

令和 6 年 5 月 29 日現在

機関番号：34315

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2021～2023

課題番号：21K04857

研究課題名（和文）機械構造全体が空乏層からなるシリコンpnダイオード振動子センサの研究

研究課題名（英文）Silicon p-n diode resonant sensors consisting of depletion layers in a whole structure

研究代表者

鈴木 健一郎（SUZUKI, KENICHIRO）

立命館大学・理工学部・教授

研究者番号：70388122

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）：シリコン振動子の検出方法として利用するpnダイオード静電容量検出センサは、ビルトインポテンシャルを利用できるために振動子の逆バイアス電圧が不要になることから、低電圧駆動および小電力デバイスとして利用できる。本研究では、この振動子センサの外部入出力を無線で行うことを可能とすることを目指して、空乏層からなるシリコンpnダイオード振動子の高周波特性の定量的解明を主な目的とした。この結果、静電容量方式のために周波数が高くなると信号の遺漏が増大するという欠点が深刻化することが明らかになり、この欠点を補うために微小な信号電流を検出するためのいくつかのセンサ回路を開発して比較検討評価を行った。

研究成果の学術的意義や社会的意義

近年、水晶振動子マイクロバランズ（QCM）が化学・バイオセンサ応用で注目されている。水晶は機械振動数の温度依存性が小さいために広く用いられているが、振動子センサの薄型化が限界に近付いているため、さらなる高感度化が困難になりつつある。一方、シリコン振動子センサにおいては、真空を利用できない環境下を考慮すること、振動子自身の機械的溫度特性を抑えることが課題であり、この課題を解決するために新たな原理を導入することが必須である。我々は空乏層が機械特性の温度変動を抑えることができる特長をもつことを以前の研究で確認したが、これを利用したセンサを開発することに挑戦することにした。

研究成果の概要（英文）：Because the p-n diode resonant devices eliminate bias voltage owing to the built-in potential, they have features of low driving voltage and low energy consumption. In order to make use of them in the Wi-Fi frequency range, our goal of this research is to quantitatively analyze the resonators in the high frequency.

It has been clarified that electrical signal leakage increases with the increase in the frequency. We have developed several detection circuits and compared with them.

研究分野：MEMS

キーワード：MEMS 共振器 温度変動 pn ダイオード Wi-Fi 空乏層

1. 研究開始当初の背景

近年、質量、粘度、温度、湿度の計測を行う化学・バイオセンサの普及に伴って、動作範囲が広く使いやすい水晶振動子マイクロバランス (QCM) がセンサ素子として広く利用されている。QCM はガスセンサとしての用途も近年、急速に拡大しており、ますます注目されている。QCM は検出質量変化 Δm に伴って振動周波数が $\Delta f \propto f_0^n \Delta m$ ($n=2$ (気体), 1.5 (液体)) のように変化する。この周波数変化は振動周波数 f_0 に強く依存するため、センサ感度を上げるには、振動周波数を増大させることが重要である。水晶振動子では薄型化によって振動周波数を増大させることが行われているが、振動子の薄型化にともなって、170 MHz 振動子に 200 nm の金電極を設けると振動数変化が半減したり、配線により振動子の Q 値が低減したりする、等の電極・配線の悪影響が深刻になっている²⁾。もちろん、薄型化された水晶振動子は機械的に取り扱うことが非常に困難である。このような課題から、現状 0.17 mm 厚の 10 MHz 以下の振動子が普及している。電極・配線の影響を除くために、最近、無線で振動子に電力を送受信する無電極振動子が研究され、試作した 170 MHz の QCM (9.7 μm 厚) は 5 MHz の QCM に比べて約 1000 倍の周波数変化を示すことが報告された²⁾。しかし、無線使用による信号強度の低減が著しく、高級な高周波回路が必要であるという課題があった。

他方、エレクトロニクス分野でシリコン振動子の研究が活発になされ、水晶発振器の置き換えが着実なビジネスとして進んでいる。シリコンは、圧電材料ではないため、静電気力を直接に利用して振動子を駆動させることが必要である。このため、狭い空間ギャップの形成がなされるが、このギャップに異物が混入するとデバイスが動作しなくなるので、シリコン振動子を化学・バイオセンサとして利用することは困難であった。一方、pn ダイオードの空乏層を利用したシリコン pn ダイオード振動子は、このような空間ギャップを必要としない。pn ダイオード振動子は、われわれのグループが近年積極的に行った研究によって、他の振動子とは著しく異なる特徴をもつことが明らかになった³⁾。特に、a) 不純物拡散配線の利用により金属電極が不要、b) 振動子との直接的な電気配線が利用できるため無線技術が不要、c) 二次元平面の小型化によって GHz 帯にまで高周波化が可能、d) ゼロバイアス電圧においてもビルトインポテンシャルによって振動子がバイアスされるので電気回路の著しい省電力化が実現できる、等の特長は振動子センサへの応用を大いに期待できる要因となると考えられる。

2. 研究の目的

我々は、上記水晶振動子マイクロバランス (QCM) の課題を解決するために新たな原理をもつ QCM デバイスの研究を開始することにした。水晶が振動子材料で最も頻繁に使用される理由は、結晶軸の AT カット面を利用した厚みすべり振動モードを利用すると振動数の温度依存性を極めて小さく抑制できるからである。一方、シリコン振動子は周波数が温度に大きく依存するため、温度補償が必要である。我々は先にシリコン発振器の温度依存性を抑制するために電圧制御オシレータ (VCO) を内蔵したシリコン発振器の研究を行ったが、発振器応用では振動子を高真空に置くことができることからこの補償方法により非常な成功を得ることができた⁴⁾。しかし、振動子センサ応用では真空環境を利用することができないので、この補償方法が使用できない。我々は pn ダイオードシリコン共振器の研究から空乏層領域のシリコンの機械特性が温度にほとんど依存しないことに気がついた⁵⁾。この特徴を利用すると温度補償不要な振動子センサを実現することが可能になると期待できる。振動子単体の信号強度を水晶とシリコンで比較すると、pn ダイオードの電気機械変換係数が圧電材料のそれに比べて小さいために通常シリコン共振器の出力はかなり小さいという課題がある。しかし、電気機械変換係数は構造寸法に依存しており、pn ダイオード共振器では小型化により信号強度を相対的に著しく増大させることができる (ナノ寸法においてはついに水晶をはるかに超えると予想される)。なお、シリコンは水晶と比べて加工方法とアセンブリの観点から小型化に適しており、振動周波数が高くなるに従ってデバイスの取り扱いが相対的に容易になることは明らかである。

一方、シリコン振動子センサの利用においては、真空を利用できない環境下を考慮することに加えて、振動子自身の機械的溫度特性を低く抑えることが課題である。この課題の解決のために我々が先に発見した知見を利用したデバイスを研究することにした。本研究においては、ほぼ構造全体が空乏層からなる (厚さ 2 μm 程度) 小型のシリコン振動子からなるセンシング要素を (MEMS 技術を利用した) 流路の中に形成した構造をもつセンサデバイスの開発に挑戦することにした。この開発に関係して種々の課題が考えられるが、本研究では、特に振動子センサの外部入出力を無線で行う方式を実現することを目標に、空乏層からなるシリコン pn ダイオード振動子の高周波特性を定量的に明らかにすることを主な目的とした。

3. 研究の方法

我々の以前の実験によると、シリコン材料は、不純物濃度を大きくすると共振器の周波数温度特性を低く抑える傾向があることが示された。同様の結果はドイツの研究機関からも報告され

ている⁶⁾。これは、温度変動によって半導体材料のキャリア電流が運ぶ電気エネルギーが変化し、この変化が機械エネルギーを変化させるために機械振動特性が変化するということが生じるが、縮退したボロンはキャリアを増大させることから温度変動によるキャリア電流の変化を相対的に減殺する効果があるとして説明できる。この原理に従うならば、空乏層においては、高濃度ボロン拡散と反対に元来キャリア電流が小さいので温度変動を抑制することが起こると期待できる。我々はこれを確かめるために試作したpnダイオード共振器の逆バイアス電圧を変化(即ち、空乏層の厚さを変化)させたときの周波数温度変動を測定し、予想通りに周波数温度変動が抑制されることを確かめた⁵⁾。過去に空乏層が周波数の温度特性に影響を与える可能性があることを米国の研究機関が予想として報告したことがあるが、空乏層を変化させるという直接的な手法ではなかった。振動センサ応用においては、この空乏層を利用するというアイデアは今後、中核技術になると考えられる。

このようにしてシリコン振動子の電気検出方法としてpnダイオード静電容量の原理を利用することができることが示されたが、このpnダイオード静電容量検出センサは、ビルトインポテンシャルの利用により振動子の逆バイアス電圧が不要になるため、低電圧駆動および小電力デバイスに適しているという他に大変興味深い特徴をもっていることがわかった。他方、静電容量方式の採用は寄生容量が大きいため高周波信号が遺漏しやすいという課題がある。本研究では、センシング要素およびその高周波電気回路の基礎実験およびシミュレーションによりセンサを特徴づける基本的なパラメータを試作したデバイスから抽出することにした。また、いくつかの異なる構成を比較検討して将来の最適設計のための指針を得ることにした。

4. 研究成果

今回この新規デバイスの基本特性を定量的にかつ詳細に解析することができた。また、(以前はセンシング要素だけの評価であったのに対して)振動デバイス自身の評価からデバイスの温度変動が大変小さいことを確認することができた。これらの結果は本研究のデバイスが実際の利用に大いに役立つものになることを示している。一方、このデバイスの高周波特性が、周波数が高くなると信号の遺漏が増大するという欠点が深刻化することが定量的に明らかになった。この欠点を補うために微小な信号電流を検出するためのセンサ回路のいくつかについて検出回路の試作を行い、その高周波特性の評価を行った。これらの結果を比較検討して今後の最適設計のための指針とすることができた。

参考文献

- 1) A. Alassi, M. Benammar, and D. Brett, *Sensors* 2017, 17, 2799; doi:10.3390/s17122799.
- 2) 荻博次, 電子情報通信学会 基礎・境界ソサイエティ Vol. 11, No. 3, 180-5 (2018).
- 3) F. Miyazaki, H. Tanigawa, T. Furutsuka, and K. Suzuki, *Japanese Journal of Applied Physics*, Vol. 57, pp.107201: 1-16, 2018.
- 4) K. Kawakami, S. Kaneuchi, H. Tanigawa, and K. Suzuki, *J. Micromech. Microeng.*, Vol. 29, 125007, 2019.
- 5) Y. Nakai, K. Kanaya, H. Tanigawa, and K. Suzuki, *Japanese Journal of Applied Physics*, Vol. 57, pp.017201: 1-9, 2018.
- 6) A. Jaakola, M. Prunnila, T. Pensala, J. Dekker, and P. Pekko, *IEEE Trans. UFFC*, vol. 61, No. 7, pp.1063, 2014; 8) Csavinszky P. and Einspruch N. G., *Phys. Rev.*, 132, 2434-40 (1963).

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計0件

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
--	---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------