

# 脉冲参数对电镀金层微观结构与耐腐蚀性能的影响

欧阳欣宇<sup>1</sup>, 宋方祥<sup>1,\*</sup>, 沈岳军<sup>2,3</sup>, 罗华江<sup>3</sup>

1. 贵州大学化学与化工学院, 贵阳 550025
2. 贵州大学资源与环境学院, 贵阳 550025
3. 贵州航天电器股份有限公司, 贵阳 550009

**摘要:** [目的] 针对航天接插件薄金层对高耐蚀性与高可靠性的需求, 研究脉冲电沉积参数对氰化物镀金层微观结构与耐腐蚀性能的影响, 为脉冲镀金工艺的工程化应用提供参数依据。[方法] 以镀镍黄铜片为基底, 采用市售氰化亚金钾镀液进行脉冲电沉积。借助 X 射线荧光测厚仪、扫描电镜 (SEM) 和极化曲线测试对镀层进行表征与耐蚀性检测。在控制金层厚度为 0.3~0.6 μm 的条件下, 通过单因素实验分别考察了脉冲频率、占空比、正向电流密度和反向电流密度对镀层表面形貌及耐蚀性的影响。[结果] 当脉冲频率为 800 Hz、占空比为 22%、正向电流密度为 0.11 A/dm<sup>2</sup>、反向电流密度为 0.004 A/dm<sup>2</sup> 时, 所得 Au 镀层晶粒细小、表面致密平整, 经 96 h 中性盐雾试验后表面无锈蚀。[结论] 合理调控脉冲电沉积参数可显著优化电镀金层的微观组织与耐蚀性, 本研究可为航天接插件高可靠性薄金层的制备提供参考方案。

**关键词:** 脉冲电沉积; 氰化物镀金; 耐蚀性; 组织结构

**中图分类号:** TG174

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1004-227X (2026) 04-0058-07

## Effects of pulse parameters during plating on microstructure and corrosion resistance of gold coating

OUYANG Xinyu<sup>1</sup>, SONG Fangxiang<sup>1,\*</sup>, SHEN Yuejun<sup>2,3</sup>, LUO Huajiang<sup>3</sup>

1. School of Chemistry and Chemical Engineering, Guizhou University, Guiyang 550025, China
2. School of Resource and Environmental Engineering, Guizhou University, Guiyang 550025, China
3. Guizhou Space Appliance Stock Co Ltd, Guiyang 550009, China

**Abstract:** [Objective] To meet the demands for high corrosion resistance and high reliability of thin gold coatings on aerospace connectors, the effects of pulse electrodeposition parameters on the microstructure and corrosion resistance of cyanide-based gold coatings were studied, aiming to provide a parametric basis for the engineering application of pulse gold plating. [Method] Pulse electrodeposition was carried out on nickel-plated brass substrates in a commercial potassium gold cyanide bath. An X-ray fluorescence thickness gauge, scanning electron microscopy (SEM), and polarization curves measurement were employed to characterize the coating and evaluate its corrosion resistance. Under the condition of controlling the gold coating thickness within the range of 0.3-0.6 μm, the effects of pulse frequency, duty cycle, forward current density, and reverse current density on the surface morphology and corrosion resistance were examined through single-factor experiments. [Result] The gold coating electrodeposited at pulse frequency of 800 Hz, a duty cycle of 22%, a forward current density of 0.11 A/dm<sup>2</sup>, and a reverse current density of 0.004 A/dm<sup>2</sup> exhibited fine grains, as well as a dense and smooth surface, with no rust formation after 96 hours of neutral salt spray testing. [Conclusion] The microstructure and corrosion resistance of electroplated gold coating can be significantly optimized by adjusting pulse parameters reasonably. This study can provide a reference scheme for the electrodeposition of high-reliability thin gold coatings on aerospace connectors.

**Keywords:** pulse electrodeposition; cyanide gold plating; corrosion resistance; microstructure

金镀层被广泛应用于航天器用接插件、微电子互连、光电器件及其他高端装备用连接端子的关键部位<sup>[1-2]</sup>。在现有的工程实践中, 直流电镀金仍然是军用及航天电子元器件应用最为成熟的技术, 具有镀液性能稳定、工艺窗口宽、生产线设备可通用、工艺规范完备, 以及长期服役数据充分等优点<sup>[3]</sup>。然而, 随着航天器向小型化、低成本和高集成度方向发展, 传统直流镀金工艺的局限性日益凸显。直流镀金在复杂几何

**收稿日期:** 2026-03-04 **修回日期:** 2026-04-02

**基金项目:** 贵州省基础科学研究计划(自然科学领域)(QKHJC-ZK[2023]YB051)。

**第一作者:** 欧阳欣宇(2000-), 男, 在读硕士研究生, 研究方向为表面处理和电镀。

**通信作者:** 宋方祥(1993-), 男, 博士, 副教授, 研究方向为电化学及表面处理。

**引用格式:** 欧阳欣宇, 宋方祥, 沈岳军, 等. 脉冲参数对电镀金层微观结构与耐腐蚀性能的影响[J]. 电镀与涂饰, 2026, 45 (4): 58-64.

OUYANG X Y, SONG F X, SHEN Y J, et al. Effects of pulse parameters during plating on microstructure and corrosion resistance of gold coating [J]. Electroplating & Finishing, 2026, 45 (4): 58-64.

结构、深孔及盲孔部位存在深镀能力不足、镀层厚度分布不均等技术缺陷。这直接影响镀层的耐蚀性和电接触性能,使镀金层在服役过程中容易产生点蚀、接触电阻漂移等失效风险<sup>[4]</sup>。因此,需通过工艺优化在保证接触可靠性的前提下降低金耗,并提升镀层的致密性和深镀能力。脉冲电沉积是解决上述问题的有力手段之一。相比直流电镀,脉冲电镀通过周期性调制电流或电位,在通电阶段施加较高的瞬时电流密度以提高成核速率和细化晶粒,在关断或反向阶段则允许扩散层恢复、吸附物脱附和界面再活化,这种周期性调制有助于获得致密的 Au 镀层,且可在一定程度上减少贵金属消耗<sup>[5-7]</sup>。已有研究表明,合理设计脉冲参数可显著改善 Ni、Au 及其合金镀层的微观结构、硬度和耐蚀性<sup>[8-11]</sup>。

然而实际工程应用中,脉冲镀金在航天器用电子元器件上仍未实现大规模替代直流工艺,主要问题如下:1)涉及的工艺参数多,包括频率、占空比、正/反向电流密度等,不同参数之间的耦合作用复杂;2)现有文献多集中于单一因素的影响或厚镀层(1.2~1.4 μm)性能,对接插件常用的薄金层(一般为 0.3~0.6 μm)缺乏系统研究;3)常用的市售镀液体系在脉冲模式下的沉积行为和机理尚不清晰,这使得企业在将其用于脉冲电镀工艺时缺乏可直接参考的参数窗口与理论依据<sup>[12-13]</sup>。

本文选用广泛使用的市售氰化亚金钾体系在镀镍黄铜片上电镀金,在控制金层厚度为 0.3~0.6 μm 的条件下,研究脉冲频率、占空比、正向电流密度和反向电流密度对镀层微观结构和耐蚀性的影响,以期为航天接插件用脉冲镀金工艺的工业化应用提供明确的参数窗口与理论依据。

## 1 实验

### 1.1 主要试剂

开缸剂、钴浓缩剂及氰化亚金钾购自罗门哈斯公司;硫酸(98% H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>)、盐酸(35%~37% HCl)及丙酮(C<sub>3</sub>H<sub>6</sub>O)购自重庆川东化工有限公司。

### 1.2 电镀金工艺

#### 1.2.1 基材预处理

基材材料为 65.00 mm × 50.00 mm × 0.20 mm 的黄铜片,先依次使用 600、800 和 1 000 目的砂纸打磨基材,接着用丙酮溶液超声除油 10~15 min,纯水冲洗后使用 100~360 g/L 盐酸室温浸蚀 1 min,最后用 200~300 g/L 盐酸活化 1~2 min。

#### 1.2.2 镀液配方与工艺参数

采用恩耐普 BP4610 高速双极性电源,以钛板(工作面积 1.3 dm<sup>2</sup>)为阳极,镀镍黄铜为阴极进行 Au 电沉积试验。镀液配方和工艺参数为:氰化亚金钾 5 g/L,开缸剂 750 mL/L,钴浓缩剂 5 mL/L,温度 50 °C,脉冲频率( $f$ )300~1 000 Hz,占空比( $D$ )10%~40%,正向电流密度( $J_f$ )0.06~0.20 A/dm<sup>2</sup>,反向电流密度( $J_r$ )0.002~0.005 A/dm<sup>2</sup>,时间( $t$ )7 min。未说明之处的脉冲频率、占空比、正向电流密度、反向电流密度分别为 800 Hz、22%、0.11 A/dm<sup>2</sup>和 0.004 A/dm<sup>2</sup>。

### 1.3 性能检测

#### 1.3.1 厚度

使用德国菲希尔 XDV-SDD 高精度 X 射线荧光测厚仪检测 Ni 镀层的厚度( $\delta$ ),每个样品测 5 个点,取平均值。

#### 1.3.2 表面形貌

使用捷克 Tescan-MIRA LMS 高分辨率场发射扫描电镜(FESEM)观察 Au 镀层的表面形貌,并通过扫描电镜搭载的能谱仪(EDS)分析镀层的元素组成。

#### 1.3.3 耐蚀性

在 Gamry Interface1010E 电化学工作站上,对不同条件下所得 Au 镀层进行极化曲线测试,通过塔菲尔外推法得到相应的腐蚀电位( $\varphi_{\text{corr}}$ ),以研究不同脉冲参数对 Au 镀层耐蚀性的影响。采用 3.5% NaCl 溶液,三电极体系的工作电极、参比电极和辅助电极分别为镀层试样(工作面积 1 cm<sup>2</sup>)、饱和甘汞电极(SCE)和铂片。电位扫描范围-0.35~0.35 V(相对于 SCE),扫描速率 10 mV/s。

中性盐雾(NSS)试验在贵州航天电器 YWX/Q-010 盐雾试验箱中进行, 盐溶液为 5% NaCl(pH = 6.5 ~ 7.2), 每 80 cm<sup>2</sup> 面积的盐雾沉降量为 0.5 ~ 3.0 mL/h, 观察试验 96 h 后镀层的腐蚀情况。

## 2 结果与讨论

### 2.1 脉冲频率对 Au 镀层形貌的影响

图 1 所示为不同频率(300 ~ 1 000 Hz)下脉冲电沉积所得 Au 镀层的表面形貌。随频率升高, Au 镀层的表面形貌总体呈先改善后变差的趋势。脉冲频率为 300 Hz 时, Au 镀层表面呈明显的“丘陵状”不规则结构, 颗粒间结合不紧密, 局部可见较大的球形颗粒。这是因为此时脉冲周期较长, 阴极沉积时间较长, 扩散层较厚, [Au(CN)<sub>2</sub>]<sup>-</sup> 的传质过程受限, 导致枝晶生长和不均匀成核。频率增大至 500 Hz 时, Au 镀层晶粒尺寸显著减小, 颗粒间的间隙减小, 表面总体较平整。此时脉冲周期缩短, 促进了界面周期性吸-脱附与瞬时过饱和成核, 成核速率较大, 晶粒得以细化。频率为 800 Hz 时, Au 镀层晶粒最细小且大小均匀, 整体最致密平整。可能是因为此时阴极电流在多个成核点之间快速分配, 抑制了孤立枝晶的持续长大; 同时高频通断使双电层不断充放电, 有效打破了扩散层限制, 抑制了晶粒的垂直生长, 最终形成纳米级致密镀层。频率继续增大至 1 000 Hz 时, 镀层晶粒反而粗化, 部分晶粒聚集, 并出现孔洞。这是因为频率过高导致单个脉冲宽度极短, 金离子在脉冲导通阶段的还原沉积不充分, 且双电层充放电行为受到干扰, 导致非均匀成核加剧。因此从 Au 镀层的表面形貌看, 较优的频率为 8 00 Hz。

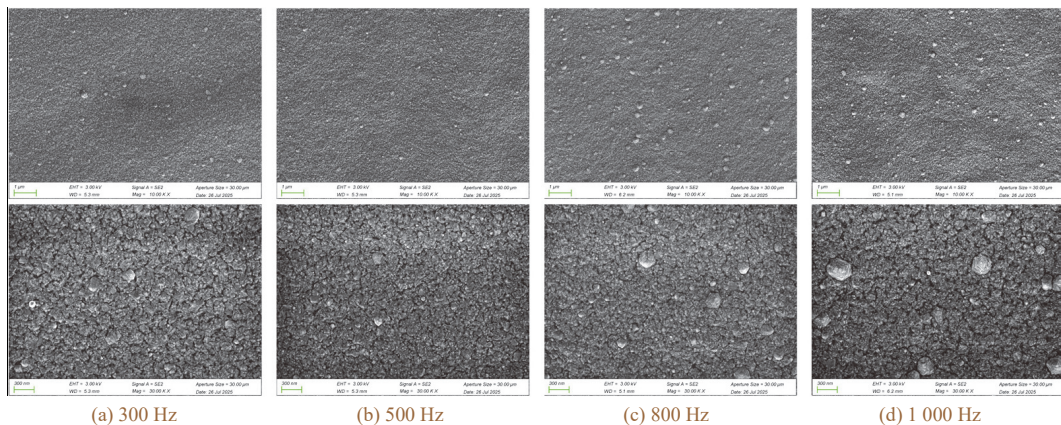


图 1 不同脉冲频率下所得 Au 镀层的表面形貌

Figure 1 Surface morphology of Au coatings electrodeposited at different pulse frequencies

### 2.2 脉冲占空比对 Au 镀层形貌的影响

不同占空比下脉冲电沉积所得 Au 镀层的表面形貌如图 2 所示。在 10% 和 15% 的低占空比下, 导通时间( $t_{on}$ )较短、关断时间( $t_{off}$ )较长, 平均电流密度偏低, 单个周期的沉积量有限, 镀层以孤立的岛状成核为主, 晶粒粗大、结构疏松。占空比增大至 22% 时, Au 镀层晶粒显著细化, 表面最为致密均匀。此时  $t_{on}$  与  $t_{off}$  的分配较合理, 导通阶段较高的峰值电流密度能够促使高密度晶核快速形成, 关断阶段则能保证镀液中 [Au(CN)<sub>2</sub>]<sup>-</sup> 的浓度梯度充分弛豫, 最终获得致密平整的镀层。占空比进一步增大至 30% 和 40% 时, 导通

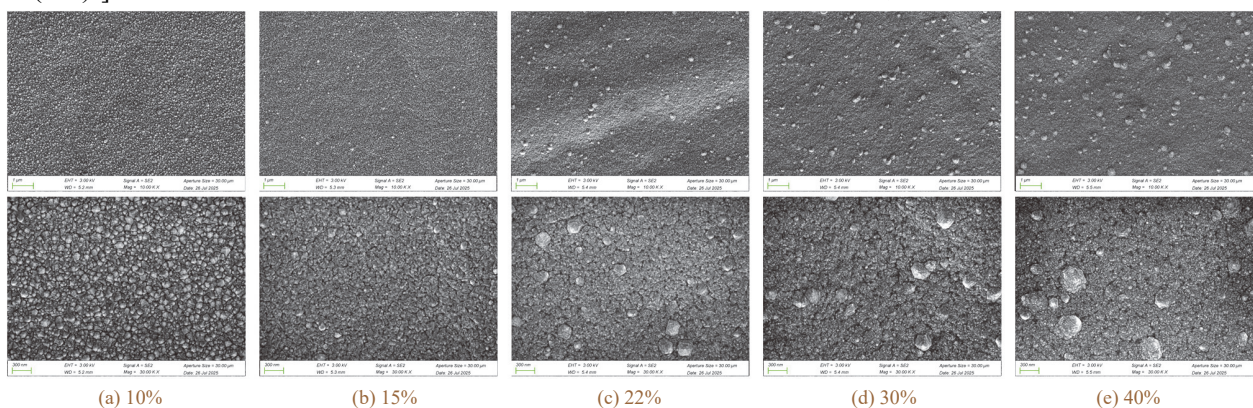


图 2 不同脉冲占空比下所得 Au 镀层的表面形貌

Figure 2 Surface morphology of Au coatings electrodeposited at different duty cycles

时间过长,导致扩散层恢复不足,局部过饱和及添加剂过吸附加剧,引发多台阶结晶和晶粒团聚,使镀层变得粗糙多孔。从 Au 镀层的表面形貌看,较优的占空比为 22%。

### 2.3 正向电流密度对 Au 镀层形貌的影响

图 3 为不同正向电流密度下脉冲电沉积所得 Au 镀层的表面形貌。正向电流密度为  $0.06 \text{ A/dm}^2$  时, Au 镀层表面以细小但略显疏松的颗粒为主。正向电流密度升至  $0.08 \text{ A/dm}^2$  后,镀层晶粒细化且分布均匀。正向电流密度为  $0.11 \text{ A/dm}^2$  时, Au 镀层最均匀、平整和致密,无明显的孔洞。继续增大正向电流密度至  $0.15 \text{ A/dm}^2$  及以上时, Au 镀层反而变得粗糙多孔。从表面形貌看,较优的正向电流密度为  $0.11 \text{ A/dm}^2$ 。

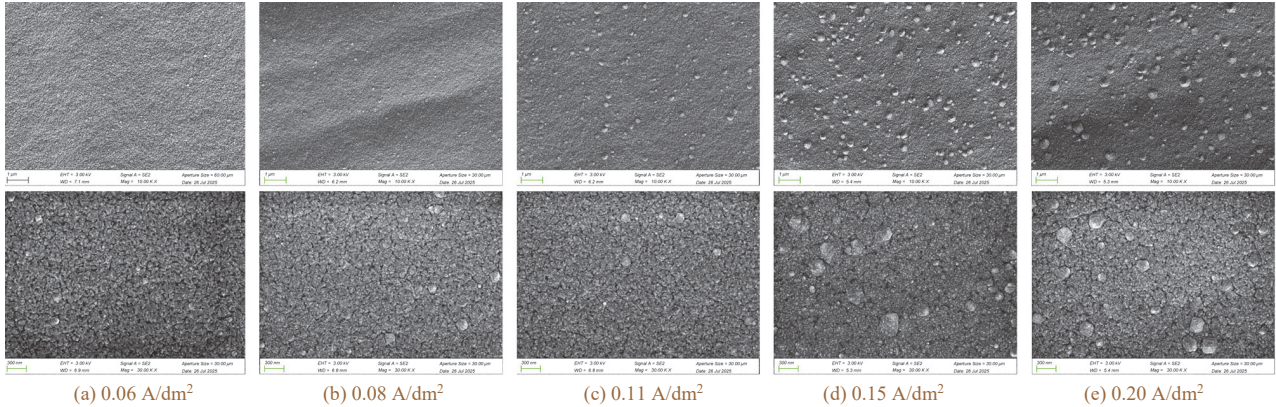


图 3 不同脉冲正向电流密度下所得 Au 镀层的表面形貌

Figure 3 Surface morphology of Au coatings electrodeposited at different forward current densities

### 2.4 反向电流密度对 Au 镀层形貌的影响

图 4 为不同反向电流密度下脉冲电沉积所得 Au 镀层的表面形貌。反向电流密度为  $0.002 \text{ A/dm}^2$  时,阳极溶解作用有限,仅能去除少量松散颗粒,表面仍可见不均匀凸起与微孔,镀层致密性不佳。增大反向电流密度至  $0.003 \text{ A/dm}^2$  后,镀层溶解与再成核达到初步平衡,表面凸起减少,晶粒细化且分布变得均匀。反向电流密度增大至  $0.004 \text{ A/dm}^2$  时,镀层表面最均匀、平整和致密。反向电流继续增大至  $0.005 \text{ A/dm}^2$  时,阳极过度溶解,镀层反而变得粗糙、多孔。此外,过高的反向电流密度还可能引起 Ni 底层优先溶解及表面应力集中,使再沉积阶段成核位点分布不均,镀层倾向于堆叠状结构。从 Au 镀层的表面形貌看,较优的反向电流密度为  $0.004 \text{ A/dm}^2$ 。

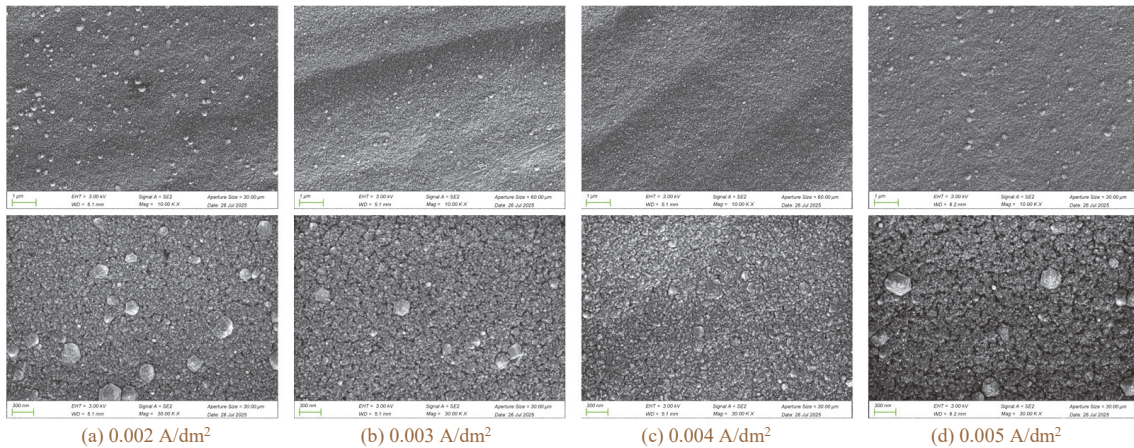


图 4 不同脉冲反向电流密度下所得 Au 镀层的表面形貌

Figure 4 Surface morphology of Au coatings electrodeposited at different reverse current densities

### 2.5 脉冲参数对镀层厚度及耐蚀性的影响

不同脉冲参数对 Au 镀层在 3.5% NaCl 溶液中的腐蚀电位与厚度的影响如图 5 所示。从图 5a 可知,不同频率下脉冲电沉积所得的 Au 镀层厚度均为  $0.4 \sim 0.5 \mu\text{m}$ , 满足厚度在  $0.3 \sim 0.6 \mu\text{m}$  范围内的要求。随着频率增大, Au 镀层的腐蚀电位总体呈现先正移后略微负移的变化趋势,在  $800 \text{ Hz}$  时最正,说明此时 Au 镀层抵挡腐蚀介质侵蚀的能力最强,这主要与其致密均匀的结构有关。从图 5b 可知,仅占空比为 15% 和 22% 时所得 Au 镀层的厚度满足要求,其中占空比为 22% 时所得 Au 镀层的腐蚀电位正于占空比为 15% 时,

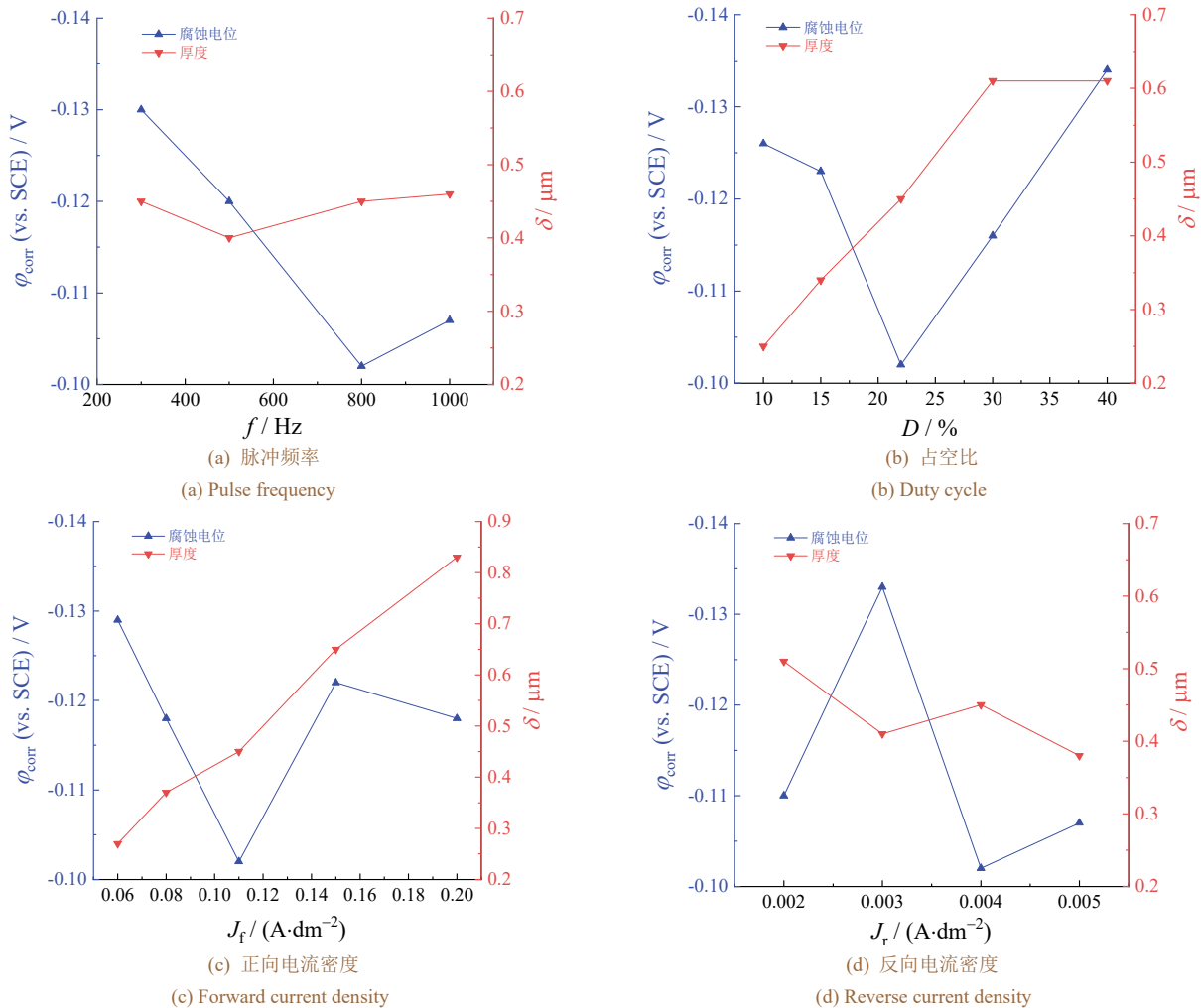


图5 不同脉冲参数对 Au 镀层厚度及腐蚀电位的影响

Figure 5 Effects of different pulse parameters on thickness and corrosion potential of Au coating

即占空比为 22% 时所得 Au 镀层抵挡腐蚀介质侵蚀的能力最强。从图 5c 可知, 随着正向电流密度增大, Au 镀层的厚度增大, 腐蚀电位呈先正移、后负移、再略微正移的变化趋势, 在  $0.11 \text{ A}/\text{dm}^2$  时所得 Au 镀层的腐蚀电位最正, 厚度也满足要求 ( $0.45 \mu\text{m}$ )。从图 5d 可知, 随着反向电流密度增大, Au 镀层的厚度总体呈减小的趋势, 但均未超出  $0.3 \sim 0.6 \mu\text{m}$  范围; 在 3.5% NaCl 溶液中的腐蚀电位呈先负移、后正移、再略微负移的变化趋势, 在反向电流密度为  $0.004 \text{ A}/\text{dm}^2$  时腐蚀电位最正。

综合考虑 Au 镀层的表面形貌、厚度和耐蚀性后确定电镀 Au 的较优脉冲参数为: 频率 800 Hz, 占空比 22%, 正向电流密度  $0.11 \text{ A}/\text{dm}^2$ , 反向电流密度  $0.004 \text{ A}/\text{dm}^2$ 。

## 2.6 较优脉冲参数下所得 Au 镀层的性能

### 2.6.1 元素组成和晶相结构

较优脉冲参数下所得 Au 镀层的 EDS 面扫图像如图 6 所示。可见 Au 与 Ni 元素均匀分布在镀层表面, 其中 Ni 来自 Ni 底层, Au 元素的分布非常致密, 进一步证实了 Au 镀层的致密性较好。XRD 分析 (如图 7 所示) 显示, 镀层在  $2\theta$  为  $38.18^\circ$ 、 $44.39^\circ$ 、 $64.57^\circ$ 、 $77.55^\circ$  和  $81.71^\circ$  处分别出现衍射峰, 与标准卡片 (ICDD PDF#98-000-0062) 对比可知, 依次对应于 Au 的 (111)、(200)、(220)、(311) 和 (222) 晶面。由于本次分析采用掠入射衍射模式并结合刀片准直器限制探测深度, 谱图中未出现与 Ni 底层、黄铜基底相关的衍射信号。此外, 谱图中未见任何金合金或杂质相的衍射峰, 表明镀层中的 Au 以单质形式存在。

### 2.6.2 耐腐蚀性

由图 8 可知, 较优脉冲参数下所得 Au 镀层呈现光亮的金黄色, 且色泽均匀。经 96 h 中性盐雾试验后, 镀层表面无任何锈蚀现象, 说明其耐蚀性优异。

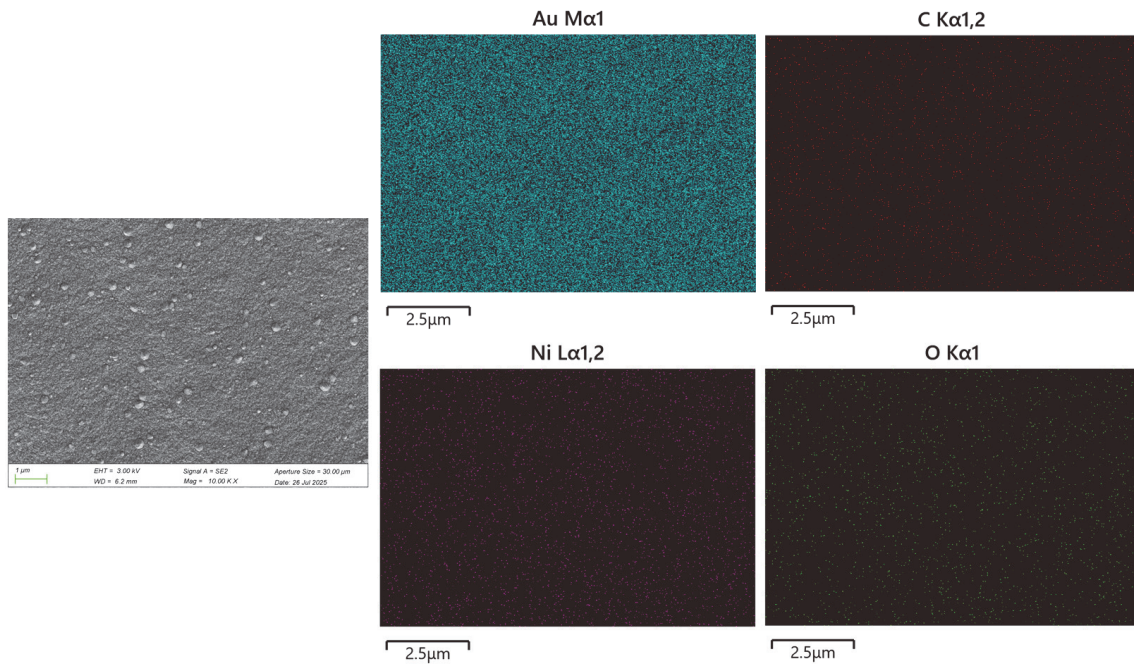


图6 较优脉冲参数下所得 Au 镀层的 EDS 面扫图像  
Figure 6 EDS mapping of Au coating electrodeposited with the optimized pulse parameters

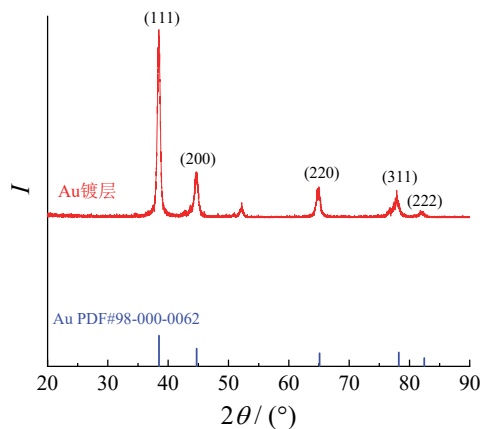


图7 较优脉冲参数下所得 Au 镀层的 XRD 谱图  
Figure 7 XRD pattern of Au coating electrodeposited with the optimized pulse parameters

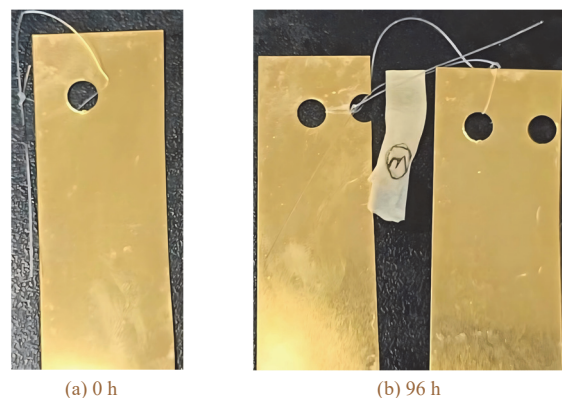


图8 较优脉冲参数下所得 Au 镀层在中性盐雾试验 96 h 前后的外观  
Figure 8 Appearance of Au coating electrodeposited with the optimized pulse parameters before and after 96 hours of neutral salt spray test

### 3 结论

研究了不同脉冲参数对氰化亚金钾体系脉冲电镀金的影响, 得到较优的脉冲参数为: 频率 800 Hz, 占空比 22%, 正向电流密度  $0.11 \text{ A/dm}^2$ , 反向电流密度  $0.004 \text{ A/dm}^2$ , 施镀时间 7 min。该条件下所得 Au 镀层外观呈光亮的金黄色, 组织结构均匀致密, 结合力和耐蚀性好。

**参考文献:**

- [1] GREEN T A. Gold electrodeposition for microelectronic, optoelectronic and microsystem applications [J]. Gold Bulletin, 2007, 40 (2): 105-114.
- [2] WU D Y, ZHOU X, LI L P, et al. Microstructure, mechanical properties and tribological behaviors of gold coating determined by surface quality [J]. Surface & Coatings Technology, 2023, 462: 129463.
- [3] ZLOTNIK S, WRÓBEL J, BOGUSKI J, et al. Facile and electrically reliable electroplated gold contacts to p-type InAsSb bulk-like epilayers [J]. Sensors, 2021, 21 (16): 5272.
- [4] SCHLESINGER M, PAUNOVIC M. Modern Electroplating [M]. 5th ed. New Jersey: John Wiley & Sons, 2010: 115-130.
- [5] PARK J, BAE S H, SON I. Improved contact resistance and solderability of electrodeposited Au-Sn alloy layer with high thermal stability for electronic contacts [J]. Applied Surface Science, 2021, 551: 149405.
- [6] PAUNOVIC M, SCHLESINGER M. Fundamentals of Electrochemical Deposition [M]. 2nd ed. New Jersey: John Wiley & Sons, 2005: 289-306.
- [7] RAMAPRAKASH M, DEEPIKA Y, BALAMURUGAN C, et al. Pulse electrodeposition of nano-crystalline Ni-W alloy and the influence of tungsten composition on structure, microhardness and corrosion properties [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2021, 866: 158987.
- [8] DAS M K, URUMARUDAPPA S K J, KAMAL S, et al. Effect of pulse electrodeposition parameters on the microstructure and mechanical properties of Ni-W/B nanocomposite coatings [J]. Nanomaterials, 2022, 12 (11): 1871.
- [9] TURY B, LAKATOS-VARSÁNYI M, ROY S. Ni-Co alloys plated by pulse currents [J]. Surface & Coatings Technology, 2006, 200 (24): 6713-6717.
- [10] TURY B, RADNÓCZI G Z, RADNÓCZI G, et al. Microstructure properties of pulse plated Ni-Co alloy [J]. Surface & Coatings Technology, 2007, 202 (2): 331-335.
- [11] DOĞAN F, UYSAL M, DURU E, et al. Pulsed electrodeposition of Ni-B/TiN composites: effect of current density on the structure, mechanical, tribological, and corrosion properties [J]. Journal of Asian Ceramic Societies, 2020, 8 (4): 1271-1284.
- [12] PRAMOD KUMAR U, SHANMUGAN S, JOSEPH KENNADY C, et al. Anti-corrosion and microstructural properties of Ni-W alloy coatings: effect of 3,4-dihydroxybenzaldehyde [J]. Heliyon, 2019, 5 (3): e01288.
- [13] AMAZIAN M, ANDREU T, SARRET M. Pulsed current electrodeposition of gold-copper alloys using a low-cyanide electrolyte [J]. Coatings, 2025, 15 (7): 778.

【编辑：周薪莉】