

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 25 年 6 月 16 日現在

機関番号：12612

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2011～2012

課題番号：23860022

研究課題名（和文） MEMS共振器を用いた環境電波による発電の研究

研究課題名（英文） A study of power generator from environment energy using MEMS resonators

研究代表者

石橋 孝一郎 (ISHIBASHI KOICHIRO)

電気通信大学・大学院情報理工学研究科・教授

研究者番号：50614038

研究成果の概要（和文）：

MEMS共振器を共振させて電波のエネルギーを蓄積し、極低電力の無線LSIチップを駆動できる電力を取得する研究を行った。

梁の長さ50 μ mのカンチレバー型及び半径50 μ mの円環型のMEMS共振器を考案し解析を行った結果、共振時の弾性エネルギーをカンチレバー型の5.7E-11[J]から円環型の8.2E-10[J]と1桁以上の向上を期待できることを明らかにした。円環型のMEMS共振器の製作を行ない、解析した共振周波数に近い996KHzの共振周波数特性を観測した。

研究成果の概要（英文）：

A MEMS resonator to harvest energy from environmental radio waves has been investigated. An ultra-low power LSI can operate with the energy. A cantilever and torus type MEMS resonators have been investigated. It is clear that torus resonator store larger energy of 8.2E-10[J] than a cantilever does 5.7E-11[J]. A torus resonator was fabricated and we 996KHz resonant frequency is observed which is almost same frequency of the analysis.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2011年度	1,300,000	390,000	1,690,000
2012年度	1,100,000	330,000	1,430,000
年度			
年度			
年度			
総計	2,400,000	720,000	3,120,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：電子デバイス・電子機器

キーワード：MEMS、エネルギーハーベスティング

1. 研究開始当初の背景

環境エネルギーからセンサネットの極低電力LSIを駆動する電気エネルギーを取得するエネルギーハーベスティングは得られる電力が比較的高いことから光電変換、熱、振動からの変換方式が多く提案されている。電波からの変換もアンテナの利得により高

められた電圧を整流、昇圧して必要な電圧を確保する方式が提案されている。しかし、いずれの方式も、電力を増幅できる電源がないために、極低電力LSIを駆動するために必要な5 μ W前後の電力を確保するためには数十m以内に4Wの送信電力を必要としていた。このため、数キロ離れた電波塔から飛んでくる環境電波の発電は十分な発電効率が得ら

れていない。

2. 研究の目的

本研究の目的は、空間中を飛び回る100MHz以下の地デジ波等（電界強度60-80dbuV/m程度）の環境電波から極低電力の無線LSIチップを駆動できる電力を取得する研究を行うことである。環境電波をアンテナで受け、この電力をMEMS（Micro-Electro-Mechanical Systems）共振器を用いて増幅し、最終的には極低電力の無線LSIチップを駆動できる5uW程度の電力を取得する。

3. 研究の方法

本研究ではMEMS共振器には損失がほとんどないことを利用し、微弱な環境電波のエネルギーをMEMS共振器に蓄積して増幅するという動作原理を用いる。研究計画では平成23年度は600KHzの共振周波数を持つMEMS共振器を試作、平成24年度は100MHzの共振周波数を持つMEMS共振器を試作して、MEMSによりアンテナで受けた環境電波を増幅できることを実験的に示す。

4. 研究成果

4-1 カンチレバー型共振器の解析

H23年度はMEMS共振器として、梁の長さ50umのカンチレバー型共振器の共振特性の解析と製作を行った。

検討したカンチレバー型の共振器の形状を図1に示す。

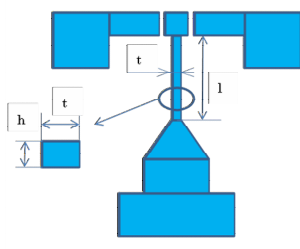


図1. カンチレバー型MEMS共振器概略図

カンチレバー型共振器では先端の重りの重量を m 梁の部分のばね定数を k とすると共振器の共振周波数は(1)式で与えられる。

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (1)$$

(1)式を用いて梁の長さ $l=50\mu\text{m}$ 、先端の重りの重量 $2.33 \times 10^{-11} \text{ kg}$ Siのヤング率 E

$=185\text{Gpa}$ とおいて計算すると、本カンチレバー型の共振器の共振周波数は708KHzと計算され、目標に近い共振周波数が得られることがわかった。

4-2 円環型共振器の解析

H24年度は新たに円環型のMEMS共振器を考案し解析と製作を行った。図2に円環型共振器の構造図を示す。

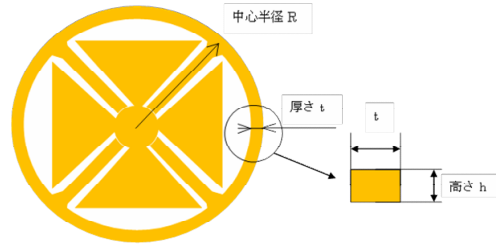


図2. 円環型共振器の構造図

円環型共振器の運動方程式は θ を入力信号の角周波数、 δ を共振器のたわみ量とすると(2)式で与えられる。

$$\frac{d^2\theta(t)}{dt^2} = -\theta^2 \delta_{yc} \cos \theta t \quad (2)$$

この運動方程式を解くと共振周波数は(3)式で求められる。

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{4 \times 5.6 \times 10^{-4} E}{0.15\pi \rho r^2}} \quad (3)$$

ここで、 r は円環型共振器の半径、 ρ は材料の密度である。この式から円環の半径を50umの場合、円環型共振器の共振周波数826KHzが求められた。

4-3 有限要素解析シミュレータによる共振特性の解析

有限要素シミュレータFemtetによる固有振動数の解析し、解析値とシミュレーション値の対比を行なった。表1にその結果を示す。

表1 Femtetによる共振周波数シミュレーション

デバイスの種類	解析値 [kHz]	シミュレーション値 [kHz]
カンチレバー型	708.5	815.9
円環型	826.0	1183.0

シミュレーション結果から、カンチレバー型デバイスでは、解析値の10%程度の誤

差, 円環型は解析値と比較して-30%程度の誤差となることがわかった。

図3は、MEMS共振器の応力解析の様子を示したものである。共振器各部の変動量が小さい青色部分から変動量の大きい赤い部分までが示されており、カンチレバー、円環型いずれも第1次周波数で振動できることが示されている。

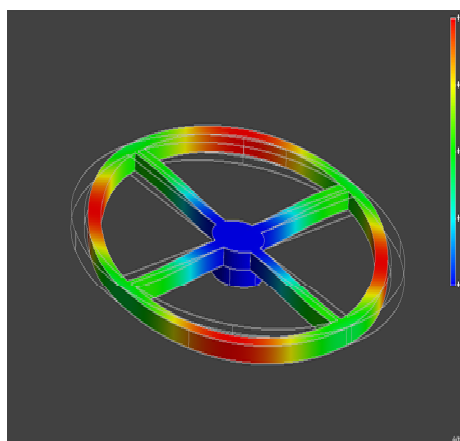
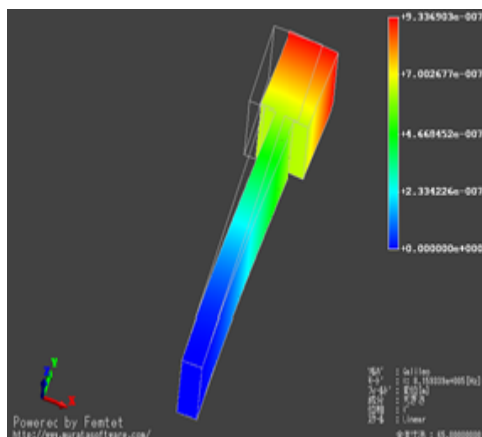


図3 カンチレバー型、円環型のシミュレーションによる変位解析

次に、それぞれの共振器の共振時の弾性エネルギーをシミュレーションにより求めた。弾性エネルギーが大きい方が、共振器により多くのエネルギーを蓄積できることになるため、共振エネルギーを電気エネルギーに変換する共振器として優れた特性を有していることになる。

表2にシミュレーション結果を示す。共振周波数700~800 kHzとほぼ同一の共振器が実現できた場合、共振時の弾性エネルギーをカンチレバー型の $5.7E-11$ [J] から円環型の $8.2E-10$ [J] と1桁以上の向上を期待できることを明らかにした。

表2 各共振器の蓄積弾性エネルギー

デバイスの種類	通常動作時の弾性エネルギー[J]	共振時の弾性エネルギー[J]
カンチレバー型	1.511×10^{-16}	5.657×10^{-11}
円環型	4.861×10^{-15}	8.194×10^{-10}

4-3 MEMSの製作工程

図4に今回製作したMEMS共振器の製作工程を示す。

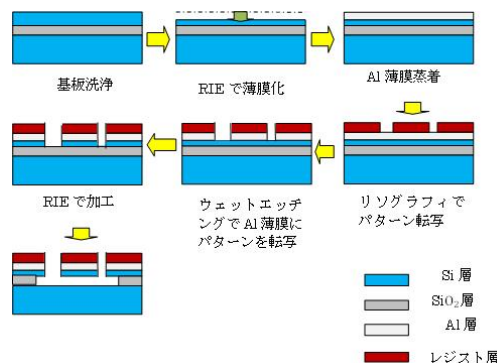


図4 MEMSの製造工程

今回製造に使用するMEMSデバイスの基板には、膜厚 $15 \mu\text{m}$ のSOI (Silicon on Insulator) 基板を用いている。表面から $15 \mu\text{m}$ のSi構造体を加工する層、構造体を可動させるための中空スペースを作るための犠牲層、台座になる基板層からなっている。H23年度までのMEMS製造の実験経験に基づき、H24年度では、 $15 \mu\text{m}$ のSi層を $5 \mu\text{m}$ まで薄くして製造を行なった。この工程の他にSOI基板のSi表面に共振器のパターンを転写する工程、Siをパターン通りに加工する工程、可動部分を作るためSi層直下のSiO₂を剥離する3工程が必要である。

パターン転写の工程としては、Al薄膜による蒸着、リソグラフィによるパターンの転写、レジスト直下のAl薄膜にウェットエッチングを施しパターンをつける小工程がある。今回の実験では、長時間のRIEエッチングにレジストの強度が耐えられないため、Al薄膜によるパターンを追加している。

Siを加工する工程では、反応性イオンエッチング(RIE)によるドライエッチング工程がある。この工程は $15 \mu\text{m}$ のSi層を $5 \mu\text{m}$ に加工する際にも使用している。SiO₂の剥離にはバッファードフッ酸(BHF)によるウェットエッチングがある。

図5にリソグラフィ後のカンチレバー型共振器、図6に円環型共振器を示す。

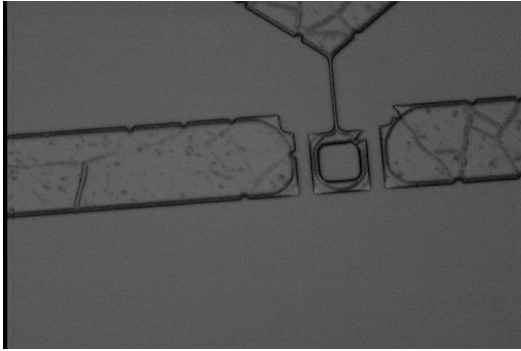


図5 製作後のカンチレバー型共振器



図6 製造後の円環型共振器

図に示すように十分満足な形状ではないが、共振特性を示す可能性のあるMEMS共振器を製作できた。

4-4 共振特性の測定

製作したMEMSをシールドボックス内に設置してマニピュレータで針を立て、入力信号源としてファンクションジェネレータ、出力信号の測定用にスペクトルアナライザ、直流バイアス電圧源にソースメータを用意して測定を行った。

図7は、円環型MEMSから取得した信号スペクトルである。測定の結果解析した共振周波数に近い996KHzの共振周波数特性を観測し、所望の共振周波数に近いMEMS共振器が得られたことを確認した。

4-5 まとめ

MEMS共振器を共振させて電波のエネルギーを蓄積し、極低電力の無線LSIチップを駆動できる電力を取得する研究を行った。

梁の長さ50umのカンチレバー型及び半径50umの円環型のMEMS共振器を考案し解析を行った結果、共振時の弾性エネルギーをカンチレバー型の $5.7E-11$ [J]から円環型の $8.2E-10$ [J]と1桁以上の向上を期待できるこ

とを明らかにした。円環型のMEMS共振器の製作を行ない、解析した共振周波数に近い996KHzの共振周波数特性を観測した。

学会への発表として、“カンチレバー型のMEMS共振器の設計”という題名で、2013年電子情報通信学会総合大会において発表を行い、カンチレバー型のMEMS共振器の共振特性の解析法について報告した。

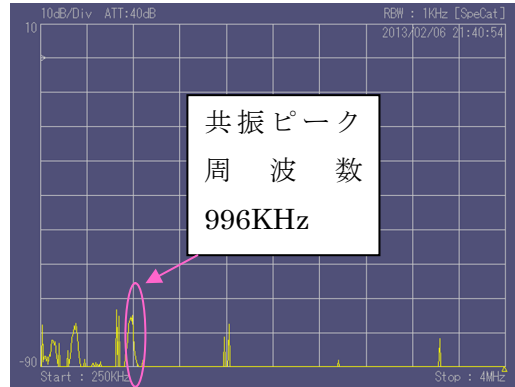


図7. 円環型共振器の共振特性

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)

[学会発表] (計1件)

- ① 日下部 圭佑, 井上 雄策, 長谷川 翔一, 石橋 孝一郎, “カンチレバー型MEMS共振器の設計,” 2013年電子情報通信学会総合大会 C-5-12, 2013年3月 岐阜大学

[その他]

ホームページ等

<http://mtm.es.uec.ac.jp>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

石橋孝一郎 (ISHIBASHI KOICHIRO)
電気通信大学・情報理工学研究科・教授
研究者番号: 50614038