

# 可視域アレイ導波路回折格子を用いた 小型分光センサの設計と評価

長野 浩子<sup>1</sup>, 駒井 友紀<sup>1</sup>, 岡本 勝就<sup>2</sup>, 小舘香椎子<sup>1</sup>

<sup>1</sup>日本女子大学理学研究科 数理・物性構造科学専攻

<sup>2</sup>岡本研究所 (NTT R & D フェロー)

(2005年11月30日受理)

**要 旨** 近年, 医学やバイオの分野において生体機能情報を取得するため, 分光の手法を用いて高速かつ高性能にセンシングできるセンサが開発されている。しかし, 従来使用されている分光センサは主に広帯域光源・回折格子・リニアセンサの組み合わせで集積化が難しく, 解析速度の向上, 高感度化も課題となっている。そこで我々は, 小型化と高分解能化を同時に実現可能なセンサとして, リアルタイム波長合分波機能をもつアレイ導波路回折格子 (Arrayed Waveguide Grating: AWG) に少量の試料を挿入する微細な溝を有する分光センサを提案している。これにより, 試料の屈折率と吸収係数を同時に透過率変化として検出でき, 物質の種類や濃度の測定が可能となる。本論文では, 測定対象物質が多数存在する可視域の AWG 分光センサを設計・試作し, 感度向上のために, 挿入する試料の屈折率と吸光度および溝を挿入することにより生じる損失を考慮し, 試料溝の最適設計を行った結果を報告する。試作した AWG 分光センサを用いて, 吸収スペクトル測定により, ささまざまな環境指標となっているクロロフィル a, b の溶液の識別に成功した。吸光度 1.0 (光路長 1 mm) の変化に対して 1.4dB の透過率が変化し, 従来よりも 2 倍の感度向上が得られるセンサを実現し, 生体情報などの検出が可能な医学やバイオ分野における小型分光センサの実現の可能性を得た。

**キーワード:** 小型平面分光センサ, 可視域 AWG, 透過スペクトル, 高波長分解能, クロロフィル a & b, 環境指標

## 1. はじめに

ユビキタス社会に向けた携帯可能な超小型分光センサのニーズが高まり, 「いつでも何処でも誰でも簡単にリアルタイムで分光センシングができ, 取得したスペクトル情報をユーザが発信できる」センサの研究開発・製品化が進んでいる<sup>1)</sup>。日本の u-Japan 構想でも, ユビキタスネットワークを基盤とする社会を実現するとともに, 情報通信ネットワークと小型光センサの実現で解決することが目標とされており, 携帯可能な手乗りサイズのセンサの適用が期待される<sup>2)</sup>。

「分光センシング」は, 光と物質の相互作用に起因するスペクトル情報を得ることで物質の同定や微量物質の検出が可能である。従来型の小型分光器は, 主に広帯域光源, 回折格子, リニアセンサを組み合わせた自由空間

型光学系で構成され, 分光光度計と同レベルのサブナノメートルの波長の分解を有する。しかし, これらの小型分光器を微量試料の測定に適用するためには試料ホルダとして数 cm<sup>3</sup> のキュベットを用いなければならない, 測定データの高感度化および再現性の向上も重要な課題である。そのため, 医療・食品分析においては酵素センサや化学センサが用いられることが多いが, これらの手法では分析結果を得るまでに作業時間とユーザの技術的ノウハウを要する。

この課題を解決できる光導波路を用いた分光センシング手法は, 広帯域光源, 測定試料を挿入するセル部, 分光器, 受光器から構成される光学系を数ミクロンから数 100  $\mu\text{m}$  の厚みの平面光波回路 (PLC) 基板上に集約することができるため, 必要なときに・必要な場所にセンサを持っていき, シンプルな測定手順で分光センシングを行うことが可能である。また, 導波路デバイスを使用するため, ネットワークシステムとの整合性も高い。

我々はフォトニックネットワークの波長多重方式で合分波デバイスとして用いられており、サブナノメートルの波長分解能を有する AWG を分光器として適用し、AWG のスラブ導波路または入出力導波路部分に微細な溝を形成することにより試料挿入セルを組み込んだ新しい AWG 小型分光センサを提案している<sup>3)</sup>。AWG 小型分光センサは、サブナノメートルの波長分解能を実現し、数  $\mu\text{l}$  オーダの微量の試料でセンシングが可能、チップサイズの基板上に分光素子と試料セルの一体化が可能、極めて高速でシンプルな測定手順であるなどの特徴を有している。これまでに、フォトニックネットワーク用近赤外波長域 AWG の入力側スラブ導波路内に、光路長  $70\mu\text{m}$  の試料挿入溝を形成し、出力側スラブ導波路の端面をカットした近赤外波長域 AWG 小型分光センサを試作した。試作センサを用いた透過率測定実験から、酢酸ナトリウム溶液を用いて濃度定量実験を行った結果、屈折率の濃度依存性により  $\pm 0.25\text{wt}\%$  で濃度定量できることを既に確認した<sup>4)</sup>。

持ち運び可能な小型分光センサの活用が期待される環境分野やバイオメディカル分野では、測定対象となるたんばく質などの被検出物質が可視波長域～短波長側近赤外波長域の光で反応を示すことが多い。一方、可視波長域の導波路用硝材として重フリントガラスなどがあるものの、導波路の精度や硝材として分散が大きいなどの理由により、使用例はかなり限られていた。そこで、今回の検討では可視波長域でセンシングを行うための AWG 小型分光センサの実現に向け、改めて可視波長域に対する AWG の設計を行った。コア幅・コア厚を始めとする形状パラメータを最適化し、初めて可視 AWG の試作に成功した<sup>5)</sup>。さらに、我々は、最適設計をおこなった試料挿入溝を可視 AWG に挿入し、環境指標の 1 つであるクロロフィル a と b の識別を行った。また、アレイ受光を行う際に異次数スペクトルの重なりを除去するために、新たに基板レス誘電体多層膜フィルタを可視 AWG の入力導波路中に形成したダイシング溝に挿入した。この手法により AWG 小型分光センサに光学デバイスを一体化させるだけでなく、フィルタを入れ替えることで、所望の物質を 1 つの AWG 小型分光センサで測定可能となる<sup>6)</sup>。本論文では、試作した可視 AWG 小型分光センサを用いたクロロフィル a と b の識別原理実験および AWG から出力される全チャンネルの透過スペクトル同時測定実験を示し、ビーム伝搬法に基づくシミュレーションを用いた数値解析と分光センシングの測定精度について報告する。

## 2. AWG 小型分光センサ

我々は液体試料の透過スペクトル特性を測定すること

ができる小型分光センサとして、分散素子に現在 WDM システムのキーデバイスとして使用されている AWG を用い、微小試料挿入溝および光源・付属光学部品・受光素子を AWG と同じ平面光波回路に一体化した AWG 小型分光センサを考案した。特に、AWG と同一の PLC 基板に微細な溝を作製することで、分散素子と通常の分光器で試料を挿入するセルを一体化している。

分光素子である AWG は長さの異なる多数の光導波路から構成され、アレイ導波路の長さは隣接する導波路で一定量  $\Delta L$  ずつ異なっており、この位相ずれを利用して波長の合成・分岐が実現できる<sup>7)</sup>。AWG の設計は通常の分光器と同様、アレイ導波路のピッチ  $d$ 、スラブ導波路の焦点距離  $f$  を変化させることで線分散を大きくすることができる。さらに AWG の特徴として、回折次数  $m$  を変えることが可能で、回折次数  $m$  は  $\Delta L$  に比例し、他のパラメータとは独立に導波路長の設計で任意の値を設定できるので、高波長分解能 ( $\Delta\lambda > 0.15\text{nm}$ ) を容易に満たす。現在では 6 インチウエハを用いた 400 チャンネル大規模 AWG が実現され、隣接波長チャンネルのクロストークが  $-20\text{dB}$  の良好な透過特性が確認されている<sup>8)</sup>。また、回折次数  $m$  に対して FSR (Free Spectral Range) ごとに中心波長  $\lambda_0$  が複数存在し、AWG 小型分光センサの使用可能な波長帯域は AWG の FSR に依存する。したがって分光センシング測定に必要な波長範囲を  $R$  とすると

$$\text{FSR} = \frac{\lambda_0}{m} \geq R$$

を満たすように AWG の設計パラメータを決める。そこで、分光センシングに必要な測定波長帯域を部分的に抽出し、AWG の入力導波路を複数化して異なる入力導波路に各分割波長帯域に合う光源を配置し、短時間で切り替えて出力面での透過スペクトルを合成する手法を導入する。

試料挿入溝の作製箇所は AWG の構成上、①入力導波路群内、②入力スラブ導波路内、③アレイ導波路内、④出力スラブ導波路内、⑤出力導波路群内の 5 種類が考えられ、取得する情報と試料挿入溝内の測定対象試料の分布によって使い分けることが可能である。

スラブ導波路内に試料挿入溝を設けた場合、AWG 小型分光センサの出力光の透過率  $T$  は次式のように近似的に算出できる。

$$T = I - (P_0 + P_1 + P_2 + P_3)$$

ここで、 $I$  は入力光パワー、 $P_0$  は試料挿入溝作製前の AWG の挿入損失で液体試料の種類や濃度には依存しない。 $P_1$  は PLC 回路基板と試料挿入溝の境界面で生じるフレネル反射損失、 $P_2$  は入力光が試料挿入溝内を伝搬

する際に生じる吸収損失,  $P_3$  は試料挿入溝内で光が自由空間を伝搬する際に発生する回折損失を示す。これらの損失要因の中で液体試料固有のパラメータである屈折率  $n_{\text{sample}}$ , 濃度に依存した吸収係数  $A_{\text{sample}}$  および試料挿入溝の全光路長  $L$  に依存するのは  $P_1$ ,  $P_2$ ,  $P_3$  であり次式のように表される。

$$\frac{P_1}{I_0} = 2 \times \left( \frac{n_s - n_{\text{sample}}}{n_s + n_{\text{sample}}} \right)^2$$

$$\frac{P_2}{I_0} = 1 - \exp(-A_{\text{sample}} \cdot L)$$

$$\frac{P_3}{I_0} = \frac{I_0 - I_{\text{coupled}}}{I_0}$$

ここで,  $n_0$  は導波路の実効屈折率,  $I_0$  は入射光強度,  $I_{\text{coupled}}$  は試料挿入溝を透過した後の擬ガウスビームの光強度を示し, 次式のように表せる。

$$I_0 = \int_{-\infty}^{\infty} \left| \text{Cexp} \left[ -\frac{y^2}{2a^2} \right] \right|^2 dy$$

$$I_{\text{coupled}} = \left| \int_{-\infty}^{\infty} \frac{a}{W} \text{Cexp} \left[ -\left( \frac{y^2}{2W^2} + \frac{y^2}{2a^2} \right) \right] dy \right|^2$$

また,  $W$  は

$$W = a \left( 1 + \frac{L^2}{k^2 n_{\text{sample}}^2 a^4} \right)^{1/2}$$

と表せる。 $L$  は試料挿入溝の長さ,  $C$  は入射ビームの振

幅,  $2a$  はスポットサイズ,  $k$  は波数である。したがって AWG 小型分光センサのダイナミックレンジ  $D$  は

$$D = |P_2(\text{Airgap}) - P_3(\text{Airgap})|$$

となる。

### 3. 可視域 AWG を用いた分光センサ

#### 3.1 可視域 AWG の設計と試作

近赤外波長域の AWG よりも可視域の AWG では波長が短くなることから導波路のコア径を小さくしているが, 試作では伝搬損失を低くするために, コア寸法を単

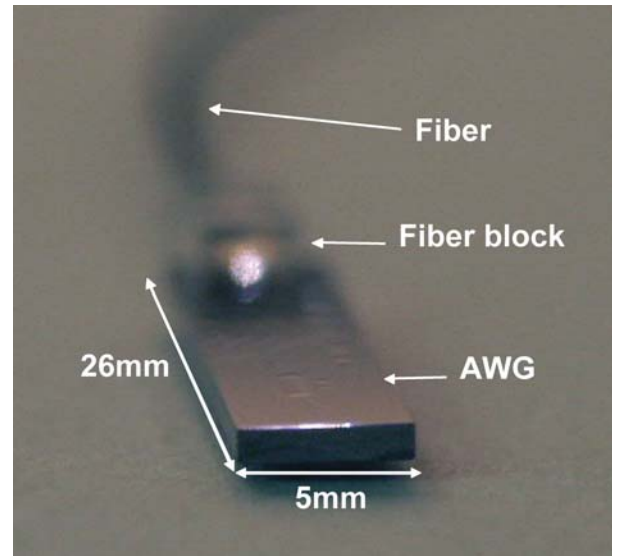


Fig. 1 (a). The fabricated visible rainbow AWG.

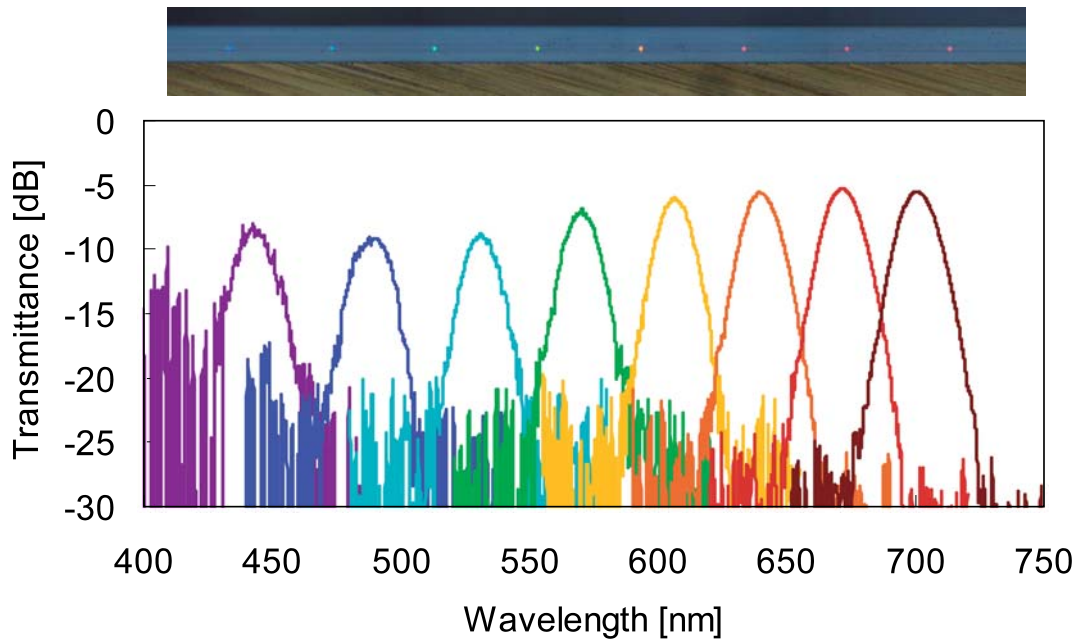


Fig. 1 (b). The end face of the output waveguides and transmission spectra of the fabricated visible rainbow AWG.



一モード条件より大きく確保した。また、アレイ導波路部分での漏れ光を小さくするために、導波路の曲げ半径を近赤外域の AWG よりも大きく設計した。この基本条件に従い、設計波長 510nm、チャンネル数 8 ch、波長間隔 37.5 nm、FSR 300nm の虹色可視 AWG を試作し、出力端面から 8 色のスペクトルが出ていることを確認した。Fig. 1 (a) に試作した可視域 AWG の写真、(b) に可視 AWG 出力端面の観察結果、スペクトル測定結果を示す。3  $\mu$ m 程度のコアから虹色の光が出ていることを確認した。挿入損失は、波長 700nm で 6dB、波長 450nm で 9dB であった。短波長ほど損失が高く、スラブ導波路とアレイ導波路の結合損失の影響と受光に使用した光スペクトラムアナライザの感度が低下していることが要因として考えられる。分光センサとしては、試料挿入溝の工夫などにより透過光強度のダイナミックレンジを 25dB 程度まで確保できている。

可視波長域での AWG の設計の有効性を得たので、以下に示す条件で、汎用的な試料の検出に適用可能な可視 AWG の設計を行った。使用した AWG の設計パラメータを Table 1 に、透過スペクトル測定結果と BPM 数値計算結果を Fig. 2 に示す。設計ではチャンネル間隔を 12.5 nm と設定したが、AWG の形状パラメータを操作する

Table 1. Design parameter of an 8ch visible AWG for the proposal spectroscopic sensor

|                                  |                               |
|----------------------------------|-------------------------------|
| Channel spacing $\Delta\lambda$  | 12.5nm                        |
| Center wavelength $\lambda_0$    | 800nm                         |
| Channel number $N$               | 8                             |
| Diffraction order $m$            | 7                             |
| Slab focal length $f$            | 1033.3 $\mu$ m                |
| Number of arrayed waveguides $N$ | 42                            |
| Circuit size                     | 26 $\times$ 3 mm <sup>2</sup> |

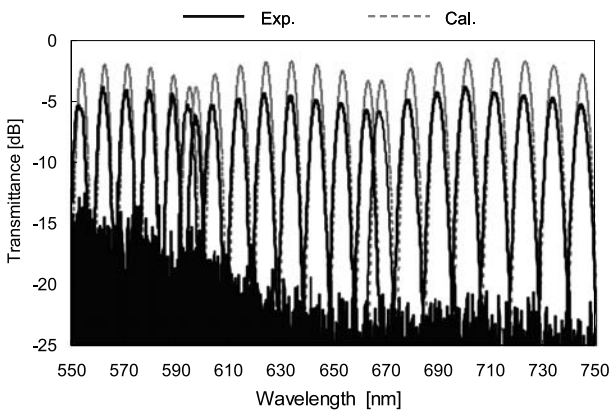


Fig. 2. Experimental and simulated transmission channels of the fabricated 8ch visible AWG spectroscopic sensor.

ことにより、特定物質に合わせてチャンネル間隔をより小さくすることは可能である。

### 3.2 試料溝の最適設計

試料挿入溝における主な光損失は、2. で述べたようにフレネル反射損失、吸収損失、回折損失がある。可視 AWG 小型分光センサの場合は、吸収などの光学的特性の変化を検出できることを最優先とした。本検討ではセンシングの対象試料として選択したクロロフィル a と b はそれぞれマッチングオイルに溶かし、各溶液の濃度を 0.4mg/ml、1.0mg/ml とした。クロロフィル a と b の溶液の吸収極大波長はそれぞれ 663 nm、645 nm である。Fig. 3 に分光光度計で測定したクロロフィル a と b の溶液の吸収特性を示す。

測定試料の吸収極大波長で得られる損失に合わせて試料挿入溝の設計を最適化する必要があり、今回はクロロフィル a と b の溶液の吸収極大波長で、損失の差が 1dB 以上になるように設計した。試料挿入溝の幅が広くなると、吸収損失に比べ回折損失のほうが支配的になり、物質固有の情報を含む吸収損失の変化が全体の光損失に比べ微量になり感度が下がる。そこで、回折による損失を抑制するため、試料挿入溝の幅を 30  $\mu$ m 以下とした。また、ダイシングにより溝を作製した場合、作製の都合上、作製可能な最小の溝幅は 20  $\mu$ m になる。

試料挿入溝において吸収による影響を大きくするためには、光が試料を通過する距離を稼ぐ必要があることから、複数本の溝を作製した。さらに、試料挿入溝のピッチ  $w$ 、光路長  $L$ 、本数  $m_{\text{groove}}$  から求まる溝領域が AWG のスラブ導波路の長さ  $f$  の半分以下になるようにするため、

$$(w+L) \times m_{\text{groove}} \leq f \times 0.5$$

を満たすように試料に合わせて  $w$ 、 $L$ 、 $m_{\text{groove}}$  の最適設計を行うこととした。Fig. 4 に 660nm における試料挿

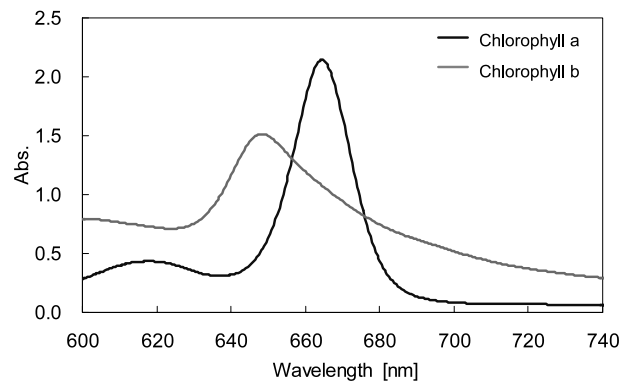


Fig. 3. Measurement result of the absorbance index for chlorophyll a and b.

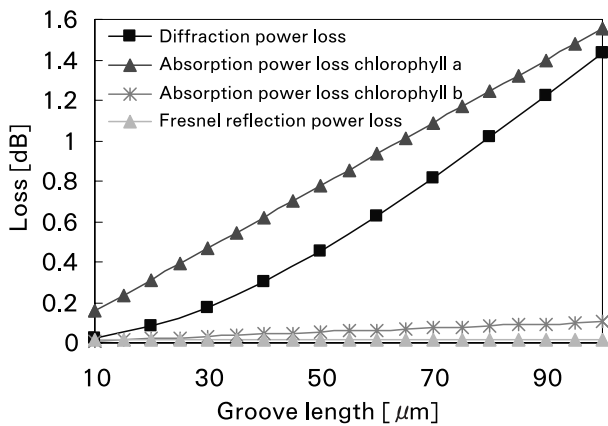


Fig. 4. Simulation results of the optical power loss per one groove at  $\lambda = 660 \text{ nm}$ .

入溝 1 本あたりの損失計算結果を示す。この吸収特性からセンシング用 8 ch 可視 AWG 小型分光センサに形成する試料挿入溝は、AWG の入力側スラブ導波路内に幅  $30 \mu\text{m}$  のダイシング溝を 5 本とし、吸光度 1.0 (光路長 1 mm) の変化に対し 1.5 dB の差で識別できるように設計した。

### 3.3 バンドパスフィルタを用いた小型分光センサ

クロロフィル a と b の吸収特性の違いが、 $600 \text{ nm} \sim 700 \text{ nm}$  の範囲に表れていることから、これら 2 つの試料を識別するために 8 ch 可視 AWG の回折次数 9 次および 8 次の透過スペクトルの中から合計 11 ch を使用した。このとき、AWG 小型分光センサから出力される複数のスペクトルピークのうち、センシングに必要なスペクトルを同時に検出するために、バンドパスフィルタが必要となる。我々は AWG 小型分光センサでの挿入損失をできるだけ削減するために、スパッタリングによる高精度な成膜を特徴とする基板ガラスなしの誘電体多層膜フィルタに着目した。測定対象物質であるクロロフィル a と b の吸収ピーク値にあわせて、 $600 \sim 700 \text{ nm}$  の波長のみを透過する基板レスバンドパスフィルタを、入力導波路内に作製した幅約  $25 \mu\text{m}$  の溝に垂直方向に挿入した。フィルタの厚みは  $20 \mu\text{m}$  とした。このフィルタ適用により、フィルタと分光センサが PLC の基板上に一体化でき、異次数のスペクトルの重なりを除去することが可能になった。さらに、透過波長の異なるフィルタを挿入することで、1 つの AWG 分光センサで複数の測定対象物質をセンシング可能となる。

## 4. クロロフィル a & b の識別実験結果

### 4.1 クロロフィル a & b の透過率測定

可視 AWG 分光センサの有効性を確認するため、クロロフィル a と b のマッチングオイル溶液を用いて識別実

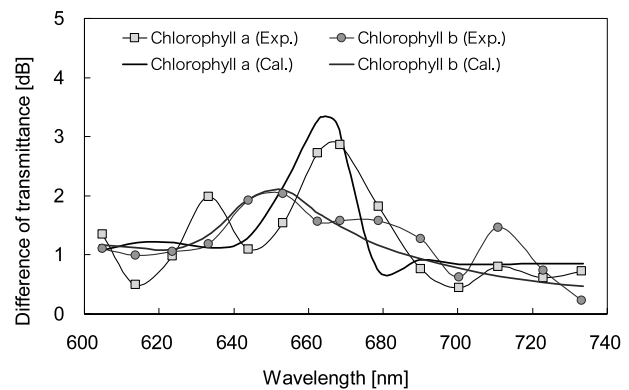


Fig. 5. Difference of transmittance between the chlorophylls and the refractive index matching oil.

験を行った。各溶液の濃度は  $0.4 \text{ mg/ml}$ 、 $1.0 \text{ mg/ml}$  とした。

実験光学系用光源としては、発光波長帯域が  $400 \sim 1800 \text{ nm}$  の白色光源を用い、異なる次数のスペクトルの重なりを除去するために、出力を可視シングルモードファイバで取り出し、クロロフィル a と b の透過率の変化を光スペクトルアナライザで測定した。Fig. 5 に各溶液の透過率差を測定した結果を示す。

クロロフィル a と b 溶液を試料挿入溝に挿入すると、各溶液における透過光強度が変化し、その変化量が波長に依存していることから、試作した可視 AWG 小型分光センサが溶液の吸収特性を感知していることを確認した。さらに 3.2 節で述べた理論を適用した試料挿入溝における光損失の数値計算と得られた実験結果との比較を行った結果、実験値と計算値の差は共に 0.3 dB と傾向が良く一致している。このとき、リファレンス用となる液体試料は溶媒でもあるマッチングオイルとした。ファイバスキャンによる吸収スペクトル測定により、透過率差の実験値はクロロフィル a で 2.7 dB (@662.4 nm)、クロロフィル b で 1.9 dB (@644.0 nm) であり、複数の試料を吸光度 1.0 (光路長 1 mm) の変化に対して、1.4 dB の差で識別 (クロロフィル a と b の溶液) に成功した。

### 4.2 アレイ受光による分光センサの感度と精度

クロロフィル a と b の識別の可能性を得たので、提案・試作した可視 AWG 小型分光センサの感度向上に向けた検討として、測定精度の検証を行った。AWG 小型分光センサから出力される複数のスペクトルピークを同時に検出するために、可視光ファイバを端面方向に走査させるスキャンの手法と光スペクトラムアナライザの組み合わせに変えて、有効画素数  $512 \text{ pixel} \times 58 \text{ pixel}$  のイメージセンサ (S7031, 浜松ホトニクス株式会社製) を使用し、透過光をレンズでイメージセンサの受光面に集光させ、8 ch の受光強度をリアルタイムで検出した。Fig. 6

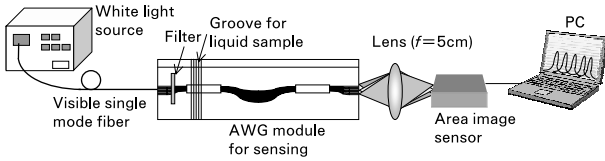


Fig. 6. Experimental setup of the spectroscopic sensing using a CCD area sensor.

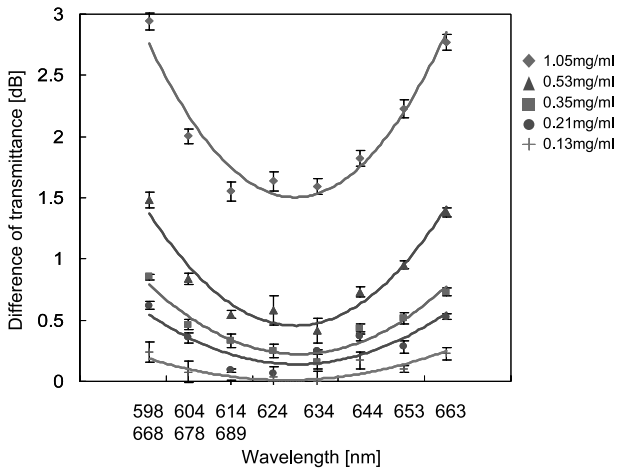


Fig. 7. Experimental results of transmittance difference of chlorophyll a solution and refractive index matching oil.

にアレイ受光を用いた可視 AWG 小型分光センサの実験光学系を示す。

アレイ受光による分光センシングの測定精度を検証するため、クロロフィル a のマッチングオイル溶液の濃度を変化させた液体試料とマッチングオイルのみを試料挿入溝に挿入した場合の透過率を測定し、マッチングオイルのみを挿入した場合の透過率でクロロフィル a 溶液の透過率を規格化した。濃度は  $2.1 \text{ mg/ml}$  の溶液を 2 倍 ( $1.05 \text{ mg/dl}$ )、4 倍 ( $0.53 \text{ mg/dl}$ )、6 倍 ( $0.35 \text{ mg/dl}$ )、10 倍 ( $0.21 \text{ mg/dl}$ )、16 倍 ( $0.13 \text{ mg/dl}$ ) と希釈し、調製した。それぞれの液体試料の濃度に応じて吸収極大波長における吸光度が変化するため、AWG 分光センサから得られる透過率の変化も検出できることを確認した。クロロフィル溶液とマッチングオイル溶液の透過率を測定し、クロロフィル a 溶液の透過率をマッチングオイルの透過率差で規格化した結果を示す。再現性を確認するため、各濃度の液体試料について 5 回の繰り返し測定を行い、ばらつき（標準偏差） $0.04 \text{ dB}$  を得た。Fig. 7 に各波長チャンネルにおける各濃度のクロロフィル a 溶液とマッチングオイルの透過率差のばらつきも示してある。液体試料の濃度に依存せず、ばらつきが発生していることから、光源の強度ゆらぎ、イメージセンサ内部のノイズによるものであると考えられる。

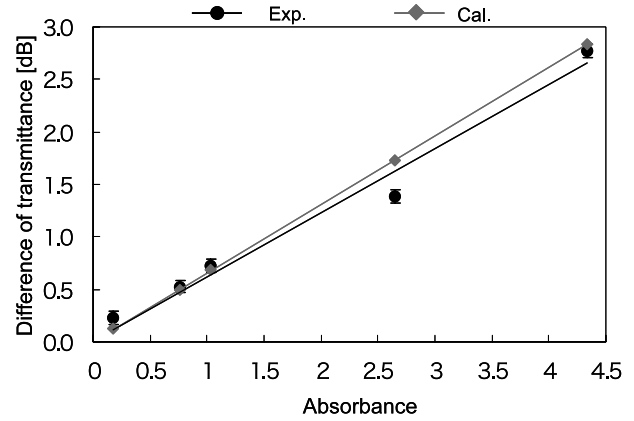


Fig. 8. The relationship between the absorbance and the transmittance difference of chlorophyll a solution.

さらに、Fig. 8 にクロロフィル a 溶液の吸収極大波長 ( $662.8 \text{ nm}$ ) における 5 種類の濃度の吸光度と検出された透過率差の関係および数値計算結果を示す。この結果より、クロロフィル a を対象として最適設計を行った可視 AWG 小型分光センサのアレイ受光測定では、ディテクタの識別感度を  $1 \text{ dB}$  とすると吸光度  $1.53$  まで測定可能であることを確認した。

吸収特性のちがいを検出する小型分光センサとしては、吸光度と透過率差の関係を示すグラフの直線の傾きが大きい方が高精度である。複数挿入溝の導入は吸収損失を大きく確保できるが、数値計算と実験値の差が生じているように溝の本数が増えるほど透過波面の乱れが生じる可能性も高くなる。試作した可視 AWG 小型分光センサの評価実験結果と解析結果より、今後、試料溝内でのビームのコリメートなど、試料挿入溝における透過波面の乱れをなくす構造上の工夫を加えることにより、提案したセンサの高精度化・高感度化が実現できることが考えられる。

## 5. ま と め

提案した AWG 小型分光センサに適用するために、新たに設計波長  $800 \text{ nm}$ 、波長間隔  $12.5 \text{ nm}$ 、回折次数 7 の可視域で動作する 8 ch 可視 AWG を設計・試作し、挿入損失  $3 \sim 4 \text{ dB}$ 、消光比  $20 \text{ dB}$  以上で良好に分波することを確認した。測定対象のクロロフィル a と b に合わせて試料挿入溝の最適設計を行い、可視 AWG の入力側スラブ導波路内に複数本の試料挿入溝（幅  $30 \mu\text{m}$ 、本数 5 本）を形成した可視域 AWG 小型分光センサの試作を行った。さらに試作した可視 AWG 小型分光センサの入力導波路に基板レスバンドパスフィルタ ( $3.0 \text{ mm} \times 0.5 \text{ mm} \times 0.02 \text{ mm}$ ) を挿入し、PLC 基板に一体化させ、FSR ごとに生じる余分な次数のスペクトル成分を除去した。

試作した可視 AWG 分光センサを用いた原理確認実験において、実験値と計算値の差は 0.3 dB であった。クロロフィル a と b 溶液の吸光度の違いにより、吸光度 1.0 (光路長 1 mm) の変化に対し 1.4 dB の差で識別に成功した。

さらに、AWG 小型分光センサの測定精度を向上させるために、データ高速処理用イメージセンサ (有効画素数  $512 \times 58 \text{ pixels}^2$ ) を使用して、複数スペクトルの同時検出を実現した。AWG 分光センサから得られる透過率が変化することを確認し、吸収極大波長 (662.8 nm) におけるクロロフィル a 溶液とマッチングオイル溶液との透過率差は 1.05 mg/dl の希釈の場合、2.77 dB になることを確認した。また、5 回測定での透過率差の再現性としてはばらつき (標準偏差) が 0.04 dB になり、良好な再現性が得られた。したがって、提案した AWG 分光センサを用いた場合、識別に必要な透過率差を 1 dB としたときに吸光度差 1.53 まで測定可能であることを実験と数値計算の両面により確認した。

今後の検討として、より簡易で高性能な可視 AWG 小型分光センサの実現に向け、可視 AWG の挿入損失の低減、LED などの小型・低消費電力の光源の利用、簡易試料挿入系の導入、受光素子と制御系の小型化・一体化が課題である。提案した小型分光センサは将来の医療分野・環境分野へ適用できるものと期待できる。

謝辞: 本研究は、大学評価・学位授与機構の神谷武志教授との共同研究の一部である。また、使用したセンシング用 AWG モジュールの試作に御協力・御助言頂きました NTT フォトニクス研究所の高橋浩氏、肥田安弘氏、鈴木賢哉氏に感謝致します。

#### 参考文献

- 1) <http://www.sci-news.co.jp/news/form.htm>.
- 2) [http://www.soumu.go.jp/menu\\_02/ict/u-japan/](http://www.soumu.go.jp/menu_02/ict/u-japan/)
- 3) Y. Komai, K. Kodate, K. Okamoto and T. Kamiya: *Ext. Abstr. (9th Microoptics Conf. 2003): Group of Microoptics of Optical Society of Japan (Japan Society of Applied Physics)* H18 (2003).
- 4) Y. Komai, H. Nagano, K. Kodate, K. Okamoto and T. Kamiya: *Jpn. J. Appl. Phys.* **43** 8B 5795-5799 (2004).
- 5) Y. Komai, H. Nagano, K. Okamoto and K. Kodate: *Proceedings of SPIE* 5867 (2005).
- 6) 肥田安弘, 鈴木賢哉, 柴田知尋, 高橋 浩, 岡本勝就: 電子情報通信学会総合大会 191 (2005).
- 7) 長野浩子, 駒井友紀, 岡本勝就, 小館香椎子: 第52回応用物理学会関係連合講演会講演予稿集 1124 (2005).
- 8) H. Takahashi, S. Suzuki and I. Nishi: *J. Lightwave Technol.* **12** 989-995 (1994).
- 9) Y. Hida, Y. Hibino, T. Kitoh, Y. Inoue, M. Itoh, T. Shibata, A. Sugita and A. Himeno: *Electron. Lett.* **37** 9 576-577 April (2001).

# Design and Evaluation of a Compact Spectroscopic Sensor Using a Visible Arrayed-Waveguide Grating

Hiroko Nagano<sup>1</sup>, Yuki Komai<sup>1</sup>, Katsunari Okamoto<sup>2</sup> and Kashiko Kodate<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Faculty of Science, Japan Women's University

<sup>2</sup>Okamoto Laboratory Ltd. (NTT R & D Fellow)

(Received November 30, 2005)

**Abstract:** We have proposed a new application of an AWG to a compact planar spectroscopic sensor to meet both conditions for miniaturization and high-wavelength resolution in the sub-nanometer order. A liquid sample under test is poured into a groove (optical path length,  $70\ \mu\text{m}$ ; groove depth,  $110\ \mu\text{m}$ ) in the first slab region of the AWG. A preliminary experiment was carried out using water solution of sodium acetate with the fabricated near-infrared AWG sensor. Concentration of the sodium acetate solute could be determined with the average accuracy of  $\pm 0.25\ \text{wt}\%$ . As the next step of AWG-based sensor, we designed and fabricated a compact spectroscopic sensor using an AWG with an insertion loss of 4dB in the visible wavelength. For improving the sensitivity of a visible AWG spectroscopic sensor, the optimal design of a groove for the liquid sample was carried out in consideration of the refractive index and transmittance of the chlorophyll a and b as various environmental indicators. We succeeded in discriminating chlorophyll solutions using the AWG sensor, and obtained a transmittance difference of 1.4dB which is two times higher than that in the conventional scheme (0.7dB) by absorbency change of 1.0 (optical path: 1.0mm). From these theoretical and experimental investigations using a visible AWG, a compact AWG-based spectroscopic sensor has been confirmed to be effective in acquiring body information in bio-medical fields.

**Key words:** planar spectroscopic sensor, visible AWG, spectral transmittance, chlorophyll a & b, environmental indicator, high-wavelength resolution