

非晶/纳米晶软磁材料及其应用*

纪松, 钱坤明, 张延松, 谭锁奎

(中国兵器科学研究院 宁波分院, 浙江 宁波 315103)

摘 要: 综述了软磁材料的分类及其性能对比, 重点介绍了高性能非晶/纳米晶软磁材料的性能及应用。非晶/纳米晶软磁材料具有较高的综合软磁性能, 如高饱和磁感应强度、高磁导率、低高频损耗等。用非晶/纳米晶软磁材料制作的器件具有质量轻、体积小、性能高等优点, 在大功率中高频变压器、高频开关电源、电磁兼容器件、高精度电流互感器、巨磁阻抗传感器等中得到了广泛的应用, 是软磁材料的又一个发展方向和研究热点。

关键词: 非晶; 纳米晶; 软磁材料;

中图分类号: TM271+.2

文献标识码: A

文章编号: 1004-244X(2005)01-0051-05

Amorphous/nanocrystalline soft magnetic materials and their applications

Ji Song, QIAN Kun-ming, ZHANG Yan-song, TAN Suo-kui

(Ningbo Branch of China Academy of Ordnance Science, Ningbo 315103, China)

Abstract: In this paper, the classification and property contrast of soft magnetic materials are summarized. The emphases are placed on the property and application of high property amorphous/nanocrystalline soft magnetic materials. The results show that amorphous/nanocrystalline soft magnetic materials have preferably integrated soft magnetic material properties. The apparatus made of amorphous/nanocrystalline soft magnetic materials have some merits, such as light weight, small bulk, high property and so on. They are widely used in high frequency transformer with big power, high frequency switch power, EMC apparatus, current mutual inductor with high precision, etc. This study is another development direction and hot topic in the field of soft magnetic materials.

key words: amorphous; nanocrystalline; soft magnetic materials; application

现代电力、电子的仪器设备正朝着小型化、轻量化的方向发展, 这种小型化、轻量化是科技发展的需求, 而且对于军用装备来说尤为重要。

在电子装备中, 部分无源器件如电阻、电容等已实现平面化, 可以大幅度减轻质量和减小体积, 但对于功率器件如电感器、变压器等, 尤其是在大功率条件下, 因工艺技术所限, 实现平面化技术难度较大, 这就要求从器件材料角度出发, 利用新型材料所具有的高性能特点, 来减小器件的体积和质量, 如发展高饱和磁感应强度、高磁导率、低高频损耗的综合性能软磁材料。针对这类实际使用要求, 软磁材料从 Fe-Si 合金、铁氧体发展到非晶材料及近年来发展起来的纳米晶 (也称超微晶) 软磁材料, 特别是纳米晶软磁材料, 因其综合性能大幅度的提高, 为电子装备的小型化、轻量化提供了材料技术的基础。

1 软磁材料的分类

从十九世纪末最早的软磁材料工业纯铁开始, 软磁材料经过百余年的发展, 性能由低到高, 成分由简单到复杂, 已发展成为一个由工业纯铁、Fe-Si 合金、Fe-Ni 合金、Fe-Si-Al 合金、Fe-Co 合金、Fe 基非晶合金、Fe-Ni 基非晶合金、Co 基非晶合金和软磁铁氧体等构成的多品种、多牌号的软磁材料体系, 为现代工程技术的发展提供了强有力的材料技术支撑。

从目前常规软磁材料的性能特征来看, 工业纯铁、Fe-Si 合金、Fe-Co 合金和 Fe 基非晶合金具有较高的饱和磁感应强度 B_s , 但磁导率较低, 损耗高, 不宜在高频下应用; Fe-Ni 合金和 Co 基非晶合金具有高磁导率, Co 基非晶合金还具有低损耗特性, 可在高频下使用, 但饱和磁感应强度较低, 且价格昂贵; 软磁铁

* 收稿日期: 2004-01-18; 修订日期: 2004-04-14

作者简介: 纪松 (1963-), 男, 研究员级高工, 博士, 电话: 0574-87902301

氧体具有低损耗特性,但磁导率和饱和磁感应强度 B_s 均较低。可见,目前常规软磁材料往往仅具有某些较高的软磁性能,还不具备高综合软磁性能,即兼有高饱和磁感应强度、高磁导率和低损耗等性能,图 1^[1] 为 1 kHz 下的纳米晶软磁材料和传统的软磁材料的饱和磁感应强度 B_s 与有效磁导率 μ_e 的关系。

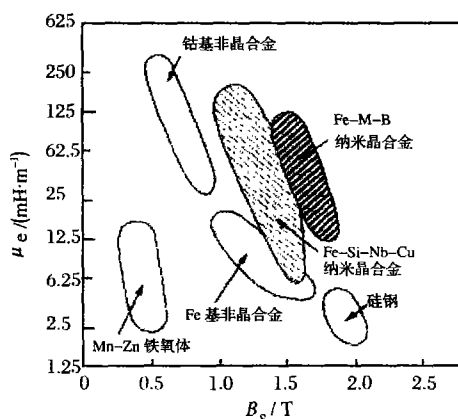


图 1 1 kHz, 0.4 A/m 下软磁材料的饱和磁感应强度 B_s 和有效磁导率 μ_e 的关系

20 世纪 80 年代末问世的 Fe 基纳米晶软磁材料,在性能上兼有与 Fe 基非晶材料相近的高饱和磁感应强度,与 Co 基非晶材料相当的高磁导率和低损耗,在软磁材料发展史上首次实现了集常规软磁材料的性能优势于一体,综合软磁性能十分优异。这是 20 世纪继非晶软磁材料后,软磁材料领域的又一重大进展,成为磁性材料研制和应用开发领域的又一热点和学科发展前沿。经过多年的研究开发,Fe 基纳米晶软磁材料在电子装备中得到了广泛的应用,目前常用非晶纳米晶软磁材料及其性能见表 1^[2]。

2 非晶纳米晶软磁材料的应用

鉴于非晶纳米晶软磁材料的优异特性,可应用于电子仪器设备中的大功率中高频变压器、高频开关电源、电磁兼容器件、高精度电流互感器、高频电流取样器、磁传感器等器件中。

2.1 大功率中高频变压器

在 20 ~ 50 kHz 频率范围内的变压器,以往一般采用铁氧体做变压器磁芯,由于制造工艺的限制,大功

表 1 常用软磁材料及其性能

合 金	$\mu_{0.05}/(\text{mH} \cdot \text{m}^{-1})$	$\mu_{\text{max}}/(\text{mH} \cdot \text{m}^{-1})$	$H_c/(\text{A} \cdot \text{m}^{-1})$	B_r/B_s	B_s/T	$P/(\text{W} \cdot \text{kg}^{-1})$	$\rho/(\mu\Omega \cdot \text{cm})$	$d/(\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	$T_c/^\circ\text{C}$	λ_s
铁基纳米晶	100	375	1.2	0.9	1.25	$W_{0.2/20k} = 3.4$	90	7.25	550	2×10^{-6}
铁基非晶	-	187.5	3.0	0.85	1.56	$W_{1.0/1k} = 4$	140	7.2	415	27×10^{-6}
钴基非晶	125	1 000	0.3	0.95	0.57	$W_{0.5/10k} = 4$	140	7.6	340	0.5×10^{-6}
铁镍基非晶	-	500	1.0	0.8	0.75	$W_{0.5/10k} = 30$	125	7.7	360	12×10^{-6}
坡莫合金 1J85	62.5	225	1.2	0.95	0.70	$W_{0.5/10k} = 45$	56	8.75	400	5×10^{-6}
功率铁氧体	-	6.25	6	0.2	0.5	$W_{0.2/20k} = 7.5$	5×10^7	4.80	220	-
冷轧硅钢	-	50	30	-	2.03	$W_{1.0/1k} = 20$	47	7.65	740	5×10^{-6}

率变压器所需要的磁芯很难解决,不得不使用几个磁芯。纳米晶软磁材料具备的优异性能,为高频变压器的小型化、轻量化提供了理想材料。用纳米晶软磁材料制造的变压器具有以下优点^[3]:

功率大:当 10 ~ 20 kW 时,功率密度可达到 15 ~ 20 kW/kg;漏感小:一般小于 5 μH ;效率高:可达到 90% 以上;体积小、质量轻:15 kW 变压器的质量仅为 3 kg 左右,体积比铁氧体降低 50%;温升小:由于纳米晶软磁材料的低损耗,可大幅度降低发热,从而提高变压器的使用可靠性。

2.2 高频开关电源

非晶纳米晶软磁材料的薄带厚度和电阻率决定其最佳应用频率范围在 kHz 频带,这正好与目前的高频开关电源频带相同,高频开关电源就成了应用非晶纳米晶软磁材料应用的重要领域。高频开关电源中使用的磁性器件较多,如图 2^[3]所示。这些磁性器件均为开

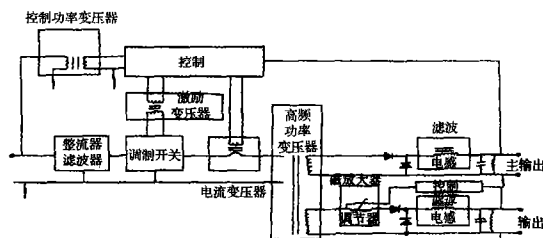


图 2 开关电源中使用的磁性器件

关电源的核心元件,如功率变压器、电流互感器、共模电感、扼流圈、滤波电感、可饱和电感、尖峰信号抑制器和抗噪声干扰器等。

我国已开发出多种规格的非晶纳米晶材料的 O 型、C 型、CD 型等器件应用于开关电源变压器的磁芯,并广泛应用到了中频电源、逆变电源、程控交换机及逆变焊机等的电源变压器。这些产品的成功推广应用,有效地提高了非晶纳米晶软磁材料及器件的技术与生

产水平,磁芯的性能见表2^[3]。

表2 高频大功率开关电源磁芯的性能和应用

铁芯规格/mm	$\Phi 142 \times \Phi 67 \times 35$	铁芯规格/mm	$\Phi 210 \times \Phi 135 \times 35$
质量/kg	2.0	质量/kg	3.5
功率/kW	11	$\mu_0(50\text{Hz})/(\text{mH} \cdot \text{m}^{-1})$	75~125
工作磁密 B_m/T	0.70	$\mu_0(10\text{Hz})/(\text{mH} \cdot \text{m}^{-1})$	50~87.5
工作噪音/dB	<45	$\mu_0(15\text{Hz})/(\text{mH} \cdot \text{m}^{-1})$	37.5~75
$P_{0.5\text{T}/20\text{h}}/(\text{W} \cdot \text{kg}^{-1})$	20~35	$P_{0.5\text{T}/20\text{h}}/(\text{W} \cdot \text{kg}^{-1})$	25~40
变压器效率	97%	备注	用于15 kHz 变压器铁芯
备注	用于程控交换机大功率开关电源		

2.3 电磁兼容器件

在现代电子设备设计中,EMC(电磁兼容)与EMI(抗电磁干扰)已越来越引起人们重视,解决这些问题的关键元件之一即是电感器件。对EMI器件中使用的电感器设计,人们在磁芯材料选用上曾做过很多探讨。选用价格低的硅钢和铁粉芯,其频率特性不佳,易发热,影响开关管工作;使用常规高性能铁氧体材料,其饱和磁感应强度和居里点低,需要增大磁芯尺寸与加大气隙;选用坡莫合金铁芯,成本则较高,而且大电流条件下使用时的性价比更高。因为这种电感器的作频率在kHz级,非晶纳米晶材料正适合用于此频率。现在,通过改进工艺加工技术和热处理技术,研制出了有效磁导率 μ_e 从几十到几万的系列材料,可以满足不同的电感器件需要。

2.3.1 共模滤波电感

共模滤波电感器为小信号工作状态,要求电感量

越大越好。

$$L = 0.4\pi\mu_e N^2 S_e / 100 l_e \quad (\mu\text{H})$$

式中, μ_e 为有效磁导率

N 为线圈匝数(匝)

S_e 为有效截面积(cm^2)

l_e 为平均磁路长度(cm)

由公式可见, L 正比于 μ_e ,同样规格的磁芯, μ_e 值越高, L 就越大。选用纳米晶软磁材料作共模滤波电感的磁芯,可以大大减小铁芯的尺寸,尤其是用于大电流、大功率工作状态下的磁芯,具有良好的性价比。例如,作为共模电感的磁芯,如果采用磁导率不到1万的铁氧体材料,其尺寸要比采用磁导率为8~10万的纳米晶材料大出8~10倍。表3^[4]为纳米晶软磁材料共模电感的磁性能。据报道,日本日立公司生产的主要用于抑制噪声干扰的共模电感的纳米晶软磁材料的月产量由以前的30 t猛增到目前的120 t,增长了4倍多。

表3 共模滤波电感的磁性能

纳米晶软磁材料(居里温度550℃)	共模电感类	可饱和电感类
初始磁导率 $\mu_0/(\text{mH} \cdot \text{m}^{-1})$	37.5~150	-
最大磁导率 $\mu_m/(\text{mH} \cdot \text{m}^{-1})$	>125~250	>375
矫顽力 $H_c/(\text{A} \cdot \text{m}^{-1})$	<2.8	<1.6
饱和磁感应强度 B_s/T	>1.2	>1.2
矩形比 B_r/B_s	-	>0.85

2.3.2 尖峰抑制器

尖峰抑制器是开关电源中常用的抗噪声干扰器件,要求其中的电感器体积小、电感量大,过去一般采

表4 无间隙宽恒导电感磁芯应用实例

实例	样品规格及技术性指标		研制铁芯的性能		应用
No. 1	铁芯尺寸/mm	$\Phi 18 \times \Phi 11 \times 10$	铁芯尺寸/mm	$\Phi 18 \times \Phi 11 \times 10$	汽车音响噪音抑制器
	性能指标	$\Phi 1 \text{ mm}$ $N = (26 \pm 2)$ 匝	性能指标	$\Phi 1 \text{ mm}$ $N = 26 \pm 2$ 匝	
	$f = 1 \text{ kHz}$	OA $L = 565 \pm 25\% \mu\text{H}$ 1A $L \geq 450 \mu\text{H}$	$f = 1 \text{ kHz}$	OA $L = 550 \sim 700 \mu\text{H}$ 1A $L \geq 450 \sim 550 \mu\text{H}$	
No. 2	外形尺寸/mm	$\Phi 46 \times \Phi 20 \times 23$	外形尺寸/mm	$\Phi 46 \times \Phi 20 \times 23$	家用电器滤波电感
	性能指标	$\Phi 2 \text{ mm}$ $N = 23$ 匝	性能指标	$\Phi 2 \text{ mm}$ $N = 23$ 匝	
	$f = 10 \text{ kHz}$	$I = 7 \text{ A}$ $L \geq 250 (\pm 25\%) \mu\text{H}$	$f = 10 \text{ kHz}$	OA $L = 250 \sim 450 \mu\text{H}$ 7A $L = 200 \sim 340 \mu\text{H}$	
No. 3	外形尺寸/mm	$\Phi 25_{\text{max}} \times 10.5_{\text{max}}$	外形尺寸/mm	$\Phi 22 \times 10.5$	用于音响噪音抑制器
	性能要求	$\Phi 0.9 \text{ mm}$ $N = 26 \pm 2$ 匝	性能要求	$\Phi 0.9 \text{ mm}$ $N = 26 \pm 2$ 匝	
	$f = 1 \text{ kHz}$	OA $L \leq 660 \mu\text{H}$ 1.7A $L \geq 250 \mu\text{H}$	$f = 1 \text{ kHz}$	OA $L = 470 \sim 603 \mu\text{H}$ 1.7A $L = 280 \sim 350 \mu\text{H}$	
No. 4	外形尺寸/mm	$\Phi 20_{\text{max}} \times 10_{\text{max}}$	外形尺寸/mm	$\Phi 18 \times 10$	JVC 汽车音响噪音抑制器
	性能	$\Phi 0.9 \text{ mm}$ $N = 20 \pm 2$ 匝	性能	$\Phi 0.9 \text{ mm}$ $N = 20$ 匝	
	1 kHz	100 mA $I = 1.8 \text{ A}$ $L \geq 140 \mu\text{H}$	$f = 1 \text{ kHz}$	100 mA OA $L = 180 \sim 350 \mu\text{H}$ 1.8A $L = 143 \sim 170 \mu\text{H}$	

用高磁导率的 Co 基非晶材料制作其磁芯。但因 Co 的价格高,难于达到要求的性价比,之后开始选用 Fe 基纳米晶软磁材料,从而降低了成本。

2.3.3 无间隙宽恒导电感材料及器件

铁基非晶无间隙宽恒导电感材料及器件是铁基非晶材料新的应用领域。用其制作的电感器件具有高频损耗低、磁导率高、饱和磁感高、磁芯尺寸小等特性。

这种材料和器件已广泛应用于 SMPS、DC/DC、AC/DC、UPS 等,表 4^[4]为无间隙宽恒导电感磁芯的应

用实例。

2.3.4 铁基纳米晶软磁材料磁粉芯及器件

通过非晶晶化基础上获得的铁基纳米晶软磁材料磁粉芯,其综合性能十分优越,用它代替 Fe-Ni 和 Fe-Ni-Mo 磁粉芯,拓展了纳米晶软磁材料的应用领域。

铁基纳米晶软磁材料磁粉芯具有良好的综合性能,如高饱和磁感应强度、良好的频率特性、良好的温度稳定性、低损耗等。表 5、图 3、图 4^[5]为几种常用磁粉芯的软磁性能比较。

表 5 几种常用磁粉芯的软磁性能比较

合 金	饱和磁感 B_s/T	居里温度 $T/^\circ\text{C}$	电阻率 $(\mu\Omega \cdot \text{m})$	饱和场强 $H/(\text{A} \cdot \text{m}^{-1})$	磁导率 $\mu/(\text{mH} \cdot \text{m}^{-1})$	损耗 $P_{0.17/20k}/(\text{W} \cdot \text{kg}^{-1})$
Fe 基微晶合金	> 1.2	570	1.25	$> 32\,000$	65	13.5
铁镍铝粉芯	< 0.8	460	0.4	16 000	125	12.8
铁粉芯	$B_{800} \cdot \text{m}^{-1} = 1.2$	> 600	0.1	24 000	80	115
铁硅铝粉芯	$B_{800} \cdot \text{A} \cdot \text{m}^{-1} = 0.46$	> 400	—	—	60	34

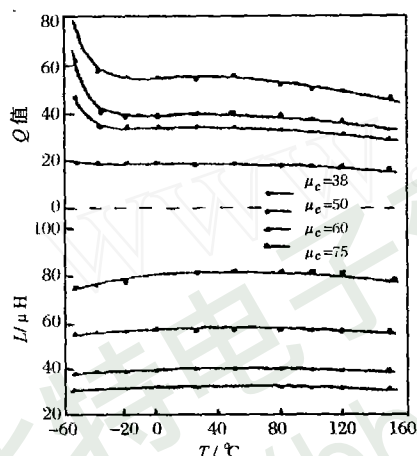


图 3 纳米晶磁粉芯的温度稳定性

铁基纳米晶软磁材料磁粉芯因其具有较高的电感量和高的品质因素 Q 值,适用于作高频大电流大功率条件下的各类电源变换器及功率因数校正技术中的扼流圈、滤波电感及贮能电感等。与用 0.1 mm 厚的硅钢铁芯相比,铁损从 30 W 左右降到 5 W 左右,磁芯质量可减轻 15% 左右。

2.4 高精度电流互感器

电流互感器的性能可以从三个方面来讨论,误差特性、绝缘特性和热特性,其中以误差特性最为重要。电流互感器应能准确地将一次电流变换为二次电流,保证测量精度或使保护装置正确地动作,因此电流互感器必须保证高准确度。

对于大电流、高精度的电流互感器,磁芯材料的磁特性是产生误差的一个很大的影响因素。以往较常用的材料是坡莫合金,但坡莫合金高昂的价格限制了其大规模应用,纳米晶软磁材料是目前最为理想的制造大电流、高精度电流互感器磁芯的材料。纳米晶软磁材料的高磁导率(初始磁导率 $\mu_0 \geq 60000$)和低损耗特

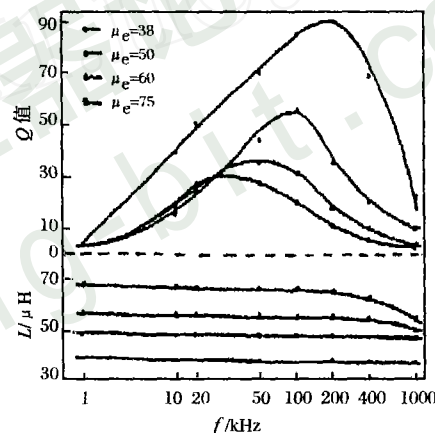


图 4 纳米晶磁粉芯的频率特性

性很好地满足了电流互感器的精度要求。

磁芯材料的温度稳定性对测量精度有很大的影响。对纳米晶软磁材料进行温度稳定性研究发现,在工作磁感应强度低于 0.8 T、使用温度低于 120 $^\circ\text{C}$ 时,磁芯的 μ 值随温度的升高而略有增加,这有利于减小互感器的测量误差。近几年来,国内有关单位开展了电流互感器纳米晶软磁磁芯的研制生产工作,所生产的纳米晶软磁电流互感器不仅质量要比坡莫合金轻 1/3,而且精度可达 0.2 s 级水平^[1]。

2.5 高频电流取样器

高频电流取样器由于其使用频带宽、测量精度高,用常规软磁材料难于满足其全频段幅值和相位的高精度测量,通常用适合于不同频段的几种软磁材料制作电流取样器,进行分频段测试,这不但大幅度地增加了测量仪器的质量和体积,设备操作不便,且对测试精度有着较大的影响。

通过对纳米晶软磁材料的成分及处理工艺进行设计和调整,用该种材料制备的纳米晶软磁磁芯制作高

频电流取样器,其性能与国外同类产品相当。

2.6 巨磁阻抗传感材料及器件

材料的交流阻抗随外加直流磁场的改变而变化的特性称为磁阻抗效应。最初对这一效应研究得最多的是具有零或负磁致伸缩系数的钴基非晶态软磁合金细丝,随着研究的深入以及新型纳米软磁材料—铁基纳米晶软磁合金的研制成功,由于其具有非常优异的软磁性能,是研究 GMI 效应的最佳材料,正日益受到国内外学者的重视。当这种细丝通以高频电流时,丝两端感生的电压振幅随沿丝长方向所加外磁场强度的改变而变化,这种变化无磁滞效应,而且响应快、灵敏度高,这种特别大的磁阻抗效应即为巨磁阻抗效应(Giant Magneto-impedance)。它的灵敏度一般情况下可达 $0.25\% / (\text{A} \cdot \text{m}^{-1})$,比传统的霍尔元件高出两个数量级,同时比最近几年才发展起来的巨磁电阻效应(Giant Magneto-Resistance, GMR)还高一个数量级,巨磁阻抗效应一般简称为 GMI。GMI 效应的典型特征曲线如图 5 所示^[5]。

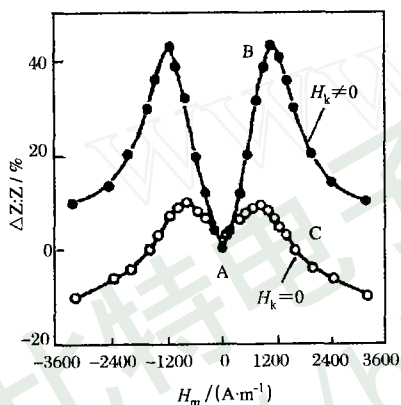


图5 GMI效应的典型特征

随着自动化和信息时代的到来,各种器件正在向着微型化、高信息密度、高灵敏度的方面发展。具有 GMI 效应的巨磁阻抗效应材料,由于其交流磁阻抗随外加磁场改变而变化极其灵敏,在室温下的巨磁阻抗效应和低频外磁场下的高灵敏度,使其在磁传感器、磁灵敏开关、自动化控制系统等方面有较大的应用前景:利用巨磁阻抗效应做成传感头可以具有磁阻磁头所特有的优点,即它探测的是磁通量而不是磁通量的变化,同时,它是一种无线圈探测头,与被测面间可以为非接触的,而且比磁阻头可以有更大的间隙,此外,磁阻抗传感器还具有无磁滞效应的优点。与磁通传感器及磁阻传感器比较,唯有磁阻抗传感器可同时具有高灵敏度、微型尺寸和快速响应等优点,它使用的是交流信号,为实现许多性能提供方便,如调制解调、滤波、振荡和共振等,这些是磁阻传感器所做不到的,这类传感器可用于转速测量仪、汽车 ABS 防抱死装置传

感器等中;用巨磁阻抗材料制作的弱磁场传感器可用于宇航工程、军事探测、地质勘探、医疗诊断、交通控制和机械工业(汽车、机械人、材料探伤等)等的磁场测量,有广阔的应用前景。

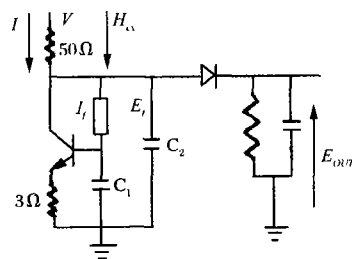


图6 磁场传感器的电路原理图

图6为一个用直流电源工作的磁场传感器的电路图^[6]。图中 V 表示直流电压, I 表示输入电流, H_{ex} 为外加磁场, I_t 表示流过样品的电流, E_i 为样品两端的电压, E_{out} 是器件的输出电压, C_1 、 C_2 为电容。整个电路所用的功率只有 20 mW ($V_{CC} = 1.5 \text{ V}$, $I = 13 \text{ mA}$), 在外场 $H_{ex} = 800 \text{ A/m}$ 时, 输出 E_i 的变化可达 24%, 灵敏度为 $0.3\% / (\text{A} \cdot \text{m}^{-1})$ 。

3 结束语

非晶/纳米晶软磁材料具有高饱和磁感应强度、高磁导率、低高频损耗等性能特点,是综合软磁性能最为优越的一类软磁材料。用非晶/纳米晶软磁材料制作的器件具有质量轻、体积小、性能高等优点,在大功率中高频变压器、高频开关电源、电磁兼容器件、高精度电流互感器、巨磁阻抗传感器等中得到了广泛的应用,是软磁材料的又一个发展方向和热点。

参考文献:

- [1] 李国栋,当代磁学[M]. 合肥:中国科技大学出版社,1999: 173.
- [2] 王红霞,等. 非晶超微晶软磁合金在电力电子领域的应用[J]. 金属功能材料,1998,增刊:104.
- [3] 毕耀宗. 非晶软磁材料在大功率中、高频电源变压器上的应用[J]. 国际电子变压器,2003(11):192.
- [4] 学贝. 非晶微晶合金材料及其在电磁器件中的应用[J]. 电子变压器技术,2003(2):28.
- [5] 张甫飞. 非晶超微晶合金材料及其应用[C]. 第一届全国磁性材料与电子变压器电感器应用技术研讨会,2000-06: 158-169.
- [6] Panina L V, et al. Giant magneto-impedance in Co-rich amorphous wires and films[J]. IEEE Trans Mag, 1995, 31 (2): 1249.
- [7] Uchiyama T, et al. Magneto-impedance in sputtered amorphous films for micro magnetic sensor[J]. IEEE Trans Mag, 1995, 31 (6): 3182.