

# メタマテリアルを活用した新たなテラヘルツ波発生素子の開発 (Development of new THz wave emission devices using metamaterial structures)

谷 正彦<sup>1</sup>, 舘岡 千柳佳<sup>1</sup>, Miezal Talara<sup>1</sup>, Valynn Mag-Usara<sup>1</sup>,  
北原 英明<sup>1,2</sup>, 古屋 岳<sup>1</sup>, 中嶋 誠<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 福井大学 遠赤外領域開発研究センター

<sup>2</sup> 大阪大学 レーザー科学研究所

## 1. はじめに

スピントロニックテラヘルツ (THz) 波発生素子は磁性(Ferro-magnetic)金属と非磁性(Non-magnetic)金属の薄膜2重層構造を持ち、光励起により磁性金属中で発生したスピン流が非磁性金属に流れる際に、逆スピンホール効果による実電流が誘起されることを利用して THz 波を発生させる(Fig.1 参照)。1~1.6  $\mu\text{m}$  帯のファイバーレーザーを励起光源として利用でき[1]、素子構造が簡単で、大面積励起が可能であるなど、テラヘルツ波発生素子として有利な特性を備えている[2]が、従来から用いられている光伝導アンテナの効率にはまだ及ばないため、THz 波発生効率の改善が課題となっている。

本研究の目的は、光励起によるスピン流を利用した高効率、広帯域なテラヘルツ (THz) 波発生素子 (スピントロニック THz 波発生素子) の開発である。そのために材料開発、薄膜構造の最適化、および素子形状にアンテナ構造やメタマテリアル構造を導入することによる放射効率の改善に取り組んでいる。アンテナ構造を導入することで、THz 波放射の空間への結合効率の改善および方向ゲインの改善を行うことができる。またメタマテリアル構造を導入することで、発生するテラヘルツ波の周波数を制御したり、メタマテリアル構造の共鳴周波数付近での発生効率を増強することを目指す。

前年度 (2018 年度) の共同研究では、磁性金属として Fe を、非磁性金属として Pt を用いたスピントロニック THz 波発生素子 (Fe/Pt 素子) の膜厚依存性および励起波長依存性などについての評価を行った。今年度 (2019 年度) の共同研究では、磁性金属

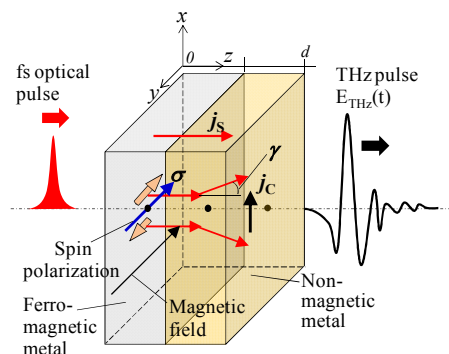


Fig. 1. Schematic diagram of spintronic THz emission from a bilayer consisting of ferromagnetic (FM) and non-magnetic (NM) thin films.

として Co を、非磁性金属として Pt を用いたスピントロニック THz 波発生素子 (Co/Pt 素子) の膜厚依存性、および Fe/Pt 素子との THz 波発生効率の比較を行った。

## 2. 素子作成および評価装置

Table 1 に示す 3 種類 (4 個) の Co/Pt 素子を試作した。基板には融解石英 (厚さ 0.5mm) を用い、室温下、超真空下でレーザースパッタリング法によって成膜した。比較に用いた Fe (2nm)/Pt (3nm) 素子は佐賀大学の郭其新教授のグループにより MgO 基板 (厚さ 0.5mm) 上に電子ビーム蒸着法により成膜したものである。

素子評価にはモード同期チタンサファイアレーザー (パルス幅が約 80 fs, 繰り返し周波数 82 MHz, 中心波長が 800 nm) を励起光源とするテラヘルツ時間領域分光システムを用いた。スピントロニック素子からの THz 波検出には LT-GaAs 基板のダイポール型光伝導アンテナを用いた。

Table 1. Spintronic THz devices made with Co/Pt bilayers

Sample No.	1	2	3	4
Co thickness [nm]	10	10	5	5
Pt thickness [nm]	2.5	5	5	5

## 3. 素子の評価結果

Fig. 2 に Co(10nm)/Pt(2.5nm) の素子 (Sample 1) と Co(10nm)/Pt(5nm) の素子 (Sample 2) からの THz 放射波形の比較を示す。この実験では、素子には Si 製の超半球レンズを装着 (基板側が Si レンズの平坦面に接触) し、約 15mT の磁場を印加し、平均 20mW のポンプ光を非磁性体側から入射させ測定を行った。この結果より Pt 膜厚は 2.5nm よりも 5nm の場合のほうが THz 波放射効率が低いことがわかる。

Fig. 3 に Co(10nm)/Pt(5nm) の素子 (Sample 2) と Co(5nm)/Pt(5nm) の素子 (Sample 3 および Sample 4) からの THz 放射波形の比較を示す。この測定では、平均パワー 40 mW のポンプ光を非磁性体の Pt 側から入射し、基板側に放射される THz 波を測定した。

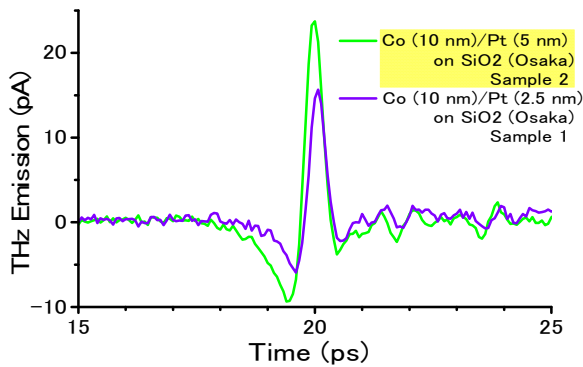


Fig. 2. THz emissions from Co(10nm)/ Pt(2.5nm) (Sample 1) and Co(10nm)/Pt(5nm) (Sample 2) with Si hyper-hemispherical lens. The pump power was 20 mW.

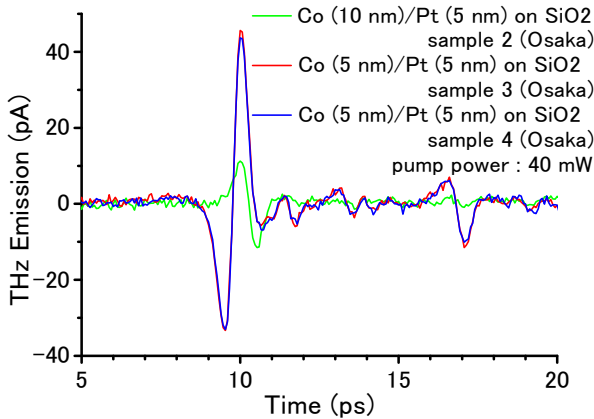


Fig. 3. THz emissions from Co(10nm)/Pt(5nm) (Sample 2), Co(5nm)/Pt(5nm) (Sample 3), and Co(5nm)/Pt(5nm) (Sample 4) without Si hyper-hemispherical lens. The pump power was 40 mW.

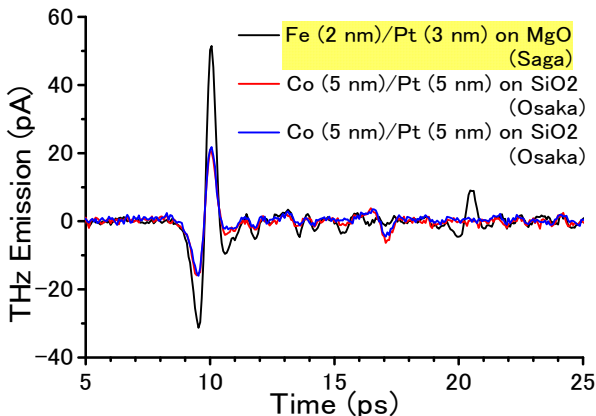


Fig.4. THz emissions from Fe(2nm)/Pt(3nm) (from Saga University), Co(5nm)/Pt(5nm) (Sample 3), and Co(5nm)/Pt(5nm) (Sample 4) without Si hyper-hemispherical lens. The pump power was 20 mW.

また超半球 Si レンズは用いなかった。この結果から Co 膜厚 5nm、Pt 膜厚 5nm の場合のほうが、Co 膜厚 10nm、Pt 膜厚 5nm の場合よりも THz 波放射効率が 高いことがわかる。以上の結果から Co/Pt 素子の最適 な膜厚は、Co 膜厚約 5nm、Pt 膜厚約 5nm である といえる。

Fig. 4 に Fe(2nm)/Pt(3nm)の素子 (佐賀大学提供) と Co(5nm)/Pt(5nm)の素子 (Sample 3 および Sample

4) からの THz 放射波形の比較を示す。この測定で は平均パワー40 mW のポンプ光を非磁性体の Pt 側 から入射した入射し、基板側に放射される THz 波を 測定した。また超半球 Si は用いなかった。この結果 から膜厚が最適化された Fe/Pt 素子と Co/Pt 素子では、 前者のほうが THz 波放射効率が 高いことがわかる。 ただし、THz 波放射効率は用いる基板や、成膜方法 によっても大きく異なることが知られており、必ず してもこの結果が、材料特性として、Fe/Pt 素子のほう が Co/Pt 素子よりも THz 波放射効率が 良いことを示 しているとは限らないことに注意すべきである。

#### 4. 構造を持った素子の設計・試作

素子形状が放射効率および放射スペクトルに与える 影響を調べるために、Fig. 5 に示す形状の Co(5nm)/Pt(5nm) 薄膜素子を設計、試作した。今後これら の素子の評価を行い、次いでより複雑なメタマ テリアル構造の設計と試作を行う。

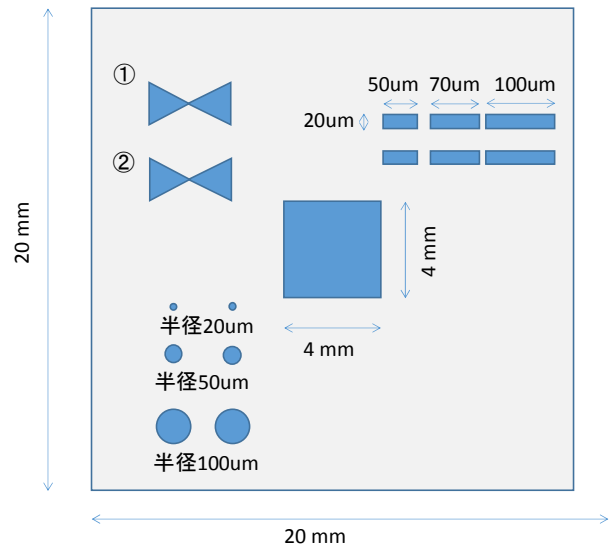


Fig. 5. Structures designed and fabricated Co(5nm) / Pt(5nm) spintronic bilayer devices on a fused silica substrate (thickness 0.5mm). The diablo structure ① and ② has a length of 2 mm and the narrowest width is 50 μm and 20 μm, respectively.

#### 4. まとめと今後の展望

本年度に行った素子の試作およびその評価結果から、基板と成膜方法に違いがあるものの、膜厚最適化した条件では、Co/Pt 素子よりも、Fe/Pt 素子のほうが THz 波放射効率が 高いことが分かった。 今後は Fe/Pt 素子と Co/Pt 素子それぞれにアンテナ構造およびメタマテリアル構造を導入し、THz 波放射効率および放射スペクトルに与える影響を評価する。

#### REFERENCES

- [1] Papaioannou, *et al*, IEEE Trans. Magnetics, **54**, 9100205 (2018).
- [2] Torosyan, *et al*, Scientific Reports, **8**, 1311 (2018).