

文章编号 1004-924X(2012)08-1772-10

无交叠垂直梳齿平动微镜的驱动特性

翟雷应^{1, 2*}, 徐 静¹, 钟少龙², 吴亚明¹

(1. 中国科学院 上海微系统与信息技术研究所 微系统技术重点实验室 传感技术联合
国家重点实验室, 上海 200050; 2. 中国科学院 研究生院, 北京 100039)

摘要:为了设计用于光相位调制器平动微镜的无交叠梳齿驱动器,建立了保角变换数学模型,研究了驱动器的驱动特性。从复变函数理论出发,建立了驱动器的保角变换静电场解析模型;以动齿受力为研究对象,根据不同情形下的动齿受力特点,求解了一定区间内动齿的静电力并与有限元模拟计算结果进行了对比分析。采用微机电系统(MEMS)工艺制作出了无交叠梳齿驱动器,搭建了 Michelson 干涉仪光学测试系统,测试了无交叠梳齿驱动器的静态驱动特性。实验结果表明,所制作的无交叠梳齿驱动器在 28 V 偏压下机械位移可达 325 nm,相位差为 2π ;在 90 V 的偏压下能够获得 2.07 μm 静态位移。测试结果与保角变换及有限元模型分析结果一致,验证了所建数学模型的正确性,为无交叠梳齿驱动器的设计提供了理论与实验基础。

关键词:微机电系统(MEMS);光相位调制器;无交叠垂直梳齿驱动器;平动微镜;保角变换法;静电驱动

中图分类号:TN761.92;TH703.6 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20122008.1772

Driving characteristics of non-overlap vertical electrostatic combdriver for optical translational micromirror

ZHAI Lei-ying^{1,2*}, XU Jing¹, ZHONG Shao-long², WU Ya-ming¹

(1. State Key Laboratory of Transducer Technology, Shanghai Institute of Microsystem and Information Technology, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200050, China;
2. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

* Corresponding author, E-mail: lyzhai@mail.sim.ac.cn

Abstract: To design a non-overlap vertical electrostatic combdriver for the optical translational micromirror of an optical phase modulator, a mathematic model based on the conformal mapping was built to research the driving performance of the combdriver in detail. According to the theory of complex variable function, an analytical model was established for the electrostatic field of comb actuator by conformal mapping. Then, the electrostatic force in a certain displacement range was deduced by the analytical model for researching the movable comb finger. The results were compared with the corresponding resolution by the Finite Element Method (FEM). Finally, a non-overlap vertical combdriver was successfully fabricated by Micro Electronic Mechanic System (MEMS) process, and an optical Michelson interference system was constructed to measure the static driving characteristics of the

收稿日期:2012-04-11;修订日期:2012-05-08.

基金项目:国家 863 高技术研究发展计划资助项目(No. 2008AA03Z406, No. 2009AA03Z443);国家自然科学基金资助项目(No. 608-77066)

comb driver. The result shows that the displacement of proposed non-overlap vertical electrostatic combdriver is 325 nm (phase difference 2π) with a dc driving voltage of 28 V and the offset vertical comb actuator can be actuated to $2.07 \mu\text{m}$ under a dc driving voltage of 90 V. The measured results accord excellently with the simulated results using the conformal mapping and FEM method, which proves proposed analytical model to be correct. It can provide theoretical and practical bases for design of non-overlap vertical electrostatic combdrivers.

Key words: Micro Electronic Mechanic System(MEMS); optical phase modulator; non-overlap vertical comb driver; translational micromirror; conformal mapping; electrostatic actuator

1 引言

基于微机电系统(MEMS)技术的光学微镜驱动器在光通信、光学传感器、投影显示等领域有着诱人的应用前景^[1-5]。光学微镜驱动器的机械运动主要有扭转和平动 2 种方式,其中平动微镜驱动器的镜面运动方式有平面内平移^[6]及垂直平移 2 种情形。实现平面内平移运动的驱动器设计及制作工艺较为简单,而垂直平移为立体空间内的运动,其驱动器尤其是垂直梳齿驱动器的设计及制作难度大、工艺复杂、具有挑战性。光相位调制是光网络及光纤通信系统发展必不可少的技术^[7],光相位调制器可设计为基于垂直平移微镜的光学器件,通过微镜沿其法向的平移运动实现对入射光波的高精度、高速度、低损耗的光相位调制。微镜获得 2π 相差的位移量便可实现一个完整周期的相位调制,采用平动镜面实现光相位调制具有重大意义。在光学微位移检测、光干涉检测以及光相位调制^[8-13]等应用中具有良好的应用前景。

基于静电驱动原理的垂直梳齿结构^[14]是一种驱动性能优良的微镜驱动器,可以很好地实现非平面垂直运动,具有无迟滞,响应快,动态范围大、驱动电压低、调节精度高等优点,能够很好地满足光微位移调制的应用要求。采用 MEMS 工艺比较容易实现平面交叠梳齿^[15],可以设计为具有任意重叠长度或无交叠长度的梳齿结构。相对平面梳齿结构制作,采用 MEMS 工艺设计三维空间垂直梳齿的交叠结构难度大得多,目前已有的一些制作工艺^[16]较复杂,成品率较低。而将垂直梳齿设计为无交叠结构相对要容易得多。无交叠

垂直梳齿是垂直梳齿驱动器的新结构,其结构设计上可将动、静齿设计在 2 个不同的器件层上,由中介质层隔离,采用 MEMS 硅-硅键合工艺易于实现基于两层的动、静齿布局设计,具有制作工艺简单、易于实现、实用性强等优点。平面交叠梳齿在一定电压下、一定位移内静电力为一常数^[15],而动、静齿无交叠梳齿静电力随着它们的相对位置变化而不断变化,直到达到一定的交叠长度,因此在无交叠垂直梳齿的结构和驱动特性设计过程中有一些需要解决的新问题。与交叠梳齿驱动器有很大的不同,在一定位移内动齿所受静电力大小主要由边缘静电场决定。驱动器静电场的求解涉及空间静电场的拉普拉斯方程或泊松方程的边值问题,通常的一些方法很难得到无交叠梳齿边缘静电力的解析解,因而建立一个能够求解无交叠梳齿静电力的模型并得到解析解对于设计微光学平动微镜驱动器具有十分重要的意义。

保角变换能够求解复杂电磁场的反演问题,是求解静电和静磁问题的有效方法。保角变换能够将曲面化为平面、平面上的复杂区域变换成简单区域,且保持二维拉普拉斯方程或二维泊松方程不变,因而使复杂边界静电场求解转化为简单边界的静电场求解,甚至可能得到静电场的解析解,大大简化器件设计。本文从静电垂直梳齿驱动微结构的驱动理论出发,采用文献[17]中描述的保角变换的指数变换法建立了所设计无交叠垂直梳齿的二维平面静电力解析模型,不仅有效地将复杂的边界变为简单边界,而且得出了用于静电力计算的简单解析公式,并进一步研究了无交叠垂直梳齿驱动器输出静电力大小,分析了动齿不同情形下的受力特征。为了验证分析结果,本

文将保角变换模型的分析结果与有限元(FEM)法计算结果进行了对比,并简要分析了保角变换模型所存在的问题及造成两者差别的原因。最后采用 MEMS 工艺成功制作出了该类梳齿驱动器,采用 Michelson 干涉光学测量系统对所制备垂直梳齿驱动器性能进行了测试,测试结果与保角变换模型解析结果相符,证明了保角变换法对无交叠垂直梳齿结构力学性能分析的高效性与实用性。结果表明,所制作的平动微镜驱动器在 28 V 偏压下,镜面位移可达 325 nm,相位差为 2π ,能够满足光相位调制器行程要求。当偏压为 90 V 时,微镜能够获得 2.07 μm 的静态位移,可以实现更大行程的光学微位移调制。

2 非交叠垂直梳齿平动微镜驱动器

2.1 非交叠垂直梳齿平动微镜驱动器的结构

图 1 为所设计的光学微镜垂直梳齿驱动器。器件中央部分为圆形微镜主体,由单晶硅膜溅射金形成;镜面由悬臂梁支撑,镜面四周为呈辐射状并且相邻夹角相等的下动齿结构;静齿与动齿相互交错、对称地排列在圆形镜面周围,并分为上下 2 部分,且由 SiO_2 介质层隔离。上部分定齿(电极 1)与动齿(电极 2)之间施加驱动电压,形成垂直平移运动的垂直梳齿驱动器。整个垂直梳齿驱动器结构上主要由 4 层组成,分别为上梳齿层、介质层 I、下梳齿层和介质层 II。介质层 I 将上、下齿绝缘,介质层 II 将下动齿及底层衬底硅绝缘。动齿、镜面及悬臂梁下部体硅已全部去除,不仅

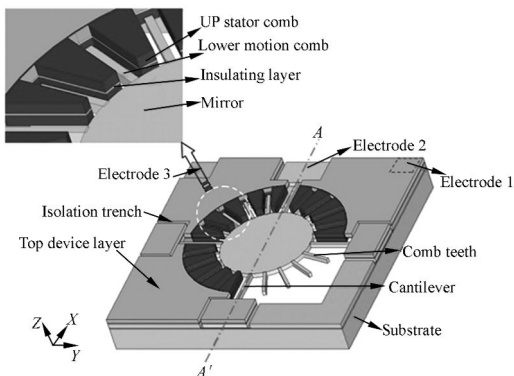


图 1 垂直梳齿结构简图

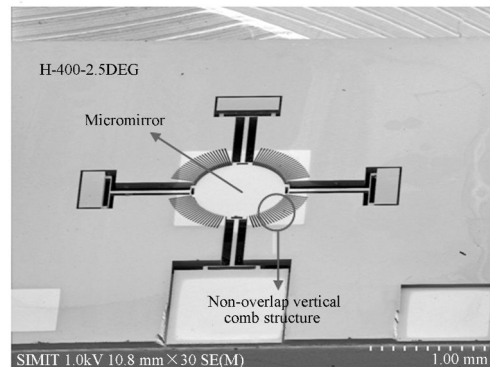
Fig. 1 Schematic diagram of vertical comb structure

能够有效地防止静电悬浮效应,保证了动、静齿间电场分布的对称性,而且使得镜面运动阻尼极大地减小。为了减小制造工艺难度,动齿、微镜及悬臂梁设计为同样的硅层高度。

2.2 非交叠垂直梳齿平移微镜驱动器 SEM 形貌

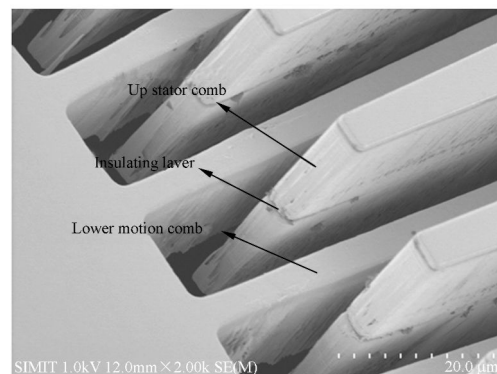
平面梳齿动、静齿采用 1 次光刻、刻蚀即可完成,而垂直梳齿动、静齿间具有较大的台阶,不可能在同一次光刻、刻蚀工艺中完成。因此,工艺设计中必然存在深坑光刻及动、静齿对准等问题。本文采用硅-硅键合工艺,将动、静齿安排于不同层上,避免了深坑光刻的难度。此外,设计了用于动、静齿刻蚀的自对准多层掩模。在掩模制作完成后无需任何对准加工工艺,仅采用干法刻蚀即可制作出全部的垂直梳齿结构,相关的工艺研究将在另一篇文章中详细讨论。

图 2 为采用 MEMS 工艺制作的垂直无交叠梳齿平移微镜驱动器 SEM 照片,图 2(a)为梳齿



(a) 垂直梳齿驱动器全貌 SEM 照片

(a) SEM image of whole view of the vertical combdrive



(b) 梳齿部分 SEM 照片

(b) SEM image of comb fingers

图 2 非交叠垂直梳齿微镜驱动器 SEM 形貌

Fig. 2 SEM images of non-overlap vertical comb driver for micromirror

驱动器全貌图,图 2(b)为梳齿部分细节照片。从图中可以看到所制备的梳齿驱动器完全符合图 1 中的设计结构,具有很高的垂直度、结构完整。动、静齿在镜面法线方向无交叠,对称地分布于不同的器件层,它们之间由中间介质层隔离,其初始相对距离由介质层厚度决定。动齿与镜面相连,镜面由悬臂梁支撑。在动、静齿间施加一定驱动电压信号后,微镜在动齿所受静电力的作用下使悬臂梁发生弹性变形从而产生垂直位移,最终实现光学微位移调制。

3 非交叠垂直梳齿驱动器的保角变换模型分析

保角变换是以复变函数^[18]为基础,将复平面 P 内某点 p_0 处的所有线素点集 D 通过变换函数 $w=f(p)$ 映射到 W 平面上的一个点集 G ,所有线素按同一比例伸长,任意 2 条曲线之间的交角保持不变。解析函数所实现的变换其导数 $f'(p) \neq 0$ 各点处都是保角的,即保角变换。利用保角变换可以将 P 平面上用电力线和等位线互相垂直所描述的一种电场,映射为 W 平面上的另一种电场图像而保持它们之间相互垂直。如果保角变换满足一定的边界条件则 2 平面上的对应点应具有相同的电位。

3.1 非交叠梳齿静电场分析的保角变换理论模型

梳齿驱动器结构参数主要有:间隙 d 、长度 l 、宽度 w 及高度 h 。其输出静电力在驱动电压一定时主要受到以上各个结构参数的影响。图 3(c)梳齿模型与所设计模型(图 3b)具有相同结构参数,因此可以采用其代替所设计无交叠梳齿驱动器模型进行相关的力学性能分析,器件的相关结构和力学参数如表 1 所示。

表 1 器件结构与力学参数

Tab. 1 Structural and mechanical parameters

参数	意义	值
$l, w, h/\mu\text{m}$	梳齿长、宽、高	200, 5, 20
n	梳齿数目	136
$d/\mu\text{m}$	梳齿间隙	4
$r/\mu\text{m}$	镜面直径	500
$h/\mu\text{m}$	镜面厚度	20
$k/\text{N} \cdot \text{m}^{-1}$	悬臂梁刚度	183.9

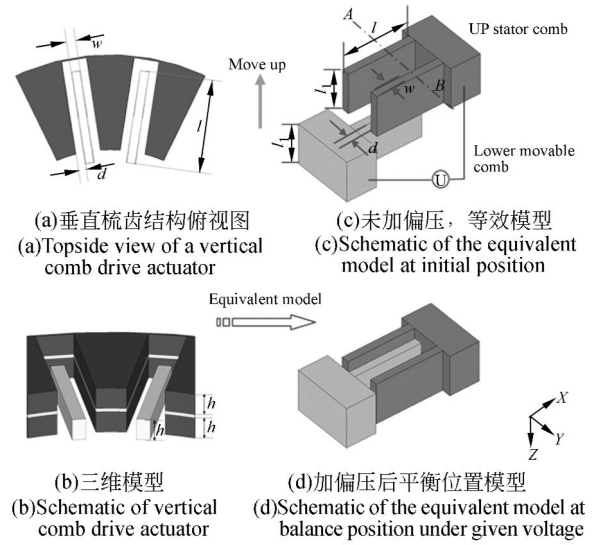


图 3 垂直梳齿结构模型简图

Fig. 3 Schematic diagram of vertical comb structure

图 3 中非交叠梳齿模型沿 AB 线在 YZ 平面内的截面如图 4 所示,当施加驱动偏压 U 后,在静电力作用下,动齿将由距定齿端部 $|t|$ 的位置运动至与动齿交叠长度 m 位置处,其中 d 为梳齿间 Y 向间隙, t 为动齿端部在 Z 轴上的坐标, m 为驱动静电力与悬臂梁弹簧力平衡后的梳齿交叠长度。

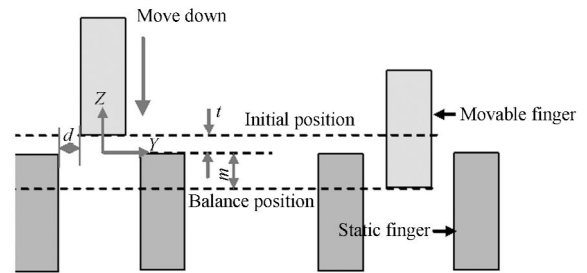
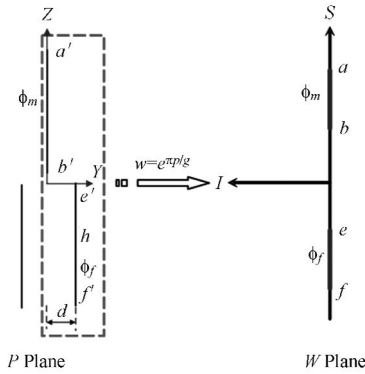


图 4 梳齿驱动器在 YZ 平面内的截面图

Fig. 4 Cross section of comb actuator in YZ plane

由于图 4(a)中梳齿为面元素,需要进一步简化为图 5(a)模型,此时仅包括线元素,该简化过程基于以下 2 点假设:(1)梳齿具有高的表面比,即 $l/d > 20$;(2)由于电场电力线大部分终止于动齿端部角落内,可以认为 $w \approx 0$ 。由此简化后的动、静齿在 P 平面内可由图 5(a)中线段 $a'b'$ 及 $e'f'$ 表示, a', b', e', f' 在 Z 轴上的坐标依次表示为 $z_a', z_{b'}, z_{e'}, z_{f'}$ 。由于梳齿为周期性结构,这里仅考虑单个周期结构,即红色方框中的右半平面,此

时线段 $a'b'$ 及 $e'f'$ 电势分别为 ϕ_m 、 ϕ_f 。 $a'b'$ 位于 P 平面的正实轴上, $e'f'$ 为 $y=d$ 平行于 Z 轴的线段。



(a) 假设 $w \approx 0$ 时图 3(a) 简化模型 (b) 保角变换示意图
(a) Simplified comb fingers of (b) Conformal mapping model
Fig. 3(a) with $w \approx 0$ of Fig. 4(a)

图 5 无交叠垂直梳齿的保角变换模型

Fig. 5 Conformal mapping model of non-overlap vertical comb finger

保角变换中的指数变换函数 $w = e^p$, 其中 $p = x + jy$, 为 P 平面内的复变函数, $w = s + ji$ 为 W 平面内的复变函数, 可将 P 平面内的平行于 Z 轴的直线变换成 W 平面内通过原点的射线族^[19], 因此采用指数变换可将 P 平面实轴变换为 W 平面的正实轴, 将 y 为常数的直线族变换为 W 平面内通过原点的射线。这里采用指数变换函数 $w = e^{\pi p/d}$ 进行变换后, Z 轴上的线段 $a'b'$ 映射至 W 平面的正实轴, $y=d$ 的线段 $e'f'$ 映射至 W 平面的负实轴, 从而将 P 平面的线段 $a'b'$ 及 $e'f'$ 及它们之间的点集全部映射至 W 平面。因此, 静齿变换为图 5(b) 中的线段 ef , 动齿变换为 ab , 两线段位于同一条直线上, a 、 b 、 e 、 f 在 S 轴上的坐标依次表示为 s_a 、 s_b 、 s_e 、 s_f 。其中各对应点的变换函数分别为: $s_a = e^{\pi z_a'/d} = e^{\pi(z_b'+1)/d}$, $s_b = e^{\pi z_b'/d}$, $s_e = e^{-\pi h/d}$, $s_f = 1$, $s_a > s_b > 0 > s_e > s_f$ 。

由于边缘静电场产生静电力作用于表示动齿的线段 $a'b'$ 上, 当梳齿无交叠部分时: $|s_a|$, $|s_b| \gg |s_e|$, 因此总的静电力可由从 z_a' 到 z_b' 积分得到, 当动齿和定齿足够长时, 单位长度静电力如式(1)^[18]:

$$F_e = \frac{\epsilon_0 \pi^2 U^2}{4d [K(q)]^2} \quad q \approx \sqrt{s_b / (s_b + 1)},$$

$$K(q) = F(\pi/2, q) = \int_0^{\pi/2} \frac{d\theta}{\sqrt{1 - q^2 \sin^2 \theta}}, \quad (1)$$

其中: $K(q)$ 为椭圆函数 $F[(\pi/2), q]$ 。

最终将二维平面扩展至三维模型, 即考虑 X 向长度 l 后, 单对梳齿静电力可由式(2)表示:

$$F_e = \frac{\epsilon_0 \pi^2 l U^2}{4d [K(q)]^2}, \quad (2)$$

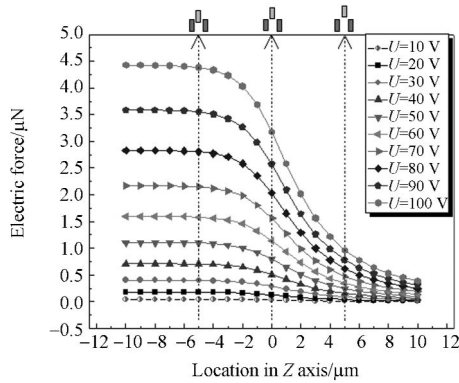
其中: ϵ_0 为真空介电常数。采用保角变换法得到了一个比较直观的解析公式, 其所表达的静电力大小包含了动、静齿相对位置, 而交叠梳齿的静电驱动力公式无法计算, 这对设计无交叠垂直梳齿具有重要的意义。

3.2 非交叠垂直梳齿驱动器的驱动特性

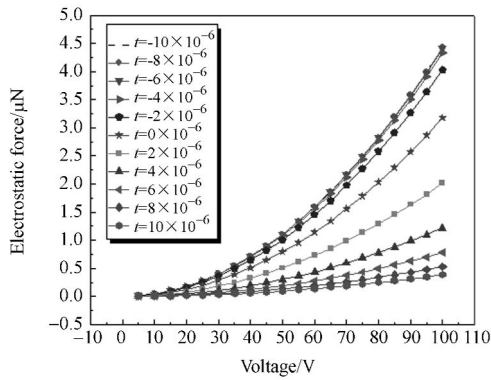
由式(2)可知, 在图 5(a) 模型中当动齿从 Z 轴负半轴逐步向正半轴运动时, 动齿所受静电力随相对位置 t 的变化而不断变化。本文对相对位置 t 、间隙 d 及电压 U 对输出静电力影响进行了深入地分析。

图 6(a) 为在固定电压 U 下, 动、静齿在不同相对位置 t 时由式(2)决定的静电力变化曲线图。从图 6(a) 中可以看到随着动齿向定齿逐渐靠近, 即 t 沿 Z 轴负向不断变化时, 输出静电力不断增大, 最终达到一个定值。说明随着动、静齿由未交叠到交叠过程中, 梳齿间静电力由边缘静电力主导逐步进入稳定静电场力, 而该值可由交叠梳齿静电力公式^[16] 计算得出。因此由保角变换方法可以完成非交叠齿的边缘静电力的计算, 可以定量分析动齿向定齿靠近过程中静电力变化情况。图 6(b) 为图 6(a) 中某一梳齿交叠量时, 静电力随驱动电压(沿箭头方向)的变化, 即动、静齿不同相对位置 t 下输出静电力随电压 U 变化图, 输出梳齿静电力与驱动电压的二次方成正比。随着动齿向静齿靠近, 静电力逐渐增大, 在交叠长度达到 $4 \mu\text{m}$ ($m \geq -4 \mu\text{m}$) 后, 随着交叠量的进一步增大, 静电力大小基本不再变化, 可见只有交叠量大于 $4 \mu\text{m}$ 后, 无交叠梳齿驱动器才工作在真正意义上的交叠部分。说明此时梳齿静电力输出进入了稳定阶段, 该阶段即可用交叠梳齿静电力公式进行描述。

相比平板电容驱动器, 非交叠梳齿可以通过增加梳齿数目及多个结构参数设计降低驱动电压。为了拓展所设计非交叠梳齿驱动器的应用范



(a) 不同偏压时, 静电力模拟结果随相对位置的变化
(a) Simulated electrostatic force changed with relative position under different bias voltages



(b) 不同相对位置时, 静电力模拟结果随电压变化曲线
(b) Simulated electrostatic force changed with different voltages at the different relative positions

图 6 电压及相对位置对静电力变化的影响

Fig. 6 Influence of bias voltage V and relative position on electrostatic force

围, 考察梳齿驱动器在大量程下的驱动特性, 以下计算中驱动电压均为 90 V 。图 7 所示为驱动电压 90 V 时, 动、静齿在不同梳齿间隙 d 下, 静电力大小随相对位置 t 的变化曲线图。从图中可以看到在间隙固定的情况下, 梳齿静电力变化与图 6(a) 中变化趋势相同。随着间隙减小, 静电力饱和值逐渐增大, 而且间隙越小静电力趋于该值的速率越快。

从以上保角变换模型分析结果可以看出, 该方法能够有效地分析非交叠齿间静电力随动、静齿相对位置及间隙大小变化的结果。对于给定的电极间隙 d , 静电力趋于饱和的变化区间长度不同。如 $d=4\text{ }\mu\text{m}$ 时, 动齿位置 t 由 $-2\sim 2\text{ }\mu\text{m}$, 输出静电力减小了 80% , 而 $d=0.5\text{ }\mu\text{m}$ 时该区间缩

短为 $[-0.5, 1]\text{ }\mu\text{m}$ 。与交叠梳齿驱动电压 U_m 相比, 工作于无交叠区域的非交叠梳齿驱动器, 获得相同的垂直位移时所需的驱动电压 U_n 要大一些。以所设计微镜驱动器为例, 其起始动、静齿相对位置 $t=0.5\text{ }\mu\text{m}$ 。相同结构参数的交叠梳齿静电力公式计算: $F_m = n\epsilon_0 lV^2/d$ 。在动齿获得相同的位移时, 以上两种设计所需电压比例 U_n/U_m 与位移量关系曲线如图 8 所示。从图中能够看到初始两者所需电压比为 $1.239:1$, 可见在相同条件下, 无交叠梳齿所需驱动电压增加幅度不大。当位移为 $4.5\text{ }\mu\text{m}$ 时, 两者比例接近 $1:1$, 此时无交叠齿重叠 $m=4\text{ }\mu\text{m}$, 说明此时无交叠梳齿静电力已可由交叠梳齿静电力公式计算。因此, 依据该模型分析结果, 结合 MEMS 工艺要求可以合理地设计并选择合适的梳齿驱动器结构参数。

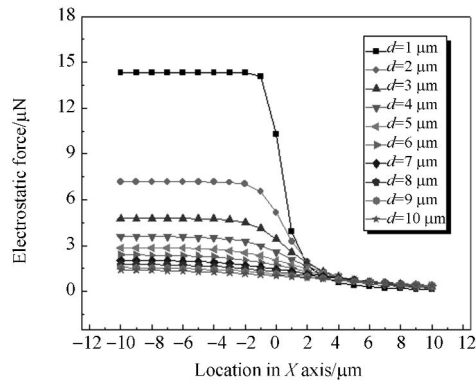


图 7 电压 $U=90\text{ V}$ 时, 不同间隙下输出静电力随相对位置的变化曲线

Fig. 7 Simulated electrostatic force changed with relative position under the different comb gaps at 90 V

4 保角变换模型与有限元分析的对比

ANSYS 是集结构、热、流体、电磁及声学于一体的大型通用有限元分析软件, 能够实现梳齿三维模型电磁场分析, 通过划分网格计算各个离散格点的电场作用力, 由传输矩阵实现最终的电磁场求解问题。因此, 有限元法具有实体建模的优势, 其计算结果与实际情形更为接近, 但运算量大且速度慢。为了验证以上保角变换模型解析结果, 采用有限元工具 ANSYS 对图 3(c) 中的三维模型进行了有限元分析, 并对两者结果进行了对比分析。

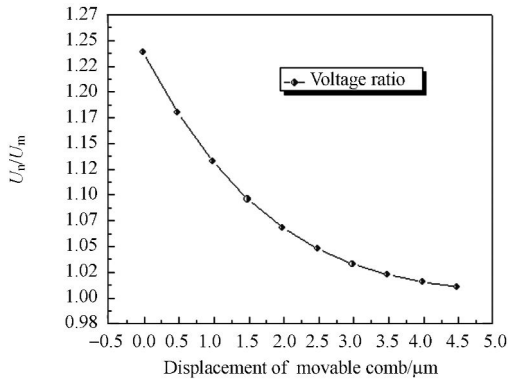


图 8 U_n/U_m 随动齿位移量变化曲线图

Fig. 8 U_n/U_m varied with the displacement of movable comb

由于以上保角变换模型忽略了梳齿宽度 w 的影响,会在一定情形下带入误差,作者采用 ANSYS 工具对宽度 w 对输出静电力的影响进行了模拟计算,结果如图 9 所示($U=90\text{ V}$)。从图中很容易看到当梳齿宽度大于 $4\text{ }\mu\text{m}$ 后,在任何相对位置 t 下,静电力基本趋于常数,其影响逐渐减小,而 t 越小,静电力趋于常数的最小宽度 w 值也越小,这对结构设计中增加梳齿数目、增加驱动力,选择合适的动、静齿间介质层厚度具有重要的意义。

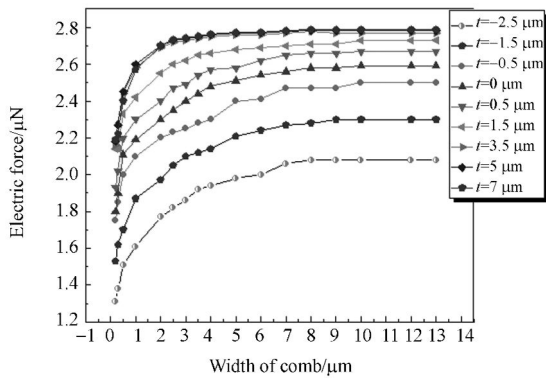
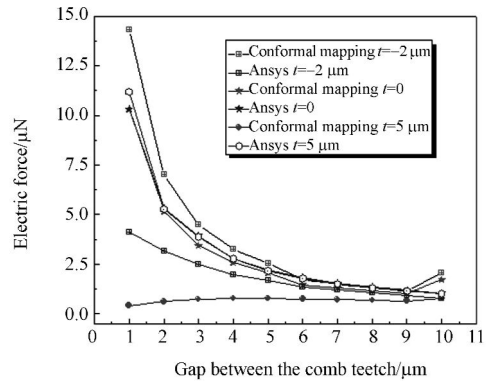


图 9 梳齿静电力随梳齿宽度变化曲线

Fig. 9 Electrostatic force changed with finger width w at a fix position t

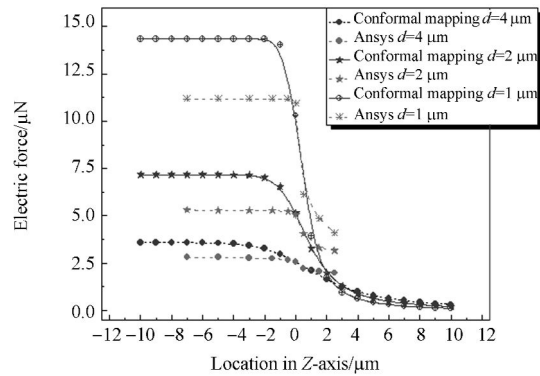
图 10(a)为 $U=90\text{ V}$ 时,不同动、静齿相对位置 t 下两种模拟方法所计算的静电力随间隙 d 的变化趋势对比结果。从图中可以看到在相对位置 t 为 $-2\text{ }\mu\text{m}$ 时,保角变换结果明显大于 ANSYS 计算结果,此时梳齿宽度 w 对静电力大小影响较小;当交叠为 0 时两者计算结果大致相同;随着动齿远离定齿($t \geq 5\text{ }\mu\text{m}$),梳齿宽度 w 的影响逐渐

增大,而我们在进行保角变换前假设 $w \approx 0$,因此 ANSYS 计算结果大于保角计算结果。图 10(b)为间隙 d 分别为 $4, 2, 1\text{ }\mu\text{m}$ 时不同交叠位置下的静电力变化结果。间隙越小两者差距越大,梳齿宽度 w 对静电力影响越大;间隙越大两者差别越小。因此当梳齿间隙大于 $4\text{ }\mu\text{m}$ 后,相同条件下保角变换模型可以准确计算此时静电力大小。



(a) 不同相对位置 t 静电力随间隙 d 变化曲线

(a) Electrostatic force t changed with parameter d under different t



(b) 不同间隙 d 下静电力随相对位置 t 变化曲线

(b) Electrostatic force changed with relative location t under the different d

图 10 $U=90\text{ V}$ 时保角变换及 ANSYS 模拟结果对比曲线

Fig. 10 Comparison between the results by ANSYS and conformal mapping method at 90 V

由上分析可知,在一定条件下,保角变换法能够准确求解无交叠梳齿受力结果,尤其在动静齿在交叠与未交叠临界位置领域时,保角变换法具有简单、高效、快速分析的特点。相比较而言,ANSYS 有限元法虽然能够采用实体建模,更加准确地分析各种情况下的受力结果,但建模较困难,边界条件复杂,运算量大,耗时长。因此,对于

无交叠垂直梳齿驱动器结构的求解,保角变换法能够满足设计要求,提高设计效能,是一个有效、简单的理论模型。

5 非交叠垂直梳齿驱动器的驱动特性测试

5.1 无交叠垂直梳齿驱动器测试光路

采用基于 Michelson 干涉原理的测试光学系统对所制备的垂直梳齿驱动器进行测试。具体测试光路如图 11 所示。采用红光半导体激光光源 ($\lambda=650\text{ nm}$),出射光由分束镜按 1:1 分束,光束 1 垂直入射固定镜,光束 2 也垂直入射垂直梳齿驱动微镜。两束光反射后按原路返回,经分光镜后形成光干涉图样。调节垂直梳齿驱动微镜与固定镜面光程差,当两者光程差接近于 0 时可得到最大的可见度。光干涉图样经小孔光阑后,用透镜将其聚焦至光电探测器上,光强大小直接由示波器读出。垂直梳齿驱动微镜施加某一驱动电压后,通过光干涉结果计算出相位变化^[19],进一步计算出微镜位移量,实现无交叠垂直梳齿驱动器的驱动特性的测量。

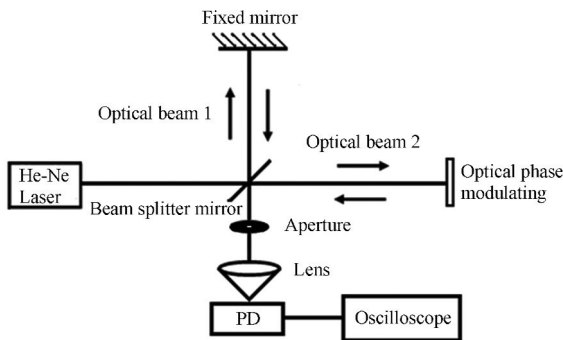


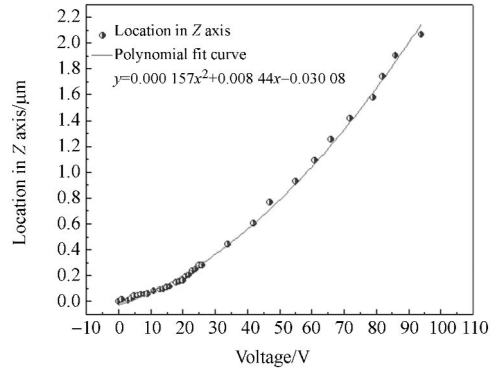
图 11 Michelson 干涉原理测试光路图

Fig. 11 Test setup based on Michelson interference

5.2 无交叠垂直梳齿驱动器测试结果

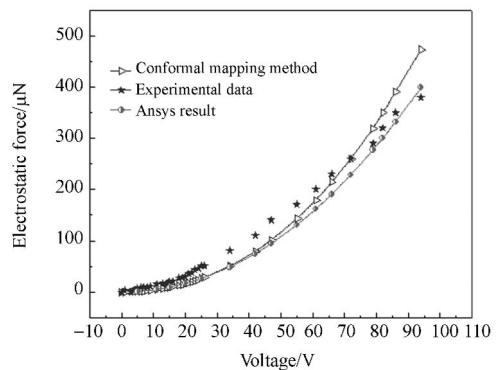
梳齿驱动器施加 0~90V 驱动电压时,测量得到镜面位移与电压关系曲线如图 12(a) 所示。从图中能够看到,微镜位移随驱动电压变化呈现二次方关系。当驱动电压为 28 V 时,镜面位移可达 $325\text{ nm}(\lambda/2)$,此时光相位差为 2π ;当偏压为 90 V 时,最大位移为 $2.07\text{ }\mu\text{m}$ 。根据虎克定律: $F=kx$, $k=183.9\text{ N/m}$,可以得到梳齿驱动器输出

静电力大小随电压变化曲线如图 12(b) 所示,为了对比,保角变换模型与 ANSYS 仿真计算结果也在图中给出。从图中可以看到两种方法在电压低于 45 V 时符合得非常好,当电压高于 45 V 时稍有差别,其中保角变换结果偏大,偏差来源于两者模型建立方式的差别。实验测试结果与两种方法模拟计算结果基本相符,相比较而言,实验结果与 ANSYS 模拟结果更为接近。实验结果与模拟结果差别除了来自模型本身的近似误差和测量误差外,垂直梳齿驱动器制作工艺误差造成的结构缺陷,结构参数变化也是误差的主要来源,如梳齿整体干法刻蚀精度误差、动、静齿端部过刻及毛刺等缺陷。总之,保角变换模型能够实现对所设计



(a) 镜面位移随电压变化曲线

(a) Test displacement of mirror changed with applied voltage



(b) 梳齿驱动器输出静电力随电压变化曲线

(b) Output electrostatic force of fabricated comb actuator changed with different voltages

图 12 无交叠垂直梳齿驱动器测试结果

Fig. 12 Measured results of non-overlap vertical electrostatic combdriver

无交叠垂直梳齿驱动器静电力快速、准确、高效的分析,尤其在低驱动电压时可以达到 ANSYS 有限元分析的精度,这对于设计该类器件具有较大意义。

6 结 论

研究了无交叠垂直梳齿微驱动结构静电力模型,采用保角变换法建立了该模型的解析方程,求解了一定区间内的静电驱动力,并采用有限元分析软件 ANSYS 对保角变换模型的解析结果进行了验证,对两者的差别进行了对比分析。最后,采

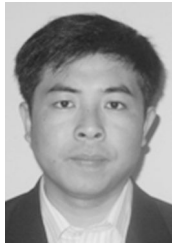
用 MEMS 工艺成功制作出了无交叠垂直梳齿驱动器,对其驱动特性采用光学干涉法进行了测试。结果表明,所制作的无交叠梳齿驱动器在 28 V 偏压下,机械位移可达 325 nm,相位差为 2π ,能够满足光相位调制器行程要求。当电压增至 90 V 时,静态位移可以达到 $2.07 \mu\text{m}$,驱动器驱动位移随电压变化曲线与保角变换模型解析结果基本一致,证明了所建立保角变换模型的正确性,满足模型建立快速、准确、高效分析的要求,为进一步优化器件结构设计,研制大位移、低功耗垂直梳齿驱动器奠定了理论与实验基础。

参考文献:

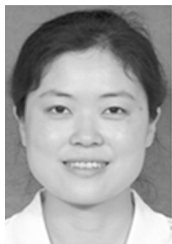
- [1] 穆参军,赵本刚,吴亚明. 高速 MEMS 扫描微镜动态变形特性研究[J]. 传感技术学报, 2008,21(4): 640-643.
MU C J, ZHAO B G, WU Y M. Study on dynamic deformations of high speed MEMS scanning micromirror[J]. *Chinese Journal of Sensors and Actuators*, 2008,21(4):640-643. (in Chinese)
- [2] 李四华,刘玉菲,高翔,等. 微机电系统扭转微镜面驱动器的研制[J]. 半导体学报, 2006,27(4):757-760.
LI S H, LIU Y F, GAO X, et al.. Analysis and fabrication of torsion micromirror actuators based on a MEMS technology[J]. *Chinese Journal of Semiconductors*, 2006,27(4):757-760. (in Chinese)
- [3] 王大鹏,韦穗. 数字微镜器件的相位调制性质[J]. 光学学报, 2007,27(7):155-160.
WANG D P, WEI S. Phase modulation properties of digital micromirror device[J]. *Acta Optica Sinica*, 2007,27(7):155-160. (in Chinese)
- [4] 杨梅,韩翔,林川力,等. 一种高制动效率大角度硅扭转微镜 MEMS 光开关的设计[J]. 纳米技术与精密工程, 2006,4(4):326-330.
YANG M, HAN X, LIN CH L, et al.. Design of an electrostatic silicon torsion micromirror for low drive voltage and wide angle MEMS optical switch applications[J]. *Nanotechnology and Precision Engineering*, 2006,4(4):326-330. (in Chinese)
- [5] 李四华,徐静,龙亮,等. 多台阶平板静电驱动的高占空比微镜阵列的研制[J]. 光学精密工程, 19(8):1816-1823.
LI S H, XU J, LONG L, et al.. Fabrication of high fill factor micro mirror array with multi-teraced plate structure [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011,19(8):1816-1823. (in Chinese)
- [6] LIU A Q, ZHANG X M, LU C, et al.. Optical and mechanical models for a variable optical attenuator using a micromirror draw bridge[J]. *J Micro-mech Microeng*, 2003,13(3):400-411.
- [7] 刘勇,周喙,朱震,等. 压电陶瓷光纤相位调制控制系统的研制[J]. 量子电子学报, 2008,25(3):379-384.
LIU Y, ZHOU N, ZHU ZH, et al.. Control system of piezoelectrical fiber-optic phase modulation[J]. *Chinese Journal of Quantum Electronics*, 2008,25(3):379-384. (in Chinese)
- [8] 邹定海,叶声华,王春和. 用于在线测量的视觉检测系统[J]. 仪器仪表学报, 1995,16(4):337-340.
ZOU D H, YE SH H, WANG CH H. A visual inspection system for on-line measurement [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 1995,16(4):337-340. (in Chinese)
- [9] WEI ZH ZH, ZHANG G J, LI X. The application of machine vision in inspecting position-control accuracy of motor control systems [C]. *Proceedings of the Fifth International Conference on Electrical Machines and Systems*, Shenyang; 2001: 1031-1038.
- [10] 刘勇,周喙,朱震,等. 压电陶瓷光纤相位调制控制系统的研制[J]. 量子电子学报, 2008,25(3):379-384.
LIU Y, ZHOU N, ZHU ZH, et al.. Control system of piezoelectrical fiber-optic phase modulation [J]. *Chinese Journal of Quantum Electronics*, 2008,25(3):379-384. (in Chinese)

- [11] TATSUTOSHI S, KENICHIRO F, KEN K, *et al.*. High-resolution spectroscopy using interleaved 100 GHz optical frequency comb scanned by phase modulator [J]. *Optics Communications*, 2011, 284(21):5180-5184.
- [12] TATSUTOSHI S, TAKASHI M, HIROSHI O. Single-shot tomography by means of VIPA and spatial phase modulator installed optical interferometer [J]. *Optics Communications*, 2011, 284(1):144-147.
- [13] BHATTI A, RAWESHIDY H S, MURTAZA G. Optical response of an all-fibre acoustooptic phase modulator using aluminium nitride coating [J]. *Optics Communications*, 2000, 176(4):355-363.
- [14] JEONG K H, LEE L P. A novel microfabrication of a self-aligned vertical comb drive on a single SOI wafer for optical MEMS applications [J]. *J. Micromech. Microeng.*, 2005, 15(2):277-281.
- [15] JAECKLINT V P, LINDER C, ROOIJ N F D, *et al.*. Micromechanical comb actuators with low driving voltage [J]. *J. Micromech. Microeng.*, 1992, 2(4):250-255.
- [16] 池积光, 车录锋, 王跃林. 基于塑性变形的自对准垂直位错梳齿结构制作工艺 [J]. *功能材料与器件学报*, 2008, 14(3):663-668.
- CHI J G, CHE L F, WANG Y L. Fabrication process of self-aligned vertical offset comb structure using plastic deformation [J]. *Journal of Functional Materials and Devices*, 2008, 14(3):663-668. (in Chinese)
- [17] ANDREW YEH J L, HUI C Y, TIEN N C. Electrostatic model for an asymmetric combdrive [J]. *Journal of Microelectromechanical Systems*, 2000, 9(1):126-135.
- [18] 郭洪芝, 藤桂兰. 复变函数 [M]. 天津: 天津大学出版社, 2002.
- GUO H ZH, TENG G L. *Complex Variable Function* [M]. Tianjin: Tianjin University Press, 2002. (in Chinese)
- [19] WANG S H, QUAN C, TAY C J. A genetic optical interferometric inspection on micro-deformation [J]. *Optik*, 115(12):564-568.

作者简介:



翟雷应(1977—),男,山西大同人,博士,2002年、2006年于太原理工大学分别获得学士、硕士学位,主要从事光学 MEMS 器件设计与工艺制作的研究。E-mail: lyzhai@mail.sim.ac.cn



徐静(1977—),女,四川江油人,博士,副研究员,1998年于武汉测绘科技大学获得学士学位,2001年于武汉大学获得硕士学位,2004年于浙江大学获得博士学位,主要从事 MEMS 光通信器件与光纤传感器的研究。E-mail: xujing@mail.sim.ac.cn



钟少龙(1974—),男,山西五寨人,高级工程师,1997年于南京理工大学获得学士学位,主要从事光纤传感技术,高性能嵌入式系统等方面的研究。E-mail: shaolongzhong@mail.sim.ac.cn

导师简介



吴亚明(1966—),男,湖北孝感人,博士,研究员,博士生导师,1986年、1989年于华中科技大学分别获得学士、硕士学位,1993年于中科院上海光学精密机械研究所获博士学位,主要从事光学 MEMS 技术、光通信器件、光电传感、集成光学等方面的研究。E-mail: yamingwu@mail.sim.ac.cn