

令和 6 年 7 月 1 日現在

機関番号：12608

研究種目：基盤研究(A)（一般）

研究期間：2021～2023

課題番号：21H04554

研究課題名（和文）結合共振器を用いた超高速面発光レーザの開拓

研究課題名（英文）Developments of ultra-high-speed VCSELs using coupled cavities

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・特任教授

研究者番号：30178397

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 32,400,000円

研究成果の概要（和文）：データセンターなどの光インターコネクットの主要光源である面発光レーザに、微小光共振器を横方向に集積してその光の帰還効果により、その変調帯域を大幅に拡大する超高速変調技術を確認した。微小共振器とともに従来の高速化に必要な駆動電流の増加を必要としないため、低消費電力化も実現した。理論的な変調速度限界を究明するとともに、既存技術の2倍以上の50GHzの変調帯域と160Gbpsの超高速動作、1/5以下の低消費電力動作を両立した。さらに、発光波長を1.1μm帯まで拡張することで、単一モード光ファイバ伝送のリンク距離を2km以上まで延伸し、ハイパースケールデータセンターネットワークへの適用可能性を実証した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

機器間の光リンクの高密度実装、低消費電力化のために、次世代超小型光トランシーバの開発競争が世界中で活発に繰り広げられているが、大容量化、スケーラビリティ、小型実装、低消費電力化への要求を満たす解が見出されていない。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25Gbpsの伝送速度に留まっていた。生成AIの進展により、データセンタ内のリンク速度の拡充と消費電力の低減は喫緊の課題である。本研究により、低消費電力化と高速化を両立させる面発光レーザからなる超高速光リンク技術を開発する学術的・産業上の意義は極めて大きい。

研究成果の概要（英文）：We have established an ultra-high-speed modulation platform that significantly expands the modulation bandwidth by integrating a miniature resonator laterally on a surface-emitting laser, which is the main light source for optical interconnects in data centers, and using the optical feedback effect. Since the micro-cavity VCSEL does not require an increase in the driving current needed for conventional high-speed operation, low power consumption has also been achieved. In addition to clarifying the theoretical modulation speed limit, we have achieved a modulation bandwidth of 50 GHz, more than twice that of existing technology, ultra-high-speed operation of 160 Gbps, and low power consumption operation of less than 1/5. Furthermore, by extending the emission wavelength to the 1.1 μm band, we have extended the link distance of single-mode optical fiber transmission to more than 2 km, demonstrating the applicability of this technology to hyper-scale data center networks.

研究分野：光エレクトロニクス

キーワード：半導体レーザ データセンタ 光インターコネクタ 光通信

## 1. 研究開始当初の背景

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、100Gbps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次世代移動体通信アクセス網、光LAN、データセンター・スパコンでの装置間・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。図1に示すように、短距離通信の標準規格であるEthernetは、過去30年あまりでリンク速度が4万倍に拡大し、今やTb級の大容量伝送の標準化が議論されている。一方で、情報トラフィックの80%以上がデータセンター内のサーバー間の短距離通信である。このような機器間の光リンクの高密度実装、低消費電力化のために、次世代超小型光トランシーバの開発競争が世界中で活発に繰り返されているが、大容量化、スケーラビリティ、小型実装、低消費電力化への要求を満たす解が見出されていない。また、データセンター内の短距離光インターコネクต์では、低消費電力動作を可能とする面発光レーザ(VCSEL: Vertical Cavity Surface Emitting Laser)が主要光源として使われており、現状最速では25Gbps/chの光トランシーバが開発されているが、より大容量、長距離、小型化が可能な光源技術の開拓が求められている。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ต์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25Gbpsの伝送速度に留まっている。研究室レベルでは、50Gbps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が限界と見られており、強度に4値を取る多値変調技術を使用しても50Gbpsが限界である。また、電気段でのイコラザによる70Gbps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。

一方、今や社会インフラの根幹をなす移動通信システムは、図2に示すように、過去30年で10万倍に伝送容量が拡大され、私たちの生活や社会活動に、大きなインパクトをもたらす応用が数多く生まれている。移動体通信はもはや国家競争力の根幹となっており、早くも次世代の6Gの開発に関する研究開発プロジェクトが世界的に動き始めている。無線端末の伝送速度も5Gでは最大で20Gb/s、6Gにおいては100Gb/s~1Tbpsが見込まれ、アンテナ基地局を結ぶ大容量光アクセス網の必要性が顕在化している。この場合も、100Gbps~1Tbpsの大容量伝送とリンク距離kmオーダーの両立が求められているが、現行の半導体レーザ技術の延長では解が見出せていなかった。

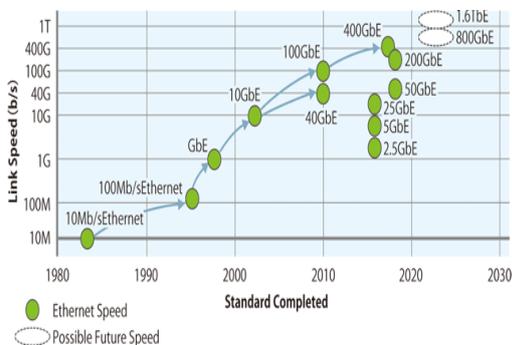


図1 Ethernet規格の進展



図2 移動通信システムの進化 (第1世代~第5世代)

[https://www.soumu.go.jp/main\\_content/000633132.pdf](https://www.soumu.go.jp/main_content/000633132.pdf)

以上のように、1Tbps級の短距離大容量伝送を可能にする半導体レーザ工学が求められているが、研究実施者は、光トランシーバの伝送容量を制限する半導体レーザの直接変調限界を打破する結合共振器面発光レーザを提案し、図3に示すように、結合共振器構造の導入で材料による速度限界を打破し、通常の素子に比べて、3倍以上の変調帯域の拡大に成功している(APL 2013, APEX 2015, MOC 2019)。本研究では、さらに、長波長側への波長域拡大と単一モード化により、より高速・長距離伝送を可能にし、超高速・低消費電力動作を両立することが可能になった。面発光レーザは既に6インチGaAs基板の量産プロセスが確立しており、現行の1.3 $\mu$ m帯光通信用DFBレーザに対してコスト優位性を持つ。研究開始当初は、リンク距離が2km以上で使用される現行の1.3 $\mu$ m帯DFBレーザの変調速度は25Gbpsに留まっており、100Gbps以上の高速変調には、外部変調器集積光源、および多値変調が必須であり、これらはトランシーバの消費電力増大をもたらす課題がある。本研究により、低消費電力化と高速化を両立させる面発光レーザからなる超高速光リンク技術を開発する学術的意義は大きい。

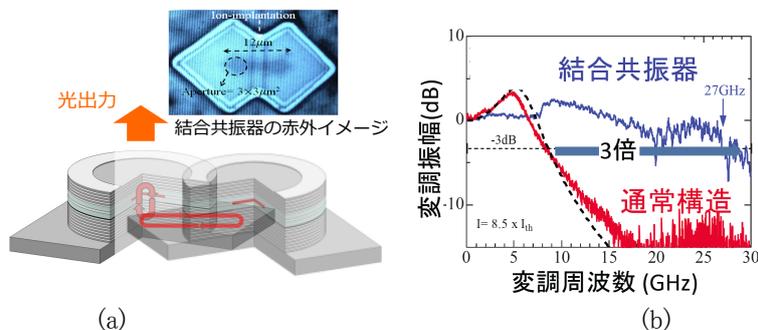


図 3(a)結合共振器面発光レーザ, (b) 小信号変調特性における変調帯域拡大

## 2. 研究の目的

本研究の目的は以下に集約される。

### 1) 横方向結合共振器集積による面発光レーザの高速化

面内に微小共振器を結合した結合共振器面発光レーザを具現化するために、新規構成法を探索し、従来の半導体レーザの直接変調帯域の速度限界 (約 20GHz) を打破し、小信号変調帯域を大幅に拡大する高速化手法を確立する。

### 2) 低消費電力化のための変調エネルギー効率向上

100Gbps を越える変調速度と 1 ビット当たりの変調に必要なエネルギー消費量を 100fJ/bit 以下の低消費電力動作を目指す。

### 3) 多値変調による大容量化

多値変調を導入することで、1 波長当たりの変調速度として、400Gbps を可能にする高速化基盤技術を構築し、Tbps 級半導体レーザ工学への道筋を明らかにする。

### 4) 単一モード化と波長域の拡大による光ファイバ伝送距離の拡大

結合共振器による単一モード化と高歪量子井戸による波長 1.1 μ m 帯への長波長化により、単一モード光ファイバでの km 級リンク距離の実現

## 3. 研究の方法

本研究では、高歪量子井戸を用いて発光波長を波長 1.1 μ m 帯まで拡大する面発光レーザウエハを設計・外部ウェハベンダーを用いて高品質化を進めるとともに、新規な結合共振器面発光レーザの設計・試作を通して、100~200Gbps/ch の世界最速の変調速度を実現する。さらに、多値変調を用いて、1 波長当たり 400Gbps の高速変調を実現するための基盤技術を構築する。

### ①結合共振器を用いた単一モード面発光レーザの高速化

特許出願したメタル開口を用いた複数の結合共振器の試作を行い、面発光レーザの構造パラメータを最適化することによって、大信号 NRZ 変調で 100Gbps まで拡大する。

### ②単一モード化と発光波長域の拡大

メタル開口を用いた複数の結合共振器モードにおける安定化により単一モード化を行う。酸化開口径と電極開口径との差、非対称構造の検討、上部反射鏡の最適化等を行い、低しきい値・高効率動作の条件を明らかにするとともに、モードフィールド径を 8 μ m 程度まで拡大し、高速化、高信頼化、光ファイバとの高効率結合を両立する単一モード素子を実現する。さらに、高速単一モードファイバ伝送へ適合する超高速・低消費電力単一モード面発光レーザの実現により、リンク距離 km 級単一モード光ファイバの伝送技術を構築する。

### ③Tbps 級超高速面発光レーザフォトニクスへの展開

結合共振器による帯域拡大で 100Gbps の高速化、さらに多値変調により、200Gbps 超の高速化と低消費電力化の両立を図り、次世代の Tbps 級面発光レーザフォトニクスの学術基盤を構築する。

## 4. 研究成果

データセンターなどの光インターコネクトの主要光源である面発光レーザに、微小共振器を横方向に集積してその光の帰還効果により、その変調帯域を大幅に拡大する超高速変調技術を確認した。微小共振器とともに従来の高速化に必要な駆動電流の増加を必要としないため、低消費電力化も実現した。理論的な変調速度限界を究明するとともに、既存技術の 2 倍以上の 50GHz の変調帯域と 160Gbps の超高速動作、1/5 以下の低消費電力動作を両立した。さらに、発光波長を 1.1 μ m 帯まで拡張することで、単一モード光ファイバ伝送のリンク距離を 2km 以上まで延伸し、ハイパースケールデータセンターネットワークへの適用可能性を実証した。

金属開口結合共振器面発光レーザでは、金属境界での反射により、結合共振器効果による変調帯域の増大が可能である。プロセスの一部を外部の 3 インチウエハファンダリプロセスを利用して試作した。酸化開口部の表面を数十 nm エッチングして、発振波長を短波長化することで、酸化領域での横方向伝搬を可能にするものである。図 4 に、試作した 1.1 μ m 帯金属開口結合共振器面発光レーザの構造概略図を示す。酸化開口径は、5~8 μ m で独自の酸化プロセスの in-situ モニタを使って精密に制御した。図 5 (a), (b) に、それぞれ酸化開口径 5 μ m の素子の電流対光出力特性と発振スペクトルを示

す. しきい値電流 1.1mA, 単一モード出力として光出力 4mW 以上を得た. また駆動電流全域で SMSR>30dB の単一モード発振を確認した. 発光近視野像と遠視野像を測定したところ, モードフィールド径は約 4 $\mu$ m で, ビーム拡がり角 13 $^\circ$  以下の狭射出ビームを得た. 酸化開口端から金属開口端までの距離dが 3 $\mu$ m 程度では, 多モード発振となり, 金属開口による横モード制御は観測されなかった. d が 1~2  $\mu$ m では, 明瞭なモード制御の効果が発現した.

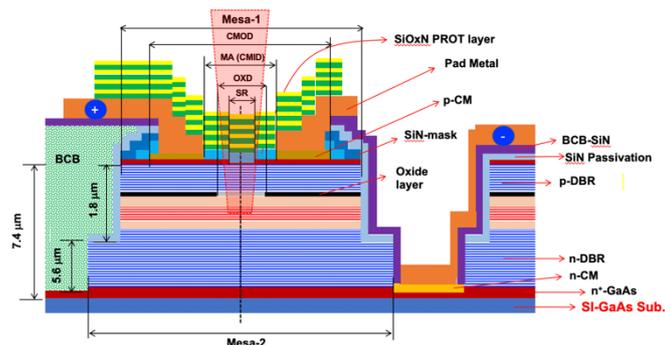
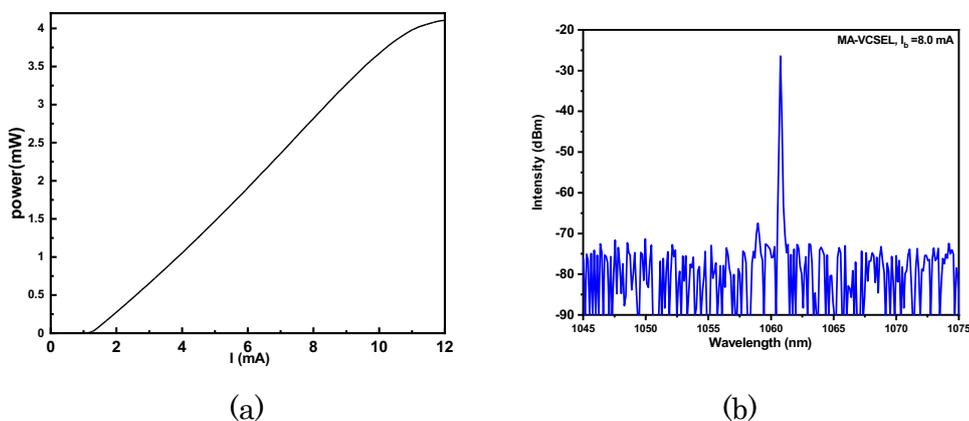


図4 1.1 $\mu$ m帯結合共振器面発光レーザの構造概略図



(a) 電流対光出力特性 (b) 発振スペクトル

図6は, 半導体表面を 30nm エッチングした金属開口面発光レーザの室温における小信号変調特性を示している. 比較のために, 同一基板上に製作し, 金属開口を広げて結合共振器効果を消失させた多モード発振素子の変調特性も評価, 比較した. 結合共振器の効果により, 変調帯域が約 2 倍に増大し, 面発光レーザの直接変調としては, 世界最速の 50GHz の変調帯域を実現した.

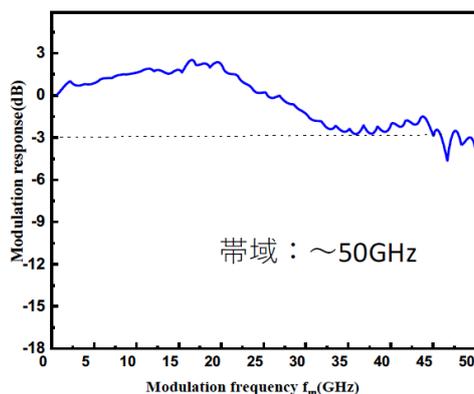


図 6 小信号変調特性

今後, 横方向の結合を強くするとともに, 素子抵抗の低減, 浮遊容量の低減, さらには, ウェハ構造の高速化設計により変調速度の高速化を進める.

試作した同素子を用いて, 図 7(a)に示すように, 100Gbps NRZ 変調のアイ開口を実現した. また, PAM(Pulse Amplitude Modulation)は, 限られた帯域でビットレートを倍増させる有力な手段である. この場合, 振幅方向を多値化するのでレーザ光源に変調を掛けた際に低雑音で光信号に変換されないと, 所用の SN が確保できない. また, 変調波形の十分なアイ開口を確保するためには信号の立ち上がりや立下りのタイミングの変動, 即ち, ジッタの削減も重要である.

上記に述べた試作素子を用いて、多値変調(PAM4)の測定を行った。任意波形発生器(AWG)を用いて4値の変調波形を生成して変調波形を観測した。従来の結合共振器で見られる強度雑音の増大によるSNの劣化などは観測されず、図7(b)に示すように、金属開口結合共振器面発光レーザに対して、160Gbps(80Gbaud)までのPAM4変調に成功した。面発光レーザで消費される電気的な消費電力をビット当りに換算すると、100fJ/bitの低消費電力動作を達成した。

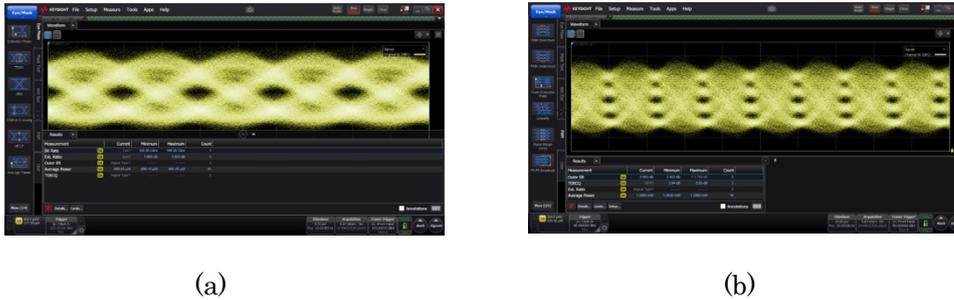


図7 金属開口面発光レーザのNRZ(100Gbps), 多値変調(PAM4)(160Gbps)変調波形

また、結合共振器面発光レーザを用いて、単一モード光ファイバ伝送の評価を継続して実施した。図8(a)に示すように、金属開口結合共振器面発光レーザに対して、通常の1.3 $\mu$ m帯単一モード光ファイバ(G652)伝送後の小信号変調特性を異なるファイバ長に対して測定した。ファイバの長さは、それぞれ、2mである。これらの結果を用いて、図8(b)に示すように、ファイバ伝送による伝達関数を明らかにした。シミュレーションとの比較をすることで、金属開口結合共振器面発光レーザのチャープパラメータは約2.5程度と推定される。この場合は、長さ5kmまではパルス圧縮効果で実効的な帯域は増大することが分かる。伝送距離をさらに拡大するため、また多値変調信号伝送のために、より低チャープ化を可能にする構造を検討する。

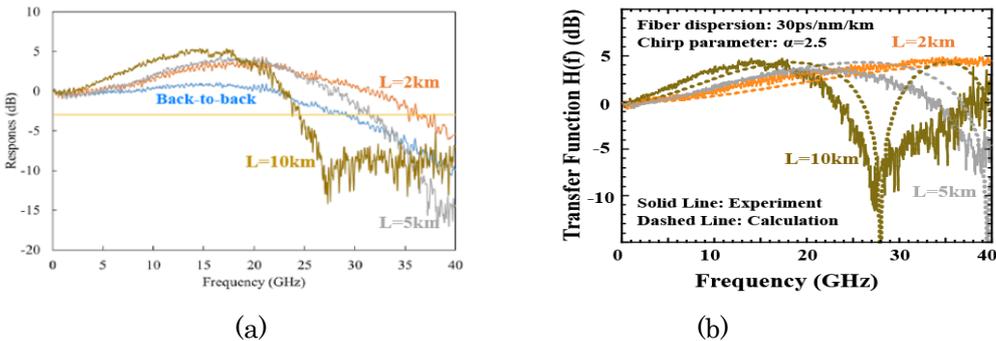


図8 (a)異なる長さの単一モード光ファイバ伝送後の小信号変調特性と(b)ファイバ伝送の伝達関数(実線:実験, 破線:計算)

図9(ア)に、伝送距離2km~10kmでの金属結合共振器面発光レーザによるNRZ伝送波形を示す。通常の単一モード光ファイバ(G652)2km伝送時にNRZ75Gbpsまでのアイ開口を確認し、10km伝送時には50Gbpsまでのアイパターンを確認した。50Gbps(10km)を除いて、誤り率はFEC Limit以下である。伝送距離10kmでの高いBaud Rateを実現するために、低チャープ化を長波長化によるファイバの分散量低減を検討することが重要である。

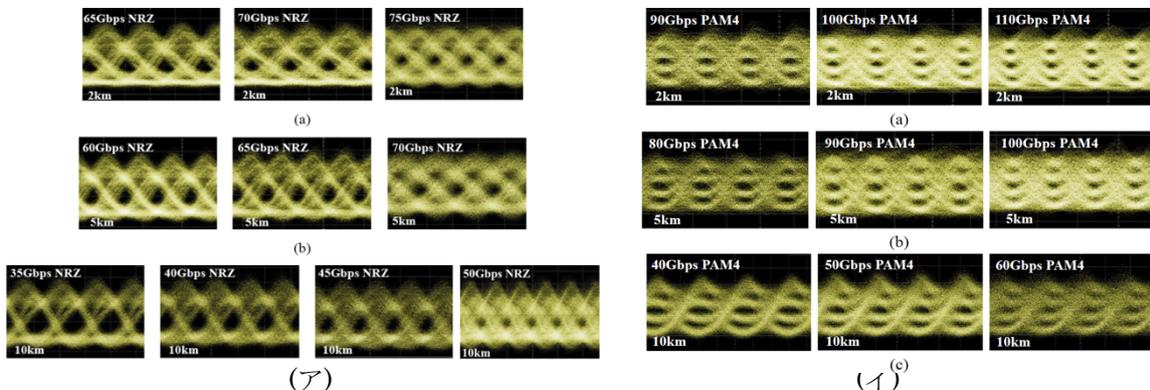


図9 金属開口面発光レーザのファイバ伝送後の伝送波形(ア:NRZとイ:PAM4)

同様に、図9(イ)にPAM4伝送波形を示す。2km伝送時には、PAM4110Gbpsのアイ開口を観測した。今後、横方向の結合を強くするとともに、素子抵抗の低減、浮遊容量の低減、さらには、ウェハ構造の高速化設計により変調速度の高速化と素子のアレイ化を進めることでTbps光リンクの可能性を見出した。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計15件（うち招待講演 13件 / うち国際学会 10件）

1. 発表者名 Fumio Koyama
2. 発表標題 High-speed VCSEL photonics for datacenter networks
3. 学会等名 SPIE Photonics Europe (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Fumio Koyama
2. 発表標題 High-speed VCSEL photonics for datacenter networks
3. 学会等名 20th International Conference Laser Optics (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Fumio Koyama
2. 発表標題 High-speed VCSEL Photonics for Datacenter Networks
3. 学会等名 2022 URSI-Japan Radio Science Meeting (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 小山二三夫
2. 発表標題 高速変調面発光レーザの最近の進展
3. 学会等名 2022年度光ネットワーク産業・技術研究会第2回公開討論会 (招待講演)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 小山二三夫
2. 発表標題 1060nm帯結合共振器面発光レーザのモード制御と高速化
3. 学会等名 電子情報通信学会レーザ・量子エレクトロニクス研究会（招待講演）
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Fumio Koyama
2. 発表標題 Advances of VCSEL Photonics
3. 学会等名 第3回サイエンスサロン（招待講演）
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Fumio Koyama
2. 発表標題 VCSEL Photonics for CPO Transceivers and LIDAR Applications
3. 学会等名 Asia Communications and Photonics Conference 2022（招待講演）（国際学会）
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Fumio Koyama
2. 発表標題 VCSEL Photonics for Interconnects and 3D Sensing
3. 学会等名 International Conference and Expo on Lasers, Optics & Photonics（招待講演）（国際学会）
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Fumio Koyama
2. 発表標題 VCSEL Photonics for CPO Transceivers Toward Beyond 5G Networks
3. 学会等名 The 12th International Symposium on Photonics and Electronics Convergence (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Chang Ge, Xiaodong Gu, Fumio Koyama
2. 発表標題 1060nm Single-mode Intra-cavity Metal-aperture VCSEL for over 2km Standard 1300nm SMF Transmission
3. 学会等名 第70回応用物理学会春期講演会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 F. Koyama
2. 発表標題 VCSEL Photonics for Communications and 3D Sensing
3. 学会等名 IEEE Electron Device Society Webinar (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 H. Ibrahim, A. Hassan, X. Gu, S. Shinada, M. Ahmed F. Koyama
2. 発表標題 Record Low Power Consumption 1060nm Single-mode Intracavity Metal Aperture VCSEL with Transverse Resonance
3. 学会等名 第82回応用物理学会秋期学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 F. Koyama
2. 発表標題 Recent progress of VCSEL Photonics and their applications
3. 学会等名 The 47th European Conference on Optical Communications (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 F. Koyama
2. 発表標題 VCSEL Photonics: Current State of the Art and Future Prospects
3. 学会等名 27th IEEE International Semiconductor Laser Conference (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 F. Koyama
2. 発表標題 VCSEL Photonics for High-speed Optical Interconnects and 3D Sensing
3. 学会等名 The 6th Laser and Optoelectronics Conference (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------