

研究種目：特定領域研究

研究期間：2005～2008

課題番号：17068006

研究課題名（和文）

中空光導波路における巨大可変特性発現とその光ネットワークデバイスへの展開

研究課題名（英文）

Widely Tunable Hollow Optical Waveguides and Their Applications for Photonic Network Devices

研究代表者

小山 二三夫 (Koyama Fumio)

東京工業大学・精密工学研究所・教授

研究者番号：30178397

研究成果の概要：

本研究では、高反射率の反射鏡により光を空気あるいは真空中に閉じこめる中空光導波路とマイクロマシン構造を融合して、巨大な伝搬定数の変化を可能とする可変中空光導波路とその光回路への応用を目指して研究を進めた。10%に及ぶ巨大な伝搬定数変化や温度無依存動作などの特性を実証するとともに、低損失3次元中空導波路の実現や、可変分散補償器、波長可変レーザ、波長可変フィルタなどのデバイス応用を実証した。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2005年度	23,200,000	0	23,200,000
2006年度	29,200,000	0	29,200,000
2007年度	23,200,000	0	23,200,000
2008年度	18,900,000	0	18,900,000
年度			
総計	94,500,000		94,500,000

研究分野：光エレクトロニクス

科研費の分科・細目：応用物理学・工学基礎、応用光学・量子光工学

キーワード：光通信、マイクロマシン、光デバイス、光信号処理

## 1. 研究開始当初の背景

導波路型光デバイスでは、全反射を用いて光を固体材料に閉じ込める誘電体導波路や半導体導波路が用いられ、その屈折率を変化させて可変機能を得るためには、電気光学効果、熱光学効果、あるいはキャリア効果などが用いられてきた。しかし、これらの屈折率変化は、通常0.1～1%程度であり、例えば可変光フィルタを構成した場合、必ずしも十分な可変波長幅が得られていない。従って、大きな可変特性を実現するためには、複数の共振器のバーニア効果などが用いられてきた。また、これらの通常の光導波路を用いた光デバイスでは、材料固有の屈折率の温度変化に

起因するデバイスの温度依存性が問題となり、通常、精密な絶対波長制御が要求される波長多重光通信システムで用いる際には、高精度な温度制御が必要になっていた。

## 2. 研究の目的

本研究では、超高反射率ミラー形成技術により、光を空気あるいは真空中に閉じこめた可変中空光導波路を実現し、巨大な可変伝搬特性を具現化するとともに、巨大な波長可変特性を可能とする光フィルタ/レーザ、光ルーティング素子、光スイッチ、光遅延線など、新世代の光通信ネットワークデバイスの実現を目指す。以下の項目を研究目標とする。

1) 超高反射率ミラーによりサブミクロンの微小領域に光を閉じこめる中空光導波路の基盤形成

2) マイクロマシン構造を融合した光波制御(巨大な位相・光速可変)の実現

3) 巨大な波長可変特性を可能とする光フィルタ/レーザ, 光ルーティング素子の実現

4) 温度無依存光回路の実現

### 3. 研究の方法

微小中空コアへ光を閉じこめる極限技術の確立を進めるとともに、マイクロマシンによる光波の制御とそのデバイス応用を重点的に行った。中空導波路とマイクロマシンを融合した新機能素子として波長可変フィルタ回路を製作し、静電力あるいは熱応力を利用して中空コア厚を変化させることで、巨大可変特性を実験的に検証し、数10%に及ぶ巨大可変特性の実現を目指した。さらに、温度無依存化も同時に進め、広可変制御と温度無依存化を同時に可能とする光回路の形成とその評価を行った。

さらに、サブミクロンの極限領域まで微小化した中空光導波路の群速度低下、大きな波長分散、およびこれらの巨大可変特性など、中空光導波路デバイスの新規な伝搬特性の解明を目指した。また、これらの学術的知見を基に、巨大な波長可変特性を可能とする光フィルタ/レーザ, 光ルーティング素子, 光スイッチ, 光遅延線など新規光デバイスの製作と評価を進め、本領域研究の他研究グループとの連携を強化し、新世代の光通信ネットワークデバイスへの展開を目指した。

### 4. 研究成果

#### (1) 低損失3次元中空導波路

誘電体多層膜反射鏡などの屈折率構造を持つ矩形の中空光導波路の構成は困難であるため、本研究では段差構造による3次元導波路を提案した。図1にその光強度分布を示す。ここで、中空コアは $3.8\mu\text{m}$ 、導波路幅は $20\mu\text{m}$ 、TEモードを仮定している。段差量を低減することで、伝搬損失を $0.1\text{dB/cm}$ 以下に低減できることがわかった。TM偏光に対しては、入射角がブリュースタ角よりも小さいために、空気コアと多層膜界面での反射位相がTE偏光の場合と反転してしまうため、大きな偏光依存性が生じてしまう。このため、

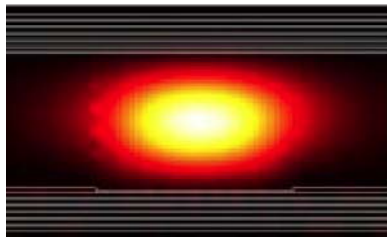


図1 微小ステップ3次元中空光導波路

小さな偏光依存性を要求する用途には偏光依存性を低減するための設計が必要である。偏光依存性を低減するために、段差量と多層膜反射鏡の1層目厚さによる伝搬定数の偏光依存性について検討し、偏光依存性として、 $3 \times 10^{-5}$  が得られている。

#### (2) 巨大化変特性の実現

製作したテーパ構造の波長可変ミラーのデバイスの模式図を図2に示す。また、電子ビーム露光とドライエッチングにより円形回折格子を製作した。ファイバとの結合損失の問題を軽減するために、図2に示すテーパ構造を導入した。1mm長のデバイスに対して出射側0.5mmにのみ回折格子を設けている。これは小コア厚測定時に入射側のデバイスコア厚がファイバのコア厚よりも小さくなり結合効率が低下するのを避けるためである。スポットサイズ変換器としてテーパ構造を用いることで結合効率の改善が期待できる。可変特性の測定結果を図4に示す。約190nmにおよぶ可変帯域が得られた。これは、12%を超える巨大伝搬定数変化に相当する。中空コアの微小化、中空導波路を形成する反射鏡の広帯域化により、さらに可変幅の拡大が期待できる。

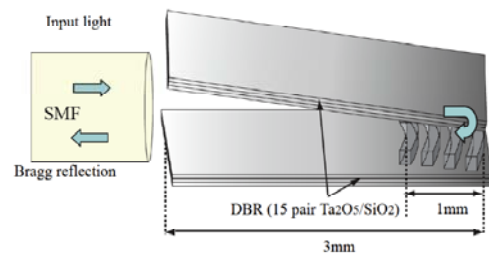


図2 テーパ中空導波路可変ブラッグ反射鏡

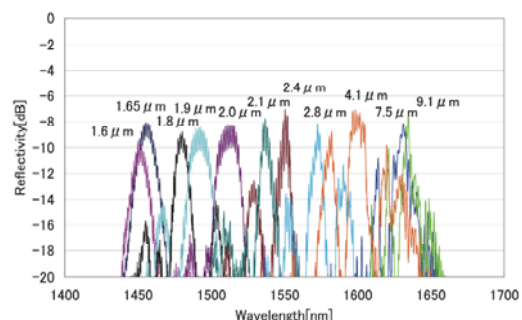


図3 巨大化変特性

#### (3) デバイス応用

##### a) 中空光導波路を用いた波長可変レーザ

可変中空光導波路の巨大伝搬定数変化を利用した波長可変レーザを提案し、その連続波長可変特性の検討をした。一つの制御パラメータで、ブラッグ波長を可変すると同時に

位相を調整して波長の連続可変を可能にする。単一制御パラメータで、35nm以上の連続波長可変動作の可能性を得た。

実験的に図4に示すようにGaInAsP/InPのSOAチップと中空光導波路 Bragg 反射鏡とをハイブリッド集積して、波長可変レーザを試作した。ここでは、モード跳躍防止のための位相調整領域は含まれていない。SOAは、GaInAsP/InPを活性層とし、30 $\mu$ mのストライプ構造を用いた。中空ブラッグ反射鏡のコア厚を変化させると波長は可変し、測定された発振波長は導波モードの理論曲線上にのっていることから、中空ブラッグ反射鏡によるDBRモードであることがわかった。波長シフト量は、図5に示すように11nmであり、共振器で決定するモードで発振している。更なる波長可変幅の拡大と集積波長可変レーザの実現が期待できる。

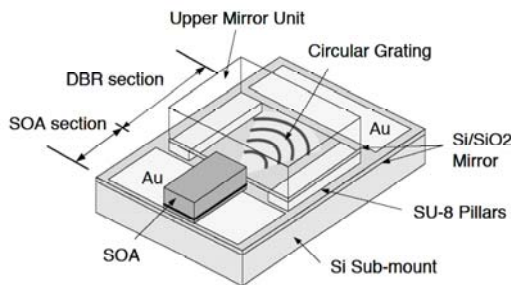


図4 中空導波路を用いた波長可変レーザ

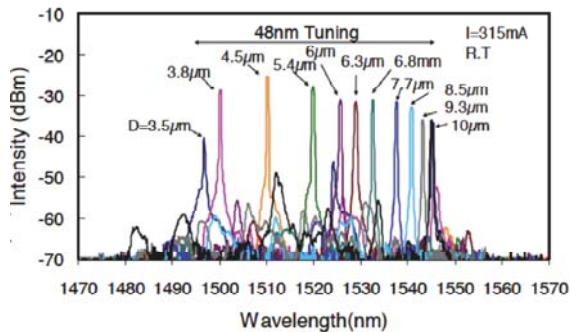


図5 波長可変特性

巨大可変特性と温度無依存特性の両立が、中空光導波路素子の特徴である。図4の素子の波長温度依存性を測定したところ、縦モード間のモード跳躍は観測されるものの、30度以上の温度範囲にわたって、図6に示すように、縦モード間隔である波長範囲0.6nmに、発振波長がロックされていることがわかる。本実験結果は、中空光導波路を用いた半導体レーザのアサermal動作の可能性を示すものであり、デバイスの構造設計により、モード跳躍を抑止することで、広い温度範囲で発振波長の安定化が期待できる。

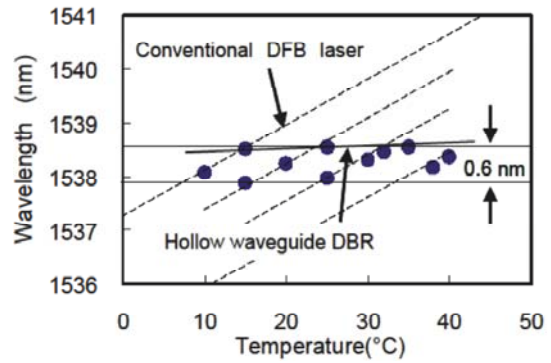


図6 波長温度無依存動作

#### b) 光路変換器

周期構造の多層膜反射鏡によって伝搬光が閉じこめられ、全反射による通常の光導波路と異なり、最低次の基本モードにもカットオフ条件が存在する。このため、このカットオフ近傍では、光が垂直方向に放射されることが計算により見出された。この現象は、面型光素子との集積化を可能にする。実際に片側基板を薄膜DBR基板としたテーパ構造を用いて、放射光の測定を行った。測定デバイスの概念図を図7に示す。薄膜DBRの先端を尖形にすることで、DBR先端のみを接地させ出射端付近に微小コア領域を形成した。波長1550nmのレーザ光を入射したときのデバイス上面への放射光の様子を図8に示す。出射端の微小コア領域において垂直方向に強い放射が起きていることがわかる。

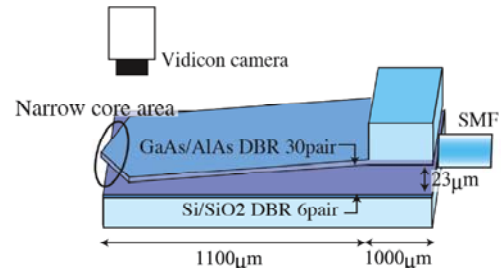


図7 テーパ中空導波路による光路変換

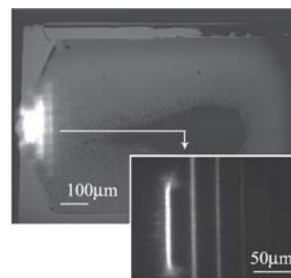


図8 テーパ中空導波路からの垂直放射

その他、本研究の成果をまとめると以下の通りである。

#### [1] 可変中空光導波路の伝搬特性

\* 巨大可変特性  $\Delta\lambda > 190\text{nm}$  ( $\lambda=1550\text{nm}$ )

- \* 3次元中空導波路の実現
  - \* 偏光制御 (偏光依存性の低減と増大)
  - \* HCGを用いた新しい中空導波路の実現
- [2] デバイス応用の実証
- \* 波長可変ミラー
  - \* 可変フィルタ & 波長可変レーザ  
( $\Delta\lambda > 30\text{nm}$ )
  - \* 波長分散 & 偏波分散補償  
(波長分散: 100ps/nm, 偏波分散: 20ps/nm)
  - \* アクチュエータ集積 & 可変スポットサイズ変換
  - \* 光路変換, 合分波器
- [3] プロセス技術
- \* ナノ切削加工 & ナノインプリント転写による  
大面積ナノ波長構造形成

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 20 件)

- (1) M. Kumar, T. Sakaguchi and F. Koyama, "Wide tunability and ultralarge birefringence with 3D hollow waveguide Bragg reflector," *Optics Lett.*, vol.34, no.8, pp.1252-1254, Apr. 2009. 査読有り
- (2) A. Fuchida and F. Koyama, "Novel Waveguide Optical Switch Using Slow light," *Trans. IEICE, Vol.J92-C*, no.3, pp.69-74, Mar. 2009. 査読有り
- (3) M. Kumar, T. Sakaguchi and F. Koyama, "Giant birefringence and tunable differential group delay in Bragg reflector based on tapered three-dimensional hollow waveguide," *Appl. Phys. Lett.*, vol.94, 061112, Feb. 2009. 査読有り
- (4) F. Koyama, "New Functions of VCSEL-based Optical Devices," *Chinese Optics Letters*, invited paper, vol.6, no.10 (2008). 査読有り
- (5) A. Imamura and F. Koyama, "Modeling and experiment on tapered hollow waveguide multiplexer for multiwavelength VCSEL array," *IEICE Electronics Express*, vol.5, no.12, pp.451-456 (2008). 査読有り
- (6) A. Imamura, N. Kitabayashi and F. Koyama, "Beam steering and tilt coupling in tunable hollow waveguide," *IEICE Electronics Express*, vol.5, no.11, pp.405-410 (2008). 査読有り
- (7) M. Kumar, T. Sakaguchi and F. Koyama, "Polarization-insensitive and low-loss 3D nanostep hollow waveguide for widely tunable photonic devices," *Journal of Lightwave Technology*, vol.26, no.11, pp.1417-1422 (2008). 査読有り
- (8) A. Matsutani, H. Ohtsuki and F. Koyama, "Generation of Solid-Source H<sub>2</sub>O Plasma and Its Application to Dry Etching of CaF<sub>2</sub>," *Jpn. J. Appl. Phys.*, Vol. 47, no. 6, pp.5113-5115 (2008). 査読有り
- (9) M. Kumar, T. Sakaguchi and F. Koyama, "Tunable three-dimensional nanostep hollow optical waveguide with low polarization dependence," *Applied Physics Express*, vol.1, 052002 (2008). 査読有り
- (10) M. Kumar and F. Koyama, "Investigation and theoretical analysis of low-loss 3D hollow waveguides for widely tunable photonic devices," *Jpn. J. Appl. Phys.*, vol.47, no.5, 3471-3475 (2008). 査読有り
- (11) W. Janto, A. Matsutani and F. Koyama, "Wavelength Tuning of Double-Cavity Micromachined Filter with Electrical and Thermal Actuators," *OPTICAL REVIEW*, vol. 14, no. 2, pp. 86-90 (2007). 査読有り
- (12) F. Koyama, "Recent Advances of VCSEL Photonics," *Journal of Lightwave Technology*, vol.24, no.12, pp.4502-4513 (2006). 査読有り
- (13) A. Matsutani, Hideo Ohtsuki and F. Koyama, "Solid Source Dry Etching Process for GaAs and InP," *Jpn. J. Appl. Phys.*, vol. 45, no. 10B, pp. 8374-8377 (2006). 査読有り
- (14) C-H. Bae and F. Koyama, "Design and Fabrication of Multi-Mode Interference Hollow Waveguide Optical Switch with Variable Air Core," *Jpn. J. Appl. Phys.*, vol.45, no. 8B, pp. 6648-6653 (2006). 査読有り
- (15) Y. Sakurai, A. Matsutani and F. Koyama, "Tunable stop-band hollow waveguide Bragg reflector with tapered air-core for adaptive dispersion-compensation," *Appl. Phys. Lett.*, vol.88, no. 12, pp. 121103 (2006). 査読有り
- (16) Y. Sakurai, A. Matsutani, T. Sakaguchi and F. Koyama, "Tunable Planar Air-Core Resonator Based on Tunable Hollow Waveguide," *Jpn. J. Appl. Phys.*, vol.45, no. 11 (2006). 査読有り
- (17) Y. Sakurai, A. Matsutani, T. Sakaguchi and F. Koyama, "Giant Bragg wavelength tuning of tunable hollow waveguide Bragg reflector," *Jpn. J. Appl. Phys.*, vol. 44, no. 37, pp. L1171-L1173 (2005). 査読有り
- (18) F. Koyama, T. Miura and Y. Sakurai, "Tunable Hollow Optical Waveguide and Their Applications for Photonic Integrated Circuits," *IEICE of Japan*, invited paper, Vol.J88-C, no. 6, pp.388-396-343 (2005). 査読有り
- (19) A. Matsutani, H. Ohtsuki and F. Koyama, "Iodine Solid Source Inductively Coupled Plasma Etching of InP," *Jpn. J. Appl. Phys.*, vol.44, no.19, pp. L576-L577 (2005). 査読有り

有り

- (20) C.-H. Bae and F. Koyama, "Fabrication and characterization of hollow waveguide optical switch with variable air core," OPTICS EXPRESS, vol.13, no.9, pp. 3259-3263 (2005). 査読有り

[学会発表] (計 33 件)

- (1) M. Kumar, T. Sakaguchi, A. Matsutani and F. Koyama, "Adjustable Polarization Mode Dispersion Compensation using 3D Hollow Waveguide Bragg Reflector," Conference on Lasers and Electro-Optics, CLEO/IQEC2009, Baltimore, USA, CThB5, June 4 (2009).
- (2) M. Kumar, F. Koyama and C. J. Chang-Hasnain, "2D Confinement and Reduction of Polarization Dependence in Hollow Waveguide with High Index Contrast Grating," Conference on Lasers and Electro-Optics, CLEO/IQEC2009, Baltimore, USA, JWA44, June 3 (2009).
- (3) B. Pesala, V. Karagodsky, F. Koyama and C. Chang-Hasnain, "Novel 2D High-Contrast Grating Hollow-Core Waveguide," Conference on Lasers and Electro-Optics, CLEO/IQEC2009, Baltimore, USA, CMQ7, June 2 (2009).
- (4) M. Kumar and F. Koyama, "A tunable Bragg reflector based on tapered 3D hollow optical waveguide with large birefringence and tunable differential group delay", OFC 2009, OWC3, San Diego, Mar. 11 (2009).
- (5) M. Kumar, F. Koyama and C. J. C.-Hasnain, "Tunable Hollow Optical Waveguide with High Contrast Grating," 21st Annual Meeting of The IEEE Lasers & Electro-Optics Society, LEOS2008, Newport Beach, USA, WN4, pp.523-524 Nov. 5(2008).
- (6) A. Matsutani, H. Ohtsuki and F. Koyama, "Dry Etching of Si by XeF<sub>2</sub> Plasma and Investigation of Emission Intensities from Xe and F in XeF<sub>2</sub> Plasma," 21st International Microprocesses and Nanotechnology Conference, MNC2008, Fukuoka, Japan, 29D-9-58, Sep.29 (2008).
- (7) M. Kumar, T. Sakaguchi, and F. Koyama, "Widely Tunable Mirror Based on 3-D Hollow Waveguide for Tunable Photonic Integrated Circuits," Conference on Lasers and Electro-Optics, CLEO, San Jose, USA, CMG5, May 11 (2008).
- (8) J. Nakajima and F. Koyama, "Nanofabrication of Sub-Wavelength Grating Using Ultra-Fine Nano-Machining Process," Conference on Lasers and Electro-Optics, CLEO, San Jose, USA, JTUA34, May 10 (2008).
- (9) A. Matsutani, H. Ohtsuki and F. Koyama, "Dry Etching of CaF<sub>2</sub> by Solid Source H<sub>2</sub>O(ice) Plasma," 20th International Microprocesses and Nanotechnology Conference, Kyoto, Japan, 6A-4-94, pp. 248-249, Nov. 15 (2007).
- (10) M. Kumar and F. Koyama, "Design and Fabrication of 3D Nanostep Hollow Waveguide for Widely Tunable Photonic Devices," 13th Microoptics Conference, MOC '07, Kagawa, Japan, C7, pp. 62-63 Oct. 28 (2007).
- (11) F. Koyama, "VCSEL Photonics - Athermalization and Slowing Down -," Asia Optical Fiber Communication & Optoelectronics Exposition & Conference, AOE 2007, Shanghai, China, SC2.S5.1, pp.275-277, Oct. 25 (2007).
- (12) T. Takeishi and F. Koyama, "Giant Tuning Characteristics of Tapered Tunable Hollow Waveguide Bragg Reflector," 20th Annual Meeting of The IEEE Laser and Electro-Optical Society, LEOS2007, Florida, USA, ThK3, pp.769-770, Oct. 10 (2007).
- (13) A. Matsutani, H. Ohtsuki and F. Koyama, "Decreasing of Residual Oxygen by using Si Solid Source in Cl<sub>2</sub>-ICP Etching of Al," 18th International Symposium on Plasma Chemistry, ISPC18, Kyoto, Japan, 30P-118, Sep. 30 (2007).
- (14) F. Koyama, "New Functions and Challenges of VCSEL-related Photonic Devices," International Nano-Optoelectronic Workshop, INOW 2007, Beijing and Lanzhou, China, Aug. 6 (2007).
- (15) M. Kumar and F. Koyama, "Polarization-insensitive and Low-loss Tunable 3D Nanostep Hollow Waveguide for Widely Tunable Photonic Devices," International Nano-Optoelectronic Workshop, INOW 2007, Beijing and Lanzhou, China, P39, pp.188-189, Aug. 5 (2007).
- (16) T. Takeishi, S. Suda and F. Koyama, "Nanoimprint and nano-machining process for tunable hollow waveguide devices," IEEE LEOS Summer Topicals, Portland, Oregon, USA, TuB4.5, pp.123-124, July 20 (2007).
- (17) H. Nakajima, T. Miyamoto, T. Iwasaki, Y. Higa and F. Koyama, "Analysis of Large Kink Mechanism in I-L Characteristics of Tunnel Injection Lasers," OECC/IOOC2007, Yokohama, Japan, 13D1-5, pp. 654-655



- July 13(2007).
- (18) M. Kumar and F. Koyama, "Polarization Insensitive and Low-loss Tunable 3D Hollow Waveguide for Tunable Photonic Devices," OECC/IOOC2007, Yokohama, Japan, 13E1-3, pp. 64-685, July 13 (2007).
- (19) A. Imamura and F. Koyama, "Beam steering and coupling in tunable hollow waveguide with narrow air core," OECC/IOOC2007, Yokohama, Japan, 13E2-3, pp. 694-695 July 13 (2007).
- (20) T. Takeishi, T. Sakaguchi and F. Koyama, "Fabrication and characterization of tunable chromatic dispersion compensator based on hollow waveguide," OECC/IOOC2007, Yokohama, Japan, 12E3-3, pp. 442-443 July 12 (2007).
- (21) M. Kumar and F. Koyama, "Modeling of 3D Curved Hollow Waveguide for Widely Tunable Photonic Devices," International Symposium Contemporary Photonics Technology, CPT 2007, Tokyo, F-3, pp.61-62 Jan. 15 (2007).
- (22) H. Yamakawa and F. Koyama, "Athermal GaInAsP/InP Semiconductor Laser Using Hollow Waveguide Distributed Bragg Reflector," 12th Microoptics Conference, MOC, Seoul, Korea, A-2, pp.38- 39, Sep. 15 (2006).
- (23) F. Koyama, "VCSEL Integration for Silicon Photonics," 2006 3rd IEEE International Conference, IV Photonics, Ottawa, Canada, ThB4, pp.194- 196, Sep. 5 (2006).
- (24) H. Yamakawa, T. Serizawa, Y. Sakurai and F. Koyama, "Tunable Laser with Hollow Waveguide Distributed Bragg Reflector," The 11th Optoelectronics and Communications Conference, OECC 2006, Kaohsiung, Taiwan, 6C2-2-1, July 20 (2006).
- (25) Y. Sakurai, H. Yamakawa, Y. Yokota, A. Matsutani, T. Sakaguchi and F. Koyama, "Hollow Waveguide Distributed Bragg Reflector for Widely Tunable Optical Devices," Optical Fiber Communications Conference 2006, Anaheim, USA, OtuM4 Mar. 12(2006).
- (26) A. Matsutani, H. Ohtsuki and F. Koyama, "Solid Source Dry Etching Process for III-V Compound Semiconductors," 6th International Conference on Reactive Plasmas and 23rd Symposium on Plasma Processing, ICRP-6/SPP-23, Sendai, Japan, P-2A-42, pp.475-476, Jan. 25 (2006).
- (27) F. Koyama, "New Functions and Emerging Technologies for VCSEL-related Device," International Symposium on Asia-Pacific Optical Communications 2005, APOC2005, Shanghai, P.R.China, Nov. 30 (2005).
- (28) T. Miura, Y.Yokota and F. Koyama, "Proposal of tunable demultiplexer based on tapered hollow waveguide with highly reflective multilayer mirrors," The 18th Annual Meeting of the IEEE Lasers and Electro-Optics Society, LEOS 2005, Sydney, Australia, TuL3, pp.272-273, Nov.11 (2005).
- (29) Y. Sakurai, A. Matsutani, T. Sakaguchi and F. Koyama, "Air-core Resonator with Widely Tunable Hollow Waveguide Bragg Reflectors," 31st European Conference on Optical Communication, ECOC2005, Glasgow, UK, Oct. 12 (2005).
- (30) F. Koyama, "Widely Tunable Micromachined Optical Devices for Future Photonic Integrated Circuits," FIS Conference on future integrated, Cambridge, UK, pp.24, Sep.12 (2005) .
- (31) C.-H. Bae and F. Koyama, "Fabrication and Characterization of Hollow Waveguide Optical Switch with Variable Air Core," The 10th Optoelectronics and Communications Conference, OECC2005, Seoul, Korea, 7E2-5, pp.452-453, July 11 (2005).
- (32) Y. Sakurai, A. Matsutani and F. Koyama, "Tunable Stop-Band Hollow Waveguide Bragg Reflector with Tapered Air-Core for Adaptive Dispersion-Compensation," Conference on Lasers and Electro-Optics, Postdeadline Paper, CPDA6, CLEO2005, Baltimore, USA, CMP5, May 11 (2005).
- (33) Y. Sakurai, A. Matsutani, T. Sakaguchi and F. Koyama, "160nm Continuous Wavelength Tuning of Tunable Hollow Waveguide Bragg Reflector," Conference on Lasers and Electro-Optics, Postdeadline Paper,CPDA6, CLEO2005, Baltimore, USA, CPDA6 , May 9 (2005).

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

小山 二三夫 (KOYAMA FUMIO)

東京工業大学・精密工学研究所・教授

研究者番号：30178397

### (2) 研究分担者

坂口 孝浩 (SAKAGUCHI TAKAHIRO)

東京工業大学・精密工学研究所・助教

研究者番号：90116054

松谷 晃宏 (MATSUTANI AKIHIRO)

東京工業大学・技術部・技術専門員

研究者番号：40397047

### (3) 連携研究者

なし