OUKA
The University of Osaka
Institutional Knowledge Archive

Title	Research on Terahertz Sources Based on Spin Currents and Terahertz Detection Methods
Author(s)	邱, 紅松
Citation	大阪大学, 2018, 博士論文
Version Type	
URL	https://hdl.handle.net/11094/70764
rights	
Note	やむを得ない事由があると学位審査研究科が承認したため、全文に代えてその内容の要約を公開しています。全文のご利用をご希望の場合は、大阪大学の博士論文についてをご参照ください。

The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA

https://ir.library.osaka-u.ac.jp/

The University of Osaka

Form 3

Abstract of Thesis

Name （邱紅松）	
Title	Research on Terahertz Sources Based on Spin Currents and Terahertz Detection Methods （スピン流に基づいたテラヘルツ光源と検出法に関する研究）

Abstract of Thesis

Terahertz (THz) radiation generally refers to the electromagnetic wave from 0.1 to 10 THz. In recent years, THz radiation has been widely used in many research fields such as semiconductor characterization, imaging, chemical sensing, and spin dynamics. To meet various needs, researches keep developing new THz emission and detection techniques. In this thesis, we introduce the THz emitters based on the spin currents and detection techniques for THz magnetic near-fields and strong THz beams.

The emission with a bandwidth of 1.5 THz based on the spin current in the ferromagnetic heterostructure Co/Pt is demonstrated. The spin transient launched by the NIR femtosecond laser pulse in the Co/Pt is converted into the in-plane charge current due to the inverse spin Hall effect, which gives rise to the THz emission towards free space. The dependence of the THz emission on the Pt-layer thickness is investigated. To optimize the geometry structure of the new type of emitter, we developed the theoretical model by carefully analyzing the spin transport. Our model reveals the importance to take into account the interfacial spin loss. It can be used to analyze more complex heterostructures.

Besides, a magnetically and electrically polarization-tunable THz emitter that integrates a ferromagnetic heterostructure and large birefringence liquid crystals is demonstrated. The emitter is pumped by NIR femtosecond laser pulses. The heterostructure Co/Pt and the liquid crystal cell act as the broadband THz source and the phase retarder between the ordinary and extraordinary waves, respectively. The metallic Co/Pt layers are also re-used as the electrode on the front side of the liquid crystal cell in addition to the THz source. The few-layer porous graphene with a high transmittance serves as the rear electrode. The polarization state of the THz wave is switched between linear and circular polarization through changing the direction of the external magnetic field. The phase retardation is continuously adjustable over a range of π/2 by applying a voltage lower than 8 V on the electrodes when the frequency is higher than 1 THz. This economical, compact, broadband, and easy-to-regulate THz emitter can be widely used in polarization-sensitive research and engineering applications.

In addition, the direct detection of the enhanced THz magnetic near-field using the magneto-optic sampling with a Tb3Ga5O12 crystal is demonstrated. The substantial enhancement of the magnetic near-field is achieved by the combination of a tapered metallic waveguide and a metamaterial resonator. The magnetic near-field at the resonant frequency is enhanced by more than 30 times through the combination of the waveguide and the resonator. The peak amplitude of the magnetic field with a damped oscillation waveform in the time domain is up to 0.4 T. Various resonant frequencies can be detected by adopting different resonator designs. This direct detection technique can be used to monitor ultrafast spin dynamics that are excited by the THz magnetic near-fields.

At last, the visualization of strong THz beams by utilizing the yellow emission of the high-conductivity ZnO crystal is demonstrated. The strong THz beam is provided by gyrotrons with output power up to 60 W. During strong THz beam irradiation, the high-conductivity ZnO crystal exhibits intense emissions with a spectrum peak of around 2 eV (600 nm) and a longer wavelength tail. The spatial distribution of the yellow emission reflects the beam pattern. Since the intensive emission is visible for bare eyes and can be easily recorded by digital cameras, the emission from high-conductivity ZnO crystals can be utilized for the quick diagnosis of strong THz beam patterns and positions.

様式 7

論文審査の結果の要旨及び担当者

氏　名　（　邱 紅松　）	
論文審査担当者	（職）　氏　名 主 査　教授　猿倉 信彦 副 査　教授　村田 勲 副 査　准教授　中嶋 誠

論文審査の結果の要旨

テラヘルツ波は、フェムト秒パルスレーザー励起による発生方法が開発されて以来、その研究や技術は急速に進展しており、応用展開がまさに図られようとしている。またその分野も広がりを見せ、テラヘルツ磁場をもちいたスピン分光や、スピン流に起因したテラヘルツ放射など新しい機構の新デバイスも開発されており、新たな展開もおこなわれている。近年、高いピーク電場・磁場を有する高強度テラヘルツ波パルスの開発が進んでおり、テラヘルツ波パルスをもちいた物性制御の研究が広く展開されようとしている。本論文では金属磁性体のヘテロ構造によるスピン流に起因したテラヘルツ放射デバイスの開発、さらにそれに液晶層を加えることで外部磁場・電場により高い偏光選択自由度を有する光源の開発、金属導波路や金属微細共振器を利用することによる高強度なテラヘルツ磁場成分の検出、テラヘルツ励起による可視域の発光現象の観測とテラヘルツイメージングへの応用など、これら新しいテラヘルツ波の光源や検出方法に関して、その特性や機構について議論している。

本論文第一章では、本研究の背景であるスピン流に基づいたテラヘルツ波発生、偏光制御テラヘルツ光源、テラヘルツ近接磁場の検出、高強度テラヘルツ光源のビームイメージングについて概説している。

本論文第二章では、本研究における基礎技術であるテラヘルツ波の発生・検出法について紹介している。特に主要な技術である$LiNbO_3$結晶によるパルス波面傾斜法による高強度テラヘルツ波発生方法、液晶による位相変調器の仕組み、レーザー励起によるスピン流の発生方法や発生したスピン流のダイナミクス、磁性体・非磁性体界面で生じるスピンホール効果、金属導波路による超収束効果、金属微細共振器(メタマテリアル)近傍における電磁場増強について、基礎的な理論や背景を詳細に説明している。

本論文第三章では、スピン流に基づいたテラヘルツ波発生の実験結果やその特性について調べた結果を述べている。試料であるコバルト・プラチナ(Co/Pt)は、厚さナノメートルオーダーの薄膜型ヘテロ構造であり、石英基板上にスパッタリングによって自ら作成したものである。この試料にチタンサファイアレーザーパルス(中心波長800 nm)を照射することによって、透過配置において、テラヘルツ波の発生を確認し、その電場波形を電気光学効果(EOサンプリング)によって検出している。この光源は従来の半導体や非線形光学結晶の試料にくらべて、厚み数10 nmと非常に薄く、高効率にテラヘルツを発生可能であることが分かっている。また、このCo/Ptヘテロ構造試料からのテラヘルツ波放射について、基本的な特性を調べている。励起強度依存性、磁場印加方向によるテラヘルツ波放射波形の変化、放射強度のPt層の厚み依存性等である。特に、Pt層の厚み依存性については、その厚みを0.5 nmから20 nmに渡り詳細に調べている。これはスピンホール効果が実効的に働く有効な厚みを調べるだけでなく、応用的にも最適な厚みを調べることで、光源の高強度化にも寄与するものである。厚み5 nmまでは、Pt層を厚くすることで、テラヘルツ強度は劇的に増大することが分かっている。この増強因子については、Co層からPt層へのスピン流の注入効率が増大することによることが計算との比較によって明らかになっている。また5 nmより厚くしたときには，テラヘルツ波のPt層での吸収により放射強度はゆるやかに減衰していくことが明らかになっている。Pt/Coヘテロ構造からのテラヘルツ波放射について、実験的に特性を明らかにするとともに、その振る舞いについて理論的にも説明を行い、新たな知見を得ている。

本論文第四章では、三章で開発したCo/Pt試料に液晶構造を付け加えることによって、外部電場・磁場によって、自

在にテラヘルツ波の偏光を制御するデバイスの開発を行っている。テラヘルツ帯で高い複屈折率を有するNJU-LDn-4液晶を用い、また一方の電極に試料端面を利用することで、従来の液晶を用いた素子に比べて、低電圧で動作するデバイスの開発に成功している。実験では、時間波形の変化を示すだけでなく、0 - 1.5 THz の間において、その楕円率の変化を示している。スピン分光をはじめとした偏光に敏感な対象に有効な偏光制御光源の開発に成功したと言える。

本論文第五章では、金属導波路および金属微細共振器を用いることでテラヘルツ磁場成分の近接場検出を実施している。近年、高強度のテラヘルツ波パルスの磁場成分をもちいて、スピン分光やスピン制御の研究が行われており、高強度な磁場の発生・検出は非常に重要である。金属V溝形導波路の超収束効果により電場成分を波長以下の空間に収束させ、金属共振器によって、共振器近傍の磁気光学結晶上に近接場磁場を発生させる。その発生した磁場成分を磁気光学効果(MOサンプリング)によって検出し、テラヘルツ波パルスの時間波形の取得に成功している。金属微細構造には、ダブル分割リング共振器を用いることで、検出感度の増大に寄与している。最終的に共鳴周波数において、入射磁場の30倍の磁場成分が検出された。また時間波形としては、ピーク振幅0.4 テスラを有する狭帯域テラヘルツ波が得られることが明らかになった。このような高強度のテラヘルツ帯の磁場の発生はこれまで行われておらず新規の試みであり、今後のスピン制御等への応用が期待されるものである。

本論文第六章では、伝導性酸化亜鉛(ZnO)にジャイロトロンから生じる高強度のテラヘルツビームを照射することによって、可視域の黄色の発光が生じることが確認されている。この発光は単なる熱上昇起因の発光ではないことも確認されている。この発光現象を利用することで、低エネルギー領域の電磁波であるテラヘルツ波を可視域の発光によってイメージングすることが可能になると期待され、新たなテラヘルツイメージングデバイスとみることも可能であり、今後の応用展開が期待される。

本論文第七章では、本論文を総括するとともに今後の応用を含めた可能性について示唆している。

本論文は、スピン流に基づいたテラヘルツ光源をはじめとして、それを応用した偏光制御光源、導波路・微細共振器を用いることによるテラヘルツ磁場の近接場検出や、高強度テラヘルツビーム用のイメージングデバイスの開発など、新規の物理に基づいた光源開発から応用デバイスの提案と広い範囲での電磁気学・テラヘルツ工学に関する成果を含んでいる。ここで得られた知見は、電磁気学、物性物理学や光科学・応用光学、テラヘルツ波工学等の関連分野の科学および技術の発展に寄与するものである。よって、本論文は博士授与に値する論文であると認める。