

基于有限元的电感器线圈镀铜工艺仿真分析

樊爱珍

(陕西工业职业技术学院, 陕西 咸阳 712000)

摘要: **目的** 优化电感器线圈电镀工艺, 研究电感线圈电镀过程中电流、电解质电势和镀层厚度分布规律。**方法** 采用计算机仿真技术, 基于电镀动力学、电化学理论、法拉第定理和移动网格理论, 建立电感线圈匝数参数化的三维电感器线圈电镀模型。**结果** 电感线圈外部的铜离子浓度较高, 大约为 309 mol/m^3 。电感线圈最外圈的电镀厚度最厚, 约 $7.3141 \text{ }\mu\text{m}$ 。线圈外部较大的电流导致电镀线圈外侧出现较大的沉积速率。**结论** 电解的铜离子的质量传递是影响电镀动力学的最主要因素, 线圈电镀层厚度与电镀活性面上的电流分布相互作用。该电镀模型可用于分析线圈匝数对电镀工艺的影响, 优化设计类似电镀工艺, 研究电镀机理。

关键词: 电镀动力学; 移动网格; 计算机仿真; 电镀模型

中图分类号: TG153.1; TP391.9 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2014)05-0025-04

Simulation Analysis of Copper Electroplating of Inductor Coils Based on Finite Element

FAN Ai-zhen

(Shaanxi Industrial Vocational College, Xianyang 712000, China)

ABSTRACT: **Objective** To optimize the electroplating process of the inductor coil and study the current distribution, the electrolyte potential and the coating thickness distribution during the electroplating process of the inductor coil. **Methods** The computer simulation technology was used to build a three-dimensional inductor coil plating model with regards to parameterized coil turns based on plating kinetics, electrochemistry theory, Faraday theorem, and moving mesh model. **Results** The external part of inductor had a high copper concentration of about 309 mol/m^3 ; the outermost plating inductor coil had the highest thickness of about $7.3141 \text{ }\mu\text{m}$; the larger current in the external coil resulted in a larger plating deposition rate for the outer coil. **Conclusion** The mass transfer of electrolytic copper ion has the main effect on the plating kinetics. The plating thickness interacts with the current distribution on the active plating surface. The plating model can be used to analyze the impact of different plating turns on the plating process, the optimization design of similar electroplating process and the study of electroplating mechanism.

KEY WORDS: plating kinetics; moving mesh; computer simulation; plating model

近 10 年来,随着新材料的迅速发展,电镀行业迎来了新的发展研究热潮^[1]。电镀行业一直是中国重要的加工产业,旧的电镀工艺已经无法满足中国现代化制造加工的要求以及全世界对环境保护的迫切需

收稿日期: 2014-05-04; 修订日期: 2014-06-21

Received: 2014-05-04; Revised: 2014-06-21

基金项目: 陕西省教育厅立项课题(11Z14)

Fund: Shaanxi Province Office of Education Project (11Z14)

作者简介: 樊爱珍(1967—),女,陕西咸阳人,硕士,副教授,主要从事力学方面的科研和教学。

Biography: FAN Ai-zhen(1967—), Female, from Xianyang, Shannxi, Master, Associate professor, Mainly engaged in study and teaching of mechanics.

求,因此新工艺的开发已迫在眉睫,而新工艺的研发需要耗费大量人力、物力,并且会造成大量污染^[2-4]。随着计算机仿真技术的飞速发展,以数值分析替代电镀实验,不仅能缩短产品开发周期,降低产品开成本,而且丰富了电镀工艺优化的研究手段,给电镀行业带来了新的发展契机^[5]。

在广泛应用的各类电子器件中,电感线圈等磁性器件是组成电子线路不可或缺的重要部件,尤其是平面线圈的微电感结构。传统的镀铜等防护工艺不能满足现代工业标准的要求,因此研究和探索高质量的铜镀层防护工艺具有现实意义和实用价值^[6]。文中以电子电感器线圈为研究对象,对电感器线圈镀铜过程进行仿真,分析并阐明了其微米级铜电镀工艺和电镀机理,以期对实际电感器线圈电镀工艺优化提供理论指导和借鉴。

1 电镀模型定义

1.1 电镀模型

电镀工艺是基于电解原理,在导体上施加外加直流电作用,使得金属或者合金沉积到导体材料表面而形成一层镀层,该镀层具有不同于基体金属的性质和性能^[7]。文中研究的电镀模型几何形状如图1所示。此电镀模型包括2个部分:嵌于光刻胶内部直径为8 μm 的电镀线圈和光致抗蚀剂顶部50 μm 厚的矩形块形式的扩散层。电解液以 H_2SO_4 为基础,并加入一定量 CuSO_4 ,其电导率为10 S/m。

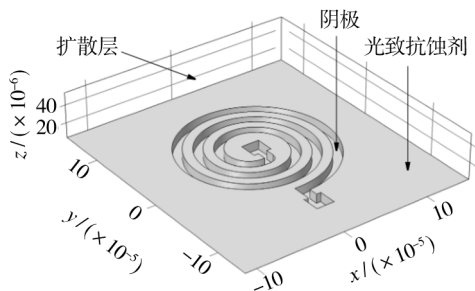


图1 电镀几何模型

Fig. 1 Electroplating geometric model

1.2 电流传导和电化学反应

电解液有恒定的电导率就表示有关于电荷传递的二次电流分布存在^[8]。采用电沉积模块来模拟电流分布,求解电解质电势 ϕ_1 和阴极上金属沉积导致的几何变形。电流为第二电流分布,在自由变形设定

中,采用超弹性平滑网格类型^[9]。在扩散层顶部边界,设置该处电势为0 V;在底部边界,阴极发生的电极反应为^[10]:



电极动力学模型采用浓度依赖动力学模型,其描述如下^[11]:

$$i_{kt} = J_{ec} (C_R \exp(\alpha_a FV/RT) - c_{\text{Cu}^{2+}}/c_0 \exp(-\alpha_c FV/RT)) \quad (2)$$

式中: J_{ec} 为交换电流密度,取值10 A/m²; C_R 为约化物质表达式,取值1; α_a 为阳极转化系数,取值1.5; α_c 为阴极转化系数,取值0.5; F 为法拉第常数,取值96 485 C/mol; R 为摩尔气体常数8.13 J/(mol · K); T 为热力学温度; $c_{\text{Cu}^{2+}}$ 为电解质铜离子浓度; c_0 为电解液中参考电解质铜离子的浓度,取值500 mol/m³; V 为超电势,其表达式见公式(3)。

$$V = \phi_s - \phi_{10} - E_{eq} \quad (3)$$

式中: ϕ_s 为初始边界电势, ϕ_{10} 为边界电解质电势,平衡势 E_{eq} 表示为(4)式^[12]。

$$E_{eq} = E_{eq0} + dE_{eq}/dT(T - T_0) \quad (4)$$

式中: E_{eq0} 为平衡势温度导数; T_0 为参考温度。

阴极电流密度平均值设为8 A/m²。除阴极和顶部扩散层电解质边界外,其余边界都是绝缘的。电极反应会导致电极边界沿着其法线方向微扰动。电极边界沿法线方向的速度 v_n 为:

$$v_n = -M_{\text{Cu}^{2+}} i_{kt} / 2\rho_{\text{Cu}^{2+}} F \quad (5)$$

式中: $M_{\text{Cu}^{2+}}$ 为铜的摩尔质量,取值63.55 g/mol; $\rho_{\text{Cu}^{2+}}$ 为铜离子的密度,取值8960 kg/m³。

1.3 电解液中 Cu^{2+} 传递

用菲克扩散定律描述电解液中 Cu^{2+} 的运动。使用稀物质传递模块模拟 Cu^{2+} 的传递,进而求解电解液中 Cu^{2+} 的浓度 $c_{\text{Cu}^{2+}}$,文中设置扩散系数为 10^{-9} m²/s。在顶部扩散层边界,设置参考电解质铜离子浓度。将离子流量 $F_{\text{Cu}^{2+}}$ 耦合到阴极上的电化学反应,根据法拉第定律,离子流量 $F_{\text{Cu}^{2+}}$ 表示为^[13]:

$$F_{\text{Cu}^{2+}} = i_{kt} / 2F \quad (6)$$

在其他边界耦合的离子流量均为0,电解液的初始铜离子密度设为500 mol/m³(此时模型外部边界不为0,遵守质量守恒)。外部镀层电极电流分布控制方程为^[14]:

$$\iint (-\sigma_1 \nabla \phi_1) dS = i_{1, \text{average}} \iint dS \quad (7)$$

式中: ϕ_1 为电解质电势; σ_1 为电解质导电率;

$i_{l,average}$ 是平均电流密度,取 -1000 A/m^2 。启动移动边界平滑,设置移动边界平滑调节系数为 0.5,边界电势初始值为 0。

1.4 边界条件

根据电极边界沉积速率,嵌于光致抗蚀剂膜内部的 $8\text{ }\mu\text{m}$ 电镀线圈域是允许发生变形的,而电镀扩散层域设置为固定。光致抗蚀剂竖直壁在 x 和 y 方向上作固定约束处理,而电镀线圈移动域与电镀扩散层固定域之间的内部边界在 z 方向上作固定处理,即设置为零位移约束。

2 有限元网格模型

对于一些边界变形域,使用指定的网格位移,而不是默认的零法向网格速度,这样模型的自由度数目会减少,从而使得求解器的计算速度得以提高^[15]。文中使用移动网格进行瞬态求解,电感线圈电镀有限元网格模型如图 2 所示(这是有限元数值分析,电镀是个瞬态过程,因为镀层厚度是不断变化的,所以采用移动网格)。

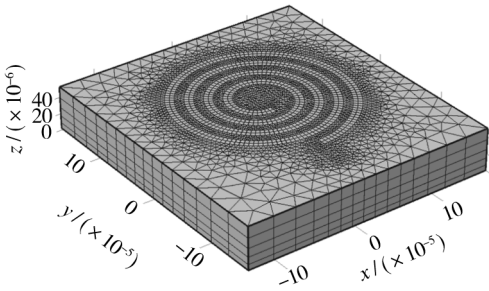


图 2 电感线圈电镀有限元网格模型

Fig. 2 Finite element model of an inductor coil for electrode position

3 结果与讨论

图 3 所示为电镀完毕后,电解液中的浓度和电流流线。阴极的铜离子浓度为 317 mol/m^3 ,明显高于周围其他位置的铜离子浓度。此外,阴极电感线圈外部的浓度略高于线圈中心的浓度。图 4 所示为阴极处局部电极电流。由于电感线圈周围的铜离子浓度较高,约为 309 mol/m^3 ,因此此处的电流较大,发生的电镀反应较为剧烈。这说明电解的铜离子的质量传递对于电镀动力学有最主要的影响,在电镀线圈的外侧出现较大的沉积速率。

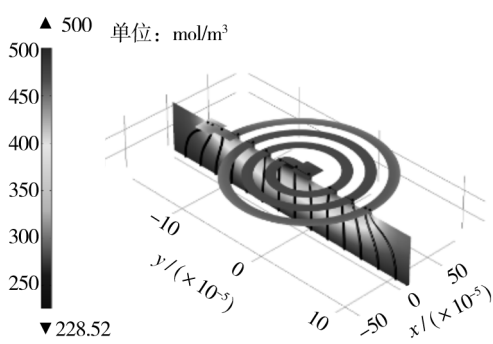


图 3 电镀完毕后电解液中铜离子浓度和电流流线
Fig. 3 Concentration of copper ion in the electrolyte after plating and electric current flow

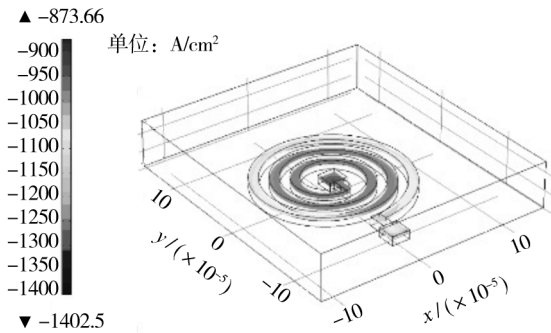


图 4 阴极处局部电极电流

Fig. 4 Local electrode current on the cathode

电极变形以及电镀铜层的厚度分布如图 5 所示。电感线圈最外圈的电镀厚度最厚,约为 $7.3141\text{ }\mu\text{m}$,这与上面所述的最外圈离子密度最大和沉积速率最大相吻合。随着电镀过程的进行,由掩模构建的线圈厚度逐渐减小,这反过来又影响电镀活性面上的电流分布。图 6 表示横坐标 $2\text{ }\mu\text{m}$ 切面的电解质电势。由于电镀模型的几何模型为螺旋圈形状,因此可知整个模型的电解质电势变化较小。由图 6 可以看出,其最

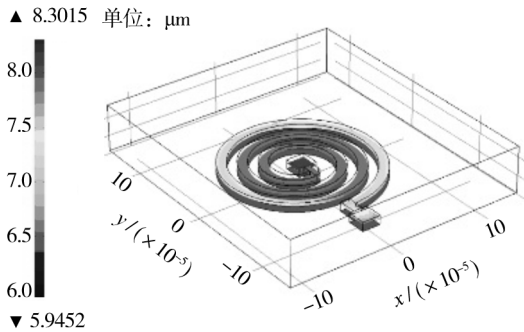


图 5 电极变形以及电镀铜层厚度分布
Fig. 5 Electrode deformation and thickness distribution of copper plating layer

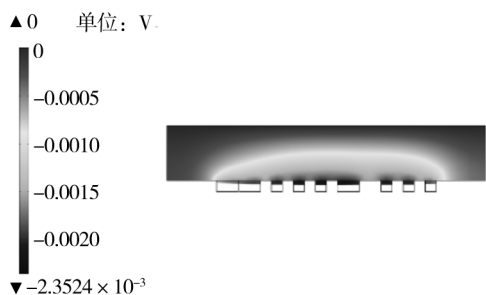


图6 横坐标为 $2\ \mu\text{m}$ 处切面的电解质电势

Fig.6 Electrolyte potential on the slice at the horizontal ordinate of $2\ \mu\text{m}$

大电势为 $2.3524 \times 10^{-3}\ \text{V}$, 而最小电势为 $0\ \text{V}$, 并且电感线圈附近电势变化极小, 基本维持在 $-1.5427 \times 10^{-3}\ \text{V}$ 左右。

4 结论

文中应用电镀动力学、电化学理论、法拉第定律、移动网格模型及应用计算机技术建立关于线圈匝数的三维电感器线圈电镀模型, 模拟了微米尺度下电感器线圈铜镀过程中的铜离子浓度、镀层厚度、沉积速率。仿真结果表明:

1) 电感线圈外部铜离子浓度较高, 并且线圈外部的电流也较大, 这说明电解的铜离子的质量传递对电镀动力学有最主要的影响, 导致电镀线圈外侧出现较大的沉积速率。

2) 电感线圈最外圈的镀层最厚。

3) 随着电镀过程的进行, 由掩模构建的线圈厚度逐渐减小, 这反过来又影响电镀活性面上的电流分布, 电解质电势的变化较小。

参考文献

- [1] 梅芳, 弓满锋. 电镀硬质氧化铝薄膜热残余应力测量[J]. 表面技术, 2013, 42(3): 108—111.
MEI Fang, GONG Man-feng. Measurement of Thermal Residual Stress of Electroplate Hard Alumina Films[J]. Surface Technology, 2013, 42(3): 108—111.
- [2] 陈羽, 廖树帜, 蒋登辉, 等. 管形器件电镀的物理模拟[J]. 电镀与涂饰, 2005, 24(11): 1—4.
CHEN Yu, LIAO Shu-zhi, JIANG Deng-hui, et al. Physical Simulation of Duct Device in Electroplating[J]. Electroplating and Finishing, 2005, 24(11): 1—4.
- [3] 易伟红, 周远才. 复杂铜波导的内腔镀银工艺[J]. 表面

技术, 2012, 41(5): 105—107.

YI Wei-hong, ZHOU Yuan-cai. The Technology of Silver Electroplating of Complicated Copper Waveguide's Cavity[J]. Surface Technology, 2012, 41(5): 105—107.

- [4] 刘志东, 陈勇, 朱军, 等. 45 钢喷射电镀 Ni 层激光重熔温度场数值模拟及其性能研究[J]. 应用激光, 2007, 27(2): 104—108.
LIU Zhi-dong, CHEN Yong, ZHU Jun, et al. Research on Temperature Field Numerical Simulation and Performance of Laser Remelted Ni-coating Oriented by Jet Electroforming on 45 Steel[J]. Applied Laser, 2007, 27(2): 104—108.
- [5] 陈贵清, 陈小刚. 冷硬铸铁活塞杆电镀硬铬工艺生产研究[J]. 热加工工艺, 2013, 42(12): 141—143.
CHEN Gui-qing, CHEN Xiao-gang. Production Study of Hard Chromium Plating Technology for Chilled Cast Iron Piston Rod[J]. Hot Working Technology, 2013, 42(12): 141—143.
- [6] 熊崑, 杜重麟, 陈阵, 等. Sn-Zn-La-CeO₂ 复合电沉积阴极极化的研究[J]. 表面技术, 2012, 41(1): 9—12.
XIONG Kun, DU Chong-lin, CHEN Zhen, et al. Study on Cathodic Polarization of Sn-Zn-La-CeO₂ Composite Electroplating Process[J]. Surface Technology, 2012, 41(1): 9—12.
- [7] 李获. 电化学原理[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2008.
LI Di. Principles of Electrochemistry[M]. Beijing: Beihang University Press, 2008.
- [8] 王伟伟, 孙腾, 侯健. 5083 铝合金在模拟淡水水中的电化学行为研究[J]. 装备环境工程, 2012, 9(1): 10—12, 45.
WANG Wei-wei, SUN Teng, HOU Jian. Study on Electrochemical Corrosion Behavior of 5083 Aluminum Alloy in Simulating Diluted Seawater[J]. Equipment Environmental Engineering, 2012, 9(1): 10—12, 45.
- [9] 段远富, 高四, 张伟, 等. 纳米碳孔金属化直接电镀技术[J]. 装备环境工程, 2013, 10(1): 114—117.
DUAN Yuan-fu, GAO Si, ZHANG Wei, et al. Direct Plating Technology for PTH Nano-carbon[J]. Equipment Environmental Engineering, 2013, 10(1): 114—117.
- [10] 屠振密, 胡会利, 侯峰岩. 三价铬电沉积铬基二元合金工艺的研究进展[J]. 表面技术, 2012, 41(6): 91—95.
TU Zhen-mi, HU Hui-li, HOU Feng-yan. Review of Chromium Binary Alloy Electrodeposition Technologies from Trivalent Chromium Baths[J]. Surface Technology, 2012, 41(6): 91—95.
- [11] 张英杰, 范云鹰, 杨显万, 等. 电沉积 Zn-Fe 合金的热力学分析[J]. 有色金属, 2004, 56(3): 18—20.
ZHANG Ying-jie, FAN Yun-ying, YANG Xian-wan, et al. Current Status of Electrodeposited Metal Based Composite Coatings[J]. Nonferrous Metals, 2004, 56(3): 18—13.

- Surface[J]. Journal of Semiconductors, 2010, 31(10): 106004-4.
- [2] WEI Z, XIN C L, YU H L. Inhibitors for Organic Phosphonic Acid System Abrasive Free Polishing of Cu[J]. Applied Surface Science, 2009, 255: 4114—4118.
- [3] YANG J C, OH D W, LEE G W. Step Height Removal Mechanism of Chemical Mechanical Planarization (CMP) for Sub-nano-surface Finish[J]. Wear, 2010, 268(3/4): 505—510.
- [4] 黄俊学, 张晖, 杨锦瑜. 绿色环保型 BFe10-1-1 铁白铜化学机械抛光工艺研究[J]. 表面技术, 2011, 40(5): 80—84.
- HUANG J X, ZHANG H, YANG J Y. Environment-friendly Chemical Polishing Technology of BFe10-1-1 Copper Alloy[J]. Surface Technology, 2011, 40(5): 80—84.
- [5] 王吉翠, 邓乾发, 周兆忠, 等. 蓝宝石晶片机械化学研磨抛光新方法研究[J]. 表面技术, 2011, 40(5): 101—104.
- WANG Ji-cui, DENG Qian-fa, ZHOU Zhao-zhong, et al. The Study on the Method of Mechano-chemical Polishing about the Grinding Polishing of Sapphire[J]. Surface Technology, 2011, 40(5): 101—104.
- [6] 彭进, 夏琳, 邹文俊. 化学机械抛光液的发展现状与研究方向[J]. 表面技术, 2012, 41(4): 95—99.
- PENG J, XIA L, ZOU W J. Research Status and Prospect of Chemical Mechanical Polishing Slurry[J]. Surface Technology, 2012, 41(4): 95—99.
- [7] OH S, SEOK J. An Integrated Material Removal Model for Silicon Dioxide Layers in Chemical Mechanical Polishing Processes[J]. Wear, 2009, 266(7/8): 839—849.
- [8] CHRISTOPHER M S, DIPANKAR R. Electrochemical Characterization of Surface Complexes Formed on Cu and Ta in Succinic Acid Based Solutions Used for Chemical Mechanical Planarization[J]. Applied Surface Science, 2010, 256: 2583—2595.
- [9] 韩东锐, 王戈, 贾思洋, 等. 新型钛铜复合管在流动海水中的腐蚀行为[J]. 装备环境工程, 2012, 9(4): 1—3.
- HAN D R, WANG G, JIA S Y, et al. Corrosion Behavior of New Type Ti-Cu Composite Pipe in Flowing Seawater[J]. Equipment Environmental Engineering, 2012, 9(4): 1—3.
- [10] 陈翔峰, 穆振军, 许春生, 等. 铜及铜合金在厦门海域实海暴露腐蚀规律研究[J]. 装备环境工程, 2013, 10(2): 1—3.
- CHEN X F, MU Z J, XU C S, et al. Corrosion Rule of Copper and Its Alloy Exposed in Xiamen Natural Seawater[J]. Equipment Environmental Engineering, 2013, 10(2): 1—3.
- [11] NG D, KULKARNI M, JOHNSON J. Oxidation and Removal Mechanisms During Chemical-Mechanical Planarization[J]. Wear, 2007, 263: 1477—1483.
- [12] KRISTIN G S, JENG Y L, PAULA C, et al. Characterization of Phosphate Electrolytes for Use in Cu Electrochemical Mechanical Planarization[J]. Electrochemical Acta, 2008, 53: 8211—8216.
- [13] LI Y, LIU Y L, NIU X H, et al. Application of a Macromolecular Chelating Agent in Chemical Mechanical Polishing of Copper Film under the Condition of Low Pressure and Low Abrasive Concentration[J]. Journal of Semiconductors, 2014, 35(1): 016001-5.
- [14] LI Y, SUN M, NIU X H, et al. Removal of Residual CuO Particles on the Post CMP Wafer Surface of Multi-layered Copper[J]. Journal of Semiconductors, 2014, 35(4): 046001-5.
- [15] 田晓东, 王利捷, 郑文鹏. TC4 钛合金表面辉光离子渗 Mo 渗 S 复合处理涂层的组织和摩擦学性能[J]. 表面技术, 2013, 42(2): 4—6.
- TIAN X D, WANG L J, ZHENG W P. Microstructure and Tribological Properties of Coatings Prepared by Glow Plasma Deposition Mo and S on TC4 Titanium Alloy[J]. Surface Technology, 2013, 42(2): 4—6.
- [16] 陈辉, 胡元中, 王慧, 等. 粗糙表面分形特征的模拟及表征[J]. 机械工程学报, 2006, 42(9): 219—223.
- CHEN H, HU Y Z, WANG H, et al. Simulation and Characterization of Fractal Rough Surface[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2006, 42(9): 219—223.
- [12] 姜晓霞, 沈伟. 化学镀[M]. 北京: 国防工业出版社, 2000.
- JIANG Xiao-xia, SHEN Wei. Chemical Plating[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2000.
- [13] 冯书谊, 周勇, 周志敏, 等. 平面磁芯螺旋结构微电感的性能研究[J]. 电子元件与材料, 2009, 28(2): 48—50.
- FENG Shu-yi, ZHOU Yong, ZHOU Zhi-min. Study on Property of Planar Spiral Structure Microinductor with Magnetic Core[J]. Electronic Components and Materials, 2009, 28(2): 48—50.
- [14] 裴芳. 基于计算机仿真技术掩膜圆晶片的电镀工艺模拟[J]. 热加工工艺, 2013, 42(18): 119—121.
- PEI Fang. Simulation of Electroplating Process on Patterned Silicon Wafer Based on Computer Simulation Technique[J]. Hot Working Technology, 2013, 42(18): 119—121.
- [15] 刘太权. 电镀层均匀性的数值模拟及验证[J]. 电镀与环保, 2010, 30(2): 11—13.
- LIU Tai-quan. Numerical Simulation and Verification on the Uniformity of Electroplated Coating[J]. Electroplating & Pollution Control, 2010, 30(2): 11—13.

(上接第 28 页)