

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 5 月 19 日現在

機関番号：12501

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2011～2013

課題番号：23560387

研究課題名(和文)ダイヤモンドを使ったRF-SAWフィルタの研究

研究課題名(英文)Study on a RF-SAW filter made of diamond

研究代表者

藤井 知 (FUJII, SATOSHI)

千葉大学・産学連携・知的財産機構・特任教授

研究者番号：30598933

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,000,000円、(間接経費) 1,200,000円

研究成果の概要(和文)：ダイヤモンドはその物質的な性質からGHz領域における高周波SAWが実現出来る材料として知られる。しかしながら、多結晶ダイヤモンド薄膜を使ったSAWフィルタでは、水晶やLiNbO3の材料に比べ、ダイヤモンドSAWの伝搬損失が大きく、RF-SAWフィルタでは大きな問題となる。そこで、単結晶ダイヤモンドを用いた1ポートSAW共振子の試作を続けたところ、5GHzにてQが8346と極めて大きな値を得ることが出来、伝搬損失も波長当たり0.004dBとすることが出来た。また、 fQ 積も 10^{13} と十分大きな値を示した。これらの値はSHF帯におけるRF-SAWフィルタの実現の可能性を示している。

研究成果の概要(英文)：Diamond has the highest known SAW phase velocity, sufficient for applications in the gigahertz range. In addition, diamond is also free from rare earth and rare metal materials. Although numerous studies have demonstrated SAW devices on polycrystalline diamond thin films, all of these devices have a much larger propagation loss than single-crystal materials such as LiNbO3. Hence, we fabricated and characterized one-port SAW resonators on single-crystal diamond to identify and minimize sources of propagation loss. A series of one-port resonators were fabricated, and their characteristics were measured. The best performing device using a diamond single crystal exhibited a resonance frequency of 5.2 GHz, and the equivalent circuit model gave a quality factor of 8346. Thus, the propagation loss was found to be only 0.004 dB/wavelength. The result shows that single-crystal diamond SAW resonators have great potential for use in RF-filters as sustainable SAW devices.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：電気電子工学・電子デバイス・電子機器

キーワード：弾性表面波 ダイヤモンド

1. 研究開始当初の背景

全ての材料の中、ダイヤモンドは最も大きいヤング率を持つことが知られている。ダイヤモンド使い、弾性表面波素子を形成すると、従来、水晶や LiNbO_3 などの材料に比較し、容易に高周波 SAW フィルタが実現する。ダイヤモンドを使った SAW デバイスの開発は、東北大山之内らが初めて発表し、その後、申請者らにより、実用的なダイヤモンド SAW フィルタが完成した。シリコン基板上に、主に弾性波の媒体となるダイヤモンド薄膜を形成し、その上に圧電体を形成する。その圧電体に電気信号を与えるための電極パターンを作製する。最上層膜は温度変化に対し、ダイヤモンドや圧電体と逆の弾性定数を持つ酸化シリコンを温度補償膜として形成する。これまで得られた特徴は、動作周波数は 10GHz まで可能であり、かつ、水晶 SAW フィルタより優れた温度特性を持つことが示された。直近の研究成果では、圧電体薄膜として窒化アルミニウムを用いると、5GHz 以上にフィルタ特性が著しく向上し、かつ温度変化に対し水晶 SAW フィルタより小さい周波数偏差を実現することが出来、ダイヤモンド SAW フィルタの GHz 帯共振子のポテンシャルを示すことが出来た。しかしながら、高周波 SAW 共振子の開発が進んでも、次世代無線通信システム全体の革新に繋がらない。そこで、ダイヤモンドの高い耐電力性を活かした急峻かつ広い通過帯域幅を持つ SAW フィルタの研究を行う。実用的な特性が実現すると、基地局内の RF フィルタの小型化が出来、ユビキタスネットワークの構築に貢献出来る。

2. 研究の目的

ダイヤモンド SAW フィルタの研究は、気相合成法を用いて形成された多結晶ダイヤモンドを中心に研究がされてきた。そのため、多結晶ダイヤモンドに起因する、圧電体の材料の制約や、その配向性の限界、欠陥が多いことによる材料自身の損失など、様々な要因により、SAW フィルタの特性の限界があった。単結晶ダイヤモンドの大型基板の可能性が見えてきたことを踏まえ、ダイヤモンドを用いた SAW フィルタの可能性の限界を示したい。具体的にはダイヤモンド SAW の低ロス及び高 Q 化、10W 以上の耐電力性、電気機械結合係数が 9% 以上と大きい圧電体薄膜のダイヤモンド上への形成を目的とし、RF-SAW フィルタの研究を進める。

3. 研究の方法

研究期間の前半は、単結晶ダイヤモンド基板に、AIN など圧電薄膜を形成し SAW フィルタの設計と試作を行い、高い Q が得られることを示す。また、GHz 帯における耐電力評価装置を構築し、試作したダイヤモンド SAW の耐電力性評価を行う。研究期間の後半は、ターゲット材料が 2 つ以上配置出来るようス

パッタ装置の構築を行い、単結晶ダイヤモンド上へ $\text{Sc}_x\text{Al}_{1-x}\text{N}$ などの圧電体薄膜の形成を試み、広帯域フィルタの試作及び耐電力性の試験を行う。

(1) 低挿入損失及び広帯域 SAW フィルタの構造と電極設計

有限要素法を用い、電極及び圧電体薄膜 (AIN) 膜厚の最適化を行い、電気機械結合係数が大きくなる膜厚の組み合わせ (構造最適化) を見出す。その後、挿入損失が小さかつ通過帯域幅が大きくなるように、弾性表面波のモード結合理論を元に電極設計を行う。また、大きい電機械結合係数を持つ圧電体薄膜を用いた設計も行う。

(2) 単結晶ダイヤモンドを用いた SAW の試作
単結晶ダイヤモンド上に、前述の構造及び電極設計に基づき、圧電薄膜 (AIN) を形成し、電極を作製し、SAW フィルタを試作する。比較のため、多結晶ダイヤモンド基板を用いた SAW フィルタも、試作する。

(3) 耐電力評価設備の構築と評価

10W 以上の信号出力を持つ評価システムを構築し、ネットワークアナライザにより、SAW フィルタの劣化をチェックする。同時に、サーモビュアを使い、温度分布を測定し、耐電力のメカニズムを探る。

(4) 電気機械結合係数の大きい薄膜材料のダイヤモンド上への形成と SAW フィルタ試作評価

ECR スパッタ等の装置を 2 種類のターゲットが配置出来るよう設備の改造を行う。ダイヤモンド上へ、 $\text{Sc}_x\text{Al}_{1-x}\text{N}$ や LiNbO_3 などの圧電薄膜の形成を検討する。基板は、ヘテロエピタキシャル成長しやすい (111) 面を中心とした単結晶ダイヤモンドを用い、オフ角も含め成長条件を実験により見出す。

(5) 研究のまとめと評価

一連の試作と評価結果から、ダイヤモンドの高い熱伝導性や高い弾性定数を活かした、10W 以上の大きな耐電力性を持つ広帯域 SAW フィルタ (RF-SAW フィルタ) の実現性について議論を行い、ダイヤモンド SAW の工学的な特徴を明らかにし、本研究を統括する。

4. 研究成果

AIN/ダイヤモンド構造における SAW 伝搬特性の解析を行った。その解析結果を、図 1 と図 2 に示す。図 1 は位相速度 (V_p)、図 2 は電気機械結合係数 (K^2) である。膜厚 (H) は波長 (λ) により規格化した H/λ を用いた。この解析結果から、膜厚が 0.35 ~ 0.60 の範囲における 2nd モードのセザワ波は、他のモードに比べ、速度分散性が小さく、 K^2 が大きい特徴を持つことが分かる。本研究では、膜厚 0.35 を選び、1 ポート共振子の作製を行った。1 ポート SAW 共振子の電極設計は、SAW を励振させる IDT 電極の両端に、SAW を閉じ込める反射器が配置される。IDT や反射器のように、伝搬路に周期的な摂動を与えるとブラッグ反射が生じ、伝搬定数が複素数となる

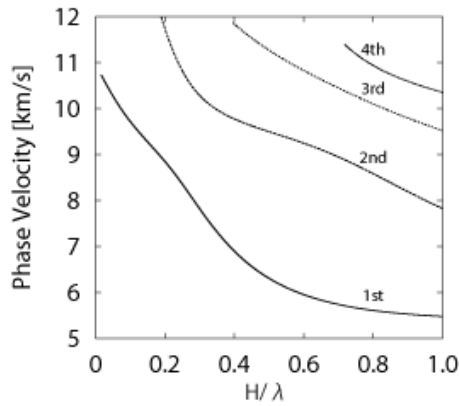


図1 位相速度 (V_p)

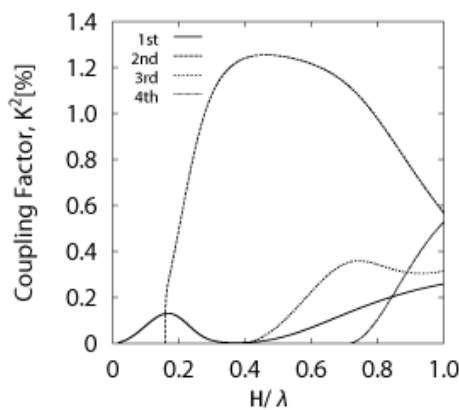


図2 電気機械結合係数 (K^2)

阻止域が形成される。この阻止域では、SAWの振幅が指数関数的に減衰するため、反射器として利用できる。

IDTと反射器が等周期の場合、阻止域下端より若干低い周波数で共振するため、反射器も阻止域から外れ、反射量が低下する。一方、IDT部の阻止域端が反射器の阻止域の中心にくるように反射器周期を調整すれば、良好な閉じ込めが実現できる。ただし、高次モードが発生しやすくなるため、一般にはIDTと反射器の周期に大きな差を与えられない。本論文では、反射器周期をIDT周期の-1.5%とした。

単結晶ダイヤモンドを用いAIN/Diamond構造を形成し、1ポートSAW共振子を作製した。また、プラズマCVD法による大型単結晶ダイヤモンドや多結晶ダイヤモンドを比較のために作製した。その最も特性の良かった共振子は高圧合成法により得られた1b単結晶ダイヤモンドを使ったものであり、そのアドミタンス特性を図3に示す。基板材料の比較を表1に示す。この測定データに対してButterworth-Van Dyke等価回路を適用し、フィッティングすることにより、共振子の Q などを求めた。共振子の周波数 f_r はコンダクタンスのピークとし、伝搬損失は電極抵抗を除いた Q より算出した。

表1 今回の試作した1ポート共振子の結果

基板材料	f_r (GHz)	Q	α (dB/ λ)
微粒多結晶 ダイヤモンド	5.20	2,220	0.015
単結晶 ダイヤモンド Ib (110)	5.27	2,954	0.012
単結晶 ダイヤモンド Ib (100)	5.23	8,346	0.004
単結晶ダイ ヤモンド CVD(100)	5.23	5,500	0.005

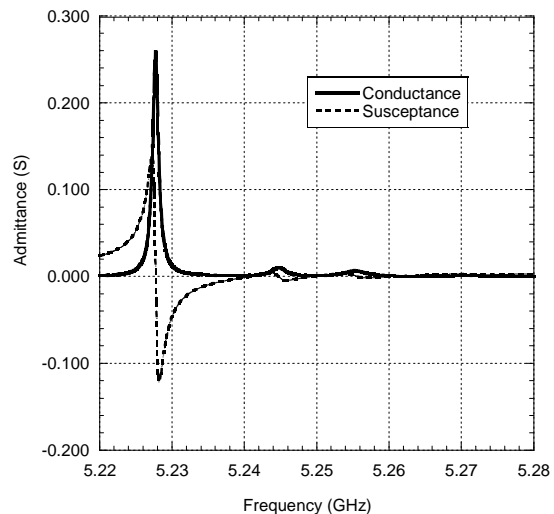


図3 単結晶ダイヤモンドのアドミタンス特性

表面状態の良い高圧高温合成法で作製した(100)面の単結晶ダイヤモンドを用いることで Q は8,346となり、 $f \cdot Q$ 積は 4.4×10^{13} に達した。この値はサファイア基板を利用した高次モードバルク振動子で実現されている 10^{14} には届かないものの、スプリアスは少なく、SAW共振子としては非常に大きな値である。また、CVD法によって合成された単結晶ダイヤモンドを使った素子においても、 Q は、5,500となり、高圧高温合成法とほぼ遜色ない結果となった。この差は電極形成プロセスなどの差と考えている。

本論文では、1ポートSAW共振子の基板に高圧高温合成法及びプラズマCVD法によって作製された単結晶ダイヤモンドを用い、多結晶ダイヤモンドを用いた場合との比較を行った。基板上にAINをc軸優先配向させることができ、結晶性に殆ど差がない膜ができた。ただし、表面の平坦性はダイヤモンドの研磨状態により今のところ、(100)面のダイヤモ

ンド表面が最も平坦であり、同時に、AIN も平坦な膜が得られている。次に、IDT/AIN/diamond 構造の1ポート共振子の試作および、測定を行った。多結晶ダイヤモンド基板に代わり、単結晶ダイヤモンド基板を用いることで、伝搬損失は 0.037 dB/λ から 0.004dB/λ にまで低減させることができた。その差分は 0.033 dB/λ であり、結晶粒界での散乱損と表面の平坦性がデバイス性能に大きく影響することが明らかになった。また、 Q は 8,346 となり、 $f \cdot Q$ 積は 4.4×10^{13} に達した。同時に、連携研究者らにより、 $Sc_xAl_{1-x}N$ の圧電薄膜を用いたダイヤモンドを使った男性表面波素子は、電気機械結合係数が 6% 以上持つことが示された。耐電力評価については、素子作製と評価がクリーンルームではないところで行ったため、パーティクルの影響が大きく十分な測定が出来なかった。しかし、伝搬損失が大きく低減したことにより、ダイヤモンドを使った SAW デバイスが 5GHz 領域における高安定発振器用共振子や RF-SAW フィルタとしてのポテンシャルを持つことが示された。今後、さらに、RF-SAW フィルタの可能性について研究を進めていく。

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 3件)

1. S. Fujii, T. Odawara, H. Yamada, T. Omori, K. Hashimoto, H. Torii, H. Umezawa, and S. Shikata, "Low propagation loss in a one-port SAW resonator fabricated on single-crystal diamond for super high frequency applications", IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, vol.60, pp.986-992, 2013 [査読有]
2. S. Fujii, and C. Jian, IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, vol.59, pp.2758-2764, 2012[査読有]
3. S. Fujii, "High frequency surface acoustic wave filter based on diamond thin film", Phys. Status Solidi A 208, No. 5, pp.1072-1077, 2011[査読有]

[学会発表](計 6件)

1. "Low propagation loss in a one-port resonator fabricated on single-crystal diamond", S. Fujii, H. Yamada, T. Omori, K. Hashimoto, H. Torii, H. Umezawa and S. Shikata, IEEE International Microwave Symposium, TU1D-6-1~3, 2013[米国、シアトル] [査読有]
2. S. Fujii, H. Yamada, T. Omori, K. Hashimoto, H. Torii, H. Umezawa, and S. Shikata, "High Frequency SAW Devices Using a Single Crystal Diamond," Proc.

2012 Int ' l Symp. on Acoustic Wave Devices for Future Mobile Comm. Systems, pp.119-124, 2012[千葉市]

3. S. Fujii, H. Yamada, T. Omori, K. Hashimoto, H. Torii, H. Umezawa and S. Shikata, "Study on a one-port SAW resonator using a single crystal diamond", International Union of Material Research Societies- International Conference on Electronic Materials, Yokohama, 2012[横浜市] [査読有]

4. S. Fujii, T. Odawara, T. Omori, K. Hashimoto, H. Torii, H. Umezawa, and S. Shikata, IEEE Ultrasonic Symposium, 2011[査読有]

5. 藤井知、小田原達矢、山田晴也、大森達也、橋本研也、鳥居博典、梅澤仁、鹿田真一、"単結晶ダイヤモンドを使った1ポート SAW 共振子"、日本学術振興会 弾性波素子技術第150委員会 第121回研究会資料[東京]

6. 山田晴也、藤井知、小田原達矢、大森達也、橋本研也、鳥居博典、梅澤仁 鹿田真一、"単結晶ダイヤモンドを用いた高周波 SAW 共振子"、ダイヤモンドシンポジウム、2011年[つくば市]

[図書](計 0件)

[産業財産権]
出願状況(計 0件)

取得状況(計 0件)

[その他]
なし

6. 研究組織

(1)研究代表者

藤井 知 (FUJII SATOSHI)

千葉大学 産学連携・知的財産機構

特任教授 研究者番号：30598933

(2)連携研究者

千葉大学 工学研究科・教授

橋本 研也 (HASHIMOTO KENYA)

研究者番号：90134353

(3)連携研究者

千葉大学 工学研究科・助教

大森 達也 (OMORI TATSUYA)

研究者番号：60302527