

令和 5 年 5 月 29 日現在

機関番号：11301

研究種目：挑戦的研究（萌芽）

研究期間：2021～2022

課題番号：21K18666

研究課題名（和文）複数種ドーピングによる複合振動シリコンMEMSの温度補正

研究課題名（英文）Temperature Compensation of Silicon MEMS Resonators by Multiple Doping

研究代表者

田中 秀治（Tanaka, Shuji）

東北大学・工学研究科・教授

研究者番号：00312611

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 5,000,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、Si共振子内に複数の異なるドーピングを施して、より高い設計自由度で温度補償MEMS共振子を実現する技術を開発した。まず、ドーピング条件による周波数温度特性をシミュレーションする方法を構築した。次に、曲げ領域とねじり領域を有するカンチレバー共振子をケーススタディとして、各領域に異なるドーピングを施して周波数温度特性を改善できることを示した。また、シミュレーション結果に基づいてMEMS共振子を試作し、その測定結果とシミュレーション結果がおおよそ一致することを確認し、シミュレーション方法の有効性を実証した。さらに、スピノンドーパントを用いて局所的に高濃度ドーピングする方法も開発した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

近年、広いセンシングレンジと高分解能を両立するために、周波数変調（FM）方式のMEMSセンサが研究されている。このようなセンサでは、温度による周波数変化がバイアスの発生やスケールファクタの変化に直結するため、周波数温度特性の改善が重要である。これまで高濃度ドーピングによるSi共振子の温度補正技術が使われていたが、これが有効である共振子構造は限られていた。本研究では、複数の異なるドーピング条件をSi共振子に適用することによって、より高い自由度で周波数補償MEMS共振子を実現できることを示した。本研究成果はFM方式のMEMSセンサの高性能化に利用でき、Society 5.0の発展に貢献しうる。

研究成果の概要（英文）：In this study, we expanded the temperature compensation technology for MEMS resonators to enhance design flexibility. This was accomplished by employing multiple doping conditions for a Si resonant body. Firstly, we developed a method to simulate the temperature characteristic of frequency (TCF) for Si resonators under different doping conditions. Next, by considering a cantilever-type resonator with bending and twisting regions, we demonstrated that the TCF can be minimized by applying distinct doping conditions to each region. Additionally, we fabricated MEMS resonators based on the simulation results and observed that the measured and simulated results were in approximate agreement. This confirmed the validity of the simulation method developed in this study. Furthermore, a local heavy doping method using a spin-on dopant was developed.

研究分野：MEMS、センサ

キーワード：MEMS 共振子 周波数温度特性 ドーピング

1. 研究開始当初の背景

Si に高濃度ドーピングを施すと、弾性スティフネステンソルの各要素の温度係数が変化することが知られている。この性質を利用して、特定不純物濃度の Si ウェハ上に特定構造の MEMS を形成し、その周波数温度依存性を小さくする技術は、Si タイミング共振子に用いられている。他にも、正の周波数温度係数 (TCF) を有する SiO₂ を用いて、Si の負の TCF を打ち消す温度補正技術が知られているが、SiO₂ の機械的損失が比較的大きいため、これを用いると Q 値が低下するという問題がある。

前者のドーピングによる温度補正技術では、あるドーピング条件の Si ウェハを準備すれば、それを用いて様々な MEMS 共振子の温度補正ができるわけではない。この方法論は限られた構造・モードの共振子でしかうまく働かず、たとえば、特定構造の Lamé モード共振子はその典型例である。一方、温度補正が期待される MEMS には、周波数変調 (FM) 方式の慣性センサや圧力センサがあり、より多様な Si 共振子に適用できる周波数温度補正の方法論が求められている。そこで、Si 共振子に複数の異なるドーピング領域を設ければ、より自由度の高い温度補正ができるはずであるという仮定をたて、本研究でこの仮定の検証を行うこととした。

2. 研究の目的

ドーピング条件による MEMS 共振子の温度特性をシミュレーションする方法を構築し、これを用いて様々なドーピング条件の MEMS 共振子の TCF を計算する。これによって、複数の異なる不純物領域を有する MEMS 共振子の温度特性の振る舞いを把握する。また、MEMS 共振子に複数の異なるドーピングを施す方法を開発する。さらに、シミュレーション結果の有効性を、MEMS 共振子の試作と評価によって確認する。これらをもって、ドーピングによる MEMS 共振子の温度補正技術の適用範囲を拡大することが、本研究の目的である。

3. 研究の方法

(1) シミュレーション方法の構築

Si のスティフネステンソル $\{c_{ij}\}$ は温度依存性を有し、それは不純物の種類と濃度に依存する。 $\{c_{ij}\}$ の温度依存性は、様々な Si 共振子の周波数温度特性を測定し、それをシミュレーション結果と照らし合わせることで求められており、これまでにいくつかの論文報告がある。これらの論文をサーベイし、ドーピング条件毎に $\{c_{ij}\}$ の温度依存性を以下の温度 T [°C] に関する 2 次式で表した。

$$c_{ij} = c_{ij}^0 \{1 + a_{ij}(T - 25) + b_{ij}(T - 25)^2\}$$

ここで c_{ij}^0 は 25°C のときのスティフネステンソル、 a_{ij} と b_{ij} はそれぞれ 1 次と 2 次の温度係数である。この式を用いて、 T をパラメータにして有限要素法 (FEM) によって各温度の共振周波数を求めるようにプログラミングすれば、MEMS 共振子の温度係数が求められる。

(2) 複数の異なるドーピング領域を有するデバイスの検討

カンチレバーの曲げ振動では主に 1 軸の引っ張り歪が生じ、梁のねじり振動では主にせん断歪が生じる。これらは異なる周波数温度特性を示す。両方が複合した振動では、2 つの周波数温度特性の中間のような周波数温度特性が現れると考えられる。後述するように、室温付近で、(010) 方向の梁のねじり振動は正の TCF を示すが、(010) 方向のカンチレバーの曲げ振動は n 型ヘビードープの条件で正の TCF を示す。

このことを踏まえれば、曲げとねじりの複合振動では中間的な周波数温度特性が得られ、TCF が小さくできると期待される。図 1 に示すような Si 振動子を考えると、これは全体としては曲げ振動をするが、支持部付近ではねじり振動を生じる。ここで、曲げ振動領域とねじり振動領域に異なるドーピングを施せば、この共振子の周波数温度特性はその条件によって変化すると考えられる。この仮定に基づき、前述のシミュレーション方法によって複数種の異なるドーピングを施したときの効果を検証した。

(3) デバイスの試作・測定によるシミュレーションの有効性の確認

上述の方法によって設計した MEMS 共振子を試作し、その周波数温度特性を測定した。これをシミュレーション結果と比較し、シミュレーション方法の有効性を確認した。MEMS 共振子の周波数温度特性を測定するために、図 2 に示すセットアップを構築した。セラミックパッケージ上に MEMS 共振子と半導体温度センサを近接させて実装し、これをペルチェ素子によって温度制御できるようにした。そして、空気によるダンピングを低減するため、これらを真空チャンバー内に設置した。

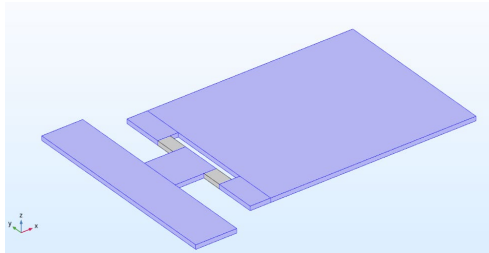


図1 複合振動カンチレバー共振子の構造
(手前が固定部)

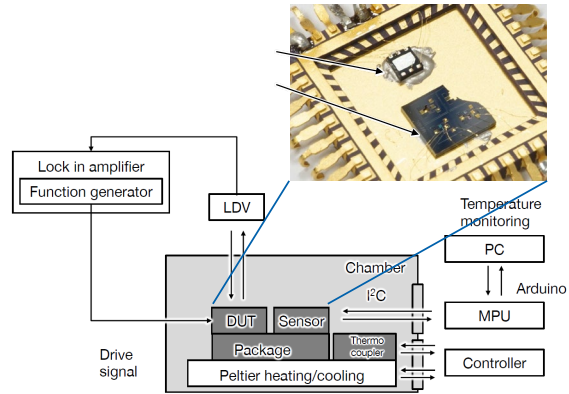


図2 周波数温度特性の測定セットアップ

(4) 複数の異なるドーピングを施す方法の開発

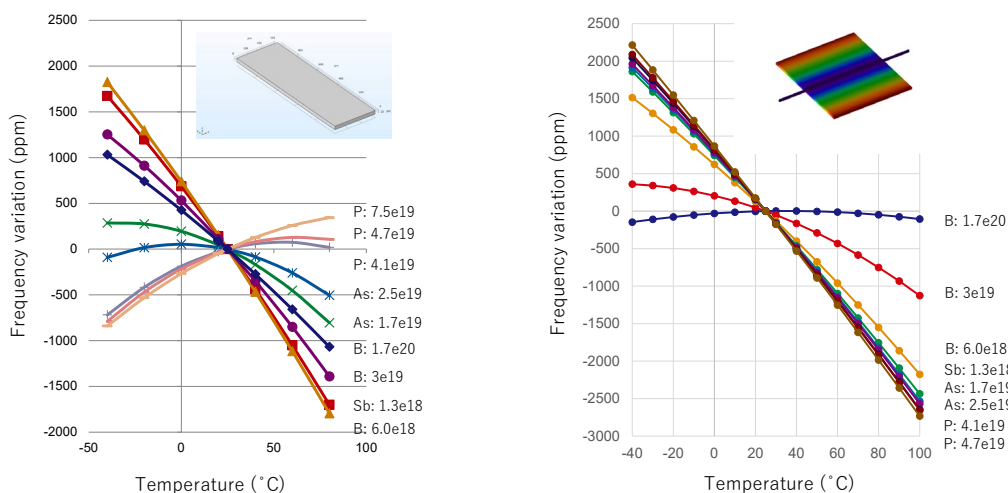
局所的なドーピングの方法としては、フォトレジスト等をマスクにしたイオン注入、 SiO_2 をマスクにした気相拡散、 SiO_2 をマスクにした固相拡散などがある。周波数温度補正を行うためには、高濃度に不純物を導入しなくてはならないことから、本研究では3番目の方法を採用した。固相拡散では、液状のスピンドーパントを用いてSiの表面にドーパントが含まれるガラス層を付け、その後、小形横型炉を用いて酸化雰囲気中で熱処理を施す。今回、使用したスピンドーパントはボロンを含むFILMTRONICS社のB200である。不純物分布の評価には広がり抵抗測定法(SRA)を用いた。

4. 研究成果

(1) シミュレーション方法の構築

図3に計算結果の例を示す。ここでは不純物の種類と濃度を变化させて、(010)方向のカンチレバーの曲げ振動、および(010)方向の梁のねじり振動の周波数温度特性を計算した。カンチレバーの曲げ振動(図3(a))については、n型、および比較的low濃度のp型では、室温付近で負のTCFを示す。一方、リンを $4 \times 10^{19} / \text{cm}^3$ 程度以上、ドーピングした場合には、TCFは正になる。ただし、リンの濃度を調整するだけでは、 $-40 \sim 80^\circ\text{C}$ で数百ppm以下の周波数変化に抑えることは難しい。

梁のねじり振動(図3(b))については、室温付近で基本的にTCFは負になる。p型へビードープにする程、TCFの絶対値は小さくなり、ボロンを $10^{20} / \text{cm}^2$ と固溶限界付近まで高濃度にドーピングすれば、1次のTCFは0に近づく。このとき、 $-40 \sim 80^\circ\text{C}$ の周波数変化は145ppmと小さいが、2次の周波数温度特性は残るのでTCFは0にはならない。



(a) カンチレバー共振子

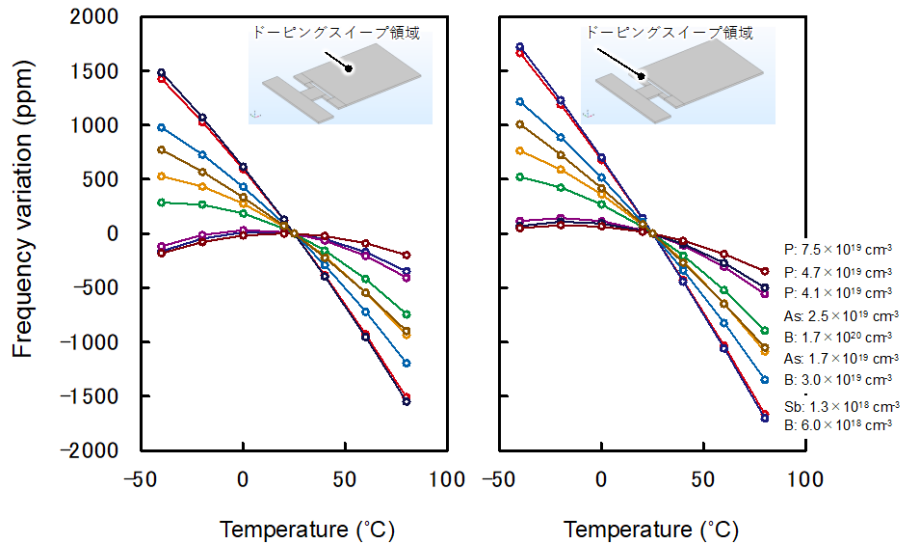
(b) ねじり梁共振子

図3 周波数温度特性のシミュレーション結果

(2) 複数の異なるドーピング領域を有するデバイスの検討

図1に示したSi共振子の曲げ領域(青色部)の不純物の種類と濃度を变化させ、一方、ねじり領域(灰色部)のドーピング条件をボロン濃度 $3 \times 10^{19} / \text{cm}^3$ に固定した。この条件で周波数温度特性をシミュレーションした結果を図4(a)に示す。また、ねじり領域の不純物の種類と濃度を变化させ、一方、曲げ領域のドーピング条件をボロン濃度 $3 \times 10^{19} / \text{cm}^3$ に固定した場合の結果

を図4 (b)に示す。これらの結果から、曲げ領域のドーピング条件をリン濃度 $7.5 \times 10^{19} / \text{cm}^3$ 、ねじり領域のそれをボロン濃度 $3 \times 10^{19} / \text{cm}^3$ にした場合、周波数温度変化が最も小さくなり、図5に示すように $-40 \sim 80^\circ\text{C}$ で約200 ppmになる。なお、後述する方法で局所ドーピングを施した場合、ドーパントは基板表面から数 μm 以下の浅い領域に存在し、その濃度は深くなると相補誤差関数分布またはガウス分布（ドライブインした場合）に従って急激に小さくなる。ただし、振動による歪の大きいのは表面付近であるため、このシミュレーション結果は実際のデバイスでも、ある程度、成り立つと考えられる。このように、同一デバイスで複数の異なるドーピングを施すことによって、より自由度の高い周波数温度補正ができることを実証した。



(a) 曲げ領域の不純物を変化 (b) ねじり領域の不純物を変化
図4 複数種のドーピングを施したカンチレバー共振子の周波数温度特性

(3) デバイスの試作・測定によるシミュレーションの有効性の確認

図1に示した構成のSi共振子を駆動するため、静電櫛歯アクチュエータ、ボンディングパッドなどを付加し、図5に示すMEMS共振子を試作した。SOI基板の $10 \mu\text{m}$ 厚のデバイス層に共振子構造を作り込み、その後、裏面からハンドル層をドライエッチングし、最後にBOX層を蒸気フッ酸によってエッチングした。使用したSOI基板のハンドル層のドーピング条件は、①リンドーピング・抵抗率 $0.001 \sim 0.005 \Omega\text{cm}$ 、および②リンドーピング・抵抗率 $0.001 \sim 0.0015 \Omega\text{cm}$ である。ここでは、後述する方法で局所ドーピングをしていないが、周波数温度変化が極小になるように、カンチレバーの長手方向を(110)方向に調整した。

図6に測定した周波数温度特性を、シミュレーション結果と合わせて示す。抵抗率から判断して、シミュレーション結果とおおよそ合致する結果が得られた。このことから、本研究で構築したシミュレーション方法の有効性が確認された。

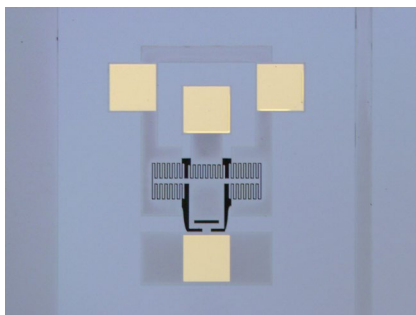


図5 試作したMEMS共振子

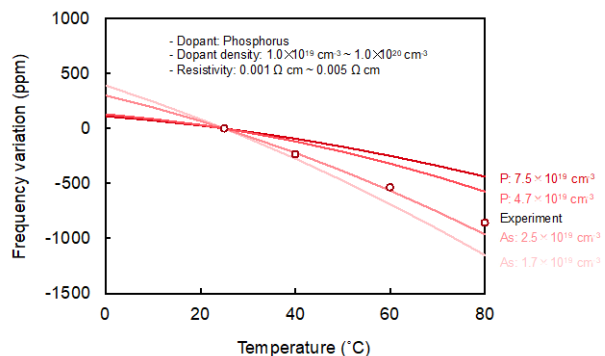


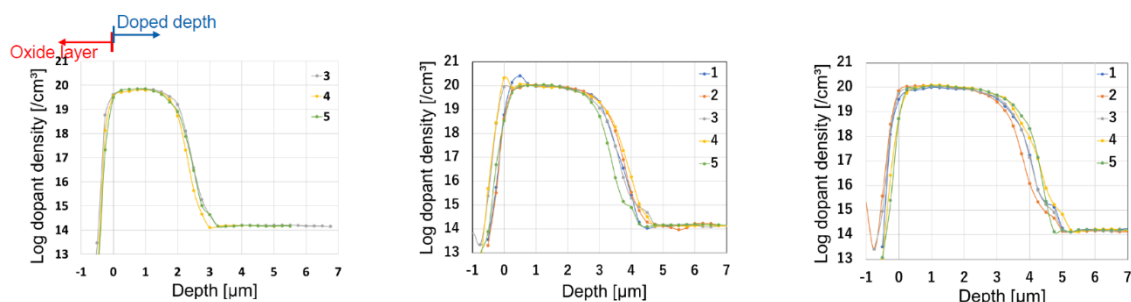
図6 測定した周波数温度特性

(4) 複数の異なるドーピングを施す方法の開発

スピンオンドーパントB200を洗浄したSi基板に3000 rpmでスピン塗布し、 200°C で15分間、ベーキングした。その後、 1000°C 、 1050°C 、および 1100°C の条件で1時間、大気中で拡散処理を行った。最後にスピンオンドーパントをフッ酸で除去した。図7に 1100°C 、1時間の条件で1回、2回、および3回、拡散処理した試料をSRAによって評価した結果を示す。1回、2回、3回の拡散処理で、それぞれ表面濃度 $5.6 \times 10^{19} / \text{cm}^3$ ・拡散深さ $2 \mu\text{m}$ 、 $8.9 \times 10^{20} / \text{cm}^3$ ・ $3 \mu\text{m}$ 、 $8.4 \times 10^{20} / \text{cm}^3$ ・ $3.5 \mu\text{m}$ の不純物分布が得られた。

スピンドーピングによると、基板表面だけではなく、エッチングした構造の側面にも不純物を導入できる。これによって、面内振動を行う MEMS 共振子の周波数温度補正も可能だと考えられる。図 8 は、このような考えのもと、シミュレーションによって設計した 32 kHz MEMS 共振子である。梁が折れ曲がった構造をしているが、これは梁の方向によって周波数温度特性が異なることを利用し、共振子の TCF を小さくするためである。前述のカンチレバー共振子と同様の考え方による。最適設計の結果、共振子の長手方向を(100)方向にし、リン濃度を $7.5 \times 10^{19} / \text{cm}^3$ にすることによって、 $-40 \sim 80^\circ\text{C}$ で周波数温度変化を約 200 ppm に抑えられることがわかった。

以上、一連の研究によって、複数の異なるドーピングを施した MEMS 共振子のシミュレーションによる設計法を確立し、また、複数の異なるドーピングによって自由度の高い周波数温度補正が可能であることを示した。また、スピンドーピングによって Si 共振子に局所的に高濃度ドーピングする方法も開発した。これらの技術によって、今までより多様な温度補償 MEMS 共振子を実設計・作製することが可能になった。近年、広いセンシングレンジと高分解能を両立するために FM 方式の MEMS センサが研究されているが、本研究の成果は、その高性能化などに資すると期待できる。



(a) 1 回ドーピング (b) 2 回ドーピング (c) 3 回ドーピング
図 7 スピンドーピングした Si 基板の不純物分布 (SRA によって測定)

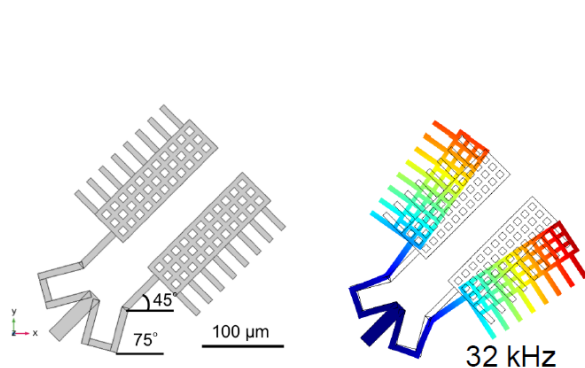


図 8 面内振動共振子の構造と振動モード

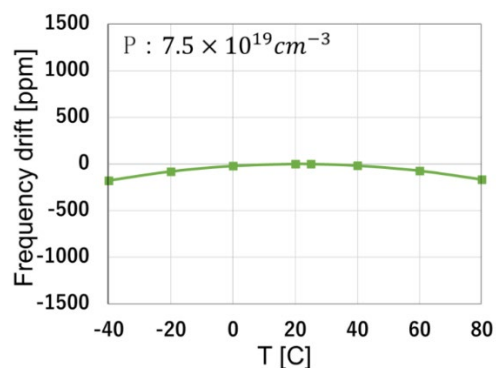


図 9 面内振動共振子の周波数温度特性

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計2件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 山田 駿介, 田中 秀治
2. 発表標題 MEMS共振子の温度特性を予測するシミュレータの作成
3. 学会等名 日本機械学会 第13回マイクロ・ナノ工学シンポジウム
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Shunsuke Yamada, Shuji Tanaka
2. 発表標題 TEMPERATURE-COMPENSATED PURE SILICON CANTILEVER RESONATOR WITH COUPLED TORSIONAL STRUCTURE AT ANCHOR
3. 学会等名 The 22nd International Conference on Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems (Transducers 2023) (国際学会)
4. 発表年 2023年

〔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
研究分担者	山田 駿介 (Yamada Shunsuke) (50811634)	東北大学・工学研究科・助教 (11301)	

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
---------	---------