

博士論文審査報告書

論 文 題 目

超高周波用三次元高密度実装のための
ダイレクト金めっきを用いた低応力接合技術

Low stress bonding technology using
direct immersion gold for
ultra-high frequency and high density
three-dimensional package

申 請 者

乃万	裕一
Hirokazu	NOMA

ナノ理工学専攻 マイクロシステム研究

2018年7月

本論文は、超高周波用三次元高密度実装を目的としたダイレクト金めつきを用いた低応力接合技術について述べたものである。

半導体素子の単一チップ面内での微細化が限界に達し、貫通シリコン電極を用いた集積回路の三次元実装がメモリ分野などで本格化している。一方、次世代 5G 通信などでは超高周波帯域でも実用に耐えうる三次元実装技術が待望されている。次世代の三次元実装においては以下の点が要求されている。シリコン積層チップ構造において電気的特性を向上するため、接合部分を薄くしチップ間の距離を縮める。低誘電率層の保護のため積層チップと有機パッケージ基板の熱膨張係数の違いに起因する接合時の熱応力の問題を解決する。パッケージ基板の両面にチップを接合する際に銅パッド表面の酸化を防止する。インピーダンススマッチを防ぎ、チップ内の高周波信号特性を向上させるため接合部材料を単一化する。本論文で著者は、ダイレクト金めつきによる低応力接合技術を用いることで次世代の三次元実装を実現する上での課題を解決することを提案している。ダイレクト金めつきとは、銅に対してニッケルバリア層を介さず、直接置換還元金めつきを行うものである。この方法は銅パッドのダイレクト接合に適用でき、微細なピッチの接合にも適しており、接合前の酸化膜除去を必要としないなど工程を大幅に削減できるというメリットもある。著者は、新たに開発した低応力接合技術を三次元高密度実装の実現上不可欠な①積層チップと有機パッケージ基板の接合、②チップ間の低背接合、③フリップチップを用いた両面実装に適用し、その効果を実証した。本論文はこれらの成果をまとめたもので、全 5 章で構成されている。

第 1 章「序論」では、超高周波用三次元高密度実装の必要性の背景、従来の三次元積層化技術、および後工程の要素技術の有効性とその課題を纏め、本研究の目的について述べている。

第 2 章「ダイレクト金めつきを用いた低応力接合」では、銅ピラーを用いたフリップチップにおけるリフロー接合工法のみで、低誘電率層（Low-k 層）を保護できる銅ピラー・はんだ接合構造を実現している。シリコン積層チップを有機パッケージ基板に実装する際には、チップの電気特性を向上させるために使われる Low-k 層を保護することが重要となる。従来はチップ側の銅ピラーなどの設計寸法やリフローの温度プロファイル等工程条件を最適化する方法が取られてきた。しかし、究極的な Low-k 層であるエア・ギャップ技術を用いるにはさらなる技術開発が要求される。そこで、著者ははんだ形状を最適化することで Low-k 層への応力を低減することを考え、はんだの基板側のパッドへの濡れ性を考慮し、基板側の銅パッドをダイレクト金めつき処理することを提案している。ダイレクト金めつきを用いることで、はんだが銅パッド上に広く濡れ広がり、接合部周辺に残るはんだ体積が減ることを実験により実証した。有限要素法で構造解析を行った結果、接合部周辺のはんだ体積が少ないダイレクト金めつき処理の方が、有機防錆被膜処理の場

合よりも Low-k 層への応力を約 15%低減できることが分かった。この結果は、ダイレクト金めっきを施すことでより誘電率の低い Low-k 層を活用でき、周波数帯を約 18%広げることが可能であり工学的意味がある。

第 3 章「ダイレクト金めっきを用いたチップ間低背接合」では、超高周波用三次元高密度実装に必要な銅パッド同士の接合へのダイレクト金めっきの応用について述べている。従来はパッド表面の平坦化並びにパッド表面の銅酸化膜の除去が必要であった。著者は銅表面を柔らかい金で被覆でき、かつ銅表面の酸化を抑止できるダイレクト金めっき膜を中間層として適用することを提案している。上側チップ・下側チップにそれぞれ高さ 1.5 μm の平面状の銅薄膜を形成した上に、厚さ 0.2 μm のダイレクト金めっきを施したものを試料とした。この金表面同士を温度条件 350 $^{\circ}\text{C}$ 、試料同士の加圧条件 10 MPa、大気 (0.1 MPa) 雰囲気下で接合した結果、シェア試験ではシリコンのバルク破壊を起こすほどの強度が得られた。また、透過電子顕微鏡で観察を行った結果、界面に局所的なサイズ 0.2 μm のボイド観察される程度の密着性が確認できた。接合は以下の 3 段階で進行すると考えた。第 1 段階の加熱環境下で銅上にある金同士が接触し、金が塑性変形し表面粗さを吸収し平坦化する。第 2 段階の加熱・加圧環境下で金同士が固相拡散接合を起こす。第 3 段階の加熱環境下で金が銅の中へと拡散し、擬似的な銅のダイレクト接合が形成される。実験から厚さ 0.2 μm のダイレクト金めっきを施せば、表面粗さ Rz0.4 μm (最大粗さ) を吸収し、良好な接合が実現できることが示唆された。この手法では銅の直接接合で要求されるナノメートルレベルの平坦化が不要となる。また、ニッケルバリア層やはんだも必要がなくなり接合高さを約 3 μm と大幅に低減できる。本研究は、銅層の厚さをさらに薄くすることも可能で提案した手法により、 μm レベルの接合高さを実現できることを世界に先駆けて実証しており工学的価値が高い。

第 4 章「銅パッド表面処理の最適化による両面実装」では、フリップチップを用いた両面実装へのダイレクト金めっきの応用について述べている。著者は、銅パッド表面に有機防錆被膜を用いる場合、銅パッドに無電解スズめっきおよびダイレクト金めっきによる表面処理を用いる場合の 3 種を微細ピッチのフリップチップに適用して比較検討を行っている。両面実装の工程では、一面目の実装時の熱が二面目にもかかるため、有機防錆被膜を用いた場合、表面の酸化、有機防錆被膜と銅の結合状態の変化、有機防錆被膜のフラックスによる除去の有無が問題となる。金属表面処理に関しては、表面の酸化および表面処理した金属と銅間の拡散が問題として挙げられる。有機防錆被膜処理では、厚みが分子層レベルで分解温度がリフロー温度以下のものと、厚さ 0.3 μm で分解温度がリフロー温度以上のものを用いて実験を行った。また、金属表面処理に関しては、1.2 μm 厚さのスズめっき、0.03 μm および 0.06 μm のダイレクト金めっきを施したものについて実験を行った。有機防錆被膜に関して、分解温度がリフロー温度以下のものでは、はんだが銅パッ

ド表面に均一に濡れているのに対して、リフロー温度以上のものでは部分的に濡れていないことが観察された。これは、一面目の実装時の熱で有機防錆被膜の銅パッド表面への結合が強くなり、二面目の実装時のフラックスに溶けなくなったためと考えられる。スズめっきによる表面処理を用いた場合、はんだが銅パッド上に濡れていない箇所があることが確認された。これは一面目の実装時の熱で界面合金層が成長し、リフロー時に溶融しなくなったためと考えられる。ダイレクト金めっきによる表面処理を用いた場合に関して厚さ $0.03 \mu\text{m}$ の金めっきでは、はんだ接合が十分ではないことが電氣的な導通試験から明らかになった。一方、厚さ $0.06 \mu\text{m}$ のダイレクト金めっきにおいて電氣的な導通が確保されており、かつパッド表面へのはんだの濡れが十分であることが接合断面の光学顕微鏡観察で確認された。この結果は、微細ピッチフリップチップ両面実装へのダイレクト金めっきの応用が有効であることを世界で初めて実証しており、この研究の工学的価値を示すものである。この方法を実用化する場合は、加熱処理に関するプロセスマージンを十分に確保することが重要となるため、ダイレクト金めっきの厚さを厚くするなどの最適化が必要である。今後、フリップチップ両面実装の微細化がさらに進むと、はんだブリッジを生じにくいダイレクト金めっきが有機防錆被膜よりも圧倒的に有利となる。

第5章「結論と今後の展望」では、本研究の成果を総括し、今後の応用も含めた展望について述べている。

以上、本論文において著者は、ダイレクト金めっきを用いた低応力接合技術の三次元高密度実装への応用手法を確立した。本研究で構築した工学は高密度集積回路および超高周波回路用三次元高密度実装のみならず、IoT 等でも幅広い実装に応用でき、半導体工学、電子工学、通信工学をはじめとする様々な分野への多大な貢献をなし、今後の実用的なマイクロ／ナノシステム作製に寄与するところが大きい。よって、本論文は博士（工学）の学位論文として価値のあるものと認める。

2018年6月

審査員（主査） 早稲田大学教授 工学博士（東北大学） 庄子 習一

早稲田大学教授 工学博士（早稲田大学） 川原田 洋

早稲田大学教授 博士（工学）早稲田大学 渡邊 孝信

早稲田大学教授 博士（工学）東北大学 水野 潤