

論文の内容の要旨

論文題目 常温封止接合プロセスと封止性能評価方法の開発

氏 名 岡田 浩尚

本論文は、従来の加熱プロセスを伴う封止技術ではダメージを受けやすい圧電薄膜や有機薄膜等の材料を用いた MEMS(Microelectromechanical systems)デバイスの封止実装を可能にする、表面活性化法を用いた常温封止接合プロセスの開発と、その封止性能評価方法の開発に関するものである。

これまでに表面マイクロマシーニングによる薄膜シェル構造を用いた手法や、陽極接合等の接合技術を用いた MEMS 封止手法が開発されている。これらはそれぞれ利点と問題点があるが、デバイスに対して適切な封止手法を用いることにより(真空)封止を行うことが可能であることが示されている。一方で、これらの封止技術では加熱を必要としているため、キャビティー内部でのガス放出やデバイスへのダメージ等の問題があり、特に圧電薄膜や有機薄膜等の熱の影響を受けやすい材料を用いた MEMS デバイスを封止するためにはプロセスの低温化が望まれている。表面活性化常温接合法(Surface activated bonding: SAB)はプロセスが常温であるため、上記の問題を解決することが可能である。実際に真空封止への適用可能性が検討されており、Si/Si、Si/Cu の SAB による真空封止が可能であることがわかっている。しかしながら、Si では接合に高真空が必要なこと等の問題があり、適切な中間層となる材料を Si 上に成膜する必要がある。Au は SAB を用いた大気圧での接合が可能であることがわかっており、上記問題を解決できる可能性があるが、Au 薄膜の封止接合に関する検討は行われていない。ここで、接触率を真実接触面積と見かけの接触面積の比、リークパスを接合界面に存在する、封止されたキャビティー内部から外界へと連なる未接触部が連なった管とし、臨界接触率をリークパスが消失する接触率とする。本研究では、Au 薄膜を用いた常温封止接合プロセスの開発として、金属薄膜接合表面形状が臨界接触率やその近傍でのリーク率に及ぼす影響の調査を行うとともに、実際に Si 基板上に形成した Au 薄膜同士を SAB により接合し、真空封止の適用可能性を検討した。一方で、封止技術の開発や製品テストでは、半導体実装で利用されている He や Kr-85 を用いたリークテスト法では感度が不十分であることや、個別の測定に不向きであること等の問題点があり、MEMS における封止評価技術の確立が求められている。本研究では、上記目的に加え、封止評価専用のデバイスを開発することも目的とした。

論文は、総括を含めて全 5 章からなる。第 1 章では、本研究の背景としてこれまで発表された封止技術について整理を行い、プロセスの低温化と封止技術の確立の必要性を示した。そして、プロセスの低温化を可能とする Au 薄膜を用いた常温接合や封止評価デバイスを組み込んだパ

パッケージングの提案を行い、そのプロセスやデバイスの開発に必要な課題を示した。

第2章では、as-sputtered Au および CMP(Chemical mechanical polished)-Cu 薄膜表面形状が臨界接触率やリーク率に及ぼす影響を調査することを目的とした。一方の接合面を理想的に平滑な堅い平面(Au, Si)、他方を柔らかい粗面(as-sputtered Au, CMP-Cu)としたモデルで計算を行った。表面形状が臨界接触率に及ぼす影響の調査では、AFM(Atomic force microscopy)で測定した $4\mu\text{m}$ 角以下である微小領域の表面形状データにより実際の封止枠サイズ(幅数十 μm 以上)の臨界接触率を推定する方法を提案した。この方法により、封止枠サイズ(幅)を増加させると、臨界接触率のばらつきが小さくなるために、実効的な臨界接触率を小さくすることができることになるが、臨界接触率が収束するサイズよりも封止枠を大きくしても、接触率に関する接合条件を緩和する効果は無いことを示した。リーク率の調査では、モンテカルロ法を用いた常温接合界面におけるリーク率の計算方法を新たに開発し、リーク率は接触率が増加するにつれ緩やかに減少し、臨界接触率付近で急激に減少することを示した。リーク率が急激に減少する接触率以下では、リーク率は少なくとも $10^{-13}\text{Pa m}^3/\text{sec}$ 程度であり、このリーク率ではキャビティー内部の圧力を長期間真空に保つには不十分であるため、常温封止接合では接触率を臨界接触率以上にすることが不可欠であることを定量的に示した。また、リーク率が $10^{-13}\text{Pa m}^3/\text{sec}$ 程度以下であった場合、リーク率は急峻に減少するため、その接合界面の接触率は臨界接触率以上になっている可能性が高く、実際に封止接合を行った結果と比較してその妥当性を示した。これにより、接触率とリーク率の関係をを用いた新たな真空封止評価方法を提案した。

第3章では、表面粗さを2乗平均粗さで 1nm 程度以下とした Au 薄膜を用いた SAB による真空封止の適用可能性の検討を目的とした。成膜方法に関してはスパッタ蒸着法と真空蒸着法について接合強度を比較し、スパッタ蒸着法が真空封止接合のための膜形成方法に適していることを示した。as-sputtered Au 薄膜の接合では Au 膜厚 20nm 程度で表面粗さが 0.6nm の試料を用いた。表面粗さが 1nm 程度以下では表面の凝着力により無加圧に近い荷重で全面的な接合ができることが予測されたが、全面的な接触を得るためには少なくとも 20MPa 以上の荷重が必要であることを示した。また、この試料の膜厚では Au が全面に存在しておらず、一部 Ti が露出していることが確認されたが、真空封止では全面で接触している必要はないことは第2章で示されており、 20MPa の荷重により 12MPa 程度の強度が確認されたことから、上記の試料を用いて SAB により真空封止接合が出来る可能性があることを示した。

第4章では、真空封止評価専用デバイスの開発を目的として、デバイスに必要な測定圧力下限、封止評価に適したセンサータイプを検討し、ウエハレベル、低デバイスコストをコンセプトとした簡易測定用デバイス A と、チップレベル、自立したデバイスをコンセプトとしたデバイス B の2つの評価デバイスの開発を行った。これまでに発表された真空封止が必要とされる振動型、赤外線、絶対圧力センサーの文献調査を行い、真空封止評価デバイスに必要な測定圧力範囲の下限は 0.1Pa であることを示した。また、センサータイプの調査では、隔膜型はセンサーサイズが大きくなること、熱伝導型は測定の際の熱によりキャビティー内壁からのガス放出が懸念されること等から、振動型が真空封止評価デバイスに適していることを示した。デバイス A

の基本構造はキャビティー内に 3 本のカンチレバー構造のみを形成したものであり、カンチレバーの振動の励振と検出は外部の圧電素子とレーザードップラー振動計によりを行うものとした。作製には 4 インチの SOI ウエハとパイレックスガラスウエハを用いており、圧力測定範囲は 10^{-2} ~ 10^3 Pa 程度であった。カンチレバーの設計では分子流領域における隣接した固定壁がある場合のカンチレバーの減衰量を見積もる方法を新たに提案し、16%程度の精度で減衰量を見積もることができることを示した。デバイス B の基本構造は、貫通電極付き基板チップ、センサーチップ、キャップチップの 3 層構造とした。センサーチップには静電容量・楕型振動子を SCREAM 法により作製しており、その圧力測定範囲は 0.1 ~ 10^4 Pa 程度であった。この振動子の設計の際には、振動子に多数形成されたリリース用エッチ孔における気体減衰量を見積もる方法を提案し、その妥当性を示した。また、この振動子における可動壁-固定壁間の減衰量の見積もりについては、余弦法則により、特に長い可動壁では減衰量が減少する可能性があることを指摘し、その妥当性を示す結果を得た。

第 5 章では、本論文の各章で述べた研究結果をまとめ、結論を述べた。