

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 22 日現在

機関番号：11301

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2013～2014

課題番号：25870042

研究課題名(和文)次世代通信技術構築のための超低損失弾性波デバイスの開発

研究課題名(英文)Ultra low loss acoustic wave devices for future communication systems

研究代表者

原 基揚(Hara, Motoaki)

東北大学・工学(系)研究科(研究院)・准教授

研究者番号：00417966

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：圧電薄膜共振子(FBAR)は基板上に作製可能な薄膜の体積弾性波(BAW)素子であり、水晶振動子のようなバルクのBAW素子と異なり、電極の膜厚や材質によって共振特性を制御することができる。従来のFBARの開発では、広帯域フィルタへの応用を想定し、結合係数を最大化する設計が行われるが、本研究では、低位相雑音なクロック素子の開発を想定し、Q値に特化した最適化を世界に先駆けて検討した。Q値の最大化にあたり、分布定数回路を用いた共振特性計算プログラムを独自に開発し、これにより、有限要素法と比し、幾何変数の連続的な取り扱いと、高速な計算処理および網羅的な材料の探索が可能となった。

研究成果の概要(英文)：A Thin Film Bulk Acoustic Resonator (FBAR) is a new class of acoustic devices fabricated on the substrate with thin film technologies. Characteristics of the FBAR can be determined by the thickness or material of electrodes in comparison with bulk acoustic devices such as a quartz resonator. Conventionally, the FBAR is mainly applied to the wide band filter. So maximization of the coupling coefficient is a main issue in the FBAR design. Contrary, in this study, we newly focused on maximization of the Q factor for the application of the clock device with low phase noise. To maximize the Q-factor, numerical program to calculate the resonance characteristic was originally developed based on the distributed constant equivalent circuit. Using this program, design parameters can be continuously tuned unlike conventional finite element method. Also, calculation time is much compressed, and calculation for various electrode material can be facilitated by combining with batch processing.

研究分野：マイクロデバイス

キーワード：圧電薄膜共振子 電極 薄膜

1. 研究開始当初の背景

圧電薄膜共振子(FBAR)は圧電薄膜と電極薄膜とで構成される薄膜のバルク波素子である(図1参照)。FBARは従来の表面弾性波素子と異なり、サブマイクロオーダーの電極構造が不要であり、耐電圧に優れるという特徴も持つ。また、共振周波数が、薄膜の厚さで決定されるため、露光技術に制限されず、高周波化を図ることができるという特徴も有する。これらの特徴から、FBARは近年、携帯電話の送受信信号を振り分ける分波器として広く応用されており、昨今の無線システムにおけるマルチバンド化に大きく貢献している¹⁾。

従来のFBARでは電極材料としてMoのような高い音響インピーダンスを有する金属を使用する。これは、共振状態において、電極に挟まれる圧電薄膜に応力を集中させ、高い電気機械結合係数を得るためである。高い電気機械結合係数はFBARで構成されるフィルタの広帯域化に寄与する。そのため、Mo以外にも $W^{2)}$ 、 $Ru^{3)}$ 、 $Ir^{4)}$ など、様々な高音響インピーダンス材料がFBARの電極として提案されている。しかしながら、結合係数の増幅は同時にQ値の低下を誘引するという課題を有する。

一方、FBARは周波数リファレンスや狭帯域フィルタとしての応用も期待されており、これらの応用では、高い電気機械結合係数よりも低損失であることが強く求められる。

2. 研究の目的

図2は先行検討において、音響インピーダンスの異なる3つの電極材料を用いた場合の電気機械結合係数と共振Qとを数値的に求めた結果である。ここで、圧電薄膜(AIN)、Mo、Cu、Alの音響インピーダンスの関係は $Z_{Mo} > Z_{AIN} \approx Z_{Cu} > Z_{Al}$ である。図2より、圧電薄膜(AIN)と音響インピーダンスがほぼ整合する銅電極にて、Q値が大幅に改善されることが見出された(2011年特許出願中)。本案では、上記の知見に基づき、圧電薄膜と電極との音響インピーダンスの整合を考慮した、新規の低損失FBARの構築を検討することを目的とする。

3. 研究の方法

先に示したように従来のFBARは広帯域なフィルタ素子への応用が主であり、電気機械結合係数の増大を企図して、様々な解析がなされて来た。例えば、実験的なアプローチとしては、横山等の報告が詳しい⁵⁾。また、有限要素法を用いた数値的なアプローチとしてはZhang等などの報告がある⁶⁻⁷⁾。しかし、これらの報告では、Q値の改善について、明確な言及はない。

FBARの結合係数は電極の材質と、電極膜と圧電膜との膜厚比によって変化し、解析は容易である。一方、Q値は電極の材料と膜厚比とだけで決定されず、素子の共振周波数と

静

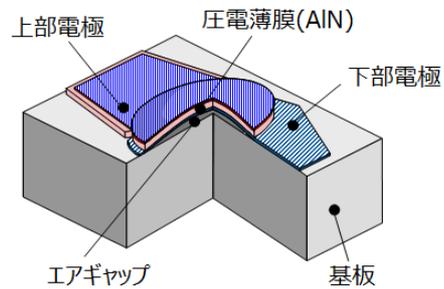


図1. FBARの代表的構成図⁷⁾

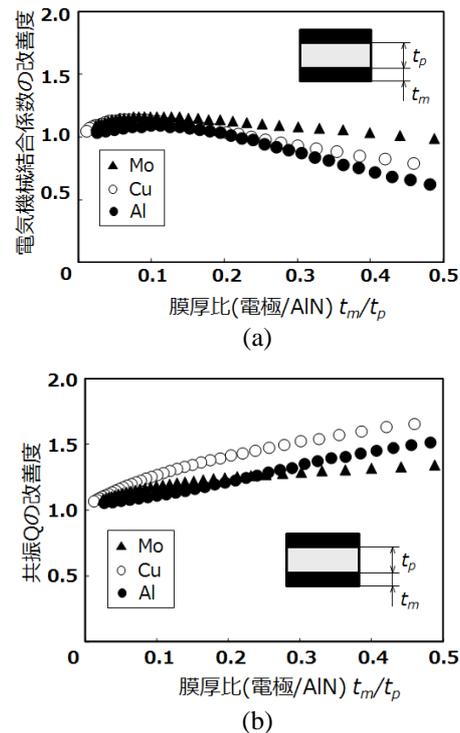


図2. 電極材料の特性に及ぼす影響⁸⁾

電容量(特性インピーダンス)とによって大きく影響を受ける。その結果、従来の実験的アプローチや有限要素法を用いた手法では明快な解析結果を提示することが困難であった。

そこで、本研究では、分布定数等価回路を用いたMasonの等価回路を利用し(図3参照)⁹⁻¹⁰⁾、独自の共振特性評価プログラムを構築することで、Q値改善の方策を明確にすることを試みた。

等価回路を利用した解析では、解析時間を大幅に圧縮することが可能となり、バッチでの処理が容易となる。また、独自のプログラムを構築することで、既存の回路シミュレータとテキストベースで連動させることが容易となり、共振特性からの特性パラメータの抽出もバッチ処理化することが可能となる。

図4は本研究において開発を行った計算プログラムの処理フローである。最初に変数の初期化を行い、圧電膜厚 t_p を設定、共振周波数が設定値(2 GHz)となるように電極膜厚 t_m をスイープする。共振特性の計算においては、

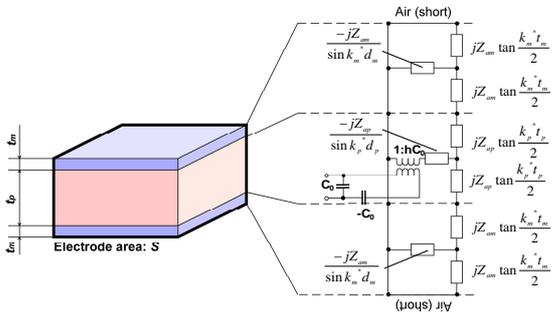


図 3. Mason の等価回路モデル

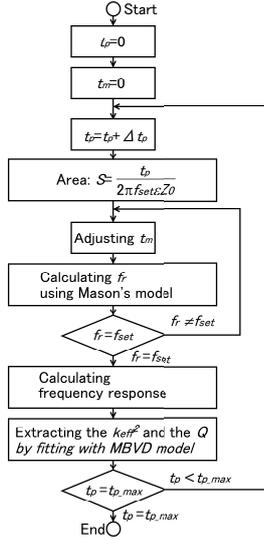
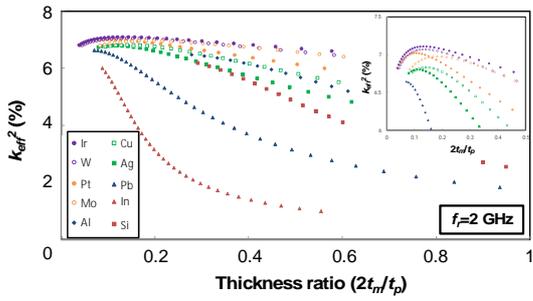
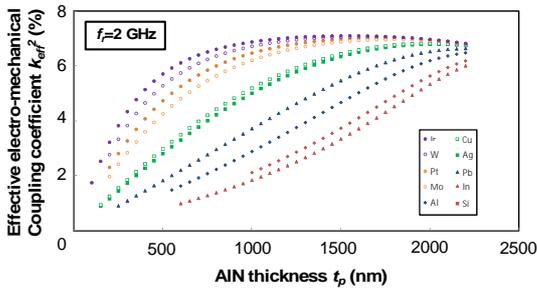


図 4. 共振特性計算フロー



(a)



(b)

図 5. 電極効果による電気機械結合係数の変化

圧電膜厚の設定値から特性インピーダンスが 50Ω となるように、電極面積を計算する。本計算フローの重要な特徴は、共振特性の出力において、共振周波数と特性インピーダンスがモデルによらず常に設定値で一定している点である。これは、メッシュサイズの拘束される従来の有限要素法では実現不可能

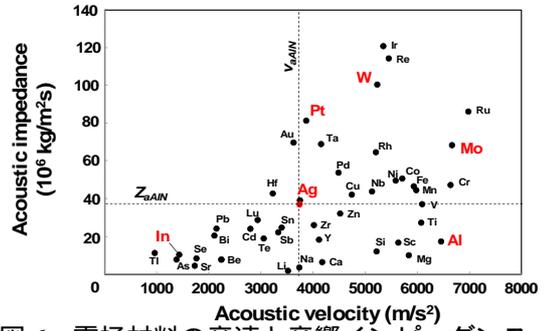


図 6. 電極材料の音速と音響インピーダンス

表 1. 解析を実施する電極材料

Material	Z_a [MPa]	v_a [m/s]
Tungsten	100.5	5224
Platinum	81.4	3862
Molybdenum	68.4	6660
Silver	39.2	3741
Aluminum	17.4	6451
Indium	10.4	1423

な特徴である。

図 5 は、本研究で作製した計算プログラムを用いて、電気機械結合係数を評価した結果である。

電極膜厚比と結合係数との関係に関する解析は Lakin 等の報告が詳しい¹¹⁻¹²⁾。図 6 の結果はこれらの結果とほぼ一致し、作製したプログラムの妥当性が確認されたと言える。

4. 研究成果

電極効果による共振特性の変化を網羅的に取り扱うため、音響インピーダンスと音速とで電極材料を整理したのが図 6 である。図 5 より、圧電薄膜として採用する AIN の音響インピーダンスと音速とを基準に評価の対象として、表 1 に示す電極材料について解析を進めた。

図 7 から図 12 は表 1 の各電極材料を用いた FBAR の共振特性の計算結果から Q 値の抽出を実施した結果である。本計算では、金属材料の減衰定数を 1000 から 5000 に変化させて計算を実施した。

本計算結果より、減衰定数が十分に小さければ、電極膜厚の増大に伴って、Q 値を増幅できることが確認された。また、Q 値の増大を電極膜厚の増大によって得るために必要な減衰定数の閾値は各電極材料によって異なっていることが確認された。

図 13 は、先の解析より得られた閾値を電極材料の音速で整理した結果である。本図より、高い Q 値を得るためには、低音速な材料を選択することによって、高 Q な共振子を得ることが容易となることが示唆される。

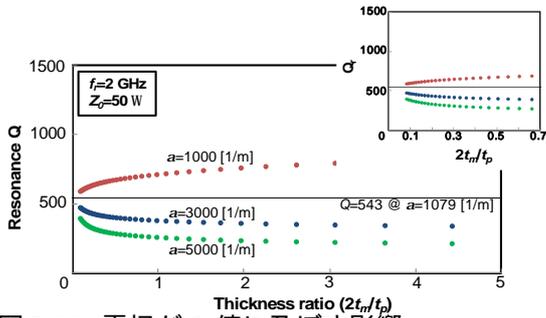


図 7. Mo 電極が Q 値に及ぼす影響

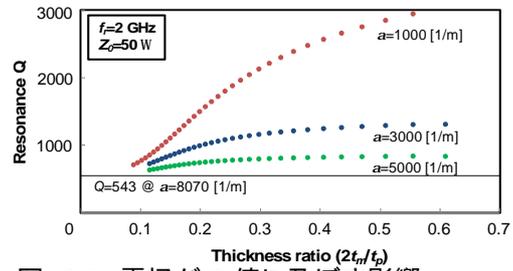


図 12. In 電極が Q 値に及ぼす影響

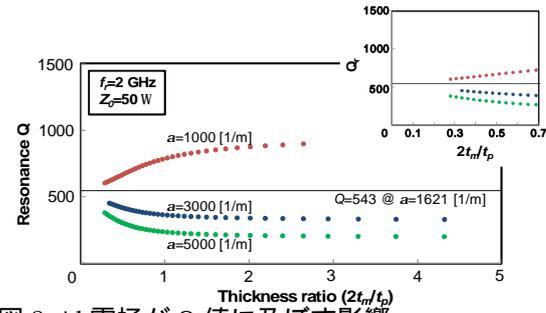


図 8. Al 電極が Q 値に及ぼす影響

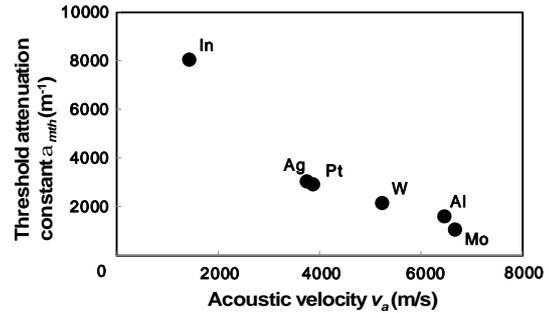


図 13. 減衰定数の閾値と音速の関係

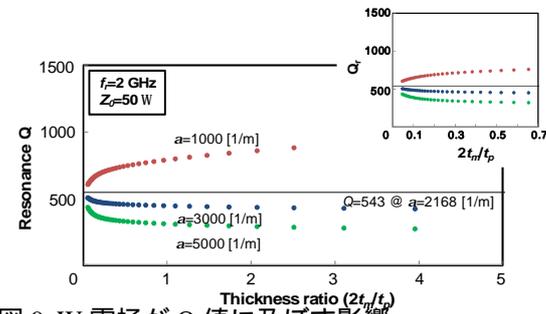


図 9. W 電極が Q 値に及ぼす影響

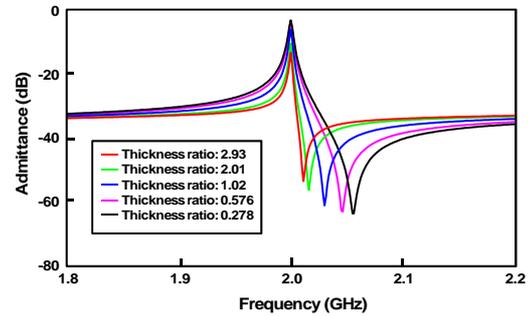


図 14. Al 電極 FBAR の共振特性

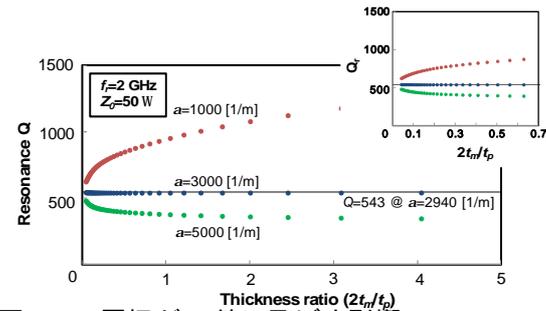


図 10. Pt 電極が Q 値に及ぼす影響

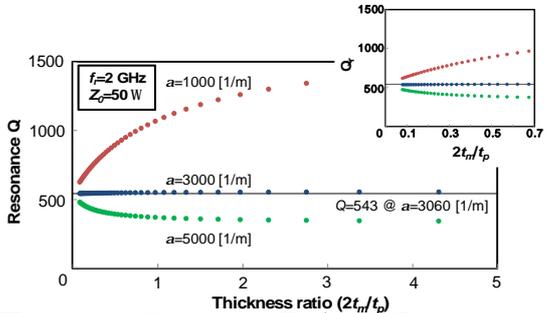


図 11. Ag 電極が Q 値に及ぼす影響

減衰定数の影響が、低音速材料において緩和されるのは、一定時間において弾性波が伝搬できる距離が低音速材料では短いためと考えられる。

共振と反共振との二重共振特性を有する弾性波素子では、Q 値と結合係数との間にトレードオフの関係性を有する。図 14 は Al 電極の膜厚比を変化させたときの共振特性を示したものである。電極膜厚の増大にともなって、反共振点が共振点に近接していく様子が確認され、それに伴って、共振ピークおよび反共振ピークの先鋭度が改善されていく様子が確認される。ここで、共振点と反共振点でのアドミタンス比に着目すると、アドミタンス比は結合係数の低下に伴って低下していくことが分かる。すなわち、結合係数の抑制による Q 値の改善は単純な損失の抑制効果として取り扱うことが困難であり、結合係数の抑制がフィルタ素子の急峻性改善に必ずしも直結しないのはそのためと考えられる¹³⁻¹⁴⁾。

本研究は電極効果による Q 値の改善を共振器をベースとしてタイミングデバイスの特性改善に活用することを目的としている。

そこで、アドミタンス比の劣化を伴う電極効果による Q 値改善が位相雑音に及ぼす影響を回路シミュレータを用いて検討した。

図 15 は検討に使用した発振回路の回路図である。本評価では変形コルピッツ回路を利用している。ここで、図中 FBAR と図示されたサブ回路には図 14 で示した共振特性を S パラメータに変換して数値データとして読み込んでいる。

図 16 は電極膜厚比を変化させたときの位相ノイズの変化を示したものである。本図より、位相ノイズの抑制はアドミタンス比に依存せず、Q 値の改善によって得られることが確認された。

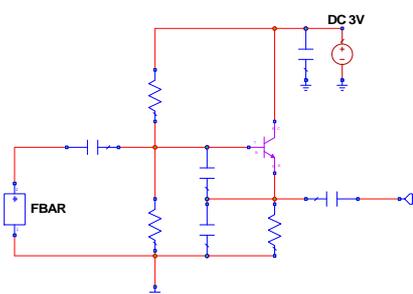


図 15. 発振器の回路トポロジ

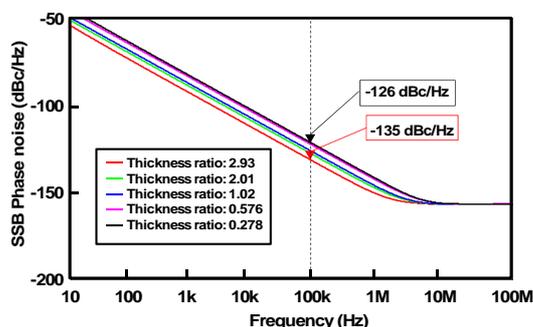


図 16. 膜厚比と位相雑音との関係

参考文献

- 1) R. Ruby, et. al., Electronics Letters, 35, 10, pp.794-795 (1999)
- 2) P. Bradley, et. al., Proc. IEEE Ultrasonics Symposium 2007, pp.1144-1147
- 3) T. Yokoyama, et. al., Proc. IEEE Ultrasonics Symposium 2004, pp.429-432
- 4) E. Iborra, et. al., Proc. IEEE Ultrasonic Symposium 2008, pp.2189-2192
- 5) T. Yokoyama, et. al., Proc. IEEE Ultrason. Symp., pp.429-432, 2004.
- 6) T. Zhang et. al., J. Acoust. Soc. Am., 122, p.1646-1651, 2007.
- 7) R. Ohara et. al., Proc. IEEE Ultrasonic Symposium, pp.1657-1660, 2007
- 8) Patent: P2012-244616A
- 9) W. P. Mason, Piezoelectric crystal and their application to ultrasonics. Princeton, N. J.: Van Nostrand, 1950.
- 10) J. F. Rosenbaum, Bulk acoustic wave theory and devices. Norwood, MA: Artech House,

Inc., 1988.

- 11) K. M. Lakin et. al., Proc. IEEE Ultrason. Symp., pp.827-831, 2001.
- 12) J. Kaikkila, Proc. IEEE Ultrason. Symp., pp.120-129, 2007.
- 13) Patent: P5441095
- 14) S. Inoue et. al., IEEE Trans. Ultrason. Ferroelect. Freq. Contr, Vol. 54, No. 9, pp.1882-1887, 2007

5. 主な発表論文等

(研究代表者, 研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕(計 0 件)

〔学会発表〕(計 5 件)

原 基揚, 桑野 博喜, タイミングデバイス用圧電薄膜共振子における電極材料による Q 値改善の検討, 第 6 回 マイクロ・ナノ工学シンポジウム, 2014 年 10 月 21 日, くにびきメッセ(島根)

今野 智一, 包 青忠, 原 基揚, 桑野 博喜, 300 MHz 帯表面弾性波共振器を利用した発振器型ひずみセンサ, 2014 年度機械学会年次大会, 2014 年 10 月 8 日, 東京電機大学 (東京)

M. Hara, H. Kuwano, Q-enhancement with electrode materials in the FBAR for timing devices, IEEE International Ultrasonic Symposium 2014, 5 Sept 2014, Chicago (USA)

Q. Wang, H. Oguchi, M. Hara, H. Kuwano, Investigation of dominant factors to control c-axis tilt angle of AlN thin films for efficient energy harvesting, IEEE Micro Electro Mechanical Systems Conference 2014, 28 Jan 2014, San Francisco (USA)

T. Konno, M. Hara, H. Kuwano, Oscillator-based strain gauges employing surface acoustic wave resonators for wireless sensor network, IEEE International Ultrasonic Symposium 2013, 25 July 2013, Prague (Czech Republic)

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

出願状況 (計 0 件)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

原 基揚(Hara, Motoaki)

東北大学・大学院工学研究科・准教授
研究者番号: 00417966