

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 24 年 5 月 16 日現在

機関番号：11301

研究種目：基盤研究（B）

研究期間：2009～2011

課題番号：21360176

研究課題名（和文）1.1  $\mu\text{m}$  帯 VCSEL を用いたパルス光源技術および高速光伝送技術に関する研究研究課題名（英文）Research on optical pulse source and ultra-high speed optical transmission technologies with 1.1  $\mu\text{m}$  VCSEL

研究代表者

吉田 真人（YOSHIDA MASATO）

東北大学・電気通信研究所・准教授

研究者番号：10333890

研究成果の概要（和文）：本研究は 1.1  $\mu\text{m}$  帯の新たな波長帯での光源技術および超高速光伝送技術を確立することを目的としたものである。まず 1.1  $\mu\text{m}$  帯シングルモード動作 VCSEL の直接変調を利用した安価な構成による伝送速度 10 Gbit/s の 5 km 光伝送を実現した。つぎに、10 GHz の繰り返し周波数で 1.1 ps の短パルス列を生成可能なモード同期 Yb ファイバレーザおよび時分割多重化／多重分離回路を開発し、これらを組み合わせて 1.1  $\mu\text{m}$  帯における 160 Gbit/s 伝送システムを世界で初めて実現した。

研究成果の概要（英文）：This work aims to develop light source and ultra-high speed optical transmission technologies in the 1.1  $\mu\text{m}$  band. First, we demonstrated a 10 Gbit/s transmission over 5 km with a 1.1  $\mu\text{m}$  directly modulated single-mode VCSEL. Next, we developed a 10 GHz, 1.1 ps regeneratively mode-locked Yb fiber laser and optical time division multiplexing and demultiplexing circuits. Then, with these devices, we demonstrated the first 160 Gbit/s ultra-high speed optical transmission system in the 1.1  $\mu\text{m}$  band.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	4,800,000	1,440,000	6,240,000
2010年度	6,700,000	2,010,000	8,710,000
2011年度	1,800,000	540,000	2,340,000
総計	13,300,000	3,990,000	17,290,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：電気電子工学、通信・ネットワーク工学

キーワード：1.1  $\mu\text{m}$  帯 VCSEL、1.1  $\mu\text{m}$  帯モード同期パルスレーザ、フォトニック結晶ファイバ、1.1  $\mu\text{m}$  帯高速光伝送

## 1. 研究開始当初の背景

光通信は時代とともに、波長 1.3  $\mu\text{m}$  から 1.55  $\mu\text{m}$  と長波長領域に移り、最も低損失な波長領域において高速・長距離伝送が実現されてきた。その一方でインターネットなどの身近なコミュニケーションとして、短距離での高速かつ安価な伝送技術が急速に重要に

なっている。特にギガビットイーサでは垂直共振型面発光レーザ（VCSEL: Vertical Cavity Surface Emitting Laser）を用いて安価で高速な伝送技術が精力的に研究されている。しかし、実用化レベルにある 0.85  $\mu\text{m}$  帯の VCSEL を用いた伝送システムでは、その伝送路がマルチモードファイバであるた

め伝送可能な距離が数 100 m 以下に制限される。また、0.85  $\mu\text{m}$  帯における広帯域な光増幅器の実現が困難であることより、その長距離伝送は困難である。一方、波長 1.1  $\mu\text{m}$  帯においては、シングルモード伝搬が可能なフォトニック結晶ファイバや Yb 添加ファイバを用いた広帯域光増幅器の開発が盛んに行なわれている。以上の背景のもと本研究では、VCSEL とフォトニック結晶ファイバを組み合わせ、高速かつ安価な波長 1.1  $\mu\text{m}$  帯光伝送システムの開発に取り組む。また伝送用光源として、研究代表者が所属するグループで開発してきた再生モード同期技術および利得スイッチ法を用いて繰り返し周波数 1.1  $\mu\text{m}$  帯ピコ秒パルス光源を新たに開発し、光時分割多重 (OTDM: Optical Time Division Multiplexing) を用いた 100 Gbit/s 以上の超高速光伝送技術を開発する。

## 2. 研究の目的

本研究では、1.1  $\mu\text{m}$  帯の新たな波長帯における光源技術および超高速光伝送技術を開発することを目的とする。主な研究課題は下記のとおりである。

### (1) 1.1 $\mu\text{m}$ 帯パルス光源技術の開発

#### ① VCSEL をベースとしたパルス光源

再生モード同期法および利得スイッチ法を VCSEL に適用した、簡易な装置構成による 1.1  $\mu\text{m}$  帯 10 GHz ピコ秒パルス光源を実現する。

#### ② Yb 添加ファイバを利得媒質としたモード同期パルス光源

全ファイバ構成の再生モード同期 Yb ファイバレーザを作製し、数ピコ秒の短パルス光源を実現する。

### (2) 1.1 $\mu\text{m}$ 帯光伝送技術の開発

#### ① VCSEL とフォトニック結晶ファイバを組み合わせさせた 10 Gbit/s 光伝送

VCSEL の直接変調と低分散特性を有するフォトニック結晶ファイバを組み合わせ、簡易かつ安価な構成の 1.1  $\mu\text{m}$  帯 10 Gbit/s 光伝送系を実現する。

#### ② ピコ秒パルス光源と OTDM 技術を組み合わせさせた 100 Gbit/s 以上の超高速光伝送

1.1  $\mu\text{m}$  帯の光時分割多重化/多重分離回路を新たに開発し、これらと(1)で開発したピコ秒パルス光源を組み合わせ、100 Gbit/s 以上の超高速 OTDM 伝送系を実現する。

## 3. 研究の方法

前章で述べた各研究課題の研究方法について以下に述べる。

### (1) 1.1 $\mu\text{m}$ 帯パルス光源技術の開発

#### ① VCSEL をベースとしたパルス光源

NEC のグループが開発してきた 40 Gbit/s マルチモード動作 VCSEL の改良を図り、10 Gbit/s の直接変調動作が可能な 1.1  $\mu\text{m}$  帯シングルモード動作 VCSEL を試作する。そして本 VCSEL に再生モード同期技術および利得スイッチ技術を適用し、繰り返し周波数 10 GHz の 1.1  $\mu\text{m}$  帯パルス光源を開発する。これらの光源の構成を図 1 に示す。図 1(a) に示す再生モード同期技術を用いたパルス光源においては、その再生モード同期帰還ループ内に数 100 m の光ファイバを挿入することにより共振器の Q 値を高め、これにより時間ジッタの低減を図る。一方、図 1(b) に示すように、VCSEL の利得スイッチ動作を利用して、簡便な構成により 10~20 ピコ秒のパルス光源を実現する。

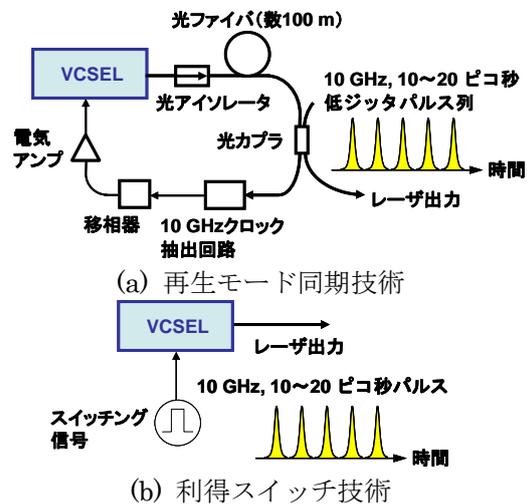


図 1 VCSEL を用いた 1.1  $\mu\text{m}$  帯パルス光源

#### ② Yb 添加ファイバを利得媒質としたモード同期パルス光源

1.5  $\mu\text{m}$  帯の光源技術を用いて、1.1  $\mu\text{m}$  帯で動作する 10 GHz モード同期 Yb ファイバレーザを開発する。そのレーザの構成を図 2 に示す。異常分散を有するフォトニック結晶ファイバを用いて共振器内の平均波長分散値が異常分散値となるよう調整し、ソリトン効果を利用した数ピコ秒の短パルス光源を

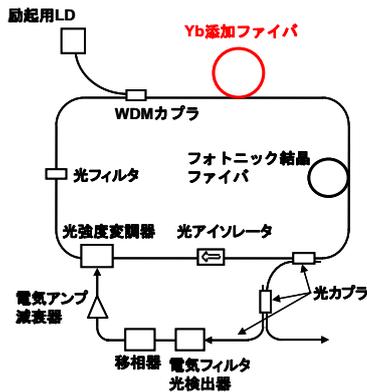


図2 再生モード同期 Yb ファイバレーザ作製する。また、損失の低いファイバでリング共振器を構成することにより共振器内の Q 値を高め、これによりジッタの低い高品質な光パルス列の生成を実現する。

## (2) 1.1 μm 帯光伝送技術の開発

### ① VCSEL とフォトニック結晶ファイバを組み合わせた 10 Gbit/s 光伝送

1.1 μm 帯で低分散かつ 2 dB 以下の低損失を有するフォトニック結晶ファイバを電線メーカーの協力のもと試作する。そして、本光伝送路と (1)①で開発した VCSEL を組み合わせ、図 3 に示すような簡便かつ安価な構成の 1.1 μm 帯 10 Gbit/s 光伝送系を構築する。

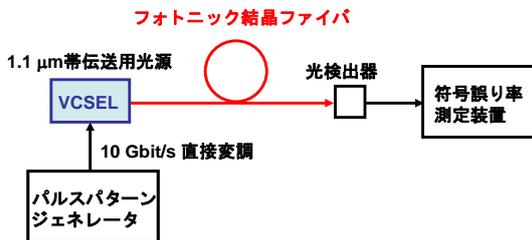


図3 VCSEL とフォトニック結晶ファイバを用いた 10 Gbit/s 光伝送系

### ②ピコ秒パルス光源と OTDM 技術を組み合わせた 100 Gbit/s 以上の超高速光伝送

OTDM 伝送に必要な光時分割多重化回路および多重分離回路を開発する。1.1 μm 帯光ファイバカプラを多段に接続することにより、10 → 160 Gbit/s 用時分割多重化回路を作製する。一方、多重分離回路は光ファイバの非線形光学効果を利用した高速光スイッチ技術を用いて作製する。そして、これら光回路と (1)で開発したピコ秒パルス光源を組み合わせ、図 4 に示す 160 Gbit/s 超高速 OTDM 伝送系を実現する。

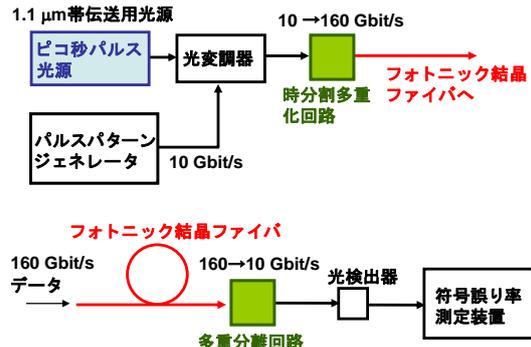


図4 160 Gbit/s 超高速 OTDM 伝送系

## 4. 研究成果

研究課題毎に得られた研究成果について以下に述べる。

### (1) 1.1 μm 帯パルス光源技術の開発

#### ①VCSEL をベースとしたパルス光源

電流狭窄構造により横高次モードを -50 dB 以下に低減させた 7.1 GHz の応答帯域を有するシングルモード動作 VCSEL を試作し、これを用いて図 1 に示した 2 種類のピコ秒パルス光源を作製した。図 1(a) に示す再生モード同期技術を用いたパルス光源においては、光遅延路として波長 1.07 μm において -5 ps/nm/km と低分散特性を有するフォトニック結晶ファイバを使用した。本光源から出力される光パルス信号の時間ジッタが最小となるように VCSEL への注入電流およびフォトニック結晶ファイバの長さを最適化した結果、注入電流を 1.9 mA、ファイバ長を 200 m としたときに 0.9 ps のジッタ特性を得た。このときの出力パルス信号の時間波形および 10 GHz クロック信号の電気スペクトル波形をそれぞれ図 5(a) および (b) に示す。図 5(a) に示すように、11.5 ps の光パルス列の生成に成功した。図 5(b) において、共振器長で決まる 0.89 MHz の間隔で 10 GHz クロック信号の周り信号成分がみられている。それら雑音成分は 50 dB 以上の比率で抑制されており、純度の高いクロック信号を得ることに成功した。一方、図 1(b) に示す利得スイッチ技術を用いたパルス光源においても、VCSEL の注入電流を 2 mA、スイッチング信号の変調電力を 6 dBm とした際に 11.5 ps の光パルス列を得ることに成功した。

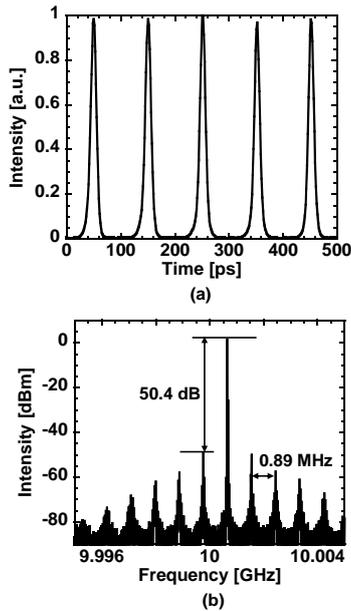


図 5 レーザ出力特性 (a)時間波形、(b)10 GHz クロック信号の電気スペクトル波形

②Yb添加ファイバを利得媒質としたモード同期パルス光源

図 2 に示すファイバレーザ共振器において、その共振器内に約 $+8.7 \text{ ps/nm/km}$ の異常分散値を有するフォトニック結晶ファイバを約 100 m 挿入し、共振器内の平均分散値を $+2.7 \text{ ps/nm/km}$ の異常分散に設定することにより、安定なソリトンパルスの生成を実現した。そのレーザ出力特性の一例として、波長 1067 nm、励起パワー450 mW における光パルスの自己相関波形と 10 GHz クロック信号のスペクトル波形をそれぞれ図 6(a),(b)に示す。このときレーザ出力パワーは 63 mW であった。図 6(a)に示すように 1.1 ps の短パルス列を生成することに成功した。また図 2(b)に示すように、10 GHz クロック信号に 70 dB 以上の高い S/N が得られた。このクロック信号の周りの単一側波帯位相雑音スペクトルより算出した時間ジッタの値は 0.13 ps であった。以上のように、①で述べた VCSEL をベースにしたパルス光源と比較して、短パルスかつ時間ジッタが低い高品質な光パルス列の生成に成功した。この結果より、160 Gbit/s OTDM 伝送実験は Yb 添加ファイバを用いたモード同期パルスレーザを使用して行なうことにした。

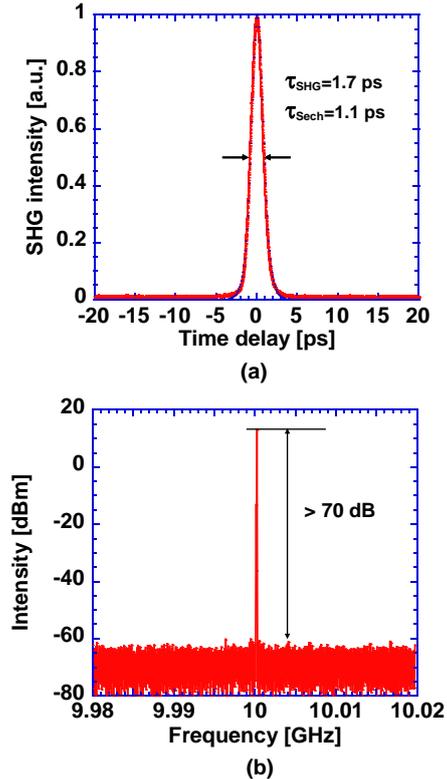
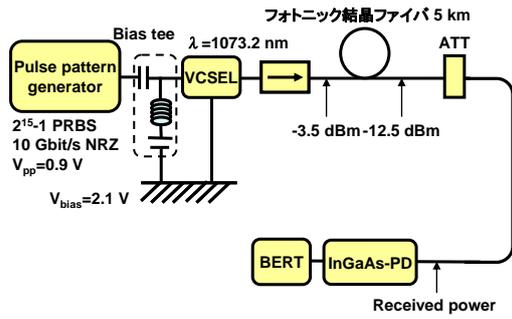


図 6 レーザ出力特性 (a)時間波形、(b)10 GHz クロック信号の電気スペクトル波形

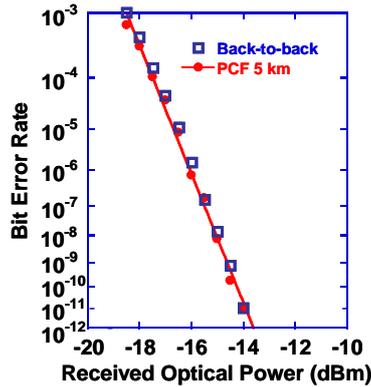
(2) 1.1  $\mu\text{m}$  帯光伝送技術の開発

①VCSEL とフォトニック結晶ファイバを組み合わせた 10 Gbit/s 光伝送

分散値および伝送損失がそれぞれ  $-19 \text{ ps/nm/km}$  および  $1.6 \text{ dB/km}$  であるフォトニック結晶ファイバを試作し、これと(1)①で開発したシングルモード動作 VCSEL を組み合わせ光伝送実験を行った。その実験系の構成および伝送結果を図 7(a)および(b)に示す。図 7(a)に示すように光変調器や光増幅器を使用しない簡便かつ安価な構成により、伝送速度 10 Gbit/s、伝送距離 5 km の 1.1  $\mu\text{m}$  帯光伝送系を構築した。そして図 7(b)に示すように、パワーペナルティのない伝送特性を実現した。また、中継用光増幅器を用いてその伝送距離を 14 km に拡大した際にもペナルティフリーの伝送特性を得ることに成功した。



(a) 伝送系



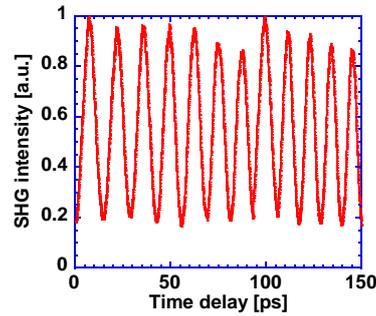
(b) 誤り率測定結果

図 7 VCSEL とフォトニック結晶ファイバを用いた 10 Gbit/s 光伝送実験

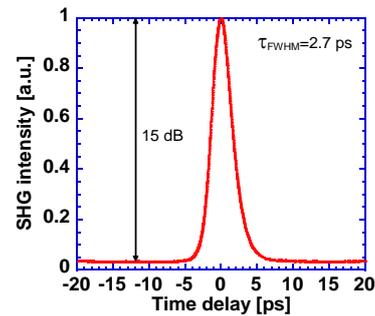
②ピコ秒パルス光源と OTDM 技術を組み合わせ合わせた 100 Gbit/s 以上の超高速光伝送

50:50 光カプラを多段接続することにより 10 Gbit/s から 160 Gbit/s への時分割多重化回路を試作した。そしてその光回路と(1)②の Yb 添加ファイバを用いたモード同期パルスレーザを組み合わせ 160 Gbit/s の高速データの生成に成功した。また、分散値  $-41 \text{ ps/nm/km}$ 、分散スロープ  $0.192 \text{ ps/nm}^2/\text{km}$ 、非線形定数  $33 \text{ W}^{-1}\text{km}^{-1}$  の特性を有する高非線形ファイバを 12.5 m 用いて非線形光ループミラー回路を作製し、これを用いて 160 から 10 Gbit/s への多重分離動作を実現した。多重分離前の 160 Gbit/s のデータ信号および多重分離した後の 10 Gbit/s データ信号の自己相関波形を図 8(a)および(b)に示す。多重分離回路内の分散値を制御することで信号光パルスと制御光パルスとのウォークオフを 2.5 ps に低減し、その結果、パルス幅 2.7 ps、消光比 15 dB の多重分離信号を得ることに成功した。さらに、多重分離した 16 チャンネルの 10 Gbit/s データ信号に対しその符号誤り率 (BER: Bit Error Rate) を測定した。その一例として ch.1 信号の BER 特性を図 9 に示す。図中の Base line は分割多重回路と多重分離回路を介さずに直接 BER を測定した結

果を示している。Base line とのパワーペナルティは約 1 dB あるものの、 $-28 \text{ dBm}$  以上の受信レベルで BER が  $10^{-12}$  以下のエラーフ



(a) 160 Gbit/s OTDM 信号



(b) 多重分離信号

図 8 多重分離回路のスイッチング特性

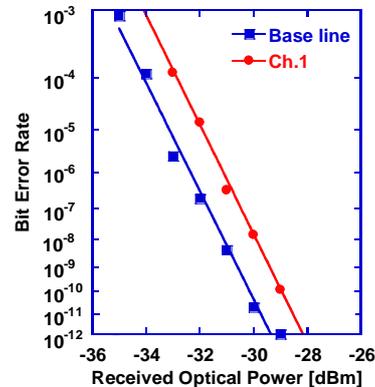


図 9 160 Gbit/s OTDM 伝送結果

り動作を実現することに成功した。全てのチャンネルに対し同等の特性が得られた。以上のように、本研究の最終目標である波長  $1.1 \mu\text{m}$  帯における 160 Gbit/s 伝送システムの基盤技術を確認することに世界で初めて成功した。

## 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 4 件)

①K. Koizumi, M. Yoshida, T. Hirooka and M. Nakazawa, "10 GHz, 1.1 ps optical

pulse generation from a regeneratively mode-locked Yb fiber laser in the 1.1  $\mu\text{m}$  band,” Optics Express, 査読有, vol. 19, 2011, pp. 25426-25432.

② K. Koizumi, M. Yoshida, and M. Nakazawa, “A 10-GHz optoelectronic oscillator at 1.1  $\mu\text{m}$  using a single-mode VCSEL and a photonic crystal fiber,” IEEE Photonics Technology Letters, 査読有, vol. 22, 2010, pp. 293-295.

③ K. Koizumi, M. Yoshida, T. Hirooka, and M. Nakazawa, “10Gbit/s photonic crystal fiber transmissions with 1.1  $\mu\text{m}$  directly-modulated single-mode VCSEL,” IEICE Electronics Express, 査読有, vol. 6, 2009, pp. 1615-1620.

④ K. Koizumi, M. Yoshida, and M. Nakazawa, “10-GHz 11.5-ps pulse generation from a single-mode gain-switched InGaAs VCSEL at 1.1  $\mu\text{m}$ ,” IEEE Photonics Technology Letters, 査読有, vol. 21, 2009, pp. 1704-1706.

〔学会発表〕(計8件)

①小泉健吾, 吉田真人, 廣岡俊彦, 中沢正隆, “非線形ファイバループミラーを用いた1.1  $\mu\text{m}$ 、160 Gbit/s OTDM信号の多重分離,” 電子情報通信学会2012年総合大会, 2012年3月21日, 岡山.

②K. Koizumi, M. Yoshida, T. Hirooka and M. Nakazawa, “10 GHz, 1.1 ps pulse generation from a harmonically and regeneratively mode-locked Yb fiber laser at 1.1  $\mu\text{m}$ ,” 17 th MicroOptics Conference, 2011年11月2日, 仙台.

③K. Koizumi, M. Yoshida, T. Hirooka and M. Nakazawa, “A 10 GHz, 2.5 ps regeneratively mode-locked Yb fiber laser in the 1.1  $\mu\text{m}$  band,” Conference on lasers and Electro-Optics, 2011年5月1日, Baltimore, USA.

④小泉健吾, 吉田真人, 廣岡俊彦, 中沢正隆, “波長1.1  $\mu\text{m}$ 帯10 GHz, 2.5 ps再生モード同期 Ybファイバーレーザー,” 第58回応用物理学関係連合講演会, 2011年3月24日, 神奈川.

⑤K. Koizumi, M. Yoshida, T. Hirooka, and M. Nakazawa, “A 10 GHz opto-electronic oscillator at 1.1  $\mu\text{m}$  using a gain-switched InGaAs VCSEL and a photonic crystal fiber,” Conference on lasers and Electro-Optics, 2010年5月17日, San Jose, USA.

⑥K. Koizumi, M. Yoshida, T. Hirooka, and M. Nakazawa, “10 Gbit/s photonic crystal fiber transmissions with 1.1  $\mu\text{m}$

directly-modulated single-mode VCSEL,” Optical Fiber Communication Conference, 2010年3月24日, San Diego, USA.

⑦小泉健吾, 吉田真人, 中沢正隆, “波長1.1  $\mu\text{m}$  単一モードVCSELとフォトニック結晶ファイバを用いた10 GHz光-マイクロ波発振器,” 電子情報通信学会総合大会, 2010年3月16日, 仙台.

⑧小泉健吾, 吉田真人, 中沢正隆, “波長1.1  $\mu\text{m}$  VCSELの利得スイッチングによる10 GHz-11.5 psパルス発生,” 電子情報通信学会ソサイエティ大会, 2009年9月17日, 新潟.

〔その他〕

ホームページ等

<http://www.nakazawa.riec.tohoku.ac.jp>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

吉田 真人 (YOSHIDA MASATO)

東北大学・電気通信研究所・准教授

研究者番号：10333890