

(12) 特許協力条約に基づいて公開された国際出願

(19) 世界知的所有権機関
国際事務局

(43) 国際公開日
2012 年 11 月 29 日(29.11.2012)



(10) 国際公開番号

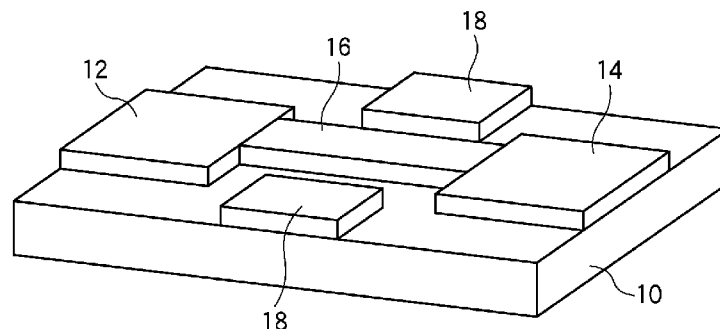
WO 2012/160663 A1

- (51) 国際特許分類:
H01L 29/66 (2006.01) H01L 29/417 (2006.01)
H01L 21/28 (2006.01) H01L 29/78 (2006.01)
H01L 21/336 (2006.01)
- (21) 国際出願番号: PCT/JP2011/061958
- (22) 国際出願日: 2011 年 5 月 25 日(25.05.2011)
- (25) 国際出願の言語: 日本語
- (26) 国際公開の言語: 日本語
- (71) 出願人 (米国を除く全ての指定国について): 富士通株式会社 (FUJITSU LIMITED) [JP/JP]; 〒2118588 神奈川県川崎市中原区上小田中 4 丁目 1 番 1 号 Kanagawa (JP).
- (72) 発明者: および
- (75) 発明者/出願人 (米国についてのみ): 大淵 真理 (OHFUCHI, Mari) [JP/JP]; 〒2118588 神奈川県川崎市中原区上小田中 4 丁目 1 番 1 号 富士通株式会社内 Kanagawa (JP).
- (74) 代理人: 北野 好人 (KITANO, Yoshihito); 〒1600015 東京都新宿区大京町 9 番地 エクシード四谷 2 階 Tokyo (JP).
- (81) 指定国 (表示のない限り、全ての種類の国内保護が可能): AE, AG, AL, AM, AO, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BH, BR, BW, BY, BZ, CA, CH, CL, CN, CO, CR, CU, CZ, DE, DK, DM, DO, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT, HN, HR, HU, ID, IL, IN, IS, JP, KE, KG, KM, KN, KP, KR, KZ, LA, LC, LK, LR, LS, LT, LU, LY, MA, MD, ME, MG, MK, MN, MW, MX, MY, MZ, NA, NG, NI, NO, NZ, OM, PE, PG, PH, PL, PT, RO, RS, RU, SC, SD, SE, SG, SK, SL, SM, ST, SV, SY, TH, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VC, VN, ZA, ZM, ZW.
- (84) 指定国 (表示のない限り、全ての種類の広域保護が可能): ARIPO (BW, GH, GM, KE, LR, LS, MW, MZ, NA, SD, SL, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), ユーラシア (AM, AZ, BY, KG, KZ, MD, RU, TJ, TM), ヨーロッパ (AL, AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HR, HU, IE, IS, IT, LT, LU, LV, MC, MK, MT, NL, NO, PL, PT, RO, RS, SE, SI, SK, SM, TR), OAPI (BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, ML, MR, NE, SN, TD, TG).
- 添付公開書類:
— 国際調査報告 (条約第 21 条(3))

(54) Title: SPIN FILTER AND DRIVING METHOD THEREOF

(54) 発明の名称: スピンフィルタ及びその駆動方法

[図1]



(57) Abstract: This spin filter has: a first electrode that is formed using a zigzag graphene ribbon, which comprises an even number of rows of carbon atoms extending in a first direction, and which exhibits a magnetic moment in a second direction intersecting with the first direction; a second electrode that is formed using the zigzag graphene ribbon, which comprises the even number of rows of carbon atoms extending in the first direction, and which exhibits a magnetic moment in the second direction; and a channel region that is provided between the first electrode and the second electrode, and which has an energy level that allows up-spin electrons or down-spin electrons to pass.

(57) 要約: 第1の方向に延在する偶数列のジグザグラフェンリボンにより形成され、第1の方向と交差する第2の方向の磁気モーメントを有する第1の電極と、第1の方向に延在する偶数列のジグザグラフェンリボンにより形成され、第2の方向の磁気モーメントを有する第2の電極と、第1の電極と第2の電極との間に配置され、アップスピンをもつ電子又はダウンスピンをもつ電子を通過させるエネルギー準位を有するチャネル領域とを有する。



WO 2012/160663 A1

明 細 書

発明の名称： スピンフィルタ及びその駆動方法

技術分野

[0001] 本発明は、ジグザググラフェンリボンを用いたスピンフィルタ及びその駆動方法に関する。

背景技術

[0002] シリコンを利用したCMOS技術は微細化の限界に近づきつつあり、その寿命を延ばすためのチャネル代替材料が模索されている。その最有力候補として、カーボンナノチューブやグラフェンを代表とするナノカーボン材料が注目されており、種々の研究・開発が行われている。

[0003] ナノカーボン材料の研究・開発を通して、スピントロニクスなどのCMOS技術を超えた技術に繋がる新しい情報処理概念の発見がなされることが期待されている。これまでも実際、カーボンナノチューブやグラフェンへの室温でのスピン注入や数 μm の長いスピン緩和など、スピントロニクス材料に適した種々の性質が観測されている。

[0004] スピンフィルタは、スピン分極した電流を得るためのスピントロニクスにおける基礎デバイスと考えられている。近年、スピンフィルタとして、磁気モーメントをもつ偶数列のジグザググラフェンナノリボンを利用したスピンフィルタが提案されている。磁気モーメントをもつ偶数列のジグザググラフェンナノリボンにより2つの電極を形成し、これら電極の磁気モーメントの向きを互いに反平行にすることにより、一方の向きのスピンをもつ電子だけが伝導することのできるスピンフィルタを形成することができる。

先行技術文献

非特許文献

[0005] 非特許文献1：Taisuke Ozaki et al., "Dual spin filter effect in a zigzag graphene nanoribbon", Physical Review B 81, 074522, 2010

非特許文献2：Chuanhong Jin et al., "Deriving carbon atomic chains fro

m graphene”, Physical Review Letters 102, 205501, 2009

非特許文献3: Jinming Cai et al., “Atomically precise bottom-up fabrication of graphene nanoribbons”, Nature, Vol. 466, July 22, 2010

発明の概要

発明が解決しようとする課題

[0006] しかしながら、上記従来のスピントリカにおいて、2つの電極に逆向きの磁気モーメントを与えることが必要であり、製造が容易でないことが想像される。また、スピントリカとしての利用性を向上するためには、アップスピンをもつ電子及びダウンスピンをもつ電子のいずれかを任意に選択して伝導できることが望ましい。

[0007] 本発明の目的は、容易に製造しうるスピントリカを提供することにある。また、本発明の他の目的は、アップスピンをもつ電子及びダウンスピンをもつ電子のいずれかを選択して伝導しうるスピントリカの駆動方法を提供することにある。

課題を解決するための手段

[0008] 実施形態の一観点によれば、第1の方向に延在する偶数列のジグザググラフェンリボンにより形成され、第1の方向と交差する第2の方向の磁気モーメントを有する第1の電極と、前記第1の方向に延在する偶数列のジグザググラフェンリボンにより形成され、前記第2の方向の磁気モーメントを有する第2の電極と、前記第1の電極と前記第2の電極との間に配置され、アップスピンをもつ電子又はダウンスピンをもつ電子を通過させるエネルギー準位を有するチャネル領域とを有するスピントリカが提供される。

[0009] また、実施形態の他の観点によれば、スピントリカの駆動方法であって、前記スピントリカは、第1の方向に延在する偶数列のジグザググラフェンリボンにより形成され、第1の方向と交差する第2の方向の磁気モーメントを有する第1の電極と、前記第1の方向に延在する偶数列のジグザググラフェンリボンにより形成され、前記第2の方向の磁気モーメントを有する第2の電極と、前記第1の電極と前記第2の電極との間に配置され、アップス

ピンをもつ電子又はダウンスピンをもつ電子を許容するエネルギー準位を有するチャネル領域と、前記チャネル領域に電界を印加するゲート電極とを有し、前記第 1 の電極と前記第 2 の電極との間に電位差を与えることにより、前記第 1 の電極及び前記第 2 の電極に、アップスピンをもつ電子だけが通過する第 1 のエネルギー領域と、ダウンスピンをもつ電子だけが通過する第 2 のエネルギー領域とを形成し、前記ゲート電極に印加する電圧により、前記チャネル領域の前記エネルギー準位を、前記第 1 のエネルギー領域又は前記第 2 のエネルギー領域に移動するスピントラップの駆動方法が提供される。

発明の効果

- [0010] 開示のスピントラップによれば、2つの電極を同じ方向の磁気モーメントを有する偶数列のジグザググラフェンリボンにより形成するので、外部磁場等によってこれら電極に容易に磁気モーメントを与えることができる。
- [0011] また、開示のスピントラップの駆動方法によれば、アップスピンをもつ電子及びダウンスピンをもつ電子のいずれかを選択して通過させることができる。

図面の簡単な説明

- [0012] [図1] 図 1 は、一実施形態によるスピントラップの構造を示す斜視図である。
- [図2] 図 2 は、ジグザググラフェンナノリボンの構造を示す図である。
- [図3] 図 3 は、同じ方向の磁気モーメントを与えた偶数列のグラフェンナノリボンによりソース領域及びドレイン領域を形成した構造体を示す図である。
- [図4] 図 4 は、図 3 の構造体におけるスピン分極電流とバイアス電圧との関係を示す図である。
- [図5] 図 5 は、図 3 の構造体におけるコンダクタンスとエネルギーとの関係を示す図である。
- [図6] 図 6 は、図 3 の構造体のエネルギーバンド構造を示す図である。
- [図7] 図 7 は、図 3 の構造体の動作を説明する図（その 1）である。
- [図8] 図 8 は、図 3 の構造体の動作を説明する図（その 2）である。
- [図9] 図 9 は、一実施形態によるスピントラップの動作を説明する図（その 1）

)である。

[図10]図10は、一実施形態によるスピントラップの動作を説明する図（その2）である。

[図11]図11は、一実施形態によるスピントラップのチャネル領域を形成する物質の一例を示す図である。

[図12]図12は、図11のチャネル領域を形成する物質のエネルギーバンド構造を示す図である。

[図13]図13は、チャネル領域を形成する物質として図11の構造体を用いた一実施形態によるスピントラップにおけるスピントラップ電流とバイアス電圧との関係を示す図である。

[図14]図14は、チャネル領域を形成する物質として図11の構造体を用いた一実施形態によるスピントラップの動作を説明する図（その1）である。

[図15]図15は、チャネル領域を形成する物質として図11の構造体を用いた一実施形態によるスピントラップの動作を説明する図（その2）である。

[図16]図16は、一実施形態によるスピントラップのチャネル領域を形成する物質の他の例を示す図である。

発明を実施するための形態

[0013] 一実施形態によるスピントラップ及びその製造方法について図1乃至図16を用いて説明する。

[0014] はじめに、本実施形態によるスピントラップの構造について図1及び図2を用いて説明する。図1は、本実施形態によるスピントラップの構造を示す斜視図である。図2は、ジグザググラフェンナノリボンの構造を示す図である。

[0015] 本実施形態によるスピントラップは、図1に示すように、第1の電極としてのソース領域12と、第2の電極としてのドレイン領域14と、ソース領域12とドレイン領域14との間に配置されたチャネル領域16とを有している。また、チャネル領域16から離間して隣接配置されたゲート電極18を有している。

- [0016] ソース領域 1 2 及びドレイン領域 1 4 は、互いに同じ方向の磁気モーメントをもつ偶数列のジグザググラフェンナノリボンにより形成されている。
- [0017] ジグザググラフェンナノリボンとは、長辺端部の炭素原子がジグザグに配列された 1 次元状（擬 1 次元）のグラフェンである。例えば図 2 に示すように、X 方向に延在する 1 次元状のグラフェンにおいて、端部（図中、点線で囲った領域を参照）の炭素原子が X 方向に沿って交互にジグザグに配置されたものである（図中、太線を参照）。
- [0018] 偶数列とは、X 方向に沿ってジグザグに配置された炭素原子の列が、Y 方向に偶数列存在することを意味する。図 2 に示すジグザググラフェンナノリボンは、X 方向に沿ってジグザグに配置された炭素原子の列が、Y 方向に n 列存在する場合を示している。偶数列のジグザググラフェンナノリボンは、 n が偶数のグラフェンナノリボンである。ソース領域 1 2 を形成するジグザググラフェンナノリボンにおける炭素原子の列数と、ドレイン領域 1 4 を形成するジグザググラフェンナノリボンにおける炭素原子の列数とは、いずれも偶数列であれば、同じでも異なってもよい。
- [0019] グラフェンは、ナノサイズのリボン状にすることによって通常のグラフェンとは異なる性質を発現することが知られている。このような構造のグラフェンが、グラフェンナノリボンと呼ばれている。グラフェンナノリボンの幅について特に定義はないが、例えば Y 方向の幅が 100 nm 程度以下のグラフェンリボンが該当する。幅 100 nm のグラフェンリボンの場合、X 方向に沿ってジグザグに配置された炭素原子の列の数 n が約 470 程度となる。ナノオーダーの幅を有するグラフェンリボンは、通常のグラフェンとは異なる特性を有している。
- [0020] ソース領域 1 2 及びドレイン領域 1 4 のジグザググラフェンナノリボンは、グラフェンリボンの延在する方向と垂直な方向（図 2 の Y 方向に相当）の磁気モーメントを有している。ソース領域 1 2 とドレイン領域 1 4 とは、磁気モーメントの向きが同じ（平行）になるように配置される。
- [0021] ソース領域 1 2 及びドレイン領域 1 4 の磁気モーメントは、ソース領域 1

2 及びドレイン領域 1 4 の近傍に配置された強磁性体からの外部磁場により、或いは、スピン注入などにより与えることができる。

[0022] チャネル領域 1 6 は、ソース領域 1 2 とドレイン領域 1 4 との間に配置され、アップスピンをもつ電子だけが通過するエネルギー領域又はダウンスピンをもつ電子だけが通過するエネルギー領域にエネルギー準位を有する物質により形成されている。このような物質によりチャネル領域 1 6 を形成することにより、アップスピンをもつ電子又はダウンスピンをもつ電子を選択的に通過させることができる。

[0023] チャネル領域 1 6 を形成する物質の一例としては、例えば、ソース領域 1 2 及びドレイン領域 1 4 のジグザググラフェンナノリボンのフェルミ準位付近 ($\sim 1 \text{ eV}$ 程度) にエネルギー準位を有する物質が挙げられる。なお、チャネル領域 1 6 を形成する物質については、後述する動作説明のなかで詳しく説明する。

[0024] ゲート電極 1 8 は、チャネル領域 1 6 に電界を加えてチャネル領域 1 6 のエネルギー準位を変化するためのものである。図 1 ではチャネル領域 1 6 を挟むように 2 つのゲート電極 1 8 を設けているが、必ずしも 2 つ設ける必要はなく、一方の側のみにゲート電極 1 8 を設けるようにしてもよい。また、平面的に見てチャネル領域 1 6 に隣接してゲート電極 1 8 を設ける必要はなく、チャネル領域 1 6 の上及び／又は下にゲート電極 1 8 を配置するようにしてもよい。アップスピンをもつ電子又はダウンスピンをもつ電子のいずれか一方のみを通過させるスピントラップを形成する場合にあっては、必ずしもゲート電極 1 8 は必要ではない。

[0025] 次に、同じ方向の磁気モーメントをもつソース領域 1 2 及びドレイン領域 1 4 を接合したときの基本的な動作について、図 3 乃至図 8 を用いて説明する。

[0026] 図 3 は、同じ方向の磁気モーメントを与えた偶数列のグラフェンナノリボンによりソース領域及びドレイン領域を形成した構造体を示す図である。図 4 は、図 3 の構造体におけるスピン分極電流とバイアス電圧との関係を示す

図である。図5は、図3の構造体におけるコンダクタンスとエネルギーとの関係を示す図である。図6は、図3の構造体のエネルギーバンド構造を示す図である。図7及び図8は、図3の構造体の動作を説明する図である。

[0027] 図3に示すように、6列のジグザググラフェンナノリボンによってソース領域12、チャネル領域16及びドレイン領域14を形成し、ソース領域12及びドレイン領域14に同じ方向の磁気モーメントを与えた構造体を想定する。ジグザググラフェンナノリボンの端部は、水素により終端されているものとする。

[0028] 図4は、図3に示す構造体について、ソース領域12とドレイン領域14との間にバイアス電圧 V_{SD} を印加したときのスピン分極電流を、第一原理に基づく非平衡グリーン関数法を用いてシミュレーションした結果を示すグラフである。また、図5は、図3に示す構造体について、コンダクタンスとエネルギーとの関係を、第一原理に基づく非平衡グリーン関数法を用いてシミュレーションした結果を示すグラフである。

[0029] 図4に示すように、ソース領域12とドレイン領域14との間にバイアス電圧 V_{SD} を印加すると、ソース領域12とドレイン領域14との間を、アップスピンをもつ電子とダウンスピンをもつ電子の双方が伝導する。すなわち、図3に示す構造体は、スピントリカとして機能しない。

[0030] しかしながら、各バイアス電圧 V_{SD} における電流値は、バイアス電圧 V_{SD} に相当するエネルギー範囲（図5の網掛け部分に相当）においてコンダクタンスを積分したものである。コンダクタンスが有限の値をもつエネルギー領域は、図5に示すように、スピンの向きによって異なっている。これは、価電子帯はリボンの幅の中心に対して反対称な電子状態（ π 状態）を有し、伝導帯はリボンの幅の中心に対して対称な電子状態（ π^* 状態）を有するという、偶数列ジグザググラフェンナノリボンに特有の電子状態に起因するものである。

[0031] 図6は、図3に示す構造体のエネルギーバンド構造を示す図である。図6では、ソース領域12及びドレイン領域14を想定した2つのバンド構造を

、X点を中心にして対称に描いている。

[0032] 図中、実線はダウンスピンの π 状態のバンド構造を表し、点線はダウンスピンの π^* 状態のバンド構造を表し、一点鎖線はアップスピンの π 状態のエネルギーバンド構造を表し、二点鎖線はアップスピンの π^* 状態のエネルギーバンド構造を表している。

[0033] 図6に示すように、図3に示す構造体のエネルギーバンドは、フェルミ準位（エネルギー＝0）近傍において交換分裂し、アップスピンバンドのエネルギーがダウンスピンバンドのエネルギーよりも低くなっている。

[0034] 図7及び図8は、ソース領域12とドレイン領域14との間に0.6Vのバイアス電圧 V_{SD} を印加したときのエネルギーバンド構造及びコンダクタンスを示す図である。図7はアップスピンをもつ電子の状態を示し、図8はダウンスピンをもつ電子の状態を示している。なお、図7及び図8では、チャネル領域16を省略している。

[0035] ソース領域12及びドレイン領域14がアップスピンの向きに磁気モーメントをもつ場合、図7に示すように、積分範囲（図中、網掛け部分）の高エネルギー側にアップスピンをもつ電子だけが通過するエネルギー領域（図中、領域A）が現れる。また、積分範囲（図中、網掛け部分）の低エネルギー側には、図8に示すように、ダウンスピンをもつ電子だけが通過するエネルギー領域（図中、領域B）が現れる。磁気モーメントが逆向きの場合は、領域Aを通過するスピンの向きと領域Bを通過するスピンの向きとの関係が上記とは逆になる。

[0036] 次に、本実施形態によるスピントフィルタの動作について図9乃至図16を用いて説明する。

[0037] 図9及び図10は、本実施形態によるスピントフィルタの動作を説明する図である。図11は、本実施形態によるスピントフィルタのチャネル領域の一例を示す図である。図12は、図11のチャネル領域のエネルギーバンド構造を示す図である。図13は、図11のチャネル領域を用いた本実施形態によるスピントフィルタにおけるスピン分極電流とバイアス電圧との関係を示す図

である。図 1 4 及び図 1 5 は、図 1 1 のチャンネル領域を用いた本実施形態によるスピントフィルタの動作を説明する図である。図 1 6 は、本実施形態によるスピントフィルタのチャンネル領域の他の例を示す図である。

[0038] 本実施形態によるスピントフィルタでは、図 3 の構造体が有する上述のような特性を利用してアップスピンをもつ電子又はダウンスピンをもつ電子を選択的に通過させるために、チャンネル領域 1 6 を以下のような物質により形成する。

[0039] すなわち、本実施形態によるスピントフィルタでは、チャンネル領域 1 6 を形成する物質として、アップスピンをもつ電子だけが通過するエネルギー領域又はダウンスピンをもつ電子だけが通過するエネルギー領域のいずれか一方にエネルギー準位を有する物質により形成する。

[0040] 例えば図 9 に示すように、領域 A のエネルギー領域内にエネルギー準位 E_c を有し、領域 B のエネルギー領域内にエネルギー準位をもたない物質を用いる。この場合、ダウンスピンをもつ電子はチャンネル領域 1 6 を通過できず、アップスピンをもつ電子だけがチャンネル領域 1 6 を通過することができる。つまり、アップスピンをもつ電子だけを通過するスピントフィルタとして機能する。

[0041] 或いは、本実施形態によるスピントフィルタでは、チャンネル領域 1 6 を形成する物質として、例えば図 1 0 に示すように、領域 B のエネルギー領域内にエネルギー準位 E_c を有し、領域 A のエネルギー領域内にエネルギー準位をもたない物質を用いる。この場合、アップスピンをもつ電子はチャンネル領域 1 6 を通過できず、ダウンスピンをもつ電子だけがチャンネル領域 1 6 を通過することができる。つまり、ダウンスピンをもつ電子だけを通過するスピントフィルタとして機能する。

[0042] このようにしてチャンネル領域 1 6 を形成する物質を変えることにより、フィルタリングするスピンの種類を変えることができる。

[0043] チャンネル領域 1 6 は、必ずしも磁気モーメントをもつ必要はなく、領域 A 又は領域 B のいずれかのエネルギー領域内にエネルギー準位 E_c を有するも

のであれば、アップスピンとダウンスピンのエネルギー準位が縮退していてもよい。

[0044] チャネル領域 16 を形成する物質は、必ずしも領域 A 又は領域 B のいずれかのエネルギー領域内にエネルギー準位 E_c を有する物質である必要はない。チャネル領域 16 に印加する電界により、チャネル領域 16 のエネルギー準位 E_c を領域 A 又は領域 B のいずれかのエネルギー領域内に移動することもできる。チャネル領域 16 に印加する電界は、ゲート電極 18 に印加するゲート電圧 V_g によって制御することができる。

[0045] また、ゲート電極 18 に印加するゲート電圧 V_g を適宜制御することにより、アップスピンをもつ電子又はダウンスピンをもつ電子のいずれかを選択的に通過させることも可能である。

[0046] 例えば、チャネル領域 16 として、磁気モーメントをもたず、両スピンのエネルギー準位が縮退している状態の物質を想定する。ゲート電極 18 に電圧を印加しないとき、チャネル領域 16 のエネルギー準位 E_c が領域 A のエネルギー領域内にあるものとする。

[0047] このような場合、ゲート電極 18 にゲート電圧 V_g を印加しない状態では、アップスピンをもつ電子だけが通過するスピントラップとして機能する（図 9 参照）。一方、ゲート電極 18 にゲート電圧 V_g を印加してチャネル領域 16 のエネルギー準位を領域 B のエネルギー範囲内まで押し下げることにより、ダウンスピンをもつ電子だけが通過するスピントラップとして機能する（図 10 参照）。

[0048] なお、一般的な電子デバイスの動作電圧を考慮すると、ゲート電極 18 に印加する電圧 V_g が ± 1 V 程度であることが望ましい。

[0049] このように、ゲート電極 18 に印加するゲート電圧により、アップスピンをもつ電子又はダウンスピンをもつ電子のいずれかを選択的に通過するスピントラップとなる。

[0050] チャネル領域 16 を形成する物質は、上述の条件を満たす物質であれば、特に限定されるものではない。

- [0051] このようなチャネル領域 16 を形成する物質としては、例えば、偶数列のグラフェンナノリボンを屈曲した構造体を用いることができる。例えば図 1 1 に示すように、ソース領域 12 とドレイン領域 14 との間の部分のグラフェンナノリボンを折り曲げてチャネル領域 16 とすることができる。
- [0052] 図 1 2 は、折り曲げた偶数列のグラフェンナノリボンのエネルギーバンド構造を示すグラフである。図 1 2 (a) がアップスピンをもつ電子の状態を示し、図 1 2 (b) がダウンスピンをもつ電子の状態を示している。
- [0053] 図 1 2 に示すように、偶数列のグラフェンナノリボンを屈曲した構造体は、フェルミ準位直上に、すなわち領域 B のエネルギー範囲内に、ダウンスピンをもつ電子だけが状態をもつエネルギー準位を有している（図 1 2 (b) の※ 1 部分を参照）。
- [0054] 図 1 3 は、図 1 1 に示す構造体においてソース領域 12 とドレイン領域 14 との間にバイアス電圧 V_{SD} を印加したときのスピン分極電流を、第一原理に基づく非平衡グリーン関数法を用いてシミュレーションした結果を示すグラフである。
- [0055] チャネル領域 16 として偶数列のグラフェンナノリボンを屈曲した構造体は、図 1 3 に示すように、ダウンスピンをもつ電子を通過するが、アップスピンをもつ電子を通過しない。すなわち、ダウンスピンをもつ電子だけが通過するスピンフィルタを実現できることが検証できた。これは、図 1 4 に示すように、ダウンスピンをもつ電子のエネルギー準位 E_{c1} が、領域 B のエネルギー範囲に位置しているためである。
- [0056] また、図 1 2 (b) の※ 1 部分に示すように近傍に複数のエネルギー準位が存在する場合、ゲート電極 18 に印加する電圧によって、領域 B のエネルギー領域にかかるエネルギー準位の数を変えることができる。これにより、ソース領域 12 とドレイン領域 14 との間に流れるスピン分極電流の大きさを変化することができる。すなわち、ゲート電極 18 に印加する電圧により、スピン分極電流の大きさを制御することができる。
- [0057] また、ゲート電極 18 に電圧を印加してチャネル領域 16 のエネルギー準

位を押し下げると、ダウンスピンの状態は領域Bから離れ、逆にアップスピンをもつ電子のエネルギー準位 E_{c2} が領域Aに入るため、アップスピンをもつ電子だけが通過するスピントラップを実現することができる。アップスピンをもつ電子のエネルギー準位 E_{c2} は、例えば図12(a)の※2部分のエネルギー準位が該当する。

[0058] 或いは、例えば図16に示すように、ソース領域12を形成する偶数列のグラフェンナノリボンとドレイン領域14を形成する偶数列のグラフェンナノリボンとの間を、炭素単原子又はグラフェンナノリボンの幅より幅の細いリボンのチャネル領域16により接続するようにしてもよい。

[0059] 単原子や細いリボンでは、2つのスピンの縮退しており、ソース領域12及びドレイン領域14を形成するグラフェンナノリボンのフェルミ準位近傍に現れる。

[0060] この場合、チャネル領域16のエネルギー準位が領域Bのエネルギー範囲内となる小さいゲート電圧 V_g を印加することにより、ダウンスピンだけが通過するスピントラップを実現できる。また、チャネル領域16のエネルギー準位が領域Aのエネルギー範囲内となる大きいゲート電圧 V_g を印加することにより、アップスピンだけが通過するスピントラップを実現できる。

[0061] 次に、本実施形態によるスピントラップの製造方法について図1を参照して説明する。

[0062] まず、基板10上に、シリコンカーバイド(SiC)膜を形成し、例えば1350℃の温度で熱処理を行う。これにより、シリコンカーバイド膜の表面のシリコンが蒸発し、シリコンカーバイド膜の表面に1層のグラフェンシートが形成される。グラフェンシートの原子配列は、シリコンカーバイドの結晶方位を制御することにより、決定することができる。

[0063] 或いは、コバルト(Co)、ニッケル(Ni)、鉄(Fe)、銅(Cu)等の触媒金属を利用したCVD法によりグラフェンシートを合成し、基板10上に合成したグラフェンシートを転写するようにしてもよい。グラフェンシートの原子配列は、電子顕微鏡や走査顕微鏡を用いて確認することができ

る。

[0064] 次いで、基板 10 に形成したグラフェンシート上に、レジストを塗布し、フォトリソグラフィや電子線リソグラフィにより、ソース領域 12、ドレイン領域 14、チャネル領域 16 及びゲート電極 18 の形状にレジストをパターンニングする。

[0065] 次いで、このレジストをマスクとして、酸素 (O_2) ガスを用いた反応性イオンエッチングやアルゴン (Ar) ガスを用いたミリング等によりグラフェンシートをパターンニングする。こうして、偶数列のグラフェンナノリボンのソース領域 12 及びドレイン領域 14、チャネル領域 16、並びにゲート電極 18 を形成する。

[0066] 次いで、必要に応じて、パターンニングしたソース領域 12 及びドレイン領域 14 上に、チタン (Ti) 膜や金 (Au) 膜等の金属電極を形成する。

[0067] 次いで、ソース領域 12 及びドレイン領域 14 近傍に、ソース領域 12 及びドレイン領域 14 のグラフェンナノリボンに磁気モーメントを与える強磁性体を形成する。

[0068] この強磁性体は、ソース領域 12 及びドレイン領域 14 に直に接するようにしてもよいし、金属電極の材料自体を強磁性体としてもよい。また、強磁性体は、必ずしもソース領域 12 及びドレイン領域 14 に直に接している必要はなく、ソース領域 12 及びドレイン領域 14 から離間した場所に形成してもよい。

[0069] 本実施形態によるスピントリカでは、ソース領域 12 及びドレイン領域 14 に与える磁気モーメントが同じ方向であるため、強磁性体の磁化方向は一方向でよい。したがって、外部磁場等を利用することにより、強磁性体を容易に磁化することができる。

[0070] ソース領域 12 及びドレイン領域 14 のグラフェンナノリボンへの磁気モーメントの付与には、スピン注入等の他の方法を用いてもよい。

[0071] このように、本実施形態によれば、ソース領域及びドレイン領域を、同じ方向の磁気モーメントを有する偶数列のジグザググラフェンリボンにより形

成するので、外部磁場等によってこれら電極に容易に磁気モーメントを与えることができる。また、チャネル領域に電界を印加してチャネル領域のエネルギー準位を移動させることにより、アップスピンをもつ電子及びダウンスピンをもつ電子のいずれかを選択して通過させることができる。

[0072] [変形実施形態]

上記実施形態に限らず種々の変形が可能である。

[0073] 例えば、上記実施形態では、グラフェンナノリボンの延在する方向に隣接してソース領域及びドレイン領域を配置したが、ソース領域とドレイン領域は、必ずしもグラフェンナノリボンの延在する方向に隣接配置する必要はない。

[0074] 例えば、ソース領域を形成するグラフェンナノリボンとドレイン領域を形成するグラフェンナノリボンとを平行に配置してもよい。この場合、チャネル領域は、グラフェンナノリボンの短辺から引き出すようにしてもよいし、グラフェンナノリボンの長辺から引き出すようにしてもよい。

[0075] また、上記実施形態では、チャネル領域が一つのエネルギー準位のみを有するように説明した部分があるが、チャネル領域は、複数のエネルギー準位を有してもよい。領域Aのエネルギー領域にアップスピンをもつ電子を許容するエネルギー準位が存在する場合に、領域Bのエネルギー領域にダウンスピンをもつ電子を許容するエネルギー準位が1つも存在しなければよい。また、領域Bのエネルギー領域にダウンスピンをもつ電子を許容するエネルギー準位が存在する場合には、領域Aのエネルギー領域にアップスピンをもつ電子を許容するエネルギー準位が1つも存在しなければよい。

[0076] また、上記実施形態ではスピントランジスタについて説明したが、同様の構造体により、スピンスイッチやスピントランジスタを形成するようにしてもよい。

[0077] また、上記実施形態に開示の構成材料や製造条件は、当該開示内容に限定されるものではなく、目的等に応じて適宜変更が可能である。

符号の説明

[0078] 1 0…基板

1 2…ソース領域

1 4…ドレイン領域

1 6…チャネル領域

1 8…ゲート電極

請求の範囲

[請求項1] 第1の方向に延在する偶数列のジグザググラフェンリボンにより形成され、第1の方向と交差する第2の方向の磁気モーメントを有する第1の電極と、

前記第1の方向に延在する偶数列のジグザググラフェンリボンにより形成され、前記第2の方向の磁気モーメントを有する第2の電極と、

前記第1の電極と前記第2の電極との間に配置され、アップスピンをもつ電子又はダウンスピンをもつ電子を通過させるエネルギー準位を有するチャネル領域と

を有することを特徴とするスピントリカ。

[請求項2] 請求項1記載のスピントリカにおいて、

前記第1の電極と前記第2の電極との間に電位差を与えることにより、前記第1の電極及び前記第2の電極に、アップスピンをもつ電子だけが通過する第1のエネルギー領域と、ダウンスピンをもつ電子だけが通過する第2のエネルギー領域とが形成され、

前記チャネル領域は、前記第1のエネルギー領域に、アップスピンをもつ電子を許容する前記エネルギー準位を有する

ことを特徴とするスピントリカ。

[請求項3] 請求項2記載のスピントリカにおいて、

前記チャネル領域に電界を印加するゲート電極を更に有し、

前記チャネル領域の前記エネルギー準位は、前記ゲート電極に印加する電圧により、前記第1のエネルギー領域に移動されている

ことを特徴とするスピントリカ。

[請求項4] 請求項1記載のスピントリカにおいて、

前記第1の電極と前記第2の電極との間に電位差を与えることにより、前記第1の電極及び前記第2の電極に、アップスピンをもつ電子だけが通過する第1のエネルギー領域と、ダウンスピンをもつ電子だ

けが通過する第2のエネルギー領域とが形成され、

前記チャネル領域は、前記第2のエネルギー領域に、ダウンスピンをもつ電子を許容する前記エネルギー準位を有することを特徴とするスピントラップ。

[請求項5]

請求項4記載のスピントラップにおいて、

前記チャネル領域に電界を印加するゲート電極を更に有し、

前記チャネル領域の前記エネルギー準位は、前記ゲート電極に印加する電圧により、前記第2のエネルギー領域に移動されている

ことを特徴とするスピントラップ。

[請求項6]

請求項1記載のスピントラップにおいて、

前記チャネル領域に電界を印加するゲート電極を更に有し、

前記第1の電極と前記第2の電極との間に電位差を与えることにより、前記第1の電極及び前記第2の電極に、アップスピンをもつ電子だけが通過する第1のエネルギー領域と、ダウンスピンをもつ電子だけが通過する第2のエネルギー領域とが形成され、

前記チャネル領域の前記エネルギー準位は、前記ゲート電極に印加する電圧により、前記第1のエネルギー領域又は前記第2のエネルギー領域に移動されている

ことを特徴とするスピントラップ。

[請求項7]

請求項1乃至6のいずれか1項に記載のスピントラップにおいて、

前記チャネル領域は、アップスピンをもつ電子及びダウンスピンをもつ電子の双方を許容する前記エネルギー準位を有する

ことを特徴とするスピントラップ。

[請求項8]

請求項1乃至7のいずれか1項に記載のスピントラップにおいて、

前記チャネル領域は、偶数列のジグザググラフェンリボンを屈曲することにより形成されている

ことを特徴とするスピントラップ。

[請求項9]

請求項1乃至8のいずれか1項に記載のスピントラップにおいて、

前記チャネル領域は、炭素単原子により形成されている
ことを特徴とするスピントリカ。

[請求項10]

請求項 1 乃至 8 のいずれか 1 項に記載のスピントリカにおいて、
前記チャネル領域は、前記第 1 の電極及び前記第 2 の電極を形成する
前記ジグザググラフェンリボンよりも細いジグザググラフェンリボン
により形成されている
ことを特徴とするスピントリカ。

[請求項11]

スピントリカの駆動方法であって、
前記スピントリカは、第 1 の方向に延在する偶数列のジグザググラ
フェンリボンにより形成され、第 1 の方向と交差する第 2 の方向の
磁気モーメントを有する第 1 の電極と、前記第 1 の方向に延在する偶
数列のジグザググラフェンリボンにより形成され、前記第 2 の方向の
磁気モーメントを有する第 2 の電極と、前記第 1 の電極と前記第 2 の
電極との間に配置され、アップスピンをもつ電子又はダウンスピンを
もつ電子を許容するエネルギー準位を有するチャネル領域と、前記チ
ャネル領域に電界を印加するゲート電極とを有し、

前記第 1 の電極と前記第 2 の電極との間に電位差を与えることによ
り、前記第 1 の電極及び前記第 2 の電極に、アップスピンをもつ電子
だけが通過する第 1 のエネルギー領域と、ダウンスピンをもつ電子だ
けが通過する第 2 のエネルギー領域とを形成し、

前記ゲート電極に印加する電圧により、前記チャネル領域の前記エ
ネルギー準位を、前記第 1 のエネルギー領域又は前記第 2 のエネルギ
ー領域に移動する

ことを特徴とするスピントリカの駆動方法。

[請求項12]

請求項 1 1 記載のスピントリカの駆動方法において、
前記チャネル領域は、アップスピンをもつ電子を許容する前記エネ
ルギー準位を有し、

前記ゲート電極に印加する前記電圧により、前記チャネル領域の前

記エネルギー準位を前記第 1 のエネルギー領域に移動することにより、アップスピンをもつ電子を選択的に通過させることを特徴とするスピントフィルタの駆動方法。

[請求項13]

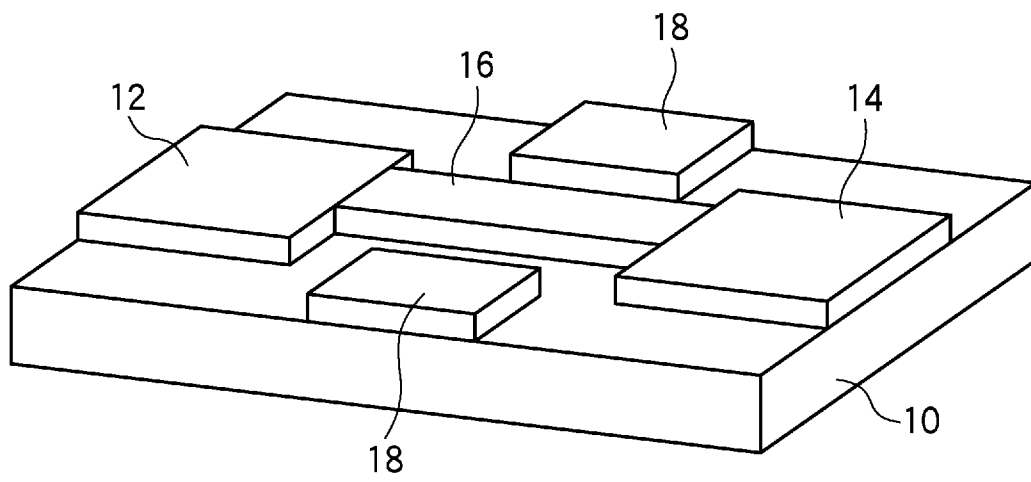
請求項 1 1 記載のスピントフィルタの駆動方法において、前記チャネル領域は、ダウンスピンをもつ電子を許容する前記エネルギー準位を有し、

前記ゲート電極に印加する前記電圧により、前記チャネル領域の前記エネルギー準位を前記第 2 のエネルギー領域に移動することにより、ダウンスピンをもつ電子を選択的に通過させることを特徴とするスピントフィルタの駆動方法。

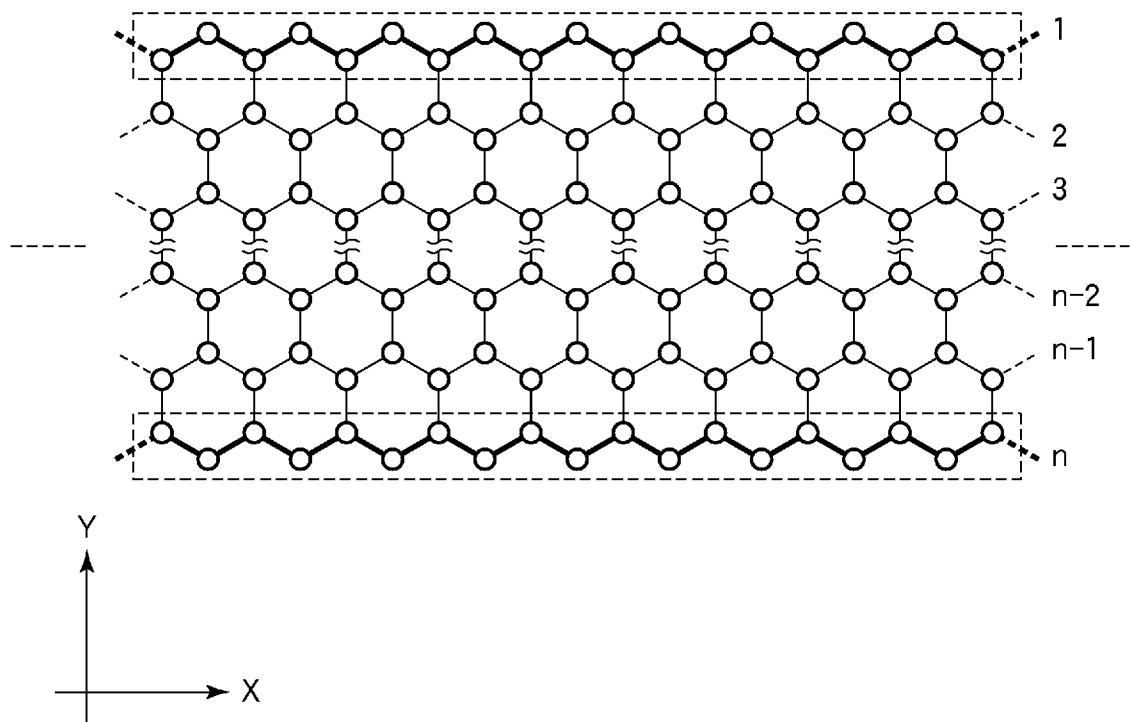
[請求項14]

請求項 1 1 記載のスピントフィルタの駆動方法において、前記チャネル領域は、アップスピンをもつ電子及びダウンスピンをもつ電子の双方を許容する前記エネルギー準位を有することを特徴とするスピントフィルタの駆動方法。

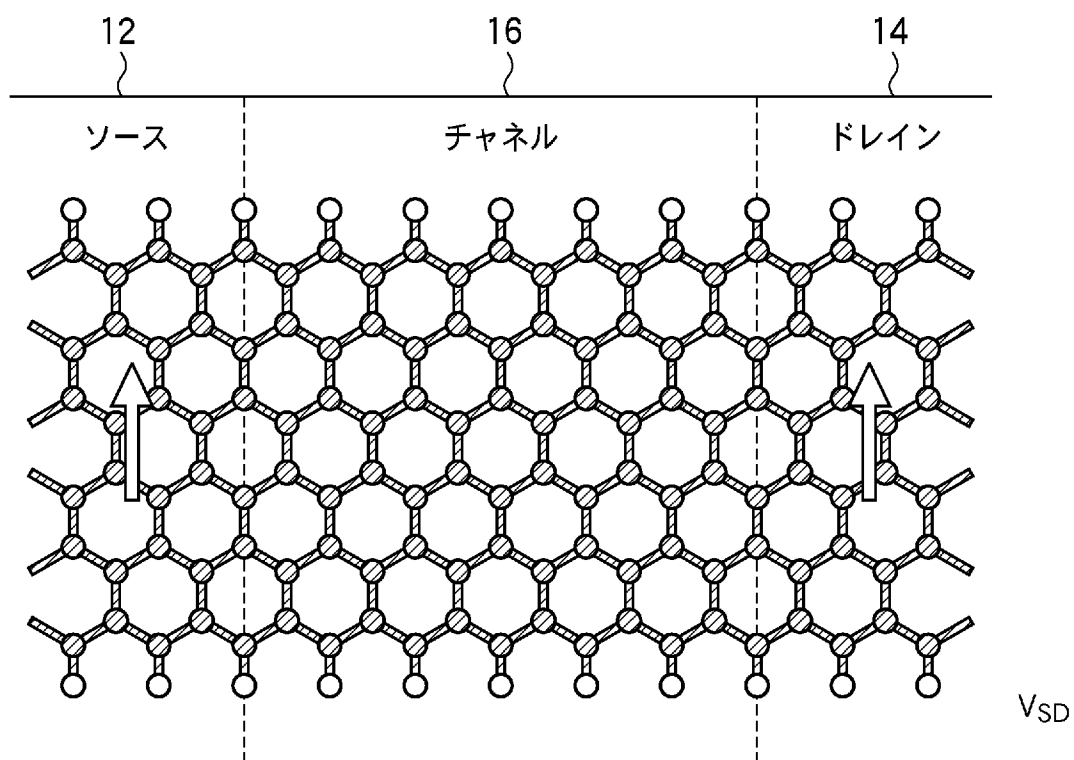
[図1]



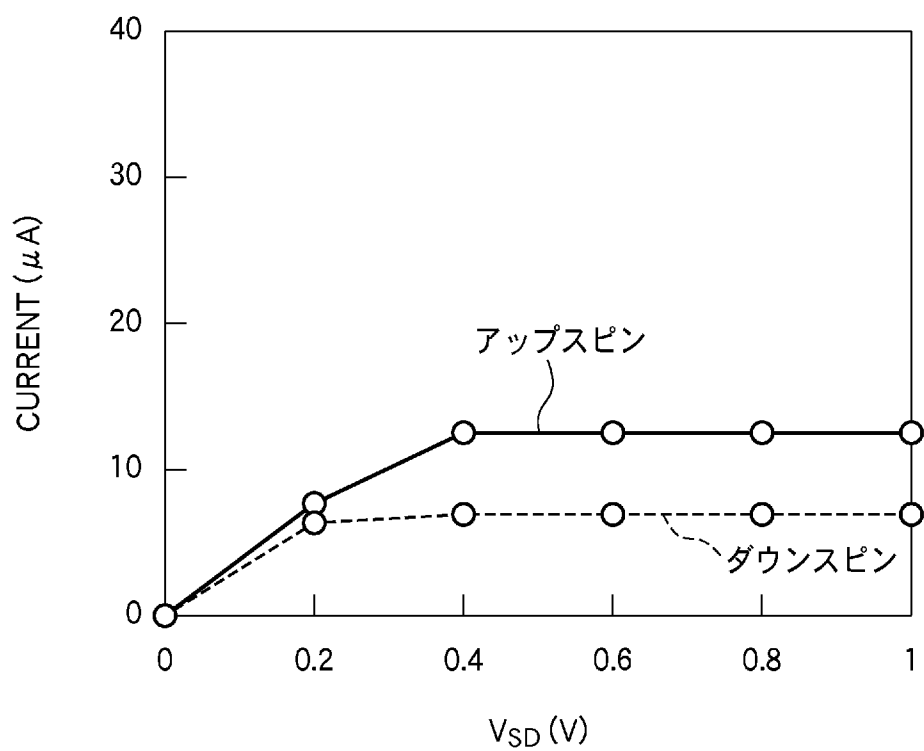
[図2]



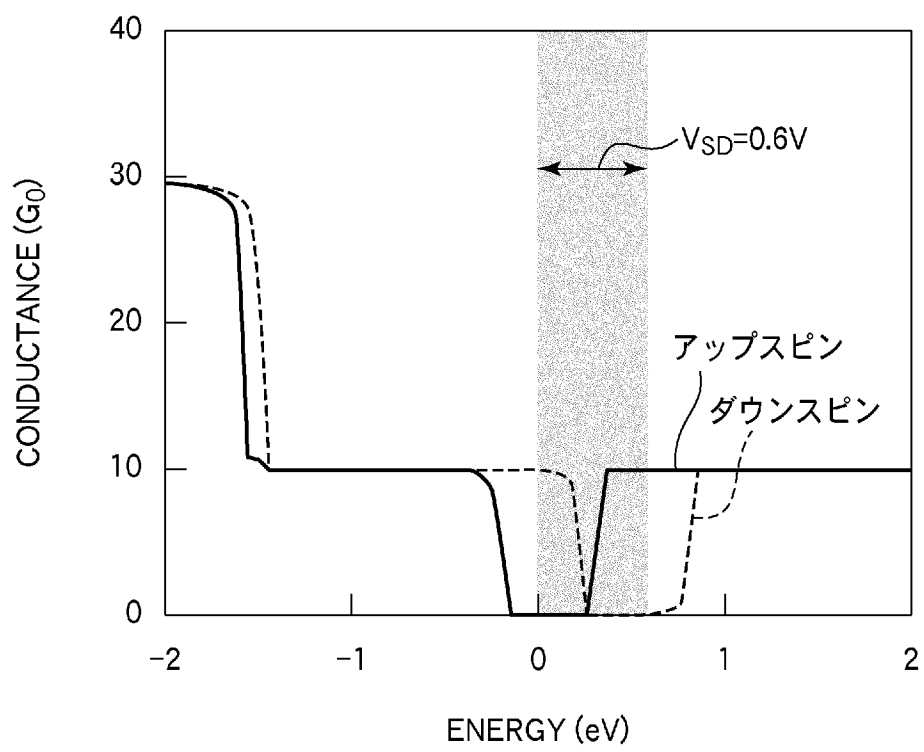
[図3]



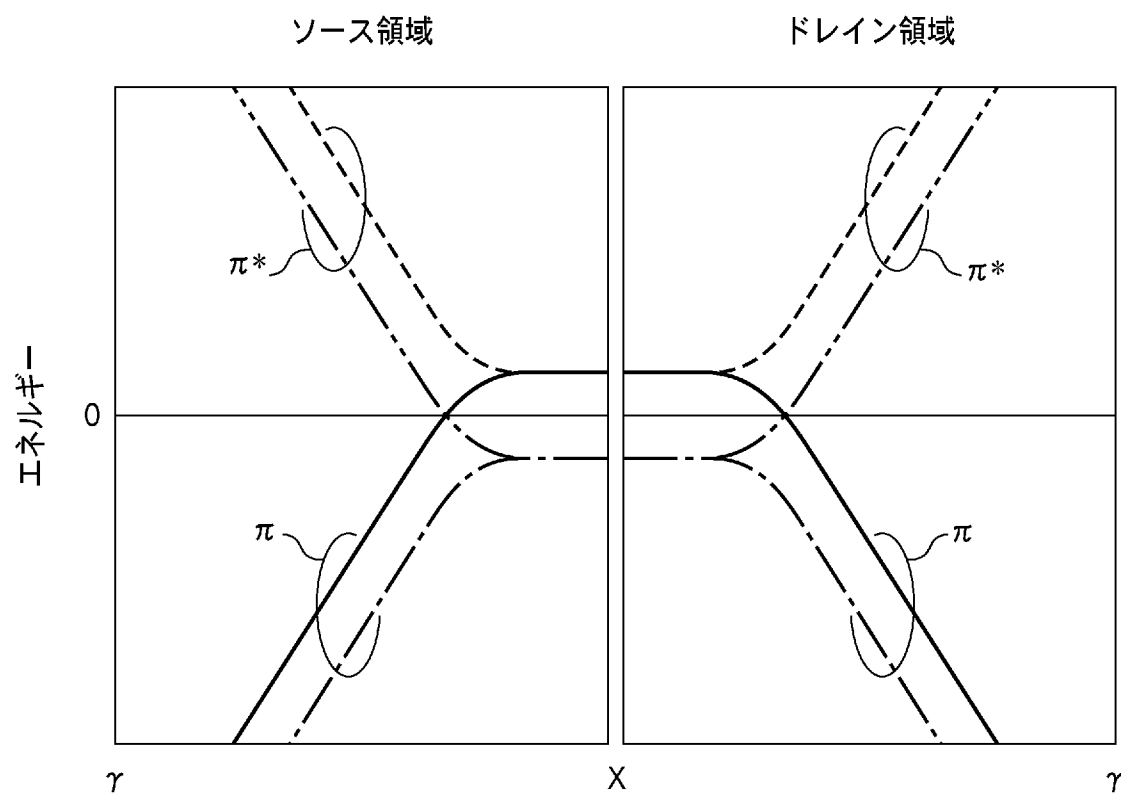
[図4]



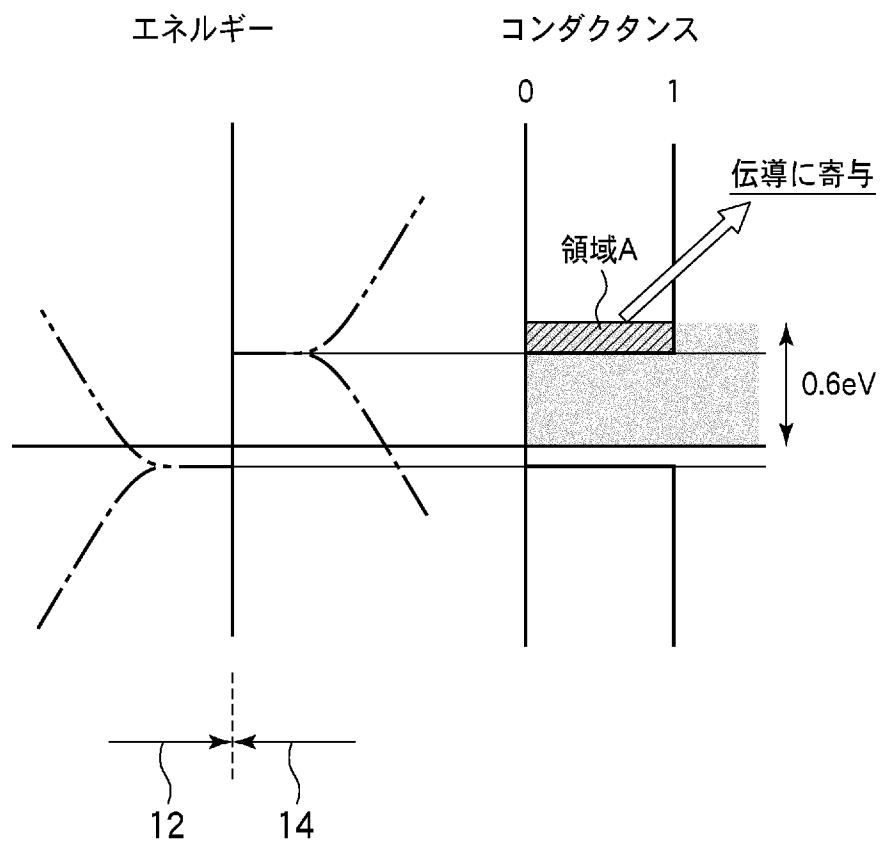
[図5]



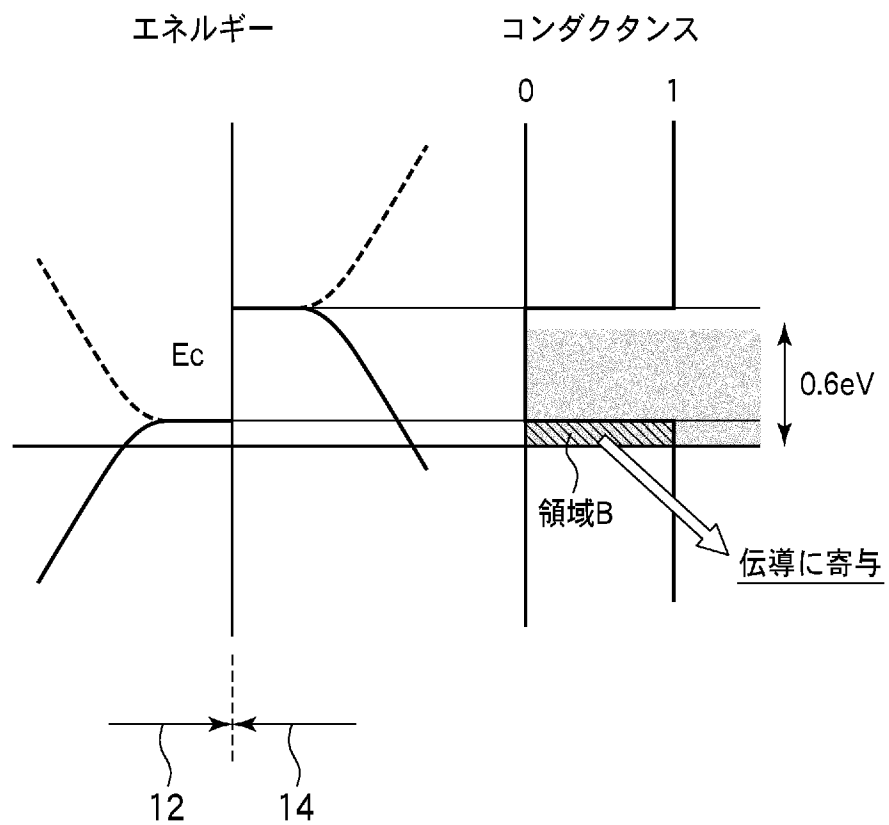
[図6]



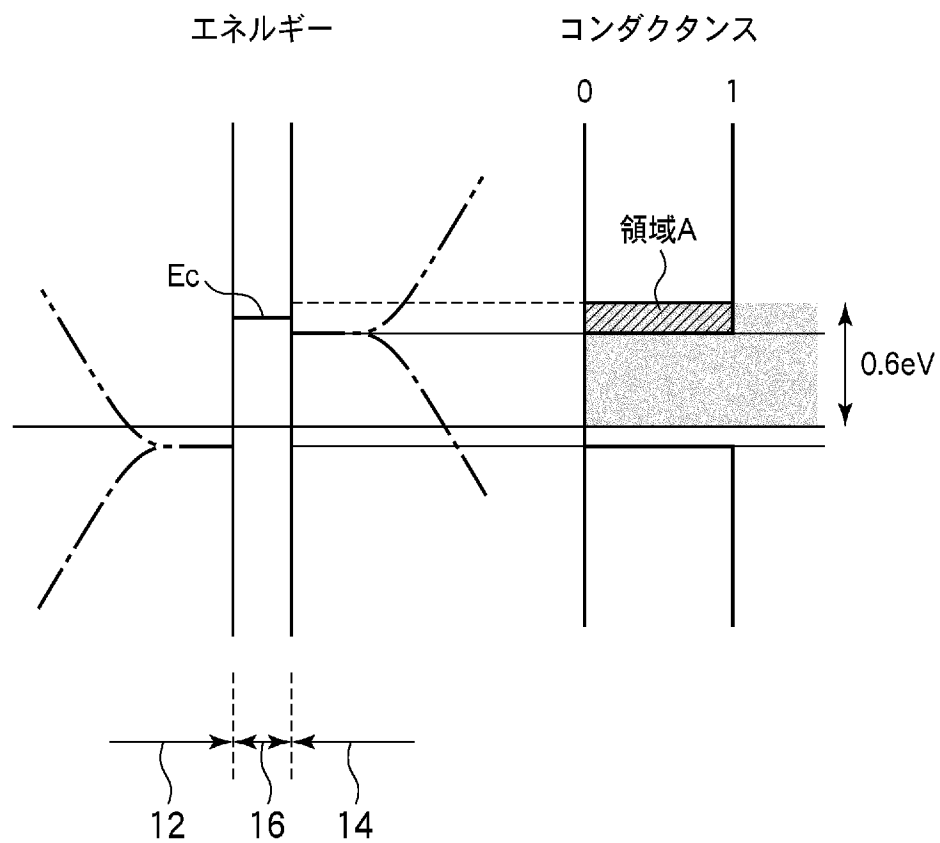
[図7]



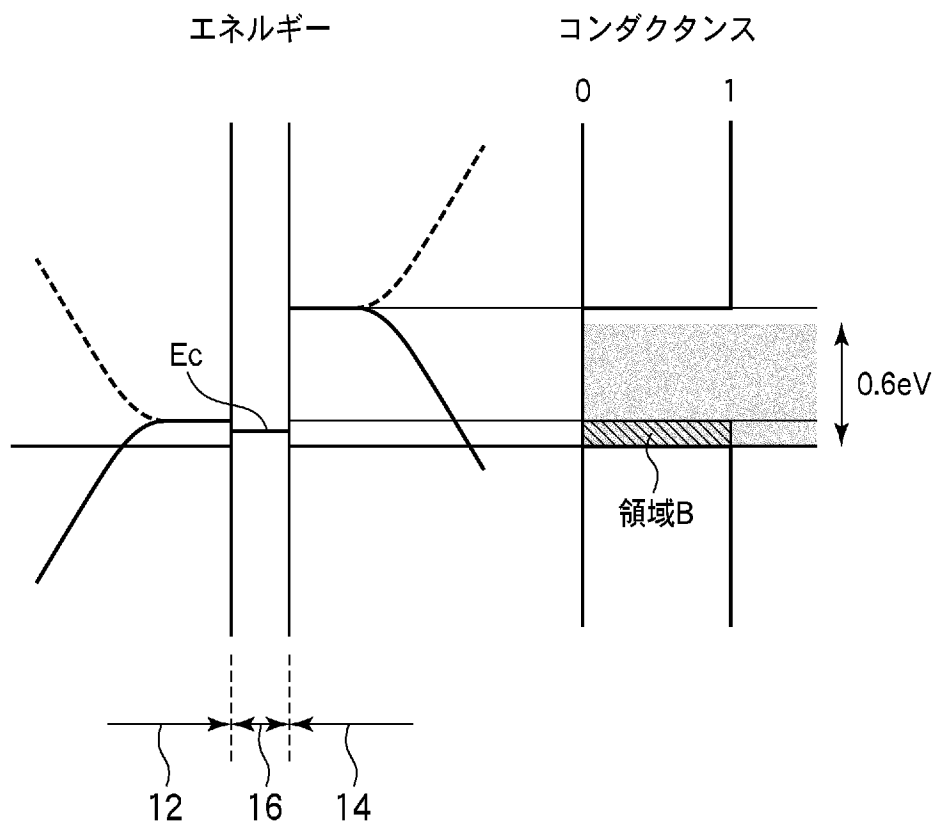
[図8]



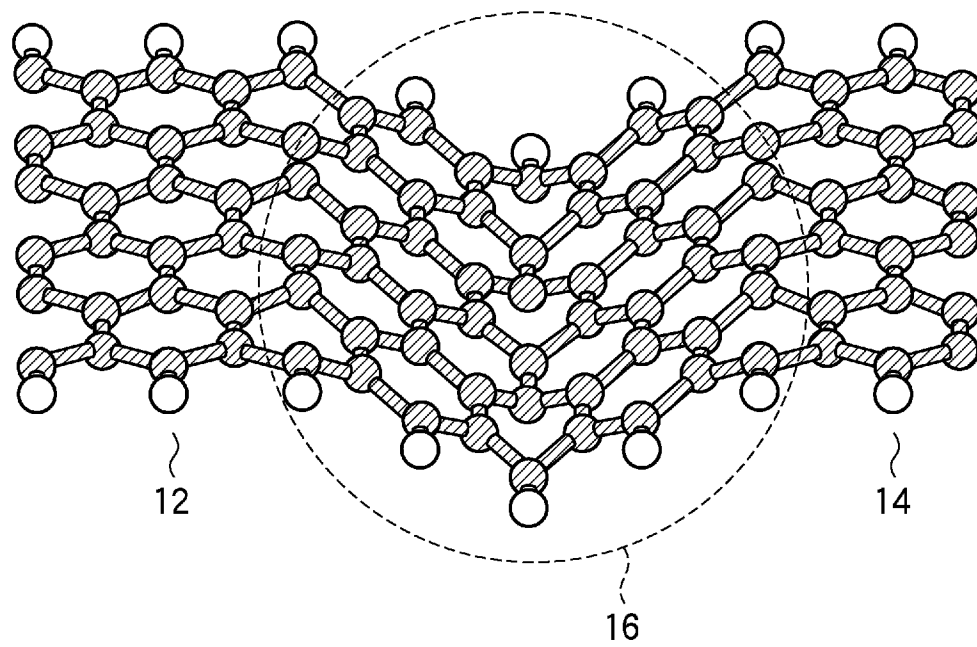
[図9]



[図10]

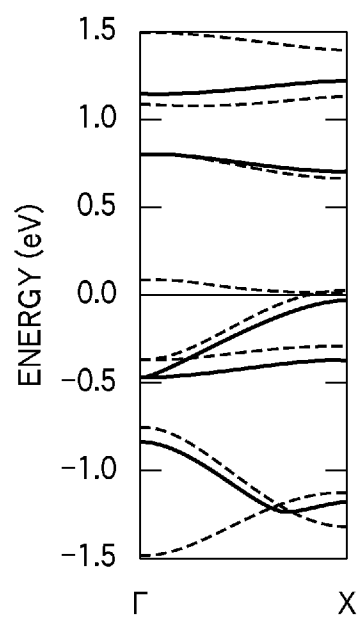


[図11]

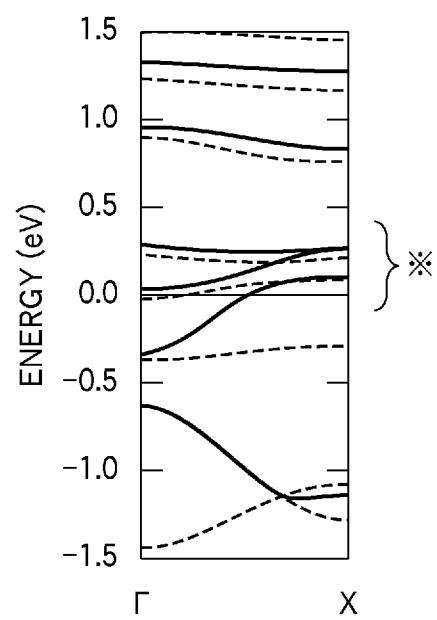


[図12]

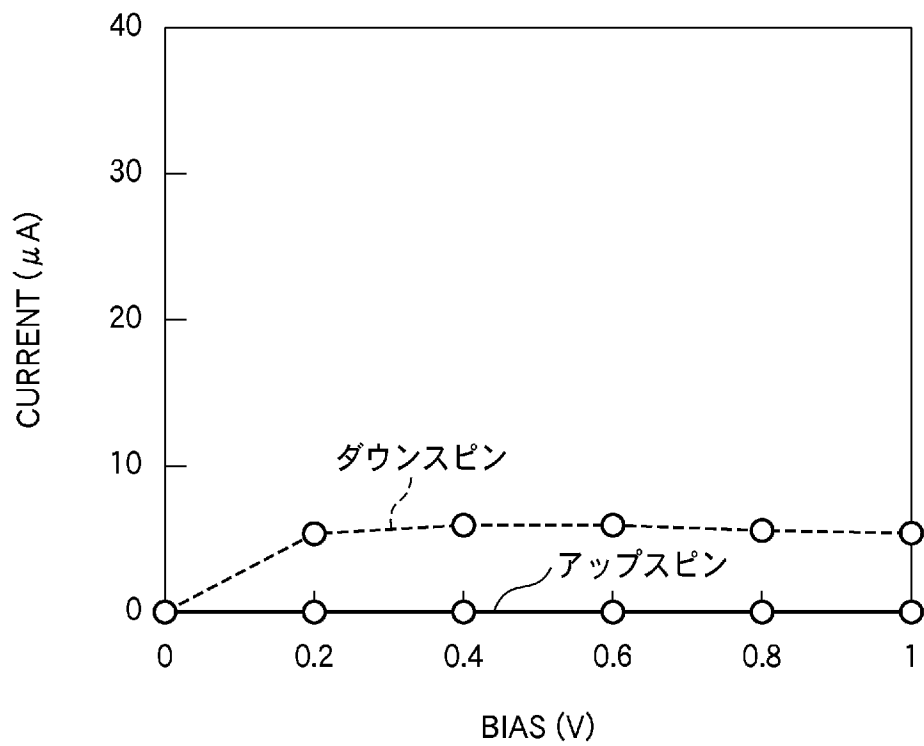
(a) アップスピン



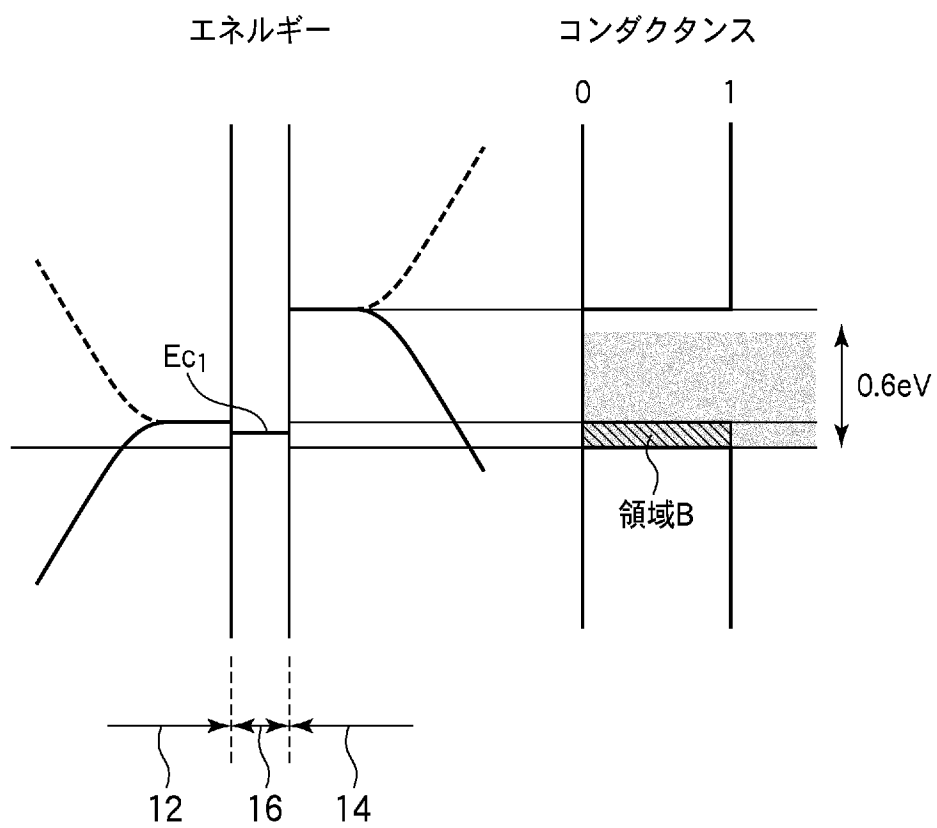
(b) ダウンスピン



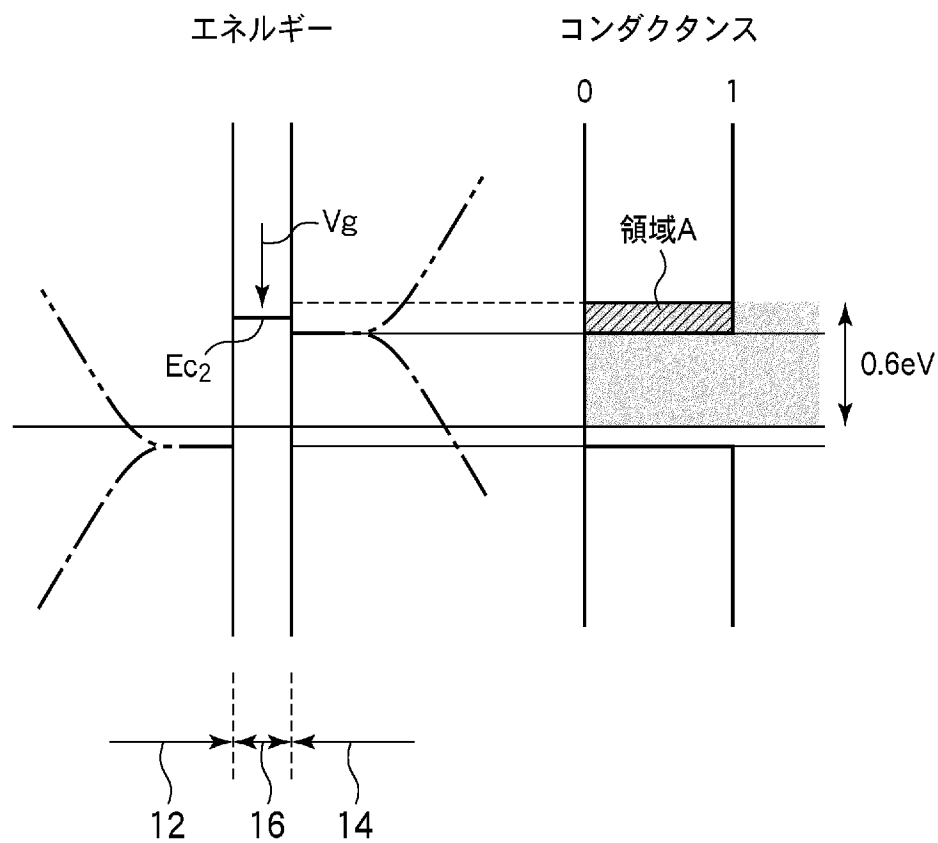
[図13]



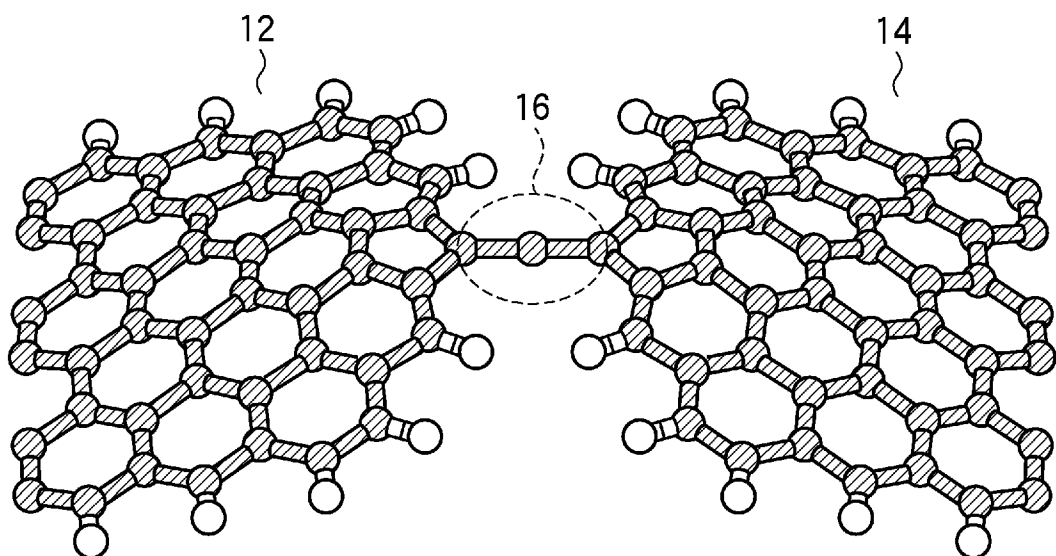
[図14]



[図15]



[図16]



INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/JP2011/061958

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER

H01L29/66(2006.01)i, H01L21/28(2006.01)i, H01L21/336(2006.01)i,
H01L29/417(2006.01)i, H01L29/78(2006.01)i

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

B. FIELDS SEARCHED

Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols)

H01L29/66, H01L21/28, H01L21/336, H01L29/417, H01L29/78

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

Jitsuyo Shinan Koho	1922-1996	Jitsuyo Shinan Toroku Koho	1996-2011
Kokai Jitsuyo Shinan Koho	1971-2011	Toroku Jitsuyo Shinan Koho	1994-2011

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

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
A	WO 2008/108383 A1 (NEC Corp.), 12 September 2008 (12.09.2008), entire text; all drawings & US 2010/0102292 A	1-14
A	JP 2010-283009 A (NEC Corp.), 16 December 2010 (16.12.2010), entire text; all drawings (Family: none)	1-14
A	JP 2010-232511 A (Hitachi Maxell, Ltd.), 14 October 2010 (14.10.2010), entire text; all drawings (Family: none)	1-14



Further documents are listed in the continuation of Box C.



See patent family annex.

* Special categories of cited documents:

“A” document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance

“E” earlier application or patent but published on or after the international filing date

“L” document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified)

“O” document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means

“P” document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed

“T” later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention

“X” document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone

“Y” document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art

“&” document member of the same patent family

Date of the actual completion of the international search
28 June, 2011 (28.06.11)

Date of mailing of the international search report
12 July, 2011 (12.07.11)

Name and mailing address of the ISA/
Japanese Patent Office

Authorized officer

Facsimile No.

Telephone No.

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/JP2011/061958

C (Continuation). DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
A	Mitsutaka FUJITA, Katsunori WAKABAYASHI, Kyoko NAKADA and Koichi KUSAKABE, "Peculiar Localized State at Zigzag Graphite Edge", Journal of Physical Society of Japan, 1996.07, Vol.65, No.7, p.1920-p.1923	1-14

A. 発明の属する分野の分類 (国際特許分類 (I P C))

Int.Cl. H01L29/66(2006.01)i, H01L21/28(2006.01)i, H01L21/336(2006.01)i, H01L29/417(2006.01)i,
H01L29/78(2006.01)i

B. 調査を行った分野

調査を行った最小限資料 (国際特許分類 (I P C))

Int.Cl. H01L29/66, H01L21/28, H01L21/336, H01L29/417, H01L29/78

最小限資料以外の資料で調査を行った分野に含まれるもの

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

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

C. 関連すると認められる文献

引用文献の カテゴリー*	引用文献名 及び一部の箇所が関連するときは、その関連する箇所の表示	関連する 請求項の番号
A	WO 2008/108383 A1 (日本電気株式会社) 2008.09.12, 全文, 全図 & US 2010/0102292 A	1 - 14
A	JP 2010-283009 A (日本電気株式会社) 2010.12.16, 全文, 全図 (ファミリーなし)	1 - 14
A	JP 2010-232511 A (日立マクセル株式会社) 2010.10.14, 全文, 全図 (ファミリーなし)	1 - 14

☒ C 欄の続きにも文献が列挙されている。

☐ パテントファミリーに関する別紙を参照。

* 引用文献のカテゴリー

「A」特に関連のある文献ではなく、一般的技術水準を示すもの
「E」国際出願日前の出願または特許であるが、国際出願日以後に公表されたもの
「L」優先権主張に疑義を提起する文献又は他の文献の発行日若しくは他の特別な理由を確立するために引用する文献 (理由を付す)
「O」口頭による開示、使用、展示等に言及する文献
「P」国際出願日前で、かつ優先権の主張の基礎となる出願

の日の後に公表された文献

「T」国際出願日又は優先日後に公表された文献であって出願と矛盾するものではなく、発明の原理又は理論の理解のために引用するもの
「X」特に関連のある文献であって、当該文献のみで発明の新規性又は進歩性がないと考えられるもの
「Y」特に関連のある文献であって、当該文献と他の1以上の文献との、当業者にとって自明である組合せによって進歩性がないと考えられるもの
「&」同一パテントファミリー文献

国際調査を完了した日

2 8 . 0 6 . 2 0 1 1

国際調査報告の発送日

1 2 . 0 7 . 2 0 1 1

国際調査機関の名称及びあて先

日本国特許庁 (I S A / J P)

郵便番号 1 0 0 - 8 9 1 5

東京都千代田区霞が関三丁目4番3号

特許庁審査官 (権限のある職員)

三浦 尊裕

電話番号 0 3 - 3 5 8 1 - 1 1 0 1 内線 3 4 6 2

4 M

3 7 7 5

C (続き) . 関連すると認められる文献		
引用文献の カテゴリー*	引用文献名 及び一部の箇所が関連するときは、その関連する箇所の表示	関連する 請求項の番号
A	Mitsutaka FUJITA, Katsunori WAKABAYASHI, Kyoko NAKADA and Koichi KUSAKABE, "Peculiar Localized State at Zigzag Graphite Edge", Journal of Physical Society of Japan, 1996.07, Vol.65, No.7, p.1920-p.1923	1 - 14