

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 公開特許公報(A)

(11) 特許出願公開番号

特開2010-232384
(P2010-232384A)

(43) 公開日 平成22年10月14日(2010.10.14)

(51) Int. Cl.	F I	テーマコード (参考)
HO 1 L 21/66 (2006.01)	HO 1 L 21/66 Y	4 M 1 0 6
HO 1 L 21/3205 (2006.01)	HO 1 L 21/88 S	5 F 0 3 3
HO 1 L 23/52 (2006.01)		

審査請求 有 請求項の数 12 O L (全 20 頁)

<p>(21) 出願番号 特願2009-77629 (P2009-77629)</p> <p>(22) 出願日 平成21年3月26日 (2009. 3. 26)</p> <p>特許法第30条第1項適用申請有り 平成21年3月16日~20日 「2009年アメリカ物理学会 春季会議」において文書をもって発表</p>	<p>(71) 出願人 503360115 独立行政法人科学技術振興機構 埼玉県川口市本町四丁目1番8号</p> <p>(74) 代理人 100082876 弁理士 平山 一幸</p> <p>(74) 代理人 100109807 弁理士 篠田 哲也</p> <p>(74) 代理人 100148127 弁理士 小川 耕太</p> <p>(72) 発明者 梅野 顕憲 東京都世田谷区船橋5-33-22-212</p> <p>(72) 発明者 平川 一彦 東京都多摩市聖ヶ丘3-52-5-501</p>
--	---

最終頁に続く

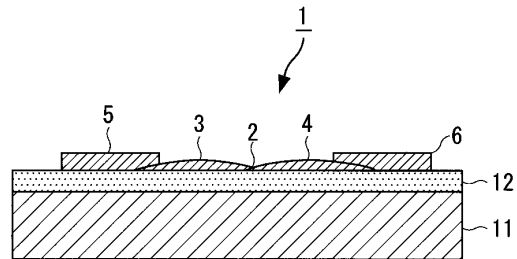
(54) 【発明の名称】 金属配線評価用パターン、半導体装置及び評価方法

(57) 【要約】

【課題】金属配線断線の際の活性化エネルギーを短時間で直接求めることができる、金属配線評価用パターン、半導体装置及び評価方法を提供する。

【解決手段】半導体基板10に配設した絶縁膜12上の金属配線評価用パターン1であって、狭窄部2と、狭窄部2の一端に接続した第1配線部3と、狭窄部2の他端に接続した第2配線部4とからなる。金属配線評価用パターン1へランプ電圧を繰り返し印加し、流れる電流から狭窄部2のコンダクタンスを計算し、コンダクタンスが $100G_0$ から数百 G_0 の相1の状態からコンダクタンスが $10\sim 60G_0$ の相2の状態を経て、狭窄部2を破壊しナノ接合を形成し、相2の臨界接合電圧(V_c)のヒストグラムを作成し、ヒストグラムの最頻値の電圧からエレクトロマイグレーションの活性化エネルギーを求めることができる。

【選択図】図1



【特許請求の範囲】

【請求項 1】

半導体基板に配設された絶縁膜上の金属配線評価用パターンであって、
 狭窄部と、該狭窄部の一端に接続される第 1 配線部と、該狭窄部の他端に接続される第 2 配線部と、を備えていることを特徴とする、金属配線評価用パターン。

【請求項 2】

前記金属配線評価用パターンは、該金属配線評価用パターンに使用される金属材料の電ロマイグレーションの活性化エネルギーを測定するためのパターンであることを特徴とする、請求項 1 に記載の金属配線評価用パターン。

【請求項 3】

さらに、前記第 1 配線部及び前記第 2 配線部にそれぞれ接続されるパッド部を備えていることを特徴とする、請求項 1 に記載の金属配線評価用パターン。

【請求項 4】

前記金属配線評価用パターンが、半導体装置内に配設されていることを特徴とする、請求項 1 又は 2 に記載の金属配線評価用パターン。

【請求項 5】

前記第 1 配線部と前記第 2 配線部とが密着層上に形成され、該密着層が前記絶縁膜上に形成されており、

前記狭窄部が前記絶縁膜上に直接形成されていることを特徴とする、請求項 1 又は 3 に記載の金属配線評価用パターン。

【請求項 6】

さらに、前記金属配線評価用パターンは、寿命測定用の金属配線評価用パターン部を備えていることを特徴とする、請求項 1 ~ 5 の何れかに記載の金属配線評価用パターン。

【請求項 7】

金属配線評価用パターンを備えた半導体装置であって、

上記金属配線評価用パターンは、半導体基板に配設された絶縁膜上に配設され、狭窄部と、該狭窄部の一端に接続される第 1 配線部と、該狭窄部の他端に接続される第 2 配線部と、を備え、

上記金属配線評価用パターンは、該金属配線評価用パターンに使用される金属材料の電ロマイグレーションの活性化エネルギーを測定するためのパターンであることを特徴とする、半導体装置。

【請求項 8】

さらに、前記金属配線評価用パターンは、寿命測定用の金属配線評価用パターン部を備えていることを特徴とする、請求項 7 に記載の半導体装置。

【請求項 9】

金属配線評価用パターンを用いた金属配線の評価方法であって、

半導体基板上に配設された絶縁膜上に、狭窄部と該狭窄部の一端に接続される第 1 配線部と、該狭窄部の他端に接続される第 2 配線部と、からなる上記金属配線評価用パターンを形成し、

上記第 1 配線部及び第 2 配線部にランプ電圧を繰り返し印加し、

上記ランプ電圧によって上記第 1 配線部と上記第 2 配線部との間に流れる電流から上記狭窄部のコンダクタンスを計算し、

上記ランプ電圧によって、上記コンダクタンスが $100 G_0$ から数百 G_0 (ここで、 G_0 は 1 量子コンダクタンスである。) の相 1 の状態から上記コンダクタンスが $10 \sim 60 G_0$ の相 2 の状態を経て、上記狭窄部を破壊しナノ接合を形成し、

上記相 2 のランプ電圧の最大値である臨界接合電圧 (V_c) のヒストグラムを作成し、該ヒストグラムの最頻値の電圧に電荷素量 (q) を乗じた値を、上記金属配線評価用パターンにおける電ロマイグレーションの活性化エネルギーの値として求めることを特徴とする、金属配線の評価方法。

【請求項 10】

10

20

30

40

50

前記ランプ電圧を前記第1配線部と前記第2配線部との間に繰り返し印加する際に、前記金属配線評価用パターンを冷却することを特徴とする、請求項9に記載の金属配線の評価方法。

【請求項11】

さらに、前記金属配線評価用パターンと共に、寿命測定用の金属配線評価用パターン部を形成することを特徴とする、請求項9又10に記載の金属配線の評価方法。

【請求項12】

前記寿命測定用の金属配線評価用パターン部を用いて、高温下で金属配線の寿命を測定し、

上記金属配線の寿命と前記活性化エネルギーとから、金属配線の平均寿命を求めることを特徴とする、請求項9～11の何れかに記載の金属配線の評価方法。

10

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

本発明は、金属配線評価用パターン、半導体装置及び金属配線評価用パターンの評価方法に関する。さらに詳しくは、本発明は、半導体装置における金属配線の信頼性の評価の際に用いられる金属配線評価用パターンと、金属配線評価用パターンを備えた半導体装置と、金属配線の信頼性を評価する評価方法に関する。

【背景技術】

【0002】

集積回路等の半導体装置に用いる金属配線の線幅は微細化の進展に伴い縮小し、現在は数百から40ナノメートル(nm)程度になっている。金属配線の電流密度が高くなるとそれに伴って断線故障が生じるおそれが高くなる。この断線故障の原因としては、所謂エレクトロマイグレーション(Electromigration)が知られている。

20

【0003】

エレクトロマイグレーションの原因の一つは、金属配線の材料となる電気的な伝導体の中で移動する電子と金属原子との間で運動量の交換が行われるため、イオンが徐々に移動することによって金属配線の形状に欠損が生じる現象である(非特許文献1～4参照)。エレクトロマイグレーションの他の原因は、ジュール加熱であり、金属配線材料中の原子の移動を加速する(非特許文献3、5参照)。

30

【0004】

上記した二つの機構は何れも金属配線材料中の原子の移動を促進する。原子は、主として結晶粒界を介して移動し(非特許文献2参照)、最終的に金属配線が断線する。

【0005】

このようなエレクトロマイグレーションによって誘起される断線は、大規模集積回路(VLSI)の金属配線における主要な故障原因となるので、金属配線の信頼性確保のためにVLSIが故障するまでの平均時間である平均故障寿命(MTTF: Mean Time To Failure)に関するデータ取得が必須となっている。これにより、種々の金属配線のMTTFから活性化エネルギーが実験的に求められている(非特許文献6、7参照)。

【0006】

半導体回路における金属配線の信頼性の指標であるMTTFに関するデータ取得のために、製造したVLSI又は金属配線試料を多数用意し、環境温度を変えながら金属配線試料が断線するまで長時間通電する、所謂高温加速試験が行われている。通電時間として数10～数1000時間が必要となる。金属配線試料の断線までの寿命と環境温度との関係から、断線耐性の指標となる活性化エネルギーを求めている。さらに、高温加速試験の結果を、VLSIの使用状態の温度まで外挿することによってMTTFを推定している。

40

【先行技術文献】

【非特許文献】

【0007】

【非特許文献1】H. B. Huntington and A. R. Grone, J. Phys. Chem. Solids 20, 76 (

50

1961)

【非特許文献 2】P. S. Ho and T. Kwok, Rep. Prog. Phys. 52, 301 (1989)

【非特許文献 3】A. Scorzoni, B. Neri, C. Caprile, F. Fantini, Mat. Sci. Rep. 7, 143 (1991)

【非特許文献 4】J. R. Lloyd, Semicond. Sci. Technol. 12, 1177 (1997)

【非特許文献 5】C. Durkan and M. E. Welland, Ultramicroscopy 82, 125 (2000)

【非特許文献 6】M. Etzion, I. A. Blech, and Y. Komem, J. Appl. Phys. 46, 1455 (1975)

【非特許文献 7】M. Hauschildt, M. Gall, S. Thrasher, P. Justison, L. Michaelson, R. Hernandez, H. Kawasaki, P. S. Ho, Appl. Phys. Lett. 88, 211907 (2006)

【非特許文献 8】S. Gunther, A. Hitzke, and J. Behm, Surf. Rev. Lett. 4, 1103 (1997)

【発明の概要】

【発明が解決しようとする課題】

【0008】

従来の金属配線の M T T F の取得には多数の試料を用意して、環境温度を変えて長時間の測定を必要とし、1回の評価に1000時間以上の時間とコストが必要となる。従来技術における M T T F の取得に要する時間及びコストは、金属配線開発において、より多様な材料や構造を活かすことの妨げとなっている。

【0009】

本発明の目的は、上記課題に鑑み、金属配線断線の際の活性化エネルギーを短時間で直接求めることができる、金属配線評価用パターン及びこの評価用パターンを具備する半導体装置並びに評価方法を提供することにある。

【課題を解決するための手段】

【0010】

上記第1の目的を達成するため、本発明は、半導体基板に配設された絶縁膜上の金属配線評価用パターンであって、狭窄部と、狭窄部の一端に接続される第1配線部と、狭窄部の他端に接続される第2配線部と、を備えていることを特徴とする。

【0011】

上記構成において、金属配線評価用パターンは、好ましくは、金属配線評価用パターンに使用される金属材料のエレクトロマイグレーションの活性化エネルギーを測定するためのパターンである。

上記第1配線部及び第2配線部にはそれぞれパッド部が接続されていると好ましい。

金属配線評価用パターンは、好ましくは、半導体装置内に配設されている。

第1配線部と第2配線部とは密着層上に形成され、密着層が絶縁膜上に形成されており、狭窄部が絶縁膜上に直接形成されていてもよい。

さらに、金属配線評価用パターンは、寿命測定用の金属配線評価用パターン部を備えていてもよい。

【0012】

上記第2の目的を達成するため、本発明の半導体装置は、金属配線評価用パターンを備え、この金属配線評価用パターンは、半導体基板に配設された絶縁膜上に配設され、狭窄部と、狭窄部の一端に接続される第1配線部と、狭窄部の他端に接続される第2配線部と、を具備し、金属配線評価用パターンに使用される金属材料のエレクトロマイグレーションの活性化エネルギーを測定するためのパターンであることを特徴とする。

この金属配線評価用パターンは、寿命測定用の金属配線評価用パターン部を備えていてもよい。

【0013】

上記第3の目的を達成するため、本発明は、金属配線評価用パターンを用いた金属配線の評価方法であって、半導体基板上に配設された絶縁膜上に、狭窄部と狭窄部の一端に接続される第1配線部と、狭窄部の他端に接続される第2配線部と、からなる金属配線評価

10

20

30

40

50

用パターンを形成し、第1配線部及び第2配線部にランプ電圧を繰り返し印加し、ランプ電圧によって第1配線部と第2配線部との間に流れる電流から狭窄部のコンダクタンスを計算し、ランプ電圧によって、コンダクタンスが $100G_0$ から数百 G_0 。(ここで、 G_0 は1量子コンダクタンスである。)の相1の状態からコンダクタンスが $10\sim 60G_0$ の相2の状態を経て、狭窄部を破壊しナノ接合を形成し、相2のランプ電圧の最大値である臨界接合電圧(V_c)のヒストグラムを作成し、ヒストグラムの最頻値の電圧に電荷素量(q)を乗じた値を、金属配線評価用パターンにおけるエレクトロマイグレーションの活性化エネルギーの値として求めることを特徴とする。

【0014】

上記構成において、ランプ電圧を第1配線部と第2配線部との間に繰り返し印加する際には、金属配線評価用パターンを冷却してもよい。金属配線評価用パターンと共に、寿命測定用の金属配線評価用パターン部を形成してもよい。

寿命測定用の金属配線評価用パターン部を用いて、高温下で金属配線の寿命を測定し、金属配線の寿命と活性化エネルギーとから、金属配線の平均寿命を求めることができる。

【0015】

上記構成によれば、集積回路等の半導体装置中の金属配線の信頼性を、金属配線と同じ材料の原子数十個ほどからなる微小な接合を用い、原子一つずつの微小断線を何度も生じさせ、そのときの接合電位差を精密に測定し、統計処理することで、信頼性の指標である金属配線の断線における活性化エネルギーを直接に、かつ、短時間で求めることができる。さらに、通常の寿命試験を高温で行うことによって平均寿命の測定も、短時間で行うことができる。

【発明の効果】

【0016】

本発明によれば、金属配線の断線耐性の評価項目である活性化エネルギーや平均寿命を劇的に低い時間コストで評価することができる金属配線評価用パターン、半導体装置及び評価方法を提供することができる。これにより、材料や微視的な結晶構造の違いといった多様な配線構造の断線耐性を比較検討することが可能となり、金属配線の開発に大きく寄与しうる。

【図面の簡単な説明】

【0017】

【図1】本発明の実施の形態である金属配線評価用パターンの構成を示す模式的な断面図である。

【図2】図1の模式的な部分平面図である。

【図3】本発明の実施の形態である金属配線評価用パターンの構成の変形例を示す模式的な断面図である。

【図4】図3の模式的な部分平面図である。

【図5】金属配線評価用パターンの変形例を模式的に示す平面図である。

【図6】金属配線評価用パターンの変形例を模式的に示す平面図である。

【図7】本発明の金属配線評価用パターンを用いた金属配線の評価を行う金属配線評価装置のブロック図である。

【図8】金属配線評価用パターンに通電してからナノギャップ電極が形成されるまでのコンダクタンスの時間軸における変化を模式的に示す図である。

【図9】 R_j を V_c の関数として示す図である。

【図10】 $MTTF$ を求めるための片対数グラフである。

【図11】狭窄部の走査型電子顕微鏡像であり、(A)がナノ接合を、(B)がナノギャップ電極を示している。

【図12】実施例に関し、金属配線評価用パターンのランプ電圧印加直後におけるコンダクタンスと印加電圧の関係を示す図である。

【図13】実施例に関し、金属配線評価用パターンの相1におけるコンダクタンスの時間依存性を示す図である。

10

20

30

40

50

【図14】実施例に関し、金属配線評価用パターンの相2におけるコンダクタンスの時間依存性を示す図である。

【図15】実施例に関し、金属配線評価用パターンの R_j と臨界接合電圧 V_c の関係を示す図である。

【図16】相2のコンダクタンス測定で得た臨界接合電圧 V_c の頻度を示すヒストグラムの一例である。

【図17】 G_j が $3.9 G_0$ のときのコンダクタンスの時間依存性を示す図である。

【発明を実施するための形態】

【0018】

以下、本発明による金属配線評価用パターン及びその評価方法の実施の形態を図面により詳細に説明する。

図1は、本発明の実施の形態である金属配線評価用パターンの構成を示す模式的な断面図である。図2は図1の模式的な部分平面図である。

金属配線評価用パターン1は、半導体からなる基板11の表面側に設けられ絶縁膜12の表面に配設されている。半導体は半導体装置に用いられる基板であれば何でもよく、シリコン(Si)やGaAsやSiC等の化合物半導体からなる。

【0019】

絶縁膜12は、シリコン酸化膜(SiO_2)や窒化膜等を使用することができ、所謂層間絶縁膜でもよい。以下、絶縁膜12はシリコン酸化膜として説明する。

【0020】

金属配線評価用パターン1は、金属配線から形成されている。金属配線の材料としては、アルミニウム、銅、金等が挙げられる。

【0021】

図2は、金属配線評価用パターン1の模式的な平面図である。図2のI-I線に沿った断面が図1である。

金属配線評価用パターン1は、狭窄部2と、この狭窄部2を両側で挟むように配置された左側の第1配線部3と右側の第2配線部4と、から構成されている。図示の場合、第1配線部3及び第2配線部4は三角形のパターンを有している。各三角形の頂点同士が対向しており、この頂点同士の接続する位置に狭窄部2が設けられている。狭窄部2は、後述するように、第1配線部3及び第2配線部4へ電源を接続し、電流を流すことによって最終的には損傷させ、第1配線部3と第2配線部4との電氣的接続を無くすために設けている。後述するが、金属配線評価用パターン1によれば、金属配線の破壊におけるエレクトロマイグレーションの活性化エネルギーを測定することができる。

【0022】

金属配線評価用パターン1は、第1配線部3に接続されるパッド部5と第2配線部4に接続されるパッド部6を備えていてもよい。パッド部5,6は、金属配線評価用パターン1と同時に形成することができる。また、図示するように、パッド部5,6は、金属配線評価用パターン1の形成後に形成してもよい。

【0023】

金属配線評価用パターン1は、基板11上に絶縁膜12を形成し、絶縁膜12上に形成することができる。金属配線となる材料の金属層を蒸着法、CVD法等で堆積し、金属層を金属配線評価用パターン1に形成する工程によって形成することができる。金属配線評価用パターン1の形状は、リソグラフィとエッチングとの組合せによる工程等によって形成することができる。

【0024】

図3は、本発明の実施の形態である金属配線評価用パターンの構成の変形例を示す模式的な断面図である。図4は図3の模式的な部分平面図である。

金属配線評価用パターン1Aは半導体装置10の所定の領域に配置され、所謂評価用パターン(TEGとも呼ばれている)として配置されている。半導体装置10は、半導体からなる基板11の表面側に設けられた絶縁膜12と、基板11又は基板11の表面近傍に

10

20

30

40

50

形成された素子 1 3 と、素子用の金属配線 1 4 を備えている。図示の場合、金属配線評価用パターン 1 A は素子用の金属配線 1 4 と同じ材料から構成され、絶縁膜 1 2 の表面に配置されている。

【 0 0 2 5 】

金属配線評価用パターン 1 A は、半導体装置 1 0 の所定の領域に素子用の金属配線 1 4 と同時に形成することができる。具体的には、金属配線 1 4 となる材料の金属層を蒸着、CVD などで堆積し、金属層を所定のパターンに形成する工程によって形成することができる。金属配線評価用パターン 1 A の形状は、リソグラフィとエッチングとの組合せによる工程等によって形成することができる。

【 0 0 2 6 】

図 5 は、金属配線評価用パターンの変形例を模式的に示す平面図である。図 5 に示すように、金属配線評価用パターン 1 B において、図 3 で示した素子用の金属配線 1 4 は、第 1 配線層 7 と第 2 配線層 8 とから構成されている。狭窄部 2 の下部は酸化膜 1 2 上に配置されており、第 2 配線層 8 だけで形成されている。第 1 配線部 3 及び第 2 配線部 4 は、酸化膜 1 2 上に形成された第 1 配線層 7 と第 2 配線層 8 とから形成されている。パッド部 5 , 6 も第 1 配線部 3 及び第 2 配線部 4 と同様に 2 層構造によって形成することができる。

【 0 0 2 7 】

第 1 配線層 7 は例えば Ti 等の密着層であり、第 2 配線層 8 は、半導体装置 1 0 の電極となる配線層であって、上記したアルミニウム、銅、金等からなる。第 2 配線層 8 は、第 1 配線層 7 よりも厚く形成されている。第 1 配線部 3、第 2 配線部 4 を、Ti からなる第 1 配線層 7 と金からなる第 2 配線層 8 とで形成した場合には、酸化膜 1 2 との密着がよくなる。金からなる狭窄部 2 は、酸化膜 1 2 上に配置されているが、第 1 配線部 3 及び第 2 配線部 4 の第 2 配線層 8 に接続しているので、酸化膜 1 2 との密着性はよくないが、酸化膜 1 2 からは剥離しないようになる。

これにより、金属配線評価用パターン 1 B によれば、狭窄部 2 が断線の評価対象となる第 2 配線層 8 だけで構成されるので、第 1 配線層 7 の影響を受けずに第 2 配線層 8 の断線評価を正確に行うことができる。

【 0 0 2 8 】

上記説明では、金属配線評価用パターン 1 B の狭窄部 2 以外を 2 層、つまり、金属配線 1 4 が 2 層で構成される例を示したが、金属配線 1 4 が多層で形成されてもよい。この場合、密着層以外の最も断面積の大きい主となる配線層だけで狭窄部 2 を形成すればよい。主となる配線層は、金属配線 1 4 の断線評価をする配線層である。

【 0 0 2 9 】

図 6 は、金属配線評価用パターンの変形例を模式的に示す平面図である。図 6 に示すように、金属配線評価用パターン 1 C は、活性化エネルギー測定用の金属配線評価用パターン 1 , 1 A , 1 B の何れかと、寿命測定用の金属配線評価用パターン部 1 5 とから構成されている。金属配線評価用パターン部 1 5 は、細線からなる配線部 1 6 と、この配線部 1 6 の両端に接続されるパッド部 5 , 6 とから形成されている。この金属配線評価用パターン部 1 5 は、所謂従来の寿命測定用の配線パターンと同様の構成を有しており、細線の幅は最小加工寸法としてもよい。金属配線評価用パターン 1 (1 A , 1 B) と金属配線評価用パターン部 1 5 は、同じ金属配線を用いて同時に形成する。さらに、金属配線評価用パターン 1 (1 A , 1 B) と金属配線評価用パターン部 1 5 は、図示するように複数個配設してもよい。

【 0 0 3 0 】

次に、本発明の金属配線評価用パターン 1 , 1 A , 1 B を用いた金属配線の評価を行う装置及び評価方法について説明する。評価装置及び評価方法は、金属配線評価用パターン 1 , 1 A , 1 B に依存しない。このため、以下の説明では金属配線評価用パターン 1 として説明する。

図 7 は、本発明の金属配線評価用パターンを用いた金属配線の評価を行う金属配線評価装置のブロック図である。金属配線評価装置 2 0 は、測定試料となる金属配線評価用パタ

10

20

30

40

50

ーン 1 の試料載置部 2 2 と、金属配線評価用パターン 1 に接続端子 2 4 を介して電圧を印加する電圧発生部 2 6 と、金属配線評価用パターン 1 に電圧を印加したときに流れる電流を測定する電流検出部 2 8 と、制御部 3 0 と、から構成されている。

【 0 0 3 1 】

金属配線評価装置の試料載置部 2 2 は、金属配線評価用パターン 1 を一定温度にするための恒温槽や冷凍器 3 2 を含んで構成されている。さらに、金属配線評価用パターン 1 と、試料載置部 2 2 と、接続端子 2 4 とは、図示しない真空槽内に配置してもよい。後述するように、金属配線評価用パターン 1 によってエレクトロマイグレーションの活性化エネルギーを求める場合、試料載置部 2 2 の温度は室温でもよい。さらに、金属配線評価用パターン 1 の熱エネルギーの揺らぎを抑圧するために試料載置部 2 2 を冷却してもよい。熱エネルギーは kT (ここで、 k はボルツマン定数、 T は絶対温度 (K) である。) で見積もられ、室温では約 $0.03 eV$ である。これにより、特に活性化エネルギーとして、少数点以下 2 桁台の精度が要求される場合には、試料載置部 2 2 を冷却する。

10

【 0 0 3 2 】

接続端子 2 4 としては、W 線の針等を用いたプローブを使用することができる。

【 0 0 3 3 】

電圧発生部 2 6 はランブ波を発生する。ランブ波は、1 サイクルの掃印の間に電圧値が直線的に増加し、それから急に元の値に戻って、次のサイクルを開始するような掃印電圧を繰り返して発生する回路である。

【 0 0 3 4 】

電流検出部 2 8 の一端は電圧発生部 2 6 の出力端子に接続され、電流検出部 2 8 の他端は接続端子 2 4 の一端に接続されている。接続端子 2 4 の他端は、電圧発生部 2 6 の接地側に接続されている。

20

ここで、電流検出部 2 8 の他端と接続端子 2 4 の一端との間には、雑音除去用のフィルタ 3 2 が挿入されていてもよい。フィルタ 3 2 としては、例えば高周波除去用のローパスフィルタを用いることができる。

【 0 0 3 5 】

制御部 3 0 は、電圧発生部 2 6 で発生するランブ波を制御すると共に、ランブ波の電圧と電流検出部 2 8 で検出された電流値から金属配線評価用パターン 1 のコンダクタンスを計算する。制御部 3 0 は、電子計算機 3 2 から構成されている。このような電子計算機 3 2 としては、パーソナルコンピュータを用いることができる。電子計算機 3 2 は、ランブ波や金属配線評価用パターン 1 のコンダクタンス等を表示するディスプレイ部 3 6 を備えていてもよい。

30

【 0 0 3 6 】

(金属配線評価用パターン 1 を用いた金属配線の評価方法)

次に、本発明の金属配線評価用パターン 1 を用いた金属配線の評価方法について説明する。

【 0 0 3 7 】

金属配線評価用パターン 1 への電圧ストレスの印加前に、測定系の全抵抗 R_s ($= V / I$) を測定する。全抵抗 R_s は、パッシブなローパスフィルタの直列抵抗を含み、測定系の時間に独立な直列抵抗である。金属配線評価用パターン 1 の抵抗は、全抵抗 R_s を差し引いた値となる。

40

【 0 0 3 8 】

次に、金属配線評価用パターン 1 へ遅い帰還制御された電圧ストレスによって金属配線評価用パターン 1 の破壊工程を行う。バイアス電圧 V は、電流を監視しながら行う。ランブ電圧の時間に対する上昇は、例えば $1 mV / 200 ms$ である。

【 0 0 3 9 】

金属配線評価用パターン 1 におけるエレクトロマイグレーションの前兆は、コンダクタンス G (ここで、 $G(i) = I / V(i)$)、と微分コンダクタンス ($I / V(i)$) の増加を監視することによって、ランブ電圧の印加中に検出される。ここで、 i は電圧

50

ステップ数である。Vは、例えば10mVに設定することができる。

【0040】

ランプ電圧は、一例として微分コンダクタンス ($I / V(i+1)$) が、大凡 $G(i)$ になるまで上昇させた。つまり、 $I / V(i+1) = G(i)$ である。

しかしながら、微分コンダクタンスがある閾値よりも小さい $G(i)$ になったときには、ランプ電圧Vがエレクトロマイグレーション工程で安定するように、急激に減少させた。減少割合は、例えば10%である。

【0041】

微分コンダクタンスの閾値は、経験的に調整することができる。閾値は破損が発展するように典型的には80%から200%まで増加させた。

10

【0042】

制御されたストレスと緩和を繰り返すことによって、金属配線評価用パターン1の狭窄部2は徐々に破壊する。最終的には、狭窄部2は無くなり、金属配線評価用パターン1は、第1配線部3と第2配線部4とがnmオーダーの間隔で対向した、所謂ナノギャップ電極となる。

【0043】

金属配線評価用パターン1の狭窄部2へランプ電圧によって電気的なストレスを数回繰り返すにつれて、エレクトロマイグレーションは進行し、回路抵抗であるRは初期値 R_s から増加する。この回路抵抗Rから初期値 R_s を差し引いた $R - R_s$ が、金属配線評価用パターン1の正味の抵抗である。Rの増加は、狭窄部2におけるナノギャップ接合の形成に起因している。

20

【0044】

金属配線評価用パターン1の抵抗 R_j は、下記(1)式で定義される。

$$R_j = R - R_s \quad (1)$$

金属配線評価用パターン1のコンダクタンス G_j は、下記(2)式で定義される。

$$G_j = (R - R_s)^{-1} = 1 / R_j \quad (2)$$

【0045】

金属配線評価用パターン1に印加される電圧 V_j において、電圧降下がほぼ狭窄部2で生じるので、狭窄部2の接合電圧は V_j と近似的に表わされる。従って、 V_j は下記(3)式で与えられる。

$$V_j = I / G_j \quad (3)$$

ここで、Iは、金属配線評価用パターン1を流れる電流である。

30

【0046】

上記各式の R_j , G_j は、印加するランプ電圧と測定されるIから制御部30で計算される。例えば、計算された G_j , V_j 等の時間変化は、ディスプレイ装置34に表示される。

【0047】

図8は、金属配線評価用パターン1に通電してからナノギャップ電極が形成されるまでのコンダクタンスの時間軸における変化を模式的に示す図である。図8に示すように、コンダクタンスは相1から相2へ変化することによって、金属配線評価用パターン1の狭窄部2の破壊が進展し、相2の最後で狭窄部2がなくなりナノギャップ電極が形成される。

40

初期のコンダクタンスの非常に緩やかな減少の後、電圧帰還制御が開始される。そして $G - V$ 特性は、狭窄部2の破壊工程の進展につれて、電圧Vが減少するという傾向を有した複雑なパターンを示し始める。相1では、 G_j が、 G_0 の数百倍大きい初期段階では、電圧のストレス及び緩和の制御に同期して、 G_j は、急激な減少と完全でない復帰を繰り返す。 G_0 は1量子コンダクタンスであり下記(4)式で表わされる。

$$G_0 = 2e^2 / h \quad (4)$$

ここで、eは電子の単位電荷であり、hはプランク定数である。

【0048】

相1から相2の変換点のコンダクタンス G_j が、例えば G_0 の数十倍になると、エレクト

50

トロマイグレーションモードが変化することが分かる。相 1 から相 2 の変換点のコンダクタンス G_j は、金属配線評価用パターン 1 の試料毎、或いは用いる金属材料でも若干異なるが、 $100G_0$ 未満で、特に $50G_0$ 程度以下の値となることが多い。金属配線評価用パターン 1 が金配線からなる場合には、相 1 から相 2 の変換点のコンダクタンス G_j は用いる $10G_0 \sim 60G_0$ 程度である。

【0049】

しかしながら、図 8 に相 2 として示すように、 G_j は量子化コンダクタンスの平坦部を有するようになり、連続的に G_0 ずつ階段状に減少するようになる。これは、相 2 のエレクトロマイグレーションが、金の原子の連続的な 1 個ずつの剥離が進行していることを示している。相 2 をパリストティック相とも呼ぶことにする。

10

【0050】

図 8 の相 1 及び相 2 の状態をさらに詳しく調べるために、接合電圧 V_j における臨界接合電圧 V_c を定義する。臨界接合電圧 V_c は、 G_j が急激に減少し始めるときの接合電圧 V_j であり、基本的には図 8 の相 1 及び相 2 に示しているように、鋸波状の接合電圧 V_j の最大値に等しい電圧とする。

【0051】

図 9 は、 R_j を V_c の関数として示す図である。図の横軸は臨界接合電圧 V_c (V) であり、図の縦軸は R_j ($h / (2e^2)$) である。 $h / (2e^2)$ は、1 量子コンダクタンスの逆数であり、1 量子抵抗である。

図 9 に示すように、 R_j が小さいときは、 R_j と V_c との関係 ($R_j - V_c$ 特性とも呼ぶ) は、従来のジュール加熱モデルである $R_j = V_c^2 / P^*$ で良く表わされる。ここで、 P^* は定数であり、接合におけるエレクトロマイグレーションが生起するときの臨界電力消費として説明することができる。

20

【0052】

しかしながら、相 2 において狭窄部 2 の幅が数十原子位に狭くなると、 $R_j - V_c$ 特性は一定電力の線からはずれようになる。これは、狭窄部 2 において、熱ではない機構、つまり、エレクトロマイグレーション工程が生起し始めることを意味している。これにより、 G_j が数十 G_0 ($G_j < \text{数十} G_0$) の電子輸送機構は、パリストティック伝導であることが示唆される。

【0053】

相 2 では、金属配線評価用パターン 1 のコンダクタンス変化は、1 量子コンダクタンスずつの連続的な低下が観測される。1 量子コンダクタンスは、狭窄部 2 の接合電圧が臨界値を超えたときの配線材料に用いる原子の一つずつの剥離に相当する。

30

【0054】

(エレクトロマイグレーションにおける活性化エネルギーの求め方)

金属配線評価用パターン 1 の狭窄部 2 におけるエレクトロマイグレーションの活性化エネルギーは、相 2 における臨界接合電圧 V_c のヒストグラムを作成し、最も頻度の高い電圧から求めることができる。つまり、最頻値の電位差 \times (電荷素量 $q : 1.6 \times 10^{-19} \text{C}$) として活性化エネルギーの値が求められる。

これにより、金属配線評価用パターン 1 の狭窄部 2 において、相 2 の臨界接合電圧のヒストグラムによってピーク値を求めることによって、配線材料に用いる原子の表面自己拡散過程の活性化エネルギーを求めることができる。

40

【0055】

さらに、相 2 の臨界接合電圧のヒストグラムにおけるピーク値は、配線材料に用いる原子の M T T F の活性化エネルギーと一致する。M T T F は、別途、従来の配線材料の信頼性試験から求められた値である。結果は、エレクトロマイグレーションが熱由来ではないことを示し、その素過程は、粒界における単一の伝導電子から単一の金属原子に対して続いて運動エネルギーの伝達によって生起 (誘起) される表面拡散である。

【0056】

本発明の金属配線評価方法によれば、金属配線評価用パターン 1 は半導体装置 10 と同

50

じ材料からなり、狭窄部 2 にランプ電圧を繰り返し通電することによって原子数が数十個ほどからなる相 2 の状態とし、狭窄部 2 を微小な接合とし、これに精密にランプ電圧を通電することで、原子一つ分の微小断線を何度も生じさせ、観測される臨界接合電圧 V_c の頻度分布から直接、(最頻値の電位差) \times (電荷素量 $q = 1.6 \times 10^{-19} \text{ C}$) として活性化エネルギー (eV) の値を求めることができる。

【0057】

(MTTF の測定方法)

次に、金属配線の平均故障寿命 (MTTF) の測定方法について説明する。

上記した評価方法によって金属配線評価用パターン 1, 1A, 1B を用いて、金属配線のエレクトロマイグレーションにおける活性化エネルギーを求めることができる。さらに、金属配線評価用パターン 1C を用いることで、MTTF を測定することができる。

10

金属配線評価用パターン 1 の測定は、以下の工程によって求めることができる。

工程 1: 金属配線評価用パターン 1C において、上記の方法によって、金属配線評価用パターン 1, 1A, 1B の何れかに用いる金属材料のエレクトロマイグレーションの活性化エネルギーを求める。以下の説明では、金属配線評価用パターン 1 として説明する。

具体的には、金属配線評価用パターン 1 に通電を行い、狭窄部 2 の切断を行い、相 2 における臨界接合電圧を取得し、臨界接合電圧のヒストグラムを作成し、金属配線評価用パターン 1 に用いる金属材料のエレクトロマイグレーションの活性化エネルギーを求める。活性化エネルギーの精度を高めるためには、多数の金属配線評価用パターン 1, 1A で活性化エネルギーを測定し、その平均値を活性化エネルギーとすることが望ましい。

20

工程 2: 金属配線評価用パターン 1C 内に金属配線評価用パターン 1 と共に配置されている寿命測定のための金属配線評価用パターン部 15 を用い、通常寿命試験である劣化試験を高温 (T_h) で行い、劣化するまでの寿命を測定する。寿命測定の精度を向上させるには、高温は 1 点ではなく、複数の高温で行ってもよい。

【0058】

工程 3: 工程 2 で得た温度 T_h における寿命を片対数グラフへプロットする。図 10 は、MTTF を求めるための片対数グラフであり、横軸は絶対温度 (K) の逆数 (直線目盛り) で、縦軸は寿命 (時間) の対数目盛りである。工程 2 で得た温度 T_h における寿命を丸印 () で示している。

工程 4: 寿命 t_f は、下記 (5) 式で与えられる。

30

$$t_f = A \exp(-E_a / (kT)) \quad (5)$$

ここで、A は定数、 E_a はエレクトロマイグレーションの活性化エネルギー、k はボルツマン定数、T は絶対温度 (K) である。

従って、図 10 に示すように、片対数グラフへプロットした寿命の点を基準として、工程 1 で求めた活性化エネルギーを有する直線を低温側まで外挿線を描く。温度 T_h から低温側への外挿線を用い、低温側の寿命を得る。

【0059】

上記方法によれば、図 6 に示す金属配線評価用パターン 1C を用い、金属配線評価用パターン部 15 の劣化試験を高温で行うことによって、半導体装置 10 に用いる金属配線の寿命を測定することができる。この方法によれば、金属配線評価用パターン 1 (1A, 1B) により短時間で求められる金属配線の活性化エネルギーと、高温側の少なくとも 1 点の寿命測定と、によって MTTF を求めることができる。このため、従来の MTTF 測定のように、低温側 (例えば 200) から高温側 (例えば 500) まで複数の測定を行う必要がなくなる、特に、低温側での時間が掛かる寿命測定が不要となるので、短時間に MTTF を得ることができる。

40

【実施例 1】

【0060】

以下、実施例により本発明をさらに詳細に説明する。

(金属配線評価用パターン 1 の作製)

金属配線評価用パターン 1 は、高不純物密度添加の $p^+ \text{ Si}$ 基板 11 の表面に形成され

50

た酸化膜 (SiO_2 膜) 上に形成した弱いナノ接合である狭窄部 2 を備えている。酸化膜 1 2 の厚さは 100 nm である。金属配線評価用パターン 1 は、材料として金を用い、電子ビーム露光と引き続きの影蒸着で行った。

【0061】

密着層 7 として、2 nm の厚さの Ti を通常の入射で行った。次に、10 nm の金属 2 層をそれぞれ、 11° 、 -11° の角度で蒸着し、小さなオーバーラップ領域、つまり、狭窄部 2 を形成した。これにより、ごく僅かに重なった領域は、Ti からなる密着層 7 の影響が回避される。製作した金属配線評価用パターン 1 の狭窄部 2 の幅は 150 nm である。製作した金属配線評価用パターン 1 を、金属配線評価装置 20 の試料載置部 22 の銅ブロック上に載置し、真空にして 4.2 K まで冷却し、エレクトロマイグレーションにお

10

【0062】

金属配線評価用パターン 1 のうち狭窄部 2 は上記した遅い帰還制御によって破壊された。金属配線評価用パターン 1 に印加するランプ波は、電流を監視しながら $1 \text{ mV} / 200 \text{ ms}$ で変化させた。I / V (i) の測定において、V は 10 mV に設定した。閾値は経験的に調整し、破損が進展するように典型的には 80% から 200% まで増加させた。ランプ電圧によって制御されたストレスと緩和を繰り返すことによって、狭窄部 2 のナノ接合は、徐々に破壊してナノギャップ電極とした。

【0063】

図 11 は、狭窄部 2 の走査型電子顕微鏡像であり、(A) がナノ接合を、(B) がナノギャップ電極を示している。加速電圧は 50 kV であり、倍率は 20 万倍である。

20

図 11 から明らかなように、ランプ電圧を精度良く繰り返し印加することで、ナノ接合及びナノギャップ電極を形成することができた。

【0064】

図 12 ~ 14 は、実施例の金属配線評価用パターン 1 のコンダクタンス測定結果を示す図である。

図 12 は、実施例に関し、金属配線評価用パターンのランプ電圧印加直後におけるコンダクタンスと印加電圧の関係を示す図である。図 12 の横軸は電圧 (V) を示し、図 12 の縦軸はコンダクタンス (mS) を示している。

図 12 に示すように、ランプ電圧印加直後の初期のコンダクタンスは、非常に緩やかに減少させた後、電圧帰還制御を開始した。コンダクタンスと電圧の特性 (G - V 特性とも呼ぶ) は、破壊工程の進展につれて、電圧 V が減少するという傾向を有している複雑なパターンを呈し始める。

30

【0065】

図 13 は、実施例に関し、金属配線評価用パターンの相 1 におけるコンダクタンスの時間依存性を示す図である。図 13 の横軸は時間 (秒) を、左縦軸及び右縦軸は、それぞれコンダクタンス ($2e^2/h$)、狭窄部 2 の接合電圧 V_j (V) を示している。

図 13 に示すように、狭窄部 2 のコンダクタンス G_j は、ランプ電圧の変化によって $220 G_0 \sim 195 G_0$ まで減少する場合を示している。このように、 G_j が G_0 の百倍から数百倍と大きい初期段階では、ランプ電圧の上昇 (ストレス) 及び下降 (緩和) の制御に同期して、狭窄部 2 のコンダクタンス G_j は急激な減少と完全ではない増加 (復帰) を繰り返し示すと共に、徐々に減少する。

40

【0066】

図 14 は、実施例に関し、金属配線評価用パターンの相 2 におけるコンダクタンスの時間依存性を示す図である。図 14 の横軸及び縦軸は図 13 と同じである。

図 14 に示すように、狭窄部 2 の破壊工程における相 2 は G_j が G_0 の数十倍になると生じる相であり、相 1 からエレクトロマイグレーションモードの相 2 へ変化することが分かる。図 14 では、狭窄部 2 のコンダクタンスがランプ電圧の変化によって $42 G_0 \sim 30 G_0$ まで減少する場合を示している。相 2 では、 G_j が量子化コンダクタンスの平坦部を有するようになり、連続的に G_0 ずつ階段状に減少するようになる。これは、相 2 で生

50

起するエレクトロマイグレーションでは、金の原子の連続的な1個ずつの剥離が進行していることを示している。

【0067】

図15は、実施例に関し、金属配線評価用パターンの R_j と臨界接合電圧 V_c の関係を示す図であり、2つの試料A, Bのデータを示している。図15の横軸は臨界接合電圧 V_c (V)であり、縦軸は R_j ($h / (2e^2)$)である。

図15から明らかなように、 R_j が小さい場合は、接合抵抗 R_j と臨界接合電圧 V_c の特性 ($R_j - V_c$ 特性と呼ぶ) は図示する点線の傾きで R_j が増加する。この領域が狭窄部2の接合における相1であり、 R_j と V_c との関係は、従来のジュール加熱モデルで表わされる。 R_j が約 $0.02R_0$ 以上では、相1とは異なる傾きとなり、 $R_j - V_c$ 特性から相2へ移行することが分かる。このように、相2では、狭窄部2の接合の幅が数十原子位に狭くなり、 $R_j - V_c$ 特性は一定電力の線からずれるようになる。

10

【0068】

図16は、相2のコンダクタンス測定で得た臨界接合電圧 V_c の頻度を示すヒストグラムの一例である。図16の横軸は臨界接合電圧 V_c (V)を示し、縦軸は頻度を示している。

図16から明らかなように、臨界接合電圧 V_c は $0.25V$ から $0.6V$ までの範囲に分布し、ピークが $0.42V$ であることを示している。ピークの位置は、金線に対する信頼性試から経験的に決定された活性化エネルギーである $0.42 \pm 0.02 eV$ (非特許文献6参照) と等しいことが判明した。

20

【0069】

さらに、ピークの位置は、走査型トンネル顕微鏡で実験的に決定された金の表面における自己拡散ポテンシャルである $0.4 eV$ から $0.44 eV$ (非特許文献8参照) と一致している。

【0070】

上記結果から、エレクトロマイグレーションにおける素過程は、図16の挿入図 (ポテンシャルダイアグラム) に示すように、単一の伝導電子から単一の金属原子に対する運動エネルギーの伝達によって誘起される表面拡散である。図16に示すように、狭窄部2の破壊工程の最終段階のデータ点は $1 eV$ を越えており、この値は、バルクの金の凝集エネルギー ($3.81 eV$) のオーダーである。これは、接合が、強い金属結合を有する数原子によって架橋されていることを示している。

30

【0071】

図17は、 G_j が $39G_0$ のときのコンダクタンスの時間依存性を示す図である。図17の実線及び点線は、それぞれ、 V_j が $0.32V$ 及び $0.46V$ のときの異なる試料における G_j を示している。

図17から明らかなように、 V_j が $0.32V$ の場合には、 G_j は変化しないことが分かる。一方、 V_j が $0.46V$ の場合の G_j は、時間と共に急激に減少していることが分かる。

【0072】

これらの結果は、 V_c のヒストグラム中の $0.4V$ のピークが金のナノ接合における金拡散に対する閾値を与えることを明瞭に示している。図17は、原子の拡散ポテンシャルに対して接合の印加電圧を注意深く選定することによって、BJ工程を原子単位で正確に制御することができる。

40

【0073】

上記実施例から、金属配線評価用パターン1に設けた狭窄部2の破壊工程におけるランブ電圧の繰り返し印加によって、狭窄部2の金原子が40個、つまり、コンダクタンスが $40G_0$ 位からなる相2の状態とし、臨界接合電圧 V_c を、さらに、精密に測定しつつ通電することで、原子一つ分ずつの微小断裂を何度も生じさせることが確認できた。狭窄部2に印加される臨界接合電圧 V_c のヒストグラムから、臨界接合電圧 V_c の最頻値として $0.4V$ を得て、狭窄部2の断線の活性化エネルギーとして $0.4 eV$ の値を得た。この

50

活性化エネルギーは、従来の測定法で得られた値とよく一致することが判明した。

【 0 0 7 4 】

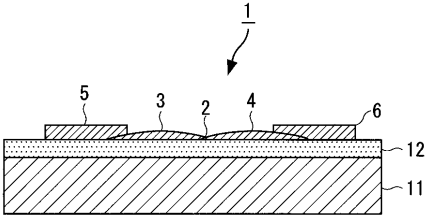
本発明は上記実施例に限定されることなく、特許請求の範囲に記載した発明の範囲内で種々の変形が可能であり、それらも本発明の範囲内に含まれる。例えば、上記実施の形態で説明した金属配線評価用パターン 1, 1 A, 1 B, 1 C は、狭窄部 2 を有していれば、種々の半導体装置 1 0 に応じて様々なパターン形状とし得ることは勿論である。

【 符号の説明 】

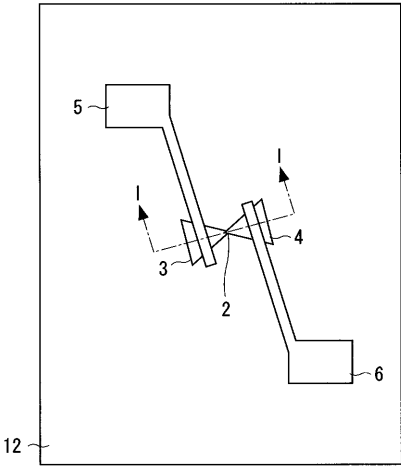
【 0 0 7 5 】

1, 1 A, 1 B, 1 C : 金属配線評価用パターン	
2 : 狭窄部	10
3 : 第 1 配線部	
4 : 第 2 配線部	
5, 6 : パッド部	
7 : 第 1 配線層	
8 : 第 2 配線層	
1 0 : 半導体装置	
1 1 : 基板	
1 2 : 絶縁膜	
1 3 : 素子	
1 4 : 金属配線	20
1 5 : 寿命測定用の金属配線評価用パターン部	
1 6 : 配線部	
2 0 : 金属配線評価装置	
2 2 : 試料載置部	
2 4 : 接続端子	
2 6 : 電圧発生部	
2 8 : 電流検出部	
3 0 : 制御部	
3 2 : 恒温槽 (冷凍器)	
3 4 : フィルタ	30
3 6 : ディスプレー部	

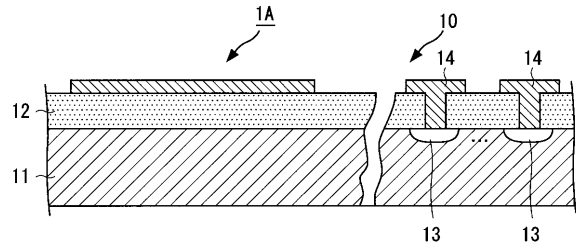
【 図 1 】



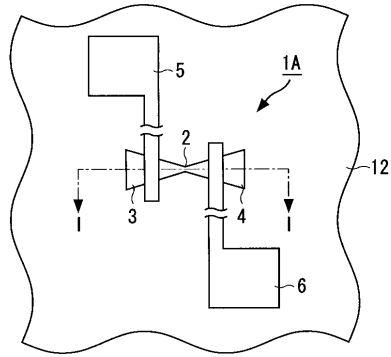
【 図 2 】



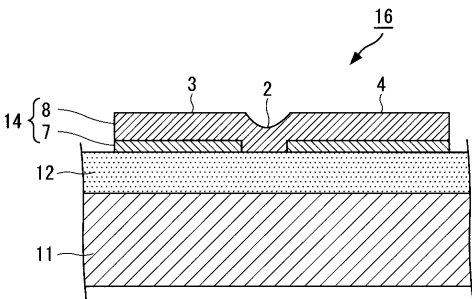
【 図 3 】



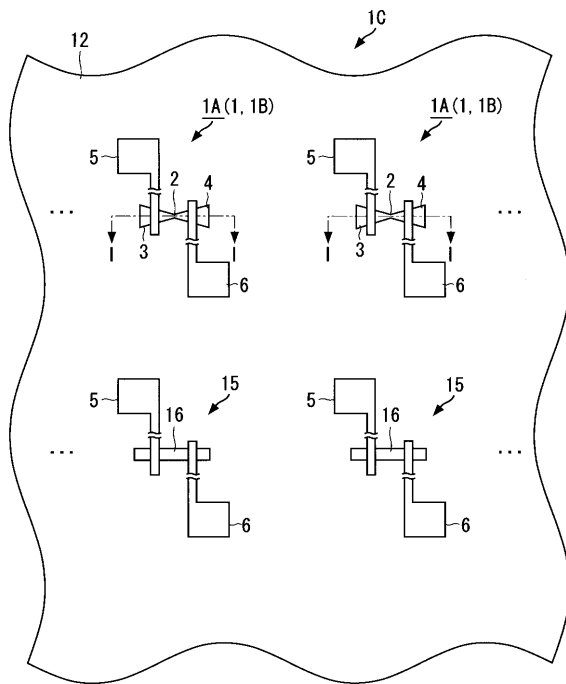
【 図 4 】



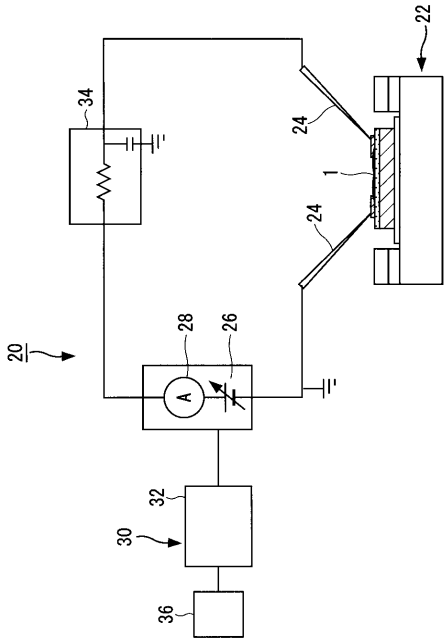
【 図 5 】



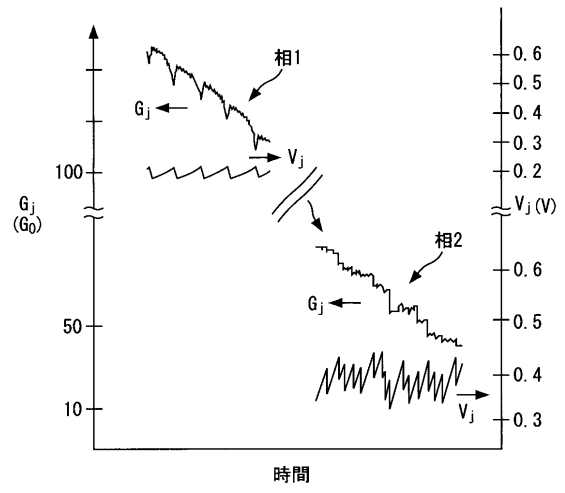
【 図 6 】



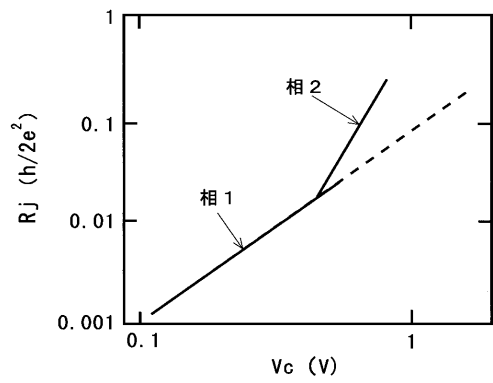
【 図 7 】



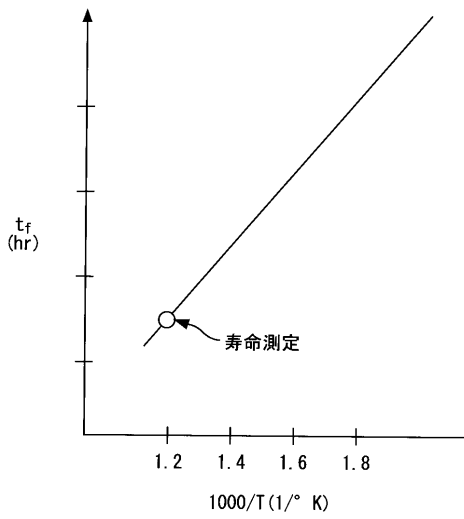
【 図 8 】



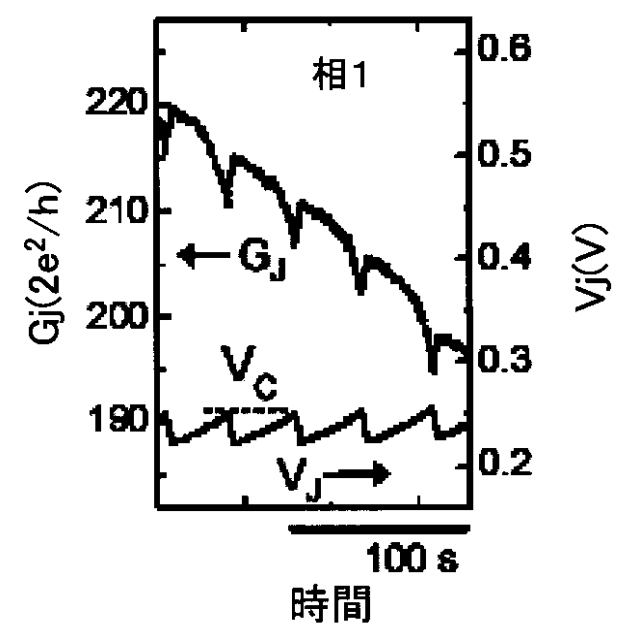
【 図 9 】



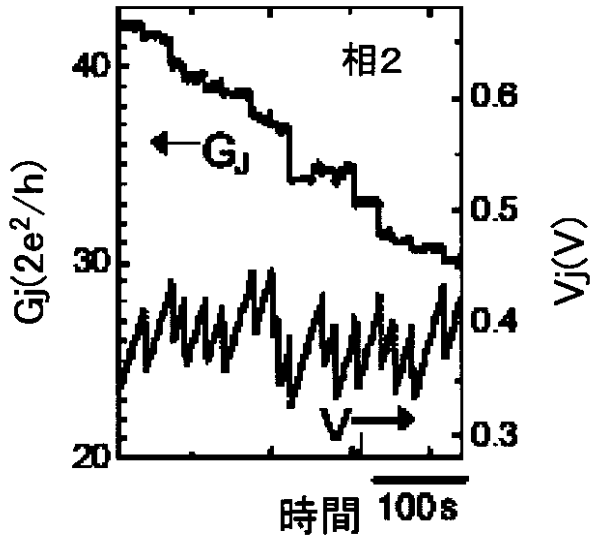
【 図 10 】



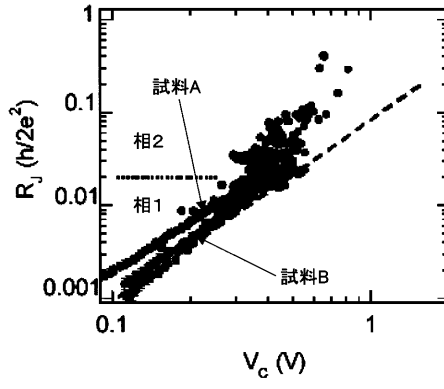
【 図 13 】



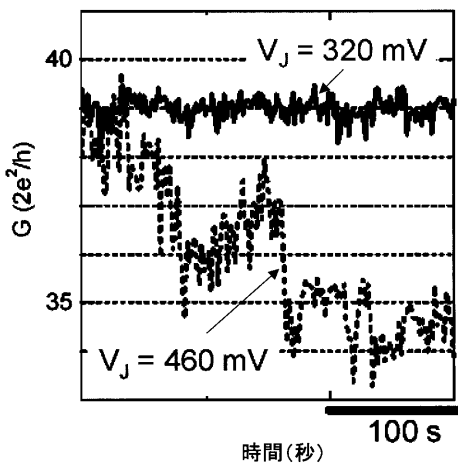
【 図 1 4 】



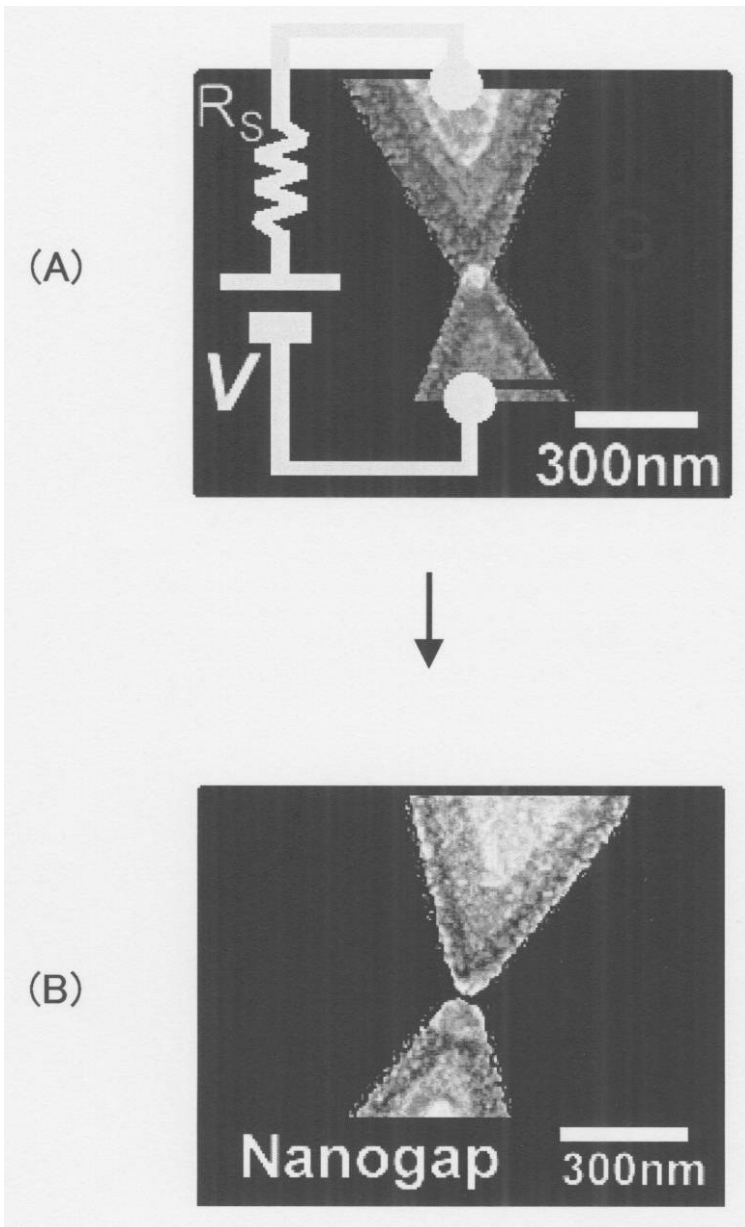
【 図 1 5 】



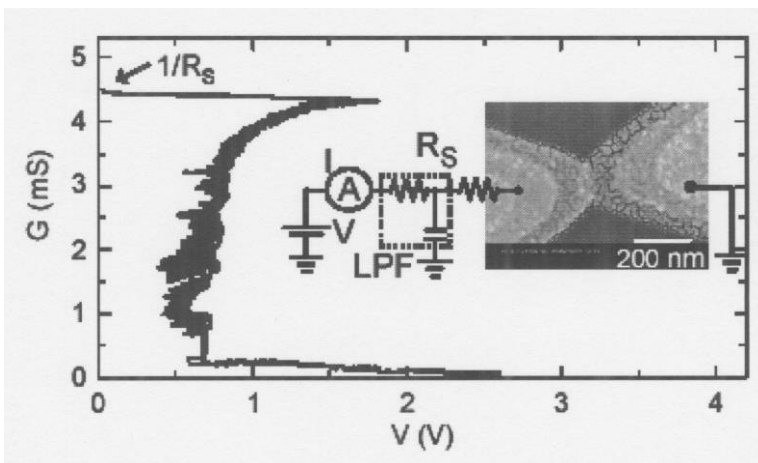
【 図 1 7 】



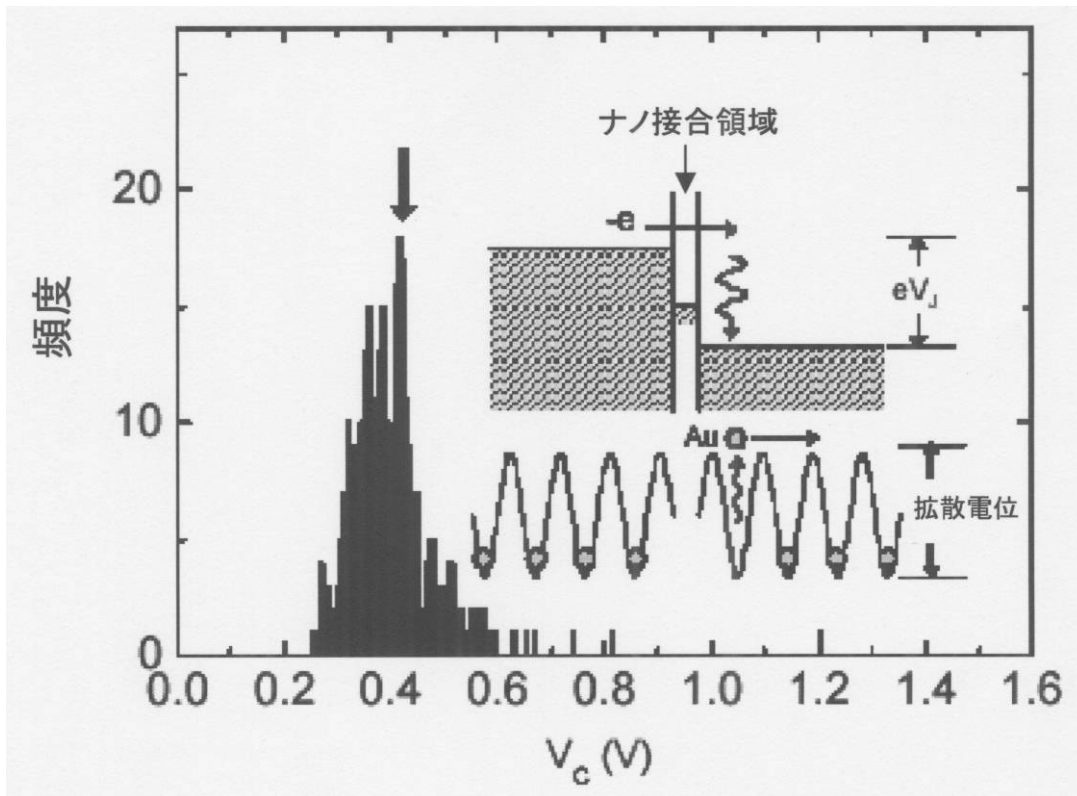
【 図 1 1 】



【 図 1 2 】



【 図 1 6 】



フロントページの続き

Fターム(参考) 4M106 AA01 AA07 AB12 AB15 BA14 CA16 CA40
5F033 GG01 GG02 HH08 HH11 HH13 HH18 MM05 MM21 MM28 RR04
RR06 VV12 WW00 XX03 XX05 XX37