

# 博士学位論文

(内容の要旨及び論文審査の結果の要旨)

MIZUSHIMA Daisuke

氏名 水嶋 大輔  
学位の種類 博士 (工学)  
学位記番号 博 甲 第 61 号  
学位授与 令和 2 年 3 月 23 日  
学位授与条件 学位規程第 3 条第 3 項該当  
論文題目 半導体レーザーの自己結合効果を利用したレーザーマイクロホンに関する研究  
論文審査委員 (主査) 教授 津田 紀生<sup>1</sup>  
(審査委員) 教授 小塚 晃透<sup>1</sup> 教授 鳥井 昭宏<sup>1</sup> 教授 五島 敬史郎<sup>1</sup>  
工学博士 佐藤 正典<sup>2</sup>

## 論文内容の要旨

### 半導体レーザーの自己結合効果を利用したレーザーマイクロホンに関する研究

現在広く使用されているマイクロホンは、音波による振動膜の振動を電気信号に変換し、音波を検出している。これらのマイクロホンは振動膜を用いていることから、その材質、厚みや面積、制御方式によって検出できる音圧、周波数の範囲、設置環境に制限がある。これらの課題を解決するため、光を利用して音波検出を行う、光マイクロホンの研究が盛んに行われている。これまでの光マイクロホンは、マッハ・ツェンダー干渉計を利用したものや、音波による光の微小回折を利用したものなど、装置が大型で光学系が複雑なものが主であった。そこで、小型で安価な自己結合効果を利用したレーザーマイクロホンの実用化を目指し研究を行った。

半導体レーザー (以下 LD) は、その出射光が対象物で反射し、反射光の一部が LD の光共振器構造内に再入射すると、出射光との干渉により LD の光強度がわずかに変化する自己結合効果が生じる。LD を反射板と向かい合わせに設置し、その間の空間に音波を入射すると、空気の屈折率が変化し、干渉光の位相が変化する。その変化量は音圧に比例し、位相変化の周期が音波の周期と一致するため、音波検出が可能になる。これにより音場との非接触検出が実現でき、検出できる周波数や音圧の範囲は、振動膜を利用するマイクロホンや回折を利用する光マイクロホンに比

べてはるかに広い。レーザーマイクロホンがこれまでの光マイクロホンと最も異なる点は、LD の自己結合効果によって発生する活性層内部の光強度変化を、LD 内に内蔵されたモニタ用フォトダイオード (以下 PD) で検出するため、測定装置の光学系を簡略化できることである。具体的には、光源となる LD と、そこに内蔵された PD、レーザー光を平行ビームに整形する為のレンズ、そして反射板のみで光学系が構成できる。

過去に行われてきた研究から、自己結合効果を利用したレーザーマイクロホンで音波検出が可能であることは分かっていた。しかし、その特性は明らかにされておらず、また、出力信号に雑音成分が多く重畳しており、感度が実用上十分でなかった。そこで本研究の第一の目的は、レーザーマイクロホンの原理を説明し、レーザーマイクロホンの特性について実験的に明らかにすることである。第二の目的は、レーザーマイクロホンの実用化を妨げる課題の解決手法を考案することである。レーザーマイクロホンは自己結合効果に起因する戻り光雑音によって、出力信号の信号対雑音比が低下するという根本的な問題がある。本研究では、レーザーマイクロホンの高感度化を一つの課題とした。レーザーマイクロホンの信号の大きさは、屈折率の変化量と光路長に比例する。そこで、広範囲の音波を光軸上に集め、等価的に音圧を高くすることで、大きな屈折率変化を起こす手法と、プリズムを用いて光路を折り曲げ、一定の空間内で光路を長くするという二つの手法を考案し、実験を行った。また、もう一つの解決すべき課題として、

<sup>1</sup> 愛知工業大学 工学部 電気学科 (豊田市)

<sup>2</sup> 本多電子株式会社 (豊橋市)

レーザーマイクロホンの高空間分解能化がある。これまでのレーザーマイクロホンは、音波検出のためセンサ部に一定の光路長を必要とし小型化が難しく、センサ部に入力する音波は平面波で無ければならなかった。そこで、高分解能と高感度を両立した新しいセンサ部の構造を新たに提案し、平面波のみならず音圧や位相が同心円状に広がっていく球面波でも平面波のみならず音圧や位相が同心円状に広がっていく球面波でも検出できるようにレーザーマイクロホンに改良を加えた。

本論文は7章からなり、第1章では、本研究の背景と目的について述べている。

第2章では、自己結合効果がLDの発振波長やスペクトルに与える影響や、自己結合効果を利用したレーザーマイクロホンの音波検出原理、レーザーマイクロホンの高周波帯域における感度低下の原理について述べている。

第3章では、レーザーマイクロホンに適したレーザーについて調べた結果について述べている。まず代表的なLDの種類、構造や特徴について述べた後、特に本研究で使った垂直共振器面発光レーザー (Vertical Cavity Surface Emitting Laser : 以下 VCSEL) と、分布帰還型レーザー (Distributed Feed-Back Laser : 以下 DFB-LD) の特徴について述べ、本実験で用いた基本的な装置構成や実験環境、特に音源の特性について述べている。最後に VCSEL と DFB-LD を用いてレーザーマイクロホンを作製し、両者の特性を比較することによって、本研究に適したLDの種類や特徴について考察した結果について述べている。

第4章では、レーザーマイクロホンの特性について述べている。レーザーマイクロホンの特性を決める要因となる、反射板の反射率や入射音圧、レーザーパワー、外部共振器長といったパラメータを変化させた実験を行い、これらのパラメータに対してレーザーマイクロホンの出力電圧が線形に変化する。これにより、第2章で述べた理論式が正しいことを確認し、レーザーマイクロホンの周波数特性について実験を行った結果について述べている。レーザーマイクロホンの周波数特性は、高周波帯の特性がレーザービームの長径によって変化することについて第2章で述べており、この理論を確認するため、1 mm から 14.3 mm の4種類のビーム長径で実験を行った結果、長径の変化によって感度が低下し始める周波数が増え、その感度低下の特性曲線が理論に基づいて計算したものとほぼ一致し、第2章で示した理論を立証した事について述べている。最後に、指向性について実験を行い、レーザービームと水平方向では双指向性、垂直方向では無指向性という結果を得た事について述べている。

第5章では、レーザーマイクロホンを高感度化について述べており、高感度化の為に2つの手法を提案し、それぞれの手法がレーザーマイクロホンの特性にどのように影響を与えるのか実験を行った結果、広範囲に広がる音波を

光軸上に集める集音器を使用した場合、実験の結果から感度は最大9倍程度、信号対雑音比は最大6倍程度向上した事について述べている。また、感度の向上度合いは集音器の開口部の高さに依存し、集音器の焦点距離にはよらないことを解明した結果について述べている。また、周波数特性は主に10 kHz以下の周波数領域で感度が低下し、その低下の様子は集音器の開口部の高さや焦点距離に関係し、指向性は集音器の正面に鋭いピークを持ち、集音器の開口部の高さや焦点距離に関係することを解明した結果について述べている。これらの事柄から、集音器は感度向上の効果は大きいですが、周波数特性や指向性が集音器の寸法によって変化する事を明らかにし、直角プリズムを用いて光路を延長した場合、実験の結果から感度が最大3倍程度、信号対雑音比は最大4.8倍程度向上し、最低検出音圧11 dB低下した結果について述べている。また、実験から周波数特性や指向性は、集音器を使用した場合のような帯域や角度の選択性はみられなかった事から、光路を延長すると感度の向上効果は集音器を用いた場合より低いですが、周波数特性や指向性が広いまま感度が向上できる事について述べている。

第6章では、レーザーマイクロホンの空間分解能を改善するため、多重反射センサを採用した多重反射型レーザーマイクロホンを作製し、その実験結果について述べている。多重反射センサは、向かい合わせにした一対のミラーを核として一体構造をなしており、外部振動の影響を受けないというメリットがあり、このミラー間でレーザービームを繰り返し反射させ、狭い空間内で長い光路長を確保し、それによって高感度と高分解能を両立出来る事について述べている。この多重反射センサ内に平面波を入射した場合の結果から、同じ1 cmの空間分解能でも、感度特性は反射の回数によって変化し、最大7倍程度、信号対雑音比は最大10倍程度まで向上し、周波数特性は反射の影響を受けない事について述べている。また、多重反射センサ内に球面波を入射した実験結果から、多重反射型レーザーマイクロホンが商用マイクロホンと同程度に球面波を検出でき、球面波入射時の周波数特性から、周波数特性はセンサ面積が小さいほど、より高い周波数まで球面波が正しく検出でき、多重反射型レーザーマイクロホンが想定したモデル通りに動作していることが確認できた事について述べている。

第7章では、本研究を総括し、今後の課題・展望を記している。

#### 論文審査の結果の要旨

現在広く使用されているマイクロホンは、音波による振動膜の振動を電気信号に変換し、音波を検出している。こ

これらのマイクロホンは振動膜を用いていることから、その材質、厚みや面積、制御方式によって検出できる音圧、周波数の範囲、設置環境に制限がある。これらの課題を解決するため、光を利用して音波検出を行う、光マイクロホンの研究が盛んに行われている。これまでの光マイクロホンは、マッハ・ツェンダー干渉計を利用したものや、音波による光の微小回折を利用したものなど、装置が大型で光学系が複雑なものが主であった。そこで、小型で安価な自己結合効果を利用したレーザーマイクロホンの実用化を目指し研究を行った。

半導体レーザー（以下 LD）は、出射光が対象物で反射し、反射光の一部が LD の光共振器内の活性層に再入射すると、出射光との干渉により LD の光強度がわずかに変化する自己結合効果が生じる。LD を反射板と向かい合わせに設置し、その間の空間に音波を入射すると、空気の屈折率が変化し、干渉光の位相が変化する。その変化量は音圧に比例し、位相変化の周期が音波の周期と一致するため、音波検出が可能になる。これにより音場との非接触検出が実現でき、検出できる周波数や音圧の範囲は、振動膜を利用するマイクロホンや回折を利用する光マイクロホンに比べてはるかに広い。

本研究では、レーザーマイクロホンの高感度化を一つの課題とした。レーザーマイクロホンの信号の大きさは、屈折率の変化量と光路長に比例する。そこで、広範囲の音波を光軸上に集め、等価的に音圧を高くすることで、大きな屈折率変化を起こす手法と、プリズムを用いて光路を折り曲げ、一定の空間内で光路を長くするという二つの手法を考案し、実験を行った。また、もう一つの解決すべき課題として、レーザーマイクロホンの高空間分解能化がある。これまでのレーザーマイクロホンは、音波検出のためセンサ部に一定の光路長を必要とし小型化が難しく、センサ部に入力する音波は平面波で無ければならなかった。そこで、高分解能と高感度を両立した新しいセンサ部の構造を新たに提案し、平面波のみならず音圧や位相が同心円状に広がっていく球面波でも検出できるようにレーザーマイクロホンに改良を加えた。

本論文は7章からなり、第1章では、本研究の背景と目的について述べている。

第2章では、自己結合効果が LD の発振波長やスペクトルに与える影響や、自己結合効果を利用したレーザーマイクロホンの音波検出原理、レーザーマイクロホンの高周波帯域における感度低下の原理について述べている。

第3章では、レーザーマイクロホンに適した LD について調べた結果について述べている。まず代表的な LD の種類の構造や特徴について述べた後、特に本研究で使用した垂直共振器面発光レーザー (Vertical Cavity Surface Emitting Laser : 以下 VCSEL) と、分布帰還型レーザー (Distributed Feed-Back Laser : 以下 DFB-LD) の特徴につ

いて述べ、本実験で用いた基本的な装置構成や実験環境、特に音源の特性について述べている。最後に VCSEL と DFB-LD を用いてレーザーマイクロホンを作製し、両者の特性を比較することによって、本研究に適した LD について考察した結果について述べている。

第4章では、レーザーマイクロホンの特性について述べている。レーザーマイクロホンの特性を決める要因となる、反射板の反射率や入射音圧、レーザーパワー、外部共振器長といったパラメータを変化させた実験を行い、これらのパラメータに対してレーザーマイクロホンの出力電圧が線形に変化することについて述べている。この結果から、第2章で述べた理論が正しいことを確認し、レーザーマイクロホンの周波数特性について実験を行った結果について述べている。レーザーマイクロホンの周波数特性は、高周波帯の特性がレーザービームの長径に依存する。この事は、第2章で述べており、この理論を確認するため、1 mm から 14.3 mm の4種類のビーム長径で実験を行った結果、長径の変化によって感度が低下し始める周波数が変化し、その感度低下の特性曲線が理論に基づいて計算したものとほぼ一致し、第2章で示した理論を立証した事について述べている。最後に、指向性について実験を行い、レーザービームと水平方向では双指向性、垂直方向では無指向性という結果を得た事について述べている。

第5章では、レーザーマイクロホンの高感度化について述べており、高感度化の為の2つの手法を提案し、実験を行った。その結果、広範囲に広がる音波を光軸上に集める集音器を使用した場合、実験の結果から感度は最大9倍程度、信号対雑音比は最大6倍程度向上した事について述べている。また、感度の向上度合いは集音器の開口部の高さに依存し、集音器の焦点距離にはよらないことを解明した。また周波数特性は、主に 10 kHz 以下の周波数領域で感度が低下し、その低下の様子は集音器の開口部の高さや焦点距離に関係し、指向性は集音器の正面に鋭いピークを持ち、集音器の開口部の高さや焦点距離に関係することを解明した結果について述べている。これらの事から、集音器は感度向上の効果は大きいですが、周波数特性や指向性が、集音器の寸法によって変化する事を明らかにした。次に、直角プリズムを用いてセンサ部の光路を延長した場合、実験の結果から感度が最大3倍程度、信号対雑音比は最大7倍程度向上し、最低検出音圧が 11 dB 低下した結果について述べている。また実験結果から、周波数特性や指向性は、集音器を使用した場合のような帯域や角度の選択性はみられなかった事から、センサ部の光路の延長による感度の向上効果は、集音器を用いた場合より低いが、周波数特性や指向性が広いまま感度が向上した事について述べている。

第6章では、レーザーマイクロホンの空間分解能を改善するため、多重反射センサを採用した多重反射型レーザーマイクロホンを作製し、その実験結果について述べている。

多重反射センサは、向かい合わせにした一対のミラーを核として一体構造をしており、外部振動の影響を受けないというメリットがある。また、このミラー間でレーザービームを繰り返し反射させることによって、狭い空間内で長い光路長を確保し、それによって高感度と高分解能を両立出来る事について述べている。この多重反射センサ内に平面波を入射した場合の結果から、同じ 1 cm の空間分解能でも、感度特性は反射の回数によって変化し、最大 7 倍程度、信号対雑音比は最大 10 倍程度まで向上し、周波数特性は反射の影響を受けない事について述べている。また、多重反射センサ内に球面波を入射した実験結果から、多重反射型レーザーマイクロホンが商用マイクロホンと同程度に球面波を検出でき、球面波入射時の周波数特性から、センサ面積が小さいほど、より高い周波数まで球面波を正しく検出でき、多重反射型レーザーマイクロホンが想定したモデル通りに動作していることが確認できた事について述べている。

第 7 章では、本研究を総括し、今後の課題・展望を記している。本研究で得られた新たな知見は、半導体レーザーの自己結合効果を利用したレーザーマイクロホンの発展に大きく寄与できるものと期待され、工学的に高い価値が認められる。以上の事から、当該論文が電気・材料工学専攻における博士（工学）の学位のレベルを十分に満たしていると判定する。