

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 特 許 公 報(B2)

(11) 特許番号

特許第6684224号
(P6684224)

(45) 発行日 令和2年4月22日(2020.4.22)

(24) 登録日 令和2年3月31日(2020.3.31)

(51) Int.Cl. F I
 H O 1 F 10/18 (2006.01) H O 1 F 10/18
 H O 1 F 10/30 (2006.01) H O 1 F 10/30
 H O 1 F 41/18 (2006.01) H O 1 F 41/18
 H O 1 F 41/30 (2006.01) H O 1 F 41/30
 H O 1 F 41/20 (2006.01) H O 1 F 41/20

請求項の数 20 (全 25 頁) 最終頁に続く

(21) 出願番号 特願2016-560768 (P2016-560768)
 (86) (22) 出願日 平成27年3月31日(2015.3.31)
 (65) 公表番号 特表2017-513231 (P2017-513231A)
 (43) 公表日 平成29年5月25日(2017.5.25)
 (86) 国際出願番号 PCT/NZ2015/050038
 (87) 国際公開番号 W02015/152736
 (87) 国際公開日 平成27年10月8日(2015.10.8)
 審査請求日 平成30年3月30日(2018.3.30)
 (31) 優先権主張番号 623343
 (32) 優先日 平成26年4月2日(2014.4.2)
 (33) 優先権主張国・地域又は機関
 ニュージーランド(NZ)

前置審査

(73) 特許権者 516294469
 グランビル サイモン エドワード
 ニュージーランド国 6012 ウェリン
 トン ケルバーン ケルバーン パレード
 132 ビー
 (73) 特許権者 516294517
 アントン エヴァーマリア ヨハンナ
 ニュージーランド国 6011 ウェリン
 トン マウント ビクトリア ブローアム
 ストリート 3/58
 (73) 特許権者 516294539
 ナタリ フランク
 ニュージーランド国 6037 ウェリン
 トン チャートン パーク アールストー
 ク クレセント 84エー

最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 希土類窒化物を含む磁性材料およびデバイス

(57) 【特許請求の範囲】

【請求項1】

第1の希土類窒化物材料の第1の強磁性層と、第2の希土類窒化物材料の第2の強磁性層と、第1および第2の強磁性層の各々の間の且つそれらと接触しているブロッキング層とを含む磁性材料において、前記第1および第2の強磁性層が異なった抗電界を有し、前記第1および第2の希土類窒化物材料が各々独立に窒化プラセオジウム(P r N)、窒化ネオジウム(N d N)、窒化サマリウム(S m N)、窒化ユウロピウム(E u N)、窒化ガドリニウム(G d N)、窒化テルビウム(T b N)、窒化ジスプロシウム(D y N)、窒化ホルミウム(H o N)、窒化エルビウム(E r N)、窒化ツリウム(T m N)、および窒化イッテルビウム(Y b N)、ならびにそれらの任意の2つ以上のみからなる合金からなる群から選択され、

前記第1および前記第2の希土類窒化物材料は、それぞれ付加的なドーパントまたは他の不純物を 10^{21} 原子/cm³未満含み、

前記ブロッキング層は、L a N、L u N、H f N、A l N、G a Nおよび(A l、I n、G a) N合金からなる群から選択される、磁性材料。

【請求項2】

前記第1および第2の希土類窒化物材料の一方または両方が、1つまたは複数の付加的なドーパントを含む、請求項1に記載の磁性材料。

【請求項3】

前記第1の希土類窒化物材料がG d Nを含み、前記第2の希土類窒化物材料がS m Nを

10

20

含む、又は、

前記第 1 の希土類窒化物材料が S m N を含み、前記第 2 の希土類窒化物材料が G d N を含む、請求項 1 又は 2 に記載の磁性材料。

【請求項 4】

前記ブロッキング層が厚さ約 1 ~ 2 0 0 n m である、請求項 1 ~ 3 の何れか 1 項に記載の磁性材料。

【請求項 5】

前記第 1 の強磁性層と接触している基材をさらに含む、請求項 1 ~ 4 の何れか 1 項に記載の磁性材料。

【請求項 6】

前記第 1 の強磁性層が前記基材とエピタキシャルであり、前記ブロッキング層が前記第 1 の強磁性層とエピタキシャルであり、前記第 2 の強磁性層が前記ブロッキング層とエピタキシャルである、請求項 5 に記載の磁性材料。

【請求項 7】

前記第 2 の強磁性層と接触しているキャッピング層をさらに含む、請求項 1 ~ 6 の何れか 1 項に記載の磁性材料。

【請求項 8】

第 1 の希土類窒化物材料の第 1 の強磁性層と、第 2 の希土類窒化物材料の第 2 の強磁性層と、第 1 および第 2 の強磁性層の各々の間の且つそれらと接触しているブロッキング層とを含む磁性材料において、前記第 1 および第 2 の強磁性層が異なった抗電界を有し、前記第 1 および第 2 の希土類窒化物材料が各々独立に窒化プラセオジウム (P r N)、窒化ネオジウム (N d N)、窒化サマリウム (S m N)、窒化ユウロピウム (E u N)、窒化ガドリニウム (G d N)、窒化テルビウム (T b N)、窒化ジスプロシウム (D y N)、窒化ホルミウム (H o N)、窒化エルビウム (E r N)、窒化ツリウム (T m N)、および窒化イッテルビウム (Y b N)、ならびにそれらの任意の 2 つ以上のみからなる合金からなる群から選択され、前記第 1 および前記第 2 の希土類窒化物材料は、それぞれ付加的なドーパントまたは他の不純物を 10^{21} 原子 / c m ³ 未満含む磁性材料を作製する方法であって、

(a) 前記第 1 の希土類窒化物材料を含む前記第 1 の強磁性層を堆積させる工程と、
(b) 工程 (a) において形成された前記第 1 の強磁性層上に前記ブロッキング層を堆積させる工程と、
(c) 工程 (b) において形成された前記ブロッキング層上に前記第 2 の希土類窒化物材料を含む前記第 2 の強磁性層を堆積させる工程とを含む、
前記ブロッキング層は、 L a N、L u N、H f N、A l N、G a N および (A l、I n、G a) N 合金からなる群から選択される、方法。

【請求項 9】

前記第 1 および第 2 の希土類窒化物材料の一方または両方が、1 つまたは複数の付加的なドーパントをさらに含む、請求項 8 に記載の方法。

【請求項 10】

前記第 1 の希土類窒化物材料が G d N を含み、前記第 2 の希土類窒化物材料が S m N を含む、又は、

前記第 1 の希土類窒化物材料が S m N を含み、前記第 2 の希土類窒化物材料が G d N を含む、請求項 8 又は 9 に記載の方法。

【請求項 11】

前記ブロッキング層が厚さ約 1 ~ 2 0 0 n m である、請求項 8 ~ 10 の何れか 1 項に記載の方法。

【請求項 12】

前記第 1 の強磁性層が基材上に堆積される、請求項 8 ~ 11 の何れか 1 項に記載の方法。

【請求項 13】

前記第 1 の強磁性層が前記基材とエピタキシャルであり、前記ブロッキング層が前記第 1 の強磁性層とエピタキシャルであり、前記第 2 の強磁性層が前記ブロッキング層とエピタキシャルである、請求項 1 2 に記載の方法。

【請求項 1 4】

工程 (c) において形成された前記第 2 の強磁性層上にキャッピング層を堆積させる工程をさらに含む、請求項 8 ~ 1 3 の何れか 1 項に記載の方法。

【請求項 1 5】

希土類と窒素供給源とを組み合わせることによって前記第 1 又は第 2 の希土類窒化物材料の 1 つまたは複数が M B E によって堆積される、請求項 8 ~ 1 4 の何れか 1 項に記載の方法。

10

【請求項 1 6】

前記窒素供給源が、高純度分子窒素、アンモニア、および活性窒素の供給源、またはそれらの任意の 2 つ以上の混合物からなる群から選択される、請求項 1 5 に記載の方法。

【請求項 1 7】

前記窒素供給源フラックスが、希土類フラックスよりも少なくとも 1 0 0 倍大きい、請求項 1 6 に記載の方法。

【請求項 1 8】

工程 (c) において形成された前記第 2 の強磁性層上にキャッピング層を堆積させる工程をさらに含まない場合は、前記第 1 の強磁性層、前記第 2 の強磁性層、および前記ブロッキング層からなる群より選択される少なくとも一種；又は

20

工程 (c) において形成された前記第 2 の強磁性層上にキャッピング層を堆積させる工程をさらに含む場合は、前記第 1 の強磁性層、前記第 2 の強磁性層、前記ブロッキング層および前記キャッピング層からなる群より選択される少なくとも一種が、周囲温度または高温で堆積される、請求項 8 ~ 1 7 の何れか 1 項に記載の方法。

【請求項 1 9】

請求項 1 ~ 7 の何れか 1 項に記載の磁性材料と、任意選択により、電気接点とを含む磁気デバイス。

【請求項 2 0】

基材および / またはキャッピング層が電気接点を提供する、請求項 1 9 に記載の磁気デバイス。

30

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0 0 0 1】

本発明は、希土類窒化物を含む磁性材料および、より詳しくは、1 つの比較的軟質および 1 つの比較的硬質磁性層を含む複数層構造材料を含む磁性材料に関する。本発明はさらに、磁性材料を含むデバイスに関する。

【背景技術】

【0 0 0 2】

希土類は、5 7 (L a) から 7 1 (L u) の原子番号を有し、4 f 軌道が満たされている元素：すなわち、ランタン (L a)、セリウム (C e)、プラセオジウム (P r)、ネオジウム (N d)、プロメチウム (P m)、サマリウム (S m)、ユウロピウム (E u)、ガドリニウム (G d)、テルビウム (T b)、ジスプロシウム (D y)、ホルミウム (H o)、エルビウム (E r)、ツリウム (T m)、イッテルビウム (Y b)、およびルテチウム (L u) を含む。それらは原子配置 $[X e] 6 s^2 5 d^1 4 f^n$ または $[X e] 6 s^2 4 f^{n+1}$ を有し、n が L a について 0 から L u について 1 4 まで変化する。それらの最も一般的なイオン電荷状態は 3 + であり、4 f 準位はフェルミエネルギーに及ぶ。それらは、最低限よりも多く満たされた f 殻電子軌道を有する安定な元素であり、結果として、それらは最大スピンおよび軌道モーメントを有する元素である。秩序化固体においてそれらは最強の強磁性材料に寄与し、強い永久磁石を必要とする技術においてそれらの実用性を確実にしている寄与となっている。それらの名称にもかかわらずそれらは、安定核同位

40

50

体を有さないプロメチウムを例外として、決して珍しくない。

【 0 0 0 3 】

最初に希土類窒化物は 1 9 6 0 年代に検討され、その時に技術開発は、希土類系列の化学的に似た要素を分離する際に直面する問題を克服した。希土類窒化物はほとんど全て強磁性であり、成長条件に強く依存して系列全体にわたりそして抗電界で強く変化する磁性状態を有する。例えば、S m N は唯一の公知のほぼ零モーメントの強磁性半導体であり、非常に大きな抗電界を有し、G d N は約三桁小さい抗電界を有する。希土類窒化物は、スピントロニクス、赤外線 (I R) 検知器、および I I I 族窒化物半導体化合物への接点など多様な用途において有望である。

【 0 0 0 4 】

磁気抵抗ランダムアクセスメモリ (M R A M) は、不揮発性ランダムアクセスメモリ技術である。M R A M 内のデータは、磁気記憶素子によって記憶されるが、他方、他の R A M 技術が典型的にデータを電荷または電流フローとして記憶する。M R A M 内の磁気記憶素子は 2 つの磁性層から形成され、それらの各々が、バリア層によって隔てられた磁界を保持することができる。一方の磁性層は、特定の磁気整列にされる永久磁石である。他方の磁性層は、外部磁界に整列することによってデータを記憶する。そこで、素子は、平行なまたは反平行な磁化方向のどちらかを有する、異なった配位で存在する。絶縁バリア層を有する素子の電気抵抗、または金属バリア層に沿う抵抗は、磁性層が平行に整列される時小さめであるので、2 つの磁界配位はそこで、区別される。

【 0 0 0 5 】

巨大磁気抵抗 (G M R) およびトンネリング磁気抵抗 (T M R) 磁界センサーの構造および動作原理は同様である。

【 0 0 0 6 】

しかしながら、既存のデバイスの全てが、金属磁性層を有する。

【 0 0 0 7 】

したがって、上記の不利な点を避ける或る方法に至ること、および / または一般利用者に有用な選択を少なくとも提供することが本発明の目的である。

【 0 0 0 8 】

本発明の他の目的は、例として与えられるにすぎない以下の説明から明らかになるであろう。

【 0 0 0 9 】

本明細書に含まれている文書、行為、材料、デバイス、物品等のいかなる考察も、本発明のために文脈を提供する目的のためにすぎない。これらの問題のいずれかまたは全てが先行技術の基礎の一部を形成するかまたは優先日の前にそれが存在するので本発明に関連する分野の共通の一般的情報であったことを認めるものとしてとられるべきではない。

【発明の概要】

【課題を解決するための手段】

【 0 0 1 0 】

第 1 の態様において、本発明は、第 1 の強磁性層と、第 2 の強磁性層と、第 1 および第 2 の強磁性層の各々の間の且つそれらと接触しているブロッキング層とを含む磁性材料を提供し、そこで第 1 および第 2 の強磁性層が異なった抗電界を有し、第 1 の強磁性層が第 1 の希土類窒化物材料を含み、第 2 の強磁性層が第 2 の希土類窒化物材料を含み、第 1 および第 2 の希土類窒化物材料が各々独立に窒化プラセオジウム (P r N)、窒化ネオジウム (N d N)、窒化サマリウム (S m N)、窒化ユウロピウム (E u N)、窒化ガドリニウム (G d N)、窒化テルビウム (T b N)、窒化ジスプロシウム (D y N)、窒化ホルミウム (H o N)、窒化エルビウム (E r N)、窒化ツリウム (T m N)、および窒化イッテルビウム (Y b N)、ならびにそれらの任意の 2 つ以上の合金からなる群から選択される。

【 0 0 1 1 】

第 2 の態様において、本発明は、第 1 の態様の磁性材料と、任意選択により、電気接点

10

20

30

40

50

とを含む磁気デバイスを提供する。

【 0 0 1 2 】

第 3 の態様において、本発明は、

(a) 第 1 の希土類窒化物材料を含む第 1 の強磁性層を堆積させる工程と、
(b) 工程 (a) において形成された第 1 の強磁性層上にブロッキング層を堆積させる工程と、
(c) 工程 (b) において形成されたブロッキング層上に第 2 の希土類窒化物材料を含む第 2 の強磁性層を堆積させる工程とを含む、第 1 の態様の磁性材料を作製する方法を提供する。

【 0 0 1 3 】

第 4 の態様において、本発明は、第 3 の態様の方法によって作製される時に磁性材料を提供する。

【 0 0 1 4 】

また、本発明は、第 3 の態様の方法によって得ることができる磁性材料を提供する。

【 0 0 1 5 】

また、本発明は一般的に、個々にまたは一括して適用の明細に言及されるかまたは示される部分、要素および特徴、ならびに任意の 2 つ以上の前記部分、要素または特徴の任意のまたは全ての組合せに存すると言われてもよく、そして本発明が関連する本技術分野に公知の同等物を有する特定の完全体が本明細書において言及される場合、このような公知の同等物は、あたかも個々に示されるかのように本明細書に組み込まれるとみなされる。

【 0 0 1 6 】

さらに、本発明の特徴または態様がマーカッシュグループを用いて説明される場合、本発明はまた、マーカッシュグループの任意の個々の要素または要素のサブグループを用いてそれによって説明されることを当業者は理解するであろう。

【 0 0 1 7 】

本明細書中で用いられるとき名詞の後の「 (s) 」は、名詞の複数形および / または単数形を意味する。

【 0 0 1 8 】

本明細書中で用いられるとき用語「および / または」は、「および」または「または」または両方を意味する。

【 0 0 1 9 】

本明細書において使用されるとき用語「含む (comprising) 」は、「 ~ の少なくとも一部に存する (consisting at least in part of) 」を意味する。用語「含む (comprising) 」を包含する本明細書中の各々の言明を解釈するとき、この用語によって導入される特徴以外の特徴もまた、存在していてもよい。「含む (comprise) 」および「含む (comprises) 」などの関連用語は同様に解釈されなければならない。

【 0 0 2 0 】

本明細書に開示される数の範囲 (例えば、 1 ~ 1 0) への言及もまた、その範囲内の全ての有理数 (例えば、 1、 1 . 1、 2、 3、 3 . 9、 4、 5、 6、 6 . 5、 7、 8、 9 および 1 0) そしてまたその範囲内の有理数の任意の範囲 (例えば、 2 ~ 8、 1 . 5 ~ 5 . 5 および 3 . 1 ~ 4 . 7) への言及を包含することが意図され、したがって、本明細書に明白に開示される全ての範囲の全ての部分範囲がこれによって明白に開示される。これらは明確に意図されるものの例にすぎず、列挙される最小値と最高値との間の数値の全ての可能な組合せが同様な方法で本出願において明白に言明されると考えられなければならない。

【 0 0 2 1 】

本発明は一般的に上に定義された通りであるが、本発明はそれに限定されず、また、本発明は、以下の説明が例を示す実施形態を包含すると当業者は理解するであろう。

本発明は図を参照してここで説明される。

【図面の簡単な説明】

【0022】

【図1】本発明の一実施形態に従う磁性材料の横断面である。

【図2】SmN/GdN材料およびSmN/LaN/GdN材料のX線磁気円二色性(XMCD)スペクトルを示す。

【図3】(以下に考察される)Simmonsのトンネリングモデルを使用して適合された、GdN/GaN/GdN材料を含むトンネル接合の電流-電圧特性を示す。挿入図は、1.91nmの固定バリア幅を仮定して抽出された、温度に対してプロットされたモデル化されたバリア高さ(順方向および逆方向電流の平均)を示す。

【図4a】5Kで約30nAの電流によって得られたGdN/GaN/GdN材料を含むトンネル接合の磁気抵抗の磁界依存性を示す。データの上の線図は電極の主磁化方向を示す。

10

【図4b】GdN/GaN/GdN材料を含むトンネル接合の磁界依存磁化を示す。

【図5】様々な印加電流を使用して測定されたGdN/GaN/GdN材料を含むトンネル接合の温度依存抵抗を示す。挿入図は、バルクGdN層の抵抗率を示す。

【発明を実施するための形態】

【0023】

第1の態様において、本発明は、第1の強磁性層と、第2の強磁性層と、第1および第2の強磁性層の各々の間の且つそれらと接触しているブロッキング層とを含む磁性材料を提供し、そこで第1および第2の強磁性層が異なった抗電界を有し、第1の強磁性層が第1の希土類窒化物材料を含み、第2の強磁性層が第2の希土類窒化物材料を含み、第1および第2の希土類窒化物材料が各々独立に窒化プラセオジウム(PrN)、窒化ネオジウム(NdN)、窒化サマリウム(SmN)、窒化ユウロピウム(EuN)、窒化ガドリニウム(GdN)、窒化テルビウム(TbN)、窒化ジスプロシウム(DyN)、窒化ホルミウム(HoN)、窒化エルビウム(ErN)、窒化ツリウム(TmN)、および窒化イッテルビウム(YbN)、ならびにそれらの任意の2つ以上の合金からなる群から選択される。

20

【0024】

いくつかの実施形態において、第1および第2の希土類窒化物材料が各々独立にPrN、NdN、SmN、EuN、GdN、TbN、DyN、HoN、ErN、TmN、およびYbNからなる群から選択される。

30

【0025】

いくつかの実施形態において、第1および第2の希土類窒化物材料が各々独立にPrN、NdN、SmN、GdN、TbN、DyN、HoN、ErN、およびTmN、ならびにそれらの任意の2つ以上の合金からなる群から選択される。

【0026】

いくつかの実施形態において、第1および第2の希土類窒化物材料が各々独立にPrN、NdN、SmN、GdN、TbN、DyN、HoN、ErN、およびTmNからなる群から選択される。

【0027】

いくつかの実施形態において、第1および第2の希土類窒化物材料が各々独立にNdN、SmN、EuN、GdN、DyN、HoN、ErN、およびYbN、ならびにそれらの任意の2つ以上の合金からなる群から選択される。

40

【0028】

いくつかの実施形態において、第1および第2の希土類窒化物材料が各々独立にNdN、SmN、EuN、GdN、DyN、HoN、ErN、およびYbNからなる群から選択される。

【0029】

いくつかの実施形態において、第1および第2の希土類窒化物材料が各々独立にNdN、SmN、GdN、DyN、HoN、およびErN、ならびにそれらの任意の2つ以上の

50

合金からなる群から選択される。

【0030】

いくつかの実施形態において、第1および第2の希土類窒化物材料が各々独立にNdN、SmN、GdN、DyN、HoN、およびErNからなる群から選択される。

【0031】

いくつかの実施形態において、第1および第2の希土類窒化物材料の一方または両方が希土類窒化物合金である。いくつかの実施形態において、希土類窒化物合金が、(Sm, Gd)N、(Gd, Ho)N、および(Gd, Dy)Nからなる群から選択される。いくつかの実施形態において、希土類窒化物合金が(Sm, Gd)Nである。いくつかの実施形態において、希土類窒化物合金が(Gd, Ho)Nである。いくつかの実施形態において、希土類窒化物合金が(Gd, Dy)Nである。

10

【0032】

いくつかの実施形態において、第1および第2の希土類窒化物材料の一方または両方が、1つまたは複数の付加的なドーパントをさらに含む。一般的に、第1および第2の希土類窒化物材料が、付加的なドーパントまたは他の不純物を約 10^{21} 原子/cm³未満で含む。いくつかの実施形態において、第1および第2の希土類窒化物材料が、付加的なドーパントまたは他の不純物を約 10^{20} 原子/cm³未満で含む。いくつかの実施形態において、第1および第2の希土類窒化物材料が、付加的なドーパントまたは他の不純物を約 10^{19} 原子/cm³未満で含む。

【0033】

20

いくつかの実施形態において、第1の強磁性層が、第1の希土類窒化物材料からなる。他の実施形態において、第1の強磁性層が、本質的に第1の希土類窒化物材料からなる。

【0034】

いくつかの実施形態において、第2の強磁性層が、第2の希土類窒化物材料からなる。他の実施形態において、第2の強磁性層が、本質的に第2の希土類窒化物材料からなる。

【0035】

いくつかの実施形態において、第1の強磁性層および第2の強磁性層の組成が異なっている。いくつかの実施形態において、第1の強磁性層および第2の強磁性層の組成が同じである。

【0036】

30

いくつかの実施形態において、第1の希土類窒化物材料および第2の希土類窒化物材料が異なっている。いくつかの実施形態において、第1の希土類窒化物材料および第2の希土類窒化物材料が同じである。

【0037】

第1および第2の強磁性層が異なった抗電界を有し、すなわち、強磁性層のうちの一方の抗電界が、他方の強磁性層の抗電界よりも高い。これは、以下に考察されたブロッキング層と一緒に、より高い抗電界を有する強磁性層の磁気整列を変化させずにより低い抗電界を有する強磁性層の磁気整列を外部磁界によってまたはスピントランスファートルクによって変化させることを可能にする。

【0038】

40

いくつかの実施形態において、第1の強磁性層の抗電界が第2の強磁性層の抗電界よりも高い。他の実施形態において、第2の強磁性層の抗電界が第1の強磁性層の抗電界よりも高い。

【0039】

より低い抗電界を有する強磁性層の抗電界が典型的に約5000e未満である。いくつかの実施形態において、より低い抗電界を有する強磁性層の抗電界は約2000e未満である。

【0040】

より高い抗電界を有する強磁性層の抗電界が典型的に、より低い抗電界を有する層の抗電界より少なくとも約2倍大きい。いくつかの実施形態において、より高い抗電界を有す

50

る強磁性層の抗電界が、より低い抗電界を有する層の抗電界より少なくとも約 10 倍大きい。いくつかの実施形態において、より高い抗電界を有する強磁性層の抗電界が、より低い抗電界を有する層の抗電界より少なくとも約 100 倍大きい。

【0041】

いくつかの実施形態において、抗電界が約 70 K に測定される。他の実施形態において、抗電界が約 50 K に測定される。他の実施形態において、抗電界が約 4 K に測定される。

【0042】

いくつかの実施形態において、第 1 および第 2 の強磁性層の間の抗電界の差が温度感受性である。このような温度感受性は、磁性材料を異なった用途において使用するために調節することを可能にする場合がある。

10

【0043】

有利には、約 60 % 以下のスピン偏極率を有する、磁気センサーにおいてまたは MRAM 構造（例えば、CoFe および NiFe）のために典型的に使用される通常強磁性金属と対照的に、いくつかの REN は非常に高スピン偏極される。

【0044】

例えば、スピントロニクスデバイスは、磁気作用と電気伝導との間の相互作用に基づいて作動し、それは、伝導電子（または正孔）の全てがスピン偏極される場合はもっとより強い。本発明の磁性材料は、例えば、第 2 の強磁性層の磁化が第 1 の強磁性層の磁化と反対である時の抵抗と、両方の層の磁化が整列される時の抵抗との間のより強い対比（より弱くスピン偏極した材料を含む材料と比較して）を示すことが予想される。

20

【0045】

有利には、希土類窒化物は、フェルミ準位に弱く偏極した s 電子を有する通常強磁性金属と対照的に、非常に強く希土類 d 電子に基づいている伝導帯を有する。s 電子がトンネリングを支配し、それは若干のデバイスにおいて不利な点である。

【0046】

いくつかの実施形態において、第 1 の強磁性希土類窒化物材料が GdN を含む。

【0047】

いくつかの実施形態において、第 2 の強磁性希土類窒化物材料が SmN を含む。有利には、SmN は、強磁性的に秩序化していても、ほとんど無いに等しいくらい小さいフリンジ磁界を有し、それは外部印加磁界がオフにされる時に隣接したより軟質な磁性層の再整列を妨げる。

30

【0048】

いくつかの実施形態において、第 1 の強磁性希土類窒化物材料および第 2 の強磁性希土類窒化物材料の両方が GdN を含む。

【0049】

いくつかの実施形態において、第 1 の強磁性希土類窒化物材料が GdN を含み、第 2 の強磁性希土類窒化物材料が SmN を含む。いくつかの実施形態において、第 1 の強磁性希土類窒化物材料が SmN を含み、第 2 の強磁性希土類窒化物材料が GdN を含む。

【0050】

GdN および SmN の抗電界の差は約 3 桁である。

40

【0051】

ブロッキング層は非磁性材料であり、すなわち、ブロッキング層は、永久磁気モーメントも固有電子スピンの秩序化も有さない。ブロッキング層は、外部磁界またはスピントランスファートルクによって第 1 および第 2 の強磁性層の磁気整列の独立制御を可能にし、すなわち、ブロッキング層は、第 1 および第 2 の強磁性層の間の磁気交換を防ぐ。

【0052】

適したブロッキング層は第 1 および第 2 の強磁性層と非反応性であり、磁性材料を作製するために使用される加工条件の間安定している。

【0053】

50

いくつかの実施形態において、ブロッキング層が、 LaN 、 LuN 、 HfN 、 AlN 、 GaN 、および $(\text{Al}, \text{In}, \text{Ga})\text{N}$ 合金からなる群から選択される。

【0054】

いくつかの実施形態において、ブロッキング層が、 LaN 、 LuN 、および GaN からなる群から選択される。

【0055】

いくつかの実施形態において、ブロッキング層が GaN を含む。いくつかの実施形態において、ブロッキング層が GaN からなる。他の実施形態において、ブロッキング層が本質的に GaN からなる。

【0056】

いくつかの実施形態において、ブロッキング層が導体である。他の実施形態において、ブロッキング層が半導体である。他の実施形態において、ブロッキング層が絶縁体である。

【0057】

ブロッキング層が導体であるそれらの実施形態において、磁性材料はGMR磁界センサーにおいて使用するために適しているが、他方、絶縁ブロッキング層を含む磁性材料はMRAMデバイスおよびTMR磁界センサーにおいて使用するために適しており、半導性ブロッキング層を含む磁性材料は磁気トンネル接合において使用するために適している。

【0058】

いくつかの実施形態において、ブロッキング層が第1の強磁性層とエピタキシャルである。他の実施形態において、ブロッキング層が多結晶質である。

【0059】

いくつかの実施形態において、第2の強磁性層がブロッキング層とエピタキシャルである。他の実施形態において、第2の強磁性層が多結晶質である。

【0060】

いくつかの実施形態において、ブロッキング層が第1の強磁性層とエピタキシャルであり、第2の強磁性層がブロッキング層とエピタキシャルである。

【0061】

LaN について約5.3 ~ LuN について約4.76 の範囲の格子定数を有し、系列全体にわたって合計10%の差および隣接する原子種の窒化物の間に約0.7%の差がある面心立方 NaCl 構造に希土類窒化物が形成される。したがって、希土類窒化物はエピタキシー適合性である。

【0062】

したがって、いくつかの実施形態において、ブロッキング層が第3の希土類窒化物材料を含む。

【0063】

いくつかの実施形態において、ブロッキング層が LaN または LuN を含む。

【0064】

いくつかの実施形態において、ブロッキング層が LaN からなる。他の実施形態において、ブロッキング層が本質的に LaN からなる。

【0065】

いくつかの実施形態において、ブロッキング層が LuN からなる。他の実施形態において、ブロッキング層が本質的に LuN からなる。

【0066】

また、適したブロッキング層が複数層構造材料を含有する。

【0067】

いくつかの実施形態において、第1および第2の強磁性層が各々独立に厚さ約5 ~ 200 nmである。いくつかの実施形態において、第1の強磁性層および第2の強磁性層が実質的に同じ厚さである。他の実施形態において、第1の強磁性層および第2の強磁性層が異なった厚さを有する。

10

20

30

40

50

【0068】

ブロッキング層が典型的に厚さ約1～200nmである。いくつかの実施形態において、特にブロッキング層が絶縁体である実施形態において、ブロッキング層が厚さ約1～10nmである。いくつかの実施形態において、特にブロッキング層が導体である実施形態において、ブロッキング層が厚さ約5～200nmである。

【0069】

いくつかの実施形態において、磁性材料が、第1の強磁性層と接触している基材をさらに含む。

【0070】

適した基材が、第1の強磁性層と非反応性であり、磁性材料を作製するために使用される加工条件の間安定している。

10

【0071】

いくつかの実施形態において、基材が導体である。他の実施形態において、基材が半導体である。他の実施形態において、基材が絶縁体である。

【0072】

いくつかの実施形態において、第1の強磁性層が基材とエピタキシャルである。他の実施形態において、第1の強磁性層が多結晶質である。

【0073】

いくつかの実施形態において、第1の強磁性層が基材とエピタキシャルであり、ブロッキング層が第1の強磁性層とエピタキシャルである。

20

【0074】

いくつかの実施形態において、第1の強磁性層が基材とエピタキシャルであり、ブロッキング層が第1の強磁性層とエピタキシャルであり、第2の強磁性層がブロッキング層とエピタキシャルである。

【0075】

いくつかの実施形態において、基材がAlN、GaNまたは(Al, In, Ga)N合金である。

【0076】

他の適した基材には、限定されないが、イットリア安定化ジルコニア(YSZ)およびMgOなどが含まれる。

30

【0077】

さらに適した基材には、限定されないが、Al、W、Cr、Cu、Gd、Mg、TaN、NbN、GaAs、およびMgF₂などが含まれる。

【0078】

適した基材は複数層構造材料を含有する。例えば、複数層構造基材は、第1の強磁性層と接触している緩衝層を含んでもよい。

【0079】

いくつかの実施形態において、基材が、任意選択によりAlNまたはGaNの緩衝層と共にSiまたはAl₂O₃を含む。他の実施形態において、緩衝層が(Al, In, Ga)N合金である。

40

【0080】

いくつかの実施形態において、基材がAl₂O₃を含む。いくつかの実施形態において、基材は、(111)面に沿って配向されたAl₂O₃を含む。いくつかの実施形態において、基材が、AlNまたはGaNのエピタキシャル(六回対称軸)緩衝層と共に(111)面に沿って配向されたAl₂O₃を含む。

【0081】

いくつかの実施形態において、磁性材料が、第2の強磁性層と接触しているキャッピング層をさらに含む。

【0082】

空気中でそれらが分解するために、基材上の希土類窒化物の薄い薄膜は一般的に、周囲

50

大気との反応を避けるために有効キャッピング層で不動態化される。

【0083】

適したキャッピング層が第2の強磁性層と非反応性である。

【0084】

キャッピング層は第2の強磁性層とエピタキシャルであっても、多結晶質、または非晶質であってもよい。

【0085】

キャッピング層のための適した材料には、限定されないが、Al、W、Cr、Cu、Gd、Mg、TaN、NbN、Si、YSZ、GaN、GaAs、AlN、(Al, In, Ga)N合金、およびMgF₂などが含まれる。

10

【0086】

いくつかの実施形態において、キャッピング層がAlN、GaN、(Al, In, Ga)N合金、およびSiから選択される。

【0087】

いくつかの実施形態において、キャッピング層がAlNおよびGaNから選択される。有利には、AlNおよびGaNは透明であり、光学測定を可能にする。AlNおよびGaNの他の利点には、それらの成長の容易性および経時的な良好な化学安定性などが含まれる。

【0088】

いくつかの実施形態において、キャッピング層がGaNである。

20

【0089】

本発明の磁性材料の一実施形態が図1に示される。

【0090】

図1を参照して、磁性材料(1)が、第1の強磁性層(5)、第2の強磁性層(10)および第1(5)および第2(10)の強磁性層の各々の間の且つそれらと接触しているブロッキング層(15)を含む。第1の強磁性層(5)が第1の希土類窒化物材料を含み、第2の強磁性層(10)が第2の希土類窒化物材料を含む。第1(5)および第2(10)の希土類窒化物材料が異なった抗電界を有する。図1に示される磁性材料(1)の実施形態は、第1の強磁性層(5)と接触している任意選択の基材(20)および第2の強磁性層(10)と接触している任意選択のキャッピング層(25)をさらに含む。

30

【0091】

第2の態様において、本発明は、第1の態様の磁性材料と、任意選択により、電気接点とを含む磁気デバイスを提供する。

【0092】

このような電気接点は、例えば或るデバイスの書き込みおよび/または読み出しプロセスのために必要とされる場合がある。適した電気接点には、トンネリングデバイス(例えばMRAMおよびTMR磁界センサー)のための伝導性基材または下部金属ストリップおよび上部金属ストリップあるいは面内抵抗読み出し(例えばGMR磁界センサー)のための接点が含まれる。

【0093】

このような電気接点はデバイスの製造中に前または後に堆積されてもよいが、本発明はそれに限定されない。

40

【0094】

いくつかの実施形態において、基材および/またはキャッピング層が電気接点を提供する。

【0095】

第3の態様において、本発明は、

(a) 第1の希土類窒化物材料を含む第1の強磁性層を堆積させる工程と、
(b) 工程(a)において形成された第1の強磁性層上にブロッキング層を堆積させる工程と、

50

(c) 工程 (b) において形成されたブロッキング層上に第 2 の希土類窒化物材料を含む第 2 の強磁性層を堆積させる工程とを含む、第 1 の態様の磁性材料を作製する方法を提供する。

【0096】

いくつかの実施形態において、第 1 の強磁性層が基材上に堆積される。適した基材が上に考察される。

【0097】

したがって、いくつかの実施形態において、本発明は、

(a) 基材上に、第 1 の希土類窒化物材料を含む第 1 の強磁性層を堆積させる工程と、
(b) 工程 (a) において形成された第 1 の強磁性層上にブロッキング層を堆積させる工程と、

10

(c) 工程 (b) において形成されたブロッキング層上に第 2 の希土類窒化物材料を含む第 2 の強磁性層を堆積させる工程とを含む、第 1 の態様の磁性材料を作製する方法を提供する。

【0098】

いくつかの実施形態において、方法は、

(d) 工程 (c) において形成された第 2 の強磁性層上にキャッピング層を堆積させる工程をさらに含む。

【0099】

層が、典型的には当業者に公知の超高真空技術を使用して順次に堆積される。適した技術には、限定されないが、パルス化レーザー堆積 (PLD) および DC / RF マグネトロンスパッタリングなどの物理的蒸着 (PVD)、熱的蒸発、および分子線エピタキシー (MBE) などが含まれる。限定されないが金属有機化学蒸着などの他の技術 (MOCVD) もまた使用されてもよい。

20

【0100】

いくつかの実施形態において、層が MBE によって順次に堆積される。これらの実施形態のいくつかにおいて、層の成長をモニタするために反射高エネルギー電子回折 (RHEED) が使用される。

【0101】

MBE 装置のベース圧力は典型的に約 10^{-8} トール以下である。

30

【0102】

例えば、GdN と SmN は、希土類と窒素供給源とを組み合わせることによって MBE によって薄い薄膜として容易に成長する。

【0103】

窒素供給源が、成長表面に反応性窒素原子を提供する。いくつかの実施形態において、窒素供給源が、高純度分子窒素、アンモニア、および活性窒素の供給源、例えば窒素プラズマまたはイオン化窒素、またはそれらの任意の 2 つ以上の混合物からなる群から選択される。

【0104】

いくつかの実施形態において、窒素供給源が、高純度分子窒素、アンモニア、および活性窒素の供給源、例えば窒素プラズマまたはイオン化窒素からなる群から選択される。

40

【0105】

いくつかの実施形態において、窒素供給源が高純度分子窒素である。

【0106】

希土類は、堆積中に蒸発される、固体希土類を含有するエフュージョンセルなどの希土類元素の供給源から提供され得る。

【0107】

窒素供給源フラックスは典型的に、希土類フラックスよりも少なくとも 100 倍大きい。窒素供給源フラックスの、希土類フラックスに対する比が約 100 より小さい場合、得られた薄膜は、窒素空孔によって濃くドーピングされる可能性が高い。

50

【0108】

希土類窒化物材料がMBEによって堆積されるいくつかの実施形態において、窒素供給源の分圧またはビーム等価圧力(BEP)が約 $10^{-5} \sim 10^{-3}$ トールである。

【0109】

いくつかの実施形態において、希土類のBEPが約 $10^{-8} \sim 10^{-7}$ トールである。

【0110】

層は典型的に約 $0.01 \sim 1$ nm/秒の速度で堆積される。いくつかの実施形態において、層が約 $0.01 \sim 0.5$ nm/秒の速度で堆積される。いくつかの実施形態において、層が約 $0.01 \sim 0.15$ nm/秒の速度で堆積される。いくつかの実施形態において、層が約 $0.01 \sim 0.1$ nm/秒の速度で堆積される。

10

【0111】

いくつかの実施形態において、層が周囲温度または高温で堆積される。

【0112】

層が層またはそれが堆積される基材とエピタキシャルであることが望ましい場合、層が一般的に高温において堆積される。

【0113】

例えば、GdNおよびSmN薄膜は周囲温度で成長される時に強く(111)テクスチャー化されるが、それらは300 を超える温度で適した基材上にエピタキシャルに成長する。

【0114】

したがって、いくつかの実施形態において、層が約500～900 の温度で堆積される。いくつかの実施形態において、層が約500～800 の温度で堆積される。

20

【0115】

しかしながら、層が、特に多結晶質が望ましい場合、上記の温度よりも低い温度、またはさらに周囲温度で堆積されてもよい。例えば、より低い温度で希土類窒化物の層を堆積させることは典型的に、より少ない窒素空孔をもたらす。

【0116】

堆積中の温度は、光高温計、または本技術分野に公知の他の適した装置、例えば熱電対によって測定されるのが便利である場合がある。

【0117】

いくつかの実施形態において、2つ以上の希土類元素が高純度 N_2 ガス、または上に記載したような代替の窒素供給源の存在下で同時に蒸発され、希土類窒化物材料の合金を含む層を提供する。

30

【0118】

同様に、基材、ブロッキング層、および/またはキャッピング層がIII族窒化物を含むそれらの実施形態において、III族窒化物の合金もまた考えられる。

【0119】

1つまたは複数のドーパントが層の1つまたは複数を堆積する間に導入されてもよいことを当業者は理解するであろう。このようなドーパントは、得られた層の磁気および/または電気的性質を変えることができる。

40

【0120】

第4の態様において、本発明は、第3の態様の方法によって作製される時に、磁性材料を提供する。

【0121】

また、本発明は、第3の態様の方法によって得ることができる磁性材料を提供する。

【0122】

以下の非限定的な実施例は本発明を説明するために提供されるが、決してそれらの範囲を限定しない。

【実施例】

【0123】

50

実施例 1

図 1 を参照して、GdN の第 1 の強磁性層 (5) および SmN の第 2 の強磁性層 (1 0) を非磁性 LaN ブロッキング層 (1 5) と共に含む磁性材料 (1) が分子線エピタキシーを使用して (1 1 1) 配向 Al₂O₃ 基材 (2 0) 上に成長された。

【 0 1 2 4 】

GdN の第 1 の強磁性層 (5) および SmN の第 2 の強磁性層 (1 0) を含むが非磁性 ブロッキング層 (1 5) を含まない相当する材料もまた、分子線エピタキシーを使用して (1 1 1) 配向 Al₂O₃ 基材 (2 0) 上に成長された。

【 0 1 2 5 】

受け取られただけの Ga、La、Sm、および Gd 固体装入物の各々の純度は少なくとも 3 N であった。

【 0 1 2 6 】

超高真空チャンバのベース圧力は 1.0×10^{-8} トールであった。基材 (2 0) は、希土類窒化物層の成長の間 750 °C に保持された。GdN の第 1 の強磁性層 (5) は、高純度 (少なくとも 4 N) の分子窒素の 3×10^{-4} トール分圧の存在下で電子銃を使用して Gd 金属を蒸発させることによって成長された。GdN の成長速度は 0.05 nm/s であり、Gd のビーム等価圧力は 8×10^{-8} トールであった。GdN は 100 nm の厚さに成長された。存在しているとき、LaN の非磁性ブロッキング層 (1 5) は、GdN 層のために使用されたのと同じ窒素圧力下で電子銃を使用して La 金属を蒸発させることによって GdN の第 1 の強磁性層 (5) の上に成長された。LaN の成長速度は 0.04 nm/s であり、La のビーム等価圧力は 7×10^{-8} トールであった。LaN は 6 nm の厚さに成長された。SmN の第 2 の強磁性層 (1 0) は、先行層のために使用されたのと同じ窒素分圧下で熱蒸発器内で Sm 金属を蒸発させることによって、第 1 の材料については GdN の上にそして第 2 の材料については LaN の上に成長された。SmN の成長速度は 0.02 nm/s であり、Sm のビーム等価圧力は 3×10^{-8} トールであった。SmN は 5.5 nm の厚さに成長された。

【 0 1 2 7 】

両方の材料がキャッピング層 (2 5) を含み、具体的には 0.06 nm/s の成長速度および 1×10^{-7} トールのビーム等価圧力で周囲温度で成長された厚さ 25 nm の GaN 層を含んだ。電子銃を使用して Ga 金属を蒸発させ、 3×10^{-4} トールの分圧の商用イオン化窒素供給源からのイオン化窒素を使用して窒化物を形成した。

【 0 1 2 8 】

SmN / GdN 材料および SmN / LaN / GdN 材料について図 2 の X 線磁気円二色性 (XMCD) スペクトルは、薄いスペーサー層をそれらの間に導入することによって SmN 層および GdN 層の磁化方向の分断を示す。XMCD が本質的に磁化の各層を測定し、各層からの寄与を個々に精査することができる (図 2 のプロットは、SmN からの寄与を示す)。2 つのタイプのスペクトルがある : 表面だけを精査する TEY (全電子収量、プロットの上側部分)、および下にある GdN 層との境界面までずっと下って SmN 層の全厚さを精査する TFY (全蛍光収量、プロットの下側部分)。したがって TEY スペクトルは GdN への近接によって影響を与えられない SmN 部分を表わし、他方、TFY は、GdN に近いことが SmN に及ぼす効果を示す。

【 0 1 2 9 】

GdN に直接隣接した SmN を有する材料について TFY は、TEY と同じ形状を有するが反対符号を有する。これは、SmN の表面の磁化が GdN 境界面付近の磁化の反対方向に向いていることを意味し、GdN が、隣接した SmN に影響を与えることが明らかに認められる。SmN と GdN との間にブロッキング層を有する材料について信号のこの逆転は観察されず、SmN の磁化が層全体にわたって一様な方向に向いており、GdN からの強い影響がないことを意味する。このように、図 2 は、2 つの磁性層が分断されることを実証する。

【 0 1 3 0 】

実施例 2

図 1 を参照して、薄い GaN トンネルバリア（ブロッキング層（15））によって隔てられた GdN 電極（第 1 の強磁性層（5）、第 2 の強磁性層（10））からなる多結晶磁気トンネル接合として構成された磁性材料（1）が、ベース圧力 1×10^{-8} ミリバール（ 7.5×10^{-9} トール）を有する真空装置内で室温で成長された。GdN 層（5, 10）について、ガドリニウム金属が、 $1 \sim 10 \times 10^{-5}$ ミリバール（ $7.5 \sim 75 \times 10^{-6}$ トール）の窒素分圧下で $0.2 \sim 0.5$ / s の速度で電子銃から蒸発された。カウフマンイオン源から供給される活性化窒素を使用して、GaN バリア（15）が同様な方法で成長された。

【0131】

トンネル接合は、フォトリソグラフィによって交差接触幾何学的形状に形成された。フォトリソグラフィおよび金属リフトオフ法によって狭い（ $100 \mu\text{m}$ ）金接触ストリップ（図示せず）がサファイア基材（20）上に堆積された。幅 $200 \mu\text{m}$ のチャネルを金ストリップに直交してフォトリソグラフィによって製造した。次に、GdN / GaN / GdN トンネル接合（5, 15, 10）を堆積させ、その後に、キャッピング層（25）として作用して GdN の酸化を防ぐ約 45 nm のガドリニウム金属の上層を堆積させた。トンネル接合および Gd 層（25）の成長後に第 2 のリフトオフ法によってフォトレジストを除去した。金属 Gd 層（25）は室温まで強磁性であり、上部および下部強磁性 GdN 層（5, 10）の磁性間の対称性を壊すことが予想された。

【0132】

断面走査電子顕微鏡（SEM）画像は、GdN 層（5, 10）が各々厚さ約 60 nm であることを示した。同様な条件下で成長した GaN 層上で行なわれた X 線反射率測定は、厚さ数 nm（約 5 nm ）の厚さとなり、SEM の結果と一致していた。

【0133】

トンネル接合に比較するためにサファイア基材（20）上に約 100 nm の GdN 薄膜（5）を含むが、ブロッキング層（15）も第 2 の強磁性層（10）も含まない相当する材料を公称で同じ成長条件下で作製し、Gd 層の代わりに厚さ約 30 nm の GaN 層（25）でキャップした。X 線回折（ $\Theta - 2\Theta$ 走査）は、GdN（5）が多結晶質であり、強く（111）テクスチャー化され、 5.00 ± 0.01 の面外の格子パラメーターを有することを明らかにした。

【0134】

図 3 は、典型的なトンネルバリアの 5 および 290 K での電流密度 - 電圧（J - V）特性を示す。曲線は、トンネリングによって支配されるシステムについて予想されるように、示されたそれらを含めて全ての温度 $5 \sim 290 \text{ K}$ で非線形である。データは、矩形バリアを通るトンネリングのために Simmons によって開発されたモデルによく適合する（J. G. Simmons, J. Appl. Phys. 34 1793 (1963 年) および J. G. Simmons, J. Appl. Phys. 35 2472 (1964 年) を参照）。

【0135】

全ての温度でのデータは、 1.91 nm のバリア幅に非常によく適合し、バリア高さが唯一の温度依存フィッティングパラメーターのみである。図 3 への挿入図は、フィッティングから抽出された温度依存バリア高さ（順方向および逆方向電流の平均）を示す。

【0136】

モデル化されたバリア厚さは SEM および X 線反射率測定値と同様であったが、トンネリングがバリアの最も薄い部分によって支配されるという事実のためにこれらの最良の推定値よりもわずかに薄いというのが最も可能性が高い。バリア高さは室温で 1.5 eV であり低温で 1.65 eV であったが、それはフェルミ準位が GaN バリアの隙間の中央付近にあることを示唆する（GdN の E_F が伝導帯の最低に近いと仮定する）。

【0137】

層に平行に印加された増加および減少磁界の両方で測定された 5 K での磁気抵抗は、1

10

20

30

40

50

つの層が他の層よりも低い磁界で変化する場合磁気トンネル接合において予想される磁気抵抗のヒステリシス特性を示した - 図 4 (a) を参照。スイッチング磁界は、図 4 (b) に示される磁気ヒステリシスにおいて観察される抗電界と一致する。磁気抵抗のヒステリシスは、高い抵抗状態をもたらす低い磁界での G d N 層 (5 , 1 0) の主磁化方向の差に帰せられる。

【 0 1 3 8 】

異なった印加電流で測定されたトンネルバリアの温度依存抵抗が図 5 に示される。最小電流 (1 0 n A) で測定されたトンネルバリアの抵抗は G d N の抵抗率だけから計算される抵抗よりも (5 K で) 4 桁 ~ (3 0 0 K で) 6 桁大きく、それで磁気トンネル接合抵抗が G a N バリアによって支配されることは明らかである。しかしバルク G d N の抵抗率の特徴は磁気トンネル接合の性質に反映される。

10

【 0 1 3 9 】

確かに、G a N バリアを有さない他の点では同様な G d N 制御装置は、縦の輸送向きの非常に低い抵抗 (< 1 Ω) を有した。比較のために、v a n d e r P a u w 幾何学配置で測定された均質な G d N 薄膜の抵抗率が図 5 の挿入図に示される。均質な薄膜とトンネルバリアの両方の抵抗は、G d N 帯の交換分裂の開始によって生じさせられる G d N のキュリー温度付近の 5 0 K でのピークなど、同様な電子構造を示し、それは多数キャリア活性化エネルギーを低下させ、したがって抵抗を低下させる。T_c 付近のピークは抑えられ、より高い電流においてトンネル接合では全抵抗が減少するが、バルク G d N についてはこれらの効果は見られない。より大きい印加電流、したがって電圧について、帯分裂の相対的な効果は、印加電圧がバリア高さに与える効果と比較して低下する。明らかに、トンネル接合を通る輸送は、G a N 層の存在によって支配されるが、電極の状態密度もまた、デバイス特性に重要な効果をもつ。

20

【 0 1 4 0 】

本発明の様々な簡条は以下の簡条によって説明される：

1 . 第 1 の強磁性層と、第 2 の強磁性層と、第 1 および第 2 の強磁性層の各々の間の且つそれらと接触しているブロッキング層とを含む磁性材料において、第 1 および第 2 の強磁性層が異なった抗電界を有し、第 1 の強磁性層が第 1 の希土類窒化物材料を含み、第 2 の強磁性層が第 2 の希土類窒化物材料を含み、第 1 および第 2 の希土類窒化物材料が各々独立に窒化プラセオジウム (P r N) 、窒化ネオジウム (N d N) 、窒化サマリウム (S m N) 、窒化ユウロピウム (E u N) 、窒化ガドリニウム (G d N) 、窒化テルビウム (T b N) 、窒化ジスプロシウム (D y N) 、窒化ホルミウム (H o N) 、窒化エルビウム (E r N) 、窒化ツリウム (T m N) 、および窒化イッテルビウム (Y b N) 、ならびにそれらの任意の 2 つ以上の合金からなる群から選択される、磁性材料。

30

【 0 1 4 1 】

2 . 第 1 および第 2 の希土類窒化物材料が各々独立に P r N 、 N d N 、 S m N 、 G d N 、 T b N 、 D y N 、 H o N 、 E r N 、および T m N 、ならびにそれらの任意の 2 つ以上の合金からなる群から選択される、簡条 1 の磁性材料。

【 0 1 4 2 】

3 . 第 1 および第 2 の希土類窒化物材料が各々独立に N d N 、 S m N 、 E u N 、 G d N 、 D y N 、 H o N 、 E r N 、および Y b N 、ならびにそれらの任意の 2 つ以上の合金からなる群から選択される、簡条 1 の磁性材料。

40

【 0 1 4 3 】

4 . 第 1 および第 2 の希土類窒化物材料が各々独立に N d N 、 S m N 、 G d N 、 D y N 、 H o N 、および E r N 、ならびにそれらの任意の 2 つ以上の合金からなる群から選択される、簡条 1 ~ 3 の磁性材料。

【 0 1 4 4 】

5 . 第 1 および第 2 の希土類窒化物材料が各々独立に P r N 、 N d N 、 S m N 、 E u N 、 G d N 、 T b N 、 D y N 、 H o N 、 E r N 、 T m N 、および Y b N からなる群から選択される、簡条 1 の磁性材料。

50

【 0 1 4 5 】

6 . 第 1 および第 2 の希土類窒化物材料が各々独立に P r N、N d N、S m N、G d N、T b N、D y N、H o N、E r N、および T m N からなる群から選択される、箇条 1、2 および 5 の磁性材料。

【 0 1 4 6 】

7 . 第 1 および第 2 の希土類窒化物材料が各々独立に N d N、S m N、E u N、G d N、D y N、H o N、E r N、および Y b N からなる群から選択される、箇条 1、3 および 5 の磁性材料。

【 0 1 4 7 】

8 . 第 1 および第 2 の希土類窒化物材料が各々独立に N d N、S m N、G d N、D y N、H o N、および E r N からなる群から選択される、箇条 1 ~ 7 の磁性材料。 10

【 0 1 4 8 】

9 . 第 1 および第 2 の希土類窒化物材料の一方または両方が希土類窒化物合金である、箇条 1 ~ 4 の磁性材料。

【 0 1 4 9 】

1 0 . 希土類窒化物合金が、(S m , G d) N、(G d , H o) N、および (G d , D y) N からなる群から選択される、箇条 9 の磁性材料。

【 0 1 5 0 】

1 1 . 第 1 および第 2 の希土類窒化物材料の一方または両方が、1 つまたは複数の付加的なドーパントをさらに含む、箇条 1 ~ 1 0 の磁性材料。 20

【 0 1 5 1 】

1 2 . 第 1 および第 2 の希土類窒化物材料が、付加的なドーパントまたは他の不純物を約 10^{21} 原子 / cm^3 未満で含む、箇条 1 ~ 1 1 の磁性材料。

【 0 1 5 2 】

1 3 . 第 1 の強磁性層が、本質的に第 1 の希土類窒化物材料からなる、箇条 1 ~ 1 2 の磁性材料。

【 0 1 5 3 】

1 4 . 第 2 の強磁性層が、本質的に第 2 の希土類窒化物材料からなる、箇条 1 ~ 1 3 の磁性材料。

【 0 1 5 4 】

1 5 . より低い抗電界を有する強磁性層の抗電界が約 5 0 0 O e より小さい、箇条 1 ~ 1 4 の磁性材料。 30

【 0 1 5 5 】

1 6 . より高い抗電界を有する強磁性層の抗電界が、より低い抗電界を有する層の抗電界より少なくとも約 2 倍大きい、箇条 1 ~ 1 5 の磁性材料。

【 0 1 5 6 】

1 7 . 抗電界が約 7 0 K に測定される、箇条 1 ~ 1 6 の磁性材料。

【 0 1 5 7 】

1 8 . 抗電界が約 5 0 K に測定される、箇条 1 ~ 1 6 の磁性材料。

【 0 1 5 8 】

1 9 . 抗電界が約 4 K に測定される、箇条 1 ~ 1 6 の磁性材料。 40

【 0 1 5 9 】

2 0 . 第 1 および第 2 の強磁性層の間の抗電界の差が温度感受性である、箇条 1 ~ 1 9 の磁性材料。

【 0 1 6 0 】

2 1 . 第 2 の強磁性層の抗電界が第 1 の強磁性層の抗電界よりも高い、箇条 1 ~ 2 0 の磁性材料。

【 0 1 6 1 】

2 2 . 第 1 の強磁性層の抗電界が第 2 の強磁性層の抗電界よりも高い、箇条 1 ~ 2 0 の磁性材料。 50

【 0 1 6 2 】

2 3 . 第 1 の強磁性希土類窒化物材料が G d N を含む、箇条 1 ~ 2 1 の磁性材料。

【 0 1 6 3 】

2 4 . 第 1 および第 2 の強磁性希土類窒化物材料が G d N を含む、箇条 1 ~ 2 3 の磁性材料。

【 0 1 6 4 】

2 5 . 第 2 の強磁性希土類窒化物材料が S m N を含む、箇条 1 ~ 2 1 および 2 3 の磁性材料。

【 0 1 6 5 】

2 6 . 第 1 の強磁性希土類窒化物材料が G d N を含み、第 2 の強磁性希土類窒化物材料が S m N を含む、箇条 1 ~ 2 1、2 3 および 2 5 の磁性材料。 10

【 0 1 6 6 】

2 7 . 第 1 の強磁性希土類窒化物材料が S m N を含み、第 2 の強磁性希土類窒化物材料が G d N を含む、箇条 1 ~ 2 0 および 2 2 の磁性材料。

【 0 1 6 7 】

2 8 . ブロッキング層が第 1 の強磁性層とエピタキシャルである、箇条 1 ~ 2 7 の磁性材料。

【 0 1 6 8 】

2 9 . 第 2 の強磁性層がブロッキング層とエピタキシャルである、箇条 1 ~ 2 8 の磁性材料。 20

【 0 1 6 9 】

3 0 . ブロッキング層が第 1 の強磁性層とエピタキシャルであり、第 2 の強磁性層がブロッキング層とエピタキシャルである、箇条 1 ~ 2 9 の磁性材料。

【 0 1 7 0 】

3 1 . ブロッキング層が第 3 の希土類窒化物材料を含む、箇条 1 ~ 3 0 の磁性材料。

【 0 1 7 1 】

3 2 . ブロッキング層が L a N または L u N を含む、箇条 1 ~ 3 1 の磁性材料。

【 0 1 7 2 】

3 3 . ブロッキング層が本質的に L a N からなる、箇条 1 ~ 3 3 の磁性材料。

【 0 1 7 3 】

3 4 . ブロッキング層が本質的に L u N からなる、箇条 1 ~ 3 3 の磁性材料。 30

【 0 1 7 4 】

3 5 . ブロッキング層が、L a N、L u N、H f N、A l N、G a N、および (A l , I n , G a) N 合金からなる群から選択される、箇条 1 ~ 2 7 の磁性材料。

【 0 1 7 5 】

3 6 . ブロッキング層が G a N を含む、箇条 1 ~ 2 7 および 3 5 の磁性材料。

【 0 1 7 6 】

3 7 . 第 1 および第 2 の強磁性層が各々独立に厚さ約 5 ~ 2 0 0 n m である、箇条 1 ~ 3 6 の磁性材料。

【 0 1 7 7 】

3 8 . ブロッキング層が厚さ約 1 ~ 2 0 0 n m である、箇条 1 ~ 3 7 の磁性材料。 40

【 0 1 7 8 】

3 9 . 磁性材料が、第 1 の強磁性層と接触している基材をさらに含む、箇条 1 ~ 3 8 の磁性材料。

【 0 1 7 9 】

4 0 . 第 1 の強磁性層が基材とエピタキシャルである、箇条 3 9 の磁性材料。

【 0 1 8 0 】

4 1 . 第 1 の強磁性層が基材とエピタキシャルであり、ブロッキング層が第 1 の強磁性層とエピタキシャルである、箇条 3 9 または 4 0 の磁性材料。

【 0 1 8 1 】

42. 第1の強磁性層が基材とエピタキシャルであり、ブロック層が第1の強磁性層とエピタキシャルであり、第2の強磁性層がブロック層とエピタキシャルである、
箇条39～41の磁性材料。

【0182】

43. 基材が、第1の強磁性層と接触している緩衝層を含む、箇条39～42の磁性材料。

【0183】

44. 磁性材料が、第2の強磁性層と接触しているキャッピング層をさらに含む、箇条1～43の磁性材料。

【0184】

45. キャッピング層が第2の強磁性層とエピタキシャルである、箇条44の磁性材料。

【0185】

46. 第1の強磁性層と、第2の強磁性層と、第1および第2の強磁性層の各々の間の且つそれらと接触しているブロック層とを含む磁性材料において、第1および第2の強磁性層が異なった抗電界を有し、第1の強磁性層が第1の希土類窒化物材料を含み、第2の強磁性層が第2の希土類窒化物材料を含み、第1および第2の希土類窒化物材料が各々独立に窒化プラセオジウム(P r N)、窒化ネオジウム(N d N)、窒化サマリウム(S m N)、窒化ユウロピウム(E u N)、窒化ガドリニウム(G d N)、窒化テルビウム(T b N)、窒化ジスプロシウム(D y N)、窒化ホルミウム(H o N)、窒化エルビウム(E r N)、窒化ツリウム(T m N)、および窒化イッテルビウム(Y b N)、ならびにそれらの任意の2つ以上の合金からなる群から選択される磁性材料を作製する方法であって、

(a) 第1の希土類窒化物材料を含む第1の強磁性層を堆積させる工程と、

(b) 工程(a)において形成された第1の強磁性層上にブロック層を堆積させる工程と、

(c) 工程(b)において形成されたブロック層上に第2の希土類窒化物材料を含む第2の強磁性層を堆積させる工程とを含む方法。

【0186】

47. 第1および第2の希土類窒化物材料が各々独立にP r N、N d N、S m N、G d N、T b N、D y N、H o N、E r N、およびT m N、ならびにそれらの任意の2つ以上の合金からなる群から選択される、箇条46の方法。

【0187】

48. 第1および第2の希土類窒化物材料が各々独立にN d N、S m N、E u N、G d N、D y N、H o N、E r N、およびY b N、ならびにそれらの任意の2つ以上の合金からなる群から選択される、箇条46の方法。

【0188】

49. 第1および第2の希土類窒化物材料が各々独立にN d N、S m N、G d N、D y N、H o N、およびE r N、ならびにそれらの任意の2つ以上の合金からなる群から選択される、箇条46～48の方法。

【0189】

50. 第1および第2の希土類窒化物材料が各々独立にP r N、N d N、S m N、E u N、G d N、T b N、D y N、H o N、E r N、T m N、およびY b Nからなる群から選択される、箇条46の方法。

【0190】

51. 第1および第2の希土類窒化物材料が各々独立にP r N、N d N、S m N、G d N、T b N、D y N、H o N、E r N、およびT m Nからなる群から選択される、箇条46、47および50の方法。

【0191】

52. 第1および第2の希土類窒化物材料が各々独立にN d N、S m N、E u N、G d

10

20

30

40

50

N、DyN、HoN、ErN、およびYbNからなる群から選択される、箇条46、48および50の方法。

【0192】

53. 第1および第2の希土類窒化物材料が各々独立にNdN、SmN、GdN、DyN、HoN、およびErNからなる群から選択される、箇条46~52の方法。

【0193】

54. 第1および第2の希土類窒化物材料の一方または両方が希土類窒化物合金である、箇条46~49の方法。

【0194】

55. 希土類窒化物合金が、(Sm, Gd)N、(Gd, Ho)N、および(Gd, Dy)Nからなる群から選択される、箇条54の方法。 10

【0195】

56. 第1および第2の希土類窒化物材料の一方または両方が、1つまたは複数の付加的なドーパントをさらに含む、箇条46~55の方法。

【0196】

57. 第1および第2の希土類窒化物材料が、付加的なドーパントまたは他の不純物を約 10^{21} 原子/cm³未満で含む、箇条46~56の方法。

【0197】

58. 第1の強磁性層が、本質的に第1の希土類窒化物材料からなる、箇条46~57の方法。 20

【0198】

59. 第2の強磁性層が、本質的に第2の希土類窒化物材料からなる、箇条46~58の方法。

【0199】

60. より低い抗電界を有する強磁性層の抗電界が約500Oeより小さい、箇条46~59の方法。

【0200】

61. より高い抗電界を有する強磁性層の抗電界が、より低い抗電界を有する層の抗電界より少なくとも約2倍大きい、箇条46~60の方法。

【0201】

62. 抗電界が約70Kに測定される、箇条46~61の方法。 30

【0202】

63. 抗電界が約50Kに測定される、箇条46~61の方法。

【0203】

64. 抗電界が約4Kに測定される、箇条46~61の方法。

【0204】

65. 第1および第2の強磁性層の間の抗電界の差が温度感受性である、箇条46~64の方法。

【0205】

66. 第2の強磁性層の抗電界が第1の強磁性層の抗電界よりも高い、箇条46~65の方法。 40

【0206】

67. 第1の強磁性層の抗電界が第2の強磁性層の抗電界よりも高い、箇条46~65の方法。

【0207】

68. 第1の強磁性希土類窒化物材料がGdNを含む、箇条46~66の方法。

【0208】

69. 第1および第2の強磁性希土類窒化物材料がGdNを含む、箇条46~68の方法。

【0209】

70. 第2の強磁性希土類窒化物材料がSmNを含む、箇条46~66および68の方法。

【0210】

71. 第1の強磁性希土類窒化物材料がGdNを含み、第2の強磁性希土類窒化物材料がSmNを含む、箇条46~66、68および70の方法。

【0211】

72. 第1の強磁性希土類窒化物材料がSmNを含み、第2の強磁性希土類窒化物材料がGdNを含む、箇条46~65および67の方法。

【0212】

73. ブロッキング層が第1の強磁性層とエピタキシャルである、箇条46~72の方法。 10

【0213】

74. 第2の強磁性層がブロッキング層とエピタキシャルである、箇条46~73の方法。

【0214】

75. ブロッキング層が第1の強磁性層とエピタキシャルであり、第2の強磁性層がブロッキング層とエピタキシャルである、箇条46~74の方法。

【0215】

76. ブロッキング層が第3の希土類窒化物材料を含む、箇条46~75の方法。

【0216】

77. ブロッキング層がLaNまたはLuNを含む、箇条46~76の方法。 20

【0217】

78. ブロッキング層が本質的にLaNからなる、箇条46~77の方法。

【0218】

79. ブロッキング層が本質的にLuNからなる、箇条46~78の方法。

【0219】

80. ブロッキング層が、LaN、LuN、HfN、AlN、GaN、および(Al, In, Ga)N合金からなる群から選択される、箇条46~72の方法。

【0220】

81. ブロッキング層がGaNを含む、箇条46~72および80の方法。 30

【0221】

82. 第1および第2の強磁性層が各々独立に厚さ約5~200nmである、箇条46~81の方法。

【0222】

83. ブロッキング層が厚さ約1~200nmである、箇条46~82の方法。

【0223】

84. (a) 第1の希土類窒化物材料を含む第1の強磁性層を堆積させる工程と、
(b) 工程(a)において形成された第1の強磁性層上にブロッキング層を堆積させる工程と、

(c) 工程(b)において形成されたブロッキング層上に第2の希土類窒化物材料を含む第2の強磁性層を堆積させる工程とを含む、箇条1~38の磁性材料を作製するための方法。 40

【0224】

85. 第1の強磁性層が基材上に堆積される、箇条46~84の方法。

【0225】

86. 第1の強磁性層が基材とエピタキシャルである、箇条85の方法。

【0226】

87. 第1の強磁性層が基材とエピタキシャルであり、ブロッキング層が第1の強磁性層とエピタキシャルである、箇条85または86の方法。

【0227】

８８．第１の強磁性層が基材とエピタキシャルであり、ブロッキング層が第１の強磁性層とエピタキシャルであり、第２の強磁性層がブロッキング層とエピタキシャルである、箇条８５～８７の方法。

【０２２８】

８９．基材が、第１の強磁性層と接触している緩衝層を含む、箇条８５～８８の方法。

【０２２９】

９０．（ｄ）工程（ｃ）において形成された第２の強磁性層上にキャッピング層を堆積させる工程をさらに含む、箇条４６～８９の方法。

【０２３０】

９１．キャッピング層が第２の強磁性層とエピタキシャルである、箇条９０の方法。

10

【０２３１】

９２．層が超高真空技術を使用して順次に堆積される、箇条４６～９１の方法。

【０２３２】

９３．超高真空技術が、物理的蒸着（ＰＶＤ）、パルス化レーザー堆積（ＰＬＤ）、ＤＣ／ＲＦマグネトロンスパッタリング、熱的蒸発、および分子線エピタキシー（ＭＢＥ）からなる群から選択される、箇条９２の方法。

【０２３３】

９４．層がＭＢＥによって順次に堆積される、箇条４６～９３の方法。

【０２３４】

９５．希土類と窒素供給源とを組み合わせることによって希土類窒化物材料の１つまたは複数がＭＢＥによって堆積される、箇条４６～９１の方法。

20

【０２３５】

９６．窒素供給源が、高純度分子窒素、アンモニア、および活性窒素の供給源、またはそれらの任意の２つ以上の混合物からなる群から選択される、箇条９５の方法。

【０２３６】

９７．活性窒素の供給源が窒素プラズマまたはイオン化窒素である、箇条９６の方法。

【０２３７】

９８．窒素供給源が高純度分子窒素である、箇条９７の方法。

【０２３８】

９９．窒素供給源フラックスが、希土類フラックスよりも少なくとも１００倍大きい、箇条９５～９８の方法。

30

【０２３９】

１００．窒素供給源の分圧またはビーム等価圧力（ＢＥＰ）が約 10^{-5} ～ 10^{-3} トルである、箇条９５～９９の方法。

【０２４０】

１０１．希土類のＢＥＰが約 10^{-8} ～ 10^{-7} トルである、箇条９５～１００の方法。

【０２４１】

１０２．層が約０．０１～１ｎｍ／秒の速度で堆積される、箇条４６～１０１の方法。

【０２４２】

40

１０３．層が周囲温度または高温で堆積される、箇条４６～１０２の方法。

【０２４３】

１０４．層の１つまたは複数が約５００～９００の温度で堆積される、箇条４６～１０３の方法。

【０２４４】

１０５．層の１つまたは複数が約５００～８００の温度で堆積される、箇条４６～１０４の方法。

【０２４５】

１０６．箇条４６～１０５の方法によって調製されるとき磁性材料。

【０２４６】

50

107. 簡条46～105の方法によって得ることができる磁性材料。

【0247】

108. 簡条1～45、106および107の磁性材料と、任意選択により、電気接点を含む磁気デバイス。

【0248】

109. 基材および/またはキャッピング層が電気接点を提供する、簡条108の磁気デバイス。

【0249】

本発明の範囲を上記の実施例だけに限定することを意図しない。当業者によって理解されるように、添付した特許請求の範囲に示される本発明の範囲から逸脱せずに多くの変型が可能である。

10

【図1】

1 (磁性材料)
25 (キャッピング層; 任意選択的)
10 (第2の強磁性層)
15 (ブロッキング層)
5 (第1の強磁性層)
20 (基材; 任意選択的)

図1

【図2】

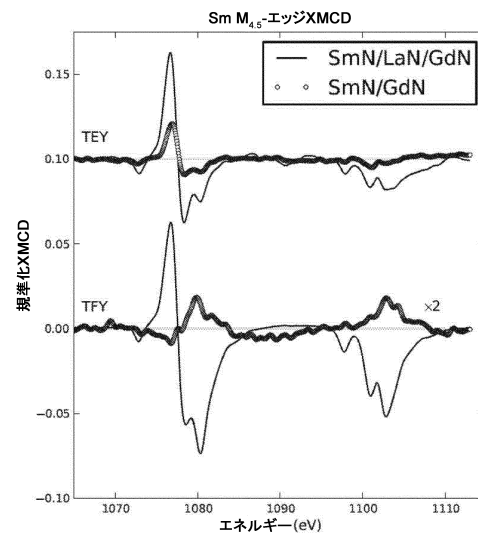


図2

【図 3】

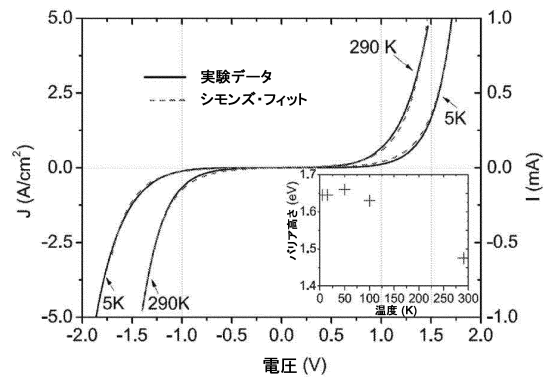


図 3

【図 4】

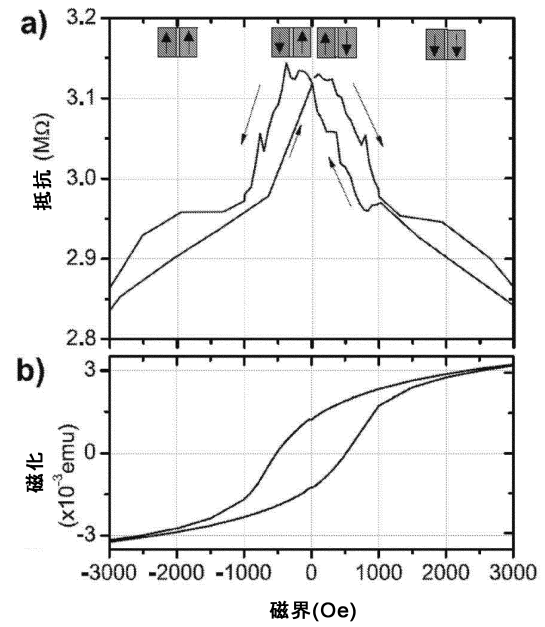


図 4

【図 5】

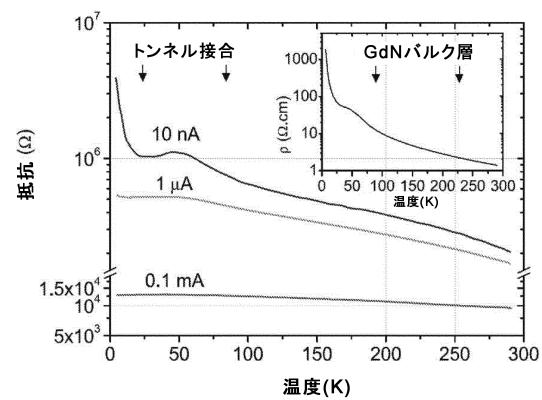


図 5

フロントページの続き

- (51)Int.Cl. F I
H 0 1 L 43/08 (2006.01) H 0 1 L 43/08 M
H 0 1 L 43/10 (2006.01) H 0 1 L 43/12
H 0 1 L 43/12 (2006.01)
- (73)特許権者 516294540
ルック ベンジャミン ジョン
ニュージーランド国 5 0 1 0 ロワー ハット ワIFEトゥ ワイトゥイ クレセント 9
- (73)特許権者 516294551
トロダール ハリー ジョセフ
ニュージーランド国 7 1 7 5 アッパー モウテレ ジョンストン ループ 2 7
- (73)特許権者 516294562
マクナルティ ジェイムズ フランシス
ニュージーランド国 6 0 1 1 ウェリントン テ アロ キューバ ストリート 3 / 1 0 7
- (74)代理人 110000796
特許業務法人三枝国際特許事務所
- (72)発明者 グランビル サイモン エドワード
ニュージーランド国 6 0 1 2 ウェリントン ケルバーン ケルバーン パレード 1 3 2 ビー
- (72)発明者 アントン エヴァ - マリア ヨハンナ
ニュージーランド国 6 0 1 1 ウェリントン マウント ビクトリア ブローラム ストリート
3 / 5 8
- (72)発明者 ナタリ フランク
ニュージーランド国 6 0 3 7 ウェリントン チャートン パーク アールストーク クレセン
ト 8 4 エー
- (72)発明者 ルック ベンジャミン ジョン
ニュージーランド国 5 0 1 0 ロワー ハット ワIFEトゥ ワイトゥイ クレセント 9
- (72)発明者 トロダール ハリー ジョセフ
ニュージーランド国 7 1 7 5 アッパー モウテレ ジョンストン ループ 2 7
- (72)発明者 マクナルティ ジェイムズ フランシス
ニュージーランド国 6 0 1 1 ウェリントン テ アロ キューバ ストリート 3 / 1 0 7

審査官 鈴木 孝章

- (56)参考文献 特開2015-002297(JP,A)
特開2008-112845(JP,A)
特開2006-080379(JP,A)
特表2017-511294(JP,A)

(58)調査した分野(Int.Cl., DB名)

H 0 1 F 1 0 / 1 8
H 0 1 F 1 0 / 3 0
H 0 1 F 4 1 / 1 8
H 0 1 F 4 1 / 2 0
H 0 1 F 4 1 / 3 0
H 0 1 L 4 3 / 0 8
H 0 1 L 4 3 / 1 0