

可変中空光導波路を用いた高機能波長制御デバイス

-光を真空に閉じ込めて光を自由に操る-

東京工業大学大学院

物理情報システム創造専攻博士課程 3年

三浦 達

1. はじめに

これまでに情報伝達の手段は大きな発展を遂げ、郵便により意思疎通が可能になり、電話による会話や高速回線によるビデオ会議などが可能になった。現在ではウェブやメールなどにより、過去からは予想もできないほどの利便性を手に入れた。情報通信の発達に伴い「距離」が縮まり、「時間」が短縮され、通信容量の増大に伴い送受信できる情報が持つ表現力が向上する。等身大でリアルタイムで高音質な、あたかも受信者が送信元に居るかのような環境に発展し得るのではないかと。通信容量の増大に反比例して距離が縮まる。つまり通信技術の発展は我々の「距離」という概念を変え得るポテンシャルを持つと捉えることができる。

では、いかにしてそれほどの大容量の通信を可能にするか？光通信技術は近年大きな発展を遂げ、1本の光ファイバに多数の波長の光を通す波長分割多重(Wavelength Division Multiplexing)通信により通信容量は飛躍的な増大が可能となった。用いる波長数が増える程、通信容量も増大する。このWDM通信を行うには当然、多波長の光源、受光器、光の多重化、分波化を行う光合分波器、所望の波長の光のみを入出力する光フィルタ等、多くの光デバイスが必要となる。つまり、光の波長を自由に操る技術が必要不可欠である。

現在実用化されている光回路素子、例えば光フィルタでは、光導波路の材料固有の屈折率の温度依存性によるフィルタ波長のシフトなどの問題が存在する。現存の導波路デバイスは石英ガラスや半導体などの材料で構成されているが、精密な温度制御が不可欠であり、温度無依存化を可能とする新しい光回路構成法が望まれている。また、波長可変デバイスにおいては、光導波路の構成材料の屈折率を電気光学効果や熱光学効果などを用いて能動的に変化させることで光の伝搬特性を変化させているが、この導波路の屈折率変化は十分に大きな変化とは言えず、よりダイナミックレンジの大きな波長可変デバイスの構成方法が望まれている。また、上記の温度無依存性と可変性を同時に実現する光回路は未踏の研究領域である。

本研究では、真空中に光を伝搬させるという新しい着想に基づく可変中空光導波路を用いた温度無依存の光回路の構成法の確立、中空光導波路とマイクロマシン(Micro-Electro Mechanical System)を融合した新しい波長可変デバイスの確立を目標として、以下を研究目

的とした。

- 1) 低損失・偏波無依存の新しい中空光導波路の構成法探索
- 2) 温度無依存光回路の実現
- 3) マイクロマシンを融合した可変機能を有する光波制御の実現

2. 可変中空光導波路の提案

通信容量の増大のためにはより高密度な波長多重化、広い波長帯域が必要となる。高密度化の際には光の波長の間隔が非常に狭くなっていく。温度により波長特性が変化してしまう光デバイスのなかで、その近接した光の混信を防ぐためには非常に精密な温度制御が必要となる。また近年普及が進められている FTTH (Fiber To The Home) では各家庭までの光経路の敷設やそれにとまなう都市内

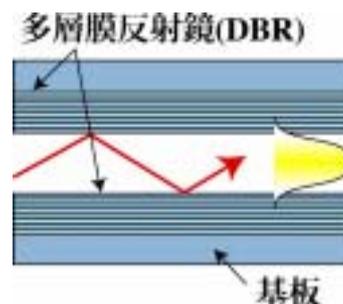


図 2 中空光導波路の構成

の光ネットワークにおける WDM 化では温度制御を必要としない光デバイスが強く望まれている。本研究では、温度に対して屈折率が変化しない真空中に光を導波させる中空光導波路(図1)による新しい光回路構成の成法を提案している。広帯域化が進められる光ネットワークでは広い動作波長をカバーする光デバイスがキーデバイスであり、中空光導波路では光を伝搬させるコアが真空であるために、コア形状を直接可変にすることで光の伝搬特性を可変にできることを見出した。光は本来、屈折率の高い材料内に局在する特性があるが、本研究では、周期構造による極めて高い反射率の鏡により光を真空中に閉じ込めて、光を自由に操る技術の創成を目指す。中空導波路は、マイクロ波・ミリ波領域では、導波管として確立された技術であるが、数百 THz の高い周波数である光に対しては、これまで未確立な領域であった。過去には、Bragg ファイバなどの提案、最近では OMNI ファイバ、ホーリーファイバ、フォトニック結晶導波路[1]などが関連技術としてあるが、本研究の独創的な点は、マイクロマシンとの融合による可変性と平面光回路への適用性に集約される。

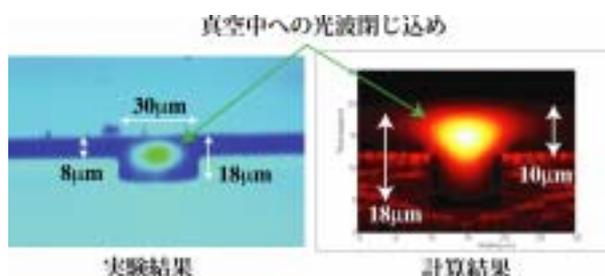


図 1 真空中に閉じ込められる光波

3. 低損失・偏波無依存の新しい中空光導波路の構成法探索

従来、光導波路は高屈折率のコアを低屈折率のクラッドで挟んで構成し、高屈折率材料中を全反射現象を用いて光を伝搬させる。このため、低損失な特性が得られる。しかし、我々が

提案する中空光導波路用いるデバイスでは導波路のコアが空気であり、クラッドよりも低屈折率となり全反射現象を用いた導波が不可能であり、低屈折率材料内に光を閉じ込める導波路構造が必要である。そこで我々が低屈折率コア内に光を導波させる構造として用いている構造を図 2 に示す。中空コアを高反射率ミラーである多層膜反射鏡で挟みフレネル反射の繰り返しにより導波させる構造である。この多層膜反射鏡(DBR)は高屈折率材料と低屈折率材料を交互に積層して作られ、その層数を増やす程高反射率となり、低損失な導波路となる。

伝送路を伝搬してきた信号を扱う場合には偏波依存性の無い導波路構造が望まれる。偏波無依存の設計は DBR の層構造を工夫することで簡単に得られる。図 3 に示すように DBR の第1層目を位相補償層として層厚をコントロールすることで反射の際の位相変化を TE, TM 偏波の両偏波共通の値をとる層厚に設定することで両モードのモードプロファイルがほぼ一致し、伝搬定数の偏波依存性を無視できる[2]。

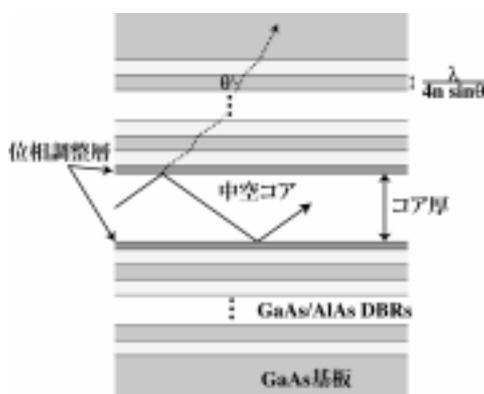


図 3 偏波無依存 DBR 構造

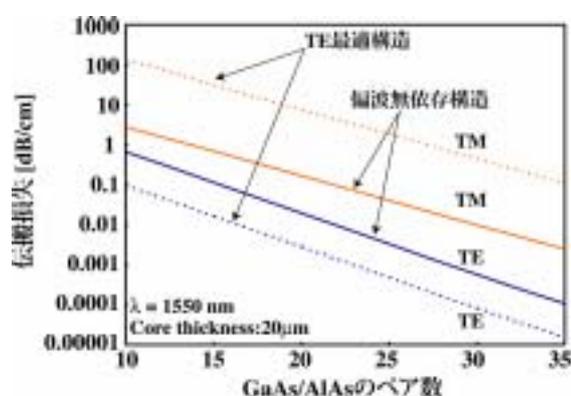


図 4 TE 最適, 偏波無依存構造スラブ導波路の伝搬損失と GaAs/AlAs DBR のペア数の関係

また伝搬損失に対しても DBR の層数を増やすことで非常に低損失な構造となる。GaAs/AlAs DBR を用いた場合の TE 偏波に最適は構造, 偏波無依存構造 (第1層目の層厚を $\lambda/16n$) に対して, 伝搬損失を DBR のペア数でプロットしたものを図 4 に示す。TE 偏波に最適な構造では偏波依存損失非常に大きいが TE 偏波に対しては非常に低損失となっている。そして, 偏波無依存の設計では偏波依存損失の低減が期待できることが分かる。これに対して, 実際に GaAs/AlAs DBR を用いて上記の2種類の構造のスラブ導波路を製作し, 挿入損失の測定を行った結果を図 5 に示す。図 5 より TE 最適構造では TE 偏波で 0.14dB/cm, TM 偏波で 2.3dB/cm という結果が得られ, 実際に TE 偏波に対して非常に低損失な結果が得られ

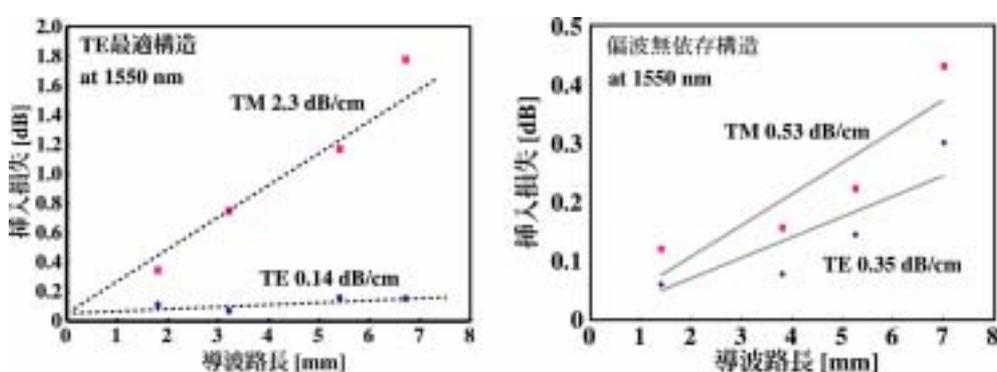


図 5 TE 最適構造, 偏波無依存構造スラブ中空導波路の挿入損失の測定結果

た。そして偏波無依存構造では TE 偏波で 0.35dB/cm, TM 偏波で 0.53dB/cm という結果が得られ, 偏波依存損失が 0.2dB/cm 以下となった。以上の解析的, 実験的結果より, DBR を用いることで低損失化が図れ, 層構造を最適化することで偏波依存性も低減することができることを実証した[3]。

4. 温度無依存光回路の実現

従来の導波路は高屈折率材料内に光を伝搬させることで低損失な構造となるが, その材料の屈折率の温度依存性の影響を受け, 温度制御が必要となっている。そこで, 我々の提案する中空光導波路を用いることで温度に対して安定な空气中に光を伝搬させることで伝搬特性の安定化が期待できる。従来の導波路の材料の屈折率の温度依存性から決まる温度依存性と中空光導波路を用いた場合の温度依存性の比較を Table 1 に示す。従来の導波路では InP を用いた場合, 0.1nm/K, シリカを用いた場合でも 0.01nm/K の温度依存性を持つ。これに対して, 中空光導波路を用いた場合には温度

表 1 中空光導波路と従来の導波路の温度依存性の比較

	材料	温度依存性(mm/K)
中空導波路	GaAs	14.0×10^{-3}
	InP	7.75×10^{-3}
	Si	4.65×10^{-3}
	SiO ₂	6.5×10^{-4}
従来の導波路	InP	~ 0.1
	SiO ₂	~ 0.01

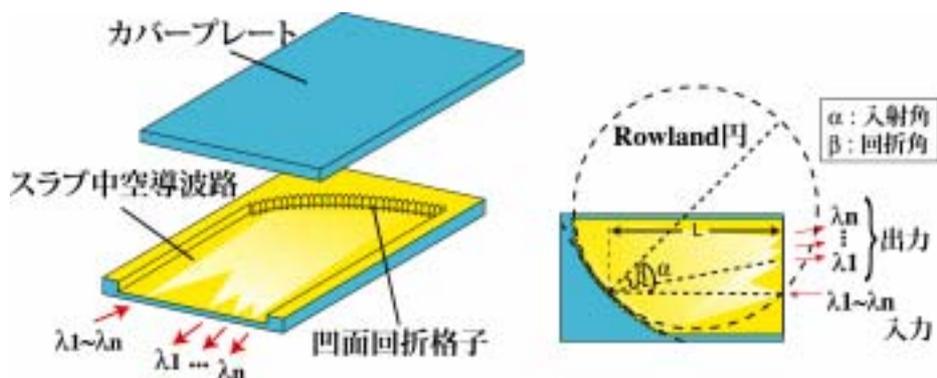


図 6 中空光導波路を用いた光分波器

依存性は導波路を構成する材料の熱膨張係数で決まり、InP を用いた場合 7.75×10^{-3} 、 SiO_2 では 6.5×10^{-4} となり従来の導波路と比べ 1/10~1/100 の温度依存性となる[4]。この値は SiO_2 を用いた中空光導波路で 100 の温度変化に対して僅か 0.065nm しか波長シフトが起こらないことを意味し温度制御フリーなデバイスとなる。

中空光導波路を用いた光デバイスの1例として我々は図 6 のような光分波器を提案している。本素子はスラブ中空導波路と凹面回折格子で構成され、分波器の場合、導波路に入射された複数の波長の光が合波された信号光はスラブ導波路内を広がりながら伝搬し、凹面回折格子にて反射された光は回折・集光され出射ポートへ伝搬する。この凹面回折格子の曲率半径を直径とするローランド円上から入射された光は回折・集光され再びローランド円上に結像するという性質を持つ。この構造の場合、分波する光の分解能は導波路の長さに依存し、入射角 α =回折角 β とし、素子長と分波波長分解能の関係を計算したものを図 7 に示す。入射・回折角が大きい程、分解能は良くなり、素子長が長くなる程分解能が良くなるのが分かる。具体的には入射・回折角ともに 45° で素子長が 6.5mm の分波器では分解能は 1nm 以下が期待できる。また、中空導波路の製作プロセスも簡易な平板プロセスを提案しており、図 8(a)のようにウェハには GaAs 基板の上に GaAs/AlAs DBR、エッチストップ層として GaInP 層、その上に回折格子を形成する GaAs 層を積層したウェハを用いる。製作プロセスを図 8(b)に示す。

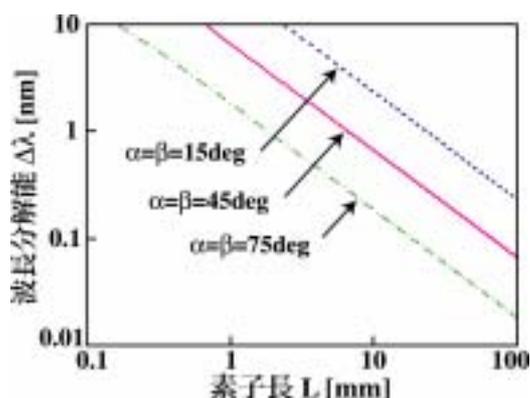


図 7 波長分解能と素子長の関係

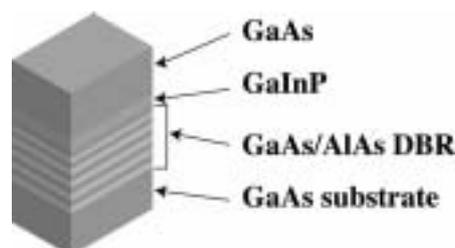


図 8(a) 製作に用いるウェハ構造

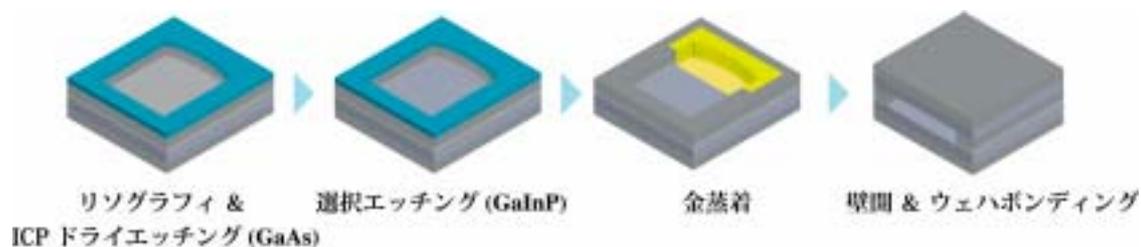


図 8(b) 平板プロセスによる中空導波路光分波器の製作方法

GaAs 基板上にフォトリソグラフィ, ICPドライエッチングを用いて製作した分波器の SEM 写真を図 9 に示す. スラブ導波路と $2.2\mu\text{m}$ ピッチの凹面回折格子が製作できていることが分かる. そして, 製作した分波器の分波特性を評価した結果を図 10 に示す. 今回, 測定に用いた分波器は製作の容易さにより, GaAs 基板に回折格子, 導波路パターンを ICPドライエッチングにより形成し, 表面に金薄膜をコーティングしたものをを用いている. 素子長が $100\mu\text{m}$, 1mm , 5mm のものを評価したところ, 理論計算と同様に素子長が長いデバイスほど分解能が向上しているのが分かる. そして素子長 5mm のものでは波長分解能 3nm という結果が得られた[5]. 今回のデバイスは金薄膜を用いているが, 半導体 DBR などを用いることでさらなる低損失化が可能であるため素子長の長いデバイス製作が可能となり, 1nm 以下の波長分解能を持つ分波器の実現

が期待できる. そして, 中空導波路を用いているために温度制御不要の可能性, また MEMS 素子との融合により波長可変機能の付加の可能性がある.

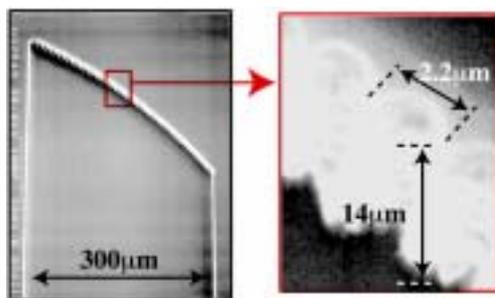


図 9 製作した凹面回折格子の SEM 像

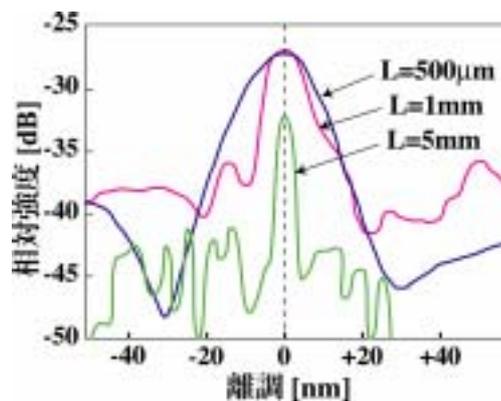


図 10 分波特性の測定結果

5. マイクロマシンを融合した光波制御の実現

当初, point-to-point から始まった光通信は今後 Ring 型や Mesh 型の形態へ変化し, アクセス系など, 我々の身近なところまで光ネットワークが普及すると考えられる. その光ネットワークの普及とともに伝送路内に多くのノードが必要とされ, 当然多数の光デバイスが必要となる. そして, 光ネットワークの有効に活用するには, ネットワークの自由度を上げる波長可変レーザや波長可変フィルタ, 光スイッチなどのチューナブルデバイスが重要な役割を果たす. 電気光学効果や熱光学効果を用いて屈折率変化を生じさせる既存のチューナブルデバイスで, その屈折率変化率は大きいもので 0.1%程度が限界である. チューナブルデバイスの可変帯域は屈折率の変化率に比例し, 既存のデバイスでは広帯域なチューニングは難しいのが現状である. そこで我々は中空光導波路とマイクロマシンを融合した新しいチューニング機構を提案している[6]. 伝搬特性を可変にするには, 既存のデバイスのように材料の屈折率に変化を与える方法の他に導波路内を伝搬する光のモードプロファイルを変化させることで導波モードの伝搬定数, つまり等価屈折率を変化させることで伝搬特性に可変機能を持たせることが可能となる. 中空光導波路のコア厚を可変にする MEMS を集積した中空光導波路の概念図を図 11 に示す.

このデバイスは中空光導波路を構成する上部基板を薄膜化し, 電圧を印加し静電引力にて導波路の厚さを変位させるものである. 光は中空光導波路内で反射を繰り返して導波モード

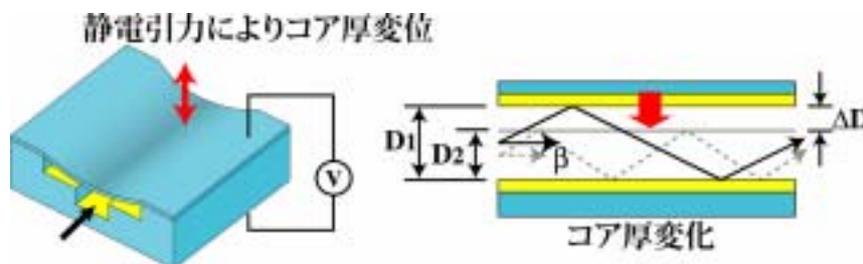


図 11 中空光導波路を MEMS 集積による波長可変デバイスの概念図

を形成し, 光の真空中の伝搬定数の進行方向成分がそのモードの伝搬定数となる. 従って, 導波路の厚さを変位させると導波路内で反射を繰り返す光の伝搬角度が変化し, 導波モードの伝搬定数が変化する. そしてその伝搬定数の変位は等価屈折率の変位に相当するため導波モードの伝搬特性が変化する. この中空光導波路を用いた可変特性には, 従来のチューナブルデバイスと比べて大きな可変帯域が期待できるという利点がある. スラブ中空光導波路の場合, コア厚 D の導波路内を伝搬する波長 λ の光の等価屈折率 n_{eff} は簡単に

$$n_{eff} = \sqrt{1 - \left(\frac{\lambda}{2D}\right)^2} \quad \dots\dots (式 1)$$

のように表すことができる. この(式1)を用いてコア厚と等価屈折率の関係を計算した結果を図12に示す. 変位前のコア厚 $D_1=20, 10, 5, 3\mu\text{m}$ から $\Delta D\mu\text{m}$ だけコア厚を小さくした結果を示してあり, 従来のチューナブルデバイスの屈折率変化量 $\sim 0.1\%$ と比較して数%という非常に大きな等価屈折率変化が期待できることが分かる. 特にその屈折率変化量はコア厚が小さい程, 大きな屈折率変化となり, コア厚が $5\mu\text{m}$ から $3\mu\text{m}$ に変化した場合には, 2.2% という従来のデバイスでは到底達成不可能なほどの大きな屈折率変化が期待できる.

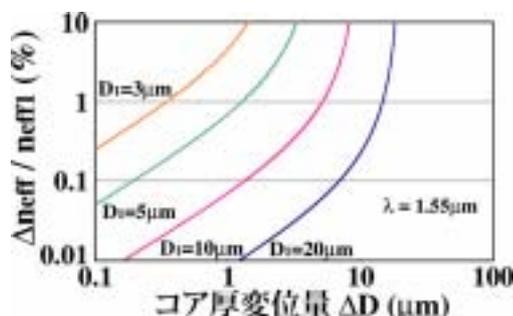


図12 中空光導波路のコア厚変位量と等価屈折率変化の関係

中空光導波路のコア厚さの変位による等価屈折率の変化を確かめるために, 図13のようにICPドライエッチングにより導波路内部に深さ $10\mu\text{m}$ の反射点を設け, シングルモードファイバから光を入射し, 導波路内部の反射点とファイバ端の間で共振器を形成し, その共振スペクトルのコア厚依存性を測定した. 導波路の入射端から導波路内部の反射点までの距離は $490\mu\text{m}$, ファイバ端から導波路の入射端までの距離は $100\mu\text{m}$ であり, この共振器長 L は

$$L = 100 + 490 \cdot n_{eff} \quad \dots (式2)$$

と表すことができ, コア厚の変位による等価屈折率の変化は共振器長の変化に相当する. 導波路のコア厚を $21\mu\text{m}$ から $27\mu\text{m}$ まで変化させたときの共振スペクトルを測定

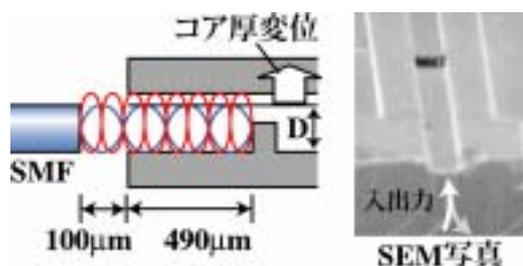


図13 中空光導波路内への共振器の製作

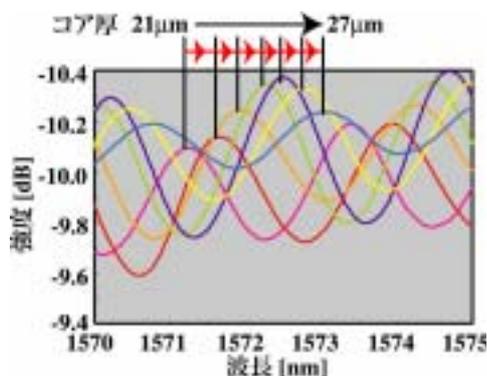


図14 コア厚変位による共振スペクトルの変化の測定結果

した結果を図14に示す. これより, コアの厚さを厚くしていくに連れて共振ピークが長波長側にシフトしているのが分かる. コア厚 $6\mu\text{m}$ の変位に対して波長シフト量は 1.82nm であり, コア厚 $1\mu\text{m}$ の変位あたりの平均の波長シフト量に換算すると, $0.3\text{nm}/\mu\text{m}$ となる[7]. これに対してスラブ導波路の等価屈折率の与える(式1)から波長シフト量を計算すると

0.12nm/μm となり、測定結果の方が大きな波長シフト量となることが分かる。この相違は(式1)はスラブ導波路に対して等価屈折率を表すもので、測定に用いた導波路は3次元中空光導波路であるために生じていると考えられる。スラブ導波路の場合には導波路の厚さの変化による導波モードのモードフィールドの変化は1次元であるが、3次元中空光導波路の場合は2次的に変化する。そのため伝搬定数の変化は3次元中空光導波路の方が大きくなると考えられる。そこで3次元中空導波路におけるコア厚変化による等価屈折率変化を見積もるために *Mode-Matching-Method* を用いてシミュレーションを行った。コア厚変位によるモードフィールドの変化の1例として、コア厚が20μm、22μmのときの3次元中空光導波路の断面内での光の強度分布 図15に示す。これより、コアの厚さの変化により、強度分布は水平、垂直方向に広がっていることが分かる。そして、コア厚変位による等価屈折率変化を測定と同様に21μmから27μmの範囲、またその近辺の値で計算した結果を図16に示す。この結果より、測定結果は19μmから25μmまでコア厚を変位させたときのシミュレーション結果と非常に良く一致していることが分かる[8]。このコア厚変位の範囲の相違2μmという値は、測定系によって生じるコア厚の誤差範囲であり妥当な結果であると言える。また、スラブ導波路の場合の等価屈折率変化と比較すると3次元中空光導波路を用いた場合には非常に大きな変化が得られることが分かる。これにより、中空光導波路のコア厚変化による等価屈折率変化を初めて実証した[9]。

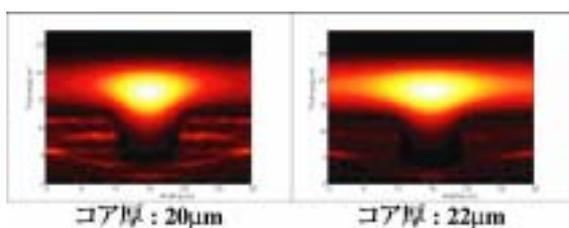


図15 コア厚変位による光強度分布の変化の計算結果

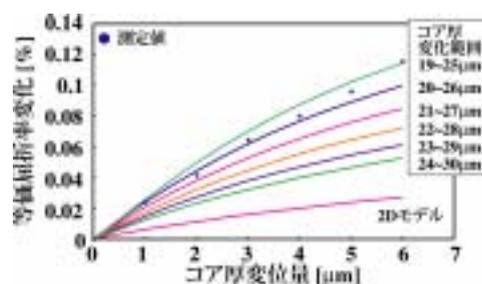


図16 3次元中空光導波路のコア厚変位による等価屈折率変化のシミュレーション結果

6. 結論

本研究では、可変中空光導波路を用いた新しい光デバイス構成法を提案し、また中空光導波路とMEMS素子の集積による新しい機能を実現することに成功した。本論文における主要な成果をまとめると

中空光導波路の低損失・偏波無依存構造を提案、実証した。

中空光導波路による光デバイスの温度無依存化を提案し、その可能性を示した。

中空光導波路のMEMSを融合による新しい波長制御機構を提案し、その波長制御機能を初めて実証した。

今後、これらの技術を用い光機能デバイスの高機能化、温度無依存化を両立可能なデバイスの実現を目指す。尚、最近、本研究に触発され、他の研究機関においても中空光導波路を用いた光回路の研究が報告されるようになり、国際的にも新しい研究の展開が期待できる。この中空光導波路の変換機能はこれまでにない新しい機構であり、このデバイス構成法が光デバイスの新領域に発展し得ると考える。これにより、光ネットワークの普及、フレキシブルな光ネットワークの構築に貢献できることを願う。本研究が次世代ITの1つの解となれば、幸いである。

謝辞

本研究は文部省科研費学術創成研究（#14GS0212”）の援助を得た。また、本研究を行うにあたり、日々ご指導頂いている小山二三夫教授に心より感謝する。

参考文献

- [1] J.D. Joannopoulos, R.D. Meade and J.N. Winn, "Photonic Crystals -Modeling the flow of light", Princeton University Press, 1995.
- [1] Toru Miura and Fumio Koyama; LEOS 2003, ThH 5.
- [2] Toru Miura and Fumio Koyama; JJAP, Vol. 43, No. 1A/B, 2004, pp. L 21.
- [3] Toru MIURA, Fumio KOYAMA and Akihiro MATSUTANI; Jpn. J. Appl. Phys. Vol. 41 Part 1, No. 7B, 2002, pp. 4785.
- [4] Mayumi Ishikawa, Toru Miura, Akihiro Matsutani, and Fumio Koyama, MOC'03, B2.
- [5] T. Miura and F. Koyama, ECOC2002, 4.4.4.
- [6] Toru Miura and Fumio Koyama; ECOC 2003, Tu 1.2.3.
- [7] Toru Miura and Fumio Koyama; OECC 2003, 16B4-6.
- [8] T. Miura, F. Koyama and A. Matstutani; IEEE Photon. Technol. Lett., VOL. 15, NO. 9, 2003, pp. 1240.