



Title	Evaluation of surface and interface properties of Si-based structures by terahertz emission spectroscopy (TES)
Author(s)	Yang, Dongxun
Citation	大阪大学, 2023, 博士論文
Version Type	
URL	https://hdl.handle.net/11094/92953
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

論文内容の要旨

氏 名 （ 楊 棟 勛 ）	
論文題名	Evaluation of surface and interface properties of Si-based structures by terahertz emission spectroscopy (TES) (光励起テラヘルツ波放射分光法によるSi系構造体の表面及び界面の物性評価)
論文内容の要旨 現代の半導体産業において、シリコン (Si) ウェーハとSi系構造体は、依然として圧倒的な地位を占めており、我々の日常生活を強力に支えている。これらのデバイスの性能は、Si表面や界面の電気的特性に依存しており、その開発には迅速かつ非接触な特性評価が要求されている。レーザー励起テラヘルツ波 (THz) 分光法 (TES) は、超高速光励起下で広範囲のSi表面や界面に対して、非接触・非破壊的に電子物性の光学的応答をさらに探求する新しいアプローチであり、それに対しての研究が必要だと考えられている。本論文では、レーザー励起THz放射分光法およびTHz放射顕微鏡 (TES/LTEM) を用いて、Siウェーハや様々なSi系構造の表面・界面特性を評価ことに焦点を当て、THz放射の特性と材料の表面・界面特性との関係について議論した。まずは、シリコン表面からのTHz放射特性を、酸化膜のある初期表面、フッ素終端表面、水素終端表面など、異なる表面条件下で系統的に研究した。一方、シリコン表面からのTHz放射振幅には、異なる表面条件下で強いドーピング濃度依存性があることが明らかになり、これはTHz放射と表面双極子によるバンドベンディングとの間に半定量的な関係があることを示唆した。次は、Si金属-酸化膜-半導体 (MOS) 構造に基づくTHz放射のメカニズムを定式化し、MOSデバイスを半定量的に評価した。ポアソン方程式からn型とp型のSi MOS構造の簡略化モデルを導出し、フォトキャリア電界加速による光電流に加え、フラットバンド電圧、ホットキャリア拡散、界面状態による高速再結合などの外部効果を考慮して、THz放射振幅の外部バイアス電圧依存性を効果的に説明することができた。更に、THz放射分光法によるバナジウム (VO₂) /Siヘテロ接合の推定に関する研究を実施した。VO₂の金属-絶縁体相転移に伴うTHz放射の明らかな変化と、THz放射に及ぼすSiドーピング条件の影響を観察した。バンド理論の説明により、これらの結果はTHz放射振幅と界面電界の間に強い関係を示唆し、320 Kから380 Kへの温度上昇に伴いVO₂の局所界面電位と仕事関数が5.17 eVから5.25 eVであることを迅速に推定することができた。最後に、Si基板上に転写した大規模CVDグラフェンのマッピングへのLTEM適用の可能性について検討した。LTEMによる鮮明な画像が得られ、グラフェンおよびSiの表面状態の影響についても議論した。 本論文は、全7章から構成されている： 第1章では、テラヘルツ科学技術の背景を概観し、研究の動機について紹介した。第2章では、Si表面からのTHz放射をより深く理解するために、超高速光励起による半導体表面からのTHz発生原理を概説した。また、TES/LTEMシステムの紹介や、フェイズドアレイ効果による直径依存性についても解説していた。第3章では、ドーピング条件や表面状態の異なるSiウェーハの表面からのTHz放射の研究に焦点をあてていた。緩衝フッ化水素 (BHF) を用いてウェーハ表面を処理し、Si表面のネイティブな酸化膜を除去し、中間条件としてF終端、最終条件としてH終端の表面を生成した。表面バンドベンディングにおける表面双極子や表面状態の役割について、TESによるTHzの波形を用いて考察し、LTEMによりSi表面の表面電位分布のマッピング画像を得ることができた。第4章では、外部DCバイアスを印加したSi金属-酸化膜-半導体 (MOS) 構造のTHz放射理論モデルを扱っていた。理論モデルはポアソン方程式から導かれ、ドリフト電流によるTHz放射のメカニズムを説明していた。一方、酸化膜の界面電荷密度、キャパシタンス、誘電率などの材料パラメータは、理論モデルによってシミュレーションされていた。第5章では、異なる温度条件下での酸化バナジウム (VO₂) -Siヘテロ接合からのTHz放射を探求していた。THz放射を用いて、VO₂膜の特性を評価し、温度変化に伴うVO₂相転移のプロセスを観察することができた。その後、VO₂膜の金属-半導体相転移がTHz放射に及ぼす影響について議論し、VO₂膜の仕事関数を推定することに成功した。第6章では、Si基板上の大規模CVDグラフェンのマッピングにLTEMを適用したことを示した。その結果、グラフェン/Siヘテロ接合において、ドーピング条件や表面状態の違いによるTHz放射の大きな変化が観察された。THz放射特性に影響を与えるネイティブ酸化膜とグラフェンの役割について、バンド図を用いて議論した。また、Si基板上のグラフェンの明らかなマッピング画像も示した。最後に、第7章では、すべての論文の研究結果をまとめ、今後のテラヘルツ波放射研究の展望を述べた。	

論文審査の結果の要旨及び担当者

氏 名 (楊 棟 勛)		
論文審査担当者	(職)	氏 名
	主 査	教授 斗内 政吉
	副 査	教授 尾崎 雅則
	副 査	准教授 村上 博成
	副 査	教授 片山 光浩
	副 査	教授 片山 竜二
	副 査	教授 丸山 美帆子
	副 査	教授 近藤 正彦
	副 査	教授 森 伸也
	副 査	教授 廣瀬 哲也
	副 査	教授 小島 一信

論文審査の結果の要旨

現代の半導体産業において重要な役割を果たしているシリコン（Si）ウェーハと Si 系構造体の特性評価に焦点を当てている。これらのデバイスの性能は、Si 表面や界面の電気的特性に依存しており、その開発には迅速かつ非接触な特性評価が求められている。テラヘルツ波放射を用いた物性評価技術は、Si を代表とする半導体の表面と界面の非破壊、非接触的な評価方法として期待されている。本論文は、レーザー励起テラヘルツ波（THz）分光法と THz 放射顕微鏡（TES/LTEM）を使用して、Si ウェハや様々な Si 系構造の表面・界面特性を評価している。これにより、非接触・非破壊的に電子物性の光学的応答を探索する新しいアプローチを提案している。以下に得られた主たる研究結果を要約する。

まず、異なる表面条件下でシリコン表面からの THz 放射特性を研究している。酸化膜のある初期表面、フッ素終端表面、水素終端表面などを系統的に調査している。また、異なる表面条件下でのシリコン表面からの THz 放射振幅には、強いドーピング濃度依存性があることが明らかにしている。これは、THz 放射と表面双極子によるバンドベンディングとの間に半定量的な関係があることを示唆している。

次に、Si 金属-酸化膜-半導体（MOS）構造に基づく THz 放射のメカニズムを定式化し、MOS デバイスを半定量的に評価している。ポアソン方程式から導かれる簡略化モデルを使用し、フォトキャリア電界加速による光電流や外部効果（フラットバンド電圧、ホットキャリア拡散、界面状態による高速再結合など）を考慮し、THz 放射振幅の外部バイアス電圧依存性を効果的に説明している。

さらに、THz 放射分光法を用いてバナジウム（VO₂）/Si ヘテロ接合の推定に関する研究を行っている。VO₂ の金属-絶縁体相転移に伴う THz 放射の変化と、Si ドーピング条件が THz 放射に及ぼす影響を観察している。これらの結果は、THz 放射振幅と界面電界の間に強い関係があることを示唆しており、VO₂ の局所界面電位と仕事関数を迅速に推定することができる。最後に、Si 基板上に転写された大規模 CVD グラフェンのマッピングに対して、THz 放射顕微鏡の適用可能性を検討している。LTEM による鮮明な画像が得られ、グラフェンおよび Si の表面状態の影響についても議論している。

以上のように、本論文はレーザー励起 THz 波分光法と THz 放射顕微鏡を使用して Si ウェーハと Si 系構造体の表面・界面特性を非接触的に評価する新たなアプローチを提案し、その応用範囲と特性評価への有用性について議論している。よって本論文は博士論文として価値あるものと認める。