

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 特 許 公 報(B2)

(11) 特許番号

特許第5569851号  
(P5569851)

(45) 発行日 平成26年8月13日(2014. 8. 13)

(24) 登録日 平成26年7月4日(2014. 7. 4)

(51) Int. Cl.	F I	
HO 1 L 29/82 (2006. 01)	HO 1 L 29/82	Z
HO 1 L 29/66 (2006. 01)	HO 1 L 29/66	Z
HO 1 L 29/06 (2006. 01)	HO 1 L 29/06	G O 1 Q
HO 1 L 29/812 (2006. 01)	HO 1 L 29/80	H
HO 1 L 29/778 (2006. 01)	HO 1 L 29/80	E

請求項の数 11 (全 15 頁) 最終頁に続く

(21) 出願番号 特願2013-554508 (P2013-554508)  
 (86) (22) 出願日 平成25年7月25日(2013. 7. 25)  
 (86) 国際出願番号 PCT/JP2013/070217  
 (87) 国際公開番号 W02014/027555  
 (87) 国際公開日 平成26年2月20日(2014. 2. 20)  
 審査請求日 平成25年11月28日(2013. 11. 28)  
 (31) 優先権主張番号 特願2012-179763 (P2012-179763)  
 (32) 優先日 平成24年8月14日(2012. 8. 14)  
 (33) 優先権主張国 日本国(JP)

早期審査対象出願

(73) 特許権者 503360115  
 独立行政法人科学技術振興機構  
 埼玉県川口市本町四丁目1番8号  
 (73) 特許権者 500116351  
 ユニヴァーシティー オブ ヨーク  
 UNIVERSITY OF YORK  
 イギリス, ワイオー10 5ディーディ  
 ー ノース・ヨークシャー, ヨーク,  
 ヘスリントン  
 (74) 代理人 100088155  
 弁理士 長谷川 芳樹  
 (74) 代理人 100124291  
 弁理士 石田 悟  
 (74) 代理人 100161425  
 弁理士 大森 鉄平

最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 スピン偏極トランジスタ素子

(57) 【特許請求の範囲】

【請求項1】

第1方向に磁化された強磁性体からなるソース部と、  
 前記ソース部に離間して並設され、前記第1方向に磁化された強磁性体からなるドレイン部と、  
 前記ソース部と前記ドレイン部との間に配置され、前記ソース部及び前記ドレイン部に直接又はトンネル層を介して接合されたチャンネル部と、  
 前記チャンネル部のスピンの向きを前記第1方向に揃えるように制御するための円偏光を前記チャンネル部へ照射する円偏光照射部と、  
 を備え、  
 前記ソース部及び前記ドレイン部の厚さは、前記円偏光の侵入長を超える厚さである、  
 スピン偏極トランジスタ素子。

【請求項2】

前記チャンネル部は半導体材料により形成され、前記円偏光照射部は、前記チャンネル部のバンドギャップエネルギー以上のエネルギーに相当する波長を有する円偏光を前記チャンネル部へ照射する請求項1に記載のスピン偏極トランジスタ素子。

【請求項3】

前記チャンネル部はヒ化ガリウム(GaAs)により形成される請求項2に記載のスピン偏極トランジスタ素子。

【請求項4】

前記円偏光照射部は、前記第 1 方向に沿った方向に円偏光を照射する請求項 1 ~ 3 の何れか一項に記載のスピンの偏極トランジスタ素子。

【請求項 5】

基板を備え、前記ソース部と前記ドレイン部とは前記基板上に形成され、前記第 1 方向は基板に垂直な方向であり、前記円偏光照射部は、前記第 1 方向に沿った方向に円偏光を照射する請求項 4 に記載のスピンの偏極トランジスタ素子。

【請求項 6】

基板を備え、前記ソース部と前記ドレイン部とは前記基板上に形成され、前記第 1 方向は基板面内方向であり、前記円偏光照射部は、前記チャンネル部への円偏光の侵入角度が 90 度より小さい角度となるように円偏光を照射する請求項 1 ~ 3 の何れか一項に記載のスピンの偏極トランジスタ素子。

10

【請求項 7】

前記チャンネル部は、二次元電子ガス層を有する請求項 1 ~ 6 の何れか一項に記載のスピンの偏極トランジスタ素子。

【請求項 8】

前記ソース部及び前記ドレイン部の厚さは、前記チャンネル部の厚さよりも厚い請求項 1 ~ 7 の何れか一項に記載のスピンの偏極トランジスタ素子。

【請求項 9】

第 1 方向に磁化された強磁性体からなる第 1 ソース部と、  
前記第 1 ソース部に離間して並設され、前記第 1 方向に磁化された強磁性体からなる第 1 ドレイン部と、

20

前記第 1 ソース部と前記第 1 ドレイン部との間に配置され、前記第 1 ソース部及び前記第 1 ドレイン部に直接又はトンネル層を介して接合された第 1 チャンネル部と、

第 2 方向に磁化された強磁性体からなる第 2 ソース部と、  
前記第 2 ソース部に離間して並設され、前記第 2 方向に磁化された強磁性体からなる第 2 ドレイン部と、

前記第 2 ソース部と前記第 2 ドレイン部との間に配置され、前記第 2 ソース部及び前記第 2 ドレイン部に直接又はトンネル層を介して接合された第 2 チャンネル部と、

前記第 1 チャンネル部及び前記第 2 チャンネル部のスピンの向きを前記第 1 方向に揃えるように制御するための円偏光を前記第 1 チャンネル部及び前記第 2 チャンネル部へ照射する円偏光照射部と、

30

を備え、

前記第 1 ソース部の厚さ及び前記第 1 ドレイン部の厚さ並びに前記第 2 ソース部の厚さ及び前記第 2 ドレイン部の厚さは、前記円偏光の侵入長を超える厚さである、スピンの偏極トランジスタ素子。

【請求項 10】

前記第 1 チャンネル部を構成する物質内のスピンを制御するために円偏光を照射する第 1 円偏光照射部と、

前記第 2 チャンネル部を構成する物質内のスピンを制御するために円偏光を照射する第 2 円偏光照射部と、

40

を備える、請求項 9 に記載のスピンの偏極トランジスタ素子。

【請求項 11】

前記第 1 ソース部及び前記第 1 ドレイン部の厚さは、前記第 1 チャンネル部の厚さよりも厚く、

前記第 2 ソース部及び前記第 2 ドレイン部の厚さは、前記第 2 チャンネル部の厚さよりも厚い請求項 10 に記載のスピンの偏極トランジスタ素子。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

本発明は、スピンの偏極トランジスタ素子に関するものである。

50

## 【背景技術】

## 【0002】

従来、スピン偏極トランジスタ素子として、強磁性体からなるソース及びドレインと、該ソース及び該ドレインと直接あるいはトンネル絶縁層を介して接合を成す非磁性体のチャンネル層と、該チャンネル層上に直接又はゲート絶縁体層を介して設けられ、チャンネル層の電位を制御するゲート電極と、を備えるスピン偏極トランジスタ素子が知られている（例えば、特許文献1、非特許文献1参照。）。特許文献1及び非特許文献1記載のトランジスタでは、ゲート電極を用いてチャンネル層へ電界を印加し、チャンネル層内の電子スピンを回転制御することによって、ソースとドレインとの間の電流のオン・オフを制御する。

## 【先行技術文献】

10

## 【特許文献】

## 【0003】

【特許文献1】特開2011-187861号公報

## 【非特許文献】

## 【0004】

【非特許文献1】S. Datta and B. Das著、“Electronic analog of the electrooptic modulator”、Applied Physics Letters、1990年2月12日、pp. 665~667

## 【発明の概要】

20

## 【発明が解決しようとする課題】

## 【0005】

近年のハードウェアの小型化に伴い、トランジスタについても小型化が要求されている。しかしながら、特許文献1及び非特許文献1記載のトランジスタにあっては、電圧印加用のゲート電極を配置するためのスペースをソースとドレインとの間に確保する必要があるので、ソース及びドレインの配置の自由度に制限がある。よって、結果としてトランジスタの小型化が困難となるおそれがある。本技術分野では、小型化可能な構造を有するトランジスタが望まれている。

## 【課題を解決するための手段】

## 【0006】

30

本発明の一側面に係るスピン偏極トランジスタ素子は、第1方向に磁化された強磁性体からなるソース部と、ソース部に離間して並設され、第1方向に磁化された強磁性体からなるドレイン部と、ソース部とドレイン部との間に配置され、ソース部及びドレイン部に直接又はトンネル層を介して接合されたチャンネル部と、チャンネル部のスピンの向きを第1方向に揃えるように制御するための円偏光をチャンネル部へ照射する円偏光照射部と、を備え、ソース部及びドレイン部の厚さは、円偏光の侵入長を超える厚さである。

## 【0007】

このように構成することで、円偏光照射部により、チャンネル部に円偏光が照射され、チャンネル部においてスピンの向きが揃った電子が励起され、チャンネル部の電気抵抗が変化する。このように、円偏光を利用して非接触でスピンの向きを制御することができるため、例えば、円偏光照射のみでスピンの向きを制御することでゲート電極を不要とし、ソース部及びドレイン部の配置の自由度を向上させ、あるいは、電圧印加と円偏光照射とを併用することで、電圧を印加するための機構そのものを簡易にすることが可能となる。よって、トランジスタ素子を小型化することができ、該素子設計の自由度を向上させることが可能となる。

40

## 【0008】

一実施形態では、チャンネル部は半導体材料により形成され、円偏光照射部は、チャンネル部のバンドギャップエネルギー以上のエネルギーに相当する波長を有する円偏光をチャンネル部へ照射してもよい。このように構成することで、チャンネル部に円偏光が照射されると、チャンネル部を形成する半導体材料中のスピンの価電子帯から伝導帯に遷移することがで

50

きる。このため、より効率的にソース部から注入された電流をドレイン部に流すことが可能となる。

【0009】

一実施形態では、チャンネル部はヒ化ガリウム (GaAs) により形成されていてもよい。このように構成することで、円偏光照射部が GaAs のバンドギャップエネルギーと同じか少し高いエネルギーに相当する波長を有する円偏光をチャンネル部へ照射することにより、チャンネル部のスピンの価電子帯から伝導帯に遷移することができる。このため、より効率的にソース部から注入された電流をドレイン部に流すことが可能となる。

【0010】

一実施形態では、円偏光照射部は、第1方向に沿った方向に円偏光を照射してもよい。  
一実施形態では、基板を備え、ソース部とドレイン部とは基板上に形成され、第1方向は基板に垂直な方向であり、円偏光照射部は、第1方向に沿った方向に円偏光を照射してもよい。  
一実施形態では、基板を備え、ソース部とドレイン部とは基板上にされ、第1方向は基板面内方向であり、円偏光照射部は、チャンネル部への円偏光の侵入角度が90度より小さい角度となるように円偏光を照射してもよい。

【0011】

このように構成することで、円偏光を照射して、チャンネル部のスピンの向きが第1方向すなわちソース部及びドレイン部の磁化方向に揃えることができるため、ソース部から注入された電流をドレイン部に流すことが可能となる。

【0012】

一実施形態では、チャンネル部は、二次元電子ガス層を有していてもよい。このように構成することで、二次元電子ガスよりスピンの供給されるため、チャンネル部におけるスピンの角運動量の伝搬を効率的に行うことが可能となる。

【0013】

一実施形態では、ソース部及びドレイン部の厚さは、チャンネル部の厚さよりも厚くてもよい。

【0014】

このように構成することで、ソース部及びドレイン部に光が照射された場合であっても、チャンネル部のスピンのみを制御することができる。

【0015】

また、本発明の他の側面に係るスピン偏極トランジスタ素子は、第1方向に磁化された強磁性体からなる第1ソース部と、第1ソース部に離間して並設され、第1方向に磁化された強磁性体からなる第1ドレイン部と、第1ソース部と第1ドレイン部との間に配置され、第1ソース部及び第1ドレイン部に直接又はトンネル層を介して接合された第1チャンネル部と、第2方向に磁化された強磁性体からなる第2ソース部と、第2ソース部に離間して並設され、第2方向に磁化された強磁性体からなる第2ドレイン部と、第2ソース部と第2ドレイン部との間に配置され、第2ソース部及び第2ドレイン部に直接又はトンネル層を介して接合された第2チャンネル部と、第1チャンネル部及び第2チャンネル部のスピンの向きを第1方向に揃えるように制御するための円偏光を第1チャンネル部及び第2チャンネル部へ照射する円偏光照射部と、を備え、第1ソース部の厚さ及び第1ドレイン部の厚さ並びに第2ソース部の厚さ及び第2ドレイン部の厚さは、円偏光の侵入長を超える厚さである。

【0016】

このように構成することで、円偏光照射部により、第1チャンネル部及び第2チャンネル部に円偏光が照射され、第1チャンネル部及び第2チャンネル部においてスピンの偏極した電子が励起され、第1チャンネル部及び第2チャンネル部の電気抵抗が変化する。このため、ゲート電極を用いることなく、第1ソース部及び第2ソース部から注入された電流を第1ドレイン部及び第2ドレイン部へ流すことが可能となる。よって、トランジスタ素子を小型化することができる。さらに、複数のスピン偏極トランジスタに円偏光を照射することにより、複数のスピン偏極トランジスタを一括して制御することが可能となる。

## 【0017】

一実施形態では、第1チャンネル部を構成する物質内のスピンを制御するために円偏光を照射する第1円偏光照射部と、第2チャンネル部を構成する物質内のスピンを制御するために円偏光を照射する第2円偏光照射部と、を備えていてもよい。このように構成することで、複数のスピンプラズマ素子の一括制御と個別制御とを実現することができる。

## 【0018】

一実施形態では、第1ソース部及び第1ドレイン部の厚さは、第1チャンネル部の厚さよりも厚く、第2ソース部及び第2ドレイン部の厚さは、第2チャンネル部の厚さよりも厚くてもよい。

## 【0019】

このように構成することで、ソース部及びドレイン部に光が照射された場合であっても、チャンネル部のスピンのみを制御することができる。

## 【発明の効果】

## 【0020】

以上説明したように、本発明の種々の側面及び実施形態によれば、小型化可能な構造を有するプラズマ素子を提供することができる。

## 【図面の簡単な説明】

## 【0021】

【図1】第1実施形態に係るスピンプラズマ素子を説明する概略断面図である。

【図2】円偏光照射部によるスピンプラズマ素子の説明する概略図である。

【図3】第1実施形態におけるスピンプラズマ素子がオフ状態のスピンの向きを説明する概略図である。

【図4】第1実施形態におけるスピンプラズマ素子がオン状態のスピンの向きを説明する概略図である。

【図5】第2実施形態におけるスピンプラズマ素子がオフ状態のスピンの向きを説明する概略図である。

【図6】第2実施形態におけるスピンプラズマ素子がオン状態のスピンの向きを説明する概略図である。

【図7】第3実施形態におけるスピンプラズマ素子を説明する概略図である。

【図8】第4実施形態におけるスピンプラズマ素子を説明する概略図である。

【図9】実施形態に係るスピンプラズマ素子の変形例を説明する概略図である。

## 【発明を実施するための形態】

## 【0022】

以下、添付図面を参照して本発明の実施形態について具体的に説明する。なお、図面の説明において同一の要素には同一の符号を付し、重複する説明を省略する。また、図面の寸法比率は、説明のものと必ずしも一致していない。

## 【0023】

## (第1実施形態)

本実施形態に係るスピンプラズマ素子は、スピンプラズマを応用したプラズマ素子であって、例えばナノスケールのスイッチング素子として好適に採用されるものである。図1は、一実施形態に係るスピンプラズマ素子10を説明する概略断面図である。図1に示すように、スピンプラズマ素子10は、例えば、ソース部11、ドレイン部12、チャンネル部15及び円偏光照射部51を備えている。

## 【0024】

ソース部11は、基板18上に形成されている。基板18として、例えば半導体基板が用いられる。ソース部11は、強磁性体材料により形成されている。強磁性体材料として、例えばFe、Co又はNi等が用いられる。ソース部11は、任意の第1方向に磁化され得る。第1方向は、例えば、基板面内方向(基板面に平行な任意の方向)又は基板垂直方向である。ソース部11には、電圧印加用の端子が設けられている。ソース部11の基板18からの厚さは、円偏光の侵入長を超える厚さとされ、例えば数10nm以上とされ

10

20

30

40

50

る。

#### 【0025】

ドレイン部12は、基板18上に形成されており、ソース部11に離間して並設されている。ドレイン部12は強磁性体材料により形成されている。強磁性体材料として、例えばFe、Co又はNi等が用いられる。ドレイン部12は、基板面内方向又は基板垂直方向(第1方向)に磁化され得る。ここでは、ドレイン部12は、任意の第1方向に磁化され得る。第1方向は、例えば、基板面内方向又は基板垂直方向である。ソース部11と同一方向に磁化されている。ドレイン部12には、電圧検出用の端子が設けられている。ドレイン部12の基板18からの厚さは、円偏光の侵入長を超える厚さとされ、例えば数10nm以上とされる。

10

#### 【0026】

チャネル部15は、ソース部11とドレイン部12との間に配置され、ソース部11及びドレイン部12と直接接合されている。チャネル部15は非磁性体材料で形成されている。非磁性体材料として、例えばSiもしくはヒ化ガリウム(GaAs)などの半導体材料、又は、AgもしくはCu等の非磁性金属が用いられる。なお、例えば、基板18としてGaAs基板を用い、基板18へ電子をドーピングすることにより、GaAsドーブ層14(半導体層14)を形成した場合には、GaAsドーブ層14と基板18との間に二次元電子ガス層16が形成される。この場合、GaAsドーブ層14及び二次元電子ガス層16がチャネル部15として機能する。このように、チャネル部15は、二層構造になっていてもよい。チャネル部15のソース部11とドレイン部12との間の長さは、例えば数10nm程度である。またチャネル部15の基板18からの厚さは、例えば数nm程度である。ソース部11又はドレイン部12の基板18からの厚さは、チャネル部15の基板18からの厚さより厚ければよい。例えば、ソース部11又はドレイン部12の基板18からの厚さは、チャネル部15の基板18からの厚さの1.05倍~20倍程度としてもよい。

20

#### 【0027】

円偏光照射部51は、円偏光を照射する機能を有する。光源として、例えば半導体LEDが用いられる。光源は、チャネル部15の材料に応じて選択された波長を有する。例えばチャネル部15が半導体で形成される場合には可視光~赤外領域の波長の光源が用いられる。円偏光照射部51は、例えば直線偏光させたレーザ光を通過させる1/4波長板を有している。あるいは、円偏光照射部51は、例えば直線偏光させたレーザ光を通過させるポッケルセル等の電場を印加可能な光学結晶を有している。円偏光照射部51は、集光レンズ等のスポット幅を調整する機構を有している。また、円偏光照射部51は、円偏光の波長や円偏光の回転方向を制御するための円偏光制御部52に接続されている。

30

#### 【0028】

円偏光照射部51は、チャネル部15のスピン向きを制御するために円偏光をチャネル部15へ照射する。円偏光照射部51は、第1方向すなわちソース部11及びドレイン部12の磁化方向に沿った方向へ円偏光を照射してもよい。チャネル部15が半導体材料で形成されている場合には、円偏光照射部51は、チャネル部15のバンドギャップエネルギー以上のエネルギーに相当する波長を有する円偏光をチャネル部15に照射してもよい。

40

#### 【0029】

ここで、図2を用いて円偏光照射部51によるスピン制御について説明する。図2は、一実施形態に係る円偏光照射部51によるスピン制御を説明する概略図である。なお、図2では、チャネル部15が半導体材料を用いて形成された場合の例を模式的に示している。図2の(A)は、スピンの種類と円偏光の向きとの関係について、その一例を示している。また、図2の(A)において、ダウンスピンS<sub>d</sub>は、下向きスピンを表し、アップスピンS<sub>u</sub>は、上向きスピンを表す。また左円偏光Lは反時計回りの円偏光を表し、右円偏光Rは時計回りの円偏光を表す。

50

## 【0030】

図2の(A)で示すように、ダウンスピン $S_d$ は、左円偏光 $L$ が照射されると、左円偏光 $L$ よりエネルギーを受けてスピンの向きが反転し、アップスピン $S_u$ となる。また一方、アップスピン $S_u$ は、右円偏光 $R$ が照射されると、右円偏光 $R$ よりエネルギーを受けてスピンの向きが反転し、ダウンスピン $S_d$ となる。このように、左円偏光 $L$ と右円偏光 $R$ とを使い分けることで、チャンネル部15のスピンの向きを制御することができる。また、電子は円偏光が照射されると、エネルギー状態が高くなる。このため、価電子帯の電子は、円偏光を照射されることにより、エネルギーギャップを超えて伝導帯へ遷移する。このように、円偏光の回転方向だけでなく、波長(エネルギー)を変更することで、特定のスピンの向きの電子だけを遷移させることができる。

10

## 【0031】

なお、図2の(A)で示したアップスピン $S_u$ 及びダウンスピン $S_d$ と、右円偏光 $R$ 及び左円偏光 $L$ との関係は一例であって、材料や物理的特性、あるいはその他の要因により、変化する。そしてこれらスピン反転と円偏光との関係は、物質ごとに決定される選択則によって与えられるものでよい。

## 【0032】

図2の(B)は、半導体で一般的にみられるバンドギャップについて、その一例を示している。図2の(B)に示すように、半導体材料のバンド構造は、一般的に、価電子帯 $B_v$ と伝導帯 $B_c$ とに分かれる。エネルギー軸を縦軸とし、横軸を波数又は運動量で表した場合、価電子帯 $B_v$ は、伝導帯 $B_c$ より低い値で示される。そして、GaAsなど、直接遷移が起こる半導体においては、価電子帯 $B_v$ が高くなる波数と、伝導帯 $B_c$ が低くなる波数とは、同じ波数である。価電子帯 $B_v$ と伝導帯 $B_c$ とのエネルギー差が、バンドギャップエネルギー $E_g$ である。

20

## 【0033】

よって、チャンネル部15をGaAsで形成した場合、円偏光照射部51がGaAsのバンドギャップエネルギー $E_g$ と同じか少し高いエネルギーに相当する波長を有する円偏光をチャンネル部15へ照射することにより、チャンネル部15のスピンの向きが価電子帯 $B_v$ から伝導帯 $B_c$ に遷移する。このため、直接遷移する半導体を採用することによって、効率的にソース部11から注入された電流をドレイン部12に流すことが可能となる。なお、GaAsのバンドギャップエネルギー $E_g$ は、室温で1.43eV程度となり、このエネルギーに対応する波長が選択され得る。

30

## 【0034】

次に、スピン偏極トランジスタ素子10のオン・オフ状態を概説する。図3は、スピン偏極トランジスタ素子10がオフ状態のスピンの向きを説明する概略図である。図4は、スピン偏極トランジスタ素子10がオン状態のスピンの向きを説明する概略図である。

## 【0035】

図3に示すように、ソース部11は、基板18に対して垂直な方向(基板垂直方向)に磁化されており、磁気モーメント $S_{21}$ を有する。同様に、ドレイン部12は、基板18に対して垂直な方向に磁化されており、磁気モーメント $S_{22}$ を有する。磁気モーメント $S_{21}$ と磁気モーメント $S_{22}$ とは互いに平行である。チャンネル部15に円偏光が照射されていない場合、二次元電子ガス層16内のスピン $S_0$ の向きはバラバラである。従って、ソース部11からドレイン部12へ電流が流れない(オフ状態)。

40

## 【0036】

次に、図4に示すように、円偏光照射部51により、円偏光をチャンネル部15の上面へ照射する。円偏光照射部51は、基板18に対して垂直方向に円偏光を照射する。基板垂直方向にスピンの向きを揃える場合には、基板垂直方向へ円偏光を照射する方が効率的である。円偏光照射部51からチャンネル部15へ円偏光が照射されると、スピン $S_0$ は基板18に垂直な方向に揃う。(スピン $S_{20}$ )。すなわち、チャンネル部15のスピンの向きがソース部11及びドレイン部12の磁化方向に揃う。従って、ソース部11からドレイン部12へ電流が流れる(オン状態)。

50

## 【 0 0 3 7 】

なお、ソース部 1 1 及びドレイン部 1 2 が、円偏光の侵入長よりも十分に長い厚さを有している場合には、円偏光照射部 5 1 は、チャンネル部 1 5 の上面のみに正確に照射する必要はなく、ソース部 1 1 及びドレイン部 1 2 の上面にも照射してもよい。このように、ソース部 1 1 及びドレイン部 1 2 の膜厚を調整することで、光の照射範囲の精度を緩和させることができる。

## 【 0 0 3 8 】

以上、第 1 実施形態に係るスピン偏極トランジスタ素子 1 0 によれば、円偏光照射部 5 1 により、チャンネル部 1 5 に円偏光が照射され、チャンネル部 1 5 においてスピンの向きが偏極した電子が励起され、チャンネル部 1 5 の電気抵抗が変化する。このため、ソース部 1 1 から注入された電流をドレイン部 1 2 に流すことができる。また、ソース部 1 1 及びドレイン部 1 2 の磁化方向が基板垂直方向の場合において、円偏光照射部 5 1 が基板垂直方向に沿った方向に円偏光を照射することで、チャンネル部 1 5 のスピンの向きを基板垂直方向に揃えることができる。このため、スピン偏極トランジスタ素子 1 0 をオフ状態からオン状態へ切り替えることができる。このように、電流のスイッチングを、円偏光を用いて非接触で行うため、ゲート電極を素子に形成する必要がない。従って、ゲート電極のための微細加工が不要となり素子の製造が容易となるとともに、ゲート電極を形成するための領域を確保する必要がないことからソース部 1 1 とドレイン部 1 2 との間を狭くすることができる。例えば、 $1\ \mu\text{m}$  程度のゲート電極を設けるためには、ソース部 1 1 とドレイン部 1 2 との間隔を  $3\ \mu\text{m}$  程度空ける必要がある。これに対して、第 1 実施形態に係るスピン偏極トランジスタ素子 1 0 によれば、ソース部 1 1 とドレイン部 1 2 との間隔を数  $\text{nm}$  とすることができる。よって、トランジスタ構造を小型化することができる。さらに、円偏光のスイッチング速度がゲート変調速度にそのまま依存することから、現在の COMS 素子と同等以上の速度で動作可能である。

## 【 0 0 3 9 】

また、チャンネル部 1 5 が半導体材料により形成されている場合、チャンネル部 1 5 に円偏光が照射されると、チャンネル部 1 5 を形成する半導体材料中のスピンの向きが価電子帯から伝導帯に遷移することができるため、より効率的にソース部 1 1 から注入された電流をドレイン部 1 2 に流すことが可能となる。さらにチャンネル部 1 5 が二次元電子ガス層 1 6 を有している場合、チャンネル部 1 5 に二次元電子ガス層 1 6 よりスピンの向きが供給されるため、チャンネル部 1 5 におけるスピンの角運動量の伝搬を効率的に行うことが可能となる。

## 【 0 0 4 0 】

( 第 2 実施形態 )

第 2 実施形態に係るスピン偏極トランジスタ素子 1 0 は、第 1 実施形態に係るスピン偏極トランジスタ素子 1 0 とほぼ同様に構成され、ソース部 1 1 の磁化の向き、ドレイン部 1 2 の磁化の向き、チャンネル部 1 5 を流れるスピンの向き、及び円偏光照射部 5 1 から照射される円偏光の照射方向が相違する。以下、説明理解の容易性を考慮して、第 1 実施形態に係るスピン偏極トランジスタ素子 1 0 と重複する説明は省略し、相違点を中心に説明する。

## 【 0 0 4 1 】

図 5 は、第 2 実施形態におけるスピン偏極トランジスタ素子がオフ状態のスピンの向きを説明する概略図である。図 6 は、第 2 実施形態におけるスピン偏極トランジスタ素子がオン状態のスピンの向きを説明する概略図である。

## 【 0 0 4 2 】

図 5 に示すように、ソース部 1 1 は、基板 1 8 の面内方向に磁化されており、磁気モーメント  $S_{11}$  を有する。また、ドレイン部 1 2 は、基板 1 8 の面内方向に磁化されており、磁気モーメント  $S_{12}$  を有する。磁気モーメント  $S_{11}$  と磁気モーメント  $S_{12}$  とは同一方向へ向いている。チャンネル部 1 5 に円偏光が照射されていない場合、二次元電子ガス層 1 6 内のスピンの向きはバラバラである。従って、ソース部 1 1 とドレイン部 1 2 との間には電流は流れない ( オフ状態 ) 。



## 【 0 0 4 3 】

次に、円偏光が照射された場合を図 6 に示す。図 6 に示すように、円偏光照射部 5 1 は、チャンネル部 1 5 への円偏光の侵入角度（チャンネル部 1 5 に対する入射角度であって、チャンネル部 1 5 の表面方向と平行な場合を 0 度とする）が 9 0 度より小さい角度となるように円偏光を照射する。基板面内方向にスピンの向きを揃える場合には、基板面内方向へ円偏光を照射する方が効率的である。つまりソース部 1 1 及びドレイン部が基板 1 8 の面内方向に磁化している場合、円偏光照射部 5 1 は、チャンネル部 1 5 への円偏光の侵入角度ができるだけ低角、好ましくは 0 度に近い角度となるように、基板面内方向へ円偏光を照射する方が効率的である。円偏光照射部 5 1 からチャンネル部 1 5 へ円偏光が照射されると、スピン S 0 は、ソース部 1 1 及びドレイン部 1 2 を含む平面方向、言い換えれば基板 1 8 の面内方向に揃う（スピン S 1 0）。すなわち、チャンネル部 1 5 のスピンの向きがソース部 1 1 及びドレイン部 1 2 の磁化方向に揃う。従って、ソース部 1 1 とドレイン部 1 2 との間には電流は流れる（オン状態）。

10

## 【 0 0 4 4 】

以上、第 2 実施形態に係るスピン偏極トランジスタ素子 1 0 によれば、第 1 実施形態に係るスピン偏極トランジスタ素子 1 0 と同様の作用効果を奏する。

## 【 0 0 4 5 】

（第 3 実施形態）

第 3 実施形態に係るスピン偏極トランジスタ素子 2 0 は、第 1 実施形態に係るスピン偏極トランジスタ素子 1 0 の一部構成要素を複数配列した素子である。以下、説明理解の容易性を考慮して、第 1 実施形態に係るスピン偏極トランジスタ素子 1 0 と重複する説明は省略し、相違点を中心に説明する。

20

## 【 0 0 4 6 】

図 7 は、第 3 実施形態におけるスピン偏極トランジスタ素子 2 0 を説明する概略図である。図 7 に示すように、スピン偏極トランジスタ素子 2 0 は、第 1 実施形態又は第 2 実施形態に係るスピン偏極トランジスタ素子 1 0 の一部構成要素を基板 B<sub>0</sub> 上に複数配列させた構造を有する。すなわち、スピン偏極トランジスタ素子 2 0 は、第 1 実施形態又は第 2 実施形態に係るスピン偏極トランジスタ素子 1 0 の構成要素である第 1 ソース部 1 1、第 1 ドレイン部 1 2 及び第 1 チャンネル部 1 5 を備えている。また、スピン偏極トランジスタ素子 2 0 は、第 1 実施形態又は第 2 実施形態に係るスピン偏極トランジスタ素子 1 0 の構成要素である第 2 ソース部 2 1、第 2 ドレイン部 2 2 及び第 2 チャンネル部 2 5 を備えている。第 1 ソース部 1 1、第 1 ドレイン部 1 2、第 2 ソース部 2 1 及び第 2 ドレイン部 2 2 は第 1 方向にそれぞれ磁化されている。

30

## 【 0 0 4 7 】

さらに、第 1 実施形態又は第 2 実施形態に係るスピン偏極トランジスタ素子 1 0 が備える円偏光照射部 5 1 とほぼ同様の円偏光照射部 7 1 を備えている。本実施形態に係る円偏光照射部 7 1 は、円偏光照射部 5 1 と比較して、照射先（照射領域）のみが相違し、構造は同一である。また、円偏光照射部 7 1 は、円偏光の波長や円偏光の回転方向を制御するための円偏光制御部 7 2 に接続されていてもよい。

40

## 【 0 0 4 8 】

円偏光照射部 7 1 は、第 1 チャンネル部 1 5 及び第 2 チャンネル部 2 5 のスピンの向きを制御するために円偏光を第 1 チャンネル部 1 5 及び第 2 チャンネル部 2 5 へ照射する。円偏光照射部 7 1 は、第 1 方向に沿った方向に円偏光を照射してもよい。

## 【 0 0 4 9 】

以上、第 3 実施形態に係るスピン偏極トランジスタ素子 2 0 によれば、円偏光照射部 7 1 により、第 1 チャンネル部 1 5 及び第 2 チャンネル部 2 5 に円偏光が照射され、第 1 チャンネル部 1 5 内及び第 2 チャンネル部 2 5 内においてスピンの向きが偏極した電子が励起され、第 1 チャンネル部 1 5 及び第 2 チャンネル部 2 5 の電気抵抗が変化する。従って、第 1 実施形態及び第 2 実施形態に係るスピン偏極トランジスタ素子 1 0 と同様に、トランジスタ構造を小型

50

化することができる。

【0050】

また、第3実施形態に係るスピン偏極トランジスタ素子20によれば、トランジスタ構成要素間で共通となる円偏光照射部71を備え、複数のスピン偏極トランジスタに円偏光を照射することにより、複数のスピン偏極トランジスタを一括して制御することができる。

【0051】

(第4実施形態)

第4実施形態に係るスピン偏極トランジスタ素子30は、第3実施形態に係るスピン偏極トランジスタ素子20とほぼ同様に構成され、各トランジスタ素子単位で円偏光照射部をさらに備える点が相違する。以下、説明理解の容易性を考慮して、第3実施形態に係るスピン偏極トランジスタ素子20と重複する説明は省略し、相違点を中心に説明する。

【0052】

図8は、第4実施形態に係るスピン偏極トランジスタ素子30を説明する概略図である。図8に示すように、スピン偏極トランジスタ素子30は、第1実施形態又は第2実施形態に係るスピン偏極トランジスタ素子10を基板B<sub>0</sub>上に複数配列させた構造を有する。すなわち、スピン偏極トランジスタ素子30は、第1実施形態又は第2実施形態に係るスピン偏極トランジスタ素子10と同一の構造を有するスピン偏極トランジスタ素子10A、10Bを備えている。スピン偏極トランジスタ素子10A、10Bは、それぞれ第1円偏光照射部51、第2円偏光照射部61を備えている。第1ソース部11、第1ドレイン部12、第2ソース部21及び第2ドレイン部22は第1方向にそれぞれ磁化されている。

【0053】

第1円偏光照射部51は、第1チャンネル部15を構成する物質内のスピンを制御するために円偏光を照射する。第2円偏光照射部61は、第2チャンネル部25を構成する物質内のスピンを制御するために円偏光を照射する。円偏光照射部71は、第3実施形態に係るスピン偏極トランジスタの円偏光照射部71と同一である。

【0054】

以上、第4実施形態に係るスピン偏極トランジスタ素子30によれば、円偏光照射部71により、第1チャンネル部15及び第2チャンネル部25に円偏光が照射され、第1チャンネル部15内及び第2チャンネル部25内においてスピンの偏極した電子が励起され、第1チャンネル部15及び第2チャンネル部25の電気抵抗が変化する。従って、第3実施形態に係るスピン偏極トランジスタ素子10と同様に、トランジスタ構造を小型化することができる。

【0055】

また、第4実施形態に係るスピン偏極トランジスタ素子30によれば、トランジスタ構成要素間で共通となる円偏光照射部71を備え、複数のスピン偏極トランジスタに円偏光を照射することにより、複数のスピン偏極トランジスタを一括して制御することができる。

【0056】

さらに、第4実施形態に係るスピン偏極トランジスタ素子30によれば、トランジスタ構成要素間で独立した第1円偏光照射部51及び第2円偏光照射部61を備え、複数のスピン偏極トランジスタに個々に円偏光を照射することにより、複数のスピン偏極トランジスタを個別に制御することができる。

【0057】

上述した各実施形態は、本発明に係るスピン偏極トランジスタの一例を示すものである。本発明は、各実施形態に係るスピン偏極トランジスタに限られるものではなく、変形し、又は他のものに適用したものであってもよい。

【0058】

例えば、上述した実施形態では、チャンネル部15は、ソース部11及びドレイン部12

10

20

30

40

50

と直接接合されているとしたが、チャンネル部 15 は、ソース部 11 及びドレイン部 12 とトンネル層などを介して接合されていてもよい。このように構成した場合であっても、スピン偏極トランジスタ素子 10 を実現することが可能となる。

【0059】

また、上述した実施形態では、円偏光照射部 51 を、基板 18 上に配置されるチャンネル部 15 の上方に配置し、基板表面側から円偏光を照射する例を説明したが、円偏光照射部 51 を、基板 18 裏面側に配置し、基板 18 の裏面側から円偏光を照射してもよい。この際、チャンネル部 15 が積層された基板 18 を部分エッチングにより薄くしてもよい。このように構成した場合であっても、円偏光によってチャンネル部 15 のスピンの向きを制御することができる。

10

【0060】

また、上述した実施形態では、従来の電界効果トランジスタなどにみられるゲート電極を不要とする例を説明したが、ゲート電極をチャンネル部 15 上に設けるとともに、円偏光照射部 51 を備える構成としてもよい。すなわち、円偏光照射部 51 をゲート電極によるスピン制御のアシスト機構として動作させてもよい。アシスト機構として動作させる場合には、円偏光の効果を一層奏するために、例えば、ゲート電極を薄く形成したり、上述したように基板 18 の裏面側から円偏光を照射したりしてもよい。このように構成した場合であっても、例えば円偏光を照射する領域についてはゲート電極を設ける必要がなくなるため、ソース及びドレイン間の距離を小さくして小型化することができる。また、アシスト機構を備えることでゲート電極から印加すべき電圧を低減することができるので、ゲート電圧を印加させる機構そのものを簡易にすることが可能となり、結果として素子の小型化に寄与することができる。

20

【0061】

また、上述した実施形態では、円偏光照射部 51 が円偏光を照射したタイミングで、ソース部 11 からドレイン部 12 へ電流が流れトランジスタがオン状態となる例を説明したが、円偏光照射部 51 が円偏光を照射したタイミングで、トランジスタがオフ状態となるように、チャンネル部 15 のスピンを制御してもよい。

【0062】

また、図 7, 8 では、2つの素子構成要素を配列させた例を示しているが、素子構成要素を3つ以上配列させてもよい。また、基板 18, 28 を共通化させて基板 B<sub>0</sub> を不要としてもよい。さらに、第1ソース部 11、第1ドレイン部 12、第2ソース部 21 及び第2ドレイン部 22 が第1方向にそれぞれ磁化されている例を説明したが、第1ソース部 11 及び第1ドレイン部 12 の磁化方向（例えば第1方向）と、第2ソース部 21 及び第2ドレイン部 22 の磁化方向（例えば第2方向）が異なる方向であってもよい。

30

【0063】

また、上述した実施形態では、1つの素子構成要素がソース部、ドレイン部及びチャンネル部を備えた例を説明したが、隣接する素子構成要素のソース部とドレイン部とを1つの部材で構成してもよい。例えば、図 9 に示すように、第1ドレイン部 12 及び第2ソース部 21 を共通化させ、端子 41 としてもよい。このように部材を兼用することができるため、トランジスタ素子を一層小型化することが可能となる。また、基板 18、28 を共通化させ、基板 42 としてもよい。

40

【産業上の利用可能性】

【0064】

スピン偏極トランジスタ素子 10 は、産業上、以下のような利用可能性を有している。スピン偏極トランジスタ素子 10 は、例えば、各産業分野における電気電子部品として使用することができる。例えば、面内スピントランジスタや縦型ナノピラー等の強磁性体/半導体ハイブリッド構造におけるゲート制御としても適用することができる。

【符号の説明】

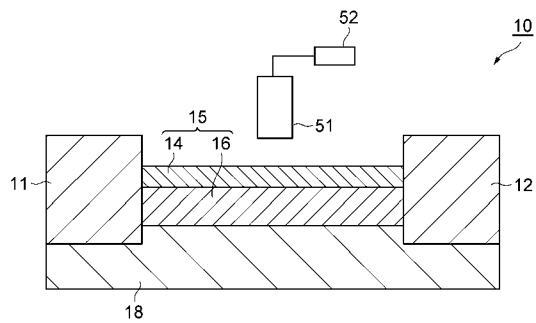
【0065】

10 ... スピン偏極トランジスタ素子、 11 ... ソース部、 12 ... ドレイン部、 14 ... G a

50

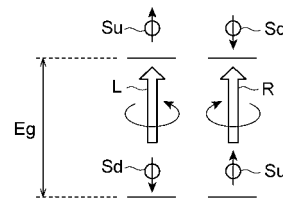
A s ドープ層 ( 半導体層 )、 1 5 ... チャンネル部、 1 6 ... 二次元電子ガス層、 5 1 ... 円偏光照射部。

【 図 1 】

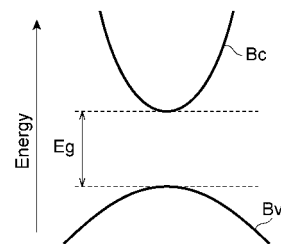


【 図 2 】

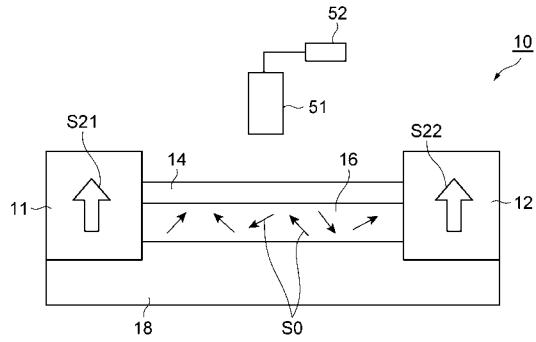
(A)



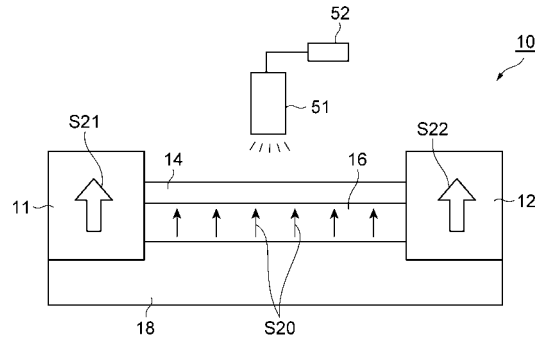
(B)



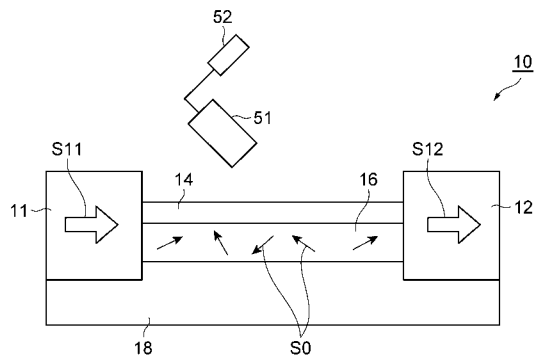
【 図 3 】



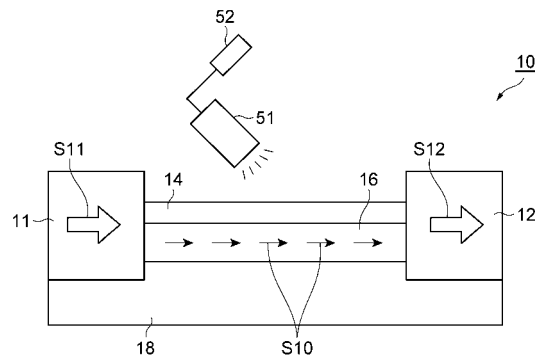
【 図 4 】



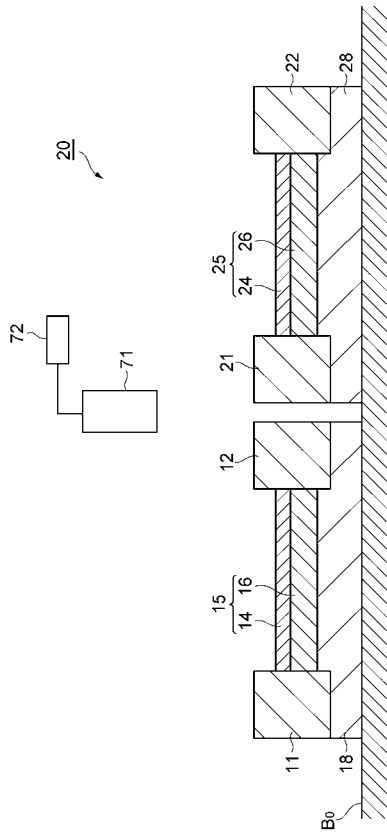
【 図 5 】



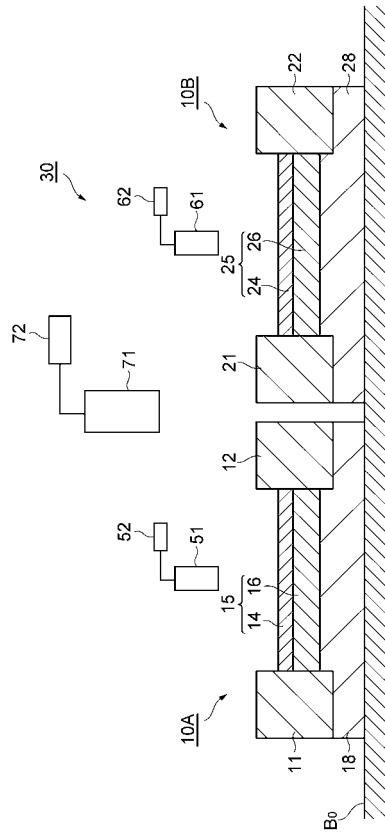
【 図 6 】



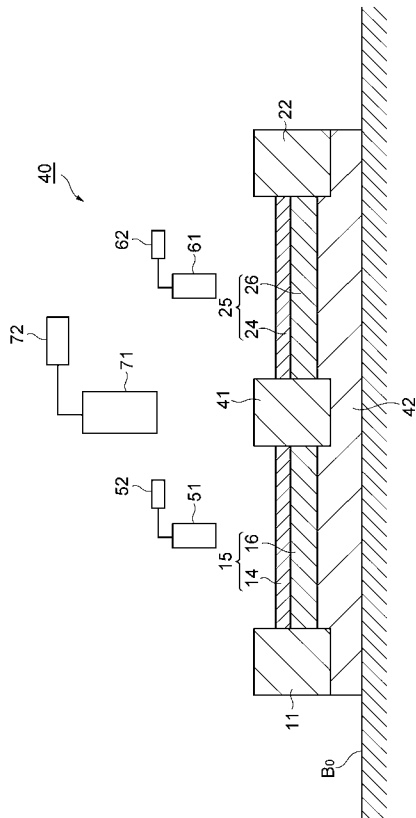
【 図 7 】



【 図 8 】



【 図 9 】



フロントページの続き

(51)Int.Cl. F I

H 0 1 L 21/338 (2006.01)

H 0 1 L 27/095 (2006.01)

(72)発明者 廣畑 貴文

イギリス国, ワイオー１０ ５ディーディー, ノース・ヨークシャー, ヨーク, ヘスリン  
トン, ユニヴァーシティ オブ ヨーク内

審査官 小山 満

(56)参考文献 特開２００８ - １６６６８９ ( J P , A )

特開２００３ - ０９２４１２ ( J P , A )

特開２００９ - １４１１３１ ( J P , A )

特開２０１１ - １８７８６１ ( J P , A )

特開２００９ - １６４４４７ ( J P , A )

特開２００５ - ０１１９０７ ( J P , A )

特開２０１２ - ０４９２０２ ( J P , A )

特表２００４ - ５３１８８１ ( J P , A )

特開平０８ - ２４９８７５ ( J P , A )

特開２００６ - １４６７１８ ( J P , A )

特開２００３ - ２２４３３３ ( J P , A )

(58)調査した分野(Int.Cl. , D B名)

H 0 1 L 29 / 8 2

H 0 1 L 21 / 3 3 8

H 0 1 L 27 / 0 9 5

H 0 1 L 29 / 0 6

H 0 1 L 29 / 6 6

H 0 1 L 29 / 7 7 8

H 0 1 L 29 / 8 1 2