



| | |
|--------------|--|
| Title | THz Emission Microscopy on GaN-based Heterostructures |
| Author(s) | Mannan, Abdul |
| Citation | 大阪大学, 2022, 博士論文 |
| Version Type | |
| URL | https://hdl.handle.net/11094/88058 |
| 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

Abstract of Thesis

| | |
|---|---|
| Name (ABDUL MANNAN) | |
| Title | THz Emission Microscopy on GaN-based Heterostructures (テラヘルツ放射顕微鏡を用いた窒化ガリウムヘテロ構造の評価) |
| <p>Abstract of Thesis</p> <p>Terahertz (THz) emission microscopy is a versatile tool that can probe the ultrafast carrier dynamics in a non-contact and non-invasive fashion in optically excited electronic materials and devices, which provides precise local information. This technique can extract the especial behavior of ultrafast carrier dynamics, which is inaccessible with traditional optical and optoelectronic approaches in characterizing semiconductor surfaces and interfaces. Recently, this technique is approaching real onsite applications in semiconductor research and development. However, to further explore the charge transport in band bending regions and to observe the multifunctional optical response in the complex multiple layer heterostructure semiconductor materials. A better understanding of THz generation and emission from semiconductor surfaces is required. The primary cause of the THz emission from wide bandgap semiconductors is the surge current perpendicular to the surface of the semiconductor. Therefore, the optical excitation angles of the incident femtosecond laser and THz detection in THz emission microscopy are used around 45 degrees. That is due to the radiation patterns of dipoles considering Snell's law and phased-array effect, the latter of which has not been studied yet.</p> <p>In this work, we first investigated how the phased-array affect the THz emission from the semiconductor surfaces. We studied this optical phased-array effect in THz emission from semiconductor surface by angular dependence THz emission mechanism from optically excited THz oscillating dipoles in semiconductor surfaces at focusing and defocusing conditions. We observed that, at the focusing conditions, the THz emission remains similar to a point source radiation pattern. At the defocusing conditions, a pronounced directivity is observed for higher frequencies. Later, we studied ultrafast carrier dynamics in GaN single layer, GaN-based heterostructures, and GaN-based multiple quantum wells (MQW) structures using THz emission microscopy. The THz emission microscopy on a single layer reveals the majority of carrier types in GaN single layer. The THz emission microscopy on multilayer GaN-based heterostructure shows the signatures of probing multiple heterostructure interfaces. The THz emission microscopy on GaN-based MQW structures reveals multifunctional optical responses attributed to electronic and lattice dynamics. We observed, ultrafast dynamical screening of built-in bias in quantum wells, capacitive charge oscillations of excited carriers, and coherent acoustic phonon-driven polarization surge at GaN interfaces.</p> <p>This thesis is composed of seven chapters. Chapter 1 gives the details of the motivation of this research work. Chapter 2 reviews the principle of THz generation from a semiconductor and explains the general concepts regarding THz generation from semiconductor surfaces. Chapter 3 deals with the study of the phased-array effect from optically created THz transient dipoles in semiconductor surfaces. Chapter 4 deals with the THz emission microscopy on differently doped single layer GaN layers. Chapter 5 focuses on the THz emission microscopy on GaN-based field-effect transistor (FET) and high-electron-mobility-transistor (HEMT). Chapter 6 focuses on the THz emission microscopy on GaN-based multiple quantum well structures (MQWs). Finally, chapter 7 summarizes the thesis based on the findings from THz emission microscopy on GaN-based heterostructures.</p> | |

論文審査の結果の要旨及び担当者

| 氏 名 (ABDUL MANNAN) | | |
|----------------------|---------|-------|
| | (職) | 氏 名 |
| 論文審査担当者 | 主 査 教授 | 斗内 政吉 |
| | 副 査 教授 | 片山 竜二 |
| | 副 査 准教授 | 村上 博成 |
| | 副 査 教授 | 森 勇介 |
| | 副 査 教授 | 尾崎 雅則 |
| | 副 査 教授 | 近藤 正彦 |
| | 副 査 教授 | 森 伸也 |
| | 副 査 教授 | 廣瀬 哲也 |

論文審査の結果の要旨

レーザーテラヘルツ (THz) 放射顕微鏡 (LTEM) は、レーザービーム径の空間分解能で電荷キャリアの局所的な情報を調べることができるという点で注目されている。LTEM を使えば、フェムト秒 (fs) レーザーパルスで励起されたさまざまな電気材料からの THz 放射像をイメージングすることができる。LTEM では、半導体材料からの THz パルスは、半導体のバンドギャップよりも高い光子エネルギーを持つレーザービームの光励起によって生成される。この光励起により、電荷キャリアが発生し、誘導光電流が発生し、誘導光電流の時間変化率によって、THz パルスが発生する。半導体材料で発生する光電流は、半導体材料内の局所的な電界に依存するため、THz 放射も同様に変化する。これらの THz パルスの振幅をマッピングすることで、半導体材料の局所電場を可視化することができる。

近年、THz 放射分光法 (TES) 技術は、半導体の研究開発分野において、フェムト秒レーザーの入射と THz 検出器の光励起角度が 45 度前後で使用されるようになり、実際の現場での応用が始まっている。これは、スネルの法則とフェーズドアレイ効果を考慮した双極子の放射パターンによるものであるが、後者についてはまだ研究されていない。本研究では、まず、フェーズドアレイが半導体表面からの THz 放射にどのような影響を与えるかを、角度依存性とレーザービーム径依存性に基づいて理論的および実験的に研究し、その後、単層の GaN 表面、多層の GaN ベースのヘテロ構造、GaN ベースの量子井戸構造を含む GaN ベースのヘテロ構造からの THz 放射特性を観察している。主な研究成果を以下に要約する。

1. 集束および非集束条件下で、光学的に励起された半導体表面からのテラヘルツ波放出機構の角度依存性におけるフェーズドアレイ効果を調べている。遠方からのテラヘルツ波の放出を有限差分時間領域の数値シミュレーションで評価し、概念実証として実験結果と比較している。集束条件では、テラヘルツ放射は点光源に近い放射パターンを維持するが、非集束条件では、より高い周波数で顕著な指向性をもつことを観測している。

2. ドープされた異なる単層 GaN 層における超高速光キャリアダイナミクスを、TES を用いて研究している。光励起によるドープの異なる GaN 膜からの超高速キャリアダイナミクスに基づく THz 放射は、自由空間の組み込みフィールドに基づいて、光励起されたキャリアが表面近くで内側または外側にドリフトしていることを明らかにしている。また、GaN 薄膜の空乏層が浸透深さに比べて非常に薄いにもかかわらず、バンドギャップよりも高い光子エネルギーで光励起されたキャリアによる THz 発光は、光デンバー効果とは関係なく、サージ電流メカニズムに起因することを議論している。THz 放射振幅の極性から、n 型 GaN 薄膜では、電子が内部方向に向かって走行し、p 型 GaN 薄膜では、表面に向かって走行し、また、p 型 GaN 薄膜では、バンドギャップよりも小さいエネルギーの光によるテラヘルツ波の放出が観測され、これは伝導帯端近くの窒素空孔によって形成された薄い縮退帶での光キャリアの拡散によるものであると結論付けている。

3. GaN をベースにした多層ヘテロ構造からのポンプ波長可変のテラヘルツ波発光は、内蔵された電界/界面電位、各

界面のバンドベンディングプロファイル、光励起の浸透深さに基づいており、FET および HEMT 構造内部の複数のヘテロ構造界面をプローブできる。FET 構造からは、GaN のバンドギャップを超える、あるいは下回るさまざまな光子エネルギーにおいて、フリップフロップ型のテラヘルツ波を放出している。このフリップフロップ THz 放射は、サンプル内の異なるバンドベンディングプロファイルを持つ複数の界面から THz 放射が発生していることを示している。HEMT 構造では、光励起レーザーの様々な波長において、THz 放射にフリップフロップの傾向は見られないことを見出している。

4. 量子井戸の内蔵バイアスの超高速動的スクリーニング、励起キャリアの容量性電荷振動、GaN 界面でのコヒーレント音響フォノンによる分極サージなどが観測できる。

以上のように、フェーズドアレイ効果の観測は、THz 分光法やイメージングの応用を高め、GaN 単層および GaN ベースのヘテロ構造における様々な光子エネルギーでの THz 放射観測は、複数の界面における異なるバンドベンディング特性に基づく超高速キャリアダイナミクスを非接触・非侵襲的に観察するための知見を提供し、また、量子井戸システムの超高速光励起が、量子井戸の内部バイアスの動的スクリーニングやコヒーレント音響フォノンの発生などに起因した帯域の THz 波発生メカニズムについて新たな知見を与える、ワイドギャップ半導体デバイスを用いたテラヘルツ・ナノ地震学分野の開拓へと繋がる。よって本論文は博士論文として価値あるものと認める。