

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 9 月 13 日現在

機関番号：12612

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25420324

研究課題名(和文) 待機モードのゼロ消費電力を実現するMEMS ウェイクアップモジュールの研究

研究課題名(英文) A study on non-power MEMS wake up module

研究代表者

石橋 孝一郎 (ISHIBASHI, Koichiro)

電気通信大学・情報理工学(系)研究科・教授

研究者番号：50614038

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,000,000円

研究成果の概要(和文)： Q値の大きいMEMS共振器を製作し、これを用いて無電源のウェイクアップモジュールを実現することを目的として、研究を行った。

静電型MEMS共振器の設計法、製造法、測定法、動作シミュレーション方法を確立した。くし歯型静電型MEMSを製作し、131MHzの共振周波数を確認した。一方、静電型MEMS共振器では、ウェイクアップ信号発生に必要な共振エネルギーが得られないこともわかった。

次に圧電型MEMS共振器について検討し、圧電型で一定の大きさのMEMS共振器で900MHz帯でウェイクアップモジュールが実現できることを明らかにした。

研究成果の概要(英文)： We have investigated non power wake up module which utilizes a high Q MEMS resonator. Design, fabrication, measurement, and simulation methods of electric static MEMS resonator have been investigated. It is shown that electric static MEMS resonator cannot store energy to achieve a wake up module. Piezo type MEMS resonator is found to be a resonator which can store enough energy to achieve a wake up module, if the resonator has enough volume.

研究分野：エレクトロニクス

キーワード：電子デバイス 電子機器 MEMS ウェイクアップモジュール

### 1. 研究開始当初の背景

省エネルギー技術は従来地球環境保全のために開発が進んできた。2011年の大震災後は原発停止による発電量の不足や貿易赤字の拡大などがあり、産業と生活で従来以上に省エネルギー化が急がれている。省電力化技術の一つとして有効な手段の一つは機器の待機モードの導入であるが、次の動作コマンドを受け付けるための回路で待機電力を消費してしまう。待機電力が小さくても待機モードの時間は長いために積算すると大きなエネルギーを消費する。家庭内の電気機器の待機電力は全電力消費量の7%に相当するといわれていて、日本全体では、原子力発電機約2機分弱に相当する1.6MKWを消費している。

待機モードの消費電力を低減するため、特定の周波数の電波を受信すると、システムにウェイクアップ信号を出して、システムを稼働させるウェイクアップモジュールがある。しかし、現状のウェイクアップモジュールは、常時受信状態にしておく必要があるため100uAほどの消費電力を必要としていた。

### 2. 研究の目的

MEMS(Micro Electrical Mechanical Systems)は、機械振動子を作成すれば、Qの大きな共振器を作成することが可能である。本研究の目的は、MEMSでQの大きい共振器を製作し、微小な電圧を蓄積して大きな電圧を発生して無電源のウェイクアップモジュールを実現することである。900MHzや2.4GHz帯の周波数の共振器であればWiFi規格やZigBee規格の無線モジュールセンサネットワークの起動にも応用できる。

### 3. 研究の方法

アンテナで受けた電波は電極に導入されている。電極はカップリング容量を介してMEMS共振器に接続している。これにより、アンテナでMEMS共振器の共振周波数と同等の電波を受け取ると、その微弱な電力はMEMSの共振器に少しずつ蓄えられていく。MEMS共振器の振幅が大きくなると電極に大きな電圧として現れるようになる。電極の電圧が一定量を超えると、整流回路により整流されてウェイクアップ信号が発生する。

MEMSの試作は電気通信大学内の共同研究設備にすでに配置されているRIE(Reactive Ion Etching)装置や、東京大学ナノテクノロジープラットホーム研究設備のDRIE(Deep Reactive Ion Etching)等を用いて行った。LSI設計は電気通信大学内で使用可能なVDECのEDAツールを用い、試作はLSIの試作ファウンドリーに外注して行った。

当初の研究計画では、平成25年度に所望の共振周波数を持つMEMS共振器の設計を行う。同時にMEMSと組み合わせるLSIチップの設計まで行う。平成26年度は第1回目の製作の結果を改良し、第2回目のMEMS共振器製作を行う。LSIの試作も外注し、この2つを合わせてウェイクアップモジュールを実現する。平成27年度はこの26年度までに実現したウェイクアップモジュールを用いて、バッテリーレスのセンサネットワークシステムを実現する予定であった。

### 4. 研究成果

平成25年度は研究の初年度として、ウェイクアップモジュールに適した円環型の静電型MEMS共振器を考案した。

有限要素解析シミュレータFemtetにより応力解析を行い、MEMS共振器の共振周波数を割り出す設計法を確立した。固定電極が円環の中心にある形状と外側にある形状の2種類のMEMS共振器の解析を行い、それぞれの共振周波数が4.27MHzと5.7MHzであり、解析的に求めた値と10%以内の誤差でよい一致が得られた。(図1)

設計結果に基づき静電型MEMS共振器の試作を行い、直径100um、厚さ15um、電極間ギャップ1umの円環型MEMS共振器を製作した。ギャップのアスペクト比は15で大きい。(図2)

試作したMEMS共振器に直流バイアスを与えながら一方の電極に交流電圧を与えたときの他方の電極に現れる電圧をスペクトルアナライザで観測し、共振周波数4.5MHzと設計値に対して10%以内で一致することを確認した。(図3)

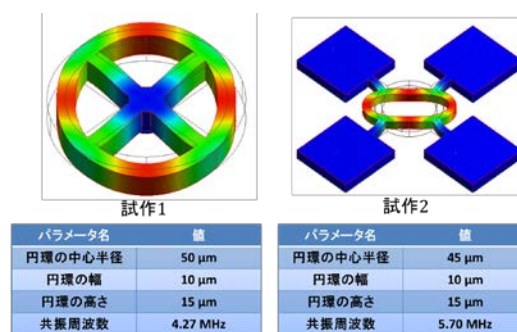


図1 静電MEMS共振器のシミュレーション

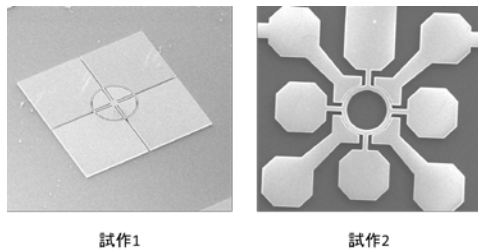


図2 試作したMEMS共振器の電子顕微鏡写真。

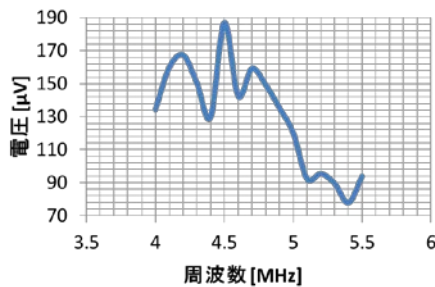


図3 製作したMEMSの共振特性

平成26年度は平成25年度の研究成果を踏まえてより高い共振周波数のMEMS共振器を製作するとともに、静電型MEMS共振器に蓄積できるエネルギーの解析を行った。

MEMSの形状として、楕形の静電MEMS共振器を製作し(図4)、設計どおりの315MHzの共振周波数が得られることを確認した。(図5)これにより静電型MEMS共振器の製法と共振の測定法を確立した。

MEMS共振器が共振した際に構造体が蓄積できるエネルギーをMatlabによるシミュレーションで評価し、最大で1.5E-12Jのエネルギーを蓄積できることを明らかにした。(図6)

これらの結果より、MEMS共振器で振動エネルギーを蓄積してウェイクアップ信号を発生できる可能性を確認した。その一方で、静電型MEMSでは目的とする900MHzの高い共振周波数になると蓄積エネルギーが十分でなく、圧電型MEMSを検討する必要があるという検討結果になった。

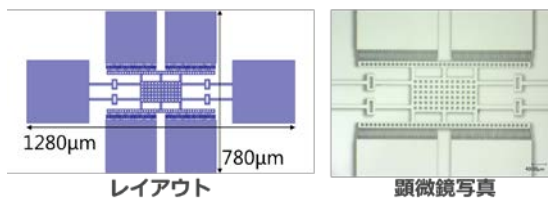


図4 くし歯型MEMSのレイアウト図と製作したMEMSの顕微鏡写真

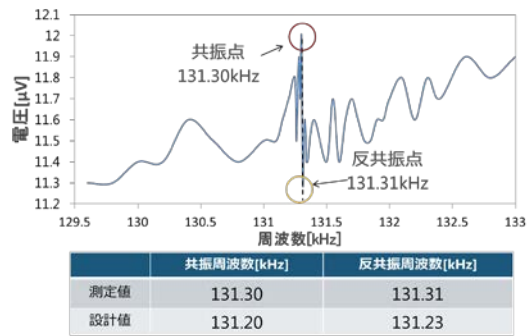


図5 製作したくし歯型MEMSの共振特性

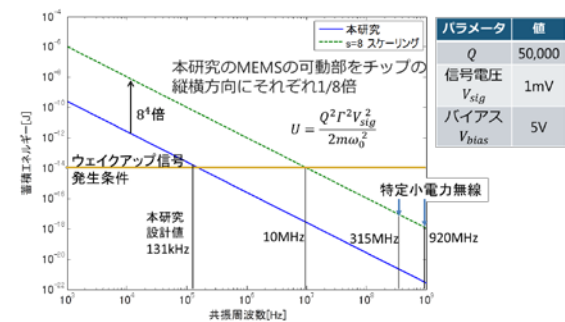


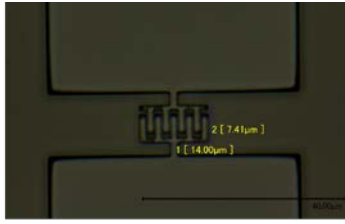
図6 静電型MEMSの蓄積エネルギー

H27年度は高周波数でエネルギーの蓄積が可能になる圧電型MEMSの検討を行った。

圧電膜として、製造の容易性等を考慮して酸化亜鉛(ZnO)を選択した。圧電型MEMS共振器の作成に関して、各プロセスレシピの作成とZnOのアライメント露光以前のプロセスまでを確立した。その一方でBulk型圧電MEMS共振器を作製し、(図7)共振周波数を測定したところ、2.12GHz付近に共振ピークを確認することができた。(図8)

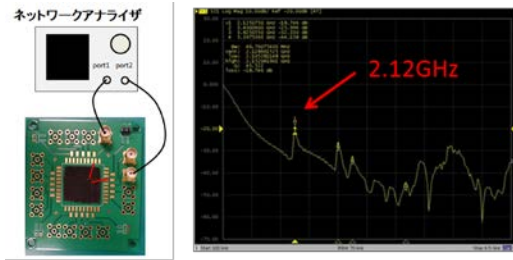
ウェイクアップモジュール実現に向けて、有限要素解析シミュレータ(Femtet)と回路シミュレータ(LTSPICE)を活用して、圧電MEMS共振器の等価回路を導く方法も確立した。これらにより、圧電型MEMS共振器により、ウェイクアップモジュールを構成するために必要なサイズを明らかにした。(図9)

その結果、圧電型MEMSで電極のくし歯250本、1.62mm X 6mm X 1.65μmのサイズであれば、920MHzにおいて必要な電圧ゲイン19dBを達成できることがわかった。



	マスクレイアウト	作製後
x(縦)	13.5μm	14.0μm
y(横)	7.32μm	7.41μm

図7 試作した圧電型MEMS共振器

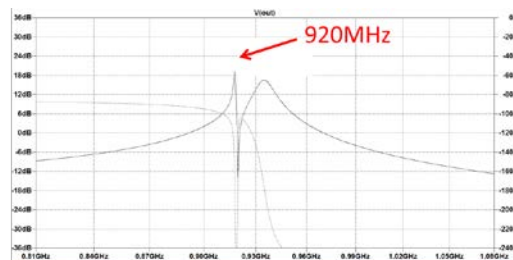


測定の概略

作製したMEMS共振器の測定結果

16

図8 圧電型MEMS共振器の共振特性



パラメータ	値	インピーダンス
$R_m$	~1.73 $\Omega$	1.73 $\Omega$
$C_m$	20 fF	$8.65 \times 10^3 \Omega$
$L_m$	1.5 $\mu$ H	$8.67 \times 10^3 \Omega$
$C_0$	13.5 pF	12.8 $\Omega$

Q値を5000と仮定

図9 圧電型MEMS最適化シミュレーション

以上の研究により、圧電型MEMS共振器により、ウェイクアップモジュールを実現できる可能性を示した。

## 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)

永村信也、石毛剛志、石橋孝一郎 「くし歯型MEMS共振器の共振特性と蓄積エネルギー」 2015年3月11日 電子情報通信学会 総合大会 (立命館大学)

## 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