

## 論文の内容の要旨

論文題目 Si薄膜を中間層としたFeナノ密着層による表面活性化接合

氏 名 近藤 龍一

### [背景および目的]

金属、半導体ウエハなどを常温で接合する技術としてイオン衝撃による表面活性化接合が知られているが、イオン結合性の材料のウエハ接合に対しては、適用が困難とされてきた。一方、イオン衝撃の際に数nm厚さのFeを付加させることにより、一部のイオン結合性材料について、表面活性化接合が可能であることが近年報告されている（Feナノ密着層による表面活性化接合）が、接合への役割が明らかにされていない。本研究では、この手法をSi-Siウエハ接合に適用する過程を詳細に検討することより、Feナノ密着層による表面活性化接合の詳細を検討し、Feナノ密着層の役割と本接合手法の適用範囲を明らかにする。さらにFeナノ密着層の詳細な検討より、高強度の接合に役割を果たしていたFeSi層の形成手法として、Si薄膜を中間層とし、これをFeナノ密着層と組み合わせることで、より適用範囲の広い常温接合が可能であることを見いだした。この手法を「Si薄膜を中間層とし、Feナノ密着層による表面活性化接合」と称し、そのプロセスの詳細を検証するとともに、従来困難とされてきたイオン結合性材料の同種・異種ウエハの常温接合を実現することを目的とする。

### [Si-Siウエハ接合におけるFeナノ密着層の役割の検討]

Feナノ密着層の形成過程をイオンビーム照射条件と接合強度の関係から検討し、界面微細構造と結合状態の評価を通じて、Feナノ密着層の役割を明らかにすることを目的に以下の結果を得た。イオンビームの強度、照射距離により接合強度は異なり、接合破断面のXPS測定から、接合強度の強いサンプルではFe、接合強度の弱いサンプルではFe酸化物の形成が示唆された。また、従来のFeナノ密着層によるとされてきた高強度の接合は、2nm程度の厚さのFeSi層を介した接合であることを見いだした。

### [Si-SiN膜接合、Si-Si熱酸化膜接合におけるFeナノ密着層の役割の検討]

Si-SiN膜、Si熱酸化膜、硼珪酸ガラスウエハにおけるイオンビーム照射条件と接合強度の関係を検討し、界面微細構造と結合状態の評価より、Si-SiN膜およびSi酸化膜接合におけるFeナノ密着層の役割を明らかにした。Si-SiN膜接合では接合界面にFeSiN層からなるFeナノ密着層が形成されることで強固な接合が得られ、一方、酸化側接合界面にはFe酸化物が介在することで接合強度が弱いことを明らかにした。これより、酸化側材料表面にFeSiの密着層が形成できれば、イオン結合性材料の常温接合が可能と考えられ、酸化側材料表面へFeSi接合界面を形成する手法として、Si薄膜を中間層とし、Feナノ密着層と組み合わせるプロセスを提案した。また、従来の表面活性化接合では、超高真空中の残留気体の主成分である水への暴露量が $10^{-5}\text{Pa}\cdot\text{s}$ 以上で、酸化による接合強度の低下が確認されているのに対して、本実験

では、水への暴露量が $9 \times 10^{-3} \text{Pa} \cdot \text{s}$ にも関わらず、接合界面のEELS観察より酸素は検出されなかったことより、FeSi層により水が解離吸着されにくく、活性な表面であると考えられる。

#### [Si薄膜を中間層としたFeナノ密着層による表面活性化接合の有効性の検証]

Si薄膜を中間層としたFeナノ密着層の形成プロセスおよびSi熱酸化膜、SiN膜の接合の検討より提案手法の有効性の検証を行うとともに、界面構造および接合破断表面の結合状態の評価より接合界面の構成と接合強度の関係を明らかにした。従来困難とされてきた $\text{SiO}_2$ - $\text{SiO}_2$ 接合を実現し、また、 $\text{SiO}_2$ - $\text{SiO}_2$ 接合界面のTEM/EELS観察より接合界面およびSi中間層との界面にはFeSiが存在し、接合強度を向上させていることを確認した。SiNウエハ接合にもSi中間層とFeナノ密着層を組み合わせた表面活性化接合は適用可能であることが確認され、イオンビームエッチングによってSiN表面にSi層が形成されることによって、非常に強固な接合が達成されることを見いだした。さらに、Si中間層とFeナノ密着層を形成後に大気雰囲気にも曝しても接合が実現することが明らかになった。デバイスによってはSi中間層を形成できない場合においても、被接合ウエハの片側のみにSi中間層を形成することで接合が実現することを明らかにし、提案した手法の有効性を示した。

#### [Si薄膜を中間層としたFeナノ密着層による表面活性化接合の適用可能性]

酸化物ウエハへの適用可能性を検証するためにサファイアおよびガラス材料について、Siを中間層としたFeナノ密着層による表面活性化接合のプロセスにおいてチャージアップの影響を検討し、酸化物ウエハの同種・異種ウエハ接合を検討した。絶縁体である酸化物ウエハの接合においては、Si中間層形成およびFeナノ密着層の形成において、イオンビーム照射工程での中和処理の効果を明らかにした。また、表面のチャージアップを制御することで、Si中間層を介しFeナノ密着層による表面活性化接合を用いて、従来困難とされてきたサファイアウエハ同士の接合およびサファイア- $\text{SiO}_2$ 、SiNとの異種接合を実現した。また、硼珪酸ガラスとSiウエハについても強固な接合を得られ、接合強度がSiのバルク破断強度に匹敵する結果が得られた。

以上のように、Si薄膜を中間層としFeナノ密着層による表面活性化接合によるイオン結合性の常温ウエハ接合が可能であることが、本研究より示された。