

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 特 許 公 報(B2)

(11) 特許番号

特許第6233772号
(P6233772)

(45) 発行日 平成29年11月22日 (2017.11.22)

(24) 登録日 平成29年11月2日 (2017.11.2)

| | | | | | |
|--------------------------|--------|-------|---------|--|--|
| (51) Int. Cl. | F I | | | | |
| HO 1 L 29/06 (2006.01) | HO 1 L | 29/06 | GO 1 N | | |
| HO 1 L 29/66 (2006.01) | HO 1 L | 29/66 | S | | |
| HO 1 L 51/05 (2006.01) | HO 1 L | 29/66 | T | | |
| HO 1 L 51/30 (2006.01) | HO 1 L | 29/28 | 1 0 0 A | | |
| HO 1 L 47/00 (2006.01) | HO 1 L | 29/28 | 2 5 0 E | | |
| 請求項の数 10 (全 17 頁) 最終頁に続く | | | | | |

(21) 出願番号 特願2013-179578 (P2013-179578)
 (22) 出願日 平成25年8月30日 (2013. 8. 30)
 (65) 公開番号 特開2015-50248 (P2015-50248A)
 (43) 公開日 平成27年3月16日 (2015. 3. 16)
 審査請求日 平成28年7月21日 (2016. 7. 21)

(73) 特許権者 504176911
 国立大学法人大阪大学
 大阪府吹田市山田丘1番1号
 (74) 代理人 110001427
 特許業務法人前田特許事務所
 (72) 発明者 田中 啓文
 大阪府吹田市山田丘1番1号 国立大学法
 人大阪大学内
 (72) 発明者 小川 琢治
 大阪府吹田市山田丘1番1号 国立大学法
 人大阪大学内
 (72) 発明者 浅井 哲也
 北海道札幌市北区北14条西9丁目 北海
 道大学大学院 情報科学研究科内

最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 非線形素子

(57) 【特許請求の範囲】

【請求項1】

電極と、

導電性粒子と、該導電性粒子に接続され、非線形な電流電圧特性を示す粒子とにより構成され、前記電極に接続されたネットワーク構造体と

を備え、

前記非線形な電流電圧特性を示す粒子がポリオキシメタレータの粒子である

ことを特徴とする非線形素子。

【請求項2】

前記導電性粒子と、前記粒子とにより構成された接続体であって、

前記接続体は、前記接続体に接続された前記電極に電圧を印加した場合に、電流電圧特性が負性微分抵抗を示し、

前記ネットワーク構造体が少なくとも1つ以上の前記接続体を備えることを特徴とする請求項1に記載の非線形素子。

【請求項3】

前記ネットワーク構造体が、前記導電性粒子と、該導電性粒子の表面上に形成されたフィルム状の前記粒子とにより構成されることを特徴とする請求項1又は請求項2に記載の非線形素子。

【請求項4】

前記導電性粒子が導電性ナノワイヤであることを特徴とする、請求項1～3のいずれか

1 項に記載の非線形素子。

【請求項 5】

請求項 1 ~ 4 のいずれか 1 項に記載の非線形素子をパルス発生素子として使用することを特徴とする、パルスジェネレータ。

【請求項 6】

請求項 1 ~ 4 のいずれか 1 項に記載の非線形素子により形成されていることを特徴とする、ニューロン素子。

【請求項 7】

電極と、
導電性粒子と、該導電性粒子に接続され、非線形な電流電圧特性を示す粒子とにより構成され、前記電極に接続されたネットワーク構造体と
を備える非線形素子により形成されていることを特徴とする、ニューロン素子。 10

【請求項 8】

前記導電性粒子と、前記粒子とにより構成された接続体であって、
前記接続体は、前記接続体に接続された前記電極に電圧を印加した場合に、電流電圧特性が負性微分抵抗を示し、
前記ネットワーク構造体が少なくとも 1 つ以上の前記接続体を備えることを特徴とする請求項 7 に記載のニューロン素子。

【請求項 9】

前記ネットワーク構造体が、前記導電性粒子と、該導電性粒子の表面上に形成されたフィルム状の前記粒子とにより構成されることを特徴とする請求項 7 又は請求項 8 に記載のニューロン素子。 20

【請求項 10】

請求項 6 ~ 9 のいずれか 1 項に記載のニューロン素子を複数個接続することにより形成されていることを特徴とする、ニューラルネットワーク情報処理装置。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

本発明は、スパイク信号を発生することができる非線形素子に関する。 30

【背景技術】

【0002】

現在、生物の脳における情報処理の特徴を模倣したニューラルネットワークの研究が盛んに行われており、このニューラルネットワーク研究においては、ニューロンの機能は電子回路を用いて再現されている。

【0003】

しかし、このような電子回路化されたニューロン素子は、その構造が複雑であり、またサイズが大きいため、集積化が困難であるという問題があった。

【0004】

そこで、近年、分子電子素子をニューロン素子の構成部品として使用することにより、回路を簡素化して集積化を容易にし、ニューラルネットワーク構築を目指した技術が報告されている。 40

【0005】

より具体的には、例えば、分子電子素子である機能性分子素子を利用したニューロン素子及びそれを用いたニューラルネットワーク情報処理装置が提案されている（例えば、特許文献 1 参照）。

【0006】

特許文献 1 の機能性分子素子は、この素子を流れる電流が印加電圧に対し変曲点を有する関数として表されるという電流電圧特性を有するため、この機能性分子素子を、出力信号を定める素子として利用することにより、回路を簡素化することができることと、効 50

果的なアナログ型の出力特性を提供することができると記載されている。

【先行技術文献】

【特許文献】

【0007】

【特許文献1】特開2009-157600号公報

【発明の概要】

【発明が解決しようとする課題】

【0008】

ここで、近年注目を集めている、生体の神経回路により近いスパイクニューラルネットワークの研究においては、実際にスパイク信号（パルス）を発生するようなニューロン素子の開発が求められており、特に、単一素子でスパイクを発生するような生体の神経回路により近い系の開発が望まれている。

10

【0009】

しかし、上記特許文献1に記載されたニューロン素子においては、上述のごとく、回路を簡素化して集積化を容易にすることはできるものの、本質的に古典的ニューラルネットワークでの使用を想定したニューロン素子であり、単一でスパイク信号を発生することができるような素子ではないため、スパイクニューラルネットワーク研究等への応用は困難であるという問題があった。

【0010】

本発明は、かかる点に鑑みてなされたものであり、単一の分子電子素子として機能し、素子の集積化が容易であり、かつ、スパイク信号を発生することができる非線形素子を提供することを目的とする。

20

【課題を解決するための手段】

【0011】

上記目的を達成するために、本発明の非線形素子は、電極と、導電性粒子と、該導電性粒子に接続され、非線形な電流電圧特性を示す粒子とにより構成され、前記電極に接続されたネットワーク構造体とを備えることを特徴とする。

【0012】

同構成によれば、本発明に係る非線形素子をしきい素子としてニューロン素子に利用した場合に、ニューロン素子の集積化が容易となり、複雑かつ高度なスパイクニューラルネットワーク構築を可能とする。

30

【発明の効果】

【0013】

本発明によれば、ニューロン素子の集積化が容易となり、複雑かつ高度なスパイクニューラルネットワーク構築が可能となる。

【図面の簡単な説明】

【0014】

【図1】本発明の実施形態に係る非線形素子の構造を示す斜視図である。

【図2】本発明の実施形態に係る非線形素子のネットワーク構造体を示す模式図である。

【図3】(a) フィッツヒュー = 南雲モデル及び (b) ノイズアシスト型フィッツヒュー = 南雲モデルの等価回路 (L. Gonzalez-Carabarin, T. Asai, M. Motomura, J. Signal Processing 16, 503-509 (2012)より転載)を示す図である。

40

【図4】本発明の実施形態に係る非線形素子の接続体構造を示す模式図である。

【図5】本発明の実施形態に係る非線形素子の作製工程を説明するための図である。

【図6】本発明の実施形態に係る非線形素子の測定方法を示す構成図である。

【図7】本発明の実施形態に係る非線形素子のネットワーク構造体を示す模式図である。

【図8】本発明の実施形態に係る非線形素子に電圧(0~125V)を印加した場合の電流の経時変化図である。

【図9】本発明の実施形態に係る非線形素子に電圧(150V)を印加した場合の電流の経時変化図である。

50

【図10】本発明の実施形態に係る非線形素子に電圧(150V)を印加し、一定時間経過した後の電流の経時変化図である。

【図11】比較例の電流の経時変化図である。

【発明を実施するための形態】

【0015】

以下、本発明の実施形態を図面に基づいて詳細に説明する。なお、本発明は以下の実施形態に限定されるものではない。

【0016】

図1は、本発明の実施形態に係る非線形素子の構造を示す斜視図である。

【0017】

図1に示すように、本実施形態の分子電子素子1は、基板42と、基板42上に形成された非線形素子2とにより構成され、非線形素子2は、基板42上に一定の距離で離間されて配置された2つの電極41a、41bと、基板42上において、電極41a、41bの間に配置されたネットワーク構造体30とを備えている。

【0018】

ここで、本発明において、「分子電子素子」とは、分子レベルで結合位置などを制御した分子集合体、及びこのような分子集合体と基板とが一体となった素子を意味し、好ましくはスイッチ機能や、メモリ機能など所定の機能を有する素子を意味する。

【0019】

基板42は、非線形素子2を保持する支持台としての役割を有するものであり、基板42の表面は電氣的絶縁性を有する材料により形成される。基板42の種類としては、ガラス基板、熱酸化膜付シリコン基板、樹脂基板など、基板42表面に電氣的絶縁性を有する基板であれば特に限定されない。また、基板42は、非線形素子2を保持することができる材質であれば、板状など硬質のものも、フィルム状など軟質のものも使用することができる。また、基板42は、板状、球状、リボン状等、いかなる形状であってもよい。

【0020】

電極41a、41bは、電極41a、41bに接続されたネットワーク構造体に電流を流す役割を有するものであり、導電性を有する材料であれば特に限定されない。電極41a、41bの材料としては、Au、Pt、Al、Cuなどの金属、シリコン、インジウム錫酸化物(ITO)などが挙げられ、必要に応じて複数の種類の材料を組み合わせ使用することができる。また、電極41a、41bの形状は、板状、薄膜状、ブロック形状、円柱状、針状、球状、リボン状、繊維状等、いかなる形状のものも使用できる。

【0021】

また、本発明の実施形態においては、電極41a、41bは、単一の電極によって構成されていても、複数の電極によって構成されていてもよい。より具体的には、例えば、電極41a、41bを部分的に含む、絶縁体で接続された単一の電極によって構成されていてもよい。また、例えば、電極41a、41b間に配置されたネットワーク構造体30に、他方向から電圧等の外部刺激を加えることができるように、電極41a、41bに加えてさらに複数の電極によって構成されていてもよい。

【0022】

次に、ネットワーク構造体30は、図1に示すように、複数の導電性粒子31と、複数の非線形な電流電圧特性を示す粒子(以下、「非線形IV特性粒子」という。)32とから構成されている。

【0023】

ここで、本発明において、「粒子」とは、1nm~100μmの径を有する単分子又は物質の集合体を意味する。具体的には、例えば、分子、イオン、錯体、ポリマー、液晶分子、金属、有機材料、無機材料、有機無機ハイブリッド材料などの物質及びこれら物質の混合物により構成され、粒子形状に成形可能なものである。

【0024】

また、本発明において、「ネットワーク構造体」とは、導電性粒子31及び非線形IV

10

20

30

40

50

特性粒子32が、物理的、電氣的、磁氣的、又は化学的接続、もしくはこれら接続状態のうち複数の接続状態を含む接続を介して、相互に接触している構造体を意味する。

【0025】

導電性粒子31は、電極41a、41bと、非線形IV特性粒子32とを接続し、電極間に配置されたネットワーク構造体30に電流を流す配線の役割を有するものであり、導電性を示す物質により構成される粒子である。より具体的には、導電性を有する分子、イオン、錯体、ポリマー、液晶分子、金属、有機材料、無機材料、有機無機ハイブリッド材料などの物質及びこれら物質の混合物により構成される粒子である。

【0026】

ここで、本発明の実施形態においては、導電性粒子31として、導電性ナノワイヤを使用することができる。

10

【0027】

本発明において、「導電性ナノワイヤ」とは、繊維状の形状を有する導電性粒子を意味し、直径が1nm~100 μ m、より好ましくは1nm~200nm、長さが10nm~100 μ m、より好ましくは、100nm~100 μ mの繊維状導電性粒子である。導電性ナノワイヤの種類としては、例えば、カーボンナノチューブなどの有機物ナノワイヤ；Ag、Au、Ni、Cu、Pd、Pt、Rh、Ir、Ru、Os、Fe、Co、Sn等からなる群より選択された1種類以上の元素で構成される金属ナノワイヤ；IrO₂、In₂O₃、SnO₂、ITO等からなる群より選択された1種類以上の酸化物で構成される酸化物ナノワイヤ及びこれらの混合ナノワイヤなどが挙げられる。

20

【0028】

また、本発明の実施形態においては、導電性粒子31として、カーボンナノチューブを使用してもよい。

【0029】

カーボンナノチューブは実質的にグラファイトの1枚面を巻いて筒状にした形状を有しており、1層に巻いたものを単層カーボンナノチューブ(SWNT)、多層に巻いたものを多層カーボンナノチューブ(MWNT)という。カーボンナノチューブは、優れた強度、弾性率、導電性を有し、その繊維状の形状から、分子電子素子の配線として使用することが可能である。本発明においては、SWNT及びMWNTを各々単独で用いてもよく、2種以上を併せて用いてもよい。カーボンナノチューブは、半導体性カーボンナノチューブ、金属性カーボンナノチューブ、あるいは両者の混合物を使用することができる。半導体性カーボンナノチューブと金属性カーボンナノチューブとの混合物を用いる場合、混合物中の両者の含有比率は、導電性の観点から、金属性カーボンナノチューブの含有比率が高いほうが好ましい。また、カーボンナノチューブには金属などが内包されていてもよく、フラーレン等の分子が内包されたものを用いてもよい。なお、本発明の導電性粒子には、カーボンナノチューブの他に、カーボンナノホーン、カーボンナノコイル、カーボンナノピーズなどのナノカーボンが含まれてもよい。

30

【0030】

なお、本発明の実施形態において、導電性粒子31の形状は、特に限定されるものではない。例えば、球状、略球状、円柱状、略円柱状、水滴形状、針状、繊維状、フィルム状等、種々の形状のものを使用することができる。

40

【0031】

次に、本発明において、「非線形な電流電圧特性」とは、印加電圧に対して出力電流が比例しない電流電圧特性のことをいい、具体的には例えば、半導体のpn接合(以下、pn接合という。)に見られる整流性、ショットキー接合に見られる整流性、数十nmの幅で大量にドーパされたpn接合に見られる負性微分抵抗、トンネル接合に見られるクーロンブロッケード現象等が挙げられる。ここで、整流性とは、電流を一定方向にのみ流す特性、負性微分抵抗とは印加電圧の増加に伴い電流が減少する特性、クーロンブロッケード現象とは低印加電圧で電流が減少する特性のことをいう。

【0032】

50

また、本発明において、「非線形な電流電圧特性を示す粒子（非線形 I V 特性粒子）」とは、粒子が、物理的、電氣的、磁氣的、又は化学的接続、もしくはこれら接続状態のうち複数の接続状態を含む接続を介して電極に接続されており、その電極に電圧を印加した場合に、上述の非線形な電流電圧特性を示す粒子のことをいう。

【0033】

本発明の実施形態において、非線形 I V 特性粒子 3 2 は、導電性粒子 3 1 に接触し、ネットワーク構造体 3 0 を形成する接点の役割を有するとともに、電流が流れた場合に、上述の非線形な電流電圧特性を示し、スイッチ機能やメモリ機能などを発現する機能性素子としての役割を有する。例えば、負性微分抵抗を示す物質としては、酸化還元能を有する、共鳴トンネル効果を示す、又は水晶振動子に相当する構造を有する分子、イオン、錯体、ポリマー、液晶分子、金属、有機材料、無機材料、有機無機ハイブリッド材料などの物質及びこれら物質の混合物により構成される粒子である。また、酸化還元能を有する物質は、例えば、ポリオキソメタレート (POM)、 TiO_2 、 Ta_2O_5 、 MoO_3 、 MnO_2 、 SiO_2 、 Co_3O_4 、 TaO_x 等の金属酸化物、 MoS_2 等の遷移金属硫化物、 Mo_2N 等の金属窒化物、 $LiTi_5O_{12}$ 等の複合金属酸化物、 $LiFePO_4$ 等のリン酸塩、ポリアニリン、ポリピロール、ポリチオフェン、ポリインドール、ポリパラフェニレン及びこれらの誘導体等である。

10

【0034】

ここで、本発明の実施形態においては、非線形 I V 特性粒子 3 2 として、ポリオキソメタレート (POM) の粒子を使用してもよい。

20

【0035】

POM は、一般式 $[X_a M_b O_c]^{n-}$ で表すことができる金属酸化物である。X は、主として、第 13 ~ 15 族から選ばれる少なくとも 1 種の元素がコバルトあるいは希土類から選ばれる少なくとも 1 種の元素であり、より具体的には例えば、P、As、Si、B、Co、Al などである。M は、主として第 5 ~ 11 族から選ばれる少なくとも 1 種の元素 ($b = 1, 2, 3, \dots$) であり、他にもランタノイド系、アクチノイド系のものも含まれ、より具体的には例えば、Mo、W、Cr、V、Nb、Fe、Ta、Al などである。具体的なポリオキソメタレートの例は、 $[Mo_6O_{19}]^{2-}$ 、 $[PMo_{12}O_{40}]^{3-}$ 、 $[BW_{12}O_{40}]^{5-}$ 、 $[SbW_6O_{24}]^{8-}$ 、 $[SiV_2W_{10}O_{40}]^{6-}$ などである。

30

【0036】

なお、本発明の実施形態において、非線形 I V 特性粒子 3 2 の形状は、特に限定されるものではない。例えば、球状、略球状、円柱状、略円柱状、水滴形状、針状、繊維状、フィルム状等、種々の形状のものを使用することができる。

【0037】

ここで、本実施形態の非線形素子 2 においては、電極 4 1 a, 4 1 b に接続されたネットワーク構造体 3 0 が、導電性粒子 3 1 と、導電性粒子 3 1 に接続された非線形 I V 特性粒子 3 2 とにより構成されている点に特徴がある。

【0038】

例えば、図 2 に示すように、本発明の実施形態におけるネットワーク構造体 3 0 は、繊維形状を有する導電性粒子 3 1 及び略球形形状を有する非線形 I V 特性粒子 3 2 から構成され得る。この場合、ネットワーク構造体 3 0 は、繊維形状を有する導電性粒子 3 1 及び略球形形状を有する非線形 I V 特性粒子 3 2 の、物理的接続を伴う接続領域 3 3 を介して、相互に接触し得る。

40

【0039】

このような構成により、本発明に係る非線形素子 2 の電極 4 1 a, 4 1 b に電圧を印加した場合に、スパイク信号を発生させることができるため、本発明に係る非線形素子 2 をしきい素子としてニューロン素子に利用した場合に、集積化が容易なニューロン素子として有用であり、複雑かつ高度なスパイクングニューラルネットワーク構築が可能となる。

【0040】

50

なお、本発明において「しきい素子」とは、特定のしきい値（例えば、電圧の下限値等）以上の入力信号に対して信号を出力し、しきい値以下の入力信号に対しては信号を出力しない素子を意味する。

【0041】

ここで、本発明の実施形態に係る非線形素子2が、スパイク信号を発生する素子であるためには、負性微分抵抗素子を備える電子回路と等価であることが好ましい。負性微分抵抗素子を備える電子回路は、図3(a)に示すフィッツヒュー＝南雲モデル(R. FitzHugh, Bull. Math. Biophysics 17, 257-278 (1955))と等価である場合に、スパイク信号を発生する回路として機能し得る。

【0042】

図3(a)に示すように、フィッツヒュー＝南雲モデルは、負性微分抵抗素子としてトンネルダイオードを利用してニューロン発火現象におけるスパイク信号発生を再現した電気回路モデルである。フィッツヒュー＝南雲モデルにおいては、外部から電圧パルスなどの刺激を受けた場合、その刺激量があるしきい値を超えると、スパイク信号を一つ発生する（以下、状態Aとする）。また、電圧E及び抵抗Rの条件に応じて、外部から刺激を受けなくても、スパイク信号を連続的に発生し続けることも可能である（以下、状態Bとする）。

【0043】

また、負性微分抵抗素子を備える電子回路は、ダイオード発振器と同様に発振回路として機能し得る。このとき流れる電流は、発振振幅が印加電圧の上昇に伴い漸増するノイズ電流である。

【0044】

ここで、負性微分抵抗素子を備える電子回路が、発振回路であり、フィッツヒュー＝南雲回路と等価かつ状態Aにある場合に、印加電圧の上昇に伴い、回路内で発生するノイズがランダムな外部刺激の代わりとなり、その刺激値が確率的にしきい値を超えてランダムなスパイク電流を発生する状態Bとなる。このような電子回路は、ノイズアシスト型フィッツヒュー＝南雲モデル(図3(b)、L. Gonzalez-Carabarin, T. Asai, M. Motomura, J. Signal Processing 16, 503-509 (2012))と等価であると考えられることができる。

【0045】

そして、本発明の実施形態に係るネットワーク構造体30においては、図4に示すように、例えば、単一の導電性粒子31と、接続領域33を介して接続された単一の非線形IV特性粒子32とにより構成される接続体36を、複数個備えている。ここで、接続体36においては、例えば、接続体36と、接続体36に接続された電極41a, 41bとにより構成される構造物5に電圧を印加した場合に、その電流電圧特性が負性微分抵抗を示すことが好ましい。

【0046】

例えば、導電性粒子31としてSWNTを、非線形IV特性粒子32としてPOMを使用した場合、本実施形態におけるネットワーク構造体30は、POMが介在するとともに、SWNTとPOMとにより構成された接続体36を備える。ここで、本発明者らは、SWNTとPOMとの接続体36が、印加電圧の増加に伴い出力電流が減少する電流電圧特性（すなわち、上述のごとく、負性微分抵抗）を示すことを確認している。従って、本実施形態における非線形素子2は、負性微分抵抗素子を備える電子回路として使用することができる。

【0047】

すなわち、本実施形態における非線形素子2は、非線形素子2の両端に電圧を印加した場合にスパイク電流を出力する素子として機能し得る。従って、本発明の実施形態に係る非線形素子2をパルス（スパイク信号）発生素子として、パルスジェネレータに利用することが可能である。

【0048】

また、本実施形態における非線形素子2は、発振回路として使用することが可能である

10

20

30

40

50

。すなわち、本発明の実施形態における非線形素子 2 は、非線形素子 2 の両端に電圧を印加した場合に発振電流を出力する素子としても機能し得る。また、非線形素子 2 の両端に電圧を印加した場合にノイズ電流を出力する素子としても機能し得る。

【0049】

また、本実施形態における非線形素子 2 は、非線形素子 2 の両端に電圧を印加した場合に、ノイズアシスト型フィッツヒュー＝南雲モデルと等価となり、ノイズ電流及びスパイク電流を出力する素子としても機能し得る。

【0050】

また、本実施形態における非線形素子 2 は、しきい値を超える外部刺激が与えられた場合にスパイク信号を出力するしきい素子としても機能し得る。従って、本実施形態における非線形素子 2 をしきい素子として利用することにより、ニューロン素子を作製することが可能である。そして、本実施形態における非線形素子 2 をしきい素子とするニューロン素子を複数個接続し、ニューラルネットワーク情報処理装置を作製することが可能である。

【0051】

なお、本実施形態における非線形素子 2 においては、ネットワーク構造体 30 中の SWNT 及び POM の混合比及び素子サイズを調整することにより、所望の印加電圧（例えば、80V～150V の間の任意の電圧）においてスパイク信号を発生し得る非線形素子 2 を作製することが可能である。すなわち、本発明の実施形態における非線形素子 2 においては、導電性粒子 31 及び非線形 I V 特性粒子 32 の混合比及び素子サイズを調整することにより、所望のしきい値を有するしきい素子を作製することが可能である。

【0052】

次に、本実施形態の非線形素子 2 の作製方法について一例を挙げて説明する。

【0053】

図 5 に示すように、容器 61a 中において、繊維状の導電性粒子 31 を、非線形 I V 特性粒子 32 の原料である物質を溶解させた溶液 62 中に懸濁させる。このとき、超音波処理を施すことにより、繊維状の導電性粒子 31 の繊維束を解き、溶液 62 中に一様に分散させておくことが好ましい。超音波処理により、繊維状の導電性粒子 31 と、非線形 I V 特性粒子 32 の原料である物質との接触面積が大きくなり、その結果、ネットワーク構造体 30 中における、導電性粒子 31 と、非線形 I V 特性粒子 32 との接続領域 33 が増加し、非線形素子 2 の特性を向上させることが可能である。

【0054】

ここで、溶液 62 を調整する際に使用する溶媒としては、導電性粒子 31 又は導電性粒子 31 の原料である物質、及び、非線形 I V 特性粒子 32 の原料である物質を溶解、分散又は懸濁させ、ネットワーク構造体 30 を作製する際に、粒子 31, 32 の形状を形成し、かつ、接続領域 33 を形成させることができる溶媒であることが好ましい。具体的には、メタノール、エタノール、アセトン、ジクロロメタン、クロロホルム、酢酸エチル、ジメチルエーテル、テトラヒドロフラン、ジメチルホルムアミド、トルエン、キシレン、ヘキサン、ペンタン等の有機溶媒及び水、又はこれらの混合溶媒などが挙げられる。

【0055】

次に、繊維状の導電性粒子 31 を分散させた溶液 62 に、超遠心処理を施し、溶液 62 の上澄み部分をシリンジ 63 を用いて採取し、ろ紙 65a を備える漏斗 64 及び受器 66 からなるろ過装置を使用してろ過処理を施す。溶液 62 の上澄み部分に、本実施形態におけるネットワーク構造体 30 が含まれているため、本ろ過処理により、ろ紙 65a 表面上に、ネットワーク構造体 30 を吸着させて溶液 62 から単離することができる。

【0056】

次に、本実施形態におけるネットワーク構造体 30 を表面に吸着させたるろ紙 65a を漏斗 64 から取り外し、基板 42 の絶縁性表面に貼着する（ろ紙 65b）。ホットプレート 68 上に、物質 67a を入れた容器 61b を置き、容器 61b 上に、ろ紙 65b を貼着した基板 42 を、ろ紙 65b を貼着した面を下に向けて置く。物質 67a を加熱することに

10

20

30

40

50

より物質 67a が蒸発（物質 67b）し、基板 42 に貼着したろ紙 65b を溶解させ、基板 42 表面からろ紙 65b のろ紙成分を取り除く。その結果、基板 42 の絶縁性表面上に、導電性粒子 31 と非線形 I V 特性粒子 32 とにより構成されたネットワーク構造体 30 を転写させ、吸着させることができる。

【0057】

ここで、ネットワーク構造体 30 を単離し、基板 42 に吸着させるろ紙 65 としては、溶液 62 で使用した溶媒には溶解せず、物質 67 には溶解する素材であることが好ましい。この際、溶液 62 で使用した溶媒と物質 67 が同一の物質であって、温度条件によるろ紙の溶解度の差により、溶解性を制御してもよい。すなわち、例えば溶媒として物質 67 を用いて溶液 62 を作製した場合に、ろ過処理時には 0 で、また、転写時には 60 で 10 行うといった温度差による処理方法を採用することが可能である。

【0058】

ろ紙 65 の材料としては、具体的には、セルロース混合エステル、ポリカーボネート等を使用することができる。また、ろ紙 65 の孔径としては、導電性粒子 31 及び非線形 I V 特性粒子 32 の種類に合わせ、10 nm ~ 10 μm のものを適宜使用することができる。

【0059】

物質 67 としては、ろ紙 65 を溶解させる又はある温度以上で溶解させることが可能であり、かつ、ネットワーク構造体 30 を劣化させない物質であることが好ましい。具体的には、アセトン、エタノール、トルエン、ジクロロメタン、クロロホルム等の有機溶媒等 20 が挙げられる。

【0060】

ネットワーク構造体 30 を吸着させた基板 42 上に、マスク 69 を配置し、蒸着材料 70 を矢印方向から蒸着することにより、ネットワーク構造体 30 に接続された電極 41a, 41b を作製する。このようにして、本実施形態における非線形素子 2 を作製することができる。

【0061】

次に、本発明の実施形態に係る非線形素子 2 の測定方法を説明する。

【0062】

図 6 は、本発明の実施形態に係る非線形素子 2 の測定方法の一例を示す概略図である。 30

【0063】

真空プローバ 71 中において、本発明の実施形態に係る非線形素子 2 を素子 7 部分に設置し、電極 41a, 41b とプローブ針 711a, 711b を使用して（すなわち、図示していないが、電極 41a, 41b 上にプローブ針 711a, 711b を接触させ）、電極 41a, 41b に電圧を印加することにより測定を行う。入力側では、ファンクションジェネレータ 72 を DC モードで使用し、アンプ 73 によって 30 倍に増幅させて電圧を印加する。出力側には、プリアンプ 74 を経由して計測システム（DAQ 24bit）75 により出力信号を記録する。

【0064】

また、上記実施形態は以下のように変更してもよい。 40

【0065】

本発明の実施形態におけるネットワーク構造体 30 は、導電性粒子 31 と非線形 I V 特性粒子 32 の種類及び形状により、適宜様々な構造を有し得る。例えば、ネットワーク構造体 30 は、導電性粒子 31 と、導電性粒子 31 の表面上に形成されたフィルム状の非線形 I V 特性粒子 32 とにより構成されていてもよい。より具体的には、図 7 に示すように、繊維形状を有する導電性粒子 31 の表面上を、フィルム状の非線形 I V 特性粒子 32 で被覆した状態にある複合粒子 54 が、フィルム状の非線形 I V 特性粒子 32 の表面上で、複合粒子接続領域 53 を介して、相互に接続された構造 50 を有していてもよい。

【0066】

また、本実施形態における複合粒子 54 を構成する非線形 I V 特性粒子 32 は、フィル 50

ム状の非線形 I V 特性粒子 3 2 の代わりに、複数の非線形 I V 特性粒子 3 2 により構成された薄膜状の非線形 I V 特性粒子 3 2 の集合体であってもよい。

【 0 0 6 7 】

このような構成により、導電性粒子 3 1 の表面上に一様に非線形 I V 特性粒子 3 2 を存在させることができ、導電性粒子 3 1 と非線形 I V 特性粒子 3 2 との接続領域 3 3 を形成し得る表面積が増加する。このため、ネットワーク構造体 3 0 が備える接続領域 3 3 の総数及び総面積が増加し、より小型の、しきい値電圧の低い本発明に係る非線形素子 2 を作製することが可能である。

【 0 0 6 8 】

以上に説明した本発明の実施形態においては、以下の効果を得ることができる。

10

【 0 0 6 9 】

(1) 本発明の実施形態における非線形素子 2 は、電極 4 1 a , 4 1 b に接続されたネットワーク構造体 3 0 が、導電性粒子 3 1 と、導電性粒子 3 1 に接続された非線形 I V 特性粒子 3 2 とにより構成されている。従って、本発明に係る非線形素子 2 の電極 4 1 a , 4 1 b に電圧を印加した場合に、スパイク信号を発生させることができるため、本発明に係る非線形素子 2 をしきい素子としてニューロン素子に利用した場合に、集積化が容易なニューロン素子として有用であり、複雑かつ高度なスパイクニューラルネットワーク構築が可能となる。

【 0 0 7 0 】

(2) 本発明の実施形態におけるネットワーク構造体 3 0 は、単一の導電性粒子 3 1 と、接続領域 3 3 を介して接続された単一の非線形 I V 特性粒子 3 2 とにより構成される接続体 3 6 を、複数個備えている。ここで、接続体 3 6 においては、接続体 3 6 と、接続体 3 6 に接続された電極 4 1 a , 4 1 b とにより構成される構造物 5 に電圧を印加した場合に、その電流電圧特性が負性微分抵抗を示す。従って、本発明の実施形態における非線形素子 2 は、負性微分抵抗素子を備える電子回路として使用することができる。

20

【 0 0 7 1 】

(3) 本発明の実施形態におけるネットワーク構造体 3 0 は、導電性粒子 3 1 と、導電性粒子 3 1 の表面上に形成されたフィルム状の非線形 I V 特性粒子 3 2 又は薄膜状の非線形 I V 特性粒子 3 2 の集合体とにより構成され得る。従って、導電性粒子 3 1 の表面上に一様に非線形 I V 特性粒子 3 2 を存在させることができ、導電性粒子 3 1 と非線形 I V 特性粒子 3 2 との接続領域 3 3 を形成し得る表面積が増加する。このため、ネットワーク構造体 3 0 が備える接続領域 3 3 の総数及び総面積が増加し、より小型の、しきい値電圧の低い本発明に係る非線形素子 2 を作製することが可能である。

30

【 0 0 7 2 】

(4) 本発明の実施形態における非線形素子 2 は、複数の電極によって構成されていてもよい。従って、電極 4 1 a , 4 1 b 間に配置されたネットワーク構造体 3 0 に、他方向から電圧等の外部刺激を加えることが可能である。

【 0 0 7 3 】

(5) 本発明の実施形態に係る非線形素子 2 は、非線形素子 2 の両端に電圧を印加した場合にスパイク電流を出力する素子として機能し得る。従って、本発明の実施形態に係る非線形素子 2 をパルス (スパイク信号) 発生素子として、パルスジェネレータに利用することが可能である。

40

【 0 0 7 4 】

(6) 本発明の実施形態に係る非線形素子 2 は、発振回路として使用することが可能である。すなわち、本発明の実施形態に係る非線形素子 2 は、非線形素子 2 の両端に電圧を印加した場合に発振電流を出力する素子としても機能し得る。また、非線形素子 2 の両端に電圧を印加した場合にノイズ電流を出力する素子としても機能し得る。

【 0 0 7 5 】

(7) 本発明の実施形態における非線形素子 2 は、非線形素子 2 の両端に電圧を印加した場合に、ノイズアシスト型フィッツヒュー = 南雲モデルと等価となり、ノイズ電流及び

50

スパイク電流を出力する素子としても機能し得る。

【0076】

(8) 本発明の実施形態における非線形素子2は、しきい値を超える外部刺激が与えられた場合にスパイク信号を出力するしきい素子としても機能し得る。従って、本発明の実施形態に係る非線形素子2をしきい素子として利用することにより、ニューロン素子を作製することが可能である。そして、本発明の実施形態に係る非線形素子2をしきい素子とするニューロン素子を複数個接続し、ニューラルネットワーク情報処理装置を作製することが可能である。

【0077】

(9) 本発明の実施形態における非線形素子2は、ネットワーク構造体30中の導電性粒子31及び非線形IV特性粒子32の混合比及び素子サイズを調整することにより、所望のしきい値を有するしきい素子とすることが可能である。

【実施例】

【0078】

次に、具体的に実施した実施例について説明する。

【0079】

(実施例1)

(SWNTの精製)

SWNT (Carbon Nanotechnologies, Inc. Houston, TX) をアモルファスカーボン除去のため大気下200で20時間加熱処理を施した後、触媒金属除去のため12mol/Lの塩酸で洗浄後、超純水で洗浄し、精製済みSWNTを得た。

【0080】

(SWNT/POMネットワーク構造体の作製)

SWNT/POMネットワーク構造体を以下の要領で作製した。まず0.8mgのリンモリブデン酸($H_3PMo_{12}O_{40} \cdot nH_2O$ 、和光純薬工業(株)社製)を10mLのエタノールに溶解した。その後1.6mgの精製済みSWNTを加えた。16時間超音波処理を施した後、4000rpmで3時間遠心処理を行った。上澄み1mLを粗さ1 μ mのセルロース混合エステルろ紙(MCEろ紙、Millipore社製)を用いて吸引ろ過することにより、ろ紙上にネットワーク構造体が形成された。その後吸引ろ過装置にMCEろ紙を設置したままエタノール、超純水で吸引ろ過することにより洗浄した。MCEろ紙が乾燥しないうちに、アセトン及びエタノールで洗浄済みの熱酸化膜付きシリコン基板(SiO_2 基板)上にMCEろ紙を添付し、裏返したものを、アセトンを入れたサンプル瓶の上に置き、サンプル瓶をホットプレート(プレート温度80)で1時間加熱した。アセトンの蒸気がMCEろ紙を溶解させ、MCEろ紙が基板上から除去され、 SiO_2 基板上にSWNT/POMネットワーク構造体を形成した。

【0081】

(電極作製)

SWNT/POMネットワーク構造体が形成された SiO_2 基板上に、メタルマスクを設置し抵抗加熱蒸着法により、Au(膜厚80nm)電極構造を作製した。

【0082】

(測定)

真空プローバ(ナガセテクノエンジニアリング(株)社製、極低温プローバ-ARK-HELIPS-LV)に、入力側にファンクションジェネレータ((株)エヌエフ回路設計ブロック社製、WF1974)及びアンプ(30倍に増幅)を接続し、出力側にプリアンプ及びNI9227計測システム(DAQ24bit、National Instruments社製、NI9227)を接続し、PC上でLabVIEW(National Instruments社)(登録商標)を使用して測定を行った。真空プローバ中に設置されたプローブ針を素子に接触させて測定を行った。なお、本実施例1において、図6中の素子7は本発明に係る非線形素子である。図8、図9及び図10に測定結果を示す。

【0083】

(実施例2)

SWNT/POMネットワーク構造体を実施例1に記載の方法と同様の方法で作製した。なお、0.4mgのリンモリブデン酸($H_3PMo_{12}O_{40} \cdot nH_2O$ 、和光純薬工業(株)社製)を使用した。SWNT/POMネットワーク構造体が形成された SiO_2 基板上に、実施例1に記載の方法によりAu電極を作製した。測定を実施例1に記載の構成及び方法により行った。本実施例2において、図6中の素子7は本発明に係る非線形素子である。

【0084】

(比較例1)

実施例1及び実施例2で使用したSWNT/POMネットワーク構造体の代わりに、1Mの抵抗を設置し、電流量の測定を行った。すなわち、本比較例1において、図6中の素子7は1Mの抵抗素子である。図11に電流の経時変化図を示す。

【0085】

図8より、実施例1における非線形素子は、印加電圧0Vから125Vにおいて電流が発振し、その発振振幅が印加電圧の上昇に伴い漸増していることが判る。この印加電圧0Vから125Vにおける発振電流を解析したところ、その振幅だけが漸増するノイズ電流であることが判った。

【0086】

また、図9に示すように、印加電圧150Vでは発振電流が不安定化することが判った。その後150Vを印加したまま一定時間放置させたところ、図10に示すようにベースの電流量が漸増し、スパイク電流を呈するようになった。

【0087】

これは本実施例1の非線形素子が、ノイズアシスト型フィッツヒュー=南雲回路と等価であり、十分印加電圧が大きい場合に前記非線形素子の内部ノイズにより、ランダムなスパイク電流を発生していると考えられる。

【0088】

一方、比較例1における抵抗素子においては、図11に示すように、オームの法則に従い、印加電圧に比例した電流が流れることが判った。すなわち、実施例1における非線形素子において観測されるノイズ電流及びスパイク電流は、非線形素子を構成するSWNT/POMネットワーク構造体が、負性微分抵抗を示す、SWNTとPOMとの接続体により構成された特異的な構造であることに由来すると考えられる。

【0089】

一方、実施例2における非線形素子においては、実施例1における非線形素子に比べて、リンモリブデン酸の含有量を低く設定している。このとき、印加電圧80Vにおいて、スパイク電流の発生が観測された。すなわち、本発明の実施形態に係る非線形素子において、ネットワーク構造体中の導電性粒子及び非線形IV特性粒子の混合比及び素子サイズを調整することにより、所望の印加電圧においてスパイク信号を発生し得る非線形素子を作製することが可能であるといえる。

【産業上の利用可能性】

【0090】

本発明によれば、単一の分子電子素子で構成され、素子の集積化が容易であり、かつ、スパイク信号を発生することができる非線形素子が提供され、その結果、ニューロン素子の集積化が容易となり、複雑かつ高度なスパイクニューラルネットワークの構築が可能となるため、例えば、スパイクタイミング依存シナプス可塑性などの情報伝達機構解明に関する研究や、より生物の脳に近いニューロコンピュータの実現、人工知能を実装したロボットの實現などを通じて、脳科学、コンピュータ科学及びロボット工学への研究、応用等に貢献することが可能である。

【符号の説明】

【0091】

- 1 分子電子素子
- 2 非線形素子

10

20

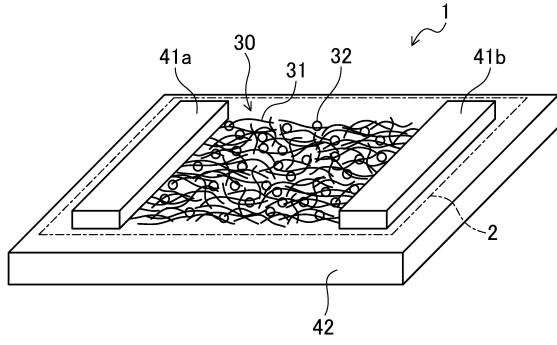
30

40

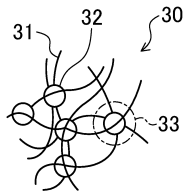
50

| | | |
|-------|---|----|
| 5 | 構造物 | |
| 7 | 素子 | |
| 3 0 | ネットワーク構造体 | |
| 3 1 | 導電性粒子 | |
| 3 2 | 非線形 I V 特性粒子 | |
| 3 3 | (導電性粒子 3 1 と非線形 I V 特性粒子 3 2 との) 接続領域 | |
| 3 6 | 接続体 | |
| 4 1 | 電極 | |
| 4 2 | 基板 | |
| 5 0 | 構造 | 10 |
| 5 3 | 複合粒子接続領域 | |
| 5 4 | 複合粒子 | |
| 6 1 | 容器 | |
| 6 2 | 溶液 | |
| 6 3 | シリンジ | |
| 6 4 | 漏斗 | |
| 6 5 | ろ紙 | |
| 6 6 | 受器 | |
| 6 7 | 物質 | |
| 6 8 | ホットプレート | 20 |
| 6 9 | マスク | |
| 7 0 | 蒸着材料 | |
| 7 1 | 真空プローバー | |
| 7 1 1 | プローブ針 | |
| 7 2 | ファンクションジェネレータ | |
| 7 3 | アンプ | |
| 7 4 | プリアンプ | |
| 7 5 | 計測システム (D A Q 2 4 b i t) | |

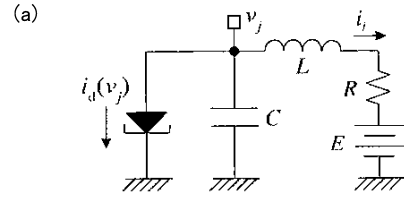
【図1】



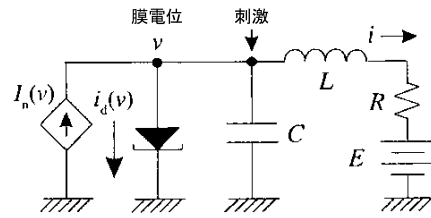
【図2】



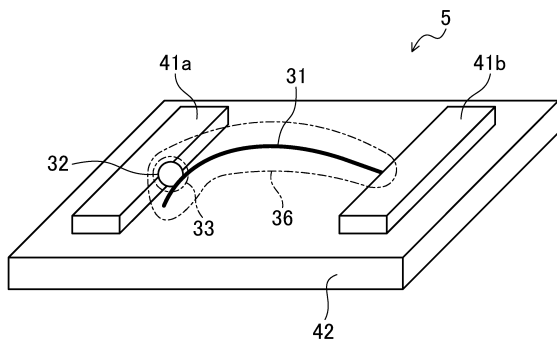
【図3】



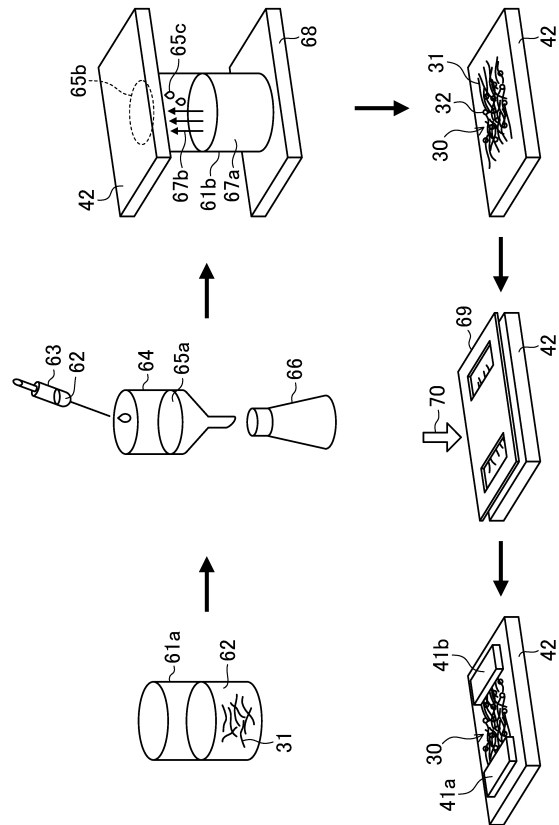
(b)



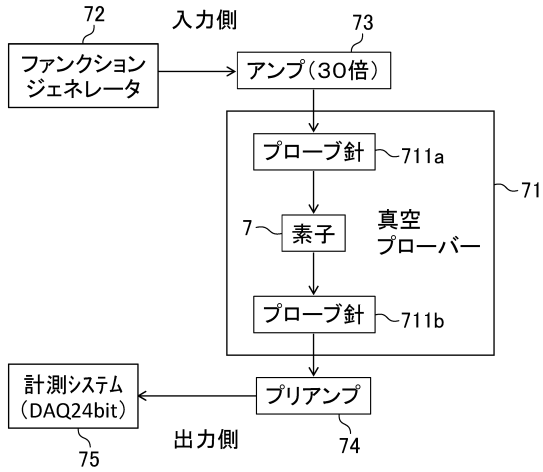
【図4】



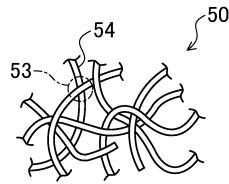
【図5】



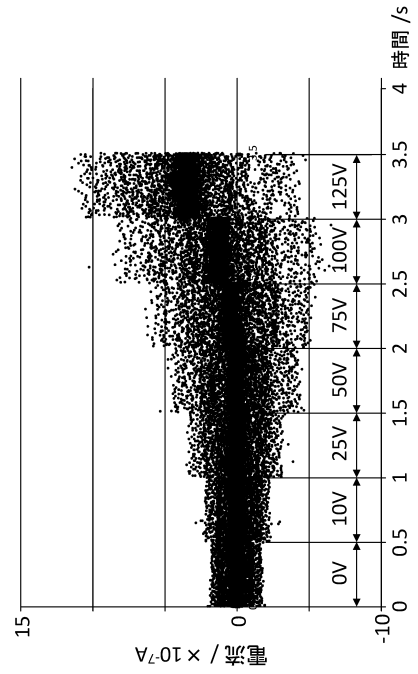
【図 6】



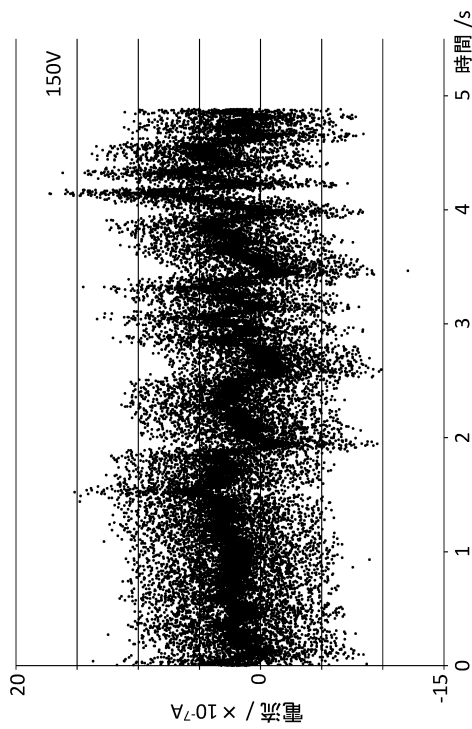
【図 7】



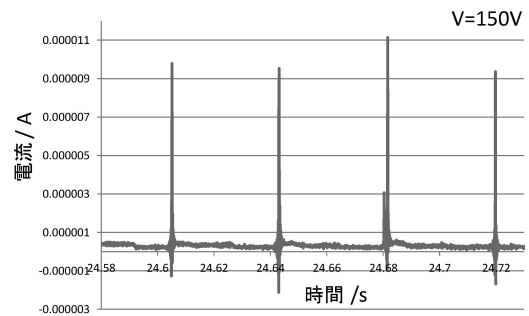
【図 8】



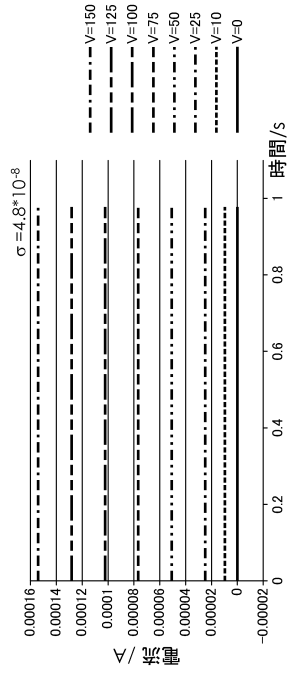
【図 9】



【図 10】



【 図 1 1 】



フロントページの続き

(51)Int.Cl. F I
B 8 2 Y 30/00 (2011.01) H 0 1 L 47/00
B 8 2 Y 30/00

審査官 綿引 隆

(56)参考文献 特表2012-504870(JP,A)
特開2002-329872(JP,A)
特開平06-020074(JP,A)
特開平09-237925(JP,A)
特開2008-004791(JP,A)
特開2009-157600(JP,A)
特開2009-158698(JP,A)

(58)調査した分野(Int.Cl., DB名)
B 8 2 Y 3 0 / 0 0
G 0 6 F 1 5 / 1 8
G 0 6 G 7 / 6 0
G 0 6 N 3 / 0 6 3
H 0 1 L 2 9 / 0 6
H 0 1 L 2 9 / 6 6
H 0 1 L 4 7 / 0 0
H 0 1 L 5 1 / 0 5
H 0 1 L 5 1 / 3 0