

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 25 日現在

機関番号：12608

研究種目：基盤研究(S)

研究期間：2010～2014

課題番号：22226008

研究課題名(和文)超低消費電力光配線のための集積フォトニクスの進化

研究課題名(英文)Advances of integrated photonics for ultra-low power consumption optical interconnects

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

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 161,700,000円

研究成果の概要(和文)：MEMS構造による絶対波長安定化(アサーマル)面発光レーザ、光群速度低下させて素子サイズを大幅に小型化して高速化を図るスローライト光デバイスの開拓とその集積化を進め、アサーマル面発光レーザによる30nmにわたる波長可変動作、面発光レーザ構造を基軸とした超小型スローライト光スイッチ・光変調器、解像点数1000を超える超高解像ビーム掃引デバイスなどを実現した。また、スローライト伝搬を利用した結合共振器面発光レーザと光変調器集積光源により、30GHzを超える高速変調動作を実現し、高速化と低消費電力化の両立を実現した。さらに、超多ポート波長選択スイッチの実現など新たな集積フォトニクスの可能性を示した。

研究成果の概要(英文)：We performed new challenges for athermal and tunable surface emitting lasers based on MEMS structures and developed various VCSEL-based slow-light devices and their integrations, which enable size reduction and high-speed operations. We realized widely tunable athermal VCSELs with a tuning range of over 30nm. Also, we demonstrated VCSEL-based novel devices such as an ultra-compact slow-light switch, modulator and super-high resolution beam steering device, exhibiting a number of resolution points of over 1,000. In addition, we proposed and demonstrated a coupled cavity VCSEL and modulator-integrated VCSEL based on slow-light lateral integration, exhibiting high-speed operation beyond 30GHz with low power consumption. The achievement also includes a compact wavelength selective switch supporting ultra-high port account of over 180, which may open up new photonics integration scheme.

研究分野：光エレクトロニクス

キーワード：半導体レーザ 光通信 光集積回路 光インターコネクト マイクロマシン 高速変調 波長可変レーザ スローライト

1. 研究開始当初の背景

スーパーハイビジョンなどの次世代超高精細映像の伝送には、20Gbps 以上の大容量伝送技術が必要であり、低消費電力化を両立させることも将来のグリーン ICT の方向性から重要な課題である。幹線系光通信網に対しては、10Tbps を超える大容量波長多重伝送技術が可能になりつつあるものの、これらは単体光素子を寄せ集めた既存の光デバイス技術から構成されている。今後加速的に重要性が増してくる光アクセス、光 LAN、装置間・装置内配線の大容量化を実現するためには、経済性やスケラビリティに優れた革新的な光リンク・光配線技術の開拓が必要である。我が国発の技術である面発光レーザを用いた短距離系光リンクは、最近では装置間・装置内における光インターコネクタへの適用が進められようとしている。近い将来 100Gbps 超の加速的な高速化のニーズは大きいものの、10Gbps 程度の伝送容量に留まっており、温度制御が適用できない短距離系では、波長空間の活用による多重化の検討は小規模に留まっていた。

2. 研究の目的

本研究では、研究代表者の提案した MEMS 構造集積化による絶対波長安定化（アサーマル）面発光レーザアレイ、光群速度低下させて素子サイズを大幅に小型化して高速化を図るスローライト光デバイスをキデバイスとして、その並列アレイ化、多波長集積化、超高速化、低消費電力化を進めて、現状技術の 100 倍から 1000 倍の超大容量 (100Gbps-1Tbps) の光リンク/光配線のための革新的な集積光デバイスの開発を行い、高速化と低消費電力化を両立する集積フォトニクスの進化を目指した。

3. 研究の方法

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、サブ波長回折格子を用いた高精度波長集積化など、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し、大きな消費電力を発生する温度制御を不要とし、高精度に制御されたアレイ素子の百波長に及ぶ高精度多波長一括生成技術の確立を目指した。

また、面発光レーザに集積可能な Bragg 反射鏡導波路におけるスローライトを用いて、光変調器や光検出器などの光回路の飛躍的な小型化を進めた。光の群速度を 1/10~1/100 まで低減することにより、素子長を数十ミクロン以下となる超小型光素子、高密度光回路の実現が可能になる。これによって、超高速光変調器、大規模半導体光スイッチ網など、低消費電力化と高速化を両立可能な光

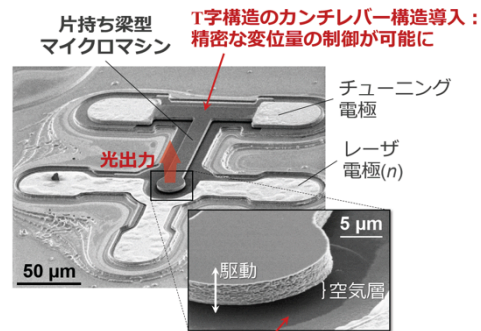
配線要素技術の確立を進めた。さらに、面発光レーザアレイとテーパ中空光導波路とのハイブリッド集積素子や、Bragg 反射鏡導波路アレイを用いた小型・大規模光合波回路の実現を目指した。

4. 研究成果

(1) 面発光レーザの波長エンジニアリング

A) アサーマル波長可変面発光レーザ

図 1 に示すように 850nm 帯面発光レーザに応力制御層を含んだ独自の MEMS 構造を集積し、周囲温度が変わっても波長の変化しないアサーマル動作を実現するとともに (図 2)、カンチレバー構造にマイクロヒーターを同時に集積することで、局所加熱による 5nm 以上の連続波長掃引を同時に達成した。さらに、カンチレバー構造に電圧を印加して静電引力により、30nm 以上の連続波長掃引を実現した。図 3 に示すように、波長温度安定化と波長可変動作の両立は、半導体レーザでは初めての報告である。MEMS 構造のサブナノメートルオーダーの自立的な熱的微小変位によって、半導体レーザの波長温度係数を自在に制御したもので、温度制御不要の多波長集積化光源の実現が可能になり、多波長集積光源の大幅な低消費電力化の可能性を示した。



モノリシックな反射防止層形成: 波長可変範囲の拡大を可能に

図 1 アサーマル波長可変面発光レーザ

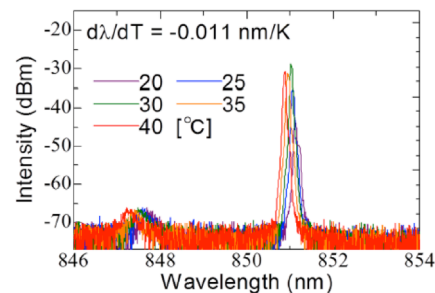


図 2 アサーマル (絶対波長安定化) 動作 (Sano, et.al, APL 2012)

B) 多波長アレイ化と高精度波長制御

MEMS 構造のカンチレバー長を変えることで、アサーマル面発光レーザの発振波長をウ

エハ面内で変えた多波長面発光レーザを実現した。同時に、図4に示すように波長可変動作により、100GHz 間隔で110 波長規模の多波長集積化の動作実証に成功した。

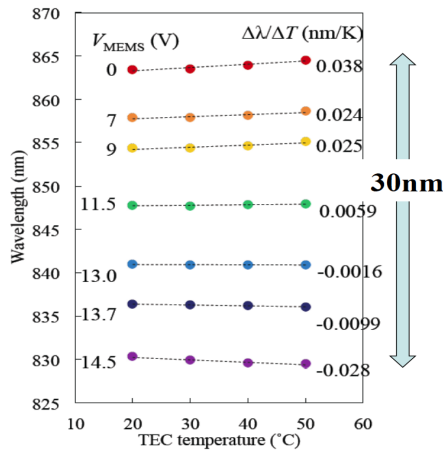


図3 アサermal (絶対波長温度安定) 化と30nm の波長可変動作の両立 (OPEX 2014)

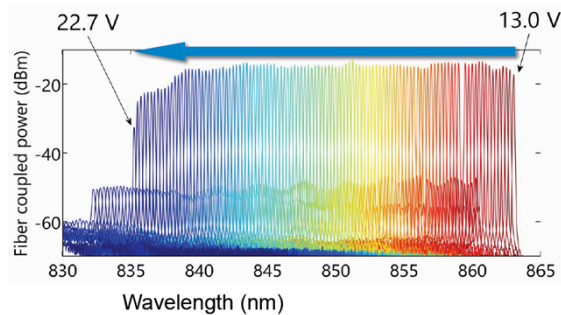


図4 波長可変動作による大規模波長集積 (100GHz 間隔で110 波長の集積が可能)

C) サブ波長回折格子面発光レーザ

広い波長範囲での多波長動作実現のため、平面内の周期構造を用いたサブ波長回折格子(HCG)をナノインプリント法による高精度製法を確立し、980nm 帯 HCG 面発光レーザの発振に成功した。HCG による巨大な角度依存性による単一横モード制御法を達成した。

(2) スローライトフォトニクス

A) スローライト光デバイス

面発光レーザと同様な層構造を有する Bragg 反射鏡導波路を用いて光群速度を1/10-1/100 以下に減速し、超小型の光変調器、光スイッチ、波長スイッチの実現に成功した。まず、スローライト伝搬を利用した小型全反射光スイッチを提案・試作し、構造分散による巨大な等価屈折率変を実現して、交差角30°、大きさ30μm 角の小型光スイッチの動作に初めて成功した(図5(a))。さらに、キャリア注入によるナノ秒オーダーの高速スイッチングが可能であることを実証した。

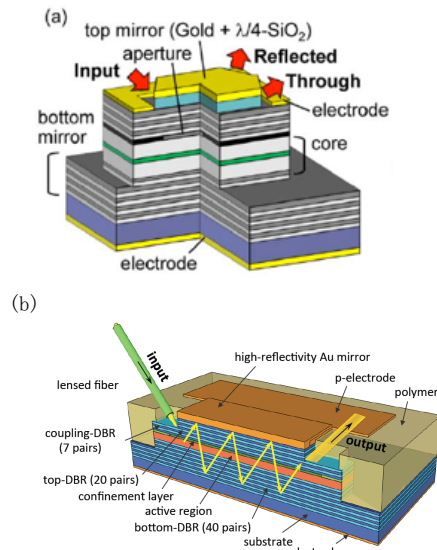


図5 (a)素子サイズ30μm 角のスローライトスイッチと (b) スローライト光変調器 (Fuchida, et.al., OL 2011, Gu, APL 2013)

さらに、図5(b)に示すようなスローライト変調器を製作し、その特性評価を行った。素子長50ミクロンの小型素子に対して、500mV の小さな変調器電圧で、5dB の消光比が得られた。また、素子長20ミクロンの超小型素子で変調帯域20GHz 以上(40Gbps 相当)を実現した。導波路型吸収変調器としては世界最小の素子サイズである。スローライト効果による微小化による浮遊容量低減効果を示し、40Gbps の高速動作により、60fJ/bit の低消費電力動作が可能であることを実証した。

B) 結合共振器による面発光レーザの高速化

本研究推進中に、図6に示すように、面発光レーザと同一面内に集積された光共振器を横方向スローライト伝搬による結合・帰還させる新構造を見出して、光の帰還により従来の半導体レーザの変調速度限界を打破する高速直接変調技術を実現した。

横方向結合共振器の構造としてくびれ酸化狭窄構造を提案し、レート方程式解析により、結合共振器により小信号変調帯域が50GHz 以上に拡大できることを示した。また実際にデバイス製作を行い、図7に示すように小信号変調帯域として、980nm 帯面発光レーザとしては、世界最速の29GHz 以上の高速化を実現して、大信号変調特性としては36Gbps の変調に成功するとともに、その動作温度やバイアス電流に対する良好な安定性を実証した。また、横方向結合共振器面発光レーザにおいて、各共振器へ注入する電流波形の位相を反転した差動変調方式による高速化の手法を提案し、差動変調方式により40Gbps の大信号変調に成功した。

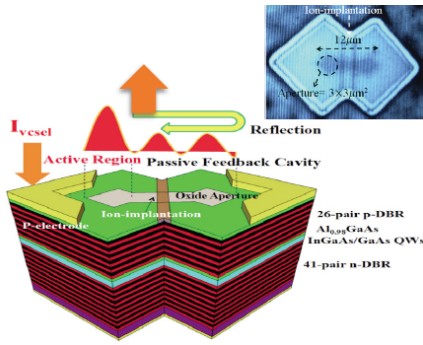


図 6 光学的手法によって従来の変調速度限界を打破する結合共振器面発光レーザ

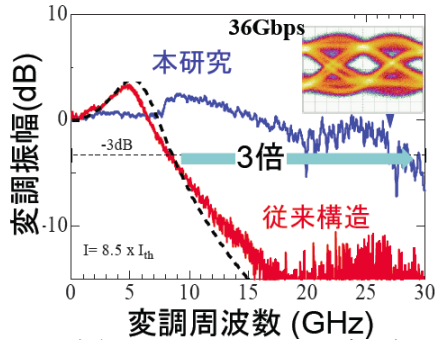


図 7 結合共振器面発光レーザの変調特性
従来素子の 3 倍以上の変調帯域を実現。面発光レーザとしては世界最速。(Dalir, et.al., APL 2013)

C) 光変調器集積光源

直接変調の速度限界を超える更なる高速化を実現するため、面発光レーザにスローライト変調器を直接結合する新しい集積手法を提案し、変調器集積光源を実現した(図 8)。横方向結合共振器面発光レーザの一方の共振器に逆バイアス電圧を印可して電界吸収効果により、変調器電圧 200mV 以下で消光比 5dB 以上の低電圧動作を実証するとともに(吸収型変調器としては世界最小値)、25Gbps までの高速変調動作を実現した。さらに、変調器素子長の 13 μ m までの微小化により、図 9 に示すように変調帯域としては 30GHz (光検出器限界) を越える高速化を実現し、低駆動電圧による低消費電力動作と高速化の両立が可能であることを実証した。

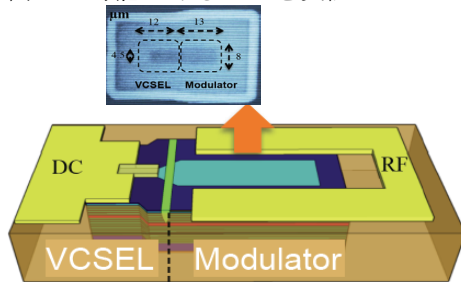


図 8 スローライト変調器を集積した面発光レーザ。世界最小の光変調器集積光源 (Dalir, et.al, APL, 2014)

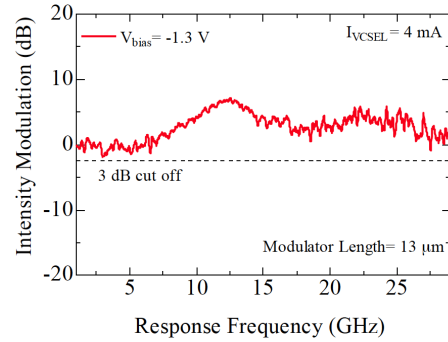


図 9 スローライト変調器集積光源の変調特性 (Dalir, et.al., APL 2014)

D) 超高解像度ビーム掃引と超多ポート波長選択スイッチ

面発光レーザ構造のスローライト導波路の巨大な構造分散を用いて、超高解像度ビーム掃引・高分解能波長分波回路を実現できることを見出した。本デバイスの特徴は大きな構造分散により通常の回折格子に比べて一桁以上大きな角度分散が得られ、ビーム掃引デバイスの性能指数である解像点数を 1,000 以上まで増大できる。実際に GaAlAs 系スローライト導波路を作製し、ビーム広がり角 0.04° 以下、最大偏向角 60°、解像点数 1,000 以上の高解像ビーム掃引を実現した(図 10)。これは、非機械式のビーム掃引デバイスとしては世界最高値である。同時にこの高角度分散素子を用いて、波長分波回路の特性を明らかにし、超小型大規模チャンネルの分波回路の可能性を示すとともに、図 11 に示す空間光学系を用いた波長選択スイッチへと展開し、出力ポート 180 を越える超多ポート波長選択光スイッチを実現した。これにより小型・大規模な波長選択スイッチへの道が拓かれた。

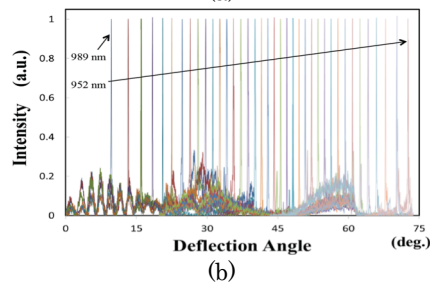
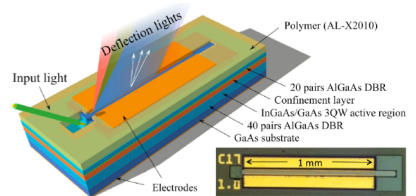


図 10 超高解像度ビーム掃引素子のビーム掃引特性。非機械式としては世界最高の解像点数 1,000 を実現 (Gu, et.al., IEEE Photon. J., 2012)

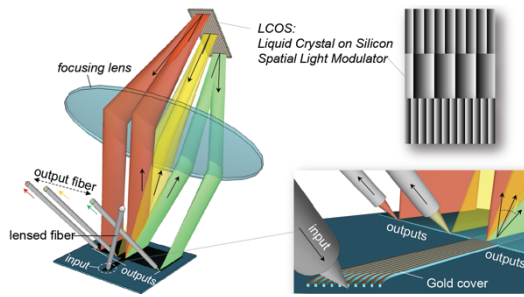


図 11 ビーム掃引デバイスを用いた超多ポート波長選択スイッチ。世界最高の182出力ポート動作を実現(OFC2014, ECOC2014 で top scored paper に選出。JLT での招待論文)

(b) VCSEL・合波回路ハイブリッド集積化

テーパ構造中空導波路を用いて、面発光レーザアレイからの多波長光を合波させる超小型光合波回路を製作し、素子長 $200\mu\text{m}$ の微小回路で、12チャンネルの多波長合波動作に成功した。さらにポート数、波長チャンネル数を大幅に拡大するため、図 11 の波長選択スイッチによる波長分波特性を実証した。図 12(a)に示すチップサイズ 1mm 角内に、面発光レーザと同様な Bragg 反射鏡導波路構造で 200 本のアレイを集積し、図 12(b)に示すように、最小波長間隔 $0.15\text{nm} \times 60$ チャンネルの大規模波長分波動作に成功した。これは面発光レーザと集積可能であり、実際に面発光レーザと Bragg 反射鏡導波路との一体集積にも成功した。(Shimda et.al. Appl. Opt., 2014)

面発光レーザアレイと上記の大規模波長合分波回路との一体集積までには至らなかったものの、面発光レーザの 100 波長チャンネルを越える波長可変動作と、面発光レーザと集積可能な 60 波長チャンネル規模の小型合分波回路を実現して、面発光レーザを基軸とした高密度光 IC のコア技術を創出した。

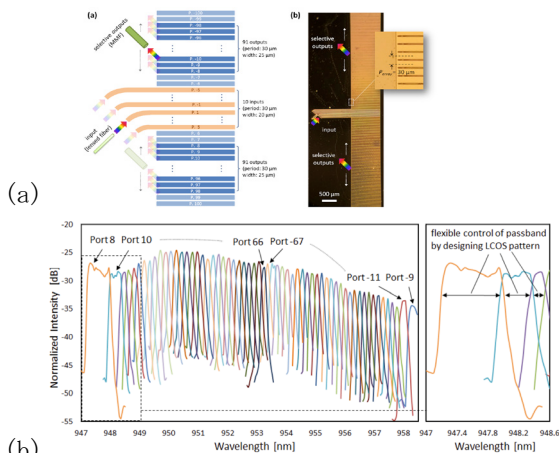


図 12 (a) 180 ポート波長合分波チップの顕微鏡写真、(b)波長分波特性 (60 チャンネル、最小チャンネル間隔 0.15nm) (JLT 招待論文 2015)

(4) まとめ

面発光レーザの波長温度係数、多波長集積化を自在に操る MEMS 面発光レーザ技術確立し、大容量の WDM 光インターコネクットの低消費電力化のための中核技術を創出するとともに、面発光レーザ構造を基軸として超小型スローライトスイッチ・変調器、超高解像度ビーム掃引、などの革新的な新機能を有する集積デバイスを実現し、高速化、100 波長規模の多波長エンジニアリング、超多ポート波長選択スイッチ/合分波回路などの光回路を実現するなど、当初目標は達成できた。

本研究の成果は、学術雑誌論文 59 編、国際会議論文 126 編、国内大会発表等約 139 件で外部に積極的に発信され、一連の研究成果は、7 件の国際誌招待論文、23 件の国際会議基調講演・招待講演など、国際的にもインパクトをもたらした。また、光・電子集積技術業績賞 (応用物理学会)、MOC Award (17th Microoptics Conference) を含む 19 件の受賞 (当該研究に関する研究協力者の受賞を含む) をもたらすなど、国内外で高く評価されるに至った。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 59 件)

- ① X. Gu, K. Suzuki, Y. Ikuma, K. Seno, H. Tanobe, A. Matsutani, F. Koyama, "Compact Wavelength Selective Switch Using a Bragg Reflector Waveguide Array with Ultra-Large Number (>100) of Output-Ports," Journal of Lightwave Technology, vol. 33, no. 7, pp. 1358-1364, Apr. 2015. (招待論文)
- ② F. Koyama, M. Nakahama, "Micromachined Vertical Cavity Surface Emitting Lasers - Athermalization, Tuning and Multi-wavelength Integration -," IEEE JSTQE, vol. 21, 1700310, Jan. 2015. (招待論文)
- ③ F. Koyama, "Advances and New Functions of VCSEL Photonics," Optical Review, Vol. 21, No. 6, pp. 893-904, Dec. 2014. (招待論文)
- ④ H. Dalir, Y. Takahashi, F. Koyama, "Low-voltage, high-speed and compact electroabsorption modulator laterally integrated with 980-nm VCSEL," Optics Express, vol. 22, pp. 25746-25755, Oct. 2014.
- ⑤ M. Nakahama, T. Sakaguchi, A. Matsutani, F. Koyama, "Athermalization and on-chip multi-wavelength integration of VCSELs employing thermally actuated micromachined mirrors," Appl. Phys. Lett., vol. 105, pp. 091110-1-4, Sep. 2014.
- ⑥ M. Nakahama, T. Sakaguchi, A. Matsutani, F. Koyama, "Athermal and widely tunable VCSEL with bimorph micromachined mirror, Optics Express," vol. 22, no. 18, pp. 21471-21479, Aug. 2014.
- ⑦ H. Dalir, M. Ahmed, A. Bakry, F. Koyama,

- “Compact electro-absorption modulator integrated with vertical-cavity surface-emitting laser for highly efficient millimeter-wave modulation,” Appl. Phys. Lett., vol. 105, pp. 081113-1-5, Aug. 2014.
- ⑧ H. Dalir, F. Koyama, “29GHz directly modulated 980nm vertical-cavity surface emitting lasers with bow-tie shape transverse coupled cavity,” Appl. Phys. Lett., vol. 103, 091109-1-4, Aug. 2013.
- ⑨ F. Koyama, X. Gu, “Beam Steering, Beam Shaping, and Intensity Modulation Based on VCSEL Photonics,” IEEE JSTQE, vol. 19, no. 4, Jul. 2013. (招待論文)
- ⑩ X. Gu, T. Shimada, A. Matsutani, F. Koyama, “Ultra-high channel-count wavelength demultiplexer based on a Bragg reflector waveguide with large angular dispersion,” Optics Express, vol. 20, no. 26, B331-338, Dec. 2012.
- ⑪ H. Sano, N. Nakata, M. Nakahama, A. Matsutani, F. Koyama, “Athermal and tunable operations of 850nm vertical cavity surface emitting lasers with thermally actuated T-shape membrane structure,” Appl. Phys. Lett., Vol. 101, No. 12, 121115, Oct. 2012.
- ⑫ X. Gu, T. Shimada, A. Matsutani, F. Koyama, “Miniature Non-mechanical Beam Deflector Based on Bragg Reflector Waveguide with a Number of Resolution-points Larger than 1,000,” IEEE Photon. J, Vol. 4, No. 5, pp. 1712-1719, Oct. 2012.
- ⑬ X. Gu, T. Shimada, F. Koyama, “Giant and high-resolution beam steering using slow-light waveguide amplifier,” Optics Express, Vol. 19, No. 23, 22675~22683, Nov. 2011.
- ⑭ A. Imamura, A. Matsutani, F. Koyama, “Multiplexing of Multi-Wavelength 1060-nm-Band GaInAs/GaAs Vertical Cavity Surface Emitting Laser Array Using Tapered Hollow Waveguide,” Appl. Phys. Exp., vol. 4, 082106-1-3, Jul. 2011.
他 45 件

[学会発表] (計 264 件)

- ① F. Koyama, “Energy Efficient Tunable Light Sources for Next Generation Flexible Access Networks,” Optical Fiber Communication Conference, Invited Paper, W1J.4, Mar. 2015.
- ② F. Koyama, “Virtually Image Phased Array based on Bragg Reflector Waveguide for Large-port Optical Switching,” Photonics West, Invited Paper, 9372-13, Feb. 2015.
- ③ X. Gu, K. Seno, H. Tanobe, F. Koyama, “60-channel Wavelength Selective Switch on Bragg Reflector Waveguides Array with 125 Output-ports,” ECOC 2014,” We.3.5.3, pp. 1-3, Sep. 2014. (Top Scored Paper)
- ④ F. Koyama, H. Dalir, “High-speed modulation

of transverse-coupled-cavity VCSELs,” SPIE, Photonics Europe, 9134-6, Apr. 2014.

- ⑤ X. Gu, F. Koyama, “Compact Wavelength Selective Switch Based on High-density Bragg Reflector Waveguide Array with 120 Output Ports,” OFC 2014, Th3F.1, pp. 1-3, Mar. 2014. (Top Scored Paper)
- ⑥ F. Koyama, “Beam Steering and Intensity Modulation Based on VCSEL Photonics,” International Nano-Optoelectronics Workshop, Aug. 2013.
- ⑦ F. Koyama, “Wavelength engineering of VCSELs based on MEMS technologies,” IEEE Optical MEMS and Nanophotonics 2013, TM-S1.1, pp. 37-38, Aug. 2013.
- ⑧ F. Koyama, X. Gu, “Super-high Resolution Optical Beam Steering Based on Bragg Reflector Waveguides,” CLEO-PR, Invited Paper, MK2-3, Jul. 2013.
- ⑨ F. Koyama, “Advances of VCSEL Photonics,” 23rd IEEE International Semiconductor Laser Conference, Plenary Talk, PLE3, Oct. 2012.
- ⑩ F. Koyama, “VCSEL-based slow light photonics: switching, modulation, amplification, and beam steering,” Photonics West, Invited Paper, 8276-5, Jan. 2012.
- ⑪ F. Koyama, “Advances of VCSEL Photonics,” 17th Microoptics Conference, Plenary Talk, A-3, Nov. 2011.
- ⑫ F. Koyama, “Recent Advances in VCSEL Photonics,” The 16th Opto-Electronics and Communications Conference, Invited Paper, 7D4_1, Jul. 2011.
他 252 件

[産業財産権]

- 出願状況 (計 15 件)
○取得状況 (計 5 件)

[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：7 0 2 1 5 6 2 2

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