

(12) 特許協力条約に基づいて公開された国際出願

(19) 世界知的所有権機関
国際事務局

(43) 国際公開日
2015年8月27日(27.08.2015)



(10) 国際公開番号

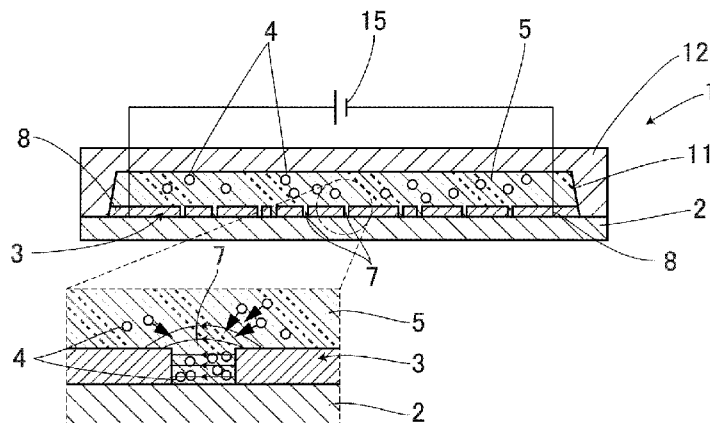
WO 2015/125944 A1

- (51) 国際特許分類:
H05K 3/22 (2006.01) H05K 1/02 (2006.01)
- (21) 国際出願番号: PCT/JP2015/054888
- (22) 国際出願日: 2015年2月20日(20.02.2015)
- (25) 国際出願の言語: 日本語
- (26) 国際公開の言語: 日本語
- (30) 優先権データ:
特願 2014-032182 2014年2月21日(21.02.2014) JP
- (71) 出願人: 学校法人早稲田大学(WASEDA UNIVERSITY) [JP/JP]; 〒1698050 東京都新宿区戸塚町1丁目104番地 Tokyo (JP).
- (72) 発明者: 岩瀬 英治(IWASE, Eiji); 〒1698050 東京都新宿区戸塚町1丁目104番地 学校法人早稲田大学内 Tokyo (JP). 古志 知也(KOSHI, Tomoya); 〒1698050 東京都新宿区戸塚町1丁目104番地 学校法人早稲田大学内 Tokyo (JP).
- (74) 代理人: 牛木 護(USHIKI, Mamoru); 〒1050001 東京都港区虎ノ門一丁目14番1号 郵政福祉琴平ビル3階 Tokyo (JP).
- (81) 指定国 (表示のない限り、全ての種類の国内保護が可能): AE, AG, AL, AM, AO, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BH, BN, BR, BW, BY, BZ, CA, CH, CL, CN, CO, CR, CU, CZ, DE, DK, DM, DO, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT, HN, HR, HU, ID, IL, IN, IR, IS, JP, KE, KG, KN, KP, KR, KZ, LA, LC, LK, LR, LS, LU, LY, MA, MD, ME, MG, MK, MN, MW, MX, MY, MZ, NA, NG, NI, NO, NZ, OM, PA, PE, PG, PH, PL, PT, QA, RO, RS, RU, RW, SA, SC, SD, SE, SG, SK, SL, SM, ST, SV, SY, TH, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VC, VN, ZA, ZM, ZW.
- (84) 指定国 (表示のない限り、全ての種類の広域保護が可能): ARIPO (BW, GH, GM, KE, LR, LS, MW, MZ, NA, RW, SD, SL, ST, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), ユーラシア (AM, AZ, BY, KG, KZ, RU, TJ, TM), ヨーロッパ (AL, AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HR, HU, IE, IS, IT, LT, LU, LV, MC, MK, MT, NL, NO, PL, PT, RO, RS, SE, SI, SK, SM, TR), OAPI (BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, KM, ML, MR, NE, SN, TD, TG).
- 添付公開書類:
— 国際調査報告 (条約第21条(3))

(54) Title: SELF-REPAIRING WIRING AND STRETCHABLE DEVICE

(54) 発明の名称: 自己修復型配線及び伸縮デバイス

[図1]



(57) Abstract: This self-repairing wiring (1) has a structure wherein metal wiring (3) is provided on a stretchable flexible substrate (2), and as a repair part for cracks (7) which occur in the metal wiring (3), the metal wiring (3) is covered with a liquid (5) having metal nanoparticles dispersed (4) therein. Even if a crack (7) occurs in the metal wiring (3) as a result of stretching of the flexible substrate (2), the crack (7) is bridged by metal nanoparticles (4) in the fluid (5), by using a force which selectively acts only on the crack (7) part, thereby selectively repairing the metal wiring (3) only in the part where the crack (7) has occurred. In addition, a stretchable device is provided by combining such a self-repairing wiring (1) with an electrical element which does not stretch. As a result of this configuration, self-repairing wiring and a stretchable device with high conductivity and high stretchability are provided.

(57) 要約:

[続葉有]

WO 2015/125944 A1

自己修復型配線（１）は、伸縮可能な柔軟基板（２）に金属配線（３）を配設し、金属配線（３）に生じるクラック（７）の修復部として、金属ナノ粒子（４）を分散させた液体（５）で金属配線（３）を覆う構造を実現している。柔軟基板（２）の伸縮に伴い金属配線（３）にクラック（７）が生じて、クラック（７）の部分にのみ選択的に働く力を利用して、液体（５）中の金属ナノ粒子（４）でクラック（７）を架橋することにより、金属配線（３）がクラック（７）の部分でのみ選択的に修復される。また、こうした自己修復型配線（１）を、伸縮性を有しない電気素子と組み合わせた伸縮デバイスを提供できる。これにより、高導電性と高伸縮性とを兼ね備えた自己修復型配線及び伸縮デバイスを提供する。

明 細 書

発明の名称：自己修復型配線及び伸縮デバイス

技術分野

[0001] 本発明は、高伸縮耐性、高導電率、自己修復機能を併せ持つ電気配線を実現する自己修復型配線と、その自己修復型配線を備えた伸縮デバイスに関する。

背景技術

[0002] 近年、例えば非特許文献1に報告されるように、柔軟性や伸縮性を持つフレキシブルデバイスの研究が盛んに行われている。また、フレキシブルデバイスに用いられる配線として、非特許文献2のような材料を導電性エラストマとした配線や、非特許文献3のような形状を波状にした金属配線などが知られている。しかし、導電性エラストマは導電性が低く、波状金属配線は伸縮でクラックが生じるという問題点がある。

[0003] 具体的には、これまで研究されてきた伸縮配線として、導電性材料をゴム材料やゲル材料に混ぜた導電性ゴムが最も一般的であるが、その電気伝導率は 10^1 S/m 程度である。また、非特許文献2に報告された従来に比べて非常に高い伝導率をもつとされるゲル材料でも、29%の伸縮耐性で、 $1.02 \times 10^4 \text{ S/m}$ の伝導率に過ぎない。これらは、固体の配線材料として用いられるAu（金）が $4.6 \times 10^7 \text{ S/m}$ であるのと比べて、非常に低い伝導率である。

[0004] 一方、金属を用いた伸縮配線としては、非特許文献4で報告されるように、金属配線をジグザグ形状にすることで、多少の伸縮が起きても破断しないデバイスを実現している。しかし、金属のみを用いているため伸縮性に限界があるだけでなく、伸縮の繰り返しによる疲労破壊の懸念がある。高伝導率を考えると、伸縮配線としては金属を利用するのが良いが、金属を用いて高伸縮耐性（すなわち伸縮による破断および伸縮の繰り返しによる疲労破壊がないこと）を解決できている報告は、今のところ存在しない。

[0005] さらに、金属配線にクラックが生じた場合の自己修復型配線の研究例とし

て、例えば非特許文献5には、シリコンゴムの流路にハンダを流し込み配線とし、変形によって破断したときには、熱をかけることで破断が修復されるという研究が報告されている。しかし、固体であるハンダと、同じ固体である金属配線との組合せでは、例えばクラックを修復する毎に、ハンダを溶解させる温度にまで加熱を行わなければならない、クラックの修復部として根本的な構造上の改良が求められていた。

先行技術文献

非特許文献

[0006] 非特許文献1: Mallory L. Hammock (マローリィ エル. ハムモック), Alex Chortos (アレックス チョルトス), Benjamin C.-K. Tee (ベンジャミン シー. ケイ. テー), Jeffrey B.-H. Tok (ジェフリー ビー. エイチ. トク), and Zhenan Bao (ツェナン バオ), "25th Anniversary Article: The Evolution of ElectronicSkin(E-Skin): A Brief History, Design Considerations, and Recent Progress," 「25周年論文: 電子皮膚(イースキン)の進化: 簡単な歴史, 設計要点, 及び最近の進歩」、Adv. Mater. (アドバンスド マテリアルズ)、2013年、pp.1-41

非特許文献2: Tsuyoshi Sekitani (関谷 毅), Hiroyoshi Nakajima (中島 宏佳), Hiroki Maeda (前田 博己), Takanori Fukushima (福島 孝典), Takuzo Aida (相田 卓三), Kenji Hata (畠 賢治), and Takao Someya (染谷 隆夫), "Stretchable active-matrix organic light-emitting diode display using printable elastic conductors," 「印刷可能な弾性導体を用いた伸縮自在なアクティブマトリクス式有機LEDディスプレイ」、Nature Materials (ネイチャー マテリアルズ)、vol.8、2009年、pp.494-499

非特許文献3: Darren S. Gray (ダレン エス. グレイ), Joe Tien (ジョー ティエン), and Christopher S. Chen (クリストファー エス. チェン), "High-Conductivity Elastomeric Electronics," 「高導電性エラストマ電子体」、Adv. Mater. (アドバンスド マテリアルズ)、2004年、

No. 5、 pp. 393-397

非特許文献4 : Dae-Hyeong Kim (ダエーヒュエオン キム) , Nanshu Lu (ナンシュ ル) , Rui Ma (ルイ マ) , Yun-Soung Kim (ユンーソウン キム) , Rak-Hwan Kim (ラクーフワン キム) , Shuodao Wang (シュオダオ ワン) , Jian Wu (ジャン ウー) , Sang Min Won (サン ミン ウォン) , Hu T ao (フー タオ) , Ahmad Islam (アフマド イスラム) , Ki Jun Yu (キ ジュン ユ) , Tae-il Kim (タエーイル キム) , Raeed Chowdhury (ライード チャウドゥーリ) , Ming Ying (ミン イン) , Lizhi Xu (リーチー シュー) , Ming Li (ミン リー) , Hyun-Joong Chung (ヒュンージョーン チュン) , Hohyun Keum (ホヒュン ケウム) , Martin McCormick (マーティン マッコーマック) , Ping Liu (ピン リウ) , Yong-Wei Zhang (ヨンーウエイ ツァン) , Fiorenzo G. Omenetto (フィオレンツォ ジー. オメネット) , Yonggang Huang (ヨンガン ファン) , Todd Coleman (トッド コールマン) , John A. Rogers (ジョン エイ. ロジャース) , “Epidermal Electronics,” 「表皮型電子体」、Science (サイエンス)、2011年、vol.333、pp.838-843

非特許文献5 : A. C. Siegel (エイ. シー. シーゲル) , D. A. Bruzewicz (ディー. エイ. ブルゼウィクス) , D. B. Weibel (ディー. ビー. ウェイベル) , G. M. Whitesides (ジー. エム. ホワイトサイズ) , “Microsolidics : Fabrication of Three-Dimensional Metallic Microstructures in Poly(Dimethylsiloxane),” 「マイクロソリディックス : ポリジメチルシロキサン中の三次元金属マイクロ構造の作製」、Advanced Materials (アドバンスドマテリアルズ) 、2007年、vol.19、pp.727-733

発明の概要

発明が解決しようとする課題

[0007] 本発明は上記問題点に鑑み、従来とは異なる構造を利用して、高導電性と高伸縮性とを兼ね備えた自己修復型配線及び伸縮デバイスを提供することを、主な目的とする。

課題を解決するための手段

- [0008] 本発明の自己修復型配線は、第1基材に電気配線を配設し、前記電気配線に生じるクラックの修復部として、導電性粒子を分散させた流動体で前記電気配線を覆う構造を備えている。
- [0009] この場合、前記電気配線への電圧印加を可能にし、前記クラックの部分にのみ電界を生じさせる端子部を、前記電気配線に設けるのが好ましい。
- [0010] 代わりに、前記電気配線の表面を、前記導電性粒子の表面と同極に帯電させ、前記クラックの部分で前記流動体に接する前記第1基材の表面を、前記導電性粒子の表面と異極に帯電させてもよい。
- [0011] さらに、前記導電性粒子が金属粒子であることが好ましい。
- [0012] さらに前記導電性粒子が、前記クラックの部分で前記電気配線よりも先に熱で融解するものであることが好ましい。
- [0013] また、本発明の自己修復型配線は、第1基材に電気配線を配設し、前記電気配線に生じるクラックの修復部として、金属イオンを溶解した流動体で前記電気配線を覆う構造を備えている。
- [0014] この場合、前記電気配線への電圧印加を可能にし、前記クラックの部分にのみ電界を生じさせる端子部を、前記電気配線に設けるのが好ましい。
- [0015] 代わりに、前記クラックの部分で前記流動体に接する前記第1基材の表面にのみ、無電解メッキにより前記金属イオンから固体金属を析出させる構成としてもよい。
- [0016] さらに、前記金属イオンから析出される固体金属が、前記クラックの部分で前記電気配線よりも先に熱で融解するものであることが好ましい。
- [0017] さらに、前記第1基材が伸縮可能であることが好ましい。
- [0018] さらに、前記電気配線が金属配線であることが好ましい。
- [0019] さらに、前記電気配線の所定の場所でクラックが発生するように、前記電気配線または前記第1基材の少なくとも一方が構成されていることが好ましい。
- [0020] 上記構成の自己修復型配線を備えた本発明の伸縮デバイスは、前記第1基

材と、当該第1基材よりも剛性の高い第2基材とにより基板を構成し、前記第2基材にのみ電気素子を実装して構成される。

発明の効果

- [0021] 請求項1の発明では、電気配線にクラックが生じても、クラックの部分にのみ選択的に働く力を利用して、流動体中の導電性粒子がクラックを架橋すれば、電気配線がクラックの部分で選択的に修復される。そのため従来とは異なり、導電性粒子を含む流動体と、固体である電気配線とのハイブリット構造を利用して、高導電性と高伸縮性とを兼ね備えた自己修復型配線を提供できる。
- [0022] 請求項2の発明では、電気配線にクラックが生じても、端子部を利用してその電気配線に電圧を印加すれば、クラックの部分にのみ選択的に働く力として、誘電泳動力による電界トラップ現象を流動体中の導電性粒子に生じさせることができる。これにより、凝集した導電性粒子がクラックを架橋して、外部から熱を加えたりせずに、物理的な力のみで電気配線を修復することが可能となる。
- [0023] 請求項3の発明では、電気配線にクラックが生じても、クラックの部分にのみ選択的に働く力として、表面の分子修飾の違いにより、流動体中の導電性粒子に静電力を作用させることができる。これにより、第1基材が露出したクラックの部分に導電性粒子が架橋して、外部から熱を加えたりせずに、物理的な力のみで電気配線を修復することが可能となる。また、修復の際に電圧を印加する必要がなく、リーク電流や絶縁破壊の問題も回避できる。
- [0024] 請求項4の発明では、電気配線に生じたクラックを修復した後に、そのクラックの部分にトラップされた導電性粒子だけを加熱融解させることができ、単に導電性粒子を架橋させた場合に比べて低抵抗とすることができる。
- [0025] 請求項5の発明では、導電性粒子として特に金属粒子を用いたものにおいて、高導電性と高伸縮性とを兼ね備えた自己修復型配線を提供できる。
- [0026] 請求項6の発明では、電気配線にクラックが生じても、クラックの部分にのみ選択的に働く力を利用して、流動体中の金属イオンから析出される固体

金属がクラックを架橋すれば、電気配線がクラックの部分で選択的に修復される。そのため従来とは異なり、金属イオンを含む流動体と、固体である電気配線とのハイブリット構造を利用して、高導電性と高伸縮性とを兼ね備えた自己修復型配線を提供できる。

[0027] 請求項 7 の発明では、電気配線にクラックが生じて、端子部を利用してその電気配線に電圧を印加すれば、クラックの部分にのみ選択的に働く力として、電界を利用した電解メッキにより、流動体中の金属イオンから固体金属を析出させることができる。これにより、析出した固体金属がクラックを架橋して、外部から熱を加えたりせずに、電気化学的な力のみで電気配線を修復することが可能となる。

[0028] 請求項 8 の発明では、電気配線にクラックが生じて、クラックの部分にのみ選択的に働く力として、表面修飾の違いを利用した無電解メッキにより、クラックの部分で流動体に接する第 1 基材の表面にのみ、流動体中の金属イオンから固体金属を析出させることができる。これにより、析出した固体金属がクラックを架橋して、外部から熱を加えたりせずに、電気化学的な力のみで電気配線を修復することが可能となる。また、修復の際に電圧を印加する必要がなく、リーク電流や絶縁破壊の問題も回避できる。

[0029] 請求項 9 の発明では、電気配線に生じたクラックを修復した後に、そのクラックの部分に析出した固体金属だけを加熱融解させることができ、単に固体金属を架橋させた場合に比べて低抵抗とすることができる。

[0030] 請求項 10 の発明では、第 1 基材の伸縮に伴い電気配線にクラックが生じて、その電気配線をクラックの部分で選択的に修復することが可能になる。

[0031] 請求項 11 の発明では、電気配線として特に金属配線を用いたものにおいて、高導電性と高伸縮性とを兼ね備えた自己修復型配線を提供できる。

[0032] 請求項 12 の発明では、クラックとなる断線部分の発生領域を制御することが可能になる。

[0033] 請求項 13 の発明では、伸縮デバイスが変形したときに、第 2 基材に実装

した電気素子は変形せず、第1基材の部分のみが伸縮して、電気配線にクラックが生じた場合でも、そのクラックを修復部で自己修復することができる。そのため、従来からの伸縮特性のない電気素子をそのまま利用しても、自己修復型配線の部分が伸縮耐性及び修復機能を有しているので、伸縮デバイス全体として伸縮耐性を有することが可能となる。

図面の簡単な説明

[0034] [図1]本発明の第1実施形態における自己修復型配線の基本的構造を示す縦断面図である。

[図2]同上、金属ナノ粒子の電界トラップによる修復の様子を示す模式図である。

[図3A]同上、点Oから離れた金属ナノ粒子が電界から受ける力を模式的に示す図である。

[図3B]同上、点Oからの距離と誘電泳動力との関係を理論的に解析したグラフである。

[図4A]同上、点Aに位置する金属ナノ粒子が電界から受ける力を模式的に示す図である。

[図4B]同上、印加電圧に対する誘電泳動力の計算結果を示すグラフである。

[図5]同上、実験用配線の構成を示す写真である。

[図6]同上、ガラス基板を用いた実験例として、印加電圧の振幅と金属配線のインピーダンスとの関係を示すグラフである。

[図7]同上、クラックの幅が200 nmの場合に、実験後の金属配線を撮影した写真である。

[図8]同上、クラックの幅と修復電圧との関係を示すグラフである。

[図9]同上、クラックの幅が200 nm, 600 nm, 1000 nmの場合に、実験後の金属配線をそれぞれ撮影した写真である。

[図10]同上、クラックの幅が400 nmの場合に、実験後の金属配線を撮影した写真である。

[図11]同上、柔軟基板を用いた実験例として、印加電圧の振幅と金属配線の

インピーダンスとの関係を示すグラフである。

[図12]同上、クラックの幅が270 nmの場合に、実験後の金属配線を撮影した写真である。

[図13]同上、ガラス基板を用いた別な実験例として、金属ナノ粒子の粒子半径を変えた場合の、印加電圧の振幅と金属配線のインピーダンスとの関係を示すグラフである。

[図14]同上、ナノ粒子の半径が20 nm [A] と、半径が200 nm [B] であって、クラックの幅が500 nmの場合の、実験後の金属配線を撮影した写真である。

[図15]同上、クラックの幅と修復電圧との関係を示すグラフである。

[図16]本発明の第2実施形態における自己修復型配線の基本的構造を示す縦断面図である。

[図17]本発明の第3実施形態における自己修復型配線の基本的構造を示す縦断面図と、電解メッキによる修復の様子を示す模式図である。

[図18]本発明の第4実施形態における自己修復型配線の基本的構造を示す縦断面図と、電解メッキによる修復の様子を示す模式図である。

[図19]本発明の第5実施形態における自己修復型配線の概要を説明する図である。

[図20]同上、金ナノ粒子がクラック部にトラップされている様子（非溶解）を撮影した写真である。

[図21]同上、金ナノ粒子がジュール熱（抵抗加熱）により一部溶解している様子を撮影した写真で、小さな粒が元のサイズで、大きな玉が溶解したものである。

[図22]同上、金ナノ粒子が大きく溶解している様子を撮影した写真である。

[図23]本発明の第6実施形態における自己修復型配線のクラック周辺の構造を示す横断面図である。

[図24A]本発明の第7実施形態における伸縮デバイスの製造方法の一例を示す斜視図である。

[図24B]同上、伸縮デバイスの製造方法の一例を示す斜視図である。

[図24C]同上、伸縮デバイスの製造方法の一例を示す斜視図である。

[図24D]同上、伸縮デバイスの製造方法の一例を示す斜視図である。

[図24E]同上、伸縮デバイスの製造方法の一例を示す斜視図と縦断面図である。

[図25]同上、伸縮デバイスを伸縮変形させたときの歪の分布を示す模式図である。

[図26]同上、平板状の伸縮デバイスを曲面に貼り付けて使用する一例を示す模式図である。

発明を実施するための形態

[0035] 以下、本発明の好ましい幾つかの実施形態について、添付図面を参照しながら説明する。なお、各実施形態において、共通する構成には共通する符号を付し、共通する部分の説明は重複を避けるために極力省略する。

[0036] 図1は、本発明の第1実施形態における自己修復型配線1の基本構造を示している。自己修復型配線1は、シート状の柔軟基板2上に金属配線3を配置し、その金属配線3を覆うように、金属ナノ粒子4を含む液体5を配置した構造を基本とする。またここでは、柔軟基板2の上面に凹状の液体封止部11を形成した容器12が接合され、液体封止部11に収容された液体5が柔軟基板2と容器12との間に封止される。金属配線3の両端には、自己修復型配線1の外部に設けた電源15から金属配線3に電圧を印加するための端子部8が設けられる。

[0037] 自己修復型配線1の外郭部材となる柔軟基板2と容器12は、可撓性と伸縮性を有する絶縁材料で構成される。これに対して金属配線3は、自己修復型配線1の外郭部材よりも可撓性や伸縮性に乏しい導電性材料で構成され、自己修復型配線1を無理に曲げたり伸縮させたりすると破断して、図1に示すようなクラック7が部分的に形成される。

[0038] 本実施形態では、金属配線3に生じたクラック7の修復部として、液体5と固体である金属配線3とのハイブリット構造を採用した点が注目される。

このようなハイブリッド構造は、後述する各実施形態にも総て共通するものである。特に本実施形態におけるクラック 7 の修復部は、金属ナノ粒子 4 を分散させた液体 5 で金属配線 3 を覆うと共に、金属配線 3 への電圧印加を可能にして、クラック 7 にのみ電界を生じさせるような端子部 8 を、その金属配線 3 に設けている。

[0039] 図 2 は、上記自己修復型配線 1 において、金属ナノ粒子 4 の電界トラップによる修復の様子を模式的に示したものである。

[0040] 本実施形態では、金属ナノ粒子 4 の電界トラップ現象を利用することで、伸縮可能な柔軟基板 2 上の金属配線 3 に自己修復機能を持たせている。電界トラップ現象は、電界が不均一な領域で生じるため、クラック 7 が生じた部分のみを選択的に修復できる。トラップされた金属ナノ粒子 4 がクラック 7 を架橋することによって金属配線 3 が修復され、再び高い導電性の金属配線 3 となる。

[0041] ここで、クラック 7 が生じた金属配線 3 に電圧を印加した際に、金属ナノ粒子 4 に働く力を考えると、その合力 F_{Total} は、次の数 1 で表せる。

[0042] [数 1]

$$F_{\text{Total}} = F_{\text{VDW}} + F_{\text{ES}} + F_{\text{EP}} + F_{\text{DEP}}$$

[0043] 上記数 1 で、 F_{VDW} はファンデルワールス力、 F_{ES} は静電反発力、 F_{EP} は電気泳動力、 F_{DEP} は誘電泳動力である。この中で、ファンデルワールス力 F_{VDW} と静電反発力 F_{ES} は、粒子（金属ナノ粒子 4）や溶媒（液体 5）によって決まり、電源 15 の印加電圧に依存しない力である。また、電源 15 の印加電圧が直流もしくは低周波数のときには、電気泳動力 F_{EP} と誘電泳動力 F_{DEP} の両方が作用するが、高周波数のときには、誘電泳動力 F_{DEP} のみが作用する。この誘電泳動力 F_{DEP} は、金属ナノ粒子 4 に対して電界トラップ現象を生じさせる力であり、高周波数の交流電圧を金属配線 3 に印加することで、電界トラップ現象による金属配線 3 の修復が可能になる。

[0044] 誘電泳動力 F_{DEP} の時間平均 $\langle F_{\text{DEP}} \rangle$ は、次の数 2 で表せる。

[0045]

[数2]

$$\langle F_{\text{DEP}} \rangle = 2\pi\epsilon_1 R^3 \text{Re}[\underline{K}(\omega)] \nabla E_{\text{rms}}^2$$

[0046] ここで、 ϵ_1 は溶液の誘電率、 R は粒子の半径、 ω は印加電圧の角周波数、 E_{rms} は電界強度の実効値である。また、 $\text{Re}[\underline{K}(\omega)]$ （以下、数式以外では、記号の下に記されたアンダーライン「 $\underline{\quad}$ 」を、対応する記号の後に併記する）は、Clausius-Mosotti factor と呼ばれる粒子の分極度合を表す値であり、誘電泳動力 F_{DEP} の向きは、 $\text{Re}[\underline{K}(\omega)]$ ($\underline{K}(\omega)$ の実部) の符号によって決まる。 $\underline{K}(\omega)$ は、次の数3で表せる。

[0047] [数3]

$$\underline{K}(\omega) = \frac{\epsilon_2 - \epsilon_1 - j(\sigma_2 - \sigma_1)/\omega}{\epsilon_2 + 2\epsilon_1 - j(\sigma_2 + 2\sigma_1)/\omega}$$

[0048] ここで、 ϵ_2 は粒子の誘電率、 σ_1 は溶液の電気伝導率、 σ_2 は粒子の電気伝導率であり、 j は虚数単位である。一例として、金属ナノ粒子4としての金ナノ粒子が水に分散している場合、 10^{16} Hz 以下の交流電圧では、 $\text{Re}[\underline{K}(\omega)] > 0$ となり、誘電泳動力 F_{DEP} によって金ナノ粒子がクラック7へ引き寄せられる。したがって、金ナノ粒子を分散させた水を溶液5として用いる場合、金ナノ粒子による電界トラップを生じさせるには、金属配線3に印加する交流電圧の周波数を、 10^{16} Hz 以下とするのが好ましい。

[0049] 図3Aは、点Oから離れた金属ナノ粒子4が電界から受ける誘電泳動力 F_{DEP} を模式的に示しており、図3Bは、クラック7内の点Oから金属ナノ粒子4に至る距離と、誘電泳動力 F_{DEP} との関係を理論的に示している。

[0050] 上記数2や数3で示したように、誘電泳動力 F_{DEP} は、金属ナノ粒子4の粒径や、電界の強度分布や、金属ナノ粒子4の誘電率及び電気伝導率や、液体5の誘電率及び電気伝導率から計算でき、材料のパラメータを代入し、寸法及び電界のパラメータを変更して理論的解析を行なうことで、図3Bに示すグラフが得られる。ここでは、金属ナノ粒子4の入手容易性や、金属配線3の作成可能性などを加味して、各部の材料や寸法を決定した。具体的には、金属ナノ粒子4を含む液体5として、Sigma-Aldrich社製の平均直径40 nmの金

ナノ粒子を分散した水溶液を用いると共に、金属配線3として厚さ100 nmの金配線を用いることとした。また、金配線への印加電圧として、100 kHzの交流電圧を用いることとした。

[0051] 図4 Aは、点Aに位置する金属ナノ粒子4が電界から受ける誘電泳動力 F_{DEP} を模式的に示しており、図4 Bは、金属配線3への印加電圧に対する誘電泳動力 F_{DEP} の計算結果を示している。

[0052] この計算でも、金属ナノ粒子4を含む液体5として、半径 $R=20\text{ nm}$ の金ナノ粒子を分散した水溶液を用い、電源15からの100 kHzの交流電圧 $V(t) = V_{\text{amp}} \sin \omega t$ を用いた。また、金配線の厚さ $h=100\text{ nm}$ 、クラック7の幅 $d=200\text{ nm}$ として、数式2により誘電泳動力 F_{DEP} を計算した。図4 Bは、図4 Aの点Aにおいて、金配線への印加電圧の振幅 V_{amp} を0 Vから3 Vに変化させたときの誘電泳動力 F_{DEP} の時間平均 $\langle F_{\text{DEP}} \rangle$ の大きさを示している。ファンデルワールス力 F_{VDW} に静電反発力 F_{ES} を加えた力 $(F_{\text{VDW}} + F_{\text{ES}})$ の大きさは、 10^{-12} N 程度であるため、これよりも誘電泳動力 F_{DEP} の時間平均 $\langle F_{\text{DEP}} \rangle$ が大きくなる電圧振幅 $V_{\text{amp}}=1.70\text{ V}$ 程度以上で、金ナノ粒子の電界トラップが起きると予測できる。

[0053] 次に、本実施形態の実験例について、図5～図15を参照しながら説明する。ここでは、金ナノ粒子の電界トラップによって金配線が修復できることの検証を行なった。

[0054] 最初に、図1で示した柔軟基板2を基材とした自己修復型配線1ではなく、ガラス基板102を基材とした実験用配線101を用い、このガラス基板102上で人工的に作製したクラック7の修復実験を行った。図5は、ガラス基板102上に形成した金属配線3としての金配線に、幅200 nmのクラック7を作成した実験用配線101を示している。実験では、金ナノ粒子の電界トラップによって理論の予測通りに配線が修復されること、及びどの程度の幅までクラック7の修復が可能かを確認した。

[0055] 実験では、ガラス基板102上に、幅 $10\text{ }\mu\text{ m}$ 、厚さ100 nm、長さ1 mmの金配線をフォトリソグラフィにより作成し、その後でFocused Ion Beam (F

I B : 集束イオンビーム) 加工によって、200 nm から 1600 nm の幅で、金属配線 3 を横断する断線領域としてのクラック 7 を人工的に作製した。金ナノ粒子を分散した水溶液として、粒子濃度 7.15×10^{10} 個 / ml、半径 20 nm の Sigma-Aldrich 社製 741981 を用いた。そして、電源 15 となる LCR メータによって 100 KHz の交流電圧を印加し、同時にインピーダンス (交流抵抗値) $|Z|$ を四端子法で計測した。

[0056] 図 6 は、幅 200 nm のクラック 7 において、電圧振幅 V_{amp} を 0.50 V から 3.00 V へ増加させたときに、金属配線 3 のインピーダンス $|Z|$ がどのように変化するかを測定したものである。図 6 において、電圧振幅 V_{amp} が 1.65 V のときインピーダンス $|Z|$ が、 $10^4 \Omega$ オーダから $10^1 \Omega$ オーダまで大きく減少し、その後は金属配線 3 への印加電圧を上げてても、インピーダンス $|Z|$ が変化しない状態となっている。これは、電界トラップによって凝集した金ナノ粒子がクラック 7 を架橋し、金属配線 3 が修復したと考えられる。そのため、この電圧を「修復電圧 V_{heal} 」と呼ぶ。修復後の金属配線 3 のインピーダンスは、クラック 7 が入っていない金属配線 3 と同じオーダであり、非常に高い自己修復機能を有していると言える。また、図 7 に示すように、実験後の金属配線を Scanning Electron Microscope (SEM : 走査型電子顕微鏡) で観察したところ、金ナノ粒子がクラック 7 を架橋していることが確認できた。

[0057] 図 8 は、図 6 と同様の実験を異なる幅のクラック 7 で行なったときの修復電圧 V_{heal} を示している。ここでは、200 nm から 1600 nm の幅を有するクラック 7 に対して 5 回ずつ実験を行った。図中、分数は試行回数に対する修復した回数を表している。

[0058] 図 9 は、クラック 7 の幅が 200 nm, 600 nm, 1000 nm の場合に、実験後の金属配線 3 をそれぞれ撮影したものである。同様に図 10 は、クラック 7 の幅が 400 nm の場合に、実験後の金属配線 3 を撮影したものである。

[0059] 実験の結果、例えばクラック 7 の幅が 200 nm のときには、5 回中 4 回修復に成功し、成功した場合の修復電圧 V_{heal} の平均は 1.7 V であった。こうして、

クラック 7 の幅が1000 nm以下の場合、5 回中4 回以上が修復に成功し、クラック 7 の幅が1200 nm以下の場合でも、5 回中3 回以上が修復に成功した。また、クラック 7 の幅が広がると共に修復電圧 V_{heal} が増加する傾向がみられ、クラック 7 の幅が200 nmから1200 nmの間は、修復電圧 V_{heal} の平均値が1.70 Vから2.50 Vまで変化した。その理由は、上記数 2 から分かるように、クラック 7 の幅が大きくなることにより、電界強度の実効値 E_{rms} が小さくなり、電界トラップに必要な電圧が大きくなったためである。

[0060] 一方、クラック 7 の幅が1400 nmに広がると、5 回中1 回しか修復せず、1600 nmでは修復しなかった。修復しなかった金属配線 3 では、印加する交流電圧の振幅 V_{amp} が3.00 V前後になると、クラック 7 の周辺で気泡が生じ、さらに電圧を上げると金属配線 3 が融解した。印加電圧の振幅 V_{amp} が3.0 V以上を超えると、溶液および金属配線 3 の電気分解、もしくはジュール熱による溶液の沸騰および金属配線 3 の融解が始まると考えられるため、実験では3.0 Vまでで修復するかどうかを調べた。

[0061] 修復電圧 V_{heal} の最大値と最小値の差は、最大で1.10 V程度であった。これは、修復電圧 V_{heal} は電界トラップが始まる電圧ではなく、金ナノ粒子が凝集し、クラック 7 を架橋したときの電圧であることが原因であると考えられる。図 6 での計測は、各点数十秒ほど待ってから電圧振幅 V_{amp} を変化させているが、誘電泳動力 F_{DEP} の有効な領域に含まれる金ナノ粒子の数は確立的であり、凝集する金ナノ粒子の数は毎回変化する。そのため、修復電圧 V_{heal} が変動すると考えられる。実際、図 8 のエラーバーが示すように、同じ幅を有するクラック 7 でも修復電圧 V_{heal} のばらつきは大きく、クラック 7 の幅が小さければ必ず修復される訳でもないため、修復過程に確率的な過程が入っていると考えられる。しかし、幅が1000 nm以下のクラック 7 であれば、3.0 V以下の電圧印加によりほぼ修復が可能であるという結論が得られた。

[0062] 続いて、ガラス基板 102 に代わって伸縮可能な柔軟基板 2 上での実験を行った。この実験では、柔軟基板 2 として poly(dimethylsiloxane) (PDMS) を用いた。PDMS 基板上に幅10 μm 、厚さ100 nmの金配線を作製し、

F I B加工によって幅270 nmのクラック7を作製した。ガラス基板102上と同じ条件で修復した結果、修復電圧 V_{heal} は1.60 Vであった。図11には、電圧振幅 V_{amp} を0.50 Vから3.00 Vへ増加させたときに、金属配線3のインピーダンス $|Z|$ がどのように変化するかを測定した結果を示している。

[0063] ガラス基板102がPDMS基板になることで、ファンデルワールス力 F_{VDW} と静電反発力 F_{ES} の大きさや、クラック7の断面形状が変化する可能性が考えられる。しかし、実験での修復電圧 V_{heal} は、ガラス基板102と同等の値であった。これは、金配線の厚さが100 nmであり、PDMS基板から受けるファンデルワールス力 F_{VDW} と静電反発力 F_{ES} の影響が小さいことなどが理由であると考えられる。図12は、クラック7の幅が270 nmである場合の、金属配線3を修復した後のクラック7の顕微鏡写真とSEM写真であり、ガラス基板101上の実験と同様に金ナノ粒子がクラック7を架橋していた。つまり、PDMSを用いた柔軟基板2上でも、金ナノ粒子の電界トラップ現象によって、金配線を自己修復できることが判明した。

[0064] このように、ガラス基板102上に幅 $10\mu\text{m}$ 、厚さ100 nm、長さ1 mmの金配線を製作し、その金配線に200 nmから1600 nmの幅のクラック7を生じさせた実験用配線101に、粒子濃度 7.15×10^{10} 個/ml、半径20 nmの金ナノ粒子を分散した水溶液を用いて、金配線の修復実験を行った。その結果、クラック7の幅が200 nmから1200 nmの金配線は、100 kHzの周波数で、振幅 V_{amp} が1.70 Vから2.50 Vの範囲の交流電圧を電源15から金配線に印加すれば、金ナノ粒子に電界トラップ現象が生じて、金ナノ粒子がクラック7を架橋し、金配線を修復できることが判明した。また、修復された金配線のインピーダンス $|Z|$ は、クラック7が生じる前と同じ $10^1 \Omega$ オーダにまで減少し、高い電気伝導性を維持できることが判明した。

[0065] さらに別な実験で、PDMS基板上に幅 $10\mu\text{m}$ 、厚さ100 nmの金配線を製作し、その金配線に270 nmの幅のクラック7を生じさせたものでは、1.60 Vの修復電圧 V_{heal} で金ナノ粒子に電界トラップ現象が生じて、金ナノ粒子がクラック7を架橋し、金配線を修復できた。これは、ガラス基板101上の実

験結果と同等であった。

[0066] 次に、金ナノ粒子の粒径依存性について、図5と同様にガラス基板102を基材とした実験用配線101を用い、このガラス基板102上で人工的に作製したクラック7の修復実験を行った。金属ナノ粒子に働く力は、前述したように数1で示した合力 F_{Total} で表される。数1の右辺に示す各力は、金属ナノ粒子の粒径の影響を受け、ファンデルワールス力 F_{VDW} と静電反発力 F_{ES} との和である $F_{VDW} + F_{ES}$ は r に比例し、誘電泳動力 F_{DEP} は r^3 に比例する（ r は金属ナノ粒子の粒子半径）。そのため、金ナノ粒子の粒径の違いによって、クラック7の修復の効果が異なることが予想される。

[0067] 実験では、ガラス基板102上に、幅 $10\mu m$ 、厚さ $500nm$ 、長さ $1mm$ の金配線をフォトリソグラフィにより作成し、その後でFocused Ion Beam（FIB：集束イオンビーム）加工によって、金属配線3を横断する断線領域としてのクラック7を人工的に作製した。また金ナノ粒子として、半径 $20nm$ と半径 $200nm$ の2種類を用いて実験を行なった。クラック幅に関しては、粒子半径 $20nm$ を用いる場合は幅 $250nm$ から $1250nm$ とし、粒子半径 $200nm$ を用いる場合は幅 $500nm$ から $3500nm$ とした。金ナノ粒子を分散した水溶液として、粒子半径以外の条件をできるだけ揃えるために、粒子濃度 7.2×10^{10} 個/ mL 、半径 $20nm$ のSigma-Aldrich社製741981と、粒子濃度 1.9×10^8 個/ mL 、半径 $200nm$ のSigma-Aldrich社製742090を用いた。そして、電源15となるLCRメータによって $100kHz$ の交流電圧を印加し、同時にインピーダンス（交流抵抗値） $|Z|$ を四端子法で計測した。

[0068] 図13は、幅 $500nm$ のクラック7において、電圧振幅 V_{amp} を $0.1V$ から $2.5V$ へ増加させたときに、金属配線3のインピーダンス $|Z|$ がどのように変化するのかを測定したものである。図13において、粒子半径が $20nm$ を用いた場合は、電圧振幅 V_{amp} が $2.2V$ のときに、また粒子半径が $200nm$ を用いた場合は、電圧振幅 V_{amp} が $1.8V$ のときに、インピーダンス $|Z|$ が $10^4\Omega$ オーダから $10^1\Omega$ オーダまで大きく減少し、その後は金属配線3への印加電圧を上げても、インピーダンス $|Z|$ が変化しない状態となっている。電界トラップ

によって凝集した金ナノ粒子がクラック7を架橋し、金属配線3を修復したと考えられる修復電圧 V_{heal} は、金ナノ粒子の粒径を大きくすることにより、下げることができることが分かる。また、図14に示すように、実験後の金属配線をScanning Electron Microscopeで観察したところ、金ナノ粒子がクラック7を架橋していることが確認できた。なお、図14のAに示すように、粒子半径20 nmにおいては、凝集した粒子が溶融し、大きさ数百 nmの固まりが生じている様子が確認された。

[0069] 図15は、図13と同様の実験を異なる幅のクラック7で行なったときの修復電圧 V_{heal} を示している。ここでは、粒子半径20 nmを用いる場合には250 nmから1600 nmの幅を、また粒子半径200 nmを用いる場合には500 nmから3500 nmの幅を有するクラック7に対して、5回ずつ（3500 nmの幅のみ3回）実験を行った。図中、分数は試行回数に対する修復した回数を表している。

[0070] 実験の結果、同じ粒子半径では、クラック7の幅が大きくなると修復が生じる電圧も大きくなった。粒子半径が20 nmの場合、幅が1000 nmまでクラック7は印加電圧の振幅 V_{amp} が3.2 V以下で修復が生じ、粒子半径が200 nmの場合、幅が3500 nmまでクラック7は印加電圧の振幅 V_{amp} が4.0 V以下で修復が生じた。また、粒子半径が20 nmよりも200 nmの金ナノ粒子を用いた方が、各クラック7の幅に対する修復が生じる電圧が小さくなり、同じ印加電圧でより大きいクラックを修復することができた。

[0071] 次に、図1に示す自己修復型配線1の作用効果を説明する。本実施形態の自己修復型配線1は、例えばPDMSからなる柔軟基板2や容器12が可撓性と伸縮性を有するため、外力により任意に曲げたり伸縮させたりすることができる。この点、従来はフレキシブルディスプレイやフレキシブルセンサシートなどの開発が盛んに行なわれているものの、そうしたフレキシブルデバイスの多くは、或る曲率半径まで曲げられる可撓性を有するが、伸縮性は有していない。

[0072] また、自己修復型配線1を無理に曲げたり伸縮させたりすると、金属配線

3が部分的に破断してクラック7が生じるが、電源15の両端を端子部8に接続して、電源15から金属配線3に上述のような交流電圧を印加すれば、クラック7の部分に電界が生じて、液体

5中の金属ナノ粒子4に誘電泳動力 F_{DEF} のみが作用する電界トラップ現象が生じ、その金属ナノ粒子4がクラック7を架橋して、金属配線3はクラック7の部分にのみ選択的に修復される。この自己修復型配線1の自己修復機能により、電気配線として高い電気伝導率でかつ高い伸縮耐性を持つことが可能になる。

[0073] 以上のように、本実施形態の自己修復型配線1は、第1基材である柔軟基板2に電気配線としての金属配線3を配設し、金属配線3に生じるクラック7の修復部として、導電性粒子としての金属ナノ粒子4を分散させた液体5で金属配線3を覆う独自のハイブリッド構造を実現している。

[0074] この場合、金属配線3にクラック7が生じても、クラック7の部分にのみ選択的に働く力を利用して、液体5中の金属ナノ粒子4がクラック7を架橋すれば、金属配線3がクラック7の部分でのみ選択的に修復される。そのため従来とは異なり、金属ナノ粒子4を含む液体5と、固体である金属配線3とのハイブリット構造を利用して、高導電性と高伸縮性とを兼ね備えた自己修復型配線1を提供できる。

[0075] また、本実施形態の自己修復型配線1は、金属配線3への電圧印加を可能にし、クラック7の部分にのみ電界を生じさせる端子部8を、金属配線3に設けている。

[0076] この場合、柔軟基板2の伸縮に伴い金属配線3にクラック7が生じても、端子部8を利用してその金属配線3に所望の電圧を印加すれば、クラック7の部分にのみ選択的に働く力として、誘電泳動力 F_{DEF} による電界トラップ現象を液体5中の金属ナノ粒子4に生じさせることができる。これにより、凝集した金属ナノ粒子4がクラック7を架橋して、外部から熱を加えたりせずに、物理的な力のみで金属配線3を修復することが可能となる。

[0077] また、本実施形態の自己修復型配線1は、導電性粒子が金属粒子となる金

属ナノ粒子4であることを特徴とし、導電性粒子として特に金属ナノ粒子4を用いたものにおいて、高導電性と高伸縮性とを兼ね備えた自己修復型配線1を提供できる。

[0078] また、本実施形態の自己修復型配線1は、第1基材としての柔軟基板2が伸縮可能であることを特徴とし、柔軟基板2の伸縮に伴い金属配線3にクラック7が生じて、その金属配線3をクラックの部分で選択的に修復することが可能になる。

[0079] また、本実施形態の自己修復型配線1は、電気配線が金属配線3であることを特徴とし、電気配線として特に金属配線3を用いたものにおいて、高導電性と高伸縮性とを兼ね備えた自己修復型配線1を提供できる。

[0080] 図16は、本発明の第2実施形態における自己修復型配線21の基本構造を示している。本実施形態では、第1実施形態のような電界を用いる方法ではなく、表面の違いを用いる方法として、特に表面修飾によって金属配線3に生じたクラック7を自己修復する方法を提示する。ここでの伸縮配線21は、第1実施形態における端子部8や電源15を設けず、その代わりに金属ナノ粒子4の表面と、液体5に接する金属配線3の表面を負電荷22に帯電させ、クラック7の部分で液体5に接する柔軟基板2の表面を、正電荷23で帯電させた構成を有している。

[0081] そして本実施形態では、金属配線3に対して電圧を加えなかったとしても、金属ナノ粒子4には前述のファンデルワールス力 F_{VDW} と静電力が働く。ファンデルワールス力（引力） F_{VDW} とは制御が難しいが、静電力は表面が正に帯電しているか、負に帯電しているかで、引力として働くか斥力として働くかが決まり、これは表面の分子修飾によって容易に変えることが可能である。そのため図16に示すように、金属ナノ粒子4と金属配線3の各表面が液体5中で負に帯電し、柔軟基板（シリコンゴム）2の表面が液体5中で正に帯電するような静電力付与手段（図示せず）を伸縮配線21に付加すれば、柔軟基板2がむき出しになったクラック7の部分を金属ナノ粒子4が架橋して、この部分にのみ選択的に金属配線3を修復することが可能になる。これは

修復に電圧を必要とせず、リーク電流や絶縁破壊の問題がないという点で、第1実施形態のような電界を用いる方法よりも優れている。

[0082] 以上のように、本実施形態の自己修復型配線1は、さらに金属配線3の表面を、金属粒子である金属ナノ粒子4の表面と同極の負電荷22に帯電させ、クラック7の部分で液体5に接する第1基材としての柔軟基板2の表面を、金属ナノ粒子4の表面と異極の正電荷23に帯電させる構成を備えている。

[0083] この場合、柔軟基板2の伸縮に伴い金属配線3にクラック7が生じても、クラック7の部分にのみ選択的に働く力として、特に表面の分子修飾の違いを利用して、液体5中の金属ナノ粒子4に静電力を作用させることができる。これにより、柔軟基板2が露出したクラック7の部分を金属ナノ粒子4が架橋して、外部から熱を加えたりせずに、物理的な力のみで金属配線3を修復することが可能となる。また、修復の際に電圧を印加する必要がなく、リーク電流や絶縁破壊の問題も回避できる。

[0084] なお、上記第1実施形態や第2実施形態において、導電性粒子は金属粒子の他に、金属を含む化合物の粒子、はんだなどの合金粒子、半導体粒子、導電性高分子、カーボンナノチューブやフラーレンなどの炭素粒子もしくはこれらの組み合わせでもよい。半導体粒子や導電性高分子でも、上記のファンデルワールス力 F_{VDW} や、静電反発力 F_{ES} や、誘電泳動力 F_{DEF} が働き、また表面修飾により表面の電荷を変えることが可能である。また、第1実施形態や第2実施形態では、導電性粒子を分散する流動体として、液体5に代わって、気体（空気やガス、真空など）を用いてもよい。これは特に、宇宙用途で重要なものとなる。

[0085] 図17は、本発明の第3実施形態における自己修復型配線31の基本構造を示している。本実施形態では、第1実施形態のような電界を用いる方法として、特にクラック7が生じた一方の金属配線3を陽極3Aとし、他方の金属配線3を陰極3Bとして、その間に電源15からの直流電圧を印加する電解メッキによる方法を提示する。ここでの伸縮配線31は、クラック7の部

分にのみ生じた電界によって、電解メッキを行なうために、金属ナノ粒子4ではなく、例えば銅イオン Cu^{2+} などの金属イオンが溶解した水溶液としての液体5が、金属配線3を覆って配設される。

[0086] そして本実施形態では、伸縮配線31を無理に曲げたり伸縮させたりすると、金属配線3が部分的に破断してクラック7が生じるが、電源15の両端を端子部8に接続して、電源15から金属配線3に直流電圧を印加すれば、クラック7の部分にのみ電界が生じ、液体5に溶けている金属イオンが電気化学反応によって、金属配線3の陽極3A側に固体金属として析出される。そして、その固体金属がクラック7を架橋することで、金属配線3はクラック7の部分にのみ選択的に修復される。

[0087] なお、上記電気化学反応では、金属配線3の陰極3B側で、金属が金属イオンとして液体5に溶け出してしまう反応が起きるが、電解メッキでは尖った角に電界が集中して、他の部位よりもメッキが速く行われるため、このメッキ速度の違いを利用すれば、金属配線3全体は修復しなくても、金属配線3の一部が再度繋がるようになる。

[0088] 以上のように、本実施形態の自己修復型配線31は、伸縮可能な第1基材である柔軟基板2に金属配線3を配設し、柔軟基板2の伸縮に伴い金属配線3に生じるクラック7の修復部として、金属イオンとを溶解した液体5で金属配線3を覆う独自のハイブリッド構造を実現している。

[0089] この場合、柔軟基板2の伸縮に伴い金属配線3にクラック7が生じても、クラック7の部分にのみ選択的に働く力を利用して、液体5中の金属イオンから析出される固体金属がクラック7を架橋すれば、金属配線3がクラック7の部分で選択的に修復される。そのため従来とは異なり、金属イオンを含む液体5と、固体である金属配線3とのハイブリット構造を利用して、高導電性と高伸縮性とを兼ね備えた自己修復型配線31を提供できる。

[0090] また、本実施形態の自己修復型配線31は、金属配線3への電圧印加を可能にし、クラック7の部分にのみ電界を生じさせる端子部8を、金属配線3に設けている。

- [0091] この場合、柔軟基板 2 の伸縮に伴い金属配線 3 にクラック 7 が生じても、端子部 8 を利用してその金属配線 3 に所望の電圧を印加すれば、クラック 7 の部分にのみ選択的に働く力として、電界を利用した電解メッキにより、液体 5 中の金属イオンから固体金属を析出させることができる。これにより、析出した固体金属がクラック 7 を架橋して、外部から熱を加えたりせずに、電気化学的な力のみで金属配線 3 を修復することが可能となる。
- [0092] 図 18 は、本発明の第 4 実施形態における自己修復型配線 4 1 の基本構造を示している。本実施形態では、第 2 実施形態のような表面の違いを用いる方法として、特に無電解メッキによる電気化学的な方法を提示する。ここでの伸縮配線 4 1 は、第 3 実施形態と同様に金属イオンが溶解した水溶液を液体 5 として用いるが、第 3 実施形態のような端子部 8 や電源 15 は設けず、その代わりに樹脂である柔軟基板 2 の表面にのみ無電解メッキを行なうために、この柔軟基板 2 に前処理を施している。
- [0093] そして本実施形態では、伸縮配線 4 1 を無理に曲げたり伸縮させたりすると、金属配線 3 が部分的に破断してクラック 7 が生じるが、そのクラック 7 の部分で前処理が施された柔軟基板 2 がむき出しになって液体 5 に触れると、液体 5 に溶けている金属イオンが電気化学反応によって、柔軟基板 2 の表面に固体金属のメッキ層 4 2 として析出される。そして、メッキ層 4 2 がクラック 7 を架橋することで、金属配線 3 はクラック 7 の部分にのみ選択的に修復される。
- [0094] 以上のように、本実施形態の自己修復型配線 4 1 は、さらにクラック 7 の部分で液体 5 に接する柔軟基板 2 の表面にのみ、無電解メッキにより金属イオンから固体金属をメッキ層 4 2 として析出させる構成を有している。
- [0095] この場合、柔軟基板 2 の伸縮に伴い金属配線 3 にクラック 7 が生じても、クラック 7 の部分にのみ選択的に働く力として、表面修飾の違いを利用した無電解メッキにより、クラック 7 の部分で液体 5 に接する柔軟基板 2 の表面にのみ、液体 5 中の金属イオンから固体金属をメッキ層 4 2 として析出させることができる。これにより、析出したメッキ層 4 2 がクラック 7 を架橋し

て、外部から熱を加えたりせずに、電気化学的な力のみで金属配線 3 を修復することが可能となる。また、修復の際に電圧を印加する必要がなく、リーク電流や絶縁破壊の問題も回避できる。

[0096] なお、上記第 3 実施形態や第 4 実施形態において、金属イオンを溶解した液体 5 は、金属を含む化合物や化合物イオン、もしくはこれらの組み合わせを含有もしくは溶解した流動体でも良い。

[0097] 図 19～図 22 を基に、本発明の第 5 実施形態について説明する。本実施の形態では、クラック 7 の間を金属ナノ粒子 4 が架橋した後に融解することで、修復後の抵抗を下げるものである。具体的には、金属ナノ粒子 4 を電界トラップもしくは表面修飾で自己修復を行った後、図 19 に示すように、電源 15 を利用して配線部となる金属配線 3 に電圧を印加する（電界トラップの場合には修復でも電圧をかけているので、そのまま電圧を印加し続けることも可能である）ものである。修復部は配線部よりも高抵抗であるため、ジュール熱（抵抗加熱）により修復部が選択的に加熱される。さらに、金属ナノ粒子 4 は、ある程度の大きさを持った塊であるバルクの金属よりも融点が高いことが知られており、ジュール熱で配線部が溶けるよりも先に金属ナノ粒子 4 が溶けるものと考えられる。このため、第 1 の実施の形態でも説明したように、修復部の金属ナノ粒子 4 の融解が生じ、クラック 7 の間に融解部 18 が形成される。ある程度の量の金属ナノ粒子 4 で架橋しておけば、修復部の金属ナノ粒子 4 が融解し、クラック 7 の隙間を融解部 18 で埋めていくために、単に金属ナノ粒子 4 を架橋させた場合に比べて低抵抗とすることができる。

[0098] また、修復部を選択的に加熱するための熱源として、前述のジュール熱に代わって、自己修復型配線 1 の全体を加熱したり、レーザー加熱を行なったりしても構わない。この場合も金属ナノ粒子 4 は、ある程度の大きさを持った塊であるバルクの金属よりも融点が高いことが知られているので、自己修復型配線 1 の全体を加熱しても金属ナノ粒子 4 だけを融解させることができる。

- [0099] 実際に、クラック部を架橋した金ナノ粒子が溶ける様子を、図20～図22に示す。図20は金ナノ粒子がクラック部にトラップされている様子を示し、図21はジュール熱（抵抗加熱）により金ナノ粒子が融解して、その一部が融解して大きな固まりとなっている様子を示し、図22は金ナノ粒子が大きく融解して固まりとなっている様子を示している。
- [0100] 本実施の形態で述べたジュール熱を用いた金属ナノ粒子4の融解は、第1実施形態で述べた金属ナノ粒子4を用いた電界トラップや、第2実施形態で述べた表面修飾で有効であるが、第3実施形態の電解めっきや、第4実施形態の無電解めっきと併用しても良い。つまり第3実施形態や第4実施形態では、クラック7の部分に析出した固体金属を、金属配線3への電圧印加により金属配線3よりも先にジュール熱で融解させる。ここでもジュール熱に代わって、自己修復型配線31、41の全体を加熱したり、レーザー加熱を行ったりしても構わない。なお、第2実施形態や第4実施形態では、何れも端子部8や電源15を設けない構成として説明したが、本実施形態を併用する場合は端子部8や電源15を必要とする。
- [0101] 以上のように本実施形態では、上述の第1実施形態や第2実施形態と併用して、導電性粒子としての金属ナノ粒子4が、クラック7の部分において電気配線としての金属配線3よりも先に熱で融解するもので構成される。
- [0102] この場合、金属配線3に生じたクラック7を修復した後に、そのクラックの部分にトラップされた導電性粒子だけを加熱融解させることができ、単に導電性粒子を架橋させた場合に比べて低抵抗とすることができる。
- [0103] また本実施形態では、上述の第3実施形態や第4実施形態と併用して、クラック7を架橋するのに金属イオンから析出される固体金属が、クラック7の部分において金属配線3よりも先に熱で融解するもので構成される。
- [0104] この場合、金属配線3に生じたクラック7を修復した後に、そのクラック7の部分に析出した固体金属だけを加熱融解させることができ、単に固体金属を架橋させた場合に比べて低抵抗とすることができる。
- [0105] 図23は、本発明の第6実施形態における自己修復型配線1のクラック7

周辺の構造を示している。同図において、「タイプ 1」は第 1 実施形態で説明した単独の金属配線 3 を示し、「タイプ 2」は本実施形態で説明する多股に分割した金属配線 3 を示している。本実施形態では、金属配線 3 の形状が異なる以外は、第 1 実施形態の自己修復型配線 1 と同一の構成を有する。

[0106] 「タイプ 1」の金属配線 3 は、一端（例えば、一方の端子部 8）と他端（例えば、他方の端子部 8）との間に一つの電流経路だけが形成されるため、金属配線 3 にクラック 7 が生じたときの修復ポイントも一つだけとなり、最終的には修復されるものの、一時的には「断線」した状態になる。

[0107] これに対して、「タイプ 2」の金属配線 3 は、一端と他端との間に多股に分割した複数の電流経路が形成されるため、金属配線 3 にクラック 7 が生じたときに複数の修復ポイントができ、複数の電流経路の中でどれか数か所の電流経路は繋がっている、ということが実現できる。これにより、繋がっている箇所の数に応じて、金属配線 3 としての抵抗値の変動はあるものの、「断線」となる瞬間をなくすことが可能になる。

[0108] 以上のように、本実施形態の自己修復型配線 1 は、さらに金属配線 3 を多股に分割して形成することで、クラック 7 の修復中でも断線となる状態を回避することができる。

[0109] なお、本実施形態で提案する金属配線 3 の形状は、上述した他の自己修復型配線 2 1, 3 1, 4 1 にもそのまま適用できる。

[0110] 図 2 4 A～図 2 4 E は、本発明の第 7 実施形態における伸縮デバイス 5 1 の製造方法の一例を示している。なお、ここで説明する伸縮デバイス 5 1 の製造方法は具体的ではあるものの限定的なもので、この製造方法に限るという訳ではなく、他の方法を適用してもよい。

[0111] 以下、伸縮デバイス 5 1 の製造方法を順に説明すると、先ず図 2 4 A において、ここでは例えば、剛性の分布のある基板 5 4 を作成するために、伸ばしたり曲げたりしても破断しないシリコンゴム（PDMS）基板などの高伸縮材料 5 5 と、高伸縮材料 5 5 よりも剛性が高く、力を加えてもさほど変形しない Si 基板などの高剛性材料 5 6 などの、ヤング率の大きく異なる 2

種類の基材を用いる。これは、図中左右方向に基板 5 4 を引っ張った時に歪みの分布を作るためのもので、同じ材質を用いて、それぞれの基材の厚みを変えたり、一方の基材にのみ穴をあけたりすることでも同様の効果を発揮できる。本例では第 1 基材となる高伸縮材料 5 5 を Si 基板とし、第 2 基材となる高剛性材料 5 6 をシリコンゴム基板としているが、シリコンゴムでもヤング率が 10 倍異なる種類も知られており（それを 2 種類の基材として用いれば、左右に引っ張ったときに歪は $1/10$ 倍違うということになる）ので、基板 5 4 のすべてをゴム材料としても実現可能である。つまり、ここでの基板 5 4 は、それぞれの材質や形状に限定されず、第 1 基材（例えば、高伸縮材料 5 5）と、この第 1 基材よりも剛性の高い第 2 基材（例えば、高剛性材料 5 6）で作製されていればよい。高剛性材料 5 6 は、第 1 実施形態～第 6 実施形態で説明した柔軟基板 2 に相当する。

[0112] 次の図 2 4 B では、基板 5 4 の表面に金属配線層 5 7 がパターンニング形成される。金属配線層 5 7 は、第 1 実施形態～第 6 実施形態で説明した金や銅などの金属配線 3 に相当するもので、真空蒸着や薄膜を接着するなど、従来用いられている手法を用いることができる。ここでは、高伸縮材料 5 5 と高剛性材料 5 6 に跨って金属配線層 5 7 が形成され、特に高剛性材料 5 6 の表面上の金属配線層 5 7 に、それぞれ対をなす第 1 電極 5 8 A, 5 8 B と、第 2 電極 5 9 A, 5 9 B と、第 3 電極 6 0 A, 6 0 B が配設される。図中、金属配線層 5 7 は基板 5 4 の片面にのみ設けられているが、基板 5 4 の両面に設けてもよい。

[0113] 次の図 2 4 C では、基板 5 4 の高剛性材料 5 6 の部分に、例えば IC などの電気素子 6 3 を実装する。電気素子 6 3 は、金属配線層 5 7 の第 3 電極 6 0 A, 6 0 B に半田付け接続されるが、従来用いられている伸縮耐性のないものを利用していても、高伸縮材料 5 5 とその表面に形成された金属配線層 5 7 とによる配線部が、第 1 実施形態～第 6 実施形態で説明したような伸縮耐性及び修復機能を有していれば、最終的に伸縮デバイス 5 1 全体として伸縮耐性を有することが実現可能になる。

[0114] 次の図 2 4 D では、前述した液体 5 の封止部となるパターン化された流路部 7 1 と、電気素子 6 3 の収容部 7 2 が窪んだシリコーンゴム (PDMS) の封止体 7 3 を別途作成し、これを図 2 4 C の状態の基板 5 4 と接合する。ここでの接合は、PDMS-PDMS bonding と呼ばれるマイクロ流路などを作る際に一般的に使われている手法で、接合力は強く、封止した液体 5 が漏れるということもない。またシリコーンゴムは、空気圧をかけて風船のように膨らますなどの用途も行われており、引っ張って接合部が破れるというようなこともない。シリコーンゴムであっても当然破断する限界はあるが、元の寸法に対して 200% 伸びるというシリコーンゴムも存在する。封止体 7 3 は第 1 実施形態～第 6 実施形態で説明した容器 1 2 に相当し、流路部 7 1 は第 1 実施形態～第 6 実施形態で説明した液体封止部 1 1 に相当する。

[0115] こうして、封止体 7 3 と基板 5 4 とを接合すると、図 2 4 E に示すような完成状態の伸縮デバイス 5 1 が得られる。伸縮デバイス 5 1 の完成状態では、流路部 7 1 に収容された液体 5 が、高伸縮材料 5 5 上の金属配線層 5 7 と接した状態で、封止体 7 3 と基板 5 4 との間に封止される。また、伸縮デバイス 5 1 と他の電気機器との電氣的接続を可能にするために、第 1 電極 5 8 A, 5 8 B 及び第 2 電極 5 9 A, 5 9 B は、封止体 7 3 に覆われることなく高剛性材料 5 6 上に露出している。

[0116] なお、液体 5 は封止体 7 3 と基板 5 4 とを接合封止する際に予め流路部 7 1 に入れても良いし、封止した後に外から注入し、流路部 7 1 に連通する注入口を塞ぐものでも構わない。また、リーク電流などを考慮して、例えば図 2 4 E のように電気素子 6 3 に液体 5 が触れないように、封止体 7 3 の流路部 7 1 を区画形成すれば、そうしたリーク電流などの問題は生じない。

[0117] 図 2 5 は、図 2 4 A で「剛性の分布のある基板 5 4」を用いた理由を説明するための図で、伸縮デバイス 5 1 を伸縮変形させたときの歪の分布を模式的に示している。同図において、完成した伸縮デバイス 5 1 に対し、左右に一様な力をかけて伸縮変形をさせたときに、高剛性材料 5 6 に電気素子 6 3 を実装した無変形領域は変形せず、上下ともシリコーンゴムの高伸縮材料 5

5と封止体73でできた高変形領域の部分のみが伸縮する。この高変形領域は、第1実施形態～第6実施形態で説明した自己修復型配線1, 21, 31, 41に相当するため、伸縮デバイス51を伸縮するのに伴い金属配線3にクラック7が生じれば、これを第1実施形態～第6実施形態の方法によって修復することが可能になる。

[0118] なお、上述した伸縮デバイス51の製造方法自体は、一つの例としてさほど特殊なものではないが、剛性の分布のある基板54を用いることにより、伸縮デバイス51として歪の分布を任意に制御できる。また本実施形態では、修復機能を電気素子63に求めず、配線すなわち金属配線層57のみに求めていることも特徴である。例えば、有機EL素子や有機半導体素子のような機能素子に、曲げ耐性や伸縮耐性を求める研究は盛んに行なわれているが、図24Eに示すような伸縮デバイス51の構造にすると、機能素子を含む電気素子63そのものが伸縮性を有していなくても、デバイス全体として伸縮性と修復機能を持たせることが可能になる。現状では、有機材料を用いた電気素子63よりも無機材料を用いた電気素子63の方が性能面で優れているが、こうした従来から蓄積のある機能素子を残したまま、伸縮性と修復機能を有するフレキシブルな伸縮デバイス51が実現できる。これは、有機材料などの材料開発から行なうよりも、無機材料を使ってフレキシブルな伸縮デバイス51を製造する方が、産業上早いし現実的であることを意味し、本実施形態における伸縮デバイス51を、実現性の高いアプローチとして捉えることができる。

[0119] 次に、伸縮デバイス51の利用方法について、一例を説明すると、図24Eにおいて、通常の使用時には、一方の第1電極58Aと一方の第2電極59Aとの間に電気素子63の駆動電圧を印加して、伸縮デバイス51を利用する一方、例えば第1電極58A側に繋がる金属配線層57が破断した場合には、一方の第1電極58Aと他方の第1電極58Bに修復電圧を印加して、伸縮デバイス51を修復する。これは、電気素子63の駆動電圧を印加する電源と、金属配線層57の修復電圧を印加する電源（上述した電源15に

相当する)を分けている例になる。但し別な例として、駆動電圧に重畳して修復電圧を印加するなどが、実際の伸縮デバイス51として好ましいと考えられる。また本実施形態では、クラック7の生じた箇所に応じて、第1電極58A、58B及び第2電極59A、59Bの何れもが、金属配線層57への修復電圧の印加を可能にする端子部となり得る。

[0120] 前述のように、第1電極58A側に繋がる金属配線層57が破断した場合には、一方の第1電極58Aと他方の第1電極58Bに修復電圧を印加するが、例えば第1実施形態において、金属配線層57の修復のために必要な交流電圧の振幅 V_{amp} は3V以下であるので、例えば動作電圧が5Vの電気素子63であれば、修復で印加する電圧によって電気素子63を破壊する虞はない。また、液体5の種類(誘電率)を変えることで、修復電圧を下げることも可能である。

[0121] 図26は、平面的に作製した伸縮デバイス51を曲面に貼り付けて使用する一例を示したものである。

[0122] 伸縮デバイス51を曲げて使う場合だけでなく、伸ばして使う場合の用途として、使っている最中に伸縮が必要な第1の用途と、使っている最中には伸縮の必要がないものの、被対象物への貼り付けに伸縮が必要な第2の用途がある。第1の用途では、伸縮デバイス51を可動部(ロボットの肘など)に装着して使う場合が想定され、また生体である人に貼り付けて、体温や健康情報を取得するセンサシートとして、伸縮デバイス51を実現する場合にも、生体の伸縮に伴う伸縮性が伸縮デバイス51に求められる。

[0123] 第2の用途では、被対象物として、例えば円柱に伸縮デバイス51を貼り付けて使うのであれば、平面シート状の伸縮デバイス51を曲げるだけで、円柱の全体を伸縮デバイス51で覆うことができるが、被対象物が球面である場合は、平面シート状の伸縮デバイス51を伸縮させなければ、球面全体を伸縮デバイス51で覆うことができない。これは、貼り付けの対象物となる曲面のガウス曲率を考えれば、曲げ変形だけで済むか、伸縮変形が必要になるかがわかる。すなわち、ガウス曲率がゼロでない対象物の曲面に貼り付

けて利用することを考えると、伸縮デバイス 5 1 を伸縮変形可能とする必要がある。

[0124] 例えば、図 2 6 のように半径 r の円板シート状に作った伸縮デバイス 5 1 (面積は πr^2) を、球形の対象物 S の半球面 (面積 $2\pi r^2$) に貼り付けるとすると、面積が 2 倍になるので、相似比では $\sqrt{2}$ 倍、伸び (歪) としては伸ばす前の形状に対して 41% ($= (\sqrt{2} - 1) \times 100$) 増加となる。ここでは極端な例として、平板状の伸縮デバイス 5 1 を半球面の取付ける場合を考えたが、実際には伸びが 10% 程度の伸縮デバイス 5 1 でも利用範囲は非常に広いと考えられる。

[0125] 以上のように、本実施形態の伸縮デバイス 5 1 は、第 1 基材である高伸縮材料 5 5 と、この高伸縮材料 5 5 よりも剛性の高い高剛性材料 5 6 とにより基板 5 4 を構成し、高剛性材料 5 6 にのみ各種の電気素子 6 3 を実装している。

[0126] この場合、伸縮デバイス 5 1 が変形したときに、高剛性材料 5 6 に実装した電気素子 6 3 は変形せず、高伸縮材料 5 5 の部分のみが伸縮して、そこに実装された金属配線層 5 7 にクラック 7 が生じた場合でも、そのクラック 7 を修復部である自己修復型配線 1, 2 1, 3 1, 4 1 のハイブリッド構造で自己修復することができる。そのため、従来からの伸縮特性のない電気素子 6 3 をそのまま利用しても、自己修復型配線 1, 2 1, 3 1, 4 1 の部分が伸縮耐性及び修復機能を有しているので、伸縮デバイス 5 1 全体として伸縮耐性を有することが可能となる。

[0127] 第 7 の実施形態では、剛性分布のある基板 5 4 を用いた例を説明した。この場合、クラック 7 となる断線部分は高変形領域に発生する。本実施形態では、このような現象を用いて、あるいは他の手法を用いて、断線部分の発生領域を制御する。このように断線する領域を制御することにより、断線部分を一箇所に限ったり複数箇所作成したりすることが可能となる。断線領域を一箇所に限ることで修復電圧を低くできる。一方で、断線領域を複数に分散することで、断線間隔が大きくなり過ぎることを防ぐことができ、修復に

時間がかかることや、修復が困難になることを防ぐことができる。

[0128] 具体的には、配線（金属配線 3 や金属配線層 5 7）の一部の領域の厚さや幅を、他の領域よりも小さく形成することで、断線を生じさせることができる。また、下地となる柔軟基板 2 や高伸縮材料 5 5 などに凹凸を設け、引っ張り時に応力が集中しやすい形状とし、他の領域に比べて断線が生じやすくしてもよい。また、第 7 の実施形態で示した高変形領域と低変形領域とを交互に複数形成することで、複数の特定の領域に断線が発生するようにしてもよい。

[0129] 以上のように本実施形態では、電気配線となる金属配線 3 や金属配線層 5 7 の所定の場所でクラック 7 が発生するように、金属配線 3 や金属配線層 5 7 または第 1 基材となる柔軟基板 2 や高伸縮材料 5 5 の少なくとも一方が構成される。これにより、クラック 7 となる断線部分の発生領域を制御することが可能になる。

[0130] 以上、本発明の各実施形態について説明したが、当該実施形態はあくまでも例として提示したに過ぎず、発明の範囲を限定することを意図していない。ここに提示した実施形態は、その他の様々な形態で実施可能であり、発明の要旨を逸脱しない範囲で、種々の省略、置換、変更が可能である。

[0131] 例えば、金属（ナノ）粒子は、金以外でも、銀、銅、アルミニウムも採用可能である。また、非特許文献 4 に記載されるような、金属配線をジグザグ形状にすることで伸縮性を得ている既存の電気配線に対し、本発明の自己修復機能を併せて使用することで、高導電性と高伸縮性とを兼ね備えた自己修復型配線および伸縮デバイスの一つの望ましい実施形態を得ることができる。

[0132] その他、液体 5 はフロリナート（登録商標：住友スリーエム株式会社製）などの絶縁性液体や、イオン液体などの不揮発性液体を用いてもよい。また、自己修復型配線 1, 2 1, 3 1, 4 1 が刃物で切断されたときなどでも液体 5 が漏れないように、液体を含むゲル材料で液体 5 を構成してもよい。

産業上の利用可能性

- [0133] 伸縮性を有する配線部と微小なセンサ素子との組み合わせにより、センサ素子部は変形せずとも、全体としては伸縮性を有する伸縮デバイス 5 1 を実現できると考えている。これにより、球面などの曲面に貼付可能なセンサシートや伸縮可能なディスプレイなどへの応用が期待できる。
- [0134] また、本発明の課題を達成することで、シール状または湿布状のフレキシブルセンサシートやフレキシブルディスプレイが、伸縮デバイス 5 1 として実現可能となると考えている。高伸縮耐性という性質は、使用時に伸縮性が必要な場面に用途が限定されるわけではなく、例えば自由曲面に貼り付ける用途には必要となるため産業上での波及効果が大きなものであると考えている。
- [0135] 具体的な例として、伸縮デバイス 5 1 の産業上の利用可能性として、曲面にでも貼れるフレキシブル太陽電池シートや、絆創膏や湿布のように生体に貼り付けて、体温、脈波（脈拍）、血中酸素飽和度、血糖値などを計測または推定する健康モニタリングシートや、ロボットハンドの指先に貼り付ける触覚センサシートなどが考えられる。また、産業応用だけでなく、水着や飛行機の翼面、野球のボールの表面などに流速センサを貼り付け、流体からの力を計測するなど、学術的な現象解明のための利用も大いに考えられる。

符号の説明

- [0136] 1, 2 1, 3 1, 4 1 自己修復型配線
- 2 柔軟基板（第 1 基材）
 - 3 電気配線
 - 4 金属ナノ粒子（導電性粒子）
 - 5 液体（流動体）
 - 7 クラック
 - 8 端子部
 - 5 4 基板
 - 5 5 高伸縮材料（第 1 基材）
 - 5 6 高剛性材料（第 2 基材）

5 7 金属配線層（電気配線）

5 8 A, 5 8 B 第 1 電極（端子部）

5 9 A, 5 9 B 第 2 電極（端子部）

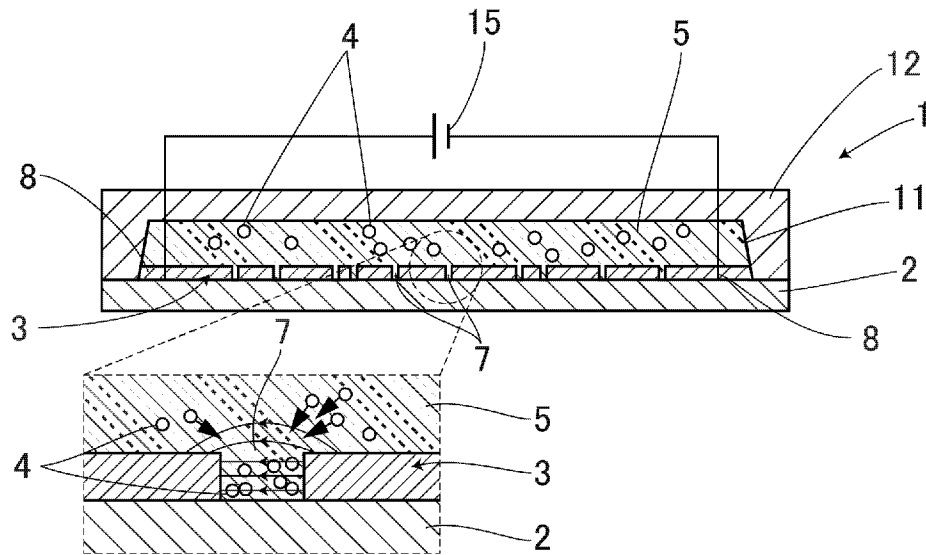
6 3 電気素子

請求の範囲

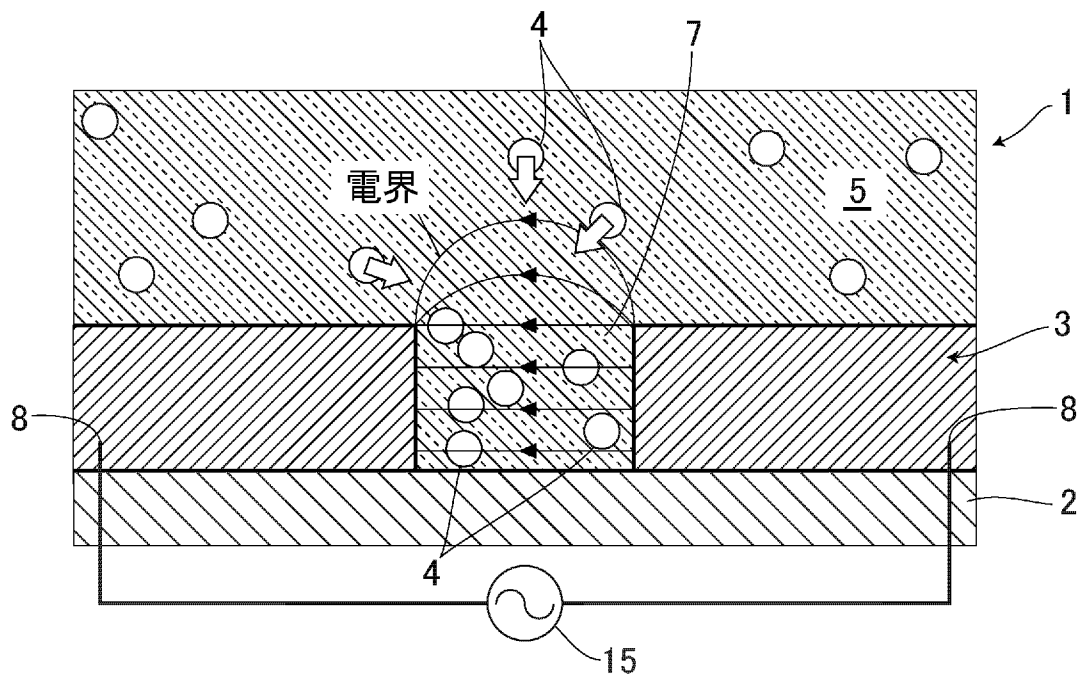
- [請求項1] 第1基材に電気配線を配設し、前記電気配線に生じるクラックの修復部として、導電性粒子を分散させた流動体で前記電気配線を覆う構造を備えたことを特徴とする自己修復型配線。
- [請求項2] 前記電気配線への電圧印加を可能にし、前記クラックの部分にのみ電界を生じさせる端子部を、前記電気配線に設けたことを特徴とする請求項1記載の自己修復型配線。
- [請求項3] 前記電気配線の表面を、前記導電性粒子の表面と同極に帯電させ、前記クラックの部分で前記流動体に接する前記第1基材の表面を、前記導電性粒子の表面と異極に帯電させることを特徴とする請求項1記載の自己修復型配線。
- [請求項4] 前記導電性粒子が、前記クラックの部分で前記電気配線よりも先に熱で融解するものであることを特徴とする請求項1～3の何れか一つに記載の自己修復型配線。
- [請求項5] 前記導電性粒子が金属粒子であることを特徴とする請求項1～4のいずれか一つに記載の自己修復型配線。
- [請求項6] 第1基材に電気配線を配設し、前記電気配線に生じるクラックの修復部として、金属イオンを溶解した流動体で前記電気配線を覆う構造を備えたことを特徴とする自己修復型配線。
- [請求項7] 前記電気配線への電圧印加を可能にし、前記クラックの部分にのみ電界を生じさせる端子部を、前記電気配線に設けたことを特徴とする請求項6記載の自己修復型配線。
- [請求項8] 前記クラックの部分で前記流動体に接する前記第1基材の表面にのみ、無電解メッキにより前記金属イオンから固体金属を析出させる構成としたことを特徴とする請求項6記載の自己修復型配線。
- [請求項9] 前記金属イオンから析出される固体金属が、前記クラックの部分で前記電気配線よりも先に熱で融解するものであることを特徴とする請求項6～8の何れか一つに記載の自己修復型配線。

- [請求項10] 前記第1基材が伸縮可能であることを特徴とする請求項1～9のいずれか一つに記載の自己修復型配線。
- [請求項11] 前記電気配線が金属配線であることを特徴とする請求項1～10のいずれか一つに記載の自己修復型配線。
- [請求項12] 前記電気配線の所定の場所でクラックが発生するように、前記電気配線または前記第1基材の少なくとも一方が構成されていることを特徴とする請求項1～11のいずれか一つに記載の自己修復型配線。
- [請求項13] 前記第1基材と、当該第1基材よりも剛性の高い第2基材とにより基板を構成し、前記第2基材にのみ電気素子を実装したことを特徴とする請求項1～12のいずれか一つに記載の自己修復型配線を備えた伸縮デバイス。

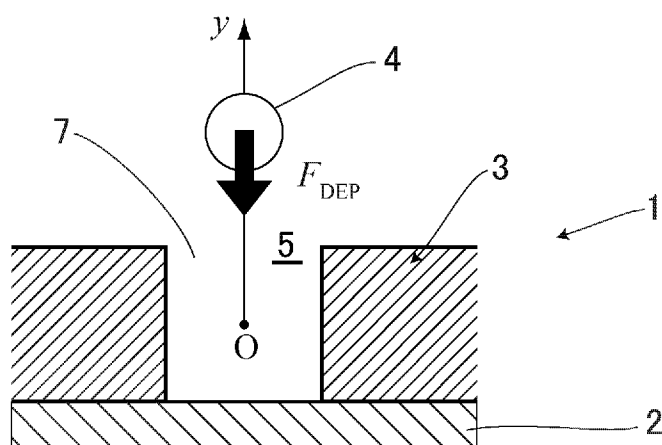
[図1]



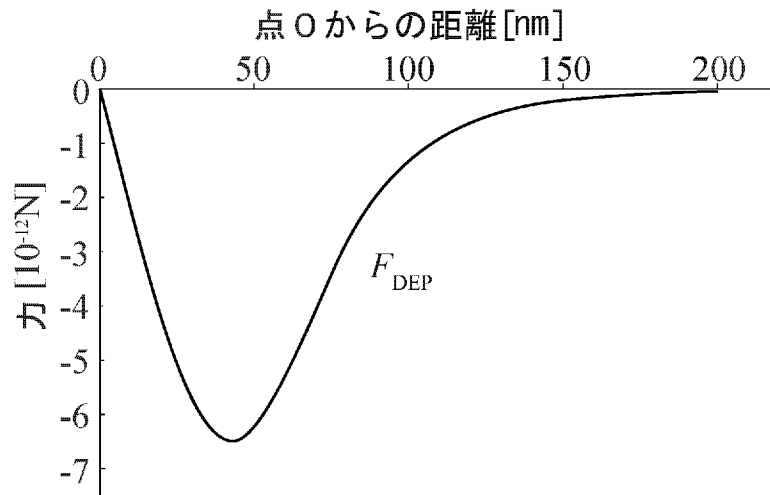
[図2]



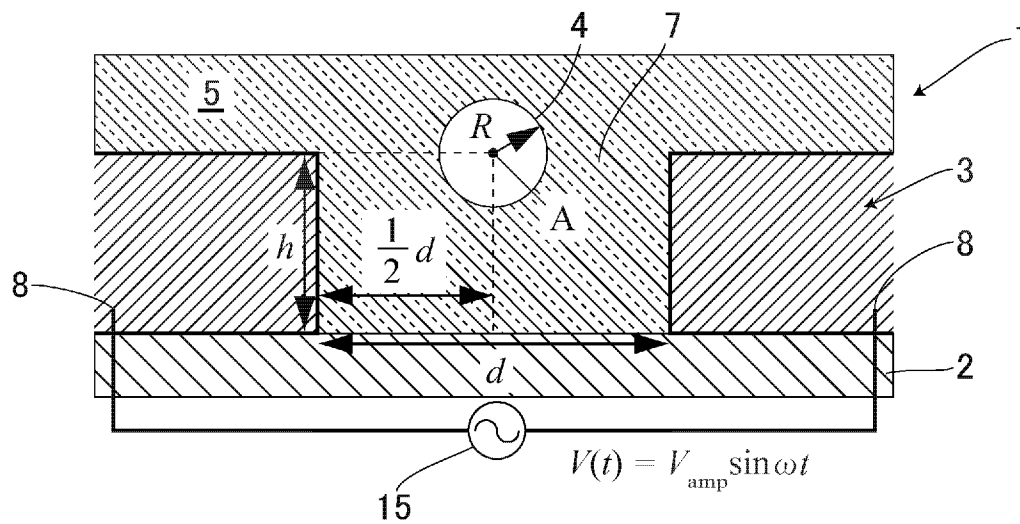
[図3A]



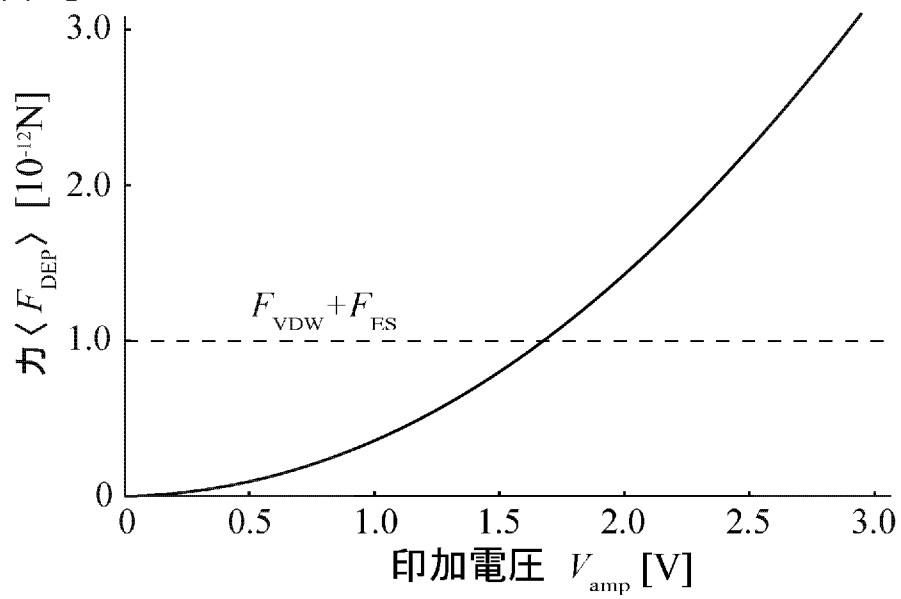
[図3B]



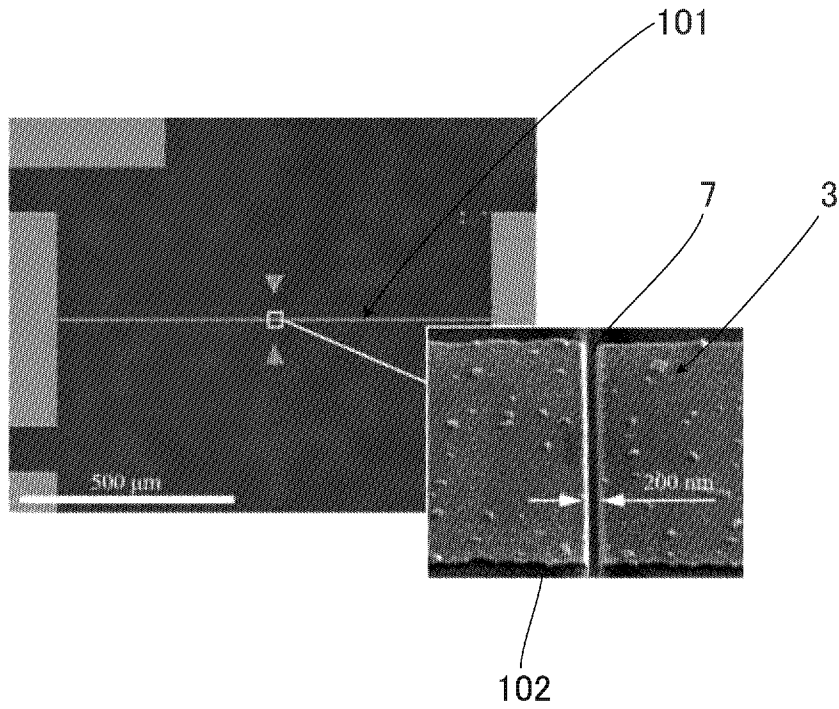
[図4A]



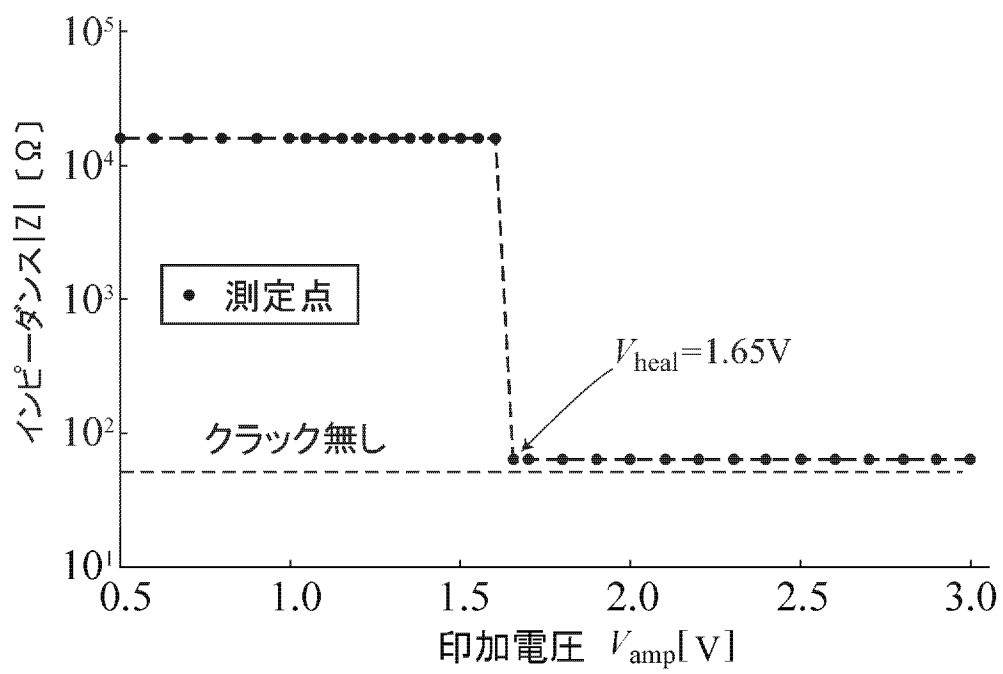
[図4B]



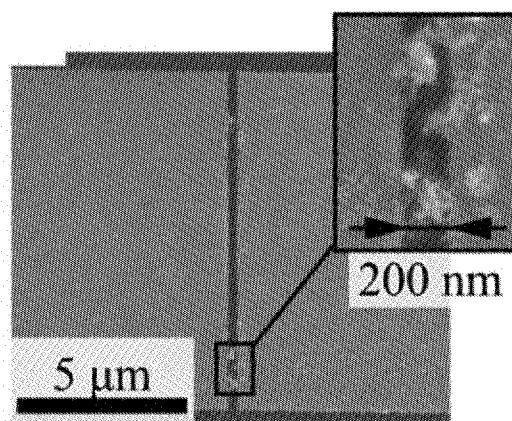
[図5]



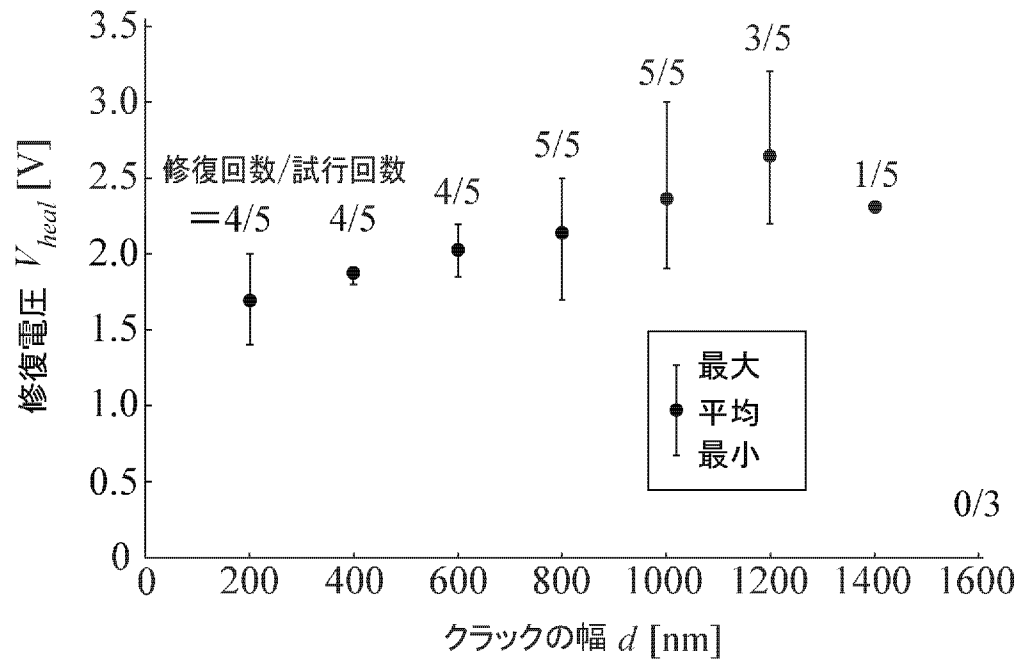
[図6]



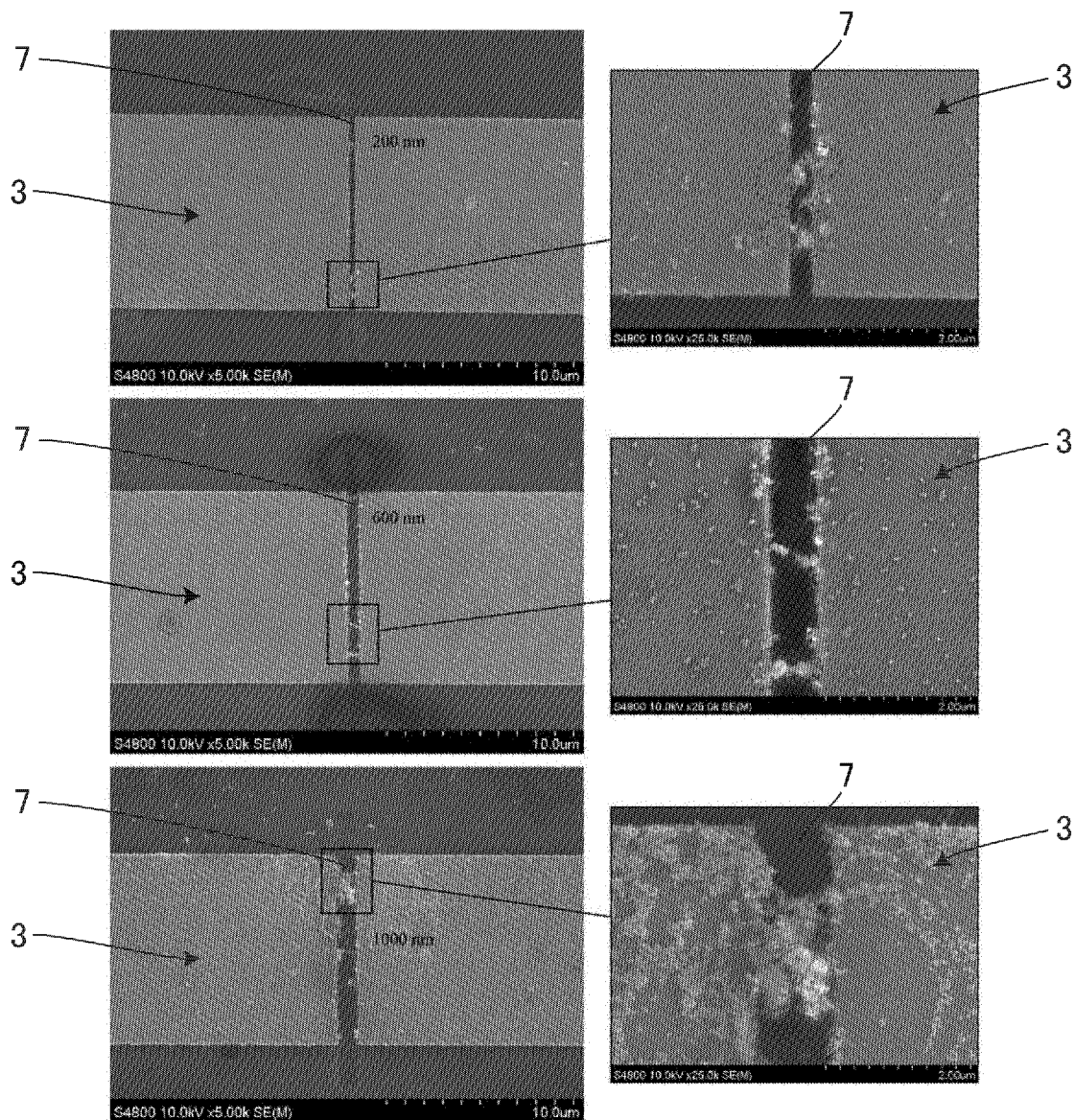
[図7]



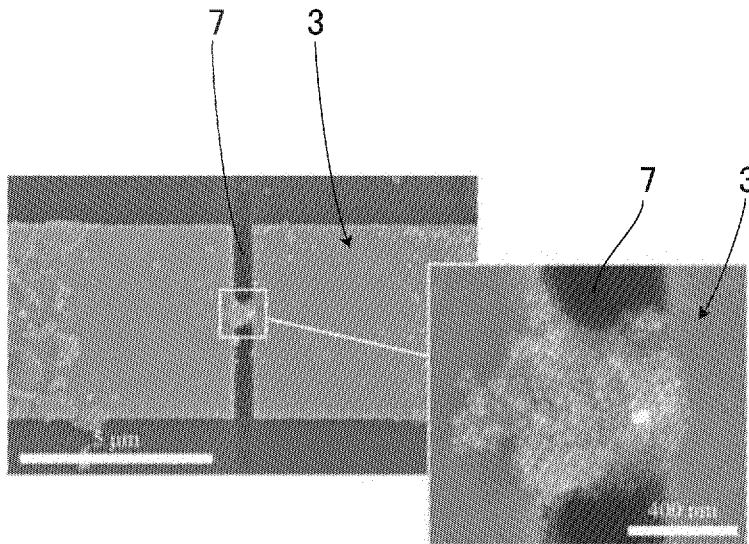
[図8]



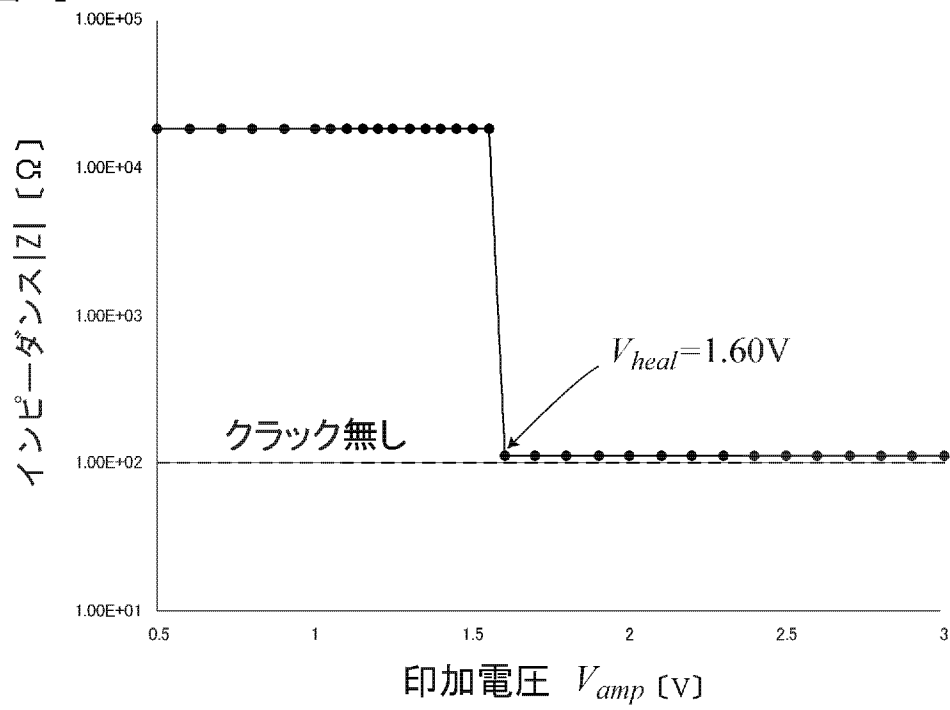
[図9]



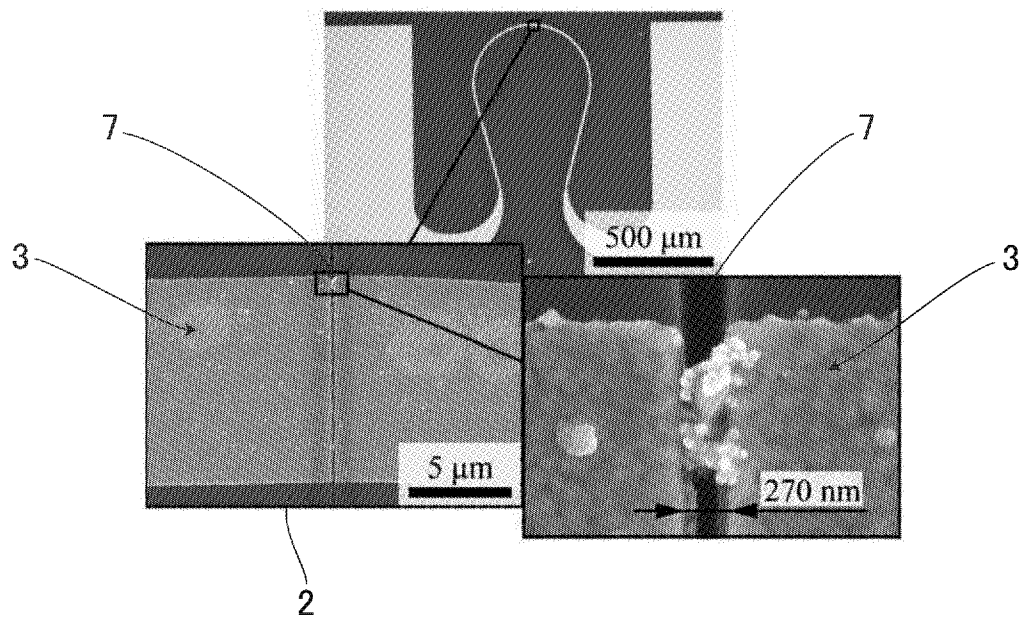
[図10]



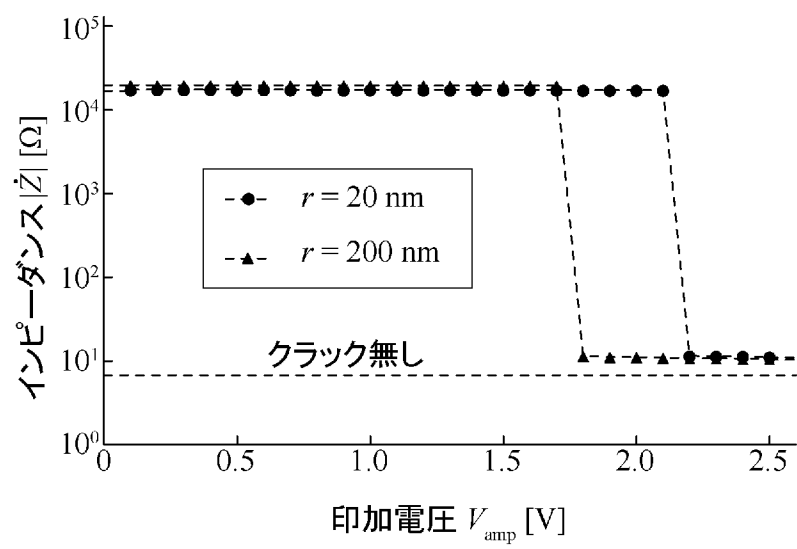
[図11]



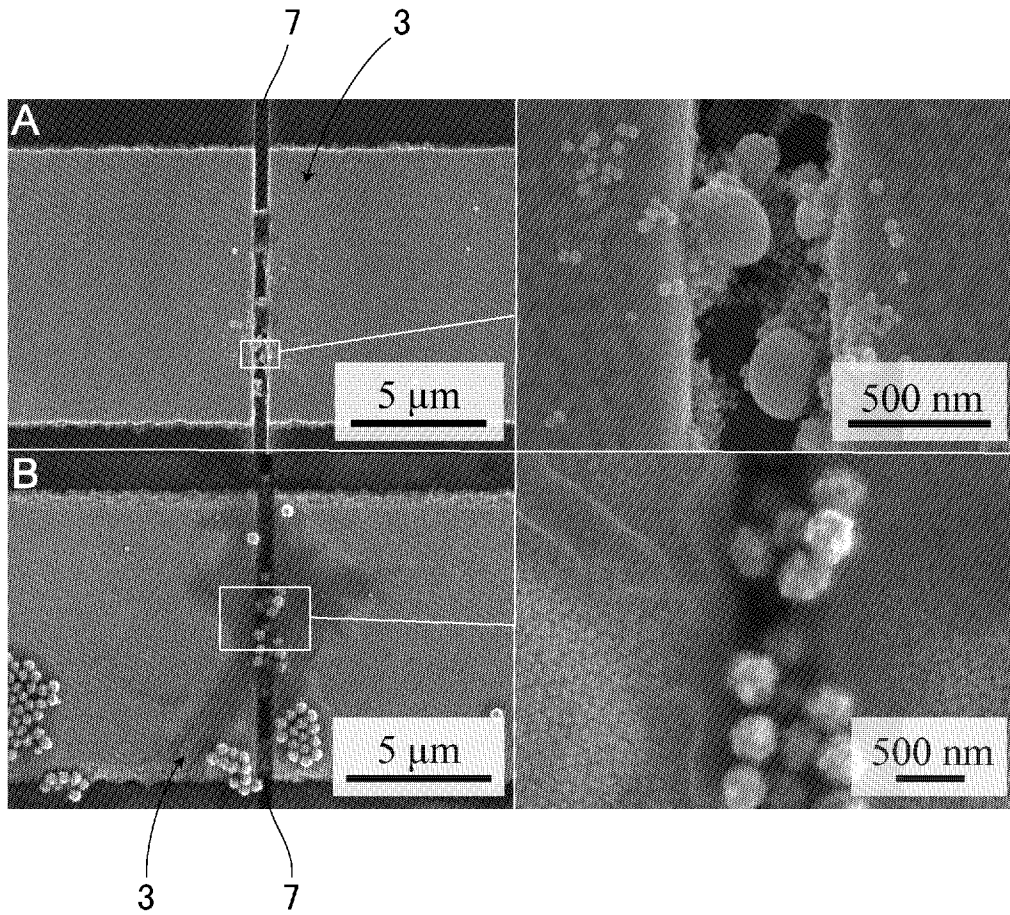
[図12]



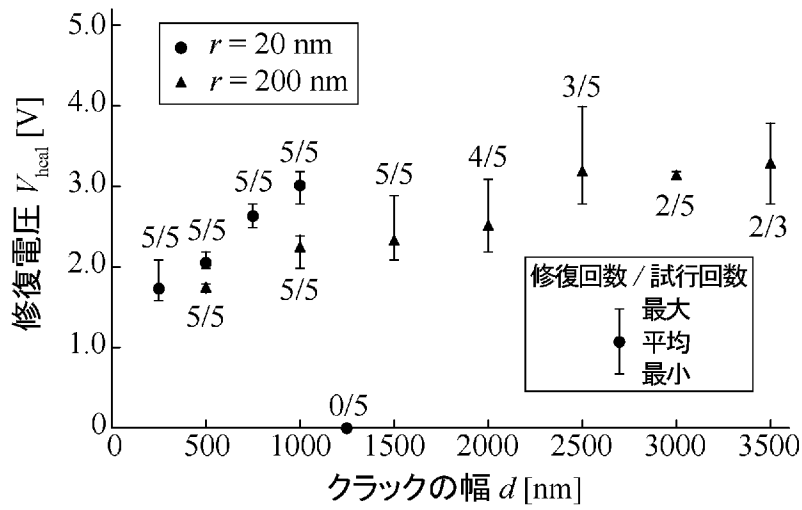
[図13]



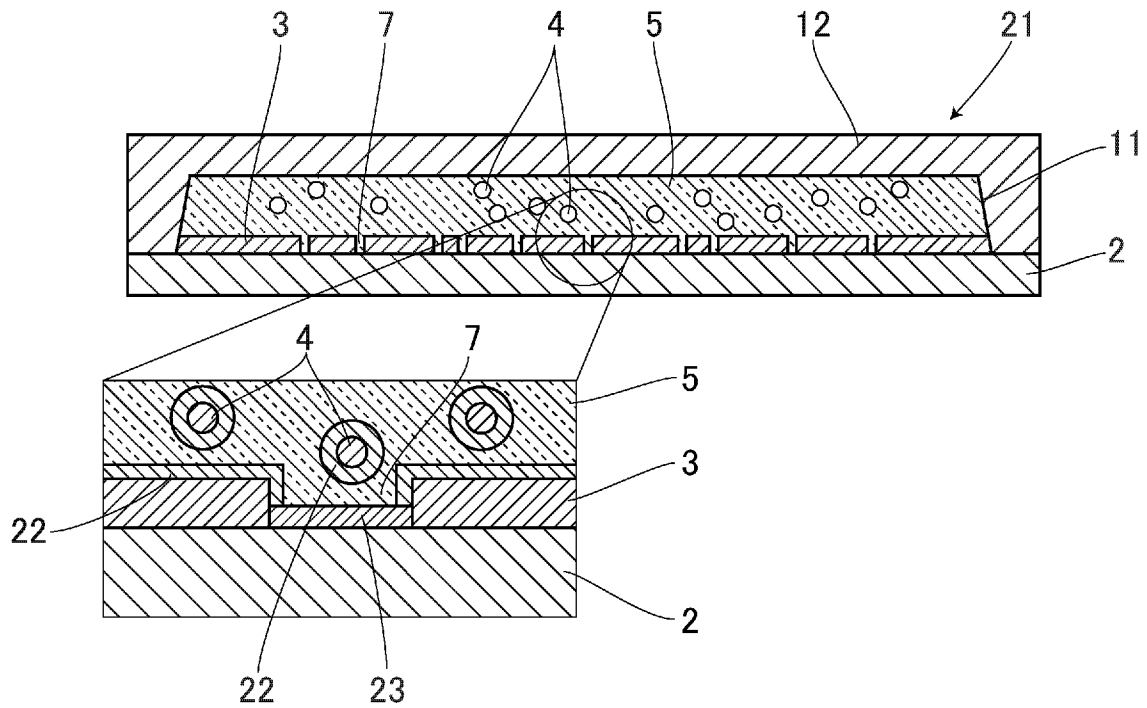
[図14]



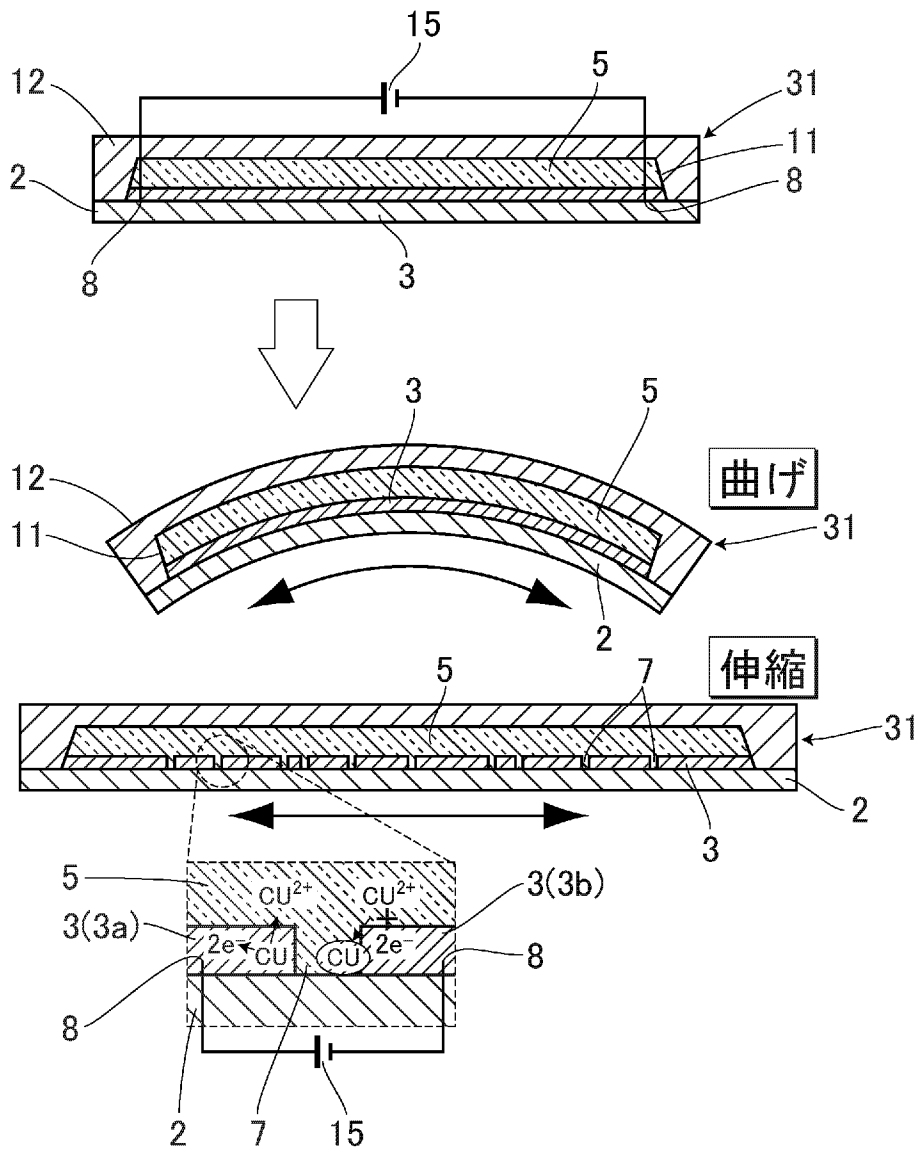
[図15]



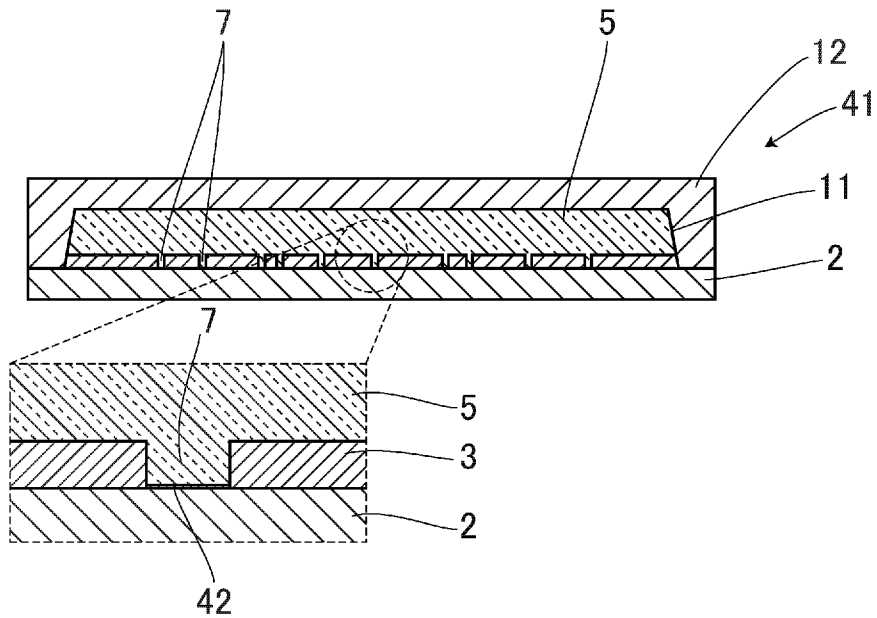
[図16]



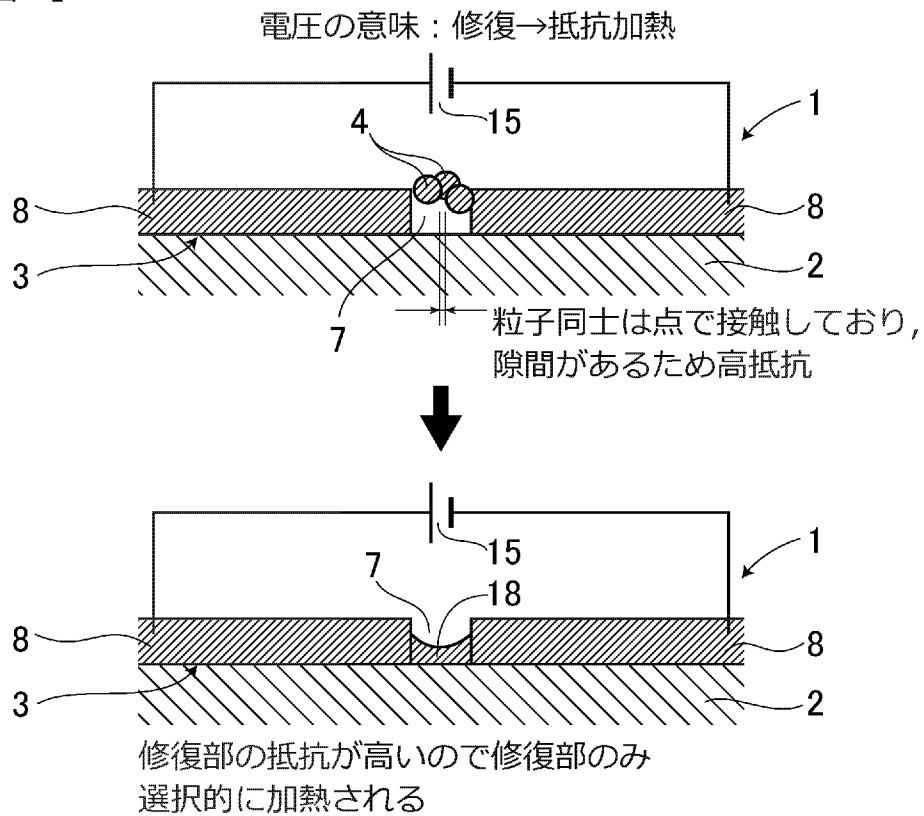
[図17]



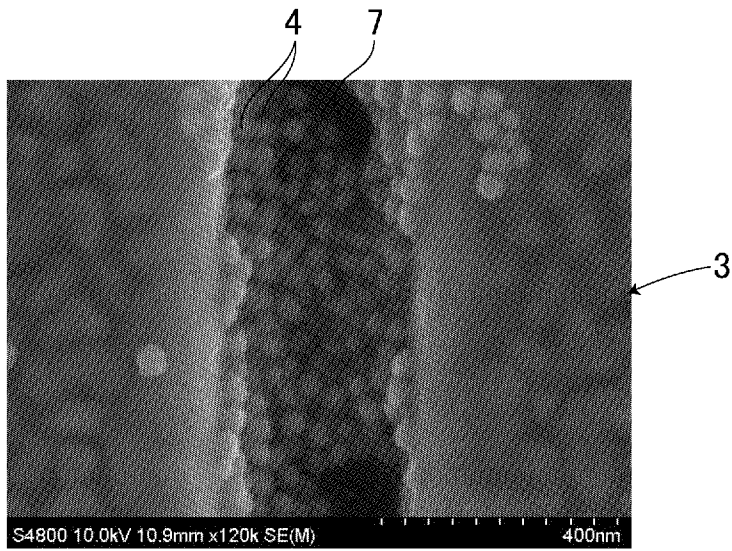
[図18]



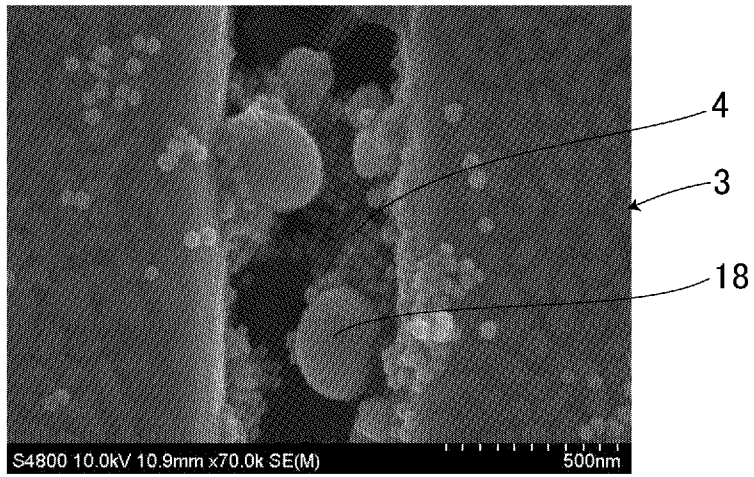
[図19]



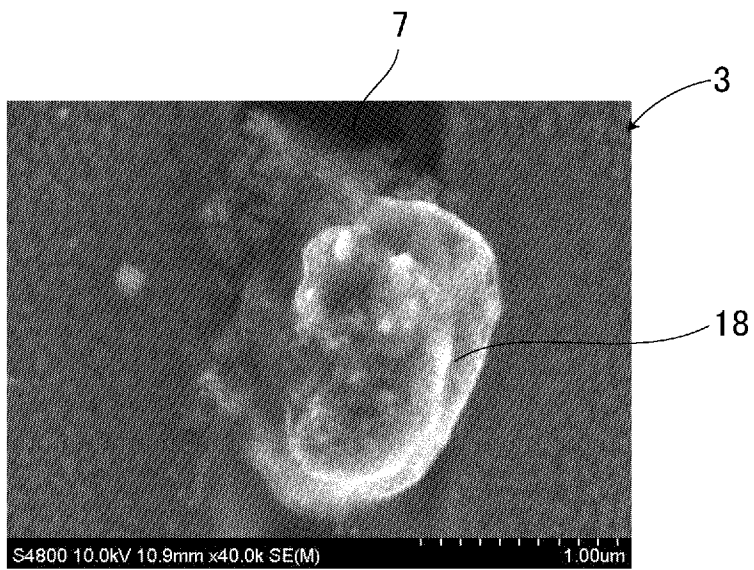
[図20]



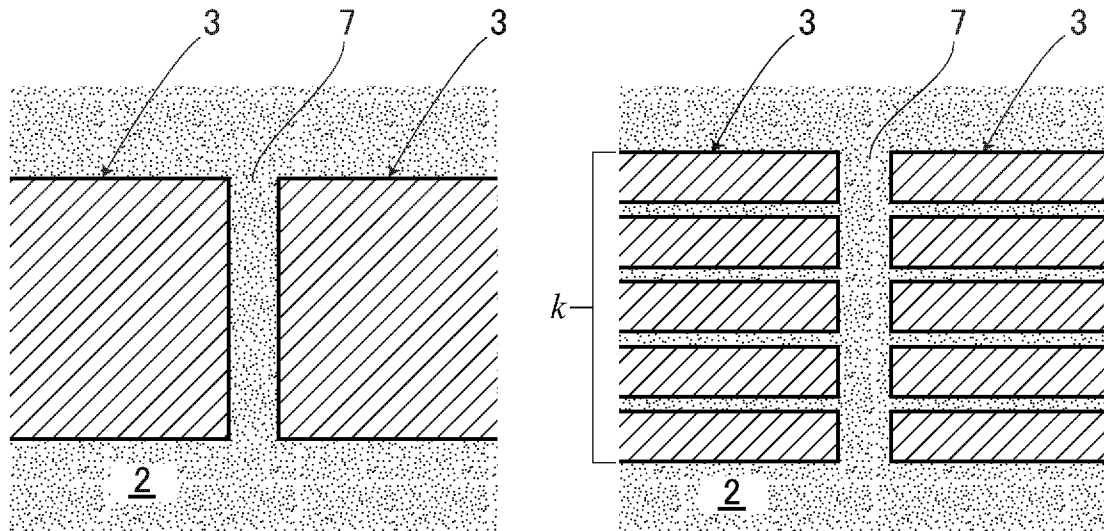
[図21]



[図22]



[図23]

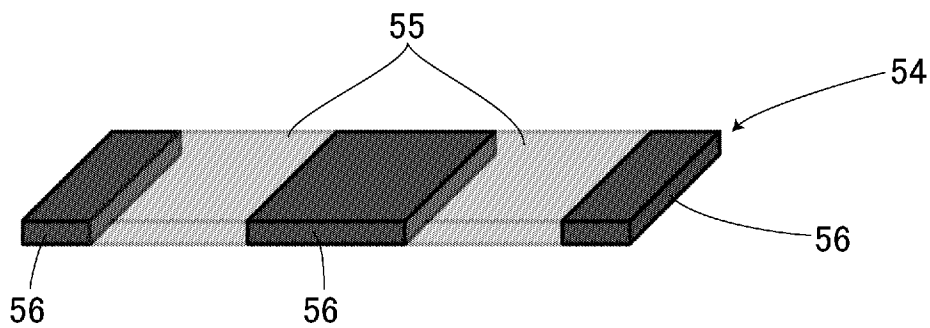


タイプ1

タイプ2

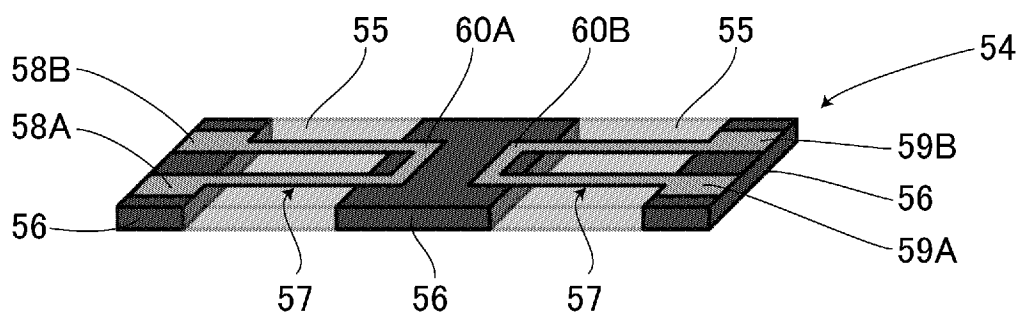
[図24A]

基板の作製



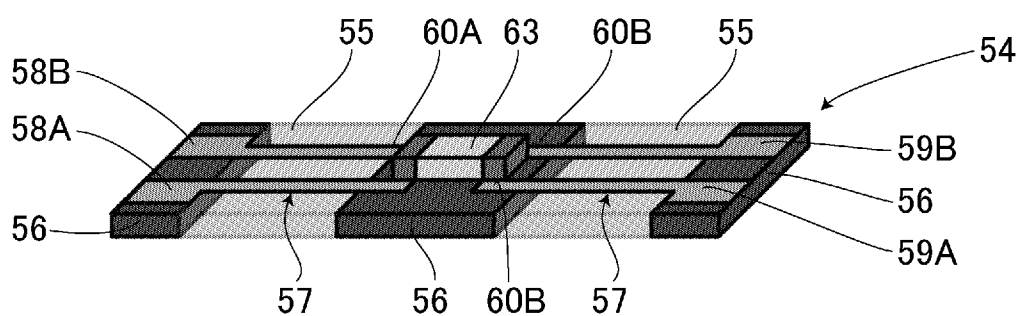
[図24B]

配線層のパターニング



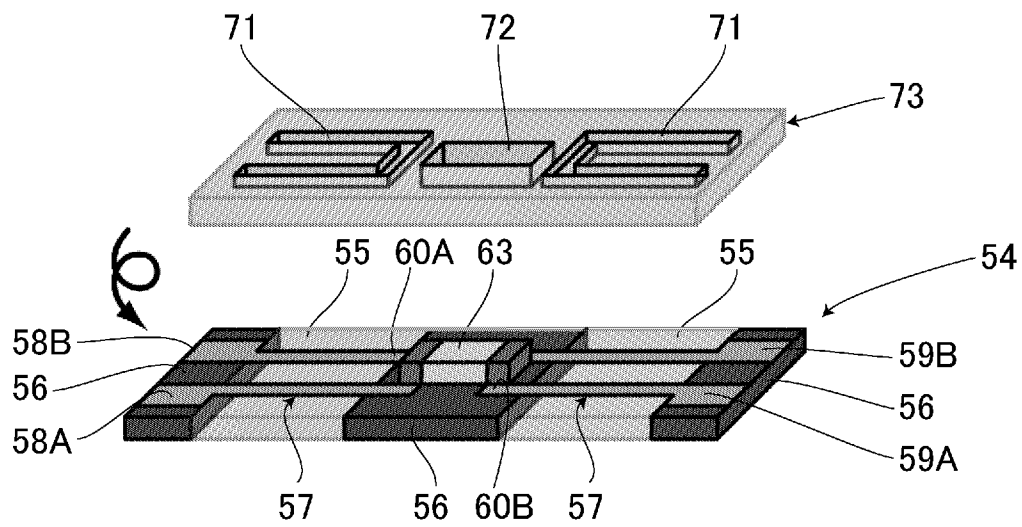
[図24C]

電気素子の実装



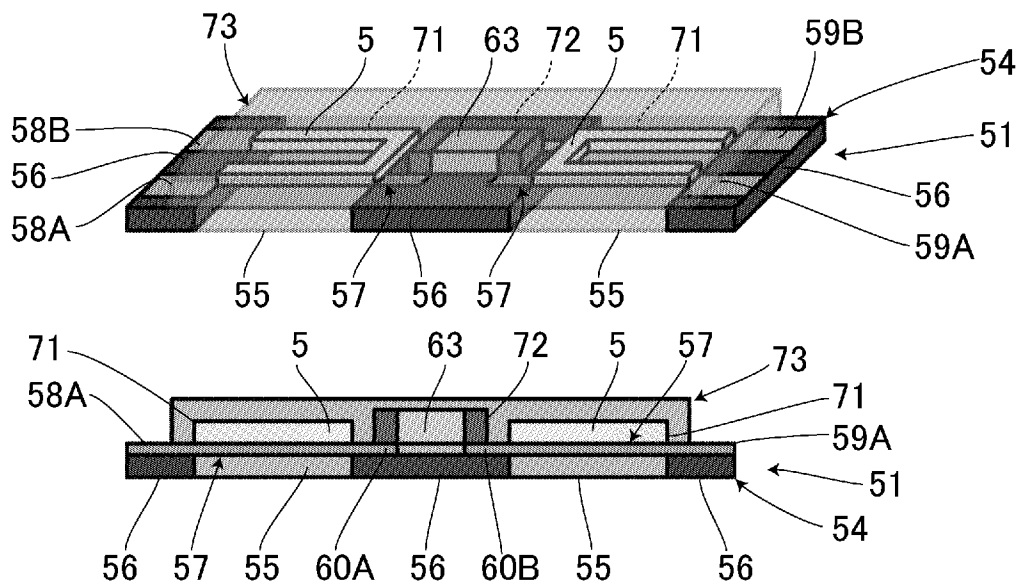
[図24D]

流路パターンの作製および封止

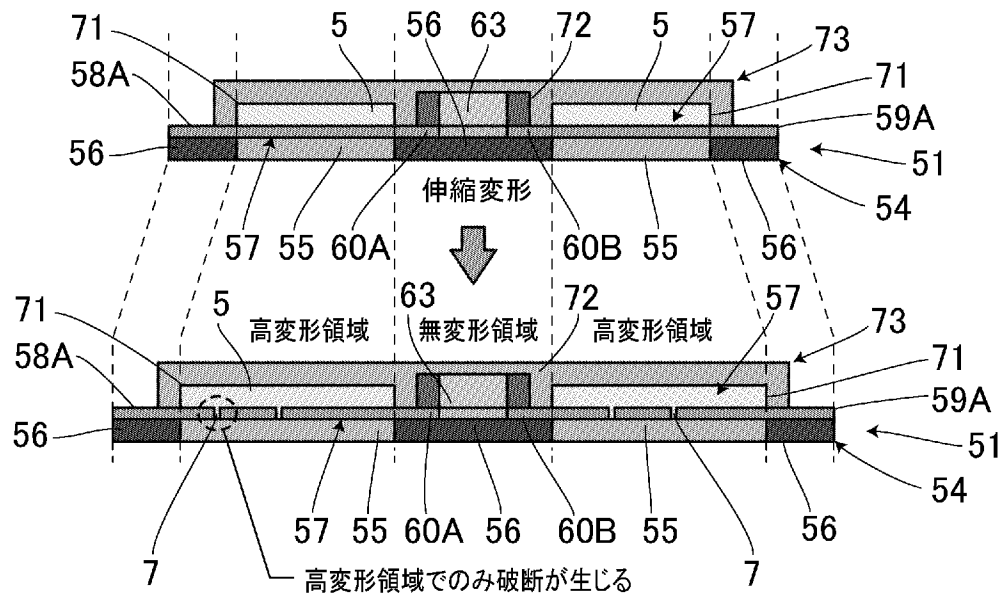


[図24E]

完成状態とその断面図



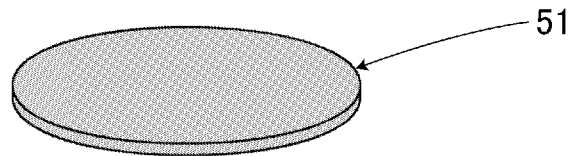
[図25]



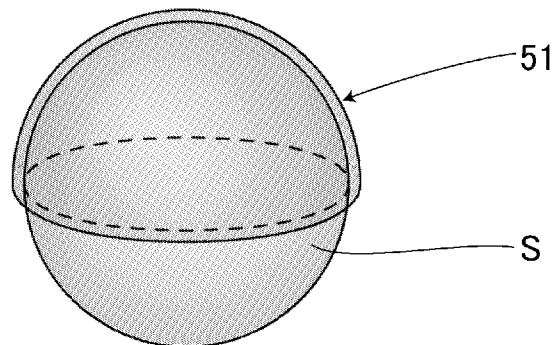
[図26]

平面上で作成した伸縮デバイス

面積: πr^2



球体の上半球面に伸ばしてシワなく
貼り付ける場合 面積: $2\pi r^2$



INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/JP2015/054888

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER

H05K3/22(2006.01)i, H05K1/02(2006.01)i

According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC

B. FIELDS SEARCHED

Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols)

H05K3/22, H05K1/02, H01B1/00-1/24

Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched

Jitsuyo Shinan Koho	1922-1996	Jitsuyo Shinan Toroku Koho	1996-2015
Kokai Jitsuyo Shinan Koho	1971-2015	Toroku Jitsuyo Shinan Koho	1994-2015

Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practicable, search terms used)

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
X Y A	JP 2010-27660 A (Nihon Micronics Inc.), 04 February 2010 (04.02.2010), entire text; all drawings & CN 101630648 A & KR 10-2010-0008329 A	1, 4-5 10-13 2-3, 6-9
X Y A	JP 2-116194 A (International Business Machines Corp.), 27 April 1990 (27.04.1990), entire text; all drawings & US 4919971 A & EP 359930 A2	6-8 10-13 1-5, 9
Y	JP 8-298364 A (NEC Corp.), 12 November 1996 (12.11.1996), entire text; all drawings & US 5717556 A & GB 2300310 A	10-13

☐ Further documents are listed in the continuation of Box C.

☐ See patent family annex.

* Special categories of cited documents:

"A" document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance
 "E" earlier application or patent but published on or after the international filing date
 "L" document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified)
 "O" document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means
 "P" document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed

"T" later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention
 "X" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone
 "Y" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art
 "&" document member of the same patent family

Date of the actual completion of the international search
22 April 2015 (22.04.15)

Date of mailing of the international search report
12 May 2015 (12.05.15)

Name and mailing address of the ISA/
Japan Patent Office
3-4-3, Kasumigaseki, Chiyoda-ku,
Tokyo 100-8915, Japan

Authorized officer

Telephone No.

A. 発明の属する分野の分類（国際特許分類（I P C））

Int.Cl. H05K3/22(2006.01)i, H05K1/02(2006.01)i

B. 調査を行った分野

調査を行った最小限資料（国際特許分類（I P C））

Int.Cl. H05K3/22, H05K1/02, H01B1/00-1/24

最小限資料以外の資料で調査を行った分野に含まれるもの

日本国実用新案公報	1 9 2 2 - 1 9 9 6 年
日本国公開実用新案公報	1 9 7 1 - 2 0 1 5 年
日本国実用新案登録公報	1 9 9 6 - 2 0 1 5 年
日本国登録実用新案公報	1 9 9 4 - 2 0 1 5 年

国際調査で使用した電子データベース（データベースの名称、調査に使用した用語）

C. 関連すると認められる文献

引用文献の カテゴリー*	引用文献名 及び一部の箇所が関連するときは、その関連する箇所の表示	関連する 請求項の番号
X	JP 2010-27660 A（株式会社日本マイクロニクス）2010.02.04, 全文, 全図 & CN 101630648 A & KR 10-2010-0008329 A	1, 4-5
Y		10-13
A		2-3, 6-9
X	JP 2-116194 A（インターナショナル・ビジネス・マシーンズ・コー ポレーション）1990.04.27, 全文, 全図 & US 4919971 A & EP 359930 A2	6-8
Y		10-13

☒ C 欄の続きにも文献が列挙されている。☐ パテントファミリーに関する別紙を参照。

* 引用文献のカテゴリー

「A」特に関連のある文献ではなく、一般的技術水準を示すもの

「E」国際出願日前の出願または特許であるが、国際出願日以後に公表されたもの

「L」優先権主張に疑義を提起する文献又は他の文献の発行日若しくは他の特別な理由を確立するために引用する文献（理由を付す）

「O」口頭による開示、使用、展示等に言及する文献

「P」国際出願日前で、かつ優先権の主張の基礎となる出願

の日の後に公表された文献

「T」国際出願日又は優先日後に公表された文献であって出願と矛盾するものではなく、発明の原理又は理論の理解のために引用するもの

「X」特に関連のある文献であって、当該文献のみで発明の新規性又は進歩性がないと考えられるもの

「Y」特に関連のある文献であって、当該文献と他の1以上の文献との、当業者にとって自明である組合せによって進歩性がないと考えられるもの

「&」同一パテントファミリー文献

国際調査を完了した日

2 2 . 0 4 . 2 0 1 5

国際調査報告の発送日

1 2 . 0 5 . 2 0 1 5

国際調査機関の名称及びあて先

日本国特許庁（I S A / J P）

郵便番号 1 0 0 - 8 9 1 5

東京都千代田区霞が関三丁目4番3号

特許庁審査官（権限のある職員）

中島 昭浩

3 S

9 1 4 7

電話番号 0 3 - 3 5 8 1 - 1 1 0 1 内線 3 3 9 1

C (続き) . 関連すると認められる文献		
引用文献の カテゴリー*	引用文献名 及び一部の箇所が関連するときは、その関連する箇所の表示	関連する 請求項の番号
A		1-5, 9
Y	JP 8-298364 A (日本電気株式会社) 1996. 11. 12, 全文, 全図 & US 5717556 A & GB 2300310 A	10-13