

氏名	大久保 喬平
学位の種類	博士(工学)
学位記番号	博甲第 8033 号
学位授与年月日	平成 29年 3月 24日
学位授与の要件	学位規則第4条第1項該当
審査研究科	数理物質科学研究科
学位論文題目	光方向性結合器型マイクロバイオセンサの構築

主査	筑波大学教授	博士(工学)	鈴木 博章
副査	筑波大学教授	理学博士	黒田 眞司
副査	筑波大学教授	博士(学術)	都倉 康弘
副査	筑波大学教授	工学博士	伊藤 雅英
副査	筑波大学准教授	Ph.D.	Edwin. T. Carlen

## 論 文 の 要 旨

本論文ではフォトニクス技術を応用したバイオセンシングデバイスについて述べている。

第1章では、細胞機能解析、医療診断等におけるバイオセンシングの必要性について述べている。また、フォトニックセンサ、特に平面導波路技術と光干渉計型バイオセンサの開発動向について述べている。以上を踏まえ、従来技術の問題点と現時点での課題を示した上で、本研究の目的を述べている。

第2章では、光導波路の理論的背景、シミュレーションに用いた FD-BPM 法、FDTD 法、FEM 法の原理、近接場光センサの動作原理、モード結合理論を用いた方向性結合器(DC)の動作原理、および本研究全体に関わるフォトニックセンサの理論的基礎について述べている。

第3章では、ポリマー導波路で構成されるマルチモード干渉計 (MMI) センサのシミュレーションによるデバイス設計、微細加工技術によるデバイスの試作、屈折率分析に向けた検討について述べている。ポリマー導波路の単一モード条件、MMI の外部媒質の屈折率変化に対する応答信号強度変化、生体関連分子の吸着を想定した表面屈折率変化のシミュレーションを FEM 法、FD-BPM 法により行っている。また、実際に厚膜フォトレジスト(SU-8)を用いて電子線描画により MMI を試作し、クラッドを空気と水とした場合について、マルチモード領域で全長に依存した光強度変化を確認している。

第4章では、窒化シリコン (SiN) 導波路から構成される DC センサについての検討結果を述べている。FD-BPM 法、FEM 法に基づくシミュレーションによりデバイスの断面寸法、バルク・表面屈折率検出センサ感度を計算している。空気、水、グリセロール水溶液を上部クラッド領域とした場合の検出信号強度とデバイス全長の関係は、モード結合理論により導かれる  $\sin^2x$  依存性と良い一致を示した。グリセロール水

溶液を用いた場合の感度は 18.9 OIU/RIU、検出限界は  $5.3 \times 10^{-4}$  RIU であった。また、表面にビオチンを固定化してアビジンのここへの結合を調べたところ、DC センサはこれに対する応答を示し、表面センサ感度は 60 OIU/RIU、検出限界は  $3.1 \times 10^{-4}$  RIU であった。この検出限界は 0.13  $\mu$ M のストレプトアビジン濃度に相当する。

第5章では、シリコンフォトニクス技術を駆使した折り畳み DC センサの開発について述べている。第4章の研究では、DC 長が長いほど高感度になることが示されたが、微量サンプルの分析にはこれでは都合が悪い。長いデバイス長を維持したまま、センシング領域をコンパクトにするため、波長 1.3  $\mu$ m で動作するシリコン細線導波路を用い、長いDCを折り畳んだ構造体を形成している。屈折率変化に対する応答を含むシリコン DC の基本特性を示し、折り畳み DC の設計、作製、評価を行ったことが述べられている。折り畳み DC 中の2つの曲線導波路のうち、外側の導波路には位相整合用スパーサー導波路を挿入し、折り畳み DC が動作することを3次元 FDTD 法により明らかにしている。また、実際に電子線描画や反応性イオンエッチングなどの微細加工プロセスにより、SOI ウェハ上に全長の異なる折り畳みシリコン DC を複数種類作製し、特性評価を行っている。その結果、取得信号から折り畳み DC を用いた屈折率測定が可能であることを示している。本研究では、曲率半径 5  $\mu$ m の曲線導波路により、全長 1 mm のシリコン DC を(100  $\mu$ m)<sup>2</sup>内に収容することができた。

第6章では、以上の研究の内容について総括している。

## 審 査 の 要 旨

〔批評〕

フォトニクス技術は光通信への応用を中心に活発に研究が進められているが、センシングへの応用に関しても、その可能性が示されつつある。本研究では、基板上に微細加工技術により形成された導波路構造からなるマルチモード干渉計 (MMI) および方向性結合器 (DC) をセンサのトランスデューサとして用いているが、このような試みは従来の研究には見られず、ユニークである。本研究では、まず、第1段階として、MMI を用いたセンサについてシミュレーションによる動作確認後、実際にデバイスを試作し、シミュレーションによる予想通りの応答が得られることを確認できている。第2段階では、より高感度なセンシングを目指した DC 型センサを示している。ポリマー導波路よりも光の閉じ込め効果の大きい SiN 導波路を用いて2本の導波路間にわずかなギャップを有する DC を作製し、実際に低濃度のストレプトアビジンを検出できている。DC は長いほど感度が良くなるが、これでは微量サンプルの分析には都合が悪い。この問題を解決するために、SiN 導波路より光の閉じ込め効果の強いシリコン導波路を用い、長い DC を微小領域に折り畳んだ構造を提案している。高い加工精度が要求されるため、ベストの性能を得るにはさらに作製プロセス面での最適化が必要ではあるが、センサとしての応答は確認している。

本論文で示されたフォトニックセンサでは、表面の屈折率変化を測定する。タンパク質や DNA の検出では、通常、蛍光標識や酵素標識を行うが、これには手間がかかる。しかし、屈折率変化を測定する方式ではこれが不要でリアルタイムで変化もとらえられるというメリットがある。この点は非常に有利である。今後、実用化が進むことを期待したい。

〔最終試験結果〕

平成 29 年 2 月 14 日、数理物質科学研究科学学位論文審査委員会において審査委員の全員出席のもと、著者に論文について説明を求め、関連事項につき質疑応答を行った。その結果、審査委員全員によって、合格と判定された。

〔結論〕

上記の論文審査ならびに最終試験の結果に基づき、著者は博士(工学)の学位を受けるに十分な資格を有するものと認める。