

平成 30 年 6 月 27 日現在

機関番号：12608

研究種目：基盤研究(A) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15H02248

研究課題名(和文)超高速・低消費電力面発光レーザフォトンクス

研究課題名(英文)High-speed and low power consumption VCSEL photonics

研究代表者

小山 二三夫(Koyama, Fumio)

東京工業大学・科学技術創成研究院・教授

研究者番号：30178397

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 33,500,000円

研究成果の概要(和文)：面発光レーザは、光インターコネクなど、高速化が強く求められている。微小光共振器を横方向に集積してその光のフィードバック効果により、その変調帯域を大幅に拡大することを目指した。まずレート方程式モデルにより、小信号変調帯域として、50GHzが得られることを示し、結合共振器の数を増やすことで、小信号変調帯域として、100GHzを越える変調帯域の可能を示した。実際に850nm帯結合共振器デバイスを製作して、小信号変調帯域30GHz、大信号変調48Gbpsを実現した。また、低消費電力を進め、100fJ/bitの低エネルギー動作を実証するとともに外部変調器集積光源を製作し、1mWを越える光出力を得た。

研究成果の概要(英文)：We proposed and demonstrated high speed VCSEL photonics using a coupled cavity structure functioning like optical equalization. The small signal analysis based on rate equations was carried out to be over 100GHz by increasing the number of cavities. A 850 nm-band transverse coupled-cavity VCSEL has shown a 3dB bandwidth over 29 GHz, and a single-mode VCSELs exhibits a 30 GHz bandwidth after resonance tuning and large signal modulation up to 48GHz. Energy power consumption can be below 100 fJ/bit. We achieved the lowest power consumption of below 70fJ/bit. We also demonstrated output over 1mW for modulator integrated devices.

研究分野：光エレクトロニクス

キーワード：面発光レーザ 光インターコネク データセンタ 半導体レーザ 直接変調 外部変調器

1. 研究開始当初の背景

活気ある持続可能な社会の構築には、社会基盤として不可欠な超高速光通信ネットワークの更なる進化が必要である。例えば、スーパーハイビジョンなどの次世代超高精細映像を非圧縮で伝送するには、70Gbps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の方向性から喫緊の課題である。幹線系光通信網に対しては、100Tbps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、今後加速的に重要性が増してくる高精細映像伝送、光アクセス、光LAN、装置間・装置内光インターコネクットの大容量化を実現するためには、高速性や低消費電力性に優れた革新的な光源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は、短距離系光リンクの主要な光源として用いられ、最近ではスパコンやデータセンターの装置間・装置内における光インターコネクトへの適用が急速に進められている、近い将来100Gbps超の高速化のニーズは大きいものの、現状技術は10Gbpsの伝送速度に留まっている。研究室レベルでは、40Gbps動作(TU Berlinなど)が報告されているものの、動作条件を加味した実用レベルでは25Gbpsが限界と見られている。また、電気段でのイコラーザによる60Gbps変調の報告(IBM)もあるものの、電気回路による付加的な消費電力が伴う。研究代表者は、面発光レーザに微小共振器を横方向に集積することで、光学的なフィードバックにより変調帯域を数倍以上に拡大できることを見出した(APL 2013, APEX 2014)。また、同様な構造で、横方向に伝搬する光の群速度を制御して素子長10 μm 程度の超小型高速光変調器集積光源へと展開した(Optics Express 2014)。これらの研究成果を基点として、高速化と低消費電力化を両立する超高速面発光レーザフォトニクスへ展開する着想に至った。

2. 研究の目的

光通信に用いられる通常の半導体レーザでは、その変調速度は、緩和振動周波数と素子の浮遊容量による帯域制限で律速される。本研究では、光インターコネクトの主要光源である面発光レーザに、垂直方向のレーザ共振器に加えて、微小光共振器を横方向に集積してその光のフィードバック効果により、その変調帯域を大幅に拡大する新しい高速変調技術を確立する。本手法での変調速度限界は半導体材料の光学特性では律速されない。また、同一手法により、面発光レーザに光の群速度を制御した小型の吸収型光変調器をモノリシックに集積し、小型化による高速化と低電圧化による低消費電力化の限界に挑戦する。両手法による理論的な変調速度限界を究明するとともに、デバイスの試作を通しての実証研究により100Gbps級の超高速半導体レーザ工学の確立を目指した。

3. 研究の方法

常の半導体レーザでは、変調速度は、光と電子の相互作用による緩和振動周波数と素子の浮遊容量による帯域制限で律速される。本研究の学術的特色は、レーザ共振器とは別に新たな共振器を集積することで光帰還により、その変調特性を光学的に制御するものであり、速度限界は材料などの特性で律速されない。精密に結合共振器を制御することで、緩和振動周波数の限界打破に留まらず、浮遊容量による帯域律速をも補償できることが期待される。上記の結合共振器では、面発光レーザ共振器からレーザ出力とは直交する横方向に光が結合する。この横方向に伝搬する光の群速度は、固体中の通常の伝搬光に比べて、約1/50以下まで減速した光、すなわちスローライトであることがわかっている。スローライトの効果により、超小型光変調器の実現が期待できる。

具体的には、以下の研究項目を実施した。

1) 結合共振器集積面発光レーザの高速化

結合共振器を用いた面発光レーザの変調特性の理論的学術基盤を確立するとともに、微小結合共振器の精密制御・プロセス技術の確立、850nm-980nm帯素子製作と高速変調特性の実証を行う。電磁界シミュレータによる酸化狭窄構造による結合共振器の解析を進め、光帰還の結合効率と遅延時間などの諸特性を明らかにするとともに、従来困難であった強結合領域での変調特性の解析を既に着手した強結合領域におけるレート方程式解析を進め、高速化の限界究明と高速化の設計指針を確立を目指した。また、酸化狭窄構造による微小結合共振器形成プロセスを確立し、安定な結合共振器動作の実現を目指した。

2) 低駆動電圧動作の光変調器集積光源開拓

面発光レーザからの高効率結合が可能かつ、変調器からの戻り光を制御した集積技術を確立するとともに、微小化と低電圧化により、高速化と低消費電力化の両立を進めた。実際に、変調器集積面発光レーザを製作し、光変調器のからの出力を増大するための構造を検討するとともに、変調特性を明らかにし、高速化のための限界究明を行った。

3) 低消費電力化の追究

両デバイス技術による低消費電力化の限界について、理論的な考察を行い、100Gbpsの高速変調(既存技術の4倍)の可能性を明らかにするとともに、100fJ/bit(既存技術の約1/5)の低消費電力化について検討し、結合共振器面発光レーザの低消費電力化について実験的に検証した。

4. 研究成果

1) 結合共振器集積面発光レーザの高速化
光帰還を用いた超高速面発光レーザ実現のため、図1に示す横方向結合共振器面発光レーザの小信号変調特性を戻り光を含むレート方程式を用いて解析を行った。強結合の条

件を議論するため、光帰還用の共振器での共振効果を含めた解析を行った。小信号変調特性の結果を図2に示す。共振器間の結合効率を増大することで、変調帯域を大幅に増大させることができ、3dB小信号変調帯域として、最大55GHzまで増大できることを明らかにした。

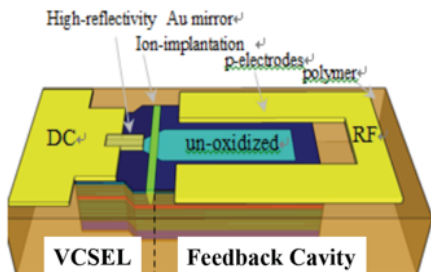


図1 結合共振器面発光レーザーのデバイス構造

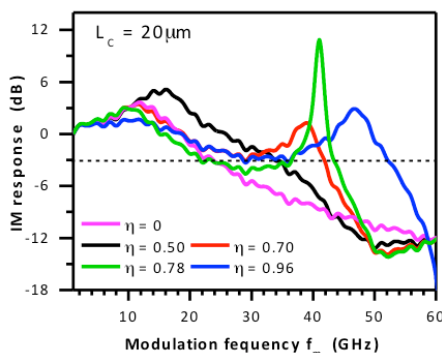


図2 小信号変調特性

さらに変調帯域を増大するために、結合共振器を3つに増やした2重結合共振器面発光レーザーを提案し(図3)、その高速化と低チャープ化をレート方程式解析により明らかにした。図4に示すように、100Gbpsに及ぶ高速変調と低チャープ化(最大約20GHz)が可能であることが明らかになった。

図5に製作した850nm帯結合共振器面発光レーザーの構造を示す。通常の850nm面発光レーザーウェハを用いて、結合共振器の電気的アイソレーションを取るためのプロトンイオン注入、ドライエッチングによる結合共振器メサ形成、選択酸化による結合共振器形成、ポリイミドによる平坦化プロセス、電極形成のプロセスから形成される。イオン注入以外は、通常的面発光レーザーとプロセス、ウェハ構造は全く同一である。従って、従来の面発光レーザーの量産プロセスがそのまま適用できる。結合共振器面発光レーザーの結合特性の制御は、メサ幅、テーパ長、各領域の長さなどを変えることで変化させ、種々の構造の遠視野像、近視野像による共振器の結合量の評価、小信号変調帯域の評価を行うことで、最適パラメータを実験的に探索した。図6に製作した素子の表面写真を示す。実験的には、イオン注入領域の幅は極力狭く、上部反射鏡のペア数は25ペア以上、オフセット波長は

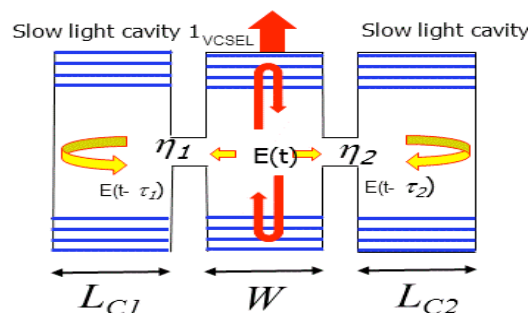


図3 複数の結合共振器を有するVCSELモデル

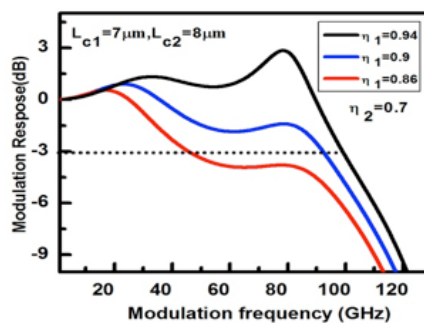


図4 小信号変調特性

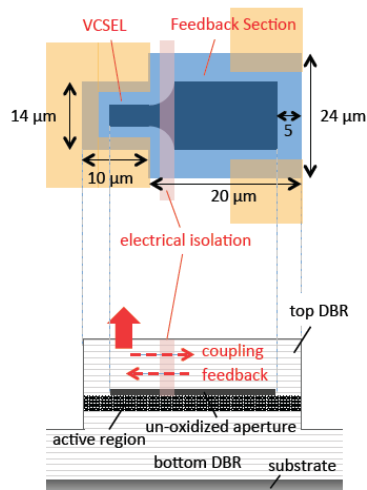


図5 製作した結合共振器面発光レーザーの上部・断面構造

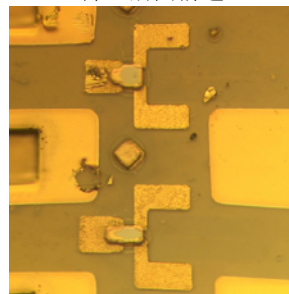


図6 製作した素子の顕微鏡写真

20nm以上などで横方向結合効率の向上と変調帯域の増大が顕著であることを実験的に検証した。図7に試作した850nm帯結合共振器面発光レーザーの小信号変調特性を示す。3dB変調帯域として約29GHzが得られた。測

定に用いた光検出器の帯域が約 25GHz 程度であることから、30GHz 以上の変調帯域が得られている。図 8 に 48Gbps での大信号変調特性（アイパターン）の測定結果を示す。消光比は約 4dB である。室温で 48Gbps の変調動作を確認した。

さらに、多値変調によるビットレートの拡大を目指し、PAM-4 変調測定系を構築した。図 9 に、40Gbps の PAM-4 変調のアイパターンを示す。良好なアイ開口が得られている。素子の高速化、光出力の線形性改善、雑音の低減と受光系の改善により 室温 96Gbps (48Gbaud) の大信号変調を実現するとともに、ジッタ、信号対雑音比などの評価を行い、エラーフリー伝送のため条件を明らかにする。

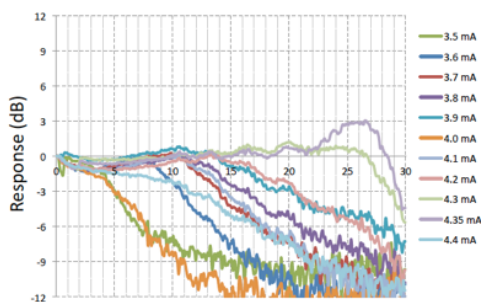


図 7 製作した素子の小信号変調特性

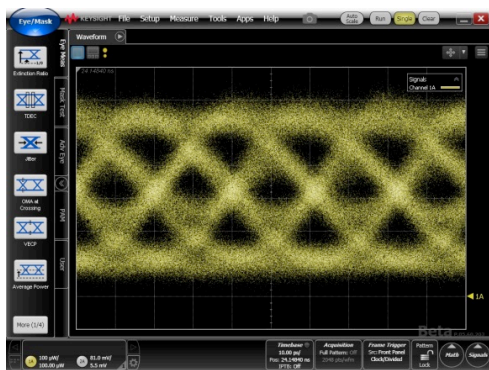


図 8 NRZ 48Gbps 大信号変調特性

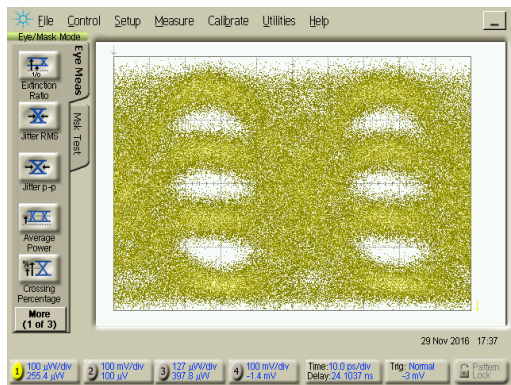


図 9 PAM-4 変調実験：20×2= 40 Gbps

2) 低駆動電圧動作の光変調器集積光源開拓
 吸収型光変調器集積光源では、変調速度がレーザの緩和振動では律速されず、スローライト効果を活用することで、小型化が可能で、その結果、浮遊容量制限を大幅に緩和した高速変調が可能になる。しかし、これまでの研究では小型化により小信号変調帯域は 30GHz 超も可能であるが、光出力が十分取れないため、大信号変調は 25Gbps に止まっていた。本研究では、光結合の高効率化の検証を行った。高速化のための構造設計をもとに、結合共振器の最適化を行った。変調帯域を拡大するための強結合共振器の設計を行い、デバイスの試作と結合効率の評価を行った。具体的には、オフセット波長の異なる VCSEL 基板を購入し、実際に酸化狭窄構造の精密な形状制御を行い、結合効率の評価を行った。オフセット波長については、20nm 以上であることが望ましいことが明らかになった。また、結合効率の上部反射率依存性を明らかにした。

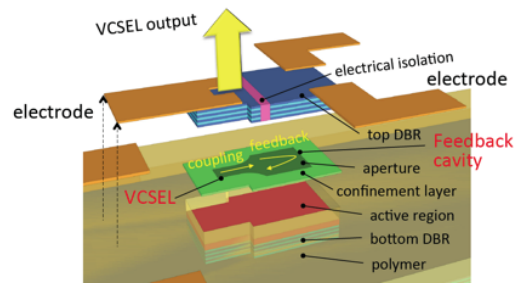


図 10 変調器集積面発光レーザ

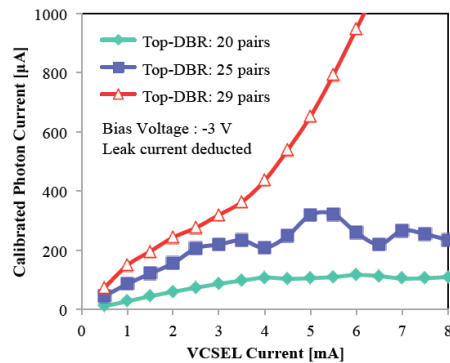


図 11 結合共振器における光電流の上部反射率依存性

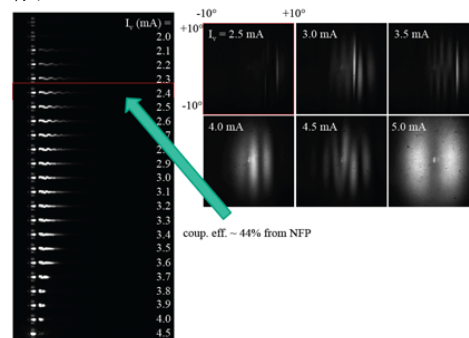


図 12 製作した変調器集積 VCSEL の近視野像

図 10 は、製作した素子構造を示す。図 11 は、結合共振器における隣接する共振器で発生する光電流（すなわちこれが結合量に対応する）の測定値を異なる上部反射率の半導体反射鏡に対して示している。光電流（すなわち結合効率）は、上部反射鏡反射率を高めることで結合効率を高めることが可能であり、高速化を進めることができる。

図 12 は上部反射鏡 29 ペアの半導体反射鏡の構造に対して、製作した結合共振器 VCSEL の近視野像と遠視野像を示している。近視野像の分布から、結合効率として 44%以上が推定された。VCSEL の上部反射鏡反射率のみを更に高めることで、更なる結合効率の増大が期待できる。同時に、近視野像から推定される結合効率の VCSEL バイアス電流依存性から、高バイアス電流値では、素子の自己加熱により、VCSEL 発振波長の red shift が生じ、相対的に結合共振器のカットオフ波長に近接することで、急激に結合効率が減少することを明らかにした。

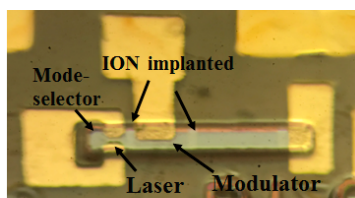
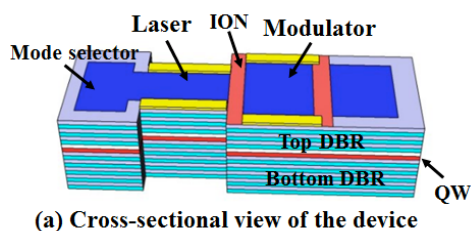


図 13 変調器集積 TCC VCSEL の (a) 構造と (b) 顕微鏡写真

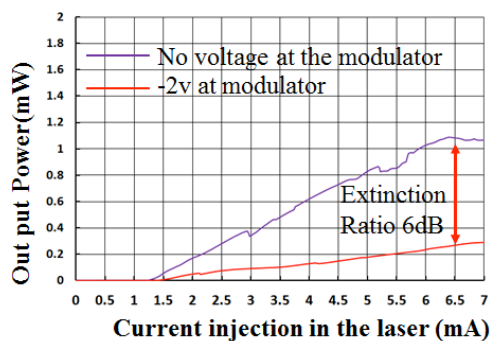


図 14 光変調器集積光源の出力の消光特性

これらの問題を解決するために、前節の TCCVCSEL を光源として集積化した。(図 13) 図 14 に示すように、初めて 1mW を越える出力を実現することができた。

3) 低消費電力化の追究

図 15 に、結合共振器面発光レーザの消費電力について、他の研究機関との性能比較を示す。40Gbps 級では、初めて 100fJ/bit の低消費電力化に成功した。

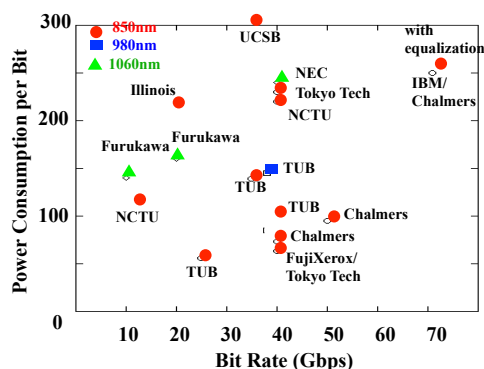


図 15 高速面発光レーザの単位ビット当たりの消費電力。

5. 主な発表論文

(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 5 件)

- 1) Masanori Nakahama, Xiaodong Gu, Takahiro Sakaguchi, Akihiro Matsutani, Moustafa Ahmed, Ahmed Bakry, Fumio Koyama, "Sub-gigahertz beam switching of vertical-cavity surface-emitting laser with transverse coupled cavity, Applied Physics Letters, Vol. 107, No. 7, pp. 071105-1-4, Aug. 2015. 査読有り
- 2) Shanting Hu, Moustafa Ahmed, Ahmed Bakry, Fumio Koyama, "Low chirp and high-speed operation of transverse coupled cavity VCSEL, Japanese Journal of Applied Physics, vol. 54, no. 9, pp. 090304-1-4, Aug. 2015. 査読有り
- 3) Xiaodong Gu, Masanori Nakahama, Akihiro Matsutani, Moustafa Ahmed, Ahmed Bakry, Fumio Koyama, "850nm transverse-coupled-cavity vertical-cavity surface-emitting laser with direct modulation bandwidth of over 30GHz, Applied Physics Express, vol. 8, no. 8, pp. 82702-1-4, Jul. 2015. 査読有り
- 4) Moustafa Ahmed, Ahmed Bakry, Mohamed S. Alghamdi, Hamed Dalir, Fumio Koyama, "Enhancing the modulation bandwidth of VCSELs to the millimeter-waveband using strong transverse slow-light feedback, OPTICS

- EXPRESS, Vol. 23, No. 12, pp. 15365-15371, Jun. 2015. 査読有り
- 5) Akihiro Matsutani, Fumio Koyama, "Dry etching of SiC using Ar/F2 plasma and XeF2 plasma, Japanese Journal of Applied Physics," vol. 54, p. 06GB01, May. 2015. 査読有り
- [学会発表] (計 20 件)
- 1) Shanting Hu, Fumio Koyama, "Coupled mode analysis of High-speed Transverse Coupled Cavity VCSEL, 20th MOC 2015, J5, pp. 26-29, Oct. 2015.
 - 2) Hameeda Ragab Ibrahim, Moustafa Ahmed, Fumio Koyama, "Influence of slow-light feedback on noise properties of VCSEL with a transverse coupled cavity, 20th MOC 2015, H3, pp. 26-28, Oct. 2015.
 - 3) Xiaodong Gu, Masanori Nakahama, Akihiro Matsutani, Fumio Koyama, "Over 30 GHz Modulation of 850 nm Transverse Coupled Cavity Vertical-Cavity Surface-Emitting Laser, 41st ECOC 2015, ID: 0803, Sep. 2015.
 - 4) Shanting Hu, Fumio Koyama, "Chirp Reduction and High-speed Operation Utilizing Lateral Optical Feedback of Coupled Cavity VCSEL," iNOW, 2015.
 - 5) Hameeda R. Ibrahim, Moustafa Ahmed, Fumio Koyama, "Modeling of Dynamics and Intensity Noise of Transverse Coupled Cavity VCSELS, iNOW 2014, TuP15, pp. 60-61, Aug. 2015.
 - 6) Masanori Nakahama, Xiaodong Gu, Takahiro Sakaguchi, Akihiro Matsutani, Fumio Koyama, "Transverse-mode Coupled cavity VCSELS with High Speed Beam Switching, iNOW, ThP1, pp. 119-120, Aug. 2015.
 - 7) Masanori Nakahama, Hiroki Kobayashi, Takahiro Sakaguchi, Akihiro Matsutani, Fumio Koyama, "Transverse-mode Control of Transverse-coupled Cavity VCSELS using Vernier Effect for Boosting Single-mode Power, Compound Semiconductor Week 2015, CSW2015, Tu405.4, pp. 346-347, Jul. 2015.
 - 8) Shanting Hu, Fumio Koyama, "Chirp Reduction and Modulation Bandwidth Enhancement of Transverse Coupled Cavity VCSEL, The 20th OECC2015, JWeC.14, Jul. 2015.
 - 9) Moustafa Ahmed, Ahmed Bakry, Hamed Dalir, Fumio Koyama, "Application of Strong Slow-Light Feedback to Boost the Modulation Bandwidth of VCSELS Beyond 70 GHz, CLEO2015, SM3F.6, May. 2015.
 - 10) Hamed Dalir, Fumio Koyama, "Millimeter-wave Modulation of 850 nm VCSELS for Radio over Fiber Applications, CLEO2015, SF11.7, May. 2015.
 - 11) Hameeda Ragab Ibrahim, Mohamed Ahmed, Fumio Koyama, "Modulation Bandwidth Enhancement of Double Transverse Coupled Cavity VCSELS, 21stMOC2016, 13A-7, Oct. 2016.
 - 12) Fumio Koyama, "VCSEL Photonics for Optical Interconnects," MOC2016, 12C-3, Oct. 2016.
 - 13) Takashi Kondo, Junichiro Hayakawa, Naoki Jogan, Akemi Murakami, Jun Sakurai, Xiaodong Gu, Fumio Koyama, "Temperature Dependence of Small Signal Response of 850 nm Transverse-Coupled-, 25th ISLC 2016, TuD3, Sep. 2016.
 - 14) Fumio Koyama, "High speed modulation of transverse coupled cavity VCSELS, 21st. (OECC/PS2016), MD2-1, Jul. 2016.
 - 15) Shanting Hu, Xiaodong Gu, Fumio Koyama, "Low chirp operation of transverse-coupled-cavity VCSELS, CLEO2016, SF1L.4, Jun. 2016.
 - 16) Hameeda Ibrahim, Fumio Koyama, Moustafa Ahmed. Large Signal Modulation Analysis Of High-speed Transverse Coupled Cavity VCSELS, The 12th CLEO-PR, 1-4N-6, Aug. 2017.
 - 17) Shanting Hu, Akihiro Matsutani, Fumio Koyama, "Unidirectional Coupling Of Laterally Coupled VCSEL And Slow Light Modulator/Amplifier, The 12th CLEO-PR, P3-125, Aug. 2017.
 - 18) Shanting Hu, Akihiro Matsutani, Fumio Koyama, "VCSELS Laterally Coupled with a Slow Light Modulator/Amplifier Showing Unidirectional Coupling, iNOW 2017, WeP, Aug. 2017.
 - 19) Ahmed Mohamed Ahmed Hassan, Moustafa Ahmed Hafez, Masanori Nakahama, Fumio Koyama, "Numerical analysis of Watt-class VCSEL amplifier, The 24th ICO, P14-02, Aug. 2017.
 - 20) Shanting Hu, Xiaodong Gu, Akihiro Matsutani, Fumio Koyama, "Electro-absorption Modulator Integrated with Transverse Coupled Cavity VCSELS," The 24th ICO, Tu1J-05, Aug. 2017.
- [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・科学技術創成研究院・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・科学技術創成研究院・助教
研究者番号：70215622