

博 士 学 位 論 文

内 容 の 要 旨
お よ び
審 査 結 果 の 要 旨

第36編

令 和 2 年 度

神 奈 川 工 科 大 学

は し が き

本編は、学位規則（昭和28年4月1日文部省令第9号）第8条によるインターネットの利用により公表を目的として、令和2年度内に本学において博士の学位を授与した者の、論文内容の要旨および論文審査の結果の要旨を収録したものである。

学位記番号に付した甲は、学位規則第4条第1項（いわゆる課程博士）によるもの、乙は、同規則同条第2項（いわゆる論文博士）によるものであることを示す。

（令和3年4月 発行）

< 目 次 >

甲第41号	端山 喜紀	集積型光センシング回路のための水平スロット導波路の研究 1
-------	-------	-----------------------------	---------

氏名(本籍)	はやま よしき (神奈川県)
学位の種類	博士 (工学)
学位記番号	甲第 41 号
学位授与日	令和 3 年 3 月 20 日
学位授与の要件	学位規則第 4 条第 1 項該当
研究科・専攻名	工学研究科 電気電子工学専攻
学位論文題目	集積型光センシング回路のための水平スロット導波路の研究
論文審査委員	(主査) 中津原 克己 教授 黄 啓新 教授 小室 貴紀 教授 三栖 貴行 教授 荒川 太郎 教授 (横浜国立大学)

内容の要旨

日常生活や化学工業、医療分野において、これまでに様々な化学物質をセンシングする多種多様のセンサ素子が開発、実用化されている。センシング技術の応用分野は医療診断、感染症検査、生物研究、食品検査、危険物質検査、環境モニターなど多岐にわたり、その重要性が増している。

センシングに用いられるセンサ素子は、その用途や求められる性能、検出対象物質に合わせて様々な方式が存在する。近年では触媒技術や MEMS(Micro Electro Mechanical System)、光導波路といった、微細加工技術の応用が盛んに行われている。また近年では、センサ素子の新たな利用形態の実現のため、センサ素子の小型化、高集積化、低消費電力化、高感度化、長期安定性の向上が求められている。

光学式センサは長期安定性、検知精度、可燃性物質や毒性物質に対する安全性に優れるという特長があるが、空間光学系を用いる構造であるため、光軸アライメントや信頼性について問題となる。そこで近年では、光源やフォトディテクタといった素子との集積が可能であり、小型の素子を実現できる、導波路形のセンサの研究が行われている。今後、各種センサの新たな利用形態の実現、信頼性が高く、多機能なセンサの実現のためには、センサの小型化や制御回路、光源、光フィルタなどの素子の集積化が必要になる。また、検知精度、分解能といった基本的な性能の向上のほかに、防爆設計といった観点も重要となる。既存のセンサ素子に対し、小型で集積性がよく、信頼性に優れた素子の実現できれば、今後の各種センシング分野において有用であると考えられる。本研究では、中空構造に光を局在させることが可能でセンサ応用に適した水平スロット導波路と反応性 DC スパッタによる高速成膜が可能な Nb_2O_5 材料に注目し、 Nb_2O_5 水平スロット導波路を用いた小型化、高密度集積が可能で、長期安定性、安全性に優れた導波路形センシング回路のための水平スロット導波路の

実現を目的としている。本論文では、本研究によって得られた成果、知見を 5 章にわたってまとめている。

第 1 章では、研究背景として、日常生活や化学工業、医療分野など多岐にわたる応用分野におけるセンサ素子の重要性を述べ、これに関連する研究の動向及び研究課題について概観している。既存のセンサ素子についてガスセンサを例にその特徴を述べ、今後のトレンドとして小型で高密度集積が可能なセンサ素子 MEMS や光導波路を応用したセンサの有用性を示した。スロット導波路は特有のモードプロファイルから様々な用途の応用が期待されている導波路構造であり、スロット導波路をセンサ素子へ応用することで、小型で高感度なセンサ素子を実現できることを述べている。また、 Nb_2O_5 材料は比較的高い屈折率を有し、素子を小型化できること、反応性 DC スパッタにより、容易に任意の膜厚、層構造を実現できることから、構造的自由度の高い導波路素子を実現できることを述べている。そして、本研究の特色である Nb_2O_5 材料を用いた水平スロット導波路を他機関から報告されたスロット導波路と比較しながら特長を示し、その優位性について述べている。センサデバイスの実現のための Nb_2O_5 水平スロット導波路の概要を述べ、本研究の目的を示している。

第 2 章では、光導波路の導波原理、スロット導波路の導波原理、センサ素子としての動作のための屈折率変化を検知する導波路構造として、Grating 導波路の構造と動作原理について述べている。また、それらの構造パラメータを設計するために必要な理論解析方法についても述べている。そして、それらの基本要素からなる Nb_2O_5 水平スロット導波路の素子構造や動作原理について述べ、 Nb_2O_5 水平スロット導波路と屈折率変化をとらえる構造を組み合わせることで、センサ素子を実現できることを示している。

第 3 章では、水平スロット導波路の解析のために用いる FEM 法と FDTD 法の理論解析手法の概略を述べ、理論解析によって得られた構造依存性、モードプロファイルの違いをリブ形導波路と比較しながら述べている。 Nb_2O_5 水平スロット導波路においては従来のリブ形導波路と比較し、高い光ピーク強度が得られる結果を示している。またスロット層厚、導波路幅といった構造パラメータによる光ピーク強度の変化について明らかにしている。比較として、縦スロット導波路の基本特性についても解析し、水平スロット導波路との特徴の違いを示している。そして、プレーナ層厚や導波路側壁角度といった、製作トレランスに関わる解析結果も示し、素子製作に必要な製作技術、トレランスを明らかにしている。モードプロファイルが特徴的なスロット導波路と他の導波路との接続についても解析し、結合損失が少なく、水平スロット導波路の中空構造を支えるために適した導波路構造を明らかにしている。

第 4 章では、中空構造を有する水平スロット導波路を製作するために必要な製作プロセスを提案し、製作に必要な条件の検討と、技術的課題に対する対策の検討を示し、水平スロット導波路を製作するための製作プロセスを示している。また実験によって得られた中空の水平スロット構造を示し、30 nm 以下という中空で、極薄のスロット層が初めて実現されたことを示す。またこれにより、提案する製作プロセスの有効性を明らかにしている。そ

して、スロット領域を SiO_2 材料とした SiO_2 スロット導波路の製作、伝搬特性の評価を行い、 Nb_2O_5 材料を用いた水平スロット導波路において初めて導波光が得られたことを示している。さらに、導波路側壁に **Grating** の周期構造を形成した SiO_2 スロット導波路においてストップバンドが得られたことについて示している。

第 5 章では、実験と解析から得られた成果についてまとめ、今後の技術的課題や、 Nb_2O_5 水平スロット導波路を用いたセンサ素子の有用性について述べている。またセンサ素子のみならず、様々な光学素子への応用への期待や、**Si** フォトニクスプラットフォームとの組み合わせの応用の可能性についてまとめている。

審査経過の要旨

1. 審査の経過

- (1) 2020年10月23日(金)、指導教員中津原克己に対し、端山喜紀君より学位論文が提出された。
- (2) 2020年11月11日(水)、電気電子工学専攻会議にて審議を行い、予備審査の開始と予備審査委員が承認された。
- (3) 2020年11月24日(火)17:00～19:00にオンライン形式での予備審査会が開催された。その際に出された各審査委員からのコメントを受けて論文の修正及び推敲を行うことを条件に本請求論文は本審査に十分耐えうると判断され、予備審査は終了した。その後、申請者は審査委員からの指摘にもとづいて論文の修正を行った。
- (4) 2020年12月9日(水)15:45からの電気電子工学専攻会議における論文受理の可否投票の結果、論文受理を決定した。
- (5) 2021年1月15日(金)、研究科委員会において、提出論文の受理を決定し、上記5名をその審査委員とすることを決定した。
- (6) 2021年2月16日(火)13:30～15:00に対面式およびオンライン式併用のハイブリッド形式にて公聴会を開催した。
- (7) 2021年2月16日(火)15:10～15:45に最終試験及び審査委員全員による審査委員会を開催した。審査期間中における各審査委員の個別審査、及び公聴会での発表内容、質疑応答の内容に基づいて審議の結果、申請論文は博士論文としての学術性、新規性、有効性を有すること、また、申請者は博士の学位に相応しい学力、語学力を有していることを審査委員全員で確認した。
- (8) 2021年2月17日(水)電気電子工学専攻会議における可否投票の結果、学位授与を可とした。

2. 審査結果

本論文は、反応性 DC スパッタによる高速成膜が可能な Nb_2O_5 材料を用いて、中空構造に光を局在させることが可能な水平スロット導波路を提案し、小型化、高密度集積が可能で、長期安定性、安全性に優れる導波路形センシング回路のための Nb_2O_5 水平スロット導波路の実現を目的として研究を行い、得られた成果及び知見を 5 章にわたってまとめている。

第 1 章では、研究背景として、日常生活や化学工業、医療分野など多岐にわたる応用分野におけるセンサ素子の重要性を述べ、これに関連する研究の動向及び研究課題について概観している。既存の光学式センサ素子についてその原理と特徴を述べ、今後のトレンドとして小型で高密度集積が可能なセンサ素子 MEMS や光導波路を応用したセンサの有用性を示した。スロット導波路は特有のモードプロファイルから様々な用途の応用が期待されている導波路構造であり、スロット導波路をセンサ素子へ応用することで、小型で高感度なセンサ素子を実現できることを述べている。また、 Nb_2O_5 材料は比較的高い屈折率を有し、素子を小型化できること、反応性 DC スパッタにより、容易に任意の膜厚、層構造を実現することから、構造的自由度の高い導波路素子を実現できることを述べている。そして、本研究の特色である Nb_2O_5 材料を用いた水平スロット導波路を他機関から報告されたスロット導波路と比較しながら特長を示し、その優位性について述べている。センサデバイスの実現のための Nb_2O_5 水平スロット導波路の概要を述べ、本研究の目的を示している。

第 2 章では、光導波路の導波原理、スロット導波路の導波原理、センサ素子としての動作のための屈折率変化を検知する導波路構造として、Grating 導波路の構造と動作原理について述べている。また、それらの構造パラメータを設計するために必要な理論解析方法についても述べている。そして、それらの基本要素からなる Nb_2O_5 水平スロット導波路の素子構造や動作原理について述べ、 Nb_2O_5 水平スロット導波路と屈折率変化をとらえる構造を組み合わせることで、センサ素子を実現できることを示している。

第 3 章では、水平スロット導波路の解析のために用いる FEM 法と FDTD 法の理論解析手法の概略を述べ、理論解析によって得られた構造依存性、モードプロファイルの違いをリブ形導波路と比較しながら述べている。 Nb_2O_5 水平スロット導波路においては従来のリブ形導波路と比較し、高い光ピーク強度が得られる結果を示している。またスロット層厚、導波路幅といった構造パラメータによる光ピーク強度の変化について明らかにしている。比較として、縦スロット導波路の基本特性についても解析し、水平スロット導波路との特徴の違いを示している。そして、プレーナ層厚や導波路側壁角度といった、製作トレランスに関わる解析結果も示し、素子製作に必要な製作技術、トレランスを明らかにしている。モードプロファイルが特徴的なスロット導波路と他の導波路との接続についても解析し、結合損失が少なく、水平スロット導波路の中空構造を支えるために適した導波路構造を明らかにしている。

第 4 章では、中空構造を有する水平スロット導波路を製作するために必要な製作プロセ

スを提案し、製作に必要な条件の検討と、技術的課題に対する対策の検討を示し、水平スロット導波路を製作するための製作プロセスを示している。また実験によって得られた中空の水平スロット構造を示し、30 nm 以下という中空で、極薄のスロット層が初めて実現されたことを示す。またこれにより、提案する製作プロセスの有効性を明らかにしている。そして、スロット領域を SiO_2 材料とした SiO_2 スロット導波路の製作、伝搬特性の評価を行い、 Nb_2O_5 材料を用いた水平スロット導波路において初めて導波光が得られたことを示している。さらに、導波路側壁に Grating の周期構造を形成した SiO_2 スロット導波路においてストップバンドが得られたことについて示している。

第 5 章では、実験と解析から得られた成果についてまとめ、今後の技術的課題や、 Nb_2O_5 水平スロット導波路を用いたセンサ素子の有用性について述べている。またセンサ素子のみならず、様々な光学素子への応用への期待や、Si フォトニクスプラットフォームとの組み合わせの応用の可能性についてまとめている。

以上のように、本研究では、本論文提出者が提案した Nb_2O_5 水平スロット導波路の有用性を理論的に明らかにし、素子の製作に必要な微細加工技術の確立、エアスロット導波路構造の形成に成功している。さらに波長特性を有するグレーティング導波路を試作し、スロットモードの導波を実証していることは、センシング分野における学術的及び工学的発展への寄与が極めて大きく、高く評価できる。

よって本論文提出者は博士(工学)の学位を受けるのに十分な資格を有するものと判定する。