

氏名・(本籍)	鈴木 均 (静岡県)
学位の種類	博士 (工学)
学位記番号	工博甲第 284 号
学位授与の日付	平成 18 年 9 月 22 日
学位授与の要件	学位規程第 5 条第 1 項該当
研究科・専攻の名称	電子科学研究科 電子応用工学
学位論文題目	溶液の光学定数評価のための光ファイバ表面プラズモンセンサの研究
論文審査委員	(委員長) 教授 相田 一夫 教授 山口 十六夫 教授 川田 善正 助教授 近藤 淳

## 論文内容の要旨

本論文は、光ファイバの特徴を生かしたより小型で高感度な表面プラズモン共鳴 (SPR) センサの開発と、光ファイバ SPR センサによるエタノール溶液などの光学定数の評価方法の研究に関するものである。

光ファイバ SPR センサの特性は、表面プラズモンが発生する金薄膜の光学定数と膜厚に大きく左右される。そこで光ファイバ SPR センサの開発に先立ち、より正確なシミュレーションと膜厚の制御のために、ガラス基板上の金薄膜の光学定数と膜厚をエリプソメトリーにより実測した。これは、光ファイバ SPR センサの金薄膜を真空蒸着する条件と同じ条件で作成された試料である。その結果、屈折率の実数部、虚数部ともに多くの研究者が引用する Palik のデータとおおよそ一致していることがわかった。また 500nm から 620nm の領域で金膜厚が増加すると屈折率の実数部、誘電率の虚数部ともにそれに伴い減少していることが明らかになった。また金の蒸発量と堆積する膜厚の検量線が得られ、金膜厚をより正確にコントロールできるようになった。

次にセンサとして最適な金膜厚を実験的に求めた。金薄膜の厚さが、SPR スペクトルの形状とセンサ感度に与える影響については、白色光源によるマルチモード光ファイバ SPR センサの場合まだ調べられていないからである。その結果、約 65nm の金膜厚のセンサが、被測定対象の屈折率変化に対して感度が高く、また SPR スペクトルの形状を表す Quality factor がもっとも優れていることが判明した。Quality factor が高ければ、精度よく屈折率変化を検出できる。またこの実験を通じて、実験 SPR スペクトルと理論 SPR スペクトルの違いを確認できた。SPR スペクトルの最小反射率は、表面プラズモンを励起するのは p 偏光なので 0.5 以上のはずであるが、0.5 以下の最小反射率をもつ SPR スペ

クトルが多く測定された。この原因として、Skew 光線の存在と s 偏光から p 偏光への変換の存在を仮定した。

最適な金膜厚が判明したので、この膜厚で溶液の屈折率を簡便に測定できかつ可搬性にも優れた、光ファイバ SPR センサによる簡易型 2 波長 LED 光ファイバ SPR センサを開発した。分光スペクトルではなく、固定された 2 波長における反射率の差分を取り、その値から屈折率を決定している。光源としてハロゲンランプではなく LED を、受光素子としてフォトダイオード使用している。蒸留水、エタノール溶液、グルコース溶液について、測定し評価を行った。その結果、屈折率範囲 1.329 から 1.360 を  $2.35 \times 10^{-4}$  の精度で測定できた。この値は、市販されている卓上型アッペ屈折計と同等である。また、ノイズ解析より LED から光ファイバへの結合効率と光カップラーのクロストーク特性を向上させれば、 $10^{-5}$  以下のかなり高精度な溶液屈折率センサが実現できることがわかった。

センサ実用化の観点から、以下の考察結果を得た。センサを設計する際、効率的に精度のいい設計をするためには、センサ特性を正確に再現できる光ファイバ SPR モデルが必要であること、またセンサの製造に際しては、同じ特性のセンサを作製する技術が必要であることが認識できた。現時点では、作製されたセンサのひとつひとつの特性の違いが大きい。さらに、温度が変動する清浄でない環境下でもセンサが正常に機能するための、センサ特性の変化を補正する機能が必要であることがわかった。

一方、光ファイバ SPR センサによる溶液の光学定数の評価については、考察といくつかの実験の結果次のことがわかった。まずスラブ導波路から導出した既存の光ファイバ SPR モデルでは、実験値との乖離が大きいため、光学定数の評価は不可能である。しかし光ファイバ SPR センサへの光の入射条件を規定できる透過型光ファイバ SPR センサを使うと、次の課題を解決できれば光学定数の評価が可能となるデータが得られた。その課題とは、Skew 光線の特徴づける角度を導入し反射時の偏光方向の回転を考慮した光ファイバ SPR センサモデルを構築することである。

最後に屈折率異方性を持つ薄膜の光学定数、膜厚評価のために、対象となる薄膜が 1 軸性の分子配向を持つと仮定し、Yeh formalism による SPR スペクトルのシミュレーションのためのプログラムを作成した。また光学定数、膜厚評価の方法に、シミュレーションという数値計算だけでなく、より表面プラズモンの理論に根ざした指針を与えるために、プリズム／金薄膜／異方性薄膜／周囲環境という 4 層モデルに対する分散関係を導いた。この分散関係より、異方性薄膜の光学定数、膜厚の変化に対する SPR スペクトルへの影響を、解析的に評価できる。

本研究により開発した簡易型 2 波長 LED 光ファイバ SPR センサは、これまでになくコンパクトでかつ低いコストで製作できるセンサシステムである。本論文で指摘した幾つかの課題をクリアできれば、SPR センサが活躍できる分野の拡大が期待できる。

# 論文審査結果の要旨

表面プラズモン共鳴 (SPR: surface plasmon resonance) センサを用いると、表面近傍の屈折率および屈折率変化を検出することができ、すでにプリズムを用いたSPRセンサはバイオ・生化学の分野で広く利用されている。一方、1993年にYeeらにより提案されたプリズムに代わり光ファイバを用いる光ファイバSPRセンサは課題も多く、今日に至るまで実用化されていない。本研究は、光ファイバSPRセンサを用いた小型で携帯可能な高感度センサの開発と、溶液の光学定数の評価を目的としている。以下に本論文について述べる。

1章では、光ファイバSPRセンサ研究の現状について説明し、金膜厚の最適化、センサの小型化といった本研究の意義を明確にしている。2章では、SPRの基礎、光ファイバSPRセンサの原理、センサの作成方法、実験系、信号処理方法について述べている。

3章では、光ファイバSPRセンサの応答スペクトルの形状や感度と金薄膜の膜厚の関係について検討している。異なる金膜厚の光ファイバSPRセンサを作成して、その応答スペクトルの最小反射率、半値全幅、quality factorを求めている。これにより、センサとして最適な膜厚が65nmであることを明らかにするとともに、スラブ型導波路を用いた理論解析結果と実験で得られた最小反射率や半値全幅とを比較して、入射白色光が100%P偏光であると仮定することで実験結果をよく説明できることを指摘している。

4章では、2波長LEDを光源とする簡易型光ファイバSPRセンサの開発について述べている。光源に波長の異なる2個のLEDを用いた反射率差分法によりセンシングシステムの構成が簡単化される。基礎実験で得られた最適な2波長と最適金膜厚を基に、光ファイバSPRセンサシステムを構築している。開発した簡易型2波長LED光ファイバSPRセンサを用いた溶液測定より、屈折率が1.3293から1.3616までの溶液を $2.4 \times 10^{-4}$ の分解能で測定可能であることを示している。

5章では、光ファイバSPRセンサを実用化および液体の光学定数を評価するための課題について検討している。また、光ファイバSPRセンサの応答スペクトルを用いて液体の屈折率を求めるためには、スラブ導波路モデルに変わる新しいモデルが必要であることを示唆している。第6章では、本研究で得られた成果がまとめられている。

以上の成果は、光ファイバ表面プラズモンセンサ開発に対して重要な知見を与えるものであり、博士(工学)の学位を授与するのに相応しい内容であると認定する。