

平成 17 年度 修士論文

半導体全光偏光変換を利用した
40GHz モードロックパルス発生の研究

学籍番号 0432037

鈴木 励

電子工学専攻 光エレクトロニクス講座
指導教員 上野芳康 助教授

修 士 論 文 の 和 文 要 旨

大学院電気通信学研究科 博士前期課程 電子工学専攻		
氏 名	鈴木 励	学籍番号 0432037
論 文 題 目	半導体全光偏光変換を利用した 40 GHz モードロックパルス発生の研究	
<p>要 旨</p> <p>さらなる高速・大容量光通信を実現するため、従来の波長分割多重大容量化方式に光時分割多重高速化方式を組み合わせることが検討されている。そのような方式を用いた将来光ネットワークの構築には、40 GHz 以上の高繰り返し周波数や 1~5 ps 程度の短パルス幅などの出力パルス特性に加え、高安定かつパルス幅が制御可能な光パルス光源が重要になる。本研究の半導体全光偏光変換器を用いた光パルス発生方式は、①集積化可能、②長期信頼性が高い、③大量生産に適している、などの点で将来性を持つ。さらに、原理的に出力パルス幅を自由に制御可能と期待される。しかし、パルス発生閾値条件は未解明であり、従来の実験周波数は全て 10 GHz であり低周波であった。本研究では、本パルス発生方式の高性能化・原理解明を目的として、光ファイバ構成のパルス発生器を試作し出力パルスを評価した。</p> <p>10 GHz パルス発生実験では、消光比や光スペクトル歪みの改善、並びにパルス発生閾値特性の解明を試みた。その結果、リング共振器に偏光子を挿入し、エルビウム添加ファイバー増幅器からの増幅自然放出光を低減することで、出力パルスの自己相関波形の消光比を 11 dB から 17 dB と本研究以前に比べ改善した。また、マッハツェンダ-干渉計の位相バイアスをわずかに π からずらすことで、出力光スペクトルの歪みを低減した。さらに、原理的に予想されていたパルス発生閾値特性を初めて実験的に明らかにした。</p> <p>さらに、本パルス発生方式で初めて、40 GHz パルスの発生に成功した。発生したパルスは 16dB の高い消光比、歪みの少ない光スペクトルを有した高品質パルスであった。加えて、原理的に期待されていたパルス幅制御性を 2 ps~5 ps までの範囲で実証した。また、40 GHz パルスの光電変換スペクトルを、光ヘテロダイン方式により低周波電気信号に変換することで、間接的に測定することに成功した。</p> <p>以上のように、本研究において、本パルス発生方式は高性能化、原理解明の面で多くの進展を得た。本研究における数々の成果は、160 GHz パルス発生、さらに、本パルス発生方式の集積化・実用化に向け、大きな役割を果たすと期待している。</p>		

概要

さらなる高速・大容量光通信を実現するため、従来の波長分割多重大容量化方式に光時分割多重高速化方式を組み合わせることが検討されている。そのような将来光ネットワークの構築には、40 GHz 以上の高繰り返し周波数や 1~5 ps 程度の短パルス幅などの出力パルス特性に加え、高安定かつパルス幅が制御可能な光パルス光源が重要になる。本研究の半導体全光偏光変換器を用いた光パルス発生方式は、①集積化可能、②長期信頼性が高い、③大量生産に適している、などの点で将来性を持つ。さらに、原理的に出力パルス幅を自由に制御可能と期待される。しかし、パルス発生閾値条件は未解明であり、従来の実験周波数は全て 10 GHz であり低周波であった。本研究では、本パルス発生方式の高性能化・原理解明を目的として、光ファイバ構成のパルス発生器を試作し出力パルスを評価した。

10 GHz パルス発生実験では、消光比や光スペクトル歪みの改善、並びにパルス発生閾値特性の解明を試みた。その結果、リング共振器に偏光子を挿入し、エルビウム添加ファイバー増幅器からの増幅自然放光を低減することで、出力パルスの自己相関波形の消光比を 11 dB から 17 dB と本研究以前に比べ改善した。また、マッハツェンダー干渉計の位相バイアスをわずかに π からずらすことで、出力光スペクトルの歪みを低減した。さらに、原理的に予想されていたパルス発生閾値特性を初めて実験的に明らかにした。これらの成果は、40 GHz パルス発生に向け大きな足がかりとなった。

さらに、本パルス発生方式で初めて、40 GHz パルスの発生に成功した。発生したパルスは 16 dB の高い消光比、歪みの少ない光スペクトルを有した高品質パルスであった。加えて、原理的に期待されていたパルス幅制御性を 2ps~5ps までの範囲で実証した。また、40 GHz パルスの光電変換スペクトルを、光ヘテロダイン方式により低周波電気信号に変換することで、間接的に測定することに成功した。

以上のように、本研究において、本パルス発生方式は高性能化、原理解明の面で多くの進展を得た。本研究における数々の成果は、160 GHz パルス発生、さらには、本パルス発生方式の集積化・実用化に向け、大きな役割を果たすことと期待している。本パルス発生器が実用化された暁には、安価かつ高安定、設計自由度の高い実用的光パルス光源を提供することが可能になり、将来の超高速・大容量光通信システムの実現に向け大きな飛躍となる。

目次	
第1章 序論	1
第2章 研究背景	6
2.1 光パルス発生器の研究状況	7
2.2 DISC-loop 型パルス発生器	10
2.2.1 半導体 DISC 型全光ゲート	11
2.2.2 パルス周回メカニズムの原理	15
2.2.3 これまでの研究成果	17
第3章 本研究の目的	19
第4章 DISC-loop 型パルス発生器における基礎メカニズムの解明	20
4.1 実験構成	20
4.2 10GHz, 5ps パルスの発生と消光比の向上	25
4.3 光スペクトル歪みの改善	28
4.4 光パルス注入同期法	30
4.5 パルス周回利得によるパルス発生 of 閾値特性	32
4.6 DISC 偏光変換器のパルス透過率	36
第5章 40GHz モードロックパルス発生	41
5.1 40GHz エタロンカセットの作成	41
5.2 高品質 40GHz, 5ps パルスの発生	48
5.3 パルス幅の制御性	50
5.4 光ヘテロダイン測定法による繰り返し周波数の測定	54
5.5 DISC-loop 型パルス発生器の安定性	60
第6章 結論	63
謝辞	64
参考文献	65
付録 各素子の特性	
自己相関波形計算プログラムのソースファイル	
著作学会予稿論文	

第1章 序論

本論文は、半導体全光偏光変換器を用いて高速光クロックパルス列の生成を行う DISC-loop 型パルス発生器に関する研究成果をまとめたものである。DISC とは Delayed Interference wavelength Signal Converter の略語である。このパルス発生器は従来のパルス発生器とは全く異なった原理で働き、それに付随して様々な特徴を持つ。それらの従来のものにはない特徴が将来の光通信システムや光計測システムに大きな役割を果たすことと信じている。本章では、光通信システムの現状と課題を明らかにし、将来の光通信システムの展望を述べることで、本パルス発生器を始めとした次世代光信号源の必要性を示す。

近年、インターネットの普及や単なるテキストから画像(或は動画)になるといった通信データ形式の変化、などによる通信データ量の増加に伴い、ネットワークの大容量化への要求がますます高まっている。近年における日本の通信データ量の増大(図 1.1)をみると、通信データ量の増大速度は1年間に2倍と非常に高速であり、今後も増加すると予測される。例えば、Mobile 通信を除く DSL(Digital Subscriber Line), CATV(Community Antenna TeleVision)といった従来電気通信が FTTH(Fiber To The Home)に代表される光通信に転じた場合、データ通信容量は 2.1 Pb/s にも上る。これらの増大し続けるデータ量を確実に通信するためには、光通信システムの大容量化が急務となっている。

現在の商用光通信システム(図 1.2)は、大容量化に際して波長分割多重(Wavelength Division Multiplexing, WDM)技術を採用している。WDM は1本の光ファイバの帯域容量を有効に使うための技術で、図 1.3 のように、低速な光信号を波長軸上で重ねることにより大容量信号を作り出すという多重法である。この技術を用いて、最近では、10 GHz 信号を 128 波(128 ch)多重した 1.28 Tb/s-WDM 商用光通信システムが実用化されている。さらに、研究レベルでは、2001 年に 40 GHz の信号を 273 波(273 ch)、多重した 10.92 Tb/s の WDM 大容量信号を伝送することに成功している(図 1.4) [1-1]。

しかしながら、低速信号を用いる WDM では①大容量信号を相互に一括して取り扱う場合にデータ間の時間遅延が生じる、②多くのシステム構成部品・保守部品が必要、③波長管理・オペレーションが複雑、④装置の大型化・大電力化、などの様々な要因により多重化に限界がきており、さらなる大容量化は困難である。特に、①はノード数の多い都市間メトロリング型ネットワークなどにおいて問題となる。そこで、近年、光時分割多重(Optical Time Division Multiplexing, OTDM)技術が注目を集めている。OTDM(図 1.5)は、図 1.6 のように、1つの波長の短パルス幅かつ低速な光信号を少しずつずらしながら時間的に重ねることで、高速信号を作り出す多重法である。この OTDM を用いて、1ch 当りの信号を高速化することで、上記の WDM の課題が解決できると期待されている [1-2, 1-3]

これらのことから、近年の光ファイバ伝送技術構想は、ネットワークの要求に応じて柔軟に OTDM と WDM を組み合わせる超高速・大容量ネットワーク構想が主流である。今後、両者を組み合わせた効率のよい光ネットワークを構築するためには、基になる高速光信号源が重要になる。このような光信号源では、特に出力パルス幅が注目すべき特性となる。パルス幅は OTDM において多重数限界(1ch 当りの伝送速度)を、WDM において 1ch 当りの帯域幅を決定する。そのため、パルス幅は全体として信号ビットレートとチャンネル数の比率の決定要因となる。よって、パルス幅の制御が可能な光信号源は、柔軟な OTDM-WDM システムの構築に非常に有用である。

現在の商用光通信システムで用いている光信号源(送信器)は、光源である半導体レーザに直接、電気信号を加え強度変調することにより、NRZ(Non Return to Zero)形式のデータ光パルス列を生成している。このような方式では、半導体内部のキャリアの応答速度で駆動周波数が 10GHz 程度に制限されるため、それ以上の周波数の高速信号を作り出すことは困難である。また、NRZ 形式ではパルスが重なってしまうため、OTDM 信号を生成することは出来ない。さらに、直接変調方式で生成された光データパルス列は波長チャープが大きいといった欠点もある。この波長チャープにより伝送距離が制限される。

このような要因により直接変調方式の光信号源では、限界がきている。そのため、将来の超高速・大容量光ネットワークでは、高周波かつ短パルス幅、高い消光比、低チャープ性、など厳しい要求を満たした新たな光信号源が望まれている。このような次世代光信号源として外部変調法の光信号源や光パルス発生器が提案されている。

第2章 研究背景

近年、超高速・大容量全光通信の実現に向け、光信号源は活発に研究されている。このような次世代光信号源には、電子回路の速度限界である 40GHz 以上の高繰り返し周波数に加えて、高い消光比、短いパルス幅、低チャープ性、高信頼性、低消費電力、など厳しい性能が要求される。また、OTDM と WDM をより柔軟に組み合わせるためには、出力パルス幅、パルス波長などの出力パルス特性の制御性がこれまで以上に重要になる。従来研究されている代表的な光信号源は外部変調器を用いたもの、モード同期ファイバーレーザ (Mode Locked Fiber Laser, MLFL) [2-1, 2-2]、モード同期半導体レーザ (Mode Locked Laser Diode, MLLD) [2-3~2-6]、半導体増幅器 (Semiconductor Optical Amplifier, SOA) を用いた SOA-ring-laser [2-7~2-10] の 4 種がある。

本章では、DISC-loop 型パルス発生器を他の方式のパルス光源と比較することでその有用性を示す。さらに、本パルス発生器の動作原理及び従来報告例を紹介することで、本研究の位置付けを行う。

第6章 結論

将来の超高速・大容量光通信システムの実現に向けて高性能次世代パルス光源が必須となる。そのようなパルス光源は現在も尚、多くの研究機関で活発に研究されている。しかしながら、独立にパルス幅を制御できるパルス発生方式に関する報告は乏しい。本研究では、パルス幅などを可変制御できる新方式の次世代パルス光源の高性能化とその原理の解明を目的とし、集積化の前段階としてファイバー結合構成の DISC-loop 型パルス発生器を試作し、出力パルスの評価を行った。

第4章では、過去の 10 GHz, 5 ps パルス発生実証実験において不十分であった3つの点、すなわち、①低消光比、②光スペクトルの歪み、③OE 変換スペクトルのマルチモード化、の改善に努めた。また、従来研究されていなかったパルス発生閾値特性の解明も目標にした。その結果、消光比は、リング共振器に偏光子を挿入し、自然放出光によるレーザ発振を抑制することで、17 dB 以上に大きく改善した。光スペクトルの歪みは、位相バイアスを π から少しずらすことにより中心成分の欠落等が解消され、大きく改善した。OE 変換スペクトルのマルチモード化については、光注入同期法を試したが、OE 変換スペクトルはマルチモードのままであった。この原因は、注入した光パルスの波長がリング共振器モードに一致していないためであると考えている。ただし、この課題は、本パルス発生器を集積化した際に、共振器モード間隔が GHz オーダとなり、エタロンの透過スペクトル成分内に共振器モードが1つしか存在できなくなると考えられ解決することが期待されるため、最終的な課題ではない。さらに、従来、想像でしかなかったパルス発生閾値利得の存在を明らかにした。これらの成果は、次の 40 GHz パルス発生に向け大きな足がかりとなった。

第5章では、従来実験周波数が 10 GHz でしかなかった本パルス発生方式を 40 GHz まで高周波数にすることを目標とした。さらに、原理的に期待されていたパルス幅の可変制御性を明らかにすること、引き続き単一周波数パルスの発生を試みた。その結果、本方式で初めて、40 GHz の高周波、16 dB の高い消光比、歪みの少ない光スペクトルなどを有した高品質モードロックパルスを得ることに成功した。さらに、パルス幅制御性に関しても 2 ~ 5 ps までの可変制御性が確認できた。また、単一周波数パルスの発生に関しては、まず、電界吸収型光変調器を用いて光ヘテロダイン計測を行うことで、40 GHz パルスの OE 変換スペクトルを間接的に測定することを可能にした。次に、繰り返し周波数決定機構であるエタロンのフィネス値を増減させ OE 変換スペクトル幅を測定することで、反射率 98.5% 以上のエタロンを用いれば単一周波数パルスの発生する可能性があると予測した。

以上のように、本研究において、DISC-loop 型パルス発生器は高性能化、原理解明の面で多くの進展を得た。

今後の課題として、①次々世代光通信システムの周波数である 160 GHz, 1 ps パルス発生の実現、②OE 変換スペクトルのシングルモード化、③波長チャープ量の評価、④本パルス発生器のモデル化、などが挙げられる。

謝辞

このような独自性の高い最新鋭研究の機会ならびに懇切なる御指導、御鞭撻を賜りました上野芳康助教授に心より感謝致します。本研究を進めるにあたり、研究に対する多くの御助言、御指摘、御討論を下さった上野研究室の博士2年の坂口淳理学博士、研究員の Ferran Sallearas 博士、2005 年度修士課程卒業の豊田将志さん、三木・來住研究室の松浦基晴博士、には謹んで御礼申し上げます。研究途上において、高精度偏光制御器をご提供頂いたオプトクエスト社の桃井香氏、並びに 40GHz 電界吸収型光変調器をご提供頂いた OKI 電気の辻清美氏には厚く御礼申し上げます。また、2004 年度の学部卒業の佐藤佑介君、高山豪太君の御二人の研究は本研究を行う上で参考になりました。また、共に本研究を進めてきた同研究室の修士1年の大平高志君、学部生の中本亮一君、小林聡君には多くの刺激を受け、本研究への大きな励みにすることができました。

最後に上野研究室の皆様には、常日頃より、多くの議論及び激励を受け、今日までの楽しくも充実した日々を過ごすことが出来ました。皆様には心より感謝致します。

参考文献

- [1-1] K. Fukuchi, T. Kasamatsu, M. Morie, R. Ohhira, T. Ito, K. Sekiya, D. Ogasahara, and T. Ono, "10.92-Tb/s (273x40-Gb/s) triple-band/ultra-dense WDM optical-repeated transmission experiment," Optical Fiber Communication Conference, Anaheim, USA, March 17-22, 2001, postdeadline paper PD24.
- [1-2] 藤井 浩三 「大容量ネットワークを支える基幹光通信技術-国家プロジェクトにおける超高速・大容量・長距離伝送への取り組み-」、沖テクニカルレビュー, 第 197 号 vol. 71, No. 1, 2004 年 1 月.
- [1-3] 藤井 浩三 「超高速光信号処理技術の開発~160Gbit/s 光通信システムの実用化に向けて~」、沖テクニカルレビュー, 第 204 号 vol. 72, No. 4, 2005 年 10 月.
- [2-1] E. Yoshida, N. Shimizu, and M. Nakazawa, "A 40-GHz 0.9-ps Regeneratively Mode-Fiber Laser with a Tuning Range of 1530-1560 nm," IEEE PHOTONICS TECHNOLOGY LETTERS, VOL. 11, NO. 12, pp. 1587-1589, DECEMBER 1999
- [2-2] Y. W. Song, C. S. Goh, S. Y. Set, T Kotake, and S. Yamashita, "17.2-GHz Pulsed Laser Passively Mode-locked by Carbon Nanotubes" 10th Optoelectronics and Communications Conference (OECC 2005), Seoul, Korea, July 5-8, 2005, paper PDP 8,
- [2-3] S. Arahira and Y. Ogawa, "40 GHz Actively Mode-Locked Distributed Bragg Reflector Laser Diode Module with an Impedance-Matching Circuit for Efficient RF Signal Injection" Japanese Journal of Applied Physics, Vol. 43, No. 4B, pp. 1960-1964, April, 2004
- [2-4] S. Arahira and Y. Ogawa, "160-Gb/s All-Optical Encoding Experiments by Four-Wave Mixing in a Gain-Clamped SOA With Assist-Light Injection" IEEE PHOTONICS TECHNOLOGY LETTERS, VOL. 16, NO. 2, pp. 653-655, Feb., 2004
- [2-5] S. Arahira, S. Sasaki, K. Tachibana, and Y. Ogawa, "All-Optical 160-Gb/s Clock Extraction With a Mode-Locked Laser Diode Module" IEEE PHOTONICS TECHNOLOGY LETTERS, VOL. 16, NO. 6, pp. 1558-1561, JUNE 2004
- [2-6] 荒平 慎, 小川 洋, 「40GHz 光パルス光源」、沖テクニカルレビュー, 第 201 号 vol. 72, No. 1, 2005 年 1 月.
- [2-7] L. Schares, R. Paschotta, L. Occhi, and G. Guekos "40-GHz Mode-Locked Fiber-Ring Laser Using a Mach-Zehnder Interferometer With Integrated SOAs," IEEE Journal of Lightwave Technology, vol. 22, no. 3, pp. 859-873, March. 2004.
- [2-8] K. Vlachos, C. Bintjas, N. Pleros and H. Avramopoulos, "Ultrafast, Semiconductor-based Fiber Laser Sources," IEEE J. of Selected Topics in Quantum Electronics (Special Issue on Ultrafast Science and Technology), Nov./Dec. 2003.
- [2-9] S. Gee, F. Quinlan, S. Ozharar, and P. J. Delfyett, 'Simultaneous Optical Comb Frequency Stabilization and Super-Mode Noise Suppression of Harmonically Mode-Locked

- Semiconductor Ring Laser Using an Intracavity Etalon,' IEEE Photonics Technol. Lett., vol. 17, no. 1, pp. 199-201, Jan. 2005.
- [2-10] B. Resan, L. Archundia, and P. J. Delfyett, Jr., "Experimental characterization and numerical simulations of dispersion-managed breathing-mode semiconductor mode-locked ring laser," LEOS Annual 2003.
- [2-11] 長井 清, 和田 浩 「40Gb/s EA 変調器」、沖テクニカルレビュー, 第 190 号 vol. 69, No. 2, 2002 年 4 月.
- [2-12] Y. Ueno, S. Nakamura, K. Tajima, and S. Kitamura, "3.8-THz Wavelength Conversion of Picosecond Pulses Using a Semiconductor Delayed-Interference Signal-Wavelength Converter (DISC)," IEEE Photonics Technol. Lett. vol. 10, no. 3, pp. 346-348, March 1998.
- [2-13] Y. Ueno, S. Nakamura, and K. Tajima, "Spectral Phase-Locking in Ultrafast All-Optical Mach-Zehnder-Type Semiconductor Wavelength Converters," JJAP, vol. 38, no. 11A, pp. 1243-1245, November. 1999
- [2-14] Y. Ueno, S. Nakamura, and K. Tajima, "Nonlinear phase shifts induced by semiconductor optical amplifiers with control pulses at repetition frequencies in the 40-160-GHz range for use in ultrahigh-speed all-optical signal processing," JOSAB, vol. 19, no. 11, pp. 2573-2589, Nov. 2002.
- [2-15] S. Nakamura, Y. Ueno, and K. Tajima, "168-Gb/s All-Optical Wavelength Conversion With a Symmetric-Mach-Zehnder-Type Switch," IEEE PHOTONICS TECHNOLOGY LETTERS, VOL. 13, NO. 10, OCTOBER 2001.
- [2-16] Y. Ueno, S. Nakamura, and K. Tajima, "All-Optical Divided-Clock Extractor Using an Ultrafast All-Optical Symmetric-Mach-Zehnder-Type Semiconductor Switch Embedded in an Optical Loop," Jpn. J. Appl. Phys., vol. 39, no. 8A, pp. 803-805, Aug. 2000.
- [2-17] Y. Ueno, S. Nakamura, and K. Tajima, "5-ps, 10-GHz pulse generation from an all-optical semiconductor switch embedded in a ring cavity," Appl. Phys. Lett., vol. 79, no. 16, pp. 2520-2522, Oct. 2001.
- [2-18] R. Suzuki, S. Kobayashi, J. Sakaguchi, and Y. Ueno, 'Threshold condition for pulse generation from a DISC-loop-type pulse generator,' IQEC/CLEO-PR, July 11-15, 2005, Tokyo, paper CMF1-4.
- [2-19] 鈴木 励、小林 聡、坂口 淳、大平 高志、上野 芳康、「DISC-Loop 型パルス発生器のパルス発生閾値条件」、第 52 回応用物理学関係連合講演会、2005 年 3 月、埼玉大学、さいたま市、Vol. 3, p. 1347, 31p-ZQ-18。
- [2-20] R. Suzuki, T. Ohira, J. Sakaguchi, and Y. Ueno, "40-GHz mode-locked pulse generation with a new scheme of SOA-based pulse generators," submitted to CLEO/QELS, May 21-26, 2006, California.

[2-21] 鈴木 励、大平高志、坂口 淳、上野 芳康、「半導体全光偏光変換器を用いた 40GHz 光クロックパルスの発生」、第 53 回応用物理学関係連合講演会、2006 年 3 月、武蔵工業大学、東京、 to be published.

[4-1] Y. Ueno, M. Takahashi, S. Nakamura, K. Suzuki, T. Shimizu, A. Furukawa, T. Tamanuki, K. Mori, S. Ae, T. Sasaki, K. Tajima, "Control Scheme for Optimizing the Interferometer Phase Bias in the Symmetric-Mach-Zehnder All-Optical Switch," IEICE TRANS. ELECTRON., Vol. E86-C, No.5, May, 2003.

[4-2] A. Takada, and W. Imajuku, "Linewidth Narrowing and Optical Phase Control of Mode-Locked Semiconductor Ring Laser Employing Optical Injection Locking," IEEE PHOTONICS TECHNOLOGY LETTERS, VOL. 9, NO. 10, pp. 1328-1331, OCTOBER 1997

[4-3] H. Kurita, T. Shimizu, and H. Yokoyama, "Experimental Investigations of Harmonic

Synchronization Conditions and Mechanisms of Mode-Locked Laser Diodes Induced by Optical-Pulse Injection," IEEE JOURNAL OF SELECTED TOPICS IN QUANTUM ELECTRONICS, VOL. 2, NO. 3, pp. 508-513, SEPTEMBER 1996.

[5-1] 崔 森悦, 吉田 真人, 中沢 正隆「光ヘテロダイン検波法による 10GHz ピコ秒高調波モード同期エルビウムファイバーレーザの縦モード線幅の測定」、電子情報通信学会論文誌 vol. J86-C No. 10 pp.1504-1062, 2003 年 10 月

[5-2] M. Yoshida, T. Yamaguchi, S. harada, and M. Nakazawa, "A 40GHz Regeneratively and Harmonically Mode-Locked Erbium-Doped Fiber Laser and Its Longitudinal-Mode Characteristics," IEICE Trans. Electron., vol.E87-C, No. 7, July, 2004.

[5-3] 羽田 健太郎, 吉田 真人, 横山 弘之, 小川 洋, 中沢 正隆, 「GHz 帯超高速モード同期半導体レーザの縦モード線幅とその相対強度雑音特性」、情報通信学会論文誌 vol. J88- No. 3 pp.161-168, 2005 年.