

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 25 日現在

機関番号：13801

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2011～2013

課題番号：23560287

研究課題名(和文) アルカリイオン混入シリコン酸化膜を用いた超小型振動発電素子の開発

研究課題名(英文) Development of a micro vibration energy harvesting device using silicon dioxide electret film including alkali ions

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) 4,100,000円、(間接経費) 1,230,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は、アルカリイオンを酸化膜に混入する独自に開発したシリコンMEMSデバイス用エレクトレット膜に関するものである。まずエレクトレット膜の帯電を制御するための研究を行い、帯電電圧が制御できること、帯電の終了判定ができること、帯電電圧の測定が静電型アクチュエータを用いてできること、最大400Vまで帯電できたことなどの成果を得た。また実際に振動発電素子を作製し、外部からの振動により発光ダイオードが点灯できることを示し、その発電量が0.85 $\mu$ Wであったことを示した。さらに帯電膜の信頼性評価を行い、-1dB劣化寿命が室温で30000年以上あることを示した。

研究成果の概要(英文)：This research focuses on a newly developed electret film that is made of silicon dioxide including potassium ions. We conducted experiments that aim control of charging property, and found that (1) the charging voltage is controllable, (2) the charging end detection is possible, (3) the charging voltage is measureable using electrostatic actuators, and (4) the maximum charging voltage is over 400V. We also fabricated a vibration energy harvesting device using the electret method and demonstrated LED illumination by 0.85 micro watts.

In addition, we examined accelerated aging tests of the electret film and evaluated -1dB voltage decay time; resulting in the charging voltage will be maintained over 30000 year at room temperature.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学・知能機械学・機械システム

キーワード：マイクロ・ナノデバイス マイクロマシン 環境技術 省エネルギー

1. 研究開始当初の背景

近年光や振動などの周辺環境のエネルギーを電気エネルギーに変換する素子の研究が益々盛んになってきている。特にミリメートルからセンチメートルオーダーの小型エネルギー変換素子を研究する Power MEMS と呼ばれる研究領域に多くの注目が集まっている。これらは主にセンサネットワーク用モジュールのメンテナンスフリー電源として期待されており、その実現は我々の生活に多大な恩恵をもたらす。例えば自然災害の早期発見や建築物の老朽化診断、さらには植物工場などの環境制御などである。高効率の小型発電素子としては太陽電池があるが、これは日照が必要条件であるためセンサ表面の汚れに対してメンテナンスを必要とする。そのため、超小型にした場合の発電素子としては使用条件が限られる。一方振動発電素子は、密閉されたケースに収められるので汚れに対するメンテナンスは不要であり、長期間において使用可能である。この特徴から、超小型振動発電素子の研究が多く行われるようになってきている。このような素子としては(株)オムロンと東京大学のグループが開発したテフロンベースのエレクトレット発電素子が有名であるが、さらに小型で量産性の高い振動発電素子がセンサネットワーク用電源としては求められている。このような状況の中、当研究室では、ミリメートルオーダーの超小型振動発電素子の実現を目標として、半導体微細加工技術で作製する櫛歯型振動子による発電素子の研究に着手した。その実現のブレークスルーは、基板に垂直なエッチング側面にどのように帯電膜を形成するかということである。櫛歯型振動子は、髪をとかす櫛のような形をした電極が2つかみ合さった構成であり、その電極と電極の間は、数 $\mu\text{m}$ のオーダーである。このような狭いギャップのエッチング側面に、簡単に帯電膜を形成することが課題であった。この課題解決のために、我々はシリコン酸化膜に混入するアルカリイオンに着目した。MOS型トランジスタでは、絶縁膜に利用するシリコン酸化膜中のアルカリイオンは、トランジスタの閾電圧をシフトさせるので混入することが最も避けられるべきものとして知られている。しかしこれを逆手にとれば、帯電したシリコン酸化膜が得られる可能性がある。さらに水蒸気を用いたシリコン酸化膜は、ミクロンオーダーの狭いギャップの側壁にも均一に形成されることが実験的に分かっている。そこで予備実験として、アルカリイオンを積極的に導入したシリコン酸化膜を作成し、その表面電位の測定を行ったところ、-35VのBT処理電圧に対して、BT処理直後には約10Vの表面電位が得られることが分かった。本研究はこのアルカリイオンを用いたエレクトレット法によって、振動発電

素子の実証を目指したものである。

2. 研究の目的

本研究は振動発電素子の開発を通して、アルカリイオンエレクトレット法を実用可能な技術として確立することにある。そのため次にあげる2つのテーマを明らかにすることを目的とした。

- (1) アルカリイオン混入シリコン酸化膜による発電素子の実証と、各種製造パラメータによる特性の違いの把握

櫛歯型振動子を作製したのち、アルカリイオン混入シリコン酸化膜を形成して、BT処理後によるMEMSデバイスへの帯電方式を確立する。そして素子の等価回路モデルと比較して、固定された電荷量を明らかにするとともに、振動発電素子を作製し発電できることを実証する。

- (2) アルカリイオンの長期固定手法の開発

エレクトレット膜を実用化するためには、帯電電位の長期信頼性を担保する必要がある。予備実験では、帯電表面電位は時間とともに徐々に減少してしまったので、帯電電位の減少を防ぐ手法を開発する。

3. 研究の方法

目的欄で述べたように、本研究は実際にMEMSデバイスを作製してエレクトレット膜の研究を行った。図1にエレクトレットMEMSデバイスの作製手順を示す。SOI (Silicon on Insulator) 基板にSiN膜を堆積した基板からスタートする。SiN膜はアルカリイオンを混入させる酸化時のマスクとして利用するもので、素子との電気コンタクトをとるパッド部にのみパターンニングして残す。その後SOI部にデバイス構造を深掘りエッチング技術で形成する。次に構造部をリリースするために基板裏面からエッチングし、埋め込み酸化膜層 (BOX層) をフッ酸で除去する。そして、アルカリ混入酸化を行い酸化膜を形成する。最後にパッド部のSiN膜をドライエッチングで除去する。

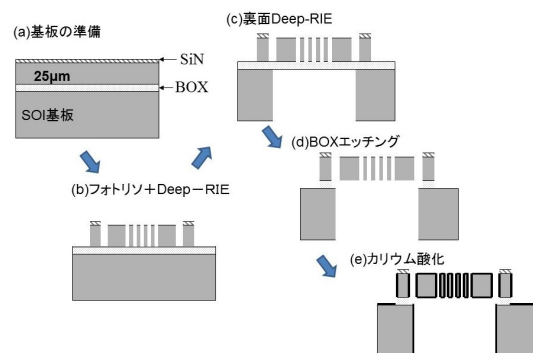


図1 アルカリイオンエレクトレット MEMS デバイスの作製方法

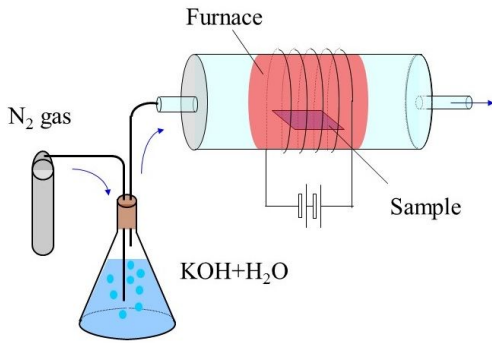


図2 アルカリ混入酸化の模式図

図2はアルカリイオン混入酸化の模式図である。窒素ガスをキャリアガスとしたバブリングによるウェット酸化と同じであるが、40wt%の水酸化カリウム水溶液を80℃にホットバスで加熱した液をバブリングする。SIMSによるカリウムイオンの含有量測定では、 $5 \times 10^{-17} \sim 1 \times 10^{-18}/\text{cm}^3$ 程度が酸化膜内に含まれていることが分かった。

このようにしてデバイスを作製したのち、エレクトレット膜の帯電特性等の評価をデバイスの特性を測定することで行った。

#### 4. 研究成果

##### (1) エレクトレット帯電のその場観察

カリウムイオンが混入した酸化膜をエレクトレット化するためには、デバイスをヒーターで加熱しながら電圧を印加する、いわゆる分極処理を行う必要がある。この分極処理中の櫛歯アクチュエータの変位変化を測定した。ターボ分子ポンプで真空にした真空チャンバ内(圧力  $1 \times 10^{-5}$ Torr程度)にシリコン基板を短冊状にしたヒーターを設置し、櫛歯アクチュエータを設置した。アクチュエータの変位は、分極用の直流電圧に1kHz、0.1Vppの交流を重畳させ、その交流電流が櫛歯間キャパシタンスの変位にほぼ比例することを利用して測定した。この交流電流測定はロックインアンプにより行った。図3に帯電過程をその場観察した結果を示す。

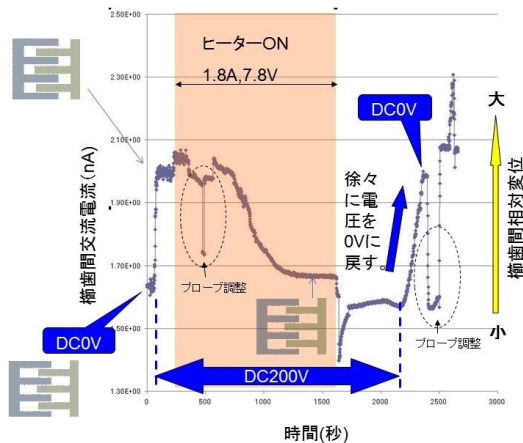


図3 帯電過程のその場観察。櫛歯アクチュエータ間を流れる交流電流をモニタリングしている。

まず帯電用の200Vの直流電圧を印加すると、櫛歯アクチュエータに静電引力が働くので櫛歯電極の重なりが大きくなり電流が増加する。次に電圧を印加したままヒーターで加熱すると、交流電流が徐々に減少していく。そしてほぼ直流電圧を印加するまでの電流レベルで飽和する。電流の減少がほぼなくなり安定したところでヒーターを切り、素子の温度が下がるまでしばらく待った後に直流電圧を0Vまで戻す。すると図3のように、最初に200Vを印加したレベルまで電流が増加する。これは電圧をかけたまま電流が減少し飽和した時点で、櫛歯間に静電引力が働かない、すなわち対向する両電極の電圧が同電位になったことを示しており、ヒーターを切って冷却をし印加電圧を除去しても、対向する電極側には200Vの電圧がそのまま残っていることを意味している。すなわち、このような計測で交流電流の飽和を観察すれば、帯電電圧の終了を判定でき、印加した電圧と同じエレクトレット電圧が得られることを示している。このようにアルカリイオンイオンエレクトレット法は、従来の電荷制御のエレクトレット法と異なり、帯電電圧を制御できるので、MEMSデバイスの性能を再現性よく担保するのに極めて優れている手法といえる。この帯電電圧を確認するために、櫛歯間交流電流印加電圧特性を測定した。図4にその結果を示す。

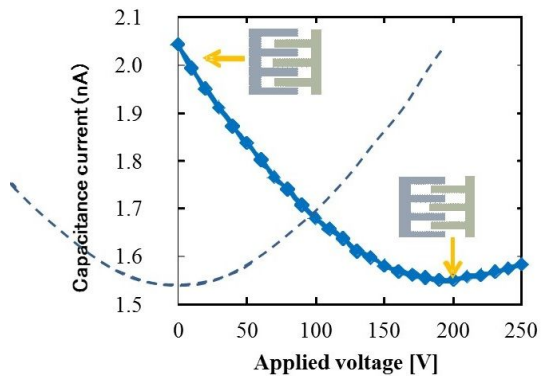


図4 櫛歯間交流電流と印加直流電圧の関係。

最初電圧を印加していない状態でも電位差があるために櫛歯電極間には静電引力が働いて、その結果静電容量は大きくなっている。しかし電圧を印加していくと逆に電位差が減少していくため徐々に静電容量は小さくなっていき、帯電電圧と同じ電圧を印加した時点で静電引力が働かなくなるため、静電容量は最小になる。さらに電圧を上げていくと再び電位差が生ずるため静電容量は増加に転じる。従って図4のような2次関数特性になって、その最小点が帯電電圧である。この結果から、帯電のために印加した電圧とほぼ同じ電圧にエレクトレット化されていることが明らかになった。このようにMEMS静電アクチュエータの特性を測定することで、エ

レトレットの帯電モニタリングや帯電電圧の測定が簡単にできることが分かった。次にエレクトレット帯電電圧が、通常の外部印加電圧と同様に静電 MEMS 素子のバイアス電圧として働くかどうか確認する実験を行った。これには外部バイアス電圧の印加なしに微小交流電圧を印加して、櫛歯アクチュエータの振動特性、すなわち共振 反共振特性を取得すればよい。図 5 に上述のように 200V に帯電した櫛歯アクチュエータの振動特性を示す。実際には櫛歯間短絡交流電流を測定している。図 5 に示すように、きれいな共振 反共振特性が得られており、エレクトレット電圧が静電アクチュエータのバイアスとして働いていることを示している。なお、この共振 反共振特性から計算される電気機械結合係数は 10%を超えており、高い電圧でエレクトレット化することで、外部バイアスなしでも極めてエネルギー変換効率のよい静電型 MEMS デバイスが得られることが分かった。なお現状得られている最大のエレクトレット電圧は、使用している装置の絶縁耐圧の関係で 400V であるが、さらに高い電圧の帯電も可能と思われる。

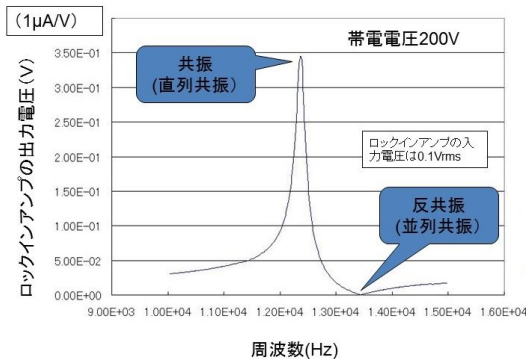


図 5 エレクトレット化した櫛歯アクチュエータの振動特性

### (2) 振動発電デバイスの実証

アルカリイオンエレクトレット法による振動発電の可能性を検証するため、図 6 に示すような振動発電素子を作製した。大きさは 16mm 角であり、カンチレバー型振動子にツリー状に櫛歯電極を配置した。図 6 に素子の全体写真と振動発電実験の装置構成を示す。振動発電素子の作製手順は図 1 と同じであり、帯電電圧は 80V である。振動発電素子の傍らには白色発光ダイオードがあり、振動発電素子と図 7 に示す回路で接続されている。振動

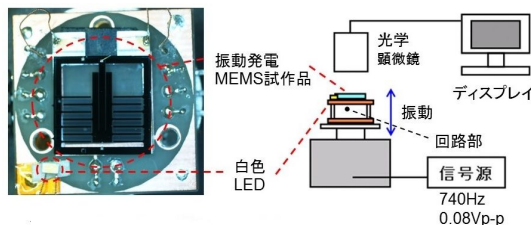
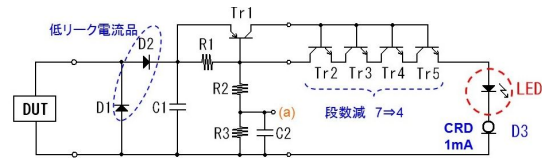


図 6 作製した振動発電素子と発電実験の構成図

発電素子は小さなボイスコイル状に設置され、振動発電素子の共振周波数 740Hz で 0.08Vpp の交流電圧でボイスコイルを振動させた。



D1, D2	BAS716 : 低リーク電流	Tr1	2SA1586
C1	0.1 uC	Tr2~5	2SC4116
R1	10 MΩ	LED	高輝度型
R2	100 MΩ	D3	E-102 : 1mA CRD

図 7 発光ダイオードの点灯実験に用いた回路

図 7 の回路は東大の鈴木らの実験回路を参考にしたものであり、振動発電素子が発生する電力を整流してコンデンサーに蓄え、Tr1 のトランジスタのベース・エミッタ電圧がターンオン電圧になるとコンデンサーに蓄えた電力を放出し LED が発光する仕組みになっている。図 8 に LED が点灯しているときの静止画を示す。このようにして本実験では 6 秒毎に LED が点滅した。点灯するときコンデンサーに蓄えられた電圧は約 7.15V であり、コンデンサー容量から計算されるエネルギーは 2.56 μJ である。電源がする仕事はこの 2 倍なので、6 秒間で 1 回点灯することから、発電量は約 0.85 μW である。これは目標にしていた 1 μW にかかなり近い値である。このようにアルカリイオンエレクトレット法による帯電膜でも振動発電素子の実現できることが実証された。



図 8 LED が点滅している様子。6 秒ごとに点滅した。

### (3) 帯電膜の長期信頼性

エレクトレット膜を実用化するためには、帯電膜の長期信頼性を担保する必要がある。そのため、まず加速試験を行ってカリウムイオンを導入した酸化膜エレクトレットの寿命予測を行った。本実験では SOI (Silicon On Insulator) 基板を用いて櫛歯型静電アクチュエータを作製し、基板表面温度 650 ~ 700 で 120V ~ 150V に帯電させた試験デバイスを用いて行った。試験デバイスの櫛歯電極間ギャップはアルカリイオンナノエレクトレット膜形成前で 2 μm であり、これに膜厚 480nm (デバイス ID:S01-007)、580nm(S01-022,025)、

900nm (S01-020) の 3 種類のエレクトレット膜を形成した。図 9 に 300 で行った加速試験による帯電電圧測定結果を示す。

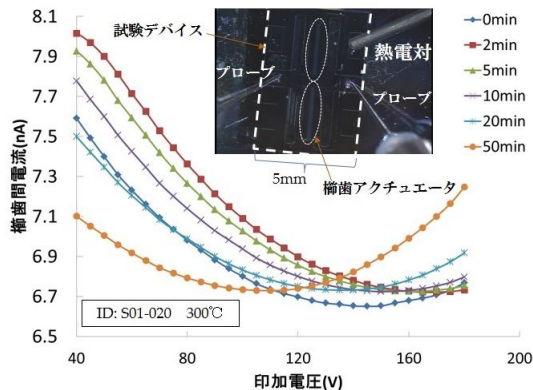


図 9 300 の加速試験による帯電電圧の測定例

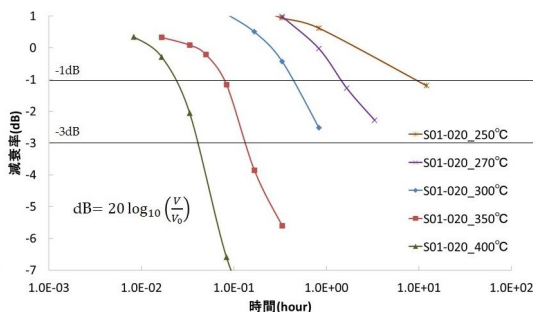


図 10 様々な温度における帯電電圧の劣化特性

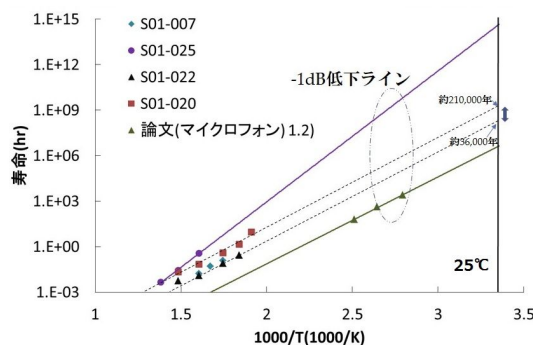


図 11 -1dB 劣化速度に関する寿命予測プロット

加速試験は真空雰囲気で行っており、温度計測は挿入写真に示すようにデバイス表面に熱電対をあてて測定した。図 10 には、270 から 400 で行った加速試験による帯電電圧の劣化特性をまとめたものを示す。このように温度が高いほど劣化速度も速くなる。これらの実験結果から、劣化速度がアレニウスの法則に従うと仮定して、-1dB 低下速度をプロットしたものが図 11 である。このグラフを室温まで外挿したときに予測される寿命はおおよそ 36000 年であることが分かった。大気中においては水分の影響のため表面のパッシベーションが必要である。無機系のパッシベーション膜を被覆して大気中に 150 で

放置したデバイスでは、少なくとも 400 時間以上帯電電圧の劣化はなく、保護膜により大気中でも十分信頼性が担保できる結果が得られている。

## 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 1 件)

T. Sugiyama, M. Aoyama, Y. Shibata, M. Suzuki, T. Konno, M. Ataka, H. Fujita, G. Hashiguchi, SiO<sub>2</sub> Electret Generated by Potassium Ions on a Comb-Drive Actuator, Appl. Phys. Express, vol. 4(2011)114103. (査読有)

[学会発表](計 17 件)

(1) H. Mitsuya, H. Ashizawa, T. Sugiyama, H. Fujita, G. Hashiguchi, ELECTRET-BASED LOW POWER RESONATOR FOR ROBUST PRESSURE SENSOR, 27th IEEE International Conference on Micro Electro Mechanical Systems (IEEE MEMS 2014 Conference), January 26-30, 2014, San Francisco, USA.

(2) T. Sugiyama, M. Aoyama, K. Kawai, G. Hashiguchi, VERY LOW POWER CONSUMPTION MEMS SCANNER WITH ALKALI ELECTRET COMB DRIVE, 27th IEEE International Conference on Micro Electro Mechanical Systems (IEEE MEMS 2014 Conference), January 26-30, 2014, San Francisco, USA.

(3) H. Hayashi, M. Suzuki, T. Sugiyama, G. Hashiguchi, ELECTROSTATIC MICRO TRANSFORMER USING POTASSIUM ION ELECTRET FORMING ON A COMB-DRIVE ACTUATOR, The 17th International Conference on Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems (Transducers2013), 16-20 June 2013, Barcelona, Spain.

(4) M. Suzuki, H. Hayashi, A. Mori, T. Sugiyama, and G. Hashiguchi, ELECTROSTATIC MICRO POWER GENERATOR USING POTASSIUM ION ELECTRET FORMING ON A COMB-DRIVE ACTUATOR, The 12th International Workshop on Micro and Nanotechnology for Power Generation and Energy Conversion Applications, Atlanta, Georgia, USA, December 2-5, 2012.

(5) Kentaro Yoshii, Gen Hashiguchi,

- Momoko Kememura, and Hiroyuki Fujita, Molecular Tweezers with Optical Fiber Function, OPTICAL MEMS & NANOPHOTONICS CONFERENCE, Banff, Alberta, Canada, August 6-9,2012.
- (6) Kentaro Yoshii, Tatsuhiko Sugiyama, Masato Suzuki, Hiroki Hayashi, Takashi Konno, Yasushi Shibata, Mitsuru Aoyama, and Gen Hashiguchi, Characterization of an electret comb-drive actuator as an energy harvesting device, 2012 Joint International Conference on Micromechatronics for Information and Precision Equipment, Santa Clara, California, USA, June 18-20,2012.
- (7) Shinji Ueki, Yuki Nishimori, Hiroshi Imamoto, Masakazu Sugiyama, and Gen Hashiguchi, EVALUATION OF THE RESONANCE FREQUENCY SHIFT OF VB-FET CAUSED BY JOULE HEATING AT THE CHANNEL, 2012 Joint International Conference on Micromechatronics for Information and Precision Equipment, Santa Clara, California, USA, June 18-20,2012.
- (8) Yuki Nishimori, Shinji Ueki, Masakazu Sugiyama, Seiji Samukawa, and Gen Hashiguchi, A NEW EXPERIMENTAL APPROACH TO EVALUATE PLASMA-INDUCED DAMAGE IN MICROcantilever, 2012 Joint International Conference on Micromechatronics for Information and Precision Equipment, Santa Clara, California, USA, June 18-20,2012.

など

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

出願状況 (計 3 件)

- (1) 名称：静電型変換装置及び DC-DC コンバーター  
発明者：鈴木雅人、林宏樹、橋口原、杉山達彦  
権利者：アオイ電子株式会社、静岡大学  
種類：特許  
番号：特許出願 2012-192113  
出願年月日：平成 24 年 8 月 31 日  
国内外の別：国内

- (2) 名称：アクチュエータ、シャッタ装置、流体制御装置、スイッチおよび 2 次元走査型センサ装置  
発明者：橋口原・鈴木雅人・森 昭登・杉山達彦・今本浩史・大場正利・三屋裕幸・芦澤久幸・石橋和徳  
権利者：国立大学法人静岡大学・アオイ電子株式会社・オムロン株式会社・株式会社鷺宮製作所  
種類：特許  
番号：特願 2013-165166  
出願年月日：2013 年 8 月 8 日  
国内外の別：国内
- (3) 名称：静電アクチュエータ及び電位差検出装置  
発明者：橋口原、杉山達彦  
権利者：国立大学法人静岡大学  
種類：特許  
番号：特願 2014-88379  
出願年月日：2014 年 4 月 22 日  
国内外の別：国内

取得状況 (計 0 件)

〔その他〕  
ホームページ等

6. 研究組織

- (1) 研究代表者  
橋口原  
静岡大学・電子工学研究所・教授  
研究者番号：70314903
- (2) 研究分担者  
なし
- (3) 連携研究者  
なし