

氏名	山地 泰弘		
博士の専攻分野の名称	博士（工学）		
学位記号番号	博理工甲第 742 号		
学位授与年月日	平成 21 年 3 月 24 日		
学位授与の条件	学位規則第 4 条第 1 項該当		
学位論文題目	無電解めっきの導体間ブリッジ析出を応用したフリップチップ接続法に関する研究		
論文審査委員	委員長	連携教授	青柳 昌宏
	委員	教授	明連 広昭
	委員	教授	吉田 貞史
	委員	准教授	矢口 裕之

論文の内容の要旨

本研究は、LSI チップ-パッケージ間の接続に用いられるフリップチップ（Flip-chip）接続において、無電解めっきを応用した新しい電極間接続法に関してまとめたものである。

今日の半導体素子の高集積化・高機能化に伴い、LSI チップから、システムにおける基板実装に至る各階層（半導体チップ→パッケージ→実装基板（ドーター基板/マザー基板））間を電氣的に結ぶ接続技術が、性能を左右するボトルネックとなりつつある。特に、微細接続法として幅広く用いられているフリップチップ接続の分野では、10m 以下レベルの微小サイズの bumps を用いた接続例も報告されるに至り、bump 接続の信頼性確保が困難になりつつある。これは、従来の bump 接続プロセスが、「高温で荷重を加え、金属同士を接触、変形させる」という方法で行われ、bump の微小化が進むほど、電極間のアライメント、個々の bump の加圧制御が困難になるだけでなく、接続後温度降下に伴い個々の bump に加わる熱応力が、bump 強度の限界レベルに達しつつあるためである。

本研究では、この問題を解決するため、「常温に近い接続温度」、「機械的変形を与えない接続」の 2 つの条件を満足する接続手法として、無電解めっき反応を利用した方法を提案（特許出願済み：特開 2008-42169）した。Si 基板の周辺部に、bump を有しない矩形の銅電極を配したチップ、基板を用いて、無電解 Ni-B めっきによるフリップチップ接続を行い、その接続特性を調べた。その結果、電極間距離が 10 μm 以下のフリップチップ接続に対する有効性を確認、最小で 5 μm 幅 - 10 μm ピッチの超微細ピッチのフリップチップ接続を実証した。また、Ni-B 析出膜に関する詳細な SEM 観察及び有限要素法（FEM）による濃度分布シミュレーションの結果、この析出挙動が、めっき反応で電極から生じる（金属に対して触媒活性を有する）反応生成物の高濃度領域と密接な関連があることを見出した。Ni-B 膜で懸念される電気抵抗問題は、Ni-B 析出層への無電解 Au めっきの連続めっきにより、通常の bump 接続レベルに改善されることを確認した。

本論文は以下の通り構成される。

第1章 序 論

第2章 無電解めっき法による新微細接続法

第3章 平面配置対向電極による接続性評価

第4章 フリップチップ接続への適用性検証

第5章 実用化に向けたアプローチ

第6章 結 論

主な研究成果を以下にまとめる。

- 1) 平面配置対向電極による接続性評価では、電極及び電極間の各寸法、空間的配置が無電解 Ni-B めっきによるブリッジ析出に与える影響を調べた。電極幅 5 ~ 100 μm 、ピッチ 10 ~ 50 μm 、電極間距離 4 ~ 100 μm の電極をフォトリソグラフィ技術により作製、無電解 Ni-B めっきを行ない、接続部析出膜の外観及び断面 SEM 観察、導通試験により、Ni-B のブリッジ析出膜による接続性を調べた。その結果、接続部の Ni-B 析出膜は浸漬時間 3 分で厚さ約 200nm まで成長し、良好な接続を得るには、対向させた電極間距離を 10 μm 以下に抑えることが重要であること、また電極幅の増大は接続歩留りを向上させる効果があることを確認した。この平面配置電極に関し、析出膜の成長プロセスに関連する SEM 観察及び FEM を用いた拡散仮定による濃度分布シミュレーションを行ない、ブリッジ析出における電極間の選択的なブリッジ析出膜の形成には、電極面における（触媒活性を有する）反応生成物の高濃度領域とベース材料表面に残留するパラジウム核の存在が大きく関連している可能性が高いことを見出した。また、接続部の析出膜の ICP-AES による組成分析、また XRD による構造解析から、析出膜は 97% Ni-3% B 組成を有し、また、構造的には、面心立方 (fcc) 構造の Ni の微細結晶粒とアモルファス（非晶質）構造の Ni-B から成ることが推定された。
- 2) フリップチップ接続への適用性検証では、より実際の接続に近い、対向電極が垂直に配置された場合の Ni-B のブリッジ析出による接続特性に関して明らかにした。Si 基板の周辺部に矩形の銅電極を配したチップ、基板を用い、各々で周辺配置された銅電極が露出するように開口部をパターンニングした絶縁性接着剤（ポジ型レジスト）をダイボンディング材として、本基板上でチップを加熱圧着、同接着層周辺部の垂直壁面をベースとしてチップと基板の対向電極（電極幅：5 ~ 100 μm 、ピッチ：10 ~ 60 μm 、接着層厚（=電極間距離）：約 7 μm ）間に無電解 Ni-B めっきを行い、ブリッジ析出膜を形成させた。その結果、実効的な対向幅が 5 μm 以上かつ電極幅に対して 3 倍以上のピッチの対向電極を有するフリップチップ構造に対して接続が確認され、最小で 10 μm 幅 - 30 μm ピッチのフリップチップ接続に成功した。四端子抵抗測定の結果、Ni-B ブリッジ析出を用いたフリップチップ接続部は、比抵抗 100 [$\mu\Omega \cdot \text{cm}$] レベルの接続抵抗を有することを確認した。一方、垂直配置の対向電極に関する析出挙動を調べるため、FEM による対向電極での反応生成物に関する拡散シミュレーションを行ない、電極配置に伴う濃度分布の変化を解析した。その結果、垂直配置の対向電極を有し対向電極の対向面積が大となるフリップチップ接続では、反応生成物による高濃度領域が平面配置の対向電極よりも発達しやすい傾向が有り、選択的な析出膜の形成には有利であるが、隣接リードとの間に形成されるショートの高率が増加する可能性が高いことが示された。この結果は、「平面配置対向電極」と「垂直配置対向電極（フリップチップ接続用電極）」それぞれにおいて観察された実際のブリッジ析出膜における「析出の選択性」の違いとも符合するものであり、反応生成物による拡散現象とブリッジ析出現象との因果関係を示唆するものと言える。

- 3) 実用化に向けたアプローチでは、本接続固有の接続メカニズムに起因する微細ピッチ化の限界を克服するためのアプローチとして、隣接リードとの拡散干渉を抑制するマイクロキャビティ構造を応用した方法を考案した。接続実験の結果、世界的にも特殊な環境下（真空中等）での報告例しかない、 $10\ \mu\text{m}$ ピッチレベルの超微細ピッチ接続に関して大気中での接続に成功、改良型の接続手法の有効性を実証した。一方、Ni-B析出による接続膜で問題となる電気抵抗低減のため、この接続膜上に無電解Auめっきの可能性について検討を行った。連続めっきによりNi-Bブリッジ析出膜上に約 $1\ \mu\text{m}$ のAu膜層を形成できること、また従来のフリップチップによるバンプ接続と同等の電気抵抗が得られることを確認し、本接続の実用に向けたポテンシャルを実証した。

論文の審査結果の要旨

今日の半導体素子の高集積化・高機能化に伴い、LSI チップから、電子システムにおける基板実装に至る各階層(半導体チップ→パッケージ→実装基板(ドーター基板/マザー基板))間を電氣的に結ぶ接続インターフェースの領域が、システム全体の性能を左右するほどの重大なボトルネックと認識され始めている。特に、半導体チップとパッケージの間の接続に用いられる、チップをフェースダウンの形で実装するフリップチップ接続の技術分野では、10 μm 以下レベルの微小サイズの bumps を用いた接続例も報告されるほどの超高密度な領域に至っており、信号伝送、電源供給、接続信頼性などの確保が非常に困難な状況となりつつある。機械的な強度の観点で見ると、従来の bumps 接続プロセスが、「高温で荷重を加え、金属同士を接触、変形させる」という方法で行われているため、bumps の微小化が進むほど、電極間のアライメント、個々の bumps の加圧制御が困難になるだけでなく、接続後温度降下に伴い個々の bumps に加わる熱応力が、bumps 強度の限界レベルに達しつつあるとの認識が広がっている。

本論文では、こうした問題を解決するため、「常温に近い接続温度」、「機械的変形を与えない接続」の2つの条件を満足する接続手法として、無電解めっき反応を利用した接続方法を提案している。まず、Si 基板の周辺部に、bumps を有しない矩形の銅電極を配したチップ、基板を用いて、無電解 Ni-B めっきによるフリップチップ接続の実験を行い、その接続特性が調べられた。その結果、電極間距離が 10 μm 以下のフリップチップ接続に対する有効性が確認されて、最小で 5 μm 幅-10 μm ピッチの超微細ピッチのフリップチップ接続を実証することができた。また、Ni-B 析出膜に関する詳細な SEM 観察及び有限要素法 (FEM) による濃度分布シミュレーションの結果、この析出挙動が、めっき反応で電極から生じる (金属に対して触媒活性を有する) 反応生成物の高濃度領域と密接な関連があることが見出された。最後に、Ni-B 膜で懸念される高い電気抵抗値は、Ni-B 析出層への無電解 Au めっきの連続めっき工程により、通常の bumps 接続レベルまで低い値に改善されることが確認された。

特に、第3章「平面配置対向電極による接続性評価」では、電極及び電極間の各寸法、空間的配置が無電解 Ni-B めっきによるブリッジ析出に与える影響についての検討結果が述べられている。電極幅 5~100 μm 、ピッチ 10~50 μm 、電極間距離 4~100 μm の電極をフォトリソグラフィ技術により作製、無電解 Ni-B めっきを行ない、接続部析出膜の外観及び断面 SEM 観察、導通試験により、Ni-B のブリッジ析出膜による接続性が調べられた。その結果、良好な接続を得るには、接続部の Ni-B 析出膜を浸漬時間 3 分で厚さ約 200nm まで成長させ、対向させた電極間距離を 10 μm 以下に抑えることが重要であること、また、接続歩留りを向上させるためには、電極幅を増大させることに効果があることが確認された。この平面配置電極に関し、析出膜の成長プロセスに関連する SEM 観察、および、FEM を用いた拡散仮定による濃度分布シミュレーションに基づいて、電極間の選択的なブリッジ析出膜の形成では、電極表面における (触媒活性を有する) 反応生成物の高濃度領域とベース材料表面に残留するパラジウムの存在が関連していることが見出された。また、ブリッジ析出膜の ICP-AES による組成分析、また XRD による構造解析から、析出膜は 97% Ni-3% B 組成を有し、また、構造的には、面心立方 (fcc) 構造の Ni の微細結晶粒とアモルファス (非晶質) 構造の Ni-B から成ることが推定された。

第4章「フリップチップ接続への適用性検証」では、実際のフリップチップ接続に近い、対向電極が垂直に配置された場合の Ni-B ブリッジ析出による接続特性に関して調べられた。Si 基板の周辺部に矩形の銅電

極を配したテストチップ、テスト基板を用い、各々で周辺配置された銅電極が露出するように開口パターンを形成した絶縁性接着剤（ポジ型レジスト）をダイボンディング材として、本基板上でチップを加熱圧着、同接着層周辺部の垂直壁面をベースとしてチップと基板の対向電極（電極幅:5~100 μm 、ピッチ:10~60 μm 、接着層厚（=電極間距離）:約7 μm ）間に無電解 Ni-B めっきを行い、ブリッジ析出膜を形成させる実験が行われた。その結果、実効的な対向幅が5 μm 以上かつ電極幅に対して3倍以上のピッチの対向電極を有するフリップチップ構造に対してブリッジ接続が確認され、最小で10 μm 幅-30 μm ピッチのフリップチップ接続の実証実験に成功している。

四端子抵抗測定の結果により、Ni-Bブリッジ析出を用いたフリップチップ接続部は、比抵抗100 [$\mu\Omega\cdot\text{cm}$]レベルの接続抵抗を有することが確認された。一方、垂直配置の対向電極に関する析出挙動を調べるため、FEMによる対向電極での反応生成物に関する拡散シミュレーションを行ない、電極配置に伴う濃度分布の変化が解析された。その結果、垂直配置の対向電極を有し対向電極の対向面積が大となるフリップチップ接続では、反応生成物による高濃度領域が平面配置の対向電極よりも発達しやすい傾向が有り、選択的な析出膜の形成には有利であるが、隣接リードとの間に形成されるショートの高率が増加する可能性が高いことが示された。この結果は、「平面配置対向電極」と「垂直配置対向電極(フリップチップ接続用電極)」それぞれにおいて観察された実際のブリッジ析出膜における「析出の選択性」の違いとも符合するものであり、反応生成物による拡散現象とブリッジ析出現象との因果関係を示唆している。

第5章「実用化に向けたアプローチ」では、ブリッジ接続固有の接続メカニズムに起因する微細ピッチ化の限界を克服するためのアプローチとして、隣接リードとの拡散干渉を抑制するマイクロキャビティ構造を応用した方法が提案されている。接続実験の結果、世界的にも特殊な環境下(真空中等)での報告例しかない、10 μm ピッチレベルの超微細ピッチ接続に関して大気中での接続に成功し、改良型の接続手法の有効性が実証された。一方、Ni-B析出による接続膜で問題となる電気抵抗低減のため、この接続膜上に無電解 Au めっきの可能性について検討が行われた。連続めっきにより Ni-Bブリッジ析出膜上に約1 μm の Au 膜層を形成できること、また従来のフリップチップによるバンプ接続と同等の電気抵抗が得られることが確認され、本接続の実用に向けたポテンシャルが実証された。

これらの研究成果については、電子工学分野の査読付き学術論文2編、米国とシンガポールで開催された国際会議論文2編により、公表されている。

以上、無電解めっきの導体間ブリッジ析出を応用したフリップチップ接続法について、Ni-B膜の選択的析出現象を利用した新しい接続方法を提案し、基本的なブリッジ接続条件を明らかにするとともに、無電解めっきブリッジ析出のメカニズムについて、FEMシミュレーションによる解析手法を開発し、実験データの分析を試みるとともに、最終的に従来法では実現が困難な10mピッチの接続実証実験に成功している。論文の内容は、電子システムインテグレーション技術の研究として、工学的に重要な課題を解決したすぐれた内容となっており、電子システムのボトルネックを解消するための新たな技術領域を切り開く可能性を有するものである。したがって、博士の学位論文として価値のあるものと認め、合格とした。