

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24年 5月 7日現在

機関番号：11301

研究種目：若手研究（B）

研究期間：2010～2011

課題番号：22710119

研究課題名（和文）導電性ソフトマテリアルを用いた長寿命・高信頼性 RF - MEMS スイッチの研究

研究課題名（英文）Research on robust and reliable RF-MEMS switch using conductive soft material

研究代表者

吉田 慎哉（YOSHIDA SHINYA）

東北大学・原子分子材料科学高等研究機構・助教

研究者番号：30509691

研究成果の概要（和文）：

本研究では、導電性ソフトマテリアルの柔軟性や機械特性を調査し、RF-MEMS スイッチの接点部への応用可能性を検討した。また、エッチングダメージを受けた単結晶シリコンの破壊強度の向上化技術の開発を試みた。研究の結果、導電性高分子であるポリアニリン薄膜は、ヤング率約 5GPa の柔軟性を有しており、金属との凝着力も少ないことが実証された。また、適切な条件下での水素アニール処理によって、エッチングによってシリコン構造体表面に形成された凹凸部は、容易に平滑化できることが実証された。

研究成果の概要（英文）：

In this study, the flexibility and mechanical property of a conductive soft material was evaluated in order to investigate its application possibility to RF-MEMS switch. In addition, process technology for improvement of fracture strength of the single crystal silicon which was damaged by etching process was developed. As a result, Young's modulus of a thin polyaniline film as a conductive polymer measured approximately 5 GPa, and the adhesion force to metals was evaluated to be relatively low. Furthermore, it was demonstrated that hydrogen annealing in appropriate condition can lead to flattening of the asperity of the silicon surface due to etching damage.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	2,000,000円	600,000円	2,600,000円
2011年度	1,200,000円	360,000円	1,560,000円
年度			
年度			
年度			
総計	3,200,000円	960,000円	4,160,000円

研究分野：工学

科研費の分科・細目：ナノ・マイクロ科学 ・マイクロ・ナノデバイス

キーワード：MEMS、RF スイッチ、導電性高分子

1. 研究開始当初の背景

RF-MEMS (Radio Frequency Micro Electro Mechanical System: 高周波微小電気機械システム) スイッチは、MEMS アクチュエータに

よって電極部を機械的に動作させて物理的に回路接続の ON/OFF を行っているため、従来の半導体スイッチと比較して低損失、高アイソレーション、低電力動作という利点を有

している。また、マイクロファブリケーション技術によってスイッチ構造は小型化されるため、高効率かつ低消費電力でのスイッチングも実現できる。これらの利点から、RF-MEMS スイッチは携帯電話や無線通信用部品、半導体テスターなどへ一部実用化されており、今後ますます幅広い分野へ応用されていくことが期待されている。しかし、RF-MEMS スイッチは、スイッチング回数が半導体スイッチに比べて短く、耐久性や信頼性が問題となっている。

オーミック接触型 RF-MEMS スイッチにおける故障の原因の一つは、金属接触面の劣化である。度重なるスイッチングによって電極表面に繰り返しストレスが加わり、電極表面に金属疲労が生じてしまう。その結果、表面形状が粗くなったり空孔が発生したりして接触抵抗が増大する、もしくはパーティクルが発生して動作不良を引き起こす。したがって、接触時のストレス緩和が MEMS スイッチの信頼性向上において重要である。

また、現在のほぼ全ての MEMS はシリコン構造体から構成される。単結晶シリコンはクリープがなく、疲労にも強い。そして、その理想機械強度は金属などをはるかに凌駕する。しかし脆性材料であるために、応力集中によって発生した亀裂は直ちに伝播し、容易に破壊に至る。この応力集中は、マスク荒れやノッチング、反応性深堀エッチングの際のスキヤロップといったナノスケールの損傷や、プラズマによるシリコン表面近傍の原子欠陥の発生といった原子スケールの損傷に起因すると考えられる。このようなシリコンの損傷を修復する技術を確認することは、MEMS スイッチや他のデバイスの信頼性を向上させることができると考えられる。

そこで本研究では、導電性高分子などの導電性ソフトマテリアルを RF-MEMS スイッチの電極部へ利用することを提案する。また、微細加工時にシリコンに生じた損傷の新しい修復技術の開発を行う。

2. 研究の目的

本研究では、導電性ソフトマテリアルの柔軟性や機械特性を調査し、RF-MEMS スイッチの接点部への応用可能性を検討する。また、エッチング処理によって低下してしまった単結晶シリコンの破壊強度を向上化させることを試みる。本研究の目的は、本研究の提案する手法によって、高信頼性、高耐久性、長寿命の MEMS スイッチの実現可能性を検討することである。

3. 研究の方法

(1) 導電性高分子の接着性や弾性特性などの化学的・機械的特性の評価とその評価法の確立

導電性ソフトマテリアルの候補の一つとして、導電性高分子が挙げられる。導電性高分子は良好な導電性を持ち、また配向性やドーパントを適切に制御することで金属に匹敵する導電性を達成することができる。しかし、導電性高分子薄膜の機械的特性はこれまでほとんど報告されていない。

本研究では、導電性高分子としてポリアニリンを選定した。実際のスイッチ接点部への適用を考えた場合、低抵抗値を実現するためには、極めて薄いポリアニリン薄膜を不活性な金属表面に形成することが合理的であると考えられる。ゆえに、まず、金表面へのポリアニリン薄膜形成法の開発を行った。次に、走査型プローブ顕微鏡 (SPM) を用いて薄膜の機械的特性を評価した。

(2) 水素アニールによるエッチングダメージの修復効果の調査

本研究では、シリコンのエッチングダメージの修復法として、水素アニール処理を検討した。減圧下での水素アニール処理は、シリコン原子の表面拡散を促進する。これによって、原子レベルのシリコン平滑面が形成される。この処理を用いることで、構造体に形成されたエッチングダメージに起因する応力集中箇所を取り除けると考えられる。

実験では、まず、深堀反応性エッチング (DRIE) によってシリコン構造体を作製した。次に、その構造体に対して水素アニール処理を施し、形成されたエッチングダメージが取り除かれるアニール条件を見出した。そして、水素アニール処理を行った場合と行わなかった場合のシリコン構造体の破壊強度を調査することで、水素アニール処理のダメージ修復効果を調査した。

4. 研究成果

(1) 導電性高分子の接着性や弾性特性などの化学的・機械的特性の評価とその評価法の確立

まず、スピコート法によってポリアニリンを薄膜化することを試みたが、その分子鎖の強い凝集力によって均一な薄膜を形成することが困難であった。そこで、表面グラフト重合法を用いて金電極上にポリアニリン薄膜を形成した。その結果、膜厚30nm程度の均一なポリアニリン薄膜の成膜に成功した。

次にSPMによってフォースカーブ分布像を取得し、それを解析することでマイクロ・ナノスケールでの弾性特性を評価した。実験結果を図1に示す。トポグラフィ像から、グラフト化ポリアニリン薄膜は、直径100nm程度の

グレインから構成されており、グレインの凸部ほどヤング率が大きいことがわかった。取得したヤング率分布像のヒストグラムから、このポリアニリン薄膜のヤング率の平均値は、ポリメチルメタクリレートと同程度(約5GPa)であることがわかった。また、金属との凝着力も少ないことが実験からわかった。これは、ポリアニリンは、柔軟なスイッチ接点部として使用できる可能性を有していることを示している。

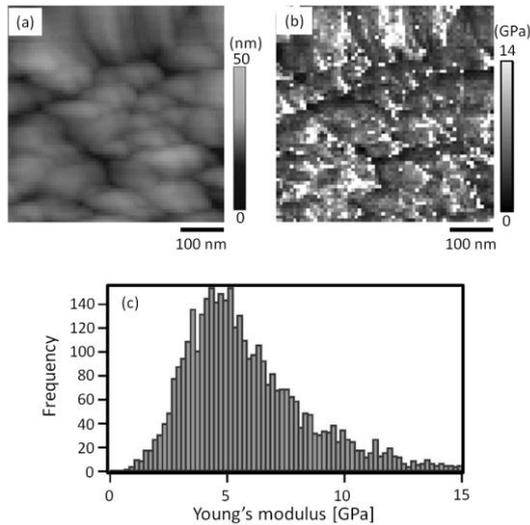


図1. (a) 表面形状像 (b) ヤング率分布像 (c) ヤング率分布像のヒストグラム

(2) 水素アニールによるエッチングダメージの修復効果の調査

図2に、水素アニール処理前後のシリコン構造体の表面形状観察像を示す。シリコン構造体は、SOIウエハのデバイス層に形成した。角部の曲率半径は、水素アニール処理によって約2.2 μ mまで増大した。また、DRIE前に見られたノッチングも、水素アニール処理によって滑らかな表面になっていることがわかる(図2a)。側壁部においては、DRIEプロセスによって生じたスキヤロップが平坦化されていることがわかる(図2b)。

次に、破壊試験試料を作製し、ねじり破壊試験を行った。その結果、水素アニールを行っていないサンプルは平均最大振れ角が $\pm 19^\circ$ であったのに対し、水素アニールを行った試料は、平均最大振れ角が $\pm 10^\circ$ であった。すなわち、水素アニール処理によってシリコン構造体の破壊強度が大幅に低下したという結果となった。この原因を調査するためにX線トポグラフィ(XRT)像を取得し、歪み場の観察を行った(図3)。図より、水素アニール処理によって歪み場が発生していることが分かった。一般的に、歪み場は結晶内での転移

や結晶欠陥などの存在を示す。このことから、水素アニール処理は、凹凸形状の平滑化は達成できる一方で、原子レベルの欠陥を発生させる原因となりうるということが判明した。

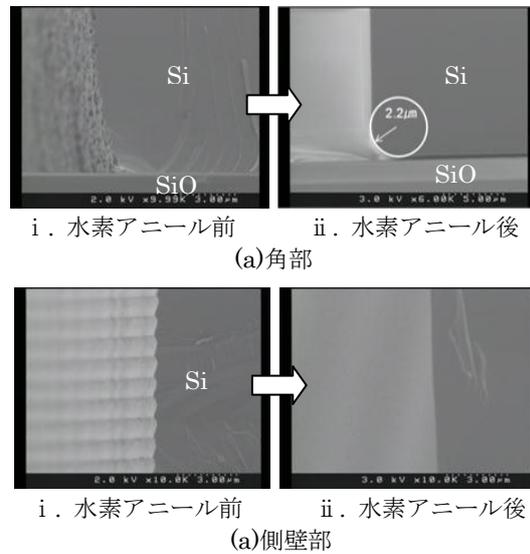


図2. 水素アニールの表面平滑化効果

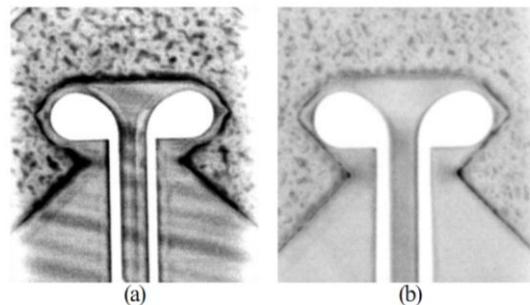


図3. X線トポグラフィ像 (a)水素アニール有 (b)水素アニール無

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5件)

1. Shinya Yoshida, Tatsuya Kobayashi, Masafumi Kumano, Masayoshi Esashi, "Conformal coating of poly-glycidyl methacrylate as lithographic polymer via initiated chemical vapor deposition", Journal of Micro/Nanolithography, MEMS, and MOEMS, 2012年, 掲載決定済み, 査読有り
2. Ali A. Golriz, Tassilo Kaule, Jeannine Heller, Maria B. Untch, Philipp Schattling, Patrick Theato, Masaya Toda, Shinya Yoshida, Takahito Ono, Hans-Jürgen Butt, Jochen Stefan Gutmann and Rüdiger Berger, "Redox active polymers with phenothiazine moieties

for nanoscale patterning via conductive scanning force microscopy.”, Nanoscale, 3(12), (2011), 5049-5058, 査読有り

3. Shinya Yoshida, Takahito Ono and Masayoshi Esashi, “Local electrical modification of a conductivity-switching polyimide film formed by molecular layer deposition.”, Nanotechnology, 22, (2011), 335302, 査読有り
4. Hideaki Yanagida, Shinya Yoshida, Masayoshi Esashi, Shuji Tanaka, “Etching Technology Using Ozone for Chemically Stable Polymer in MEMS.”, IEEJ Transactions on Sensors and Micromachines, 131(3), (2011), 122-127, 査読有り
5. Shinya Yoshida, Takahito Ono, Masayoshi Esashi, “Deposition of conductivity-switching polyimide film by molecular layer deposition and electrical modification using scanning probe microscope.”, Micro & Nano Letters, 5(5), (2010), 321-323, 査読有り

[学会発表] (計 1 1 件)

1. 熊野勝文, 西野仁, 吉田慎哉, 田中秀治, 江刺正喜, “複合酸化物と貴金属のための多元系原子層堆積装置の開発”, 第 59 回応用物理学関係連合講演会, 東京, 2012 年 3 月 15~18 日
2. 羽鹿亮, 吉田慎哉, 牧志渉, 金森義明, 江刺正喜, “水素アニール処理のシリコンの破壊強度に与える影響”, 第 59 回応用物理学関係連合講演会, 東京, 2012 年 3 月 15~18 日,
3. 原島卓也, 吉田慎哉, 江刺正喜, 田中秀治, “MEMS 用難除去性高分子材料の高速除去のための蒸気オゾンエッチング装置の開発”, 日本機械学会東北支部第 47 期総会・講演会, 仙台, 2012 年 3 月 13 日,
4. Nan WANG, Shinya YOSHIDA, Masafumi KUMANO, Yusuke KAWAI and Masayoshi ESASHI, “Fabrication of High-aspect-ratio PZT Structure by Nanocomposite Sol-gel Method for Laterally-driven Piezoelectric MEMS Switch”, 7th Annual IEEE International Conference on Nano/Micro Engineered and Molecular Systems IEEE-NEMS 2012、Kyoto、2012 年 3 月 5 日~8 日
5. Shinya Yoshida, Tatsuya Kobayashi, Masafumi Kumano, and Masayoshi Esashi “Conformal Coating of Lithographic Polymer on 3D Structure via Initiated Chemical Vapor Deposition for MEMS fabrication”, The 2012 WPI-AIMR Annual

Workshop, Sendai, 2012 年 2 月 20 日~23 日

6. 王楠, 吉田慎哉, 熊野勝文, 江刺正喜, “面内方向駆動型圧電 MEMS スイッチのための Si 鋳型を用いた高アスペクト比 PZT 構造体の作製法の開発”, 第 3 回マイクロ・ナノ工学シンポジウム, 東京, 2011 年 9 月 26 日~27 日
 7. S. Yoshida, T. Kobayashi, M. Kumano, and M. Esashi, “CONFORMAL COATING OF POLY(GLYCIDYL METHACRYLATE) AS A LITHOGRAPHIC POLYMER BY INITIATED CHEMICAL VAPOR DEPOSITION.”, The 16th International Conference on Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems, Transducers’11, 中国, 北京, 2011 年 6 月 5 日~9 日
 8. Shinya Yoshida, Takahito Ono and Masayoshi Esashi, “Electrical modification on a conductivity-switching polyimide film formed by molecular layer deposition using scanning probe microscope.”, The 2011 WPI-AIMR Annual Workshop, 仙台, 2011 年 2 月 21 日~24 日
 9. 柳田秀彰, 吉田慎哉, 江刺正喜, 田中秀治, “MEMS 用難除去高分子材料のオゾンエッチング”, 第 27 回「センサ・マイクロマシンと応用システム」シンポジウム, 島根 2010 年 10 月 14 日~15 日
 10. Shinya Yoshida, Takahito Ono, Masayoshi Esashi, “Deposition of a conductivity-switching polyimide film by molecular layer deposition and electrical modification using scanning probe microscope”, The 36th International Conference on Micro & Nano Engineering, イタリア, ジェノバ, 2010 年 9 月 19 日~22 日
 11. Shinya Yoshida, So Fujinami and Masayoshi Esashi, “Investigation of Frictional and Elastic Properties of a Conductive Polymer Brush by Atomic Force Microscopy for MEMS Probe-Based Data Storage System.” 5th Asia-Pacific Conference on Transducers and Micro-Nano Technology (APCOT2010), オーストラリア, パース, 2010 年 7 月 6 日-9 日,
6. 研究組織
(1) 研究代表者
吉田 慎哉 (YOSHIDA SHINYA)
東北大学・原子分子材料科学高等研究機構・助教
研究者番号: 30509691
(2) 研究分担者 なし