

光照射スピン流に基づいた金属磁性体ヘテロ構造からの 広帯域テラヘルツ波光源の開発

所属： 大阪大学 レーザー科学研究所

助成対象者： 中嶋誠

共同研究者： Valynn Katrine Pendang Mag-usara

概要

金属磁性体と非磁性磁性体のそれぞれ厚さ数ナノメートルのヘテロ構造は、広帯域の新しいテラヘルツ光源として期待されている。本研究では、マグネトロンスパッタリングで磁性体ヘテロ構造を作製し、広帯域で高強度のテラヘルツ放射光源の開発を行った。膜厚抵抗の評価により精密に膜厚制御を行い、制御前と比べ5倍以上の高強度化に成功した。ITO構造を用いて、後方に放射された成分を前方に放射された成分と加算的にコヒーレントに重ね合わせることにさらなる放射強度の増大を得ることに成功した。

Abstract

We developed broadband terahertz emitter based on the magnetic heterostructure with metallic and non-metallic ultrathin magnetic materials. We fabricated the terahertz emitter by using the magnetron sputtering method. We controlled the film thickness of each magnetic layers by measuring the sheet resistance of the films. We obtained more than 5 times enhancement of the radiated terahertz intensities. We succeeded the enhancement of the radiated terahertz intensity by adding the radiation in backward to the main radiation component using the ITO film structure.

研究内容

テラヘルツ波は、次世代の通信帯域”Beyond 5G”・”6G”といわれる今後ますます需要が高まる領域であり、通信をはじめ、センシングやイメージングなどの研究が活発に行われている。本研究では、大口径の試料が作製可能なテラヘルツイメージング用の光源に適した、磁性体ヘテロ構造によるスピン流に基づいたテラヘルツ光源[1]の開発を実施した。

金属磁性体 (Co, Fe など) と非金属磁性体 (Pt など) 薄膜のヘテロ構造にフェムト秒パルスレーザーを照射することで、超広帯域なテラヘルツが放射されることが報告されており、これは光照射によって生じるスピン流がヘテロ界面で逆スピンホール効果 (ISHE) が生じることでテラヘルツ波が発生するものである (図 1 参照)。この新方式のテラヘルツ波光源は、①薄く共鳴吸収がないため広帯域化が可能、②ダメージ閾値が高く・素子の面積化が容易、などの利点を有する。

本研究では、実際にマグネトロンスパッタリングを用いて、大口径の試料の作製を視野に、ガラス基板を用いて、その上に磁性体ヘテロ構造試料の作製を行い、作製した放射光源から放射されるテラヘルツ波時間波形をポンププローブ分光法を用いて測定し、その結果を放射素子作製にフィードバックすることで、高強度のテラヘルツ光源の開発を実施した。磁性金属としては、Co よりも高強度が期待される Fe を用いた。非磁性金属としては、大きなスピンホール角を有する Pt を用いた。図 2 は実際にガラス基板上に作製された磁性体ヘテロ構造テラヘルツ放射素子であり、薄いために可視光が透けている状態であることが確認できている。右の写真は、一辺 3cm 角の放射素子であり、大型の光源の作製に成功している。

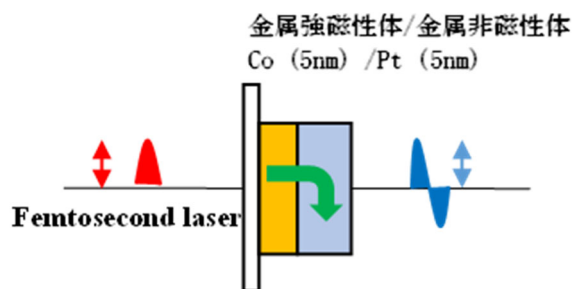


図 1 磁性体ヘテロ構造における光励起スピン流からのテラヘルツ波放射の模式図



図 2 マグネトロンスパッタリングで作製した磁性体テラヘルツ光源

さらに大型の光源の作製の目処も立っている状態になりつつある。

また、この光源は、金属磁性体と非金属磁性体との界面で生じるスピホール効果が放射効率に強く起因するため、膜厚によって、その放射強度が強く依存する[1]。我々はこの膜厚の変動を十分に減少させ、最適な厚みのテラヘルツ放射素子の作製を行った。厚みを制御するために、膜厚抵抗を測ることで、ナノメートル以下の精度で膜厚制御を行い、試料作製を行った。これらの最適なパラメータを得るために、厚みの異なる試料を50枚以上作製し、その放射強度を計測し、評価を行った。1枚の試料を作製するのに、丸3日ほどかかるために、この結果を得るためには多くの時間がかかっている。その結果、Feのシート抵抗 $4300 \Omega/\square$ 、Ptのシート抵抗 $130 \Omega/\square$ の近傍において、テラヘルツ強度が最も強

くなることが分かった。この膜厚制御により制御前の状態と較べて、放射強度が5倍以上に増強させることに成功した。実際の厚みについては、透過型電子顕微鏡(TEM)で測定を実施し、3 nm付近であることを確認している。作製されたテラヘルツ放射素子にフェムト秒パルスレーザーを照射することによって、放射されたテラヘルツ波時間波形を図3に示す。モノサイクル状の特徴的の放射波形が得られていることが分かる。そのフーリエ変換スペクトルよりその放射帯域は6 THzと広帯域なテラヘルツ放射光源であることが確認された。

さらに放射強度の増大に向けて、アンテナ構造の導入や、複層構造によるテラヘルツ強度の増強を行った。ディアプロ型アンテナを作製し、テラヘルツの放射強度から磁気分布を調べた成果については、国際会議で報告を行った(口頭発表2)。後方に放射されたテラヘルツ波を、ITO構造を用いて、前方に反射し、前方に放射された放射成分とポジティブに重ね合わせるにより、さらなる放射強度の増強にも成功している(口頭発表1)。本成果についても、論文投稿の準備中である。

厚さ数ナノメートルの磁性体ヘテロ構造のテラヘルツ光源は高強度で広帯域、大面積化

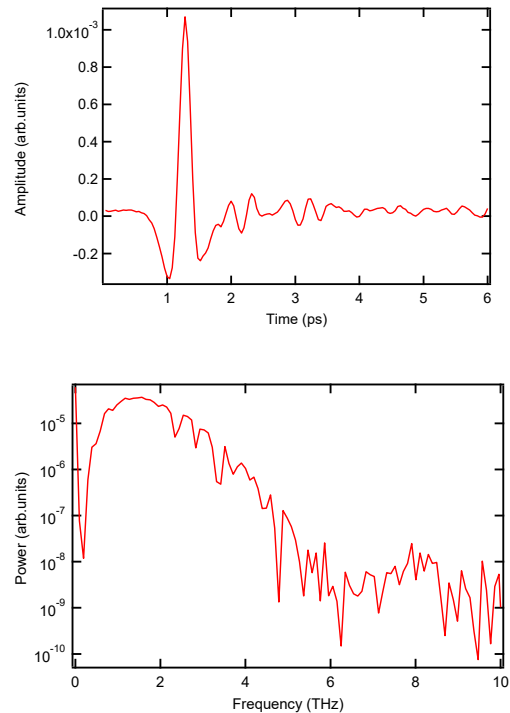


図3 観測されたテラヘルツ放射波形とそのスペクトル

可能であり、応用研究への展開が非常に期待される有望なテラヘルツ光源であることが分かった。

引用文献

1. H. Qiu, K. Kato, K. Hirota, N. Sarukura, M. Yoshimura, and M. Nakajima, *Optics Express* 26, 15247-15254 (2018).

本助成に関わる成果物

[論文発表]

投稿準備中

[口頭発表]

1. “ITO構造を利用した磁性体超薄膜テラヘルツ光源の高強度化”, 第69回日本応用物理学会春季学術講演会, (口頭発表、3/25, 25p-D315-7) (青山学院大学, 2022.3.22-26), 松永大陽, 江尻 宏平, 劉 爽, 鐵川 憧英, Mag-usara V. K. P., Agulto V. C. 西谷 彰二郎, 西谷 幹彦, 吉村 政志, 中嶋 誠.
2. "**Terahertz Magneto-Optic Sensing/Imaging using a Diabolo-Shaped Antenna with Thin Spintronic Layer between its Flares**", Miezal Legurpa Talara, Dmitry Bulgarevich, Chiyaka Tachioka, Valynn Katrine Mag-usara, Hideaki Kitahara, Makoto Nakajima, Makoto Watanabe, Masahiko Tani, JSAP-OSA Joint Symposia 2021 [Oral, 11p-N404-8], 2021.9.10-13, (Online), OSA Technical Digest (Optical Society of America, 2021),
3. "**Pt/Fe Heterostructure on Plano-convex Glass Lens Substrate as a Self-focusing Spintronic Terahertz Emitter Device**", Valynn Katrine Magusara¹, Shoei Tetsukawa¹, Shuang Liu¹, Verdad Agulto, Mikihiko Nishitani, Masahiko Tani, Makoto Nakajima, JSAP-OSA Joint Symposia 2021 [Oral, 12p-N405-8], 2021.9.10-13, (Online), OSA Technical Digest (Optical Society of America, 2021),
4. "**Azimuthal angle dependence of terahertz emission intensity for the epitaxial magnetic heterostructure**", M. Nakajima, T. Shoei, Liu Shuang, T. Matsunaga, V. Mag-usara, V. Agulto, M. Kohda, T. Ryan, H. Gamou, Y. Du, S. Karube, J. Nitta, M. Asakawa, and M. Tani, JSAP-OSA Joint Symposia 2021 [Oral, 12p-N405-7], 2021.9.10-13, (Online), OSA Technical Digest (Optical Society of America, 2021).

[ポスター発表]

1. **“Spintronic Terahertz Emission And Magnetic Anisotropy Of Epitaxial Platinum Heterostructures On MgO(110) Substrate”**, S. Tetsukawa, V.K. Mag-usara, V. Agulto, M. Kohda, R. Thompson, H. Gamou, Y. Du, S. Karube, M. Tani, M. Asakawa, M. Nakajima, 46th International Conference on Infrared, Millimeter and Terahertz Waves (IRMMW-THz 2021) Aug. 29- Sep.3 2021, (WE-PO-59 5103571, 9/1 poster), (Online conference).
2. **“Pt/Fe On Plano-convex Glass Substrate As A Terahertz Emitter With Built-in Focusing Lens For Spintronic Terahertz Radiation”**, V.K. Mag-usara, S. Tetsukawa, S. Liu, V.C. Agulto, M. Nishitani, M. Tani, M. Nakajima, 46th International Conference on Infrared, Millimeter and Terahertz Waves (IRMMW-THz 2021) Aug. 29- Sep.3 2021, (WE-PO-79 5103232, 9/1 poster), (Online conference).

[その他]

なし