

審査の結果の要旨

氏名 山本 道貴

本研究は、センサ・MEMS (Micro Electro Mechanical Systems) デバイスをはじめとした小型エレクトロニクスデバイスの高機能化・多機能化のため求められている、異種材料の低温集積化技術に関するもので、本論文は、「平滑な金薄膜の形成と大気中低温接合への応用に関する研究」と題し、Au-Au 表面活性化接合による低温・大気中での粗い表面を持つ素子のチップ接合技術、ならびにウェハ接合・封止技術について論じており、全 6 章から構成されている。

第 1 章は序論であり、本研究の背景、目的と論文の構成が述べられている。小型エレクトロニクスデバイスの例として光マイクロデバイスを取り上げ、ウェハレベル作製プロセスの必要性、Au-Au 表面活性化接合の利点・課題を整理している。Au-Au 表面活性化接合は、ウェハ接合においては、Au の膜厚、表面粗さ、および表面活性化に用いる各種プラズマの接合への影響を明らかにする必要がある。またチップ接合においては、真空排気プロセスの不要な表面活性化手法、さらには二乗平均平方根 (root mean square, RMS) 表面粗さが数 100 nm オーダーの粗い Au 表面の接合が求められている。本研究では上記課題を解決し、Au-Au 表面活性化接合によるウェハスケールでの常温封止接合ならびに大気中プロセスによる粗い表面へのチップの低温接合を実現することを目的とした。

第 2 章では、Au 薄膜を用いたウェハ常温接合における Au の膜厚・表面粗さの影響ならびに封止への応用について論じている。まず平滑な基板上に成膜した Au 薄膜を中間層とした接合における Au の膜厚・平滑性の影響を検討し、Au の膜厚が 100 nm 以下であれば常温・大気中にてウェハ同士を接触させるだけで接合が伝播することを実証している。また、Au の膜厚が 50 nm 以下の Au 薄膜では封止も可能であることを明らかにしている。膜厚 15 nm の Au 薄膜を用いて封止したサンプルの封止性能評価を行い、 1.3×10^{-14} Pa \cdot m³/s 以下という MIL-STD-883 の基準値よりも 4 桁低いリーク率が得られることを実証している。

第 3 章では、常温接合に適した表面活性化法について論じている。膜厚 15 nm の薄く平滑な Au 薄膜を用いたウェハ常温接合において、物理的な作用を主とする Ar 低真空プラズマと化学的な作用を主とする O₂ 低真空プラズマによる表面活性化の比較が行われている。O₂ 低真空プラズマを照射した場合、Au 表面に酸化金(Au₂O₃)が形成され、常温では接合できなかった。一方、Ar 低真空プラズマを照射した場合は大気中・常温においてブレード試験で基板が破壊するほど強固な接合が得られることが示されている。このことより、ウェハ常温接合においては Ar プラズマによる表面活性化が適していることを明らかにしている。

第 4 章では、表面活性化に大気圧プラズマを適用することで、表面活性化から接合まで全て大気中で行えるプロセスによる光学素子の低温接合について論じている。各種大気圧プラズマを比較し、表面活性化に Ar+H₂ 大気圧プラズマを用いることで、従来から用いられてきた Ar 低真空プラズマと同等の強固な接合が行えることが示されている。また、Ar+H₂ 大気圧プラズマを用いて、光学素子の低温接合が可能であることを実証している。

第5章では、より粗い Au 表面を低温接合するため、平滑な表面を持つテンプレート上に成膜した Au 薄膜を複数回、表面に転写する、新たな Au 表面の平滑化手法について論じている。同手法により、膜厚 300 nm 又は 500 nm の Au 薄膜を 2 回転写することで、RMS 表面粗さ 200 nm 程度という、従来接合に用いられてきた Au 表面よりも RMS 表面粗さが 1 桁～2 桁大きい粗い Au 表面を 10 nm 程度にまで平滑化できることが示されている。この平滑化手法を用いることで、粗い Au 表面の常温での接合を実証している。

第6章は総括であり、各章の主な成果をまとめ、本論文の結論について述べている。本論文では、平滑な表面を有する Au 薄膜を用いた Au-Au 表面活性化接合に着目し、各種プラズマによる表面活性化および Au 表面粗さの接合強度への影響を明らかにするとともに、ウェハスケールでの封止を実証し、RMS 表面粗さ数 100 nm の粗い Au 表面の平滑化を行うことで、チップ常温接合を実証している。

本研究成果は異種材料・異種機能の集積化に広く有用であり、小型エレクトロニクスデバイスの高機能化・多機能化に貢献するものと期待される。本研究の全般にわたって論文提出者が主体となって実験および考察を行ったもので、論文提出者の寄与が十分であると判断する。

よって本論文は博士（環境学）の学位請求論文として合格と認められる。

以上 1968 字