

# Ni2Fe 合金电镀的研究进展

杨余芳<sup>1</sup>, 龚竹青<sup>1</sup>, 邓丽元<sup>2</sup>, 马玉天<sup>1</sup>, 阳征会<sup>1</sup>

(1. 中南大学冶金科学与工程学院, 长沙 410083; 2. 中南大学化学化工学院, 长沙 410083)

**摘要:** 回顾了 Ni2Fe 合金电镀的发展进程。总结了 Ni2Fe 合金电镀工艺的优点。介绍了其镀液类型、各种电沉积方法的特点、常用体系(柠檬酸体系、BNF 体系、Nylon 工艺、葡萄糖体系和抗坏血酸体系)的实用工艺配方。综述了 Ni2Fe 合金电沉积机理、晶体结构及其电沉积影响因素的研究现状,指出了今后的发展方向。

**关键词:** Ni2Fe 合金; 电沉积

中图分类号: TQ153.2

文献标识码: B

文章编号: 1004 - 227X(2005)05 - 0023 - 05

## Progress of Ni2Fe alloy plating

YANG YuFang<sup>1</sup>, GONG Zhuqing<sup>1</sup>, DENG Liyuan<sup>2</sup>, MA Yutian<sup>1</sup>, YANG Zhenghui<sup>1</sup>

(1. College of Metallurgical Science and Engineering, Central South University, Changsha 410083, China;

2. College of Chemistry and Chemical Engineering, Central South University, Changsha 410083, China)

**Abstract:** The progress of Ni2Fe alloy plating was reviewed. The advantages of Ni2Fe alloy plating technics were summarized. The bath types, characteristics of various electro deposition methods, and the applied process formulas of common systems (including citric acid system, BNF system, Nylon process, glucose system and ascorbic acid system) were introduced. The research status of deposition mechanism and crystal structure of Ni2Fe alloy, and influences of various factors on Ni2Fe alloy plating deposition were overviewed. Development trends of Ni2Fe electroplating were presented.

**Keywords:** Ni2Fe alloy; electrodeposition

## 1 前言

Ni2Fe 合金镀层具有优良的磁学、电学和力学性能,色白,结晶细致,覆盖能力强,有良好的光亮性、整平性、均匀性、延展性和抗腐蚀性。Ni2Fe 合金镀层广泛用作防护装饰、耐磨性材料,是重要的功能磁性材料,大量应用于计算机的储存装置和电子工业的记忆、记录装置上;其磁饱和强度随 Fe 含量的增加而增加,用电沉积法合成 Ni2Fe 合金是一条生产磁性膜的捷径;电沉积 Ni2Fe 合金成本低,镀层中 Ni、Fe 含量较易调节,几乎能在任何导电基体上沉积。

## 2 Ni2Fe 合金电镀的发展概述

Ni2Fe 合金电沉积的最早研究是用于防护—装

饰,能节省昂贵的 Ni,制取应用于电子工业的铁磁记忆新材料。上个世纪四、五十年代,有人试图用 Ni2Fe 合金电镀代替 Ni 电镀,但都处于探索阶段。在较长时间内 Ni2Fe 合金电镀发展迟缓,主要原因在于 Fe 是镀 Ni 的有害杂质,其存在使 Ni 镀层出现针孔、龟裂、分层、疏松、发黑、脱落现象。在排除 Fe 对镀 Ni 的干扰中发现,当镀液中 Ni、Fe 含量比超过一定范围,但不形成 Fe(OH)<sub>3</sub> 沉淀时,可以形成性能良好的 Ni2Fe 合金镀层,Ni2Fe 合金电镀于是很快发展起来。

1971 年,美国 OXY 金属工业公司 Dick Clouss 和 Robert Tremmel 首次研究成功取代光亮镀 Ni 的光亮 Ni2Fe 合金电镀新工艺,轰动了国际电镀界,获得 1973 年美国金属学会“表面涂饰奖”<sup>[1]</sup>。国外有代表性的 Ni2Fe 合金电镀工艺有 OXY 公司的 Niron 体系<sup>[1]</sup>、M&T 化学公司的“3 号 Ni2Fe 合金”体系和 Udylyte 公司的 Nylon 工艺等<sup>[2]</sup>。我国于 20 世纪 70 年代末引入光亮 Ni2Fe 合金电镀工艺,于 1978 年研制成功柠檬酸盐 Ni2Fe 合金电镀工艺,很快得到推广应用;不久又研制成功快速、镀层光亮和整平性好的 NT Ni2Fe 合金电镀工

收稿日期:2004 - 12 - 29 修回日期:2005 - 03 - 02

作者简介:杨余芳(1967 - ),女,博士研究生,研究方向为应用电化学。

作者联系方式:(Email) zzyufang @163.com

芝<sup>[3]</sup>;1981年单层、双层和三层 Ni<sub>2</sub>Fe 合金电镀获得成功<sup>[4]</sup>;1983年研制成功 BNF 体系和葡萄糖酸盐体系<sup>[5]</sup>;1984年研制出适于滚镀的 RC 体系和抗坏血酸体系<sup>[6]</sup>,后来研制了 Niron 光亮 Ni<sub>2</sub>Fe 合金电镀工艺、含新型 GTR 稳定剂可与多种光亮剂匹配使用的工艺。这些工艺的区别在于采用了不同的稳定剂和光亮剂。目前,国内应用的工艺主要有 BNF 型、RC 型、抗坏血酸型、葡萄糖酸钠-葡萄糖型、NT 型、Niron 型等<sup>[7]</sup>。

### 3 Ni<sub>2</sub>Fe 合金电镀工艺特点

#### 311 Ni<sub>2</sub>Fe 合金电镀工艺的优点

可利用镀 Ni 的全套设备进行 Ni<sub>2</sub>Fe 合金电沉积,以廉价的 Fe 取代部分 Ni,合金中 Fe 含量可高达 30%~50%,降低生产成本 15%~20%;把镀 Ni 液中的有害 Fe 杂质变为合金镀层的有用成分,排除了镀液管理的一大故障;Ni<sub>2</sub>Fe 合金镀层质量如光亮度等,和光亮镍镀层相同,而整平性高于光亮镍,覆盖能力良好;Ni<sub>2</sub>Fe 合金镀层镀铬性能好,尤其是镀铬深镀能力比光亮镍镀层好,复镀性能优于光亮镍;Ni<sub>2</sub>Fe 合金镀层韧性高于纯镍,硬度比纯镍层高;将光亮镍液转换为光亮 Ni<sub>2</sub>Fe 合金镀液的手续简单;操作中 Ni<sub>2</sub>Fe 合金镀液带出损失少<sup>[8]</sup>。

#### 312 Ni<sub>2</sub>Fe 合金电沉积的方法

##### 31211 Ni<sub>2</sub>Fe 合金电沉积液类型

Ni<sub>2</sub>Fe 合金电沉积液主要有含简单盐类的镀液和络合盐的镀液。镀液若按稳定剂类型大致分为:柠檬酸盐(络合型)体系、抗坏血酸(还原型)体系和柠檬酸+葡萄糖(酸)(络合-还原型)体系;若根据电镀液中导电盐的类型则分为氯化物型、硫酸盐型、硫酸盐低氯化物混合型、氨基磺酸盐型、氟硼酸盐型、焦磷酸盐型等,它们的主盐为相对应的镍盐和铁盐。

氯化物镀液可在高电流密度下操作,即使 pH 值较低时,溶液仍有优良的均镀能力。电流效率较高,镀层化学成分均匀,热力学性质稳定,强度高,硬度大,耐腐蚀性能优良。但镀层内应力较大,被镀基体容易腐蚀,阳极溶解过快,主盐浓度易升高。

硫酸盐镀液所得镀层应力小,阳极溶解不好,镀层晶粒粗大,镀层质量下降,沉积速度较慢。

氯化物硫酸盐混合液(硫酸盐为主,少量的 NiCl<sub>2</sub>)较稳定,操作简便,镀液容易维护,成本低,对设备腐蚀性小,沉积速度快,镀层脆性及内应力均较小。

氨基磺酸盐镀液所得镀层表面呈块状,结晶晶粒粗大,无微观裂纹,断面组织呈柱状。镀液成本较高,高温下,氨基磺酸盐易分解。

##### 31212 Ni<sub>2</sub>Fe 合金电沉积类型

Ni<sub>2</sub>Fe 合金电沉积类型根据所用电源的电流类型分为直流法、非对称交流法、脉冲法、脉冲反向法。直流法所得镀层晶粒最大,非对称交流法所得镀层晶粒最小,恒电流脉冲法则居中。常用的电沉积方法为直流法。

非对称交流法(直流上叠加交流)能克服电极表面 pH 值的变化,抑制异常共沉积的产生,得到较为理想的坡莫合金镀层。由于存在阳极过程,使阴极沉积时出现的大颗粒结晶,在阳极过程优先溶解得以消除,所以非对称交流法所得镀层的平滑性和致密性最好。在非对称交流法中,当直流部分较交流部分低时,交流频率对合金 Fe 含量影响显著,控制频率可以控制镀层 Fe 含量。通过变频法可 1 次镀出 Fe 含量不同的层状合金。采用非对称交流法,选择最适宜的电解条件,可以得到晶粒细小、表面平整光滑、Fe 含量稳定分布的 Ni<sub>2</sub>Fe 合金。

脉冲电沉积是比直流电沉积更好的一种方法。在脉冲电镀中因物质扩散而受到的限制经常被减轻,通电时间较长时,恒电流脉冲法与直流法具有相似的电化学行为,但沉积的晶粒比较小。与直流法相比,脉冲法有许多可调操作参数,比如脉冲电流密度、反向电流密度、脉冲时间、间歇时间。采用脉冲电镀法,可以抑制 H<sub>2</sub> 析出,提高镀层质量,得到比直流电镀法硬度大、内应力小、晶粒细小、Fe 含量稳定的坡莫合金镀层<sup>[9]</sup>。Popov 等<sup>[10]</sup>利用脉冲电流在旋转圆盘电极上电镀 Ni<sub>2</sub>Fe 合金,发现使用脉冲电流可以提高表面平整性。采用脉冲反向电流电镀 Ni<sub>2</sub>Fe 合金时,在脉冲间隙期使用反向电流,导致 Ni 和 Fe 溶解,而 Ni 阳极不会发生钝化。随着反向脉冲电流的增大,Ni 的平均分电流密度减小。较短的脉冲时间或较高的频率使 Ni 的沉积速度减慢,合金中 Fe 含量增大<sup>[11]</sup>。

##### 31213 Ni<sub>2</sub>Fe 合金电镀实用工艺举例

Ni<sub>2</sub>Fe 合金电镀实用工艺配方见表 1。

## 4 Ni<sub>2</sub>Fe 合金电沉积机理、镀层结构和电沉积影响因素研究

### 4.1 Ni<sub>2</sub>Fe 合金电沉积机理的研究

Ni<sub>2</sub>Fe 合金电沉积是一种扩散控制过程<sup>[15]</sup>,Ni<sub>2</sub>Fe 合金的电沉积为异常共沉积,与 Ni、Fe 各自在单金属镀液中的沉积速度相比,Ni 的沉积被减慢,Fe 的沉积被加快<sup>[16]</sup>。

对 Ni<sub>2</sub>Fe 异常共沉积机理的解释存在较大分歧。Thomas C. Franklin 认为<sup>[17]</sup>,异常共沉积是由于电极表面不溶性膜或络离子的还原所引起,而不是由于溶液

表 1 Ni2Fe 合金电镀常用体系工艺配方

Table 1 Process formulae of common system of Ni2Fe alloy plating

	柠檬酸体系	BNF 体系 <sup>[14]</sup>	Nylon 工艺 <sup>[2]</sup>	葡萄糖体系 <sup>[8]</sup>	抗坏血酸体系 <sup>[13]</sup>	
(硫酸镍)/(g/L)	300~380 <sup>[12]</sup>	180~220 <sup>[13]</sup>	100~125	80~150	200	45~55
(硫酸亚铁)/(g/L)	20~30	20~25	5~15	5~20	20	17.5~20
(氯化镍)/(g/L)			15~20	40~80		100~105
(硼酸)/(g/L)		40~45	40~45	40~50	50	27.5~30
(柠檬酸)/(g/L)	15~20					
(柠檬酸钠)/(g/L)		28~30				
(氯化钠)/(g/L)	10~13	25~30			25	
(糖精)/(g/L)	1~3	3	2.5~3.5		5	2~4
(苯亚磺酸钠)/(g/L)		0.3~0.4			0.3	0.2~0.8
(葡萄糖)/(g/L)					30	
(葡萄糖)/(g/L)					4~9	
(络合剂)/(g/L)	FN15~50					
光亮剂( )体积浓度/(mL/L)	FN2I 20					
光亮剂( )体积浓度/(mL/L)	FN2S 2.5					
(硫酸钠)/(g/L)	60~80					
(抗坏血酸)/(g/L)						1~1.5
(琥珀酸)/(g/L)						0.2~0.4
ABSB 体积浓度/(mL/L)						4~8
BNF21 体积浓度/(mL/L)			25~35			
BNF22 体积浓度/(mL/L)			0.8~1.2			
(十二烷基硫酸钠)/(g/L)	0.05~0.15	0.1~0.3	0.2~0.3		0.3	0.05~0.1
791 体积浓度/(mL/L)					3.8	
J/(A/dm <sup>2</sup> )	2~6	2~2.5	2~5	2~10	3~5	2~10
/	50~55	60~65	55~65	50~70	58~65	55~65
pH 值	2.5~3	3.0~3.5	3~4	2.8~3.5	3.5	3.0~3.8
S <sub>(Ni电极)</sub> S <sub>(Fe电极)</sub>		4~5 1	6~14 1		6~8 1	

中处于热动平衡状态的离子还原所引起。Dahms<sup>[18]</sup>、Croll<sup>[19]</sup>认为, Ni2Fe 共沉积过程中, 副反应 H<sub>2</sub> 的析出速度比 H<sup>+</sup> 扩散到阴极表面的速度快, 电极表面因 pH 值升高而形成 Fe(OH)<sub>2</sub>, Fe(OH)<sub>2</sub> 选择性膜吸附在电极表面, 阻碍了 Ni<sup>2+</sup> 电沉积, 但允许 Fe<sup>2+</sup> 电沉积, 从而形成异常共沉积。但这一观点无法解释 Ni2Fe 共沉积时 Fe 的分极化曲线明显正移现象。后来有实验结果表明, 甚至在低 pH 值时, 异常行为也会发生。此外, 由于水溶液中 Fe(OH)<sup>+</sup> 和 Ni(OH)<sup>+</sup> 的稳定常数不同, 有人认为随着 pH 值升高, Ni(OH)<sub>2</sub> 的沉积比 Fe(OH)<sub>2</sub> 早得多<sup>[10, 20~21]</sup>。也有人认为异常共沉积是由 Ni2Fe 基体上 Fe<sup>2+</sup> 欠电位沉积所引起, 但他们无法说明共沉积时 Ni<sup>2+</sup> 电沉积被阳化以及低电流密度下正常共沉积的事实。李平等认为<sup>[22]</sup> Ni2Fe 异常共沉积是由于 Fe<sup>2+</sup> 发生水解, 生成 FeOH<sup>+</sup>, FeOH<sup>+</sup> 与生长着的 Ni 原子团 (Ni<sup>3+</sup>) 发生还原反应, 生成 Ni<sup>3+</sup> (FeOH), Ni<sup>3+</sup> (FeOH) 进一步还原成 Ni2Fe 合金, 由于 Ni<sup>3+</sup> 被 FeOH<sup>+</sup> 占据, 阳化了 NiOH<sup>+</sup> 的进一步放电, 同时对 FeOH<sup>+</sup> 的放电过程起了活化作用。Gimmet 等发现, 在脉冲反向电镀中阳极脉冲电流升高能减小 Ni2Fe 共沉积的异

常行为<sup>[11]</sup>。Horkans 认为, Fe<sup>2+</sup> 和 Ni<sup>2+</sup> 的放电沉积是通过氢氧化物薄层实现的, 合金镀层中铁的含量可由 Fe<sup>2+</sup> 和 Ni<sup>2+</sup> 通过 Fe(OH)<sub>2</sub> 吸附层的相对扩散速度来测定<sup>[23]</sup>。另一种新的模型认为, Ni<sup>2+</sup> 和 Fe<sup>2+</sup> 通过水解形成 NOH<sup>+</sup> 和 FeOH<sup>+</sup>, 并在阴极表面放电。异常共沉积是由于电极附近高浓度的 FeOH<sup>+</sup> 所引起。Mat2 losz 认为, Ni<sup>2+</sup> 和 Fe<sup>2+</sup> 的还原是通过两步机理发生的, 第一步是一价中间体的吸附过程, 第二步是它还原到自然状态的过程, 异常共沉积发生在被吸附铁中间体优先覆盖的表面上, 金属离子的竞争吸附决定了铁和镍的沉积速度<sup>[24]</sup>。总之, 导致 Ni2Fe 合金异常共沉积的机理说法较多, 尚未得到统一的认识, 有待进一步研究。

#### 412 Ni2Fe 合金电沉积晶体结构的研究

Ni2Fe 合金镀层可分为晶态和非晶态, 晶粒大小和组成强烈依赖于电解液组成和沉积参数。溶液中 Ni<sup>2+</sup>/Fe<sup>2+</sup> 比值增大, 合金中铁含量下降, 晶粒增大。基体和搅拌速度也影响沉积层颗粒大小, 搅拌速度较小, 颗粒较大<sup>[25]</sup>。在普通溶液中电沉积晶态 Ni2Fe 合金时, 在较宽的电流密度范围和较短的时间内, 可沉

积出光亮的 Ni<sub>2</sub>Fe 合金镀层。当电流密度较小时,电沉积得到的 Ni<sub>2</sub>Fe 合金为柱状结构;当电流密度过大和沉积时间延长时,Ni<sub>2</sub>Fe 合金变成层状结构,这种层状结构耐蚀性差,脆性大。当电流密度增大时,柱状晶格由粗变细;当镀液温度升高时,镀层柱状结晶变得更粗大;当 pH 值变大时,镀层由柱状结构变为层状结构<sup>[26~27]</sup>。

纳米晶体 Ni<sub>2</sub>Fe 合金有良好的机械性能和磁性。电流密度增大,Ni<sub>2</sub>Fe 合金晶粒大小减小,硬度提高<sup>[28]</sup>。在高过电位下,可沉积出纳米晶体 Ni<sub>2</sub>Fe 合金。在电沉积纳米晶体 Ni<sub>2</sub>Fe 合金时,最严重的缺点是产生内应力(宏观应力)。当内应力大到超过断裂强度时,将导致镀层产生裂缝<sup>[29]</sup>。在电解液中加入适量的应力抑制剂如糖精等,可以减小颗粒大小和应力值。

非晶态 Ni<sub>2</sub>Fe 合金,是一种微观近程有序、远程无序结构的材料,无晶界,无位错,表现为宏观上的均一性和各向同性;化学成分均匀,无腐蚀核心,热力学性质稳定,具有强度高、硬度大、韧性好以及抗蚀性能强等性能。在室温下,当镀液中有 P、B 以及其它元素存在时,会导致 Ni<sub>2</sub>Fe 合金镀层结构发生本质上的变化,使 Ni<sub>2</sub>Fe 合金镀层由晶态结构完全转变为非晶态结构<sup>[30]</sup>。

#### 413 Ni<sub>2</sub>Fe 合金电沉积的影响因素

##### 41311 稀土元素

在 Ni<sub>2</sub>Fe 合金镀液中加入少量稀土添加剂(如氧化镧),稀土吸附在阴极表面,参与表面吸附膜的形成,使阴极表面氢氧化铁吸附膜部分被稀土添加剂所取代,降低了 Fe<sup>2+</sup> 优先沉积的速度,使合金镀层中 Fe 含量有所降低。加入稀土,镀液光亮电流密度范围明显增宽,阴极极化明显增大,镀层结构更加紧密,结晶细化均匀;电流效率增大,镀液分散能力增大,镀液中 Fe<sup>3+</sup> 有所降低,起到了稳定镀液的作用。随着稀土加入量增加,镀层中铁含量随之降低。当镀液中稀土含量逐渐增加时,镀层的耐蚀性逐渐提高。当稀土超过一定值时,阴极极化程度几乎不再变化<sup>[31~32]</sup>。

##### 41312 有机添加剂

所用有机添加剂有光亮剂、表面活性剂、络合剂、稳定剂等。Ni<sub>2</sub>Fe 合金电镀中所用光亮剂有初级光亮剂和次级光亮剂。初级光亮剂比较典型、效果较好的有糖精、苯亚磺酸钠、磺酸丙烯酸酯和茜素磺酸钠等。这些物质的分子有一定的极性,能在电极上吸附,阻化 Ni<sub>2</sub>Fe 沉积,使得镀层光亮,结晶细致,附着力强,并减少镀层的内应力,增加延展性。次级光亮剂的分子结构中含有一些极性较强的基团,用量很少,光亮性

强,整平性较好。但是镀层应力较大,在镀液中易分解,并可能夹杂在镀层中,且消耗量较大。用得较多的是炔醇,或炔醇与环氧系列的缩合产物等,当需要高纯度材料时应避免使用<sup>[33]</sup>。

为防止 H<sub>2</sub> 在阴极表面停留而产生针孔和麻点,可使用阴离子型表面活性剂十二烷基硫酸钠,以降低界面张力。十二烷基硫酸钠含量过多时,对界面张力的降低不明显,反而易夹入镀层中,而使镀层内应力加大,镀层含硫量增多。在高 pH 值时,它能与 Ni<sup>2+</sup>、Fe<sup>2+</sup> 形成不溶性化合物而大量消耗,而在低 pH 值时,也有一定的分解。其含量一般为 0.11~0.16 g/L,需定期补充。

柠檬酸是常用的络合剂,可以消除 Fe<sup>3+</sup> 对 Fe<sup>2+</sup> 和 Ni<sup>2+</sup> 共沉积的干扰。在柠檬酸(盐)溶液中加入甘氨酸,可使 Ni<sub>2</sub>Fe 合金沉积过程中的成核数量和成核速度升高,Ni<sub>2</sub>Fe 合金沉积层中球形颗粒变细,表面粗糙度减小。

L2 抗坏血酸、没食子酸、葡萄糖、乳糖等可作为还原剂加入镀液中,便于稳定连续电镀。抗坏血酸能与氧化剂作用,可将 Fe<sup>3+</sup> 还原成 Fe<sup>2+</sup>,并把溶液中溶解的氧消除掉,消除了 Fe<sup>2+</sup> 被氧化的可能,保证了 Fe<sup>2+</sup> 浓度的稳定性。抗坏血酸被氧化为去氢抗坏血酸,镀液中的去氢抗坏血酸在阴极上又可还原成抗坏血酸,可有效地长期循环使用。

##### 41313 pH 值

pH 值的高低会影响合金的组成。pH 值太低时易析氢而影响镀层质量,同时使阴极电流效率降低,阳极溶解加快,主盐浓度升高;pH 值较高时,电流效率较高,合金中 Fe 的含量较高,但 pH 值太高,则溶液不稳定,有 Fe(OH)<sub>3</sub> 沉淀出来,使镀层发暗。为了避免此类情况发生,可用硼酸或醋酸作缓冲剂。硼酸的存在,使 H<sup>+</sup> 的还原电位向更负的方向移动,阻碍了阴极表面由于水的分解引起的 pH 值升高。在 pH 值为 3~3.8 时硼酸的缓冲作用最强,含量可为 30~60 g/L,以 40~45 g/L 为最好,低于 20 g/L 时失去缓冲作用<sup>[34~35]</sup>。

##### 41314 电流密度

Ni<sub>2</sub>Fe 共沉积过程中,Fe<sup>2+</sup> 放电受扩散控制,电流密度增加越大,扩散过程的影响越大,阴极区 Fe<sup>2+</sup> 离子越贫乏,镀层中铁含量越低。当电流密度适宜时,镀层与基体附着力较好,电流效率较高,晶粒较小。电流密度过低,沉积速度慢,光亮不足。电流密度过高,镀层容易烧焦。

##### 41315 温度

温度对 Ni 和 Fe 的沉积速度的影响相反,温度升

2005年5月

Ni2Fe合金电镀的研究进展

高, Ni的沉积速度减慢, Fe的沉积速度增大, 镀层中Fe的含量上升。与此同此, 扩散速度增大, 浓差极化和阴极极化降低, 阴极反应速度加快, 使镀层结晶变粗。温度过高, 会促使 $Fe^{3+}$ 的生成, 使添加剂易分解和挥发, 从而加大添加剂的消耗量。温度低时, 电流效率降低, 出光速度慢, 镀层无光泽, 整平性不好。因此应选用适当的温度, 以获得理想的镀层。

## 5 Ni2Fe合金镀层的发展方向

我国现有单层、双层和三层Ni2Fe合金电镀、光亮Ni2Fe合金电镀、功能性厚层Ni2Fe合金电镀、高整平全光亮Ni2Fe合金电镀等, 在室内家具、零件、办公用品、家电产品、杂货件等方面均得到广泛应用。但是, 用电沉积的方法生产用于防护-装饰和功能磁性材料等方面的Ni2Fe合金箔, 则非常欠缺, 而国内的需求却日益增大, 当前主要靠国外进口来满足需求。故今后应加强此方面的研究工作, 以满足国内发展需求。此外, 国际上Ni2Fe合金电镀将会朝着由高温向低温方向发展, 以克服高温下能耗大、控温困难、 $Fe^{3+}$ 离子增长速度加快、添加剂易分解以及镀液处理费用较高等问题。研制新型的可在较低温度下获得高整平性、全光亮、低消耗、夹杂少的Ni2Fe合金电镀光亮剂和稳定剂, 仍将是今后的发展方向。

### 参考文献:

- [1] Clauss R T, Tremmel R A. Plating, 1973, 60: 803.
- [2] 川崎元雄, 小西三郎, 土肥信康. 实用电镀[M]. 北京: 机械工业出版社.
- [3] 孙锡琪, 曹盛禹, 于挺杰. 电镀镍铁合金和亮镍的新型添加剂—“791”[J]. 电镀与环保, 1981, 1(2): 30-32.
- [4] 曹盛禹, 孙锡琪, 于挺杰. 自行车圈电镀双层镍铁合金/微孔铬[J]. 电镀与环保, 1981, 1(4): 1.
- [5] 梁锦洲, 梁国栋. NT镍铁合金电镀工艺研究报告[J]. 电镀与涂饰, 1988, 7(2): 1.
- [6] 曹盛禹, 孙锡琪, 刘永定, 等. RC型电镀镍铁合金工艺[J]. 电镀与环保, 1984, 1(2): 10.
- [7] 陈秉彝, 姚士冰, 杨方祖, 等. 高整平全光亮镍铁合金电镀的研究[J]. 电镀与环保, 1989, 9(6): 1-5.
- [8] 屠振密. 电镀合金原理与工艺[M]. 北京: 国防工业出版社, 1993. 199.
- [9] Hadian S E, Gabe D R. Residual stresses in electrodeposits of nickel and nickel2iron alloys[J]. Surface and Coatings Technology, 1999, 122: 119-135.
- [10] Yin KM, Jan S L. Current pulse plating of nickel2iron alloys on rotating disk electrodes[J]. Surface and Coatings Technology, 1996, 79: 252-262.
- [11] Yin KM, Jan S L, Lee C C. Current pulse with reverse plating of nickel2iron alloys in a sulphate bath[J]. Surface and Coatings Technology, 1996, 88: 219-225.
- [12] 电镀手册[M]. 北京: 国防工业出版社, 1977. 430.
- [13] 曾华梁, 吴仲达. 电镀基本原理与实践[M]. 北京: 机械工业出版社, 1986. 356.
- [14] 梁锦洲, 梁国柱, 谢国骥, 等. BH290光亮镀镍添加剂工艺研究与扩大试验报告[J]. 电镀与涂饰, 1990, 9(1): 1.
- [15] Afshar A, Dolati A G, Ghorbani M. Electrochemical characterization of the Ni2Fe alloy electrodeposition from chloride2citrate2glycolic acid solutions[J]. Materials Chemistry and Physics, 2002, 77: 352-358.
- [16] Brenner A. Electrodeposition of alloys [M]. New York: Academic Press, 1963.
- [17] Thomas C F. A possible role of electrode filming in abnormal deposition of alloys[J]. Surface and Coatings Technology, 1996, 82: 65-69.
- [18] Dahms H. The influence of hydrolysis on the deposition and co2deposition of iron2group metals (Fe, Co, Ni) at the dropping mercury electrode[J]. Electroanal Chem, 1964, (8): 5-12.
- [19] Dahms H, Croll I M. The anomalous codeposition of nickel2iron alloys [J]. Electrochem. Soc., 1965, 112: 771-775.
- [20] Dahms H. The influence of hydrolysis on the deposition and co2deposition of iron2group metals (Fe, Co, Ni) at the dropping mercury electrode [J]. Electroanal Chem, 1964, (8): 5-12.
- [21] Dahms H, Croll I M. The anomalous codeposition of nickel2iron alloys [J]. Electrochem Soc, 1965, 112: 771-775.
- [22] 李平, 许家园, 周绍民. 镍铁异常共沉积研究[J]. 物理化学学报, 1989, (5): 693-698.
- [23] Hrkans. On the role of buffers and anions in nickel2iron electrodeposition[J]. Electrochem Soc, 1981, 45: 128.
- [24] Matlosz M. Competitive adsorption effects in the electrodeposition of iron2nickel alloys[J]. Electrochem Soc, 1993, 140: 2272-2279.
- [25] Allen B, Chi C H. Iron2cobalt and iron2cobalt2nickel nanowires deposited by pulse2reverse electroplating[J]. Electrochemistry Communications, 2003, (5): 78-82.
- [26] 戴洪斌. 电沉积铁镍合金织构现象的研究[J]. 电镀与环保, 1994, 14(6): 5-7.
- [27] 戴洪斌. 氨基磺酸盐镀镍铁合金组织结构的研究[J]. 表面技术, 1996, 25(1): 9-12.
- [28] Czerwinski F. The microstructure and internal stress of Fe2Ni nanocrystalline alloys electrodeposited without a stress2reliever[J]. Electrochimica Acta, 1998, 44: 667-675.
- [29] Hongqi Li, Fereshteh Ebrahimi. Synthesis and characterization of electrodeposited nanocrystalline nickel2iron alloys[J]. Materials Science and Engineering, 2003, A347: 93-101.
- [30] 何湘柱, 龚竹青, 蒋汉瀛. 非晶态合金电沉积研究[J]. 材料保护, 1998, 31(9): 19-21.
- [31] 王保玉. 稀土在镍铁合金电沉积中的作用[J]. 材料保护, 1998, 31(1): 12-14.
- [32] 朱龙章, 陈霞, 顾卫星. 稀土镧对镍-铁合金镀层铁含量及耐腐蚀性的影响[J]. 电镀与精饰, 1994, 16(6): 4-7.
- [33] 左正忠. 电镀镍铁合金高整平性光亮剂的研制[J]. 表面技术, 1990, 19(5): 15-21.
- [34] Zeh N, Landolt D. The influence of boric acid and sulfate ions on the hydrogen formation in Ni2Fe plating electrolytes[J]. Electrochimica Acta, 2000, 45: 3461-3471.
- [35] Yin KM, Lin B T. Effects of boric acid on the electrodeposition of iron, nickel and iron2nickel [J]. Surface and Coatings Technology, 1996, 78: 205-210.

[编辑: 韦凤仙]