

[別紙 2]

審査の結果の要旨

氏名 重藤 暁津

全体的には、本論文の研究において、表面活性化常温接合法(surface activated bonding, SAB)を用いた CMP-Cu 薄膜の直接接合を超微細・低プロファイル Cu 電極の接続に応用することにより、世界に先駆けて、従来の配線接続技術では不可能であった $10\mu\text{m}$ 以下の接続ピッチを有する超多端子接続を実現したという点が高く評価された。特に、次世代のシステム LSI の実現に不可欠な実装技術によるシステム化、システム・イン・パッケージ (System in Package) に有効な超微細・超高密度接続構造として、バンプ状電極を介さず電極表面と絶縁体表面が同時に接触する接合構造であるバンプレス接合 (bumpless interconnect) を新たに提案し、その有効性を示した点が評価された。

第 2 章「表面活性化常温接合法による CMP-Cu 薄膜直接接合の実現」では、SAB 法において接合性に影響する重要な因子である表面の形状と清浄度について検討しているが、特に以下の成果について評価された。

- ・ 表面形状については、正弦波形状ではない一般の Cu 表面の形状を評価するため、機械的に実測可能な表面の平均曲率 K と平均粗さ Ra をパラメータに用いた簡易的なモデルを構築し、全面的な接合を達成するための形状条件の目安を平均曲率 10^6m^{-1} 程度の Cu 薄膜表面に対して平均粗さ約 2nm 以下と算出している。そして、この平坦度が、保護性酸化被膜形成などの表面処理によって酸化の進行を抑制することで長時間維持されることを確認するとともに、表面処理を行った試料に対し、XPS(x-ray photoelectron spectroscopy)を用いた深さ方向分析から、Cu 清浄面を得るための必要エッチング量が 15nm であることを明らかにしている。
- ・ 表面の清浄度に関しては、上記の活性化条件の下で得られた清浄表面間の接合性を真空雰囲気に対する露出量($\text{Pa}\cdot\text{s}$)をパラメータとして評価し、全面的な接合を得るための限界露出量が約 $0.2\text{Pa}\cdot\text{s}$ であることを明らかにしている。さらに、XPS により測定した活性表面上に生成する酸化物膜厚の成長速度の近似式から、上記の限界露出量下で生成する酸化物層厚は約 2nm であると算出するとともに、この値が Cu 表面で連続的な酸化被膜が形成したときの厚さ約 3nm とほぼ合致することから、連続的の皮膜形成が接合性の可否を決定する要因である可能性が高いとの結論を得ている。

- ・ 得られた接合条件の下で CMP-Cu の直接接合を行ない、その界面の構造を透過電子顕微鏡観察することにより、接合界面では、微小突起が変形することで表面間が密着し、Cu-Cu 原子間の接合が達成されていることを明らかにした。さらに界面に見られた歪みのコントラストは、真空中 200°C 程度の加熱によって歪み近辺の応力が緩和することで縮小し、界面が加熱によって安定する挙動を示すことも発見している。

第3章「表面活性化法を用いた超微細 Cu 電極のバンプレス接合の実現」では、次の点が評価された。

- ・ 表面活性化法を用いた高精度接続を行なうため、新たに高真空中で±1μm のアライメント精度を有する SAB フリップチップボンダを開発している。特に、高真空中での試料ハンドリング動作を可能にするためバネ式のチャックと、平坦な試料間の接続を可能にするため、揺動して互いの表面に倣う機構を備えたボンディングヘッドを新規に考案・開発している。
- ・ 超微細 Cu バンプレス電極の製作のために、ダマシン手法と RIE(reactive ion etching) プロセスを併用する方法を開発している。このプロセスを用いて 10μm ピッチの 3μm 径電極 100,000 ピンを、絶縁体表面からの高さ 60nm 以下・高さばらつき 2nm 以下の平坦さで実現している。
- ・ 上記の試料を用いて超微細 Cu バンプレス接続を実現し、100,000 全ピンが電氣的に接続されていること、その界面では 1mΩ以下の低い接触抵抗値が得られていることを確認している。また、150°C・1000 時間の加熱加速試験において、接触抵抗の増加率は誤差範囲内の 5%以内であったことを示している。

第4章「バンプレス接合の実デバイスへの応用性」では、実デバイスへの適用性検証のため、バンプレス電極を有する 0.1mm 厚の薄型フラッシュメモリチップを用いてメモリカードを試作している。結果として、接合が良好に行なわれたことを示す 128MB の領域確保と、スムーズなデータの書込・読出動作を実際に確認したことが評価された。

以上の結果から、本論文には、次世代マイクロシステム実装に有用かつ独創的な研究成果がまとめられていると判断される。

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。