

特集 無電解Ni-Pメッキを利用した容量結合型静電スイッチの作製*

A Novel Fabrication Process for Amorphous Ni-P Microstructure Using Electroless Plating and its Application to Electrostatically-actuated MEMS Switch

犬塚 肇

Hajime INUZUKA

菅見浩史

Hiroshi HAZUMI

松ヶ谷和沖

Kazuoki MATHUGATANI

永草誠治

Seiji NAGAKUSA

A novel fabrication process for microstructure is presented. Electroless plating process is used to form an amorphous Ni-P microactuator. A electrostatically-actuated MEMS switch with 14 μm wide capacitive gap was successfully fabricated using this process.

Key Words : Micromachine, Micromechanics, MEMS, Switching, Microwave, Micromechanical Switch, Plating, Electroless Plating, Amorphous, Switch

1. 序論

マイクロマシンはサイズが数ミクロンから数百ミクロンの可動部分と電子回路部分とを微細加工技術を基に融合した機械である。マイクロマシンという呼び方は日本でよく使われるが、欧米ではMEMS(Micro Electro Mechanical System)やマイクロメカニズムと呼ばれることが多い。ただし、MEMSと言えば通常は半導体集積回路の加工技術を用いて作られたデバイスを指すが、マイクロマシンには広義には微細加工技術を追求して従来の機械を微小化したものも含まれる。

本稿では、半導体集積回路技術の応用分野としての位置付けから、狭義のマイクロマシンであるMEMSという名称を用いる。MEMSは加速度センサや圧力センサなどセンサ分野を中心に実用化が進んでいる。MEMSの新しい応用分野として、マイクロ波やミリ波用のスイッチへの応用が検討されている^{1)~6)} MEMSは、多結晶Siを構造体として用いる場合が多い。高周波の切り替えにMEMSを用いる場合、容量結合の影響を抑制するため、構造体と伝送線路のエアギャップを大きくする必要が有る。多結晶Siを用いたMEMSでは、CVDのステップカバレージによる制約から、大きなエアギャップを得るのは困難である。更に、高温のプロセスを必要とするため、基板材料が限定される、熱応力の合わせ込みが難しいなどの課題が有る。

本研究の目的は、マイクロ波やミリ波用のスイッチへの展開を目的として、3 μm 以上のエアギャップを有する構造体の作製が可能なMEMSの作製方法を開発することに有る。

本研究では、ステップカバレージの良好な薄膜堆積方法としてメッキに着目し、無電解Ni-Pメッキによる構造体の作製を試みた。無電解Ni-Pメッキは、MEMSの構造体作製方法として、次のような利点を有している。

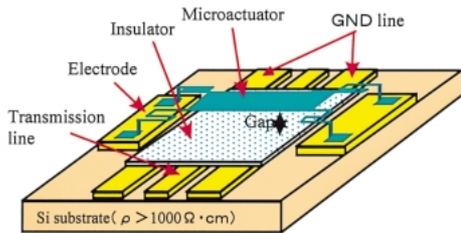
- 1)犠牲層の側面にも表面と同じ厚さの薄膜を堆積することができるためステップカバレージが良好であり、犠牲層を厚くすれば、いくらでもエアギャップの大きい構造体を作製できる。
- 2)メッキ条件を選ぶことにより、機械強度に優れたアモルファス金属を堆積可能である、
- 3)メッキ条件の調整により、応力を引っ張りから圧縮まで自由に変えることができる、
- 4)メッキは100℃以下の低温で行われるため、基板と構造体の熱膨張係数差に伴う熱応力が小さい、
- 5)作製工程に高温を必要としないため、基板材料の選択自由度が大きく、樹脂やガラスなどを用いることが可能である、
- 6)電解メッキのような通電が不要であるため、パターンへの制約が少ない。
- 7)多結晶SiをCVDで堆積する方法に較べて、設備・原料共に安価であり、大幅なプロセスコストの低減が期待できる。
- 8)Ni-Pは金メッキによる表面金属の置換が容易であるため、多結晶Siに較べて、接触抵抗や直列抵抗の低減が可能である。

本論文では、無電解メッキを利用した容量結合型静電スイッチの試作結果について報告する。

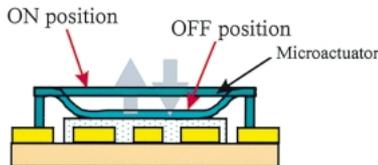
* 2000年6月6日原稿受理

2. 素子構造の検討

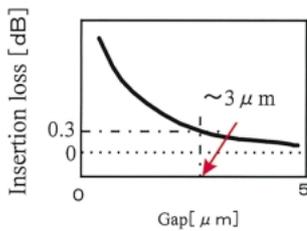
Fig.1は、今回、考案した容量結合型静電スイッチの概要である。基板上に伝送線路の両側をGNDラインが平行に走るコプレーナウェーブガイドが形成されている。ウェーブガイドの上に構造体が接触した場合に直流電流が流れないように絶縁層が形成されており、その上にエアギャップを隔てて制御電極の部分で支えられた構造体が配置されている。



(a) Conceptual illustration of MEMS switch



(b) Schematic view of microactuator operation



(c) Calculated insertion loss for 77GHz millimeter-wave as a function of gap

Fig. 1 Proposal of the MEMS switch

制御電極に直流電圧を印加するとGNDとの間に静電引力が働き、構造体が下降する。構造体と伝送線路及びGNDは対向電極構造のコンデンサとして機能するため、構造体が下降し、絶縁層に密着するとコンデンサの静電容量が増加する。そのため、ミリ波やマイクロ波などの高周波に対しては、インピーダンスが小さくなり、伝送線路とGNDの間が短絡された状態となり、高周波はスイッチの所で遮断される。

今回、77GHzのミリ波に対するスイッチ部でのON時の損失を0.3dB以下とすることを目標としたため、構造体と伝送線路とのエアギャップは $3 \mu\text{m}$ 以上とすることにした。

3. 実験

3.1 無電解Ni-Pメッキ層の評価

構造体を作製するに当たり、無電解メッキ層の組成及び結晶構造、応力を評価した。無電解メッキ液として、奥野製薬のトップニコロン(SA-98-M + SA-98-I)を使用した。

メッキ層の組成はXPSにより評価し、結晶構造はX線回折で評価した。応力の方向は、三次元形状測定装置(Zygo)により測定した構造体の形状から推定した。比較のため(NiCl₂+NiSO₄+ホウ酸)電解メッキ液によるNi構造体も作製し、その特性を評価した。

3.2 容量結合型静電スイッチの作製

Fig.2は静電スイッチの作製工程である。高抵抗Si(111)基板($\rho = 1800 \Omega \cdot \text{cm}$)の上に、以下の手順で静電スイッチを形成した。

1) Au/Ti伝送線路形成 (Fig.2(a))

Si基板表面を熱酸化後、伝送路を形成する部分のSiO₂をフォトリソグラフィ及びバッファ・フッ酸でエッチングした後、リフトオフ法によりAu(400nm)/Ti(60nm)伝送線路を形成した。

2) Si₃N₄絶縁層形成 (Fig.2(b))

プラズマCVDにてSi₃N₄を100nm堆積後、フォトリソグラフィ及びCF₄によるドライエッチングで不要な部分を除去した。

3) Cu犠牲層形成 (Fig.2(c))

犠牲層として、厚さ $6 \mu\text{m}$ の銅を蒸着した。その後、フォトレジストで構造体の足を形成する部分が開口したパターンを作製し(塩化アンモン第2銅+アンモニア)混合液で銅をエッチングした。

4) Ni-P無電解メッキ (Fig.2(d))

フォトリソグラフィにより、構造体形成部分に開口部を有するパターンを厚膜レジストで形成した後、以下の手順で無電解メッキを行い、Ni-Pを堆積した。

(1) 脱脂: OPCクリーナー使用(25℃, 1 min),

(2) 活性化: 硫酸(25℃, 1 min)

(3) 触媒付与: ICPアクセラ使用(25℃, 1分)

(4) 無電解メッキ: 奥野製薬製トップニコロン使用(SA-98-M + SA-98-I, 90℃, 1分)

(5) 水洗

5) 犠牲層除去 (Fig.2(e))

レジスト剥離後、銅を(塩化アンモン第2銅+アンモニア)混合液で除去した。

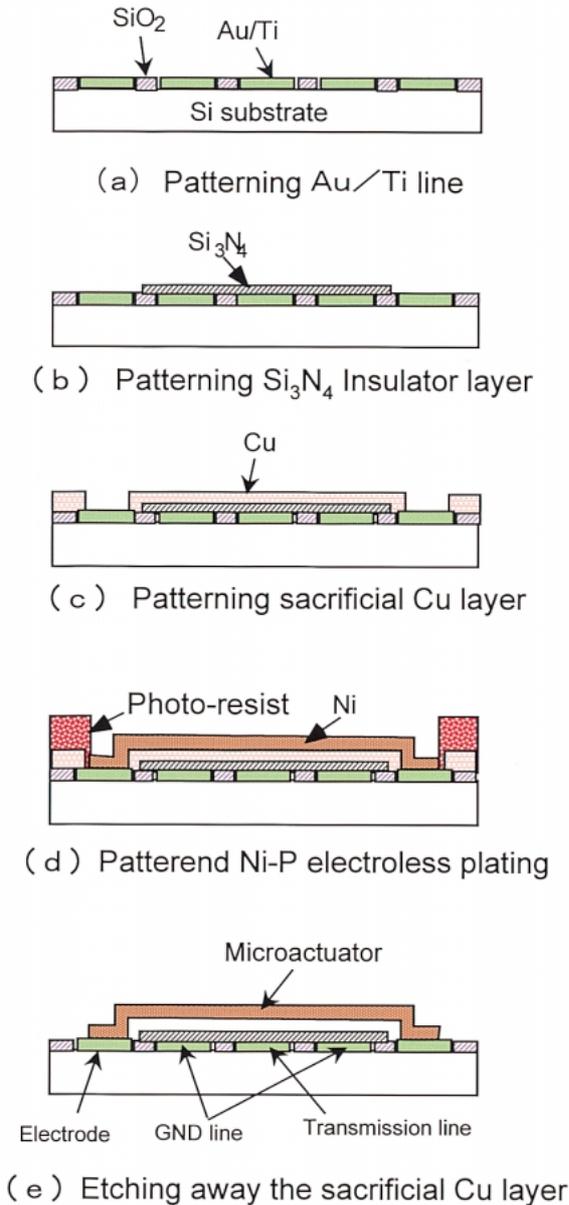


Fig. 2 Fabrication process of MEMS switch

3.3 静電スイッチの動作確認

制御電極へ 0 ~ 50 V の電圧を印加し、構造体の変形の様子を観察した。形状の観察には、3次元形状測定装置(Zygo)、変位置の測定には、表面形状測定顕微鏡(キーエンス製)を使用した。

4. 実験結果

4.1 無電解Ni-Pメッキ層の評価

XPSによる測定から、無電解メッキで堆積したNi-Pの組成比はNi_{0.8}P_{0.2}と推定した。Fig.3は、Ni-P構造体の形状観察結果である。無電解メッキで作製した構造体は膜厚が4.6 μmで、平坦な形状をしており、その曲率は1 × 10⁻¹¹ [m⁻¹]以下である。

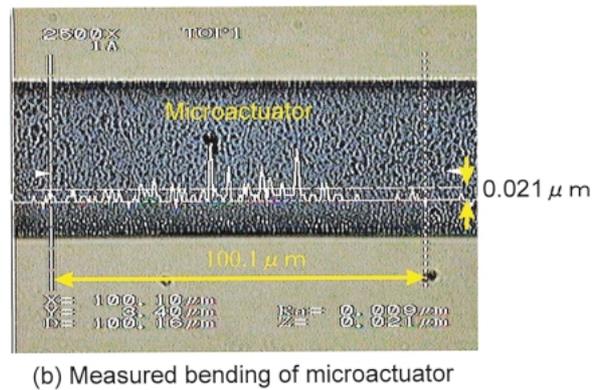
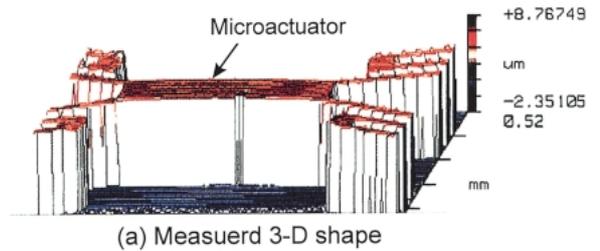
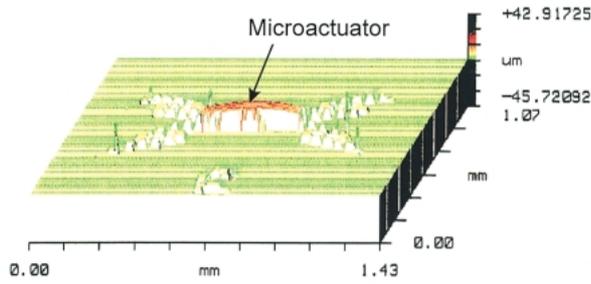


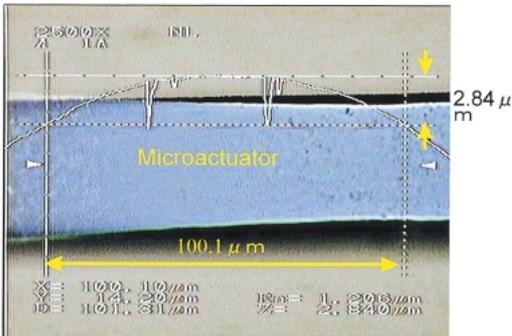
Fig. 3 Electroless plated Ni-P microactuator

Fig.4は、比較のために電解メッキで作製したNi構造体の形状観察結果である。電解メッキで作製したNi構造体は、膜厚が3.8 μmで、凸型に変形しており、その曲率は2 × 10⁻⁹ [m⁻¹]と大きい。

Fig.5は、電解メッキで堆積したNiと無電解メッキで堆積したNi-PのX線回折結果である。電解メッキで堆積したNiはNi(111)及びNi(200)による回折ピークが現れており、多結晶構造となっていることが分かる。一方、Ni-PはNi(111)の位置に微弱でブロードな信号が出ているのみである。



(a) Measurd 3-D shape



(b) Measured bending of microactuator

Fig. 4 Electro plated Ni microactuator

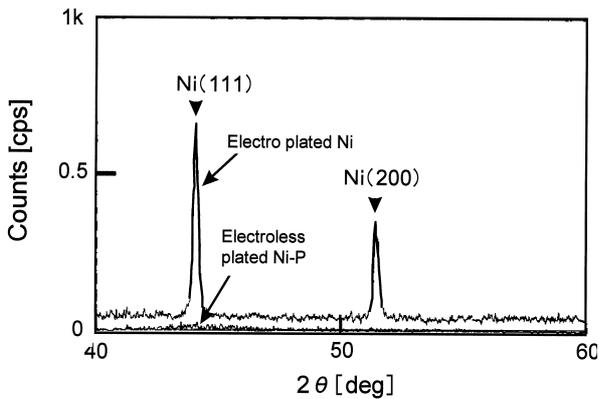


Fig. 5 X-ray diffraction from Ni-P and Ni layer

4.2 容量結合型静電スイッチの作製と動作確認

Fig.6は、静電スイッチ試作品の外観写真である。表面形状測定顕微鏡で測定した構造体の厚さは $7.3\mu\text{m}$ 、構造体と伝送線路間のエアギャップは $14\mu\text{m}$ であった。

Fig.7は、制御電極とGND間への印加電圧と構造体の動作特性である。制御電極に 35V の電圧を印加することにより構造体を伝送線路表面に接触させることができた。

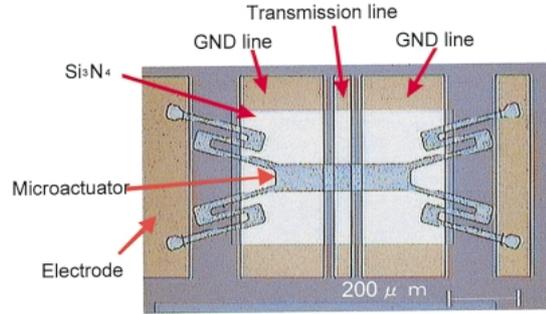


Fig. 6 Top view photo of a fabricated MEMS switch

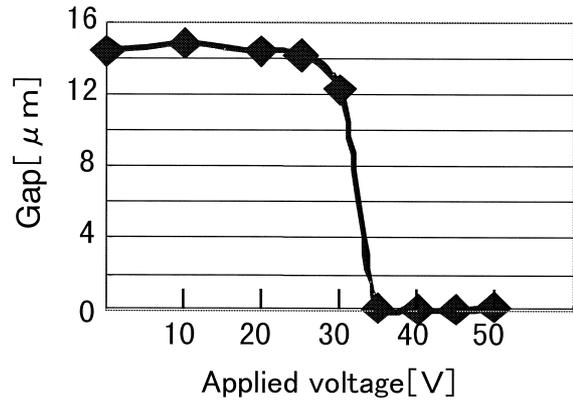
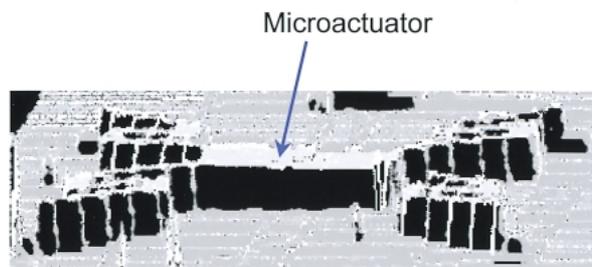
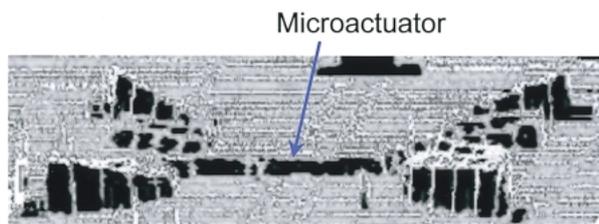


Fig. 7 Measured gap as a function of applied voltage

Fig.8は、制御電圧を印加する前と後の構造体の変形を3次元形状測定装置で観測した結果である。電圧印加により、構造体が伝送線路側に接触していることが分かる。



(a) Applied voltage = 0[V]



(b) Applied voltage = 50[V]

Fig. 8 Measurd 3-D shape of microactuator

5. 考察

5.1 無電解Ni-Pメッキ層の評価

Fig.3及びFig.4の形状観察結果より，無電解メッキにより形成したNi-P構造体は平坦であり，内部応力が低いのに対し，電解メッキにより形成したNi構造体には大きな圧縮応力が働いているものと推定される．

$$\sigma = E \cdot h \cdot \frac{1}{2} \kappa \quad (\sigma: \text{応力}, E: \text{ヤング率}, h: \text{構造体の厚さ}, \kappa: \text{曲率})$$

の関係を用いて，構造体の内部応力を推定した．なお，アモルファスNi-Pのヤング率は，不明であるため，計算に際しては，Niのヤング率(199GPa)で代用した．

電解メッキにより形成したNi構造体は，900 [MPa]程度の圧縮応力が加わっていると推定されるのに対し，Ni-P構造体の内部応力は4 [MPa]以下と小さい．

Fig.5のX線回折結果において，電解メッキで堆積したNiはNi(111)及びNi(200)による回折ピークが現れており，多結晶構造であることを示しているのに対し，無電解メッキで堆積したNi-PはNi(111)の回折位置周辺に微弱でブロードなピークが現れているだけであり，アモルファス構造が得られたことを示している．

無電解メッキにより堆積したNi-Pは，その結晶構造及び内部応力がP濃度と密接に関係しており，P濃度が低い場合には多結晶となるが，P濃度が8%を越えた辺りから，アモルファス構造となり，P濃度が8~15%で応力が極小となる⁷⁾ことと今回の結果は対応している．Ni-PのP濃度をこの領域になるようにメッキ条件を選ぶことで，機械強度と低応力を両立できるものと考えられる．

5.2 容量結合型静電スイッチの作製と動作確認

電圧印加により構造体に変形し，絶縁層に接触することを確認することができた．ONからOFFに切り替わる電圧が35 [V]と高いが，構造体の厚さ及びエアギャップの大きさを小さくすることで，駆動電圧の低減が可能と考えられる．今回の試作では，Ni-Pの堆積速度が速いため，膜厚の制御が難しかった．メッキ条件を調整し，堆積速度を下げることで膜厚の制御性を向上させる必要がある．

Fig.9は，本静電スイッチを用いて2分岐の回路セレクタを作製した応用例である．構造体作製と同一工程でエアブリッジの作製も可能である．

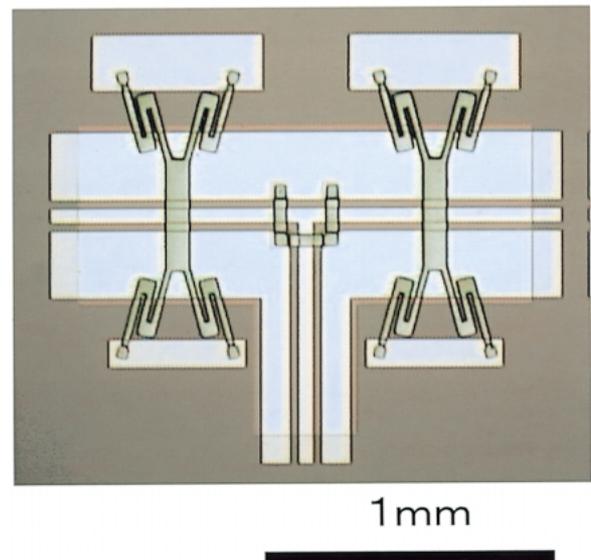


Fig. 9 SPDT MEMS switch

6. まとめ

大きなエアギャップを有するMEMSを作製するため，無電解メッキによるアモルファスNi-Pの堆積を利用したマイクロマシンの作製方法を開発した．本手法は，簡単な工程で，機械強度に優れたアモルファスNi-P構造体を形成でき，高温のプロセスも不要であるため，基板などの素材の選択に対する自由度も大きいなどの特長を有している．

本手法を用いてミリ波用の容量結合型静電スイッチを試作し，制御電圧印加による構造体の動作を確認した．本手法は，ミリ波スイッチのみならず，センサや各種アクチュエータなど多様に渡るMEMSの作製に適用可能と考える．

<参考文献>

- 1) J.Jason Yao, Frank Chang, The 8th International Conference on Solid-State Sensors and Actuators, and Eurosensors IX, p.384 ~ 387(1995)
- 2) C.Goldsmith, J.Randall, S.Eshelman, et al, 1996 IEEE MTT-S Digest, p.1141 ~ 1144(1996)
- 3) Hector J.De Los Santos, Yu-Hua Kao, et al, IEEE Aerospace Conference, Vol.3, p.235 ~ 254(1997)
- 4) Leslie A. Field, Richard C.Ruby, United State Patent, Patent Number 5,467,067(1995)
- 5) John N.Randall, Chuck Goldsmith, David Dennuston, Tsen-Hwang Lin, J.Vac.Sci.technol. B 14(6) p.3692 ~ 3696(1996)
- 6) Paul M.Zavracky, Nicol E.McGruer, Richard H.Morri-

son, Gregory Jenkins, Keith Warner, Proc. Sens. Expo.

Detroit, p.293 ~ 298(1997)

- 7) 無電解メッキ - 基礎と応用 - 日本鍍金研究会編(日刊工業新聞社), p.36



< 著 者 >



犬塚 肇
(いぬづか はじめ)

生産技術開発部
薄膜材料及び, その評価解析技術
の開発に従事.



松ヶ谷 和沖
(まつがたに かずおき)

基礎研究所 第2研究
ミリ波デバイスの開発に従事.



管見 浩史
(はずみ ひろし)

開発部
ミリ波応用システムの開発に従事.



永草 誠治
(ながくさ せいじ)

基礎研究所 研究企画室
半導体プロセスの開発に従事.