

# 磁头内置 DFH 控制元件可靠性的有限元分析

肖祥慧<sup>1</sup>, 彭敏放<sup>1</sup>, 黎福海<sup>1</sup>, 詹 杰<sup>2</sup>, 唐荣军<sup>3</sup>

(1. 湖南大学电气与信息工程学院, 湖南长沙 410082; 2. 湖南科技大学物理学院, 湖南湘潭 411201; 3. 日本 TDK 集团, 广东东莞 523000)

**摘 要:** 磁头内置 DFH 控制元件的可靠性设计评估十分重要, 目前工艺上多采用经验数据指导的方法, 误差十分大, 理论上是根据传统流体力学的基本原理, 利用 Matlab 软件实现模拟评估的, 由于元件尺寸限制, 模拟算法会随着舍入误差的叠加而失效. 本文使用 ANSYS 软件, 通过实验获得建立模型的基本参数, 选择了合适的单元类型、材料属性, 给出了磁头的有限元模型. 利用模型对元件进行的寿命预测实验表明, 有限元模型分析 DFH 控制元件的设计可靠性问题是有效的, 并且得出以下结论: 在 50Ω 的新型 DFH 计算结果中, 其热效应强度比传统屏蔽层大 10% 以上, 实际的寿命失败样品问题区域都在线路的转角处.

**关键词:** DFH; 可靠性分析; 有限元; 热效应; 电流拥挤效应

**中图分类号:** TM271+.2      **文献标识码:** A      **文章编号:** 0372-2112 (2012)10-2140-05

**电子学报 URL:** <http://www.ejournal.org.cn>

**DOI:** 10.3969/j.issn.0372-2112.2012.10.040

## The Finite Element Analysis for Reliability of Built-DFH in Magnetic Head

XIAO Xiang-hui<sup>1</sup>, PENG Min-fang<sup>1</sup>, LI Fu-hai<sup>1</sup>, ZHAN Jie<sup>2</sup>, TANG Rong-jun<sup>3</sup>

(1. Institute of Elec and Information Engineering in Hunan University, Changsha, Hunan 410082, China; 2. School of Physics in Hunan University of Science & Technology, Xiangtan, Hunan 411201, China; 3. Japan's TDK Groups, Dongguan, Guangdong 523000, China)

**Abstract:** The assessment for the reliability design of Built-DFH in Magnetic head is very important. It recurrently uses the empirical data to instruct the production in the craft now. Unfortunately, the error is very large. Theoretically, everybody is simulating the reliability using the Matlab software. Owing to the limit of the cell size, the simulation algorithm will expire along with the rounding error superimposition. This article uses the ANSYS software. The experiment was to establish the basic parameters and select the appropriate cell type, material properties and give the finite element model of the head. The results according to the life prediction using the model above shows, the finite element model is effective. Furthermore, in new DFH in 50Ω, the strength of thermal effects is larger above 10% than the traditional shield. The regions with problems of the actual life failed samples are in the line of the corner.

**Key words:** Dynamic Flying Height; reliability analysis; finite element; thermal effects; current crowded effect

## 1 引言

磁头内置 DFH (Dynamic Flying Height, 即动态飞行高度) 控制元件是一种调节磁头动态飞行高度的装置, 它可以动态调节读写头实际的有效磁间距, 减少磁头和碟片之间的机械摩擦与碰撞, 从而减少读写出错率以及碟片的物理损伤<sup>[1]</sup>. 由于该元件长时间工作在高温环境, 因此对其设计可靠性评估显得十分重要, 但是其尺寸相当小, 所以要想获得和可靠性有关的参数十分困难, 用数值模拟的方法可以克服这个困难. 目前国际上, 一般采用 Matlab 软件来模拟评估, 但由于磁头个体差异以及尺寸限制, 模拟算法会随着舍入误差的叠加而失效<sup>[2]</sup>,

国内在可靠性方面主要借鉴电子产品的可靠性及寿命研究, 高温可靠性研究等<sup>[3]</sup>, 研究基本属于空白阶段. 参数化设计语言 (ANSYS Parametric Design Language, APDL) 主要用来自动完成某些功能或建模, 它是 ANSYS 高级应用的基础, 常用于优化设计、自适应网格等. 本文使用 ANSYS 软件<sup>[4]</sup>, 采用 APDL 实现对磁头模型的建立以及对模型的计算求解, 先采用直接耦合的方法对磁头内置 DFH 控制元件通电产生的电流密度和温度场进行分析, 然后用序贯耦合的方法对温度产生的结构变形进行分析, 简化了问题的分析, 增强了模型的可移植性, 也大大减少了模型的建立周期和求解周期<sup>[5]</sup>, 建立的有限元模型能有效评估元件设计可靠性问题, 因而对磁头内置

DFH 控制元件的设计可靠性分析有积极意义。

## 2 有限元模型的建立

### 2.1 耦合场分析原理

在有限元分析<sup>[6,7]</sup>的过程中,耦合场分析是指考虑两种或多种物理场的交叉作用和相互影响的一种分析方法.耦合场的分析方法可归结为直接耦合和序贯耦合两种.直接耦合法通过对所有的耦合单元类型分析,一次求解就能得出耦合场分析结果,耦合是通过计算包含所有必须项的单元矩阵或单元载荷向量来实现的;序贯耦合法<sup>[8]</sup>是按照顺序进行两次或多次相关场的分析,耦合是通过把第一次场分析的结果作为第二次场分析的载荷来实现的。

### 2.2 磁头的物理结构

在最早一代磁头中,读写功能都是复合在一起的,现在的磁头读写部分都是分开的,结构也比以前的磁头复杂很多,从 ABS 面的视角看以及从横断面看,磁头的极尖形状如图 1 所示。

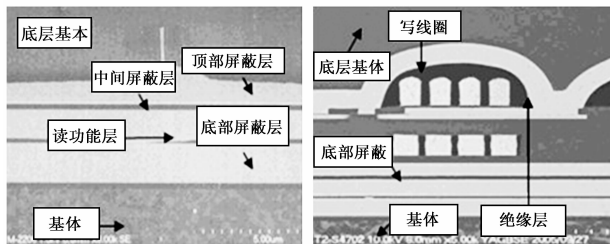


图1 磁头正面和切剖面结构示意图

图1 磁头正面和切剖面结构示意图

图 1 中,底层基体( $Al_2O_3$ ),工艺上是为了给底部屏蔽层的沉积提供光滑表面;顶部屏蔽层(NiFe)的功能和底部屏蔽层相同;中间屏蔽层(NiFe)的功能和底部屏蔽层相同;底部屏蔽层(NiFe)为读功能部分屏蔽过渡区以外的磁场;读功能层(NiFe/Ta/NiFeCr),感应磁碟上信息并反馈成电信号;基体(AlTiC)为磁头的主要支撑结构;写线圈(Cu),将施加的电信号转变成磁场;绝缘层(Photo-resist)为写线圈的沉积提供基体。

### 2.3 模型的建立

由于采用的是参数化建模方式,所以在此仅用一款磁头内置 DFH 控制元件来做简单说明,此型号的元件有长、短两种类型,它们分别代表原来和现在即将采用的元件.为了获得建模所需要的一些结构参数,需要对所分析的样品进行剖切实验再进行测量获得结构参数.图 2 给出了长、短两种磁头内置 DFH 控制元件横截面的 SEM 照片,表 1 给出了相关参数(单位  $\mu m$ ):其中 DFH-L 表示元件的长度,DFH-t 表示元件的厚度,SF-L 表示图形中底部屏蔽层的长度,SF-t 表示图形中底部屏蔽层的厚度,SS-L 表示图形中中间屏蔽层的长度,SS-t 表示图形中中间屏蔽层的厚度,DFH-ABS 表示图形中

DFH 的空气承托面(ABS).

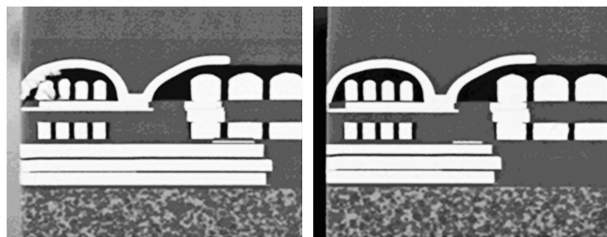


图2 两种不同类型的磁头内置DFH控制元件截面图

表 1 关于两种不同型号 DFH 横截面图形的一些参数

Name	DFH-L	DFH-t	SF-L	SF-t	SS1-L	SS1-t	SS2-L	SS2-t	DFH-ABS
长	4.35	0.12	24	1.1	25.1	1.12	24.0	1.2	19.3
短	3.07	0.12	19	1.3	20.1	1.24	19.0	0.8	12.6

由于有限元分析为耦合场分析,所以选择的单元类型有:(1)选择 solidA 和 shellA 对热电分析进行直接耦合;(2)用 solidB 和 shellA 对其进行结构分析.所有耦合场都是通过对元件通不同功率电流产生的电流密度场和温度场,在下文应用时有具体说明.电热分析所需要的材料参数为:电阻率,热传导系数,比热,密度.热-结构耦合分析所需要的材料参数为:热膨胀系数,泊松比,弹性模量.这些参数可以查阅相关手册或资料查得<sup>[9,10]</sup>.因为磁头内置 DFH 控制元件读功能部分的大小和其本身相比可以忽略,对整个磁头的散热影响也是可以忽略的,所以,可以把读功能部分简化为一层,最后我们可以得到有限元模型如图 3 所示。

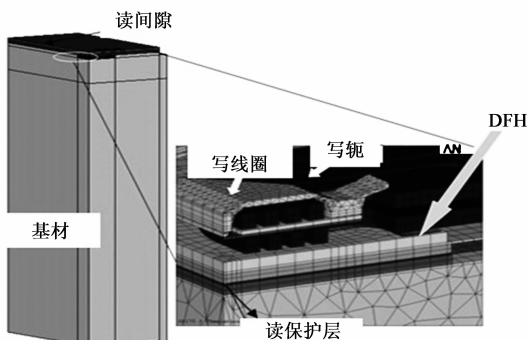


图3 磁头的有限元分析模型

## 3 有限元模型分析及其效果

### 3.1 寿命预测分析

有限元模型可以预测产品的寿命,验证产品设计的可靠性,同时寿命预测也可以验证模型的有效性.Black 提出的平均失效时间 MTTF (Mean Time To Failure) 模型是目前最有效的电迁移现象寿命预测模型之一,具体方程<sup>[11]</sup>如式(1)所示:

$$TTF = AJ^{-n} e^{E_a/KT} \quad (1)$$

式中  $A$  为和材料有关的参数,由样品结构、薄膜和

基体的物理特性决定;  $J$  为电流密度, 单位  $\text{MA}/\text{cm}^2$ ;  $N$  为和实验相关的加速因子;  $K$  为波尔兹曼常数, 值为  $8.6171\text{e}-5\text{eV}/\text{K}$ ;  $E_a$  为材料的活化能. 将公式变形可得:

$$TTF = C * J^{-n} * e^{B/T_{\text{coil}}} \quad (2)$$

两边求对数可得:

$$\ln(TTF) = \ln C - n \ln J + e^{B/T_{\text{coil}}} \quad (3)$$

$$\text{而 } T_{\text{coil}} = T_{\text{ambient}} + TR \quad (4)$$

其中  $C$  通常等同于  $A$ ,  $T_{\text{coil}}$  是测试环境温度和磁头内置 DFH 控制元件升高的温度(由焦耳热导致的温升)的总和, 而测试的环境温度是已知的, 那么就只需要对其升高的温度进行计算. 事实上, 由于电阻率随温度线性变化关系式为:

$$\rho_t = \rho_0(1 + T_c \Delta T) \quad (5)$$

可以推出得出:

$$T_c = dR / (R_0 * \Delta T) \quad (6)$$

其中  $\rho_0$  和  $T_c$  是和材料相关的常数. 而对流系数:

$$TR = [(R_{\text{@ oven, bias}} - R_{\text{woven}}) / (R_{\text{amb}} - R_{\text{uamb}}) - 1.0] / T_c + T_{\text{amb}} - T_{\text{oven}}$$

其中,  $R_{\text{@ oven, bias}}$  为炉温条件下, 通“x”mA 电流时, 磁头内置 DFH 控制元件的电阻值;  $R_{\text{woven}}$  为炉温条件下, 元件的线阻;  $R_{\text{amb}}$  为环境温度下, 通测试电流测得的元件电阻值;  $T_c$  为上文求得的元件温度系数值. 设定一定的老化试验, 就可以求出对应的温升值  $TR$ , 它与环境温度  $T_{\text{ambient}}$  的和  $T_{\text{coil}}$  也就可以求出了.

### 3.2 模拟结果与实际结果对比

传统计算电流密度分布如式(7).

$$J = I / A \quad (7)$$

其中,  $J$  为磁头内置 DFH 控制元件的电流密度;  $I$  为给元件通的电流;  $A$  为元件的横截面积. 利用有限元模型进行电热耦合, 给磁头内置 DFH 控制元件通功率为  $100\text{mW}$  的相同电流可以得到长短两种元件的电流密度分布<sup>[12-14]</sup>, 结果如图 4 所示. 结合表 1 得到的结果可以算出两种不同型号元件在通入电流为  $31.6\text{mA}$  时的电流密度分别为  $5.85\text{MA}/\text{m}^2$ ,  $8.78\text{MA}/\text{m}^2$ .

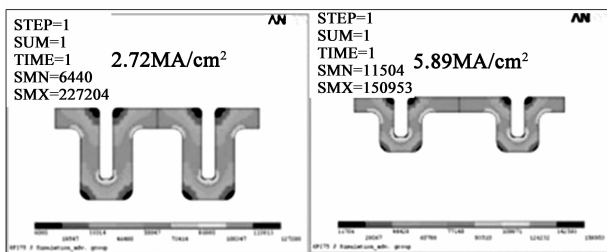
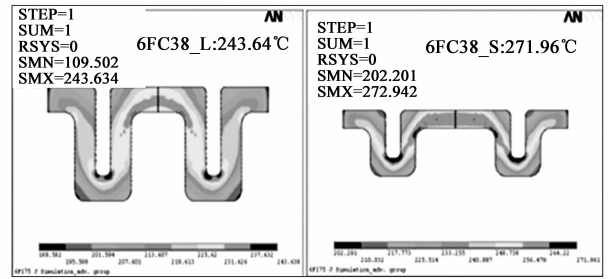


图 4 两种不同尺寸 DFH 电流密度分布的模拟结果

根据电热结构耦合分析结果, 继续分别对原长, 短两种类型磁头内置 DFH 控制元件通  $100\text{mW}$  功率电流, 可以得到磁头的整体温度分布和磁头极尖部分的温度场分布情况, 如图 5 所示.



(a) 长型 DFH

(b) 短型 DFH

图 5 两种不同类型 DFH 温度场分布模拟结果

可以看出, 两种不同类型磁头内置 DFH 控制元件的温度分别为  $243.64^\circ\text{C}$ 、 $271.96^\circ\text{C}$ . 设定对流系数值, 然后结合老化实验, 利用文中有限元模型做模拟实验, 直到模拟结果和实际结果吻合后, 停止实验, 此时, 所求得的对流系数值就是我们所需要的边界条件, 可以得到  $ABS$  散热面的热对流系数为  $5.50 \times 10^4 \text{W}/\text{m}^2\text{K}$ , 其他散热面为  $78\text{W}/\text{m}^2\text{K}$ . 这样不但可以从上述模拟结果得到磁头内置 DFH 控制元件温度场分布的最大值, 也就是理论最优值, 而且还可以得到元件的平均温度值. 可以看出, 模拟的结果要比传统计算的结果大. 实际上, 实验结果所测得的就是元件的平均温度值, 所以只需计算出元件温度升高的最大值, 如果满足条件, 就可以确定模型的有效性, 这是可以通过实验和上面的结论得到的, 具体如表 2 所示, 可以得出, 磁头内置 DFH 控制元件的模拟平均值和实验值相似, 模拟最大值比实验值稍大.

表 2 DFH TR 值模拟结果和实验结果的对比

通过上述分析可以得出, 本文设计的有限元模型分析磁头内置 DFH 控制元件的可靠性设计问题是切实可行的.

类型	6FC38-L	6FC38-S
实验值/ $^\circ\text{C}$	2.19	2.449
模拟平均值/ $^\circ\text{C}$	2.17	2.434
模拟最大值/ $^\circ\text{C}$	2.43	2.72

### 4 实际产品设计验证

在实际的设计中, 可以通过不同的分析方法来模拟各种类型的设计结果, 并且可以通过模拟结果来评估其中的可靠性隐患, 对不合理的设计给予淘汰. 以下是一款设计复杂的磁头内置 DFH 控制元件, 其目的是通过较长的距离即宽的接触面积来达到散热较快的结果, 具体参数如下: DFH 高度和宽度分别为  $0.0261\text{mm}$  和  $0.0400\text{mm}$ ; 线圈宽度和距离分别为  $0.003\text{mm}$  和  $0.0030\text{mm}$  和  $0.0050\text{mm}$ ; 线圈电阻和引线电阻分别为  $50\text{ohm}$  和  $2\text{ohm}$ . 通过电热耦合方式模拟结果可以看到, 最容易发热的区域即最早失败点是在线路的转角处, 转角越多则意味最早失败点越多. 实际的寿命失败样品, 其出

现问题的区域都是在线路的转角处。

按要求,磁头的屏蔽层从原来的 0.065nm 降到 0.050um,相应的磁头内置 DFH 控制元件结构电阻也要从 100Ω 变为 50Ω,因此需要对这种元件及其他的相应设计进行有限元分析来估算其可行性.将相应的数据代入上述模型中,可以得出 0.050nm 的屏蔽层比 0.065nm 的蔽层的热效应要强 10% 以上.从理论上来说,0.050nm 的屏蔽层厚度比 0.065nm 的屏蔽层要薄,而 0.065nm 厚度的屏蔽层要比 0.050nm 的屏蔽层体积要大,因此热传导效应取决于金属屏蔽层的厚度大小(相同的位置).可以看到,实际两种不同的 50Ω 的设计都达到了比较理想的热效应,分别达到了 19.7nm/100mW 和 17.9nm/100mW,相比原来 0.065nm 的屏屏蔽层(16.2nm/100mW 左右)效果要好.

由于热效应的强度过大,上述设计虽然可以达到好的极尖突起效果,但也可能造成极尖的塑性形变而造成可靠性问题<sup>[15]</sup>.因此,常常会再采用原子力显微镜等手段来确认极尖形变的可靠性问题.

## 5 实验结果拓展分析

按照传统的磁畴以及磁畴壁变化分析可以得出,当材料中存在缺陷时,由于缺陷对畴壁形成钉扎,使得缺陷两侧形成反向势垒,阻碍了磁畴壁运动,在缺陷边缘附近形成微磁同定结点,微磁结点内磁化方向的变化决定了缺陷区域的泄漏微磁场特性,而微磁固定结点上磁化强度的法向分量不连续,因此泄漏微磁场的奇异特征包含了缺陷信息,也就是说失败点的产生是磁畴壁钉扎的原因,与线路转角应该不存在必然联系.在电子迁移现象<sup>[16~18]</sup>发生时,电子在大的外加场作用下,发生大规模的定向运动,同时伴随着空位的反方向运动.电流拥挤效应的发生,在实际场合主要表现在电流流过结构转折的地方,即电流拥挤效应发生在电流方向改变的地方<sup>[19]</sup>,这与拐角处材料奇异变化有关.我们采用原子力显微镜,将档位调至 x4000 档,对大量产品实效前后拍照做了比对,如图 6 所示.试验表明,电流密度和电流方向改变频率是电流拥挤效应的主要原因,当然,材料在大电流密度冲击下的电迁移效应不尽相同,电迁移的发生会导致薄膜内晶体结构的破坏,引起薄膜和周围材料的粘联,从而加剧保护层的破坏,甚至导致结构断裂造成短路,事实上,材料结构凸起和结构断裂都会通过结构的电阻变化表现出来.换言之,电流拥挤效应是产品电流密度、拐角电流方向改变频率以及材料结构凸起和结构断裂共同作用的结果.

继续对结构凸起和结构断裂产品进行条件为静止空气冷却时热-结构场耦合分析.模拟结果如图 7 所示.可以看出结构凸起和结构断裂产品的温度场也发生了

相应变化,从而进一步论证了拓展分析的结果.

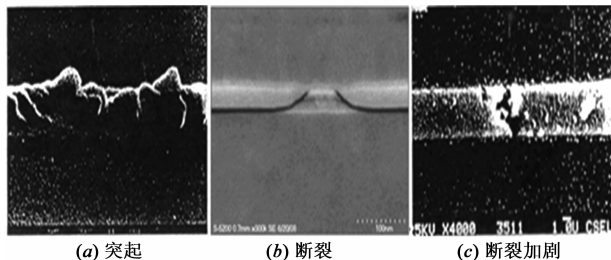


图6 失效前的结构凸起和结构断裂以及失效后结构断裂的加剧

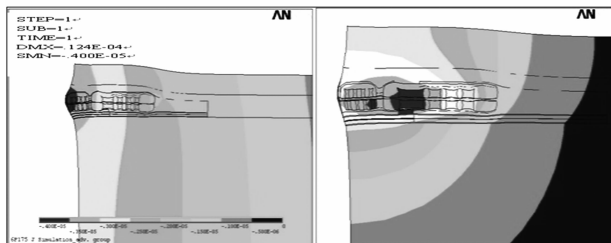


图7 热-结构场耦合分析结果

## 6 结论

通过以上分析可以得出,磁头内置 DFH 控制元件的失效样品,其出现问题的区域都是在模拟线路的转角处.实际上,转角处材料的结构突起和结构断裂、拐角电流方向改变频率以及电流密度是引起电流拥挤效应的原因,电流拥挤的程度都会通过材料结构电阻变化表现出来,也就是说只要找到材料电流拥挤的临界电阻,就会减少电子迁移的发生,从而可以减少和避免电流拥挤效应的发生<sup>[20,21]</sup>.这与磁畴变化分析相吻合,与传统上所说的拐角引起电流拥挤效应存在差异.在实际设计中,本文给出的有限元模型模拟结果的平均值和实际结果相似,模拟结果的最大值比实验值稍大,如把模拟最大值设为理论最优值,有利于指导生产实践,评估磁头可靠性隐患,并得出以下结论:

(1)在 50Ω 的新型磁头内置 DFH 控制元件计算结果中,其热效应强度比传统的屏蔽层要大 10% 以上,也就是说其引起的极尖突起效果要好于传统的磁头内置 DFH 控制元件;

(2)在相同的位置,热传导效应取决于金属屏蔽层的厚度大小,而不是传统上所说的接触面体积大小.

### 参考文献

- [1] 肖祥慧,黎福海,等.磁头润滑油饱和厚度研究[J].湖南大学学报(自然科学版),2011,38(7):48-52.  
XIAO Xiang-hui, LI Fu-hai, et al. Research on the thickness of the magnetic head [J]. Journal of Hunan University (Natural Science), 2011, 38(7): 48-52. (in Chinese)
- [2] Thornton BH, Bogy DB. Flying height modulation due to disk waviness of sub-5 nm flying height air bearing slider [J].

- ASME Journal of Tribology, 2002, 124(4): 762 – 770.
- [3] 李晓延, 严永长. 电子封装焊点可靠性及寿命预测方法[J]. 机械强度, 2005, 27(4): 470 – 479.  
LI XiaoYan, YAN YongChang. Reliability life prediction methodologies for solder joints of electronic packages [J]. Journal of Mechanical Strength, 2005, 27(4): 470 – 479. (in Chinese)
- [4] Iliana Marinova, Valentin Mateev. Electromagnetic field modeling in human tissue [J]. World Academy of Science, Engineering and Technology, 2010, 64: 298 – 303.
- [5] Runhan Wang, Xiao Z Wu, et al. Head protrusion and its implications on head-disk interface reliability [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2001, 37(4): 1842 – 1847.
- [6] 程军峰, 徐善驾. 用于有限元分析的一种新的等级基多重网格法[J]. 电子学报, 2003, 31(9): 1303 – 1306.  
CHEN Jun-feng, XU Shan-jia. A new multigrid method based on hierarchical basis for the finite element analysis [J]. Acta Electronica Sinica, 2003, 31(9): 1303 – 1306. (in Chinese)
- [7] 隆志力, 吴运新, 等. 热超声倒装键合换能系统多模态振动与有限元分析[J]. 电子学报, 2008, 36(2): 255 – 260.  
LONG Zhi-li, WU Yun-xin, et al. Multiple modal vibration and FEM analysis of ultrasonic transducer for thermosonic flip chip bonding [J]. Acta Electronica Sinica, 2008, 36(2): 255 – 260. (in Chinese)
- [8] li Chen, David B Bogy, Brian Storm. Simulation on magnetic recording slider bearing [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2000, 36: 2486 – 2490.
- [9] Jianfeng Xu, James D, Kiely, et al. Effect of thermal pole tip protrusion and disk roughness on slider disk contacts [J]. Microsystem Technologies, 2009, 15(5): 687 – 693.
- [10] B K Gupta, K Yong S K Chilamakuri, A K Pole Tip. Recession (PTR) measurements with high accuracy Menon [J]. ASME Journal of Tribology, 2001, 123(2): 380 – 385.
- [11] K Takano, Micromagnetic-FEM models of a perpendicular writer and reader [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2006, 41(1): 696 – 701.
- [12] 裴先登, 夏又新, 黄浩等. 混合记录磁热效应[J]. 电子学报, 2003, 31(8): 1249 – 1251.  
PEI Xian-deng, XIA You-xin, HUANG Hao, et al. Study on hybrid recording magneto-heat domino effect [J]. Acta Electronica Sinica, 2003, 31(8): 1249 – 1251. (in Chinese)
- [13] Valter Cocilovo. Magnetic diffusion models for FAST toroidal magnet coils [J]. IEEE/NPSS 24th Symposium on Fusion Engineering, 2011, 2(9): 1 – 6.
- [14] 梁颖, 黄春跃, 阎德劲, 李天明. 基于热叠加模型的叠层 3D 多芯片组件芯片热布局优化研究[J]. 电子学报, 2009, 37(11): 2520 – 2524.  
LIANG Ying, HUANG Chun-yue, YAN De-jin, LI Tian-ming. Study on thermal placement optimization of stacked 3D-MCM based on thermal superposition model [J]. Acta Electronica Sinica, 2009, 37(11): 2520 – 2524. (in Chinese)
- [15] Hui Li, Bo Liu, Tow-Chong Chong. Numerical simulation of slider temperature rise caused by read/write current [J]. Journal of Applied Physics, 2005, 97(10): 306 – 309.
- [16] 陆裕东, 何小琦, 等. 电迁移作用下 SnPb 与 Ni(P) 界面金属间化合物的极性生长[J]. 金属学报, 2009, 45(2): 178 – 182.  
LU Yudong, HE Xiaoqi, et al. Polarity growth of intermetallic compound induced by electromigration at the interface between eutectic SnPb and Ni(P) finihes [J]. Acta Metallurgica Sinica, 2009, 45(2): 178 – 182. (in Chinese)
- [17] 刘珂, 菅洪彦, 黄晨灵等. 多电流路径抑制片上电感电流拥挤效应[J]. 半导体学报, 2006, 27(9): 1690 – 1694.  
Liu Ke, Jian Hongyan, Huang Chenling et al. Suppressing of on-chip inductor current crowding by a multi-current-path method [J]. Chinese Journal of Semiconductors, 2006, 27(9): 1690 – 1694. (in Chinese)
- [18] Dzung Viet Dao, Phuc Hong Pham, Susumu Sugiyama. Multi-module micro transportation system based on electrostatic comb-drive actuator and ratchet mechanism [J]. Journal of Microelectromechanical Systems, 2011, 20(1): 140 – 149.
- [19] Keo Kagami, Tetsuya Kuwashima. A performance study of next generation's TMR heads beyond 200Gb/in<sup>2</sup> [J]. IEEE transactions on Magnetics, 2006, 42(2): 93 – 96.
- [20] 任韬. 铜互连中的电流拥挤效应研究[D]. 上海交通大学硕士学位论文, 2007. 8 – 11.  
Ren Tao. Current Crowding for CU Interconnects Abstract [D]. Master's degree paper of Shanghai Jiaotong University, 2007. 8 – 11. (in Chinese)
- [21] N Strelkov, A Vedyayev, et al. Finite element modeling of charge-and spin-currents in magnetoresistive pillars with current crowding effects [J]. IEEE Magnetics Letters, 2010, 1: 3000300 – 3000304.

### 作者简介



肖祥慧 男. 1983 年 9 月出生, 湖南邵阳人. 湖南大学电气与信息工程学院电气工程专业博士研究生. 主要从事接地网故障诊断, 智能电网, 电磁场理论及其应用, 智能信息处理等方面的研究工作.  
E-mail: xiaoen3@126.com



彭敏放 女. 1964 年 3 月生, 湖南湘乡人. 1991 年、2006 年分别在湖南大学获得工学硕士和工学博士学位. 现为湖南大学电气与信息工程学院教授、博士生导师, 湖南省新世纪 121 人才工程人选, 主要从事电路测试与诊断、智能信息处理、电力系统故障分析及其设备状态监测、电磁场理论及其应用等方面的研究工作.  
E-mail: pengminfang@hnu.edu.cn