

硅基纳机电探针及其敏感和执行特性^{*}

杨尊先 李昕欣 王跃林 鲍海飞 刘 民 陆德仁

(中国科学院上海微系统与信息技术研究所 传感技术联合国家重点实验室, 上海 200050)

摘要: 阐述了集成纳机电探针实现超高密度存储的工作原理, 并对所设计的结构进行了力学理论计算和有限元模拟。采用硅基微纳机械加工工艺, 将压阻敏感器和电热纳米针尖一体集成到硅悬臂梁上, 实现器件制作。对加热电阻进行温度标定, 得到了加热电阻与温度间二次关系曲线。在此基础上对器件进行微秒级瞬态电热特性分析和测试, 测试结果与理论计算结果和有限元模拟结果都有较好的吻合。测试结果表明在4V 脉冲电压下, 加热时间为3μs 时, 针尖温度达到463.15K, 相应的加热电阻的降温时间常数为6.2μs, 数据写入速度达到近百kHz。悬臂梁上的压阻器件敏感度(电阻相对变化)在 $2 \times 10^{-7} N$ 预力作用针尖处时, 达到了 5.41×10^{-4} , 满足纳米数据坑读出灵敏度的要求。

关键词: 悬臂梁-针尖探针; 纳机电系统技术; 压阻敏感; 电热纳米针尖; 数据存储技术

PACC: 0670M

中图分类号: TP212.6

文献标识码: A

文章编号: 0253-4177(2004)07-0863-06

1 引言

作为一种有希望成为新一代高密度存储器产品的纳机电悬臂梁-针尖型超高密度存储器将利用电加热的纳米尺寸针尖进行数据存储, 具有阵列集成化和可批量制造的优点, 能够实现近百 Gbit/in² 存储。在这方面IBM 公司和斯坦福大学等做了一些有益的研究工作^[1]。但研究的内容是通过两个悬臂梁来实现读写功能, 读写分开无法用同一个器件实现数据写入和读出。近年来, IBM 也研究过热读写一体集成于同一电热探针的技术^[2], 但将读和写功能用同一加热的针尖来完成, 造成读写特性分别优化的困难。国内也有利用腐蚀技术制作探针^[3], 但他们利用的是GaAs 的各向异性腐蚀技术, 器件使用在光学方面。本文致力于研究一种将针尖热写入和压阻读出两个功能一体集成在同一悬臂梁-针尖结构上的一维阵列器件。在阐述器件的工作原理后通过理论计算和有限元仿真得到器件的设计参数。采用硅基微纳机电技术实现器件的制造。着重对器件进

行电热性能和压阻性能分析和测试。性能测试结果表明器件性能符合设计要求, 为实现可应用的器件打下了良好的基础。

2 器件工作原理和微纳机电结构设计

本文所设计的一维阵列器件包含十个并行工作的悬臂梁-纳米针尖探针, 每个探针上集成了纳米尺寸针尖、加热电阻和压阻式微力/微位移敏感器件。单个探针的基本结构如图1 所示。

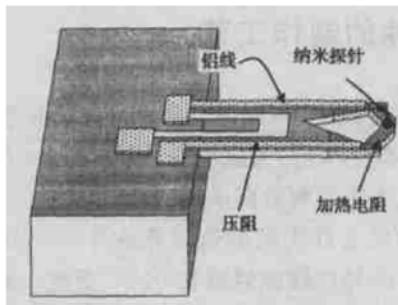


图1 集成了压阻和热针尖的单个探针结构示意图

Fig. 1 Schematic of single cantilever probe with piezoresistor and nano-tip integrated

* 国家重点基础研究发展规划(No. G1999033103)和上海市纳米专项课题(No. 0111NM077)资助项目

杨尊先 男, 1973年出生, 博士研究生, 从事微纳电子机械系统技术的研究。

2003-07-20 收到, 2003-12-01 定稿

©2004 中国电子学会

在数据写入过程中,先对悬臂梁施加一个初始力(10^{-7} N量级^[1]).当纳米探针在存储介质上扫描到数据点写入位置时,加热电阻被存储写入信号脉冲电流加热,纳米针尖处的温度迅速升高.当纳米探针的温度高于存储介质薄膜的玻璃转变温度时,接触点处介质便发生微小区域软化,针尖在悬臂梁初始力配合作用下陷入到介质中形成记忆坑(代表0或1).相反,当没有脉冲电流时,介质的相应位置上则不会形成记忆坑.由于针尖是纳米尺寸的,其热容很小,对微秒级的电热脉冲来得及反应,可以形成只有几十个纳米的记忆坑.从而实现超高面密度的数据写入,存储面密度可达几十至几百Gbit/in².器件读出是通过悬臂梁上压阻感应出探针在存储介质(有无记忆坑)不同位置时悬臂梁根部挠度变化并转化为电信号,从而读出存储介质上的存储信息.

根据数据读写的要求,悬臂梁的扫描预力应在 2×10^{-7} N左右^[1].据此在忽略梁的自重后,用悬臂梁末端受力模型进行结构分析和设计,依次得到了该结构的最大挠度、弹性系数、最大应力和共振频率特性参数的表达式,然后设计出器件的各个结构参数.并用ANSYS有限元模拟软件对结构参数进行了仿真优化,仿真结果和理论计算结果列于表1.

表1 悬臂梁力学特性参数表

Table 1 Mechanical parameters of the cantilever

力学参数	理论计算表达式 ^[4]	理论计算结果	有限元仿真结果	容差/%
针尖处最大挠度/nm	$y_{\max} = \frac{4FL^3}{Ebh^3}$	16.525	17.4	5
弹性系数/(N·m ⁻¹)	$k = \frac{Ebh^3}{4L^3}$	12.103	11.494	5
最大应力/(N·m ⁻²)	$T_{\max} = \frac{6EL}{bh^2}$	8.0526×10^5	9.0551×10^5	11
基频/Hz	$f_0 = \frac{1.0019}{2\pi} \times \frac{h}{L^2} \sqrt{\frac{E}{\rho}}$	2.6106×10^5	2.92814×10^5	10

在表1中,悬臂梁针尖初始作用力为 $F=2\times 10^{-7}$ N,悬臂梁的长度 $L=102\times 10^{-6}$ m,悬臂梁的宽度 $b=38\times 10^{-6}$ m,悬臂梁的厚度 $h=2\times 10^{-6}$ m,压阻扩散区的结深 $h=0.5\times 10^{-6}$ m.从表1所示的结果可以看出:简化的理论结构模型计算结果与有限元模拟结果符合较好.

3 器件的制作工艺

器件是以SOI(350μm硅衬底、1μm氧化层和8μm n型硅结构层)为原材料,采用如图2所示的微纳机械加工工艺制造而成的.

纳米尺寸硅尖的制造是先在40℃、40% KOH溶液中各向异性腐蚀后再在950℃温度下氧化削尖而成^[5,6].图3(a)是形成的硅针尖SEM照片,通过这种方式制得的硅尖的曲率半径小于40nm,能够达到器件30Gbit/in²面密度存储的要求.经过KOH腐蚀制得的硅尖,如果直接进行氧化削尖,则很容易在以后的工艺中磨损,因此在本实验中采用了工艺过程中逐步氧化削尖的方式,即整个工艺过程中多次氧化均在950℃条件下进行.加热电阻的制备采用了硼预沉积后在氮气保护下高温长时间再分布,这样可

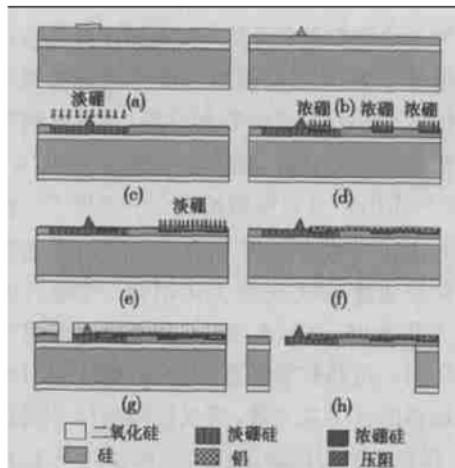


图2 器件制作工艺流程图 (a) 氧化并对针尖处进行光刻; (b) KOH 腐蚀硅尖; (c) 加热电阻区淡硼扩散; (d) 引线孔浓硼扩散; (e) 压阻淡硼扩散; (f) 刻蚀铝引线; (g) 正面刻蚀梁; (h) 背面深刻蚀并释放器件

Fig. 2 Process flow of the devices (a) Oxidation and pattern the tip area; (b) KOH etch for tip; (c) Light boron diffusion for heater; (d) Dense boron diffusion for hole; (e) Light boron diffusion for piezoresist; (f) Pattern Al for wire; (g) Etching silicon for cantilever; (h) Deep trench etch through wafer to release component

以让硼扩散到整个悬臂梁, 防止在针尖处沿厚度方向产生pn结, 否则该pn结在电加热产生的高温下会失去电隔离作用。为了保证压阻具有较高的灵敏度, 应使压阻扩散的结深较浅, 采用了短时间低温预淀积后低温再分布工艺。然后, 通过引线孔浓硼扩散、蒸铝并刻蚀出铝引线。

以光刻胶为掩膜, 用反应离子刻蚀工艺刻蚀硅到中间氧化层得到悬臂梁结构。最后在正面涂胶保护后对梁进行背面刻蚀至氧化层, 将中间氧化层腐蚀掉后悬臂梁结构得到释放。图3(b)和(c)分别是悬臂梁结构释放后一维探针阵列的单个探针CCD显微镜图像。

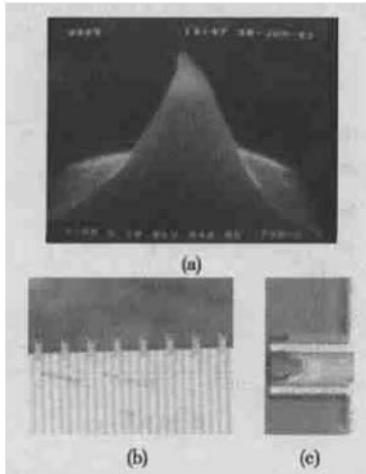


图3 器件SEM 和 CCD 显微镜图像 (a) 形成的硅尖SEM 图像; (b) 器件阵列CCD 图像; (c) 单个器件悬臂梁结构顶视CCD 图像

Fig. 3 SEM and CCD images of the formed structure
(a) SEM image of tip; (b) CCD image of probe-array;
(c) CCD image of single cantilever

4 器件的性能

4.1 针尖稳态电热特性

在研究电热纳米针尖加热特性时, 如图4所示, 对模型做了如下简化:

(1) 将整个悬臂梁分成了加热电阻部分形成的加热区和悬臂梁到硅体部分的传导区(温度变化区)。

(2) 由于温度不是特别高, 因此忽略了热辐射和对流过程; 在整个系统达到热平衡时, 加热电阻所产生的热量主要是悬臂梁以热传导的方式向衬底传递, 即加热电阻所产生的热量等于通过悬臂梁传导

出的热量; 温度传导区与加热区连接处的温度设为 T_h , 与加热区的温度相同, 与衬底相连接处的温度设为室温 T_r (300K)。

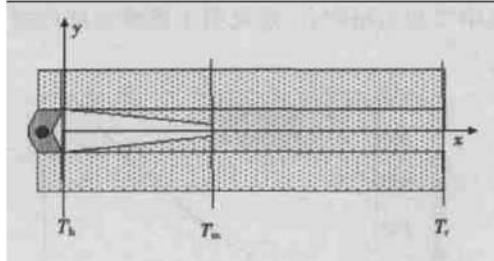


图4 悬臂梁简化热学电学模型

Fig. 4 Simple thermal-electrical model of cantilever

根据平壁热传导方程^[7]并积分得到了通过悬臂梁横截面的热量:

$$Q = \frac{\zeta K_{Si} h (T_h - T_r)}{\frac{29}{19} + \frac{19}{5} \ln \frac{17}{12}} \quad (1)$$

式中 取有效传热效率因子 $\zeta=0.46$, 硅的热传导率 $K_{Si}=148W/(m \cdot K^{-1})$, 悬臂梁的厚度 $h=2 \times 10^{-6} m$, 室温以 $T_r=300K$ 计算。

通过实验直接测试加热电阻在不同温度下的电阻值, 并对加热电阻阻值与温度之间的关系进行拟合, 根据拟合结果得到了如图5所示的加热电阻值与针尖温度之间的二次函数关系曲线, 其形式如下:

$$R_h(T_h) = R_h(T_r) [1 + \alpha_{h1}(T_h - T_r) + \alpha_{h2}(T_h - T_r)^2] \quad (2)$$

其中 加热电阻温度系数 $\alpha_{h1}=5.3237 \times 10^{-4}/K$ 和 $\alpha_{h2}=3.4992 \times 10^{-6}/K^2$, 加热电阻在室温下的电阻值 $R_h(T_r)=560\Omega$ 。

根据热平衡条件, 对加热电阻施加的电压与纳米硅尖处温度间关系为

$$\frac{V_{appl}^2}{R_h(T_r) [1 + \alpha_{h1}(T_h - T_r) + \alpha_{h2}(T_h - T_r)^2]} = \frac{\zeta K_{Si} h (T_h - T_r)}{\frac{29}{19} + \frac{19}{5} \ln \frac{17}{12}} \quad (3)$$

通过测试不同温度下加热电阻的阻值, 得到了图5所示的加热电阻值与温度之间的关系, 进而通过测试加热电阻在不同电压下的电流值, 得到加热电阻在不同电压下的电阻, 然后根据公式(2)或者图5标定出加热电阻在不同电压下的温度值, 得到了加热电阻测试温度与施加电压之间的关系。同时, 由公式(3)可知加热电阻的温度与施加于电阻上的电

压之间的理论关系, 为便于比较, 将理论计算结果和实测结果一并示于图6。从图6所示的结果可以看出, 通过模型所计算出来的电压与温度的关系和测试结果基本相吻合。这说明了该模型理论的合理性。

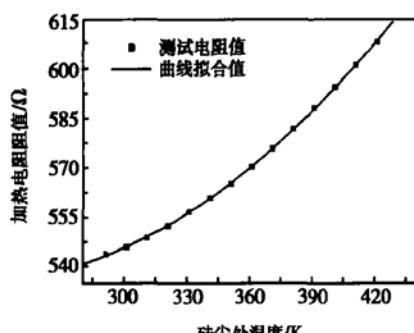


图5 加热电阻的阻值与温度之间关系曲线

Fig. 5 Resistance of heater versus temperature

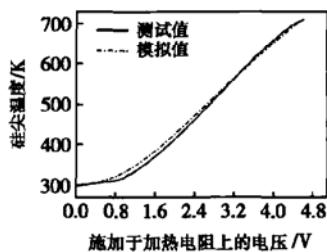


图6 测试和理论计算的针尖温度-施加电压关系曲线
Fig. 6 Relationship between temperature of tip and applied voltage by both testing and modeling

4.2 加热针尖的瞬态电热特性

本节进一步研究器件数据写入时相应的瞬态热特性。如果加热速率过慢将影响数据写入速率, 同时必将使存储数据坑过大, 从而影响了数据存储密度。图7和图8分别表示在4V加热脉冲电压下, 加热脉冲时间分别为 $3\mu s$ 和 $100\mu s$ 时, 加热针尖温度与时间之间的关系曲线。

从图7和图8可以看出: 当脉冲电压施于加热电阻后, 加热电阻的温度迅速升高, 在很短的时间(大约 $3\mu s$)内就达到 $463.15K$, 足以满足器件在热塑性有机薄膜上进行数据写入时对于硅尖温度的要求。随着脉冲电压施加时间的延长, 尽管加热电阻的温度仍然在升高, 但是温度增加的速度明显变慢, 最后趋于饱和。在降温阶段, 器件在脉冲电压停止加热后的很短的时间内迅速降低到存储介质的玻璃转变温度以下, 从而保证了该器件存在高写入速度的

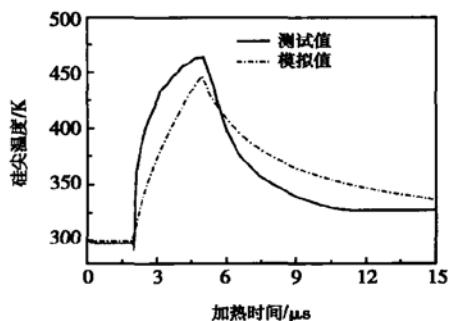


图7 4V 脉冲电压、加热时间为 $3\mu s$ 时, 温度与时间之间关系的测试和模拟结果

Fig. 7 Tested and simulated temperature of heater versus time under voltage of 4V and the heating time of $3\mu s$

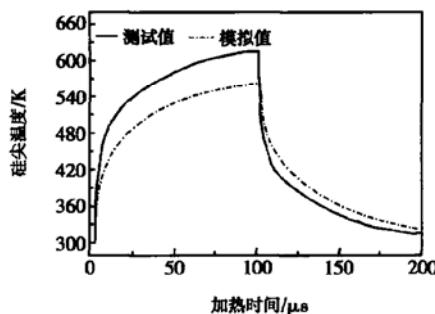


图8 4V 脉冲电压、加热时间为 $100\mu s$ 时, 温度与时间之间关系的测试和模拟结果

Fig. 8 Tested and simulated temperature of heater versus time under voltage of 4V and the heating time of $100\mu s$

可行性。同时, 如图7和图8所示, 分别求出该加热电阻在4V的供电电压下, 加热时间分别为 $3\mu s$ 和 $100\mu s$ 时的降温时间常数分别为 $6.2\mu s$ 和 $119.15\mu s$, 这说明了在保证针尖能够达到足够高温度的前提下缩短加热时间是提高探针写入速率的关键。测试结果表明, 如果升温采用 $3\mu s$ 或更短, 降温时间常数将是 $6.2\mu s$ 或更短, 使单个探针存储速率接近 $100kHz$ 完全可能, 因此, 借助探针阵列并行工作的优势可以实现高速存储。从图7和图8中测试得到针尖瞬态热加热电阻在不同时间的温度与利用ANSYS有限元模拟的结果基本上相吻合, 只是在测试结果中升温速率和降温速率偏大。测试结果中升温速率过快, 可能是由于SOI硅片中间氧化层阻止了表面硅向衬底传热而导致了温度迅速升高; 而测试结果中降温速

率偏大, 可能是由于探针悬臂梁上铝线的传导作用所致。在 ANSYS 有限元仿真时没有考虑这些特殊性。

4.3 针尖读出敏感特性

根据前面表 1 中悬臂梁结构的力学特性进一步得到了有关压阻的灵敏度特性参数表达式, 并假设存储数据坑的深度 $x = 20\text{nm}$, 得到各参数的理论计算值, 同时, 根据图 9 中压阻阻值与作用于悬臂梁末端作用力之间直线拟合关系分别求出在数据读过程中敏感性系数及其输出电压。将压阻灵敏度参数的计算结果和测试结果一并列于表 2。

表 2 压阻灵敏度特性
Table 2 Sensitive performance of the piezoresistance

参数	表达式	计算数值	测试数值
硅尖处作用力/N	$F = kx$	$2.4206 \times 10^{-7} (\text{x} = 20\text{nm})$	$2.4206 \times 10^{-7} (\text{x} = 20\text{nm})$
压阻敏感度	$\frac{\Delta R}{R} = \frac{3\pi r_4 F(h - h')}{bh^3} \left(L - \frac{l}{2} \right)$	3.117×10^{-4}	5.41×10^{-4}
输出电压/mV	$V_{\text{output}} = \frac{V_{\text{input}}}{4} \times \frac{\Delta R}{R}$	0.389665	0.67556

在表 2 中, 悬臂梁弹性系数 $k = 12.103 \text{ m/N}$ (采用表 1 中计算结果), 压阻系数 $\pi_{44} = 10^{-9}/\text{Pa}$, 压阻供电电压 $V_{\text{input}} = 5\text{V}$ 。

为了检测出悬臂梁压阻敏感读出性能, 在本实验中利用原子力显微镜探针在器件悬臂梁硅尖附近施加作用力的方法。具体操作方法是: 将器件置于原子力显微镜的探针下, 用原子力显微镜的探针压住悬臂梁的末端部位, 并对悬臂梁末端施加作用力, 然后测试在不同作用力下器件悬臂梁压阻的电阻值。同样, 利用表 2 中压阻敏感性公式计算出不同压力作用条件下压阻的理论电阻值, 两者的结果相比较于图 9 中。

从图 9 所示的器件悬臂梁末端不同压力作用下, 压阻阻值测试结果与计算结果图可以看出: 理论计算结果比测试结果偏小, 可能是制作出的压阻的掺杂浓度与设计有偏差, 实际的压阻系数与设计使用值略有不同所致。但是总体上来说, 两者基本上吻合。同时, 从灵敏度系数、输出电压计算值及其测试值可以看出, 该探针可以感应出数据读过程中悬臂梁末端针尖处挠度(20nm)的变化。

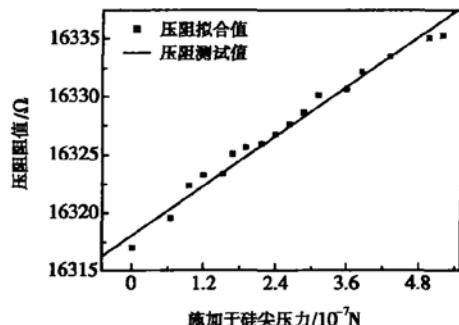


图 9 在悬臂梁针尖部位不同压力下压阻阻值测试和理论计算结果

Fig. 9 Tested and calculated resistance of piezoresistor versus applied force on the tip

5 结论

本文采用微纳机械加工技术制造出硅基纳机电探针一维阵列器件, 探针同时集成了压阻读出敏感器和电热写入针尖, 实现了在同一悬臂梁上集成读写功能。在制作加热电阻的过程中采用了 DRIE 刻蚀楔形小孔和扩散后氮气保护下高温再分布技术, 消除了 pn 结在高温下失去电隔离作用; 使用电阻温度标定技术得到了加热电阻阻值与电阻温度之间的二次曲线关系, 建立了适用于该器件的稳态电热模型, 并进一步计算出该器件的稳态电热 $T-V$ 特性, 计算结果与实际测试结果相吻合; 瞬态电热测试结果与有限元模拟结果基本相符。加热脉冲电压为 4V, 加热时间为 $3\mu\text{s}$, 可满足器件写入要求, 显示了近 100kHz 的单个探针热读写速率; 探针压阻敏感性系数测得为 5.41×10^{-4} , 表明该压阻足以能够探测出针尖扫过纳米数据点时悬臂梁的挠度变化。

参考文献

- [1] Chui B W, Stowe T D, Ju Y S, et al. Low-stiffness silicon

- cantilevers and piezoresistive sensors for high-density AFM thermomechanical data storage. *J Microelectromechan Syst*, 1998, 7(1) : 69
- [2] Vettiger P, Despont M, Drechsler U, et al. The ‘Millipede’—more than one thousand tips for future AFM data storage. *IBM J Res Develop*, 2000, 44(3) : 323
- [3] Li Hailan, Jia Gang, Zhang Xiaoting, et al. Study and fabrication of micro-electrooptic-probe. *Chinese Journal of Semiconductors*, 2002, 23(10) : 1098(in Chiness)[李海兰, 贾刚, 张晓婷, 等. 微型电光探针的研制. 半导体学报, 2002, 23(10) : 1098]
- [4] Bao Minhang . Micro mechanical transducers — pressure sensors, accelerators and gyroscopes. In: *Handbook of Sensors and Actuators Series*. Amsterdam Publisher, 2000: 222
- [5] Mayer G K, Offereins H L, Sandmaier H, et al. Fabrication of non-underetched convex corners in anisotropic etching of (100)-silicon in aqueous KOH with respect to novel micromechanic elements. *J Electrochem Soc*, 1990, 137(12) : 3947
- [6] Marcus R B, Ravi T S, Gmitter T, et al, Formation of silicon tips with < 1nm radius. *Appl Phys Lett*, 1990, 56(3) : 236
- [7] BeHNK A N. *Engineering thermodynamics and thermal transmission*. Yan Jiaju, Zhang Zhengrong, trans. Metallurgical Industry Publisher, 1959: 248(in Chinese)[维尼克 A N. 工程热力学及传热学基础. 严家驹, 张正荣, 译. 冶金工业出版社, 1959: 248]

Sensitivity and Performance of Nanomechanical Electro-Thermal Probe^{*}

Yang Zunxian, Li Xinxin, Wang Yuelin, Bao Haifei, Liu Min and Lu Deren

(State Key Laboratory of Transducer Technology, Shanghai Institute of Microsystem and Information Technology,
The Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200050, China)

Abstract: The fundamental working principle of integrated nano-mechanical probe's realizing ultrahigh density storage is illustrated. After the design of component, both the theoretical and finite element method (FEM) analysis are provided. Using the micromachining technology process, the piezoresistor and the electro-thermal nano-tip are integrated on the silicon micro-cantilever. The second order relationship between the heating resistance and its temperature is mined by using resistance-temperature demarcating technology. Further microsecond rank instant electro-thermal performance is tested, agreeing well with the theoretical results and FEM results, respectively. Under 4V pulse voltage, after heating 3μs, the temperature of heater is up to 463. 15K, with the cooling time constant of 6. 2μs and nearly 100kHz writing velocity during data writing. Under 2×10⁻⁷N force on the tip, the piezoresistive sensitivity coefficient is 5. 41×10⁻⁴, which is sufficient for piezoresistive sensitivity during data reading.

Key words: cantilever-tip probe; nano-electromechanical-system-technology; piezoresistance sensitivity; electro-thermal nano-tip; data-storage technology

PACC: 0670M

Article ID: 0253-4177(2004)07-0863-06

* Project supported by State Key Development Program for Basic Research of China (No. G1999033103) and Shanghai Nano-Project (No. 0111NM077)

Yang Zunxian male, was born in 1973, PhD candidate. He is engaged in the research on (micro-) nano-electromechanical system(MEMS and NEMS).