

激光光强分布对原子力显微镜中光学偏转法检测结果的影响

杨生元 黄文浩

(中国科学技术大学精密机械与精密仪器系, 合肥 230026)

摘要 从光学偏转超微力检测原理出发, 严格地分析了在激光光源具有一定空间光强分布的情况下其检测的结果。我们发现激光源的空间光强分布在超微力检测条件下对检测结果没有影响, 即其 PSD 的输出信号完全正确地反应了悬臂梁的受力大小。但是, PSD 所检测光斑的重心位置对应的光线将随悬臂梁受力大小的不同而不同。本文给出了入射光经弯曲悬臂梁反射后空间光强分布变化的计算方法和计算实例, 并提出了进一步从反射光束中提取上述变化信息并加以应用的建议。

关键词: 光学偏转超微力检测法; 光强分布

1 引 言

自从原子力显微镜(atomic force microscope- AFM)^[1]问世以来, 已被广泛应用于许多学科领域, 仪器本身也得到了很大发展。AFM 中超微力检测法中应用最为普遍的恐怕要数光学偏转法^[2-3]。此法即是让一激光束打在超微力传感元件悬臂梁(cantilever- CL)的背面, 由于悬臂梁在受力情况下将产生弯曲变形, 因此反射光束也会因悬臂梁的弯曲而转过一角度, 用位置敏感元件 PSD 检测出此角度, 也就检测出了悬臂梁所受的力。此检测原理可以简单地用图1示意。由几何光学的知识可知, 当悬臂梁反射面转过一个角度 $\Delta\alpha$, 也即反射点下移 Δl 时, 反射光线在该接收面上移动 $\Delta L = L \cdot 2\Delta\alpha + \Delta l$ $L \cdot 2\Delta\alpha$, 故检测放大比为

$$\beta = \frac{\Delta L}{\Delta l} = 2 \frac{L}{l} \quad (1)$$

这是通常所说的光学杠杆放大原理。到目前为止还没有对入射于悬臂梁上光斑大小的因素对测量结果的定量分析,没有光强分布测量结果的定量误差分析。而实际上,光斑是有一定大小的,是有空间光强分布的。当悬臂梁发生弯曲变形时,其反射面变为曲面,各反射点所对应的反射角的大小由曲面的具体形状决定,则反射光束在垂直于主光轴的截面上的空间光强分布将不同于原入射光束的分布。本文将从理论上严格分析空间光强分布对检测结果将会有什么样的影响,并给出计算反射光空间光强分布的计算方法和计算实例,最后提出利用所检测到的空间光强分布的变化进一步提取有关传感元件有效信息的建议。

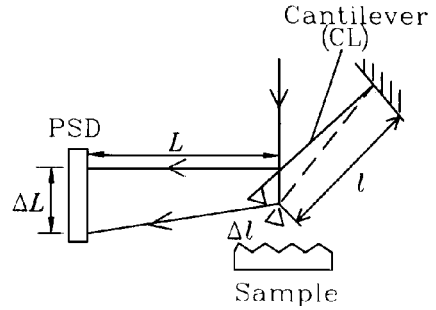


Fig. 1 Schematic diagram of the detecting principle of optic-deflection detecting

2 空间光强分布对检测结果的影响

图2所示为带有直角坐标系的检测原理。 O_1 为激光光源的中心位置, O_2 为 PSD 接收面的中心位置。坐标系 $O - xyz$ 的原点置于悬臂梁的根部, Ox 轴为悬臂梁的对称轴, Oz 轴垂直于纸面向外, 平面 xOz 与未变形反射面重合。坐标系 $O_2 - x_2y_2z_2$ 的原点置于 PSD 的接收面上, 坐标轴 O_2y_2 平行于平面 xOy , 平面 $y_2O_2z_2$ 与 PSD 接收面重合且平行于 Oz 轴, O_2z_2 轴垂直于纸面向外。坐标系 $O - xyz$ 和 $O_2 - x_2y_2z_2$ 均为右手系。在本文中定义的

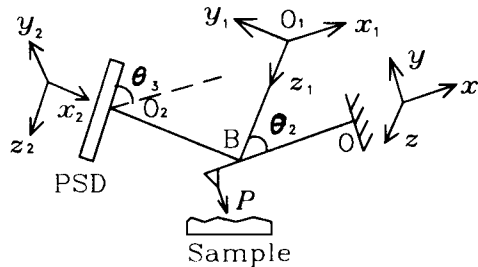


Fig. 2 Schematic diagram of the coordinate for analysing the detecting principle of optic-deflection detecting

“重心光线”为光束在垂直于主光轴截面上的光强分布的重心位置所对应的那一条光线。为了减小测量误差和扩大测量范围,使光源发出的重心光线在悬臂梁未变形时的反射光线(此反射光线也为反射光束的重心光线)垂直打在 PSD 的接收面上,且尽可能打在接收面的中心位置。若入射重心光线与 Ox 轴的夹角为 θ , 则 PSD 接收面与 Ox 轴的夹角 $\theta = 90^\circ - \theta_2$ 。

当 CL 未受力时, CL 未弯曲, PSD 上接收的反射光强分布的类型与入射光束的光强分布类型相同,只可能有分布宽窄的改变。比如入射光为高斯分布型,则反射光仍为高斯型分布,但分布的宽窄可能不同。计此时反射光束的重心位置在系 $O_2 - x_2y_2z_2$ 中的坐标为 $(0, y_2c, z_2c)$ 。为叙述方便,假设入射光线为光束平行光线,即不考虑光束在光路上传播过程中的发散和会聚,因光束的发散或会聚只会导致光强空间分布的按比例地变宽或变窄,光束的重心光线和重心位置并没有改变,而 PSD 检测的就是光强分布的重心位置,所以光学偏转检测结果不会因光束的发散或会聚受影响,这也正是在图1中不画出透镜的原因。假设入射光平行于平面

xOy , 则每一条入射光线被 CL 反射后仍平行于平面 xOy 且与平面 xOy 的距离未变, 即反射光强的空间分布在 Oz 轴(或 Oz_2 轴)方向没有任何变化, 所以只须考虑在 O_2y_2 轴方向上分布的变化。

现考虑位于平面 $z = z_i$ (z_i 为 CL 反射面 z 坐标取值范围 $[Z_{i1}, Z_{i2}]$ 内的任一定数值; 在本文中以后除非特别声明, 凡是 PSD 接收面上的点的坐标均是在 $O_2 - x_2y_2z_2$ 中描述的, 其它点的坐标、直线、平面的方程和分布函数均是在 $O - xyz$ 系中描述的)的一束入射光线, 被反射后光强分布重心位置的变化。当 CL 受一垂直于其未变形反射面的超微力 P 时, CL 将产生弯曲变形, 但变形量相对于 CL 的本身尺度及入射点到 PSD 的距离相比是很小的, 故忽略因 CL 变形而引起的入射点及入射点到 PSD 距离的微小变化。设 P 的方向向下, 计 CL 的挠曲线为

$$y = f(x) \quad (2)$$

入射于点 $(x, 0, z_i)$ (x 为在 CL 反射面内 x 坐标取值范围 $[x_{i1}(z_i), x_{i2}(z_i)]$ 内的任一固定数值)的入射光线, 其反射角将增加一小角度(如图3所示)

$$\Delta\theta_x = 2f'(x) \quad (3)$$

其中 $f'(x)$ 为 $f(x)$ 的导数。在 CL 未变形时, 该入射光线垂直反射于 PSD 上 $(0, y_2, z_i)$ 点, 其中 $y_2 = y_2(x)$ 。计入射点到 PSD 的垂直距离为 l_x , 则 CL 变形后反射光线打在 PSD 上的点将下移, 下移量为 $\Delta y_2 = \Delta y_2(x) = f'(x) + l_x \tan(\Delta\theta_x)$, 又因在超微力条件下 $\Delta\theta_x$ 很小, 有 $\tan(\Delta\theta_x) \approx \Delta\theta_x$, 故

$$\Delta y_2 = f'(x) + l_x \Delta\theta_x \quad (4)$$

由于对不同入射光线 x 值不同, $l_x, \Delta\theta_x$ 也不同, 并且一般情况下 $\Delta\theta_x$ 随 x 的变化关系较为复杂, 因而下移量 Δy_2 与 x 的关系也较为复杂, 所以不但此时的反射光强的分布将有所变化而且不能保证变化后的分布与原分布为同一种类型的分布, 即反射光强的分布将偏离于原分布(如正态分布)。

此束反射光线的重心位置记为 $(0, y_{21}, z_i - c_2)$, 其中 c_2 为点 O_2 在坐标系 $O - xyz$ 中的 z 坐标分量, 并设入射光束空间光强分布为 $A(x, y, z)$, 有

$$y_{21} = \frac{\int_{x_{i1}}^{x_{i2}} (y_2 + \Delta y_2) A(x, 0, z_i) dx}{\int_{x_{i1}}^{x_{i2}} A(x, 0, z_i) dx} = \frac{\int_{x_{i1}}^{x_{i2}} y_2 A(x, 0, z_i) dx}{\int_{x_{i1}}^{x_{i2}} A(x, 0, z_i) dx} + \frac{\int_{x_{i1}}^{x_{i2}} \Delta y_2 A(x, 0, z_i) dx}{\int_{x_{i1}}^{x_{i2}} A(x, 0, z_i) dx} \quad (5)$$

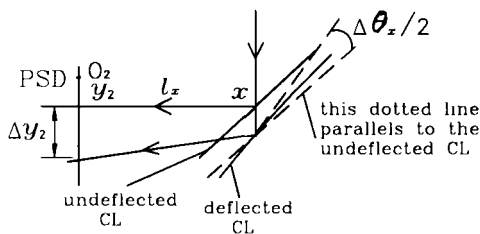


Fig. 3 Schematic diagram of the variation of incident angle of the incident light incident upon CL after the CL's deflection

为简化分析(5)式中没有考虑反射的损失。(5)式右端的第一项表示了CL未变形时反射光的重心位置,记为 y_{20} ,第二项表示了重心位置的下移,记为 Δy_{20} ,即有

$$y^{21} = y_{20} + \Delta y_{20} \quad (5^*)$$

由(5)式可以看出,要使反射光束重心位置不变,须 $\Delta y_{20} = \frac{\int_{x_{i1}}^{x_{i2}} \Delta y_2 A(x, 0, Z_i) dx}{\int_{x_{i1}}^{x_{i2}} A(x, 0, Z_i) dx} = 0$,这在

AFM光学偏转检测法中是不可能成立的,因为AFM中CL是在其一端受集中力,故CL上各点(除CL固定端上各点外)的挠度方向均与该集中力的方向相同,则要么 $\Delta y_2(x) > 0$,要么 $\Delta y_2(x) < 0$,对一切 $x \in [x_{i1}, x_{i2}]$, $x \neq 0$ 。所以该反射光束的重心位置会发生改变。

当CL受 $-nP$ ($n > 0$)的力作用时,其挠曲线变为 $y = nf(x)$,此时入射于 $(x, 0, z_i)$ 的光线反射于PSD上点的下移量成为 $\Delta y_{2n} = nl_x \Delta \theta + nf(x) = n\Delta y_2$,可记于平面 $z = z_i$ 的这束入射光线的反射光线的重心位置为 $(0, y_{2n}, z_i - c_2)$,有

$$y_{2n} = \frac{\int_{x_{i1}}^{x_{i2}} (y_2 + \Delta y_2) A(x, 0, z_i) dx}{\int_{x_{i1}}^{x_{i2}} A(x, 0, z_i) dx} = y_{20} + n\Delta y_{20} \quad (6)$$

然后考虑所有平行于平面 xOy 的平面内光线总的效果,即整个反射光束的重心位置。当所受外力为 P 时,该重心位置可记为 $(0, y_{2G1}, z_{2G1})$,其中

$$y_{2G1} = \frac{\int_{z_{i1}}^{z_{i2}} \int_{x_{i1}}^{x_{i2}} y_{21} A(x, 0, z) dx dz}{\int_{z_{i1}}^{z_{i2}} \int_{x_{i1}}^{x_{i2}} A(x, 0, z_i) dx dz} = \frac{\int_{z_{i1}}^{z_{i2}} \int_{x_{i1}}^{x_{i2}} y_{20} A(x, 0, z) dx dz}{\int_{z_{i1}}^{z_{i2}} \int_{x_{i1}}^{x_{i2}} A(x, 0, z_i) dx dz} + \frac{\int_{z_{i1}}^{z_{i2}} \int_{x_{i1}}^{x_{i2}} \Delta y_{20} A(x, 0, z) dx dz}{\int_{z_{i1}}^{z_{i2}} \int_{x_{i1}}^{x_{i2}} A(x, 0, z_i) dx dz} = y_{20G} + \Delta y_{20G}, \quad (7)$$

$$z_{2G1} = z_{2G};$$

当所受外力为 nP 时,该重心可记为 $(0, y_{2Gn}, z_{2Gn})$,其中

$$y_{2Gn} = \frac{\int_{z_{i1}}^{z_{i2}} \int_{x_{i1}}^{x_{i2}} y_{2n} A(x, 0, z) dx dz}{\int_{z_{i1}}^{z_{i2}} \int_{x_{i1}}^{x_{i2}} A(x, 0, z_i) dx dz} = \frac{\int_{z_{i1}}^{z_{i2}} \int_{x_{i1}}^{x_{i2}} y_{20} A(x, 0, z) dx dz}{\int_{z_{i1}}^{z_{i2}} \int_{x_{i1}}^{x_{i2}} A(x, 0, z_i) dx dz} + \frac{\int_{z_{i1}}^{z_{i2}} \int_{x_{i1}}^{x_{i2}} n\Delta y_{20} A(x, 0, z) dx dz}{\int_{z_{i1}}^{z_{i2}} \int_{x_{i1}}^{x_{i2}} A(x, 0, z_i) dx dz} = y_{20G} + n\Delta y_{20G}, \quad (8)$$

$$z_{2Gn} = z_{2G};$$

由(7)、(8)两式得

$$\frac{y_{2Gn} - y_{2G}}{y_{2G1} - y_{2G}} = \frac{n\Delta y_{20G}}{\Delta y_{20G}} = n = \frac{nP}{P} \quad (9)$$

由(7)和(9)式便可推知整个反射光束的重心位置在 CL 受力时是要发生变化的,且其变化完全反应了 CL 所受外力的变化,即 PSD 的输出信号真实地代表了 CL 在该处的受力情况,所以该检测法在考虑空间光强分布的情况下和在超微力检测条件下无原理误差。在实际测量中将 y_{2G} 和 z_{2G} 都预置为零以扩大测量范围。

进一步考虑 CL 在不同力作用下反射光束的重心光线是否变化的问题。仍看 $z = z_i (z_i [z_{i1}, z_{i2}])$ 面内的反射光线,设在 P 力作用下反射光束的重心光线对应回去的入射点为 x_{21} , 有

$$y_{21} = y_{x_{21}} + l_{x_{21}} \Delta\theta_{x_{21}} + f(x_{21}) \quad (10)$$

其中 $y_{x_{21}}, l_{x_{21}}$ 分别为入射于 $(x_{21}, 0, z_i)$ 的光线当 CL 未变形时反射于 PSD 上点的 y_2 坐标值及点投到 PSD 的距离。在 nP 力作用下,假设反射光束的重心光线仍为经过点 $(x_{21}, 0, z_i)$ 反射来的光线,即在 P 力和 nP 力作用下反射光束的重心光线不变,则有

$$y_{2n} = y_{x_{21}} + l_{x_{21}} n \Delta\theta_{x_{21}} + n f(x_{21}) \quad (11)$$

根据(5)、(6)两式,要使(10)和(11)两式同时成立,即有

$$y_{21} - y_{20} = \Delta y_{20} = y_{x_{21}} - y_{20} + l_{x_{21}} \Delta\theta_{x_{21}} + f(x_{21}) \quad (12)$$

$$y_{2n} - y_{20} = n \Delta y_{20} = y_{x_{21}} - y_{20} + l_{x_{21}} n \Delta\theta_{x_{21}} + n f(x_{21}) \quad (13)$$

以上两式相比有 $y_{21} - y_{20} = n(y_{x_{21}} - y_{20})$, 则必须 $n = 1$, 即此二力大小一样。实际应用中,所施加于 CL 上的力是经常变化的,即在不同力作用下原假设反射光束的重心光线不变是不成立的,所以反射光束的重心光线是随着 CL 的受力不同而不同。上述 CL 在 nP 力作用下反射光束的重心光线所对应回去的入射点记为 x_{2n} , 若记 $y_{x_{2n}}$ 和 $l_{x_{2n}}$ 分别为入射于点 $(x_{2n}, 0, z_i)$ 的光线在 CL 未变形时打在 PSD 上的反射点的 y_2 坐标值及点 $(x_{2n}, 0, z_i)$ 到 PSD 的距离,则有

$$y_{2n} = y_{x_{2n}} + l_{x_{2n}} n \Delta\theta_{x_{2n}} + n f(x_{2n}) \quad (14)$$

既然每个 $z = z_i (z_i [z_{i1}, z_{i2}])$ 平面上的反射光束的重心光线随 CL 受力的变化而变化,由于这种变化的复杂性,则整个反射光斑的重心光线也应随 CL 的受力变化而变化。当然在超微力作用条件下这种变化是微小的,实际上与入射重心光线相隔较近。

由上面的分析可见,虽然光学偏转法正确地测量了力的大小,没有测量误差,但是它探测到的反射光束的重心位置对应的反射光线所对应回去的反射位置在变化,并不是前面提到的其反射光斑重心位置的变化是简单的光学杠杆放大,因为此时的“光学支点”(所探测到的反射点)随 CL 受力大小的不同而在不断变化。并且不难看出,上面给出的分析方法及得出的结论对任意形状的 CL 和任意的入射空间光强分布都是适用的。

3 反射光强分布变化的计算方法和计算实例

为叙述方便,如图2所示,在光源上以 O_1 为原点置一右手坐标系 $O_1-x_1y_1z_1$, 使 O_1z_1 轴与光源出射光重心光线重合, O_1x_1 垂直于纸面向外。记 O_1 和 O_2 在 $O-xyz$ 系中的坐标分别为 (a_1, b_1, c_1) 和 (a_2, b_2, c_2) 。已知在 $O-x_1y_1z_1$ 系中光源出射光强分布为 $A_1(x_1, y_1, z_1)$, 为简单起见仍设入射光线为平行于面 $x_1o_1y_1$ 的平行光线。

我们的计算方法是对起始于 $O_1-x_1y_1z_1$ 系中的任一点 (x_{1x}, y_{1x}, z_{1x}) 的光线,找到对应的经弯曲 CL 反射打在 PSD 上的点在 $O_2-x_2y_2z_2$ 系中的坐标 $((x_{2x}, y_{2x}, z_{2x}))$, PSD 接收面上 $(x_{2x},$

y_{2x}, z_{2x} 点的光强 $U(x_{2x}, y_{2x}, z_{2x}) = A_1(x_{1x}, y_{1x}, z_{1x})$, 也即得到了反射光束的空间光强分布。

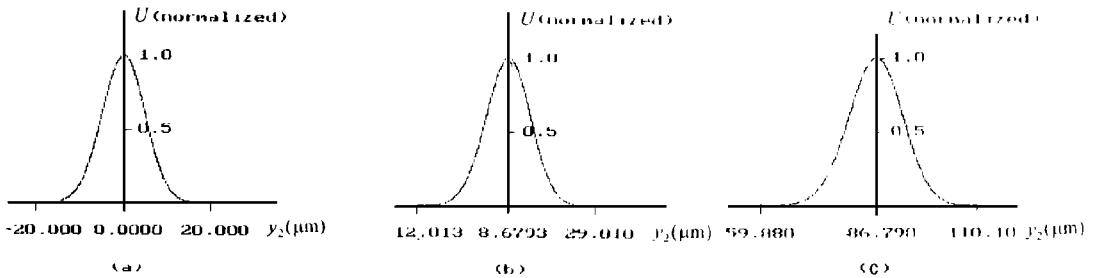
利用求得的 PSD 接收面上的所有坐标点 $(0, y_{2x}, z_{2x})$ 和对应的光强值 $A_1(x_{1x}, y_{1x}, z_{1x})$ 作图即可得反射光束空间光强分布的全貌, 并可求得诸如重心位置等单项指标。

现取最常见的高斯入射光强分布为例进行计算, 取 $A_1(x_1, y_1, z_1) = \exp(-\frac{x_1^2 + y_1^2}{w^2})$, 其 $w = 7 \mu\text{m}$ 。为简单起见取 $c_1 = c_2 = 0$, 即让 O, O_1, O_2 处于同一平面, c_1 和 c_2 通常为仪器的调整误差。 $\theta_2 = \theta_3 = 45^\circ; \alpha_1 = 0, \alpha_2 = -0.1 \text{ m}$ 。取 $b_2 = -(a_2 + b_1 / \text{tg}\theta) \text{tg}\theta$, 即使入射重心光线在 CL 未变形时反射于 PSD 接收面的中心位置, $b_1 = 160 \text{ m}$ 。CL 取为矩形反射面 CL, 其几何参数为长 $l = 200 \mu\text{m}$, 宽度 $b = 40 \mu\text{m}$, 厚度 $h = 0.5 \mu\text{m}$, 杨氏模量 $E = 150 \text{ GPa}$, 有 CL 的挠曲线为 $f(x) = -\frac{Px^2}{6EI}(3l+x)$, 其中 $I = \frac{bh^3}{12}$ 。作为分析的需要只计算平面 xOy (即平面 $y_1O_1z_1$) 内入射光线经反射后的空间光强分布情况。在坐标轴 O_1y_1 上宽度为 $40 \mu\text{m}$ 且关于原点对称的区间内取 1001 个点进行计算, 点间间隔为 $0.4 \mu\text{m}$, 记这些点为 $(0, y_{1i}, z_{1i}) (i = 1, 2, \dots, 1001)$, 计算出经反射后反射到 PSD 接收面上的点的坐标 $(0, y_{2i}, 0)$ 和该点的光强值 $U_i (i = 1, 2, \dots, 1001)$, 最后在平面直角坐标系中描点 $(-y_{2i}, U_i)$ 便可得到与入射光束对应的反射光束的光强在轴 O_2y_2 上的分布情况, 并利用下式

$$y_c = \frac{\sum_{i=1}^{1001} U_i y_{2i}}{\sum_{i=1}^{1001} U_i} \quad (15)$$

可近似计算得反射光斑的重心位置。

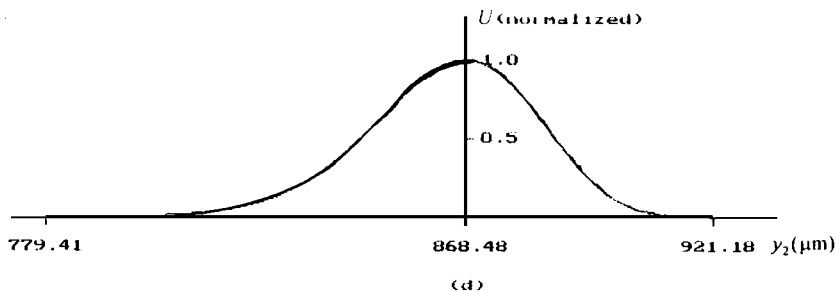
我们用计算机程序计算了在上述各参数值条件下和分别在外力 $P = 0.1 \text{ nN}$, $P = 1 \text{ nN}$ 和 $P = 10 \text{ nN}$ 的作用下, 反射光强分布情况, 如图 4 所示, (a) 为入射光强分布, (b)、(c) 和 (d) 分别为 $P = 0.1 \text{ nN}$, $P = 1 \text{ nN}$ 和 $P = 10 \text{ nN}$ 时反射光强分布, 在各图的下方并给出 PSD 所接收到的反射光斑的重心位置。从计算结果可以看出, 具体的数值关系与前面的在超微力条件下理论分析结论符合很好, 反射光强的分布在 CL 受外力时相对于入射光强(高斯分布) 是发生了明显的偏离, 随着受力 P 的越大其偏离于正态分布就越远。



(a) is the distribution of light intensity of the incident light

(b) is the case of $P = 0.1 \text{ nN}$, and the calculated $y_c = 8.6683 \mu\text{m}$.

(c) is the case of $P = 1 \text{ nN}$, and the calculated $y_c = 86.687 \mu\text{m}$.



(d) is the case of $P = 10 \text{ nN}$, and the calculated $y_c = 867.37 \text{ } \mu\text{m}$.

Fig. 4 The calculated space distribution of light intensity of the reflected light spot in the case that there is a force acting on CL and under the condition that is given in context.

4 建 议

根据本文前面分析所得出的结论和具体的数值计算结果可知, 弯曲的 CL 将改变反射光束的空间光强分布, CL 一定的弯曲对应于一定的反射光强分布, 那么我们可以设想, 若反过来测出反射光束的具体的空间光强分布情况, 是否可以反推回 CL 的弯曲变形? 答案是肯定的, 也即是利用诸如 CCD 等光电检测元件检测出反射光束光强分布, 将它与入射光强分布比较, 通过一定的算法便可找出 CL 的变形, 利用找出的 CL 的变形量再与弹性力学中的理论计算结果相比, 看二者是否一致, 便可以验证弹性力学中的处理方法在诸如 CL 这样的微型器件上是否适用。这套建议方案是否真正可行, 还有待于继续探讨。我们认为这将取决于 CCD 检测系统本身的检测精度以及整个测量系统杂散光和其它光噪声的影响程度。

参 考 文 献

- [1] Binnig G, Quate C F, Gerber C. Atomic Force Microscope. Phys. Rev. Lett. 1986, **56**: 930
- [2] Meyer G, Amer N M. Novel Optical Approach to Atomic Force Microscope. Appl. Phys. Lett. 1988, **53**: 1045
- [3] Warmack R J, Zheng X -Y, Thundat T, Allison D P. Friction Effects in the Deflection of Atomic Force Microscope Cantilevers. Rev. Sci. Instrum. 1994. **65**: 394

Influence of Distribution of Light Intensity of Laser Source on Detecting Results of Optic-deflection Detecting in Atomic Force Microscope

Yang Shengyuan, Huang Wenhao

*(Department of Precision Machinery and Precision Instrumentation,
University of Science and Technology of China, Hefei 230026)*

Abstract

In this paper, the detection results in the case that laser light source has a certain space distribution of light intensity are critically analysed on the basis of detecting principle of optic-deflection ultra-microforce detecting. We find that the space distribution of light intensity of the laser source has no influence on the detecting results on the condition of ultra-microforce detecting. That is the output of PSD completely and correctly reflects the value of the force acting on cantilever. However, with different values of force acting on cantilever the lights corresponding to the position of weight center of light spot detected by PSD are different. Calculation method and calculation example of the variation of the space distribution of light intensity of incident light after reflected by the deflected cantilever are also given, and suggestion for further extraction the information of the above mentioned variation from the reflected beam and putting it in use is pointed out in the article.

Key words: Optic-deflection ultra-microforce detecting, Light-intensity distribution

杨生元 男, 1970年12月生, 现为中国科学技术大学精密机械与精密仪器系在读博士生, 主要从事纳米技术及仪器方面的研究工作, 已在国内外发表论文数篇。