

令和 2 年 7 月 8 日現在

機関番号：33924

研究種目：若手研究

研究期間：2018～2019

課題番号：18K14128

研究課題名(和文) Clarifying physical mechanism of a very fast current-induced domain wall motion at low current density in RE-TM nanowire attributed to spin orbital torque.

研究課題名(英文) Clarifying physical mechanism of a very fast current-induced domain wall motion at low current density in RE-TM nanowire attributed to spin orbital torque.

研究代表者

Pham VanThach (Van Thach, Pham)

豊田工業大学・工学(系)研究科(研究院)・ポストドクトラル研究員

研究者番号：70807809

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,200,000円

研究成果の概要(和文)：IBMのParkinらは、フェロ磁性体/非磁性体/フェロ磁性体の複雑な3層構造で人工的にアンチフェロ状態を作り出し、磁壁移動速度を750m/secに高めることに成功した。しかし、GdFeCo単層膜はフェリ磁性材料であり、単層でもアンチフェロに類似していると考えられる。そこで、GdFeCo/Ptヘテロ界面磁性細線を作成し、磁壁移動速度が向上するか調べた。電流パルス幅を100nsecとしたとき、磁壁移動速度は600m/secにも高速化し、IBMの750m/secに近づいた。パルス幅を3nsec(半値幅6nsec)に短くすると磁壁移動速度は2600m/secにも高速化できることを確認した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

磁性細線メモリにとって重要な電流駆動磁壁移動速度を2600m/secに高めることに成功した。これはパルス半値幅6nsecでの値であるが、実際には設定値の3nsecでの駆動と考えると、磁壁移動速度は倍の5200m/secになる。この速度は驚異的で、このような早さを制御できる電子回路が無いので有効活用できないが、電子回路の進展具合では超高速低消費電力磁性細線メモリの実用化が期待できる結果である。また、パルス幅を100nsecから3nsecに変えると、駆動電力は2.5倍増えたが、磁壁移動速度は4倍に増えた。磁壁移動速度/駆動電力比をおよそ倍にすることができた。これも省電力化に貢献できる結果である。

研究成果の概要(英文)：IBM's Parkin et al. succeeded to improve the domain wall velocity of 750m/sec using a complicated three-layer structure of ferromagnet/nonmagnetic material/ferromagnetic magnetic wire. The important key point is that the two magnetic layers are antiferromagnetically coupled. On the other hand, the GdFeCo single layer film is a ferrimagnetic material, and it is considered that the single GdFeCo layer is similar to antiferromagnetic material. Therefore, I prepared a GdFeCo/Pt heterointerface magnetic wire and investigated whether the domain wall motion velocity is improved. When the current pulse width was set to 100 nsec, the domain wall speed increased to 600 m/sec, approaching the IBM value. It was confirmed that the domain wall speed was improved to 2600 m/sec by using shortening the pulse width to 3 nsec (half-value width 6 nsec). Thus, ferrimagnetic wires are attractive because they have a simpler structure and can improve the domain wall speed.

研究分野：スピントロニクス

キーワード：スピン軌道トルク 磁性細線メモリ ジャロシンスキー守谷相互作用 磁壁駆動速度 希土類・遷移金属合金 フェリ磁性材料 電流磁壁駆動 臨界電流密度

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

ビッグデータを集めて人工知能で解析し、生産性向上を目指した新たな産業革命が進められている。この集約されたデータは新しい産業革命において貴重な財産となるため、そのデータ量は指数関数的に増大しており、データセンターの増設が続いている。これに伴い、データ蓄積に必要な消費電力も指数関数的に増大しており、将来の発展のためには巨大な発電所を増設する必要がある。このように、電力問題が深刻化している。この原因として、データを維持するために大量の電力を必要とする半導体メモリの存在が考えられる。半導体メモリ SRAM では常時電力供給が必要、DRAM では 30msec に 1 回データの読み出し及び記録を行うリフレッシュ動作が必要であり。データ維持に電力を必要としない不揮発メモリの開発が喫緊の課題となっている。そこで、データ維持に電力不要の磁壁移動型 MRAM や磁性細線メモリの研究が盛んに行われている。これらの駆動原理にはスピントランスファートルク (STT) が用いられている。伝導電子のスピンのにより、磁性細線内の磁壁を駆動する方法である。磁壁は電子流の方向 (電流と逆) に動く。一方、最近新しい磁壁駆動力が見出された。磁性層に Pt などの重金属層を近接すると、このヘテロ界面に流れる電流がスピンホール効果によりスピン偏極し、磁性層内にスピン流が流入する。例えば、重金属層が Pt の場合、このスピン流によって磁性層の磁壁は電流方向に動く。これをスピン軌道トルク (SOT) と呼ぶ。すなわち、磁性細線の駆動力に STT と SOT を組み合わせることで磁壁の駆動制御に大きな自由度が生まれる。そこで、磁壁駆動に必要な電流密度低減や磁壁移動速度向上の研究が盛んに行われている。

多くの研究には磁性層にフェロ磁性体が用いられている。しかし、この場合ヘテロ界面における SOT は界面数 nm に限られる。そのため磁壁移動速度は 300m/sec くらいが限界であった。そこで、IBM の Parkin らは 2 枚のフェロ磁性層を非磁性層で挟んだアンチフェロ磁性細線を作ることで磁壁移動速度を 750m/sec にまで改善した。一方、希土類と遷移金属からなる合金や多層膜はフェリ磁性体であり、これ自体単層でアンチフェロ磁性体に類似した磁気構造を持つ。この磁性細線に注目して電流磁壁駆動実験を行った。

2. 研究の目的

GdFeCo 単層はアンチフェロに近い磁気構造をもつ。この GdFeCo/Pt ヘテロ磁性細線を作成し、その磁壁移動速度について詳細に調べて IBM の磁壁移動速度を超えることが本研究の目的である。磁壁移動速度は印加する電流密度で高速になる。そこで、少ない電流密度で高速磁壁駆動を実現することが第 2 の目的である。

3. 研究の方法

アンチフェロ磁気構造に近いフェリ磁性体をマグネトロンスパッタ法で作成し、リフトオフ法で磁性細線を形成した。この積層構造を図 1 (a) に示す。この規格化した異常ホール効果 (R_H) の磁気ヒステリシスループを図 1 (b) に示すが、保磁力 30mT の垂直磁化膜であることがわかる。

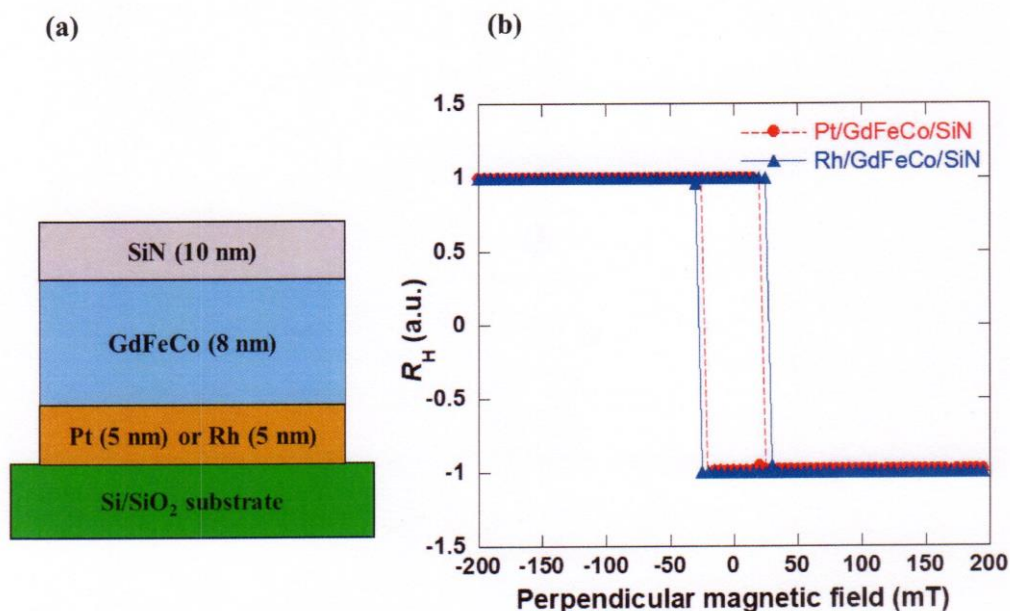


図 1 (a) GdFeCo/Ptヘテロ構造磁性細線の積層構造
(b) GdFeCo/Ptヘテロ構造磁性細線の規格化異常ホール効果(R_H)の磁気ヒステリシスループ。GdFeCo/Rhヘテロ構造膜も同様に作成した結果、全く同じヒステリシスループが得られ、電流磁壁駆動実験において両者を比較できることがわかる。

一方、比較材料として重金属層を Rh に変えた試料の R_{H} 磁気ヒステリシスループも同図に示した。重金属層が Pt でも Rh でも磁性膜が同じ GdFeCo なので全く同じ磁気ヒステリシスループであることがわかる。すなわち、両者の磁性細線の電流磁壁駆動は全く同じ磁気特性での比較が可能であることが確認できる。この電流磁壁駆動実験結果を以下に示す。

4. 研究成果

図 2 (a) の一番上の写真には、GdFeCo/Pt 磁性細線の左端に磁壁を作ったときの極磁気光学 Kerr 偏光顕微鏡イメージを示す。これに、パルス電流を左側電極から右側電極に印加すると、左端にあった磁壁は図 2 (a) の真ん中の写真に示すように大きく右側に動く。この 1 パルスでの磁壁の移動距離は(上)図と(中)図の差分画像(下)図から正確な値を求めることが出来る。この磁壁移動距離を印加したパルス幅で除算することで、磁壁移動速度を算出した。磁壁は電流方向に動いており、磁壁の駆動力はその移動方向から STT ではなく SOT が支配的であることがわかる。

この比較材料として、GdFeCo/Rh 磁性細線の電流磁壁移動実験結果を図 2 (b) に示した。磁壁の移動方向は Pt 同様に電流方向であり SOT が駆動力の主因であることがわかる。しかし、その移動距離は図 2 (b) 下図からもわかるように、Pt に比べて非常に短い。

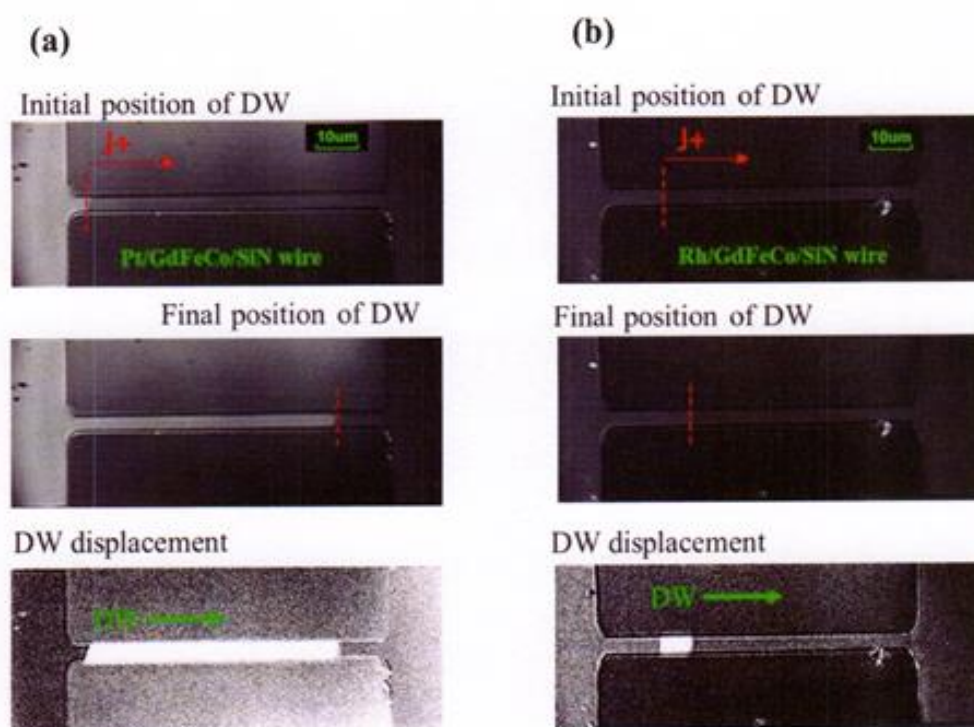


図2 (a) (上)GdFeCo/Pt磁性細線の左端に磁壁を形成したときの偏光顕微鏡写真。
 (中)GdFeCo/Pt磁性細線に右向きに1発パルス電流を印加すると、左端の磁壁が大きく右側に移動した。
 (下) (上)図と(中)図の差分画像。1発のパルス電流で移動した磁壁の大きな移動軌跡がわかる。
 (b) (上)GdFeCo/Rh磁性細線の左端に磁壁を形成したときの偏光顕微鏡写真。
 (中)GdFeCo/Rh磁性細線に右向きに1発パルス電流を印加すると、左端の磁壁が少し右側に移動した。
 (下) (上)図と(中)図の差分画像。1発のパルス電流で移動した磁壁の移動軌跡がわずかであることがわかる。

この磁壁移動速度は電流密度を高めるほど高速になる。そこで、これら2種類の磁性細線の磁壁移動速度と印加電流密度の関係を調べた結果を図3に示した。電流印加には Picosecond 社製のパルス発生器 2600C を用い、発生させたパルス電流幅を 100nsec に設定したときのパルス電流波形を図3 (a) に示した。パルス電流切断時にわずかなリングングが出ているが、値が小さいので実験に支障はない。このパルス電流を GdFeCo/Pt 磁性細線に注入した結果を図3 (b) に示す。磁壁を動かすのに必要な最小電流密度は $1 \times 10^{11} \text{A/m}^2$ と比較的小さな値である。電流密度を大きく

すると磁壁移動速度はリニアに上昇し、電流密度 $4 \times 10^{11} \text{A/m}^2$ で磁壁移動速度は 600m/sec に達した。すなわち、IBMのように複雑な人工的なアンチフェロ構造を作らなくても単層で磁壁駆動速度を IBM の 750m/sec 近くまで高層化することができた。また、比較材料の GdFeCo/Rh 磁性細線の場合にはこれとは違って $3.6 \times 10^{11} \text{A/m}^2$ において磁壁移動速度は限界を迎え、更に電流密度を増やすと磁壁移動速度は減速している。これは Rh 系の場合にはウォーカーブレークダウンが生じていることを示す。

さて、パルス幅を短くするとどうなるのか実験した結果を図 3 (d) に示す。用いたパルス電流波形は図 3 (c) の形である。設定値は 3ns であるが、半値幅は 6ns くらいに広がっている。磁壁駆動にはパルス電流値の先端が有効であるが、試料の抵抗値が大きくインピーダンスマッチングがとれないため電流が入り込むのに時間が必要ということの意味するパルス波形になっている。磁壁移動速度を求めるためにはパルス幅が必要で、図 3 (d) の結果には半値幅の 6ns を用いた。驚いたことにパルス幅を 3 分の 1 に狭くしたにもかかわらず、磁壁駆動の臨界電流密度はわずかに $2.5 \times 10^{11} \text{A/m}^2$ に増大しただけである。すなわち、臨界駆動電力が 1 3 分の 1 に減少した。しかも、磁壁移動速度は 2600m/sec にまで高速化している。速度計算に用いたパルス幅を 3ns で計算しなおすと 5200m/sec になる。一方、比較材料の GdFeCo/Rh を見てみると、ウォーカーブレークダウンは見られず、磁壁移動速度は 500m/sec にまで高速化した。この結果は非常に面白く、パルス幅が短いと SOT を低電力で有効に活用できることを示している。

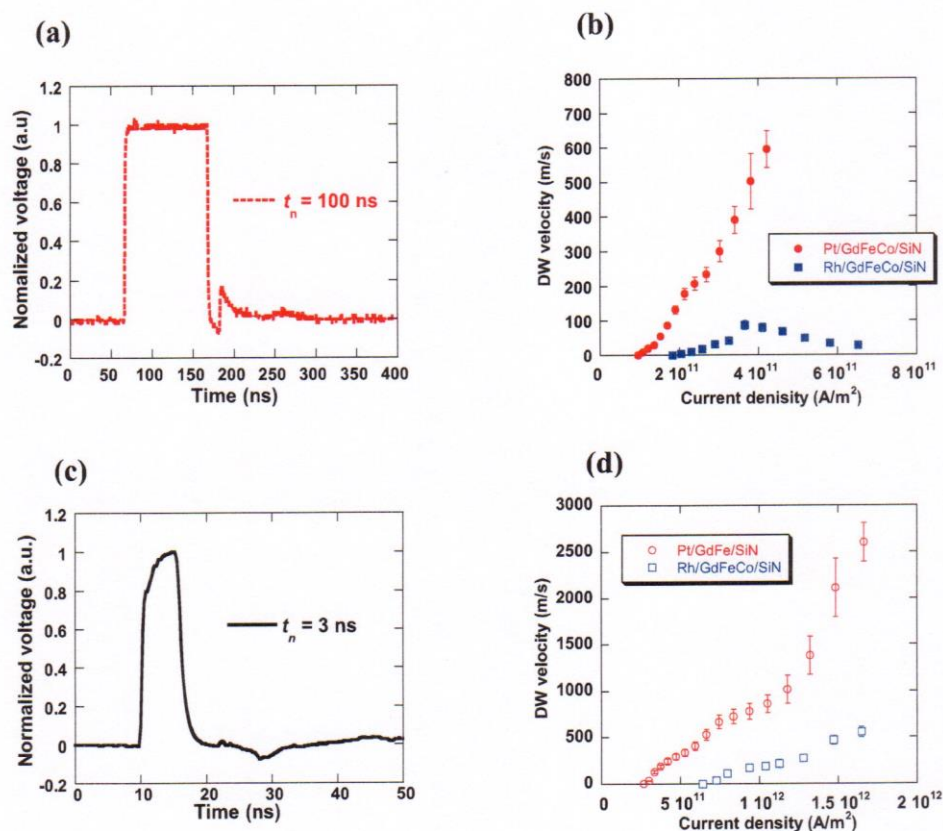


図3 (a) パルス電流幅100nsecの設定値で磁性細線に電流印加した時のパルス電流波形。
 (b) パルス電流幅100nsecをGdFeCo/Pt磁性細線に印加した時の磁壁移動速度の印加電流値依存性。最大移動速度は 600m/sec と高速である。一方、比較材料としてGdFeCo/Rh磁性細線における同様の結果も同図示したが、最大磁壁移動速度は 100m/sec と遅い。
 (c) パルス電流幅3nsecの設定値で磁性細線に電流印加した時のパルス電流波形。
 (d) パルス電流幅3nsecをGdFeCo/Pt磁性細線に印加した時の磁壁移動速度の印加電流値依存性。最大移動速度は 2600m/sec と更に高速になった。一方、比較材料GdFeCo/Rh磁性細線では、最大磁壁移動速度は 500m/sec に向上した。

では、なぜ Pt 系と Rh 系に差が生じたのか？それを調べるために SOT を構成するジャロシンスキー守谷相互作用について調べた。図 4 にその結果を示す。一般に、重金属に接しない通常の

磁性細線内の磁壁はブロッホタイプの磁壁となる。しかし、ヘテロ結合した磁性細線界面において磁壁はジャロシンスキー守谷相互作用の影響でネール型磁壁となる。このネール磁壁にスピンホール効果によるスピン流が流れ込むと磁壁の駆動力となる。そこで、磁性細線方向に外部磁界を印加すると、ジャロシンスキー守谷相互作用によるネール磁壁を壊してブロッホタイプにもどすことができる。この磁壁のスピン方向はスピン流と平行になるためトルクが働かず磁壁は動かなくなる。その外部磁界がジャロシンスキー守谷相互作用磁界である。これを測定した結果が図4 (a) GdFeCo/Pt 磁性細線, (b) GdFeCo/Rh 磁性細線である。図4 (a) GdFeCo/Pt 磁性細線では、down-up up-down どちらの結果も直線で示すことが出来、ネール磁壁をブロッホ磁壁に変えるための外部磁界強度は ± 240 Oe であることがわかった。また、比較材料の(b) GdFeCo/Rh 磁性細線ではおよそ ± 40 Oe と小さいことが明らかになった。したがって、ブロッホ磁壁をネール磁壁にする力はPtのほうが6倍も大きいことがわかる。このように、図3で示した磁壁移動速度の差は、このジャロシンスキー守谷相互作用磁界の影響であると言える。(a) GdFeCo/Pt 磁性細線と(b) GdFeCo/Rh 磁性細線の最大磁壁移動速度比は5倍程度であり、このジャロシンスキー守谷相互作用磁界の6倍に近い比率になっている。

また、スピンホール効果が大きいほどこの傾きが大きい。傾きについて図4を見てみると、(a) GdFeCo/Pt 磁性細線のほうが、(b) GdFeCo/Rh 磁性細線の傾きより50%大きい。これはスピンホール効果の働きも(a) GdFeCo/Pt 磁性細線のほうが大きいことを示しており、ジャロシンスキー守谷相互作用およびスピンホール効果が大きいほど、磁壁駆動電流密度を下げ、磁壁移動速度を向上することが示唆される。これは重要な設計指針であると考えられる。

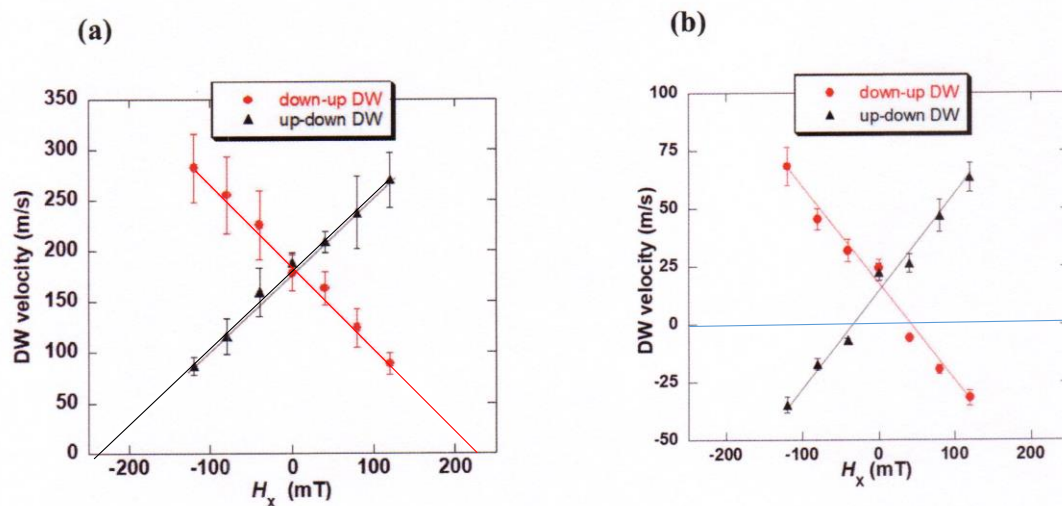


図4 (a) GdFeCo/Pt磁性細線の細線方向に外部磁界を印加し、電流磁壁移動速度を測定したときの磁界強度依存性。磁壁にはdown-up磁壁とup-down磁壁の2種類がある。その2種類の測定結果。
(b) GdFeCo/Rh磁性細線の細線方向に外部磁界を印加し、電流磁壁移動速度を測定したときの磁界強度依存性。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計4件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 3件）

1. 発表者名 P. Van Thach, B. Do, S. Sumi and H. Awano
2. 発表標題 Fast current-induced domain wall motion in symmetric ferrimagnetic Tb-Co alloy wires
3. 学会等名 Intermag/MMM 2019 Joint conference (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 T. Sawa, M. Kawamoto, S. Sumi, P. Van Thach, K. Tanabe and H. Awano
2. 発表標題 Observation of thermal distribution of magnetic nanowire memory by current injection
3. 学会等名 Intermag/MMM 2019 Joint conference (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 P. Van Thach, B. Do, S. Sumi and H. Awano
2. 発表標題 Fast current-induced domain wall motion in symmetric ferrimagnetic Tb-Co alloy wires
3. 学会等名 ICM2018 (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 家元章吾、鷲見聡、Pham Van Thach, 栗野博之, 林将光
2. 発表標題 Pt/TbCoヘテロ界面積層膜における磁気光学効果の波長依存性評価
3. 学会等名 電気学会マグネティクス研究会資料
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
--	---------------------------	-----------------------	----