

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 25 年 4 月 18 日現在

機関番号：15301

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2010～2012

課題番号：22560142

研究課題名（和文）

RF-MEMS スイッチ接点電極材料へのカーボンナノチューブ薄膜の適用

研究課題名（英文）

Applications of carbon nanotube films to contact materials of RF-MEMS switch

研究代表者

木之下 博 (Hiroshi KINOSHITA)

岡山大学・大学院自然科学研究科・准教授

研究者番号：50362760

研究成果の概要（和文）：

MEMS 技術を応用した超小型高周波信号デバイスである RF-MEMS スイッチの接点電極は、マイクロ荷重でも十分低い接触抵抗を必要としている。本研究では、カーボンナノチューブ(CNT)薄膜を用いることで、マイクロ荷重で低接触抵抗を達成することを目的としている。実験の結果、CNT 薄膜単独では接触抵抗が高いが金薄膜を蒸着すること、CNT を基板に対して水平に配向させることで接触抵抗を下げられることが明らかとなった。

研究成果の概要（英文）

Radio-frequency microelectromechanical systems (RF MEMS) switches have potentially superior electrical properties. There are problems with the electrical contacts: The mechanical relay switches in RF MEMS switches are micro-sized, and so the contact electrodes must be considerably smaller (less than 100 μm^2). In order to solve the problem, we used carbon nanotube (CNT) films as contact materials under micro loads. Although CNT films have high contact resistances, Au film depositions on CNT films and horizontal alignment of CNTs decrease contact resistances.

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	1,700,000	510,000	2,210,000
2011年度	800,000	240,000	1,040,000
2012年度	800,000	240,000	1,040,000
総計	3,300,000	990,000	4,290,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学 設計工学・機械機能要素・トライボロジー

キーワード：RF MEMS, カーボンナノチューブ薄膜, 接触抵抗, 凝着力, 接点電極

1. 研究開始当初の背景

RF-MEMS はシリコン SOI ウェハの犠牲層エッチングで作製した可動ビームと基板にそれぞれ駆動電極と接点電極が形成されている。接点の ON は駆動電極に電圧を印加することによって静電引力を発生させ、可動ビームを基板側に引き付け、接点電極を接触させて行う。構造上は通常サイズの電気リレーと類似であり、典型的な大きさは数 mm 角である。半導体スイッチと比較し、OFF 時には物

理的に絶縁されているため漏れ電流が殆ど無く(高アイソレーション)、ON 時には抵抗値が非常に小さく、特に高周波信号に対して損失が非常に小さい(低挿入損失)。

しかしながら、(A)微小サイズゆえに接点電極面積が十分でなく、それに加えて(B)可動ビームの微小な荷重が相乗効果になって下記の問題点を含んでいる。(1)電流値(数 mA 程度)を確保するため、さらなる小型化を困難にしている((A)さらに(B)によって真実接

点面積が増加できないことが起因). (2) 通電しながら接触させるので接点電極が固着し ON のままになる (B) に起因). またこれら以外の大きな問題として, (3) ON-OFF 回数が増加すると接点が劣化し, 接点が得られなくなる (低耐久性、現状で数億回程度 (間接的に (B) に起因)) が挙げられる。現在、接触電極材料に金やルテニウム, それらの合金を使用し問題点を解決が試みられているが、十分な結果は得られていない。

一方, CNT は柔軟かつ強靱で, 非常に高い電気導電性 (銅の数倍以上) を有する。多数の CNT を基板上に生成し薄膜状にしたものを CNT 薄膜と称しており, 研究代表者 (木之下博) は CNT 薄膜のマイクロトロジー特性について精力的に実験を行っている。その結果, CNT 薄膜と各種金属の間に凝着力はほとんど存在せず, 耐摩耗性にたいへん優れ, かつ非常に柔軟であり, 計算の結果密度 300 本/ μm^2 の CNT 薄膜が先端曲率半径 $20\mu\text{m}$ のチップに接触する本数は荷重数 μN において数万に達する。この特性は RF-MEMS スイッチの接点材料に非常に適している。すなわち, RF-MEMS スイッチに必要な要件の 1 つが電圧 0.5V で電流値 0.5mA であるが, 相手接点電極に 5 万本の CNT が接すると, 一本当たり電流値は 10nA 程度 (STM の電流量程度) であり CNT の良好な電気伝導性を考えると非常に小さな値である, しかも、凝着力はほとんど無く, 加えて電極や CNT が摩耗しても優れた CNT の弾力性によって新たな接点が形成される。

2. 研究の目的

そこで本申請では CNT 薄膜を接点電極に用いた RF-MEMS スイッチの開発を行う。そのため, マイクロ荷重 (1mN 以下) でカンチレバー先端の電極を接点電極材料に押し付けて, 接点抵抗を測定するための装置をはじめ, MEMS プロセスを用いた各種形状や配向性を有した CNT 薄膜電極やカンチレバーの作製を行い, RF-MEMS スイッチに最適な CNT 薄膜電極を作成する。

3. 研究の方法

(1) CNT 薄膜電極の作製方法

CNT 薄膜電極は、鉄粒子を触媒にした CVD 法により気相成長させて作製した。CVD 条件としては、 C_2H_2 ガス流量 200~300sccm、 H_2 ガス流量 100~200sccm、および温度 500~750°C の下で、最適な CNT 成長条件を得た。CNT 薄膜電極は、熱酸化して SiO_2 を形成した Si 基板上に鉄薄膜をパターニングし、アニール処理によって鉄の微粒子化させた後、上記の CVD 条件で、高さ $5\mu\text{m}$ および $50\mu\text{m}$ の垂直配向した平均直径 40nm の CNT 薄膜を形成した。この垂直配向した CNT 薄膜に対して、真空蒸着法により直接、金薄膜をコーティング

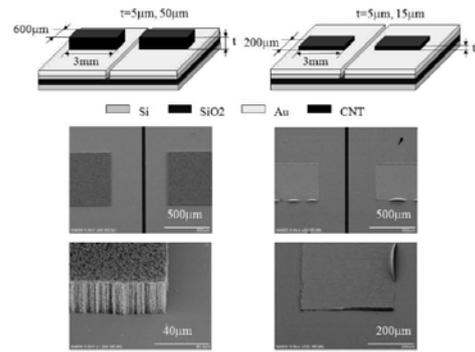


図1 作製した垂直配向, 水平配向金蒸着 CNT 薄膜電極基板

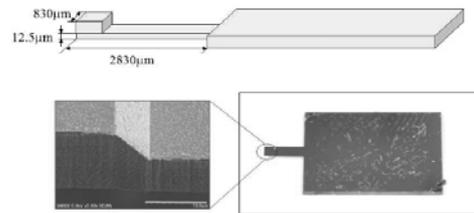


図2 作製した金蒸着カンチレバー

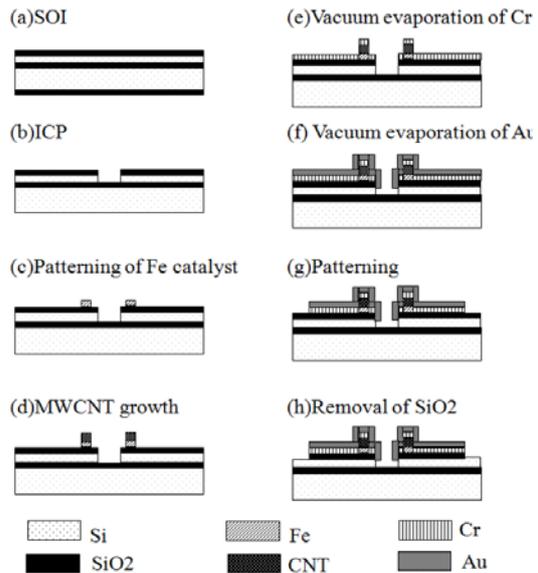


図3 CNT 薄膜電極のプロセスフロー

した基板を垂直配向 CNT 電極とした。金をコーティングしたのは, CNT そのものの電気伝導性は極めて高いが, CNT と金属との接触電気抵抗は極めて高く, それを下げるためである。水平配向 CNT 薄膜は, 高さ $200\mu\text{m}$ 、幅 5mm および 15mm で垂直配向させた CNT 薄膜基板を IPA 液中に浸透させ, その後 IPA 液面に対して垂直に 0.1m/sec の速度で引き上げて作製した。すなわち, IPA への浸透と低速引き上げを実施することで, 垂直配向 CNT が基板上に吸着し, 水平配向 CNT 薄膜が

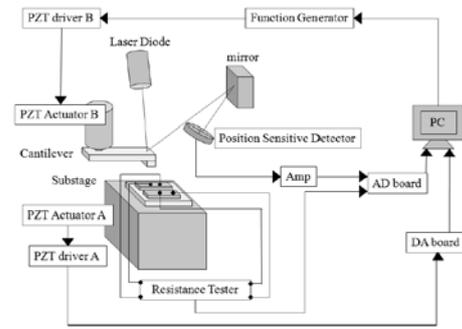
形成される。その後、同基板を真空蒸着法によって金薄膜コーティングしたものを、水平配向 CNT 薄膜電極とした。更に、比較のために金薄膜電極 (CNT 薄膜を成長させていない) も併せて準備した。図 1 に垂直配向、水平配向 MWCNT 電極の模式図および外観写真を示す。基板には SiO_2 で覆われた、活性層 30mm、BOX 層 1mm、基板層 400mm の SOI 基板から作製している。左右の電極間を完全に電氣的に絶縁するためにフォトリソグラフィにより SOI 基板に幅 30mm の開口ラインパターンを設けた後、Deep-RIE によって活性層深さの溝を形成した。この溝の左右に鉄薄膜触媒をパターンニングした後、CVD により垂直配向 CNT を形成する。Cr/Au 薄膜コーティングしたカンチレバー型スイッチについても、SOI 基板から作製している。カンチレバー型スイッチの形状寸法ならびに外観写真を図 2 に示す。CNT 薄膜電極と直接接触するのは、カンチレバー先端の突起部分としている。カンチレバー先端突起と薄膜電極との接触時の重なり面積は、左右の電極合わせて $100 \times 100 \text{mm}^2 \times 2$ ヶ所である。図 3 に垂直配向 CNT 電極基板のプロセスフローを示す。

(2) マイクロ接触実験システムの開発

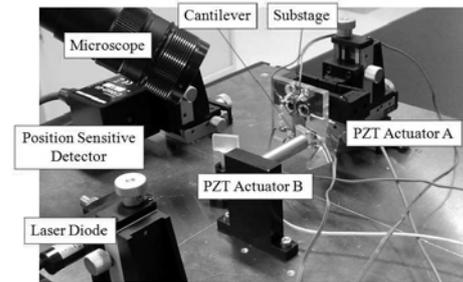
マイクロ接点電極の耐摩耗特性評価を実施するために開発した、マイクロ接触実験システムの模式図と外観写真を図 4 に示す。本システムでは、接触力一定の条件下で電極-カンチレバー間の接触を実現するために、光てこ方式による接触力の検出機構とフィードバック制御機構を開発した。同図に示すように、PZT アクチュエータ A に設置した電極基板取り付け台の上に MWCNT 電極基板を固定するとともに、同基板に対抗するように配置された PZT アクチュエータ B にカンチレバーを取り付ける。アクチュエータ B は、カンチレバーの薄膜電極への微動アプローチならびに繰り返し接触させるために用いられる。繰り返し接触時は、ファンクションジェネレータからの信号をアクチュエータ B 用ドライバーに直接入力している。一方、アクチュエータ A は、繰り返し接触実験中に生じることが予想される、電極基板位置の熱的、電氣的なドリフトを補正するために用いるものである。接触力一定にするには、カンチレバー背面で反射した光を PSD 素子で受光し、アンプを介して PC にデータサンプリングすることで、設定接触力になるようにフィードバック制御している。

(3) マイクロ接触試験方法

本研究で実施するマイクロ接触実験の条件を表 1 に示す。CNT 薄膜電極の耐摩耗特性評価においては、静的接触時の DC 特性を評価した後、ホットスイッチング条件下で開



(a) Block diagram of micro contact testing system



(b) Photograph of micro contact testing system

図 4 開発したマイクロ接触実験システム。

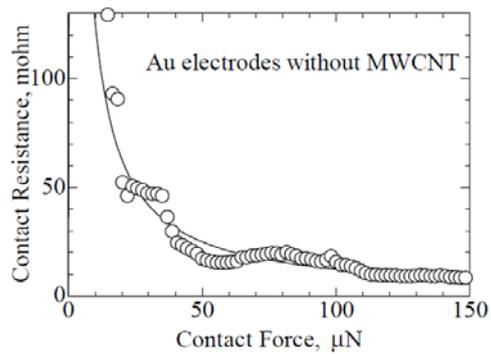
(a) システムのブロック図。(b) 概要写真

閉容量試験を実施する予定である。DC 抵抗測定は交流四端子法を用いて実施した。カンチレバーが非接触状態から、アクチュエータ A を電極基板に徐々に近づけていき、各荷重下での接触抵抗を計測する。一方、繰り返し接触試験においては、カンチレバーが取り付けられたアクチュエータ B をスイッチング周波数 100Hz で制御する。開閉容量試験では、10V、10mA の電力負荷の下でサイクル数 104 毎に抵抗値の変化をサンプリングする。また、接触試験の際の接触力は、静的接触試験で得られた最低抵抗値の接触力で制御することとした。

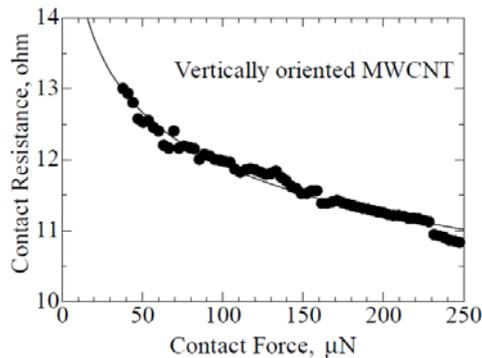
4. 研究成果

(1) 静的接触抵抗

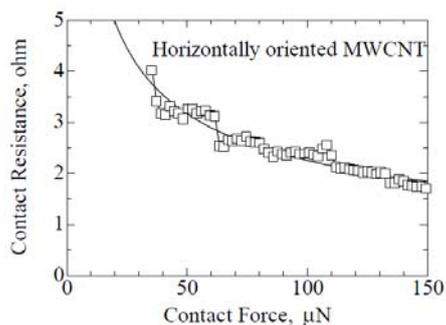
接触荷重の増加に伴う CNT 無しの Au 電極、垂直配向 MWCNT 電極、および水平配向 MWCNT 電極の静的接触抵抗の変化を図 5(a) ~ (c) に示す。同図 (a) において、Au 電極の接触抵抗は接触荷重 20mN において 130mW を示し、その後荷重の増加に伴って抵抗値は減少していく。荷重 110mN 以上で 10 mW となり、その後ほぼ変化がないことが認められる。一方、垂直配向 MWCNT 電極では、カンチレバーの接触の初期段階から、抵抗値は 13W と大きい。その後、荷重の増加に伴って 250mN で 8 W まで低下するが、その値は mW オーダーまでには至っていない。この最小値は、Au 電極のそれより約 800 倍大



(a) Contact resistance of Au electrodes



(b) Contact resistance of vertically oriented MWCNT



(c) Contact resistance of horizontally oriented MWCNT

図5 接触荷重の増加に伴う接触抵抗の変化. (a)金薄膜, (b)金蒸着垂直配向CNT薄膜, (c)金蒸着水平配向CNT薄膜.

きい. これは, 垂直配向MWCNT電極では, CNT先端とカンチレバー表面との実接触面積が小さいため, 接触抵抗の低下は見込めないことを意味している. 一方, 水平配向MWCNT電極の接触抵抗は, 垂直配向電極のそれより小さく, 荷重の減少に伴い150mNで1.7Ωの抵抗値を示した. また, 更なる接触荷重の増加に伴って, 抵抗値は減少していく傾向が見られた.

(2) 繰り返し接触抵抗

静的接触抵抗の測定で得られた最小抵抗値を示す接触荷重において, 各電極に対する開閉容量試験を実施した. ここでは, 10V, 10mAの抵抗負荷状態での繰り返し接触試験を行い,

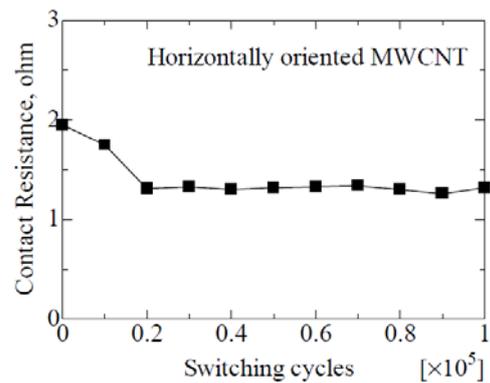


図6 接触抵抗と開閉回数の関係

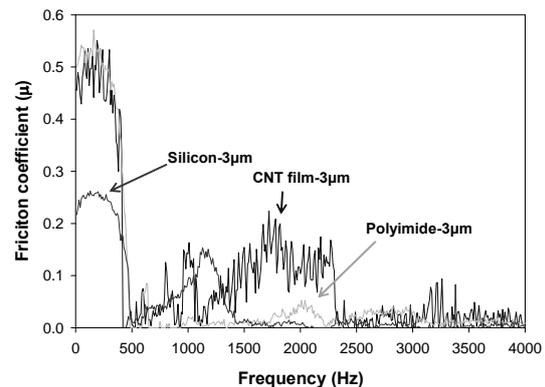


図7 荷重が1mNの時に微小振動を付与した時の摩擦力と周波数の関係.

接触抵抗の変化を調べた. 代表例として, 最大接触荷重150mNの下での, 水平配向MWCNT電極に対するサイクル数 10^5 までの開閉容量試験結果を図6に示す. 同図において, 接触回数の増加に伴う抵抗値の変化は見られず, ほぼ一定値を示した. このことから, 繰り返し接触に関して水平配向MWCNT電極は接点電極として有効であると期待できる.

(3) 微小振動付与

またさらに本研究の装置の耐久試験用のPZTを用いて振動摩擦に関する研究も行った. 振動を与えることで, 接点電極面積が大きくなった時に懸念される接触時の凝着力や摩擦を抑えることができる. 図7は荷重が1mNの時に摩擦力の周波数依存性を調べたものである. 比較としてシリコンやポリイミド膜も同様にして実験を行った. その結果, 全ての材料で振動を与えることによって摩擦力が非常に小さくなり摩擦や凝着量も極限まで低下可能であることが明らかとなった.

5. まとめ

マイクロ有接点リレーデバイスの新しい接点電極として、APCVD 法によってAu 薄膜コーティングされた垂直および水平配向MWCNT 電極を作製し、それらのDC 特性評価および開閉容量試験を行った。垂直配向MWCNT 電極の静的接触抵抗は、Au 薄膜電極に比べて極めて大きく、電極として不向きであると考えられる。一方、水平配向MWCNT電極の接触抵抗は1.7Wと小さい。また、水平配向MWCNT電極の開閉容量試験結果から、繰り返し接触中の接触抵抗値の変化は見られず、一定抵抗値を維持した。以上、水平配向MWCNT 電極は、更なる接触荷重の増加に伴う抵抗値の減少が期待できることから、マイクロ有接点リレーデバイスの接点電極として有用であると期待できる。また振動を与えることで摩擦や摩耗，凝着力を極限まで低下できる可能性が示された。

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)

[雑誌論文] (計 2 件)

①Hiroshi Kinoshita, Masatoshi Kageyama, Aidil Azli Alias, Masahiro Fujii, “Reducing the High Frictions on Carbon Nanotube Films by Applying Oscillating Motions under Micronewton Loads”, Tribology Online, vol.7, pp.213-217 (2012). DOI 10.2474/troll.7.213.

② H. Kinoshita, Y. Isono and N. Ohmae, Bonding of a Carbon Nanotube Film to a Au Film at Low Temperature and Contact Resistance of the Film under Micronewton Loads”, Tribology Online, Vol. 6, No. 4, pp.189-192, (2011). DOI 10.2474/trol.6.189.

[学会発表] (計 件)

①CNT 薄膜を集積したマイクロ接点電極の摩耗耐久性評価 末國 啓輔, 香田 永徳, 木之下 博, 花崎 逸雄, 磯野 吉正, 2012 年 10 月 22 日, 「第 29 回センサ・マイクロマシンと応用システム」シンポジウム, 10 月 22 日—10 月 24 日

②木之下博, 横井悠馬, 蔭山正敏, アイディル アズリ エイリアス, 藤井正浩, 振動印加によるカーボンナノチューブ薄膜の摩擦低減—ミリニュートン荷重領域における効果

—, 2012 年 9 月 17 日, トライボロジー会議 2012 秋, 9 月 16-9 月 18 日

③木之下博, 蔭山正敏, アイディル アズリ エイリアス, 藤井正浩, 振動印加によるカーボンナノチューブ薄膜の摩擦係数の 0 から 1 以上までのコントロール, 2012 年 6 月 14 日, ナノ学会第 10 回大会, 6 月 14 日—6 月 16 日

④蔭山正敏, アイディル アズリ エイリアス, 木之下博, 藤井正浩, カーボンナノチューブ薄膜のマイクロニュートン荷重領域における振動印加による摩擦低減効果—振動周波数と振幅依存性— 2012 年 5 月 16 日 トライボロジー会議 2012 春, C32, 東京, 5 月 14 日—16 日

⑤ Aidil Azlibin Alias, Masatoshi Kageyama, Hiroshi Kinoshita, Masahiro Fujii, Friction Force Reduction on Carbon Nanotube (CNT) Films by Oscillating Motions under Micronewton Loads - Oscillation Frequency Dependence - 2012 年 4 月 24 日 第 12 回機素潤滑設計部門講演会 4 月 23 日-24 日

①木之下博, 大前伸夫, マイクロ荷重領域におけるカーボンナノチューブ薄膜と金チップとの接触電気抵抗, 2010 年 5 月 1 日, トライボロジー会議 2010 春, B26, 東京 B26

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

○取得状況 (計 0 件)

ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究代表者

木之下 博 (Hiroshi Kinoshita)

岡山大学・大学院自然科学研究科・准教授
研究者番号：50362760

(2) 研究分担者

磯野吉正 (Yoshimasa Isono)

神戸大学・工学研究科・教授

研究者番号：20257819