

氏名（本籍地）	前原 大樹（東京都）
学位の種類	博士（工学）
学位記番号	博甲第 6829 号
学位授与年月日	平成26年 3月25日
学位授与の要件	学位規則第4条第1項該当
審査研究科	数理物質科学研究科
学位論文題目	磁気抵抗効果とスピントルクを用いた高周波発振と磁化ダイナミクスの研究

主査	筑波大学教授	博士(理学)	湯浅 新治
副査	筑波大学教授	工学博士	喜多 英治
副査	筑波大学教授	博士(工学)	大野 裕三
副査	筑波大学准教授	博士(工学)	柳原 英人
副査	産業技術総合研究所チーム長	博士(理学)	今村 裕志

論 文 の 要 旨

スピントロニクスとは、電子の持つ「電荷」と「スピン」の2つの自由度を利用して、新しい機能を創成するエレクトロニクスの分野である。スピントロニクスにはいくつかの特徴的な新物理現象が存在するが、その中でも特に応用上重要で盛んに研究が行われているのが、磁気抵抗効果とスピントルクの2つの物理現象である。磁気抵抗効果は2つの強磁性層の磁化の向きによって素子の電気抵抗が変化する現象であり、磁界センサーや不揮発性メモリ素子としてすでに実用化されている。一方、スピントルクは伝導電子と局在磁気モーメントの間でスピン角運動量が交換されることによって生じる磁気トルクのことであり、スピントルクを用いると外部磁界を用いずに磁化状態をコントロールすることができる。このため、スピントルクは新しいスピン操作技術として注目され、不揮発メモリ素子への情報書込み技術としての応用が期待されている。現在応用されているスピントロニクスデバイスでは、磁気抵抗効果およびスピントルクはそれぞれ独立した機能性を与えている。しかし、近年では磁気抵抗効果とスピントルクを同時に利用することによってスピントロニクスデバイスに新たな機能性を持たせることが試みられている。本博士論文では、その中でもスピントルクによって誘起された磁化の歳差運動が磁気抵抗効果を通して高周波信号に変換される「スピントルク発振」に注目し、応用化に向けた発振性能の高性能化とスピントルク発振中における磁化のダイナミクスについて研究を行った。その結果、以下の1.～4. について重要な結果が示されている。

1. スピントルク発振素子に適した MgO トンネル障壁層をもつトンネル磁気抵抗薄膜 (MgO -MTJ)を開発し、スイッチング電流の9倍近いバイアス電流を印加することを可能とした。また、MR比を100%以上維持したまま、スイッチング電流自体の低減を行い、ナノピラー型スピントルク発振素子の発振性能の向上を実現した。
2. MTJ膜を用いたナノコンタクト型スピントルク発振素子は実現することが難しいと考えられていたが、MTJ膜に特化した新型ナノコンタクト構造を開発し、世界で初めてMTJ膜を用いたナノコンタクト型

スピントルク発振素子の作製に成功した。1. で開発した高性能 MgO-MTJ 膜と新型ナノコンタクトを組み合わせることで、従来の発振素子が示す性能を大幅に上回る Q 値 350、発振出力が 2.4 μ W と従来のスピントルク発振素子の性能を大幅に向上させることに成功した。1 マイクロワットを超える出力をスピントルク発振素子から得たのは世界初の成果である。

3. マイクロマグネティクスシミュレーションとの比較を行い、発振モードの特定を行った。高出力が得られた条件では、大角発振モードが誘起されていることが分かった。さらに、外部磁界を用いて膜面外方向に磁化を傾けることによって反磁界の影響を低減し面外発振モードを誘起することで安定した歳差運動が実現できることを実験的および理論的に示した。この手法により、最大 3200 の Q 値を実現している。MTJ 膜を用いたスピントルク発振素子で 1000 を超える Q 値を実現したのは世界初の成果である。
4. 時間領域測定を用いた位相情報の解析を行い発振線幅の物理的起源について議論を行った。位相の時間発展が拡散的であり、熱擾乱によるランダムウォークを仮定することで位相のパワースペクトラムの周波数依存性を良く説明できることを明らかにしている。本結果により、スピントルク発振素子の本質的な発振線幅の物理的起源は熱擾乱が支配的であることが明らかとなった。

本研究によって MTJ 膜を用いたナノコンタクト型スピントルク発振素子の実現可能であることが示された。また、高出力かつ高 Q 値の両立が可能であることを示し、世界最高性能を誇るスピントルク発振素子の実現に成功した。本成果は、新たなスピントロニクスデバイスの実現を加速させる極めて重要な成果である。さらに、磁化ダイナミクスの理解や発振線幅の物理的起源解明を行うなど基礎物理の観点からも重要な成果が得られている。

審 査 の 要 旨

〔批評〕

前原氏の博士論文では、巨大な磁気抵抗比を示す超低抵抗 MgO-MTJ 素子薄膜の作製、MTJ 素子薄膜のマイクロ波発振器応用と可能とするための新型のナノコンタクト型スピントルク発振器の考案と作製、これを用いた世界最高のマイクロ波発振特性、発振線幅の物理的起源の解明、などが述べられている。第2章では、理論的に高い Q 値が得られやすいが従来はスピントルク発振器への適用が困難であったナノコンタクト型素子について、“ソンプレロ形状”の特殊なキャップ層を用いることで高発振出力と高 Q 値を両立できるスピントルク発振器が実現できることを報告している。これにより、Q 値 350 かつ 2.4 μ W という世界最高の発振出力が実現されたことが述べられている。第3章では、さらなる高 Q 値化に有利な面外発振モードについてマイクロマグネティックシミュレーションによる理論的検討、ならびに膜面垂直成分を持つ外部磁界の印加による面外発振モードの実現について述べられており、MTJ 素子ベースのスピントルク発振器としては世界最高の 3200 という Q 値の実現が報告されている。第4章では、発振線幅の金言として、外部擾乱に起因した長時間領域の周波数揺らぎ、および熱擾乱に起因したより本質的な揺らぎの2要因があることが報告されている。

以上要するに、本博士論文では MTJ 素子薄膜のマイクロ波発振器への応用を可能とするための MTJ 薄膜と素子構造の両面での本質的な技術的進展が報告されており、世界最高レベルのマイクロ波

発振特性およびスピントルク誘起ダイナミクス物理機構の解明などが成されており、電子・物理工学ならびにスピントロニクス的发展に大きく寄与するものである。

〔最終試験結果〕

平成 26 年 2 月 19 日、数理物質科学研究科学学位論文審査委員会において審査委員の全員出席のもと、著者に論文について説明を求め、関連事項につき質疑応答を行った。その結果、審査委員全員によって、合格と判定された。

〔結論〕

上記の論文審査ならびに最終試験の結果に基づき、著者は博士(工学)の学位を受けるに十分な資格を有するものと認める。