

最先端・次世代研究開発支援プログラム
事後評価書

研究課題名	環境調和型ゼロエミッション次世代半導体配線形成方法の研究開発
研究機関・部局・職名	東京工業大学・精密工学研究所・准教授
氏名	曾根 正人

【研究目的】

半導体産業は、我が国において国家を担う重要な役割を果たしている。この発展を支えているのは半導体製造における配線回路の微細化・高密度化技術の発展である。半導体製造技術の一つである配線形成技術では、電解めっき法を用いて銅配線を形成する手法が主流であり、現状においては米国が主導権を握っているが、更なる微細化への技術課題が山積している。当該技術の延長線上では更なる微細化に対する凹部への埋め込みめっきが困難となり、革新的技術の開発が切望されている。

また、半導体産業に利用されるメタルプレーティング技術としては、ドライプロセスとウェットプロセスに分類される。特にウェットプロセスで重要なめっきプロセスでは、環境基本法、下水道法及び関連条例における規制基準の強化に対し、環境対策設備や代替技術開発への投資を余儀なくされている。したがって、恒久的な環境保全・省エネルギーを両立した革新的なめっき技術の出現が期待されている。このような背景の下で、超臨界状態の二酸化炭素を洗浄・反応溶媒に用いる方法が大学と企業の双方で研究開発されている。この方法により、微細構造を非破壊で洗浄することができると同時に、洗浄溶媒を限りなくゼロに近づけられることが可能である。

曾根は、電解質溶液と超臨界二酸化炭素のエマルジョンを形成して電気めっきを行うと、数ナノメートルのナノ粒子が生成し、ピンホールの無い高硬度でレベリング性の高い皮膜が形成されることを明らかにした。この技術を超臨界ナノプレーティング法 (SNP 法) と呼ぶ (図 1 参照)。また SNP 法は、レベリング効果 (表面粗さを低減して平滑にする効果) 及び均一電着性効果 (膜厚を均一にする効果) において優れた

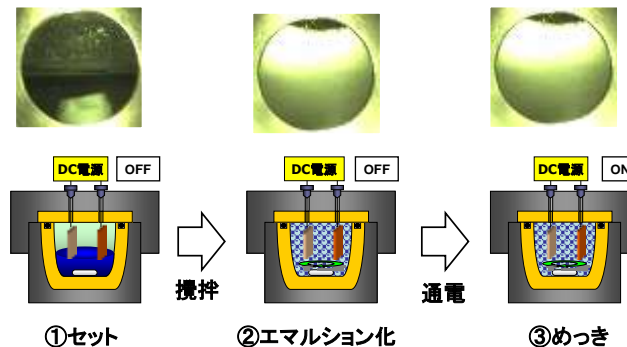


図 1 超臨界ナノプレーティング法 (SNP) の概念図 各プロセス (下) と可視セルにより観測した分散状態の写真 (上)

金属めっき被膜を提供することが明らかになっている。(特許 JP3571627)

しかしながら、実際に SNP 技術の半導体配線形成技術への応用を試みたが、SNP 法による銅の配線は電気化学的素反応レベルで極めて困難であることが分かった。具体的には、微細凹部への埋め込み不良や、シード層溶出によるめっき不良など様々な課題に直面した。そこで曾根らのグループは、SNP 技術をナノ粒子工学と融合することにより、金属ナノ粒子を活用した発展型 SNP 技術 (M-SNP) を開発した。銅イオン濃度を均一にするために SNP 反応場に銅微粒子を導入するのである(特許 JP4163728)。この方法により、M-SNP では、実用レベルの埋込配線チップの埋込穴に、ボイドや埋込不良が無く完全に銅が埋め込むことができること、また、M-SNP によって埋め込み穴内部で銅はボトムアップ成長(底面からの成長)が起こっており、さらに(111)面に配向した単一結晶粒として埋め込むことができることが実現できた。この M-SNP 技術は、世界的に見て次世代半導体製造技術開発において画期的なものであるといえる。また、この方法は、超臨界二酸化炭素を反応溶媒、洗浄溶媒と乾燥媒体に用いることで廃液を限りなくゼロに近づけることができ、技術イノベーションとグリーンイノベーションを同時に達成する稀有な技術である。

提案者である曾根は、以上に述べたような技術イノベーションとグリーンイノベーションを同時に達成しうる独創的な配線技術が開発してきた。しかし、この M-SNP 技術は、基礎研究と応用研究の双方で重要な問題が残っている。まず基礎研究としては、(i) 反応機構、(ii) 金属の核発生過程、(iii) 金属の成長過程は解明されておらず、均一な電気化学反応場を形成させることによる全ホールは無欠陥化など、技術の更なる洗練化を図るためには反応の基礎を理解する必要がある。その反応機構解明により、0次成長や1次成長といった結晶成長次元の制御が可能となる。また、応用研究としては、反応容器中の超臨界エマルジョンおよび超臨界二酸化炭素の流体力学的な解析、電極のマクロおよびマイクロな電位分布の解析が重要である。

本提案では、様々な反応条件で、様々な形状の孔を有するテストチップに M-SNP 表面処理を行い、集束イオンビーム(FIB)加工機でサンプルを加工し、走査型電子顕微鏡(FE-SEM)で反応条件と埋込めっきの定量的解析を行う。同時に透過型電子顕微鏡(TEM)・EBSD 解析装置により細孔内の金属結晶組織の解析を行う。同時に申請者の現在に至る M-SNP 装置開発研究のノウハウを元に、200ml スケールで超臨界洗浄と超臨界乾燥、M-SNP を連続で実行できる「小型 M-SNP 装置」を開発し、プロセス工学的な課題を解決し、技術イノベーションとグリーンイノベーションを同時に達成する新技術の完成を試みる。

【総合評価】

<input type="radio"/>	特に優れた成果が得られている
<input type="radio"/>	優れた成果が得られている
<input type="radio"/>	一定の成果が得られている
<input type="radio"/>	十分な成果が得られていない

【所見】
① 総合所見
<p>短期間で基礎研究と応用研究を並行して進めてきたことは、所期目的を達成するだけでなく、半導体配線技術にこだわることなく、新たな展開をはじめており、優れた成果である。理論やシミュレーションに関して他の分野の研究者と共同研究と発展させて、当該分野で新たな学術領域を作り上げたことは称賛に値する。</p>

② 目的の達成状況
<p>・所期の目的が <input checked="" type="checkbox"/>全て達成された ・ <input type="checkbox"/>一部達成された ・ <input type="checkbox"/>達成されなかった)</p> <p>新規な銅めっき方法における金属結晶成長機構などの基礎研究と同時に、応用として装置試作まで行っており、非常に多くの成果が上げられており、所期の設定目的が順調に達成できた。</p> <p>実用化を視野に入れた基礎研究と開発研究を効率よく遂行し、新技術である M-SNP装置の開発を実施した。</p>

③ 研究の成果
<p>・これまでの研究成果により判明した事実や開発した技術等に先進性・優位性が <input checked="" type="checkbox"/>ある ・ <input type="checkbox"/>ない)</p> <p>・ブレークスルーと呼べるような特筆すべき研究成果が <input checked="" type="checkbox"/>創出された ・ <input type="checkbox"/>創出されなかった)</p> <p>・当初の目的の他に得られた成果が (<input type="checkbox"/>ある ・ <input checked="" type="checkbox"/>ない)</p> <p>M-SNP 法により直径 60nm アスペクト比 2 及び直径 70nm アスペクト比 5 のホールへの無欠陥銅埋め込みに成功させただけでなく、これによりレジストパターンの基板への密着強度を向上させており先進性・優位性がある。</p> <p>本技術を応用した洗浄技術を開発するだけでなく、全自動で M-SNP 操作を行う新しい半導体配線装置を完成させており、ブレークスルーと呼べるような特筆すべき研究成果が創出された。</p> <p>当初の目的の他に得られた成果があったとは判断されない。</p>

④ 研究成果の効果
<p>・研究成果は、関連する研究分野への波及効果が <input checked="" type="checkbox"/>見込まれる ・ <input type="checkbox"/>見込まれない)</p> <p>・社会的・経済的な課題の解決への波及効果が <input checked="" type="checkbox"/>見込まれる ・ <input type="checkbox"/>見込まれない)</p> <p>新しい半導体配線装置として、実用化に資するだけの条件を兼ね備えた装置を実現しており、波及効果は大きいと推測され、メッキの関連する研究分野への波及効果が見込まれる。</p> <p>超臨界の二酸化炭素を利用することによりコストや投入エネルギーの面で既存技</p>

術に対しての優位性が確保できるかは現時点では不明に思える。今後の研究開発で、更なる実用化に発展することが期待され、社会的・経済的な課題の解決への波及効果が見込まれる。

⑤ 研究実施マネジメントの状況

・適切なマネジメントが（行われた ・ 行われなかった）

研究目的の達成に向けて研究計画は適切に実行されており、研究実施体制は適切に組織され、各年度、研究実施上必要な設備を随時導入されており、指摘事項への対応も適切に実施されている。さらに、研究成果の発信は適切に行われ、国民との科学・技術対話についても効果的に実施されており、適切な研究マネジメントが実施された。