

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 8 日現在

機関番号：32665

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25420225

研究課題名(和文) 導電性ポリマーの通電加熱で駆動するマイクロフレキシブルアクチュエータ

研究課題名(英文) micro-flexible actuator driven by applying electric current to a conductive polymer layer

研究代表者

今井 郷充 (IMAI, Satomitsu)

日本大学・理工学部・教授

研究者番号：20369953

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,800,000円

研究成果の概要(和文)：導電性高分子PEDOT/PSS薄膜への通電加熱で駆動するMEMSアクチュエータを検討した。20～30 μmの膜厚に数Vの電圧を印加した場合に数10 °Cの温度上昇が得られることが確認できた。膜厚低減のため、極性溶媒の添加(エチレングリコール5%)および導電性銀ナノ粒子溶液の添加を行うことにより導電性を高め、厚さ約2 μmの膜に3Vを印加することで、70～80 °Cの温度上昇が得られるようになった。この導電膜をシリコンゴム(PDMS)製光学レンズの焦点可変への応用を検討した。半球状のレンズの外周部に導電膜を形成し、数Vの電圧を印加して約4%の焦点距離の変化が得られ、このような分野への応用が期待できる。

研究成果の概要(英文)：Performance of a MEMS actuator using a thermal expansion drive of a conductive polymer (CP) have been investigated. The actuator consists of a thin polymer diaphragm (polyimide, 5 mm, t10 μm) and a CP (PEDOT/PSS) layer coated on the diaphragm surface. The diaphragm was deflected by applying electricity to the CP layer. When the CP layer was t10-30 μm (30-200 μm), diaphragm displacement of several tens μm was generated. A method of enhancing the electrical conductivity of PEDOT:PSS by combining solvent treatment (5 wt% ethylene glycol) and adding a small amount of silver nanoparticles in a solution was investigated to enhance electrical conductivity. The electric conductivity applied with this method was 200-260 S·cm⁻¹ for thicknesses of 1-2 μm (conductive area: 12×10 mm) and the generated temperature increase was 20-50 °C at applied voltages of 3-5 V. It was confirmed that the added Ag nanoparticles contributed to making the conductive areas more uniformly.

研究分野：工学

キーワード：導電性高分子 PEDOT/PSS アクチュエータ 熱変形 通電加熱 MEMS

1. 研究開始当初の背景

導電性ポリマーの研究において、有機コンデンサ、帯電防止フィルム、タッチパネル、太陽電池、EL、FET 等が既に開発または開発中であるが、アクチュエータやセンサーへの応用はあまり行われていない。本研究は導電性ポリマーの応用に関し、発熱体としてアクチュエータに応用するものである。アクチュエータはポリイミドを基板材料とし、導電性ポリマー膜との複合化でフレキシブルなマイクロアクチュエータとした。従来通電加熱には主に金属膜が用いられてきたが、軽さ、フレキシブル性等の点で導電性ポリマーは有利である。大きな発熱容量を必要としないマイクロサイズの発熱体には導電性ポリマー薄膜が適していると考えられ、この特性について研究した。

2. 研究の目的

機械的・熱的特性に優れるポリイミドを用いたダイアフラムとドーピング型の導電性ポリマー膜によりアクチュエータを構成し、導電性ポリマー膜を通電加熱することにより熱変形で駆動するマイクロアクチュエータを開発する。今後フレキシブルなアクチュエータやトランスデューサへのニーズが高まることへ対応を意図している。本研究における導電性ポリマーはポリチオフェン系高分子 PEDOT/PSS である。従来通電加熱には金属膜が用いられていたが、剛性が大きいことやフレキシブル化に課題があった。微細な加工(薄膜化、パターニング等)や印刷加工法も可能な点、材料のフレキシビリティ、適度な抵抗値による発熱性等が高分子を構造材とする用途に適していると考えられる。導電膜における膜厚と抵抗の関係、電圧と温度の関係、膜の機械的特性等のデータを取得し、これをもとに MEMS アクチュエータへの応用を検討した。

3. 研究の方法

(1) 熱変形マイクロアクチュエータの特性

検討

MEMS 等で一般的に使用されるダイアフラム型アクチュエータを対象とし、ポリイミド薄膜によるダイアフラムを製作し、その上に通電加熱用の導電性ポリマーを塗布して通電して加熱し、熱膨張差でダイアフラムをたわませる。この場合における導電性膜の密着性、膜厚と電気抵抗の関係、印加電圧と発生温度の関係等を調べた。導電膜への印可電圧は 10V 以下に設定した。また導電膜は高分子であるため、発生温度の上限を 120 とした。

(2) 導電性高分子膜の導電性向上

ポリチオフェン系の PEDOT/PSS (OC-AE401 (信越ポリマー) および ICP-1050 (AGFA)) を選択した。導電性を高める点から、数%の極性溶媒(エチレングリコール等)の添加や導電性液(銀ナノ溶液)等の添加も行った。この場合の導電率や導電性能を電気抵抗の測定やコンダクティブ AFM による電流像から検討した。

(3) 焦点可変レンズへの応用

マイクロアクチュエータの応用例として、マイクロ光学レンズの熱変形による焦点可変機能について検討した。これはポリジメチルシロキ酸 (PDMS) 製の光学レンズに高分子導電性膜を塗布し、通電加熱により曲率を変化させ焦点可変レンズとするものである。通電による発生温度、変位、曲率の変化を測定した。

4. 研究成果

(1) 導電性高分子膜の通電加熱における特性

ポリイミド (PI) 薄膜のダイアフラムにおいて、PEDOT/PSS 薄膜を通電加熱することで PI との熱膨張差により駆動するフレキシブルなマイクロアクチュエータを検討した。仕様は 印加電圧 10V 以内で温度上昇が約 80 , またダイアフラム中心の変位が数 10 μ m 程度

である．加工法に関しては，PI 膜($t10\mu\text{m}$)に導電性ポリマーをコーティングする場合のプロセスや密着性を検討した．また導電性膜の厚さと抵抗，通電条件と温度特性，機械的特性等について明らかにした．

高分子導電膜の密着性について

導電性ポリマー溶液(ポリチオフェン系“セプルジード”(信越ポリマー))を基板：PI膜およびPETシート上にスピンコーティングした際の密着性を調べ，大きな問題点がないことをSEMによる断面観察により確認した．また，通電加熱した際の劣化等も目視では確認されなかった．

電気抵抗について

PI膜およびPETシート上に膜厚を変えた膜を形成し抵抗値を測定した．図1に示すようにPI膜およびPETシート上に膜厚を変えた膜を形成し抵抗値を測定した．膜厚 $10\sim 30\mu\text{m}$ の範囲(面積 $12\text{mm}\times 10\text{mm}$)で $100\sim 300$ 程度の電気抵抗値であった．

温度および変位特性について

通電による温度上昇と変位，および通電停止後の自然放熱による温度降下および変位を調べた．結果を図2に示す．アルミニウム膜，ITO膜(ともに $t0.1\mu\text{m}$)等との比較も行った．印加電圧 10V 以下で温度上昇数 10 レベルの温度上昇が得られたが膜厚は $20\sim 30\mu\text{m}$ 必要であった(図2(a))．またAl膜の場合よりも少し大きい電圧をかけることで同レベルの変位を発生させることができた(図2(b))．しかし導電性ポリマー膜の場合Al膜に比べかなり大きな膜厚が必要であり，導電性向上が必要であると考え検討した(後述)．

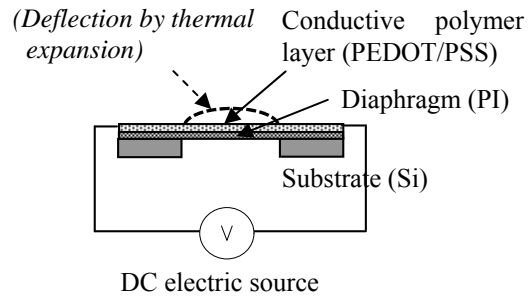
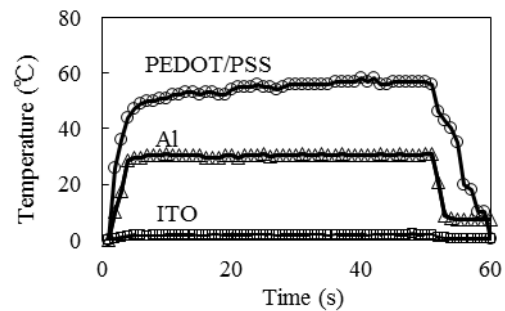
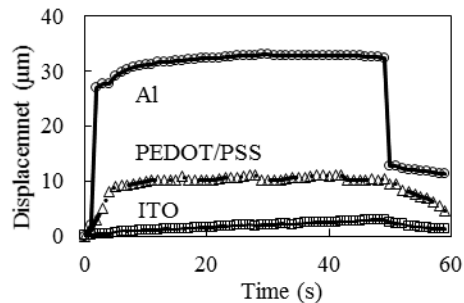


図1 導電性高分子(PEDOT/PSS)膜を塗布したポリイミドダイアフラム



(a) 発生温度



(b) 発生変位

図2 通電加熱時の発生温度と発生変位の時間波形(ダイアフラム中央)

通電時間： $0\sim 50\text{s}$ ，電圧： 3V ，通電面積： $10\text{mm}\times 12\text{mm}$ ，PEDOT/PSSの膜厚： $30\mu\text{m}$ ，ダイアフラム：直径 5mm ，厚さ： $10\mu\text{m}$ (比較用：アルミニウム膜($t0.1\mu\text{m}$,蒸着)，ITO膜($t0.1\mu\text{m}$,スパッタ))．

(2) PEDOT:PSSの通電による発生温度向上

PEDOT:PSSを通電発熱素子として使用するための性能向上(電気抵抗の低減)に関して検討した結果，少量の極性溶媒を添加および銀ナノ粒子を含む溶液の添加により，マイクロデバイスにおいて温度素子として使用することが可能なレベルの性能が得られた．行

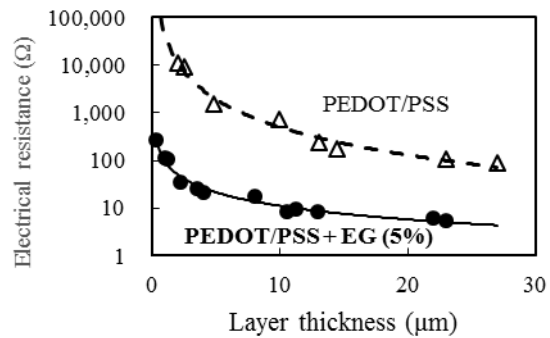
った方法の詳細は以下である。

- ・少量の極性溶媒を添加して導電率を向上 (エチレングリコール(EG)5%を添加)
- ・銀ナノ粒子を含む溶液 (PEDOT/PSS の体積に対して20%)を添加

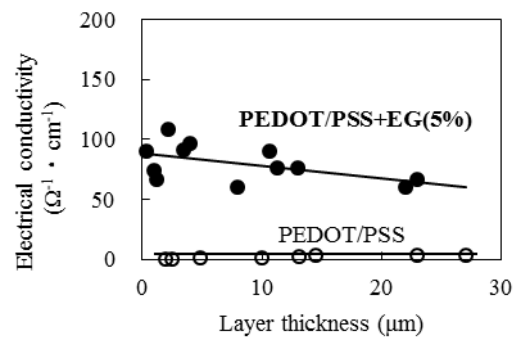
これにより、約2 μm の導電膜において、数ボルトの印加電圧で数10の温度上昇を得ることができた(発熱体のサイズ:約10mm角)。通電発熱素子として使用するため以下の仕様を満足する性能が得られた((注)仕様:数 μm 以下の導電膜において、10V以下の印加電圧で数10の温度上昇が得られること。但し、発生温度が印可電圧によってコントロール可能であり、導電膜に焼損等のダメージを与えない適切な導電率であること)。この方法が有効であった理由の解明のため、コンダクティブAFMを用いて導電膜における電流像の測定を行った。この結果、導電膜において電流がさらに均一に流れるようになることで導電率の向上が得られたことがわかった。

性能向上に関する主な結果を以下に示す。図3(a)はPEDOT/PSSの電気抵抗を示す。導体エリアは幅10mm \times スパン12mmである。Al蒸着膜の場合、膜厚が0.1 μm のとき電気抵抗は約3であるが、PEDOT/PSSはこれに比べてかなり大きく、図の膜厚の範囲で数V程度の電圧を印可しても温度上昇は小さかった。Al膜等に比べPRDOT/PSS膜は電気抵抗が高いため、導電率を向上させなければ印加電圧や膜厚を大きくしなければならない。そこで導電率向上のため極性溶媒(エチレングリコール(EG)5%)を添加した結果図3(b)に示すように導電率は100倍近く向上した。この場合の通電加熱によって得られた温度上昇を図4に示す。図4(a)は通電時の温度の時間波形である(導体エリアは図2と同じ)。膜厚および印加電圧をパラメータとして温度上昇を測定した結果図4(b)のようになった。数 μm の膜厚に数Vの電圧を印可することで数10の温

度上昇が得られた。これによりほぼ使用を満足することができた。この場合膜厚はAl蒸着膜に比べてなお10倍以上大きいが、PEDOT/PSSのヤング率を考慮すると曲げ剛性は同程度である(大変形領域での剛性)。

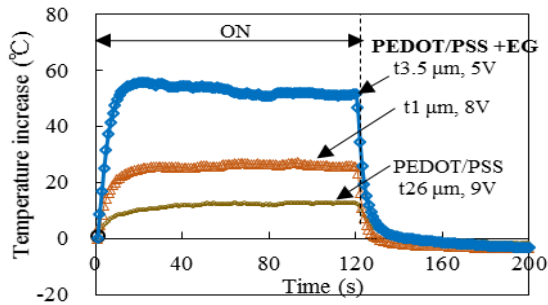


(a)電気抵抗

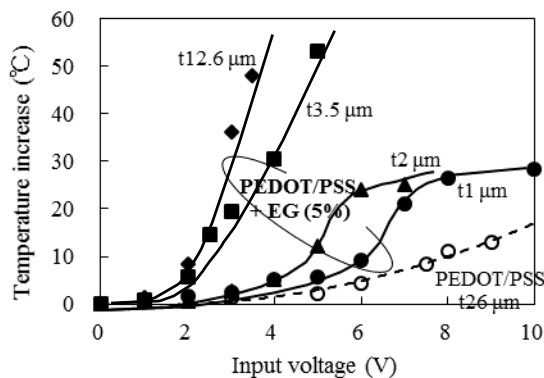


(b)導電率

図3 PEDOT/PSSの膜厚と電気抵抗



(a) 時間 vs. 温度



(b) PEDOT:PSS の膜厚と温度上昇

図4 PEDOT/PSS 膜の通電による温度上昇

(3) 導電性高分子膜の通電加熱アクチュエータへの応用 (対象: 熱変形によるマイクロレンズの焦点可変機能)

PEDOT/PSS 膜が通電加熱用に使用できることを確認できたので、これを MEMS 用熱変形アクチュエータとして応用することを検討した。対象としたのはレンズの湾曲部の曲率を変化させる焦点可変マイクロ光学レンズである。モバイル機器等においてより小型のレンズ機構が要求されていること、PEDOT/PSS はある程度の光の透過性をもっていること、高分子導電材料のため高分子材料への応用に適すること、塗布成膜が可能 (曲面や多少の表面粗さがある場合も可能) 等の点から選択した。

レンズの材料はフレキシブルなポリジメチルシロキサン (PDMS, 屈折率 1.4) とし、平凸 (片面凸, 反対面が平坦) および平凹形状のものを製作して、レンズ外周 (直径約

8mm) に導電膜として PEDOT/PSS を塗布 (幅約 5mm, 厚さ約 150 μ m) した。PEDOT/PSS は極性溶媒を添加 (EG5%) して導電率を向上させたものを使用した。2~4V の電圧を印加し、レンズ中央の変位、温度、および曲率の変化を測定し、これから焦点距離の変化を算出した。レンズ中央の変位は約 500 μ m、焦点距離の変化は約 4%であった。

実験から、PEDOT/PSS を通電加熱膜としてレンズに応用し曲率を変化させることが可能であることを確認した。しかし曲率および焦点距離をより大きく変化させることが必要であり、以下の改良点が考えられる。

レンズの肉厚を小さくする (作成したレンズの厚さが 3~4mm であったので、形状をメニスカス型とし厚さを 1mm 程度とする)。

導電膜をレンズ外周部に設ける (導電膜をレンズ外部に設けたため、レンズの温度が十分に高くなりまた温度上昇に時間がかかったため、この点を改良する。)

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 2 件)

Satomitsu, Imai, K. Adachi, Fundamental characteristics of a MEMS-diaphragm actuator using a thermal-expansion drive composed of a conductive polymer, IEEJ Trans., 査読有, 10, 2015, 101-108.

DOI:10.1002/tee.22075

Satomitsu, Imai, Enhancing electrical conductivity and electrical thermal characteristics of a PEDOT:PSS thin layer by using solvent treatment and Ag nanoparticle solution, Precision Engineering (Elsevier), 査読有, 42, 2015, 143-150.

DOI:10.1016/j.precisioneng.2015.04.009

〔学会発表〕(計1件)

安達 興史, 今井 郷充, 導電性高分子材料を用いたマイクロ通電加熱システムの基礎検討, 日本機械学会講演論文集, 2013年9月10日(2013年度年次大会, 岡山大学津島キャンパス(岡山県・岡山市)), J114035.

〔その他〕

研究室ホームページ

<http://imai-eme-cst-nihon-u.com/index.html>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

今井 郷充 (IMAI, Satomitsu)

日本大学・理工学部・教授

研究者番号: 20369953