

審査の結果の要旨

氏 名 赫 然

本論文は、200°C以下の低温領域でのウエハ接合に関し、新しい表面活性化接合（SAB）の拡張手法を提案したものである。論文の独自性は、幾つかかの表面活性化手法を組み合わせることで、異なる接合の枠組みを実現したところにある。特に、絶縁層の接合（SiO₂-SiO₂ や SiO₂-SiN_x）や Cu と絶縁層（SiO₂, SiN_x, および樹脂層）のハイブリッド接合など 3次元集積化にとって不可欠な接合に対して適用可能であることを示した。

開発手法は、具体的には、次の4つの手法からなる。

まず第1の手法では、Siの蒸着とArイオンビーム照射を組み合わせ、SiO₂の正常化とSiのキャップ層を形成する。その後、真空中でSiO₂-SiO₂の親水化接合を行う。この結果、Siのキャップ層がない場合に比較し、接合強度は0.6 J/m²から1.3 J/m²に増加した。透過電子顕微鏡（TEM）、X線分光分析（EDS）によれば、接合界面には、15 nmの厚さのSiO₂層が形成していることが示された。このことから、本接合では、Siキャップ層の≡Si-Si≡結合や≡Si-ダンダリングボンドがOH-吸着サイトとして働き、SiO₂-SiO₂親水化接合を促進していることがわかった。

第2の手法は、上記のメカニズムを積極的に利用し、Siを含んだイオンソースを用いて、SiとArの同時照射を行う方法である。この方法により、絶縁層（SiO₂-SiO₂ および SiO₂-SiN_x）およびCu-Cuの接合を超高真空中常温で実現した。絶縁層の接合強度は0.8-1 J/m²と大幅に上昇した。このことは、Siを含むArビーム照射により、Siのサブインプラネーションとスパッタリングが同時に進行し、その結果として、Si-ダンダリングボンドが増加したことを示唆している。Cu-Cuの接合において接合強度はSiのバルク強度(2.5 J/m²)に達した。Siは界面にほとんど観察されず、この場合は、SiはCu表面からのスパッタリングが支配的と考えられる。

第3の手法は、プリボンディング・アタッチ・ディタッチ（prebonding attach-detach）法と呼ぶ全く新しい方法であり、上記のSi-Ar同時照射との組み合わせによりSiO₂-SiO₂ および SiO₂-SiN_xの接合において、親水化の効果を最大限に生かす手法である。この方法により、200°Cのアニーリングにより、

接合強度は、Si のバルク強度に達する。通常の親水化接合を真空中で行うと、SiO₂-SiO₂ の接合強度が低いのは OH 基が生成するサイトが少ないためである。これに対し、プリボンディング・アタッチは、大気中でトラップされた H₂O から OH 基が生成するサイトの数を増加させる効果があり、さらに、プリボンディング・ディタッチを行うことにより、真空中で過剰な H₂O を除去することができ、結果的に大きな接合強度を得ることが可能となる。

この手法は、Cu-Cu に対する 200°C の低温接合にも適用され、Si のバルク強度を上回る接合強度を得た。200°C のポストアニーリング後の接合界面には、TEM 観察では、酸素の少ない領域と、非常に薄い(~6 nm) 酸化層とみられる酸素リッチな領域が混在していることが示された。以上のことから、この手法は、Cu と SiO₂ や SiN_x の絶縁層が混在するハイブリッドボンディングに直接適用可能であることが示された。

最後に、Cu-樹脂 (cyclic olefin polymer: COP) のハイブリッドボンディングに対して、水素ラジカルを含むギ酸活性化による表面活性接合が 200°C 以下でも有効であることを明らかにした。この手法により、樹脂と共存する場合の Cu の汚染を避けることができる。ギ酸を触媒によって分解して生成される水素ラジカルの効果は 160°C ですでに有効であり、接合温度 200°C、接合時間 300-600s の範囲で Cu-Cu 接合の強度は 40 MPa を超える。100-164 MPa の高い強度は処理時間を 300s 以上とすることで得られる。処理温度および処理時間の上限は、COP 樹脂の接合で決まり、200 °C/600s、180 °C/900s、160 °C/1800s 以上で樹脂の接合強度は 6 MPa 以上となる。これらの結果は、プロセスウィンドマップとしてまとめられ、200 °C 以下の温度で銅-樹脂 COP の接合が可能であることを示した。

以上から、新たに提案した拡張表面活性化接合は、200°C 以下のハイブリッド接合に有効であることが示され、また同時に、これまで十分に理解されていなかった低温接合のメカニズムを明らかにすることができた。

審査の過程では、それぞれに提案された 4 つの手法の関連が明確ではないとの指摘があった。これに対し、最終論文では、これらの手法に共通する表面活性化の概念、および、それぞれの得失を比較することで、この 4 つの手法の関連を明確に示した。

以上の結果から、本研究では、従来の手法では困難であった 200°C 以下での Cu-絶縁層のハイブリッドボンディングを新しい拡張表面活性化手法によって実現し、その接合メカニズムを実験的、理論的に明確に示したものであり、その独創性が高く評価された。以上のように、本研究で得られた工学的知見は極めて大きく、また、工学の発展に寄与するところは多大である。

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。