比 1:1)分为两束光,一束光垂直于光轴出射被光电探测器 1 接收作为参考光,用于观测光源的稳定性分析和信号降噪处理;另一束光沿原方向穿过小孔光阑垂直于球面反射镜入射进 F-P 腔中,光束在球面镜和微悬臂间多次反射,再由光轴反方向反射出 F-P 腔,形成干涉,最后经过分光棱镜被光电探测器 2 接收到干涉光强.由于检测系统中加入了分光比为 1:1 的分光棱镜,即 $\beta = 0.5$.则光电探测器接收到的光强可以表示为

$$I = \frac{R_1 + R_1 R_2^2 - 2R_1 R_2 \cos\left(\frac{8\pi L}{\lambda}\right)}{1 - 2R_1 R_2 \cos\left(\frac{8\pi L}{\lambda}\right) + R_1^2 R_2^2} \beta(1 - \beta) I_0 \exp\left[-\frac{(\lambda - \lambda_p)}{B_\lambda^2}\right] \quad (9)$$

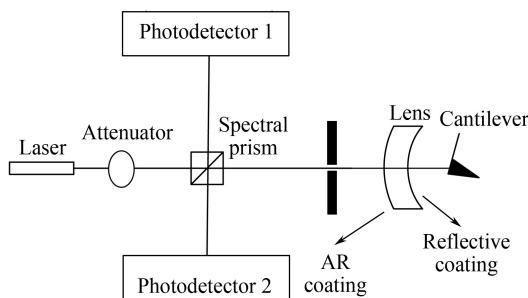


图 9 基于半球面 F-P 干涉的微悬臂偏移检测系统结构图

Fig.9 Structure diagram of micro-cantilever offset detection system based on F-P interference

本文实验中使用的光源为美国相干(Coherent)公司的单频激光器,输出波长为 488 nm,功率可调,光谱宽度小于 1.5 MHz,功率稳定性较高,光功率的变化小于 2%。为了便于分析,本文采用国产哈尔滨芯明天公司的具有纳米级的位移分辨力压电陶瓷位移驱动装置(压电位移扫描台内置电阻式 SGS 传感器,最大行程可达 80 μm ,位移分辨力 1.5 nm,最大承载 800 g)驱动球面反射镜的移动来模拟 AFM 工作过程中微悬臂的偏移,可通过计算机控制压电定位扫描台的位移驱动模式.微悬臂被固定在一个五维调整架上,可进行 X、Y、Z 轴以及俯仰角的微调,以保证光斑能够准确打到微悬臂上,判断依据为能否观察到出射光斑的“十”字形衍射条纹。

为避免其它杂散光的影响,在分光棱镜与球面镜之间放置一个小孔光阑,用于隔绝远轴从球面反射镜透射出的杂光,只让近轴光反射回光电探测器 2.在 AFM 工作时,样品表面的起伏使得微悬臂发生微小的偏移,微悬臂因为偏移而偏离球面反射镜的圆心,但因为微悬臂的偏移在纳米量级,因此可以认为此时微悬臂仍位于球面反射镜的圆心处。

干涉信号光的探测仪器的性能直接关系到实验结果,采用美国 THORLABS 公司的高灵敏度光电探测器(探测波长为 350~1100 nm,14 ns 响应时间,有效探测面积为 13 mm²)和泰克公司的示波器来观察压电陶瓷驱动球面反射镜移动过程中的光强变化波形。

3 实验结果与分析

本文采用以上所述装置来验证理论分析的可行性.利用压电陶瓷位移驱动器以 20 μm 的步长、1 Hz 的频率的连续驱动球面反射镜,进而改变 F-P 腔腔长,以模拟 AFM 工作时微悬臂随样品表面起伏而发生微小偏移.采用示波器来观察探测器得到的反射光信号如图 10.其中通道 4 为探测器 2 探测得到的光强信号曲线,通道 3 为背景噪音,M 则由光强信号曲线扣除掉背景噪音得到.读取示波器电压数据转换成光强-腔长关系,对其作归一化处理,并将其与由 Matlab 仿真得到的数据进行对比,如图 11 所示,两者能够较好拟合到一起,说明实验结果与理论分析基本一致,验证了该方案的可行性。

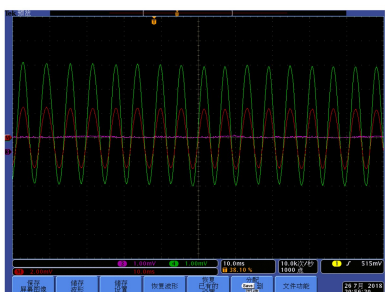


图 10 实验获得干涉光强-腔长曲线

Fig.10 Interference intensity-cavity length curve is obtained by experiment

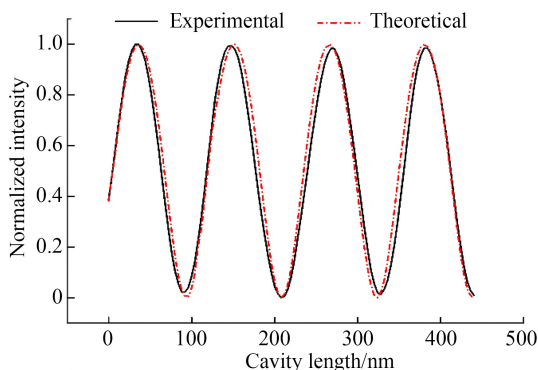


图 11 实验结果与理论对比

Fig.11 Comparison between experimental results and theory

同时,为了验证微悬臂偏转角度对干涉光强的影响,根据球面镜的曲率半径 L 和直径 D 计算其偏转角度的范围为 $\pm 23.58^\circ$.调整角位移台使得微悬臂偏移角分别为 -10° 、 -5° 、 5° 、 10° 时,曲线如图 12 所示.可以看出四条曲线能够较好拟合在一起,说明在允许范围内,微悬臂的偏转角不会影响系统的测量准确度。

重复多次实验并对实验数据的多个周期以波峰波谷值的一半 $(I_{\max}-I_{\min})/2$ 处即 Q 点为中心读取 30 nm 的数据进行最小二乘法线性拟合,拟合结果如图 13,可见在该范围内线性拟合度在 99.9% 以上,说明在此工作范围内线性度较好,为合适的工作范围,且由图可知线性斜率即电压位移关系为 0.185 mV/nm,读取示波器通道 3 背景噪音数据,由均方根计算公式算得其噪音均方根值为 0.048 mV,根据电压位移关系即可算得系统最小分辨力为 0.26 nm。

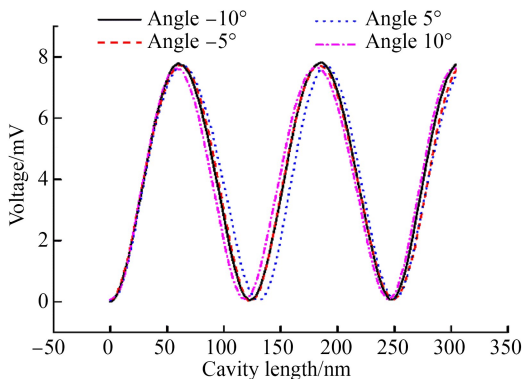


图 12 实验测得不同偏转角度的电压位移关系

Fig.12 Comparison between experimental results and theory

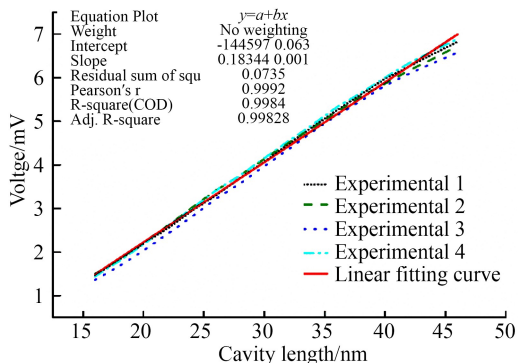


图 13 实验曲线线性拟合

Fig.13 Linear fitting curve

4 结论

本文提出的基于半球面 F-P 腔干涉的光学检测器为原子力显微镜的微悬臂偏移检测提供了一种方法,

并通过搭建一套实验系统,利用一个球面反射镜与微悬臂组成一个谐振腔,根据多光束干涉的原理获得反射光强与腔长曲线,在曲线中对 30 nm 的工作范围内进行线性分析,得到 99.9% 的线性拟合度,微悬臂最小位移分辨力为 0.26 nm,满足对微悬臂偏移探测的要求,验证了该方案的可行性。

参考文献

- [1] HAMON L, PASTRE D, DUPAIGNE P, *et al.* High-resolution AFM imaging of single-stranded DNA-binding (SSB) protein-DNA complexes[J]. *Nucleic Acids Research*, 2007, **35**(8): e58.
- [2] GIESSIBLFF J. AFM's path to atomic resolution[J]. *Materials Today*, 2005, **8**(5): 32-41.
- [3] ZHU Jie, SUN Run-guang. Introduction to atomic force microscope and its manipulation[J]. *Life Science Instruments*, 2005, **3**(1): 22-26
朱杰, 孙润广. 原子力显微镜的基本原理及其方法学研究[J]. 生命科学仪器, 2005, **3**(1): 22-26.
- [4] RUGAR D, MAMIN H J, GUETHNER P. Improved fiber-optic interferometer for atomic force microscopy[J]. *Applied Physics Letters*, 1989, **55**(25): 2588-2590.
- [5] BINNING G, QUATE C F, GERBER C. Atomic force microscope[J]. *Physical Review Letters*, 1986, **56**(9): 930-933.
- [6] GODDENHENRICH T, LEMKE H, HARTMANN U, *et al.* Force microscope with capacitive displacement detection [J]. *Journal of Vacuum Science & Technology A Vacuum Surfaces & Films*, 1998, **8**(1): 383-387.
- [7] MEYER G, AMER N M. Novel optical approach to atomic force microscopy[J]. *Applied Physics Letters*, 1988, **53**(12): 1045-1047.
- [8] ALEXANDER S, HELLENMANS L, Marti O, *et al.* An atomic-resolution atomic-force microscope implemented using an optical lever[J]. *Journal of Applied Physics*, 1989, **65**(1): 164-167.
- [9] MARTIN Y, WILLIAMS C C, WICKREMASINGHE H K. Atomic force microscope-force mapping and profiling on a sub 100-Å scale[J]. *Journal of Applied Physics*, 1987, **61**(10): 4723-4729.
- [10] XIAO-HUI L I, CHENG D. Design and research on spherical plate capacitive displacement sensor[J]. *Instrument Technique & Sensor*, 2018.
- [11] ANDREEV N V. Atomic force microscopy with interferometric method for detection of the cantilever displacement and its application for low-temperature studies[J]. *Ferroelectrics*, 2018, **525**(1): 178-186.
- [12] FENG Lu. Adjustment of Fabry-Perot etalon and con-focal spherical sweeping interferometer[J]. *Physical Experiment of College*, 2016, **29**(3): 18-20.
冯璐.法布里-珀罗标准具和共焦球面扫描干涉仪的调节[J].大学物理实验,2016,**29**(3):18-20.
- [13] QU Zhang, WU Xing-sheng, WEI Jiu-yan, *et al.* Design of a low noise optical beam deflection detection system with high sensitivity[J]. *Micronanoelectronic Technology*, 2018(5): 359-365, 370.
曲章,武兴盛,魏久焱,等.高灵敏低噪声光束偏转检测系统设计[J].微纳电子技术,2018(5):359-365,370.
- [14] YANG Guang. Study of scanning probe microscope system based on ARM[D]. Changchun: Changchun University of Technology, 2016:100-104.
杨光.基于 ARM 的扫描探针显微镜系统的研究[D].长春:长春理工大学,2016:100-104.
- [15] ROL G, PERE R, JORDI A. Atomic force microscopy[J]. *Physics Today*, 2004, **15**(7): 622-642.
- [16] HU H L, XU T M, HUI S E, *et al.* A novel capacitive system for the concentration measurement of pneumatically conveyed pulverized fuel at power stations[J]. *Flow Measurement & Instrumentation*, 2006, **17**(2): 87-9.
- [17] ZHI Quan L I, WANG L, HUANG L J, *et al.* Study on refractive index and concentration sensor based on long-period fiber grating[J]. *Journal of Applied Optics*, 2004, **25**(4): 48-5
- [18] WEI Ren-xuan, JIANG De-sheng. Solution concentration measurement with F-P interference wavelength[J]. *Journal of Optoelectronics Laser*, 2003, **14**(6): 655-656.
魏仁选,姜德生.基于 F-P 干涉波长的溶液浓度测量方法研究[J].光电子·激光,2003,**14**(6):655-656.
- [19] CHEN Xian, YU Shang-jiang, ZHOU Hui-juan, *et al.* Design of a F-P optical fiber explosion pressure sensor[J]. *Transducer & Microsystem Technologies*, 2018, **37**(2): 99-105.
陈显,余尚江,周会娟,等.一种 F-P 光纤爆炸压力传感器设计[J].传感器与微系统,2018,**37**(2):99-105.
- [20] WANG Kun-bo, ZHOU Yu, LIU Chao, *et al.* The F-P interferometric fiber optic microphone with intensity demodulation[J]. *Journal of Applied Acoustics*, 2017, **36**(5): 438-444.
王坤博,周瑜,刘超,等.强度解调的 F-P 干涉型光纤传声器[J].应用声学,2017,**36**(5):438-444.
- [21] HUANG Hai Study on New Methods and Systems of the Cavity Length Demodulation for Optical Fiber Fabry-Pérot Sensors[D].Chongqing: Chongqing University, 2016.
黄海.光纤法布里-珀罗传感器腔长解调新方法 with 系统研究[D].重庆:重庆大学,2010.

Foundation item: The National Major Scientific Instruments and Equipment Development Project of China (No. 2013YQ160551)

引用格式:HUANG Jian, ZHAN Wei-na, CHEN Yang-li, *et al.* Micro-cantilever Displacement Detection System Based on Fabry-Perot Interference[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2018, **47**(12): 1212003

黄剑,詹维纳,陈杨黎,等.基于法布里-珀罗干涉的微悬臂偏移检测系统[J].光子学报,2018,**47**(12):1212003