

氏 名	ふじい さとし 藤 井 知
学位(専攻分野)	博 士 (工 学)
学 位 記 番 号	博 甲 第 4 5 5 号
学位授与の日付	平成 19 年 3 月 26 日
学位授与の要件	学位規則第 3 条第 3 項該当
研 究 科 ・ 専 攻	工芸科学研究科 材料科学専攻
学 位 論 文 題 目	多結晶ダイヤモンドを使った高周波 SAW フィルタおよび周辺モジュールの開発 (主査)
審 査 委 員	教授 播磨 弘 教授 秋山正博 教授 林 康明

論文内容の要旨

通信技術の高速・大容量化に応えるため、より高いレベルの信号伝送技術の確立が求められてきている。そのため、通信機器の大容量・小型化と高速・高周波化の市場要求は非常に高い。エラーの少ない高品質の通信を行うため、今後開発される通信機器では、高周波、かつ低位相ノイズの基準発振器の開発が必要不可欠となっている。このような観点から本論文では、弾性表面波 (SAW) デバイスの高周波化を図ることを目的として、ダイヤモンド薄膜の高い位相速度を利用した新しい SAW デバイスの考案・作製を行い、そのデバイスを用いた高周波発振器モジュール等の開発、さらにそれを実用に供するまでに至った一連の研究の成果をまとめた。本論文は以下の 5 つの章から構成される：

第一章では、光通信、無線通信及び発振器分野で進む最近の状況、また、その分野の技術革新を支える高周波数デバイスの典型として、表面弾性波 (surface acoustic wave: SAW) デバイス材料について論じ、本研究を開始するに至った背景を概観している。

第二章では、ダイヤモンド膜上に成長させた酸化亜鉛、すなわち ZnO/ダイヤモンド構造、及び更に酸化珪素膜を成長させた SiO₂/ZnO/ダイヤモンド構造の圧電性多層膜構造における SAW 理論を論じた。特に、櫛型電極 (inter digital transducer : IDT) を介した SiO₂/ZnO/IDT/ZnO/ダイヤモンド構造について、その詳細な特性を Campbell・Jones 手法や有限要素法 (FEM) により等価回路パラメータの定数として求め、SAW デバイスの開発設計を行っている。また、詳細な実験データと比較することにより、比較・検証を行った。その結果、多結晶ダイヤモンドを使った場合、速度分散性と温度特性が周波数、つまり、波長によって異なることを見出し、波長に対する多結晶ダイヤモンド膜の弾性定数や温度係数が異なること、それがデバイス特性に大きく影響することを明らかにしている。また、耐電力を有する要求に応えるため、電極上に圧電薄膜を形成した構造を作製し、それによって 25dBm 以上の耐電力を得ている。

第三章では、SiO₂/ZnO/IDT/ZnO/ダイヤモンド構造に基づく高周波 SAW デバイスを作製するため、用いられる薄膜材料とその膜質最適化の手法について述べている。ダイヤモンドウエハはフィラメント CVD 法と機械研磨を使い、電子部品材料としてはじめて実用に耐えうるダイヤモンド膜品質が実現した経緯について述べた。その中で、ラマン散乱分光と電子線後方散乱回折 (electron backscattering diffraction: EBSD) による詳細な成長材料の分析を行い、対応するデバイス特性との比較をもとに、SAW 基板に適した伝搬損失の小さいダイヤモンド薄膜の特徴について明らかになった点を述べた。更にそのような低伝播損失がダイヤモンド薄膜で実現する機構について論じた。すなわち、小さいサイズで分布が狭く欠陥の多い結晶粒が多数存在し、カーボンクラスターが粒界に存在し、さらに同じ方位の結晶粒を持っている場合に比較的

低伝播損失が得られることを明らかにした。また、酸化亜鉛 ZnO 薄膜については、バイアスパッタ法と 2 段階成長法について述べ、x 線回折測定による結晶 c 軸ロッキングカーブの測定から、 σ 値で 0.6~0.7 の高品質な ZnO 薄膜を多結晶ダイヤモンド上に作製することに成功した。さらに、酸化珪素 SiO₂ 膜については、RF (radio frequency) マグネトロンスパッタリング中の酸素濃度を 33%から 90%とすることで、欠陥が少なく熱的に安定した SiO₂ 薄膜が得られることを明らかにした。

第四章では、前章で述べた材料開発を元に 1.5~3.4GHz 帯のダイヤモンド SAW デバイスを用いた高周波発振器の作成と、それを使った位相同期回路 (phase locked loop: PLL) モジュールの開発について述べている。開発した電圧可変 SAW 発振回路 (Voltage Controlled SAW Oscillator: VCSO) の構成は、分布定数回路基板、及び集中定数回路基板を使い、SAW 共振子、高周波増幅器、出力分岐回路、位相シフタ、さらに発振周波数を微調整するための周波数調整器の各ブロックを最適化して低位相ノイズ化を図っている。その結果、小型化、低位相ノイズ、低消費電力などの特長を持つ極めて優れた VCSO 素子の開発に成功している。さらに、GHz 帯 PLL モジュールについても検討を行い、温度安定性と低位相ノイズをもつ PLL モジュール開発にも成功した。

第五章では、以上の結果を要約している。すなわち設計、材料、モジュール開発の点から、高周波弾性波デバイスとして、多結晶ダイヤモンドを利用した SAW デバイスの有用性について明らかにした。

論文審査の結果の要旨

申請者は、今後の高速通信の進展に欠かせない高周波弾性波素子開発に多結晶ダイヤモンド薄膜を利用し、その有用性について探索、及び実証した。とりわけ、弾性波デバイスとして新規材料であるダイヤモンドを用いて表面弾性波 (SAW) 素子を設計、ダイヤモンド、ZnO、SiO₂ のそれぞれの材料の観点から求められる特性を明らかにした。

論文において、申請者は、有限要素法による詳細な計算結果を行い、弾性定数や温度係数の波長依存があることを実験データの比較から見出している。また、ダイヤモンド SAW デバイスは、SiO₂ 材料に勝る高音速材料であることを明らかにしている。これは学術的にも興味深い指摘であり、今後のダイヤモンド SAW デバイスの進展に期待されるものである。

ダイヤモンド薄膜では、はじめて実用レベルの電子デバイスへの利用を実現させ、SAW デバイスに必要な低伝播損失実現を図るため、ラマン分光や電子線後方散乱回折 EBSD を使い、多結晶ダイヤモンドの材料特性を明らかにした。その成果は学術的観点のみならず、産業界の点からも意義深い。また、実際にダイヤモンド SAW デバイスを使って、GHz 帯での発振器や PLL モジュールの開発を行い、その優れた特性を実証した。特に、高周波領域における位相雑音が小さいことが示され、これが高速信号伝送に欠かせない素子として期待されるものであることが示された。

本論文は、以下に示すように、審査を経て掲載され、申請者が筆頭筆者である 3 篇の論文と投稿準備中の 1 篇の論文、さらに、共著論文 2 編をもとに構成されている。

(1) 河野秀逸、藤井 知、船坂 司、「低挿入損失 3 GHz 帯ダイヤモンド SAW 共振子の開発」、第 26 回超音波エレクトロニクス基礎と応用に関するシンポジウム講演論文集 26 号 63 頁~64 頁 (横浜 2005 年)

(2) 河野秀逸、梅田隆俊、藤井 知、「ダイヤモンド SAW の耐電力向上」、第 27 回超音波エレクトロニクス基礎と応用に関するシンポジウム講演論文集 26 号 63 頁~64 頁 (名古屋 2006 年)

(3) S. Fujii, S. Kawano, and T. Umeda, "Improved power durability of diamond SAW resonators", Japanese Journal of Applied Physics、投稿準備中

(4) S. Fujii, S. Shikata, T. Uemura, H. Nakahata, and H. Harima, "Effect of Crystalline

Quality of Diamond Film to the Propagation Loss of Surface Acoustic Wave Devices” , IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, vol.52, pp. 1817-1822, 2005

(5) S. Fujii, Y. Takada, and H. Harima, “Low Phase Noise VCSO with Diamond SAW Resonators”, IEEE Frequency Control Symposium, pp.499-502, 2005

(6) S. Fujii, Y. Takada, and M. Aoki, “Development of PLL Module with Diamond SAW Resonator” , IEEE Frequency Control Symposium, IEEE Frequency Control Symposium, 2006, pp. 237-240

以上、本論文では、電子デバイス応用がこれまで困難であったダイヤモンドを用いた新規弾性波デバイスと応用モジュールをはじめて実現していて、学術的価値が高いことを各審査委員が認めた。