

氏 名 佐 本 哲 雄
研究科、専攻の名称 東北大学大学院工学研究科（博士課程）バイオロボティクス専攻
学 位 論 文 題 目 可変SAWフィルターのためのレーザー支援BST薄膜転写技術
論 文 審 査 委 員 主 査 東北大学教授 田中 秀治 東北大学教授 田中 徹
東北大学教授 羽根 一博 東北大学准教授 原 基揚

論文内容要約

本論文は、新規に開発したレーザー支援転写技術によって、誘電率可変特性を持つ強誘電体 $\text{Ba}_x\text{Sr}_{(1-x)}\text{TiO}_3$ （以下BSTと記す）膜を、表面弾性波（SAW）フィルター基板である LiTaO_3 （以下LTと記す）基板上へモノリシックに集積化する低温プロセスについて述べており、このプロセスで作製した帯域幅可変 SAW フィルターを通信端末のデモ機に搭載し、そのデバイス機能を実証したもので5章から成り立っている。

第1章は序論であり、コグニティブ無線方式やヘテロインテグレーション（異種要素集積化）など、本研究を行うにあたって、これらの技術が必要とされる社会的背景を述べている。さらに本研究の位置付けとして、BST 薄膜を用いた可変容量が、通信端末の周波数選別部に用いられる帯域幅可変 SAW フィルターの構成要素として適していることを示すと共に、これまでの研究では BST 薄膜のレーザーによる剥離は熱損傷が伴い、転写膜のデバイスとしての報告は皆無であったのに対し、これを可能にした本研究の新規な剥離転写法を開発するに至った技術課題について示した。

無線通信の分野では、スマートフォンなどの急激な普及により割当て無線周波数帯の枯渇が懸念されており、これに対応するため、デジタル TV 周波数領域の空き周波数帯を活用する新しい無線通信システムであるコグニティブ無線方式が提案されている。この小型通信端末の周波数選別部分には、隣接する TV 放送に影響を与えない急峻な周波数選択特性をもち、挿入損失が小さく、可変幅が大きい、帯域幅可変 SAW フィルターが望まれている。従来からスマートフォンなどのこの部分には SAW フィルターが使用されているが SAW を用いた帯域通過フィルターは、基板材料の音速と、くし歯状電極（IDT）の寸法で周波数が決定されるため、任意に通過帯域を変えることはできない。これに対し、1ポート型 SAW 共振子に直並列に可変コンデンサを挿入してこの共振および反共振周波数をシフトし、これらをハシゴ形に接続することで通過帯域をシフトできる周波数可変フィルターを形成する技術が提案されている。

可変容量の材料としては、誘電率を大きく変化でき、GHz 領域での損失が少ない強誘電体 BST が有力候補である。しかし、BST は 650°C 以上の高温での成膜が必要であるため、熱膨張係数が異なり、焦電効果もある LT 基板に直接成膜することは困難であった。この問題を解決するには、別途サファイア基板上に高温で高品質の

BST を成膜し、LT 基板上に低温で接合した後に BST の成膜に用いた基板を除去する転写工程により LT 基板に BST を集積する方法が有力である。強誘電体膜を成膜させた基板を除去する手段として、接合後に基板の裏側から強誘電体膜に対してレーザーを照射して、界面での融解または熱分解反応によって密着力を低減して剥離する方法が報告されている。チタン酸ジルコン酸鉛 (PZT) や窒化ガリウム (GaN) は転写の報告があり、特に GaN は高輝度 LED の製造工程で工業的な実施例がある。しかし、BST 膜の転写については部分的に熱損傷が入るという報告があり、転写を利用した BST 薄膜の応用は困難と考えられていた。

このため、本論文における技術課題は、①レーザーを用いて BST 薄膜をダメージ無く LT 基板へ剥離・転写する方法を実現し、②BST 薄膜を LT 基板へ高効率で転写する方法を開発し、③BST 可変容量と SAW フィルターを LT 基板上に複数個モノリシックに集積した帯域幅可変 SAW フィルターを作製し、理論通りの特性で動作させることとした。

第 2 章は、新しいレーザー支援 BST 薄膜転写技術について、BST 薄膜の LT 基板への転写プロセスを示し、転写した BST 薄膜の誘電率特性について述べている。このプロセスのキーポイントは、サファイア基板と BST 薄膜の間にある Pt⁽¹⁾にシード層、熱吸収層、分離層の三役を課している点にある。以下、BST 膜に対してサファイア基板側の Pt 膜を Pt⁽¹⁾、反対側の Pt を Pt⁽²⁾と表記する。レーザーを照射しない場合は、Pt⁽²⁾/BST の界面から分離するが、最適なレーザー照射量でレーザーを照射した領域では BST/Pt⁽¹⁾の界面から分離し、BST が表面に露出した形で転写でき、BST 素子の損傷も見られなかった。

本研究が提案するプロセスは次の通りである。最初に、サファイア基板上に Pt⁽¹⁾、BST、Pt⁽²⁾をそれぞれに順次 RF マグネトロンスパッタ装置にて基板温度 550 °C~650 °Cにて高温成膜した。Pt⁽²⁾/BST/ Pt⁽¹⁾の膜厚はそれぞれ 100 nm, 200 nm, 100 nm である。最上層に接合用の Au を 300 nm 成膜する。次にフォトリソグラフィにより任意のパターンを形成後、イオンビームミリング装置により Pt を、ウェットエッチングにより Au と BST をそれぞれエッチングし、パターンを形成する。その後、サファイア基板はダイサーにより 20 mm 角にカットした。この試料へサファイア裏面側から frequency-tripled Nd:YVO₄ レーザーの照射を行った。Pt⁽¹⁾//サファイア界面に対して、接合前にレーザーを照射して選択的にサファイア側の BST/Pt⁽¹⁾界面の密着力を弱めた後に、これを LT 基板に対してウェハレベルで接合して下部電極 Pt⁽²⁾と共に Au/Pt⁽²⁾/BST を転写する低温プロセスである。膜の分離面が BST/Pt⁽¹⁾界面であることを特徴とする。レーザー照射条件は、レーザー波長 355 nm, 繰返し周波数 50 kHz, パルス幅時間 20 ns, 照射ビーム径 25 μm である。レーザー光の掃引は X-Y ステージで走査し、走査スピードは 10 mm/sec, ピッチ 25 μm である。レーザー平均出力は 0~1.2 W の範囲で検討した。一方、Au パッドと SAW 共振子とが形成された 20 mm 角の LT 基板を別に用意しておき、MEMS 接合用に開発したウェハボンダを用いて、両基板の接合位置を合わせた後に、140 °C, 12 MPa の条件で Au-Au 接合を行った。接合前に両基板の Au 接合面は Ar プラズマ活性化処理を行った。接合後の基板にナイフエッジを用いて軽い衝撃を与えると、サファイア基板と LT 基板は容易に剥離し、BST パターンは LT 基板側に転写された。この後、

BST 可変容量の上部電極となる Au/Pt^②をリフトオフ法にて形成した。

レーザー支援 BST 薄膜転写法によって転写した BST 薄膜の誘電率の変化率は、上記で作製したコンデンサのバイアス電界依存性から得られ、電圧 10 V を印加したときの誘電率を ϵ_{\min} 、電圧を印加しない場合の誘電率を ϵ_{\max} とすると誘電率の変化率は $(\epsilon_{\max} - \epsilon_{\min}) / \epsilon_{\max} = 0.67$ が得られた。これは良好な変化率を示している。

レーザーパワーを変化させて BST 薄膜の剥離状態を調べた結果、レーザーパワーのプロセスウィンドウを明らかにすることができ、プロセスウィンドウ内では Pt^②/BST/ Pt^①/Sapphire サンプルの BST//Pt^①界面から剥離が生じ、BST を表面にさらした状態で転写できることを示した。この特性は、Pt エッチングの時に特に重要で、BST 側面に Pt デブリが付着すると上部下部の Pt 電極間でショートが発生するが、本実験で示した剥離分離面では電気ショートが全く起こらない。しかも、上部電極の面積を調整することにより、可変容量の最大値を後から決定することができる。この BST 薄膜転写メカニズムについて一次元非定常熱伝導シミュレーションにて考察した。Pt^①//Sapphire 界面をレーザーで加熱することで Pt^①を融点 (1769 °C) 近くまで加熱するとき、BST//Pt^①界面の BST 表面温度は 732 °C に到達し、BST の熱分解温度 700 °C を超える。BST 膜自体は熱伝導率が 1.1 W/(mK) と小さいため、急激な温度勾配があり、表面から膜内部に入ると温度は急激に減少し、BST 裏面の最高温度は 243 °C である。このため、BST のごく表層部の分解による酸素の放出が膜剥離の原因の一つと推定している。また、熱応力の概算を行い、界面の熱膨張係数の差およびシミュレーション温度から BST の Pt^①側と Pt^②側の界面の熱応力はそれぞれ 760 MPa, 230 MPa 程度と推定された。これは BST//Pt^①界面が最も大きく、この熱応力も剥離を助長する原因の一つと推論した。

第 3 章は、実用に供する帯域幅可変 SAW フィルター回路の LT 基板上回路パターンに BST 薄膜をレーザー支援転写する場合の Au-Au 接合方法に関する収率向上について述べている。LT 基板上には回路に必要な BST 転写位置とは別にダミーの Au パッドを複数配置し、接合圧力を分散させ、過剰な圧力が特定の場所にかからないようにして BST 薄膜を転写する仕組みである。しかし、このダミーのパターンの配置がアンバランスだと収率を悪化させる。そこで、配置パターンにかかる応力分布を有限要素法 FEM にて計算し、パターン配置による応力分布の変化を調べた。解析のモデルは、Au-Au 接合を行うため、上下基板の接合部分は厚み 1.3 μm の Au で代表させた。シミュレーションは Au パッドと LT 基板の接合部のミーゼス応力を求める解析（静解析）を行った。有限要素法によって計算した Au パッドの応力分布を基に、圧力が不足した部分には、均一な応力が得られるようにダミーパターンの再配置を行った。この結果、帯域幅可変 SAW フィルター回路上必要な位置にある転写パターンの抜けが無くなり、フィルターチップの収率が飛躍的に向上した。さらに接合装置の接合圧力リリースタイミングを調整することで、歩留まりはさらに向上し、約 80 % 程度に達した。今後、さらに複雑なパターンに対しても FEM を活用した接合圧力分散パターン設計手法の活用によって、無欠陥レーザー転写の実現が期待できる。

第 4 章は、レーザー支援 BST 薄膜転写技術により作製した帯域幅可変 SAW フィルターを使ったデモンストレ

ーションについて述べている。転写した BST 可変容量は優れた容量変化率を示し、この BST 可変容量を SAW 共振子基板に複数集積して作製した帯域幅可変 SAW フィルターは、設計通りの帯域幅可変動作が確認できた。

コグニティブ無線用通信端末のフロントエンド部としてアップコンバージョン型スーパーヘテロダイン方式が採用されており、その中間周波数 IF 段へ作製した帯域幅可変 SAW フィルターを実装し、デジタル TV 周波数帯 470-710 MHz のホワイトスペース（空き周波数帯）を通してもう一つの端末との仮想ワイアレス LAN 通信をおこなった。BST 薄膜可変容量に印加するバイアス電圧を変化させることで、ラダー型 SAW フィルターの 1 GHz 領域における帯域幅を約 2 倍に変化させることができ、可変帯域通過フィルターの特性をデモンストレーションすることができた。このことから、本プロセス技術の優位性が実証された。

第 5 章は結論であり、本論文で得られた成果について要約している。

本レーザー支援転写技術により、無線通信分野における無線周波数帯の使用帯域割当て拡大のための新しい通信方式であるコグニティブ無線用途の小型無線通信端末周波数選別部に搭載可能な帯域幅可変 SAW フィルターが作製可能となり、将来の無線周波数帯の割り当てに関する逼迫した問題に対しての一つの解決法を実証したものである。さらに、新しい素子の作製プロセスへの応用が考えられ、ヘテロ集積化を推進する技術として期待できる。