

平成22年6月1日現在

研究種目：基盤研究（A）  
 研究期間：2007～2009  
 課題番号：19206012  
 研究課題名（和文）面発光レーザフォトニクスの新展開

研究課題名（英文）New Functions of VCSEL Photonics

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（和文）：

面発光レーザの波長制御技術開拓と面発光レーザ構造を用いた位相制御の光信号処理を柱とし、面発光レーザを基盤とする新しい光デバイス工学を展開することを目的として研究を進め、MEMS構造によるアサーマル面発光レーザとその波長可変動作の実現、テーパ中空導波路による超小型光合波器の実現、面発光レーザ構造による高速光位相シフタの実現、面発光レーザ構造を導波路デバイスに展開するスローライト素子を提案と実証などの成果を得た。

研究成果の概要（英文）：

Challenges for new functions of VCSEL-related devices have been carried out, which include the wavelength control and optical phase-control based on VCSEL structures. The athermal operation of micromachined VCSELs was demonstrated with a novel thermally-actuated membrane mirror. We demonstrated an optical nonlinear phase shifter based on a VCSEL saturable absorber. A large nonlinear phase shift could be observed in both modeling and experiments. The proposed device was used for mitigating fiber nonlinearities in optical domain. Also, highly reflective periodic mirrors commonly used in VCSELs enabled us to manipulate light with a slow light effect. This new scheme provided us ultra-compact intensity modulators, optical switches and so on.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	9,800,000円	2,940,000円	12,740,000円
2008年度	13,800,000円	4,140,000円	17,940,000円
2009年度	13,000,000円	3,900,000円	16,900,000円
年度			
年度			
総計	36,600,000円	10,980,000円	47,580,000円

研究分野：光エレクトロニクス

科研費の分科・細目：電気電子工学・電子デバイス・電子機器

キーワード：半導体レーザ，光通信，光集積回路，光インターコネクタ，マイクロマシン

#### 1. 研究開始当初の背景

光通信ネットワークで用いられる半導体レーザは、従来技術であるDFBレーザを個々

に精密な温度制御で波長を管理して用いたもので、今後、加速的に伝送容量が拡大する短距離ネットワークで、100波に及ぶ光ネッ

トワークを実現するには、多波長光源や発振波長の温度無依存化などのブレークスルー技術が必要とされていた。半導体レーザの波長温度無依存化や数百波〜千波規模の大規模集積化の取り組みは、研究開始当初は、ほとんど例が無かった。さらに、マイクロマシンによる波長可変面発光レーザの研究は北米のベンチャー企業等で進められていたが、波長の温度無依存化、多波長一括生成等については、未着手であった。

## 2. 研究の目的

面発光レーザの波長制御技術開拓と面発光レーザ構造を用いた位相・偏光状態制御の光信号処理を柱とし、面発光レーザを基盤とする新しい光デバイス工学を展開することを目的として、以下の研究項目を実施した。

1) 面発光レーザの波長集積/制御技術の開拓  
光マイクロマシン構造集積により発振波長の温度依存性を完全に補償した絶対波長温度無依存レーザ、あるいは、デバイス製作後に高精度に波長を再調整する波長トリミング技術など、従来の半導体レーザでは実現困難であった革新的な波長制御技術を開拓する。

2) 面発光レーザ構造を用いた光信号処理  
面発光レーザ構造を用いて、外部光入力に対して巨大な非線形位相シフトを発現する位相シフタの実現とそのファイバ非線形効果の新しい非線形補償技術への展開や光群速度制御による小型光機能素子開拓など、面発光レーザを基盤とした新規な光信号処理技術を確立する。

## 3. 研究の方法

波長帯 1100nm の面発光レーザにおいて、共振器長のチップ内制御の手法により、多波長一括生成とその合波技術による多波長面発光レーザアレイの基盤技術を開発する。また、マイクロマシン構造により共振器の温度係数を完全に補償した波長温度無依存の面発光レーザの設計・製作を行い、温度無依存化の動作を実現する。また、多波長アレイの光出力を合波するために、テーパ構造 Bragg 反射導波路構造による超小型光合分波器を実現する。また、面発光レーザ共振器の Q 値制御により、非線形位相シフタの符号と非線形位相シフト量、動作帯域、応答速度の設計を行うとともに、設計に基づくデバイス製作を行い、10 ピコ秒以下非線形応答の評価や、これを用いたファイバ非線形効果補償技術の確立を目指す。さらに、面発光レーザ構造を導波路デバイスに展開したスローライト素子として、光ゲート素子や光スイッチの小型化を進める。

## 4. 研究成果

1) 多波長面発光レーザアレイ  
凹凸基板を用いた多波長面発光レーザの波

長間隔の精度向上を目指して、ドライエッチングプロセスによる凹凸基板形成を行い、波長間隔精度を 15%以内抑えることに成功した。(図 1, 2)

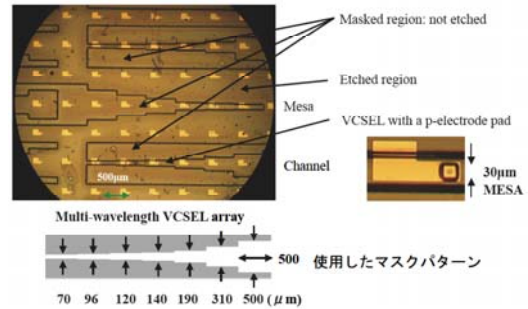
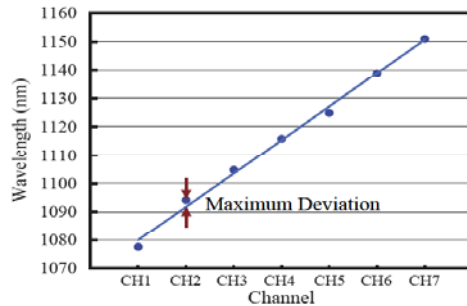


図 1 凹凸基板を用いた多波長面発光レーザアレイ

図 2 多波長アレイの波長制御

また、面発光レーザと中空光導波路を組み合わせた合波光回路を提案し、光線追跡のシ



ミュレーションを行い、10 チャンネル以上の合波を 1mm 以下の微小回路で実現できることを示すとともに、実際に 1060nm 帯面発光レーザを用いて、4 チャンネル合波実験を行った。この結果を基に、12 チャンネル規模の多波長合波が素子長 200 ミクロン程度で可能なことを実証した。(図 3, 4)

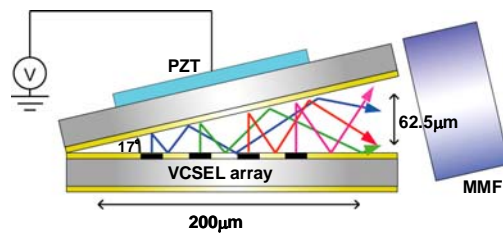


図 3 中空導波路光合波器

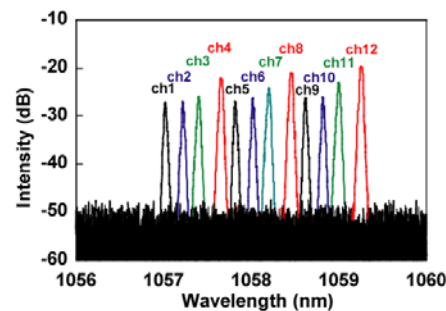


図 4 多波長面発光レーザ合波特性

(2) 波長温度無依存面発光レーザ

850nm 帯面発光レーザに半導体薄膜の熱膨張係数を制御した熱アクチュエータから構成される MEMS 構造を集積し、発振波長の温度ドリフトを補償することにより、従来の単一モード半導体レーザの波長温度係数の約 1/40 のアサーマル動作を実現するとともに、注入電流を変化することで 2nm 以上の連続波長可変動作の両立を初めて実現した。(図 5) また、同構造により、ドライエッチングを用いて製作誤差を補正する波長トリミングと、リソグラフィプロセスで異なった波長を集積化する多波長集積化の提案と実証に成功した。

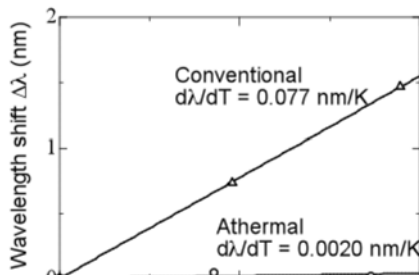
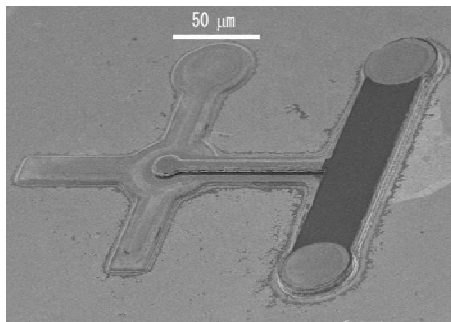


図 5 アサーマル面発光レーザとその特性

(3) 光位相シフタとその応用

面発光レーザ構造を用いて入射光強度に対して大きな負の位相シフトを与える位相シフタを製作し(図 6)、その 10 ピコ秒クラスの高速度応答を実証して、光ファイバ伝送中の非線形効果を光学的に補償する新手法の提案し、実際に 10psec 幅の短パルスに対して、光ファイバ中の自己位相変調を光学的に補償できる可能性を示した(図 7, 8)。

(4) 面発光レーザ構造を用いたスローライト導波路

面発光レーザ構造を用いて、高反射率で形成された導波路で光を減速したスローライトを生成し、大幅に光回路を微小化するスローライト光回路を提案し(図 9)、大きさ 20 ミクロンの超小型光変調器、光検出器の実証に成功した。また、スローライトを用いた超小型光スイッチを提案し、その小型化の設計とスイッチング特性を明らかにした。

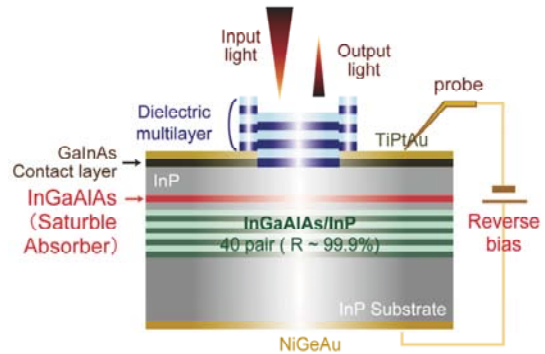


図 6 面発光レーザ構造による光位相シフタ

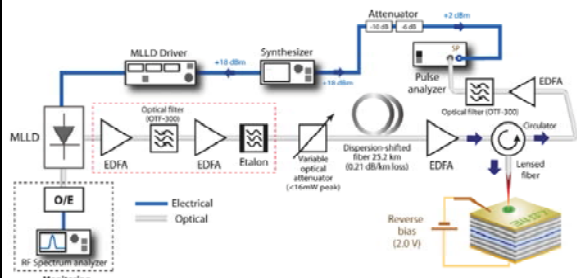


図 7 光ファイバの非線形効果補償

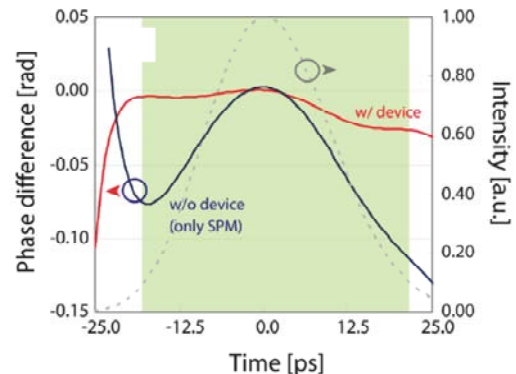


図 8 位相シフタによる自己位相変調の補償効果の実証

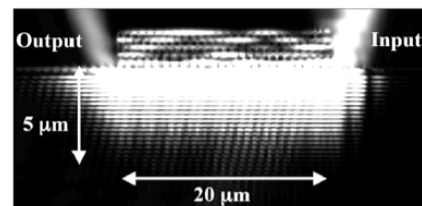
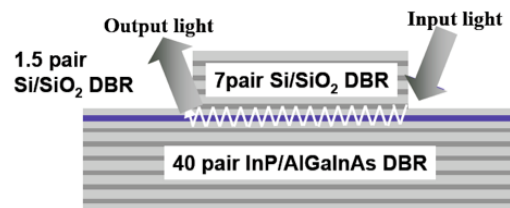


図 9 面発光レーザ構造によるスローライト導波路

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 19 件)

- (1) Vadim Karagodsky, Bala Pesala, Christopher Chase, Werner Hofmann, Fumio Koyama and Connie J. Chang-Hasnain, "Monolithically integrated multi-wavelength VCSEL arrays using high-contrast gratings," OPTICS EXPRESS, vol.18, no.2, pp. 694-699, Jan.,2010. 査読有り
- (2) Xiaoxue Zhao, Bo Zhang, Louis Christen, Devang Parekh, Werner Hofmann, Markus C. Amann, Fumio Koyama, Alan E. Willner and Connie J. Chang-Hasnain, "Greatly increased fiber transmission distance with an optically injection-locked vertical-cavity surface-emitting laser," Optics Express, vol.17, no.16, pp.13785-13791, Aug. 2009. 査読有り
- (3) 小山二三夫, 淵田歩, "Bragg 反射鏡導波炉におけるスローライトを用いた光回路," レーザー研究, vol.37, no.8, pp. 591-595, Aug.2009. 査読有り
- (4) Padullaparthi Babu Dayal, Takahiro Sakaguchi, Akihiro Matsutani and Fumio Koyama, "Multiple-Wavelength Vertical-Cavity Surface-Emitting Lasers by Grading a Spacer Layer for Short-Reach Wavelength Division Multiplexing Applications," Appl. Phys. Exp., vol.2, no.9, pp.092501-1-3, Aug. 2009. 査読有り
- (5) Akihiro Matsutani, Hideo Ohtsuki and Fumio Koyama, "Smooth and Vertical Profile Dry Etching of Si Using XeF<sub>2</sub> Plasma," Jpn. J. Appl. Phys. vol.48, 06FE09, pp. 1-3, Jun. 2009. 査読有り
- (6) Hayato Sano and Fumio Koyama, "Proposal of gain-matched VCSELs with a thermally actuated MEMS structure for wide temperature operations," IEICE Electronics Express, vol.6, no.12, pp.883-888, Jun. 2009. 査読有り
- (7) Fumio Koyama, "VCSEL Photonics -advances and new challenges-," IEICE Electronics Express, vol.6, no.11, pp. 651-672, Jun. 2009. 査読有り
- (8) Hayato Sano, Akihiro Matsutani and Fumio Koyama, "Athermal 850nm Vertical Cavity Surface Emitting Lasers with Thermally Actuated Cantilever Structure," Appl. Phys. Exp., vol.2, pp.07210-1-3, Jun. 2009. 査読有り
- (9) Ayumi Fuchida and Fumio Koyama, "Novel Waveguide Optical Switch Using Slow light," Trans. IEICE, vol.J92-C, no.3, pp.69-74, Mar. 2009. 査読有り
- (10) \*F. Koyama, "New function of VCSEL-based optical devices", Chinese Opt. Lett., vol.6, no.10, Oct. 2008. 査読有り
- (11) Xiaoxue Zhao, Koich Hasebe, Takahiro Sakaguchi, Fumio Koyama, Connie J. Chang-Hasnain, Nobuhiko Nishiyama, Catherine Canueau and Chung-En Zah, "Tunable optical equalizer using diffraction grating filters," IEEE Photon. Technol. Lett., vol.20, no.18, p.1590, Sep. 2008. 査読有り
- (12) Akihiro Imamura and Fumio Koyama, "Modeling and experiment on tapered hollow waveguide multiplexer for multiwavelength VCSEL array," IEICE Electronics Express, vol.5, no.12, pp. 451-456, Jun. 2008. 査読有り
- (13) Akihiro Imamura, Naoto Kitabayashi and Fumio Koyama, "Beam steering and tilt coupling in tunable hollow waveguide," IEICE Electronics Express, vol.5, no.11, pp. 405-410, Jun. 2008. 査読有り
- (14) Akihiro Matsutani, Hideo Ohtsuki and Fumio 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, Jun. 2008. 査読有り
- (15) Ayumi Fuchida and Fumio Koyama, "Proposal of total-internal-reflection optical switch with slowing light in Bragg reflector waveguide," IEICE Electronics Express, vol.5, no.9, pp. 349-353, May 2008. 査読有り
- (16) Akihiro Matsutani, Hideo Ohtsuki and Fumio Koyama, "Characterization of H<sub>2</sub>O-inductively coupled plasma for dry etching," J. Phys., pp.1-4, Apr. 2008. 査読有り
- (17) Satoshi Suda, Fumio Koyama, Nobuhiko Nishiyama, Catherine Caneau and Chung-En Zah, "High speed response of nonlinear optical phase-shifter based on vertical micro-cavity saturable absorber," IEICE Electronics Express, vol.5, no.4, pp. 131-135, Feb. 2008. 査読有り
- (18) Padullaparthi Babu Dayal and Fumio Koyama, "Polarization control of 0.85μm vertical-cavity surface-emitting lasers integrated with gold nanorod arrays," Appl. Phys. Lett., vol.91, p.111107, Nov. 2007. 査読有り
- (19) Padullaparthi Babu Dayal, Naoto Kitabayashi, Tomoyuki Miyamoto and Fumio Koyama, "Polarization control of 1.15μm vertical-cavity surface-emitting lasers using autocloned photonic crystal polarizer," Appl. Phys. Lett., vol.91, p.0411110, Jul. 2007. 査読有り

[学会発表] (計 58 件)

- (1) \*Fumio Koyama, "Wavelength Control of VCSELs," The XV International Workshop on the Physics of Semiconductor Devices, IWPSD 2009, New Delhi, India, pp.77-80, Dec.21. 2009.
- (2) Hayato Sano and Fumio Koyama, "Proposal of Gain-matched VCSELs with a Thermally Actuated Cantilever Structure for Ultra-wide Temperature Operations," 15th Microoptics Conference, MOC2009, Tokyo, Japan, K4, Oct.30. 2009.
- (3) Akihiro Imamura, Vadim Karagodsky, Bala Pesala, Fumio Koyama and Connie J. Chang-Hasnain, "Multi-Wavelength VCSEL Array based on High Contrast Sub-Wavelength Grating," The 22nd Annual Meeting of the IEEE Photonics Society, Turkey, ThX5, pp.811-812, Oct.28.2009.
- (4) \*Fumio Koyama, "Advances of VCSEL-related Photonic Devices," 12th International Symposium on Microwave and Optical Technology, ISMOT 2009, New Delhi, India, I-605, pp.999-1002, Dec. 20.2009.
- (5) \*Fumio Koyama, "Advances of Surface Emitting Lasers," International Symposium of Advanced Photonic Electronics, JSPS2009, Tokyo, Japan, pp.35-40, Oct. 12.2009.
- (6) Hayato Sano, Akihiro Matsutani and Fumio Koyama, "Athermal and Tunable Operations of 850nm VCSEL with Thermally Actuated Cantilever Structure," 35th European Conference and Exhibition on Optical Communication, ECOC2009, Vienna, Austria, P2.26, Sep.10. 2009.
- (7) \*Fumio Koyama and Hayato Sano, "VCSEL Photonics –Tuning, Athermalization and Slowing-down –," CLEO/Pacific Rim 2009, CLEO-PR, Shanghai, China, Aug. 28.2009.
- (8) \*Fumio Koyama, "Manipulation of Light in VCSELs and Hollow Waveguides," 2009 International Nano-Optoelectronics Workshop, iNOW2009, Stockholm, Sweden, ThA2, pp.37-38, Aug.5 2009.
- (9) \*Fumio Koyama and Hayato Sano, "Wavelength control of MEMS VCSELs," Opto-Electronics and Communications Conference 2009, OECC2009, Hong Kong, China, FO3, Jul.12, 2009.
- (10) \*Fumio Koyama, "New Functions of VCSEL-related Photonic Devices," International Conference on Materials for Advanced Technologies, ICMAT2009, Singapore, A02997-05119, Jun.30, 2009.
- (11) Koichi Hasebe, Yusuke Mada, Takeru Sakairi, Takahiro Sakaguchi, Akihiro Matsutani and Fumio Koyama, "High-Speed Optical Modulation based on Frequency-Modulated VCSELs and Optical Filters," 2009 International Conference on Indium Phosphide and Related Materials, IPRM2009, Newport Beach, USA, ThB1-5, pp.379-382, May,16, 2009.
- (12) P. Babu Dayal, Akihiro Imamura, Takahiro Sakaguchi, Akihiro Matsutani and Fumio Koyama, "Multiple-Wavelength GaInAs/GaAs VCSELs with Grading a Spacer Layer for Short Reach WDM Applications," 2009 International Conference on Indium Phosphide and Related Materials, IPRM2009, Newport Beach, USA, Tu B2-6, pp.182-184, May ,15,2009.
- (13) Ayumi Fuchida, P. Babu Dayal, Takahiro Sakaguchi, Akihiro Matsutani and Fumio Koyama, "Low Polarization Dependence of Bragg Reflector Slow Light Waveguides," 21st Annual Meeting of The IEEE Lasers & Electro-Optics Society, LEOS2008, Newport Beach, USA, WN5, pp. 525-526, Nov. 12,2008.
- (14) P. Babu Dayal, Jun Nakajima, Takahiro Sakaguchi, Akihiro Matsutani and Fumio Koyama, "Multiple-wavelength VCSEL arrays using surface nano-machining process for WDM applications," 21st Annual Meeting of The IEEE Lasers & Electro-Optics Society, LEOS2008, Newport Beach, USA, TuEE4, pp. 400-401, Nov.11, 2008.
- (15) \*Fumio Koyama, "VCSELs: their 30 years history and new challenges," Asia Pacific Optical Communications, APOC2008, Hangzhou, China, 7135-18, Oct. 28,2008.
- (16) Satoshi Suda, Xiaxue Xhao, Fumio Koyama, Connie J. Chang-Hasnain, Nobuhiko Nishiyama and Chung-En Zah, "Tunable optical equalizer based on 1.55  $\mu\text{m}$  VCSEL for modulation bandwidth enhancement," 21st IEEE International Semiconductor Laser Conference, ISLC2008, Sorrento, Italy, ThB5, p.179, Sep 14-18. 2008.
- (17) Keisuke Kuroki, Ayumi Fuchida, Takahiro Sakaguchi, Akihiro Matsutani and Fumio Koyama, "Miniature optical gate with VCSEL-based slow light bragg reflector waveguide," 21st IEEE International Semiconductor Laser Conference, ISLC2008, Sorrento, Italy, TuC3, p.67, Sep. 14-18 2008.
- (18) \*Fumio Koyama, "Tuning and slowing light in Bragg reflector waveguides," iNOW2008, Shonan, Japan, ThB2, p.105, Aug 7-9. 2008.
- (19) \*Fumio Koyama, "Recent advances of VCSEL photonics," MBE2008, Hsinchu, Taiwan, pp.27-28, Jun.6 2008.
- (20) \*Fumio Koyama, "Nano-aperture plasmonic VCSELs," 20th Indium Phosphide and Related Materials Conference, IPRM2008, Versailles, FRANCE, WeA1.2, May.27 2008.
- (21) Xiaoxue Zhao, Bo Zhang, Louis Christen,



- Devang Parekh, Fumio Koyama, Werner Hofmann, Markus C. Amann, Alan E. Willner and Connie J. Chang-Hasnain, "Data Inversion and Adjustable Chirp in 10-Gbps Directly-Modulated Injection-Locked 1.55- $\mu\text{m}$  VCSELs," Conference on Lasers and Electro-Optics, CLEO, San Jose, USA, CMW5, May.25 2008.
- (22) Ayumi Fuchida and Fumio Koyama, "Slow Light Total-Internal-Reflection Optical Switch with 90-Degree Bend," Conference on Lasers and Electro-Optics, CLEO, San Jose, USA, JWA86, May.7 2008.
- (23) \*Fumio Koyama, "Recent advances of VCSEL photonics," The 2008 Spring Meeting of the German Physical Society, Berlin, Germany, DS7, Feb.25-29, 2008.
- (24) \*Fumio 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. 17-19,2007.
- (25) Ayumi Fuchida and Fumio Koyama, "Total-Internal-Reflection Optical Switch with Slowing Light in Bragg Reflector Waveguide," 20th Annual Meeting of the IEEE Laser and Electro-Optical Society, LEOS2007, Florida, USA, MK2, pp. 88-89, Oct.,22-25, 2007.
- (26) Go Hirano and Fumio Koyama, "Slowing Light in Bragg Reflector Waveguide with Tilt Coupling Scheme," 20th Annual Meeting of the IEEE Laser and Electro-Optical Society, LEOS2007, Florida, USA, MK1, pp. 86-87, Oct. 22-25,2007.
- (27) Keisuke Kuroki, Go Hirano, Fumio Koyama, Koichi Hasebe and Takahiro Sakaguchi, "Slow Light Waveguide Detector Slowing Light in Bragg Reflector Waveguide," 33rd European Conference and Exhibition on Optical Communication, ECOC07, Berlin, Germany, P-49, Sep. ,16-21,2007.
- (28) Satoshi Suda, Fumio Koyama, Nobuhiko Nishiyama, Catherine Caneau and Chung-En Zah, "Transient Behavior of Nonlinear Optical Compensator Based on Vertical Micro-Cavity Saturable Absorber," 33rd European Conference and Exhibition on Optical Communication, ECOC07, Berlin, Germany, P-42, Sep. 16-21, 2007.
- (29) \*Fumio Koyama, "New Functions and Challenges of VCSEL-related Photonic Devices," International Nano-Optoelectronic Workshop, iNOW2007, Beijing and Lanzhou, China, Jul.29./Aug.,11, 2007.
- (30) Akihiro Imamura and Fumio Koyama, "Beam steering and coupling in tunable hollow waveguide with narrow air core," 12th Optoelectronics and Communications Conference/16th International Conference on Integrated Optics and Optical Fiber Communication, OECC/IOOC2007, Yokohama, Japan, 13E2-3, pp. 694-695, Jul. 9-13,2007.
- (31) Naoto Kitabayashi, Akihiro Imamura, Akihiro Matsutani and Fumio Koyama, "Tapered hollow waveguide multiplexer for multi-wavelength VCSEL array," 12th Optoelectronics and Communications Conference/16th International Conference on Integrated Optics and Optical Fiber Communication, OECC/IOOC2007, Yokohama, Japan, 12D4-2, pp. 410-411, Jul. 9-13,2007.
- (32) \*Fumio Koyama and Tomoyuki Miyamoto, "Recent Advances of VCSEL Technologies," International Conference on Indium Phosphide and Related Materials, IPRM2007, Matsue, Japan, WeB3-1, pp. 420-425, May,14-18, 2007.

[その他]

ホームページ等

<http://vcsel-www.pi.titech.ac.jp/index-j.html>

## 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：3 0 1 7 8 3 9 7

### (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：9 0 1 1 6 0 5 4

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：4 0 3 9 7 0 4 7