インダストリー 4.0 に向けて —電気めっき浴の制御のための自己診断分析システム—

著：アレキサンダー・ジョワスキー^a,
ハンナ・ウィキエル^a, カズミエール・ウィキエル^a

訳：上川 和成^b, 坂田 正人^b

^a テクニク (02910 アメリカ合衆国ロードアイランド州クランストン モルター通り)

^b テクニクジャパン(株) (〒532-0011 大阪府大阪市淀川区西中島 5-2-5 中島第2ビル 301)

Towards Industry 4.0

— Self-validating Analytical System for Controlling of Electroplating Baths —

Aleksander Jaworski^a, Hanna Wikiel^a and Kazimierz Wikiel^a (auth.)

Kazushige UEKAWA^b, Masato SAKATA^b (trans.)

^a Technic, Inc. (47 Molter Street, Cranston, RI 02910, USA)

^b Technic Japan Inc. (#301 Nakajima No.2 Bldg., 5-2-5 Nishinakajima, Yodogawa-ku, Osaka-shi, Osaka 532-0011)

Keywords : Copper Damascene, Voltammetry, Real Time Analysis, Automatic Replenishment, Reluctance

1. はじめに

産業の進歩は18世紀以降にワールドワイドで進行し、今日に至るまで世界は4つの大きな産業革命の波を経験した。即ち、インダストリー 1.0 (18世紀の機械化), インダストリー 2.0 (20世紀初頭の大量生産), インダストリー 3.0 (1950年代後半に始まる自動化のためのコンピュータ化), インダストリー 4.0 (現在に至るまで約10年間継続している, デジタル化による製造の強化)である。歴史は、各革命の原則をタイムリーに実行しなかった製造業者が滅亡するか、衰退することを示す圧倒的な証拠を示している。

インダストリー 4.0 は、現在進行中の製造技術における自動化とデータ交換である。インダストリー 4.0 は、いわゆる「スマートファクトリー」の創造につながるものであり、サイバー・フィジカル・システム (CPS), クラウド・コンピューティング, そしてインダストリアル IoT (IIoT) が提供する利点を活用しながら、マシンラーニングが可能な自律システムで構築されている。

めっき産業は、連続した産業革命によってもたらされる変化に常に追従しようと試みてきた。インダストリー 3.0 の適用により、コンピュータ制御の自動化機器, 例えば, ラック, バスケット, バレルシステム, 連続プロセス (リール to リール, ロール to ロールめっき装置) などが生まれた。

めっきプロセスの最も大きな革命的变化は、半導体産業の分野で発生した。現在、最先端の電気めっきプロセスは電子部品製造に必要不可欠なものとなった。これらのプロセスには、ULSI 集積回路の製造のためのダマシシ及びシリコン貫

通ビア (TSV) めっきだけでなく、複雑な多層フレキシブル及びリジッドプリント回路基板 (PCB) の製造のための電気めっきが含まれる。

しかし、めっきラインの自動化速度の向上にめっき液の分析技術の進化が追いつけなかったため、インダストリー 3.0 の基準における自動化の達成を不完全なものとした。歴史的にめっき浴は数十年の経験的知識を有する経験豊富なオペレータによって維持されてきた。多くの場合、この経験的アプローチはハルセルテスト¹⁾によってサポートされてきたもので、その運用コンセプトは「人による実施」とその結果に対する「人による評価」に依存するものであった。このようなハルセルテストに基づくめっき浴の管理は、数世代先に進歩しためっきラインの制御に使用され続けてきた。しかし、近年になりインダストリー 3.0 の規定にあるような、浴制御の高度な分析法が電気めっきにおいて次第に広がりを見せるようになり、手作業主体の主観的な機能テストを徐々に代替し始めた。

インダストリー 4.0 の基準を満たすためには、現在適用されているプロセス制御方法における分析的アプローチと構造的可用性を全面的に改良する必要がある。インダストリー 4.0 の基準にアップグレードするための主な前提条件には、信頼性、長期間にわたる性能の安定性、シンプルな設計、消耗品レス、そして易メンテナンス性の組み合わせが含まれる (図 1)。インダストリー 4.0 構想への取り組みは無色透明な空白状態の中で課せられるわけではなく、だんだんとその重要性を増している環境にやさしいモノづくりに向かって進む世界にある。従って、インダストリー 4.0 に準拠した分析シス

図1 めっき工程管理システムの統合がインダストリー 4.0 へのアップグレードの前提条件

テムは、有害廃棄物を発生させるような試薬または化学操作の必要性を大幅に低減または完全に排除しなければならない。

電気めっき液のモニタリングに現在使用されている自動分析システムのほとんどは複雑なデザインである²⁾。一般的に滴定、クロマトグラフィー、分光測定、電気化学分析などを含む、根本的に異なる様々な分析方法を単一のユニット内に統合している。多くの場合、めっき浴の溶液サンプルはマトリックス効果を抑制することを目的とした様々な前処理を受ける。各前処理には異なるセットの薬品が必要となり、最終的に分析を終えた溶液サンプルとともに廃棄される。電気めっき液のモニタリングに使用されるセンサの大部分は、頻繁に(毎日又は場合によっては各測定前に)校正する必要があるため標準液も必要となる。このような分析システムには複雑な配管と複数のセンサが必要となるが、複雑化したシステムは装置全体のサイズを肥大化させるとともに信頼性に悪影響を及ぼす。また、装置サイズによる空間的負荷は多くの生産現場において極めて重要であり、特にこの後で述べるシステムリダンダンシー(2重検証化)の実現を困難にする。

2. コンセプトのアップグレードによる分析性能の強化

電気めっき溶液のモニタリングに使用される典型的な分析システムは、種々のセンサや測定器を利用し、それぞれ異なるめっき浴成分の濃度を管理する。このような分析器の概念図を図2 A に示す。大多数の監視システムは複数のセンサと計器を採用しているが、概念図では単一のセンサに単純化し

て表示している。センサは計測を行い、計器はパラメータとデータの収集を制御する。この計器はコンピュータ化された分析測定ユニット(例えば、電位差計または分光計)で構成されている。計器は収集した情報を工場側のプロセス管理用コンピュータに通信する。このコンピュータはそれに応じてめっき液成分の補充量を決定し、補給システムに補充の指令を出す。

このような概念は、インダストリー 3.0 の要件を満たしているが、インダストリー 4.0 の要求水準には到達していない。具体的にはフォルト管理、診断、および修正措置の実行を内蔵していない。図2 A に示した概念図の構成要素の一つがフォルトになるとシステム全体が停止し、すべての構成要素について時間の要するトラブルシューティングが発生する。

トラブルフリーな分析性能の実効的な強化は、同じタイプのセンサを二重化することによって達成できる。両方のセンサは、図2 B に示すように一つのマルチチャンネル計器によって制御され、それぞれのセンサが独立で同じめっきタンクから来るサンプルを分析する。分析は同時に行う必要があり、また両方のセンサのデータが一致している必要がある。一方のセンサのみが問題のある結果を出し、他方のセンサが適切な結果を出した場合、センサの調査が必要であることがわかる。その場合、分析システムが管理用パターン認識技術³⁾を利用することで、トラブル箇所の特定と診断を行うことができる。この手法は電気めっき液のモニタリングに使用される最新の分析システムの中でも未だ一般化が進んでいない。一方、めっき液の状態は第2センサで途切れることなく解析できるので、プロセス制御の中断なしに故障したセンサのトラブルシューティングを行うことができる。したがって、連続的に利用可能なバックアップセンサは、図2 A に示す構成に比べて大きな利点を有する。

通常、計器の誤動作発生確率はセンサよりはるかに低い。しかし、図2 B の構成の分析システムで計器が故障した場合には分析が中断される。インダストリー 4.0 に準拠した分析システムの設計では、センサを接続しない状態で計器を自己診断する機能が要求されるため、図2 C の概念図のように計器2を分析システムの構成に組み込む。センサ1と2は各々の計器に固定的に割り当てられておらず、例えば、センサ1の制御は計器AとBの間で自動的に切り替えることができるため、センサまたは計器が故障した場合でもデータフローの継続を保証することが可能となる。空間的制約の大きい生産現場においてこのような構成を実現するためには、シンプルな設計とそのコンポーネントの小型化が不可欠である。

3. リアルタイムアナライザ(RTA)

3. 1 RTA の重要な性質

前報^{4),5)}では、リアルタイムアナライザ(RTA: Real Time Analyzer)の重要な特徴について紹介した。RTA はめっき浴サンプルの自動、オンライン、かつめっき槽内の *in-situ* 分析方法を提供する。RTA のアプローチは、ユニークに進化したDCおよびACボルタンメトリー測定を、濃度予測およびパターン認識評価の両方に対する広範なケモメトリー技術と組み合わせることにより、浴中の成分濃度の数値結果が導出

図2 電気めっき工程を管理するための自動分析装置の概念図

され、総合的なめっき浴の状態の把握が可能となる。

ハードウェアの主要な構成要素は、マルチタスク電気化学プローブ(MTEP: Multi-Task Electrochemical Probe)^{5),6)}、ポテンショスタット、およびコンピュータの3つのから成る極めてシンプルなシステムであり、いずれも比較的小さいサイズである。この MTEP は単体でめっき浴の全成分を分析することができる。

分析試料は MTEP に設置された3針電極セルで分析された後、そのままめっき槽に戻る。タンク中のめっき液を「そのまま」の状態で行う RTA のユニークな能力は、前処理に試薬や化学的操作を必要としないことを意味する。さらに、校正に標準液が不要である特徴と合わせて、優れたメンテナンス性と廃棄物が発生しない環境に配慮したシステムを実現している。

RTA を他のすべての競合する分析方法と区別する特徴は、長期間にわたる測定性能の極めて高い安定性と一貫性にある。MTEP の電気化学分析セルに使用される電極は経時的な劣化

がみられず、従来の電気化学分析では考えられなかった半年以上の長期間にわたり校正が不要となり、安定して結果を出し続けることを可能にした。さらに、全ての電気化学シグナルの妥当性は、濃度計算に先立って早期フォルト検出ケモトリックアルゴリズムによって診断され、誤検出がめっき浴のオペレータをミスリードする可能性を排除する。

これらの特性と後述するリダンダンシーな運用の組み合わせにより、めっき設備への RTA の導入は、図 1 に概説したインダストリー 4.0 構想を実現し得るシステムの構築を可能にする。

3. 2 デュアルシステム RTA の構成

図 2 C に示すように、システムの完全なリダンダンシーを実現するためにはセンサだけでなく計測器の多重化が必要である。ユーザが2つのめっき槽(めっき薬品が異なっても良い)を同時に監視する場合、図 2 B に示すコンセプトから図 2 C のコンセプトへのアップグレードは、RTA のキーコンポーネント(MTEP, 計器)を図 3^{6),7)}に示すように構築することで実現可能となる。本構成では、2つの MTEP が各めっき槽に設置され、各々が異なる独立した計器によって制御される。

MTEP のシンプルさ、コンパクトなサイズ、および一本で浴を構成する全成分を分析できる能力により、空間的負担を増大することなくめっき槽内で2つセンサを設置することができる。

一般的に、複数のめっき槽で運用する場合^{5),6)}、それぞれの槽からサンプリングした液を槽外に設置された単一のセンサで分析する。デュアルシステム RTA のこのようなセンサの拡張はめっき浴管理のより優れたリダンダンシーを提供する。

デュアルシステム RTA 構成の場合、持続的な自己診断分析システムを有するため、6~9 か月を超えるような長期にわたり校正(または他の方法によるメンテナンス)が不要となる。

本運用における MTEP 間の比較では、図 4 に示すような

図 3 2 槽のめっき槽を同時にプロセス管理するためのデュアルシステム RTA の構成

図 4 デュアルシステム RTA 構成でのトラブルシューティングのブロック図

自動的に実行される多数の独立した性能評価システムを実行する。また、性能評価の方法については以下を含む様々なテストから構成される。

- ・電気的テスト：コントローラーとコンピュータの電気的な整合性は、MTEP を接続していない状態での内部のダミーセルで実行される一連のスキャンによって検証される。結果は自動的に評価され、予測結果からのずれを診断する。(ボルタンメトリー分析の重要な特徴であるドライシミュレーション)
- ・プローブテスト：MTEP の電気化学的安定性を検証するため、そのプローブと試料循環ポンプの状態に敏感な一連のボルタンメトリックスキャンを実行する。

MTEP の健全性と経時的一貫性の評価がこれらのテストで可能になる。診断しようとするボルタンメトリー曲線はしばしば複雑な特徴を有するが、因子分析⁸⁾の助けを借りて定量化される。これらはパターン認識法を用いたボルタンメトリーデータの包括的ライブラリの特徴と比較される³⁾。適切に動作している MTEP で記録されたボルタモグラムは、ライブラリ内のパターンと一致しなければならず、そのパターンから逸脱すると、対象 MTEP の健全性が確認できないというメッセージが表示される。管理用のパターン認識技術は予め故障の検出と分類³⁾を通してトレーニングすることができる。従って、デュアルシステム RTA と自動フォルト分類を含めた自己診断分析システムはインダストリー 4.0 の主要件の 1 つである信頼性を満足し得る。

4. デュアルシステム RTA によるめっき浴制御の実例

無機と有機の全浴成分は、MTEP 内の電極部で実施される一連の電気分析測定をもとに RTA によって制御される。図 5 に、デュアルシステム RTA で収集した、実際の半導体生産現場における銅ダマシンめっき浴のほぼ 1 年間のオンラインモニタリングによる銅成分濃度の分析数値データを示す。2 本の MTEP のうち、片方で集計されたデータに基づいて浴補給システムと通信することで、めっき浴の継続的メンテナンスが実施された。

その間、もう一方の MTEP (別の計器に接続)はバックアップとして機能した。モニタリングの全期間(1 年)に渡り 2 本の MTEP はそれぞれ、すべての浴成分について 4 千回以上の分析を実施し続けたが、メンテナンス或いは校正作業は

実施されなかった。

次に、本実験中に収集されたサプレッサ成分の分析数値結果を図 6 に示す。拡大したグラフが示すように、両方の MTEP が互いに一致してサプレッサ濃度の突然の低下をレポートしており、めっき浴にトラブルが発生したことが確認できる。このような長期にわたる校正不要な測定と、両 MTEP の応答の一致はデュアルシステム RTA の優れた安定性と一貫性を明確に示している。

5. まとめ

インダストリー 4.0 への不可避的な移行は、製造におけるすべてのステップに対するアップグレードが要求される。本論文では、めっき浴制御システムをインダストリー 4.0 の水準に引き上げるための概念、課題、および克服すべき障害が提示され、議論された。

RTA は前処理や校正に薬液を必要とせず、半年以上にわたりメンテナンス不要な長期安定性を提供する。機械的にシンプルでコンパクトなこの分析装置はまた、デュアルシステム構築を容易にし、空間的制約がある生産現場でのリダンダンシー(2 重検証化)を実現可能にする。二個一対の MTEP と計器で構成されるこのシステムの健全性は、MTEP のチェックとハードウェアの電気的テストとで常時モニターされ、得られるボルタンメトリック信号に対しては、疑わしい信号が濃度分析に使用されないよう自己診断が実施される。

図 5 約 1 年間にわたるダマシンプロセス制御において、デュアルシステム RTA の 2 つの MTEP (青と赤の円) で収集された銅成分の分析数値の結果

図 6 図 5 の実験中に同時に収集したサプレッサ成分(緑色と赤色の丸)の数値結果。左のグラフの一部を拡大して右のグラフに示す。

このようなデュアルシステム RTA 構成が提供する、シンプルなメンテナンス性や誤分析防止機能が多数の顧客に評価、採用され、その有用性が検証されてきた。その結果、現在では多数の RTA がダマシンや TSV プロセスの銅配線めっきなどにおいて環境に優しく安全なめっき浴管理を提供し続けている。

ここで紹介した以外にも RTA は様々な組み合わせでめっき浴 / センサ / 計器の数を 2 以上に拡張できる。さらなる信頼性向上を目指す場合、コンピュータを用いた高フォルト耐性を有するトリプルモード冗長性(TMR : Triple Modular Redundancy)構成も容易に想像できる。

RTA のユニークな特徴と自己診断を実現するデュアルシステムの構築により、環境意識にも高い関心を払いながら現行のめっき工程をインダストリー 4.0 にアップグレード可能な、めっき浴制御システムを提供することができると考えている。

(Received May 21, 2021)

文 献

- 1) T. Ritzdorf ; Modern Electroplating, Fifth Edition, p. 533 (John Willey & Sons, 2010).
- 2) T. Ritzdorf ; Modern Electroplating, Fifth Edition, p. 540 (John Willey & Sons, 2010).
- 3) A. Jaworski, H. Wikiel, K. Wikiel ; *Electroanalysis*, **25**, 278 (2013).
- 4) A. Jaworski, H. Wikiel, K. Wikiel, K. Uekawa ; *J. Surf. Finish. Soc. Jpn.*, **59** (12), 869 (2008).
- 5) A. Jaworski, H. Wikiel, K. Wikiel, K. Uekawa ; *J. Surf. Finish. Soc. Jpn.*, **63** (9), 571 (2012).
- 6) A. Jaworski, H. Wikiel, P. Holverson, A. Nelson, K. Wikiel ; *Electroanalysis*, **27**, 144 (2015).
- 7) A. Jaworski, H. Wikiel, K. Wikiel, P. Holverson, A. Nelson ; *ECS Trans.*, **64**, (40), 91 (2015).
- 8) K. J. Wikiel, A. Jaworski, H. Wikiel ; US Pat. 7, 124, 120 (2006).