

博士論文の内容の要旨

氏名	水寄英明
学位名	博士（工学）
学位授与年月日	2020年3月20日
論文題目	焦電効果を利用したPZT赤外線センサの作製プロセスに関する研究

(博士論文の内容の要旨)

2023年までに、年産1兆個を超えるセンサを活用して社会問題の解決を目指す「Trillion sensors universe」ビジョンが提唱されており、センサの小型化・低価格化に対する要求はますます高まっている。本論文は、各種センサの中でも、節電、見守り、防犯などの用途で需要の大きい焦電型の人体感知センサを研究対象として、センサ素子の作製プロセスと、パッケージ封止プロセスについて検討した結果をまとめたものである。

第1章では、焦電型人感センサの概要を述べた。現在上市されている焦電型人感センサは、数cm角と大型であり、かつ十数mmと高背である。このため、「目立つ」外見のセンサとなっており、機器の薄型化やリフロー実装が困難である。よって、薄膜技術を用いた表面実装型の人感センサを高い生産性かつ低コストで実現することを目的に掲げ、チタン酸ジルコン酸鉛（Lead zirconate titanate, PZT）赤外線センサ薄膜の作製と、パッケージ封止プロセスにおける課題についてまとめた。

第2章では、センサ作製プロセス中の真空工程を削減するため、大気中で高品位なPZT薄膜が得られる化学溶液堆積法を採用し、またPt下部電極膜のパターニングにリフトオフ法を用いるプロセスを検討した。SiO₂/Si基板上にリフトオフ法を用いてPt/Ti下部電極をパターニングし、PZT膜を形成した結果、基板全面にPt/Ti下部電極膜を600℃で形成した場合と比較して、PZTの残留分極量は約2/3に留まったが、約0.6 pA/mm²の焦電電流を実現し、デバイスへの適用可能性が示された。また、Pt電極のパターニングに伴い露出したSiO₂/Si基板上にPZT膜を形成した場合、パイロクロア相の生成に起因してクラックが生じた。Pt下部電極を10 μm間隔でパターニングし、ペロブスカイト相を生成させることで、PZT膜に生じるクラックを抑制する新たな手法を提案し、その有効性を実証した。本手法により成膜されたPZT膜は、下部電極の存在しない場所においてもクラックが生じないため、上部電極の配線時に信頼性の向上が期待できる。

第3章では、センサ感度向上のため、熱伝導率や反射率の低い導電性酸化膜を下部電極に用い、かつPZTエッチング時に酸化膜電極が溶解しないよう、極薄の金属膜を導電性酸化膜上に形成した2層複合電極構造を検討した。Pt/Ti極薄膜電極のみを用いた場合、PZT中のPbと電極が反応して強誘電体特性が劣化したが、2層複合電極構造ではPbの拡散が抑制され、またPZT膜の結晶粒子径が増大したことで、強誘電体特性が向上した。両者を比較すると、2層複合電極構造は残留分極量で約4倍、焦電電流は約1.4倍増加した。また、焦電電流の時間変化から時定数を評価した結果、2層複合電極構造は0.05 sとなり、Pt/Ti極薄膜電極の場合と比較して約1/8と応答速度の向上が認められた。新たに提案した電極構造では、PZTエッチング時に下部電極の溶解を防ぐことができるため、特性向上に加え、プロセスの安定化も期待できる。

第4章では、パッケージのはんだ封止プロセス中にPZTセンサが熱損傷を受けないよう、局所加熱によるはんだ接手法を提案するとともに、パッケージ内部の温度をその場測定できる手法を検討した。従来のパッケージ全体を加熱する手法を模擬したホットプレート加熱法では、パッケージ内部の温度は260℃に達し、PZTセンサのキュリー温度である250℃を上回ることから、脱分極する課題があった。一方、マイクロヒータを用いた局所加熱法では、パッケージ内部の温度は180℃以下に抑えられた。接合強度を評価した結果、いずれのはんだ接手法ともに約3~4 MPaであったものの、破断箇所はSi窓材の基材破壊であったことから、良好なはんだ接合面が得られたと考えられる。また、はんだ接合面の断面観察結果から、いずれの手法もAu-Snはんだは共晶化しており、窓材とパッケージの接合は良好に行われたと考えられる。

第5章では、パッケージ内部の詳細な温度分布や、伝熱経路を解析するため、第4章におけるはんだ接合実験を再現したモデルを作成し、有限要素法により過渡熱伝達を解析した。解析の結果、パッケージ内部の導電ビアが伝熱経路となり、はんだ接合部の面内温度分布を生じさせてい

た。また、Si 窓材は、はんだ面内の温度分布を均一に近づける働きを担っていた。Au-Sn はんだと Si 窓材、はんだとパッケージ間の接触熱抵抗について、パッケージ内部温度の実験値と計算値を比較して接触熱抵抗を推定した結果、マイクロヒータ法では加熱初期と冷却直後の誤差が大きく、はんだとパッケージ間以外の接触熱抵抗が誤差の要因と考えられる。局所加熱法によるパッケージ内部の温度上昇抑制効果は、はんだ界面の接触熱抵抗が大きく影響していることが明らかとなった。

第 6 章では、得られた知見と今後の課題・展望をまとめた。

以上のように、本論文では、PZT センサ薄膜の作製プロセスにおいて、電極形成方法の改善と、電極構造を改良するとともに、これに伴う PZT 薄膜の結晶成長機構、強誘電体・焦電体特性への影響を明らかにした。また、新たなパッケージ封止技術と温度評価手法を検討し、表面実装型赤外線センサの作製に関する一連のプロセスの有効性を示した。