(19)日本国特許庁(JP)　(12)特　許　公　報(B2)　(11)特許番号

特許第5177487号
(P5177487)

(45)発行日　平成25年4月3日(2013.4.3)　(24)登録日　平成25年1月18日(2013.1.18)

(51)Int.Cl.		F I		
G11C 11/15	(2006.01)	G11C	11/15	140
H01L 21/8246	(2006.01)	H01L	27/10	447
H01L 27/105	(2006.01)	G11C	11/15	110
G11C 11/067	(2006.01)	G11C	11/15	100
		G11C	11/067	

請求項の数 6　(全 10 頁)

(21)出願番号　特願2007-241748(P2007-241748)
(22)出願日　平成19年9月19日(2007.9.19)
(65)公開番号　特開2009-76119(P2009-76119A)
(43)公開日　平成21年4月9日(2009.4.9)
審査請求日　平成22年9月3日(2010.9.3)

(73)特許権者　504133110
国立大学法人電気通信大学
東京都調布市調布ケ丘一丁目５番地１
(74)代理人　110001069
特許業務法人京都国際特許事務所
(74)代理人　100095670
弁理士　小林　良平
(72)発明者　小野　輝男
京都府宇治市五ヶ庄　国立大学法人京都大学化学研究所内
(72)発明者　葛西　伸哉
京都府宇治市五ヶ庄　国立大学法人京都大学化学研究所内

最終頁に続く

(54)【発明の名称】強磁性ドットのコア反転方法、コアの向き制御方法、強磁性ドットのコア利用素子

(57)【特許請求の範囲】
【請求項１】
円盤形状の強磁性体から成り磁気構造が磁気渦構造を取る強磁性ドットのコアの向きを反転させる方法であって、
強磁性ドットの径方向に該強磁性ドットの共振周波数の周期の半分と略等しい長さのパルス電流を複数回供給することにより、強磁性ドットのコアの向きを反転させる
ことを特徴とする強磁性ドットのコア反転方法。
【請求項２】
前記各パルス電流を、前記強磁性ドットの径方向の両端部から交互に供給する
ことを特徴とする請求項１に記載のコア反転方法。
【請求項３】
円盤形状の強磁性体から成り磁気構造が磁気渦構造を取る強磁性ドットと、
該強磁性ドットの径方向に、該強磁性ドットの共振周波数の周期の半分と略等しい長さのパルス電流を複数回供給するパルス電流供給部と、
を備えることを特徴とする強磁性ドットのコア利用素子。
【請求項４】
前記強磁性ドットが、平面形状が直径50μm以下の略円形であって厚みが1μm以下である円盤形状であることを特徴とする請求項３に記載の強磁性ドットのコア利用素子。
【請求項５】
コアの向きを読み出す読出し部を更に備えたことを特徴とする請求項３又は４に記載の

強磁性ドットのコア利用素子。
【請求項６】
請求項５に記載の強磁性ドットのコア利用素子を複数並べたことを特徴とする情報記録素子。
【発明の詳細な説明】
【技術分野】
【０００１】
本発明は、円盤状強磁性体（強磁性ドット）における磁化（磁気モーメント）立ち上がり箇所（コア）の向きの制御が可能な素子およびその制御方法に関する。
【背景技術】
【０００２】
強磁性体を直径数μm、厚み数十nm程度の円盤形状とすると（本発明ではこのような構造の強磁性体を「強磁性ドット」と称する）、磁気構造が円盤の周に沿って渦を巻く磁気渦構造となることが知られている。そして、この強磁性ドットの中心付近では、径が10nm程度の微小領域において磁化が円盤の面に対して垂直方向に立ち上がる構造を取る（例えば、非特許文献１参照）。本発明ではこの磁化が垂直方向に立ち上がった箇所を「コア」と称する。
【０００３】
このような強磁性ドットに対して、ドットの径方向に磁場を印加するとコアの位置が変化し、その磁場の印加を止めるとコアはスパイラル運動をしながら強磁性ドットの中心に戻る動作をすることがこれまでの研究によりわかっている。また、印加する磁場をコアの回転周期と共振するような交流磁場にすると、コアは強磁性ドットの面内において、一定の径で回転運動を行うことが知られている（例えば、非特許文献２参照）。
【０００４】
さらに、コアの回転運動は磁場のみならず電流によっても制御可能であることが明らかになっている。非特許文献３では、強磁性ドットの共振周波数と略等しい周波数の交流電流をドットの径方向に供給することにより、コアをドット上で回転させることが可能である旨が報告されている。磁場ではなく電流によってコアの回転運動を制御できることにより、強磁性ドットのコアを利用した素子を作製するにあたり、その構成が簡略化される等のメリットがある。
【０００５】
本願発明者らが共著者として発表した非特許文献４では、強磁性ドットに交流電流を供給した結果、コアの速度が一定の閾値に達すると、コアの向きが強磁性ドットの面に対して反転するという現象が報告されている。コアの向きはTMR素子等を用いて読み出すことが可能であるため、このコアの向きを二値情報として扱うことにより、MRAMなどの情報記憶デバイスへの応用が可能となる。
また、非特許文献５では、強磁性ドットにパルス電流を供給することによっても、コアの向きを反転させることができることが報告されている。このように、コアの向きを交流電流ではなくパルス電流によって反転できることには、情報書き込み時間（つまりコアの反転に要する時間）が短縮され、また、交流電流が不要であるために制御回路の簡略化を図ることができるという利点がある。
【０００６】
ところで、強磁性ドットのコアの向きを利用して情報記憶を行おうとする場合等には、強磁性ドットにおけるコアの向きを確実に制御する技術が重要となる。
【０００７】
本願発明者らは本願に先立って行った国際出願（国際出願番号：PCT/JP2007/000154号）において、非特許文献４で報告された内容に加えて、強磁性ドットのコアの向きを制御する方法に関する提案を行っている。上記国際出願の明細書では、強磁性ドットに単に電流を供給することに伴う問題として、
(1)電流を供給し続けるとコアの向きが連続的に反転を繰り返してしまう

(2)コアの向きを決めることができない
という二点を挙げている。
【０００８】
そして、(1)の問題を解決するために、電流供給部から供給する電流の供給時間を適切に設定することを提案し、(2)の問題を解決するために、コアの向きを読み出す読出し部を設けておき、この読み出し部を用いてコアの向きを反転させる前の段階で現在のコアの向きを調べ、反転が必要な場合にのみ電流供給部から所定の強さ及び長さの電流を流すことを提案している。
【０００９】
また、上記国際出願の明細書では、(1)及び(2)の問題を同時に解決することを目的として、位相のみがπ/2だけずれた交流電流を互いに直交した方向に供給することによって強磁性ドットの面内に回転電流を流すという方法を開示している。
【００１０】
この方法では、強磁性ドットの径方向において互いに略直交するように第一電流供給部と第二電流供給部を接続し、第一電流供給部と第二電流供給部からは位相のみがπ/2だけずれた交流電流$J_1(=J_0\sin(\omega t))$及び$J_2(=-J_0\cos(\omega t))$を供給する。交流電流J_1及びJ_2の周波数は強磁性ドットの共振周波数と略等しくしておく。これにより、強磁性ドットの面内において回転する電流が流れる。
【００１１】
強磁性ドットの特性として、強磁性ドット面内における電流の回転の向き（時計回り又は反時計回り）と、コアの向き（強磁性ドットの面のどちら側にコアが存在しているか）との組合せにより、コアは回転するか又は殆ど回転しないかの何れかの動作を行う。コアが存在している側の面において回転電流が反時計回りに供給されており、且つその電流の周波数が共振周波数（または共振周波数に近い周波数）であるときにのみ、コアは電流と同一の方向に回転する。逆の組合せの場合にはコアは殆ど回転しない。
そして、コアの回転速度がある閾値以上となったときに、コアが反対の面へと反転する。反転して反対側の面へ移動したコアは現在の電流によっては回転を行わない。すなわちコアの向きが固定される。
【００１２】
以上の方法で以て、電流の回転方向によってコアの向きを指定することが可能である。例えば、"1"を記録する場合には第一電流供給部と第二電流供給部とから供給する電流が強磁性ドットにおいて反時計回りとなるようにし（例えば電流:$J_1=J_0\sin(\omega t)$、$J_2=J_0\cos(\omega t)$とする）、"0"を記録する場合には、第一電流供給部と第二電流供給部とから供給する電流が強磁性ドットにおいて時計回りとなるように（例えば電流:$J_1=J_0\sin(\omega t)$、$J_2=-J_0\cos(\omega t)$とする）すればよい。
【００１３】
【非特許文献１】Shinjo, T., et al. Magnetic vortex core observation in circular dots of permalloy. Science 289, 930-932 (2000)
【非特許文献２】Guslienko, K. Yu, et al. Eigenfrequencies of vortex state excitations in magnetic submicron-size disks. J. Appl. Phys. 91, 8037-8039 (2002)
【非特許文献３】Kasai, S. et al. Current-Driven Resonant Excitation of Magnetic Vortices. Phys. Rev. Lett. 96, 107204 (2006)
【非特許文献４】Yamada, K., et al. Electrical switching of vortex core in a magnetic disk. Nature Materials 6, 269-273 (2007)
【非特許文献５】Y. Liu et al. Current-induced magnetic vortex core switching in a Parmalloy nanodisk. arXiv.org, Submitted on 2 Feb 2007
【非特許文献６】Guslienko,K.Yu, et al. Eigenfrequencies of vortex state excitations in magnetic submicron-size disks. J. Appl. Phys. 91, 8037-8039 (2002)
【発明の開示】
【発明が解決しようとする課題】

【００１４】
強磁性ドットのコアの向きを制御する方法として、上記のいずれの従来技術を採用しても構わないが、これらには現在、次のような問題がある。
1)パルス電流によってコアの向きを反転させるためには、高い電流密度が要求される。そのため、強磁性ドットが破損してしまうおそれがある。
2)上記国際出願において開示されている構成の実現が技術的に困難である。
【００１５】
このような事情に鑑み、本願発明者らは強磁性ドットのコアの向きを適切且つ簡便に反転させる、または制御する手法に関する研究を更に進め、本発明に至った。
【課題を解決するための手段】
【００１６】
以上のようにして成された本発明に係る強磁性ドットのコア反転方法は、円盤形状の強磁性体から成り磁気構造が磁気渦構造を取る強磁性ドットのコアの向きを反転させる方法であって、
強磁性ドットの径方向に該強磁性ドットの共振周波数の周期の半分と略等しい長さのパルス電流を複数回供給することにより、強磁性ドットのコアの向きを反転させることを特徴としている。
【００１７】
また、上記コア反転方法においては、好ましくは前記各パルス電流を前記強磁性ドットの径方向の両端部から交互に供給するとよい。
【００１８】
また、本発明に係る強磁性ドットのコアの向きの制御方法は、円盤形状の強磁性体から成り磁気構造が磁気渦構造を取る強磁性ドットにおけるコアの向きを制御する方法であって、
該強磁性ドットの周囲において該周囲を略三等分する各位置に、第一電流供給部、第二電流供給部、及び接地部を設けておき、
該第一電流供給部より該強磁性ドットの共振周波数と略等しい周波数の交流電流を供給するとともに、
該第二電流供給部より該強磁性ドットの共振周波数と略等しい周波数を有し、該第一電流供給部から供給される交流電流に対して位相が120°又は-120°ずれた交流電流を供給することにより、該位相のずれに応じた方向にコアの向きを決定することを特徴とする。
【００１９】
そして、本発明に係る強磁性ドットのコア利用素子は、
円盤形状の強磁性体から成り磁気構造が磁気渦構造を取る強磁性ドットと、
該強磁性ドットの径方向に、該強磁性ドットの共振周波数の周期の半分と略等しい長さのパルス電流を複数回供給するパルス電流供給部と、を備えることを特徴とすることができる。
【００２０】
また、本発明に係る強磁性ドットのコア利用素子は、
円盤形状の強磁性体から成り磁気構造が磁気渦構造を取る強磁性ドットと、
該強磁性ドットの周囲を三等分する各位置に、
該強磁性ドットの共振周波数と略等しい周波数の交流電流を供給する第一電流供給部と、
該強磁性ドットの共振周波数と等しい周波数を有し、該第一電流供給部から供給される交流電流に対して位相が120°又は-120°ずれた交流電流を供給する第二電流供給部と、
接地部と、
を備えることを特徴とすることができる。
【発明の効果】
【００２１】

本発明に係る強磁性ドットのコア反転方法によれば、コアの向きをパルス電流によって反転させることが可能であるから、交流電流によってコアの向きを反転させる場合と比較して、短い時間でコアの向きを反転させることができ、さらに素子の構成も簡略化できる。加えて、複数回のパルス電流を供給することにより、一度だけパルスを供給する場合に対してコアの反転に必要な電流密度の大きさを下げることができるから、強磁性ドットや強磁性ドットを利用した素子の破損を防止することができる。

【００２２】

また、本発明に係る強磁性ドットのコアの向きの制御方法によれば、簡単な方法で、また、簡便な三端子構造を用いて、コアの現在の向きを事前に読み出す必要なくコアの向きを決定することができる。よって、製造コストの低減や素子の簡略化が達成される。更に、強磁性ドットの面内で回転電流を確実に発生させることができるようになるから、コアの向きの制御を高い信頼性を以て行うことができる。

【発明を実施するための最良の形態】

【００２３】

以下、本発明に係る強磁性ドットのコア反転方法について図面を参照しつつ説明する。まず、本発明において使用できる強磁性ドットの特性について説明する。

強磁性ドットの材料は例えばパーマロイが好適であるが、これに限られるものではなく、強磁性体であればいかなるものでもよい。

強磁性ドットのサイズは、通常状態（外部磁場の印加や電流の供給が行われていない状態）において、磁気構造がドットの面において渦を巻く磁気渦構造を取りさえすればよいが、実際には強磁性ドットの径や厚みが大きくなると磁気渦構造を取りにくくなる。そこで、強磁性ドットは、平面形状が直径50μm以下の略円形であって、厚みは1μm以下とするのが好適である。

【００２４】

いま述べたように強磁性ドットは平面形状が略円形を有していることが好ましいものの、その平面形状は磁気渦構造を取り得る限り円形に限定されることはなく、楕円形状やその他の形状であっても構わない。また、円盤の端部に多少の凹凸が存在していても構わない。強磁性ドットの形状（厚み及び径）は、その形状によってコアの回転半径や共振周波数が変化するため、目的に合わせて設計すればよい。なお、強磁性ドットの共振周波数は、強磁性ドットの厚みと半径の比によって決まることが従来より知られている（例えば非特許文献６参照）から、容易に求めることができる。

【００２５】

（コア反転方法）

本発明に係る強磁性ドットのコア反転方法においては、模式図である図１に示すように、強磁性ドットの径方向に、強磁性ドットの共振周波数の周期の半分と略等しい長さのパルス電流を複数回供給する。このとき、各パルス電流は径方向の両端部から交互に供給する。パルス電流は正弦波パルスであっても良いし、矩形パルスであっても良い。図２に、パルス電流として正弦波パルスを用いる場合におけるパルス数（1～4パルス）に応じた電流波形の例を示す。

【００２６】

先に説明したように、強磁性ドットのコアは、その移動速度がある一定の閾値に達した時点で反転する。強磁性ドットに供給するパルスの電流密度を高くすればするほどコアに大きな加速度を与えることができ、結果としてコアの反転が短時間で生じる。一方、電流密度が高いと、強磁性ドットの破損を招きやすい。そこで、パルス電流を強磁性ドットの共振周波数と略等しい周波数で以て連続的に供給することにより、単一のパルス電流ではコアが反転する程度にまでコアの移動速度を高めることはできないとしても、各パルスが供給される都度、コアの移動速度を加速させることができる。結果として、パルス電流の電流密度が比較的低い場合であっても、コアを反転させる事が可能となる。

【００２７】

図３に、直径240nm、高さ80nm、材料定数としてパーマロイを用いた強磁性ドットの径

方向に、パルス電流を供給した場合におけるコアの向きを示す。ここでは、パルス電流長は0.01～1.60nsの範囲で変化させており、パルス電流の供給回数は1～10回の範囲で変化させた。図３の各グラフでは、黒の領域で最終的にコアの反転が生じることが表されている。

なお、この強磁性ドットの共振周波数は1.54GHzであり、共振周波数の周期は1/1.54GHz=0.64nsとなる。よってコアの反転が最小の電流で生じるのはパルス電流長が周期の半分の長さである0.32ns程度の時となる。

【００２８】

図４のグラフに、図３に示す結果に基づき、コアの反転を一度だけ生じさせるのに必要なパルス電流の電流密度とパルス電流の供給回数との関係を示す。図４からも明らかなように、パルス電流の供給回数が増えるにつれて、コアを一度反転させるのに必要な電流密度が小さくなってゆくことがわかる。具体的には、１パルスでコアが一回反転するには$4X10^{12}A/m^2$程度の電流密度が必要であるのに対し、2パルスでは$2.4X10^{12}A/m^2$程度でよく、10パルスでは$0.6X10^{12}A/m^2$程度でよい。

【００２９】

なお、コアを反転させるのに必要となるパルス電流の特性は、強磁性ドットの形状や材料などに応じて変化する。図５に、(i)強磁性ドットのサイズが直径500nm、高さ80nmの円盤である場合と、(ii)直径1000nm、高さ80nmの円盤である場合のそれぞれにおいて、t_p(ナノ秒)の正弦波パルスを1回入力し、5ns間電流を切った後のコアの向きを表す。これによれば、径が大きなドットの方がコアの反転に必要な電流密度が若干小さく、また、径が小さなドットの方が高速に（短時間で）反転するということがわかる。

【００３０】

（コアの向き制御方法）

次に、本発明に係る強磁性ドットのコアの向きの制御方法の例について説明する。図６は、本発明に係る強磁性ドットのコアの向き制御素子の構成例を示す模式図である。強磁性ドットの周囲を略三等分する各位置に、第一電力供給部に接続された端子Ａ、第二電力供給部に接続された端子Ｂ、及び接地された接地部である端子Ｃを設けておく。第一電力供給部からはこの強磁性ドットの共振周波数と略等しい周波数の交流電流（これを第一電流と呼ぶ）を供給する。同時に、第二電流供給部からは、この強磁性ドットの共振周波数と略等しい周波数の交流電流であって、位相が第一電流に対して120°又は-120°ずれた交流電流（これを第二電流と呼ぶ）を供給する。通常は、第一電流と第二電流の特性は、位相が互いにずれている点以外は同一とするのがよい。

【００３１】

図７に、端子Ａを介して強磁性ドットに供給される第一電流、及び端子Ｂを介して供給される第二電流の波形の例を示す。図７(i)は、第一電流の位相に対して第二電流の位相が120°ずれている場合、図７(ii)は第一電流の位相に対して第二電流の位相が-120°ずれている場合の両者の波形図である。位相がこのようにずれた第一電流および第二電流を供給することにより、強磁性ドットの面内に回転電流が発生するが、位相のずれが+120°なのか、それとも-120°なのかによって、回転電流の向き（時計回り／反時計回り）を制御することができる。

【００３２】

強磁性ドット面内における電流の回転の向き（電流の向きがどちら方向に回転していくか）と、コアの向き（強磁性ドットの面のどちら側にコアが存在しているか）との組合せにより、コアが回転するか、または殆ど回転しないかが決定される。図８に、電流の回転の向きとコアの向きによるコアの回転条件を模式的に示す。コアが存在している側の面において回転電流が反時計回りに供給されているとき、且つ、その電流が共鳴周波数（または共振周波数に近い周波数）であるときにのみ、コアは電流と同一の方向に回転する。逆の組合せの場合にはコアは殆ど回転しない。

そして、コアの回転速度がある閾値以上となったときに、コアは反対の面へと反転する。反転して反対側の面へ移動したコアは現在の電流によっては回転を行わない。すなわち

コアの向きが固定される。

【００３３】

以上、本発明に係る強磁性ドットのコア反転方法、及び強磁性ドットのコアの向き制御方法について説明を行ったが、これらは例に過ぎないことは明らかであって、本発明の精神内において適宜に変形や改良を行っても構わない。

【産業上の利用可能性】

【００３４】

本発明に係る強磁性ドットのコア利用素子では、TMR素子などから成る読み出し部を設けることにより、コアがどちらを向いているかを知ることができる。従って、この向きを二値情報として扱い、複数の素子を並べることでMRAM等の情報記録素子として応用することができる。

【図面の簡単な説明】

【００３５】

【図１】本発明に係る強磁性ドットのコア反転方法の概念を示す模式図。

【図２】パルス電流として正弦波パルスを用いる場合におけるパルス数（1～4パルス）に応じた電流波形の例。

【図３】強磁性ドットの径方向に、パルス電流長を0.01～1.60nsの範囲で変化させ、パルス電流を1～10回の各回数供給した場合のコアの向きを示す図。

【図４】コアの反転を一度だけ生じさせるのに必要なパルス電流の電流密度とパルス電流の供給回数との関係を示すグラフ。

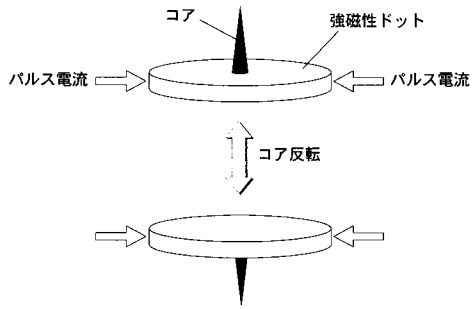
【図５】強磁性ドットのサイズが(i)直径500nm、高さ80nm、(ii)直径1000nm、高さ80nmの円盤である場合に、t_p(ナノ秒)の正弦波パルスを1回入力し、5ns間電流を切った後のコアの向きを示す図。

【図６】本発明に係る強磁性ドットのコアの向き制御素子の構成例を示す模式図。

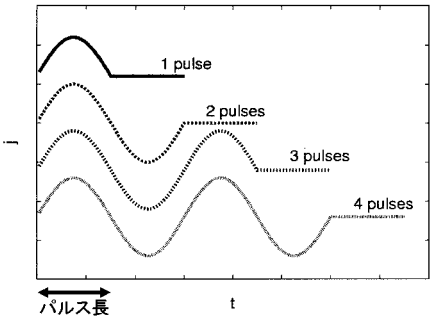
【図７】第一電流の位相に対して第二電流の位相が(i)120°、(ii)-120°ずれている場合の両者の波形図。

【図８】回転電流の向きとコアの向きによるコアの回転条件を模式的に示す図。

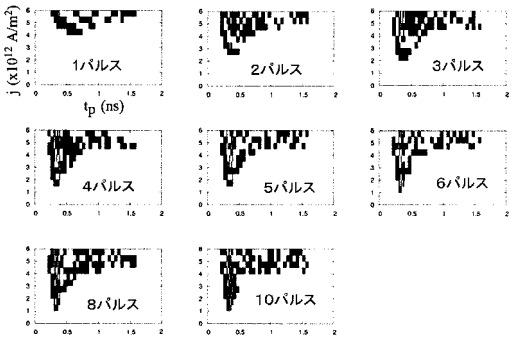
【図１】



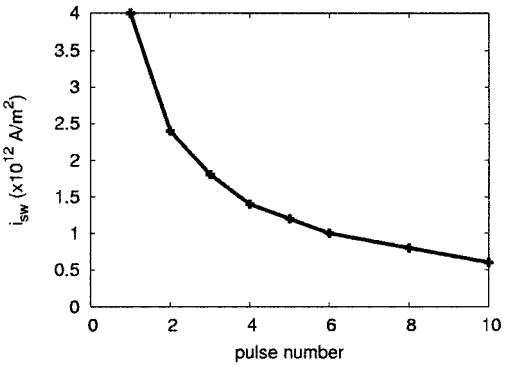
【図２】



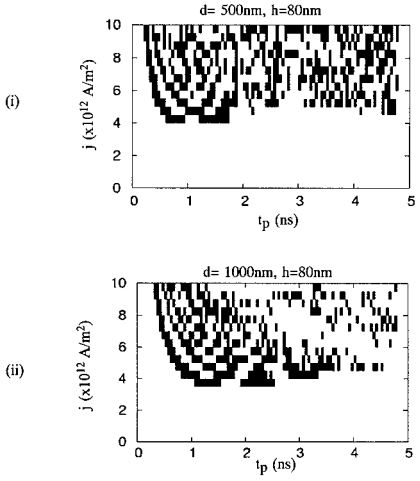
【図３】



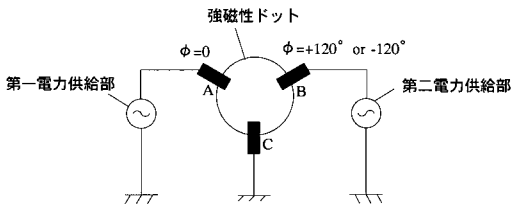
【図４】



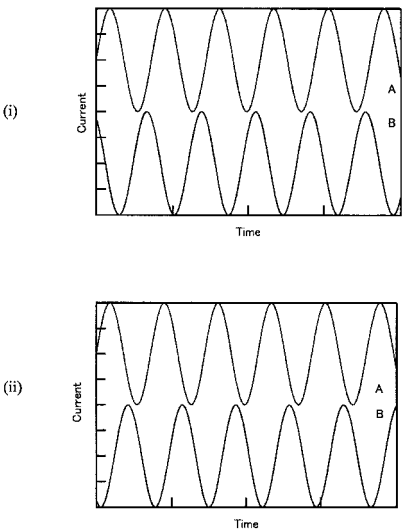
【図５】



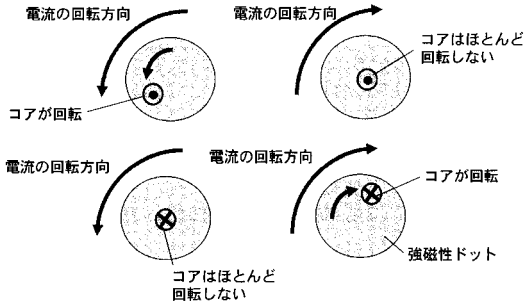
【図６】



【図７】



【図８】


電流の回転方向
コアが回転
電流の回転方向
コアはほとんど
回転しない
電流の回転方向
コアはほとんど
回転しない
電流の回転方向
コアが回転
強磁性ドット

フロントページの続き

(72)発明者　仲谷　栄伸
東京都調布市調布ヶ丘１丁目５番地１　国立大学法人電気通信大学内

審査官　後藤　彰

(56)参考文献　特許第４８０３６８１（ＪＰ，Ｂ２）
特開２００３－２７３３３１（ＪＰ，Ａ）

(58)調査した分野(Int.Cl.，ＤＢ名)
Ｇ１１Ｃ　１１／１５
Ｇ１１Ｃ　１１／０６７
Ｈ０１Ｌ　２１／８２４６
Ｈ０１Ｌ　２７／１０５