

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 17 日現在

機関番号：34315

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26390041

研究課題名(和文) ナノ結晶による1GHzMEMS金属共振器のエネルギー損失機構の研究

研究課題名(英文) Mechanism of energy loss in 1 GHz MEMS metal resonators due to nano-crystal

研究代表者

谷川 紘 (Tanigawa, Hiroshi)

立命館大学・総合科学技術研究機構・教授

研究者番号：00469199

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,900,000円

研究成果の概要(和文)：ニッケルMEMS共振器を利用してナノ結晶が及ぼす機械的エネルギー損失機構の評価を行うため、ニッケル共振器の試作を行った。しかし、試作したデバイスは、電極間の短絡によって十分に動作しなかった。一方、この研究と並行して、空間ギャップ形成を必要としないpnダイオード構造を利用した新規共振器の研究開発を進めた。試作した20 MHzリング型共振器を評価した結果、pnダイオードを利用したアクチュエータの面内駆動の原理実証に世界で初めて成功した。このpnダイオード共振器はシリコンのみからなっているため、ICと集積化することが容易である。現在、この共振器を用いてエネルギー損失の評価を進めている。

研究成果の概要(英文)：We fabricated a nickel MEMS resonator in order to evaluate mechanical energy loss mechanism of nano-crystal. However, fabricated devices failed in fully operating due to shortage. Along with this research, we developed a new resonator based on pn-diode resonators, which had no need of a space gap. From the evaluation of a fabricated 20 MHz ring resonator, we succeeded in demonstrating in-plane drive of pn-diode resonators. The pn-diode resonators consist of only silicon and can be easily integrated with IC's. At present, the evaluation of energy loss in the pn-diode resonators is investigated.

研究分野：MEMS共振器

キーワード：共振器 エネルギー損失 Q値 静電気力 高周波 ナノ結晶 金属 シリコン

1. 研究開始当初の背景

近年、情報通信機器が急速に発展し、社会の生活・産業環境が大きく変化した。加速する発展スピードに対応して、情報通信機器の世界市場が急速に拡大している。この大きな需要と技術要請に応えるために、情報通信機器に関連する技術が急速に進歩しており、新技術がすぐに陳腐化するという技術の激しい世代交代が日常化している。

今日、情報通信機器に強く要求されている基盤技術は、(1)機器の小型・高密度化、(2)高周波化、(3)ブロードバンド化、である。今日の激しい技術革新に長期的に対応するためには上記3点の要求を根本的に解決することができる技術の構築が不可欠である。共振器デバイスは、情報通信機器の中で、発振器やフィルタとして必須なデバイスであり、従来から、水晶振動子や SAW (表面弾性波) デバイスが使用されている。しかし、これらのデバイスは、作製方法や寸法限界から今日の情報通信機器の発展に十分に対応することが困難になっている。このような理由から、今日、MEMS 技術に大きな期待がかけられるようになってきている [1]。

共振器の Q 値は周波数分解能を決定することから共振器の最も重要なパラメータである。水晶が最も優れた Q 値をもつために、現在でも電子部品では水晶振動子が使用されている。我々は、単結晶シリコンからなる 12.45 MHz の MEMS 共振器の開発に成功した [2]。この共振器は、独自の電極移動狭ギャップ作製技術により、0.2 μm 幅、20 μm 深さ (アスペクト比 400) をもつ共振器狭ギャップを実現したものであり、単結晶シリコン共振器では世界トップレベルの構造をもっている (ギャップが狭いほど電気機械変換効率が増大して共振器の特性が良くなる)。この作製した共振器を測定した結果、12.45 MHz の共振周波数において Q 値が 20,000 以上あり、ノイズの少ない優れた電気特性をもっていることがわかった。続いて、我々は、1 GHz までの高い共振周波数をもつ MEMS 共振器を実現するための研究を行い、extensional 共振モードをもつリング型構造の研究を行った。この研究においては、シリコン IC と集積化することを容易にするために、メッキプロセスによって容易に作製できるニッケル MEMS 共振器に注目した。しかし、作製したニッケル共振器を評価した結果、共振の Q 値が 100 程度と非常に小さいことが判明した。このように Q 値が非常に小さいために、試作した MEMS 共振器の出力信号をノイズと区別することが困難であった。

ニッケル材料の共振を利用した MEMS デバイスは 1990 年代に一時、海外で研究が行われたことがある。しかし、いずれのデバイスも Q 値が小さいことからニッケルを利用したデバイス研究が中断したという経緯がある。その後、ニッケル共振器をアニールすると Q 値が大幅に上昇することが報告され、

メッキによって作製したニッケル共振器を 380°C でアニールすると Q 値 2400 をもつことが報告された (2007 年)。しかし、この Q 値はシリコン共振器に比べて未だ低く、また、アニールのための高温プロセスを利用することから、シリコン IC との集積化に問題が残るものであった。

2. 研究の目的

情報通信機器の急速な高機能化と高集積化に伴い、従来水晶振動子に替わる微小電気機械システム (MEMS) 技術を利用した超微小で集積化が可能な MEMS 広帯域共振器の開発が求められている。金属共振器はシリコン IC と集積化が容易であるという利点をもっているが、Q 値 (共振特性の鋭さ) が低いという共振器デバイスにとって致命的な欠点がある。本研究者はこの原因がメッキで薄膜を作製する際に基板界面で発生する金属ナノ結晶の内部摩擦であると考えた。

従来、金属材料を利用した MEMS 共振器はエネルギー損失が大きいため利用されていなかった。このため、現在ではシリコン材料に限った MEMS 共振器が研究されている。一方、理論的観点からは、単結晶材料の MEMS 共振器は 1 GHz において 1,000,000 を超える Q 値をもつことが可能であると予想される。しかし、実際は 3 桁以上も低いという現状にとどまっている。これは共振器を構成する要素としてシリコン以外の材料を内包していることに原因があるのではないかと推察される。

本研究は、材料によるエネルギー損失機構を明らかにすることを一つの大きな目的とする。また、本研究の第二の大きな目的は、シリコン IC と集積化するのに適した MEMS 共振器を実際に作製して実証することである。

本研究によって MEMS 共振器の材料選択の幅が大幅に拡大して、情報通信機器の飛躍的発展に大いに役立つことが期待できる。

1) K. Suzuki, "MEMS Resonator: What is the challenge?" Digest of 2011 International Microprocesses and Nanotechnology Conference, Kyoto, The Japan Society of Applied Physics, 25B-3-1, 2011 (invited).

2) T. Okamoto, H. Tanigawa, and K. Suzuki, "Lame-Mode Octagonal MEMS Resonator Utilizing Sliding Driving Electrodes," Digest of 2011 International Microprocesses and Nanotechnology Conference, Kyoto, The Japan Society of Applied Physics, 27P-11-151L, 2011.

3. 研究の方法

ニッケル MEMS 共振器を利用してナノ結晶が及ぼす機械的エネルギー損失機構の評価を行うことにした。このため、図 1 に示す (1, 2) 振動モードをもつニッケル共振器の試作を

行った。試作デバイスを図2に示す。しかし、試作したデバイスの電気特性評価を行ったところ、デバイスが十分に動作しなかった。これは、二段階メッキプロセス技術の未熟によって、第1段階金属メッキ(固定電極形成)とその上の第2段階金属メッキ(可動電極形成)との間に短絡が発生したためであることがわかった。プロセス改良を実施したが、メッキによって0.1 μm以下の狭いギャップをもつ凹凸のある構造体を形成することは大変困難であることがわかった。

短絡を防ぐため、狭いギャップに絶縁膜を埋め込んだ絶縁膜ギャップ共振器の作製評価を次に行った。しかし、この場合にも固定電極と可動電極との間に非常に小さな短絡が発生したため(図3)、デバイスを動作させることができなかった。最後に、空間ギャップ形成を必要としないpnダイオード構造を利用した新規共振器のアイデアを得た。このアイデアを実証するために20 MHzリング型共振器を作製して評価を行うことにした。

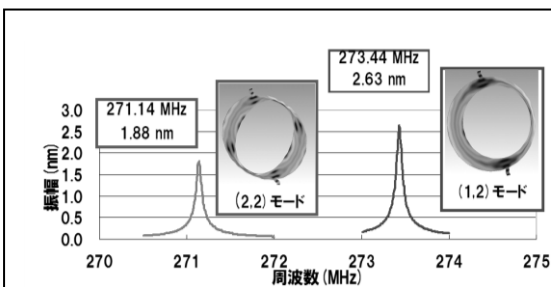


図1 リング型共振器の二つの振動モード(計算値)

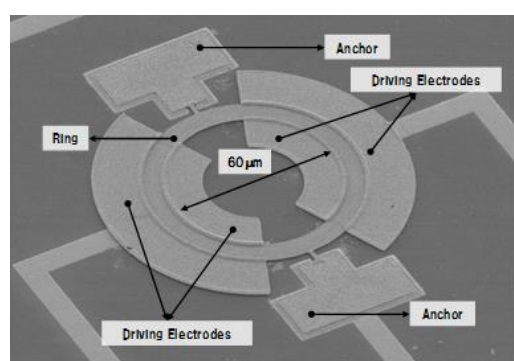


図2 試作した300 MHzリング型共振器

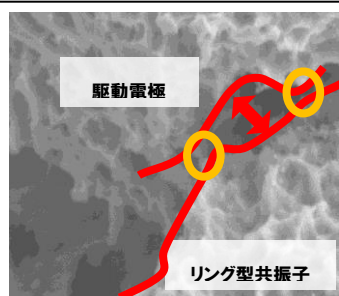


図3 試作リング型共振器の短絡(拡大図)

4. 研究成果

pnダイオード共振器の構造を図4に示す。この共振器は、(2つのアクチュエータ部が形成された)Ring形状共振プレートをその両端部でサスペンションにより支持した構造をもつ。また、Ring型共振器上下二つのリング半円領域は、それぞれnpnとnpn層から構成されており、バイアス方向を逆にするこによって二つのアクチュエータ部にそれぞれ逆向きの力が作用するように設定できる。各々のアクチュエータ部では、逆方向バイアスによって生じた空乏層内に静電気力が発生するので、この静電気力を駆動力として、機械構造体を周期的に振動させることができる。そして、印加する交流電圧の周波数が特定の周波数となったときに共振が起こり、機械構造体に大きな振動を与えることができる(pnダイオード共振アクチュエータの原理)。

作製したデバイスを図5に示す。このデバイスを用いてデバイスの動特性評価を行った。試作したデバイスを駆動するのに、二つのアクチュエータ部にDCとACの電圧を印加して駆動した(n型駆動電極に40 Vdc + 5.5 Vpp; p型駆動電極に-40 Vdc + 5.5 Vpp)。そして、デバイスの振動特性をレーザドップラ振動計(ポリテック:MSA-400)を用いて測定を行った。種々の動特性を評価することができたので、以下に代表的なものを紹介する。

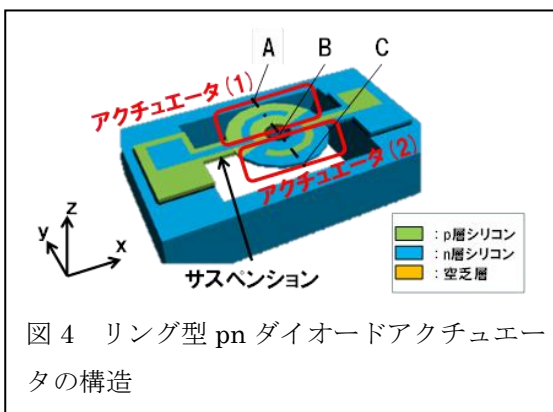


図4 リング型pnダイオードアクチュエータの構造

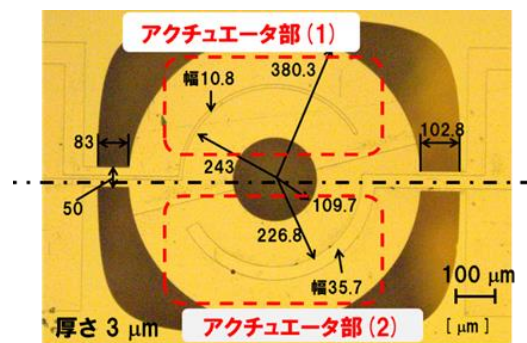


図5 試作したpnダイオードアクチュエータ

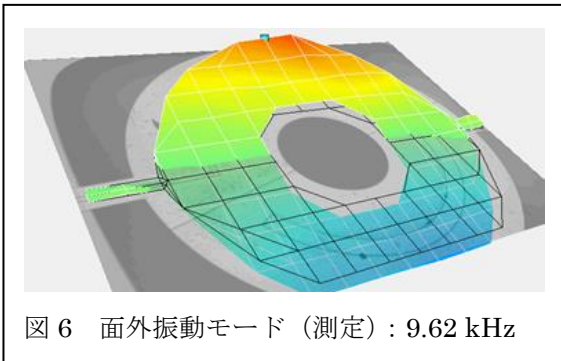


図 6 面外振動モード (測定) : 9.62 kHz

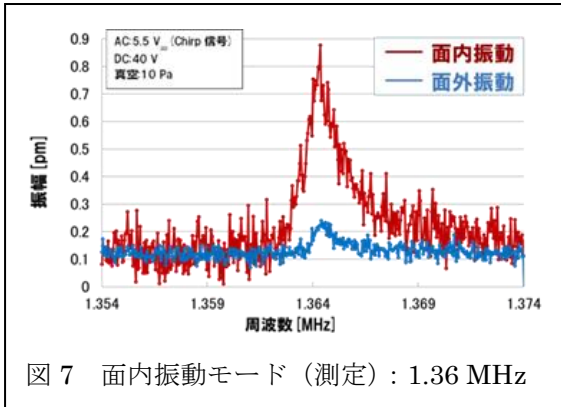


図 7 面内振動モード (測定) : 1.36 MHz

A) 面外振動モード

図 6 に示す 9.62 kHz で観測された振動モードはサスペンションねじり振動に対応した振動モードであり、シミュレーションの 10.5 kHz の振動モードと良く一致している。

B) 面内振動モード

図 7 に示す 1.36 MHz で観測された振動モードはリング面の面内振動に対応した振動モードであり、シミュレーションの 1.68 MHz の振動モードに一致する。

上で述べた成果は、pn ダイオードを利用したアクチュエータの原理実証に成功したことを意味している。特に、pn ダイオードを利用して MHz を超える周波数をもつ面内振動を実証したことは世界で初めての成果である。この pn ダイオード共振器はシリコンのみからなる共振器である。また、面内振動を利用しているために異なる周波数をもつ共振器を容易に集積化することが可能であり、IC と集積化することも容易である (金属共振器のように使用する温度に厳しい制限が課せられない) という特徴をもっている。

試作したデバイスの共振特性を評価したデータによると、Q 値 8000 程度をもっていることがわかった。この値は共振器の応用には十分であるが、他デバイスと比較して必ずしも大きくはない。現在、この値がデバイス構造によって制限されているのか測定装置によるものかの検討を進めている。この研究の先に、エネルギー損失機構を明らかにすることができるかと期待している。

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 4 件)

①旭陽一、谷川紘、西野朋希、古塚岐、鈴木健一郎、Design and fabrication of a 20 MHz pn-diode silicon ring resonator with in-plane vibration mode、Japanese Journal of Applied Physics、査読有、Vol. 55、2016、pp.06GP02、DOI 「133.19.169.1」.

②辻下勝洋、谷川紘、古塚岐、鈴木健一郎、Evaluation on two-port configuration of a Lamé-mode octagonal microelectromechanical systems resonator driven by sliding driving electrodes、Japanese Journal of Applied Physics、査読有、Vol. 54、2015、pp.06FP05、DOI 「10.7567/J14P.54.06FP05」.

[学会発表] (計 11 件)

①馬場和輝、谷川紘、西野朋希、古塚岐、鈴木健一郎、Evaluation on 60 MHz single-crystal silicon pn diode vibration sensors、(12P-7-107)、MNC 国際会議、2015 年 11 月 10 日、富山国際会議センター (富山県富山市)

②旭陽一 谷川紘、西野朋希、古塚岐、鈴木健一郎、20 MHz pn-diode silicon ring resonator with in-plane vibration mode、(13P-11-98)、MNC 国際会議、2015 年 11 月 10 日、富山国際会議センター (富山県富山市)

③辻下勝洋 谷川紘、鈴木健一郎、Evaluation on Two-port Junction Configuration of a Lamé-Mode Octagonal Microelectromechanical Systems Resonator Driven by a Low DC Bias Voltage (5C-3-5)、MNC 国際会議、2014 年 11 月 5 日、ヒルトン福岡シーホーク (福岡県福岡市)

④金谷和哉、中井柚季、谷川紘、鈴木健一郎、Evaluation on Single-crystal Silicon Cantilever-type p-n Diode Actuators (6P-7-95)、MNC 国際会議、2014 年 11 月 5 日、ヒルトン福岡シーホーク (福岡県福岡市)

⑤西田拓真、肥後矢吉、谷川紘、鈴木健一郎、Influence of packaging on frequency drift in MEMS resonators、CPMT 国際シンポジウム、2014 年 11 月 5 日、京都大学百周年時計台記念館 (京都府京都市)

[図書] (計 1 件)

谷川 紘 他、コロナ社、小さなものを作るためのナノ/サブミクロン評価法、2015 年、196 (1-30)

[産業財産権]

○出願状況 (計 1 件)

名称 : 半導体 MEMS 共振器

発明者：鈴木健一郎、谷川紘
権利者：学校法人立命館
種類：特許
番号：特願 2014-124763
出願年月日：平成 26 年 6 月 17 日
国内外の別： 国内

6. 研究組織

(1) 研究代表者

谷川 紘 (TANIGAWA, Hiroshi)
立命館大学・総合科学技術研究機構・教授
研究者番号：00469199

(2) 研究分担者

肥後 矢吉 (HIGO, Yakichi)
立命館大学・総合科学技術研究機構・教授
研究者番号：30016802

鈴木 健一郎 (SUZUKI, Kenichiro)
立命館大学・理工学部・教授
研究者番号：70388122