

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 3 年 5 月 22 日現在

機関番号：14401

研究種目：若手研究

研究期間：2019～2020

課題番号：19K15435

研究課題名(和文)磁気異方性トルクによる新原理ダイオード効果

研究課題名(英文)New diode effect mechanism by a magnetic anisotropy torque

研究代表者

後藤 穰(Goto, Minori)

大阪大学・基礎工学研究科・助教

研究者番号：80755679

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)：本研究では、熱誘起磁気異方性変化とスピントルク自励発振によって、ボロメータと同等のダイオード感度( $4.40 \times 10 \text{ V/W}$ )が得られた。このダイオード感度はサブギガヘルツ周波数帯で世界最高のダイオード感度となった。この論文で用いた熱誘起磁気異方性変化の大きさは約 $2.7 \mu\text{J/Wm}$ であり、これは従来素子の約3倍である。これらの結果は研究代表者を筆頭著者としてNature Communications誌に掲載された。この論文は日刊工業新聞や電波新聞などに掲載され、電子情報通信学会ニュース解説記事にも掲載された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究の学術的意義は、磁性体中の熱がマイクロ波周波数帯のスピントルク素子の制御に有効であることを示したことである。磁性体は次世代メモリ・ロジック・マイクロ波通信素子・人工知能素子として期待されており、磁性体中の熱の利用はそれらに対する有効な制御手法であることが分かった。また、本研究は通信で用いられるサブギガヘルツ帯の周波数帯のマイクロ波検出技術に応用できる。そのため、今後発展が予想されるIoT素子の受信素子となることが期待される。

研究成果の概要(英文)：In this study, we have obtained the diode sensitivity of  $4.40 \times 10 \text{ V/W}$  which is a bolometer level thanks to the heat controlled magnetic anisotropy and spin-torque auto oscillation. This diode sensitivity is the world's best in the sub-GHz frequency region. The magnitude of the heat controlled magnetic anisotropy in this study is approximately  $2.7 \mu\text{J/Wm}$  which is three times higher than the previous result. This result was published by the journal "Nature Communications" as a first author. This paper was published by "Nikkan Kogyo Shinbun", "Denpa Shinbun", and think piece of the Institute of Electronics, Information and Communication Engineers.

研究分野：スピントロニクス

キーワード：スピントロニクス 磁性体 熱 マイクロ波 ダイオード ボロメータ スピントルク自励発振 磁気異方性制御

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、研究者個人に帰属します。

## 様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

スピントロニクスでは強磁性体中のスピンドYNAMICSを利用したマイクロ波素子が提案されている。スピントルクダイオード効果[A. A. Tulapurkar *et al.*, Nature (2005)]はその一つであり、MTJ にマイクロ波を印加すると直流電圧(ダイオード電圧)が発生する現象である(図1)。スピントルクダイオード効果は半導体ダイオードを超える検出感度を有することが明らかになるなど[S. Miwa *et al.*, Nat. Mater. (2014)]、微弱なマイクロ波の検波技術としても有用である。

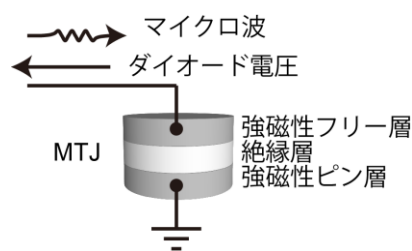


図1 磁気トンネル接合(MTJ)を用いたダイオード効果の概念図。

このように、スピントロニクスではMTJが次世代の情報・通信分野を担う素子として期待されている。半導体ダイオードのダイオード感度 3,800 V/W を超えたことを発端に、更なる検出感度の向上が進められており、約 8 万 V/W のダイオード感度が報告されている[S. Tsunegi *et al.*, Appl. Phys. Express (2018)]。この検出感度を高感度化させることにより、スピントルクダイオード効果の応用範囲を広げることにつながる。例えば、電波天文学やサーモグラフィなどで使用されているボロメータは、赤外線周波数帯で約 24 万 V/W の超高感度マイクロ波検出感度が実現している[<https://www.irsystem.com/product/bolometer/>]が、約 1 GHz 近傍ではそのような超高感度ダイオード検波器は報告されていない。

スピントルクダイオードの高効率化には「高効率スピントルクの利用」が重要な役割を果たす。高効率スピントルクの候補としてはスピントランスファートルク、スピン軌道トルク、電圧誘起磁気異方性変化、**熱誘起磁気異方性変化によるスピントルク(以下、熱誘起トルク)**などが知られている。近年、我々は熱誘起トルクが MgO|FeB|MgO 系において非常に大きな影響を及ぼすことを報告した[M. Goto *et al.*, Nat. Nanotechnol. (2019)]。熱誘起トルクとは、ジュール熱によって温度が上昇し、磁気異方性が変化することで磁化に生じるスピントルクである。本試料にて通常のスピントランスファートルクの強度と比較を行うと、熱誘起トルクはその 10 倍程度の大きさを有することがわかった。驚くべき点は、これまで応答が遅いと信じられていた熱による現象が、マイクロ波周波数でも応答するほど高速な現象だったことである。このような大きく高速な磁気異方性変化が及ぼすトルクはこれまで着目されておらず、今後この熱設計を最適化することで、さらなるトルク強度の増大が期待できる。本研究は、半導体ダイオードを超えたスピントルクに対して新原理「熱誘起トルク」による高効率なスピントルクを用いることで、ダイオード効果の検出感度をどこまで大きくできるか、という課題に迫る。

### 2. 研究の目的

熱トルクをスピントルクダイオードに利用することで、ギガヘルツ近傍の周波数において、ボロメータレベル(24 万 V/W 以上)の実現を目指す。

### 3. 研究の方法

熱トルクが有効に発現すると期待される MgO|FeB|MgO 構造の MTJ を用いる。直流電流下、様々な外部磁場下においてマイクロ波を印加した時に発生した直流電圧を測定する。また、共鳴周波数の変化などを調べることで、ダイオード電圧の発生原理について明らかにする。

### 4. 研究成果

本研究では上記 MTJ を利用することで、ボロメータと同等のダイオード感度 (440 万 V/W) を実現することに成功した (図 2)。これは当初の目的であった 24 万 V/W をはるかに超えるダイオード感度である。

図 3 に本実験で得られた結果を示します。-55 dBm の電力のマイクロ波を素子に印加すると、最大で約 10.6 mV の直流電流が発生することが分かった (赤の実験結果)。回路の挿入損失 1.16 dB を考慮すると、ダイオード感度は約 440 万 V/W となる。この値は、これまでにスピントルクダイオードに関して報告された最高のダイオード感度 (20 万 V/W) の約 20 倍の大きさとなる。本研究の結果は、通信機器の超高感度受信素子としての応用が期待される。

ここで使われた熱によるスピン制御手法の効率は従来研究の約 3 倍 ( $2.7 \mu\text{J/Wm}$ ) の大きさであることも明らかになった。この熱によるスピン制御効率の向上もダイオード感度の増大の一因であると考えられる。この熱によるスピン制御は、従来のスピントロニクスで使われているスピン注入などの制御手法に比べて、磁性層の膜厚を厚くしても効果が減衰しにくいという特長がある。磁石の厚膜化は、素子のノイズの低下や素子ばらつき低下につながるため、そのような素子におけるスピン制御手法として有効であると期待される。

一方で、この素子は実用化に向けてダイナミックレンジの増大が必要となる。これには、素子の検出限界の低減が必要となる。我々の素子では、検出限界のマイクロ波のパワーが室温にて  $2.4 \text{ pW Hz}^{-1/2}$  となった。冷却型超伝導ボロメータと同じ条件と比較すると、我々の素子は 10 倍から 100 倍ほど大きい値となる。将来的には、より微弱なマイクロ波の検出を可能にするために、素子の検出限界の低減を進めていく。

本研究の結果は、研究代表者を筆頭著者として Nature Communications 誌に掲載された [M. Goto *et al.*, Nat. Commun. (2021)]。この論文は日刊工業新聞や電波新聞などに掲載され、電子情報通信学会ニュース解説記事にも掲載された。また、熱誘起磁気異方性変化の大きさを増大させるために、サンプル構造 (CoFeB|MgO barrier|FeB|MgO cap) の MgO cap の膜厚や膜構造を変化させた。その結果、MgO の界面を増やすことで効果が増大することが分かった。この結果は研究代表者を共著者かつ責任著者として Journal of Physics Condensed Matters 誌に掲載された [R. Okuno, *M.G., et al.*, J. Phys. Condens. Mater (2020)]。さらに、本素子を透過型の素子として用いることで、マイクロ波を増幅させることが可能であることも明らかになった。この成果は、Applied Physics Letters 誌に掲載された [Y. Yamada, *M.G., et al.*, Appl. Phys. Lett. (2021)]。

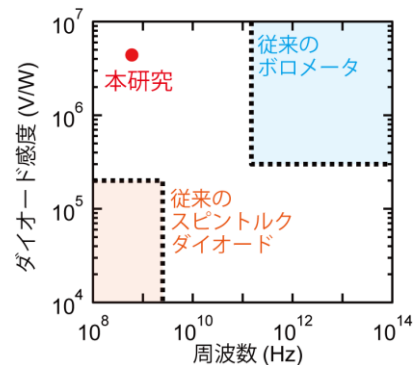


図 2 ダイオード感度と周波数に対する本研究の位置づけ。従来のボロメータとスピントルクダイオードの領域をそれぞれ青とオレンジの領域で示す。

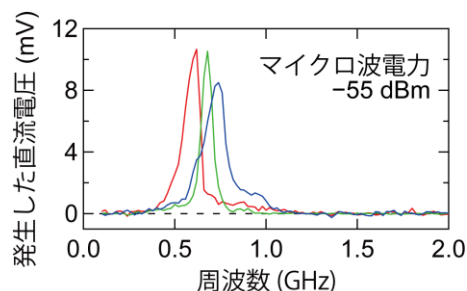


図 3 電力 -55 dBm のマイクロ波を素子に印加した時に発生した直流電圧と印加マイクロ波の周波数の関係。特定の周波数で直流電圧が得られている。このピーク周波数は外部磁場によって変調することができ、赤・緑・青は外部磁場の方向や強度が異なる実験結果を示す。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 3件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Goto Minori, Yamada Yuma, Shimura Atsushi, Suzuki Tsuyoshi, Degawa Naomichi, Yamane Takekazu, Aoki Susumu, Urabe Junichiro, Hara Shinji, Nomura Hikaru, Suzuki Yoshishige	4. 巻 12
2. 論文標題 Uncooled sub-GHz spin bolometer driven by auto-oscillation	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Nature Communications	6. 最初と最後の頁 536 ~ 536
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41467-020-20631-0	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Okuno Ryota, Yamada Yuma, Goto Minori, Mizuno Tomohito, Yamane Takekazu, Degawa Naomichi, Suzuki Tsuyoshi, Shimura Atsushi, Aoki Susumu, Urabe Junichiro, Hara Shinji, Nomura Hikaru, Suzuki Yoshishige	4. 巻 32
2. 論文標題 Enhanced electric control of magnetic anisotropy via high thermal resistance capping layers in magnetic tunnel junctions	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Physics: Condensed Matter	6. 最初と最後の頁 384001 ~ 384001
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1361-648X/ab94f3	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Yamada Yuma, Goto Minori, Yamane Takekazu, Degawa Naomichi, Suzuki Tsuyoshi, Shimura Atsushi, Aoki Susumu, Mizuno Tomohito, Urabe Junichiro, Hara Shinji, Miwa Shinji, Suzuki Yoshishige	4. 巻 118
2. 論文標題 Quasi-maser operation using magnetic tunnel junctions	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Applied Physics Letters	6. 最初と最後の頁 192402 ~ 192402
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/5.0050151	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計3件（うち招待講演 0件/うち国際学会 0件）

1. 発表者名 Minori Goto, Yuma Yamada, Atsushi Shimura, Tsuyoshi Suzuki, Naomichi Degawa, Takekazu Yamane, Susumu Aoki, Junichiro Urabe, Shinji Hara, and Yoshishige Suzuki
2. 発表標題 Giant spin torque diode effect induced by nonlinear spin dynamics in double-MgO magnetic tunnel junctions
3. 学会等名 The 80th Japan Society of Applied Physics (JSAP) Autumn Meeting 2019
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Y. Yamada, M. Goto, T. Yamane, N. Degawa, T. Suzuki, A. Shimura, S. Aoki, J. Urabe, S. Hara, S. Miwa, and Y. Suzuki
2. 発表標題 Microwave emission using two magnetic tunnel junctions with positive gain
3. 学会等名 The 80th Japan Society of Applied Physics (JSAP) Autumn Meeting 2019
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 R. Okuno, Y. Yamada, M. Goto, H. Nomura, and Y. Suzuki
2. 発表標題 Efficient heat induced magnetic anisotropy change by a multiple interfacial cap layer in a magnetic tunnel junction
3. 学会等名 The 67th Japan Society of Applied Physics (JSAP) Spring Meeting 2020
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

○日刊工業新聞および電波新聞にてスピロボロメータに関する記事が掲載された。
○日刊工業新聞での記事掲載を受けて、電子情報通信学会の2021年6月号ニュース解説記事にて「非冷却型スピロボロメータ サブギガヘルツ帯における世界最高のダイオード感度」が掲載される。

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
研究協力者	鈴木 義茂  (Suzuki Yoshishige)	大阪大学大学院・基礎工学研究科	

## 6. 研究組織（つづき）

	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
研究協力者	原 晋治  (Hara Shinji)	T D K 株式会社	
研究協力者	占部 順一郎  (Urabe Jun-ichiro)	T D K 株式会社	
研究協力者	青木 進  (Aoki Susumu)	T D K 株式会社	
研究協力者	山根 健量  (Yamane Takekazu)	T D K 株式会社	
研究協力者	出川 直通  (Degawa Naomichi)	T D K 株式会社	
研究協力者	鈴木 健司  (Suzuki Tsuyoshi)	T D K 株式会社	
研究協力者	志村 淳  (Shimura Atsushi)	T D K 株式会社	

## 7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------