

## 審査の結果の要旨

論文提出者氏名 楊文華 Yang Wenhua

本論文の目的は、銅-銅(Cu-Cu)の低温直接接合を、ギ酸を用いた還元手法とPt触媒を組み合わせた新しいプロセスを提案することによって実現し、その接合メカニズムを実験的、理論的に明らかにするものである。

微小電極の接合やパワーデバイスの低抵抗接合等の分野では、比電気抵抗の小さいCu電極の直接接合へ期待が寄せられている。しかし、Cuの直接接合には一般に350° C以上の加熱が必要であり、接合プロセスの低温化には表面酸化膜の除去が必要である。イオン衝撃によってこれを行う表面活性化接合では非常に良好で強固な常温接合が可能であるが、真空プロセスが必要である。これに対して、ギ酸による還元は大気圧下での処理が可能であり、Snやはんだで実績があるものの、Cuでは低温では有効ではなく、250° C以上の加熱が必要である。

そこで本研究では、大気圧下でノズル内に設置したPt触媒を通過したギ酸ガスをCu表面に吹きつけ、この後、直接接合を行うという簡便な方法を提案した。

本研究において提案した接合プロセスは、表面清浄化過程と接合過程とからなる。この清浄化過程においては、相対向して置かれた接合試料間にPt触媒を有するノズルを挿入し、混合ガス(不活性ガス+ギ酸ガス)をノズル入口に注入し、ノズル出口から出射するガスによって表面を清浄化し、この後接合過程において上下の接合試料に圧縮荷重を加えることにより直接接合する。

その結果、ギ酸処理前後のCu表面は酸化膜に覆われているのに対し、Pt触媒を用いたギ酸で処理したCu表面が最も清浄化されることが示された。また接合強度は、Pt触媒を用いた場合は40MPaであり、用いない場合の20MPaに比べて約2倍大きく、接触抵抗はPt触媒の無いギ酸処理における接触抵抗は0.28mΩに比べ、Pt触媒を用いたギ酸処理では0.17mΩとなって大幅に低減されることが示された。

接合表面をギ酸処理した後、200°Cで直接接合したCu電極試料の断面TEM像では接合界面には微細な結晶粒が観察され、接合界面は明確ではない。これに対し、Pt触媒のないギ酸で処理した場合はCu-Cuの接合界面が明瞭に観察された。

これらの結果から、加熱したPt触媒を通してギ酸蒸気と不活性ガスの混合ガスを導

入ることにより、200°C以下の低温でのCu-Cuの直接接合が可能となった。

自然酸化膜を有するCu表面をPt触媒を用いてギ酸処理した場合、Pt触媒を用いない場合と比べCu酸化膜はより効果的に除去される。またPt触媒を用いたギ酸処理によって、接触抵抗を小さくすることが可能である。さらに接合強度はPt触媒を用いたギ酸処理によって大きく改善する。

審査の過程では、この低温接合においてPt触媒の効果についてそのメカニズムが明確ではないとの指摘があった。これに対し、最終論文では、新たにPt触媒によって、水素ラジカルが効果的に形成されること、またPt触媒を使用しない場合とPt触媒を使用した場合の接合界面の微細構造の違いを高分解能電子顕微鏡によって詳細に観察した結果が示され、水素ラジカルによる還元作用が、ギ酸塩の生成と分解を促進し、界面に微細な結晶粒組織を形成することで、界面の密着を促進し、Cuを低温で接合することを明確に示した。

以上の結果から、本研究では、従来手法では困難であったCu-Cuの低温直接接合をギ酸を用いた還元手法とPt触媒を組み合わせた新しいプロセスによって実現し、その接合メカニズムを実験的、理論的に明確に示したものであり、その独創性が高く評価された。以上のように、本研究で得られた工学的知見は極めて大きく、また、工学の発展に寄与するところは多大である。

よって本論文は博士（工学）の学位請求論文として合格と認められる。