The University of Osaka
Institutional Knowledge Archive

Title	高周波ダイヤモンド弾性表面波デバイスに関する研究
Author(s)	鹿田, 真一
Citation	大阪大学, 2004, 博士論文
Version Type	VoR
URL	https://hdl.handle.net/11094/2837
rights	
Note	

The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA

https://ir.library.osaka-u.ac.jp/

The University of Osaka

氏　　名　鹿田真一（しかた しんいち）

博士の専攻分野の名称　博　士（工　学）

学位記番号　第　18970　号

学位授与年月日　平成16年7月8日

学位授与の要件　学位規則第4条第2項該当

学位論文名　**高周波ダイヤモンド弾性表面波デバイスに関する研究**

論文審査委員　（主査）
教　授　杉野　隆

（副査）
教　授　佐々木孝友　　教　授　伊藤　利道　　教　授　斗内　政吉

論文内容の要旨

本研究では、弾性表面波デバイスの高周波化を目的に、ダイヤモンド薄膜の高い位相速度を利用する新しいデバイスの検討を行い、設計からプロセス開発を実施し、実用に至った研究の成果をまとめている。

第1章は序論であり、本論文に関する弾性表面波デバイスおよびそれを用いる光通信および無線通信分野について概観し、本研究で取り上げるダイヤモンドを高周波弾性表面波（SAW）デバイスに用いる研究の意義と目的を明らかにしている。

第2章では、シミュレーションにより、ダイヤモンド上に圧電薄膜を積層して構成される弾性表面波デバイスの特性を予測する。弾性表面波の伝搬解析に広く用いられている従来のCAMPMBELLによる手法を積層構造を有するダイヤモンド弾性表面波デバイスに用いる事が出来るように境界条件を与え、計算機シミュレーションを実施している。Si上に成膜したダイヤモンドを基板として、その上にc軸配向のZnO、AlN、$LiTaO_3$及び$LiNbO_3$を形成する場合、またさらにその上に温度補償するSiO_2膜を積層する構造について検討している。その結果、狭帯域用デバイスとしてSiO_2/ZnO/ダイヤモンド構造が従来の水晶に較べて約3倍の高周波化が可能な事や温度係数が零になる条件が存在する事を計算によって求め、水晶の高周波版としてきわめて有力であることを見出している。また併せて、広帯域用としてSiO_2/$LiNbO_3$/ダイヤモンドが従来材料の約2倍の高周波が可能なこと、また従来材料では得られない大きな電気機械結合係数を有し、かつ零温度係数も併せ持ち、高周波広帯域デバイスに適することを見出している。

第3章では、ダイヤモンドSAWデバイス実現のための実験研究について検討している。具体的にはSiウェハ上に、フィラメントCVD法を用いて多結晶ダイヤモンド薄膜の合成を行い、供給電力や圧力などの合成条件を検討して反りの極めて小さいウェハを作製することに成功している。またダイヤモンド結晶粒径の制御により、弾性表面波の伝搬損失が小さい3インチのダイヤモンドウェハを実現している。本研究ではデバイスとしては狭帯域用材料系を選択し、SiO_2/ZnO/ダイヤモンド構造のデバイス作製を実施している。c軸配向ZnO成膜には、独自の2段階スパッタリング成長方式などを研究し、良好なZnOの作製を達成している。また線幅制御の厳しいSAWデバイス用に、リソグラフィやドライエッチングなどの検討を行い、SiO_2/ZnO/ダイヤモンド構造のデバイスプロセスを完成している。

第4章では、実際に2.5から5GHzまでの周波数のダイヤモンドSAWデバイスを作製している。位相速度はシミュレーションにより予測される値から1％以内の誤差で一致し、推定通りの高周波動作が得られることを明らかにしている。また温度補償のためにZnO/ダイヤモンド構造の上にSiO_2を積層し、シミュレーションに比べて実際には30％膜厚を増やすことで1次温度係数を零にすることができることを実験的に見出している。2次係数の最適化を行

い、従来の水晶の 1/2 以下の温度変動に抑えることが出来るデバイスを実現している。さらにデバイスの耐電力性について測定を行い、従来の材料を1桁以上凌駕することを見出している。この原因はダイヤモンドの高い弾性定数と熱伝導にあると推定している。以上、従来の水晶デバイスでは不可能な高い周波数での動作を実現し、それに加えて温度特性、耐電力性でも大きく凌駕する事を見出している。

第5章では、実際に高速光通信用フィルタ、高周波無線基地局用フィルタ及び発振器用共振器デバイスの作製を行い実用に供する事により、高周波通信の進展に大きく寄与している。まず光通信用の受信信号再生のタイミング抽出フィルタへの応用として、2ポート共振器の設計により、スプリアスを抑圧させた 2.488 GHz の狭帯域フィルタを実現しており、水晶に比べて温度変動、遅延変動が半分以下と小さく低損失のフィルタ特性を達成し、これを 2.488 Gbps の光通信用受信モジュールに適応している。次に、無線通信用狭帯域フィルタへの適応のため WCDMA 基地局間通信用パイロット信号抽出フィルタを作製している。特にダイヤモンド SAW デバイスの特徴を充分に活かし、WCDMA の高電力投入に耐えるデバイスを作製している。最後に、発振器用共振器への適応について示している。従来の低周波信号の逓倍による位相雑音などの増加や、逓倍回路そのものによる電力増大などを抜本解決する直接発振方式として、ダイヤモンド SAW を用いて高周波共振器を作製することに成功している。以上の成果は、いずれも通信システムの実機での採用に結び付く成果となり、この技術を元に量産するに至っており、事業化まで達成している。

第6章では、以上の研究成果のまとめを行い、結論としている。

論文審査の結果の要旨

現在、通信の高速、大容量化によって、フィルタや発振器の高周波化が進展しており、特にその中でも弾性表面波（SAW）デバイスは広く利用されるようになっている。従来は狭帯域用材料として水晶が、また広帯域用材料として $LiTaO_3$ が用いられている。これらの材料は位相速度が 3000～5000 m/s 程度であり、微細化の限界まで利用されて高周波化が実現されているが、フィルタで 2 GHz 帯、発振器で 1 GHz 帯が限界である。また特性上も様々な問題を抱えている。このため高周波用の材料が求められており、位相速度の高いサファイア上に ZnO などの圧電薄膜を積層したデバイスなどが実現されているが、位相速度はせいぜい 6000 m/s 程度である。そのためフィルタでは小型高性能の SAW フィルタではなく、セラミックフィルタや誘電体フィルタが高周波で用いられており、発振器では低周波から回路で逓倍して高周波を実現している。

本論文では、ダイヤモンドが物質中最も高い弾性定数を有することに着目し、圧電薄膜と積層することによって、従来材料系では不可能な高周波動作を実現することを目的としている。ダイヤモンドと圧電材料とを組合わせた場合に得られる弾性表面波の特性をシミュレーションして材料系を提案している。またそれを実現するためのダイヤモンドの合成、圧電薄膜として選択した ZnO の成膜及びデバイスを実現するためのプロセスを検討し、実際に 2.5 から 5 GHz までの高周波 SAW デバイスを試作して、従来 SAW デバイスを周波数だけでなく特性面でも凌駕する優れたデバイスを実現している。さらに光通信や無線通信の幹線系などで実用となる SAW デバイスの開発経緯についてまとめている。その主な成果を以下に要約する。

(1)ダイヤモンドに4種類の圧電薄膜と温度補償用の薄膜を積層した構造についてシミュレーションを行い、弾性表面波デバイス特性を決定する3つの因子、即ち位相速度、電気機械結合係数、温度係数を求めて、狭帯域用と広帯域用に適する新しい材料系を提案している。具体的には狭帯域用には SiO_2/ZnO/ダイヤモンドであり、広帯域用には SiO_2/$LiNbO_3$/ダイヤモンド系であるが、いずれも従来の2倍以上の高周波化が可能であることや零温度係数を有することを示唆している。

(2)シミュレーションで提案している狭帯域用の SiO_2/ZnO/ダイヤモンド構造を実現するため、実験的検討を行っている。ダイヤモンドは熱膨張係数が小さく、かつ高温で合成するため大型化が困難な材料であるが、独自のフィラメントを用いた手法を工夫することで3インチの大口径ウェハを実現している。かつ結晶粒径を小さくしてデバイスの波長と干渉することを避けて SAW の伝搬損失を低減するという独自のアイデアにより、デバイス用途に合致した材料を開発している。また ZnO に関しても、独自の二段階成長法により c 軸配向性に優れシミュレーション通りの電気

機械結合係数を有し、かつ伝搬損失の少ない材料を開発しており、目的に叶った材料を得ることに成功している。

(3)上記の材料を用いて SiO_2/ZnO/ダイヤモンド構造による高周波 SAW デバイスを試作し、その特性を検証している。まず周波数に関しては計算通り水晶の２～３倍の高周波化が可能で、基本波で 5 GHz まで可能なことを実証している。次に温度特性については零温度係数を確認する以外に、計算ではまだ不可能な２次温度係数に着目し実験的に最適化することによって、水晶の半分以下の－0.017 ppm/deg2 を得ることに成功している。そしてダイヤモンドの弾性率や熱伝導率が高いことに注目し、耐電力性に優れるのではないかとの予想に基づき計測を行い、同一線幅デバイスで従来材料より８倍の電力に耐えられることを示している。以上実験的に、従来材料ではなしえない重要な特性を見出すことに成功している。

(4)優れた特性が得られることのわかった SiO_2/ZnO/ダイヤモンド SAW デバイスを狭帯域の実用デバイスへ適応している。まず光通信については昨今の光通信網の根幹を形成する 2.5 Gbps システムの受信用に、信号復元に利用する高性能タイミング抽出フィルタを開発し、単に高周波だけでなく損失、温度変動など優れた特性を存分に活かしたデバイスを達成している。無線では携帯電話基地局用のフィルタを作っているが、これも実験的に見出されている耐電力性を十二分に活かしたものである。また最後の発振器用の共振器は、材料面から低伝搬損失を達成している成果を十二分に活かしたもので、発振回路に組み入れるために低損失化や高 Q 化を実現して初めて 2～3 GHz の高周波を直接発振することに成功している。

以上のように、本論文ではダイヤモンドの高い弾性定数を利用して、理論及び実験的に高周波弾性表面波デバイスを実現している。シミュレーションにより狭帯域、広帯域用に高周波用の材料系を提案し、材料探索面で限界に来ている弾性表面波デバイス分野にとって学術的価値が高いものである。また独自の方法によって理論通りの位相速度や圧電性能などの材料特性を有するダイヤモンド及び ZnO の実現に世界で初めて成功していること、SAW デバイス特有の要求に合わせてダイヤモンドの微粒化などの開発を行っていることなど材料面での功績も大きい。そして実際に 5 GHz という高周波デバイスを実現し、温度特性や耐電力性に優れることを実験的に見出し、本分野のデバイス工学へ大きく貢献している。さらに光通信及び無線通信におけるフィルタや高周波発振器用共振器など、真の実用デバイスを開発し、実際のシステムの中に貢献していることは工業的見地からも価値があるものと認められる。なお、ダイヤモンド SAW デバイスは世界初のものであり、ダイヤモンドの世界において電子部品分野への初の適応例でもあり、本研究成果は高く評価される。今後さらに進展する高周波の光及び無線分野において、フィルタや発振器として進展に貢献するところが大きい。よって本論文は博士論文として価値あるものと認める。