

磁気抵抗膜を用いたマイクロ波発振器を高性能化 —スピントルク発振器の発振周波数安定性が大幅に向上—

平成 26 年 1 月 8 日

独立行政法人 産業技術総合研究所
キヤノンアネルバ株式会社
国立大学法人 大阪大学

■ ポイント ■

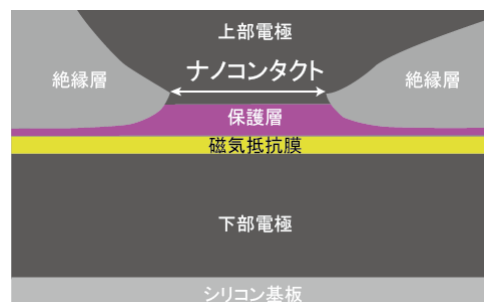
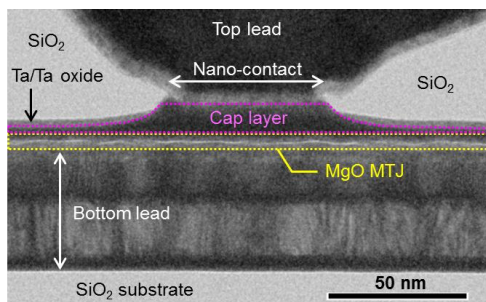
- ・ 磁気トンネル接合膜を用いたナノコンタクト型スピントルク発振素子を開発
- ・ 発振出力の高出力化と安定化を実現し、従来の 10 倍近い安定性を達成
- ・ LSI 中に組み込むことが可能なナノスケール発振器など、幅広い分野での応用に期待

■ 概要 ■

独立行政法人 産業技術総合研究所【理事長 中鉢 良治】（以下「産総研」という）ナノスピントロニクス研究センター 湯浅 新治 研究センター長、金属スピントロニクス研究チーム 久保田 均 研究チーム長、キヤノンアネルバ株式会社【代表取締役社長 酒井 純朗】（以下「キヤノンアネルバ」という）前原 大樹 研究員、国立大学法人 大阪大学（以下「大阪大学」という）基礎工学研究科 鈴木 義茂 教授は共同で、高出力と高い振動安定性（高 Q 値）をあわせもつナノコンタクト型のスピントルク発振素子を開発した。

スピントルク発振素子は磁気抵抗膜を用いた電子デバイスで、磁気抵抗膜を構成する強磁性体層中の磁石（スピン）の運動（歳差運動）を電気信号に変換して外部へ出力できる。今回、磁気抵抗膜として磁気トンネル接合膜を用い、その局所領域（約 100 nm 以下）に電流を注入するナノコンタクト型のスピントルク発振素子を使用した。スピンの向きを磁気トンネル接合膜の膜面に垂直な方向に傾けることで、これまで困難であった歳差運動の安定化を実現し、3000 以上の高い Q 値を得た。この Q 値は、従来の磁気トンネル接合膜を用いたスピントルク発振素子に比べて 10 倍近く大きな値である。今回の成果は、スピントルク発振素子の実用化を加速し、LSI 中に組み込むことが可能なナノスケール発振器や超高感度・高分解能磁界センサー、次世代ワイヤレス通信用マイクロ波発振器などへの応用が期待される。この研究成果は 2014 年 1 月 10 日に「*Applied Physics Express*」のオンライン速報版で公開される。

_____ は【用語の説明】参照



ナノコンタクト型スピントルク発振素子の断面構造

左図：電子顕微鏡写真、右図：模式図。

■ 開発の社会的背景 ■

直流から交流を作り出せる発振器は、エレクトロニクスの根幹を支える重要な電子デバイスである。携帯電話やタブレット、ノートパソコンなどの携帯型電子機器は、直流電源である電池によって駆動するが、内部の発振器によって高周波信号を生成して高速な演算や無線通信を行っている。近年では携帯型電子機器の高速化、無線信号の高周波化などが一層進んだことから、安価、小型、低消費電力のマイクロ波発振器の重要性が高まっている。

しかし、水晶発振子などを用いた従来の発振器は、振動子がミリメートルサイズと大きく、さらに周波数を高める回路が必要で、小型化が困難であった。これに対してスピントルク発振素子は、マイクロ波帯の周波数を直接発振するため 100 nm 以下の小型発振器が実現可能であり、動作電圧・電流が 0.5 V・10 mA 以下と低消費電力で動作する。LSI 中に組み込むことが可能なナノスケール発振器や超高感度・高分解能磁界センサー、次世代ワイヤレス通信用マイクロ波発振器など幅広い分野での応用が期待されている。しかし、これまでスピントルク発振素子では高出力と高い Q 値の両立が難しく課題となっていた。

■ 研究の経緯 ■

スピントロニクス分野には応用上二つの重要な物理現象がある。一つはスピンの配置によって抵抗値が変化する磁気抵抗効果、もう一つは電流によってスピンの方向をコントロールできるスピントルクである。スピントルク発振素子では、この二つをうまく利用して高周波信号を生成するが、発振出力の大きさは磁気抵抗効果の大きさによって決まる。そこで、産総研、キヤノンアネルバ、大阪大学は共同で、巨大な磁気抵抗効果を示す磁気トンネル接合膜のスピントルク発振素子への応用にいち早く取り組み、世界で最も大きな発振出力のスピントルク発振素子を開発している。また、発振周波数を安定化するために、磁気トンネル接合膜に適したナノコンタクト型スピントルク発振素子の開発も行ってきた。これまで、磁気トンネル接合膜を用いたスピントルク発振素子としては、最高レベルの Q 値 (=350) を実現していたが、磁気トンネル接合膜や素子構造の工夫だけでは 1000 を超えるような Q 値を得ることは難しく、実用化に向けて 1000 を超える Q 値を達成することが求められていた。

なお、本研究の一部は科学研究費補助金基盤研究 S「高周波スピントロニクス」（研究代表者：鈴木 義茂）の一環として行われた。

■ 研究の内容 ■

高い Q 値を得るにはスピンの歳差運動を安定させる必要がある。磁気トンネル接合膜は数 nm の磁性薄膜を基本に形成されているが、スピンの方向が膜面内を向いて歳差運動をしていると磁性薄膜の形状磁気異方性の影響によりスピンの軌道が歪んでしまう（図 1(a)）。そのため、Q 値は比較的小さくなり数百程度が限界になる。今回、外部磁界を用いてスピンの方向を膜面に垂直な方向に向けて歳差運動させた。これにより、形状磁気異方性の影響が低減され、スピンは歪みの小さい軌道を描く。図 1(b)にスピンの膜面に垂直な方向を向いている場合の歳差運動の軌道のシミュレーション結果を示す。このような状況を実現するには、膜面外方向の外部磁界を加えてスピンの方向を制御する必要がある。図 2 に膜面から 75° 方向の外部磁界を加え、その大きさを 0 ~ 8 kOe まで変化させた場合のスピントルク発振素子の発振スペクトルを示す。外部磁界が 6 kOe

付近を境に発振周波数が変化し、非常に鋭いピークとなるのが分かる。6 kOe という磁界はこの素子の実効的な反磁界に相当し、これよりも大きな磁界下ではスピンの膜面に垂直な方向を向く。外部磁界が 6 kOe 以下では Q 値は最大でも 100 程度であったが、6 kOe 以上になると Q 値は 1000 を大きく超え、最大で 3200 にまで達した。このように、スピンの方向を制御して異方性磁界の影響を低減することで安定な歳差運動を実現でき、これまで磁気トンネル接合膜を用いたスピントルク発振素子では得られなかった Q 値を達成した。

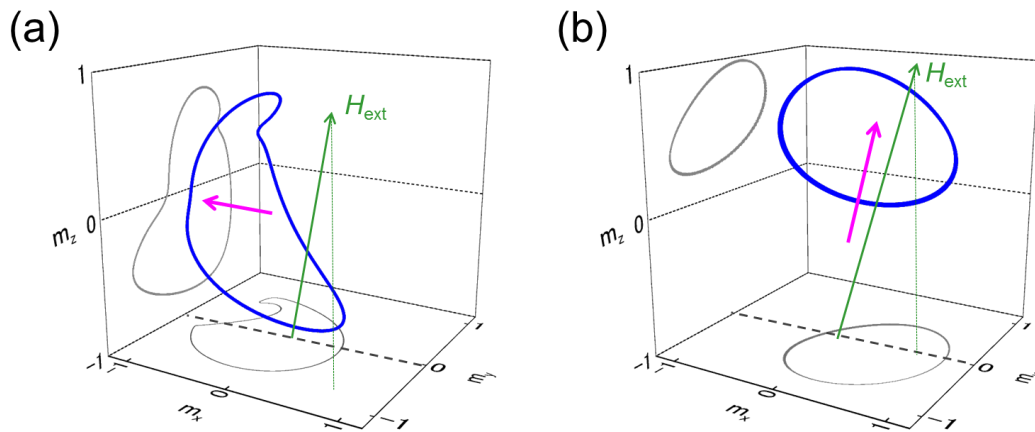


図 1 スピンの歳差運動の軌道の計算結果

膜面は xy 平面に広がっている。緑色の矢印は磁界の方向を、ピンク色の矢印は軌道運動の中心軸方向を表している。(a)では磁界が 1 kOe と弱く、軌道中心軸は面内方向にとどまっている。軌道の形状は歪んだ形をしており、不安定である。(b)は磁界を 8 kOe と十分に強くした場合で、軌道中心軸が磁界方向に近く軌道の形状も円に近い。その結果、安定した発振が得られる。

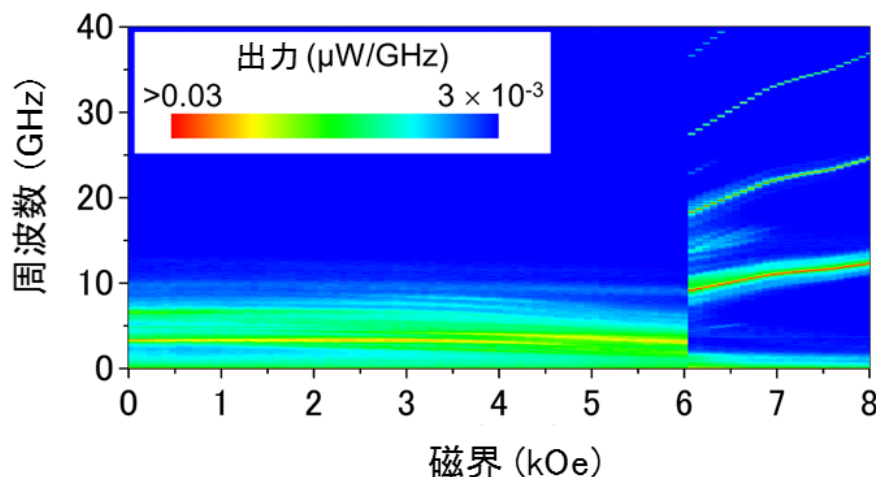


図 2 発振出力と発振周波数の外部磁界依存性

外部磁界を膜面内から 75° 方向 (図 1 (b) と同じ方向) に傾けて加え 0~8 kOe まで変化させた。赤は発振出力が大きく、青は発振出力が小さいことを示す。6 kOe 付近以上では発振出力が大きく、発振の線幅が狭く周波数の安定性が向上している。

■ 今後の予定 ■

今回は外部磁界を加えたが、今後は、薄膜材料・素子構造の工夫により外部磁界を加えない状態での発振を実現する。また、他の電子部品と組み合わせた回路作製などを行い、実用化に向けて発振器としての性能評価を実施する予定である。さらに、外部磁界の大きさによって発振周波数が変化することを利用した磁気センサーへの応用など、幅広い分野での応用展開を目指していく。

■ 本件問い合わせ先 ■

独立行政法人 産業技術総合研究所

ナノスピントロニクス研究センター 金属スピントロニクスチーム

研究チーム長 久保田 均 〒305-8568 茨城県つくば市梅園 1-1-1 中央第 2
TEL : 029-861-3949 FAX : 029-861-3432
E-mail : hit-kubota@aist.go.jp

キヤノンアネルバ株式会社 プロセス開発センター

研究員 前原 大樹 〒215-8550 神奈川県川崎市麻生区栗木 2-5-1
TEL : 044-980-5077 FAX : 044-986-4162
E-mail : maehara.hiroki@canon-anelva.co.jp

国立大学法人 大阪大学基礎工学研究科

教授 鈴木 義茂 〒560-8531 大阪府豊中市待兼山町 1-3
TEL : 06-6850-6425
E-mail : suzuki-y@mp.es.osaka-u.ac.jp

【プレス発表／取材に関する窓口】

独立行政法人 産業技術総合研究所 広報部 報道室 内藤 皓太
〒305-8568 茨城県つくば市梅園 1-1-1 中央第 2
つくば本部・情報技術共同研究棟 8F
TEL : 029-862-6216 FAX : 029-862-6212 E-mail : press-ml@aist.go.jp

【用語の説明】

◆Q 値

振動の安定性を示す無次元数。Q 値が高い程、安定した振動となる。一般的な LC 共振器では 100 程度の Q 値が得られるが、周波数が高くなると Q 値は低くなる傾向にある。また、代表的な振動子である水晶振動子を用いた発振器では数千～数万程度の Q 値が得られるが小型化が難しい問題がある。

◆ナノコンタクト型

広い面積の薄膜表面の一部（ナノサイズの微小領域）に電流を集中させる構造をナノコンタクトと呼ぶ。この構造をもつ発振素子がナノコンタクト型発振素子である。

◆スピントルク発振素子

磁気抵抗膜を微細加工プロセスによって形成した微小素子。この素子に直流電流を流すと、電子の持つ磁石の性質のため、素子に含まれる強磁性体中のスピンの歳差運動し、素子の両端には交流電圧が現れる。半導体素子とは異なり、スピントルク発振素子は共振器や周波数を高めるための回路などを必要とせずマイクロ波帯の交流信号を直接発生できる。

◆磁気抵抗膜

強磁性体/非磁性体/強磁性体の積層薄膜を基本構造とし、強磁性体中の磁石（スピン）の向きによって抵抗値が変化する性質を持つ薄膜。磁気抵抗膜にはいくつかの分類があり、非磁性体が金属の場合には巨大磁気抵抗膜（Giant magneto resistance: GMR）、絶縁体の場合には磁気トンネル接合膜（Magnetic tunnel junctions: MTJs）などと呼ばれる。一般的に磁気トンネル接合膜の方が大きな抵抗変化を示すことが知られている。

◆マイクロ波発振器

マイクロ波帯の高周波信号を発生する発振器のこと。

◆直流

電流量が時間的に変動しない電気信号のこと。

◆交流

電流量が周期的に変動する電気信号のこと。

◆磁気抵抗効果

磁界の印加、または、スピン配列の変化により電気抵抗が変化する現象のこと。

◆形状磁気異方性

磁石内部にはスピンの向きやすい方向と向きにくい方向がある。この特徴を磁気異方性という。

磁気異方性にはいくつかの種類が存在し、物質の結晶方位によって決まる結晶磁気異方性、異種材料間の界面で発生する界面磁気異方性、磁石の形状によって生じる形状磁気異方性などがある。例えば、棒磁石のような長細い形状の場合、形状磁気異方性によりスピンは長手方向に向きやすい。磁気抵抗膜のような薄膜の場合、やはり形状磁気異方性によりスピンは膜面内方向に向きやすい。

◆kOe

磁界の単位。1 kOe = 1000 Oe である。Oe はエルステッドと読む。

◆反磁界

磁性体中に存在し、磁気モーメントの方向と反対に向いている磁界のこと。