

令和 6 年 6 月 11 日現在

機関番号：13401

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2020～2023

課題番号：20K04599

研究課題名(和文)スピントロニクスデバイスを用いた広帯域テラヘルツエミッタの放射効率改善

研究課題名(英文)Improvement of radiation efficiency of the wideband terahertz-emitter using the spintronics device

研究代表者

北原 英明(Kitahara, Hideaki)

福井大学・遠赤外領域開発研究センター・特命助教

研究者番号：20397649

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：スピントロニクス素子の放射及び検出効率の改善を目的として、(a)アンテナ構造電極の付加による放射効率の改善、及び(b)交流磁場バイアスの導入による検出効率の改善を行い全体で一桁以上のダイナミックレンジ向上を試みた。矩形型ダイポールアンテナの構造と電磁石コイルの導入によりアンテナ構造の無いスピントロニクス素子と比較して夫々8倍と2倍の放射検出効率の改善を達成した。両者を組み合わせた場合には16倍の効率となり、目標である10倍以上の効率改善を達成した。また、上記成果を利用し(b)で開発したアンテナモジュールを用いて素子の磁場飽和特性の決定や自由に偏光方向を変えられる放射器の開発も行った。

研究成果の学術的意義や社会的意義

学術的意義としては交流磁場バイアスを使用し、小さな磁場領域に於ける磁場放射特性を計測することで2mTでほぼ飽和するという磁場飽和特性を計測したことにある。

社会的意義としては他の方法と比較して放射パワーが小さいスピントロニクス素子の放射パワーを他の方法に近づけたことにより、ダイナミックレンジが4.5桁と改善し本素子を実使用可能なレベルへ改良することに成功した。

研究成果の概要(英文)：In order to improve the radiation and detection efficiency of spintronics device, (a) we improved the radiation efficiency by adding an antenna structure electrode, and (b) we improved the detection efficiency by introducing an AC magnetic field bias, attempting to improve the dynamic range by more than one order of magnitude overall. By introducing a rectangular dipole antenna structure and an electromagnetic coil, we achieved an 8-fold and 2-fold improvement in radiation detection efficiency, respectively, compared to a spintronics device without an antenna structure. When both were combined, the efficiency becomes 16 times, achieving the target efficiency improvement of more than 10 times. In addition, using the above results, we also determined the magnetic field saturation characteristics of the device by using the antenna module developed in (b) and developed an emitter that can freely change the polarization orientation.

研究分野：テラヘルツ時間領域分光法

キーワード：スピントロニクスエミッタ テラヘルツ時間領域分光法

1. 研究開始当初の背景

磁性金属と非磁性金属のヘテロ構造(スピントロニック素子)をフェムト秒レーザーで光励起することで誘起される超高速のスピントロニック流を起源とするテラヘルツ(THz)放射は、超広帯域特性や広い励起波長で利用可能なことから、新しいTHz波放射機構として注目を集めている。[1]しかし、その励起パワーあたりの放射効率が低いため、実用的なTHz波放射素子として利用されるまでには至っていない。本研究では、さらにアンテナ構造の導入により、スピントロニック素子の励起レーザーパワーあたりの放射効率を現在よりも1桁以上向上させることを目指す。

2. 研究の目的

本研究では、フェムト秒レーザーパルスによるスピントロニック素子からの、逆スピントロニック効果(ISHE, 図1)に基づくTHz波放射の励起パワーあたりの効率を、現在最適化されたFe/Pt素子で得られているものよりも振幅ベースで1桁以上向上させることを目的とする。この目標が達成されればスピントロニック素子を放射素子に用いた、超広帯域、高感度で、通信波長帯(1.56 μm)のフェムト秒レーザーを励起光源に用いた安価なテラヘルツ時間領域分光システムを構築することが可能になる。この目標達成のため

スピントロニック素子の表面に金属電極によるアンテナ構造を作製して最も放射効率の良い放射器形状を探索し、金属電極の膜厚をTHz波放射に対して最適化すると共に、放射検出効率の向上或いは偏光方向を自由に変更できる磁場バイアス技術を開発する。更にこれらの知見を基に高効率なTHz波放射が得られるスピントロニックアンテナ系を開発する。

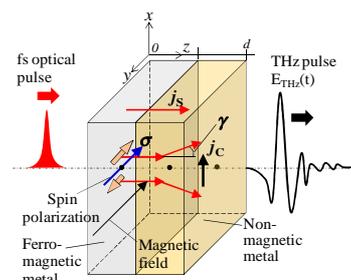


図1. ISHEに基づく金属ヘテロ構造からのTHz波放射模式図

3. 研究の方法

スピントロニック素子で発生した電磁波は自由空間との結合度改善により放射効率を改善できる。これを行うためには放射点近傍に金属製のアンテナ構造を配置するのが最も簡便である。また、スピントロニック素子は原理的に磁場バイアスをその放射過程に必要とするため、磁場バイアスの印加配向を変調することで放射電磁波の位相反転並びに偏光方向の変調制御を行う事が可能である。そこで、本研究では a) スピントロニック素子上にアンテナ電極を作製して放射効率を計測したうえで最適な形状を探索し、アンテナ電極の膜厚を最適化する。b) スピントロニック素子は磁場バイアス配向に依存した放射偏光面を持つため、磁場バイアスの方向を自由に変更できるアンテナマウント機構を開発し、また磁場バイアス変調を行う事でロックイン検出における検出効率を2倍に向上させ機械的な可動機構を持つ光チョップを排除し高速化できるようにする。最後に、c) a)及びb)の結果を基に実用に供することができるアンテナマウント、バイアスドライバ等を開発する。

上記の a) ~ c) の研究計画を並行して進め、励起レーザーパワーあたりの放射効率を現在よりも1桁以上向上を目標に研究を行い、3年目で成果を取りまとめる。

4. 研究成果

a) アンテナ構造による放射強度増強

スピントロニック素子は放射器としてのみ動作し、その測定には平行光系のテラヘルツ時間領域分光法(THz-TDS)を用いて行う。検出器はダイポール型の光伝導アンテナを使用した。アンテナ構造は、スピントロニック素子を構成するFe/Pt層の内、Pt層の厚さを制御することにより形成した。ボウタイ(Diabolo)型、円形型、長方形(ダイポール)型のアンテナ構造がフォトリソグラフィ法を用いて作製された。これら作製したアンテナの内、二つの例の構造模式図と写真を図2に示す。MgO基板上にFeを2nm、Ptを3nm積層したスピントロニック構造をアンテナの形状に作製し、放射器エレメントとなる場所のみPt層の厚さを増やして放射効率の向上を試みた。放射器エレメントの厚さを3nm、100nm、200nm、300nmと変化させて放射電場の peak to peak 値を測定した結果、200nmの時に放射

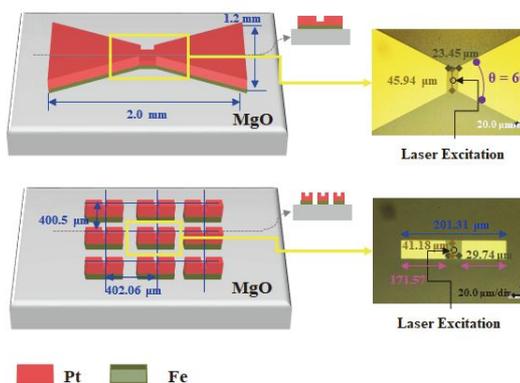


図2. 作製したアンテナ構造の模式図と写真、上がボウタイ型で下がダイポール型

効率が最大となり、アンテナ構造を持っていないスピントロニクス素子に対してボウタイ型が約 7.5 倍、ダイポール型が約 8 倍の放射電場増強を達成した。図 3 及び 4 に観測された時間波形とスペクトラムを示す。ダイポール型のスペクトラム帯域幅がボウタイ型より大幅に広いことが分かる。

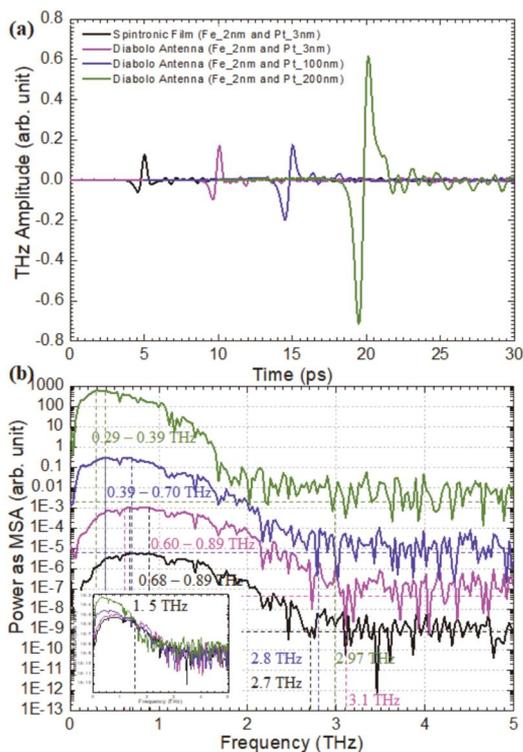


図 3. ボウタイ型放射エレメントの Pt 膜厚依存性、a)時間波形(一番左は放射エレメント無し)の基準アンテナ、b)スペクトラム

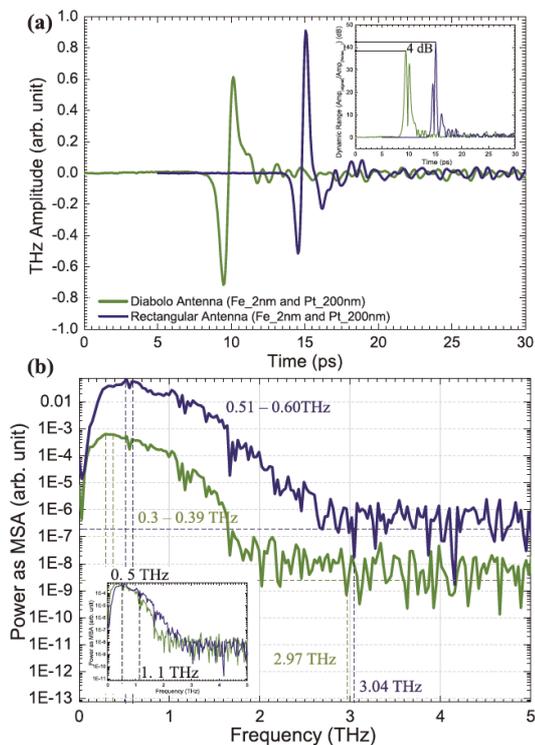


図 4. ダイポール型とボウタイ型の比較、a)時間波形、b)スペクトラム、a)の囲みはダイナミックレンジ、b)は二つを重ねて表示

b) 磁場バイアスによる検出効率の増強

磁場バイアスの変調を行うために電磁コイルを使用したアンテナマウントを製作した(図 5)。電磁コイルの中心へフェライトコアを挿入し、スピントロニクス素子の部分に最大で 30mT までの交流磁場を素子部へ印加できるように磁場回路を構成した。ロックイン検出するために、これまでは励起光に光チョッパにより変調を行ってきたが、磁場バイアスの極性を反転することにより検出効率を最大で 2 倍に増強できる。図 6 に示すのは光チョッパによる検出と交流磁場バイアスによる検出を行った時の時間波形である。交流磁場バイアスを行った時の振幅が理論値通り 2 倍に増強されていることが分かる。このときの変調周波数は 1kHz であるが、コイルの巻き数を調整することでより高い周波数へ対応することが可能である。

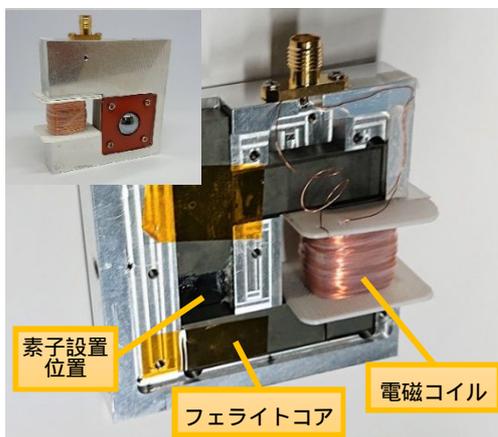


図 5. 交流磁場バイアスアンテナマウント、囲みは正面からの写真、素子は超半球高抵抗シリコンレンズの平面部に設置される

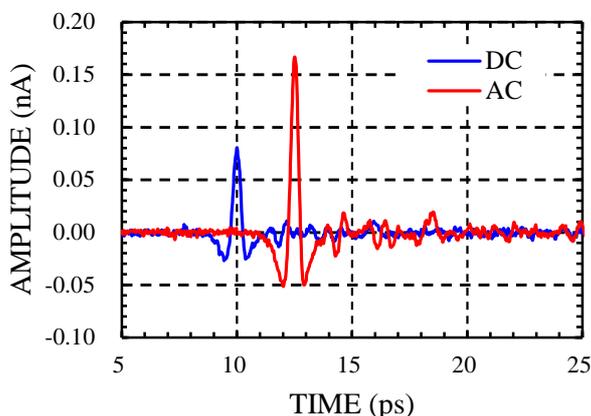


図 6. 光チョッパ(DC)と交流磁場バイアス(AC)により観測された時間波形、変調周波数は 1kHz

c) アンテナマウント系の開発

b) で作製した交流磁場アンテナマウントに加え、円環面に磁場配向が含まれるリング型のネオジウム磁石を磁場バイアス源とするアンテナマウントを作製した(図7)。リング磁石を回転することで磁場の配向を回転させることができるので、放射されるテラヘルツ波の偏光方向を自由に制御できる。図8に示すのは磁場の配向を90°間隔で0°~180°変えた時に観測された時間波形である。0°と180°では同一形状の時間波形が正負反転しており90°ではTHz波が消失している。このことは放射電磁波の偏光配向が回転していることを示している。このことは従来比較的難しかった偏光解析を簡単に行えるアンテナマウントの開発に成功したことを示している。

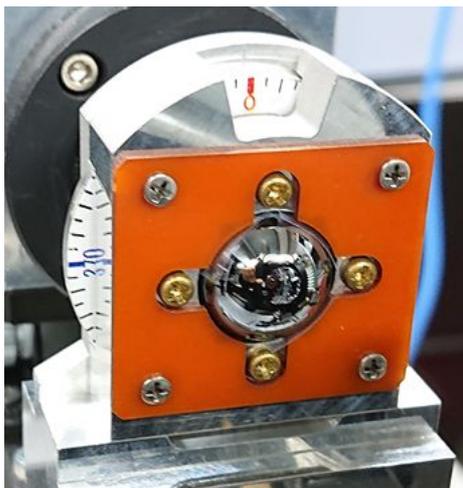


図7. 自由に偏光配向を可変できるアンテナマウント、内部にリング磁石が配置されている

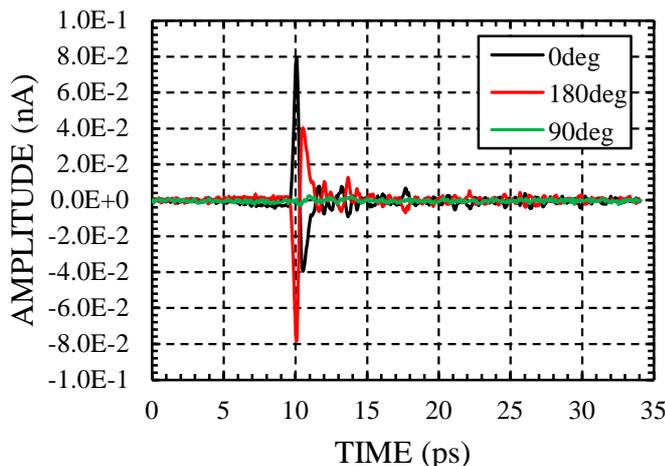


図8. 偏光可変型アンテナマウントによる各偏光角における時間波形、検出器に対して直交する偏光方向ではTHz波が消失している

最後に本題から離れるが、物性面での興味として小さな磁場バイアス強度の領域に於けるスピントロニクス素子の振る舞いを調べたので追記する。交流磁場バイアスアンテナマウントを使用すると磁場回路のヒステリシス特性を気にせず任意の磁場を印加した実験ができる。一般的には永久磁石を使用して磁場バイアスを印加しているため磁場強度に対する放射強度の依存性は興味を持たれるところである。図9は印加された磁場バイアスに対する放射電磁波の電場のグラフである。2mTまで略線形に増加しその後緩やかに飽和している。このことから、THz放射器としてスピントロニクス素子を使用するときには2mTあれば十分であることが分かった。

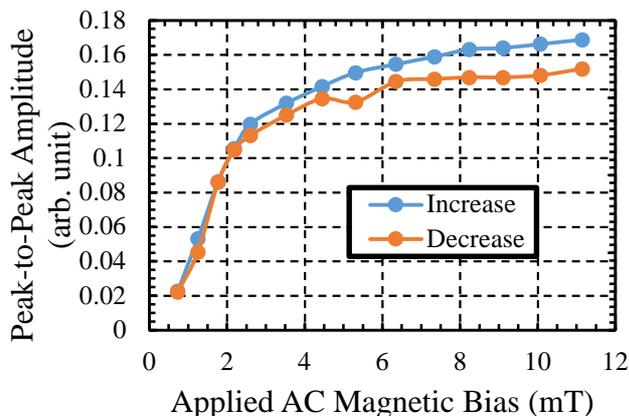


図9. スピントロニクス素子が持つ放射電磁場の磁場バイアス依存性、磁場強度を増加と減少で測定した結果

まとめ

研究成果 a) 及び b) を同時に採用すると、THz波放射の励起パワーあたりの効率を、現在最適化されたFe/Pt素子で得られているものよりも振幅ベースで16倍となり、増強度を1桁以上向上させるという当初の目的が達成された。c) については、実験機器開発時に製作したアンテナマウントや磁場コイルドライバ機器により目的は十分に達成されたと考える。更にこれらの結果を利用して偏光配向の制御やスピントロニクス素子の励起強度飽和特性といった物性も調査することができた。

[1] E. Saitoh et al., Appl. Phys. Lett. **88**, 182509 1-3 (2006).

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Miezel TALARA, Dmitry S. BULGAREVICH, Kana KOBAYASHI, Hideaki KITAHARA, Makoto WATANABE, and Masahiko TANI	4. 巻 33
2. 論文標題 Improvement of the Emission Amplitudes of Spintronic Terahertz (THz) Sources by Incorporating Antenna Structures	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 J. Jpn. Soc. Infrared Science & Technology	6. 最初と最後の頁 87,94
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	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4件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 Hideaki Kitahara, Katsuyuki Ishii, Miezel Talara, Takashi Furuya, Mary Clare Escano, Masahiko Tani, Dmitry S. Bulgarevich, Dongfeng He, Makoto Watanabe
2. 発表標題 Improvement in the Detection Efficiency of Terahertz (THz) Time-domain Spectroscopy (TDS) by applying an Alternating Magnetic Field Bias in Spintronic Emitter
3. 学会等名 2023 48th International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves (IRMMW-THz) (国際学会) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Miezel Talara, 北原英明, 石井克幸, 古屋岳, Mary Clare Escano, 谷正彦, Dmitry Bulgarevich, Dongfeng He, 渡邊誠
2. 発表標題 スピントロニック素子からのテラヘルツ波放射の磁場飽和特性
3. 学会等名 2024年第71回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 北原英明, 石井克幸, Miezel Talara, 古屋岳, Mary Clare Escano, 谷正彦, Dmitry Bulgarevich, Dongfeng He, 渡邊誠
2. 発表標題 スピントロニック放射器が放出するテラヘルツ波の交流磁場バイアスを用いた検出効率改善
3. 学会等名 2023年第70回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 石井克幸, M. Talara, M.C. Escano, 北原英明, 谷正彦, D. Bulgarevich, 渡邊誠
2. 発表標題 磁場変調による金属スピントロニック素子からのテラヘルツ波放射測定
3. 学会等名 2022年度日本物理学会北陸支部定例学術講演会
4. 発表年 2022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
研究分担者	谷 正彦 (Tani Masahiko) (00346181)	福井大学・遠赤外領域開発研究センター・教授 (13401)	
研究分担者	郭 其新 (Guo Qixin) (60243995)	佐賀大学・シンクロトロン光応用研究センター・教授 (17201)	
研究分担者	中嶋 誠 (Nakajima Makoto) (40361662)	大阪大学・レーザー科学研究所・准教授 (14401)	

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
---------	---------