

集束イオンビーム装置を用いたマイクロ配線補修技術の確立および電気特性評価

森田寛之*¹ 鈴木昌資*² 鶴菌大*³

Evaluation of Electrical Characteristics of Established Micro-Wiring Repair Techniques Using Focused Ion Beam Equipment

MORITA Hiroyuki*¹, SUZUKI Masashi*², TSURUZONO Masaru*³

抄録

イオンプレーティング装置にて成膜した銅薄膜に集束イオンビーム装置にてパターンを形成した試料を用いて、銅配線の電気特性評価を行った。また、集束イオンビーム装置にて銅配線を断線した後にタングステン膜の蒸着で補修を行い、補修後の電気特性を評価し、補修前後を比較した。銅-タングステンの電気接合はオーミックをとり、インピーダンスの寄生成分は無視できる値であった。また、蒸着したタングステン膜の抵抗率は $63\mu\Omega\text{cm}$ 、 $355\mu\Omega\text{cm}$ と算出された。

キーワード：集束イオンビーム装置，配線補修，タングステン膜，電気特性

1 はじめに

ナノプロセスの高度化、電子機器の高周波化により、電子基板の配線の細線化が求められている。細線化されたCPUやLSI、電子回路基板等の設計開発では、配線を断線・変更・補修して試作を行っている。この配線変更・補修の際には、リソグラフィ装置やエッチング装置、蒸着装置等を使用した複雑な工程が必要となり、開発の効率化が求められている。現在では、電子回路基板配線の補修に関する複雑な工程を1工程に集約するため、集束イオンビーム装置(FIB)を用いた配線修正のサービスを提供している企業がある。しかし、補修した電子回路配線の抵抗やインピーダンスといった電気特性は明らかにされておらず、かつ配線変更・補修を行うための集束イオンビーム装置のミリング設定やデポジション設定といった加工条件が不

明となっていることが現状である。

開発時に、集束イオンビーム装置を用いてミリングして断線・調整し、デポジション(蒸着)により補修した電子回路基板配線は、通電の確認は行われているが、抵抗、インピーダンスに関しては明らかにされていない。特に配線幅が数 μm ~1mmと非常に小さいものは、プローバやネットワークアナライザ等の高価な装置を使用する必要がある。さらに微小電流に関する電気特性の測定は測定環境周辺から影響を受けたノイズの除去やプローバを配線へ接続する方法等の確立が課題である。また、銅やアルミニウムで形成される配線に対して、FIBにより成膜するカーボン、タングステン、白金といった配線材料と異なる材料を用いて補修・接合されると、編集箇所では電気信号は反射・減衰・波形ゆがみが生じることが予想される。補修箇所の状態により、電気信号の位相遅れ等、伝播特性に影響を与え、高周波下における電子回路の動作不良の要因になることが考えられる。加えて、FIBを用いた配線の再編集により、高周波下で

*¹電気・電子技術・戦略プロジェクト担当

*²化学技術担当

*³材料技術担当

の配線の電気特性変化が電子回路等の動作不良に影響を与える可能性があり、課題となっている。

次に、配線幅が非常に小さい電子回路基板を変更・補修するためには、リソグラフィ装置やエッチング装置、蒸着装置等を用いた複数工程が必要となり、各装置の補修に係るソフトウェアの変更や装置の設定等に多大に時間・コストがかかる。そのような問題が電子回路の設計・試作・開発の効率化の妨げとなっていることが問題の一つとなっている。

本研究では、集束イオンビーム装置を用いて配線回路補修技術の確立および電気特性評価を行う。

2 実験方法

2.1 銅薄膜の作製

イオンプレーティング装置（昭和真空 SIP-650）（図1）にて、タングステンるつぼ内の銅（純度 99.99%）を電子ビームにてプラズマ内で熔融・蒸着し、ガラス基板上に銅薄膜を成膜した。成膜条件を表1に示す。



図1 イオンプレーティング装置

表1 成膜条件

項目	条件
蒸着材料	銅（純度 99.99%）
るつぼ材料	タングステン
プラズマ雰囲気	Ar（10mL/min）
成膜レート	5Å/s
膜厚	382.8nm
基板	石英ガラス基板

2.2 パターン形成

石英ガラス基板上に成膜した銅薄膜に対して、集束イオンビーム装置（日本電子製 JIB-4600F）（図2）を用いて、電極パッド、プローブ用電極パッドパターンを含めた銅配線パターンを形成した。



図2 集束イオンビーム装置

2.3 銅配線の断線・補修

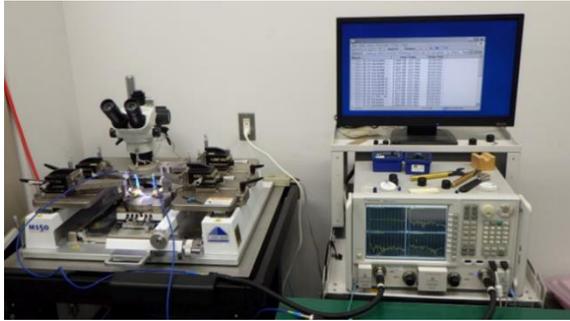
集束イオンビーム装置の Ga イオンビームを用いて、作製した配線パターン中央部の銅薄膜をミリングし、配線パターンを断線した。次に Ga イオンビーム・ヘキサカルボニルタングステン（ $W(CO)_6$ ）ガスを用いて、断線箇所タングステンを堆積し修復した。

2.4 銅配線パターンの電気特性測定

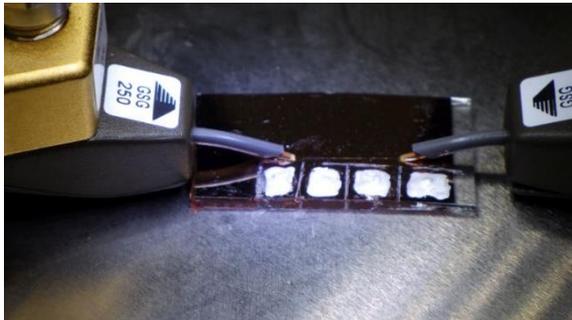
2.2で作製した銅配線パターンを用いて、電極パッド A-電極パッド D 間に電流源（Keithley 製 6221）を用いて直流電流を通电し、電極パッド B-電極パッド C 間の電圧を DMM（Keysight 製 34470A）にて測定した。銅配線パターンが補修前後で電流と電圧を測定し、オーミック接続について評価した。

次に、LCR メータ（NF 回路設計ブロック製 ZM2376）を用いて、1Hz～10kHz での銅配線パターンのインピーダンスを測定し、補修前後の抵抗成分の変化を求めた。

さらに、マイクロ波ネットワークアナライザ（Agilent(現 Keysight)製 N5244A)およびプローブ（Cascade 製 ACP40-GSG-250）（図3）を用いて、図2のプローブ用電極パッド間の S パラメータを測定し、銅配線パターンの補修前後の変化を評価した。



(1) マイクロ波ネットワークアナライザ



(2) プローブによる S パラメータ測定写真

図 3 マイクロ波ネットワークアナライザ

ステンを堆積させることで、断線箇所を補修した。加工時の SEM 像を図 5 に示す。なお、補修 2 での補修箇所上下の長方形部は、タングステンが断線個所から広がって堆積したため、除去した跡である。

表 2 補修条件

項目	補修 1 (W-Depo11)	補修 2 (W-Depo8)
加速電圧	30kV	30kV
Beam 設定	φ15nm 10pA	φ27nm 100pA
加工サイズ	2.0×12.8μm ²	2.0×12.8μm ²
ガス種類	W(CO) ₆	W(CO) ₆
ドーズ量	1.5nC/μm ²	1.5nC/μm ²
加工時間	約 1 時間	約 9 分

3 結果及び考察

3.1 銅配線パターンの補修

集束イオンビーム装置を用いて、形成した銅配線パターンの SEM 像を図 4 に示す。

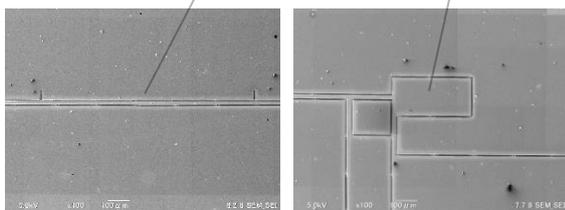


図 4 パターン形成概略図

集束イオンビーム装置の Ga イオンビームにて、配線パターンを 2μm 幅で除去・断線した後、ヘキサカルボニルタングステンガスを吹きかけ、Ga イオンビームにてカルボニル基の結合を切りタング

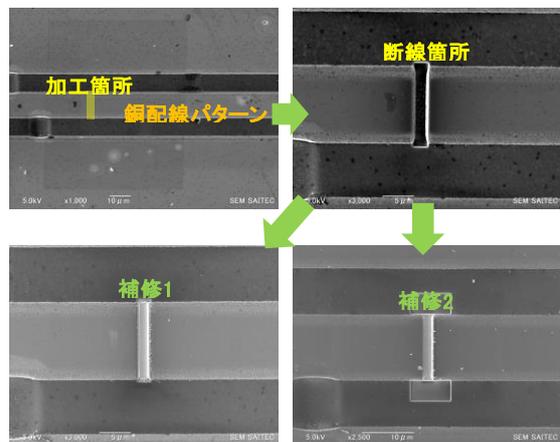
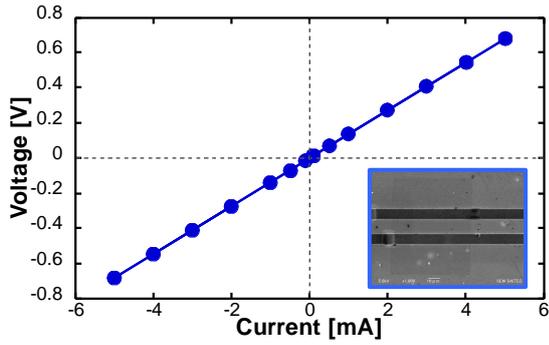


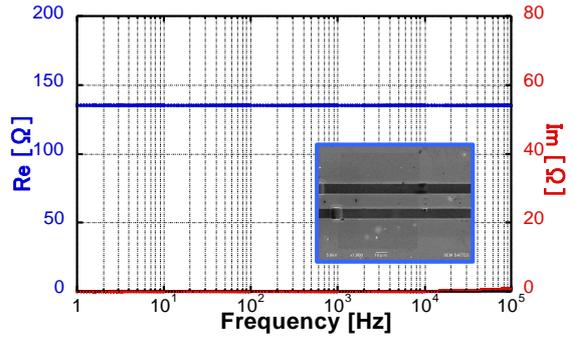
図 5 配線補修時の SEM 像

3.2 銅配線パターンの I-V 特性結果

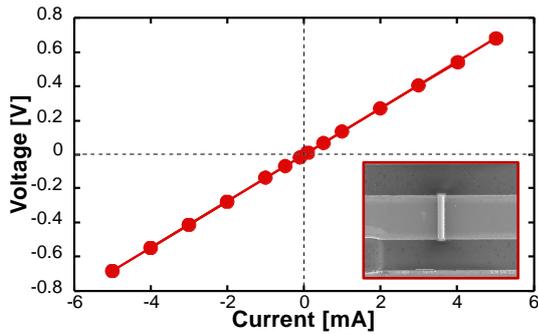
図 4 の銅配線パターンを用いて、電極パッド A-電極パッド D 間に電流源 (Keithley 製 6221) を用いて直流電流を通電し、電極パッド B-電極パッド C 間の電圧を DMM (Keysight 製 34470A) にて測定した。銅配線パターンが補修前後で電流と電圧が比例関係であるか試験を行った結果を図 6 に示す。



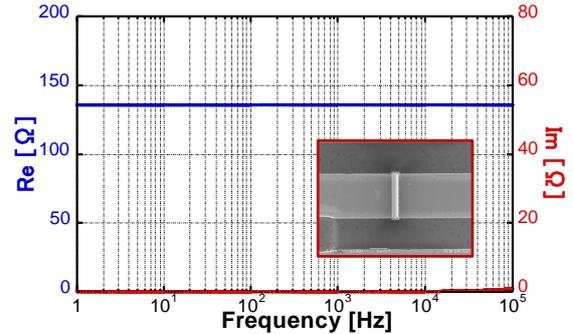
(1) 補修前



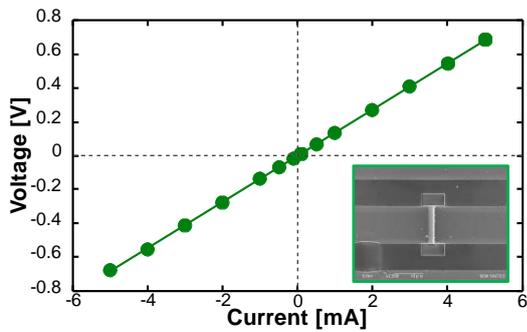
(1) 補修前



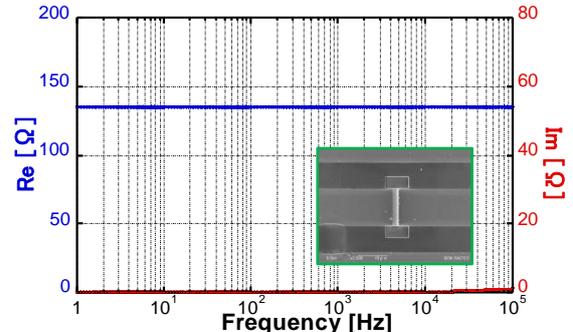
(2) 補修 1 実施後



(2) 補修 1 実施後



(3) 補修 2 実施後



(3) 補修 2 実施後

図 6 銅配線パターンの I-V 特性試験結果

図 7 配線パターンのインピーダンス測定結果

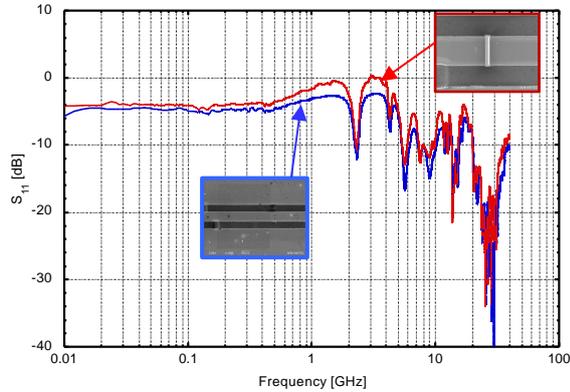
I-V特性試験結果から線形的な直線を描いたため、補修による銅-タングステン間の接合はオーミックであり、良好な補修であることが考えられる。

次に、LCR メータ（NF 回路設計ブロック製 ZM2376）を用いて、1Hz～10kHz での銅配線パターンのインピーダンスを測定し、補修前後の抵抗成分の変化を求めた結果を図 7 に示す。

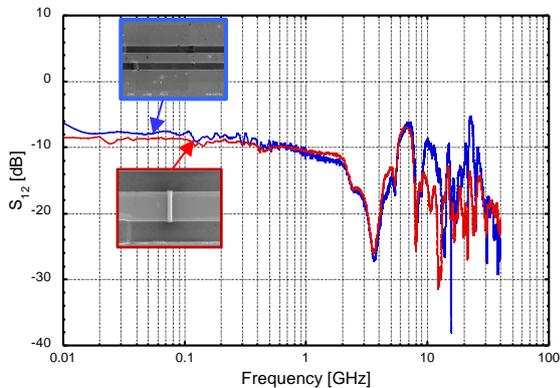
1Hz～100kHz での無効成分（Im）はほぼ 0 となり、有効成分（Re）である抵抗分は一定の値となった。このことから、周波数による変化はなく、銅-タングステン間の接合に寄生成分がなかったことが考えられる。

1Hz～100kHz の有効成分の平均は、補修前では 135.42Ω、補修 1 では 136.37Ω、補修 2 では 136.31Ω であった。加工形状から、補修 1 でのタングステンの抵抗率は 63μΩcm、補修 2 のタングステンの抵抗率は 355μΩcm であった。この値は文献値^{1),2)}と同等の値となった。

さらに、マイクロ波ネットワークアナライザを用いて、図4のプロブ用電極パッド間のSパラメータ(反射: S_{11} 、透過: S_{12})を10MHz~40GHzの範囲で測定し、銅配線パターンの補修前と補修1実施後の変化を評価した結果を図8に示す。



(1) S_{11} パラメータ測定結果



(2) S_{12} パラメータ測定結果

図8 Sパラメータ測定結果

測定結果から、 S_{11} パラメータの信号は補修により増大し、 S_{12} パラメータの信号は補修前後により低減した。これは、タングステン膜の膜厚が銅薄膜より小さいため、タングステン-銅間で信号が反射したことによるものと推定される。しかし、Sパラメータの波形は補修前後で大きな変化が見られなかったことから、タングステン膜による高周波信号への影響は小さいものと考えられる。

4 まとめ

以上の結果から、下記のことがわかった。

- (1) 集束イオンビーム装置を用いた配線補修において、銅-タングステン-銅間ではオーミック接続であることがわかった。
- (2) 集束イオンビーム装置のビーム設定(表2)により、 $2.0 \times 12.8 \mu\text{m}^2$ 、 $1.5 \text{ nC}/\mu\text{m}^2$ では、加工時間が1/6以下に短縮できた。(約1時間から約9分に短縮)
- (3) 1Hz~100kHzでは寄生成分は無視できる値であった。
- (4) 1Hz~100kHzの抵抗成分から、タングステン膜の抵抗率が $63 \mu\Omega\text{cm}$ 、 $355 \mu\Omega\text{cm}$ であった。
- (5) 10MHz~40GHzでのSパラメータ(S_{11} 、 S_{12})は、補修前後で波形は大きく変化しなかった。 S_{11} が増大、 S_{12} が減少した要因として、タングステン膜の膜厚が銅薄膜より薄いためと考えられる。

以上のことから、微細配線の補修が可能であると考えられる。配線構造が複雑なものに対して、どのように対応するかが今後の課題である。

参考文献

- 1) Jun-ya Igaki, Kazuhiro Kanda, Yuichi Haruyama, Masahiko Ishida, Yukinori Ochiai, Jun-ichi Fujita, Takashi Kaito, Shinji Matsui, Microelectronic Engineering, Vol.83, pp.1225-1228, 2006
- 2) Zhiming M. Wang, FIB Nanostructures, p108-110, Springer.
- 3) 日本機械学会, 伝熱工学資料(改訂第4版).