

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 特 許 公 報(B2)

(11) 特許番号

特許第5880937号  
(P5880937)

(45) 発行日 平成28年3月9日(2016.3.9)

(24) 登録日 平成28年2月12日(2016.2.12)

(51) Int. Cl. F I  
 HO 1 L 29/82 (2006.01) HO 1 L 29/82 Z  
 HO 4 L 9/18 (2006.01) HO 4 L 9/00 6 5 1

請求項の数 5 (全 22 頁)

(21) 出願番号	特願2011-282394 (P2011-282394)	(73) 特許権者	504190548 国立大学法人埼玉大学
(22) 出願日	平成23年12月22日(2011.12.22)		埼玉県さいたま市桜区下大久保255
(65) 公開番号	特開2013-134995 (P2013-134995A)	(74) 代理人	100104204 弁理士 峯岸 武司
(43) 公開日	平成25年7月8日(2013.7.8)	(72) 発明者	酒井 政道 埼玉県さいたま市桜区下大久保255 国立大学法人埼玉大学内
審査請求日	平成26年12月10日(2014.12.10)	(72) 発明者	長谷川 繁彦 大阪府枚方市東香里3-39-4
		(72) 発明者	北島 彰 大阪府大阪市城東区成育1-2-3
		(72) 発明者	大島 明博 大阪府茨木市豊川5-22-1-334

最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 スピン偏極度測定方法及び測定メータ、並びにこれを用いた論理演算ゲート及び信号暗号化復号化方法

(57) 【特許請求の範囲】

【請求項1】

被測定材料に非磁性導体が接合されて構成される素子の両端に電圧を印加して前記被測定材料から前記非磁性導体にスピン偏極電流を注入し、前記非磁性導体における前記スピン偏極電流の進行方向に平行な縦方向電圧、及び前記スピン偏極電流の進行方向に垂直な横方向電圧を測定し、前記縦方向電圧を前記スピン偏極電流の電流値で割った値から前記スピン偏極電流の進行方向に沿う縦方向における前記非磁性導体の縦抵抗を測定し、前記横方向電圧を前記スピン偏極電流の電流値で割った値から前記スピン偏極電流の進行方向に直交する横方向における前記非磁性導体の横抵抗を測定し、測定した前記縦抵抗及び前記横抵抗から前記非磁性導体の横抵抗率の縦抵抗率に対する縦横抵抗率比を求め、前記縦横抵抗率比と前記非磁性導体におけるキャリアのスピン偏極度とが、前記非磁性導体におけるキャリアの移動度とスピン軌道相互作用の強さとの積を比例係数とする比例関係にあることに基づいて、前記縦横抵抗率比から前記被測定材料のスピン偏極度の相対値を評価するスピン偏極度測定方法。

【請求項2】

スピン偏極度が0%のときの前記縦抵抗率の、スピン偏極度が100%のときの前記縦抵抗率に対する比から1を減算した減算値で、或るスピン偏極度における前記縦横抵抗率比の二乗値を割った値がそのスピン偏極度の二乗値に等しい関係に基づいて、前記被測定材料のスピン偏極度の絶対値を評価することを特徴とする請求項1に記載のスピン偏極度測定方法。

## 【請求項 3】

導電性を有する被測定材料に非磁性導体が接合されたメータ本体と、前記メータ本体の両端に電圧を印加して前記被測定材料から前記非磁性導体に注入されたスピン偏極電流の進行方向に平行な縦方向電圧を測定する第 1 の電圧測定手段と、前記スピン偏極電流の進行方向に垂直な横方向電圧を測定する第 2 の電圧測定手段とから構成され、

前記第 1 の電圧測定手段で測定された前記縦方向電圧を前記スピン偏極電流の電流値で割った値から前記スピン偏極電流の進行方向に沿う縦方向における前記非磁性導体の縦抵抗を測定し、前記第 2 の電圧測定手段で測定された前記横方向電圧を前記スピン偏極電流の電流値で割った値から前記スピン偏極電流の進行方向に直交する横方向における前記非磁性導体の横抵抗を測定し、測定した前記縦抵抗及び前記横抵抗から前記非磁性導体の横抵抗率の縦抵抗率に対する縦横抵抗率比を求め、スピン偏極度が 0 % のときの前記縦抵抗率の、スピン偏極度が 100 % のときの前記縦抵抗率に対する比から 1 を減算した減算値で、或るスピン偏極度における前記縦横抵抗率比の二乗値を割った値がそのスピン偏極度の二乗値に等しい関係に基づいて、前記縦横抵抗率比から前記非磁性導体のスピン偏極度の絶対値を評価するスピン偏極度測定メータ。

10

## 【請求項 4】

導電性を有する第 1 の導電材料に第 1 の非磁性導体が接合された第 1 のメータ本体、第 1 の前記メータ本体の両端に電圧を印加して第 1 の前記導電材料から第 1 の前記非磁性導体に注入された第 1 のスピン偏極電流の進行方向に平行な縦方向電圧を測定する第 1 の電圧測定手段、及び、第 1 の前記スピン偏極電流の進行方向に垂直な横方向電圧を測定する第 2 の電圧測定手段から構成される第 1 のスピン偏極度測定メータと、

20

導電性を有する第 2 の導電材料に第 2 の非磁性導体が接合された第 2 のメータ本体、第 2 の前記メータ本体の両端に電圧を印加して第 2 の前記導電材料から第 2 の前記非磁性導体に注入された第 2 のスピン偏極電流の進行方向に平行な縦方向電圧を測定する第 3 の電圧測定手段、及び、第 2 の前記スピン偏極電流の進行方向に垂直な横方向電圧を測定する第 4 の電圧測定手段から構成される第 2 のスピン偏極度測定メータと、

第 1 の前記スピン偏極電流が流出する前記第 1 の非磁性導体の端部及び第 2 の前記スピン偏極電流が流出する前記第 2 の非磁性導体の端部が一端部に接合された、またはこれらの接合部分を無くして前記第 1 の非磁性導体及び前記第 2 の非磁性導体と一体成形された第 3 の非磁性導体からなる第 3 のメータ本体、第 1 の前記非磁性導体及び第 2 の前記非磁性導体から第 3 の前記非磁性導体に流入する第 1 の前記スピン偏極電流及び第 2 の前記スピン偏極電流が合成して形成される第 3 のスピン偏極電流の進行方向に平行な縦方向電圧を測定する第 5 の電圧測定手段、及び、第 3 の前記スピン偏極電流の進行方向に垂直な横方向電圧を測定する第 6 の電圧測定手段から構成される第 3 のスピン偏極度測定メータとを備えて構成され、

30

第 1 の前記スピン偏極電流のキャリアのスピン偏極度及び第 2 の前記スピン偏極電流のキャリアのスピン偏極度を入力値、第 3 の前記スピン偏極電流のキャリアのスピン偏極度を出力値とする論理演算ゲート。

## 【請求項 5】

第 1 の前記メータ本体及び第 2 の前記メータ本体の一方に送信信号列、他方に乱数列を入力して第 3 の前記メータ本体から出力される信号列を暗号列として送信し、前記論理演算ゲートの演算論理に基づいて前記乱数列と受信した前記暗号列とから前記送信信号列を復号する、請求項 4 に記載の論理演算ゲートを用いた信号暗号化及び復号化方法。

40

## 【発明の詳細な説明】

## 【技術分野】

## 【0001】

本発明は、被測定材料におけるキャリアのスピン偏極度を測定するスピン偏極度測定方法、及びスピン偏極度測定メータ、並びにこのスピン偏極度測定メータを用いた論理演算ゲート及び信号暗号化復号化方法に関するものである。

## 【背景技術】

50

## 【 0 0 0 2 】

従来、固体中におけるキャリアのスピンの偏極度測定方法には、主に、特許文献 1 及び非特許文献 1 に開示されたスピン偏極トンネリング効果を用いる方法と、非特許文献 2 に開示されたアンドレーフ反射を利用する方法の 2 種類がある。

## 【 0 0 0 3 】

前者のスピン偏極トンネリング効果を用いる方法では、絶縁層を介して強磁性層を積層した、第 1 の強磁性層 / 絶縁層 / 第 2 の強磁性層という 3 層構造の磁気抵抗効果素子を使う。そして、第 1 及び第 2 の強磁性層間に現れるスピン偏極トンネリング効果を利用する。スピン偏極トンネリング効果における磁気抵抗変化率は、第 1 の強磁性層と第 2 の強磁性層の伝導電子スピン偏極度をそれぞれ  $P_1$ 、 $P_2$  とすると、大まかに両者の積の 2 倍、すなわち  $2 P_1 \times P_2$  と表される。従って、スピン偏極度  $P_1$  が明確である第 1 の強磁性層を使用し、磁気抵抗変化率を測定することにより、第 2 の強磁性層のスピン偏極度  $P_2$  を求めることが出来る。この方法は、実際の磁気抵抗効果素子の製造に必要な情報が直接得られるという利点を有している。

10

## 【 0 0 0 4 】

また、後者のアンドレーフ反射を利用する方法では、被測定材料に超伝導体を接合しておく。そして、被測定材料から超伝導体への入射電子がクーパー対を生成する際に、正孔が被測定材料へ反射されるという現象を利用して、スピン偏極度を測定する。

## 【 先行技術文献 】

## 【 特許文献 】

20

## 【 0 0 0 5 】

【 特許文献 1 】 特開平 1 1 - 6 4 4 7 6 号公報

## 【 非特許文献 】

## 【 0 0 0 6 】

【 非特許文献 1 】 R.Meservey and O.M.Tedrow, Phys. Rep. 238巻(1994年), 173頁

【 非特許文献 2 】 M.J.M. de Jong and C.W.J.Beenakker, Phys. Rev. Lett. 74巻 (1995年), 1657頁

## 【 発明の概要 】

## 【 発明が解決しようとする課題 】

## 【 0 0 0 7 】

30

しかしながら、上記従来のスピン偏極トンネリング効果を用いて第 2 の強磁性層のスピン偏極度  $P_2$  を測定するには、予め第 1 の強磁性層のスピン偏極度  $P_1$  を決定しておく必要がある。さらに、被測定材料は強磁性体に限られる。また、キャリアは 2 種類の磁性層を通過するので、強磁性層の局在スピンの相互作用によってキャリアのスピン状態が変化し、ひいては、キャリアのスピン偏極度はこの測定によって変化してしまう。このように、従来のスピン偏極トンネリング効果を用いた方法では、磁気抵抗変化の測定中にキャリアのスピン偏極度の値が変化しないことが保証できない。さらに、測定の原理上、大がかりな走査型トンネル電子顕微鏡 (STM) 技術を必要とするため、スピン偏極度の測定を簡便に行ってその測定結果を新たな回路素子へ応用することは困難である。

## 【 0 0 0 8 】

40

また、上記従来のアンドレーフ反射を利用してスピン偏極度を測定するには、被測定材料全体を超伝導状態に達するまで冷却する必要がある。さらに、被測定材料のフェルミ準位が電子に占有されている必要があるため、被測定材料は金属に限られる。

## 【 0 0 0 9 】

このように従来のスピン偏極度を測定する方法は、被測定材料の材質及び測定温度に制約があり、例えば、半導体のスピン偏極度を室温下で測定するのは大変困難である。

## 【 課題を解決するための手段 】

## 【 0 0 1 0 】

本発明はこのような課題を解決するためになされたもので、被測定材料に非磁性導体が接合されて構成される素子の両端に電圧を印加して被測定材料から非磁性導体にスピン偏

50

極電流を注入し、非磁性導体におけるスピンの偏極電流の進行方向に平行な縦方向電圧、及びスピンの偏極電流の進行方向に垂直な横方向電圧を測定し、縦方向電圧をスピンの偏極電流の電流値で割った値からスピンの偏極電流の進行方向に沿う縦方向における非磁性導体の縦抵抗を測定し、横方向電圧をスピンの偏極電流の電流値で割った値からスピンの偏極電流の進行方向に直交する横方向における非磁性導体の横抵抗を測定し、測定した縦抵抗及び横抵抗から非磁性導体の横抵抗率の縦抵抗率に対する縦横抵抗率比を求め、縦横抵抗率比と非磁性導体におけるキャリアのスピンの偏極度とが、非磁性導体におけるキャリアの移動度とスピン軌道相互作用の強さとの積を比例係数とする比例関係にあることに基づいて、縦横抵抗率比から被測定材料のスピンの偏極度の相対値を評価するスピンの偏極度測定方法を構成した。

10

**【0011】**

本構成によれば、被測定材料から非磁性導体に注入したスピンの偏極電流の進行方向に対して平行及び垂直な縦方向電圧及び横方向電圧を測定し、測定した各電圧値を注入したスピンの偏極電流の電流値で割ることで、縦抵抗及び横抵抗の値を求めることが出来る。そして、測定した縦抵抗及び横抵抗から非磁性導体の縦横抵抗率比を求めることで、縦横抵抗率比と非磁性導体におけるキャリアのスピンの偏極度とが比例関係にあることに基づいて、縦横抵抗率比から被測定材料のスピンの偏極度の相対値を評価することが出来る。また、キャリアの走行状態に摂動を加えずにスピンの偏極度の評価を行うことが可能になる。

**【0012】**

このため、従来のスピンの偏極トンネリング効果を用いたスピンの偏極度測定方法のように被測定材料が強磁性体に限られることはなく、また、従来のアンドレーフ反射を利用したスピンの偏極度測定方法のように被測定材料が金属に限られることはなく、被測定材料は導電性を持ちさえすれば、非磁性導体の横抵抗と縦抵抗を測定するだけで、金属か半導体かに依らず、被測定材料におけるキャリアのスピンの偏極度を評価することが可能になる。しかも、従来のアンドレーフ反射を利用したスピンの偏極度測定方法のように、被測定材料全体を超伝導状態に達するまで冷却する必要もなく、任意の測定周囲温度で、キャリアのスピンの偏極度を評価することが可能になる。また、キャリアが2種類の強磁性層を通過する従来のスピンの偏極トンネリング効果を用いた測定方法とは異なり、測定中にキャリアのスピンの偏極度の値が変化しないことが保証される。さらに、大がかりなSTM技術を必要としないため、スピンの偏極度の測定を簡便に行ってその測定結果を論理ゲートのような新たな回路素子へ応用することが可能になる。

20

30

**【0013】**

また、本発明は、スピンの偏極度が0%のときの縦抵抗率の、スピンの偏極度が100%のときの縦抵抗率に対する比から1を減算した減算値で、或るスピンの偏極度における縦横抵抗率比の二乗値を割った値がそのスピンの偏極度の二乗値に等しい関係に基づいて、被測定材料のスピンの偏極度の絶対値を評価することを特徴とする。

**【0014】**

本構成によれば、非磁性導体の縦横抵抗率比に加えて、スピンの偏極度が0%および100%の電流を非磁性導体に注入したときの各縦抵抗率を測定することで、これら各特性値の予め導かれている上記関係に基づいて、被測定材料のスピンの偏極度の絶対値を評価することが出来る。このため、従来のスピンの偏極トンネリング効果を用いたスピンの偏極度測定方法のように、2種類の強磁性層のうち一方の強磁性層のスピンの偏極度を予め決定しておく必要もなく、簡易にスピンの偏極度の絶対値を評価することが出来る。

40

**【0017】**

また、本発明は、導電性を有する被測定材料に非磁性導体が接合されたメータ本体と、メータ本体の両端に電圧を印加して被測定材料から非磁性導体に注入されたスピンの偏極電流の進行方向に平行な縦方向電圧を測定する第1の電圧測定手段と、スピンの偏極電流の進行方向に垂直な横方向電圧を測定する第2の電圧測定手段とから構成され、第1の電圧測定手段で測定された縦方向電圧をスピンの偏極電流の電流値で割った値からスピンの偏極電流の進行方向に沿う縦方向における非磁性導体の縦抵抗を測定し、第2の電圧

50

測定手段で測定された横方向電圧をスピン偏極電流の電流値で割った値からスピン偏極電流の進行方向に直交する横方向における非磁性導体の横抵抗を測定し、測定した縦抵抗及び横抵抗から非磁性導体の横抵抗率の縦抵抗率に対する縦横抵抗率比を求め、スピン偏極度が0%のときの縦抵抗率の、スピン偏極度が100%のときの縦抵抗率に対する比から1を減算した減算値で、或るスピン偏極度における縦横抵抗率比の二乗値を割った値がそのスピン偏極度の二乗値に等しい関係に基づいて、縦横抵抗率比から非磁性導体のスピン偏極度の絶対値を評価するスピン偏極度測定メータを構成した。

【0018】

本構成によれば、メータ本体の両端に電圧を印加してメータ本体における被測定材料から非磁性導体にスピン偏極電流を注入し、注入したスピン偏極電流の進行方向に平行及び垂直な縦方向及び横方向電圧を第1及び第2の電圧測定手段で測定することで、縦抵抗及び横抵抗の値を求めることが出来る。このため、キャリアの走行状態に摂動を加えずにスピン偏極度の評価を簡便に行うことが可能なスピン偏極度測定メータが提供される。

【0019】

また、本発明は、  
導電性を有する第1の導電材料に第1の非磁性導体が接合された第1のメータ本体、第1のメータ本体の両端に電圧を印加して第1の導電材料から第1の非磁性導体に注入された第1のスピン偏極電流の進行方向に平行な縦方向電圧を測定する第1の電圧測定手段、及び、第1のスピン偏極電流の進行方向に垂直な横方向電圧を測定する第2の電圧測定手段から構成される第1のスピン偏極度測定メータと、

導電性を有する第2の導電材料に第2の非磁性導体が接合された第2のメータ本体、第2のメータ本体の両端に電圧を印加して第2の導電材料から第2の非磁性導体に注入された第2のスピン偏極電流の進行方向に平行な縦方向電圧を測定する第3の電圧測定手段、及び、第2のスピン偏極電流の進行方向に垂直な横方向電圧を測定する第4の電圧測定手段から構成される第2のスピン偏極度測定メータと、

第1のスピン偏極電流が流出する第1の非磁性導体の端部及び第2のスピン偏極電流が流出する第2の非磁性導体の端部が一端部に接合された、またはこれらの接合部分を無くして第1の非磁性導体及び第2の非磁性導体と一体成形された第3の非磁性導体からなる第3のメータ本体、第1の非磁性導体及び第2の非磁性導体から第3の非磁性導体に流入する第1のスピン偏極電流及び第2のスピン偏極電流が合成して形成される第3のスピン偏極電流の進行方向に平行な縦方向電圧を測定する第5の電圧測定手段、及び、第3のスピン偏極電流の進行方向に垂直な横方向電圧を測定する第6の電圧測定手段から構成される第3のスピン偏極度測定メータと

を備えて構成され、

第1のスピン偏極電流のキャリアのスピン偏極度及び第2のスピン偏極電流のキャリアのスピン偏極度を入力値、第3のスピン偏極電流のキャリアのスピン偏極度を出力値とする論理演算ゲートを構成した。

【0020】

本構成によれば、第1のメータ本体及び第2のメータ本体にそれぞれスピン偏極度が100%の第1のスピン偏極電流及び第2のスピン偏極電流を注入すると、第3のメータ本体にはスピン偏極度が100%の第3のスピン偏極電流が流れる。また、第1のメータ本体及び第2のメータ本体にそれぞれスピン偏極度が100%の第1のスピン偏極電流及びスピン偏極度が-100%の第2のスピン偏極電流を注入すると、第3のメータ本体にはスピン偏極度が0%の第3のスピン偏極電流が流れる。また、第1のメータ本体及び第2のメータ本体にそれぞれスピン偏極度が-100%の第1のスピン偏極電流及びスピン偏極度が100%の第2のスピン偏極電流を注入すると、第3のメータ本体にはスピン偏極度が0%の第3のスピン偏極電流が流れる。また、第1のメータ本体及び第2のメータ本体にそれぞれスピン偏極度が-100%の第1のスピン偏極電流及び第2のスピン偏極電流を注入すると、第3のメータ本体にはスピン偏極度が-100%の第3のスピン偏極電流が流れる。

## 【0021】

このため、第1のスピンの偏極電流のキャリアのスピンの偏極度及び第2のスピンの偏極電流のキャリアのスピンの偏極度を入力値、第3のスピンの偏極電流のキャリアのスピンの偏極度を出力値とすると、出力値及び一方の入力値が分かると、他方の入力値が一義的に推測される。ここで、各入力値及び出力値は、第1～第3の各メータ本体を流れる第1～第3の各スピンの偏極電流の進行方向に平行な縦方向電圧及びこれに垂直な横方向電圧を第1～第6の各電圧測定手段で測定し、縦抵抗及び横抵抗を求めてスピンの偏極度を算出することで、得られる。出力値及び一方の入力値から他方の入力値が一義的に推測されるこのような論理関係は、排他的論理和の論理演算ゲートにおける入力値及び出力値の論理関係に類似する。従って、本構成により擬似排他的な論理和を演算する擬似排他的論理演算ゲートが提供される。

10

## 【0022】

また、本発明は、第1のメータ本体及び第2のメータ本体の一方に送信信号列、他方に乱数列を入力して第3のメータ本体から出力される信号列を暗号列として送信し、上記の論理演算ゲートの演算論理に基づいて乱数列と受信した暗号列とから送信信号列を復号する、上記の論理演算ゲートを用いた信号暗号化及び復号化方法を構成した。

## 【0023】

本構成によれば、第1のメータ本体に入力される送信信号列と第2のメータ本体に入力される乱数列とは、上記の論理演算ゲートによって上述した擬似排他的な論理和がとられ、その論理演算結果が暗号列として第3のメータ本体から出力され、送信される。上記の論理演算ゲートは、出力値である暗号列及び一方の入力値である乱数列から他方の入力値である入力信号列が一義的に推測されるので、受信側では、乱数列と受信した暗号列とから、上記の論理演算ゲートの演算論理に基づいて、送信した信号列を復号化することが出来る。

20

## 【0024】

このため、上記の論理演算ゲートを用いることで、送信信号列を暗号列に暗号化することが出来、暗号列を送信信号列に復号化することが出来る新たな信号暗号化及び復号化方法が提供される。

## 【発明の効果】

## 【0025】

本発明によれば、上記のように、被測定材料の材質及び測定温度に制約を受けることなく、被測定材料におけるキャリアのスピンの偏極度を簡便に測定することが出来るスピンの偏極度測定方法、及びスピンの偏極度測定メータが提供される。このため、例えば、半導体のスピンの偏極度を室温下で測定することが可能になる。また、このスピンの偏極度測定メータを用いることで、擬似排他的な論理和を演算する論理演算ゲートが提供され、さらに、この論理演算ゲートを用いることで、新たな信号暗号化及び復号化方法が提供される。

30

## 【図面の簡単な説明】

## 【0026】

【図1】(a)は、伝導電子のスピンの偏極度  $P_s$  が100%のときにおける既知の異常ホール効果、(b)は、スピンの偏極度  $P_s$  が0%のときにおける既知の異常ホール効果(スピンのホール効果)を説明するための図である。

40

【図2】本発明の一実施の形態によるスピンの偏極度測定方法の原理に用いられている、スピンの偏極度測定メータのチャンネル領域における縦抵抗  $R_{xx}$  と横抵抗  $R_{yx}$  がともにキャリアのスピンの偏極度  $P_s$  に依存する関係を説明するための表図である。

【図3】本発明の一実施の形態によるスピンの偏極度測定メータの概略構成を示す斜視図である。

【図4】(a)は、図3に示すスピンの偏極度測定メータの較正に用いられる較正器の概略構成を示す斜視図、(b)はこの較正器で得られた較正グラフである。

【図5】図3に示すスピンの偏極度測定メータを用いた本発明の一実施の形態による演算論理ゲートの概略構成を示す斜視図である。

50

【図6】(a)は図5に示す擬似XOR演算論理ゲートの真理値表、(b)は一般的なXOR演算論理ゲートの真理値表を示す表図である。

【図7】一般的なXOR演算論理ゲートをバイポーラ・トランジスタで構成した一例の回路図である。

【図8】図5に示す演算論理ゲートを用いた本発明の一実施の形態による信号暗号化及び復号化方法における送信側及び受信側の各信号列の関係を示す図である。

【発明を実施するための形態】

【0027】

次に、被測定材料におけるキャリアのスピンの偏極度を測定する本発明によるスピン偏極度測定方法の一実施の形態について説明する。

10

【0028】

本実施の形態によるスピン偏極度測定方法は、次の(1)式に表される原理に基づいている。

【数1】

$$\frac{\rho_{yx}}{\rho_{xx}} = -\mu S P_s \quad \dots (1)$$

【0029】

20

ここで、 $\rho_{xx}$ は、導電性を有する被測定材料に接合された非磁性チャネル領域に注入されたスピン偏極電流進行方向に沿う縦方向におけるチャネル領域の縦抵抗率、 $\rho_{yx}$ は、電流進行方向に直交する横方向におけるチャネル領域の横抵抗率である。また、 $\mu$ はキャリアである伝導電子の移動度であり、電子の電荷量及び質量をそれぞれ $q$ 及び $m$ 、電子の散乱緩和時間を $\tau$ とすると、 $\mu = q\tau/m$ と表される。また、 $S$ はスピン軌道相互作用の強さ、 $P_s$ はスピン偏極度である。スピン偏極度 $P_s$ は、次の(2)式によって定義される。

【数2】

$$P_s = \frac{n_\alpha - n_\beta}{n_\alpha + n_\beta} \quad \dots (2)$$

30

【0030】

ここで、 $n_\alpha$ はチャネル領域におけるスピナップ電子の電子密度、 $n_\beta$ はスピンドOWN電子の電子密度である。

【0031】

上記の(1)式は、横抵抗率 $\rho_{yx}$ の縦抵抗率 $\rho_{xx}$ に対する縦横抵抗率比 $\rho_{yx}/\rho_{xx}$ とチャネル領域におけるキャリアのスピンの偏極度 $P_s$ とが、チャネル領域におけるキャリアの移動度 $\mu$ とスピン軌道相互作用の強さ $S$ との積 $\mu S$ を比例係数とする比例関係にあることを表している。ここで、積 $\mu S$ はスピン偏極度 $P_s$ の検出感度を与える。

40

【0032】

本実施の形態によるスピン偏極度測定方法では、上記の縦抵抗率 $\rho_{xx}$ 及び横抵抗率 $\rho_{yx}$ を測定する。そして、測定した横抵抗率 $\rho_{yx}$ の縦抵抗率 $\rho_{xx}$ に対する縦横抵抗率比 $\rho_{yx}/\rho_{xx}$ とスピン偏極度 $P_s$ とが(1)式で表される比例関係にある上述の原理に基づいて、被測定材料におけるスピン偏極度 $P_s$ の相対値を評価する。移動度 $\mu$ とスピン軌道相互作用の強さ $S$ とはスピン偏極度 $P_s$ に依存しない量であるため、このようなスピン偏極度 $P_s$ の相対値測定が可能になっている。

【0033】

ここで(1)式が成立する理由を直感的方法にもとづいて説明する。図1(a)に示す

50

ように、 $z$ 方向のスピンの磁気モーメント $m$ を有する伝導電子1のスピンの偏極度 $P_s$ を100%にして、つまり、全ての伝導電子1のスピンをアップにして、チャンネル領域に $x$ 方向にバイアス電流 $I$ を流すとき、伝導電子1の軌道はスピン軌道相互作用による力 $f_{SOI}$ によって同一の $-y$ 方向に反れる。このため、チャンネル領域の内部に電荷の偏りが生じ、異常ホール効果によってホール電場 $E_H$ が発生して、伝導電子1にはホール電気力 $f_{Hall}$ が $y$ 方向に作用する。定常状態では、伝導電子1に作用するホール電気力 $f_{Hall}$ とスピン軌道相互作用力 $f_{SOI}$ とが釣り合う。従って、伝導電子1にスピン軌道相互作用が作用しても、伝導電子1の直進性を妨げる要因は実質的に消失し、伝導電子1のドリフト速度はバイアス電流 $I$ の進行方向の縦成分のみが残る。このことは、縦抵抗率 $\rho_{xx}$ がスピン軌道相互作用に影響されないことを意味する。

10

## 【0034】

一方、図1(b)に示すように、伝導電子1のスピンの偏極度 $P_s$ を0%にして、チャンネル領域に $x$ 方向にバイアス電流 $I$ を流すとき、チャンネル領域の内部に電荷の偏りは生じない。このとき、 $z$ 方向のスピンの磁気モーメント $m$ を有するスピンアップした伝導電子1と、 $-z$ 方向のスピンの磁気モーメント $-m$ を有するスピンドアウンした伝導電子1の各電子密度は等しい。電荷の偏りを生じないのは、スピン軌道相互作用による伝導電子1の軌道偏向の向きが、スピンアップした伝導電子1に対しては $-y$ 方向に力 $f_{SOI}$ が作用し、スピンドアウンした伝導電子1に対しては $y$ 方向の逆向きに力 $f_{SOI}$ が作用するからである。このため、伝導電子1のスピンの偏極度 $P_s$ が0%のときは100%のときのようにホール電場 $E_H$ は発生せず、ホール抵抗である横抵抗率 $\rho_{yx}$ はゼロである。従って、定常状態でもスピン軌道相互作用の影響が残り、縦抵抗率 $\rho_{xx}$ はスピンの偏極度 $P_s$ が100%のときよりも大きい。

20

## 【0035】

以上のことから、縦抵抗率 $\rho_{xx}$ と横抵抗率 $\rho_{yx}$ はともにキャリアのスピンの偏極度 $P_s$ に依存し、図2に示すように、横抵抗率 $\rho_{yx}$ は、スピンの偏極度 $P_s$ が100%のときに最大値、スピンの偏極度 $P_s$ が0%のときに最小のゼロ、縦抵抗率 $\rho_{xx}$ は、スピンの偏極度 $P_s$ が100%のときに最小値、スピンの偏極度 $P_s$ が0%のときに最大値を示すことが容易に推定できる。従って、横抵抗率 $\rho_{yx}$ の縦抵抗率 $\rho_{xx}$ に対する縦横抵抗率比 $\rho_{yx}/\rho_{xx}$ はスピンの偏極度 $P_s$ に敏感であることが理解され、この縦横抵抗率比 $\rho_{yx}/\rho_{xx}$ からスピンの偏極度 $P_s$ を正確に評価できることが予測される。

30

## 【0036】

このたび、発明者は、スピン2流体モデル(A.Fert and I.A. Campbell, Phys. Rev. Lett. 14 (1968) 1190)を使う微視的なモデルに依存しない現象論によって、縦抵抗率 $\rho_{xx}$ 及び横抵抗率 $\rho_{yx}$ に対するスピンの偏極度 $P_s$ の影響を解析的に計算することにより、任意のスピンの偏極度 $P_s$ における縦抵抗率 $\rho_{xx}$ と横抵抗率 $\rho_{yx}$ との比の表式を(1)式のように定量的に求めることに成功した。

## 【0037】

すなわち、横方向と縦方向でキャリアの同じ散乱過程が同時に存在する場合には、摩擦項がテンソル形式で表現できるので、ドルーデの式は電界 $E$ 及び磁界 $B$ の存在のもとで次の(3)式のように変形出来る。

40

## 【数3】

$$m \frac{d\mathbf{v}}{dt} = q\mathbf{E} + q\mathbf{v} \times \mathbf{B} - q\mathbf{S}\mathbf{v} \quad \cdots (3)$$

## 【0038】

ここで、 $m$ 及び $q$ はキャリアの質量及び電荷量、 $\mathbf{v}$ はキャリアのドリフト速度である。また、 $\mathbf{S}$ はテンソル量で、 $\mathbf{S}$ を縦方向のキャリアの散乱緩和時間とすると、 $\mathbf{S}$ は次の(4)式によって定義される。



【数4】

$$S = \begin{pmatrix} \frac{m}{q \tau_{\parallel}} & S & 0 \\ -S & \frac{m}{q \tau_{\parallel}} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{m}{q \tau_{\parallel}} \end{pmatrix} \quad \dots (4)$$

10

【0039】

定常状態では  $d v / d t = 0$  であり、また、磁界  $B$  が  $z$  方向に平行とすると、スピナップした電子の電気伝導度、及びスピндаウンした電子の電気伝導度は、それぞれ次の(5)式及び(6)式のように表される。

【数5】

$$\sigma_{\alpha} = \frac{q n_{\alpha} \mu}{1 + \mu^2 (B - S)^2} \begin{pmatrix} 1 & \mu(B - S) & 0 \\ -\mu(B - S) & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 + \mu^2 (B - S)^2 \end{pmatrix} \quad \dots (5)$$

20

【数6】

$$\sigma_{\beta} = \frac{q n_{\beta} \mu}{1 + \mu^2 (B + S)^2} \begin{pmatrix} 1 & \mu(B + S) & 0 \\ -\mu(B + S) & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 + \mu^2 (B + S)^2 \end{pmatrix} \quad \dots (6)$$

30

【0040】

また、全体の電気伝導度は次の(7)式に表される。

【数7】

$$\sigma = \sigma_{\alpha} + \sigma_{\beta} \quad \dots (7)$$

【0041】

また、一般に、縦抵抗率  $\rho_{xx}$  及び横抵抗率  $\rho_{yx}$  は電気伝導度の各テンソル成分を用いてそれぞれ次の(8)式及び(9)式に表される。

【数8】

$$\rho_{xx} = \frac{\sigma_{xx}}{\sigma_{xx}^2 + \sigma_{xy}^2} \quad \dots (8)$$

40

【数 9】

$$\rho_{yx} = \frac{\sigma_{xy}}{\sigma_{xx}^2 + \sigma_{xy}^2} \quad \dots (9)$$

【0042】

このため、(8)式及び(9)式における  $\sigma_{xx}$  及び  $\sigma_{xy}$  は、(5)式、(6)式、及び(7)式から、それぞれ次の(10)式及び(11)式のように表される。

【数 10】

10

$$\sigma_{xx} = \frac{qn_{\alpha}\mu}{1 + \mu^2(B-S)^2} + \frac{qn_{\beta}\mu}{1 + \mu^2(B+S)^2} \quad \dots (10)$$

【数 11】

$$\sigma_{xy} = \frac{qn_{\alpha}\mu^2(B-S)}{1 + \mu^2(B-S)^2} + \frac{qn_{\beta}\mu^2(B+S)}{1 + \mu^2(B+S)^2} \quad \dots (11)$$

20

【0043】

この結果、縦抵抗率  $\sigma_{xx}$  及び横抵抗率  $\sigma_{yx}$  は、平静時の電気伝導度  $\sigma_{\alpha,0} = n_{\alpha}q^2/m_{\alpha} = qn_{\alpha}\mu$ 、 $\sigma_{\beta,0} = n_{\beta}q^2/m_{\beta} = qn_{\beta}\mu$  とすると、それぞれ次の(12)式及び(13)式に表される。

【数 12】

$$\rho_{xx} = \frac{1}{\sigma_{\alpha,0} + \sigma_{\beta,0}} \frac{1 + \mu^2 B^2 + \mu^2 S^2 + 2\mu^2 SBPS}{1 + (\mu B + \mu SP_S)^2} \quad \dots (12)$$

30

【数 13】

$$\rho_{yx} = \frac{1}{\sigma_{\alpha,0} + \sigma_{\beta,0}} \left[ \frac{1 + \mu^2 B^2 - \mu^2 S^2}{1 + (\mu B + \mu SP_S)^2} \mu B - \frac{1 - \mu^2 B^2 + \mu^2 S^2}{1 + (\mu B + \mu SP_S)^2} \mu SP_S \right] \quad \dots (13)$$

40

【0044】

ここで、本実施の形態のspin偏極度測定方法では、磁界Bを印加せず、 $B = 0$ なので、(12)式及び(13)式中のBを0とすると、縦抵抗率  $\sigma_{xx}$  及び横抵抗率  $\sigma_{yx}$  はそれぞれ次の(14)式及び(15)式に表される。

【数14】

$$\rho_{xx} = \frac{1}{\sigma_{\alpha,0} + \sigma_{\beta,0}} \frac{1 + \mu^2 S^2}{1 + \mu^2 S^2 P_S^2} \quad \dots (14)$$

【数15】

$$\rho_{yx} = - \frac{1}{\sigma_{\alpha,0} + \sigma_{\beta,0}} \left( \frac{1 + \mu^2 S^2}{1 + \mu^2 S^2 P_S^2} \mu S P_S \right) \quad \dots (15) \quad 10$$

【0045】

前述した(1)式は、上記の(15)式を(14)式で割ることで導かれ、(1)式で表される原理によってスピン偏極度  $P_S$  の相対値測定が前述したように可能になっている。

【0046】

また、スピン偏極度  $P_S$  が0%のときの縦抵抗率  $\rho_{xx} (P_S = 0)$  は、(12)式中の  $P_S = 0$  と置くことで、次の(16)式で表される。

【数16】

$$\rho_{xx} (P_S = 0) = \frac{1}{\sigma_{\alpha,0} + \sigma_{\beta,0}} \frac{1 + \mu^2 S^2}{1} \quad \dots (16) \quad 20$$

【0047】

また、スピン偏極度  $P_S$  が100%のときの縦抵抗率  $\rho_{xx} (P_S = 1)$  は、(12)式中の  $P_S = 1$  と置くことで、次の(17)式で表される。

【数17】

$$\rho_{xx} (P_S = 1) = \frac{1}{\sigma_{\alpha,0} + \sigma_{\beta,0}} \quad \dots (17) \quad 30$$

【0048】

従って、(14)式から以下の(18)式を次のように導くことが出来る。

【数18】

$$\begin{aligned} \rho_{xx} &= \frac{1}{\sigma_{\alpha,0} + \sigma_{\beta,0}} \frac{1 + \mu^2 S^2}{1 + \mu^2 S^2 P_S^2} \\ &= \frac{\rho_{xx}(P_S=0)}{1 + \mu^2 S^2 P_S^2} = \rho_{xx}(P_S=1) \frac{1 + \mu^2 S^2}{1 + \mu^2 S^2 P_S^2} \end{aligned}$$

10

$$\therefore \rho_{xx}(P_S=0) = \rho_{xx}(P_S=1) (1 + \mu^2 S^2)$$

$$\therefore (\mu S)^2 = \frac{\rho_{xx}(P_S=0)}{\rho_{xx}(P_S=1)} - 1 \quad \dots (18)$$

【0049】

また、(1)式から次の(19)式が導かれる。

【数19】

20

$$(P_S)^2 = \frac{1}{(\mu S)^2} \left( \frac{\rho_{yx}}{\rho_{xx}} \right)^2 \quad \dots (19)$$

【0050】

このため、上記の(19)式に(18)式を代入すると、次の(20)式が得られる。

【数20】

30

$$(P_S)^2 = \left( \frac{\rho_{xx}(P_S=0)}{\rho_{xx}(P_S=1)} - 1 \right)^{-1} \left( \frac{\rho_{yx}}{\rho_{xx}} \right)^2 \quad \dots (20)$$

【0051】

この(20)式は、スピン偏極度  $P_s$  が0%のときの縦抵抗率  $\rho_{xx}(P_s=0)$  の、スピン偏極度  $P_s$  が100%のときの縦抵抗率  $\rho_{xx}(P_s=1)$  に対する比から1を減算した減算値で、或るスピン偏極度  $P_s$  における縦横抵抗率比  $\rho_{yx} / \rho_{xx}$  の二乗値を割った値が、そのスピン偏極度  $P_s$  の二乗値に等しい関係にあることを、表す。本実施の形態のスピン偏極度測定方法では、この関係に基づいて、被測定材料のスピン偏極度  $P_s$  の絶対値を評価する。

40

【0052】

スピン偏極度  $P_s$  が0%の電流を非磁性チャネル領域に注入したときの縦抵抗率  $\rho_{xx}(P_s=0)$  は実測可能であり、スピン偏極度  $P_s$  が100%のときの電流を非磁性チャネル領域に注入した縦抵抗率  $\rho_{xx}(P_s=1)$  も原理的に評価可能である。従って、或るスピン偏極度  $P_s$  における縦横抵抗率比  $\rho_{yx} / \rho_{xx}$  とそのスピン偏極度  $P_s$  との比例係数である積  $\mu S$  は、スピン偏極度  $P_s$  が0%及び100%のときの縦抵抗率  $\rho_{xx}(P_s=0)$  及び  $\rho_{xx}(P_s=1)$  から原理上実測できることが理解される。この結果、縦横抵抗率比  $\rho_{yx} / \rho_{xx}$ 、縦抵抗率  $\rho_{xx}(P_s=0)$ 、及び縦抵抗率  $\rho_{xx}(P_s=1)$  の3種類の測定値を(20)式に代入することで、上記のように、スピン偏極

50

度  $P_s$  の絶対値を評価することが出来る。

【 0 0 5 3 】

縦横抵抗率比  $\rho_{yx} / \rho_{xx}$  は、例えば、図 3 に示すように、被測定材料 2 に非磁性導体 3 を接合した素子の両端に電圧を印加して電流  $I$  を流し、被測定材料 2 から非磁性導体 3 にスピン偏極電流  $I_{spin}$  を注入して、測定する。このとき、非磁性導体 3 のチャンネル領域におけるスピン偏極電流  $I_{spin}$  の進行方向に平行な縦方向電界  $E_x$  及びこれに垂直な横方向電界  $E_y$  は、スピン偏極電流  $I_{spin}$  の縦方向電流密度を  $i_x$ 、横方向電流密度を  $i_y$  とすると、次の (21) 式で表される。

【数 2 1】

$$\left. \begin{aligned} E_x &= \rho_{xx} i_x + \rho_{xy} i_y \\ E_y &= \rho_{yx} i_x + \rho_{yy} i_y \end{aligned} \right\} \dots (21)$$

10

【 0 0 5 4 】

この (21) 式で横方向電流密度  $i_y$  を 0 ( $i_y = 0$ ) とすると、縦抵抗率  $\rho_{xx}$  及び横抵抗率  $\rho_{yx}$  はそれぞれ次の (22) 式に表される。

【数 2 2】

$$\left. \begin{aligned} \rho_{xx} &= \frac{E_x (i_y = 0)}{i_x} \\ \rho_{yx} &= \frac{E_y (i_y = 0)}{i_x} \end{aligned} \right\} \dots (22)$$

20

【 0 0 5 5 】

このため、非磁性導体 3 におけるスピン偏極電流  $I_{spin}$  の進行方向に平行な縦方向電圧  $V_x$  を電圧計  $V_1$  で測定し、縦方向電圧  $V_x$  を縦方向電流  $I_x$  の電流値で割った値を非磁性導体 3 の縦抵抗  $R$  とする。また、スピン偏極電流  $I_{spin}$  の進行方向に垂直な横方向電圧  $V_y$  を電圧計  $V_2$  で測定し、横方向電圧  $V_y$  を縦方向電流  $I_x$  の電流値で割った値を非磁性導体 3 の横抵抗  $R$  とする。そして、横抵抗  $R$  を縦抵抗  $R$  で割った値に、非磁性導体 3 の幅  $W$  を乗じて、非磁性導体 3 の長さ  $L$  で割ることで、縦横抵抗率比  $\rho_{yx} / \rho_{xx}$  が得られる。

30

【 0 0 5 6 】

このような本実施の形態のスピン偏極度測定方法によれば、導電性を有する被測定材料 2 に接合された非磁性導体 3 のチャンネル領域を流れるスピン偏極電流の進行方向に沿う縦方向の縦抵抗率  $\rho_{xx}$ 、及びこれに直交する横方向の横抵抗率  $\rho_{yx}$  を測定することで、測定した横抵抗率  $\rho_{yx}$  の縦抵抗率  $\rho_{xx}$  に対する縦横抵抗率比  $\rho_{yx} / \rho_{xx}$  と非磁性導体 3 におけるキャリアのスピン偏極度  $P_s$  とが比例関係にあることに基づいて、縦横抵抗率比  $\rho_{yx} / \rho_{xx}$  から被測定材料 2 のスピン偏極度  $P_s$  の相対値を評価することが出来る。

40

【 0 0 5 7 】

このときの比例係数は、被測定材料 2 とチャンネル領域の測定点までの距離が有限なため (1) 式における積  $\mu S$  より小さくなるが、チャンネル領域の材料を変えない限り同じである。つまり、チャンネル領域で観測される縦横抵抗率比  $\rho_{yx} / \rho_{xx}$  は、被測定材料 2 の材料のみに依存するので、被測定材料 2 のスピン偏極度  $P_s$  が相対測定できる。例えば、被測定材料 2 Y についての縦横抵抗率比  $\rho_{yx} / \rho_{xx}$  が  $a$ 、被測定材料 2 Z につ

50

いての縦横抵抗率比  $\rho_{yx} / \rho_{xx}$  が  $b$  として得られた場合、 $a$  と  $b$  は一般に異なる値を示すが、その違いはそれぞれの被測定材料 2 Y、2 Z のスピン偏極度  $P_s$  の違いだけに由来するので、被測定材料 2 Y、2 Z のスピン偏極度  $P_s$  が相対測定できる。

【0058】

このため、従来のスピン偏極トンネリング効果を用いたスピン偏極度測定方法のように被測定材料 2 が強磁性体に限られることはなく、また、従来のアンドレーフ反射を利用したスピン偏極度測定方法のように被測定材料 2 が金属に限られることはなく、被測定材料 2 は導電性を持ちさえすれば、被測定材料 2 に接合された非磁性導体 3 のチャンネル領域の横抵抗率  $\rho_{yx}$  と縦抵抗率  $\rho_{xx}$  を測定するだけで、金属か半導体かに依らず、被測定材料 2 のスピン偏極度  $P_s$  を評価することが可能になる。しかも、従来のアンドレーフ反射を利用したスピン偏極度測定方法のように、被測定材料全体を超伝導状態に達するまで冷却する必要もなく、任意の測定周囲温度で、キャリアのスピン偏極度  $P_s$  を評価することが可能になる。また、キャリアが 2 種類の強磁性層を通過する従来のスピン偏極トンネリング効果を用いた測定方法と異なり、測定中にキャリアのスピン偏極度  $P_s$  の値が変化しないことが保証される。さらに、大がかりな STM 技術を必要とせず、普通の電流測定と同様な手軽さでスピン偏極度  $P_s$  を測定することが出来るため、スピン偏極度  $P_s$  の測定を簡便に行ってその測定結果を後述する論理ゲートのような新たな回路素子へ応用することが可能になる。

【0059】

また、本実施の形態のスピン偏極度測定方法によれば、チャンネル領域の縦横抵抗率比  $\rho_{yx} / \rho_{xx}$  に加えて、スピン偏極度  $P_s$  が 0% 及び 100% の電流を非磁性チャンネル領域に注入したときの各縦抵抗率  $\rho_{xx}$  ( $P_s = 0$ ) 及び  $\rho_{xx}$  ( $P_s = 1$ ) を測定することで、これら各特性値の予め導かれている (20) 式の関係に基づいて、チャンネル領域のスピン偏極度  $P_s$  の絶対値、ひいては後述する方法によって被測定材料 2 のスピン偏極度の絶対値を評価することが出来る。このため、従来のスピン偏極トンネリング効果を用いたスピン偏極度測定方法のように、2 種類の強磁性層のうち一方の強磁性層のスピン偏極度  $P_s$  を予め決定しておく必要もなく、簡易にスピン偏極度  $P_s$  の絶対値を評価することが出来る。

【0060】

また、本実施の形態のスピン偏極度測定方法によれば、被測定材料 2 から非磁性導体 3 に注入したスピン偏極電流  $I_{spin}$  の進行方向に対して平行及び垂直な縦方向電圧  $V_x$  及び横方向電圧  $V_y$  を測定し、測定した各電圧  $V_x$ 、 $V_y$  の値を注入したスピン偏極電流  $I_{spin}$  の縦方向電流  $I_x$  の電流値で割ることで、縦抵抗  $R$  及び横抵抗  $R$  の値を求めることが出来る。このため、キャリアの走行状態に摂動を加えずにスピン偏極度  $P_s$  の評価を行うことが可能になる。

【0061】

次に、被測定材料におけるキャリアのスピン偏極度  $P_s$  を測定する本発明によるスピン偏極度測定メータの一実施の形態について説明する。

【0062】

上記の図 3 は、この一実施の形態によるスピン偏極度測定メータ 11 の構成の概略斜視図である。

【0063】

スピン偏極度測定メータ 11 は、導電性を有する被測定材料 2 に非磁性導体 3 が接合されたメータ本体 12 から構成される。スピン偏極度  $P_s$  の測定対象である被測定材料 2 はスピン偏極源として用いられる。また、非磁性導体 3 としては Pt、Pd などの非磁性金属が用いられ、その長さ  $L_a$  はスピン自然拡散長よりも短く設定される。上述したように、積  $\mu S$  はスピン偏極度  $P_s$  の検出感度を与えるため、スピン偏極度  $P_s$  の測定における検出感度を上げるには、高いキャリア移動度  $\mu$  とスピン軌道相互作用の強さ  $S$  が大きな材料の非磁性導体 3 を用いると、有効である。また、スピン偏極度測定メータ 11 は、第 1 の電圧測定手段として電圧計  $V_1$ 、第 2 の電圧測定手段として電圧計  $V_2$  を備える。

## 【 0 0 6 4 】

スピン偏極度測定メータ 1 1 の両端に電圧を印加すると、被測定材料 2 から非磁性導体 3 にスピン偏極電流  $I_{spin}$  が注入される。電圧計  $V_1$  は、被測定材料 2 から距離  $L_a$  離れた地点における非磁性導体 3 の、スピン偏極電流  $I_{spin}$  の進行方向に平行な縦方向電圧  $V_x$  を測定する。また、電圧計  $V_2$  は、非磁性導体 3 の、スピン偏極電流  $I_{spin}$  の進行方向に垂直な横方向電圧  $V_y$  を測定する。測定した縦方向電圧  $V_x$  及び横方向電圧  $V_y$  をスピン偏極電流  $I_{spin}$  の縦方向電流  $I_x$  でそれぞれ割った値を被測定材料 2 に接続した非磁性チャンネル領域の縦抵抗  $R$  及び横抵抗  $R$  とし、横抵抗  $R$  を縦抵抗  $R$  で割った値に、非磁性導体 3 の幅  $W$  を乗じて、非磁性導体 3 の長さ  $L_a$  で割ることで、縦横抵抗率比  $y_x / x_x$  を求める。そして、求めた縦横抵抗率比  $y_x / x_x$ 、並びに非磁性導体 3 にスピン偏極度  $P_s$  が 0 % 及び 1 0 0 % の電流を注入したときの各縦抵抗率  $x_x (P_s = 0)$  及び  $x_x (P_s = 1)$  の値を ( 2 0 ) 式に代入することで、被測定材料 2 から距離  $L_a$  離れた地点における非磁性導体 3 のスピン偏極度  $P_s$  の絶対値を算出することが出来る。

10

## 【 0 0 6 5 】

ここで、スピン偏極度 0 % の電流を非磁性導体 3 に注入するためには、被測定材料 2 の代わりに、非磁性導体 3 と同じ材料を使い、スピン偏極度 1 0 0 % の電流を非磁性導体 3 に注入するためには、被測定材料 2 の代わりに、ホイスラー合金 ( ハーフメタル ) を用いる。

## 【 0 0 6 6 】

被測定材料 2 のスピン偏極度  $P'_s$  は、スピン偏極度測定メータ 1 1 を用いて上記のように得られた非磁性チャンネル領域のスピン偏極度  $P_s$  が図 4 ( a ) に示す較正器 2 1 を用いて較正されることで、求められる。較正器 2 1 は、被測定材料 2 に相当するスピン偏極源 2 a として、スピン偏極度  $P_s$  が 1 0 0 % の材料、例えば、ホイスラー合金 ( ハーフメタル ) が使われる。また、非磁性導体 3 に相当する試料 3 a は、非磁性導体 3 に用いられる材料からなり、同図に示すような、長さ  $L_a$  よりも充分大きな長さ  $L_b$  を有する。

20

## 【 0 0 6 7 】

この構成の較正器 2 1 において、較正器 2 1 の両端に電圧を印加して電流  $I$  を流し、ソース電極としてのスピン偏極源 2 a から試料 3 a にスピン偏極電流  $I_{spin}$  を注入する。そして、そのときの試料 3 a の各長さ  $L_x$ 、つまり、スピン偏極源 2 a からの各距離  $L_x$  における縦方向電圧  $V_x$  を各電圧計  $V_{1a}$ 、 $V_{1b}$  及び  $V_{1c}$  によって測定し、横方向電圧  $V_y$  を各電圧計  $V_{2a}$ 、 $V_{2b}$  及び  $V_{2c}$  によって測定することで、試料 3 a の各長さ  $L_x$  における縦抵抗  $R$  及び横抵抗  $R$  の各値を測定する。

30

## 【 0 0 6 8 】

そして、この測定で得られた縦抵抗  $R$  及び横抵抗  $R$  の各値から、チャンネル幅と長さに考慮して各距離  $L_x$  における縦横抵抗率比  $y_x / x_x$  を求める。さらに、求めた縦横抵抗率比  $y_x / x_x$ 、並びに、既に得られているスピン偏極度  $P_s$  が 0 % および 1 0 0 % のときの試料 3 a の各縦抵抗率  $x_x (P_s = 0)$  及び  $x_x (P_s = 1)$  の値を ( 2 0 ) 式に代入し、各距離  $L_x$  における試料 3 a のスピン偏極度  $P_s$  を算出する。同図 ( b ) は、この算出結果をグラフに表したものである。同グラフの横軸はスピン偏極源 2 a からの距離  $L_x$ 、縦軸はスピン偏極度  $P_s$  を表す。同グラフに示されるように、スピン偏極度  $P_s$  は、スピン偏極源 2 a から離れるのに従って漸減するパターンのカーブ特性を有する。図 3 に示すスピン偏極度測定メータ 1 1 に用いられる非磁性導体 3 の長さ  $L_a$  は、自然対数の底を  $e$  とすると、スピン偏極度  $P_s$  が  $1/e$  ( = 約  $1/2.7$  ) に低減する距離、つまり、スピン自然拡散長よりも短く設定される (  $L_a < \text{スピン自然拡散長}$  )。

40

## 【 0 0 6 9 】

図 3 に示すスピン偏極度測定メータ 1 1 では、被測定材料 2 から距離  $L_a$  離れた地点における非磁性導体 3 のスピン偏極度  $P'_s (L_a)$  を得ることが出来るが、上記較正器 2 1 で得た結果を使うことで、スピン偏極度測定メータ 1 1 で得たスピン偏極度  $P'_s (L$

50

a) から、被測定材料 2 からの距離 0 におけるスピン偏極度  $P_s$ 、つまり、被測定材料 2 のスピン偏極度  $P'_s(0)$  を得ることが出来る。すなわち、上記較正器 21 で得た距離  $L_a$  におけるスピン偏極度  $P_s(L_a)$  に対するスピン偏極度測定メータ 11 で得た距離  $L_a$  におけるスピン偏極度  $P'_s(L_a)$  の比が、被測定材料 2 のスピン偏極度  $P'_s$  に等しい。

【0070】

このような本実施の形態によるスピン偏極度測定メータ 11 によれば、メータ本体 12 の両端に電圧を印加してメータ本体 12 における被測定材料 2 から非磁性導体 3 にスピン偏極電流  $I_{spin}$  を注入し、注入したスピン偏極電流  $I_{spin}$  の進行方向に平行及び垂直な縦方向電圧  $V_x$  及び横方向電圧  $V_y$  を電圧計  $V_1$  及び  $V_2$  で測定することで、縦抵抗  $R$  及び横抵抗  $R$  の値を求めることが出来る。このため、キャリアの走行状態に摂動を加えずにスピン偏極度  $P_s$  の評価を簡便に行うことが可能なスピン偏極度測定メータ 11 が提供される。従って、本実施の形態によるスピン偏極度測定メータ 11 は、原理上、実際のスピントロニクスデバイスにおけるリード線やソース - ドレイン電極間のスピン偏極度  $P_s$  を、通常の電流計による電流測定と同様な手軽さと精度で、簡易にその場で測定できる能力を有している。

10

【0071】

次に、上記のスピン偏極度測定メータ 11 を用いた本発明による論理演算ゲートの一実施の形態について説明する。

【0072】

図 5 は、この一実施の形態による論理演算ゲート 31 の構成の概略斜視図である。

20

【0073】

論理演算ゲート 31 は、第 1 のスピン偏極度測定メータ 11 A と第 2 のスピン偏極度測定メータ 11 B と第 3 のスピン偏極度測定メータ 11 C とを備えて構成されている。

【0074】

第 1 のスピン偏極度測定メータ 11 A は、導電性を有する第 1 の導電材料 2 A に第 1 の非磁性導体 3 A が異種接合された第 1 のメータ本体 12 A から構成される。第 1 のメータ本体 12 A の両端に電圧を印加して入力電流  $I_1$  を流し、第 1 の導電材料 2 A から第 1 の非磁性導体 3 A に第 1 のスピン偏極電流  $I_{SPIN1}$  を注入する。第 1 の電圧測定手段を構成する電圧計  $V_{1A}$  は、注入された第 1 のスピン偏極電流  $I_{SPIN1}$  の進行方向に平行な縦方向電圧  $V_x$  を測定する。第 2 の電圧測定手段を構成する電圧計  $V_{2A}$  は、第 1 のスピン偏極電流  $I_{SPIN1}$  の進行方向に垂直な横方向電圧  $V_y$  を測定する。

30

【0075】

また、第 2 のスピン偏極度測定メータ 11 B は、導電性を有する第 2 の導電材料 2 B に第 2 の非磁性導体 3 B が異種接合された第 2 のメータ本体 12 B から構成される。第 2 のメータ本体 12 B の両端に電圧を印加して入力電流  $I_2$  を流し、第 2 の導電材料 2 B から第 2 の非磁性導体 3 B に第 2 のスピン偏極電流  $I_{SPIN2}$  を注入する。第 3 の電圧測定手段を構成する電圧計  $V_{1B}$  は、注入された第 2 のスピン偏極電流  $I_{SPIN2}$  の進行方向に平行な縦方向電圧  $V_x$  を測定する。第 4 の電圧測定手段を構成する電圧計  $V_{2B}$  は、第 2 のスピン偏極電流  $I_{SPIN2}$  の進行方向に垂直な横方向電圧  $V_y$  を測定する。

40

【0076】

また、第 3 のスピン偏極度測定メータ 11 C は、第 3 のメータ本体 12 C から構成される。第 3 のメータ本体 12 C は第 3 の非磁性導体 3 C からなり、第 3 の非磁性導体 3 C には第 1 の非磁性導体 3 A 及び第 2 の非磁性導体 3 B が同種接合されている。なお、これら第 1、第 2 及び第 3 の各非磁性導体 3 A、3 B 及び 3 C を一体成形し、接合部分を無くしてもよい。第 3 の非磁性導体 3 C には、第 1 の非磁性導体 3 A 及び第 2 の非磁性導体 3 B から第 1 のスピン偏極電流  $I_{SPIN1}$  及び第 2 のスピン偏極電流  $I_{SPIN2}$  が流入し、第 3 のスピン偏極電流  $I_{SPIN3}$  が流れる。この第 3 のスピン偏極電流  $I_{SPIN3}$  は、第 1 のスピン偏極電流  $I_{SPIN1}$  及び第 2 のスピン偏極電流  $I_{SPIN2}$  が合成して形成されるものであり、第 3 の非磁性導体 3 C から電流  $I_3$  として出力される。第 5 の電圧測定手段を構成する電

50



圧計  $V_{1C}$  は、第3のスピンの偏極電流  $I_{SPIN3}$  の進行方向に平行な縦方向電圧  $V_x$  を測定する。第6の電圧測定手段を構成する電圧計  $V_{2C}$  は、第3のスピンの偏極電流  $I_{SPIN3}$  の進行方向に垂直な横方向電圧  $V_y$  を測定する。

【0077】

このような論理演算ゲート31は、第1のスピンの偏極電流  $I_{SPIN1}$  のキャリアのスピンの偏極度  $P_1$  及び第2のスピンの偏極電流  $I_{SPIN2}$  のキャリアのスピンの偏極度  $P_2$  を入力値、第3のスピンの偏極電流  $I_{SPIN3}$  のキャリアのスピンの偏極度  $P_3$  を出力値とする、2入力1出力の擬似排他的論理演算ゲートを構成する。ここで、第1、第2及び第3の各スピンの偏極度測定メータ11A、11B及び11Cは、チャンネル領域が非磁性体から構成されるため、アップ及びダウンスピンの双方を受け入れることが出来る。また、

10

【0078】

すなわち、第1のメータ本体12A及び第2のメータ本体12Bにそれぞれスピンの偏極度  $P_1$  及び  $P_2$  が100%の第1のスピンの偏極電流  $I_{SPIN1}$  及び第2のスピンの偏極電流  $I_{SPIN2}$  を注入すると、第3のメータ本体12Cにはスピンの偏極度  $P_3$  が100%の第3のスピンの偏極電流  $I_{SPIN3}$  が流れる。また、第1のメータ本体12A及び第2のメータ本体12Bにそれぞれスピンの偏極度  $P_1$  が100%の第1のスピンの偏極電流  $I_{SPIN1}$  及びスピンの偏極度  $P_2$  が-100%の第2のスピンの偏極電流  $I_{SPIN2}$  を注入すると、第3のメータ本体12Cにはスピンの偏極度  $P_3$  が0%の第3のスピンの偏極電流  $I_{SPIN3}$  が流れる。また、第1のメータ本体12A及び第2のメータ本体12Bにそれぞれスピンの偏極度  $P_1$  が-100%の第1のスピンの偏極電流  $I_{SPIN1}$  及びスピンの偏極度  $P_2$  が100%の第2のスピンの偏極電流  $I_{SPIN2}$  を注入すると、第3のメータ本体12Cにはスピンの偏極度  $P_3$  が0%の第3のスピンの偏極電流  $I_{SPIN3}$  が流れる。また、第1のメータ本体12A及び第2のメータ本体12Bにそれぞれスピンの偏極度  $P_1$  及び  $P_2$  が-100%の第1のスピンの偏極電流  $I_{SPIN1}$  及び第2のスピンの偏極電流  $I_{SPIN2}$  を注入すると、第3のメータ本体12Cにはスピンの偏極度  $P_3$  が-100%の第3のスピンの偏極電流  $I_{SPIN3}$  が流れる。ここで、-100%のスピンの偏極度  $P_s$  とは、全てのキャリアのスピンのダウンしている状態である

20

30

【0079】

このため、本実施の形態による論理演算ゲート31では、第1のスピンの偏極電流  $I_{SPIN1}$  のキャリアのスピンの偏極度  $P_1$  及び第2のスピンの偏極電流  $I_{SPIN2}$  のキャリアのスピンの偏極度  $P_2$  を入力値、第3のスピンの偏極電流  $I_{SPIN3}$  のキャリアのスピンの偏極度  $P_3$  を出力値とすると、出力値  $P_3$  及び一方の入力値  $P_1$  または  $P_2$  が分かると、他方の入力値  $P_2$  または  $P_1$  が一義的に推測される。ここで、各入力値  $P_1$ 、 $P_2$  及び出力値  $P_3$  は、第1～第3の各メータ本体12A、12B及び12Cを流れる第1～第3の各スピンの偏極電流  $I_{SPIN1}$ 、 $I_{SPIN2}$  及び  $I_{SPIN3}$  の進行方向に平行な縦方向電圧  $V_x$  及びこれに垂直な横方向電圧  $V_y$  を電圧計  $V_{1A}$ 、 $V_{1B}$  及び  $V_{1C}$ 、並びに  $V_{2A}$ 、 $V_{2B}$  及び  $V_{2C}$  で測定し、縦抵抗率  $\rho_{xx}$  及び横抵抗率  $\rho_{yx}$  を求めてスピンの偏極度  $P_s$  を算出することで、得られる。

40

【0080】

出力値  $P_3$  及び一方の入力値  $P_1$  または  $P_2$  から他方の入力値  $P_2$  または  $P_1$  が一義的に推測されるこのような擬似排他的な論理関係は、図6(a)に示す真理値表にまとめられる。ここで、論理値「1」は100%のスピンの偏極度  $P_s$ 、論理値「-1」は-100%のスピンの偏極度  $P_s$ 、論理値「0」は0%のスピンの偏極度  $P_s$  に対応している。同図(b)は、排他的論理和(XOR)を演算する一般的な論理演算ゲートにおける入力値A、B及び出力値C間の論理関係を表す真理値表である。この真理値表でも、出力値C及び一方の入力値AまたはBから、他方の入力値BまたはAが一義的に推測される。このため、

50

同図 ( a ) に演算論理を示す本実施の形態による論理演算ゲート 3 1 の擬似 X O R は、同図 ( b ) に演算論理を示す一般的な X O R に類似する。従って、本実施の形態による論理演算ゲート 3 1 により、擬似排他的な論理和を演算する擬似 X O R ゲートが提供される。

【 0 0 8 1 】

図 7 は、一般的な X O R 論理演算ゲート 4 1 を 5 個の P N P トランジスタ 4 2 ~ 4 6 及び 1 個の N P N トランジスタ 4 7 で構成した一例を示す。入力値 A をスイッチ 4 8、入力値 B をスイッチ 4 9 で入力することで、出力端子 5 0 に出力値 C が得られる。一般的な X O R 論理演算ゲート 4 1 はこのように 6 個のバイポーラ・トランジスタ 4 2 ~ 4 7 を必要とする。1 個当たりのこれらトランジスタ 4 2 ~ 4 7 における P N 接合は 2 個であるから、X O R 論理演算ゲート 4 1 には合計で 1 2 個の P N 接合が必要とされる。これに対し、本実施の形態による擬似 X O R 論理演算ゲート 3 1 は、第 1、第 2 及び第 3 の各非磁性導体 3 A、3 B 及び 3 C を一体成形することで、第 1 の導電材料 2 A と第 1 の非磁性導体 3 A との接合、及び第 2 の導電材料 2 B と第 2 の非磁性導体 3 B との接合の 2 個の接合で、極めて簡単に構成することが出来る。

【 0 0 8 2 】

次に、上記の論理演算ゲート 3 1 を用いた本発明による信号暗号化及び復号化方法の一実施の形態について説明する。

【 0 0 8 3 】

本実施の形態の信号暗号化方法では、上記の論理演算ゲート 3 1 における第 1 のメータ本体 1 2 A 及び第 2 のメータ本体 1 2 B の一方に送信信号列、他方に乱数列を入力して、第 3 のメータ本体 1 2 C から出力される信号列を暗号列として送信する。例えば、第 1 のメータ本体 1 2 A におけるキャリアのスピンの偏極度  $P_1$  を図 8 ( a ) に示すスピン偏極信号列  $P_1$ 、第 2 のメータ本体 1 2 B におけるキャリアのスピンの偏極度  $P_2$  を同図 ( b ) に示すスピン偏極乱数列  $P_2$  として信号入力すると、第 3 のメータ本体 1 2 C のキャリアのスピンの偏極度  $P_3$  は、図 6 ( a ) に示す真理値表に従った同図 ( c ) に示す値となる。本実施の形態の信号暗号化方法では、同図 ( c ) に示すこの値の列を暗号化情報列  $P_3$  として第 3 のメータ本体 1 2 C から出力し、情報通信における鍵暗号化を行う。

【 0 0 8 4 】

また、本実施の形態の信号復号化方法では、上記の論理演算ゲート 3 1 の図 6 ( a ) に示す演算論理に基づいて、乱数列と受信した暗号列とから、送信信号列を復号する。例えば、図 8 ( c ) に示す暗号化情報列  $P_3$  を受信した場合には、送信時に用いた同図 ( b ) に示すスピン偏極乱数列  $P_2$  と同じ同図 ( e ) に示すスピン偏極乱数列  $P_2$  を用い、図 6 ( a ) に示す真理値表の論理に基づき、同図 ( f ) に示すスピン偏極信号列  $P_1$  を復号化する。この復号化により、送信された同図 ( a ) に示すスピン偏極信号列  $P_1$  を得ることで、情報通信における鍵復号化を行う。

【 0 0 8 5 】

このような本実施の形態の信号暗号化及び復号化方法によれば、上記のように、第 1 のメータ本体 1 2 A に入力される送信信号列  $P_1$  と第 2 のメータ本体 1 2 B に入力される乱数列  $P_2$  とは、論理演算ゲート 3 1 によって図 6 ( a ) に示す擬似排他的論理和がとられ、その論理演算結果が暗号列  $P_3$  として第 3 のメータ本体 1 2 C から出力され、送信される。論理演算ゲート 3 1 は、出力値である暗号列  $P_3$  及び一方の入力値である乱数列  $P_2$  から他方の入力値である入力信号列  $P_1$  が一義的に推測されるので、受信側では、乱数列  $P_2$  と受信した暗号列  $P_3$  とから、論理演算ゲート 3 1 の演算論理に基づいて、送信した信号列  $P_1$  を復号化することが出来る。

【 0 0 8 6 】

このため、上記の擬似 X O R 論理演算ゲート 3 1 を用いることで、送信信号列  $P_1$  を暗号列  $P_3$  に暗号化することが出来、暗号列  $P_3$  を送信信号列  $P_1$  に復号化することが出来る信号暗号化及び復号化方法が提供される。

【 産業上の利用可能性 】

【 0 0 8 7 】

10

20

30

40

50

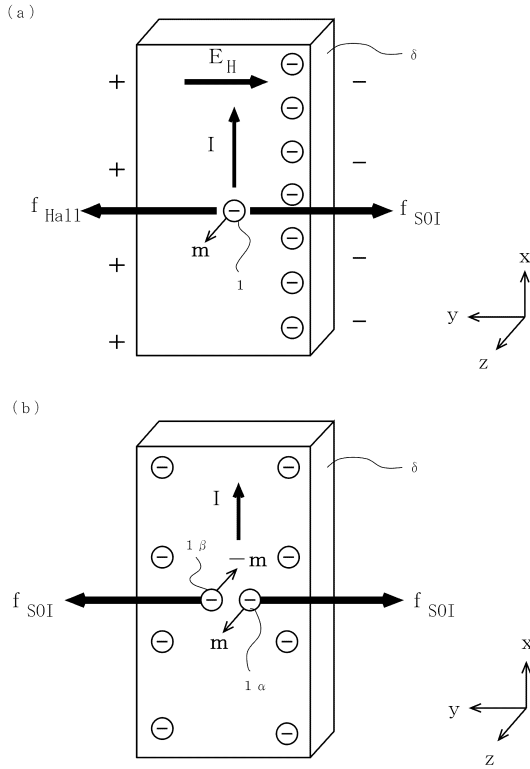
XOR論理演算ゲート41は、各種TTLを始め、鍵暗号通信における情報の暗号化及び復号化技術に必須の論理ゲートである。このため、本発明によるスピン偏極度 $P_S$ を入力とする上述した擬似XOR論理演算ゲート31は、これらデジタル回路における省電力化と高度集積化に格段の進歩をもたらす。

【符号の説明】

【0088】

- 1 ...伝導電子
- 1 ...スピンアップした伝導電子
- 1 ...スピンドウンした伝導電子
- 2 ...被測定材料 10
- 2 a ...スピン偏極源
- 2 A、2 B ...導電材料
- 3 ...非磁性導体
- 3 a、3 A、3 B、3 C ...非磁性導体
- 1 1 ...スピン偏極度測定メータ
- 1 2、1 2 A、1 2 B、1 2 C ...メータ本体
- 2 1 ...較正器
- 3 1 ...論理演算ゲート
- I ...電流 20
- ...チャンネル領域
- $f_{SOI}$  ...スピン軌道相互作用力
- $f_{Hall}$  ...ホール電気力
- $E_H$  ...ホール電場
- $m$  ...スピン磁気モーメント
- $I_{spin}$  ...スピン偏極電流
- $V_1$ 、 $V_2$  ...電圧計

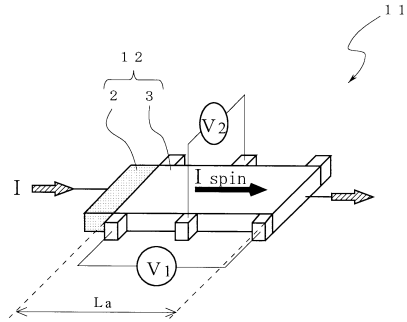
【図1】



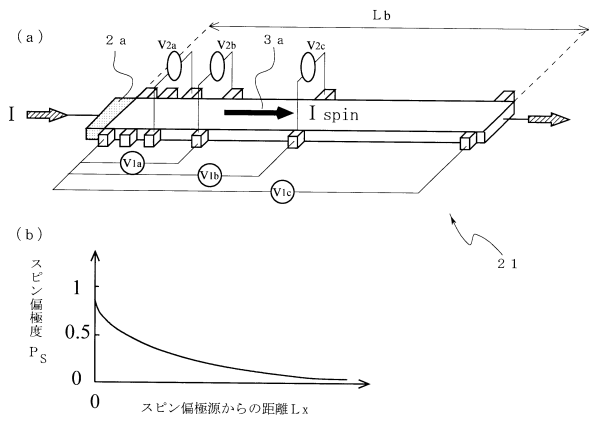
【図2】

スピン偏極度 $P_S$	0%		100%
横抵抗率 $\rho_{yx}$	ゼロ	↗	最大
縦抵抗率 $\rho_{xx}$	最大	↘	最小

【図3】



【図4】



【図6】

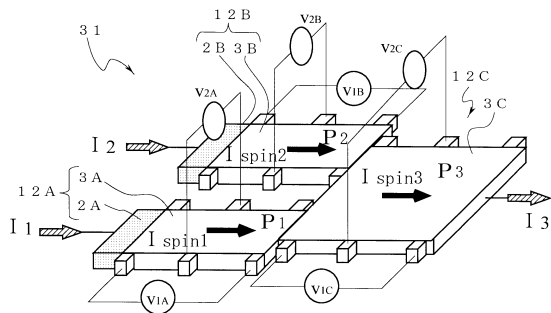
(a)

入力		出力
$P_1$	$P_2$	$P_3$
1	1	1
1	-1	0
-1	1	0
-1	-1	-1

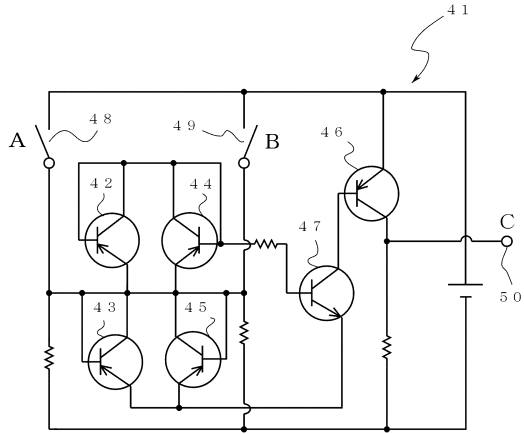
(b)

入力		出力
A	B	C
0	0	0
1	0	1
0	1	1
1	1	0

【図5】



【 図 7 】



【 図 8 】

- (a) スピン偏極信号列 P 1 1 -1 -1 1 -1 1 -1 -1 1 1
- (b) スピン偏極乱数列 P 2 -1 1 1 -1 -1 1 1 1 -1 1
- (c) 暗号化情報列 P 3 0 0 0 0 -1 1 0 0 0 1
- ↓ 送信
- (d) 暗号化情報列 P 3 0 0 0 0 -1 1 0 0 0 1
- (e) スピン偏極乱数列 P 2 -1 1 1 -1 -1 1 1 1 -1 1
- (f) 復号化スピン偏極信号列 P 1 1 -1 -1 1 -1 1 -1 -1 1 1

---

フロントページの続き

審査官 小山 満

- (56)参考文献 特開2010-122211(JP,A)  
特開2011-082388(JP,A)  
特開平11-064476(JP,A)  
特開平10-313137(JP,A)  
特開2010-126733(JP,A)  
特開平10-056219(JP,A)

- (58)調査した分野(Int.Cl., DB名)  
H01L 29/82  
H04L 9/18