

氏名	平山 重之			
学位の種類	博士（工学）			
学位記番号	博乙第 2877 号			
学位授与年月日	平成 30年 5月 31日			
学位授与の要件	学位規則第4条第2項該当			
審査研究科	数理物質科学研究科			
学位論文題目	Spin Hall Effect Induced Ferromagnetic Resonance in Permalloy/Platinum Bilayers (パーマロイ/白金二層膜におけるスピホール効果誘起強磁性共鳴)			
主査	筑波大学教授(連係大学院)	博士(工学)	三谷 誠司	
副査	筑波大学教授(連係大学院)	Ph.D.	宝野 和博	
副査	筑波大学教授	理学博士	黒田 眞司	
副査	筑波大学教授	博士(工学)	柳原 英人	

論 文 の 要 旨

本論文は、スピホール効果に起因して生じるスピトルクや強磁性共鳴を理解することと、そのデバイス応用を背景として、高周波電流と直流電流の両方を印加した状況でのスピホール効果誘起強磁性共鳴を系統的に研究したものである。近年開発が活発化している磁気ランダムアクセスメモリや、新規スピントロニクス素子であるスピトルクオシレータでは、スピホール効果誘起のスピトルクや強磁性共鳴を利用することが検討されており、その物理機構を明らかにすること重要課題となっている。加えて、このスピホール効果誘起の強磁性共鳴は物質のスピホール効果の大きさの評価にも用いることができるため、これに関する材料開発上の評価手法としての重要性も有している。著者は、強磁性材料とスピホール効果材料からなる二層積層膜における従来の研究の多くが高周波電流のみを用いたスピホール効果誘起強磁性共鳴を調べている一方で、高周波電流と直流電流の両方を印加することの物理的意義と工学的重要性に着眼し、それに関する系統的な研究を行っている。その結果、高周波電流と直流電流の両方を用いる方法では、まず、外部磁場と電流の角度が標準的な手法における 45° から大きく外れた場合、具体的には 10° といった小角の場合に磁性共鳴スペクトルに異常な直流電流変調が生じることを見出した。つづいて、非常に興味深いことに、そのような異常変調が生じている状況であっても、スペクトル半値幅の直流変調強度から正確なスピホール角を求めることができるという事実を明らかにした。また最終的に、上述の強磁性共鳴スペクトルの異常変調現象が、歳差運動における時間平均した磁化ベクトルの有効的な縮みによって理解でき、それが 10° といった小角では無視できない大きさになり得ることを明らかにした。このように本論文は、強磁性材料とスピホール効果材料の二層膜におけるスピホール効果

誘起強磁性共鳴に関し、高周波電流と直流電流の両方を印加して強磁性共鳴を励起するという状況での物理現象を多く明らかにし、材料開発におけるスピントルクの評価手法や関連する応用に大いに寄与する成果を挙げている。

第1章はイントロダクションであり、最初にスピントルクやスピントルク効果の基礎的説明、スピントルク効果誘起強磁性共鳴の概説と共鳴スペクトルからスピントルクを求める方法、関連する物理現象を述べている。続いて、スピントルク効果に起因するスピントルクや強磁性共鳴を用いたデバイス応用、具体的には磁気ランダムアクセスメモリやスピントルクオシレータについて簡単に紹介している。最後に関連する研究の現状を説明し、研究目的を述べている。

第2章は実験方法であり、スパッタ法による強磁性材料/スピントルク効果材料の二層膜試料の作製方法、振動試料型磁力計による試料の磁化測定方法、試料を微小長方形形状にして電極を配する微細加工プロセス、プローバを用いたスピントルク効果誘起強磁性共鳴の測定手法を説明している。

第3章は、強磁性共鳴の解析に際し、予め確認すべき物理量である二層膜の垂直磁気異方性について詳細な測定評価を行っている。結果的には小さな垂直磁気異方性しかなく、強磁性共鳴の解析において垂直磁気異方性は無視可能であったが、非常に小さい垂直磁気異方性成分が存在し、そのような微小垂直磁気異方性は一般的な評価法では正確に定量化できていない可能性があることを示唆している。

第4章は、本論文のハイライトであり、パーマロイ/白金二層膜における高周波電流と直流電流の両方を印加した場合のスピントルク効果誘起強磁性共鳴の系統的なデータが示されている。外部磁場と励起電流の角度としては、通常の実験では 45° が選択されるが、 10° などの小角条件のデータも示されている。 10° 等の結果において、上述のとおり、共鳴スペクトルの異常な変調効果を見出している。更に、そのような異常変調が生じている状況においても、直流電流によるピーク半値幅の変化からスピントルクを求める手法は破綻していないという非常に興味深い結果を得ている。直流電流印加による半値幅変化という手法が、スピントルクを求める上で非常に強力であることを結論付けている。

第5章では、 10° などの小角条件でのスペクトルの異常変調のメカニズムを考究している。強磁性層（パーマロイ）とスピントルク材料層（白金）の間に SiO_2 層を挿入し、スピントルク効果によるスピントルクを遮断した実験を行うことで、共鳴スペクトルの異常変調がスピントルク効果に起因する現象ではないことを明確にしている。熱流による効果でないことも確認した上で、最終的にこの現象が歳差運動における時間平均した磁化ベクトルの有効的な縮みによって理解できることを明らかにした。実験データが数値計算によって非常によく再現されている上に、 10° などの小角条件では磁化ベクトルの有効的な縮みといった一件小さそうな効果が無視できないことも明示している。強磁性共鳴における Photo-resistance 効果と呼ばれる効果に類似した現象であることも指摘している。

第6章では、直流電流の印加に関するその他の詳細な実験データが示されている。入念な解析結果についても記述されている。

第7章は本論文の結論である。

論文の末尾には、謝辞に加えて、本研究に直接的に関連する投稿論文などのリスト(含、3本の第一著者論文)を示してある。

審 査 の 要 旨

本論文では、高周波電流と直流電流を同時に印加した場合のスピホール効果誘起強磁性共鳴の重要性に着目し、その系統的な研究を行っている。実際、近年スピホール効果によるスピントルクが磁気ランダムアクセスメモリに使われようとしており、スピホール効果とそのため材料開発の重要性はますます高まりつつあることから、たいへん意義のある研究であると言える。

重要な成果としては、まず、強磁性材料/スピホール材料の二層膜におけるスピホール効果誘起強磁性共鳴の異常変調効果の発見が挙げられる。つづいて、異常変調が生じても直流電流印加によるスピホール角評価法はその影響を受けないという事実を見出したことも特筆すべき成果である。最終的に、異常変調の正体が photo-resistance 効果とよばれるものの類似現象であることを突き止めており、スピホール効果誘起強磁性共鳴の物理的理解を深めることに至っている。本研究は、スピホール角を正確に求める手法の開拓・進化に大きく寄与しており、スピホール効果に関する材料開発への波及効果も大きいということも最後に強調すべきところである。

〔結論〕

平成30年4月5日、数理物質科学研究科学学位論文審査委員会において、審査委員全員の出席のもと、本論文について著者に説明を求め、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。

よって、著者は博士(工学)の学位を受けるのに十分な資格を有するものと認める。