(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
2015 年 9 月 17 日(17.09.2015)

WIPO | PCT

(10) 国際公開番号
WO 2015/137335 A1

(51) 国際特許分類:
H01L 29/82 (2006.01) *H01L 27/105* (2006.01)
H01L 21/8246 (2006.01)

(21) 国際出願番号: PCT/JP2015/057001

(22) 国際出願日: 2015 年 3 月 10 日(10.03.2015)

(25) 国際出願の言語: 日本語

(26) 国際公開の言語: 日本語

(30) 優先権データ:
特願 2014-047746 2014 年 3 月 11 日(11.03.2014) JP
特願 2014-054016 2014 年 3 月 17 日(17.03.2014) JP
特願 2014-085850 2014 年 4 月 17 日(17.04.2014) JP

(71) 出願人: 国立研究開発法人理化学研究所(RIKEN) [JP/JP]; 〒3510198 埼玉県和光市広沢２番１号 Saitama (JP).

(72) 発明者: 永長　直人(NAGAOSA Naoto); 〒3510198 埼玉県和光市広沢２番１号　独立行政法人理化学研究所内 Saitama (JP). 小椎八重　航(KOSHIBAE Wataru); 〒3510198 埼玉県和光市広沢２番１号　独立行政法人理化学研究所内 Saitama (JP). 岩崎　悴一(IWASAKI Junichi); 〒3510198 埼玉県和光市広沢２番１号　独立行政法人理化学研究所内 Saitama (JP). 川▲崎▼　雅司(KAWASAKI Masashi); 〒3510198 埼玉県和光市広沢２番１号　独立行政法人理化学研究所内 Saitama (JP). 金子　良夫(KANEKO Yoshio); 〒3510198 埼玉県和光市広沢２番１号　独立行政法人理化学研究所内 Saitama (JP). 十倉　好紀(TOKURA Yoshinori); 〒3510198 埼玉県和光市広沢２番１号　独立行政法人理化学研究所内 Saitama (JP).

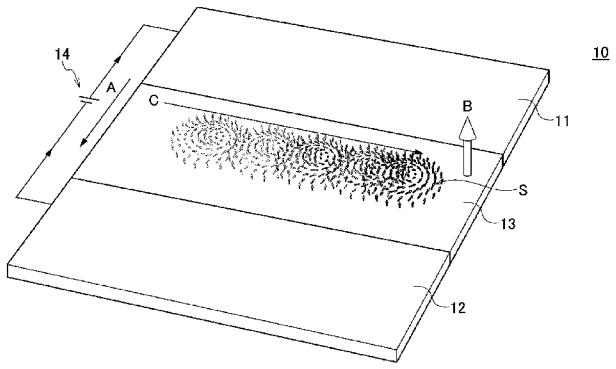
(74) 代理人: 龍華国際特許業務法人(RYUKA IP LAW FIRM); 〒1631522 東京都新宿区西新宿１－６－１　新宿エルタワー２２階 Tokyo (JP).

(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, BN, 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, IR, IS, JP, KE, KG, KN, KP, KR, KZ, LA, LC, LK, LR, LS, LU, LY, MA, MD, ME, MG, MK, MN, MW, MX, MY, MZ, NA, NG, NI, NO, NZ, OM, PA, PE, PG, PH, PL, PT, QA, RO, RS, RU, RW, SA, 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.

[続葉有]

(54) **Title**: MAGNETIC ELEMENT, SKYRMION MEMORY, AND DEVICE INCLUDING SKYRMION MEMORY MOUNTED THEREIN

(54) 発明の名称 : 磁気素子、スキルミオンメモリおよびスキルミオンメモリを搭載した装置



(57) **Abstract**: A thin-layer magnetic element capable of transferring skyrmions, characterized by comprising: a thin-layer magnetic object (13); an upstream-side nonmagnetic metal (11) which is a thin-layer conductor connected to the magnetic object (13) in a direction in which the magnetic object (13) has been spread; and a downstream-side nonmagnetic metal (12) which is a thin-layer conductor connected to the magnetic object (13) so as to be separated from the upstream-side nonmagnetic metal (11). The magnetic element is further characterized in that an electric current is applied between the upstream-side nonmagnetic metal (11) and the downstream-side nonmagnetic metal (12), thereby transferring one or more skyrmions (S).

(57) 要約:　スキルミオンを転送可能な薄層状の磁気素子であって、薄層状の磁性体１３と、磁性体１３の延展方向に接続された薄層状の導電体である上流側非磁性金属１１と、上流側非磁性金属１１と離間して磁性体１３に接続された薄層状の導電体である下流側非磁性金属１２とを備え、上流側非磁性金属１１と下流側非磁性金属１２との間に電流を印加することにより、１又は複数のスキルミオンＳを転送することを特徴とする。

WO 2015/137335 A1

(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, RW, SD, SL, ST, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), ユーラシア (AM, AZ, BY, KG, KZ, 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, KM, ML, MR, NE, SN, TD, TG).

添付公開書類:

— 国際調査報告（条約第 21 条(3)）

— 補正された請求の範囲（条約第 19 条(1)）

明　細　書

発明の名称 ：

磁気素子、スキルミオンメモリおよびスキルミオンメモリを搭載した装置

技術分野

[0001] 本発明は、スキルミオンを高速に転送、消去、または、一括消去できる磁気素子及びこの磁気素子を応用したスキルミオンメモリ、スキルミオンメモリ搭載ＣＭＯＳ－ＬＳＩデバイス、パーソナルコンピュータ、データ記録媒体、データ記録装置、携帯電話機、スマートフォン、デジタルカメラ、スティックメモリ、通信装置、画像記録装置、テレビジョン受像機、自走装置、飛行装置、宇宙空間飛行装置に関する。

背景技術

[0002] 近年において、メモリ等の記録用デバイスの記憶容量に対して大容量化への要求が特に高まっている。例えば画像素子の画素ピッチがより繊細になるにつれて画素数が増大し、これに応じて記録用デバイスに要求される記憶容量は１Ｍビット相当となる。このような画像素子上で動画を表示させる場合には、１Ｇビットを超える情報量となるため、当然これに応じた記憶容量が必要となり、記憶用デバイスの記憶容量も１テラビットからさらに大容量化しつつある。またデジタルカメラ等に装着される各種ＳＤメモリカードの大容量化も進行中である。

[0003] 磁性体の磁気モーメントをデジタル情報として利用する磁気素子は、情報保持時に電力を要さない不揮発性メモリを担うナノスケールの磁気構造による超高密度性等の利点から大容量情報記憶媒体としての応用が期待され、エレクトロニクスデバイスのメモリデバイスとして、その重要度が増している。

[0004] さらに近年、不揮発性メモリをシリコン基板上に作られたＣＭＯＳデバイスに搭載し、計算処理能力の飛躍的向上を目的とした磁気メモリＣＭＯＳ混載の研究開発が精力的に行われている。

[0005] これは、ＣＭＯＳ回路で構成されたシリコンチップと不揮発性素子チップとの信号のやり取りに伴う、制御回路の省略、制御時間の短縮を目的としたもので、計算処理時間を飛躍的に向上させる技術である。

[0006] さらに、この研究開発は、無駄な回路部分への電力を遮断した超省電力デバイスの開発も目的としている。特に近年はＣＭＯＳ－ＬＳＩデバイスの省電力化が重要な課題として浮上しており、待機電力の省力化課題の重要性は増している。

[0007] これが実現すると、大規模情報が扱え、その応答は高速で、高機能で人間にやさしいヒューマンインターフェイスをもちなおかつ低消費電力のパーソナルコンピュータ、データ記録媒体、データ記録装置、携帯電話機、スマートフォン、デジタルカメラ、スティックメモリ、通信装置、画像記録装置、テレビ、自走装置、飛行装置、宇宙空間飛行装置などの大容量メモリとして応用展開が期待できる。

[0008] こうした状況下で、本願発明者らは、外部磁場のもとでカイラル磁性体にスキルミオン磁気構造をもつ材料を見出し尚かつ電流によりスキルミオンを駆動できることを見出し、この磁気構造体を用いた磁気素子を提案した（特許文献１）。

[0009] スキルミオンは中心部において印加された磁場に対して反平行の磁気モーメントを有し、周辺部においては印加された磁場に対して平行な磁気モーメントを有する、渦巻状の磁気構造を備えている。

[0010] スキルミオンは、直径が１～１００ｎｍのナノスケールサイズの磁気構造を有し、膨大なビット情報を極細密化して記憶できる大容量記憶磁気素子として応用することが期待されている。また、スキルミオンは、このビット情報を直接転送し、情報演算や伝達に応用できる可能性をもつ磁気構造体でもある。

[0011] こうした特徴から、スキルミオン素子は、要求される記憶容量が増加の一途をたどるデータ記録媒体およびデータ記録装置用磁気メモリの性能限界にブレークスルーを与える次世代型磁気メモリデバイスの根幹を担うものとし

て期待されている。

[0012] 特に磁気メモリは宇宙空間での各種の素粒子や放射線への耐性が強い。スキルミオンメモリも同じ特徴を有している。モーターなどの回転機構を必要としない大容量磁気メモリは宇宙空間におけるメモリの主役としての位置を占めると期待される。

[0013] 一方で、最近メモリ媒体として浮上している電子を記憶ビットとして利用するフラッシュメモリはこのような環境には適さない。電子は高エネルギー素粒子や放射線によりシリコン酸化膜のエネルギー障壁を簡単に乗り越え、データの消去や誤書き込みを発生させるからである。

[0014] また、大規模不揮発性スキルミオンメモリが大規模論理ＣＭＯＳ－ＬＳＩデバイスとチップが一体化されると、低消費電力型ＣＭＯＳデバイスや高インテリジェント型ＣＭＯＳデバイスにとって大変魅力的であり、こうした技術を応用した高密度不揮発性スキルミオンメモリ混載ＣＭＯＳ－ＬＳＩデバイスの登場が期待されている。

[0015] 次世代型のメモリデバイスの他の候補としては、米国ＩＢＭを中心に磁気ドメイン磁壁を駆動してその磁気モーメント配置を電流で転送し、記憶情報を読み出すマグネチックシフトレジスタ１が提案されている（特許文献２参照）。

[0016] 図３３は、電流による磁気ドメイン磁壁駆動の原理を示す模式図である。互いに磁気モーメントの向きが相反する磁気領域の境界がドメイン磁壁である。矢印の向きの電流により磁気ドメイン磁壁が駆動される。ドメイン磁壁が移動することによりドメインを構成する情報を記憶した磁気モーメントの向きによる磁気変化を下部の磁気センサ２で検知して磁気情報を引き出す。

[0017] しかし、こうしたマグネチックシフトレジスタ１は、磁気ドメイン磁壁を動かす際に大きな電流が必要であり、また磁気ドメイン磁壁の転送速度が遅いという欠点を持っている。この結果、メモリの書き込み、消去時間が遅くなる。

[0018] そこで、本願発明者は、磁性体中に発生するスキルミオンを記憶単位とし

て使ったスキルミオン磁気素子を提案した（特許文献１参照）。この提案において本願発明者らは、スキルミオンを電流により駆動できることを示した。

[0019] 従来、特定の形状をしたパーマロイなどの材料のエッジに磁気バブルを固定するとともに、磁界を回転させることにより、磁気バブルをエッジ上に動かしていた。すなわち、磁気バブルを用いた磁気素子メモリでは、常に回転磁界が必要となっていた。

[0020] これに対して、本願発明者らは、磁気バブルではなくスキルミオンを用いるとともに、これを回転磁界ではなく電流で直接駆動できることを示した。

[0021] このように、スキルミオンは電流による転送が可能であることから、磁気情報を直接電流で制御できる磁気素子としての応用が期待されている。

[先行技術文献]

[特許文献]

[特許文献１]特願２０１２－２３２３２４

[特許文献２]米国特許第６８３４００５号

[非特許文献]

非特許文献１ 永長 直人、十倉 好紀、”Ｔｏｐｏｌｏｇｉｃａｌ ｐｒｏｐｅｒｔｉｅｓ ａｎｄ ｄｙｎａｍｉｃｓ ｏｆ ｍａｇｎｅｔｉｃ ｓｋｙｒｍｉｏｎｓ”、Ｎａｔｕｒｅ Ｎａｎｏｔｅｃｈｎｏｌｏｇｙ、英国、Ｎａｔｕｒｅ Ｐｕｂｌｉｓｈｉｎｇ Ｇｒｏｕｐ、２０１３年１２月４日、Ｖｏｌ．８、ｐ８９９－９１１．

発明の概要

発明が解決しようとする課題

[0022] 上述したように、メモリや論理演算等のデバイスにスキルミオンを応用することへの期待が高まっているが、スキルミオンの駆動電流とスキルミオンの転送の関係等の詳細が明らかではなかったため、スキルミオンメモリを実現することができない状況であった。

[0023] そこで、本願発明者はスキルミオンの駆動電流とスキルミオンの転送状態

の関係の詳細を明らかにした上で、１または複数のスキルミオンを高速に転送、消去または一括消去できる磁気素子及びスキルミオンメモリを発明した。

[0024] また、こうした磁気素子及びスキルミオンメモリの一つの実施形態においては、所定のトラック領域の１または複数のスキルミオンを印加した電流で高速に転送できることが好ましい。また、こうした磁気素子及びスキルミオンメモリの一つの実施形態においては、１または複数のスキルミオンを印加した電流で所定の箇所において消去できることが好ましい。また、こうした磁気素子及びスキルミオンメモリの一つの実施形態においては、印加した電流で所定のトラック領域のスキルミオンを一括で消去できることが好ましい。

[0025] すなわち、本願発明は、低消費電力で１または複数のスキルミオンを高速に転送、消去、または、一括消去できる磁気素子及びこの磁気素子が応用されたスキルミオンメモリ、スキルミオンメモリ搭載ＣＭＯＳ－ＬＳＩデバイス、パーソナルコンピュータ、データ記録媒体、データ記録装置、携帯電話機、スマートフォン、デジタルカメラ、スティックメモリ、通信装置、画像記録装置、テレビジョン受像機、自走装置、飛行装置、宇宙空間飛行装置を提供することを目的とする。

課題を解決するための手段

[0026] 本発明の第１の形態においては、スキルミオンを転送可能な薄層状の磁気素子であって、薄層状の磁性体と、磁性体の延展方向に接続された薄層状の導電体である上流側非磁性金属と、上流側非磁性金属と離間して磁性体に接続された薄層状の導電体である下流側非磁性金属とを備え、上流側非磁性金属と下流側非磁性金属との間に電流を印加することにより、１又は複数のスキルミオンが転送されることを特徴とする磁気素子。

[0027] 磁性体における上流側非磁性金属から下流側非磁性金属に至る幅ｗは、スキルミオンの直径をλとしたとき、ｗ≧０．５λであってよい。磁性体は、転送される複数のスキルミオンの間隔ｄがスキルミオンの直径λの２倍以上

である場合に、その間隔ｄを保持しつつスキルミオンを転送してよい。

[0028] 本発明の第２の形態においては、第１の形態に係る磁気素子と、磁気素子の上流側非磁性金属及び下流側非磁性金属に接続され、上流側非磁性金属から下流側非磁性金属に向けて電流を印加する電源と、磁性体の一面側に対向して設けられた磁場発生部とを備え、電源は、上流側非磁性金属と下流側非磁性金属との間に電流を印加することにより、１又は複数のスキルミオンを転送することを特徴とするスキルミオンメモリを提供する。

[0029] 磁性体における上流側非磁性金属から下流側非磁性金属に至る幅ｗは、スキルミオンの直径をλとしたとき、ｗ≧０．５λであってよい。磁性体は、転送される複数のスキルミオンの間隔ｄがスキルミオンの直径λの２倍以上である場合に、その間隔ｄを保持しつつスキルミオンを転送してよい。下流側非磁性金属は、磁性体の延展方向に接続されてよい。下流側非磁性金属は、磁性体に積層されて接続されてよい。

[0030] 本発明の第３の形態においては、スキルミオンを転送可能な薄層状の磁気素子であって、薄層状で切り欠けを有する磁性体と、磁性体の延展方向に接続された薄層状の導電体である上流側非磁性金属と、上流側非磁性金属と離間して磁性体に接続された薄層状の導電体である下流側非磁性金属とを備え、上流側非磁性金属と下流側非磁性金属との間に電流を印加することにより、磁性体中で転送される１又は複数のスキルミオンが、切り欠けを介して消去されることを特徴とする磁気素子を提供する。

[0031] 磁性体は、上流側非磁性金属に接する磁性体の端部から切り欠けが設けられ、当該切り欠けの内周端に上流側非磁性金属を接触させてよい。磁性体は、切り欠けの隅部においてスキルミオンを消去してよい。磁性体は、上流側非磁性金属に接する磁性体の端部から長方形状の切り欠けが設けられ、切り欠けは、電流の印加方向に対する略直交方向の長さＬｘが、スキルミオンの直径λの２倍以上であってよい。

[0032] 磁性体は、上流側非磁性金属に接する磁性体の端部から下流側非磁性金属側に向けて縮径化する台形状の切り欠けが設けられ、切り欠けにおける下流

側非磁性金属側により近い下辺の長さＬｘ２は、スキルミオンの直径λより大きくてよい。切り欠けと下流側非磁性金属との間に形成される転送経路の幅、又は複数の切り欠け間に形成される転送経路の幅は、スキルミオンの直径λ以上であってよい。

[0033] 本発明の第４の形態においては、第３の形態に係る磁気素子と、磁気素子の上流側非磁性金属及び下流側非磁性金属に接続され、上流側非磁性金属から下流側非磁性金属に向けて電流を印加する電源と、磁性体の一面側に対向して設けられた磁場発生部とを備え、電源は、上流側非磁性金属と下流側非磁性金属との間に電流を印加することにより、磁性体中で１又は複数のスキルミオンを、切り欠けを介して消去することを特徴とするスキルミオンメモリを提供する。

[0034] 下流側非磁性金属は、磁性体の延展方向に接続されていてよい。下流側非磁性金属は、磁性体に積層されて接続されていてよい。

[0035] 本発明の第５の形態においては、スキルミオンを転送可能な薄層状の磁気素子であって、薄層状の磁性体と、磁性体の延展方向に接続された薄層状の導電体である上流側非磁性金属と、上流側非磁性金属と離間して磁性体に接続された薄層状の導電体である下流側非磁性金属とを備え、上流側非磁性金属と下流側非磁性金属との間に電流を印加することにより、磁性体中で転送される１又は複数のスキルミオンが消去されることを特徴とする磁気素子を提供する。

[0036] 磁性体中でスキルミオンを転送する際に印加される電流よりも大きな電流を印加することにより、磁性体中で転送される１又は複数のスキルミオンを一括して消去してよい。

[0037] 本発明の第６の形態においては、第５の形態に係る磁気素子と、磁気素子の上流側非磁性金属及び下流側非磁性金属に接続され、上流側非磁性金属から下流側非磁性金属に向けて電流を印加する電源と、磁性体の一面側に対向して設けられた磁場発生部とを備え、電源は、上流側非磁性金属と下流側非磁性金属との間に電流を印加することにより、磁性体中で転送される１又は

複数のスキルミオンを消去することを特徴とするスキルミオンメモリを提供する。

[0038] 電源は、磁性体中でスキルミオンを転送する際に印加される電流よりも大きな電流を印加することにより、磁性体中で転送される１又は複数のスキルミオンを一括して消去してよい。下流側非磁性金属は、磁性体の延展方向に接続されてよい。下流側非磁性金属は、磁性体に積層されて接続されてよい。

[0039] 第１から第６の形態において、磁性体は、カイラル磁性体、ダイポール磁性体、フラストレート磁性体、および、磁性材料と非磁性材料との積層界面構造のうちのいずれかからなってよい。

[0040] 本発明の第７の形態においては、上記形態に係るスキルミオンメモリとＣＭＯＳ－ＬＳＩデバイスが同一チップ内に形成されていることを特徴とするスキルミオンメモリ搭載ＣＭＯＳ－ＬＳＩデバイスを提供する。

[0041] 本発明の第８の形態においては、上記形態に係るスキルミオンメモリを搭載したことを特徴とするパーソナルコンピュータ、データ記録媒体、データ記録装置、携帯電話機、スマートフォン、デジタルカメラ、スティックメモリ、通信装置、画像記録装置、テレビジョン受像機、自走装置、飛行装置および宇宙空間飛行装置を提供する。

発明の効果

[0042] 上述した構成からなる本発明によれば、低消費電力で１または複数のスキルミオンを高速に転送、消去、または、一括消去できる磁気素子とすることができる。また、この磁気素子が応用されたスキルミオンメモリ、スキルミオンメモリ搭載ＣＭＯＳ-ＬＳＩデバイス、およびスキルミオンメモリを内蔵した、パーソナルコンピュータ、データ記録媒体、データ記録装置、携帯電話機、スマートフォン、デジタルカメラ、スティックメモリ、通信装置、画像記録装置、テレビジョン受像機、自走装置、飛行装置、宇宙空間飛行装置を提供することができる。

図面の簡単な説明

[0043] [図1]磁性体中の磁気モーメントのナノスケール磁気構造体であるスキルミオンの一例を示す模式図である。

[図2]図２（Ａ）から（Ｅ）は、位相が異なるスキルミオンを示す模式図である。

[図3]第１の実施形態に係るスキルミオンの転送を可能とする磁気素子を示す模式図である。

[図4]カイラル磁性体の磁気相図を示す図である。

[図5]スキルミオンを転送する磁性体の幅が最小の幅０．５λの場合に、スキルミオンが安定して存在することを示すシミュレーション結果の図である。

[図6]スキルミオンを転送する磁性体の幅がＷ＝０．４λの場合のスキルミオンの状態を示すシミュレーション結果の図であり、図６（ａ）は初期状態のシミュレーションの結果を示す図であり、図６（ｂ）は、時間経過とともにスキルミオンが消滅したことを示すシミュレーション結果の図である。

[図7]複数のスキルミオンを転送する場合におけるスキルミオンの転送のシミュレーション結果の図である。

[図8]第２の実施形態に係るスキルミオンの消去を可能とする磁気素子を示す模式図である。

[図9]カイラル磁性体の磁気相図を示す図である。

[図10]磁性体の上流非磁性金属端に沿って長さLx１で、高さLy1の長方形形状の切り欠け構造をスキルミオン転送経路に設置した場合のミュレーション結果を示す図である。

[図11]磁性体の上流非磁性金属端に沿って長さLx１で、高さLy1の長方形形状の切り欠け構造をスキルミオン転送経路に設置した場合において、長さLx１がスキルミオンの直径λより小さい場合のミュレーション結果を示す図である。

[図12]図１２（ａ）は、磁性体の上流非磁性金属端に沿った上辺の長さＬｘ１、下辺の長さＬｘ2、高さLy1の台形状の切り欠け構造をスキルミオン転送経路に設置した場合において、遅い転送速度をもつスキルミオンを示すシミュレ

ーション結果を示す図である。図１２（ｂ）は、磁性体の上流非磁性金属端に沿った上辺の長さＬｘ１、下辺の長さＬｘ2、高さLy1の台形状の切り欠け構造をスキルミオン転送経路に設置した場合において、早い転送速度をもつスキルミオンを示すシミュレーション結果図である。

[図13]図１３（ａ）は、磁性体の上流非磁性金属端に沿った上辺の長さＬｘ１の台形状の切り欠け構造であって、台形状の切り欠け構造の下辺の長さLx2を小さくした場合において、転送されてきたスキルミオンを示すシミュレーション結果図である。図１３（ｂ）は、磁性体の上流非磁性金属端に沿った上辺の長さＬｘ１の台形状の切り欠け構造であって、台形状の切り欠け構造の下辺の長さLx2＝λの場合において、転送されてきたスキルミオンを示すシミュレーション結果図である。

[図14]上流側非磁性金属に接する前記磁性体の端部が長方形形状の切り欠け形状と該切り欠けとの間隙Ly2＝λが配置され、スキルミオンがこの間隙を転送されてくる構造を有する場合において、転送されてきたスキルミオンを示すシミュレーション結果図である。

[図15]図１４においてLy=０．８×λの場合の転送されてきたスキルミオンを示すシミュレーション結果図である。

[図16]下流側非磁性金属に設けられ切り欠け構造を長方形の切り欠け形状にした場合で、台形形状切り欠けと長方形形状切り欠けとの間隙Ly2＝λの場合の転送されてきたスキルミオンを示すシミュレーション結果図である。

[図17]図１７（Ａ）から（Ｈ）は、本実施形態を適用した磁気素子における磁性体中に形成された切り欠けの構成例を示す図である。

[図18]第３の実施形態に係るスキルミオンの一括消去を可能とする磁気素子を示す模式図である。

[図19]カイラル磁性体の磁気相図を示す図である。

[図20]シミュレーション実験に用いる印加電流の時間依存性を示す図である。

[図21]図２１（ａ）から（ｃ）は、印加電流によるにスキルミオン消去につ

いて説明するためのシミュレーション結果を示す図である。

[図22]シミュレーション実験に用いる最大電流密度０．００２§ｊとした場合の印加電流の時間依存性を示す図である。

[図23]図２２の印加電流におけるシミュレーションの結果を示す図である。

[図24]シミュレーション実験に用いる最大電流密度０．００２§ｊの印加時間をより短くした場合の印加電流の時間依存性を示す図である。

[図25]図２４の印加電流におけるシミュレーションの結果を示す図である。

[図26]シミュレーション実験に用いる最大電流密度を０．００１３§ｊとし、その印加時間を２７０００（１／Ｊ）とした場合の印加電流の時間依存性を示す図である。

[図27]図２７（ａ）および（ｂ）は、図２６の印加電流におけるシミュレーションの結果を示す図である。

[図28]シミュレーション実験に用いる最大電流密度を０．００１３§ｊとし、その印加時間を２６０００（１／Ｊ）とした場合の印加電流の時間依存性を示す図である。

[図29]図２８の印加電流におけるシミュレーションの結果を示す図である。

[図30]電流密度を０．００１３§ｊとし、その印加時間を２５０００（１／Ｊ）とした場合の印加電流の時間依存性を示す図である。

[図31]図３０の印加電流におけるシミュレーションの結果を示す図である。

[図32]スキルミオンメモリを搭載した装置を示す模式図である。

[図33]電流による磁気ドメイン駆動の原理を示す模式図である。

発明を実施するための形態

[0044] 以下、本発明の実施の形態について、図面を参照して説明する。

[0045] 図１は、磁性体中のナノスケール磁気構造体であるスキルミオンの一例を示す模式図である。図１において、矢印は磁気モーメントの向きを示している。

[0046] スキルミオンは、あらゆる向きを向く磁気モーメントで構成されている。磁性体中に印加される磁場の向きが図中上向きである場合に、最外周磁気モ

ーメントは、その磁場の向きと同様に上向きで、かつ磁場と平行とされている。

[0047] スキルミオンは、その最外周から渦巻状に内側へ向けて回転していく平面形態とされ、これに伴って磁気モーメントの向きは徐々に向きを変えることとなる。

[0048] そしてスキルミオンの中心を構成する磁気モーメントは、磁場と反平行となるように、下向きで安定することとなる。

[0049] スキルミオンでは、磁気モーメントが中心から最外周に至るまで下向きから上向きに連続的に遷移しつつ規則的に並ぶ結果、複数の磁気モーメントが渦のように規則的に並んだ構造をしている。中心の磁気モーメントと最外周の磁気モーメントの向きは反平行で、中心から外周の間に向きは連続的にねじれ、渦巻き構造を形成する。

[0050] ここで、磁性体中に渦巻くナノスケール磁気構造体は、スキルミオン数で特徴づけられる。スキルミオン数は、単位空間あたり何回磁気モーメントが渦巻くかを示す、以下の［数１］及び［数２］で表現される。［数２］において、磁気モーメントとの極角Θ（ｒ）はスキルミオンの中心からの距離ｒの連続関数であり、ｒを０から無限まで変化させたとき、πからゼロもしくはゼロからπに変化する。

[0051] [数1]

$$N_{sk}=1/4\pi\iint d^{2}\ r\ n\cdot[(\partial n/\partial x)\times(\partial n/\partial y)]$$

[0052] [数2]

$$n(r)=(\cos\Phi(\phi)\sin\Theta(r),\ \sin\Phi(\phi)\sin\Theta(r),\ \cos\Theta(r))$$
$$\Phi(\phi)=m\phi+\gamma$$

[0053] このようなスキルミオン数$N_{sk}=-1$の場合の一例を図２に示した。図２は、位相が異なるスキルミオンを示す模式図である。図２（Ｅ）は座標のとりかた(右手系)を示している。ｘ軸、ｙ軸に対してｚ軸は紙面の裏から手前の向きに向けて設ける。濃淡は磁気モーメントの向きを示している。矢印は

磁気モーメントを示している。この図２に示す磁気構造体は、スキルミオンと定義される状態にある。

[0054] γは磁気モーメント間の位相を示している。図２では、異なる位相γの４例（Ａ）～（Ｄ）が示されている。

[0055] （Ａ）γ＝０に対して（Ｂ）γ＝πのすべての磁気モーメントの向きは丁度１８０°回転した磁気モーメントの向きを持っている。この時の濃淡と磁気モーメントの向きは（Ｅ）での定義に対応している。

[0056] （Ｃ）γ＝－π／２はγ＝０のすべての磁気モーメントの向きに対し、－９０度（右回りに９０度）の磁気モーメントの向きをとる。なお、図２（Ｄ）の位相λ＝π／２のスキルミオンが、図１のスキルミオンに相当する。

[0057] すなわち、図２（Ａ）～（Ｄ）に図示した４例の磁気構造は異なるように見えるが、トポロジー的には同一の磁気構造体である。

[0058] このような構造を有するスキルミオンは、一度生成すると安定して存在し、外部磁場印加下のカイラル磁性体中で情報伝達を担うキャリアとして働く。

[0059] 次に、このようなスキルミオン数N_{sk}＝－１のナノスケール磁気構造体であるスキルミオンの運動を以下に記述する。

[0060] ［第１の実施形態］

図３は、第１の実施形態に係るスキルミオンの転送を可能とする磁気素子１０を示す模式図である。磁気素子１０は、厚さが５００ｎｍ以下の薄層状に形成された素子であり、ＭＢＥ（Molecular Beam Epitaxy）やスパッター等の技術を用いて形成されている。

[0061] 磁気素子１０は、カイラル磁性体よりなる薄層状の磁性体１３と、磁性体１３の延展方向に接続された薄層状の導電体である上流側非磁性金属１１と、上流側非磁性金属１１と離間して磁性体１３に接続された薄層状の導電体である下流側非磁性金属１２と、を備えて構成されている。

[0062] 上流側非磁性金属１１及び下流側非磁性金属１２は、Ｃｕ、Ｗ、Ｔｉ、ＴｉＮ、Ａｌ、Ｐｔ、Ａｕ等の導電性の非磁性金属よりなる。

[0063] 磁性体１３はカイラル磁性体であり、ＦｅＧｅやＭｎＳｉ等よりなる。

[0064] 本実施形態においては、下流側非磁性金属１２は、磁性体１３の延展方向に接続されている。しかし、下流側非磁性金属１２の接続形態はこれに限らず、下流側非磁性金属１２を、磁性体１３に積層して接続する態様としてもよい。

[0065] この磁気素子１０を用いてスキルミオンを転送させる際には、上流側非磁性金属１１及び下流側非磁性金属１２に電源１４が接続される。また、磁気素子１０の磁性体１３の図３における下面側には、磁性体１３に対向して図示しない磁場発生部が設けられる。この磁気素子１０、電源１４及び図示しない磁場発生部を備えてスキルミオンメモリが構成されている。

[0066] 電源１４から上流側非磁性金属１１に電流が印加されると、電流は図３の矢印Ａの向き、すなわち上流側非磁性金属１１から磁性体１３を経て下流側非磁性金属１２へと流れていく。

[0067] また、図示しない磁場発生部が磁気素子１０に対して、矢印Ｂの向きに向けて磁場を印加する。磁性体１３におけるカイラル磁性体は、磁場の印加がない場合の磁気モーメント配置が、磁気モーメントの進行方向に対して螺旋上に回転する磁性体である。磁場を印加することにより、カイラル磁性体はスキルミオンを安定化する磁性体となる。さらに磁場強度を強くすると強磁性体になる。この強磁性体中に発生した複数個のスキルミオンについて、その駆動電流とスキルミオンの転送状態を調べることになる。

[0068] 磁気素子１０に対して上述した向きに磁場が印加された状態で電流を流すと、磁気素子１０の中のスキルミオン５は、磁性体１３の上流側非磁性金属１１に隣接した縁部に沿って矢印Ｃの向きに移動する。

[0069] こうしたスキルミオンの運動は、以下の論理を用いて説明することができる。

[0070] Ｒ＝（Ｘ，Ｙ）は磁気構造体の中心位置を示す。ＶｄはＲの時間微分で磁気構造体の速度を示す。この磁気構造体の振る舞いは下記の［数３］で示す運動方程式から導かれる。

[0071] [数3]

$$G\times(Vs-Vd)+\mathrm{D}(\beta Vs-\alpha Vd)+F=0$$

[0072] 上記［数３］中、Ｘは外積を示す。$V_S=-\xi j$であり、伝導電子の速度を示している。$\xi=2eM/(pa^3)$。ａは格子定数。Ｍは磁気モーメント、ｐは伝導電子のスピン偏極である。

[0073] 第３項Ｆは電極と磁性体との境界、不純物、磁場等から磁気構造体に働く力である。

[0074] 磁気構造体の運動を特徴づけるマグナスベクトルＧはｚ方向に沿った単位e_zで$G=Ge_z$である。Ｇはスキルミオン数を用いて、$G=4\pi N_{sk}$と表される。N_{sk}はスキルミオン数である。

[0075] スキルミオンの場合、スキルミオン数$N_{sk}=-1$である。一方、ドメイン磁壁の場合、スキルミオン数$N_{sk}=0$であり、Ｇ＝０となる。

[0076] 第２項は散逸過程を示す。αはギルバート減衰係数で、βは非断熱過程を示す。そしてβ～αである。Ｄはジャロシンスキー・守谷相互作用の大きさで、Ｄのテンソル成分D_{ij}は$D_{xx}=D_{yy}=D\sim4\pi$でその他は０である。$N_{sk}=-1$のスキルミオンの場合、［数３］の第２項を無視することができ、｜ＧＶｓ｜＞＞｜Ｆ｜のとき、Ｖｄ＝Ｖｓとなる。

[0077] この［数３］において、Iwasaki, J., Mochizuki, M. & Nagaosa, N., Nat. Commun. 4, 1463 (2013)に記載されているものと同様の適当なパラメータセットを用いることで、$j=10^{10}A/m^2$の場合、｜Ｖｄ｜＝～１ｍ／ｓｅｃとなる。

[0078] ところで近年、情報伝達媒体として磁壁を使う技術が盛んに研究されている（例えば、特許文献２参照。）。磁壁の運動では、［数３］の第１項のＧは０である。そして、β｜Ｖｓ｜＞＞｜Ｆ｜が満足されるとき、［数３］はＶｄ＝（β／α）Ｖｓとなる。

[0079] β～αなので、磁壁は小さい電流密度では転送することができないことが分かる。また、臨界電流以上の電流を流しても、磁壁の転送速度は遅い。こ

れが磁壁転送に大きな電流密度が要求される理由である。

[0080] N_{st}＝－１のスキルミオンの場合はこのような臨界電流密度は存在せず、小さな電流密度でも転送可能となる。スキルミオン数N_{sk}＝－１のスキルミオンを記憶単位として利用することの優位性はこの点にある。

[0081] しかし、上述した解析からでは、まだスキルミオンの速度と磁壁の速度との違いは明確ではない。必要な電流密度１０^{10}Ａ／ｍ^{2}ではスキルミオン速度、磁壁速度はともに｜Ｖｄ｜＝１ｍ／ｓｅｃである。逆にいえば、スキルミオン速度｜Ｖｄ｜＝１ｍ／ｓｅｃとするためには大きな電流密度である１０^{10}Ａ／ｍ^{2}が必要である。

[0082] スキルミオンの移動速度が磁壁移動の速度より大きくなることを以下に説明する。

[0083] まず、｜Ｖｄ｜＝η｜Ｖｓ｜とし、η＞＞１となるηの量を検討していく。

[0084] 図３において、電流の流れの向きをｙ軸、スキルミオンの流れの向きをｘ軸とする。このような配置の場合、スピントランスファートルク効果が発生する。

[0085] Ｖｄ＝（Ｖｄ^x、０、０）、Ｖｓ＝（０、Ｖｓ^y、０）、Ｆ＝（０、Ｆ^y、０）、Ｇ＝（０、０、Ｇ）とすると、［数３］から［数４］が得られる。

[0086] [数4]

$$-GV_s^y-D\alpha V_d^x=0$$
$$-GV_d^x+D\beta V_s^y+F^y=0$$

[0087] この［数４］から［数５］及び［数６］が得られる。

[0088] [数5]

$$V_d^x=-GV_s^y/D\alpha$$

[0089] [数6]

$$V_d^x\sim V_s^y/\alpha$$

[0090] ［数６］が主要結果である。Ｇ＝４π、Ｄ～４πであるから、以下の［数７］を得ることができる。

[0091] [数7]

$$\{G^2 / (D\alpha) + D\beta\} V_s{}^y = -F^y$$

[0092] このとき、α～１０$^{-2}$－１０$^{-3}$であるため、ηは１０^2－１０^{3}となる。これは、スキルミオンの速度をドメイン磁壁の速度の１００倍から１０００倍にすることが可能であることを示している。

[0093] 不純物などによるピンニング効果についても議論できる。Ｆ$^{x}_{pin}$を［数４］に加えればよい。

[0094] 閾値Ｖｓ^{y}は［数４］と同様で、（Ｖｓ^y）$_{th}$＝Ｆ$^{x}_{pin}$／（４π）となり、ドメイン磁壁への影響と比較し、小さな閾値を与えるに過ぎない。

[0095] すなわち、ピンニング効果がスキルミオン速度に与える影響は小さく、散乱効果からの影響も小さい。この特徴も、デバイスにスキルミオン転送方法を応用する際の大きなメリットとなる。

[0096] 以上から、スキルミオンの移動速度は、ドメイン磁壁の移動速度の１００倍から１０００倍となることが分かる。

[0097] 以上をさらに詳細に説明する。スキルミオンの移動の向きと上流側非磁性金属１１から下流側非磁性金属１２に流れる電流の向きとの方位関係は重要である。スキルミオンの移動の向き（Ｃ方向）と電流の向き（Ａ方向）は略垂直の向きに配置している場合を理論的に解明してきた。ここではこの配置を横電流配置とよぶ。これに対して電流の向きとスキルミオンの転送の向きが平行の向きに配置している場合を縦電流配置と呼ぶ。上記の結果はスキルミオン転送配置を横電流配置にすれば、縦電流配置におけるスキルミオン転送速度に対し、スキルミオン転送速度を１００倍から１０００倍速くなることを検証したものである。またその横電流配置のスキルミオン転送は、磁性体１３内の磁性不純物に対しても安定的に流れる。

[0098] これらの結果より、横電流配置のスキルミオンの転送速度は、縦電流配置

のスキルミオン転送速度と同じ移動速度であるドメイン磁壁の移動速度の１００倍から１０００倍となることが分かる。

[0099] 上述した理論的解析から、非磁性の対向電極（上流側非磁性金属１１及び下流側非磁性金属１２）に沿って運動するスキルミオンが検討可能となり、最適な転送方法を実現することができる。

[0100] なお、磁性体が螺旋磁性を示すカイラル磁性体ではなく、ダイポール磁性体、フラストレート磁性体、或いは磁性材料と非磁性材料との積層界面構造からなるものであっても、上述した結論を適用することができる。

[0101] ダイポール磁性体は、磁気双極子相互作用が重要な磁性体である。

[0102] フラストレート磁性体は、磁気不整合状態を好む磁気的相互作用の空間構造を含む磁性体である。

[0103] 磁性材料と非磁性材料との積層界面を有する磁性体は、磁性材料の非磁性材料に接する磁気モーメントを非磁性材料のスピン軌道相互作用により変調した磁性体である。

[0104] 以下、そのスキルミオンの転送方法について実施例を通じて説明をする。

[0105] ［第１の実施形態の実施例１］

実施例１においてスキルミオンの転送方法において最適な磁性体幅についてのシミュレーション実験結果を示す。

[0106] スキルミオンの運動はＬａｎｄａｕ－Ｌｉｆｓｈｉｔｚ－Ｇｉｌｂｅｒｔ（ＬＬＧ）方程式で記述される。以下、断熱、非断熱スピントランスファートルク項をもつＬＬＧ方程式を数値的に解く。

[0107] [数8]

$$dM_r/dt = -\gamma M_r \times B_r^{eff} + \alpha/M \cdot M_r \times dM_r/dt + pa^3/2eM\,(j\,(r)\cdot\nabla)\,M_r - (pa^3\beta/(2eM^2))\,[M_r \times (j\,(r)\cdot\nabla)\,M_r]$$

[数9]

$$H=-J\Sigma M_r\cdot(M_{r+ex}+M_{r+ey})$$
$$-D\Sigma\ (M_r\times M_{r+ex}\cdot e_x+M_r\times M_{r+ey}\cdot e_y)\ -B\cdot\Sigma M_r$$

[0108] ここで、$B_r^{eff}=-(1/(h\gamma))(\partial H/\partial M_r)$により、[数８]と[数９]とが関連付けられる。$\gamma=g\mu B/h(>0)$は磁気回転比である。ｈはプランク定数である。$M_r$は無次元量で磁気モーメントを示す。上記［数８，９］中、Ｘは外積を示す。また、e_x、e_yは、ｘ、ｙ方向の単位ベクトルである。M_{r+ex}、M_{r+ey}はM_rに対して、ｘ、ｙ方向に単位ベクトル分異なる位置にある磁気モーメントを示す。$\xi=2eM/(pa^3)$である。

[0109] ここで、[数９]で示したＨなるハミルトニアンはカイラル磁性体の場合である。ダイポール磁性体やフラストレート磁性体或いは磁性材料と非磁性材料との積層界面を有する磁性体に関してはこのＨの表現をそれぞれの磁性体を記述するものに置換すればよい。

[0110] 本実施例でのシミュレーション実験の実験条件を図４に示す。カイラル磁性体磁性相の磁場依存性を示した相図である。カイラル磁性体は磁場強度Hskによりカイラル磁性相（ＨＬ）からスキルミオン相（ＳｋＸ）になり、さらに強い磁場強度Hfでスキルミオン相（ＳｋＸ）から強磁性相（Ｆ）になる磁性体である。ここではこの磁性体の磁気交換相互作用の大きさをＪとして、この量で規格した値で各種の物理量を記述する。

[0111] 本実施例で用いられているカイラル磁性体はＤ＝０．１８Ｊ、Ｍ＝１、α＝０．０４である。低磁場ではらせん状の磁気モーメントの磁気構造をもつカイラル相から磁場強度Hsk＝０．００７５Ｊで、スキルミオン相になる。この時のスキルミオン直径をλとする。λはＪとＤと$\lambda=2\sqrt{2}\cdot\pi J\times a/D$との関係にある。当該関係において、ａは磁性体１１の格子定数であり、Ｄはジャロシンスキー・守谷相互作用の大きさで物質固有の物理常数である。したがって、スキルミオン直径λは物質固有常数となる。スキルミオン直径λは非技術文献１に見るようにたとえばＦｅＧｅでは７０ｎｍ、ＭｎＳｉでは

１８ｎｍである。

[0112] カイラル磁性体ではスキルミオンの直径λのサイズは数nmから数百nmのナノメートルサイズである。さらに強い磁場強度Hf＝０．０２５２Jで強磁性相になるカイラル磁性体を用いる。

[0113] 本実施例でのシミュレーション実験結果を以下詳述する。

スキルミオンＳを転送する磁性体１３の適切な最小の幅を図５に示す。ここでいう磁性体１３の幅Ｗとは、あくまで上流側非磁性金属１１から下流側非磁性金属１２に至るまでの図中上下方向の幅である（以下、転送幅Ｗという。）。また、以下の図５～７において互いに交差するn_x、n_yの軸で表現される濃淡は、n_x、n_yの軸上で表現した磁気モーメントの向きを示している。スキルミオンメモリを実装する場合、転送幅はメモリ集積度を決定する。そのために転送幅の最小幅を決定できたことはデザインルールを決めたことになり、設計指針として重要である。スキルミオンを横電流配置で転送する場合、最小の転送幅はスキルミオン直径λの０．５となる。

[0114] 図６（ａ）は、スキルミオンＳを転送する磁性体１３の転送幅Ｗを当該スキルミオンＳの直径λの０．５未満で構成した例で、Ｗ＝０．４・λの場合を示している。このような条件下では、下流側非磁性金属の近くに存在していたスキルミオンＳは、図６（ｂ）に示すように消去されてしまい、スキルミオンＳ自体が磁性体１３内で存在できない。以上からスキルミオンを転送する上での転送幅Ｗは

$$W \geqq 0.5\lambda$$

である。

[0115] ［第１の実施形態の実施例２］

実施例２において複数のスキルミオンの転送方法において、磁性体１３で転送される複数のスキルミオンの間隔ｄについてのシミュレーション実験結果を示す。

[0116] 図７に示すように、複数のスキルミオンＳを転送するときは、そのスキルミオンＳ間の間隔ｄは２×λである。ｄ＜２λの場合、２つのスキルミオン

は互いの磁気モーメントにより反発しあい、やがて互いに離間することとなる。

[0117] これに対して、ｄ＝２λの場合、２つのスキルミオンは、この間隔ｄ（＝２λ）を保持しつつ転送される。またｄ＞２λの場合においても同様に、２つのスキルミオンは、その間隔ｄ（＞２λ）を保持しつつ転送される。この場合には、ｄ＝３λ、４λ・・であっても同様に間隔ｄが保持されて転送される。このため、スキルミオンＳ間の間隔ｄ≧２λである場合に、そのスキルミオンＳ間の間隔ｄが保持された状態で転送可能となる。これは、ｄ＞２λの場合には、スキルミオンＳ間で作用する相互作用が働かなくなる結果、横電流配置により電流を流すと複数のスキルミオンＳは一定間隔を保持した状態で転送されていることとなる。

[0118] このとき、ｄ＝３λ～５λであると、２つのスキルミオンＳ間の間隔ｄをより安定に保持して転送を実現できる。

[0119] ちなみに、上述のスキルミオンＳ間の間隔ｄに関する性質は、何れもＷ≧０．５λであることを前提としたものである。

[0120] このスキルミオンＳは電流密度を変化させない限りこの間隔ｄを保持する。この結果は重要である。スキルミオンＳの間隔ｄは横電流配置の場合、常に一定間隔を保持する。磁性不純物の存在があってもその間隔一定保持の特徴は保持される。この結果は、スキルミオンＳに担わせるビット情報を安定して伝えることが保証される。ビット情報の”１”、”０”はスキルミオンの”有り”、”無し”に対応している。この情報がスキルミオン転送中にも保持される。

[0121] すなわち、スキルミオンメモリを構成する場合において、メモリを構成する磁性体１３を上流側非磁性金属１１と下流側非磁性金属１２とで挟みこみ、磁性体１３のスキルミオン転送経路を構成することにより、上流側非磁性金属１１と下流側非磁性金属１２との間に電流を印加すれば複数のスキルミオンは等しい間隔で等速転送が実現できる。その結果、ビット情報を担うスキルミオンＳを細線上の磁性体１３中において転送することができる。横電

流配置構造はその転送速度が縦電流配置に対して１００倍から１０００倍の高速転送を実現する。また横電流配置は、縦電流配置と比較して大幅に構造が簡単な電流配置を用意できる。特に縦電流配置は電極間の距離が長短存在することとなり、その制御の実現性を損なう。スキルミオンＳを磁性体１３に発生させる場合、スキルミオンＳどうしの間隔ｄが２λ以上となるように、スキルミオンＳを発生させてよい。スキルミオンＳの発生間隔ｄは、３λ～５λとしてもよい。

[0122] 本実施形態は、スキルミオンメモリ素子を設計するためのスキルミオンの転送経路方法として具現化可能であり、極めて重要である。このスキルミオンの転送方法は磁性体の磁性を特徴づける磁気交換相互作用Ｊの量で規格化された量として表現されている。したがって各種のカイラル磁性体に適用可能な転送法として具現化可能であり、適用範囲は広い。

[0123] なお、ここに述べたカイラル磁性体での実施例の効果は、定性的にはダイポール系磁性体やフラストレート磁性体或いは磁性材料と非磁性材料との積層界面を有する磁性体であっても同様に奏するものである。

[0124] このように、第１の実施形態は、スキルミオン転送方法の設計指針を与えるものである。

[0125] ［第２の実施形態］

図８は、第２の実施形態に係るスキルミオンの消去を可能とする磁気素子１０を示す模式図である。磁気素子１０は、厚さが５００ｎｍ以下の薄層状に形成された素子であり、ＭＢＥ（Molecular Beam Epitaxy）やスパッター等の技術を用いて形成されている。

[0126] 磁気素子１０は、カイラル磁性体よりなる薄層状の磁性体１３と、磁性体１３の延展方向に接続された薄層状の導電体である上流側非磁性金属１１と、上流側非磁性金属１１と離間して磁性体１３に接続された薄層状の導電体である下流側非磁性金属１２と、を備えて構成されている。

[0127] 上流側非磁性金属１１及び下流側非磁性金属１２は、Ｃｕ、Ｗ、Ｔｉ、ＴｉＮ、Ａｌ、Ｐｔ、Ａｕ等の導電性の非磁性金属よりなる。

[0128] 磁性体１３はカイラル磁性体であり、ＦｅＧｅやＭｎＳｉ等よりなる。この磁性体１３は、切り欠け２１が形成される。この切り欠け２１の平面視でコ字状の内周端には、上流側非磁性金属１１が接触した状態となっている。その結果、この切り欠け２１が形成されている部分では、上流側非磁性金属１１と下流側非磁性金属１２との間隔が狭くなり、狭小な転送経路２２が形成されることとなる。スキルミオン５は、この狭小な転送経路２２をＣ方向に向けて転送されていくことになる。

[0129] なお、この切り欠け２１は、上流側非磁性金属１１側から切り欠かれたものに加え、下流側非磁性金属１２との界面から切り欠かれたものも含まれる。

[0130] この切り欠け２１の形状の詳細、及びその形状に基づく作用効果については、後段において詳述する。

[0131] 本実施形態においては、下流側非磁性金属１２は、磁性体１３の延展方向に接続されている。しかし、下流側非磁性金属１２の接続形態はこれに限らず、下流側非磁性金属１２を、磁性体１３に積層して接続する態様としてもよい。

[0132] この磁気素子１０を用いてスキルミオンを消去させる際には、上流側非磁性金属１１及び下流側非磁性金属１２に電源１４が接続される。また、磁気素子１０の磁性体１３の図８における下面側には、磁性体１３に対向して図示しない磁場発生部が設けられる。この磁気素子１０、電源１４及び図示しない磁場発生部を備えてスキルミオンメモリが構成されている。

[0133] 電源１４から上流側非磁性金属１１に電流が印加されると、電流は図８の矢印Ａの向き、すなわち上流側非磁性金属１１から磁性体１３を経て下流側非磁性金属１２へと流れていく。

[0134] また、図示しない磁場発生部が磁気素子１０に対して、矢印Ｂの向きに向けて磁場を印加する。磁性体１３におけるカイラル磁性体は、磁場の印加がない場合の磁気モーメント配置が、磁気モーメントの進行方向に対して螺旋上に回転する磁性体である。磁場を印加することにより、カイラル磁性体は

スキルミオンを安定化する磁性体となる。さらに磁場強度を強くすると強磁性体になる。この強磁性体中に発生した複数個のスキルミオンについて、その駆動電流とスキルミオンの転送状態を調べることになる。

[0135] 磁気素子１０に対して上述した向きに磁場が印加された状態で電流を流すと、磁気素子１０の中のスキルミオン５は、磁性体１３の上流側非磁性金属１１に隣接した縁部に沿って矢印Ｃの向きに移動する。

[0136] こうしたスキルミオンの運動は、［数３］から［数７］を用いて上述した論理を用いて説明することができる。上述した理論的解析から、非磁性の対向電極に沿って運動するスキルミオンが検討可能となり、最適な消去方法を実現することができる。

[0137] 上述した構成からなる本実施形態では、磁性体１３中で転送される１又は複数のスキルミオンを消去することができる磁気素子１０としても具体化される。図８に示すように磁性体１３におけるカイラル磁性体中をＣ方向に移動するスキルミオン５が切り欠け２１近傍まで接近した場合、この切り欠け２１の辺に沿って下流側非磁性金属１２側へと移動し、そのまま転送経路２中において転送されることとなる。

[0138] このスキルミオン５は、転送経路２２内において転送される過程で消去することができる。即ちスキルミオン５は、狭い転送経路２２を矢印Ｃの向きに移動する過程において、スキルミオン５ａ、５ｂ、５ｃと徐々に上流側非磁性金属１１へと近接していき、最後には、この切り欠け２１における隅部２１ａ接触することで消去されることとなる。隅部２１ａは、鋭角又は鈍角とされており、磁気モーメントのポテンシャルが低くなっている。このような隅部２１ａにスキルミオン５を接触させることで、その低い磁気モーメントのポテンシャルからなる隅部２１ａによってこれを消去することが可能となる。

[0139] この切り欠け２１における隅部２１ａは、略直角又は鋭角とされていることで、よりスキルミオン５を効果的に消去することが可能となるが、鈍角であっても、又は丸みを帯びた形状とされていても、同様に消去することが可

能となる。

[0140] 以下、そのスキルミオンの消去方法について実施例を通じて説明をする。

[0141] ［第２の実施形態の第１実施例］

実施例１においてスキルミオンの消去方法のシミュレーション実験結果を示す。スキルミオンの運動は、［数８］および［数９］を用いて上述した。本シミュレーションでは、［数８］および［数９］で示した方程式を数値的に解いて実行した。

[0142] 本実施例でのシミュレーション実験の実験条件を図９に示す。カイラル磁性体磁性相の磁場依存性を示した相図である。カイラル磁性体は磁場強度Ｈｓｋによりカイラル磁性相（ＨＬ）からスキルミオン相（ＳｋＸ）になり、さらに強い磁場強度Ｈｆでスキルミオン相（ＳｋＸ）から強磁性相（Ｆ）になる磁性体である。ここではこの磁性体の磁気交換相互作用の大きさをJとして、この量で規格した値で各種の物理量を記述する。

[0143] 本実施例で用いられているカイラル磁性体はＤ＝０．１８J、Ｍ＝１、α＝０．０４である。低磁場ではらせん状の磁気モーメントの磁気構造をもつカイラル相から磁場強度Ｈｓｋ＝０．００７５Jで、スキルミオン相になる。この時のスキルミオン直径をλとする。λはＪとＤと$\lambda=2\sqrt{2}\cdot\pi J\times a/D$との関係にある。

[0144] カイラル磁性体ではスキルミオンの直径λのサイズは数ｎｍから数百ｎｍのナノメートルサイズである。さらに強い磁場強度Ｈｆ＝０．０２５２Jで強磁性相になるカイラル磁性体を用いる。

[0145] シミュレーション実験でのスキルミオンの移動の向きと非磁性電極から流れる電流の向きとの方位関係は重要である。スキルミオンの移動の向きと電流の向きは略垂直の向き（横電流とよぶ）に配置している。このような配置にした場合のスキルミオンの消去を数値計算する。初期のスキルミオン転送状態を、横電流による定常状態とする。この定常状態では、カイラル磁性体としての磁性体１３に印加されている電流密度は、非磁性電極に略垂直に流れる０．００１ξｊであり、この印加された電流密度に基づいてスキルミオ

ンは定速で転送されている。

[0146] かかる条件の下で、[数８]と[数９]を使用し、非磁性金属に接する磁性体の端部が長方形の切り欠けを有するスキルミオンの消去法についてのシミュレーション実験結果を示す。また、以下の図１０～１１において互いに交差するn_x、n_yの軸で表現される濃淡は、n_x、n_yの軸上で表現した磁気モーメントの向きを示している。なお、このn_xは、電流の印加方向に対する直交方向であり、n_yは、電流の印加方向に相当する。この例において、上流側非磁性金属１１から下流側非磁性金属１２へ向けて流れる電流の強さj_yは、何れも０．００１ξｊとしている。この電流の強さj_yに応じてスキルミオン５のＣ方向への転送速度が決まる。

[0147] 図１０に示すように、長方形の切り欠け２１のn_x方向の長さをＬｘ１とすると、

$$Lx1 \geqq 2\lambda$$

の場合、長方形の切り欠け２１の下部において下流側非磁性金属１２との間に形成した、幅の狭い転送経路２２上で転送されてくるスキルミオン５は、当該切り欠け２１の隅部２１ａ右端で消去できる。なお、この図１０においてＬｙ１は、λと同等であり、転送経路２２の径もλと同等である。

[0148] ちなみに、上述した条件が成立するのは、スキルミオン５が転送経路２２に入っていることを前提としており、Ｌｘ１は、そのスキルミオン５が入っている転送経路２２の始点からの距離に相当する。

[0149] 即ち、スキルミオン５を消去するためには、少なくとも切り欠け２１について、換言すれば、磁性体１３よりも幅の狭い転送経路２２について、n_x方向の長さＬｘ１が２λ以上必要となる。このn_x方向の長さＬｘ１が２λより小さい場合には、転送経路２２そのものが短くなってしまうことから、転送経路２２上で転送されるスキルミオン５は、図１１に示す転送経路の矢印のように切り欠け２１の下部を通り抜けてしまう。ちなみに、この図１１におけるＬｘは、０．５λとした例である。また、この図１１のシミュレーションでは、スキルミオンの転送速度を図１０と同様の速度としている。

[0150] 但し、切り欠け２１のｎ$_x$方向の長さＬｘ１は、必ずしも上述した条件を満たしている場合に限定されるものではなく、スキルミオン５の転送速度がより高速なものであれば、

Ｌｘ１＜２λであっても、上述と同様に切り欠け２１の隅部２１ａにて当該スキルミオン５を消去することが可能となる。

[0151] ［第２の実施形態の第２実施例］

図１２は、磁性体１３の上流側非磁性金属１１の下端に沿った上辺の長さをＬｘ１、下辺の長さＬｘ２とした台形状の切り欠け２１を磁性体１３中に形成する場合におけるスキルミオン５の消去法についてのシミュレーション実験結果である。上述の構造において、図１２（ａ）に示すような、転送速度の遅いスキルミオン５の場合、スキルミオン５は消去されずに通過してしまう。

[0152] 図１２（ｂ）は、スキルミオン転送速度を図１２（ａ）に示す例と比較して、スキルミオン転送速度を２倍とした場合の例を示している。このような転送速度の速いスキルミオン５の場合、切り欠け２１における隅部２１ａにおいてスキルミオン５を消去できる。スキルミオン５が消去されること無く転送経路２２中を転送させるためには、上流側非磁性金属１１付近で形成されるポンテンシャルエネルギーの壁を乗り越えるエネルギーがスキルミオンの運動エネルギーとして必要なことが示されている。

[0153] なお、この図１２においてＬｘ１は、スキルミオンの直径λの２倍とされており、Ｌｘ２、Ｌｙ１は、λと同等とされている。

[0154] 磁性体１３の上流側非磁性金属１１端に沿った上辺の長さＬｘ１、下辺の長さＬｘ２の台形状の切り欠け２１を有する消去法についてのシミュレーション実験結果を図１３に示す。図１３（ａ）、（ｂ）の例ともに、スキルミオンの転送速度は同一であり、切り欠け２１における上辺の長さＬｘ１は互いにλとしている。これに対して、切り欠け２１の下辺の長さＬｘ２は、図１３（ａ）においては、λとしているのに対して、図１３（ｂ）の例では、１．２λとしている。その結果、図１３（ｂ）の例では、下辺の長さＬｘ２

が長くなる。

[0155] これらのシミュレーション実験結果より、切り欠け２１の下辺の長さＬｘ２の短い図１３（ａ）の例では、スキルミオン５を消去することができず、転送経路２２をそのまま通過していったのに対して、図１３（ｂ）の例では、下辺の長さＬｘ２を長くできることで、当該スキルミオン５を切り欠け２１の隅部２１ａにおいて消去することができる。

[0156] このように、切り欠け２１が台形状である場合に、その下辺の長さＬｘ２を長く設定することで切り欠け２１における隅部２１ａにおいて、転送されてくるスキルミオン５を消去できる。この場合、スキルミオン５を消去するための条件として、スキルミオン５の直径λに対して、台形状の切り欠け２１の下辺の長さＬｘ２は、以下の関係にあることが必要となる。

$$Lx2 > \lambda$$

[0157] ［第２の実施形態の第３実施例］

図１４は、磁性体１３中に２つの切り欠け２１ｂ、２１ｃを配置した場合のシミュレーション実験結果を示している。上流側非磁性金属１１側から設けられた切り欠け２１ｂと、下流側非磁性金属１２側から設けられた切り欠け２１ｃとの間に、スキルミオン５を転送するための転送経路２２が形成されている。この転送経路２２の幅（切り欠け２１ｂと切り欠け２１ｃとの間隙）をＬｙ２とするとき、スキルミオン５の直径λとの間で以下の関係が成り立つ場合、スキルミオン５は、この転送経路２２に進入することができない。

$$Ly2 < \lambda$$

[0158] 図１４に示すようにＬｙ２≧λの場合は、スキルミオン５はこの転送経路２２上を転送され、切り欠け２１ｂの隅部２１ａにおいて消去される。

[0159] これに対して、図１５は、磁性体１３中に２つの切り欠け２１ｂ、２１ｃの間隔を狭く配置した場合において、図１４の例と比較してスキルミオン５の転送速度をより高速化した場合におけるシミュレーション実験結果を示している。

[0160] このような高速のスキルミオン５は、Ｌｙ２＝０．８λである、より狭い転送経路２２に侵入してくることが可能で、上述と同様に切り欠け２１ｂにおける隅部２１ａにおいてスキルミオン５を消去することが可能となる。

[0161] 即ち、このスキルミオン５の転送速度が高速なものであれば、転送経路２２の幅が、Ｌｙ２＜λであっても、当該転送経路２２に侵入することが可能となり、これを消去することが可能となる。

[0162] 図１６には、磁性体１３中に２つの切り欠け２１ｂ、２１ｃを設けた場合において、上流側非磁性金属１１側の切り欠け２１ｂを長方形状とし、下流側非磁性金属１２側の切り欠け２１ｃを台形状に構成した例を示している。台形状の切り欠け２１ｃにおける下辺の長さＬｘ３は、４λとされ、下辺から上辺に向けて設けられた傾斜のn_x方向の長さは、２λとしている。また、図中の長さＬｘ４は２λとされている。

[0163] この切り欠け２１ｂと、切り欠け２１ｃとの間における転送経路２２は、スキルミオン５の転送方向に応じて徐々に幅が狭小化されていく構成とされている。転送経路２２において最も狭い幅Ｌｙ２＝λの場合では転送されてきたスキルミオン５は消去されずに通過してしまう。かかる構造の場合にはＬｙ２＜λであることがスキルミオンの消去には必要である。

[0164] ［第２の実施形態の第４実施例］

図１７（Ａ）～（Ｈ）は、本実施形態を適用した磁気素子１０における磁性体１３中に形成された切り欠け２１の構成例を示している。切り欠け２１は、三角形状、四角形状、その他多角形状、鍵型、半円形上、半楕円形状であってもおく、また図１７の形態に限定されること無く他のいかなる形状とされていてもよいことは勿論である。

[0165] 本実施形態は、スキルミオンメモリ素子を設計するためのスキルミオンの消去方法として具現化可能であり、極めて重要である。このスキルミオンの消去法は磁性体の磁性を特徴づける磁気交換相互作用Jの量で規格化された量として表現されている。したがって各種のカイラル磁性体に適用可能な消去法として具現化可能であり、適用範囲は広い。

[0166] なお、ここに述べたカイラル磁性体での実施例の効果は、定性的にはダイポール系磁性体であっても、またフラストレート磁性体であっても、或いは磁性材料と非磁性材料との積層構造からなる磁性体であっても同様に奏するものである。

[0167] このように、本実施形態は、スキルミオン消去方法の設計指針を与えるものである。

[0168] ［第３の実施形態］

図１８は、第３の実施形態に係るスキルミオンの転送を可能とする磁気素子１０を示す模式図である。磁気素子１０は、厚さが５００ｎｍ以下の薄層状に形成された素子であり、ＭＢＥ（Molecular Beam Epitaxy）やスパッター等の技術を用いて形成されている。

[0169] 磁気素子１０は、カイラル磁性体よりなる薄層状の磁性体１３と、磁性体１３の延展方向に接続された薄層状の導電体である上流側非磁性金属１１と、上流側非磁性金属１１と離間して磁性体１３に接続された薄層状の導電体である下流側非磁性金属１２と、を備えて構成されている。

[0170] 上流側非磁性金属１１及び下流側非磁性金属１２は、Ｃｕ、Ｗ、Ｔｉ、ＴｉＮ、Ａｌ、Ｐｔ、Ａｕ等の導電性の非磁性金属よりなる。

[0171] 磁性体１３はカイラル磁性体であり、ＦｅＧｅやＭｎＳｉ等よりなる。

[0172] 本実施形態においては、下流側非磁性金属１２は、磁性体１３の延展方向に接続されている。しかし、下流側非磁性金属１２の接続形態はこれに限らず、下流側非磁性金属１２を、磁性体１３に積層して接続する態様としてもよい。

[0173] この磁気素子１０を用いてスキルミオンを生成、転送させる際には、上流側非磁性金属１１及び下流側非磁性金属１２に電源１４が接続される。また、磁気素子１０の磁性体１３の図１８における下面側には、磁性体１３に対向して図示しない磁場発生部が設けられる。この磁気素子１０、電源１４及び図示しない磁場発生部を備えてスキルミオンメモリが構成されている。

[0174] 電源１４から上流側非磁性金属１１に電流が印加されると、電流は図１８

の矢印Ａの向き、すなわち上流側非磁性金属１１から磁性体１３を経て下流側非磁性金属１２へと流れていく。

[0175] また、図示しない磁場発生部が磁気素子１０に対して、矢印Ｂの向きに向けて磁場を印加する。磁性体１３におけるカイラル磁性体は、磁場の印加がない場合の磁気モーメント配置が、磁気モーメントの進行方向に対して螺旋上に回転する磁性体である。磁場を印加することにより、カイラル磁性体はスキルミオンを安定化する磁性体となる。さらに磁場強度を強くすると強磁性体になる。この強磁性体中に発生した複数個のスキルミオンについて、その駆動電流とスキルミオンの転送状態を調べることになる。

[0176] 磁気素子１０に対して上述した向きに磁場が印加された状態で電流を流すと、磁気素子１０の中のスキルミオン５は、磁性体１３の上流側非磁性金属１１に隣接した縁部に沿って矢印Ｃの向きに移動する。

[0177] こうしたスキルミオンの運動は、［数３］から［数７］を用いて上述した論理を用いて説明することができる。上述した理論的解析から、非磁性の対抗電極に沿って運動するスキルミオンが検討可能となり、最適な転送方法を実現することができる。

[0178] 上述した構成からなる本実施形態では、磁性体１３中で転送される１又は複数のスキルミオンを消去することができる磁気素子１０としても具体化される。図１８に示すように磁性体１３におけるカイラル磁性体中を移動するスキルミオン５については、その磁性体１３が、上流側非磁性金属１１と下流側非磁性金属１２との間にある限り、これを消去することができる。即ち、スキルミオン５は、矢印Ｃの向きに移動する過程において、スキルミオン５ａ、５ｂ、５ｃと徐々に上流側非磁性金属１１へと近接していき、最後には消去されることとなる。

以下、そのスキルミオンの消去方法について実施例を通じて説明をする。

[0179] ［第３の実施形態の実施例１］

実施例１においてスキルミオンの転送ならびに消去のシミュレーション実験結果を示す。スキルミオンの運動は、［数８］および［数９］を用いて上

述した。本シミュレーションでは、［数８］および［数９］で示した方程式を数値的に解いて実行した。

[0180] 本実施例でのシミュレーション実験の実験条件を図１９に示す。カイラル磁性体磁性相の磁場依存性を示した相図である。カイラル磁性体は磁場強度Ｈｓｋによりカイラル磁性相（ＨＬ）からスキルミオン相（ＳｋＸ）になり、さらに強い磁場強度Ｈｆでスキルミオン相（ＳｋＸ）から強磁性相（Ｆ）になる磁性体である。ここではこの磁性体の磁気交換相互作用の大きさをJとして、この量で規格した値で各種の物理量を記述する。

[0181] 本実施例で用いられているカイラル磁性体はＤ＝０．１８J、Ｍ＝１、α＝０．０４である。低磁場ではらせん状の磁気モーメントの磁気構造をもつカイラル相から磁場強度Ｈｓｋ＝０．００７５Jで、スキルミオン相になる。この時のスキルミオン直径をλとする。λはＪとＤと　$\lambda = 2\sqrt{2}\cdot\pi J\times a/D$　との関係にある。

[0182] カイラル磁性体ではスキルミオンの直径λのサイズは数ｎｍから数百ｎｍのナノメートルサイズである。さらに強い磁場強度Ｈｆ＝０．０２５２Jで強磁性相になるカイラル磁性体を用いる。

[0183] シミュレーション実験でのスキルミオンの移動の向きと非磁性電極から流れる電流の向きとの方位関係は重要である。スキルミオンの移動の向きと電流の向きは略垂直の向き（横電流とよぶ）に配置している。このような配置にした場合のスキルミオンの消去を数値計算する。シミュレーション実験での横電流印加の時間変化を図２０に示す。初期のスキルミオン転送状態を、横電流による定常状態とする。この定常状態では、カイラル磁性体としての磁性体１３に印加されている電流密度は、非磁性電極に略垂直に流れる０．００１ξｊであり、この印加された電流密度に基づいてスキルミオンは定速で転送されている。

[0184] かかる状態において、電源１４を介して上流側非磁性金属１１及び下流側非磁性金属１２間に、駆動電流を増加させる。この駆動電流の増加開始時点を図２０における横軸（時間；１／Ｊ）において０（１／Ｊ）としたとき、

これを起点とした時間１０００（（１／Ｊ）までに０．００２ξｊに電流密度を増加させる。その後、時間１０００～１１０００（１／Ｊ）に亘り、電流密度を０．００２ξｊに保持する。かかる条件の下で、[数８]と[数９]を使用し、数値計算を実施した。

[0185] 図２１は、スキルミオンＳの消去に関するシミュレーションの結果を示している。図２１（ａ）では、定常状態を示しており、０．００１ξｊの電流密度の下で、磁性体１３内をスキルミオンＳがＣの向きに移動する。また、以下の図２３、２５、２７、２９、３１において互いに交差するn_x、n_yの軸で表現される濃淡は、n_x、n_yの軸上で表現した磁気モーメントの向きを示している。

[0186] 時刻８０００（１／Ｊ）でのスキルミオンＳの状態を図２１（ｂ）に示す。図２１（ｂ）に示すように、スキルミオンＳは、Ｃの向きに転送されながら、磁性体１３と、上流側非磁性金属１１の界面近傍に接近する。

[0187] 時刻１１０００（１／Ｊ）でのスキルミオンＳの状態を図２１（ｃ）に示す。電流密度０．００２ξｊとした上で１１０００（１／Ｊ）まで保持した状態を示している。上流側非磁性金属１１に近づいたスキルミオンＳは上流側非磁性金属１１に吸収されたように、磁性体１３から消去される。

[0188] この現象は次のように説明できる。上流側非磁性金属からの電流はスキルミオンに対して二つの効果をもつ。一つは前述したようにスキルミオンへの横電流効果である。もう一つは上流側非磁性金属１１へのスキルミオンへの引力効果である。スキルミオンへの横電流効果は磁性体上にスキルミオンを横方向に加速する効果を生む。スキルミオンへの引力効果は、上流側非磁性金属１１と磁性体１３間にあるポテンシャル壁を乗り越えるように働く。スキルミオンへの一定以上の電流密度が大きくなるとこのポテンシャル壁を乗り越え、スキルミオンが消滅する。これがスキルミオンへの電流密度を大きくするとスキルミオンを消去できる理由である。スキルミオンを消去できる電流密度の閾値は転送されてくるスキルミオン速度に依存する。また、消去にかかる時間もスキルミオンの転送速度に依存する。

[0189] この図２１（ｃ）に示すようにスキルミオンＳは、２個とも消去できることは重要である。これは、２個以上の多数個のスキルミオンでも同様に消去できる。個数依存はない。即ち、スキルミオンＳを消去したい領域に対して、当該領域に対して、定常状態の駆動電流密度よりも大きな電流密度からなる電流を所定時間流すことにより、当該領域を流れるスキルミオンＳを全て一括して消去することが可能となる。この電流密度は０．００１３§ｊ未満では２個とも消去できない。

[0190] ［第３の実施形態の実施例２］

電流密度を０．００２§ｊとした上で、印加する電流時間依存性をシミュレーションの条件を図２２、図２４に示す。図２２に示すように印加電流密度を０．００２§ｊとし、その印加時間を６０００（１／Ｊ）とした場合、図２３に示すようにスキルミオンＳを２個とも消去できた。しかし、図２４に示すように、電流密度０．００２§ｊの印加時間が５０００（１／Ｊ）では、図２５に示すようにスキルミオンＳを２個とも消去できないことが分かった。この場合は、２個のスキルミオンＳの間隙も拡大してしまうことが分かる。したがって、電流密度０．００２§ｊの場合、印加時間を６０００（１／Ｊ）以上印加し続けることが必要であることが分かる。

[0191] ［第３の実施形態の実施例３］

電流密度０．００１３§ｊとした場合のスキルミオン消去のシミュレーション条件を図２６、図２８、図３０に示す。図２７は、図２６に示したシミュレーション条件におけるスキルミオンＳの状態を示す。図２７（ａ）は印加時間が０（１／Ｊ）での磁性体１３中の２個のスキルミオンＳの状態を示す。図２７（ｂ）は時刻２７０００（１／Ｊ）での磁性体１３中の２個のスキルミオンＳの状態を示す。時刻２７０００（１／Ｊ）で、磁性体１３中の２個のスキルミオンＳを消去できる。

[0192] 図２９は、図２８に示したシミュレーション条件において、印加時間が２６０００（１／Ｊ）での磁性体１３中のスキルミオンＳの状態を示す。図２９に示すように１個のスキルミオンＳが消去できずに残ってしまう。

[0193] 図３１は、図３０に示したシミュレーション条件において、印加時間が２５０００（１／Ｊ）での磁性体１３中のスキルミオンＳの状態を示す。図３１に示すようにもはや１個も消去できずに２個とも残ってしまう。以上の結果から、電流密度０．００１３ｊとした場合、２個以上のスキルミオンＳを消去するためには電流印加時間が２７０００（１／Ｊ）以上必要であることが分かった。

[0194] 以上の実施例１～実施例３から、転送されてくるスキルミオンに電流を印加することにより、スキルミオンを一括して消去可能である。消去できるスキルミオンの数は１以上の任意の数である。消去するための電流密度の大きさは転送されてくるスキルミオン速度に依存する。消去するための印加時間は電流密度に依存する。電流密度が大きい場合では、印加時間は短くてよいが、電流密度が小さい場合は印加時間を長くする必要がある。

[0195] 磁性体１３の幅が仮にスキルミオンＳの直径λ以上で、電流密度が０．００１３ＪＪ以上であれば、当該スキルミオンＳを一括して消去できる場合がある。また、磁性体１３の幅が仮にスキルミオンＳの直径λの１／２λ以上λ未満であれば、電流密度が０．００１３Ｊ未満であっても、当該スキルミオンＳを一括して消去できる場合がある。

[0196] また、上記は、あくまで定常状態の電流密度が０．００１ｊである場合を例にとり説明をしたが、定常状態の電流密度が０．００１ｊ以外の場合においても同様にスキルミオンＳを一括消去することが可能となる。

[0197] また、本実施形態は、定常状態から電流密度まで上げた後、その後の印加時間に至るまで常時その値を維持する場合に限定されるものではなく、途中で電流密度が低下する場合であっても、同様の効果を奏するものである。

[0198] 以上、電流印加によるスキルミオン消去法を実施例において説明した。この電流密度増加によるスキルミオン消去法は磁性体１３中の指定した領域に対して一括消去を行うことができる。かかる場合には、その磁性体１３中の指定した領域について上流側非磁性金属１１と下流側非磁性金属１２を当該指定領域の両側に設け、上流側非磁性金属１１と下流側非磁性金属１２の間

を流れる複数のスキルミオンＳについて一括消去を行うことができる。

[0199] またこれ以外には、メモリ全体を一括消去する場合においても適用可能である。

[0200] このようなメモリを構成する場合において、メモリを構成する全磁性体１３を上流側非磁性金属１１と下流側非磁性金属１２とで挟みこむことで、全エリアに対して消去用電流を流すことができ、メモリ全体の一括消去も実現できる。その結果、メモリ内の全てのスキルミオンを短時間に消去でき、ひいてはそのスキルミオンが割り当てられているビット情報も瞬時に一括消去できることから、消去時間を短縮でき、効率的なものとすることができる。

[0201] 例えば、スキルミオンをビット情報として割り当てた、上述した構成からなる記憶素子をハードディスク（ＨＤ）としてとして使用する場合、数時間かかるイニシャライズ作業を数ナノ秒で終了させることが可能となる。また実際に消去したい領域についても選択できることから、指定したトラックのみを消去することも可能である。かかる場合には、その消去したトラック領域の磁性体１３を上流側非磁性金属１１と下流側非磁性金属１２に高い電流密度の電流を印加可能な構成とすればよい。これにより、部分領域にのみ選択的にスキルミオンデータの消去を行う際において時間短縮が可能となる。

[0202] 本実施形態は、スキルミオンメモリ素子を設計するためのスキルミオン消去方法として具現化可能であり、極めて重要である。このスキルミオンの消去法は磁性体の磁性を特徴づける磁気交換相互作用Jの量で規格化された量として表現されている。したがって各種のカイラル磁性体に適用可能な消去法として具現化可能であり、適用範囲は広い。

[0203] なお、ここに述べたカイラル磁性体での実施例の効果は、定性的にはダイポール系磁性体であっても、またフラストレート磁性体であっても、或いは磁性材料と非磁性材料との積層構造からなる磁性体であっても同様に奏するものである。

[0204] このように、本実施形態は、スキルミオン消去方法、特にスキルミオン一括消去法の設計指針を与えるものである。

[0205] ちなみに、スキルミオンをビット情報として割り当てた、このスキルミオンメモリはこの書き込み、消去が何度でも可能である。そして、このスキルミオンの書き込み回数、消去回数の制限はない。すなわち、スキルミオンメモリは、エンデユランス（耐久性）が無限大であるとえる。スキルミオンメモリはデータリテンション（保持）性能を大幅に向上させることができる。スキルミオンメモリにおけるこの２つの特徴は、酸化膜の絶縁性を利用するフラッシュメモリにおける電子保存の書き込み回数の制限や保持性能の劣化などの問題を一気に解決するものといえる。

[0206] 図３２は、スキルミオンメモリ１１０を搭載した装置１００の一例を示す模式図である。装置１００は、スキルミオンメモリ１１０およびプロセッサ１４０等の処理部を備える。スキルミオンメモリ１１０は、図３に関連して説明した磁気素子１０、電源１４及び磁場発生部を有する。処理部は、スキルミオンメモリ１１０との間でデータをやりとりする。処理部は、スキルミオンメモリ１１０から読み出したデータを処理してよい。

[0207] 装置１００としては、一例としてスキルミオンメモリ搭載ＣＭＯＳ－ＬＳＩデバイスである。この場合、処理部としてＣＭＯＳ－ＬＳＩデバイスを設ける。ＣＭＯＳ－ＬＳデバイスと、スキルミオンメモリ１１０の磁気素子１０は、同一チップ内に設けてよい。また装置１００は、パーソナルコンピュータ、データ記録媒体、データ記録装置、携帯電話機、スマートフォン、デジタルカメラ、スティックメモリ、通信装置、画像記録装置、テレビジョン受像機、自走装置、飛行装置、または、宇宙空間飛行装置であってよい。

産業上の利用可能性

[0208] スキルミオンは、直径が１～１００ｎｍとナノスケールのサイズを有する極微細構造であり、膨大なビット情報を極細密化できる大容量記憶磁気素子として応用することができる。

[0209] 特にこのスキルミオンメモリとＣＭＯＳ－ＬＳＩデバイスが同一チップ内に形成されているスキルミオンメモリ搭載ＣＭＯＳ－ＬＳＩデバイスとして具現化されるものであってもよい。

[0210] スキルミオンは、これに割り当てるべきビット情報を電気的に転送、消去、または、一括消去可能である。そして、このスキルミオンに係るビット情報の転送時間や消去時間も本発明を介してナノ秒で実現することができる。このようなスキルミオンによる高速大規模不揮発性メモリが実現することにより、現在において多くの電子機器で求められている大規模情報の高速処理能力を大幅に向上させるメモリとして活用が期待される。

[0211] また、スキルミオンによるビット情報は、磁気モーメントを誘起可能な磁性体を記憶媒体としつつ、電流により高速転送されたスキルミオンメモリの記録方法は大容量磁気メモリであるハードディスク（ＨＤ）等の電子機器のモーター駆動の負荷をなくすことができるばかりでなく、超高速の書き込みや消去が可能となる。このため、スキルミオンメモリは、将来的には、現在のハードディスク等のデータ記録装置に置き換わる可能性が大きい。また、電気的な情報の転送や消去を行うことができるフラッシュメモリにおいて、特に近年における大容量の記録容量が求められつつある中、本発明を適用した磁気素子は多くの優位性を発揮することが可能となる。

[0212] 特に本発明を適用した磁気素子は、磁気モーメントを記録手段として用いるものであるから、記録保持状態を長く安定した状態で保持することができる。本発明を適用した磁気素子は、消去の動作時間を極力短縮化することができ、その時間はナノ秒まで短縮化することができる。その結果、ＤＲＡＭと同等の消去の動作時間を実現させることが可能となる。また、このような本発明を適用したスキルミオンメモリを電子機器に適用することで、その使用環境を格段に向上させることが可能となる。具体的には、電子機器への電源投入から運転可能になるまでの立ち上がり時間の短縮化、応答速度の向上を実現することができ、快適な使用環境をユーザに提供することが可能となる。このスキルミオンメモリを適用した電子機器における電力の省力化も実現できることから、搭載電池の長寿命化が実現できる。これはスキルミオンメモリを適用するモバイル電子機器において、さらに画期的な仕様をユーザ側に提供することが可能となる。ちなみに電子機器としては、パーソナルコ

ンピュータ、画像記録装置等を始め、いかなるものであってもよい。

[0213] またＣＰＵを搭載した通信装置（携帯電話機、スマートフォン、タブレット型端末等）について、本発明を適用した磁気素子を適用することにより、画像情報の取り込みや、多彩で大規模なアプリケーションプログラムの動作をより高速に実現でき、また高速な応答性を実現できることからユーザにとって快適な使用環境を確保することが可能となる。また、画面上に表示させる画像表示の高速化等も実現できることから、その使用環境をさらに向上させることが可能となる。

[0214] また本発明を適用した磁気素子をデジタルカメラ等の電子機器に適用することで、動画を大容量に亘り記録することが可能となる。また本発明を適用した磁気素子を４Ｋテレビジョン受像機等の電子機器に適用することで、その画像記録の大容量化を実現することが可能となる。その結果、テレビジョン受像機において外付けハードディスクの接続の必要性を無くすことが可能となる。また本発明は、ハードディスクをはじめとしたデータ記録装置に適用される場合に加え、データ記録媒体として具体化されるものであってもよい。

[0215] また自動車用のナビゲーションシステム等の電子機器に対してもこのスキルミオンメモリを適用することでさらに高機能化を実現することが可能となり、大量の地図情報も簡単に記憶可能となる。

[0216] また本発明は、自走装置、飛行装置、宇宙空間飛行装置を実用化する上で大きなインパクトをもたらすと期待できる。即ち、飛行装置の複雑な制御処理、天候情報処理、高精細の画質からなる映像の提供による乗客用のサービスの充実、さらには宇宙飛行装置の制御や観察した画像情報の膨大な記録情報を記録し、人類に多くの知見をもたらす。

[0217] このスキルミオンメモリは高速大規模不揮発性メモリとして、我々の生活環境に多大の貢献を担うメモリとして、その可能性をもつメモリである。また、スキルミオンはスティックメモリとして適用されるものであってもよい。

符号の説明

[0218] １　マグネチックシフトレジスタ

２　磁気センサ

５　スキルミオン

１０　磁気素子

１１　上流側非磁性金属

１２　下流側非磁性金属

１３　磁性体

１４　電源

２１　切り欠け

２２　転送経路

Ｓ　スキルミオン

１００　装置

１１０　スキルミオンメモリ

１４０　プロセッサ

請求の範囲

[請求項1] スキルミオンを転送可能な薄層状の磁気素子であって、

薄層状の磁性体と、

前記磁性体の延展方向に接続された薄層状の導電体である上流側非磁性金属と、

前記上流側非磁性金属と離間して前記磁性体に接続された薄層状の導電体である下流側非磁性金属とを備え、

前記上流側非磁性金属と前記下流側非磁性金属との間に電流を印加することにより、１又は複数のスキルミオンを転送することを特徴とする磁気素子。

[請求項2] 前記磁性体における上流側非磁性金属から下流側非磁性金属に至る幅ｗは、スキルミオンの直径をλとしたとき、ｗ≧０．５λであること

を特徴とする請求項１記載の磁気素子。

[請求項3] 前記磁性体は、転送される複数のスキルミオンの間隔ｄがスキルミオンの直径λの２倍以上である場合に、その間隔ｄを保持しつつスキルミオンを転送すること

を特徴とする請求項１又は２の記載の磁気素子。

[請求項4] 請求項１から３のいずれか１項記載の磁気素子と、

前記磁気素子の前記上流側非磁性金属及び前記下流側非磁性金属に接続され、前記上流側非磁性金属から前記下流側非磁性金属に向けて電流を印加する電源と、

前記磁性体の一面側に対向して設けられた磁場発生部とを備え、

前記電源は、上流側非磁性金属と下流側非磁性金属との間に電流を印加することにより、１又は複数のスキルミオンを転送すること

を特徴とするスキルミオンメモリ。

[請求項5] 前記磁性体における上流側非磁性金属から下流側非磁性金属に至る幅ｗは、スキルミオンの直径をλとしたとき、ｗ≧０．５λであるこ

と

を特徴とする請求項４記載のスキルミオンメモリ。

[請求項6] 前記磁性体は、転送される複数のスキルミオンの間隔ｄがスキルミオンの直径λの２倍以上である場合に、その間隔ｄを保持しつつスキルミオンを転送すること

を特徴とする請求項４又は５に記載のスキルミオンメモリ。

[請求項7] 前記下流側非磁性金属は、前記磁性体の延展方向に接続されていることを特徴とする請求項４～６のうち何れか１項記載のスキルミオンメモリ。

[請求項8] 前記下流側非磁性金属は、前記磁性体に積層されて接続されていることを特徴とする請求項４～６のうち何れか１項記載のスキルミオンメモリ。

[請求項9] スキルミオンを転送可能な薄層状の磁気素子であって、

薄層状で切り欠けを有する磁性体と、

前記磁性体の延展方向に接続された薄層状の導電体である上流側非磁性金属と、

前記上流側非磁性金属と離間して前記磁性体に接続された薄層状の導電体である下流側非磁性金属とを備え、

前記上流側非磁性金属と前記下流側非磁性金属との間に電流を印加することにより、前記磁性体中で転送される１又は複数のスキルミオンが、前記切り欠けを介して消去されることを特徴とする磁気素子。

[請求項10] 前記磁性体は、前記上流側非磁性金属に接する前記磁性体の端部から前記切り欠けが設けられ、当該切り欠けの内周端に上流側非磁性金属を接触させてなること

を特徴とする請求項９に記載の磁気素子。

[請求項11] 前記磁性体は、前記切り欠けの隅部において前記スキルミオンを消去すること

を特徴とする請求項９又は１０に記載の磁気素子。

[請求項12] 前記磁性体は、前記上流側非磁性金属に接する前記磁性体の端部から長方形状の前記切り欠けが設けられ、

前記切り欠けは、前記電流の印加方向に対する略直交方向の長さＬｘが、スキルミオンの直径λの２倍以上であること

を特徴とする請求項９～１１のうち何れか１項記載の磁気素子。

[請求項13] 前記磁性体は、前記上流側非磁性金属に接する前記磁性体の端部から前記下流側非磁性金属側に向けて縮径化する台形状の前記切り欠けが設けられ、

前記切り欠けにおける前記下流側非磁性金属側により近い下辺の長さＬｘ２は、スキルミオンの直径λより大きいこと

を特徴とする請求項９～１１のうち何れか１項記載の磁気素子。

[請求項14] 前記切り欠けと前記下流側非磁性金属との間に形成される転送経路の幅、又は複数の切り欠け間に形成される転送経路の幅は、スキルミオンの直径λ以上であること

を特徴とする請求項９～１３のうち何れか１項記載の磁気素子。

[請求項15] 請求項９～１４の何れか１項記載の磁気素子と、

前記磁気素子の前記上流側非磁性金属及び前記下流側非磁性金属に接続され、前記上流側非磁性金属から前記下流側非磁性金属に向けて電流を印加する電源と、

前記磁性体の一面側に対向して設けられた磁場発生部とを備え、

前記電源は、前記上流側非磁性金属と前記下流側非磁性金属との間に電流を印加することにより、前記磁性体中で１又は複数のスキルミオンを、前記切り欠けを介して消去すること

を特徴とするスキルミオンメモリ。

[請求項16] 前記下流側非磁性金属は、前記磁性体の延展方向に接続されていることを特徴とする請求項１５記載のスキルミオンメモリ。

[請求項17] 前記下流側非磁性金属は、前記磁性体に積層されて接続されていることを特徴とする請求項１５記載のスキルミオンメモリ。

[請求項18] スキルミオンを転送可能な薄層状の磁気素子であって、

薄層状の磁性体と、

前記磁性体の延展方向に接続された薄層状の導電体である上流側非磁性金属と、

前記上流側非磁性金属と離間して前記磁性体に接続された薄層状の導電体である下流側非磁性金属とを備え、

前記上流側非磁性金属と前記下流側非磁性金属との間に電流を印加することにより、前記磁性体中で転送される１又は複数のスキルミオンが消去されることを特徴とする磁気素子。

[請求項19] 前記磁性体中でスキルミオンを転送する際に印加される電流よりも大きな電流を印加することにより、前記磁性体中で転送される１又は複数のスキルミオンを一括して消去すること

を特徴とする請求項１８記載の磁気素子。

[請求項20] 請求項１８または１９記載の磁気素子と、

前記磁気素子の前記上流側非磁性金属及び前記下流側非磁性金属に接続され、前記上流側非磁性金属から前記下流側非磁性金属に向けて電流を印加する電源と、

前記磁性体の一面側に対向して設けられた磁場発生部とを備え、

前記電源は、前記上流側非磁性金属と前記下流側非磁性金属との間に電流を印加することにより、前記磁性体中で転送される１又は複数のスキルミオンを消去することを特徴とするスキルミオンメモリ。

[請求項21] 前記電源は、前記磁性体中でスキルミオンを転送する際に印加される電流よりも大きな電流を印加することにより、前記磁性体中で転送される１又は複数のスキルミオンを一括して消去すること

を特徴とする請求項２０記載のスキルミオンメモリ。

[請求項22] 前記下流側非磁性金属は、前記磁性体の延展方向に接続されていることを特徴とする請求項２０又は２１記載のスキルミオンメモリ。

[請求項23] 前記下流側非磁性金属は、前記磁性体に積層されて接続されている

ことを特徴とする請求項２０又は２１記載のスキルミオンメモリ。

[請求項24] 前記磁性体は、カイラル磁性体、ダイポール磁性体、フラストレート磁性体、および、磁性材料と非磁性材料との積層界面構造のうちのいずれかからなることを特徴とする、

請求項１～３、９～１４、および、１８～１９の何れか１項記載の磁気素子。

[請求項25] 前記磁性体は、カイラル磁性体、ダイポール磁性体、フラストレート磁性体、および、磁性材料と非磁性材料との積層界面構造のうちのいずれかからなることを特徴とする、

請求項４～８、１５～１７、および、２０～２３の何れか１項記載のスキルミオンメモリ。

[請求項26] 請求項４～８、１５～１７、２０～２３、および、２５の何れか１項記載のスキルミオンメモリとＣＭＯＳ－ＬＳＩデバイスが同一チップ内に形成されていることを特徴とするスキルミオンメモリ搭載ＣＭＯＳ－ＬＳＩデバイス。

[請求項27] 請求項４～８、１５～１７、２０～２３、および、２５のうち何れか１項記載のスキルミオンメモリを搭載したことを特徴とするパーソナルコンピュータ。

[請求項28] 請求項４～８、１５～１７、２０～２３、および、２５のうち何れか１項記載のスキルミオンメモリを搭載したことを特徴とするデータ記録媒体。

[請求項29] 請求項４～８、１５～１７、２０～２３、および、２５のうち何れか１項記載のスキルミオンメモリを搭載したことを特徴とするデータ記録装置。

[請求項30] 請求項４～８、１５～１７、２０～２３、および、２５のうち何れか１項記載のスキルミオンメモリを搭載したことを特徴とする携帯電話機。

[請求項31] 請求項４～８、１５～１７、２０～２３、および、２５のうち何れ

か１項記載のスキルミオンメモリを搭載したことを特徴とするスマートフォン。

[請求項32] 請求項４～８、１５～１７、２０～２３、および、２５のうち何れか１項記載のスキルミオンメモリを搭載したことを特徴とするデジタルカメラ。

[請求項33] 請求項４～８、１５～１７、２０～２３、および、２５のうち何れか１項記載のスキルミオンメモリを搭載したことを特徴とするスティックメモリ。

[請求項34] 請求項４～８、１５～１７、２０～２３、および、２５のうち何れか１項記載のスキルミオンメモリを搭載したことを特徴とする通信装置。

[請求項35] 請求項４～８、１５～１７、２０～２３、および、２５のうち何れか１項記載のスキルミオンメモリを搭載したことを特徴とする画像記録装置。

[請求項36] 請求項４～８、１５～１７、２０～２３、および、２５のうち何れか１項記載のスキルミオンメモリを搭載したことを特徴とするテレビジョン受像機。

[請求項37] 請求項４～８、１５～１７、２０～２３、および、２５のうち何れか１項記載のスキルミオンメモリを搭載したことを特徴とする自走装置。

[請求項38] 請求項４～８、１５～１７、２０～２３、および、２５のうち何れか１項記載のスキルミオンメモリを搭載したことを特徴とする飛行装置。

[請求項39] 請求項４～８、１５～１７、２０～２３、および、２５のうち何れか１項記載のスキルミオンメモリを搭載したことを特徴とする宇宙空間飛行装置。

補正された請求の範囲
[2015年7月16日(16.07.2015) 国際事務局受理]

[請求項1] （補正後） スキルミオンを転送可能な薄層状の磁気素子であって、

薄層状の磁性体と、

前記磁性体の延展方向に接続された薄層状の導電体である上流側非磁性金属と、

前記上流側非磁性金属と離間して前記磁性体に接続された薄層状の導電体である下流側非磁性金属とを備え、

前記上流側非磁性金属と前記下流側非磁性金属との間に流す電流の方向を、１又は複数のスキルミオンを転送する方向に対して略垂直に配置した横電流配置であることを特徴とする磁気素子。

[請求項2] 前記磁性体における上流側非磁性金属から下流側非磁性金属に至る幅ｗは、スキルミオンの直径をλとしたとき、ｗ≧０．５λであること

を特徴とする請求項１記載の磁気素子。

[請求項3] 前記磁性体は、転送される複数のスキルミオンの間隔ｄがスキルミオンの直径λの２倍以上である場合に、その間隔ｄを保持しつつスキルミオンを転送すること

を特徴とする請求項１又は２の記載の磁気素子。

[請求項4] 請求項１から３のいずれか１項記載の磁気素子と、

前記磁気素子の前記上流側非磁性金属及び前記下流側非磁性金属に接続され、前記上流側非磁性金属から前記下流側非磁性金属に向けて電流を印加する電源と、

前記磁性体の一面側に対向して設けられた磁場発生部とを備え、

前記電源は、上流側非磁性金属と下流側非磁性金属との間に電流を印加することにより、１又は複数のスキルミオンを転送すること

を特徴とするスキルミオンメモリ。

[請求項5] 前記磁性体における上流側非磁性金属から下流側非磁性金属に至る幅ｗは、スキルミオンの直径をλとしたとき、ｗ≧０．５λであるこ

と

を特徴とする請求項４記載のスキルミオンメモリ。

[請求項6] 前記磁性体は、転送される複数のスキルミオンの間隔ｄがスキルミオンの直径λの２倍以上である場合に、その間隔ｄを保持しつつスキルミオンを転送すること

を特徴とする請求項４又は５に記載のスキルミオンメモリ。

[請求項7] （削除）

[請求項8] （削除）

[請求項9] （補正後） スキルミオンを転送可能な薄層状の磁気素子であって、

薄層状で切り欠けを有する磁性体と、

前記磁性体の延展方向に接続された薄層状の導電体である上流側非磁性金属と、

前記上流側非磁性金属と離間して前記磁性体に接続された薄層状の導電体である下流側非磁性金属とを備え、

前記上流側非磁性金属と前記下流側非磁性金属との間に流す電流の方向を、１又は複数のスキルミオンを転送する方向に対して略垂直に配置した横電流配置であり、

前記上流側非磁性金属と前記下流側非磁性金属との間に電流を印加することにより、前記磁性体中で転送される１又は複数のスキルミオンが、前記切り欠けを介して消去されることを特徴とする磁気素子。

[請求項10] 前記磁性体は、前記上流側非磁性金属に接する前記磁性体の端部から前記切り欠けが設けられ、当該切り欠けの内周端に上流側非磁性金属を接触させてなること

を特徴とする請求項９に記載の磁気素子。

[請求項11] 前記磁性体は、前記切り欠けの隅部において前記スキルミオンを消去すること

を特徴とする請求項９又は１０に記載の磁気素子。

[請求項12] 前記磁性体は、前記上流側非磁性金属に接する前記磁性体の端部か

ら長方形状の前記切り欠けが設けられ、

前記切り欠けは、前記電流の印加方向に対する略直交方向の長さＬｘが、スキルミオンの直径λの２倍以上であること

を特徴とする請求項９～１１のうち何れか１項記載の磁気素子。

[請求項13] 前記磁性体は、前記上流側非磁性金属に接する前記磁性体の端部から前記下流側非磁性金属側に向けて縮径化する台形状の前記切り欠けが設けられ、

前記切り欠けにおける前記下流側非磁性金属側により近い下辺の長さＬｘ２は、スキルミオンの直径λより大きいこと

を特徴とする請求項９～１１のうち何れか１項記載の磁気素子。

[請求項14] 前記切り欠けと前記下流側非磁性金属との間に形成される転送経路の幅、又は複数の切り欠け間に形成される転送経路の幅は、スキルミオンの直径λ以上であること

を特徴とする請求項９～１３のうち何れか１項記載の磁気素子。

[請求項15] 請求項９～１４の何れか１項記載の磁気素子と、

前記磁気素子の前記上流側非磁性金属及び前記下流側非磁性金属に接続され、前記上流側非磁性金属から前記下流側非磁性金属に向けて電流を印加する電源と、

前記磁性体の一面側に対向して設けられた磁場発生部とを備え、

前記電源は、前記上流側非磁性金属と前記下流側非磁性金属との間に電流を印加することにより、前記磁性体中で１又は複数のスキルミオンを、前記切り欠けを介して消去すること

を特徴とするスキルミオンメモリ。

[請求項16] 前記下流側非磁性金属は、前記磁性体の延展方向に接続されていることを特徴とする請求項１５記載のスキルミオンメモリ。

[請求項17] 前記下流側非磁性金属は、前記磁性体に積層されて接続されていることを特徴とする請求項１５記載のスキルミオンメモリ。

[請求項18] （補正後） スキルミオンを転送可能な薄層状の磁気素子であって、

薄層状の磁性体と、

前記磁性体の延展方向に接続された薄層状の導電体である上流側非磁性金属と、

前記上流側非磁性金属と離間して前記磁性体に接続された薄層状の導電体である下流側非磁性金属とを備え、

前記上流側非磁性金属と前記下流側非磁性金属との間に流す電流の方向を、１又は複数のスキルミオンを転送する方向に対して略垂直に配置した横電流配置であり、前記上流側非磁性金属と前記下流側非磁性金属との間に電流を印加することにより、前記磁性体中で転送される１又は複数のスキルミオンが消去されることを特徴とする磁気素子。

[請求項19] 前記磁性体中でスキルミオンを転送する際に印加される電流よりも大きな電流を印加することにより、前記磁性体中で転送される１又は複数のスキルミオンを一括して消去すること

を特徴とする請求項１８記載の磁気素子。

[請求項20] 請求項１８または１９記載の磁気素子と、

前記磁気素子の前記上流側非磁性金属及び前記下流側非磁性金属に接続され、前記上流側非磁性金属から前記下流側非磁性金属に向けて電流を印加する電源と、

前記磁性体の一面側に対向して設けられた磁場発生部とを備え、

前記電源は、前記上流側非磁性金属と前記下流側非磁性金属との間に電流を印加することにより、前記磁性体中で転送される１又は複数のスキルミオンを消去することを特徴とするスキルミオンメモリ。

[請求項21] 前記電源は、前記磁性体中でスキルミオンを転送する際に印加される電流よりも大きな電流を印加することにより、前記磁性体中で転送される１又は複数のスキルミオンを一括して消去すること

を特徴とする請求項２０記載のスキルミオンメモリ。

[請求項22] 前記下流側非磁性金属は、前記磁性体の延展方向に接続されている

ことを特徴とする請求項２０又は２１記載のスキルミオンメモリ。

[請求項23] 前記下流側非磁性金属は、前記磁性体に積層されて接続されていることを特徴とする請求項２０又は２１記載のスキルミオンメモリ。

[請求項24] 前記磁性体は、カイラル磁性体、ダイポール磁性体、フラストレート磁性体、および、磁性材料と非磁性材料との積層界面構造のうちのいずれかからなることを特徴とする、

請求項１～３、９～１４、および、１８～１９の何れか１項記載の磁気素子。

[請求項25] 前記磁性体は、カイラル磁性体、ダイポール磁性体、フラストレート磁性体、および、磁性材料と非磁性材料との積層界面構造のうちのいずれかからなることを特徴とする、

請求項４～８、１５～１７、および、２０～２３の何れか１項記載のスキルミオンメモリ。

[請求項26] 請求項４～８、１５～１７、２０～２３、および、２５の何れか１項記載のスキルミオンメモリとＣＭＯＳ－ＬＳＩデバイスが同一チップ内に形成されていることを特徴とするスキルミオンメモリ搭載ＣＭＯＳ－ＬＳＩデバイス。

[請求項27] 請求項４～８、１５～１７、２０～２３、および、２５のうち何れか１項記載のスキルミオンメモリを搭載したことを特徴とするパーソナルコンピュータ。

[請求項28] 請求項４～８、１５～１７、２０～２３、および、２５のうち何れか１項記載のスキルミオンメモリを搭載したことを特徴とするデータ記録媒体。

[請求項29] 請求項４～８、１５～１７、２０～２３、および、２５のうち何れか１項記載のスキルミオンメモリを搭載したことを特徴とするデータ記録装置。

[請求項30] 請求項４～８、１５～１７、２０～２３、および、２５のうち何れか１項記載のスキルミオンメモリを搭載したことを特徴とする携帯電

話機。

[請求項31] 請求項４～８、１５～１７、２０～２３、および、２５のうち何れか１項記載のスキルミオンメモリを搭載したことを特徴とするスマートフォン。

[請求項32] 請求項４～８、１５～１７、２０～２３、および、２５のうち何れか１項記載のスキルミオンメモリを搭載したことを特徴とするデジタルカメラ。

[請求項33] 請求項４～８、１５～１７、２０～２３、および、２５のうち何れか１項記載のスキルミオンメモリを搭載したことを特徴とするスティックメモリ。

[請求項34] 請求項４～８、１５～１７、２０～２３、および、２５のうち何れか１項記載のスキルミオンメモリを搭載したことを特徴とする通信装置。

[請求項35] 請求項４～８、１５～１７、２０～２３、および、２５のうち何れか１項記載のスキルミオンメモリを搭載したことを特徴とする画像記録装置。

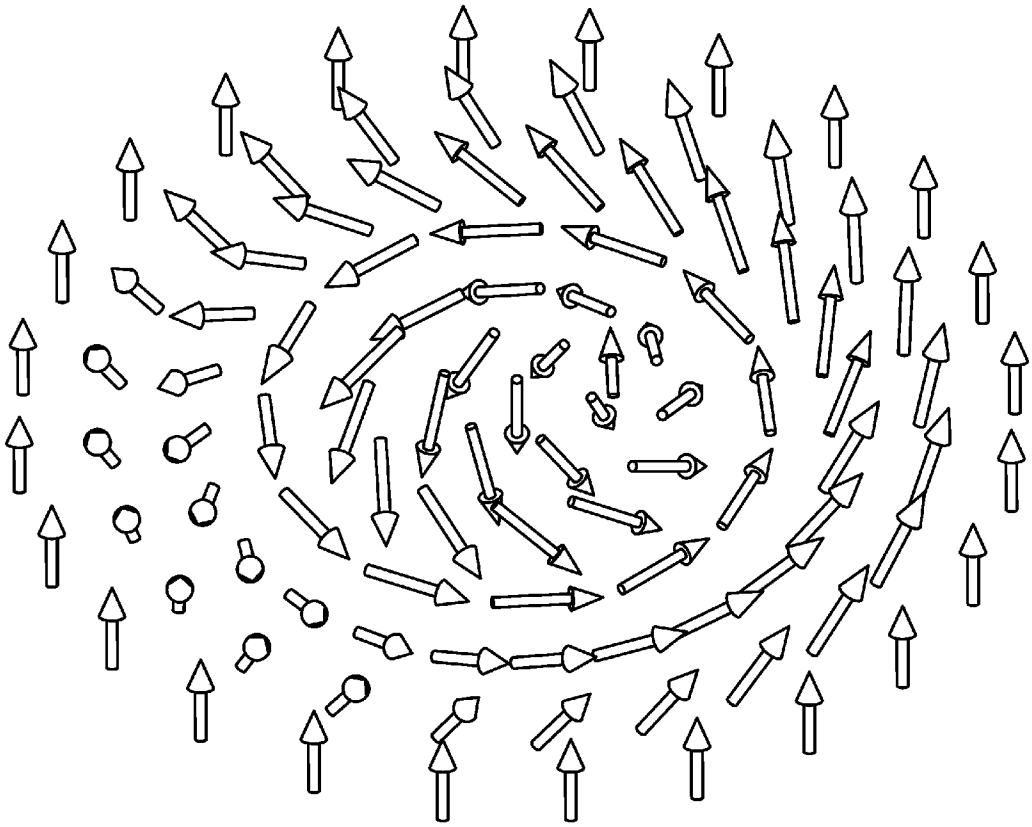
[請求項36] 請求項４～８、１５～１７、２０～２３、および、２５のうち何れか１項記載のスキルミオンメモリを搭載したことを特徴とするテレビジョン受像機。

[請求項37] 請求項４～８、１５～１７、２０～２３、および、２５のうち何れか１項記載のスキルミオンメモリを搭載したことを特徴とする自走装置。

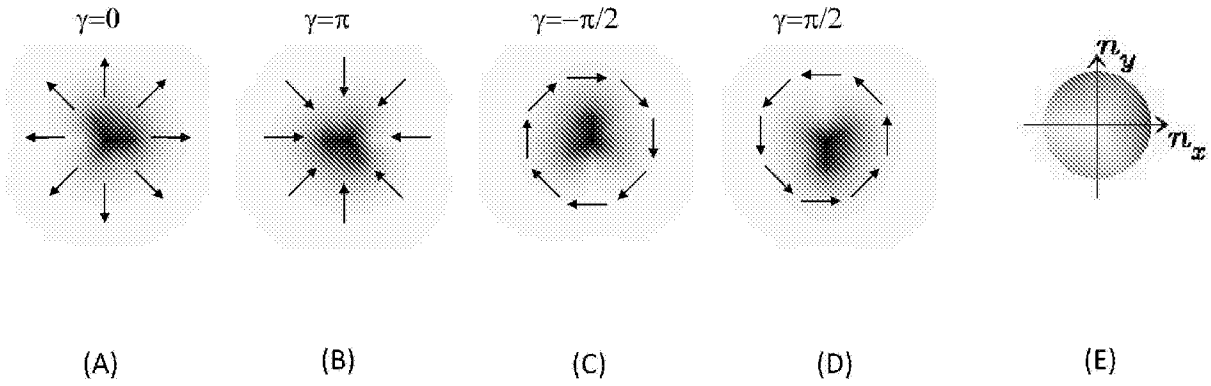
[請求項38] 請求項４～８、１５～１７、２０～２３、および、２５のうち何れか１項記載のスキルミオンメモリを搭載したことを特徴とする飛行装置。

[請求項39] 請求項４～８、１５～１７、２０～２３、および、２５のうち何れか１項記載のスキルミオンメモリを搭載したことを特徴とする宇宙空間飛行装置。

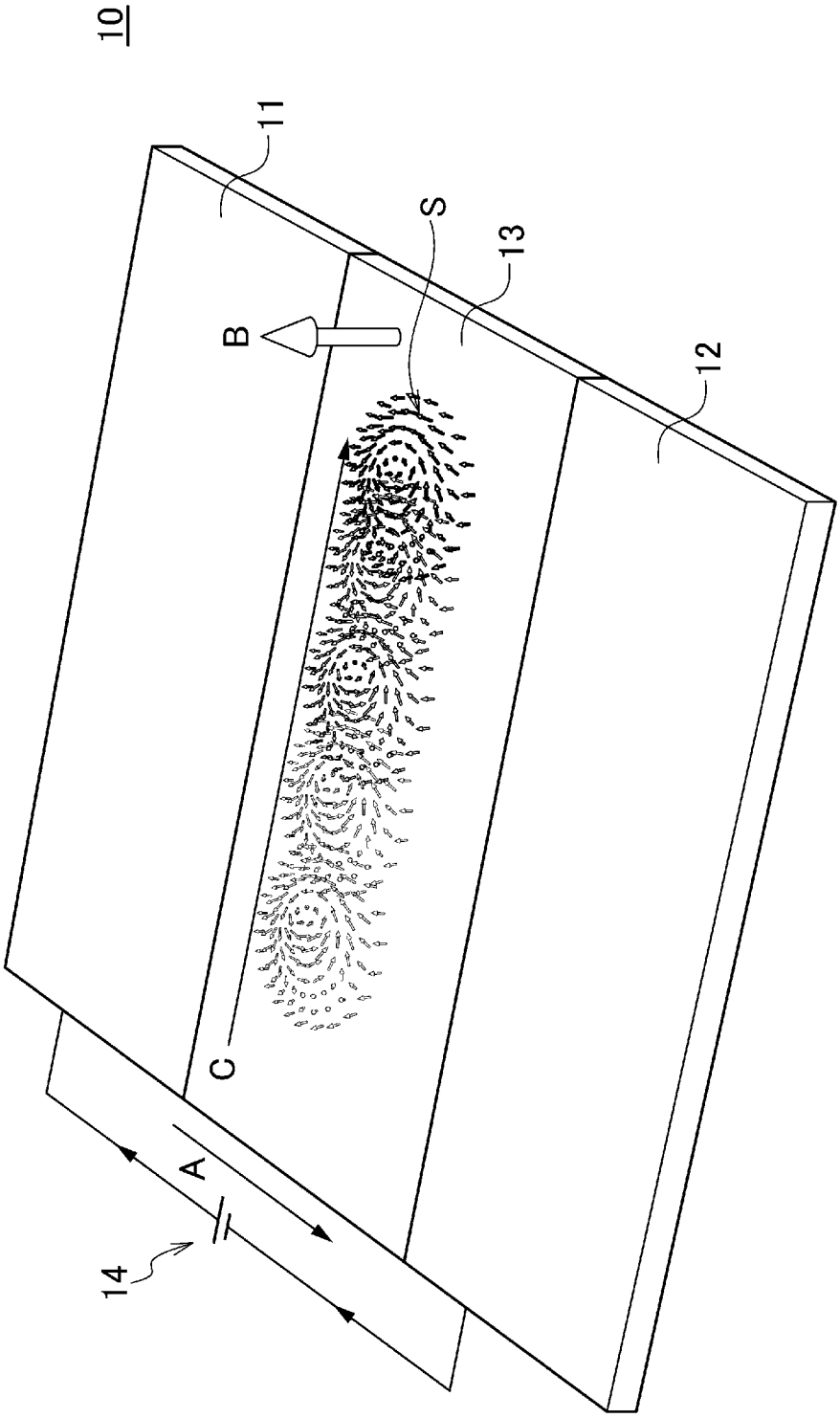
[図1]



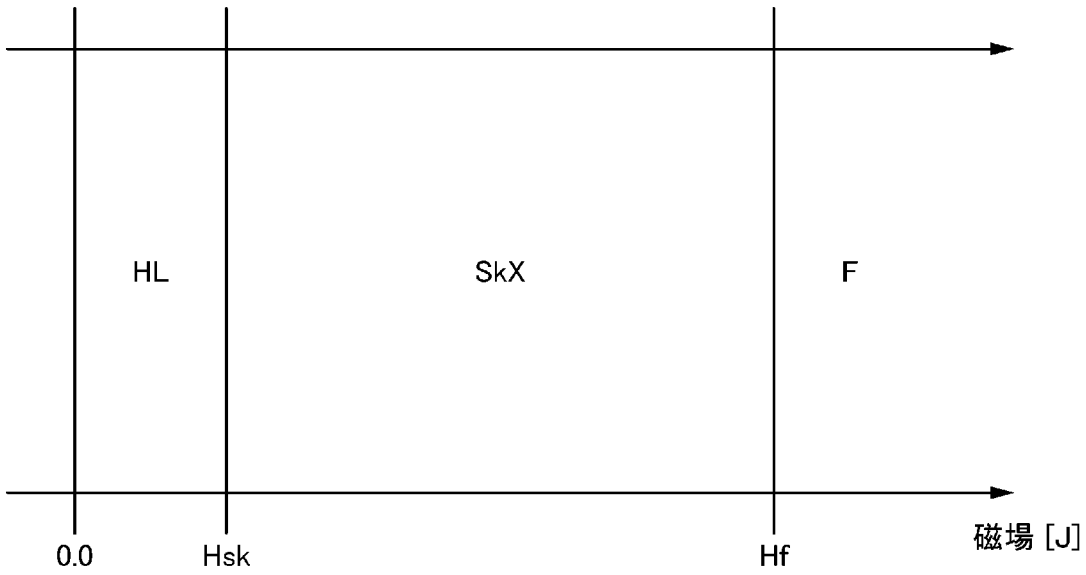
[図2]



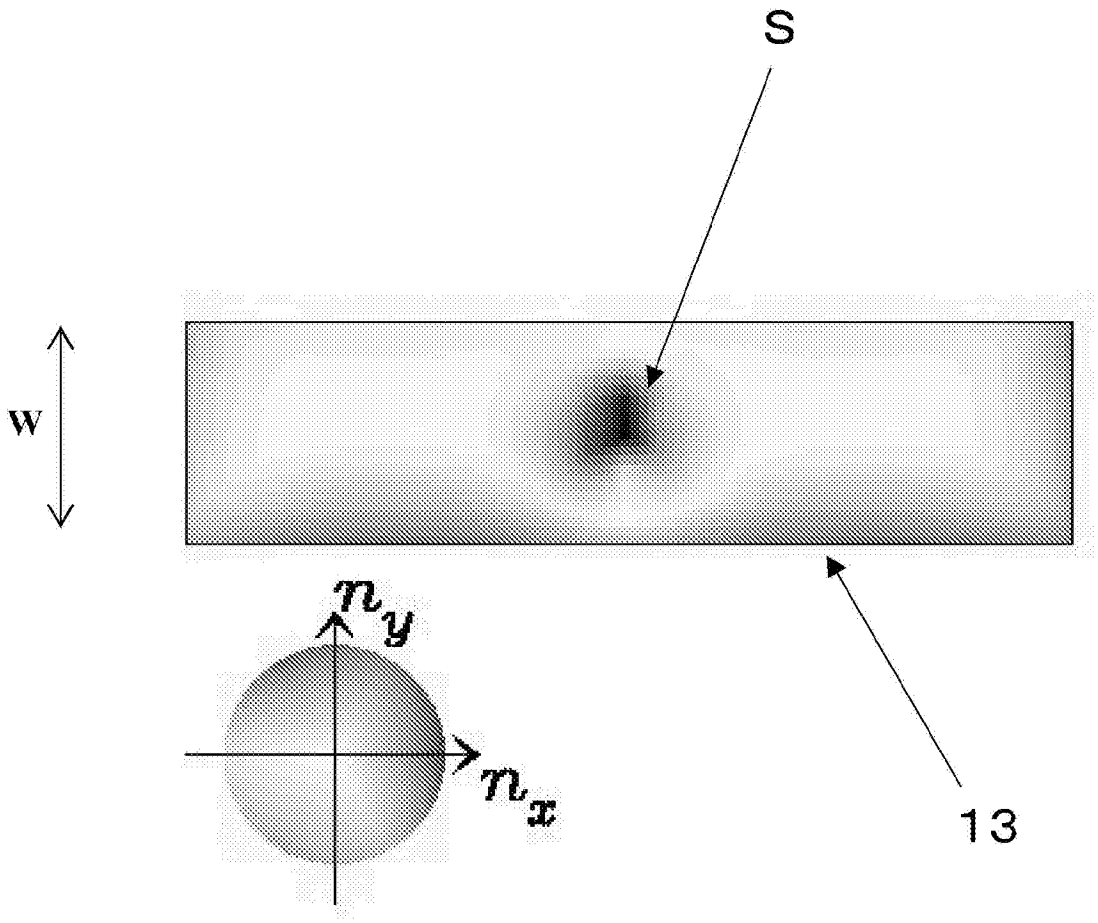
[図3]



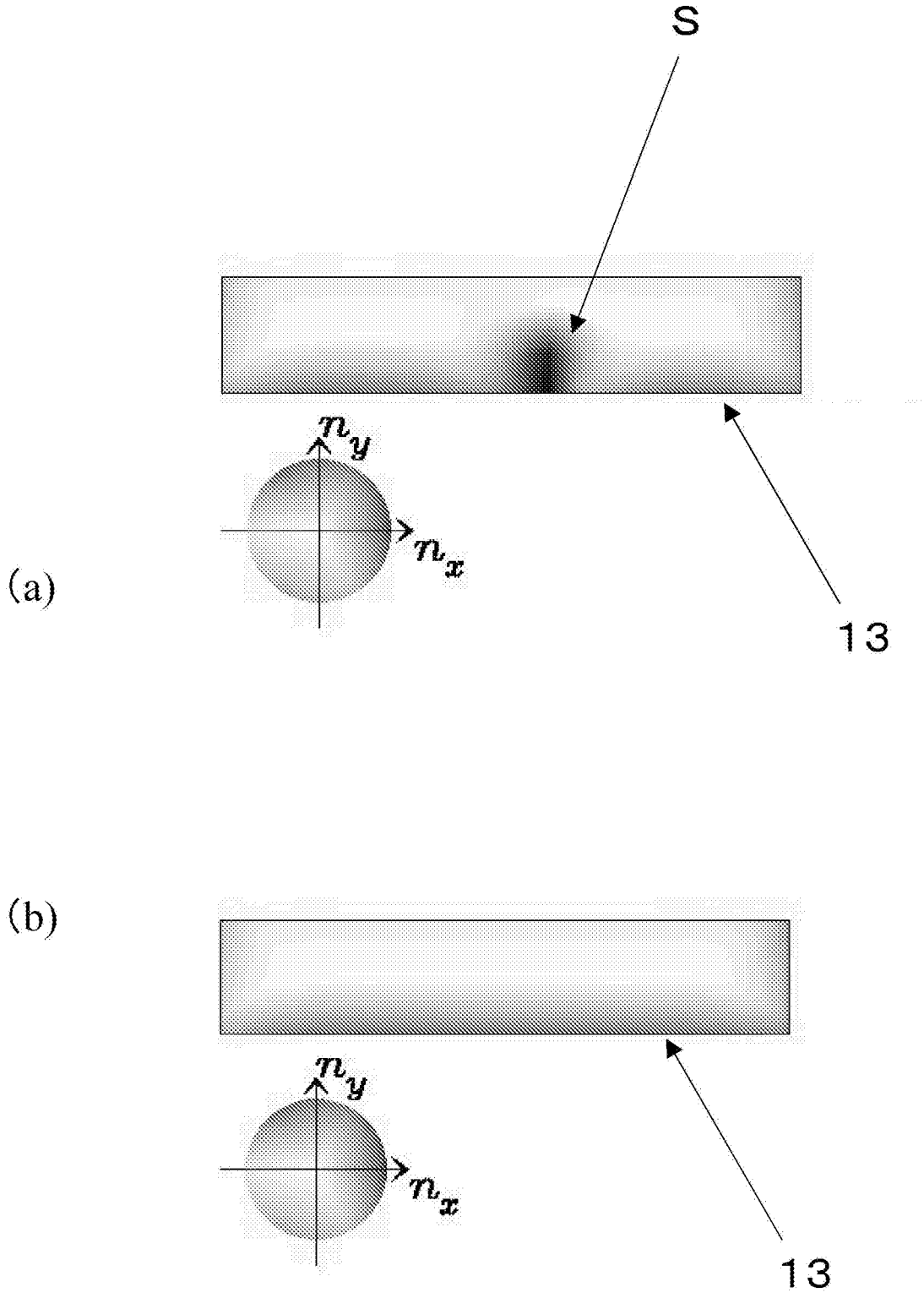
[図4]



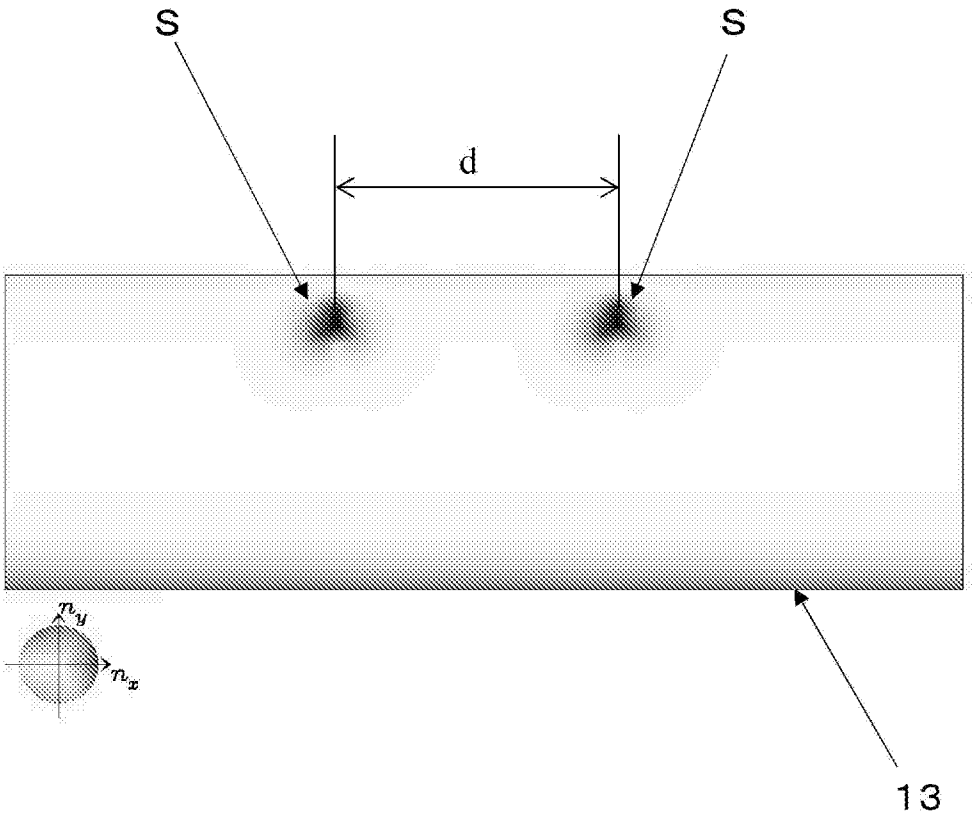
[図5]



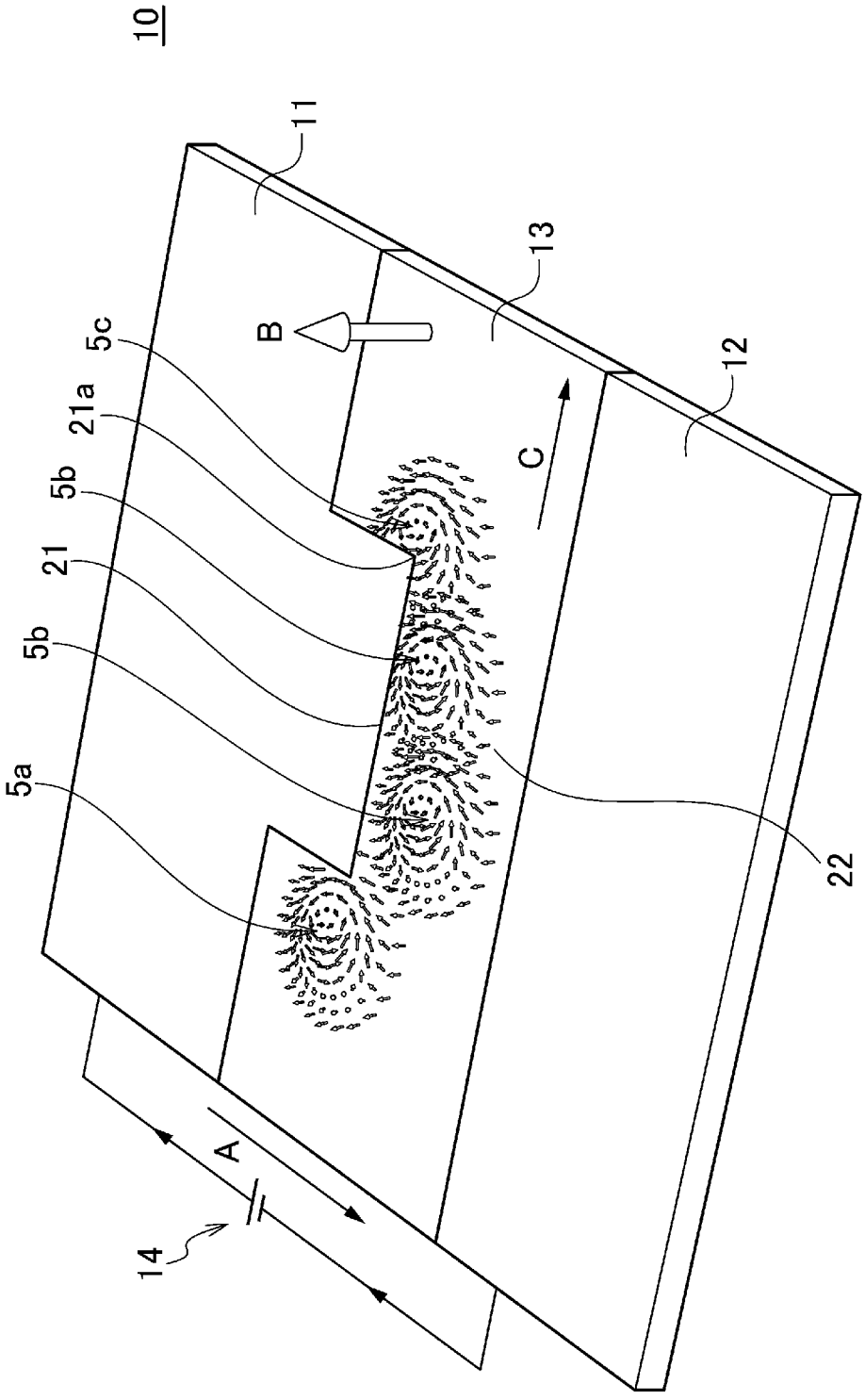
[図6]



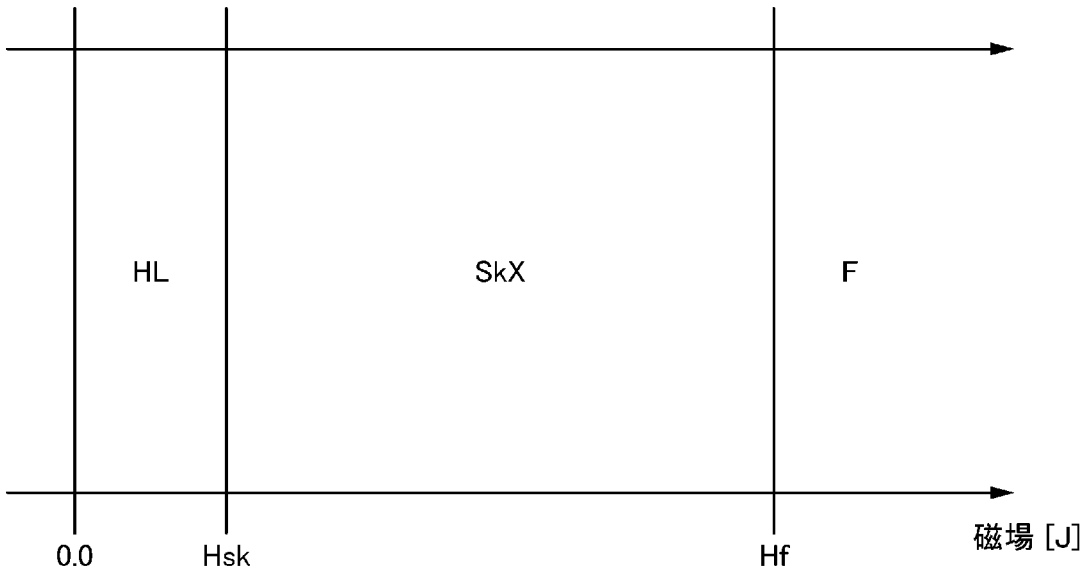
[図7]



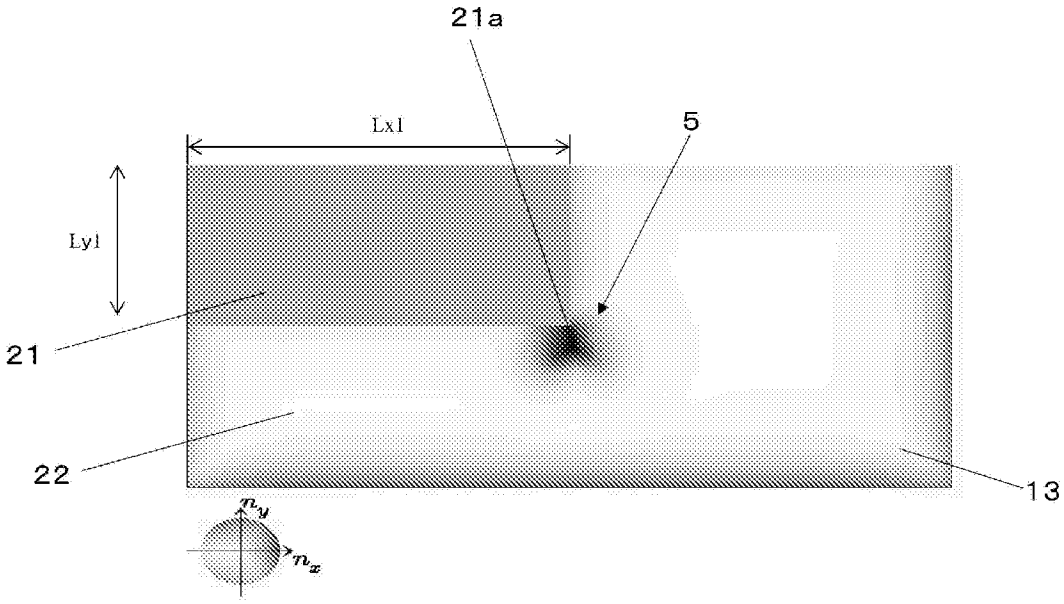
[図8]



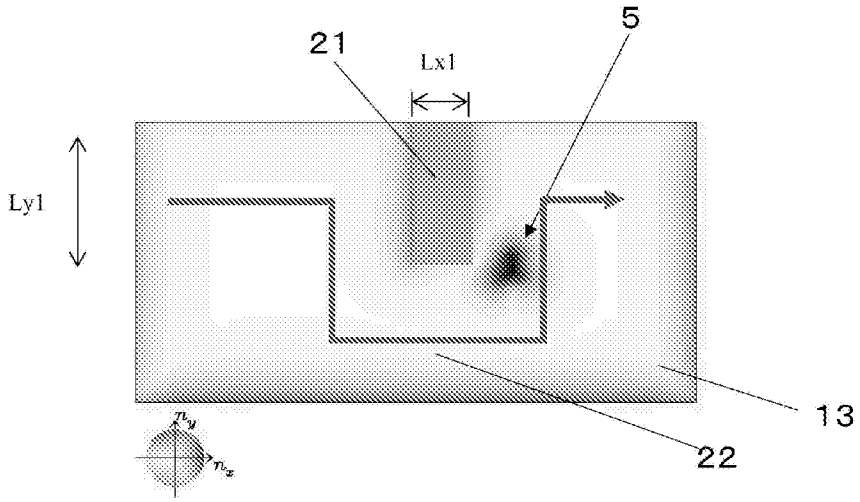
[図9]



[図10]

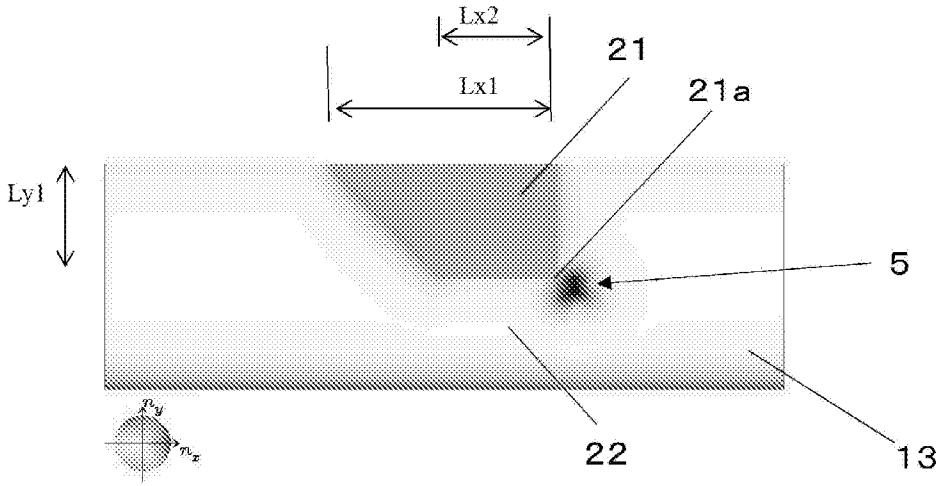


[図11]

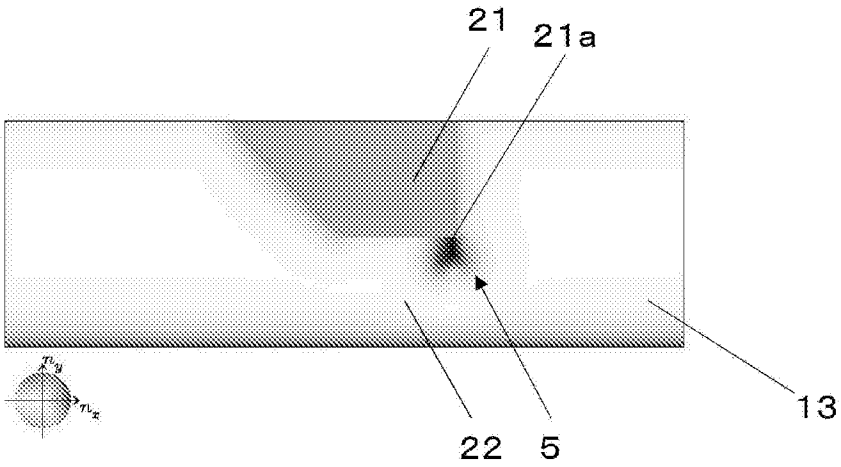


[図12]

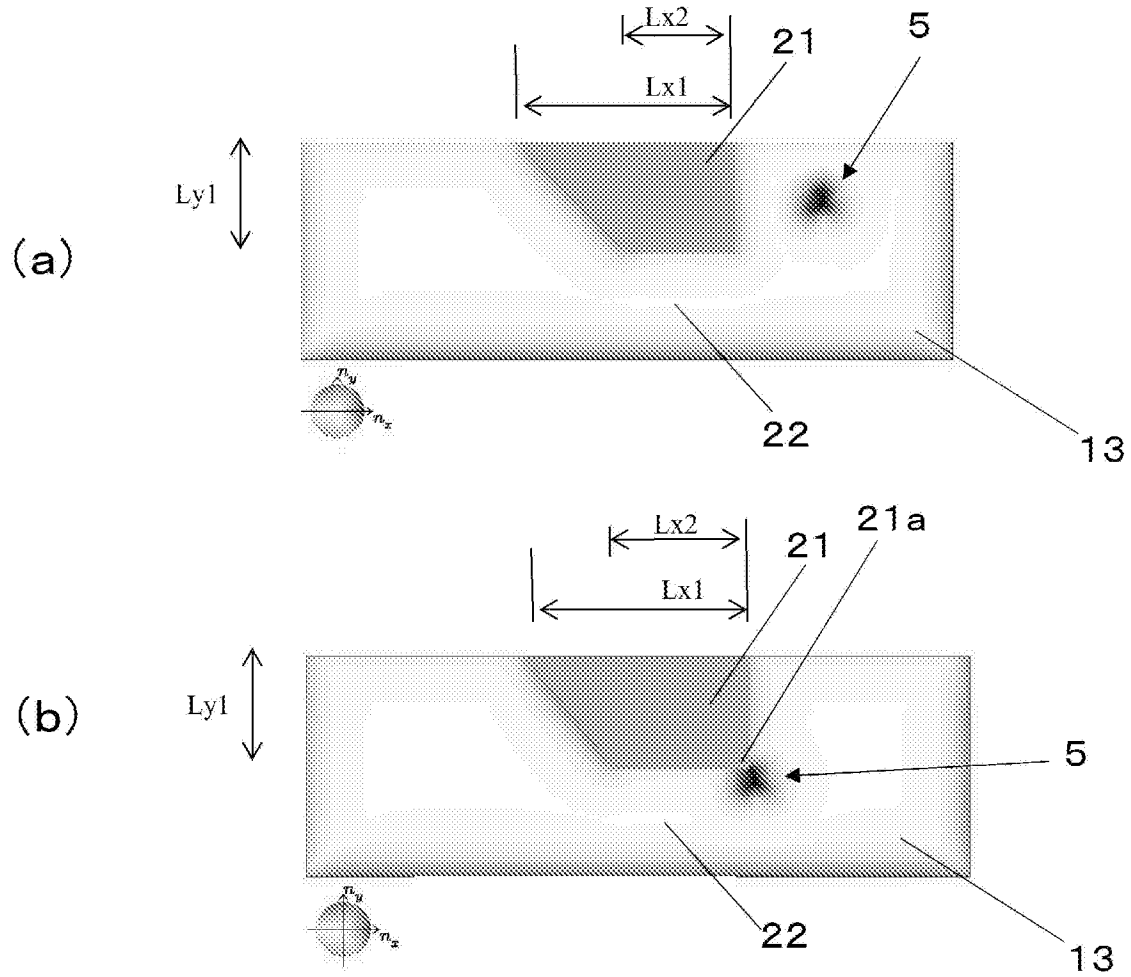
(a)



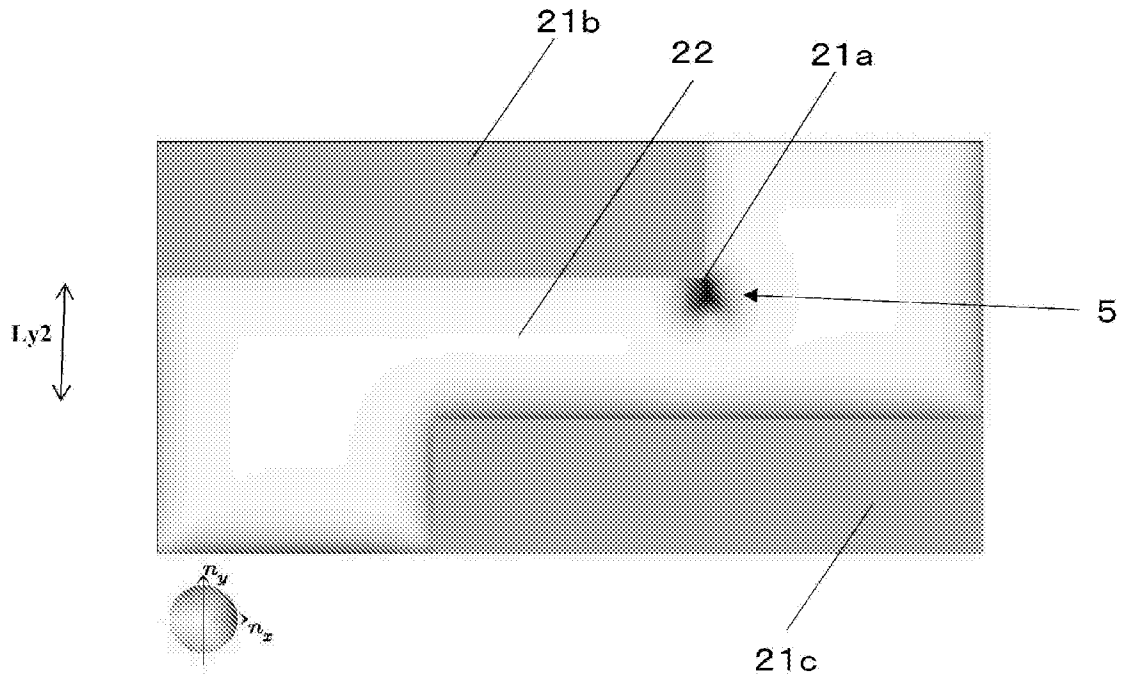
(b)



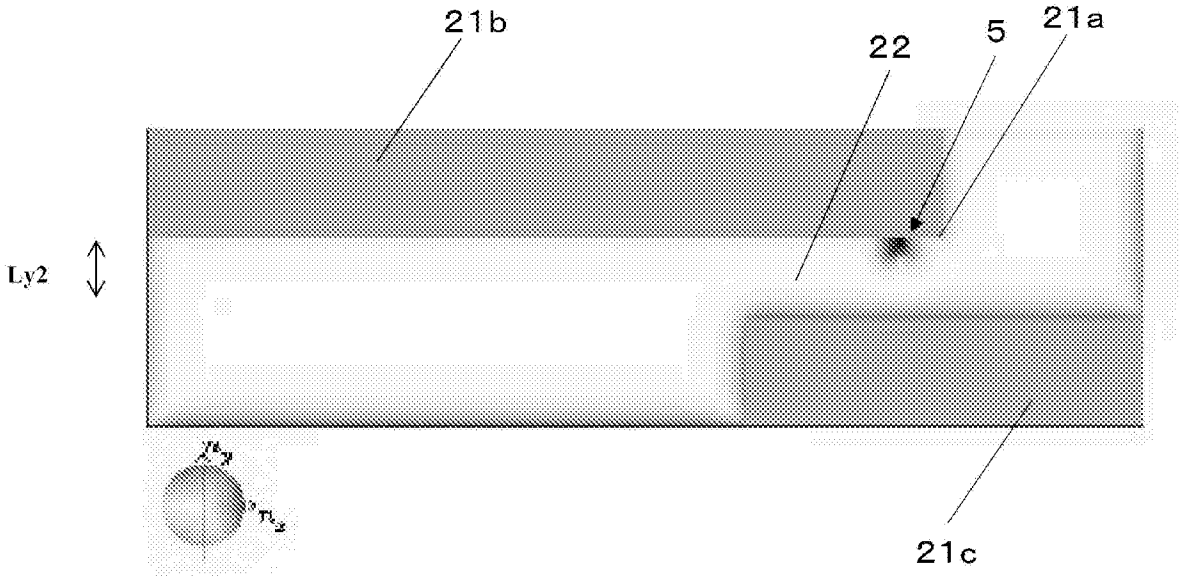
[図13]


(a)
Lx2
Lx1
21
5
Ly1
22
13
(b)
Lx2
Lx1
21
21a
Ly1
5
22
13

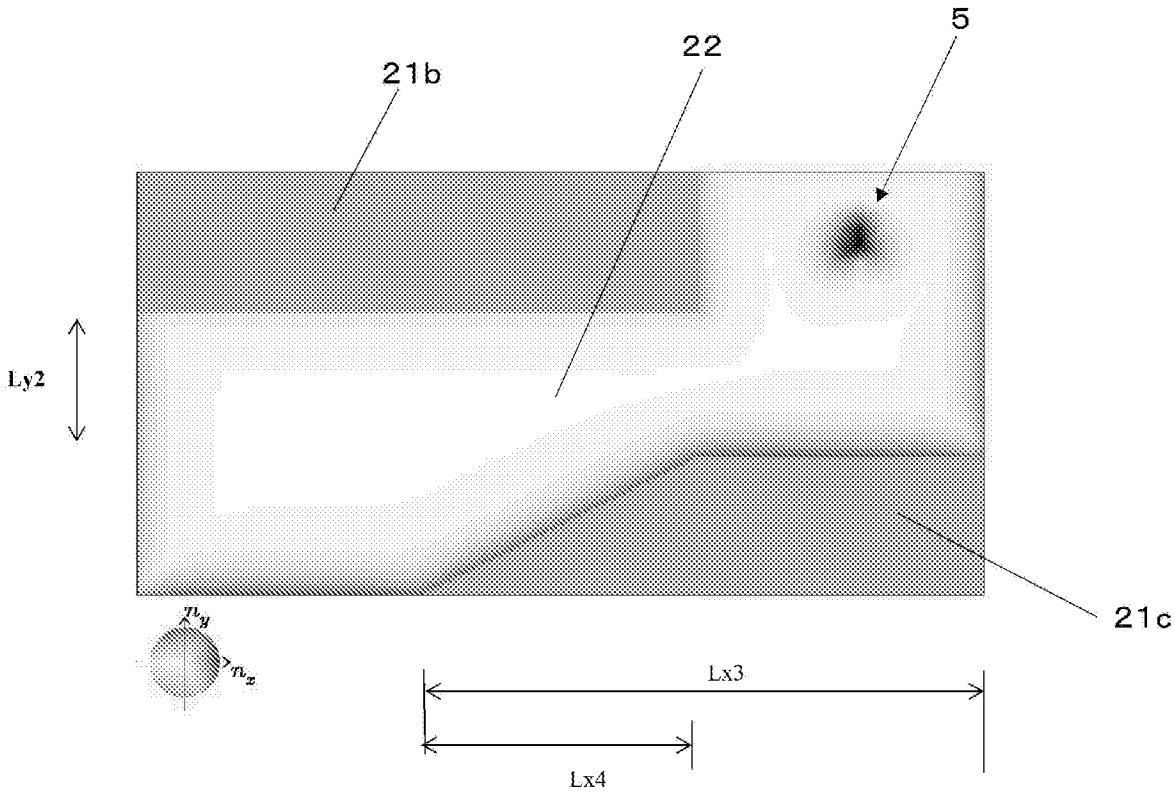
[図14]


21b
22
21a
5
Ly2
21c

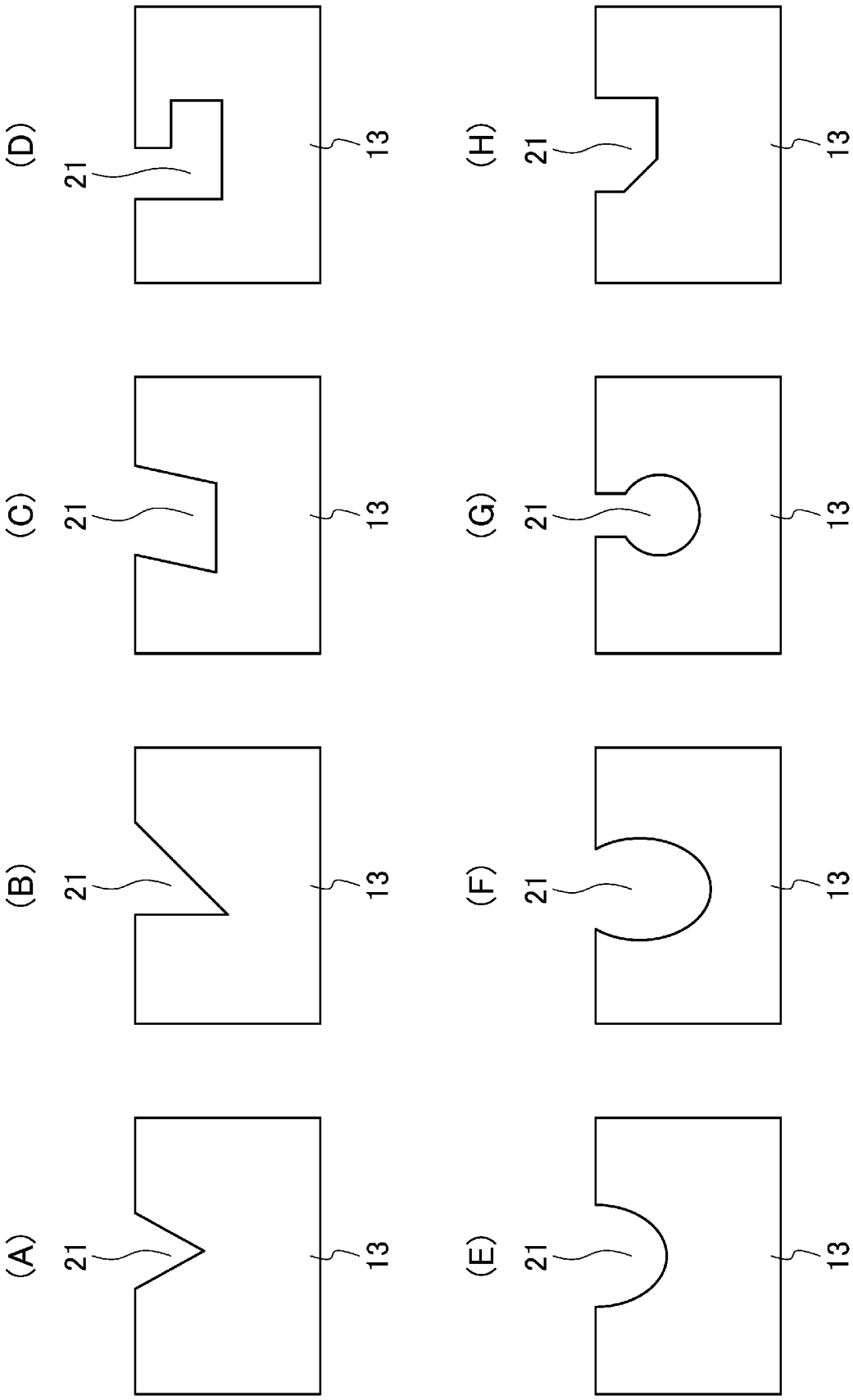
[図15]



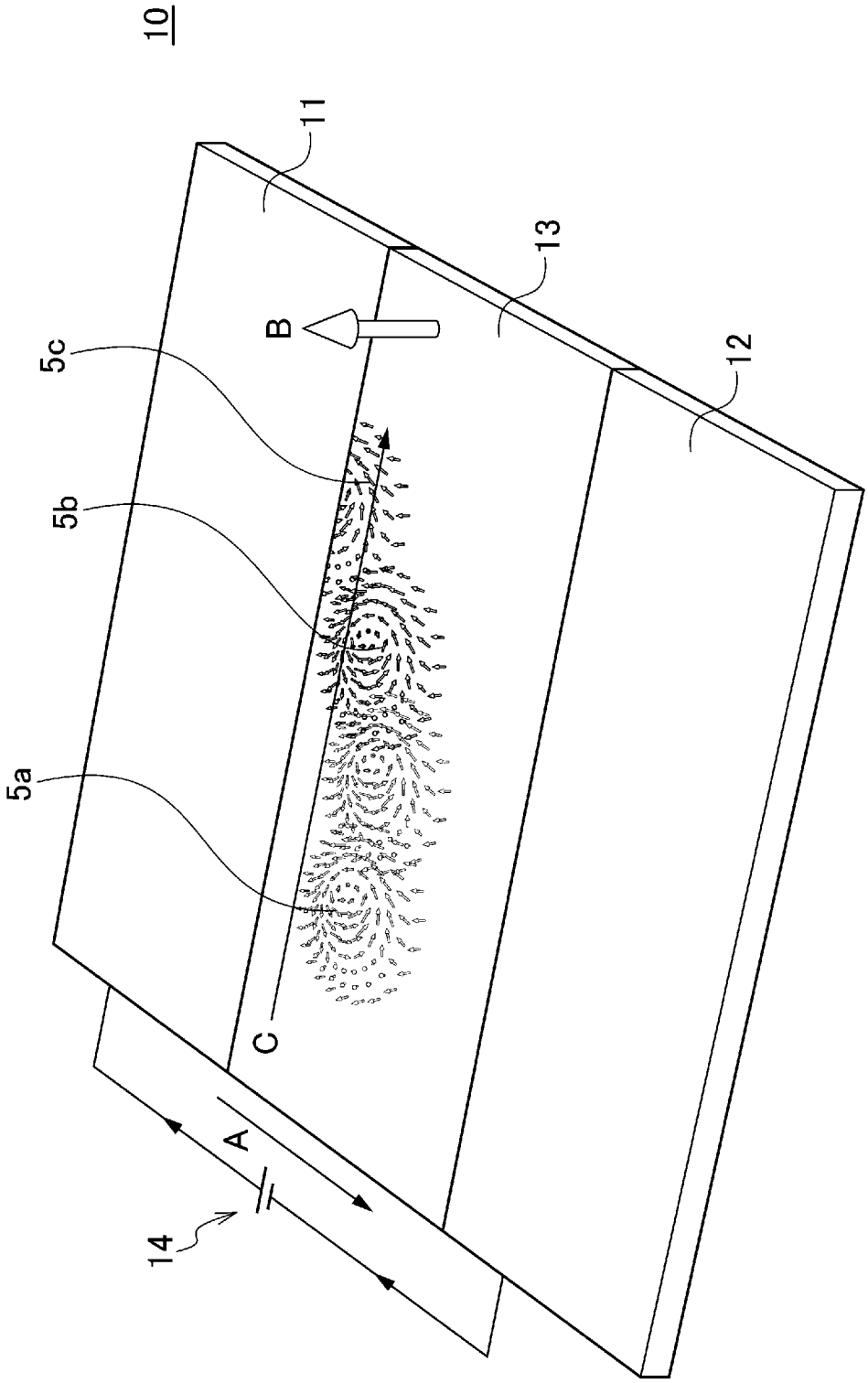
[図16]



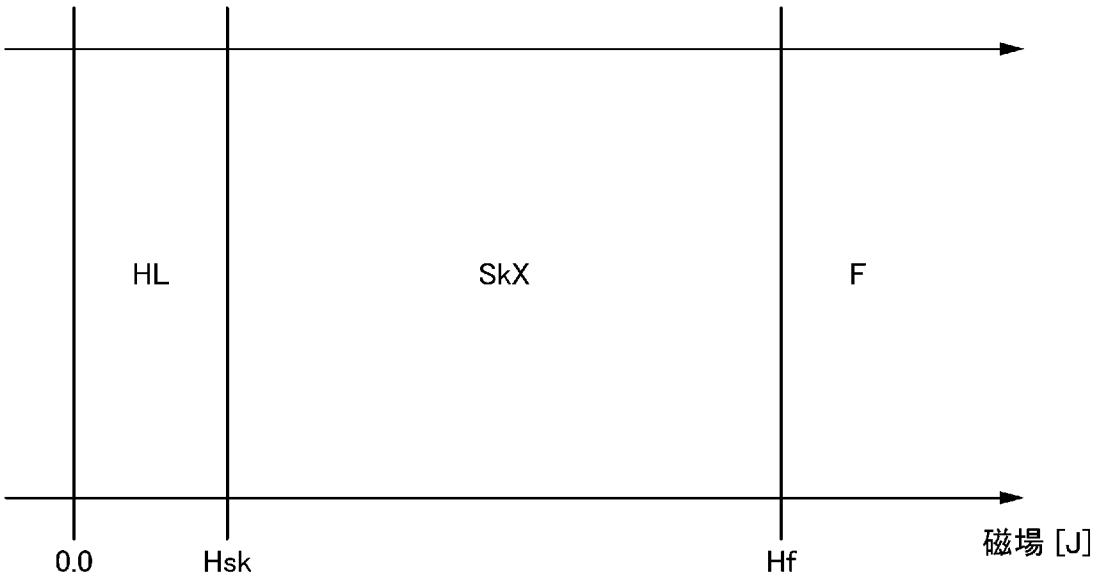
[図17]



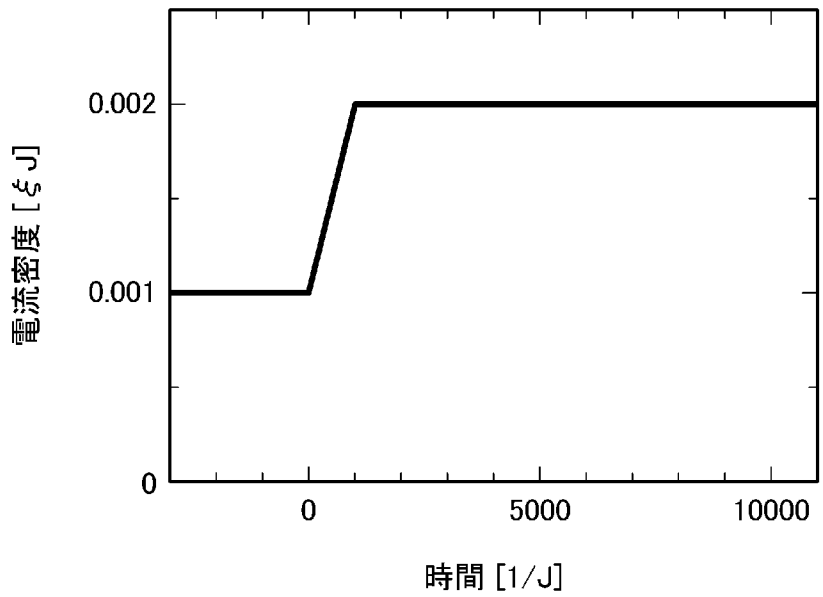
[図18]



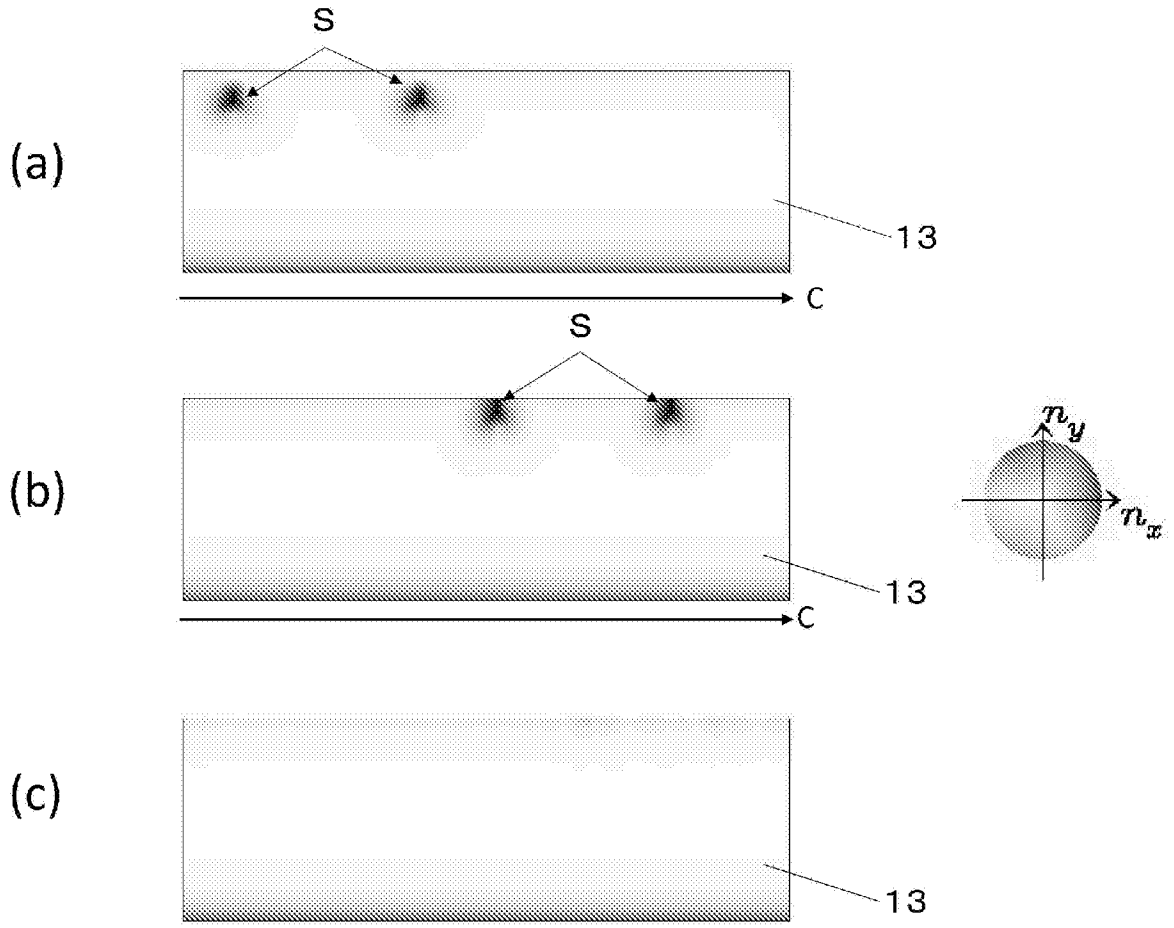
[図19]



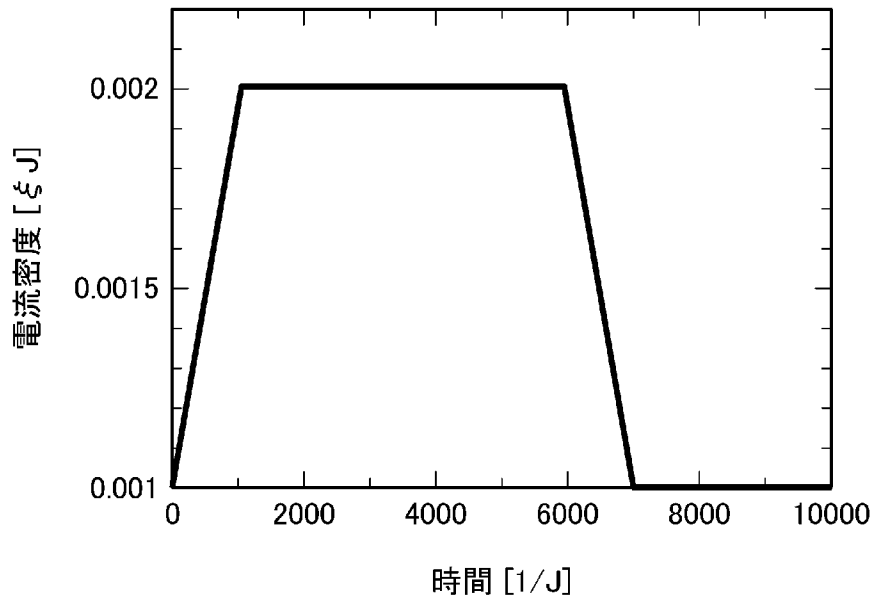
[図20]



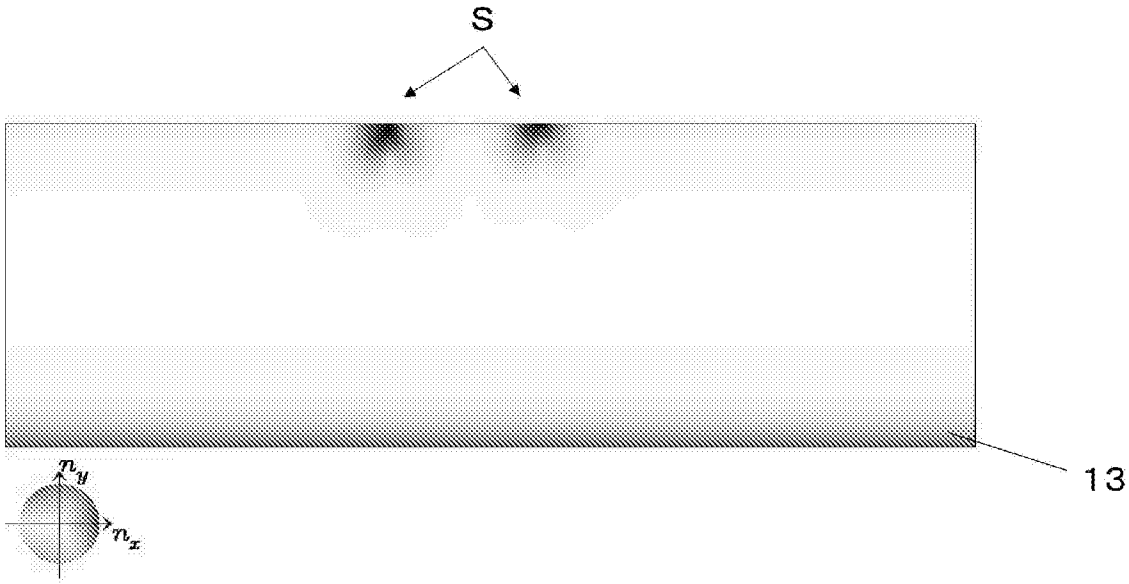
[図21]


(a)
S
13
C
(b)
S
13
C
n_y
n_x
(c)
13

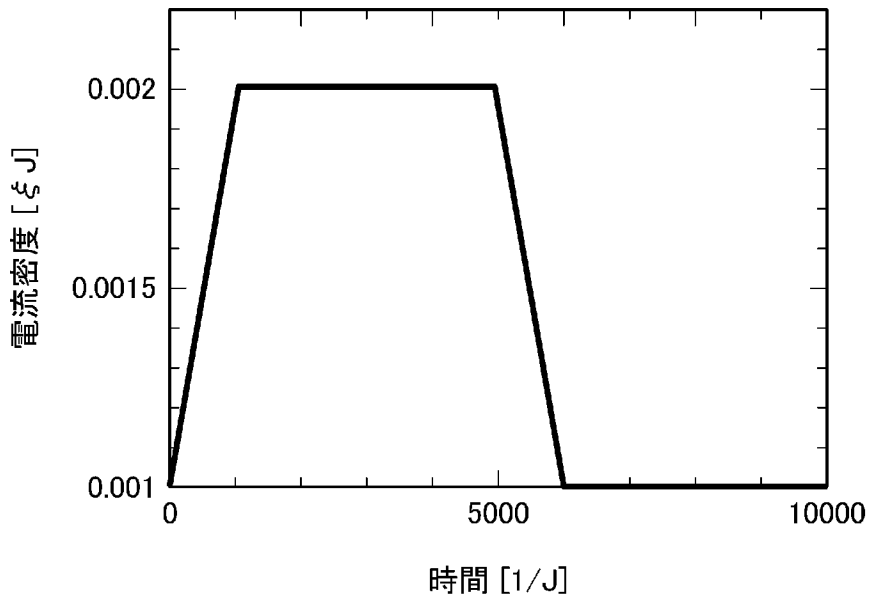
[図22]


0.002
0.0015
0.001
電流密度 [ξJ]
0
2000
4000
6000
8000
10000
時間 [1/J]

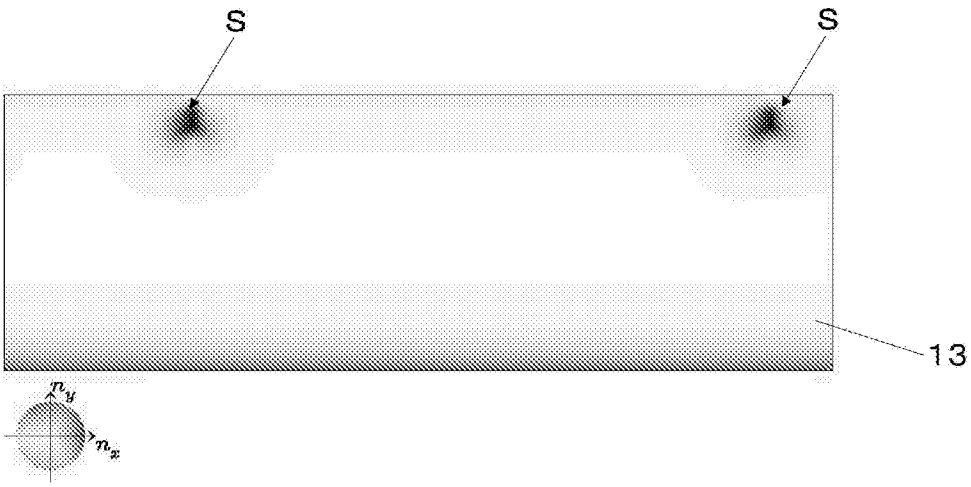
[図23]



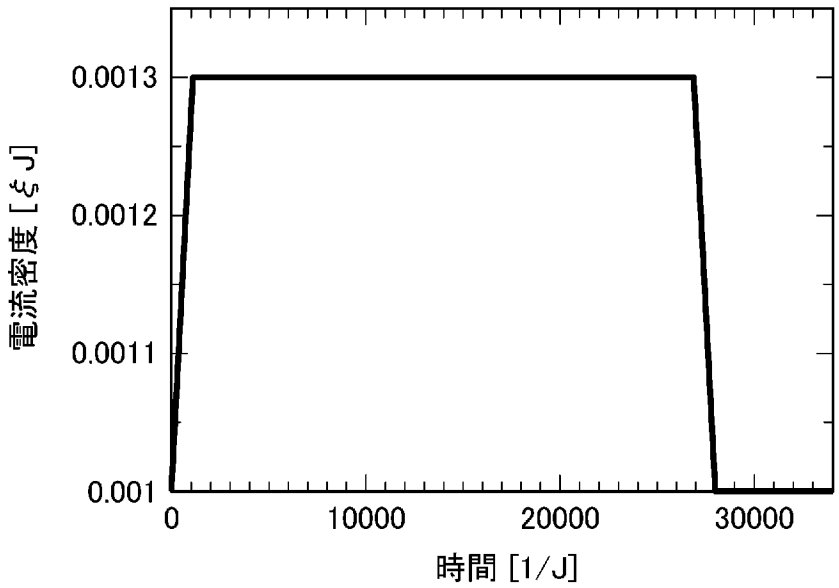
[図24]



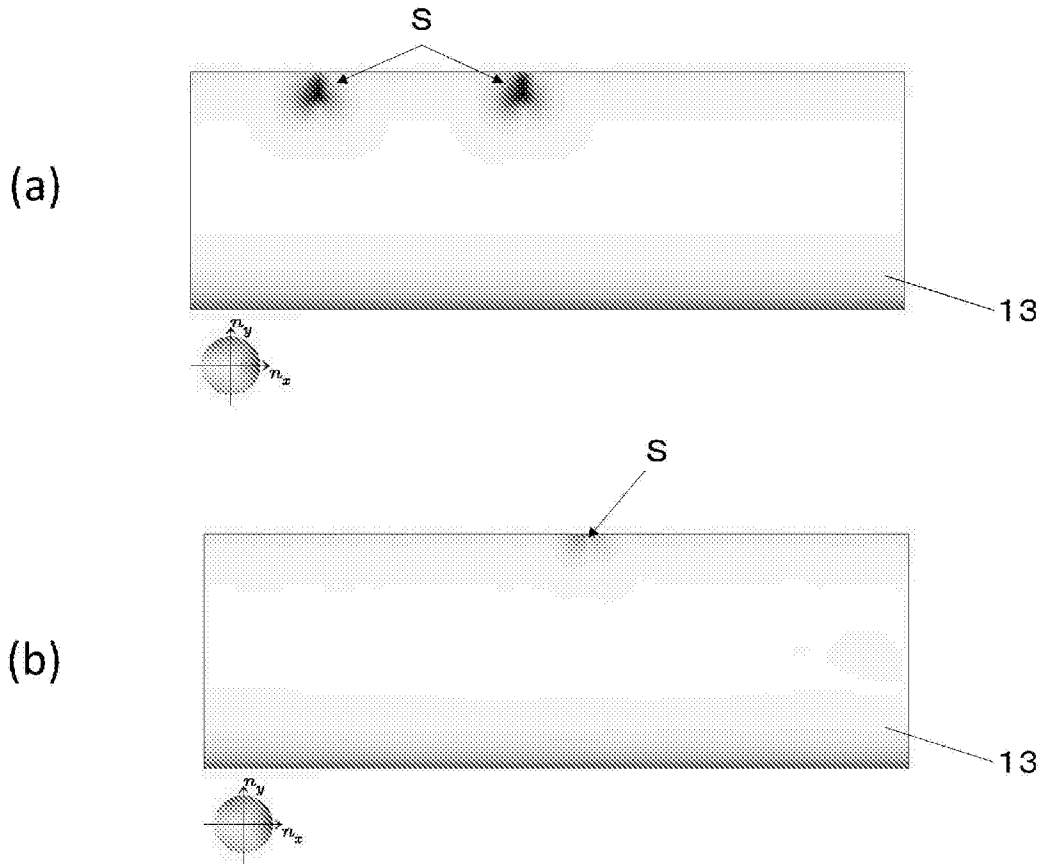
[図25]



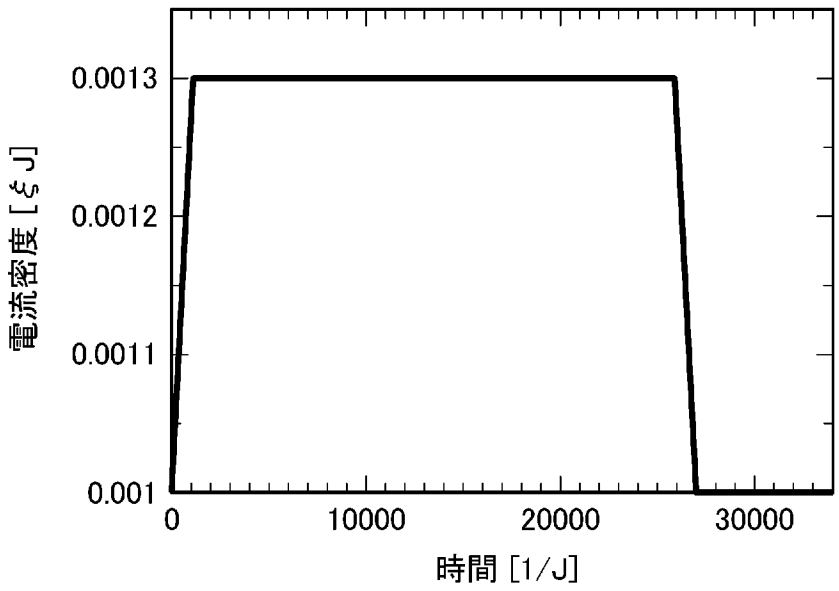
[図26]



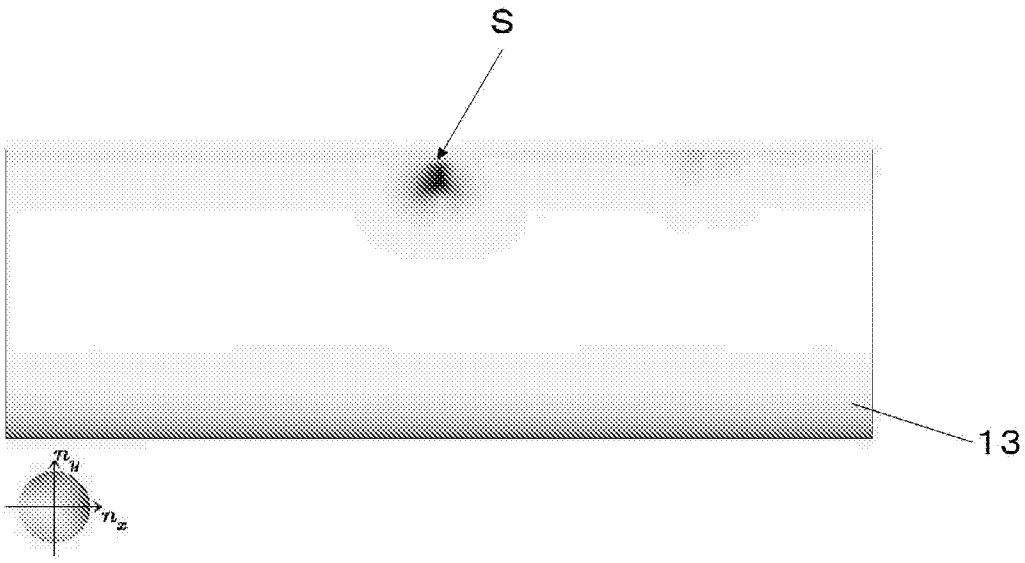
[図27]


(a)
S
13
(b)
S
13

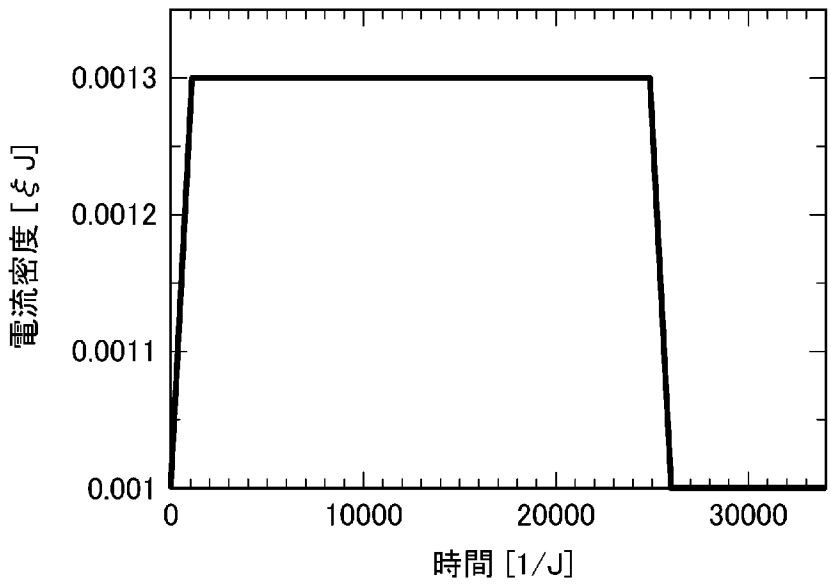
[図28]


0.0013
0.0012
0.0011
0.001
電流密度 [ξJ]
0
10000
20000
30000
時間 [1/J]

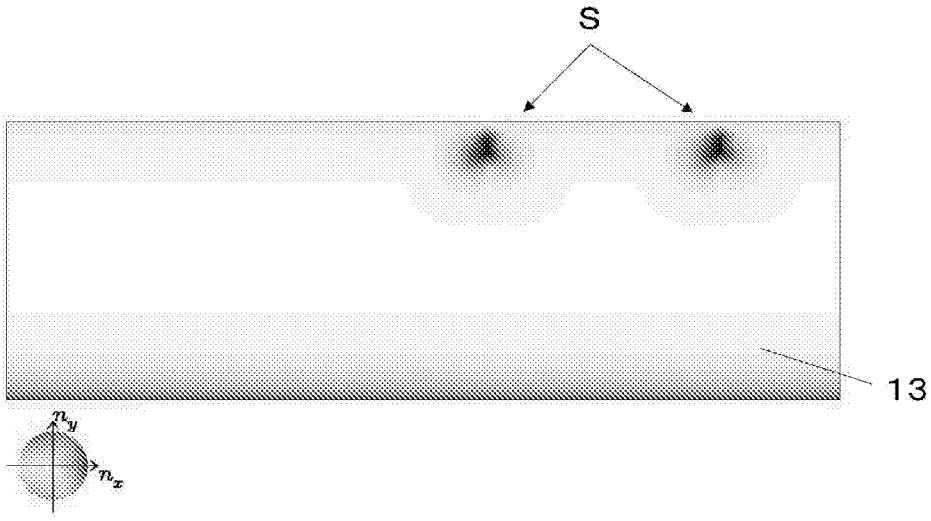
[図29]


S
13
n_y
n_x

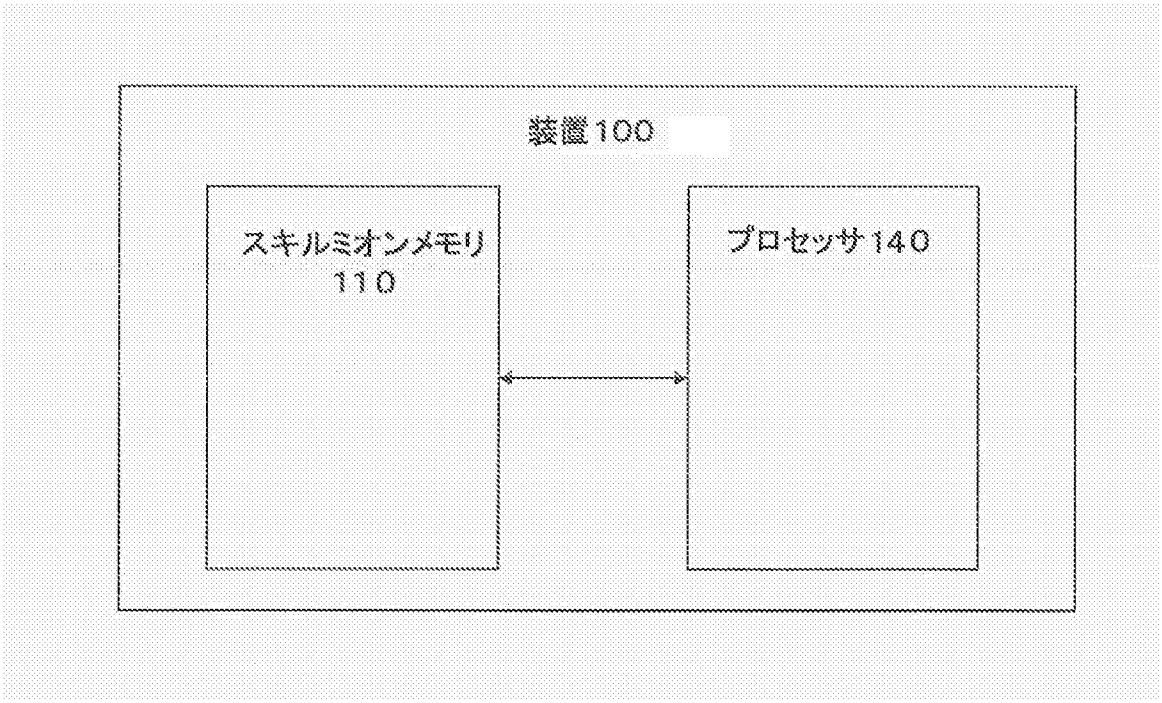
[図30]


0.0013
0.0012
0.0011
0.001
電流密度 [ξJ]
0
10000
20000
30000
時間 [1/J]

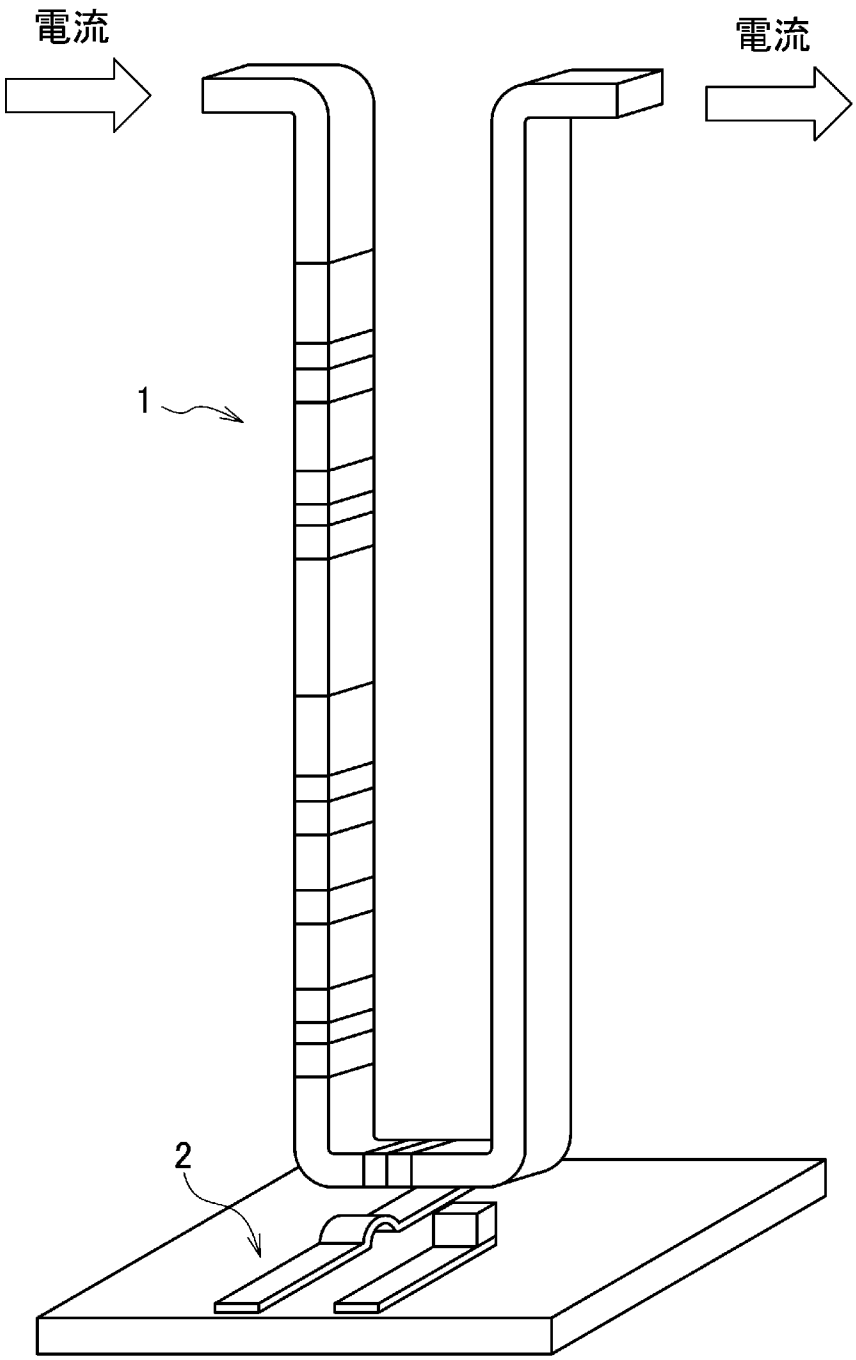
[図31]



[図32]



[図33]



INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.
PCT/JP2015/057001

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER
H01L29/82(2006.01)i, *H01L21/8246*(2006.01)i, *H01L27/105*(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)
H01L29/82, H01L21/8246, H01L27/105

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	1996-2015
Kokai Jitsuyo Shinan Koho	1971-2015	Toroku Jitsuyo Shinan Koho	1994-2015

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.
X A	Junichi IWASAKI et al., Current-induced skyrmion dynamics in constricted geometries, nature nanotechnology, Vol.8 No.10, 2013.11.07, p.742-747	1,4,7,18-22, 24-39 2,3,5,6, 8-17,23
A	IWASAKI et al., "Electric-current-induced skyrmion dynamics in constricted geometries", Abstracts of the Meeting of the Physical Society of Japan, vol.68, no.2, 26 August 2013 (26.08.2013), page 417	1-39
A	X.Z.Yu et al., Biskyrmion states and their current-driven motion in a layered manganite, nature communications, 2014.01,28, p.1-7	1-39

☒ 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	Date of mailing of the international search report
18 May 2015 (18.05.15)	26 May 2015 (26.05.15)
Name and mailing address of the ISA/ Japan Patent Office 3-4-3,Kasumigaseki,Chiyoda-ku, Tokyo 100-8915,Japan	Authorized officer Telephone No.

Form PCT/ISA/210 (second sheet) (July 2009)

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.
PCT/JP2015/057001

C (Continuation). DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
A	Niklas ROMMING et al., Writing and Deleting Single Magnetic Skyrmions, SCIENCE, Vol.341, 2013.08.09, p.636-639	1-39
P,X	JP 2014-175417 A (Riken, Japan), 22 September 2014 (22.09.2014), paragraphs [0026] to [0064]; fig. 1 to 8 (Family: none)	1,4,7,18-22, 24,25

国際調査報告

国際出願番号　ＰＣＴ／ＪＰ２０１５／０５７００１

Ａ．　発明の属する分野の分類（国際特許分類（ＩＰＣ））

Int.Cl.　H01L29/82(2006.01)i, H01L21/8246(2006.01)i, H01L27/105(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（ＩＰＣ））

Int.Cl.　H01L29/82, H01L21/8246, H01L27/105

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	１９２２－１９９６年
日本国公開実用新案公報	１９７１－２０１５年
日本国実用新案登録公報	１９９６－２０１５年
日本国登録実用新案公報	１９９４－２０１５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
X	Junichi IWASAKI、外２名, Current-induced skyrmion dynamics in constricted geometries, nature nanotechnology,	1,4,7,18-22, 24-39
A	Vol.8　No.10, 2013.11.07, p.742-747	2,3,5,6,8-17, 23
A	岩崎、外２名，制限されたサンプル形状におけるスキルミオンの電流駆動ダイナミクス，日本物理学会講演概要集, 第68巻第2号，2013.08.26，p.417	1-39

☑　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	国際調査報告の発送日
１８．０５．２０１５	２６．０５．２０１５

国際調査機関の名称及びあて先	特許庁審査官（権限のある職員）	
日本国特許庁（ＩＳＡ／ＪＰ） 郵便番号１００－８９１５ 東京都千代田区霞が関三丁目４番３号	小山　満	５Ｏ　９４５８
	電話番号　０３－３５８１－１１０１　内線　３５５９	

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	X.Z.Yu、外７名, Biskyrmion states and their current-driven motion in a layered manganite, nature communications, 2014.01,28, p.1-7	1-39
A	Niklas ROMMING、外７名, Writing and Deleting Single Magnetic Skyrmions, SCIENCE, Vol.341, 2013.08.09, p.636-639	1-39
P,X	JP 2014-175417 A（独立行政法人理化学研究所）2014.09.22, 段落0026-0064, 第1-8図（ファミリーなし）	1,4,7,18-22, 24,25