

文章编号 1004-924X(2004)03-0249-05

# 一种抗灰尘的近场承载微工作台设计

赵大鹏, 李庆祥, 李玉和, 訾艳阳, 王 亮, 彭海成  
(清华大学 精密仪器与机械学系, 北京 100084)

**摘要:**为满足近场光存储的高密度、高速度和集成化的要求,提高近场界面耦合效率,消除灰尘对固体浸没透镜(SIL)的磨损,设计了一种新型的承载微工作台,并建立了系统动力学模型。微工作台正负压力并存的结构极大地提高了承载刚度及工作稳定性;气垫面的V形轨道设计及独特的负压力布局有效减少了流入SIL底面的灰尘颗粒;SIL底面刻饰的凸台有利于获得较高的近场耦合效率,同时减小了与盘面碰撞的概率。理论分析和计算表明,微工作台的近场间距小于50 nm,承载力可达88 mN,SIL底面灰尘颗粒明显减少,微工作台具有良好的工作姿态,满足了近场光存储的需要。

**关键词:**微工作台;气垫面;V形轨道;负压力;近场光存储

**中图分类号:**TH703 **文献标识码:**A

## Design of a subminiature anti-particles load-supporting stage for near-field optical storage

ZHAO Da-peng, LI Qing-xiang, LI Yu-he, ZI Yan-yang, WANG Liang, PENG Hai-cheng

(State Key Laboratory of Precision Measurement Technology and Instruments,  
Tsinghua University, Beijing 100084, China)

**Abstract:** In order to meet the requirements of the near-field optical storage system for higher density, higher communication speed and integration, a subminiature anti-particles load-supporting stage was designed for low wear and high near-field coupling efficiency. A model of air bearing surface was investigated and solved using the finite volume method for analysis of the flying characteristics. The abundant negative pressure sufficiently enhances the stiffness and stability of the stage. The wedge-shaped rails and the novel distribution of negative force efficiently reduce the particles. The rail etched on the SIL achieved ultra sub-micron displacement from the disk surface. The theoretical analysis and computation show that a near-field gap of less than 50 nm can be successfully obtained. The carrying capacity exceeds 88 mN. Few particles are retained under the SIL. The flying head is robust for the near-field optical system.

**Key words:** subminiature load-supporting stage; air bearing surface; wedge-shaped rail; negative pressure; near-field optical storage

收稿日期:2003-12-11;修订日期:2004-02-13.

基金项目:国家自然科学基金(50305012),高等学校博士点专项科研基金(20020003015)资助项目

## 1 引言

基于固体浸没透镜(Solid Immersion Lens, SIL)的近场光存储技术可使成像分辨率突破衍射极限,极大地提高存储密度。为满足高密度、高速度和集成化的要求,提高界面近场耦合效率,此技术多采用气浮微工作台<sup>[1-4]</sup>承载光学元件,跟踪光盘高速旋转产生的轴向跳动和自身振颤。微工作台内嵌有 SIL,在附面气流的作用下,微工作台将 SIL 与盘片的间距保持在 50 nm 左右。此外,考虑 SIL 和物镜相互之间位置误差对存储光斑光学特性的影响,要求物镜和 SIL 的间距变化小于  $\pm 0.1 \mu\text{m}$ , SIL 倾斜小于  $\pm 1^\circ$ 。由于近场间距接近甚至小于分子平均自由程,高速附面气流夹杂的灰尘颗粒会破坏微工作台的工作稳定性<sup>[1]</sup>,并严重磨损 SIL 底面。本文设计的微工作台具有抗灰尘、大承载、飞高恒定等特点,适用于多种近场光存储系统。

## 2 微工作台的结构设计

微工作台的工作原理是基于流体力学的微流动理论。当光盘高速旋转时,由于气体分子粘滞作用的存在,在光盘表面形成附面气流。因微工作台底面刻蚀有复杂的三维气垫面,气流在气垫面作用下,在盘面和微工作台底面之间形成了一个类似空气动力学轴承的空气润滑薄膜,使二者脱离接触,从而获得具有较高近场耦合效率的深亚微米近场间距。

承载系统结构如图 1 所示。微工作台 1 整体尺寸为  $2.032 \text{ mm} \times 1.6 \text{ mm} \times 0.6 \text{ mm}$ 。为保证光盘在高速旋转的过程中,经过物镜的激光束准确聚焦于 SIL 底面,采用了将 SIL 7 和聚焦物镜 6 集成为一个微工作台的结构设计。SIL 顶部为球冠形,半径为 0.5 mm,高为 0.35 mm,底部为长方体的基座,基座底面正方形边长为 1 mm,基座高为 0.15 mm,其底面用离子束刻蚀法加工有一个直径为 0.4 mm,高为 140 nm 的圆形凸台。微工作台通过球形铰链 5 与自适应舌片 4 联接,自适应舌片 4 经过激光焊点 2 固定在柔性悬架 3 上。

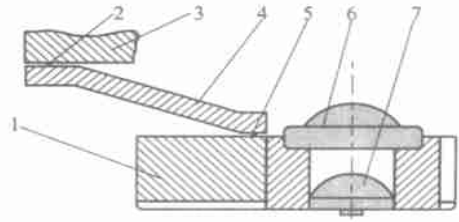


图 1 承载系统结构  
Fig. 1 Structure of the load-supporting system

## 3 微工作台气垫面设计

微工作台三维气垫面设计是系统获得稳定近场间距的核心技术,气垫面结构如图 2 所示。底面是沿  $x$  方向和  $y$  方向抛物面叠加形成的类球面,该结构有助于改善台盘界面的摩擦学特性,防止气垫面和盘片突发接触时产生月牙力,增强了微工作台的可靠性。此外,类球面存在对工作过程中气流的引入导出也有一定影响,从而能在一定程度上调整微工作台的工作姿态。该气垫面沿长度方向的球冠面高度为 30 nm,沿宽度方向的拱形面高度为 10 nm。

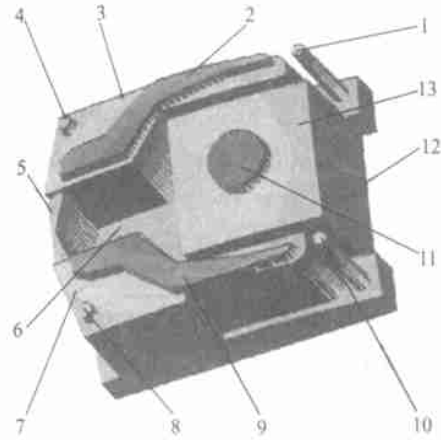


图 2 三维气垫面形貌  
Fig. 2 Profile of 3D air-bearing surface

由图 2 可知,微工作台底面按刻蚀深度分为 3 层,最上方的是气垫面(Air Bearing Surface, ABS),包括图中编号为 1, 2, 4, 8, 9, 10, 11 的轨道。中间为浅通气槽(Shallow Recess),包括编号为 3, 5, 7, 13 的轨道,浅通气槽的刻蚀深度为  $0.15 \mu\text{m}$ ,在轨道 5 上刻蚀有一个小的豁口。最低的部分形成主通气槽(Main Recess),包括 6, 12, 主通气槽深

度为 3 μm。气垫面沉积有 2.5 nm 的类金刚石薄膜(Diamond-Like Carbon),保护气垫面不受各种物理作用和化学作用的腐蚀,同时增强微工作台在工作过程中的耐磨能力,改善台盘界面的摩擦学特性。

图 2 中,浅通气槽边长 1 mm 的正方形轨道 13 是由 SIL 基座底面形成的,在轨道 13 上刻蚀有直径为 0.4 mm 的圆形轨道 11,该圆形凸台有助于减小气流导出边受到的正压力,使微工作台具有更稳定的工作姿态,同时还降低了 SIL 与盘面碰撞的概率,提高了微工作台的工作稳定性。将 SIL 底面设计为气垫面的轨道有效地保证了近场间距的形成,可获得较高的近场耦合效率。微工作台采用离子束刻蚀和超精密研磨等技术加工。

#### 4 工作姿态分析与仿真<sup>[5]</sup>

根据柔性悬架和微工作台的自身特点,可将其简化为弹簧-阻尼系统。如图 3 所示,取微工作台被支撑点为坐标原点,微工作台长度方向为 X 轴,宽度方向为 Y 轴,竖直方向为 Z 轴,微工作台在工作过程中,可视为沿 Z 方向平动、绕支撑点沿 X 方向俯仰和 Y 方向滚动的三自由度刚体。附面气流由 X=0 mm 一侧导入, X=2.032 mm 一侧导出。

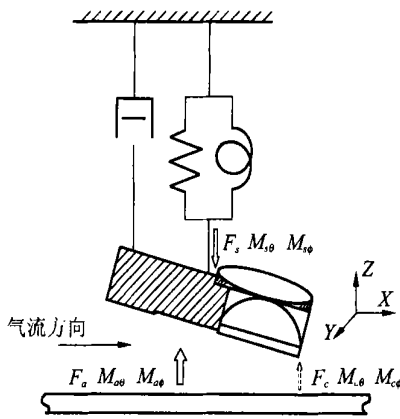


图 3 微工作台的力学模型  
Fig. 3 Mechanics model of the micro-stage

微工作台工作过程中在动压空气润滑膜气浮力、柔性悬架加载力和自身重力的作用下处于稳定工作状态,其被支撑点的动力学方程为:

$$\begin{cases} mh = F_a + F_s + G \\ I = M_a + M_s + M_G \\ I = M_a + M_s + M_G \end{cases}, \quad (1)$$

式(1)中  $m, I, I$  分别为微工作台质量、俯仰转动惯量和滚动转动惯量;  $h, \theta, \phi$  分别为微工作台被支撑点的 Z 向位移、俯仰角和滚动角;  $F_a, M_a, M_a$  分别为气浮力及其俯仰力矩和滚动力矩,

$$F_a = \iint_A (p - p_a) dx dy, M_a = \iint_A (p - p_a) dx dy, M_a = \iint_A (p - p_a) dx dy,$$

其中  $p$  是气浮力分布函数;  $p_a$  为大气压;  $A$  为微工作台底面积;  $F_s, M_s, M_s$  为柔性悬架对微工作台的压力及其俯仰力矩和滚动力矩;  $G, M_G, M_G$  分别为微工作台的重力、俯仰力矩和滚动力矩。

微工作台与盘面间距仅为几十 nm,接近甚至小于分子平均自由程,此时润滑气体不能再视为连续流,必须当作稀薄气体处理。为了更精确地反映微小间隙内滑移流的影响,采用新 1.5 阶滑移模型对传统雷诺方程进行修正,无量纲形式的修正雷诺方程表示为:

$$\frac{\partial}{\partial X} [\varrho PH^3 \frac{\partial P}{\partial X} - x PH] + \frac{\partial}{\partial Y} [\varrho PH^3 \frac{\partial P}{\partial Y} - y PH] = \frac{\partial}{\partial T} [PH], \quad (2)$$

其中  $X = \frac{x}{L}, Y = \frac{y}{L}, H = \frac{h}{h_0}, P = \frac{p}{p_a}, L$  为微工作台的长度;  $h_0$  为微工作台尾随边中心点与盘面的间距;  $\varrho$  为泊肃叶系数,它反应了滑移流的影响。

对新 1.5 阶修正模型,  $\varrho = 1 + 6a \frac{K_n}{PH} + \frac{8}{3} \left( \frac{K_n}{PH} \right)^2$ , 其中  $a$  是调节系数,对于空气  $a$  取 1;  $K_n$  是努森数;  $K_n = \lambda / h_0, \lambda$  是分子平均自由程;  $x = 6\mu UL / (p_a h_0^2)$  和  $y = 6\mu VL / (p_a h_0^2)$  分别为 X 和 Y 方向的轴承数;  $\mu$  为空气粘度;  $U, V$  分别是附面气流 X 和 Y 方向的线速度;  $\beta = 12\mu L^2 / (p_a h_0^2)$  为挤压数;  $\omega$  是盘片的角速度;  $T = t / t_0, t_0$  是时间。

采用迎风格式的有限体积法对方程组(1)和方程(2)联立求解。工作过程中,微工作台位于盘片 35 mm 半径处,盘片的转速为 3 600 r/min,微工作台的承载力为 88.2 mN,巡航角为 0°。经数值计算得到的仿真结果见表 1。

表 1 仿真结果

Tab. 1 Simulation results

技术指标名称	仿真结果
SL 最小近场间距	31.366 nm
SL 最大近场间距	40.364 nm
微工作台的正压力	148.82 mN
微工作台的负压力	60.61 mN
微工作台的承载能力	88.21 mN
物镜与 SL 的间距变化	0
微工作台的俯仰角	40.354 $\mu$ rad
微工作台的滚动角	0.351 $\mu$ rad

可见,SL 的近场间距大于 30 nm 小于 50 nm,物镜与 SL 间距恒定,SL 倾斜远小于  $1^\circ$ ,满足近场光存储系统的需要。

微工作台底面压力分布如图 4 所示。工作过程中,光盘高速旋转产生附面气流,气流由引入边进入微工作台底面,并由图 2 中浅通气槽的轨道 3,7 流向气垫面的轨道 2,9,因气垫面和浅通气槽的高度差极小,附面气流受到极大挤压,形成引入边的正压力。轨道 5 的凹槽有利于动压空气润滑膜的建立,当气流由轨道 5 进入主通气槽 6 时,因主通气槽和气垫面存在相对较大的高度差,气流此时进入一个相对开阔的区域而迅速膨胀,使被压缩的气流迅速释放。此时在主通气槽产生小于大气压的气浮力,形成将微工作台吸向盘面的负压力,即出现负压效应。气流经过主通气槽后流向 SIL 底面,由于轨道 11 和 13 的高度差极小,气流再次被压缩,形成导出边的正压力,它和引入边的正压力共同支撑微工作台,使其与盘面保持近场间距。气流经过 SIL 后最终流入导出边的凹槽 12 形成尾随边的负压力,该力将微工作台头部拉向盘面,增加了其工作俯仰角,提高了微工作台工作稳定性。轨道 1,4,8,10 构成微工作台的停泊点,工作过程中一旦发生台盘接触,碰撞将最先发生在停泊点,避免划伤 SIL 及主轨道。

通过计算可知,工作过程中附面气流的改变将引起正压力和负压力同步变化,保证了净压力相对恒定,从而使微工作台在不同转速、不同半径、不同海拔高度具有更加恒定的近场间距。因此,负压力的存在极大地提高了微工作台的承载刚度,使其具有更强的抗扰动性和更好的自适应性。这种正负压力并存的结构极大地提高了微工作台的工作稳定性,并有效地减小了加工误差的影响。

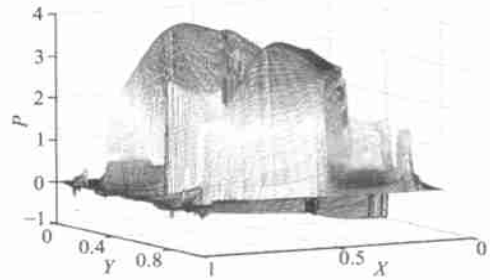


图 4 微工作台底面压力分布

Fig. 4 Pressure profile of the bottom of the micro stage

## 5 微工作台抗灰尘特性分析

根据微工作台气浮力函数计算结果,其底面流场分布如图 5 所示。由于微工作台工作时的俯仰角较小,气垫面引入边和盘面的间距小于 300 nm,因此附面气流夹杂的直径大于 300 nm 的灰尘颗粒被图 2 中引入边的 V 形导轨 3 和 7 阻挡,灰尘颗粒在导轨两侧聚集,无法进入微工作台底面,这有利于动压空气润滑膜的形成,提高了微工作台的工作稳定性。流入气垫面的灰尘颗粒进入靠近引入边的主通气槽后,由于此区域存在较大的负压力,灰尘颗粒将被吸入主通气槽,无法流向 SIL 底面;此外,流向导出边的部分灰尘颗粒在图 2 中渐开式导轨 2 和 9 的作用下流出气垫面,在导出边两侧形成密度较大的灰尘粒子流;同时,SIL 底面的灰尘颗粒还将被图 2 中导出边的负压力拉入主通气槽 12,因此最终保证 SIL 底面的灰尘颗粒很少,有效减小了 SIL 的磨损。

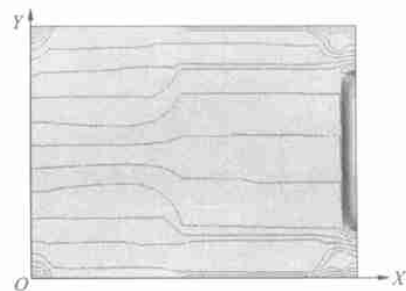


图 5 气垫面流场分布

Fig. 5 Flow distribution of the air-bearing surface

## 6 结 论

(1)微工作台在工作过程中同时受到正压力和负压力,极大地提高了承载刚度,使其具有更强的抗扰动性和更好的自适应性;

(2)较小的工作俯仰角使微工作台气流引入边与盘面间距较小,有效阻挡了大颗粒灰尘进入气垫面,但过小的工作俯仰角将影响微工作台的工作稳定性;

(3)负压力对灰尘颗粒具有明显吸附效应,较大的负压力能有效减少 SIL 底面的灰尘颗粒数量;

(4)引入边的 V 形导轨对灰尘颗粒有明显的阻挡作用,渐开式的导轨能有效地将灰尘颗粒导出气垫面;

(5)微工作台使 SIL 与盘面的最大间距为 40.364 nm,最小间距为 31.366 nm,承载力为 88.2 mN,满足了近场光存储系统的需要。

### 参考文献:

- [1] LI Y, SHARMA V. The spin-off of particles on a magnetic disk[J]. *Asme J Tribology*, 2000, 122:293-299.
- [2] WU L, BOGYD B. Use of an upwind finite volume method to solve the air bearing problem of hard disk drives[J]. *Computational Mechanics*, 2000, 26:592-600.
- [3] SHENG G, LIU B, HUA W. Structure and mechanics study of slider design for 5 ~ 15nm head-disk spacing[J]. *Ieice Trans Electron*, 1999, E82-C, 2125-2131.
- [4] TERRIS B D, MAMIN H J, RUGAR D. Near-field optical data storage[J]. *Appl Phys Lett*, 1996, 68:141-143.
- [5] YOON S J, CHOI D H. Adjoint design sensitivity analysis of molecular gas film lubrication sliders[J]. *Journal of Tribology Transactions of the Asme*, 2003, 125:145-151.

**作者简介:**赵大鹏(1978 - ),男,黑龙江人,北京清华大学精密仪器与机械学系博士研究生,主要研究方向为近场光存储及 MEMS 设计与制作;

李庆祥(1939 - ),男,河北省人,北京清华大学精密仪器与机械学系教授,博士生导师,主要研究方向为精密仪器测控、微纳测量技术、微机械技术。