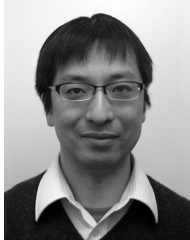


金属・液体ハイブリッド型 MEMS 配線

MEMS conducting wire using combination of metal and liquid

2001002



研究代表者 東京大学大学院 情報理工学系研究科 助教 岩瀬 英治

[研究の目的]

これまでの機械は固体の硬い構造が主であったが、人間との調和のためには柔らかい構造であることが望ましい。そのため、「柔らかい機械」が必要となる、曲げられかつ伸縮可能な電気配線を目的とする。

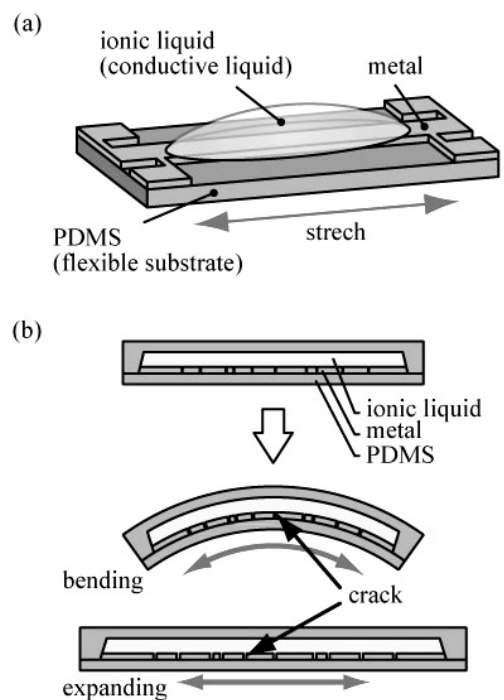
近年フレキシブルデバイスの研究が盛んに行なわれているが、これらの材料としては有機材料やゲル材料が主であった。従来の伸縮可能な配線としては導電性ゴムが挙げられるが、代表的な導電性ゴム（ゴム材料にカーボン粒子を混ぜたもの）の電気伝導率は 10^1 S/m 程度である。また、近年報告された高い伝導率をもつとされるゲル材料（カーボンナノチューブをイオン液体に混ぜたゲル）でも 10^4 S/m オーダの電気伝導率である。金属の電気伝導率は $10^6 \sim 10^7$ S/m オーダであることを考えると、従来の伸縮可能な配線は電気伝導率の点において性能が低いといえる。

本課題では、Fig. 1 に示すような柔軟基板の上に金属の配線とそれを覆うように液体を配置した構造を基本とし、MEMS (Micro-Electro-Mechanical Systems) の加工技術により製作する。これにより、曲げや伸びによって金属部にクラックが生じたとしても液体部分が電子の授受を行い、高い電気伝導率でかつ高い伸縮耐性をもつ電気配線の実現を目指す。曲げられかつ伸縮可能な電気配線という実用的な意義を持つ

だけでなく、これまでは有機材料やゲル材料が主であったフレキシブルデバイスの分野において、液体をデバイスに用いる点が特徴的である。

[研究の内容, 成果]

柔軟基板の上に金属の薄膜を蒸着し、その上に液体を載せ、金属 - 液体ハイブリッド配線とした (Fig. 1(a))。金属としては Au を、柔軟基板としてはシリコンゴムの一種である PDMS (polydimethylsiloxane) を用いた。液



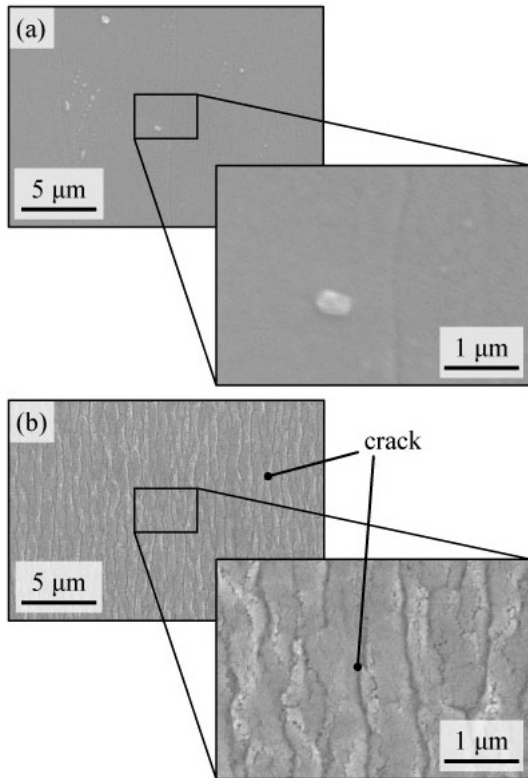
(a) 全体構成, (b) 変形による金属部へのクラックの発生

Fig. 1 デバイスの概要図

体としては、イオン液体を用いることとした。その理由としては、高いイオン伝導率を持つことに加え、水に比べ広い電位窓をもつため電氣的に利用しやすいこと、化学的安定性が高いことが挙げられる。イオン液体としては EMIES (1-ethyl-3-methyl imidazolium ethyl sulfate) を用いた。

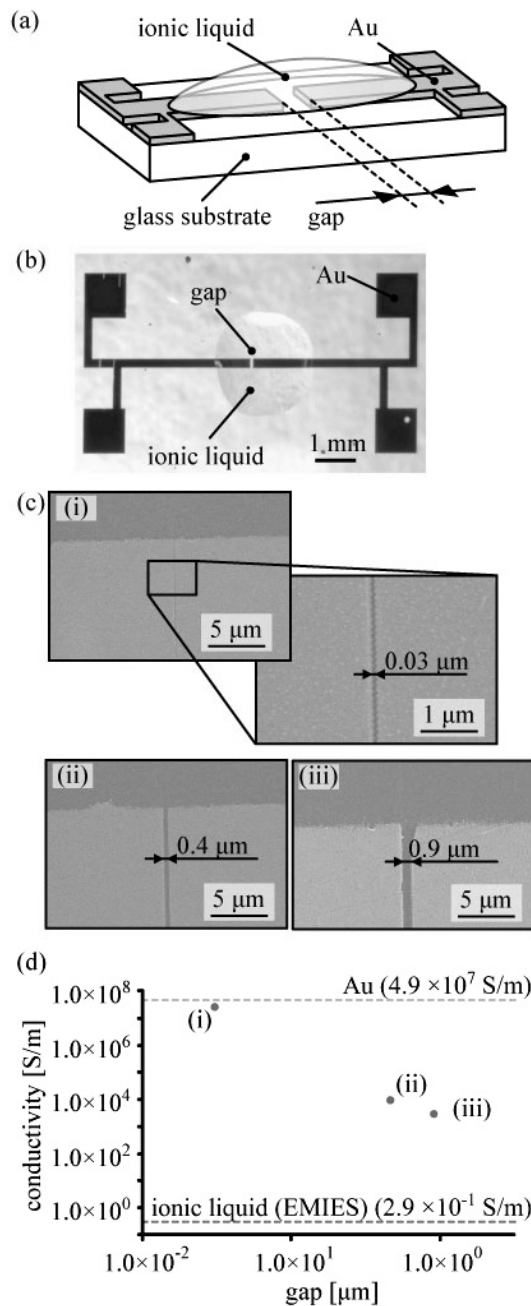
まず初めに、柔軟基板 (PDMS 基板) 上で金属 (Au) 薄膜のクラックに関して観察を行った。Au は真空蒸着により 50 nm の厚さで成膜した。PDMS は熱によって膨張するため、蒸着条件によっては成膜後の Au にクラックが生じている可能性があったが、成膜レートを低くすることで Fig.2(a) のようにクラックのない Au 薄膜が得られた。これを 40% 伸ばした後に SEM で観察したものが Fig.2(b) である。約 1 μm 間隔でクラックが生じていることが観察された。

次に、金属配線に収束イオンビーム (Focus-



(a) PDMS 上に蒸着した Au 表面の SEM 写真, (b) 40% 伸ばした後の Au 表面の SEM 写真
Fig. 2 PDMS 基板の上に Au を蒸着した際のクラックの様子

ed Ion Beam: FIB) によって幅 0.03 μm から 0.9 μm までのクラックを作製し、クラック幅と電気伝導率の関係を計測した。この計測では、伸縮の必要がないことと FIB で加工することの理由から、PDMS 基板ではなくガラス基板を用いた (Fig.3(a), (b))。Fig.3(c) に FIB で加工したナノクラックの SEM 写真を示す。

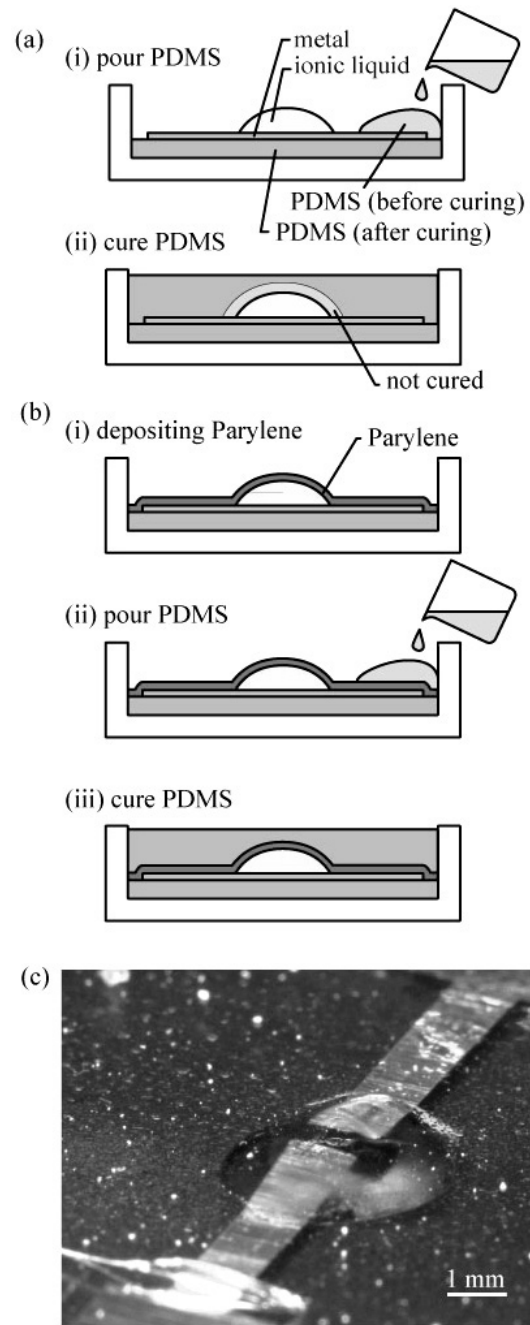


(a) 計測用デバイスの概要, (b) 計測用デバイスの写真, (c) FIB 加工によるナノクラックの SEM 写真, (d) クラック幅と電気伝導率の関係

Fig. 3 クラック幅と電気伝導率の関係の計測

計測において、イオン液体が Au 配線を覆う領域を変化させても全体の電気伝導率には大きな変化はなく、クラック幅が電気伝導率に大きく寄与していることが示唆された。Fig. 3(d) にクラック幅に対する電気伝導率の計測結果を示す。0.03 μm , 0.4 μm , 0.9 μm のクラック幅のときの電気伝導率はそれぞれ $2.6 \times 10^7 \text{ S/m}$, $9.3 \times 10^3 \text{ S/m}$, $2.9 \times 10^3 \text{ S/m}$ であった。0.03 μm のクラック幅のときの電気伝導率は、Au の電気伝導率である $4.9 \times 10^7 \text{ S/m}$ と同じオーダーの値となった。Fig. 3(d) のグラフから、基板の歪みが同じ場合において、狭いクラックが多数ある方が、広いクラックが少数あるよりも電気伝導率が良くなることが示唆される。

これまで、デバイスに液体が用いられなかった理由として、電気化学的な特性のほかに封止など取り扱いが難しいという点が挙げられる。そのため、金属・液体ハイブリッド配線のデバイス化技術についても研究を行った。実際に、Fig. 4(a) のようにイオン液体の上から硬化前の PDMS を注ぎ、イオン液体を封じ込めようとしたところ、イオン液体により PDMS の硬化阻害が起り、単純には封じ込めることができなかった。PDMS としては東レダウコーニング社製の SILPOD 184 を用いており、硬化阻害が起るとゴム状に硬化せず液状のままになってしまう。本課題では、液体の封止技術として、蒸気圧の低い液体の上に直接有機膜を蒸着する液体上パリレン直接蒸着法 (Parylene on Liquid Deposition 法, PoLD 法) を用いることとした。これはシリコンオイルやグリセリンなど蒸気圧の低い液体の上に、有機膜であるパリレン膜を低真空 ($\sim 10 \text{ hPa}$) で蒸着する方法である。イオン液体もシリコンオイルと同様、低蒸気圧の液体であるため、この手法により金属・液体ハイブリッド配線の封止が可能であると考えられる。ただし、パリレン膜は伸縮性が高くないため、パリレン膜で封止した後、全体を PDMS の中に埋め込む。これにより、伸縮されたときにはパリレン膜は破れるが、デバイス

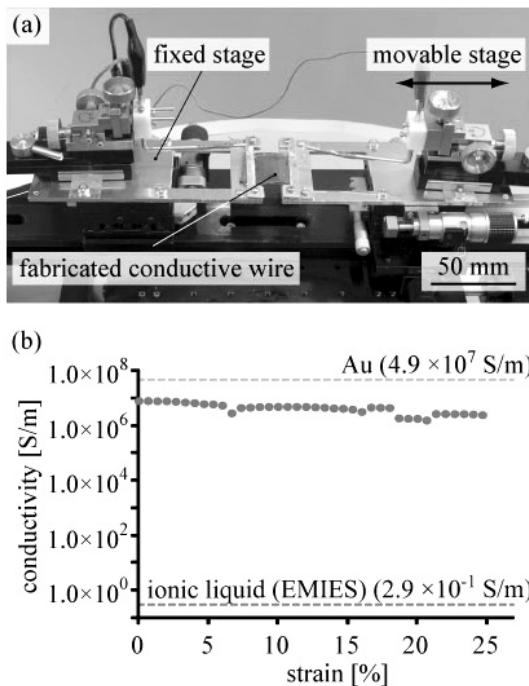


(a) PDMS のみの封止方法, (b) PoLD 法を利用したイオン液体の封止方法, (c) PDMS 基板上的イオン液体をパリレン膜で封止した写真

Fig. 4 イオン液体の封止

としては液体が漏れ出てくることはないという構造となる (Fig. 4 (b))。Fig. 4 (c) は PDMS 基板上的イオン液体をパリレン膜で封止した段階の写真である。

最後に、歪みに対する伝導率の変化の計測を行った。Fig. 5(a) に計測セットアップを示す。伸縮配線を抑える治具と計測用の電極端子が直



(a) 計測セットアップ, (b) 0% から 24% まで伸ばしたときの電気伝導率計測の結果

Fig. 5 歪みと電気伝導率の関係の計測

動ステージに取り付けられた構成となっている。歪みが 0% のときには 8.1×10^6 S/m, 歪みが 24% のときには 2.5×10^6 S/m と電気伝導率が得られた (Fig. 5(b))。これは 24% までの歪みにおいて、 10^6 S/m オーダの高い電気伝導率を維持したことを意味する。また、この結果は他の実験結果とも整合した結果である。PDMS 基板を伸ばしたときの Au 配線のクラックの観察において、クラックは約 $1 \mu\text{m}$ 間隔で生じて

いた。PDMS 基板を伸ばしたとき、Au 配線は伸びず、クラックの部分のみ幅が広がると仮定すると、24% の歪みのときには 1 つのクラックの幅は $0.24 \mu\text{m}$ となる。 $0 \mu\text{m} \sim 0.24 \mu\text{m}$ のクラック幅で、 10^6 S/m オーダの電気伝導率という結果は、FIB 加工でナノクラックを製作したものと近い値である。

[今後の研究の方向, 課題]

本課題では、PDMS 基板を伸ばしたときに自然に生じるクラックを利用して、0% から 24% の歪みにおいて、 10^6 S/m オーダの電気伝導率を実現した。しかし、クラック幅と電気伝導率の関係の計測結果から得られた結果に従うと、より狭い間隔でクラックが存在すれば、より大きな変形に置いても高い電気伝導率が維持できることとなる。そのため、クラックをナノ加工により製作することで、より性能の良い伸縮配線が実現可能であると考えられる。

また、他の性能向上の方向性として、本課題では金属として Au, イオン液体として EMIES の組み合わせのみであったが、他の各種金属と各種イオン液体の組み合わせにおいて、どれが電気配線として適しているかを調べる方法がある。これには、実験的な方法の他、イオン液体と金属との接触面における電子の授受現象の解明が役立つと考えられる。