

光ファイバSPRセンサプロープの加工法の改善

工学部システム工学科 松井義和

1. はじめに SPRとは表面プラズモン共鳴の略称である。表面プラズモン（SP）は金属のように自由電子が存在する物質と誘電体との境界で、電磁波と自由電子の結合により励起される電子の粗密波である。このエネルギーは表面に強く集中しているため、表面の物性に非常に高い感度を持っている。現在、このようなSPの特徴を利用した応用研究が盛んに行なわれている。特に、免疫反応を応用した研究が多く見られる。一般にSPの励起はプリズムカップラー法を用いることが多いが、本報告はプリズムを光ファイバに代えたSPRセンサの原理とシステムの構成を示し、本センサの課題の一つであるセンサプロープの加工法の改善について報告する。

2. センサ原理 光ファイバSPRセンサのSPの励起法はプリズムカップラー法である。図1はこのクレッチマン配置による原理図である。プリズム／金属膜／誘電体（試料）の3層構造において、プリズム側からP偏光した単色光を臨界角以上で入射すると、エバネッセント波が金属の表面に滲み出る。このときエバネッセント波のX方向の波数とSPの波数が一致すると、SPの共鳴（SPR）が生じ、光のエネルギーはSPの波動エネルギーに変化するため、反射光は図2のように急峻な減衰を示す。金属と誘電体界面を伝搬するSPの波数 k_{sp} の分散関係は

$$k_{sp} = \left(\frac{\omega}{c} \right) \sqrt{\frac{\epsilon_m \epsilon_s}{\epsilon_m + \epsilon_s}} \quad \dots (1)$$

ここで ω は光の角周波数、 c は光速、 ϵ_m は金属の誘電率、 ϵ_s は試料の誘電率である。また、光の波長を λ 、入射角を θ 、プリズムの屈折率を n_p とすれば、エバネッセント波の界面に平行な波数成分 k_{px} は

$$k_{px} = \left(\frac{2\pi}{\lambda} \right) n_p \sin \theta \quad \dots (2)$$

この k_{px} と k_{sp} が等しいときSPが励起される。プリズム型では、一般に入射角 θ を変えてSP共振特性を得るが、光ファイバは入射角 θ を変えることができないため、光の波長 λ の変化によりSP共振特性を得る。

3. センサプロープとシステム 図3は光ファイバSPRセンサプロープの概略図である。コア径は400 μm 、クラッド径480 μm 、開口数0.37のステップインデックス型のマルチ

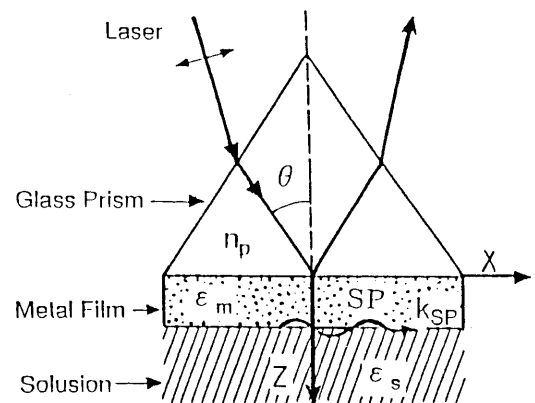


図1 センサ原理図

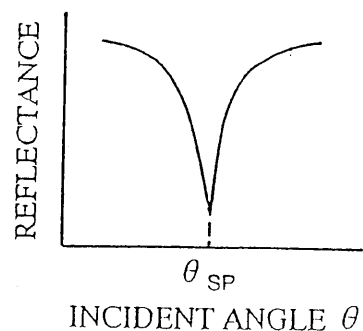


図2 入射角と反射光強度

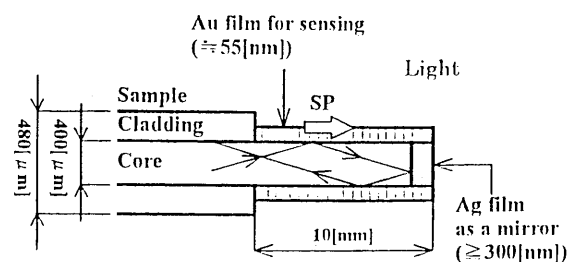


図3 センサプロープ

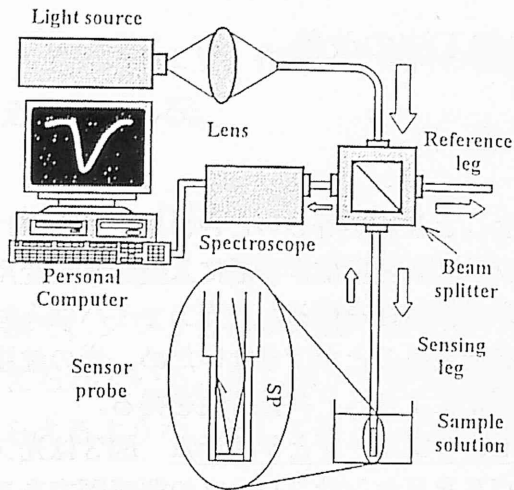


図4 SPRセンシングシステム

モードファイバである。センシング部はクラッドを除き、端面にはミラーとなる銀を300 nm以上、側面にはSPを励起するための金を55nm、ファイバを回転させながら蒸着する。図4はSPRセンシングシステムである。白色光（ハロゲンランプ）をレンズで絞り光ファイバに導く。ビームスプリッタでセンシング光とリファレンス光に分け、センシング光はセンサプローブに入る。コア側面の金膜上である波長の光はSPを励起し減衰する。これを分光器で検出する。図5の上図は空気と水をサンプルとしたときの分光器より得られた光強度のスペクトルである。この波長領域では、光ファイバの光伝搬角の関係より、サンプルが空気の場合、SPは励起されないが、水の場合は励起される。水のスペクトルを空気のスペクトルで除した結果が下図である。これはSP励起による減衰を表わす曲線でSPRスペクトルと称す。

4. センサプローブ加工法の課題と改善 本センサプローブで、特に重要なのは1) 光ファイバコアの切断面と2) コア側面の金膜厚である。この課題と改善法を次に示す。

4. 1 従来のコア端面の加工法とその課題 プローブは注射針のように使い捨てタイプを考えており、端面は研磨することなく、簡単に加工できること望ましい。しかし、用いる光ファイバのコア径が400 μm と太いため、現在、この目的を満たす市販の光ファイバカッタはない。従来のコア端面の加工法を図6に示す。ファイバの保持具は厚さ10mmのベ

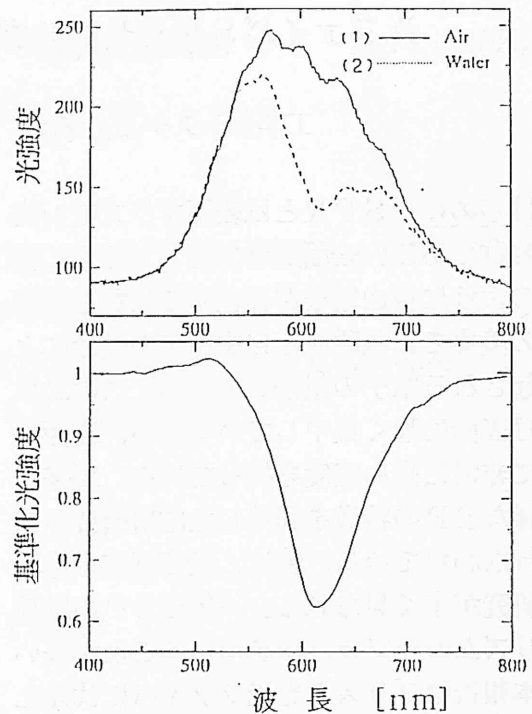


図5 光強度分布とSPRスペクトル

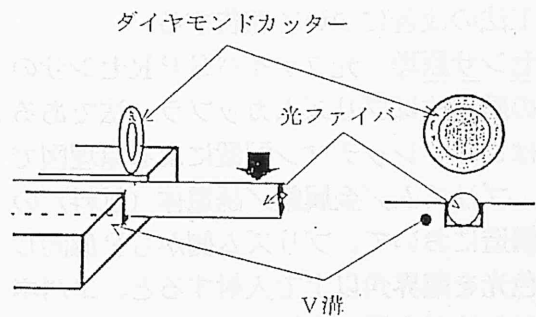


図6 従来のコア端面の加工法

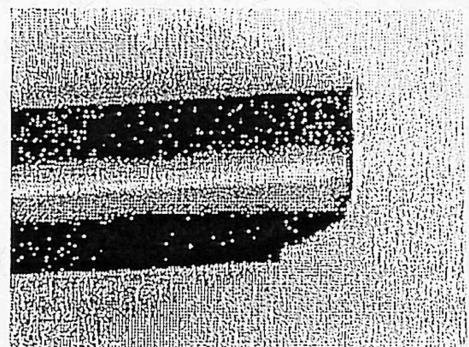


図7 従来の切断法によるコア切断面

ーク板にV溝、あるいはファイバの一次被覆径と同じ幅、同じ深さの矩形溝を施している。この溝に、端面より10数mmの一次被覆とクラッド除去したファイバを入れ、図示のようにダイヤモンドブレード（厚さ40 μm ）でコアに傷を入れた後、矢印の位置に力を加えて

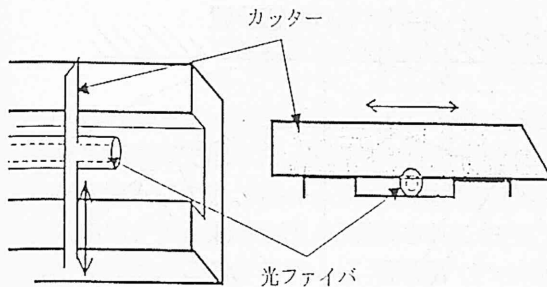


図8 新しいコア切断法

切断する。この方法によるコア切断面の一例を図7に示す。この様に従来法では切断面の一部に欠け（リップ）を生ずる。この欠け部の面積はコア断面積の10～20%であり、入射光量の減少とミラー端面からの漏れ光によるセンサ感度の低下をもたらす。

4. 2 新しいコア切断法 図8はコア端面の新しい切断法を概略的に示したものである。これは厚さ10mmのベークライト基板に、幅30mm、深さ0.50～0.60mmの溝（ファイバ形状に依存）を設け、この溝に1次被覆が付いたままのファイバを図示のように載せ、ファイバ端面より5～10mmの位置に刃先角約16°のカッターで、ファイバを回転させながら押し切るものである。この方法では溝の深さとファイバに回転を加えながら押し切る操作が重要になる。使用したファイバは住友電工製SPC-04、コア（SiO₂）径400μm、クラッド（シリコン）径430μm、1次被覆（ETFE）800μmである。表1は溝の深さによる、コアの切断実験をそれぞれ10回ずつ（0.56は8回）行なった結果である。使用する溝の深さによって、切断状態が異なることが分かる。溝の深さが0.54～0.58のとき、比較的良好な結果となっている。図9はこの方法によるコア切断面の写真である。図10は新旧切断法の比較のため、プローブからの分光器への戻り光量を比較したものである。バックグラウンド光を除くと、新しい切断方法は従来法の約1.6倍の光量になっている。

4. 3 金蒸着回転装置とその課題 図11はコアの金膜厚とSPRスペクトルの関係を求めたものである。図中の数値は膜厚である。膜厚が厚くなるにしたがって、SP共振波長は長波長側にシフトし、膜厚が53nmのとき、

表1 加工溝の深さと切断面の状態

| 溝の深さ [mm] | 使用不可 | | | 使用可能 | | |
|--------------|------|-----|----|------|-----|----|
| | ちぎれ | ゆがみ | かけ | ちぎれ | ゆがみ | かけ |
| 0.50 | 3 | 2 | 0 | 0 | 0 | 5 |
| 0.52 | 1 | 0 | 0 | 1 | 3 | 5 |
| 0.54 | 2 | 0 | 0 | 0 | 0 | 8 |
| 0.56 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 6 |
| 0.58 | 0 | 0 | 1 | 0 | 4 | 5 |
| 0.60 | 0 | 0 | 2 | 0 | 3 | 5 |

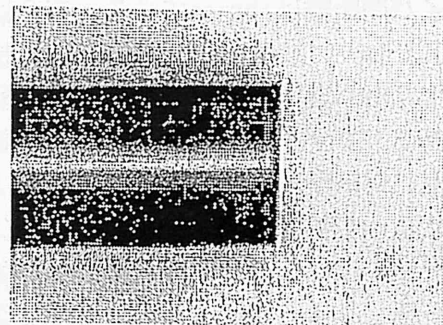


図9 新しいコア切断法によるコア切断面

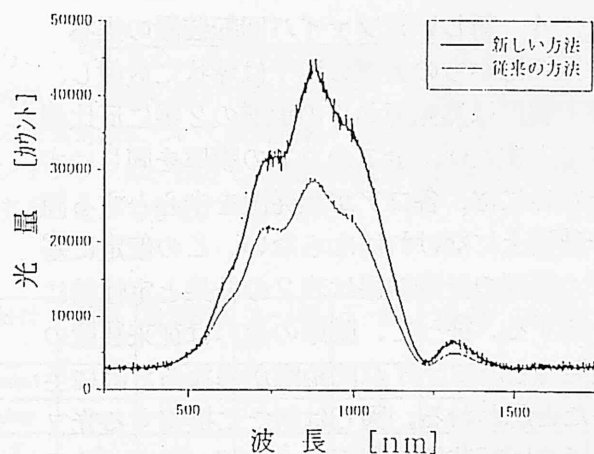


図10 光強度による新・旧法の比較

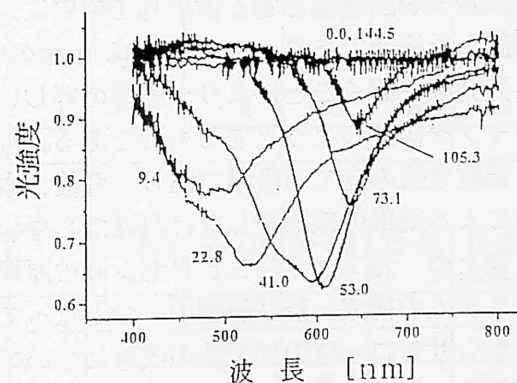


図11 金の膜厚とSPRスペクトル

半値幅が狭く、最も鋭い減衰を示している。SP共振波長の膜厚依存性が大きいことが分かる。蒸着に用いた光ファイバ回転装置はコアの金の蒸着膜厚を均一にするため、蒸着時、全てのファイバは歯車によって一定速度で回転している。また、それぞれの歯車の回転軸はファイバホルダも兼ねており、全て同一平面上にある。図12は現在の光ファイバ回転装置における光ファイバと金属の蒸発位置との関係を概略的に示したものである。蒸発源と中心となるファイバまでの距離は約120 mm、ファイバ間距離は18mmである。表2は本装置作製プローブによる水のSP共振波長測定結果である。表中の番号はファイバの配置順位である。ファイバは左右より蒸着装置中央に交互に対抗配置している。この結果は設置位置によって膜厚が異なること。および、6と12を中心に、これより離れるにしたがって膜厚が薄くなることから分かる。このように膜厚によってSP共振波長と、測定感度が変わるため、膜厚を等しくすることは重要である。

4. 4 新しい光ファイバ回転装置の提案

蒸発源からの金属の粒子は球状に放射し、蒸着膜厚は蒸発源からの距離の2乗に反比例するとすれば、全てのコアの膜厚を同じにするためには、各コアが蒸発源を中心とする同一球面上になければならない。この仮定に基づき膜厚の計算結果は表2の結果と定性的に一致する。従って、膜厚の違いは従来装置の蒸発源と各ファイバ間距離が異なるために生じたと思われる。図13は新たに提案する光ファイバ回転装置の側面図の一部である。装置は半径120mmの円周上に、左右各7個のファイバホルダを回転軸とする歯車列を中央に対向配置した構造であり、この半径120mmの中心に蒸発源を置くことにより、膜厚の等しいプローブを作製しようとするものである。現在、装置を組み立てる段階であり、今後、本装置による効果の確認をしなければならない。

5. まとめ 光ファイバSPRセンサの原理とシステムの構成、及び課題の一つとなっていたセンサプローブの加工法の改善について報告した。特に、センサプローブの加工法については、1) ファイバ端面の加工法の課題

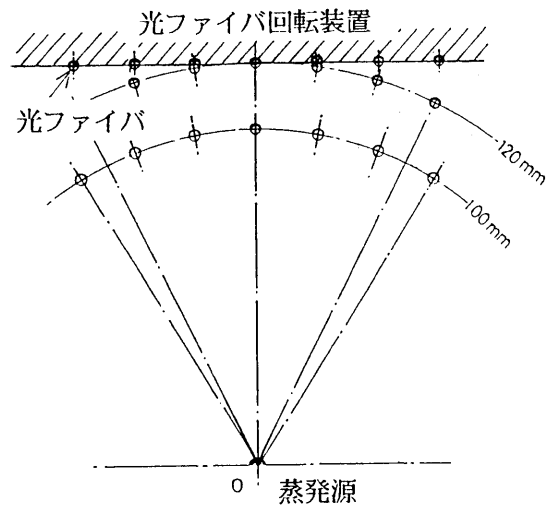


図12 光ファイバ回転装置の光ファイバと蒸発源との位置関係

表2 蒸着時のファイバ位置とSP共振波長

| 配置順位 | SP共振波長 [nm] | 配置順位 | SP共振波長 [nm] |
|------|----------------|------|----------------|
| 1 | 588 | 8 | — |
| 2 | 583 | 9 | 605 |
| 3 | 594 | 10 | 609 |
| 4 | 603 | 11 | 610 |
| 5 | 608 | 12 | 617 |
| 6 | 613 | 13 | 613 |
| 7 | 602 | 14 | 603 |

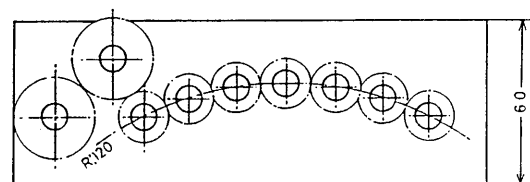


図13 提案する新しい光ファイバ回転装置

と、その改善策として新しい加工法を示した。2) SPを励起する金膜厚がセンサに与える影響と従来装置の問題点を示した。また、膜厚を等しくするための新しい光ファイバ回転装置を提案をした。

参考文献

- 1) S. Satou 他 :15th SENSOR S. IEEEJ (1997)
- 2) 松井 他 :電気学会化学センサシステム研究会 CS-98-12(1998)