

多重嵌套悬臂梁结构磁致动微机械偏转器

胡 明¹, B. Shen², W. Allegretto², A. M. Robinson²

(1. 天津大学电子信息工程学院, 天津 300072; 2 阿尔伯塔大学电气工程系, 加拿大 埃德蒙顿 T6G 2G7)

摘 要: 设计并制做了一种新型多重嵌套悬臂梁结构的磁致动微机械偏转器. 偏转器由 1.2 μm CMOS 工艺和各向异性腐蚀工艺制成. 致动原理是电流与磁场的相互作用在悬梁上产生罗仑兹力. 测量了偏转器的静态和动态特性. 测量结果表明, 这种微偏转器的特点是可双向偏转且偏转角度大且具有快的时间响应.

关键词: 悬臂梁; 微机械; 磁致动; 偏转器

中图分类号: TN304.05 文献标识码: A 文章编号: 0372-2112 (2000) 02-122-02

Magnetically Actuated Micromachined Deflector with Structure of Multiple Nested Cantilevers

Hu Ming¹, B. Shen², W. Allegretto², A. M. Robinson²

(1. Electron Information Engineering Institute Tianjin University, Tianjin 300072, China;
2. Dept. of E. E. University of Alberta Edmonton, Canada T6G 2G7)

Abstract: A novel magnetically actuated micromachined deflector with structure of multiple nested cantilevers is designed and fabricated. The device is manufactured using 1.2 μm CMOS process followed by anisotropic etching. Actuation is produced by Lorentz force due to interaction between the currents flowing in the cantilevers and an external magnetic field. Static and dynamic responses are measured. The results show that the deflector has the features of a large, bidirectional angular deflection and fast time response.

Key words: cantilever; micromachined; magnetic actuation; deflector

1 引言

在微系统中, 悬臂梁式微机械偏转器应用广泛, 如用于空间光调制^[1]、光阑^[2]和光开关^[3]等. 本文用标准的 CMOS 工艺及各向异性腐蚀工艺制作了一种新型微机械嵌套式悬臂梁结构的磁致动偏转器, 其工作原理为在外加磁场作用下通有电流的悬臂梁受到罗仑兹力而发生偏转. 改变悬臂梁中电流的方向可以使偏转器双向偏转, 且偏转角度大, 时间响应快.

2 偏转器的设计制作和工作原理

嵌套式悬臂梁结构微偏转器是由 1.2 μm 双金属层 CMOS 工艺结合各向异性腐蚀工艺制成的. 图 1 为三重嵌套悬臂梁结构偏转器的 SEM 像和结构设计平面图. 偏转器由面积为 150 μm × 200 μm 的中心悬台和围绕它的三重互相嵌套的悬臂梁组成, 其中, 中心悬台由最靠近它两侧的一对平行悬臂在 AA' 处支撑, 而这一对平行悬臂又被其外部两重悬臂梁环绕, 分别在 BB' 和 CC' 处相连. 中心悬台和悬臂梁的厚度约为 4.4 μm, 其中厚度均为 0.8 μm 的金属 1 层和金属 2 层(铝)被设计成环绕整个悬臂梁的导电通路. 所有的悬臂梁宽度为 12 μm. 将已按设计图形经 CMOS 工艺制好的硅芯片放入温度为 95~105 °C 的 EDP 腐蚀液中, 腐蚀出一表面开口为 290 μm ×

350 μm, 深度为 50 μm 的空腔, 形成如图 1 所示仅是最外侧两平行悬臂在端点处与硅基底相连的释放式结构.

当偏转器被置于方向如图 1b 所示的外部磁场中且有电流流过悬臂梁中的 AL 导线时, AA' 段、BB' 段和 CC' 段悬梁所受到的罗仑兹力将使中心悬台产生向着垂直于基底平面方向, 即 Z 方向偏转. 当电流换向时, 偏转方向相反. 在中心悬台上用金属层形成的反射镜是用来当悬台偏转时, 由光的反射变化检测偏转角度的. 悬台中央的金属膜层与悬臂梁中的金属导线彼此绝缘. 双重嵌套式悬臂梁偏转器的结构与图 1 类似, 只是悬臂梁为双重嵌套.

采用将多重嵌套悬臂梁分解的方法并运用标准方程^[4]和边界条件, 对含有 n 重嵌套结构悬臂梁的静态偏转特性进行分析, 得出三重嵌套悬臂梁偏转器中心悬台的最大偏转 Z_{max} 的表达式为:

$$Z_{\max} = (F_1 L_1^3 - (F_2 - F_1) L_2^3 + [F_3 - (F_2 - F_1)] L_3^3) / (3EI) + (-F_1 L_1 L_2^2 + [F_1 L_1 + (F_2 - F_1) L_2] L_3^2) / (2EI) \quad (1)$$

式中: F₁、F₂、F₃——分别为在三重悬梁(AA' 段、BB' 段、CC' 段)上产生的罗仑兹力. L₁、L₂、L₃——分别为三重悬臂的长度. E——杨氏模量. I——关于中心轴的转动惯量.

理论分析表明, 中心悬台的偏转与电流和磁场强度成正

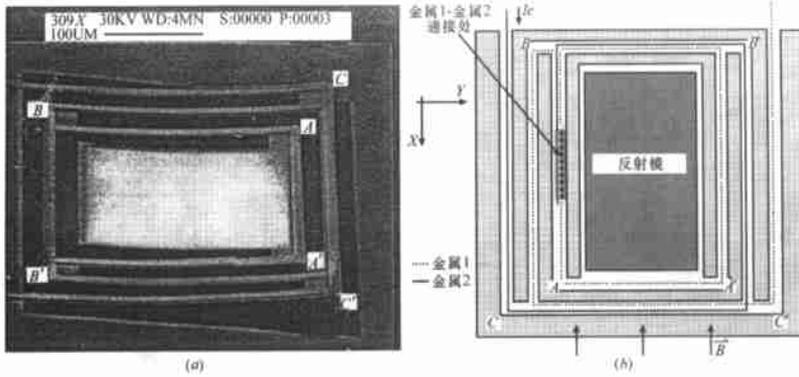


图 1 三重嵌套悬臂梁结构偏转器的 SEM 像(a)和结构设计平面图(b)

比,并决定于悬臂梁材料的杨氏模量和悬臂的转动惯量。

偏转器的动态特性由经典线性弹性方程描述,形式为:

$$\rho(\partial^2 Z/\partial t^2) + \rho_1(\partial Z/\partial t) + LZ = q(x, y, t) \quad (2)$$

其中:

$$L(Z) = \frac{\partial^2}{\partial x^2} [D_x \frac{\partial^2 Z}{\partial x^2}] + \frac{\partial^2}{\partial y^2} [D_y \frac{\partial^2 Z}{\partial y^2}] + \frac{\partial^2}{\partial y^2} [D_1 \frac{\partial^2 Z}{\partial x^2}] + \frac{\partial^2}{\partial x^2} [D_1 \frac{\partial^2 Z}{\partial y^2}] + 2 \frac{\partial^2}{\partial x \partial y} [D_{xy} \frac{\partial^2 Z}{\partial x \partial y}]$$

式中, $D_x(x, y)$, $D_y(x, y)$, $D_1(x, y)$, $D_{xy}(x, y)$ 代表弯曲刚度, ρ 为面密度, ρ_1 为阻尼项, q 为作用力。偏转器在交变电流的作用下将作谐振动,在谐振频率点,其中心悬台的偏转度达到最大值。当振动系统阻尼一定时,外力越大,达到谐振时的偏转度越大。

3 测量

将偏转器置于一永久磁体两磁极之间,磁场强度为 0.12T。由 HeNe 激光器发出的光束经聚焦照射在偏转器中心悬台的镜面上,其反射光束投射到不透光的屏上,中心悬台的偏转角度由反射光束在屏上的位置确定。将直流电流和交流方波电流分别作用于偏转器以确定静态响应和动态响应特性。

偏转器的时间响应特性测量是用 EG&G UV444BD 光电二级管取代不透光屏,输入方波电流幅值为 6.7mA,方波频率为 100Hz。

4 结果与讨论

图 2 显示了嵌套式悬臂梁结构偏转器在 DC 电流作用下的静态偏转特性。曲线表明,偏转器的偏转角度随 DC 电流值增大而线性增大,在相同 DC 电流值的激励下,三重嵌套悬臂梁偏转器比双重嵌套悬臂梁偏转器的偏转角度明显增大,验证了串接多重嵌套悬臂梁结构可增大偏转角度的理论分析。

由于悬臂梁处于与硅基体热隔离状态,流过悬臂梁中 Al 膜层导体的电流产生的焦耳热会使其温升很高,当 DC 电流值为 20mA 时,根据 Al 导体电阻值的变化和 Al 膜层的电阻温度系数 α (测得 $\alpha = 3.2 \times 10^{-3}/^\circ\text{C}$) 可计算出悬臂梁的平均温度约为 150 $^\circ\text{C}$ 。静态特性测量最大电流为 27mA,使悬臂梁的平均温度控制在 300 $^\circ\text{C}$ 以下。三重嵌套悬臂梁偏转器在 DC 电流为 27mA 时的偏转角度为 2.5 $^\circ$ 。

三重嵌套悬臂梁偏转器在 AC 电流作用下在谐振频率附近

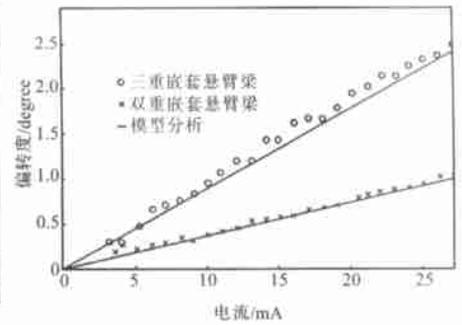


图 2 偏转器在 DC 电流下的偏转特性

近的偏转特性如图 3。谐振频率约为 16.9kHz, Q 值为 35。当电流分别为 4mA、6mA、8mA 和 10mA 时,在谐振频率点处所对应的最大偏转角度分别为 10 $^\circ$ 、16 $^\circ$ 、20 $^\circ$ 和 25 $^\circ$ 。当 AC 电流为 10mA 时,屏幕上扇形反射光束在振荡时呈现出不对称性,其响应曲线呈不对称性。这是由于中心悬台在谐振频率点振荡时其边缘触到腐蚀空腔底部,限制其偏转角度为 25 $^\circ$ 。双重嵌套悬臂梁偏转器的动态响应特性与图 3 类似,只是其偏转角度较小,约为三重嵌套悬臂梁结构的 75%,其谐振频率为 25.3kHz, Q 值为 90。测得三重嵌套悬臂梁偏转器的响应时间为 28 μs 。

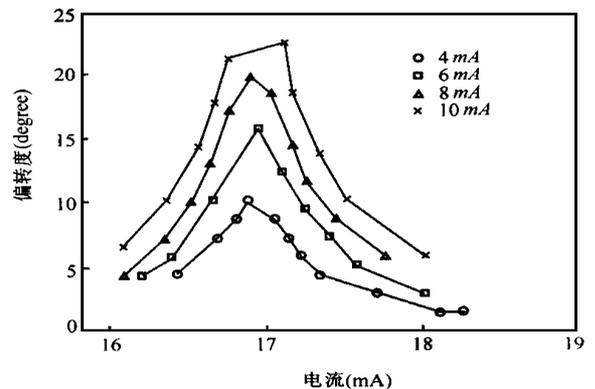


图 3 偏转器在 AC 电流下的偏转特性

5 结论

利用标准 CMOS 工艺和各向异性腐蚀成功地研制出磁致动微机械偏转器。偏转器由多重嵌套悬臂梁和中心悬台组成,多重嵌套结构悬臂梁的设计可大大提高由其支撑控制的中心悬台的偏转度,并具有可双向偏转,时间响应快,工作寿命长的特点。



胡 明 1951 年出生,1976 年毕业于天津大学无线电工程系,1991 年获硕士学位。1994 年 10 月至 1995 年 10 月在加拿大 Alberta 大学作访问学者。现任天津大学电子信息工程学院副教授,硕士生导师,中国电子学会高级会员,长期从事薄膜电子材料与器件,传感器技术方面的教学与研究工作。(下转第 117 页)

$$S_a(\beta^r) = \{b_0 \sim b_{R-1}\} * (k_1 + k_2) \{f_0(\beta) \sim f_{R-1}(\beta)\} + \{b_0 \sim b_{R-1}\} * (k_1) \{u_0(\beta) \sim u_{R-1}(\beta)\} + \{b_0 \sim b_{R-1}\} * (k_2) \{v_0(\beta) \sim v_{R-1}(\beta)\} + b_{j_1+j_2} \quad (6)$$

$$\sum_{j=0}^{R-1} u_j(\beta) = \sum_{j=0}^{R-1} v_j(\beta) = r - 1 \pmod r \quad (7)$$

不难证明, 当 $R > 2$ 恒有 $L(a) > L(a^{(3)}) + L(a^{(4)}) - 2$, 其中 $a^{(3)}$ 、 $a^{(4)}$ 分别为如下的广义 Legendre 序列:

$$a_i^{(3)} = \begin{cases} b_j, \gcd(p, i) = 1, \log_p i = j - \log_p q \\ b_{j_1+j_2}, \gcd(p, i) > 1 \end{cases}$$

$$a_i^{(4)} = \begin{cases} b_j, \gcd(q, i) = 1, \log_q i = j - \log_q p \\ b_{j_1+j_2}, \gcd(q, i) > 1 \end{cases}$$

不仅如此. 对于 $r^t = 4$, 以下将给出序列 a 的线性复杂度的更紧的界.

引理 7 取 $r^t = 4, m_1 = p \pmod 8, b = \begin{cases} 0, b_{j_1+j_2} = 0 \\ 1, b_{j_1+j_2} \neq 0 \end{cases}$, 则

① $m_1 = 1$ 时, $L(a^{(3)}) = 3(p-1)/4 + b$; ② $m_1 = 5$ 时, $L(a^{(3)}) = p - 1 + b$.

证明 由定理 1 的证明过程稍加推广即得证引理 7.

引理 8 取 $r^t = 4$, 令 $c_k = \{b_0 \sim b_3\} * (k) \{u_0(\beta) \sim u_3(\beta)\}, k = 0 \sim 3$; 则 $\{c_0, c_1, c_2, c_3\}$ 满足 $c_0 + c_1 + c_2 + c_3 = 0, c_2 = c_0 + b_0 + b_2 \neq c_0, c_3 = c_1 + b_0 + b_2 \neq c_1$ (8)

引理 9 固定排列 $\{b_0 \sim b_3\}$, 设 2 特征域上的两组元素 $\{c_0, c_1, c_2, c_3\}$ 和 $\{d_0, d_1, d_2, d_3\}$ 各自满足式(8). 记 $B_k = \{c_0 + d_k, c_1 + d_{k-1}, c_2 + d_{k-2}, c_3 + d_{k-3}\}$, 则 B_k 中的元素全部相等或者 $c_0 + d_k = c_2 + d_{k-2} \neq c_1 + d_{k-1} = c_3 + d_{k-3}$; 且当 B_k 的元素全部相等时 B_{k+1} 的元素不全相等.

证明 由式(8)知

$$\{c_0 + d_k, c_1 + d_{k-1}, c_2 + d_{k-2}, c_3 + d_{k-3}\} = \{c_0 + d_k, c_1 + d_{k-1}, c_0 + d_k, c_1 + d_{k-1}\}$$

$$\{c_0 + d_{k+1}, c_1 + d_k, c_2 + d_{k-1}, c_3 + d_{k-2}\} = \{c_0 + d_{k+1}, c_1 + d_k, c_0 + d_{k+1}, c_1 + d_k\}$$

引理 9 得证.

定理 12 取 $r^t = 4$. 则 $L(a) \geq \varphi(n)/4 + L(a^{(3)}) + L(a^{(4)}) - 1$; 记 $(m_1, m_2) = (p \pmod 8, q \pmod 8)$,

① $(m_1, m_2) = (1, 1)$ 时 $L(a) \geq \varphi(n)/4 + 3(p+q-2)/4$;
 ② $(m_1, m_2) = (1, 5)$ 时 $L(a) \geq \varphi(n)/4 + 3(p-1)/4 + (q-1)$;
 ③ $(m_1, m_2) = (5, 1)$ 时 $L(a) \geq \varphi(n)/4 + (p-1) + 3(q-1)/4$;
 ④ $(m_1, m_2) = (5, 5)$ 时 $L(a) \geq \varphi(n)/4 + (p+q-2)$.

证明 在式(6)中令 $k_1 + k_2$ 固定, k_1 变动, 由引理 7~9 即得证定理 12.

5 结语

本文的大量结论说明, 从线性复杂度角度来说广义 Legendre 序列和广义 Jacobi 序列是非常好的. 广义 Jacobi 序列比广义 Legendre 序列的优越性在于: 密藏的分解式而使序列具有更好的伪随机性, 且由生成复杂度的少量增加换取线性复杂度的大量增加. 不难证明广义 Legendre 序列和广义 Jacobi 序列的另一个鲜明的优点: 在少量符号替换下其线性复杂度很稳健. 但其伪随机性仍需进一步研究.

对不可分的第二类广义 Jacobi 序列的线性复杂度所给的界似乎太松. 可以猜想它与 $\varphi(n)$ 同阶. 定理 12 部分地证实了这一猜想.

参考文献

[1] I. Damgaard. On the randomness of Legendre and Jacobi Sequences. Advances in cryptology: CRYPTO' 88, Springer-Verlag, 1990: 163~ 172

[2] C. Ding, T. Helleseht, W. Shan. On the complexity of Legendre Sequences. IEEE Transactions on IT, May 1998, 44(3): 1276~ 1278

[3] Scott A. Vanstone, Robert J. Zucchrato. Elliptic Curve Cryptosystems Using Curves of Smooth Order Over Ring Z_n , IEEE transactions on IT, July 1997, 43(4): 1231~ 1237

[4] 柯召, 孙琦. 数论讲义. 第六章第三节. 161~ 163. 北京: 高等教育出版社, 1986

[5] R. Lidl, H. Niederreiter. Finite Fields. in Encyclopedia of Mathematics and Its Applications, Vol. 20, MA: Addison-Wesley, 1983

[6] 肖国镇, 卿斯汉. 编码理论. 第五章第五节, 188~ 193. 北京: 国防工业出版社, 1993

(上接第 123 页)

参考文献

[1] L. J. Hornbeck. Deformable mirror spatial light modulators. in Pro. SPIE, 1989, 1150: 86~ 102

[2] E. Obemeier, J. Lin and V. Schlichting. Design and fabrication of an electrostatically driven microshutter. in Tech. Dig. 7th Int. Conf. Solid State Sensor and Actuators (Transducers' 93), Yokohama, Japan, 1993,

June 7-10: 132~ 135

[3] J. Mohr, M. Kohl and W. Menz. Micro optical switching by electrostatic linear actuators with larger displacements. in Tech. Dig. 7th Int. Conf. Solid State Sensors and Actuators (Transducers' 93), Yokohama, Japan, 1993 June 7-10: 120~ 123

[4] F. P. Beer and E. R. Johnston, Mechanics of Materials. (McGraw Hill, Ryerson, Toronto 1985)