

博士論文審査報告書

論文題目

積層型機能性デバイスに向けた
ハイブリッド接合技術に関する研究

Hybrid bonding technology
for 3D integrated functional devices

申請者

仁村	将次
Masatsugu	NIMURA

ナノ理工学専攻 マイクロシステム研究

本論文は、今後の進展が期待されている積層型機能性デバイス実現の要素技術として不可欠なシングルマイクロピッチバンプ電極の接合とチップ間を封止する樹脂接合を同時に行うハイブリッド接合技術に関する研究について述べている。

従来の半導体デバイスの高性能化を実現してきた微細化は物理的限界に近づいており、従来の高集積化によるデバイス・システムの高性能化が困難となりつつある。さらなる高性能化を持続する方法の一つとして、Si 貫通電極 (TSV) を利用した 3 次元積層デバイスが注目されている。CPU と DRAM を積層する三次元 LSI では、TSV による縦型接続で配線の長さを短くでき、広いバンド幅を実現可能であるためデータ処理高速化や低消費電力化が期待される。また、近年普及が著しいイメージセンサーでは、センサーとロジックを積層することで従来と比べて小型化、高画質化が実現されており、さらに画素レベルの接続も検討されている。今後、積層デバイスが発展していく中で継続的な進化の実現にはバンプ電極のピン数増加とファインピッチ化に対応した積層技術の確立が不可欠である。本研究では、次世代の 3 次元積層デバイスを実現するために、シングルマイクロピッチのバンプ電極の接合とそのチップ間の樹脂封止技術に注目した。

従来は、フラックスを用いたはんだ接合後に樹脂を毛細管力で注入するキャピラリーアンダーフィル工法が主流であるが、隙間 $10\mu\text{m}$ 以下ではフラックス洗浄や樹脂注入自体が困難とされている。一方、樹脂をはんだ接合前にチップへ塗布し、はんだ接合と樹脂封止を同時に行う先塗布工法も用いられてきた。その場合、フラックス洗浄と樹脂注入は不要であるが、はんだ接合部の樹脂の噛み込みが課題である。これらの問題を解決する方法として、電極の周囲に有機または無機の絶縁層を予め形成した構造を用いて電極と絶縁層の接合を同時に行うハイブリッド接合技術が提案されている。しかし、従来この接合構造はダマシン工法で作製されたため、ディッシングやエロージョンによる電極や絶縁層の接合不良が問題となっている。さらに、Si 基板の歪みや接合時の平行不良による荷重の不均一が原因となり接合が困難であった。本論文では、まず、現状の問題である基板の歪みや基板間の平行度の問題を解決できる接合構造とその作製方法について検討した。さらに、それらを適用してシングルマイクロピッチのハイブリッド接合を始めて達成した研究成果に関して述べている。本論文は、全 5 章から構成されており、以下に各章の概要を示す。

第 1 章「序論」では、研究背景として 3 次元積層化のための従来の樹脂封止技術と今後開発が待望されている積層型高機能デバイス実現に向けたハイブリッド接合技術の有用性とその課題を纏め、本研究で行う研究の内容および意義を述べている。

第 2 章「Lock and key 構造を利用したハイブリッド接合」では、樹脂の硬化状態の特性を利用した歪みや平行度吸収可能な接合構造とその作製技術、その構造によるハイブリッド接合技術について述べている。ハイブリッド接合を安定的に実現するため、基板の歪みや基板間同士の平行度のずれを吸収できる Lock and key 構造を提案した。この構造は、接着性を有する未硬化状態の樹脂が Au バンプ電極周囲に形

成された凸型の Key 構造と、硬化状態の樹脂がバンプ電極周囲に形成された凹型の Lock 構造から成る。未硬化樹脂は、常温では固体であるが接合加熱時に液体となる特性を持つ。この樹脂特性とバンプの塑性変形が接合時の基板の歪みや基板間の平行度のずれを吸収する。また、Lock 構造と Key 構造の組み合わせにより、接合時のアライメント精度の向上も実現した。

バンプ電極上に樹脂の残渣が残らない Key 構造の実現のため MEMS 技術を応用した樹脂形成法を考案した。Au バンプ電極を有するチップに樹脂をスピコートし、フッ素フィルムを用いて未硬化状態の樹脂を熱加圧して Au バンプ電極上の樹脂を 150 nm 以下に薄くし、その後 O_2 プラズマ照射により Au バンプ上の樹脂を完全に除去するものである。また、Lock 構造の作製にもフォトリソグラフィと O_2/CHF_3 プラズマエッチングを用い、Au バンプ電極を覆う樹脂を残渣なく除去することに成功した。Lock and key 構造を施したチップはフリップチップボンダーにより大気下で接合可能である。その際、チップと基板のバンプ電極が接触した状態で、樹脂間の隙間を約 400 nm と最適化することで、TSV を持つテストデバイスの 900 ピン全てにおいて電氣的接続を確認した。一方、接合試料の断面 SEM 解析結果から未硬化と硬化樹脂の接合界面が一体化しており、またボイドのないことも確認された。以上の成果により、樹脂の硬化状態の特性を利用して作製された Lock and key 構造を用いたハイブリッド接合を世界で初めて実現し、基板の歪みや基板間の平行度を気にせず安定な接合を行えることを実証した。

第 3 章「Planar 構造を利用したハイブリッド接合」では、樹脂の化学機械研磨による量産化が可能となる接合構造を提案し、その構造によるハイブリッド接合の結果を評価している。新たにバンプ電極と樹脂の化学機械研磨の選択比を樹脂の硬化の状態を制御した接合構造の作製方法を考案した。その接合部は、接着性を保持した未硬化状態の樹脂と半硬化状態の樹脂がそれぞれ Au バンプ電極周囲に形成された構造から成る。未硬化状態の樹脂は、Au よりも研磨レート大きく、研磨後にバンプ電極面よりも深く研磨されるため、接合時に樹脂の充填不良が生じる可能性が危惧される。そこで、樹脂の研磨速度について検討した結果、研磨速度は樹脂の硬化状態によって異なることを見出し、Au の研磨速度に等しい速度になるように樹脂硬化状態を制御して問題の段差を最小限に抑えた。提案した作製方法によって樹脂の研磨と同時にバンプの表面も平坦化され、Au バンプ表面の RMS は 3 nm 以下となった。本構造を用いたハイブリッド接合により、テストデバイスの 900 ピン全てにおいて電氣的接続を確認した。また、接合断面 SEM 解析結果から、未硬化と硬化樹脂の接合界面は観察されず一体化しており、ボイドもないことを確認した。以上の成果により、樹脂の硬化状態を制御することで化学機械研磨による量産化を可能とするハイブリッド接合を世界に先駆けて実現した。

第 4 章「シングルマイクロピッチのハイブリッド接合」では、8 μm ピッチのバンプ電極と SiO_2 フィラー含有樹脂のハイブリッド接合技術と接合前の表面処理技術に

ついて述べている。第 2 章と第 3 章で述べたハイブリッド接合技術のための要素技術を接合構造作製へ応用し、様々な要求項目を満たす接合構造を実現するとともにバンプ電極および樹脂材料を最適化することでシングルマイクロピッチのハイブリッド接合を世界で初めて実現した。

本研究の課題は、①高密度接合での荷重の低減化、②シングルマイクロピッチの接合に適したフィラーの選択、③接合構造の作製手法の構築、④ハイブリッド接合を実現する段差構造の最適化、⑤接合前表面処理技術も確立の 5 つである。①の荷重の低減化には低圧力で変形する Sn をバンプ電極に用いることとした。②に関してはナノサイズの低熱膨張 SiO_2 フィラー含有樹脂を採用した。③では目標である $8\mu\text{m}$ ピッチのバンプ電極と樹脂のハイブリッド接合構造を実現するため、バンプ電極の頭出しと段差構造の作製に樹脂の化学機械研磨とプラズマエッチングを組み合わせた方法を考案した。バンプ形状と樹脂粘度、スピコート条件を最適調整してバンプ電極が樹脂よりも突出した構造を高スループットで作製することに成功した。また、④に関しては、 SiO_2 フィラー含有樹脂のプラズマエッチングを SiO_2 フィラーと樹脂の両方を同時にエッチング可能な O_2 と CHF_3 の混合ガスプラズマを用いることとした。その際、バンプ電極の接合界面に樹脂の噛み込み発生を防ぐため、約 $200\sim 400\text{nm}$ のバンプー樹脂段差構造を設けると基板間の平行度が吸収され、ハイブリッド接合が安定的に実現可能となる。⑤に関しては、接合前の試料表面に有機膜と酸化膜が存在し Cu-Sn 間の拡散を阻害することから、その除去に $\text{ArH}_2(4\%)$ のプラズマ照射を行うこととした。その結果、Ar のスパッタリング作用と H_2 の還元作用が働く $\text{ArH}_2(4\%)$ により、接合界面で Cu-Sn 合金の形成が顕著で、接合後に接合界面の消失が観察され、接合強度も著しく向上した。以上の技術は、シングルマイクロピッチの実用的なハイブリッド接合を可能にする技術として世界的に注目されている。

第 5 章「結論と今後の展望」では、本研究の成果を総括し、今後の展望を述べた。

以上、本論文において著者は、次世代積層型機能性デバイス実現の要素技術として不可欠なシングルマイクロピッチバンプ電極の接合とチップ間を封止する樹脂接合を同時に行うハイブリッド接合の実現に初めて成功した。本研究で構築したシングルマイクロハイブリッド接合技術は、半導体集積回路や MEMS の実装のブレークスルー技術であり、エレクトロニクス、フォトンクスをはじめとする様々な分野への多大な貢献をなし、今後高機能 3 次元積層デバイスの開発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。

2016年2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	谷井 孝至
	早稲田大学教授	博士（工学）東北大学	水野 潤