

令和 4 年 6 月 16 日現在

機関番号：13801

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2019～2021

課題番号：19H02570

研究課題名(和文) High-Q・高帯電MEMS共振子を同調回路に用いた標準電波の電波発電技術

研究課題名(英文) Energy scavenging experiment from standard time radio wave by using by a high-Q MEMS resonator

研究代表者

橋口 原 (Hashiguchi, Gen)

静岡大学・電子工学研究所・教授

研究者番号：70314903

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 9,900,000円

研究成果の概要(和文)：リング型MEMS振動子を用いて高いQ値を有するMEMS共振子を用いた、標準電波受信のための素子開発とそれを用いた充電実験を行った。1次試作においては、疑似アンテナで受信した信号を4倍程度昇圧できることを確認した。2次試作においては、ハンドル層に埋め込み酸化膜層を設ける新しいプロセスを開発し、寄生容量が極めて小さいMEMS振動子を作製することに成功した。しかしながら、全波整流回路による受信信号の充電実験では、MEMS共振子の反共振周波数で、約1.86倍の受信電圧の増大効果を確認することができたが、実用的には不十分である。今後静電トランス構造を導入し、電圧昇圧特性の改善を行っていく予定である。

研究成果の学術的意義や社会的意義

標準電波からの蓄電を、高いQ値を有するMEMS共振子を利用した試みた初めての実験である。目標値には達していないが、MEMS共振子を用いて、アンテナ信号の電圧を昇圧できることを実証できた。素子の作製において、MEMS共振子の寄生容量を減少させるための、埋め込み酸化膜構造を新たに開発したが、この手法はMEMSデバイスの寄生容量を大きく減少させることのできる手法として有用であり、MEMSデバイスの感度向上や省エネルギーに寄与できるものと考えられる。

研究成果の概要(英文)：We have examined an energy scavenging technique from standard time radio wave by using a high-Q MEMS resonator. We developed a ring vibration device having the quality factor of over 20000 in vacuum operation. Using the first trial device, the voltage boosting factor of about 4 was confirmed for the receiving signal via a pseudo antenna. Furthermore, we adopted a new dielectric separation structure in the handle layer of a SOI wafer, and established very small parasitic capacitance between electrodes of the MEMS vibrator. We have conducted the charging experiment by connecting a full-wave rectifier under resonance condition of the developed MEMS vibrator and observed the charging voltage boosting of about 1.86 compared to that under non-resonance condition. However, these results were not enough to usage of actual use as a power source. We have continued development of the MEMS resonator with electrostatic transformer function to boost up the radio wave signal.

研究分野：MEMS

キーワード：MEMS振動子 エレクトレット 電波発電 誘電分離構造

1. 研究開始当初の背景

近年自然災害の増加や社会インフラの老朽化による災害を未然に防ぐための、環境モニタリングシステムの実現に向けた研究が盛んになってきている。この中で多数のセンサーチップを駆動する電源問題がクローズアップされ、太陽光発電、熱発電、あるいは振動発電などのエネルギーハーベスティング技術が検討されてきた。電波発電も一つの候補であり、マイクロ波や放送用電波によるレクテナの開発が盛んに行われている。一方中波放送帯では、ゲルマニウムラジオ同様の共振回路で昇圧し、蓄電する試みが行われている。いずれの電波発電においても、ショットキーダイオードで整流するために必要な 0.2V 以上の出力電圧を得るための工夫が開発のポイントであるが、電波強度の強い電波塔から数十 km 以内の地点での実証に留まっており(表面技術、vol.67, No.7, p.353(2016))、自然災害の監視が必要な電波塔から離れた山岳地域での電波発電は想定されておらず、現在のところは日本全国をカバーできる電波発電技術は開発されていない状況であった。

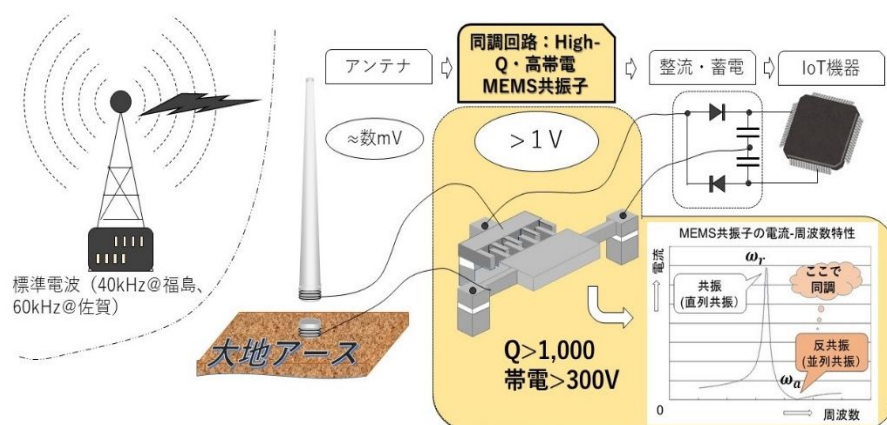


図1 標準電波による電波発電技術の概念図

2. 研究の目的

そこで本研究では、日本全国をカバーしている標準電波から蓄電する技術に挑戦する。標準電波は、最低でも 1mV/m から 3mV/m の電界強度があり(情報通信機構ホームページより)実効長数 m の微小モノポールアンテナで 10mV 程度の起電力が期待できる。このアンテナからの出力を、Q 値が 1,000 を超える MEMS 共振子の反共振(並列共振)周波数で同調させることにより昇圧し、蓄電することができるかどうか、を実験的に検証する。静電型共振子には、静電界を与えておかなければならないが、当研究室で開発したカリウムイオンエレクトレット技術を適用し、小さな交流電圧で駆動する MEMS 共振子を実現する。

3. 研究の方法

本研究では標準電波周波数の 40kHz に共振する MEMS 共振子をまず作製し、その性能を評価する。特に疑似的なアンテナで受信した電圧の昇圧特性に着目して、デバイス構造の改善を行う。最終的には実際の標準電波での実験を行い、その蓄電特性を確認する。

4. 研究成果

(1) MEMS 共振子の一次試作とその昇圧特性

MEMS 共振子の構造としては研究当初楕円型を検討したが、振動質量が大きいため弾性バネ定数も大きくなり、安定した共振特性が得られないことから、ウィングラスモードのリング振動子を作製した。図2に作製したリング振動子の写真を示す。リングの外形は 9mm、内径は 7.6mm で、活性層 30 μm の SOI 基板を用いて作製した。デバイスはカリウムイオンをドーブしたシリ

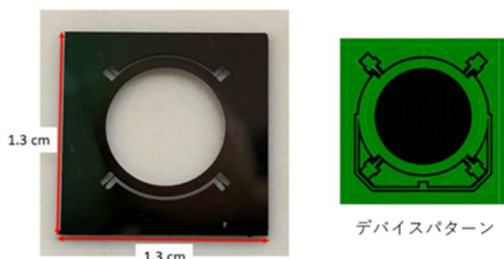


図2 作製したリング振動子

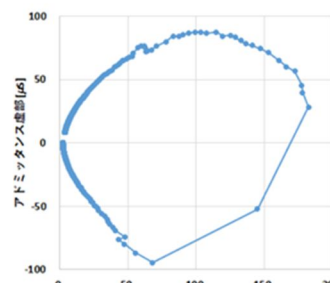


図3 真空中でのアドミッタンスカーブ

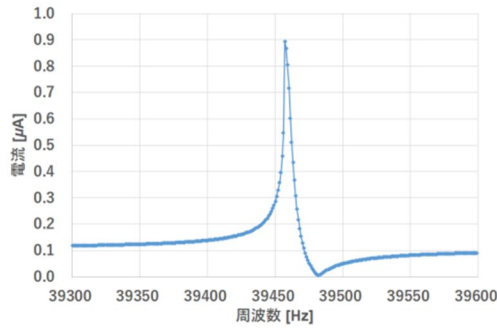


図 4 共振における短絡電流-周波数特性

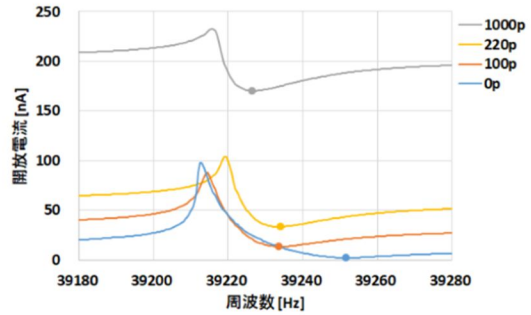


図 5 外付け容量による反共振周波数の変化

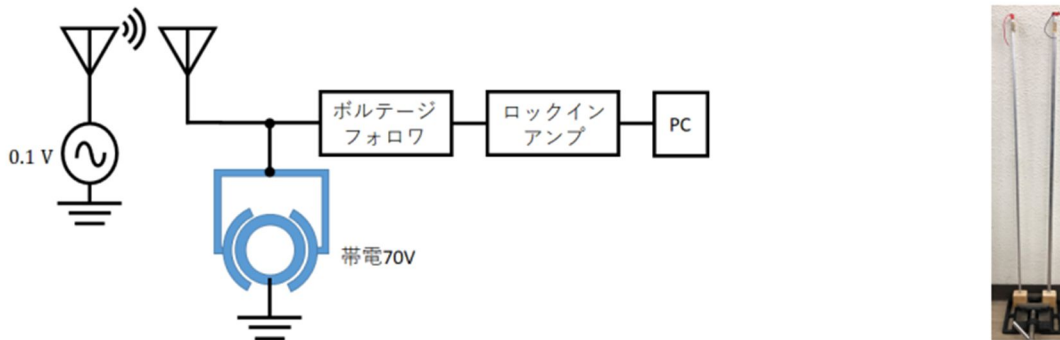


図 6 疑似アンテナによる受信電圧の昇圧実験

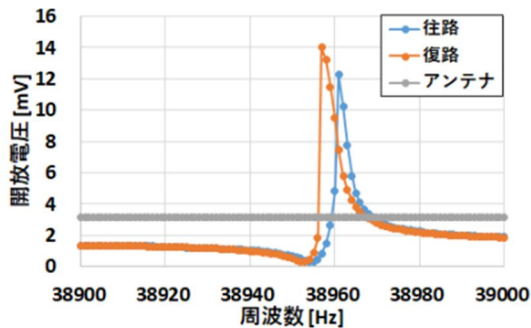


図 7 受信した信号の周波数特性

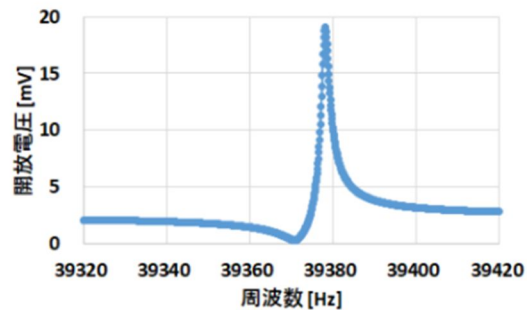


図 8 測定パラメータを用いたシミュレーション結果

コン酸化膜で覆われている。エレクトレット化の前に真空中で測定した、共振特性のアドミッタンスカーブを図 3 に示す。これより計算される共振のクオリティファクター (Q 値) は約 21600 であり、非常に大きな値が得られた。本来真円を描くが、高い Q 値のため振幅が大きくなり、対向する固定電極に接触したものと考えられる。次にこの素子に 100V で帯電処理を施し、測定した短絡電流と周波数の関係を図 4 に示す。外部からのバイアス電圧の印加なしで、実効値 10mV の交流のみで駆動したものであり、きれいな共振、半共振特性が得られた。また周波数の同調を目的として、MEMS 振動子に並列に容量を接続することで、反共振周波数の変化を測定したものが図 5 である。1000pF で、25Hz 程度反共振周波数は移動している。共振周波数はほぼ変化なく、等価回路理論から推測されたとおり、反共振周波数の同調として利用できる可能性がある。しかし並列に容量を接続したことで、共振回路としてのインピーダンスは小さくなっている。次に図 6 に示す構成で、疑似アンテナで受信した電圧の昇圧実験を行った。疑似アンテナは図中の写真に示すような長さ 1m のアルミ棒である。図 7 に受信信号の周波数特性を示す。MEMS 共振子がない状態のデータが灰色の直線の特徴であり、アンテナのみでは周波数に関係なく約 3.7mV の信号が受信されたが、MEMS 共振子の挿入により、12mV ~ 14mV に受信信号が昇圧されていることが分かる。図 8 は、測定系の浮遊容量、デバイスの寄生容量を考慮したシミュレーション結果である。ほぼ、実験結果を再現できており、特に寄生容量が昇圧に大きな影響を与えていることが判明した。そこで 2 次試作においては、寄生容量を小さくする構造を検討した。

(2) 寄生容量の抑制構造と 2 次試作共振子の特性

MEMS 共振子の寄生容量は、主に電極パッド下の埋め込み酸化膜層を介したキャパシタンスにより発生しているものと考えられる。そこで SOI 基板のハンドル層を、部分的に誘電分離す

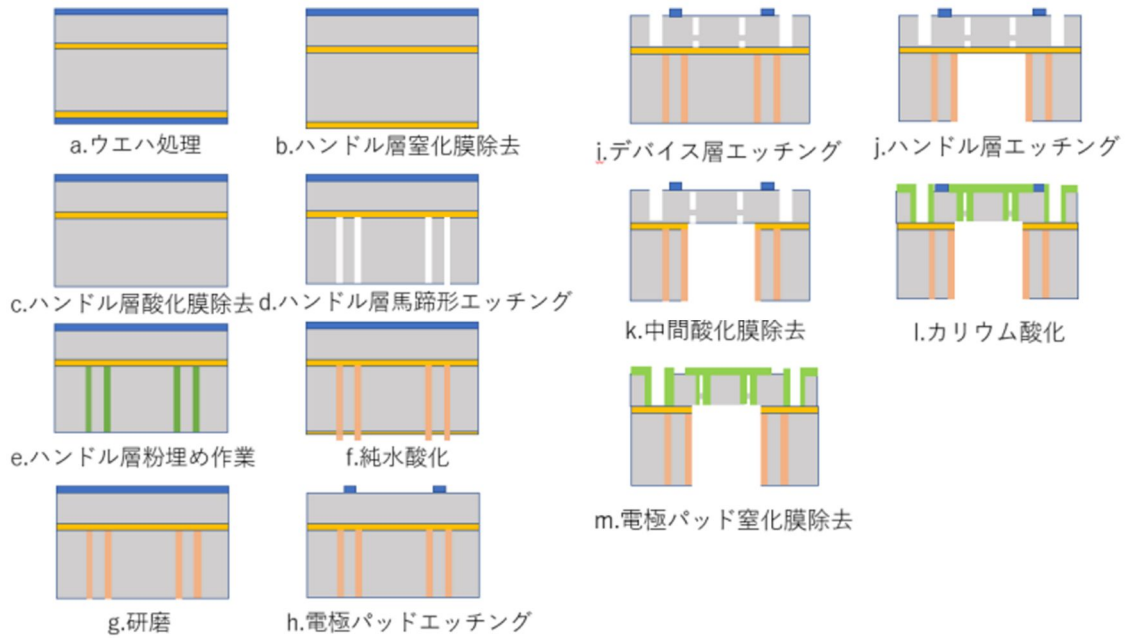


図 9 ハンドル層誘電分離構造を付加したプロセス工程図

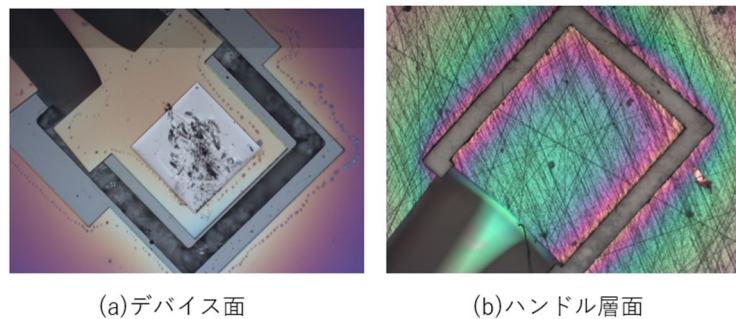


図 10 電極パッド部の誘電分離構造の顕微鏡写真

るプロセスを考案した。図 9 にそのプロセス工程図を示す。通常のプロセスと異なる部分は、同図 d に示すようにハンドル層から埋め込み酸化膜層 (BOX) 層までエッチング加工し、次に同図 e のように、平均粒径 $0.84\mu\text{m}$ の Si 粉とガラスフリット (AGC ASF-1780) を 7:3 の混合比で混ぜたものを充填した後、純水酸化してハンドル層に誘電分離された構造を設ける工程である。図 10 に MEMS 振動子パッド部の写真を示す。”コ”の字の形に見える部分が、誘電分離構造であり、(a)図が上面から、(b)図が裏面から撮影したものである。裏面側は研磨痕が見えている。作製した素子の短絡電流と周波数の関係より、パッド部を含む寄生容量は、誘電分離構造無しデバイスの約 3% まで低減できたことが確認された。

(3) 充電実験

作製した MEMS 振動子に対して帯電を行って共振を確認したが、40kHz 近傍に共振を一致させるために、100MHz の抵抗を介してバイアス電圧を加えることで充電実験を行った。作製した素子は、バイアス電圧が 484.7V でほぼ 40kHz に反共振周波数をもつため、以降の実験はこの電圧をバイアス電圧として印加して行った。充電実験は図 11 に示すように、疑似アンテナから電波を放射し、近接した受信アンテナで受信した信号を全波整流して $22\mu\text{F}$ のセラミックコンデンサに充電することで実施した。図 12 に信号源の周波数をパラメータとしたときの、充電電圧カーブを示す。バイアスを印加しない場合は、3 分後の充電電圧が 5.69mV であったが、反共振周波数に近い 40.005KHz で最も高い 10.6mV の充電電圧が得られた。信号源の周波数と充電電圧の関係を図 13 に示す。この特性は、MEMS 振動子の共振特性を反映したものと考えられる。作製した MEMS 振動子は、真空中で 20000 を超える共振の Q 値をもっており、そのためにわずかの周波数変化で、充電特性が変わってしまっている。また、バイアスなしと比較して充電電圧の増大は 1.86 倍程度であった。これは充電回路を接続したことで、システムとしての Q 値が下がってしまったと考えられる。パーアンテナ式の共振回路では、2 次巻き線を設けることで Q 値の低下を回避しており、同様の考え方により MEMS 振動子を 3 端子構成にして静電トランスとして動作させ、受信電圧を昇圧させる素子の研究を引き続き実施している。

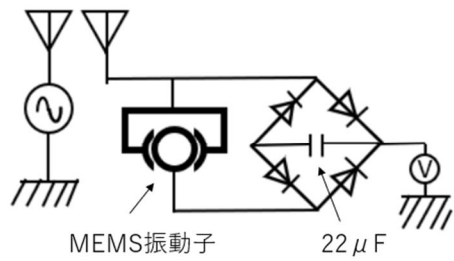


図 11 充電実験の接続図

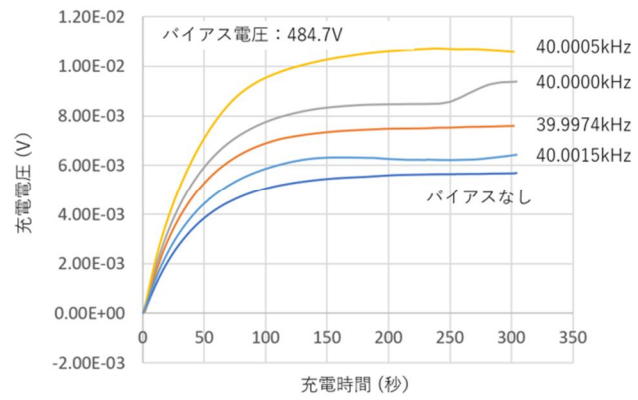


図 12 信号源周波数をパラメータとした充電特性

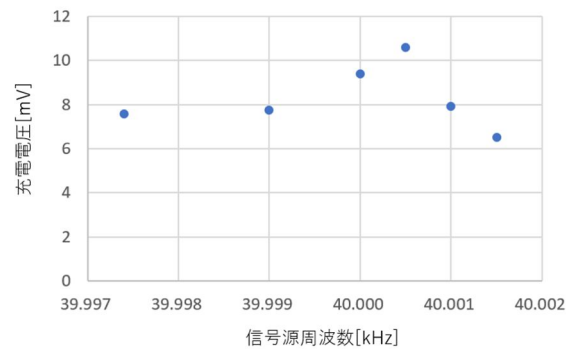


図 13 充電電圧の周波数依存性

(4) まとめ

リング型 MEMS 振動子を用いて高い Q 値を有する MEMS 共振子を用いた、標準電波受信のための素子開発とそれを用いた充電実験を行った。ハンドル層に埋め込み酸化膜層を設ける新しいプロセスを開発し、寄生容量が極めて小さい MEMS 振動子を作製することに成功した。MEMS 共振子の反共振周波数で、受信電圧の増大効果を確認することができたが、充電実験では 1.86 倍程度であり、まだ不十分である。今後静電トランス構造を導入することで、電圧昇圧特性の改善を行っていく予定である。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計1件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 Yuki Yamamoto, Yasushi Shibata, and Gen Hashiguchi
2. 発表標題 Development of a parasitic capacitance reduction process by forming embedded dielectric structures
3. 学会等名 MIPE2022 Joint International Conference on Micromechatronics for Information and Precision Equipment (国際学会)
4. 発表年 2022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
---------------------------	-----------------------	----

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