

学 位 論 文 題 名

超短光パルスを用いたマイクロ・ナノ構造における
MHz-THz 弾性波の励起・検出

学位論文内容の要旨

弾性波（音波・超音波）を利用することで固体内部等の不可視部における情報を非破壊で取得することができる。これは物質の構造や弾性を探るために古くから利用されてきた。古くは被検体を実際に叩くことによって音を利用していたが、二十世紀初頭以降は電気駆動トランスデューサー等を用いることで可聴波から超音波に至るまでの弾性波を利用することが可能となり、工業的にも基礎科学的にも大きな成果を挙げてきた。二十世紀後半になるとレーザーを用いた弾性波の励起・検出がなされるようになり、レーザー音響法という分野が確立するに至った。また、超短光パルスの開発・実用化が進むにつれ、超短光パルスを利用した非破壊・非接触・非侵襲な超音波の励起、時間領域での観測方法が提案され、広く用いられてきた。光を用いた弾性波の励起・検出には光電子相互作用や光励起電子のダイナミクス、電子格子相互作用、光弾性など多くの物理現象が関係してくるために基礎科学的に非常に興味をもたれており、また、非接触・非破壊で高周波の弾性波を励起することが可能となれば弾性体内部の構造や弾性の評価が精度よく行えるようになる等、工業・産業的にも重要である。そこで本研究では、弾性体の構造評価や埋め込まれた部位における物理的特徴の抽出、弾性波伝播の評価を目標とし、超短光パルスを利用した弾性波の光励起と超短光パルスと光干渉計測を駆使した弾性波の光学的観察を行い、観測結果の数値的解析も行った。実験は二種類行った。すなわち、埋め込まれたナノメートルスケールの半導体量子井戸構造を用いた縦波バルク超音波の光励起・光検出と、表面に設けられたマイクロメートルスケールの円形微細構造とその周囲における弾性表面波伝播の時間二次元空間観察である。

本論文は全七章より構成されている。以下、各章の要旨をまとめる。

第一章では本研究への導入として研究の背景となる事柄について簡単に述べ、過去に行われてきた研究についても触れながら本研究の目的をまとめた。

第二章では、本研究で行った実験に深く関わる三つの技術的事柄に関してまとめた。超短光パルスを利用したポンプ・プローブ分光法は、物質に光で刺激を与えてその光学応答をピコ秒～フェムト秒の時間分解能で観察することが可能な分光法であり、電子や格子振動のダイナミクスを直接観察することができるといった利点を有する。ロックイン検出とは、ある時間領域信号より特定の周波数成分のみを抽出する検波方法を指し、ポンプ・プローブ分光法に適用することで極めて微小な光学応答を抽出できる高感度観測系を構築することができる。ポンプ・プローブ分光法を適用した光音響技術にピコ秒超音波法と呼ばれる技術があり、本研究ではこのピコ秒超音波法を用いて半導体量子井戸を有する弾性体と表面に円形マイクロ構造を持つ弾性多層膜において弾性波を光励起し、時間領域で観測した。弾性波の検出・観測は共通光路光干渉計を用いて行っており、ロックイ

ン検出の利用と検出系の工夫によって、弾性波によって引き起こされる光反射率変化と光位相変化を $\sim 10^{-6}$ の感度で安定して捉えることができた。

第三章では、埋め込まれたナノメートルスケールの半導体量子井戸構造を用いた縦波バルク超音波の光励起と半導体表面における縦波バルク超音波の光検出に関する研究において行った実験に関してまとめた。初めに、本研究では独立した二台のチタンサファイアレーザーより発振された超短光パルス対を用いて超音波の光励起・光検出を時間領域で行ったが、用いた超短光パルス対の同期を取るために開発した観測手法について説明した。次に用いた半導体量子井戸構造について簡単に説明し、その後、実験で用いた光学系全体を示してその特徴を簡潔に述べた。第三章第四節においては室温と20 K程度の低温で取得した実験結果をまとめて示し、各々に対する簡単な説明を行い、次節の解析へと繋げた。

第四章では、第三章において説明した実験で取得された結果を理解するために行った数値計算についてまとめた。半導体量子井戸において光励起された超音波は量子井戸を構成する障壁層を伝播して半導体表面へ到達し観測されるが、励起されてから検出されるまでの伝播は減衰伝播であるため、その減衰を考慮に入れた超音波伝播をシミュレーションした。シミュレーション結果を利用し、多層膜構造内部を伝播する弾性波の光検出を考慮した数値計算結果と実験結果を比較することにより、用いた半導体多層膜の構造や弾性、量子井戸における電子状態に関する情報の取得に成功した。また、実験で決定された情報を用いた数値計算を通じ、励起直後の超音波パルス波形を知ることもできた。

第五章では、表面マイクロ構造とその周辺における弾性表面波伝播の時空間観測に関する実験とその結果についてまとめた。弾性表面波伝播の時空間観測を行うには、ピコ秒超音波法によって取得される時間領域情報に加えて二次元的に光を走査することで空間の情報を同時に取得する必要がある。本研究では、空間分解能を最大限に保ったまま、ポンプ・プローブ分光法と相性がよく、測定対象が制限されない光学走査法を提案し、実際に適用した。観測法の説明に続いて用いた表面マイクロ構造に関して簡単にまとめ、実際に用いた観測系全体についてもその特徴を簡単に説明した。第五章第四節において実際に観測を通じて得られた弾性表面波伝播の時空間画像をまとめて示し、本研究で新たに提案した観測技術を適用した結果、数百メガヘルツ帯の弾性表面波ウィスパリングギャラリーモードを時空間で捉えることに初めて成功したことを述べる。

第六章では、取得した時空間情報より弾性表面波や用いたマイクロ構造の特徴を抽出するために行った解析についてまとめた。本研究では主に二種類の解析を提案し実際に適用したが、ひとつは円盤の縁に局在するウィスパリングギャラリーモードの特徴を抽出することを狙っており、もう一つは取得した時空間動画全体から弾性表面波の情報を取得することを狙って行った。結果、時空間で見られた弾性表面波ウィスパリングギャラリーモードの特徴を数値として表現することができ、取得したスペクトルとロックイン検出の原理に基づいた信号解析により弾性表面波ウィスパリングギャラリーモードの減衰定数も求めることができた。また、弾性表面波の等周波数面における波数分布と分散関係を取得することや二次元的位相分布の取得を試み、点励起された弾性表面波の特徴をあらわにするなど、今後の工業・基礎科学的応用にとって有意義な結果を得ることができた。

最終第七章において研究を総括する。

学位論文審査の要旨

主 査 助 教 授 松 田 理

副 査 教 授 田 村 信一朗

副 査 教 授 武 藤 俊 一

学 位 論 文 題 名

超短光パルスを用いたマイクロ・ナノ構造における MHz-THz 弾性波の励起・検出

弾性波を用いて固体内部等の不可視部における構造や弾性的性質を調べることが可能である。近年のレーザー技術の発達に伴い、レーザー光を用いた弾性波の励起・検出がなされるようになり、レーザー音響法という分野が生まれた。これは非破壊・非接触な物質評価法として応用上重要である。また、超短光パルスの開発・実用化が進むにつれ、より微細な構造の観察や超短時間領域での対象物の動的振る舞いの観測も可能となってきた。光を用いた弾性波の励起・検出には構造や弾性的性質に加えて、光・電子相互作用、光励起電子のダイナミクス、電子・格子相互作用、光弾性など多くの物理現象が関与するため、基礎物性研究の見地からも重要である。このようにレーザー音響法の研究は基礎科学・工業的応用の双方の視点から盛んに行われている。

本研究では、上記の状況にあるレーザー音響法の新しい測定技術開発、および基礎科学への適用を行う。研究は大きく2つの部分に分けられる。すなわち、(1) 埋め込まれたナノメートルスケールの半導体量子井戸構造を用いた超高周波数縦波バルク超音波の光励起・光検出と、(2) 物質表面に埋め込まれたマイクロメートルスケールの円板状微細構造における弾性表面波伝播の時間分解二次元観察、である。

本論文の第一章では本研究の背景および目的について述べた。

第二章では、本研究で行った実験に深く関わるポンプ・プローブ分光法、ロックイン検出、ピコ秒超音波法の三つの技術について述べた。ポンプ・プローブ分光法は、物質に超短光パルスで刺激を与え、その光学応答をピコ～フェムト秒の時間分解能で観察する分光法であり、電子や格子振動のダイナミクスを直接観察することができる。ロックイン検出は、測定信号より特定の周波数成分のみを抽出する検波方法で、ポンプ・プローブ分光法と組み合わせることで極めて高感度な観測系を構築できる。ピコ秒超音波法はポンプ・プローブ分光法に基づく超短光音響技術である。本研究では共通光路光干渉計とロックイン検出の組み合わせにより、弾性波伝播による光反射率変化と光位相変化を共に 10^{-6} の感度で安定して捉えることができた。

第三章では、埋め込まれたナノメートルスケールの半導体量子井戸構造を用いた縦波バルク超音波の光励起と半導体表面における縦波バルク超音波の光検出に関する実験と結果についてまとめた。本研究では独立した二台のチタンサファイアレーザーより発振された超短光パルス対を用いて超音波の光励起・検出を時間領域で行った。用いた超短光パルス対の同期を取るために開発した相

互パルス相関測定系を含む光学系全体を示し、実験の概要を述べた。

第四章では、前章の実験で取得された結果の解析についてまとめた。半導体量子井戸における超音波の光励起、伝播、光検出を理論モデル化し、数値シミュレーションを行った。シミュレーションと実験結果との比較により、用いた半導体多層膜の構造や弾性、量子井戸における電子状態に関する情報を得た。

第五章では、表面を有するマイクロメートル構造における弾性表面波伝播の時空間観測に関する実験と結果についてまとめた。弾性表面波伝播の時空間観測を行うには、ピコ秒超音波法によって取得される時間領域情報に加えて二次元的に光を走査することで空間の情報を取得する。本研究では、空間分解能が高くポンプ・プローブ分光法と相性のよい光学走査法を開発し、これを用いて円板状表面マイクロ構造における測定を行った。得られた弾性表面波伝播の時空間画像において、数百メガヘルツ帯の弾性表面波ウィスパリング・ギャラリーモードの存在を時空間で初めて確認した。

第六章では、前章の実験で取得した時空間情報より弾性表面波や用いたマイクロ構造の特徴を抽出するために行った解析についてまとめた。円板の縁に局在するウィスパリング・ギャラリーモードの伝播様態を抽出するために、時間フーリエ変換および角度フーリエ変換を行い、同モードの動径方向の音響場分布を得た。取得したスペクトルとロックイン検出の原理に基づいた信号解析により弾性表面波ウィスパリング・ギャラリーモードの減衰定数も求めることができた。また、弾性表面波の等周波数面における波数分布と分散関係を取得することや二次元的位相分布の取得を試み、点励起された弾性表面波の特徴をあらわにするなど、今後の工業・基礎科学的応用にとって有意義な結果を得ることができた。

これを要するに、著者はレーザー音響法における新しい測定技術の開発、およびそれを用いたナノ・マイクロ構造におけるバルク・表面音響波発生・検出実験を行い、音響波物理の新知見を得たものであり、応用物理学に対して貢献するところ大なるものがある。よって著者は、北海道大学博士(工学)の学位を授与される資格あるものと認める。