

氏名	たに ふじ しょう いち 谷 藤 正 一
授与学位	博士(工学)
学位授与年月日	平成22年3月25日
学位授与の根拠法規	学位規則第4条第1項
研究科, 専攻の名称	東北大学大学院工学研究科(博士課程)電気・通信工学専攻
学位論文題目	FBARを用いた無線通信用RFデバイスの研究
指導教員	東北大学教授 坪内 和夫
論文審査委員	主査 東北大学教授 坪内 和夫 東北大学教授 長 康雄 東北大学教授 高木 直

論文内容要旨

第1章 序論

異なる周波数帯を最適に切り替え、広域、超高速、高信頼な無線通信を可能とするディペンダブル・ワイヤレス・システムの実現のためには、RF デバイスの高性能化、高周波化が必須である。この中にあって、無線端末の小型化を可能とする弾性波を用いたデバイスは必要不可欠である。本論文では、バルク弾性波を用いた圧電薄膜共振器 (FBAR) に着目し、FBAR の高性能化、高周波化を目指すと共に、FBAR を用いた RF デバイスとして FBAR フィルタおよび FBAR 発振器の研究をまとめたのであり、全文5章よりなる。

第2章 FBAR 設計手法の検討

本章では、FBAR の低損失化と広帯域化を目指し、設計手法に関する検討を行い、FBAR 構造の最適化について示す。

FBAR を励振するために圧電膜である $A\ell N$ の上下に電極を付加する必要があるが、その時、電極の質量付加効果により、共振周波数が低下する。このため、所望の共振周波数とするためには、 $A\ell N$ を薄くしなければならない。Mason の等価回路を用いて、共振周波数を一定にして $A\ell N$ および電極の膜厚を変化させた場合、共振周波数と反共振周波数から得られる実効的な電気機械結合係数 (k_{eff}^2) が膜厚によって異なり、ある組み合わせでピークの値を持つことが分かった。これは、電極を付加したことによる質量付加効果のために、膜中のバルク波の音速が低下したことにより、実効的な弾性定数が減少すると同時に、実効的な圧電定数が減少したためであることを等価回路シミュレーションより導き出し

た。さらに、電極膜の膜厚が薄くなった場合には、その導体損の増加に伴って Q 値が減少する。このように膜厚と k_{eff}^2 、 Q にはトレードオフ関係があることから、同一共振周波数であっても k_{eff}^2 と Q の選択が可能であり、所望の特性に合わせた共振特性が得られることを明らかにした。

また、CoventorWare™ を用いた三次元解析により、膜厚だけではなく、キャビティおよび電極の形状によって、スプリアスの発生や k_{eff}^2 について検討を行った。FBAR の小型化のためには面積をとるキャビティを小さくする必要があるが、共振部よりある程度広くとれば、スプリアスが抑制され共振特性には影響がないことが分かった。さらに、電極の形状は、対辺が非対称の形状が横方向の定在波の発生が抑えられ、このため、より高い k_{eff}^2 が得られることを明らかにした。

以上より、形状の最適化により、スプリアスの抑制、FBAR 単体の共振特性の向上が可能であることを示した。

第3章 FBAR 共振器の試作、評価

本章では、第2章で設計した FBAR 共振器の試作、実測、評価を行う。さらに、FBAR の高周波化に対応するために、MOCVD 法を用いて薄膜化した AlN および Ru 電極が高周波化に適していることを示す。

まず、FBAR 作成プロセスの見直しを行った。これは、上部電極をリフトオフ法によって作成する際に、フォトリソグラフィによる電極パターンの形成に使用する現像液 (TMAH) が AlN に接触し、AlN の表面がダメージを受けることが分かった。このため、上部電極をウェットエッチングによって作成し、その後、下部電極上の AlN のみエッチングし、コンタクトパッド部分を露出させる手法を提案した。さらに、パッド部分は、従来は共振部からストレートに伸びる形状であったものを、電極抵抗の低減のため広いパッドを確保した。これにより、5GHz 帯における共振特性改善を図り、高い Q 値を持つ FBAR を実現した。さらに、シミュレーション結果と同様に、対辺が非対称である電極形状によって得られる k_{eff}^2 は対称のものに比べて高く、この結果を用いることにより、FBAR 単体であっても帯域幅の制御が可能であることを示した。

また、FBAR の高周波化のために、AlN および電極の薄膜化を検討した。MOCVD 法を用いて成膜した AlN は、膜厚を薄くしても表面平坦性劣化の影響は小さく、半値幅は AlN の膜厚よらず良好であり、実測より、厚さが 30nm においても 1.3° であった。一般的なスパッタ法では膜厚が厚くなるにつれて配向性が良好となるが、厚さが薄い領域では配向性が悪い。これに対して、MOCVD 法を用いた AlN は薄膜化に向いていることが分かる。したがって、FBAR の高周波化のために AlN を薄膜化する際には、MOCVD 法による成膜が最適である。この時、電極として用いた Ru は、膜厚を薄くすると、

厚さ 40nm までは Ru(0002)の半値幅が 2° 程度とほぼ一定であるが、20nm まで薄くすると半値幅が 2.9° まで劣化することが分かった。Ru の配向性が良好な厚さ 40nm 程度までは、電極上に成膜した AlN(0002)の半値幅は 1.2° 程度であり、Ru 厚さ 20nm では、2.7° であった。AlN の半値幅が 3° 以下であれば FBAR を構成した際の k_{eff}^2 に影響がないため、Ru 下部電極の厚さは AlN 半値幅への影響を考慮すると、20nm まで薄膜化が可能であると言える。これらを組み合わせることによって、共振周波数は 45GHz となり、FBAR がミリ波帯のデバイスに適用できる可能性を示した。

以上より、5GHz 帯における FBAR 共振特性の改善ならびに形状効果の実証、さらに高周波化に向けた AlN および電極の薄膜化によって、FBAR を 40GHz 以上まで高周波化が可能であることを示した。

第 4 章 FBAR を用いた RF デバイスの検討

本章では、第 3 章までで試作した FBAR 共振器の RF デバイスへの応用として、5GHz 帯の FBAR フィルタおよび FBAR 発振器について検討する。

まず、FBAR フィルタは、高周波におけるカットオフ特性が良好であること、高い Q 値のため、周波数可変のための外部回路による特性劣化の影響が小さい、Si 上に 1 チップ化が可能といった特徴があり、5GHz 帯のフィルタとして最適であると言える。複数接続した FBAR 共振器を用いて、非平衡型のラダー型および平衡型のラティス型フィルタを構成した。バンドパスフィルタ特性を得るためには、それぞれの FBAR の共振周波数をずらす必要があるが、ここでは共振部の上部に Ru 膜を成膜し、その質量付加効果によって共振周波数を低下させる方法と、FBAR に外部回路を接続し、周波数を可変する方法を検討した。これらの方法を比較すると、積層膜による方法では、10nm 程度の薄い膜であっても大きな周波数低下が得られ、その特性の劣化が小さいこと、また、外部に容量を付加した方法では、10pF といった小さな容量であっても、その特性劣化が大きいことが分かった。このため、積層膜による方法では、周波数バンドの切り替えといった大きな周波数切り替えに用い、外部容量による方法では、非常に小さな容量を用いて、周波数温度補償といった周波数の微調整に有効であることを示した。

また、5GHz 帯の FBAR 発振器について検討を行った。GHz 帯 FBAR 発振器は、通倍回路が不要のため小型化に適すること、共振回路に Q 値の高い FBAR を用いることで、発振器の低位相雑音化が可能といった特徴がある。発振回路はコルピッツ型を採用し、90nm Si-CMOS プロセスにより 1 チップ化することで、極力寄生成分を排除した。FBAR の実装方法について検討を行い、スタッドバンプボンディング (SBB) 実装が寄生インダクタンスが小さいため FBAR の実装方法として適していることから、発振器 IC チップ上にフリップチップにより FBAR を実装した。共振回路に用いた FBAR は、第 3 章において試作した Q 値の高い FBAR を使用することで、5GHz 帯で安定に発振すること、さらに離調周

波数 1MHz において、 -130dBc/Hz の非常に低位相雑音の発振器を実現した。これは、従来のディスクリットによる FBAR 発振器の位相雑音に比べて、約 30dB の低減を図っており、先行文献のディスクリット BJT を用いた発振器や SiGe BiCMOS BJT を用いた発振器の位相雑音に匹敵する低位相雑音が得られている。このように、元々雑音の大きい Si-CMOS であるが、90nm といった微細化技術および Q 値の高い FBAR により実現可能となったものである。

以上より、外部回路により FBAR フィルタが周波数可変に対応可能であること、また、FBAR 発振器が 5GHz で安定に動作することを確認するとともに、90nm Si-CMOS IC により、バイポーラを用いた発振器に迫る低位相雑音を実現可能であることを示した。

第 5 章 結論

本章では、各章で得られた結果を述べるとともに、今後の展望として、GHz 帯からミリ波帯までカバーできるデバイスにより、ディペンダブル・ワイヤレス・システム用 FBAR の実現、また、FBAR デバイスが、カットオフ特性、位相特性、群遅延特性が良好であることから、限られた周波数帯域における大容量化、高速化のために多値位相変調の通信方式に対応すること、さらには、デジタル回路による周波数トリミング、可変技術を用いて、0 温度特性、中心周波数、帯域可変のデバイスに適用することによって、より高性能なデジタル・アシステッド・デバイスの実現について示した。

論文審査結果の要旨

異なる周波数帯を最適に切り替え、広域、超高速、高信頼な無線通信を可能とするディペンダブル・ワイヤレス・システムの実現のためには、RF デバイスの高性能化、高周波化が必須である。この中にあって、無線端末の小型化を可能とする弾性波を用いたデバイスは必要不可欠である。本論文では、バルク弾性波を用いた圧電薄膜共振器 (FBAR) に着目し、FBAR の高性能化、高周波化を目指すと共に、FBAR を用いた RF デバイスとして FBAR フィルタおよび FBAR 発振器の研究をまとめたものであり、全文 5 章よりなる。

第 1 章は、序論である。

第 2 章では、FBAR 設計手法に関する検討を行い、FBAR 構造の最適化について述べている。膜厚設計により、同一の共振周波数であっても電気機械結合定数 k_{eff}^2 と Q 値の選択が可能であり、所望の特性に合わせた共振特性が得られることを明らかにした。また、形状の最適化により、スプリアスの抑制、FBAR 単体の共振特性の向上が可能であることを示した。これらは、FBAR の高性能化のために極めて重要な成果である。

第 3 章では、プロセスおよび形状効果を考慮して設計した FBAR の試作について述べている。従来の FBAR に比べて、5 GHz 帯における共振特性改善、形状によって得られる k_{eff}^2 の違いにより、FBAR 単体であっても帯域幅の制御が可能であることを示した。さらに、圧電膜である AlN の膜厚を 30 nm まで薄膜化しても、AlN の c 軸半値幅が 1.3° と高配向な薄膜を得ており、電極の薄膜化と合わせて、FBAR がミリ波帯のデバイスに適用できる可能性を示した。これは、FBAR の形状効果の実証ならびに高周波化に向けた非常に有用な成果である。

第 4 章では、FBAR を用いたフィルタおよび発振器の検討について述べている。複数接続した FBAR を用いてフィルタを構成し、さらに外部回路による周波数トリミング方法を提案した。また、共振器部分に FBAR を用いた 5 GHz 帯 Si-CMOS 発振器の設計・試作を行った。その結果、離調周波数 1 MHz における位相雑音が -130 dBc/Hz である超低位相雑音発振器を実現した。これらの成果は、実用上極めて重要である。

第 5 章は、結論である。

以上要するに本論文は、FBAR の高性能化を図り共振周波数の高周波化の可能性を示し、さらに FBAR を無線端末用 RF デバイスに適用し、その有用性を示したもので、電気・通信工学の発展に寄与するところが少なくない。

よって、本論文は博士 (工学) の学位論文として合格と認める。