

戦略的創造研究推進事業
ナノテクノロジー分野別バーチャルラボ
研究領域「超高速・超省電力高性能ナノデバイス・
システムの創製」

研究課題「シフトレジスタ機能付
超高速光メモリの創製」

研究終了報告書

研究期間：平成14年11月～平成20年3月

研究代表者： 河 口 仁 司
(奈良先端科学技術大学院大学物質創成科学研究科 教授)

1 研究実施の概要

1.1 研究の構想

現在光ファイバ通信システムは高度情報社会を担う通信伝送方式として発展している。しかし、現状の光ファイバ通信システムは、キャリア周波数が 200 THz という光の特性をまだ十分には活用していない。今後の情報量の増大に応えるためには、より一層の超高速光通信システムの開発が望まれているが、その超高速化のためには信号処理も光が行う全光化が期待されている。とりわけ、全光型でのパケット単位のルーティング技術が必要とされている。従来、ファイバ遅延線バッファメモリを用いることが提案されているが、各ビット毎の制御や必要なタイミングに情報を読み出すことが困難であった。このような困難を解決し、現在存在する技術を用いて、パケット交換を行おうとする試みも始まっている。例えば、時系列信号を空間並列信号に変換した後、各チャンネル毎に分岐し、全てのチャンネルの信号をそれぞれ受光器で受け、電気信号に変換した後、処理しようとするものである。現在、ヘッダーの読みとりが可能になった段階であり、いずれ原理確認はなされると思われるがその構成法が極めて複雑であるため、多くの困難が予想される。従って、これまでフォトニックネットワーク技術で是非必要と言われながらも実現されてこなかった、全光パケットメモリが比較的容易な方法で実現されれば、フォトニックネットワークの構成を基本的に変えるほど大きな波及効果、インパクトをもつ。

本研究では、光信号を電気信号に変換することなく、時系列の光信号を偏光双安定面発光半導体レーザ (VCSEL) アレイの各レーザに1ビットずつ記録し、必要なタイミングにあわせ時系列信号として記録信号を読み出すことができる光バッファメモリの実現をめざす。本研究期間の終了時である平成 19 年度秋までに、2次元アレイ偏光双安定 VCSEL を用い、複数の光パルスに対する光バッファメモリ動作の原理確認を実現することを目標とする。又、シフトレジスタ機能の原理確認を行う。さらに、時間多重における光信号のタイミング調整用光バッファメモリとしての動作を実現する。この超高速光メモリの研究を実施する過程で、長波長 VCSEL の開発や、光パケットスイッチングに必要な光ヘッダ識別回路、時空間変換型光パケット生成・転送技術の実現もはかる。

1.2 研究代表者チームの成果概要

1.2.1 980 nm 帯偏光双安定 VCSEL の作製

光バッファメモリを実現するため、偏光双安定 VCSEL を自作した。一方の DBR 共振器を正方形のメサ構造に高密度プラズマ反応性イオンエッチング (Inductively-Coupled-Plasma Reactive-Ion-Etching: ICP RIE) を用いて加工し、このメサをポリイミドで埋め込む簡単な構造である。その結果、偏光分解電流－光出力特性に双安定スイッチング特性を得た。近視野像の測定結果から単一横モード発振が得られていることがわかった。34 dB のサイドモード抑圧比 (SMSR) が得られ、また、両偏光状態共に偏波消光比は 23 dB であり、光バッファメモリ等全光型信号処理の検討を行うのに十分な特性をもつ VCSEL が得られた。さらに、光入力によるフリップ・フロップ動作も実現した。

VCSEL の自作が可能になったことから、将来一層の高速化や低消費電力化の検討が可能になった。又、本研究開始前に他の研究所から提供を受けた VCSEL と、構造やプロセス工程が大きく異なる自作の VCSEL でも偏光双安定性が得られたことから、偏光双安定性は VCSEL では極めて一般性のある特性であり、2つの直交偏光でレーザ発振が可能のように設計すれば、VCSEL の構造や作製プロセスによらず一般的に得られることが実験的にも明らかになった。

1.2.2 偏光双安定 VCSEL のスイッチング特性

VCSEL の発振偏光が、光入力の偏光と同一の偏光にスイッチし、保持されることから、全光型フリップ・フロップ動作が実現できる。VCSEL において、偏光が直交する2つのモードは発振周波数が数 GHz 異なるのが一般的である。従って、0°モードから 90°モードへスイッチする場合と、90°モードから 0°モードへスイッチする場合、注入光の波長をそれぞれ最適化することにより、極めて小さな光入力でフリップ・フロップ動作を実現できることがわかった。その結果、540 MHz のくり返しでは、0.2～0.3 fJ という極めて小さな光入力で安定なフリップ・フロップ動作を実現した。この値は、我々

の知る限り、双安定半導体レーザでの最小のスイッチングエネルギーである。又、双安定半導体レーザでは最高速であるくり返し 10 GHz までの動作を確認した。

偏光双安定スイッチングは、外部から VCSEL の発振波長に近い波長をもつ光を注入することによって得る。従って、注入光と VCSEL の発振光が同一偏光になったとき注入同期が生ずるかどうかは興味深い問題である。偏光双安定スイッチングが注入同期を常に伴うかどうか確認するために、偏光双安定スイッチング動作中の動的な発振波長変化をヘテロダイン検波により測定した。偏光双安定スイッチング時のビート信号を離散フーリエ変換して、VCSEL の 90°偏光発振光のスペクトログラム(スペクトルの時間変化)を求めた。その結果、注入光パワーが大きい場合は注入同期を伴い、注入光パワーが小さい場合は注入同期を伴わずに偏光双安定スイッチングが得られ、注入同期が生じなくても発振偏光が切り替わり得ることを直接確認した。本研究で検討したスペクトログラムによるスペクトルの時間変化測定は、半導体レーザの発振波長の時間変化を高分解能(実験例では、周波数分解能 0.41 GHz、時間分解能 1.2 ns)で測定できるなど、計測に広く応用できるものと期待される。

1.2.3 1 ビット光バッファメモリ

AND ゲート動作およびメモリ動作を行う複数の偏光双安定 VCSEL を用いて、光信号を電気信号に変換することなく全光型で、時系列の光信号を各双安定半導体レーザに 1 ビットずつ記録し、必要なタイミングにあわせ時系列信号として記録信号を読み出すことができる光バッファメモリを検討した。90°偏光の入力データ信号と 90°偏光の Set パルスを VCSEL に注入すると、データ信号と Set パルスが同時に注入された時にのみ VCSEL の発振偏光が 90°に切り替わる。従って、Set パルスと同時に入力されたデータ信号の情報“1”又は“0”が発振偏光状態として記録される。VCSEL 出力光を 90°方向の偏光子に通してゲートをかけると、記録された情報が再生される。

実験では、4 ビットの入力信号から 1 ビットを抽出し記録/再生する基本動作を確認した。又、10 Gbit/s RZ 信号に相当する、パルス幅 50 ps、パルス間隔 100 ps の 4 ビット光信号列の中から、1 ビット選択して記録し、再生するメモリ動作を実現した。高速動作を実現するため、注入光の波長は離調を約 20 GHz と大きく設定した。離調を大きくしたことにより、データ信号および Set 光とも比較的大きなパワーが必要となったが(データ信号のピークパワー:150 μ W、Set 光のピークパワー:170 μ W)、VCSEL の光出力(270 μ W)よりも小さく、光利得をもって動作している。この結果は、離調をさらに大きくとることにより一層の高速化が可能なことを示している。

1.2.4 光バッファメモリの多ビット化とシフトレジスタ機能

VCSEL を 2 個用いて、2 ビットの光バッファメモリ動作を実現した。4 ビットの入力信号から 2 ビットを抽出し、記録/再生する基本動作を“00”、“01”、“10”、“11”の全ての場合について確認した。

前述のように、光入力信号の“1”又は“0”は VCSEL の発振偏光として記録される。この VCSEL (VCSEL1) の発振光を 2 番目の VCSEL (VCSEL2) へ注入することにより、VCSEL2 の偏光をスイッチし、情報を転送することができる。この機能を我々はシフトレジスタ機能と呼んでいる。消去後書き込み方式と上書き方式の 2 つの方式によりシフトレジスタ機能を実現した。消去後書き込み方式は、VCSEL2 から信号を読み出した後、リセット光で VCSEL2 の偏光を 0°にリセットする方法である。一方、上書き方式は、VCSEL2 に VCSEL1 の発振光を注入することにより、VCSEL1 の情報を VCSEL2 に上書きする方式であり、VCSEL2 から信号を読み出した後もリセット動作を行わない。両方式とも、全ての組み合わせ、つまり、“0”→“1”、“1”→“1”、“1”→“0”、および“0”→“0”の転送について実験的に実証した。この結果から、本研究の最大の目標であるシフトレジスタ機能付光メモリが実現できたと言える。

1.2.5 1.55 μm 帯偏光双安定 VCSEL とフリップ・フロップ動作実現

ウエハ接合法を用いて 1.55 μm 帯 VCSEL の作製を検討したが、光励起レーザ発振および電流注入による発光を実現したものの、電流励起レーザ発振には至っていない。そこで、VCSEL の上部分布ブラッグ反射鏡(DBR)および活性層の形状と大きさを設計し、その設計に基づき RayCan 社で 1.55 μm 帯 VCSEL を作製した。この VCSEL を用い、偏光双安定動作および全光型フリップ・フロップ動作を実現した。最低次の横モードで動作し、大きな光出力を得る条件を探すため、4 種類のメサ構造の VCSEL を作製した。DBR のサイズと活性層のサイズを、それぞれ 8(8) μm , 10(10) μm , 12(10) μm , 12(8) μm とした。全ての構造の VCSEL で、サイドモード抑圧比は 30 dB 以上であり、良好な単一縦モード発振が得られた。さらに、基板結晶の $[1\bar{1}0]$ 軸方向と $[110]$ 軸方向のどちらかに電界が向く直線偏光で発振した。

4 種類のメサ構造の VCSEL について、偏光分解した電流-光出力特性を測定した結果、10(10) μm のメサ構造について 15 個中 13 個が、12(10) μm のメサ構造については 3 個中 1 個がヒステリシス特性を示した。直交偏光抑圧比は、31 dB であった。VCSEL は両方の偏光方向ともに最低次の単一横モードで動作していることが分かった。

偏光双安定 VCSEL を双安定特性を有する電流値に設定し、発振偏光に直交した光を注入すると、発振偏光の方向が切り替わり、光注入を停止しても切り替わった方向で発振偏光が保持され、全光型フリップ・フロップ動作が実現された。この結果は、光通信波長帯の光バッファメモリ実現につながる大きな研究成果である。

1.3 研究代表者チーム以外の成果概要

1.3.1 光データ処理研究グループ（東京工業大学）

光パケットの行き先情報ラベル識別器の実現を目的として、光デジタル・アナログ変換器を用いた高速光ラベル識別技術の確立と半導体集積化を目指した。半導体ハイメサ導波路構造での 2 ビット・2 並列での 4 ビット動作を 10 Gbps および 40 Gbps で確認した。異なるラベル入力に対する異なる振幅を持つ出力信号をベッセルフィルタでパルス幅拡張を行うことにより、40 Gbps でのラベル識別動作も実現した。また本方式のラベル識別器を導入した光パケットスイッチのプロトタイプを構築し、300 ns 以下の遅延でのパケット転送を実現した。

1.3.2 時空間変換光制御方式研究グループ（慶応義塾大学）

光パケット生成のための時空間変換処理を行うキーデバイスであるアレイ導波路回折格子(AWG)の性能向上のために、V 字型微小曲げ導波路構造及び低屈折材料充填溝構造を提案し、従来の AWG と同程度の性能を約 1/10 の寸法の AWG で実現した。この新構造を活用するとともに、スラブ導波路内レンズ構造を有する空間光変調器集積用 AWG を試作し、パルス列発生と制御を行った。また、同様の構造を利用して、スペクトル位相符号化デバイスを試作し、光パルス符号化実験に成功した。

1.3.3 結晶成長研究グループ（大阪府立大学）

新しい材料系である InGaAsSbN 半導体を用いた長波長帯量子井戸レーザの作製を、プラズマアシスト分子線結晶成長法(MBE)を用いて行った。GaAs 基板上の波長 1.3 μm 帯 InGaAsSbN 量子井戸レーザに関しては、Sb 原子濃度と結晶の物性の相関を解明するとともに、Sb 濃度 2.5% 以上により高品質のレーザが作製可能であることを示した。また波長 2 μm 帯 InGaAsSbN 量子井戸レーザに関しては、室温で波長 2.5 μm の EL 発光を観測するとともに 210 K で波長 2.3 μm のレーザ動作を実現した。しかし、研究構想の時点で目標とした、長波長 VCSEL の作製には至らなかった。

1.4 研究成果の社会的インパクト等

チーム全体として、成果の外部発表、特にこの研究分野でレベルの高い国際会議へ積極的に投稿し、多くが口頭発表として採択された。平成 19 年 8 月末までに、学術誌に 42 編、国際会議 75 件、口頭発表等 87 件、特許出願 8 件に及んだ。この研究成果により、研究代表者が 2006 年 9 月 20 日電子情報通信学会フェロー(半導体光非線形機能デバイスに関する先駆的研究)に選ばれた。又、時空間変換光制御方式研究グループは、2006 年 7 月 6 日、OECC 2006 Student Paper Award を OECC (The 11th OptoElectronics and Communications Conference) から受賞、2006 年 9 月 20 日に ELEX Best Paper Award in the year 2005 を電子情報通信学会エレクトロニクスソサイエティから受賞した。又、光データ処理研究グループは、2007 年 6 月、Best Paper Award を COIN/ACOFT 2007 (Conference on Optical Internet / Australian Conference on Fiber Technology 2007) から受賞した。

以上のように、この 5 年間のプロジェクトを通じて、世界に向けて多くの新しい知見を発信し、世界でも数少ない光バッファメモリ等全光型信号処理デバイスの研究拠点としての地位を固めることが出来たと自負している。

2 研究構想及び実施体制

(1) 研究構想

A. 研究の背景

現状の光ファイバ通信システムは、キャリア周波数が 200THz という光の特性をまだ十分には活用していない。今後の情報量の増大に応えるためには、より一層の超高速光通信システムの開発が望まれているが、その超高速化のためには信号処理も光が行う全光化が期待されている。一方、複数の光ファイバの収容、及びファイバ相互で信号の収束分配を行うノードにおける信号処理量の増大が問題になってきている。IP トラフィックをできる限り効率的に処理するために信号処理の更なる高度化が求められている。現状のネットワークにおける IP パケットのルーティング等の信号処理は、ルータ等において電氣的に行われている。しかし、電氣的な処理では、その速度限界によって大容量化が難しいこと、及び中継のたびに電気光信号変換が必要になるためコスト増を招く等の欠点がある。最終的には、光信号のまま IP パケット毎にルーティング処理を行うルータ、即ちフォトニックパケットルータをベースとしたオールオプティカルネットワークの実現が期待される。図1に示すように光信号は、途中のノードにおいても電気信号に変換されることなく、光信号のまま受信端に届けられる。ルータには、IP 単位でのスイッチ機能とパケットの衝突防止のためのメモリ機能が不可欠であり、これらをフォトニック技術によって実現することが課題である。本ネットワークは、内部での光電気変換、及び電氣的な信号処理が不要であるため、システム構成がシンプルになり、経済的かつ超大容量のネットワークが実現できる可能性がある。

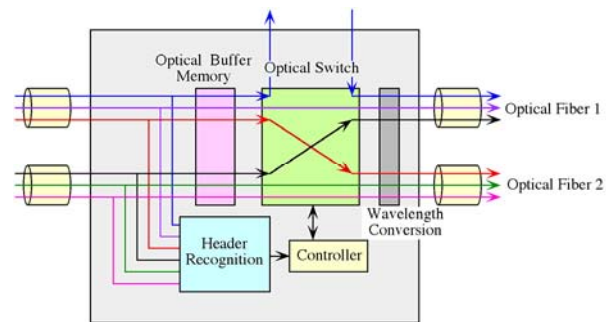


図1. 光パケットスイッチノード

従来、ファイバ遅延線バッファメモリを用いることが提案されているが、各ビット毎の制御や必要なタイミングに情報を読み出すことが困難であった。このような困難を解決し、現在存在する技術を用いて、パケット交換を行おうとする試みも始まっている。例えば、時系列信号を空間並列信号に変換した後、各チャンネル毎に分岐し、全てのチャンネルの信号をそれぞれ受光器で受け、電気信号に変換した後、処理しようとするものである。いずれ原理確認はなされると思われるがその構成法が極めて複雑であるため、多くの困難が予想される。従って、これまでフォトニックネットワーク技術では是非必要と言われながらも実現されてこなかった、全光パケットメモリが比較的容易な方法で実現されれば、フォトニックネットワークの構成を基本的に変えるほど大きな波及効果、インパクトをもつ。

B. 研究の目標

本研究の研究代表者によって世界で初めて実現された、双安定半導体レーザは小さな入力光で動作すること、光利得をもつことなどの優れた点はあるものの、スイッチング速度が 5 Gbit/s 程度に限られていた。しかし、ここ数年の間に状況は大きく変化し、本研究の研究代表者らが1992年に見いだしたピッチフォーク型偏光双安定性を用いれば、 100 Gbit/s 以上の動作が可能ながわかった。面発光半導体レーザには偏光が直交する2つの固有モードがあり、その間でピッチフォーク型双安定性を示す。面発光半導体レーザの発振偏光と直交する偏光の光パルスを送り込みとして入射すると、入射光と同じ偏光にスイッチし、トリガ光がなくなってもその状態を維持することによりフリップ・フロップ動作が得られる。

本研究では、光信号を電気信号に変換することなく、時系列の光信号を偏光双安定面発光半導体レーザアレイの各レーザに1ビットずつ記録し、必要なタイミングにあわせ時系列信号として記録信号を読み出すことができる光バッファメモリの実現をめざす。本研究期間の終了時である平成

19 年度秋までに、2次元アレイ偏光双安定面発光半導体レーザを用い、複数個の光パルスに対する光バッファメモリ動作の原理確認を実現することを目指す。又、シフトレジスタ機能の原理確認を行う。さらに、時間多重における光信号のタイミング調整用光バッファメモリとしての動作を実現する。この超高速光メモリの研究を実施する過程で、長波長面発光半導体レーザの開発や、光パケットスイッチングに必要な光ヘッダ識別回路、時空間変換型光パケット生成・転送技術の実現もはかる。

将来は、1つの面発光半導体レーザを $100\ \mu\text{A}$ 程度の動作電流で励起できるものと予想される。1つのチップの放熱限界を 10 W とすると、約 1000×100 個の VCSEL アレイに 100 kbits の光パケットのメモリが可能になるものと期待される。

C. 研究計画の概要

本研究では図 2 に示す様なANDゲート動作およびメモリ動作を行う複数個の双安定半導体レーザを用いて、光信号を電気信号に変換することなく全光型で、時系列の光信号を各双安定半導体レーザに 1 ビットずつ記録し、必要なタイミングにあわせ時系列信号として記録信号を読み出すことができる、双安定半導体レーザを用いた超高速光メモリを実現することを第一の目的とする。まず、偏光双安定面発光半導体レーザアレイ(以下、面発光半導体レーザを VCSEL と省略することがある)への信号の書き込みについて説明する。最初に紙面に垂直方向に電場をもつ(90° 光と呼ぶ)リセット光を入射することにより、各偏光双安定面発光半導体レーザの発振偏光は紙面に垂直(90° 光)にリセットされる。図に示すように、超高速の時系列光信号にはヘッダが付与されている。紙面内に偏光した(0° 光と呼ぶ)光時系列信号は光時系列信号→光空間並列信号変換器により変換され、1 ビットごとに異なる偏光双安定面発光半導体レーザに注入される。次に、光信号が VCSEL に到達した時に 0° 偏光のセット光が、ヘッダからの信号により VCSEL に入射される。VCSEL の偏光は信号光のみではスイッチしないが、セット光と信号光が同時に入射した時には、 90° 光から 0° 光にスイッチする。従って、図 2 に示すように、セット光が入射された時 VCSEL 内に注入されている‘1’、‘0’信号が VCSEL の発振偏光として記録される。

記録の読み出しは、次のように行われる。VCSEL からは‘1’、‘0’信号に従って 0° 偏光と 90° 偏光のレーザ発振光が連続的(CW)に出射されている。検光子により 0° 偏光のみを通過させ、光ゲート素子に入射される。次にゲート光パルスを光ゲート素子に入射し、VCSEL からの CW 光を通過さ

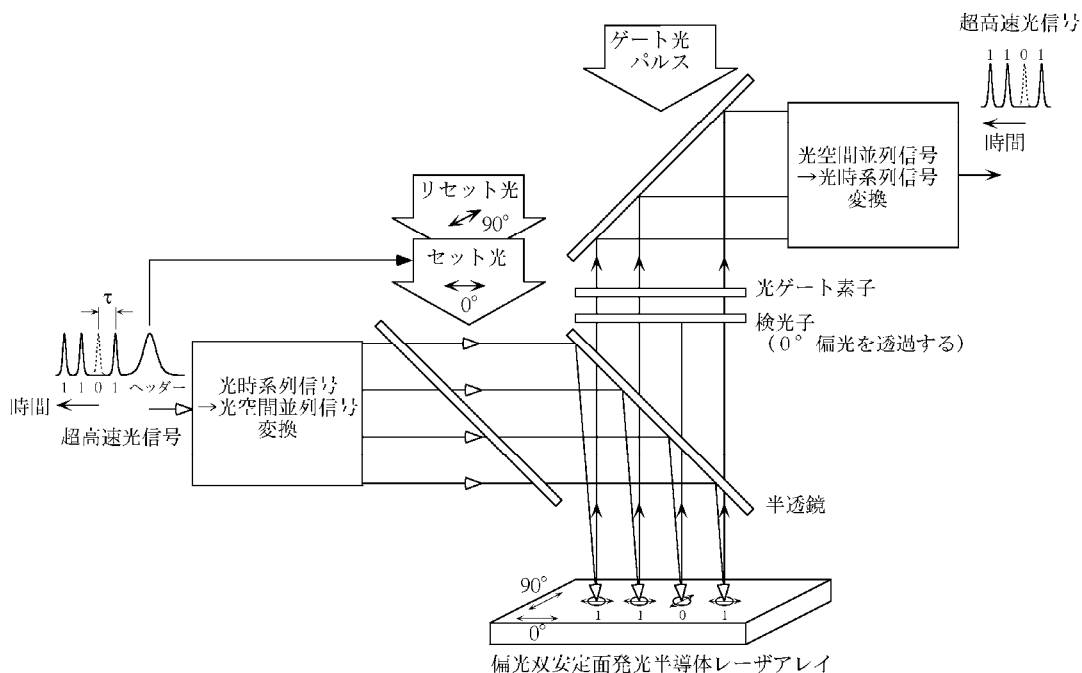


図2. 光パケットスイッチング用光バッファメモリの構成法

せパルス光として切り出す。次に光空間並列信号→光時系列信号変換器により、光パルスを時系列に並べる。以上により光パケット単位でメモリし、必要な時に光パケット単位で読み出すことができるようになる。

この光パケットメモリでは、光時系列信号／光空間並列信号変換装置の入出力ポートがビット数だけ必要になり、ビット数が増加すると構成上大きな問題になる。いくつかの双安定半導体レーザに記録されている信号を別の双安定半導体レーザへ一括転送し、記録する光シフトレジスタ機能を持たせることにより、この問題の解決をはかる。

この研究を実施するにあたり以下の項目を主に検討する。

- ① 偏光双安定面発光半導体レーザアレイの作製と偏光双安定性の実現を最優先項目とする。
- ② 光時系列信号／光空間並列信号変換装置の研究
- ③ 超高速光ゲートの研究
- ④ 光パケットスイッチング用光バッファメモリ構成法の研究
- ⑤ シフトレジスタ機能の構成法の研究
- ⑥ 光ヘッダ識別回路の研究
- ⑦ 時間多重における光信号のタイミング調整用光バッファメモリの構成法の研究

研究の主なスケジュールを以下の表に示す。

項目	平成 14 年度 (5 ヶ月)	平成 15 年度	平成 16 年度	平成 17 年度	平成 18 年度	平成 19 年度 (7 ヶ月)
GaAs 系面発光レーザの作製と偏光双安定実現	←	→				
光バッファメモリ構成法の検討		←	→			
シフトレジスタ機能付加				←	→	
光ヘッダ識別の基本動作確認	←	→				
光ゲートとの連動機能の研究			←	→		
時空間変換型光パケット生成方式の検討	←	→				
全光パケットヘッダ認識方式の検討				←	→	
GaInAsSb 系レーザ用結晶成長の研究	←	→				
GaInAsSbN 系レーザ用結晶成長の研究				←	→	
まとめ						↔

D. 研究グループの役割分担

D-1 超高速光メモリ研究グループ(平成 14 年度～17 年度 山形大学工学部、平成 18 年度～19 年度奈良先端科学技術大学院大学)

今後の情報量の増大に応えるためには、より一層高速な光通信システムの開発が望まれている。その超高速化のためには信号処理も光が行う全光化、とりわけ、全光型でのパケット単位のルーティング技術の実現が期待されている。本研究では、これまで必要とされながらも、その実現が困難であった全光型超高速光パケットメモリを研究する。時系列の光信号を空間光並列信号に変換し、二次元アレイ偏光双安定面発光半導体レーザの各レーザに 1 ビットずつ記録し、必要なタイミングにあわせ時系列信号として記録信号を読み出すことができる全光型超高速光パケットメモリを実現する。又時系列光信号の空間光並列信号への変換および逆の変換はビット数が多くなると構成が大がかりになるが、これを解決するため、偏光双安定面発光半導体レーザの二次元アレイ内で信号が転送・記録できるシフトレジスタ機能付光パケットメモリを開発する。さらに、時間多重における光信号のタイミング調整用光バッファメモリも研究する。

D-2 光データ処理研究グループ(東京工業大学 精密工学研究所 マイクロシステム研究センター)

本分担研究項目では、光レベルでのデジタル・アナログ変換を用いたラベル情報の高速な識別処理と、光デジタル・アナログ変換器の半導体集積化の研究を実施する。超高速光パケットの宛先情報であるラベル処理には、高速であると同時に低消費電力化や素子の小型化が要求される。電子回路の高速化に頼る方法は高速化に伴う消費電力増大の問題が顕在化しており、低消費動作が可能なパッシブ光素子を用いることが問題解決手段として期待される。また少ない素子数で多くのラベル情報を処理する必要性から、異なるラベルパターンを並列に並べて符号の相関処理を行う手法よりもシリアルデータを用いる方が低消費動作・小型化に有利である。そこで本研究項目では、光デジタル・アナログ変換手法を用いてラベルを識別する手法を確立するとともに、素子の半導体集積化による小型化の実現を目的とする。

(a) 半導体光デジタル・アナログ変換器の作製と特性評価

半導体ハイメサ導波路構造により光デジタル・アナログ変換器を設計し、素子を作製する。また作製した素子の基本動作の確認を行い、波長や作製誤差など特性に影響する各種パラメータに求められる精度を解析する。

(b) 光デジタル・アナログ変換型ラベル識別手法の検討

光レベルでのデジタル・アナログ変換によりシリアルデータ系列のラベル処理を行う構成を提案し、その動作を実証する。非同期な入力光パケットからラベル処理に必要なゲート信号を生成する手法や入力光のレベルを等化する回路を導入し、光パケットスイッチの構築に展開する。

D-3 時空間変換光制御方式研究グループ(慶応義塾大学)

本分担研究項目では、時空間変換光信号処理に基づく光パケット生成・転送方式の研究を実施する。超大容量の光パケット伝送には、極めて短い光パルスで構成される光パケットを利用するため、ビットレートは電気信号処理速度の上限を必然的に超える。このため、何らかの光レベルでのシリアル→パラレル変換技術を併用することが不可欠である。本研究項目では、高性能な時空間変換回路の設計・製造技術を確立し、時空間変換光信号処理技術を用いることによってシリアル→パラレル変換を行い、超短パルスで構成される光パケットの生成、光パケットヘッダのアドレス情報の解析、及びアダプティブなルーティング処理のための基本技術を確立することを目的とする。

(a) 時空間変換型光パケット生成方式の検討

時空間変換処理用の光デバイス技術の確立に注力する。ビット数の多い光パルス列を操作するために、時空間変換処理を行うアレイ導波路回折格子を高分解能化するための設計・製作方法を検討する。光パルスシンセサイザを用いて光パケット生成に関する基本技術を確認し、光パケット用ヘッダ生成回路の設計を実施する。

(b) 全光パケットヘッダ認識方式の検討

光パケットヘッダ用固定光符号生成回路の試作と符号化／復号化検証、高速ハイブリッド光符号生成回路の構築、ビット数をさらに増大することが可能な超高分解能アレイ導波路回折格子の設計・試作を実施する。

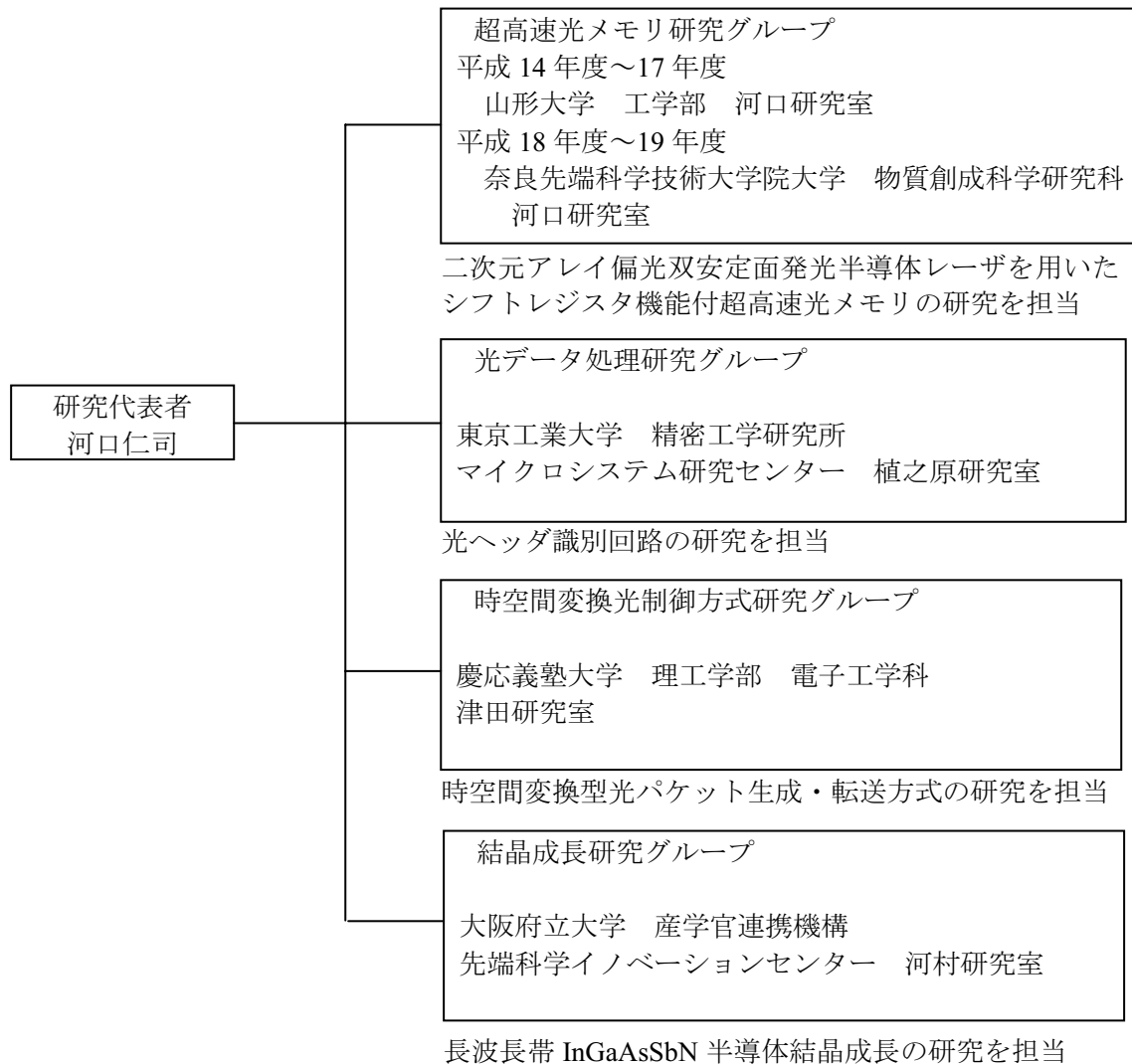
D-4 結晶成長研究グループ(大阪府立大学 産学官連携機構 先端科学イノベーションセンター)

本研究は、光通信用の新しい材料として注目されている InGaAsSbN 系化合物半導体結晶を、原子レベルでの制御が可能である分子線結晶成長法(MBE)を用いて作製し、その物性を解明するとともに、InGaAsSbN 層を活性層とした GaAs 基板上の波長 1.3 μm 帯の高性能面発光レーザの実現を目標として設定した。研究開始後、GaAs 基板上の成長のみでなく、InP 基板上の InGaAsSbN 層の成長も試みた結果、波長 2～3 μm 帯光デバイスへ応用可能であることが明らかとなった。

研究開始後の主な研究計画の変更点

- 研究開始当初、結晶成長研究グループは GaInAsSb 系成長を検討した後 GaInAsSbN 系に移行する予定であったが、成長の準備が予定より早期にでき、始めから InGaAsSbN 系の成長を行った。
- 超高速光メモリ研究グループは当初 VCSEL の作製は 980 nm 帯 VCSEL に限る予定であったが、1.55 μm 帯 VCSEL の実現を急ぐため、ウエハ接合法による 1.55 μm 帯 VCSEL 作製の検討を行った。又、最終期に 1.55 μm 帯 VCSEL 試作を RayCan 社で行った。

(2)実施体制



3 研究実施内容及び成果

3.1 二次元アレイ偏光双安定面発光半導体レーザを用いたシフトレジスタ機能付超高速光メモリの研究(奈良先端科学技術大学院大学 超高速光メモリ研究グループ)

(1)研究実施内容及び成果

A. VCSEL における偏光双安定性とその起源

超高速光通信の研究開発がペタビット(10^{15} bit/s)ネットワークの構築にむけて活発になっている。電子回路は 100 Gbit/s あたりに速度限界があるとみられることから、それを超える領域の開拓に向けて、光パルスを光のまま多重化する光時分割多重(OTDM)技術の研究が行われている。その中では、光信号を直接光で制御する全光型信号処理が必要である。さらに将来の技術として、光パケット通信の実現が期待されている。光パケットメモリとして、ファイバ遅延線バッファメモリが提案され種々の実験が行われているが、各ビット毎の制御や必要なタイミングに情報を読み出すことが困難である。従って全く新しい技術の創生が必要とされている。

光導波路が正方形の断面形状をもつ面発光半導体レーザ (Vertical-Cavity Surface-Emitting Laser: VCSEL) には、電界方向が正方形の辺に沿う2つの固有モードが存在する(図 3)が、この2つのモードは利得飽和を通して強結合し、履歴に依存したどちらか一方の偏光で発振する双安定性が生じる。光パルスを外部から入射すると、入射パルス光と同一偏光のモードにスイッチし、入射パルスがなくなった後もスイッチした偏光を保持する偏光双安定光メモリが実現できる。本 CREST 研究を開始する以前に我々が測定した結果から、偏光のスイッチング速度は約 7 ps であり、これまでに報告されている半導体レーザをベースにした光双安定素子の中で、最も高速にスイッチングできることがわかっていた。

偏光双安定性の起源は次の様に考えられる。光導波路が正方形の断面形状をもつ VCSEL には、電界方向が正方形の辺にそって2つの固有モードが存在する。2つの発振モードは、利得飽和を通して結合することから、自己利得飽和係数と相互利得飽和係数の大小関係が双安定性を得る上で重要になる。2つのモードをそれぞれ h モードと v モードと名づければ、自己利得飽和係数(ϵ_{sh} , ϵ_{sv})と相互利得飽和係数(ϵ_{xhv} , ϵ_{xvh})の間に、 $\epsilon_{xhv} \epsilon_{xvh} > \epsilon_{sh} \epsilon_{sv}$ の関係にあるとき、2つのモードは強結合し双安定性を示す。図4にこの場合の電流-光出力特性を模式的に示す。VCSEL に流す電流がしきい値電流 I_{th} をこすと、2つのモードで同時にレーザ発振する。さらに電流を増加すると、ある電流値 I_b で h モードが強くなり v モードが抑圧され、ピッチフォーク型の分岐(pitchfork bifurcation bistability)を示す。これを枝(branch)A と呼ぶ。 I_b 以上にバイアス電流を設定し、外部からモード v と同じ偏光をもつ光パルスを入射すると、モード v

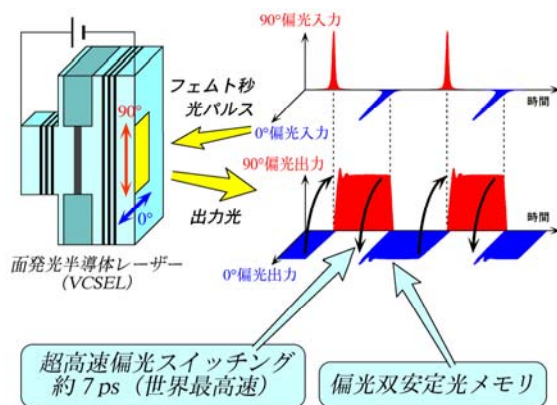


図3. 面発光半導体レーザの偏光双安定スイッチング

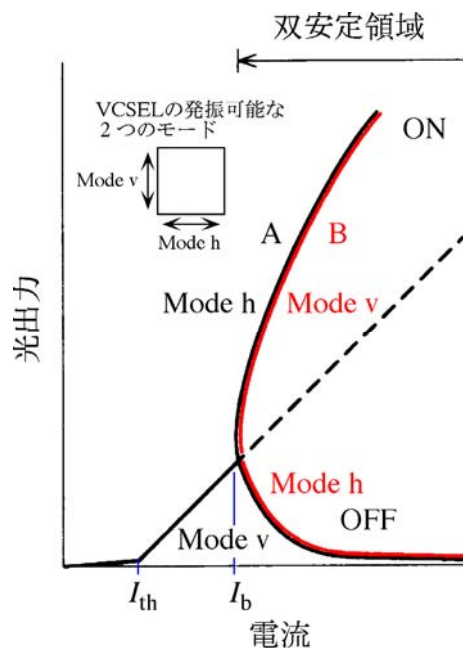


図4. ピッチフォーク型偏光双安定性をもつ VCSEL の電流-光出力特性

が発振し、モード h が抑圧され、発振モードはモード h からモード v へ切り換わる。外部からの光パルスの入射がとまってもモード v で発振しつづける。これを枝 B と呼ぶ。つまりレーザは枝 A と枝 B の間で双安定性を示す。一方、 $\epsilon_{xhv} \epsilon_{xvh} < \epsilon_{sh} \epsilon_{sv}$ の場合には、2つのモードで同時発振する。

自己利得飽和係数と相互利得飽和係数を、InGaAsP/InP VCSEL について求めた。固有モードとして、電界ベクトルが $[110]$ 方向と $[1\bar{1}0]$ 方向の偏光が直交する2つのモードを考え、 h モード、 v モードとし、バルク活性層をもつ VCSEL では、広い波長域にわたって双安定の条件 ($\epsilon_{xhv} \epsilon_{xvh} > \epsilon_{sh} \epsilon_{sv}$) を満足することがわかった。量子井戸 VCSEL の場合には、電子と重い正孔の間の遷移に対応する波長付近で $\epsilon_{xhv} \epsilon_{xvh}$ と $\epsilon_{sv} \epsilon_{sh}$ の差が大きくなり、この波長域では、より一層偏光双安定性が得られやすい。又、歪量子井戸構造活性層の場合にも双安定条件が満足されることがわかった。

B. 980 nm 帯偏光双安定 VCSEL の作製

本 CREST 研究開始までは、メーカで試作した VCSEL を用いて偏光双安定について研究を行ってきた。本 CREST 研究により、光バッファメモリを実現するため、偏光双安定 VCSEL の2次元アレイを自作した。図 5 に示すように、一方の DBR 共振器を正方形のメサ構造に高密度プラズマ反応性イオンエッチング (Inductively-Coupled-Plasma Reactive-Ion-Etching: ICP RIE) を用いて加工し、このメサをポリイミドで埋め込む簡単な構造である。

図 6 に示すように、偏光分解電流－光出力特性に双安定スイッチング特性を得た。図 7 に、偏光子を通して赤外カメラで撮影した偏光分解近視野像を示す。素子温度は 10°C であり、電流－光出力特性にヒステリシスが見られ、ヒステリシス内である 7 mA に電流を設定した。近視野像は、両偏光状態共にメサ形状と同程度の大きさの単一スポットであり、単一横モード発振が得られていることがわかる。図 8 に、偏光分解発光スペクトルの測定結果を示す。図 7 と同様に素子温度は 10°C であり、ヒステリシス内である 7 mA に電流を設定した。発振波長の短波長側のピークは高次の横モードと考えられるが、 34 dB のサイドモード抑圧比 (SMSR) が得られており、両偏光状態共にほぼ単一波長動作と言える。また、両偏光状態共に偏波消光比は 23 dB であり、ほぼ直線偏光と言える。

図 9 に示すように光入力によるフリップ・フロップ動作も実現した。自作が可能になったことから、将来一層の高速化や低消費電力化の検討が可能になった。又、偏光双安定性は VCSEL では極めて一般性のある特性であり、2つの直交偏光でレーザ発振が可能のように設計すれば、VCSEL の構造や作製プロセスによらず一般的に得られることが実験的にも明らかになった。

図 9 に示すように光入力によるフリップ・フロップ動作も実現した。自作が可能になったことから、将来一層の高速化や低消費電力化の検討が可能になった。又、偏光双安定性は VCSEL では極めて一般性のある特性であり、2つの直交偏光でレーザ発振が可能のように設計すれば、VCSEL の構造や作製プロセスによらず一般的に得られることが実験的にも明らかになった。

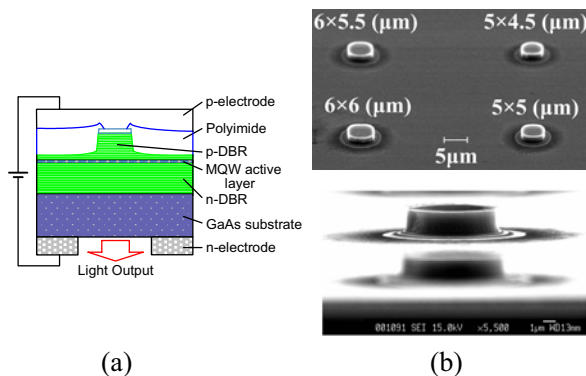


図5. 偏光双安定 VCSEL の構造(a)およびメサ構造の SEM 写真(b)

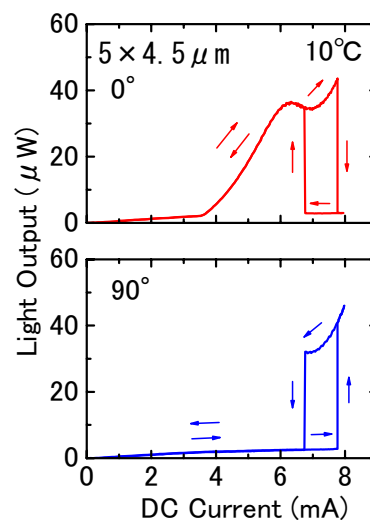
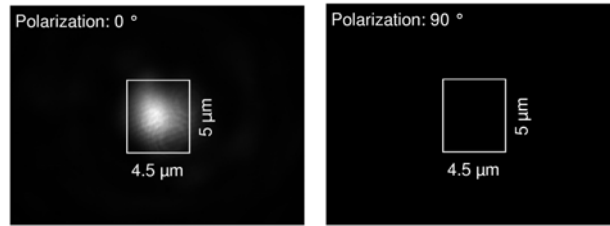
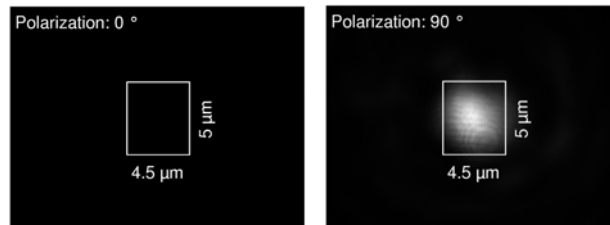


図6. 偏光分解電流－光出力特性の実験結果

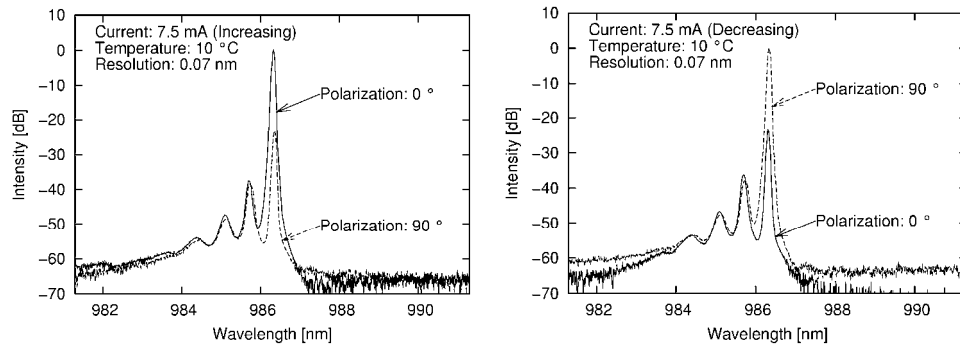


(a) 電流増加時

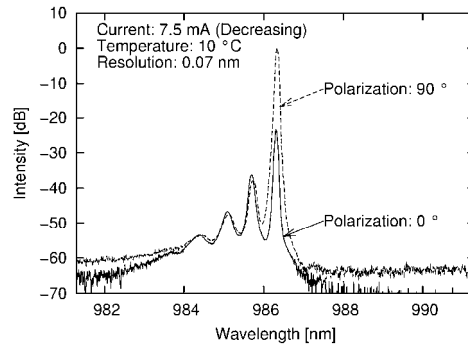


(b) 電流減少時

図7. 偏光分解近視野像(電流 7 mA)



(a) 電流増加時



(b) 電流減少時

図8. 偏光分解発光スペクトル(電流 7 mA)

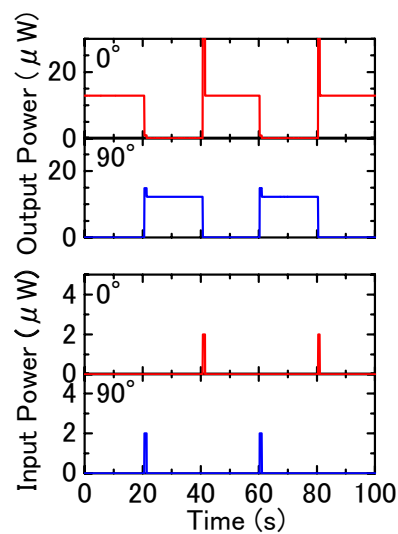


図9. 全光型フリップ・フロップ動作の実験結果

C. 偏光双安定 VCSEL のスイッチング特性

VCSEL の発振偏光が、光入力
の偏光と同一の偏光にスイッチし、保持
されることから、全光型フリップ・フロ
ップ動作が実現できる。VCSEL におい
て、偏光が直交する2つのモードは発
振周波数が数 GHz 異なるのが一般
的である。従って、 0° モードから 90° モ
ードへスイッチする場合と、 90° モード
から 0° モードへスイッチする場合、注
入光の波長をそれぞれ最適化すること
により、極めて小さな光入力でフリ
ップ・フロップ動作を実現することが
できることがわかった。

偏光双安定スイッチングが生ずる
最小スイッチングパワーの注入光波
長離調特性を図 10 に示す。横軸の
離調周波数は、VCSEL の 90° 偏光の
発振波長を基準とした注入光波長の
相対周波数である。■印は 0° から 90° への偏光スイッチングが生ずる最小の 90° 偏光の注入光パ
ワーを示し、●印は 90° から 0° への偏光スイッチングが生ずる最小の 0° 偏光の注入光パワーを示す。
□印および○印は偏光双安定スイッチングが得られなかったことを示す。なお、この VCSEL の 0°
偏光の発振波長は 90° 偏光より約 4 GHz 短波長に位置する。注入光の波長離調特性は VCSEL
の発振波長に対応しているが、非対称であり長波長側にシフトしている。これは光注入による活性
層の屈折率の増加によるものと考えられる。

図 11(a)に一例を示すように、540 MHz のくり返しでは、0.2~0.3 fJ という極めて小さな光入力で
安定なフリップ・フロップ動作が可能である。この値は、我々の知る限り、双安定半導体レーザでの
最小スイッチングエネルギーである。又、図 11(b)に示すように双安定半導体レーザでは最高速で
あるくり返し 10 GHz までの動作を確認した。図 12 に示すように、くり返し周波数を上げていくとスイ
ッチングパワーは上昇する。1996 年に我々が報告した、くり返しの遅い (80MHz) ピコ秒光パルスに
よるスイッチング速度とスイッチングパワーも比較のため図 12 に示している。

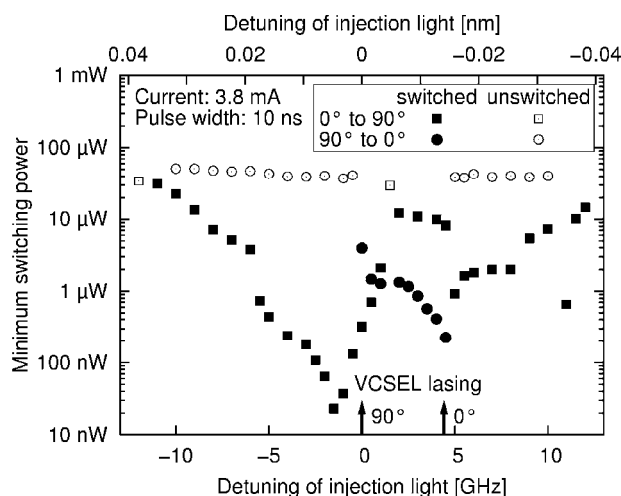


図10. 偏光双安定スイッチングが生ずる最小スイッ
チングパワーの注入光波長離調特性

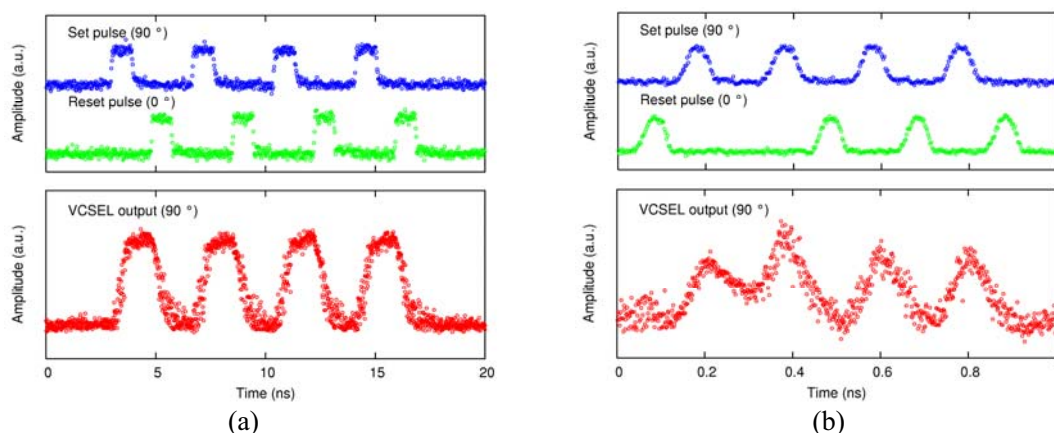


図 11. 全光型フリップ・フロップ動作

(a) 小さなエネルギーの光パルスによる動作 (セットパルス: 0.2 fJ、リセットパルス: 0.3 fJ).

(b) 高くり返し動作 (10 GHz)

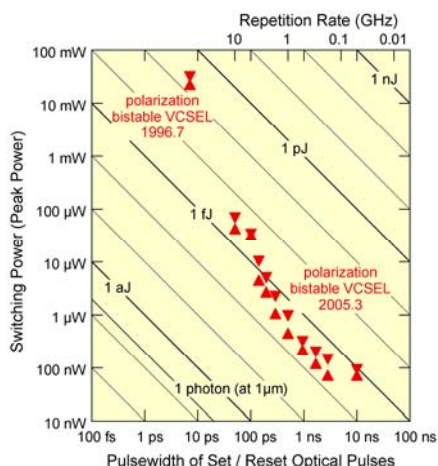


図 12. スwitchングに必要な最小光パワーの
パルス幅依存性

D. 偏光双安定スイッチングと注入同期

C で述べたように、偏光双安定スイッチングは、外部から VCSEL の発振波長に近い波長をもつ光を注入することによって得る。従って、注入光と VCSEL の発振光が同一偏光になったとき注入同期が生ずるかどうかは興味深い問題である。偏光双安定スイッチングが注入同期を常に伴うかどうか確認するために、偏光双安定スイッチング動作中の動的な発振波長変化をヘテロダイン検波により測定した。使用した VCSEL は、プロトン照射狭窄により電流閉じ込めを行なった 980 nm 帯 VCSEL である。実験の構成を図 13 に示す。外部共振器付 LD の出力光を LN 変調器でパルス化し、 0° および 90° の直線偏光に変換して VCSEL に注入し、偏光双安定スイッチングを行なった。それと同時に VCSEL 出力光の 90° 偏光成分と Set 光を偏波を合わせて合波し、APD で受光してビート信号を広帯域オシロスコープ (Agilent DSO81004A) で測定した。

図 14 は、注入同期が生ずる最小の CW 注入光パワーの波長離調特性を示す。注入同期は、発振波長が注入光波長に引き込まれる現象であり、注入光と発振光のビート信号が消失した時、注入同期が生じたと判断した。横軸の離調周波数は、図 10 と同様に VCSEL の 90° 偏光の発振波長を基準とした注入光波長の相対周波数である。▲印は注入同期が生ずる最小の 90° 偏光の注入光パワーを示し、▼印は注入同期が生ずる最小の 0° 偏光の注入光パワーを示す。

図 10 と図 14 を比較すると、 $90^\circ \rightarrow 0^\circ$ の最小スイッチングパワーは 0° 偏光の最小注入同期パワーと同程度もしくはそれ以上であるため、 $90^\circ \rightarrow 0^\circ$ の偏光スイッチングは 0° 偏光の注入同期を伴って生ずる。一方、 $0^\circ \rightarrow 90^\circ$ の最小スイッチングパワーは $-1 \sim -6$ GHz の離調周波数において 90° 偏光の最小注入同期パワーよりもかなり小さいため、 90° 偏光の注入同期を伴わずに $0^\circ \rightarrow 90^\circ$

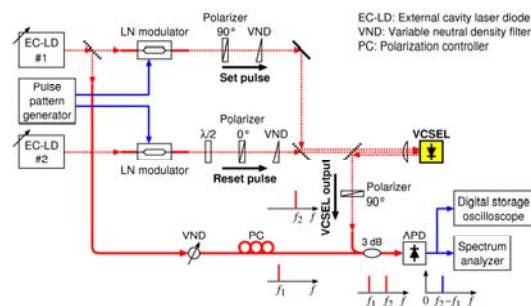


図 13. 偏光双安定スイッチングにより生ずる
VCSEL の発振波長変化の測定系

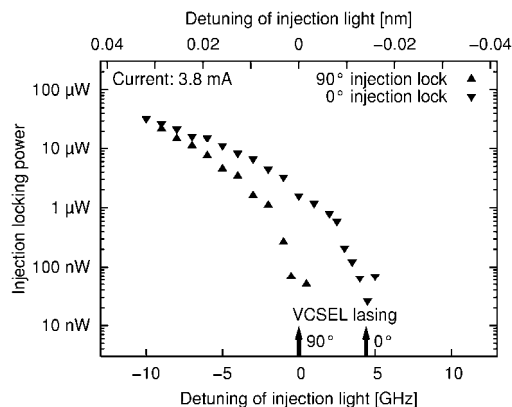


図 14. 注入同期が生ずる最小光入力
の離調依存性

の偏光スイッチングが可能である。従って、偏光双安定スイッチングに注入同期は必須ではないと言える。

図 15 は、偏光双安定スイッチング時のビート信号を離散フーリエ変換して、VCSEL の 90° 偏光発振光のスペクトログラム(スペクトルの時間変化)を求めた結果である。スペクトログラムの周波数分解能と時間分解能は、離散フーリエ変換の時間窓によって決まり、図 15 ではそれぞれ 0.41 GHz と 1.2 ns である。Set 光は 90° 偏光の VCSEL 発振光より約 3.5 GHz 長波長に設定しており、光注入無しの 90° 偏光発振状態(フリーラン)では約 3.5 GHz のビート信号が見られる。Set 光を注入している時、図 15(d) では VCSEL の発振波長が Set 光に引き込まれてビートが消失し、図 15(e)では VCSEL の発振波長がフリーランより約 0.8 GHz 低周波側にシフトしている。従って、注入光パワーが大きい場合は注入同期を伴い、注入光パワーが小さい場合は注入同期を伴わずに偏光双安定スイッチングが得られ、注入同期が生じなくても発振偏光が切り替わり得ることを直接確認した。

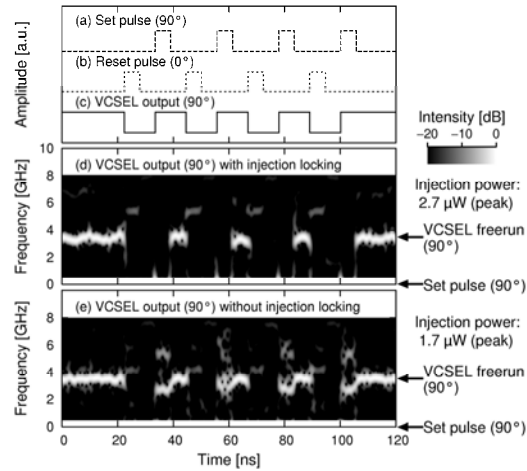


図 15. 偏光双安定スイッチングにより生じた VCSEL の発振波長の時間変化

E. 光バッファメモリ

E-1 動作原理と実証

全光型でのパケット単位のルーティング技術が必要とされている。AND ゲート動作およびメモリ動作を行う複数の偏光双安定面発光半導体レーザを用いて、光信号を電気信号に変換することなく全光型で、時系列の光信号を各双安定半導体レーザに 1 ビットずつ記録し、必要なタイミングにあわせ時系列信号として記録信号を読み出すことができる光バッファメモリの動作原理を図 16 に示す。VCSEL には、 0° と 90° の 2 つの発振偏光が存在する。 90° 偏光の入力データ信号と 90° 偏光の Set パルスを VCSEL (M_{1x}) に注入すると、データ信号と Set パルスが同時に注入された時にのみ VCSEL の発振偏光が 90° に切り替わり、Set パルスと同時に入射されたデータ信号の情報が発振偏光状態として記録される。VCSEL 出力光を 90° 方向の偏光子を通してゲートをかけると、記録された情

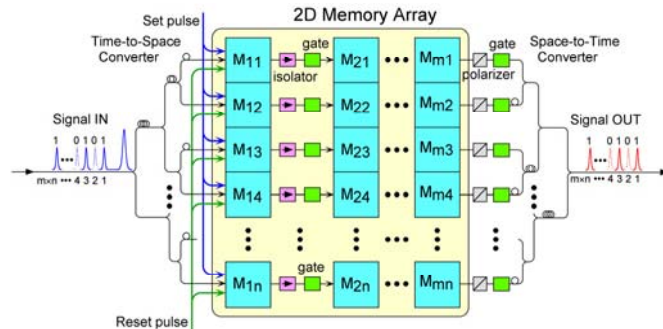


図 16. シフトレジスタ機能付光バッファメモリの概念図

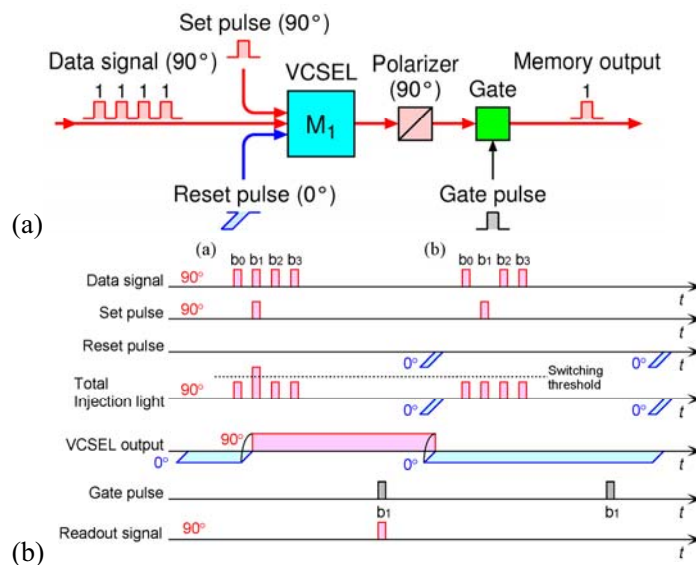


図 17. 1 ビット光バッファの構成(a)およびタイミングチャート(b)

報が再生される。この光信号を隣の VCSEL (M_{2x}) に入力すると、 M_{1x} が記録していた情報が M_{2x} に転送される。その後 Reset パルスを VCSEL M_{1x} に注入し、VCSEL の発振偏光を 0° に戻す。転送動作をくり返すことにより M_{mx} から信号が再生される。

偏光双安定面発光半導体レーザを用い、1ビットの光バッファメモリ動作を実験的に確認した。

動作原理を図 17 に示す。前に述べたように、VCSEL には 0° と 90° の 2 つの発振偏光が存在する。 90° 偏光の入力データ信号と 90° 偏光の Set パルスを VCSEL に注入すると、データ信号と Set パルスが同時に注入された時のみ VCSEL の発振偏光が 90° に切り替わり、データ信号の b_1 の情報が発振偏光状態として記録される。VCSEL 出力光を 90° 方向の偏光子に通してゲートをかけると、記録された情報が再生される。再生後に Reset パルスを VCSEL に注入すると、VCSEL の発振偏光が 0° に戻る。

1 ビット光バッファメモリの実験系を図 18 に示す。外部共振器付 LD と LN 変調器を用いてデータ信号、Set パルス、Reset パルスを生成し、偏波コントローラで偏波を調整して VCSEL に注入した。VCSEL 出力光の 90° 偏光成分を抽出し、LN 変調器でパルス化したメモリ出力光の波形を測定した。

実験結果を図 19 に示す。入力データは前半が “1111” 後半が “1011” であり、2 ビット目に Set パルスのタイミングを合わせた。前半は VCSEL の発振偏光が 90° に切り替わりメモリ出力のパルス光が得られているのに対して、後半は発振偏光が 0° のままでパルス光が出力されていない。この結果から、4 ビットの入力信号から 1 ビットを抽出し記録/再生する基本動作を確認した。

E-2 10 Gbit/s 動作

10 Gbit/s RZ 信号に相当する、パルス幅 50 ps、パルス間隔 100 ps の 4 ビット光信号列の中から、1 ビット選択して記録し、再生するメモリ動作を実現した。図 20 に実験系を示す。外部共振器付 LD と LN 変調器を用いてデータ信号、Set パルス、Reset パルスを生成し、偏波コントローラによりデータ信号と Set パルスを 90° 偏光に、Reset パルスを 0° 偏光に調整して VCSEL に注入した。使用した VCSEL はメサ構造 980 nm 帯 VCSEL である。VCSEL 出力光の 90° 偏光成分を抽出し、LN 変調器でパルス化してメモリ出力光を作り

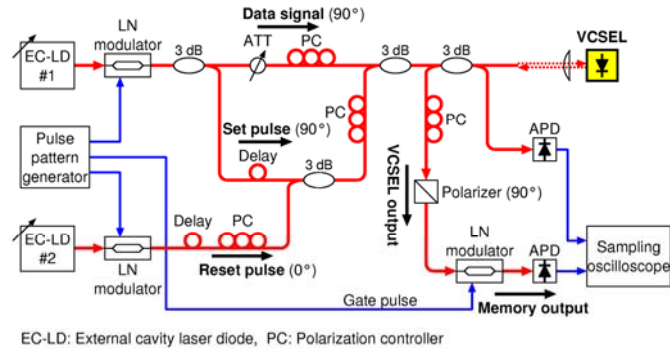


図 18. 1 ビット光バッファの実験系

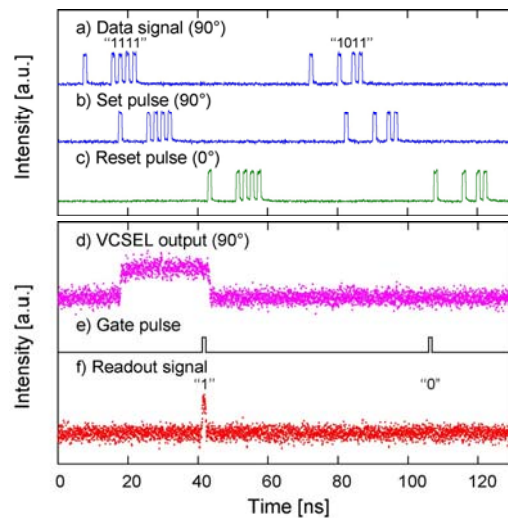


図 19. 1 ビット光バッファの実験結果

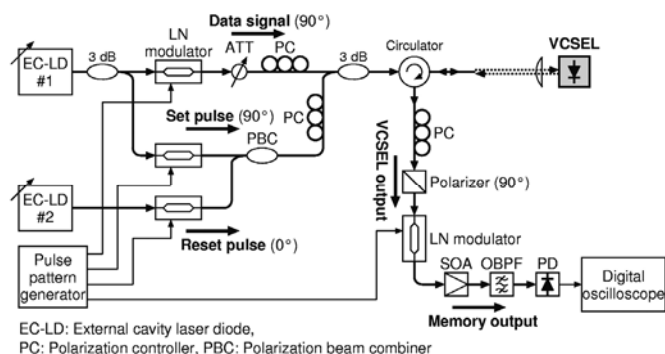


図 20. 10 Gbit/s RZ 信号の光バッファリングの測定系

その波形を測定した。

実験結果を図 21 に示す。注入光のピークパワーは、各々 $150\ \mu\text{W}$ (データ信号)、 $180\ \mu\text{W}$ (Set パルス)、 $270\ \mu\text{W}$ (Reset パルス) である。高速動作を実現するため、後に詳しく述べるように、注入光の波長は離調を約 $20\ \text{GHz}$ と大きく設定した。入力データは $10\ \text{Gbit/s}$ RZ 信号で、前半が “1111”、後半が “1011” であり、2 ビット目に Set パルスのタイミングを合わせた。前半は VCSEL の発振偏光が 90° に切り替わりメモリ出力のパルス光が得られているのに対して、後半は発振偏光が 0° のままでパルス光が出力されていない。この結果、4 ビットの入力信号から 1 ビットを抽出し記録/再生する 1 ビット光バッファメモリ動作を $10\ \text{Gbit/s}$ RZ 信号に対して確認した。

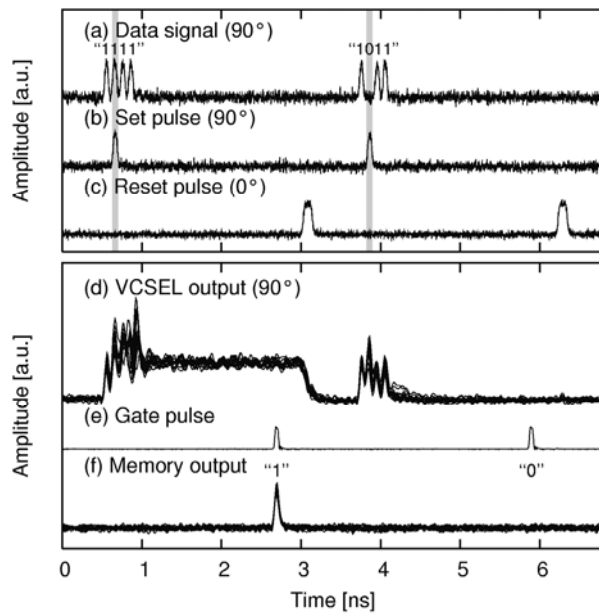


図 21. $10\ \text{Gbit/s}$ RZ 信号の光バッファリングの実験結果

C で述べた様に偏光双安定スイッチングに必要な最小光パワーは周波数離調に強く依存する。スイッチングの速度も周波数離調に依存すると考えられる。図 22 にスイッチング特性の離調依存性の実験結果を示す。データ信号は、速度が $10\ \text{Gbit/s}$ であり、前半は “0000 0000 0000 0001”、後半は “1111 1111 1111 1110” の符号をもつ。セットパルスは最後のビットに合わせて入力している。離調が $6\ \text{GHz}$ と小さい場合 (図 22(a)) には、データ信号とセットパルスの光パワーを $6\ \mu\text{W}$ および $7\ \mu\text{W}$ と設定した。一方、離調が $20\ \text{GHz}$ と大きい場合 (図 22(b)) では、 $150\ \mu\text{W}$ および $170\ \mu\text{W}$ に設定した。図に示した実験結果から、離調が小さい場合は、前半の AND 動作で偏光がスイッチせず、後半では連続するデータ信号のみにより偏光がスイッチする。一方、離調を大きくすることにより、高速動作が可能になり、前半では AND 動作により偏光がスイッチし、後半も誤動作はない。以上のように、離調を大きくすることによりスイッチングに必要な入力パワーは大きくなるが、 $50\ \text{ps}$ の

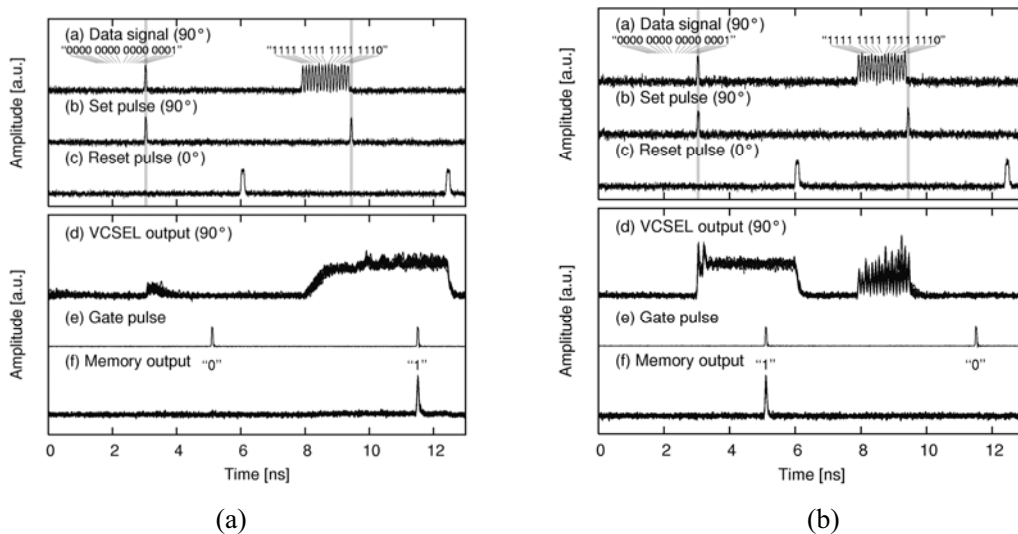


図 22. $10\ \text{Gbit/s}$ RZ 信号に対するスイッチング特性の離調依存性

(a) 離調 : $5\ \text{GHz}$ 、(b) 離調 : $20\ \text{GHz}$

パルス幅をもつ、10 Gbit/s RZ 信号の記録/再生に成功した。この高速動作においても、VCSEL の光出力パワーは、270 μ W であり、データ信号および Set パルスの光パワーを上まわっており、光利得をもつ動作が実現されている。

F. 光バッファメモリの多ビット化

F-1 2 ビット光メモリ動作

VCSEL を 2 個用いて、2 ビットの光バッファメモリ動作を実現した。図 23(a)に示すように、偏光双安定 VCSEL を 2 つ用意し、データ信号のタイミングを変えて Set パルスと共に 2 つの VCSEL に注入する。タイミングチャートを図 23(b)に示す。2 つの VCSEL は始めに 0°偏光で発振している。90°偏光の入力データ信号と 90°偏光のセットパルスを各々の VCSEL に注入すると、データ信号とセットパルスが同時に注入された時のみ VCSEL の発振偏光が 90°に切り替わり、データ信号の情報が発振偏光状態として記録される。2 ビットのメモリ動作を実現するため、入力信号を 2 つに分け、2 つの VCSEL (VCSEL1、VCSEL2) にそれぞれ注入した。入力信号には異なる時間遅延を与え、VCSEL1 では b_1 信号とセット信号が同時に入射され、VCSEL2 では b_2 信号とセット信号が同時に入射されるようにした。従って、VCSEL1 には b_1 信号が、VCSEL2 には b_2 信号が記録される。VCSEL 出力光を 90°方向の偏光子に通してゲートをかけると、記録された情報が各々の VCSEL

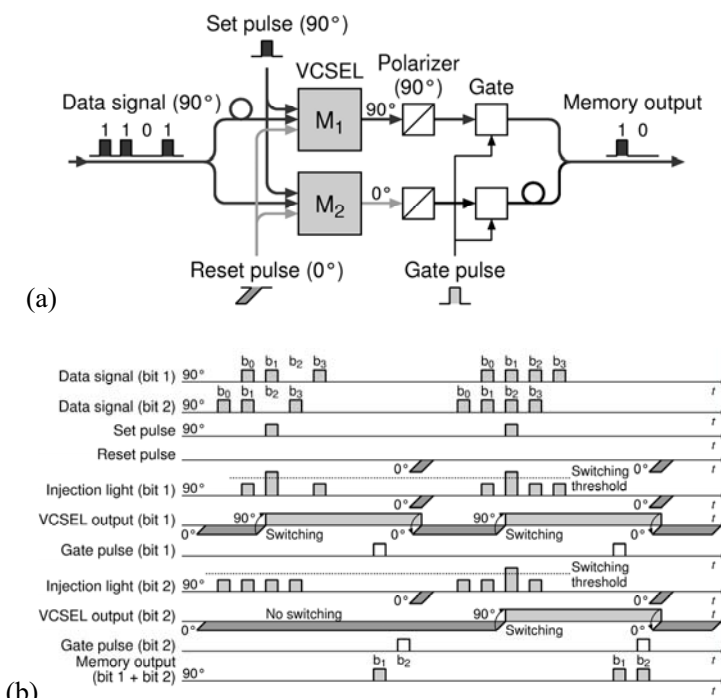


図 23. 2 ビット光バッファリングの構成(a)とタイミングチャート(b)

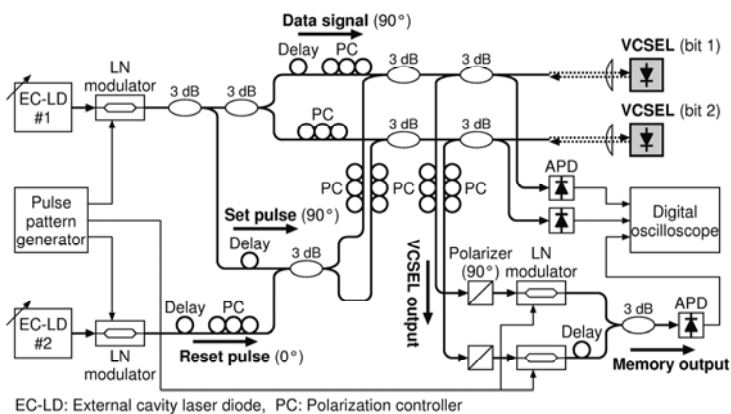


図 24. 2 ビット光バッファリングの実験系

から再生される。この 2 つの再生信号を遅延時間を合わせて合波することにより入力データ信号と同じ信号が得られる。再生後にリセットパルスを VCSEL に注入すると、VCSEL の発振偏光が 0°に戻る。

2 ビット光バッファメモリの実験の構成を図 24 に示す。外部共振器付 LD の出力光を LN 変調器でパルス化してデータ信号、Set パルス、Reset パルスを生成し、偏波を調整して 2 つの VCSEL に注入した。2 つの VCSEL の並列スイッチング動作を行うために、2 つの素子の温度を独立に調整して両 VCSEL の波長を合わせた。2 つの VCSEL 出力光を 90°方向の偏光子に通してパルス化および多重化してメモリ出力光を生成し、その波形を測定した。なお、1 ビット光バッファメモリの実験系

と比べて合波等の損失が増えるので、光出射側の DBR ミラーの層数を減らして高出力化した河川研究室作製のメサ構造 VCSEL を使用した。

実験結果を図 25 に示す。入力データは前半が“1101” 後半が“1111”であり、VCSEL1 では 2 ビット目に、VCSEL2 では 3 ビット目にセットパルスのタイミングを合わせた。従って、メモリ出力は“10” および“11”となる。又、図には示していないが、“00” および“01” 信号についても同様にメモリ動作を実現した。この結果から、4 ビットの入力信号から 2 ビットを抽出し、記録/再生する基本動作を確認した。

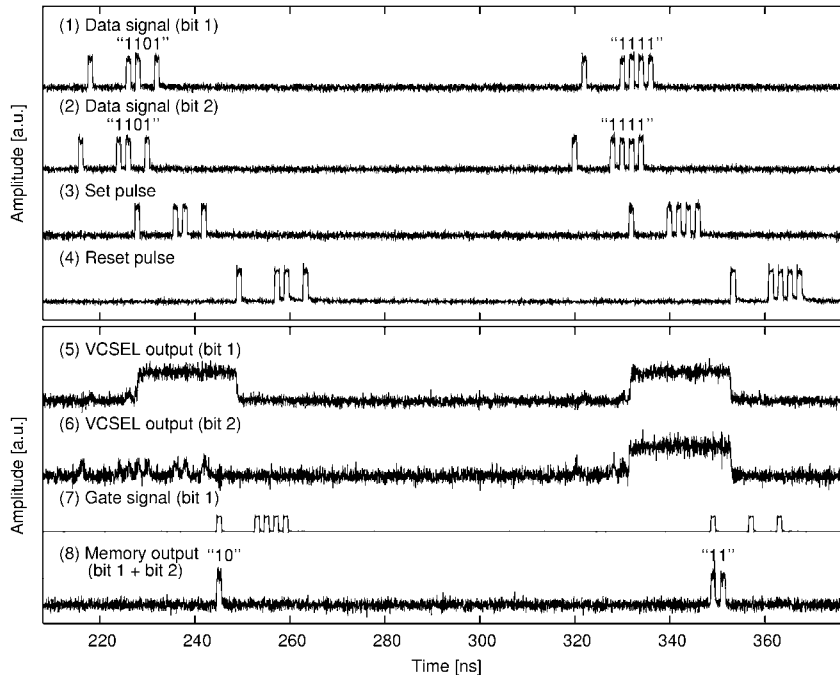


図 25. 2 ビット光バッファリングの実験結果

F-2 シフトレジスタ機能

E で述べた様に、光入力信号の“1”又は“0”は VCSEL の発振偏光として記録される。この VCSEL (VCSEL1) の発振光を 2 番目の VCSEL (VCSEL2) へ注入することにより、VCSEL2 の偏光をスイッチし、情報を転送することができる。この機能を我々はシフトレジスタ機能と呼んでいる。

2 つの方式によりシフトレジスタ機能を実現した。図 26(a)に示した消去後書き込み方式では、VCSEL2 から信号を読み出した後、リセット光で VCSEL2 の偏光を 0° にリセットする方法である。一方、図 26(b)に示した上書き方式では、VCSEL2 に VCSEL1 の発振光を注入することにより、

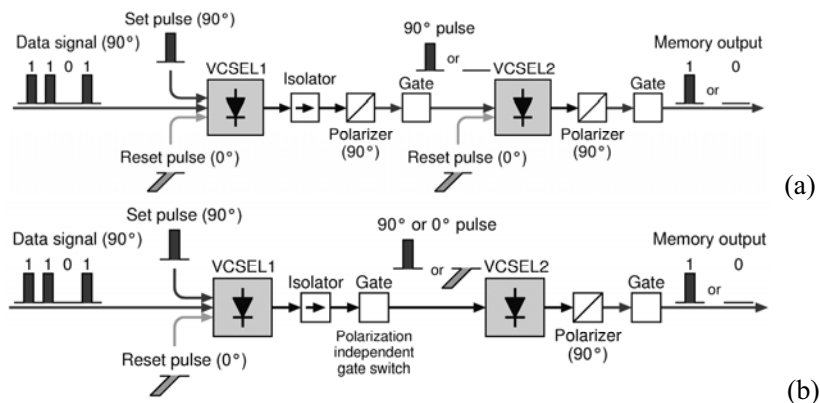


図 26. シフトレジスタ機能の構成
(a) 消去後書き込み方式、(b) 上書き方式

VCSEL1 の情報を VCSEL2 に上書きする方式であり、VCSEL2 から信号を読み出した後よりセット動作を行なわない。両方式を実験的に実証したが、本報告書では「上書き方式」について詳しく述べる。図 27 にタイミングチャートを示す。前半ではセットパルスのタイミングを b_1 に合わせている。この場合 b_1 が“1”であるので、VCSEL1 は 90° 偏光にスイッチし、 b_1 が VCSEL1 の 90° 偏光として記録される。ゲート 1 を開くことにより、VCSEL1 の光出力を切り出し、VCSEL2 の光入力とする。この光入力により、VCSEL2 の偏光は 90° にスイッチし、VCSEL1 の情報が VCSEL2 に転送され記録される。VCSEL2 の光出力を 90° 偏光が通過する偏光子を通し、ゲート 2 を開くことによりメモリ出力が得られる。一方、後半では、セットパルスを b_5 に合わせている。 b_5 は“0”であるから VCSEL1 の偏光はスイッチせず 0° 偏光のままである。ゲート 1 を開くと 0° 偏光の VCSEL1 出力が VCSEL2 に注入され、VCSEL2 の偏光が 0° にスイッチされる。VCSEL2 の光出力を 90° 偏光が通過する偏光子を通し、ゲート 2 を開くことによりメモリ出力を得るが、VCSEL2 の偏光は 0° のため出力は“0”となり、 b_5 が読み出されたことになる。

図 27. 上書き方式シフトレジスタのタイミングチャート

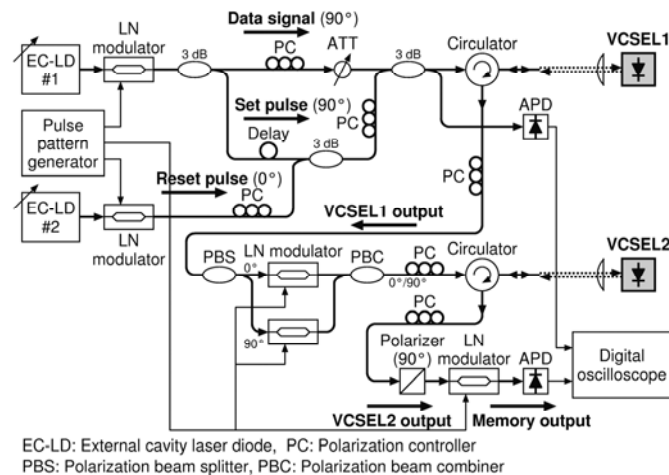


図 28. 上書き方式シフトレジスタの実験配置

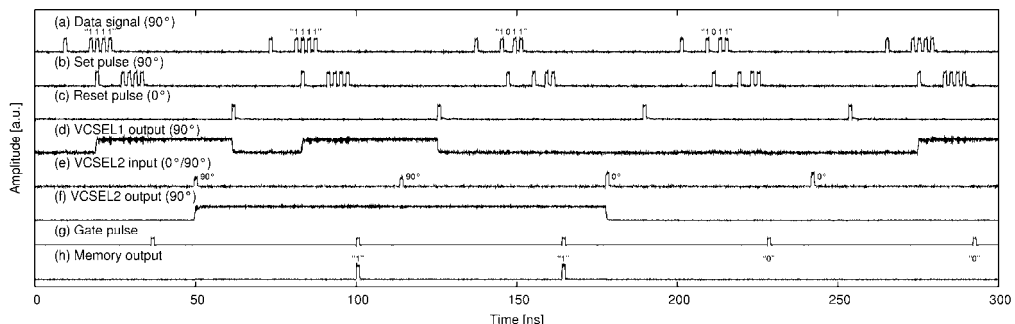


図 29. 上書き方式シフトレジスタの実験結果

G. ウエハ接合法を用いた 1.55 μm 帯 VCSEL の作製

B～F では 980 nm 帯 VCSEL の作製と光バッファメモリへの応用について述べた。光ファイバ通信への適用を考えると、1.55 μm 帯での偏光双安定 VCSEL の実現が重要になる。そこでウエハ接合法により VCSEL の作製を検討した。

1.55 μm 帯で発光する光デバイスには主に InP 基板上に InGaAsP を成長し実現されてきた。VCSEL を作製する場合、高い反射率を有する DBR が必要となる。しかし、InGaAsP と InP では十分な屈折率差が得られないため、多くの DBR ペア数を必要とする。InGaAsP/InP DBR では p 側の価電子帯間吸収が大きく、熱伝導率も GaAs/AlGaAs に比べて悪い事が報告されている。GaInNAsSb 系や、InP 基板上的 metamorphic GaAs/AlGaAs DBR とトンネル接合による長波長 VCSEL など研究されている。又、GaAs/AlGaAs DBR と InGaAsP 系活性層のウエハ接合による 1.55 μm 帯 VCSEL が作製されている。

本研究では、これらの報告例の中から GaAs/AlGaAs DBR と InGaAsP 活性層のウエハ接合を行う方法を選択し、図 30 に示す。構造の VCSEL の作製を検討した。ウエハ接合とは、接着剤などを使わずに水素雰囲気中で加圧、加熱する事により二種類の異なるウエハを直接接合することを言う。接合の原理は一般に次のように考えられている。接合前に InP と GaAs の表面の酸化膜を除去し、水酸基(OH 基)を表面に形成する。この状態で 2 枚のウエハを張り合わせると、水酸基同士の水素結合および分子間力により接着される。その後、水素雰囲気中で加圧、加温することにより、GaAs-O-InP 結合となり、更に水素の還元作用により酸素が取り除かれ GaAs と InP の直接接合が形成される。

ウエハ接合による VCSEL の作製工程の概略は以下のとおりである。高反射率、高熱伝導率、電気伝導が可能な GaAs/AlGaAs DBR ミラーを GaAs(001)基板上に n 型、p 型を別々に結晶成長する。また、InP(001)基板に発光波長 1.55 μm を持つ InGaAsP 多重量子井戸を結晶成長する。まず n-DBR と表面が n-InP の InGaAsP 系活性層の張り合わせを行なう。次に InP 基板の選択エッチングによる除去、これによって表れる p-InP 層と p-DBR を張り合わせることでウエハ接合による長波長 VCSEL 用ウエハが作製できる。

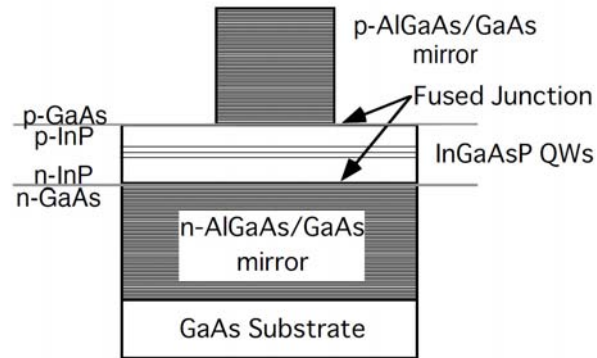


図 30. ウエハ接合法を用いた VCSEL 構造の概念図

G-1 ウエハ接合による GaAs/InP 接合の作製

VCSEL を作製した場合、ウエハ接合で形成される 2 つの InP/GaAs 接合を電流が流れる。このため接合面が低抵抗であること、劈開などに耐え得る接着強度を持つ事が必要となる。GaAs, InP の表面処理には、有機物除去にセミクリーン、酸化膜除去にバッファードフッ酸(BHF)、表面の親水化処理にアンモニア水(NH₄OH)を使用した。サンプルには 11.8 kPa の加重を加え、窒素/水素(4%)雰囲気中で 650 $^{\circ}\text{C}$ 、30 分の熱処理を施した。アンモニア水中で 2 枚のウエハを張り合わせた後に溶液から取り出す手法が最も成功率が高かった。

BHF, NH₄OH による表面処理を行ない、張り合わせた n-GaAs/n-InP, p-GaAs/p-InP (n-doped: $1\sim 2\times 10^{18}\text{cm}^{-3}$, p-doped: $1\sim 4\times 10^{18}\text{cm}^{-3}$)を図 31

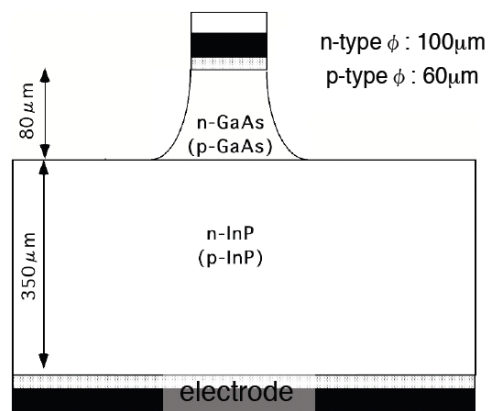


図 31. ウエハ接合法により作製した接合面の I-L 特性評価のための素子構造

に示すような径 100 μm のポスト状に ICP-RIE を用いて加工し、室温で I-V 特性を測定した。n-GaAs/n-InP 接合面に電流を 50 mA 流した場合、抵抗値が 3~8 Ω となり、デバイスとして使用するに耐え得る抵抗値となっている。しかし、p-InP/p-GaAs 接合では印加電圧、抵抗値(20~40 Ω)共に素子間のばらつきが大きかった。

そこで、より高い 5.2 MPa で加圧して p-GaAs/p-InP 接合を作製し、図 31 と同様の構造を作製した。その I-V 特性と微分抵抗を図 32 に示す。11.8 kPa の加重では、20~40 Ω (@50 mA)であった p-GaAs/p-InP 接合の微分抵抗が、5.2 MPa をかけることにより~5 Ω となった。これらの結果から、高い圧力を加える事で低抵抗化ができる事がわかった。

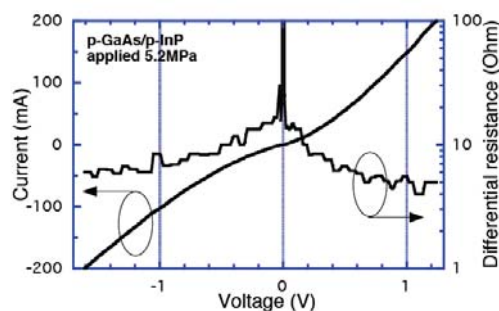


図 32. 5.2 MPa を加え接合した p-GaAs/p-InP 接合の I-V および微分抵抗特性

G-2 ウエハ接合法による VCSEL 構造作製

ウェハ接合法により長波長 VCSEL を作製するために図 33 に示す 3 枚のエピタキシャルウェハを用意した。n-, (p-) DBR は n-, (p-)GaAs 基板上に $\text{Al}_{0.16}\text{GaAs}/\text{Al}_{0.9}\text{GaAs}$ 25 ペア(35 ペア)を成長した。キャリア濃度は n-DBR が $1\sim 2\times 10^{18}\text{cm}^{-3}$, p-DBR が $2\sim 3\times 10^{18}\text{cm}^{-3}$ である。また、p-DBR には、アンモニア系エッチング液による選択エッチングのためにエッチングストップ層として $\text{Al}_{0.9}\text{GaAs}$ 100 nm とコンタクト層 GaAs 20 nm(p-doped $1\times 10^{19}\text{cm}^{-3}$)を付加した。活性層は InP 基板上に発光波長 1.55 μm の InGaAsP 多重量子井戸と p 側に 2.5 ペアの InGaAsP/InP DBR を持つ。また、エッチングストップ層として InGaAs 層 100 nm を備えている。

ウェハ接合法による VCSEL 構造作製プロセスは以下の様にして行った。1 回目のウェハ接合は n-DBR の n-GaAs 表面と InP 基板上の n-InP 表面の接合で、G-1 で述べた表面処理後、11.8 kPa の加重で 650 $^{\circ}\text{C}$, 30 分の加熱を窒素/水素(4%)雰囲気中で行った。1 回目のウェハ接合終了後、研磨と塩酸系選択エッチング($\text{HCl}:\text{H}_3\text{PO}_4=5:1$)により InP 基板を除去した。これにより、InGaAs エッチングストップ層が表面となる。InGaAs はリン酸系エッチング ($\text{H}_3\text{PO}_4:\text{H}_2\text{O}_2:\text{H}_2\text{O}=3:1:50$)を用いて除去した。これにより表面となる p-InP と p-DBR を 2 回目のウェハ接合で張り合わせた。2 回目のウェハ接合では、1 回目の張り合わせと同様の表面処理を行ない、10.8 MPa の加重で 650 $^{\circ}\text{C}$, 30 分の加熱を窒素/水素(4%)雰囲気中で行った。

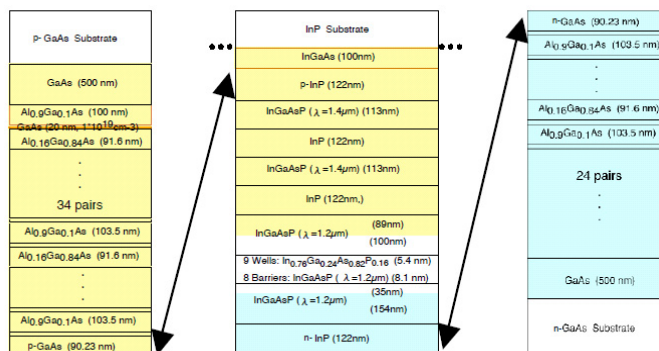


図 33. p-DBR、InP/InGaAsP 活性層、n-DBR のウェハ構造

2 回のウェハ接合で作製した長波長 VCSEL 構造ウェハの室温での反射特性を図 34 に示す。1515 nm に共振波長を持つ共振器構造が作製できた。この VCSEL 構造ウェハを用いて Ti/Sapphire パルスレーザによる光励起でのレーザ発振を試みた。DBR の共振器構造が 1515 nm と若干活性層の発光波長よりも短波側にシフトしていたため、サンプルを 225 K に冷却し、発光波長と共振波長を一致させた。発振スペクトルとポンプ光強度-光出力特性を図 35 に示す。励起波長は $\text{Al}_{0.16}\text{GaAs}/\text{Al}_{0.9}\text{GaAs}$ DBR を透過する 860 nm とした。発振閾値 70 mW で 1512 nm でレーザ発振が得られた。

2 回の張り合わせにより VCSEL 構造を作製し、レーザ発振を確認したが、電流注入が可能なデ

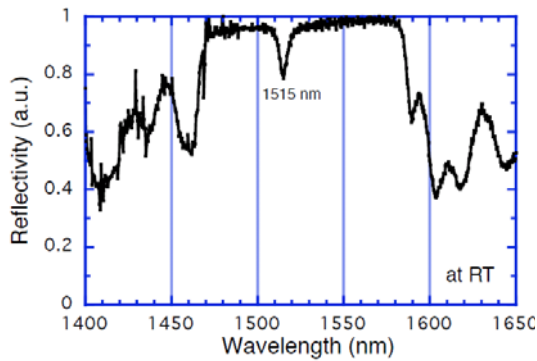


図 34. ウエハ接合法で作製した n-DBR/InGaAsP 活性層/p-DBR ウエハの反射特性(室温)

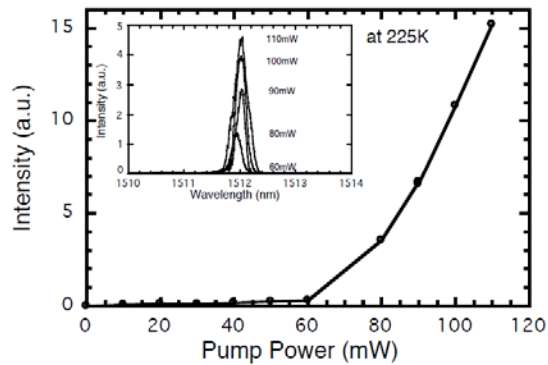


図 35. 光励起レーザ発振特性(225K)

パイス作製のプロセスの際に接合面が剥がれたり、ウエハが割れやすくなる接着強度の問題、電流-電圧特性が酸化膜によるものと思われる障壁をもったり、不安定になる問題が生じた。2 回ウエハ接合を行うためにプロセス工程を改良し、n-, p-GaAs bulk で InP 系活性層を挟んだ LED 構造を作製した。プロセス工程の改良点は、2 回目接合面となる p-GaAs 表面に線幅 10 μm 深さ 1 μm 、線間 500 μm の格子状の溝を硫酸系ウェットエッチングにより作製し、2 枚のウエハ間に残った溶液や不純物などから出るガスを逃がす構造としたことである。この脱ガス用溝を備える事で、その後の LED 構造作製のプロセス中に 2 回目のウエハ接合面の剥がれが激減し、歩留まりが向上した。2 点目の改良点は、SCH 層の両端に InGaAsP/InP の DBR を p 側 2.5 ペア、n 側 8.5 ペアとウエハ接合で挟まれる部分の厚さを 1205 nm から 3085 nm へと厚くし、活性層へのダメージの低減を計った。

InP 系部分の厚さが 1205 nm の LED 構造と InP 系部分の厚さが 3085 nm の LED 構造を同一のウエハ接合条件で試作した。図 36 にこの2つのサンプルの室温の EL スペクトルを示す。InP 部分の厚さが 3085 nm で InGaAsP/InP DBR を備えたサンプルの EL 発光強度は、DBR のないものに較べて 1 桁弱発光強度が大きくなった。また、半値全幅も、77.3 meV となり DBR のない場合の、107 meV に比べウエハ接合による広がりが押さえられた。InGaAsP/InP DBR を付帯し、2 回のウエハ接合で挟まれる厚さを増す事は活性層の保護に有用であったと言える。

上述のようにウエハ接合法により、1.55 μm 帯 VCSEL の作製を試みているが、現在では、光励起レーザ発振および電流注入による発光を実現した段階であり、目標としている電流注入レーザ発振には至っていない。平成 20 年度 3 月までの残された研究期間で実現できるように努めたい。

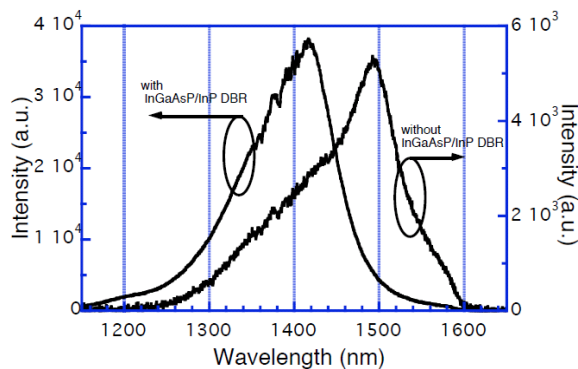


図 36. 室温での電流注入による発光スペクトル特性

H. 1.55 μm 帯偏光双安定 VCSEL とフリップ・フロップ動作

VCSEL の上部分布ブラッグ反射鏡(DBR)および活性層の形状と大きさを設計し、RayCan 社がデバイスを作製することにより、1.55 μm 帯 VCSEL を実現し、偏光双安定動作および全光型フリップ・フロップ動作を実現した。

H-1 デバイス構造

図 37 に示す偏光双安定 VCSEL の構造は、InP 基板上に減圧有機金属気相成長(MOCVD)法でモノリシックに成長されている。活性層は 0.5λ 厚の歪補償多重量子井戸である。高い熱伝導率化と低い電気抵抗化のために、 2.5λ 厚の n 型の InP クラッド層で挟まれた構造をしている。上部の n-InP と活性層の間に、炭素をドーピングした InAlAs 層によるトンネル接合層が設けられている。上部と下部の反射鏡は InAlAs/InAlGaAs の DBR である。活性層を選択的にウエットエッチングして空気ギャップを形成し、電流狭窄を行っている。矩形のメサ構造となっている上部 DBR の辺は、InP 基板の $[110]$ 軸と $[\bar{1}\bar{1}0]$ 軸に沿っている。

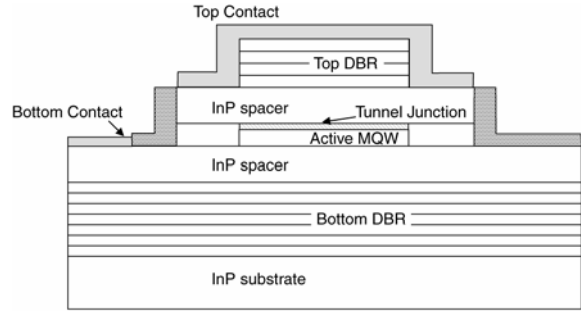


図 37. InAlGaAs/InP 偏光双安定 VCSEL の構造

まず、我々は最低次の横モードで動作し、大きな光出力を得る条件を探すため、4 種類のメサ構造の VCSEL を製作した。DBR のサイズと活性層のサイズを、それぞれ $8(8)\mu\text{m}$, $10(10)\mu\text{m}$, $12(10)\mu\text{m}$, $12(8)\mu\text{m}$ とした。これは、われわれが作製した $0.98\mu\text{m}$ 帯の矩形メサ構造 VCSEL と、RayCan 社が製品として販売している $1.55\mu\text{m}$ 帯の円形メサ構造 VCSEL の発振条件から推定して決定した。すべてのメサ構造の VCSEL は、室温において単一の横モードで連続発振した。光出力の強度は $12(10)\mu\text{m}$, $12(8)\mu\text{m}$ の VCSEL で、約 1.0 mW の出力で飽和した。また、 $8(8)\mu\text{m}$, $10(10)\mu\text{m}$ の VCSEL ではそれぞれ 0.4 mW , 0.7 mW 程度の光出力で飽和した。全ての構造の VCSEL で、サイドモード抑圧比は 30 dB 以上であり、良好な単一縦モード発振が得られた。さらに、基板の結晶の $[\bar{1}\bar{1}0]$ 軸方向と $[110]$ 軸方向のどちらかの向きの直線偏光で発振した。以降、 $[\bar{1}\bar{1}0]$ 軸方向の偏光を 0° 、 $[110]$ 軸方向の偏光を 90° とする。

H-2 偏光双安定動作

4 種類のメサ構造の VCSEL について、偏光分解した電流-光出力特性を測定した結果、 $10(10)\mu\text{m}$ のメサ構造について 15 個中 13 個が、 $12(10)\mu\text{m}$ のメサ構造については 3 個中 1 個がヒステリシス特性を示した。その他のデバイスについては、 5°C から 30°C まで温度を変えてもヒステリシス特性は得られなかった。 $10(10)\mu\text{m}$ の VCSEL の電流-電圧特性と偏光分解 I-L 特性を図 38 に示す。駆動電流が 9.8 mA の時の微分抵抗は $50\ \Omega$ であった。この VCSEL は 0° 方向で発振を始めて、駆動電流を増加して 10.3 mA になると発振偏光が 90° に切り替わる。そして、駆動電流を減少した時には、 9.3 mA で 90° から 0° に切り替わり、偏光双安定性が得られた。直交偏光抑圧比は、 9.8 mA のときに 31 dB

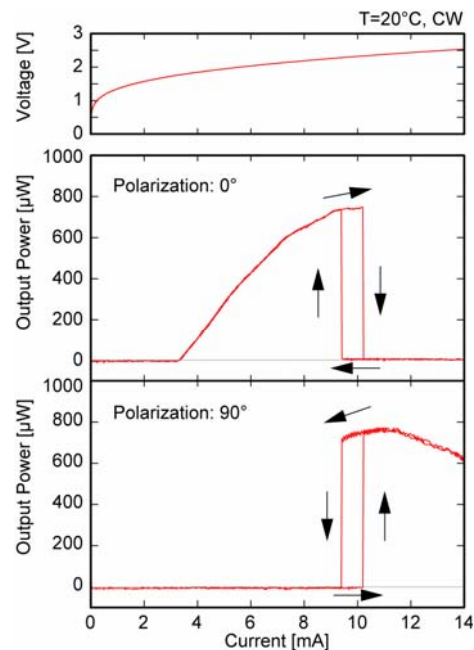


図 38. V-I 特性および偏光分解 L-I 特性

であり直線偏光であった。

このデバイスの 9.8 mA における電流増加時と減少時の偏光分解したスペクトルを図 39 に示す。0°と 90°の偏光で発振周波数が 11.5 GHz 異なっている。これ以外のメサ構造の VCSEL においても、主と副の縦モードが存在し、それらの周波数は数十 GHz 異なっていて、互いの偏光方向は直交している。また、この発振偏光の方向によって発振周波数が異なるという現象は、0.98 μm の偏光双安定 VCSEL でも見られた。

図 40 に 9.8 mA における電流増加時と減少時の偏光分解した近視野像(NFP)を示す。NFP から VCSEL は両方の偏光方向ともに最低次の単一横モードで動作していることが分かる。また、これらの結果から、矩形メサ構造 VCSEL が最低次の単一横モードで偏光双安定動作していることが分かる。

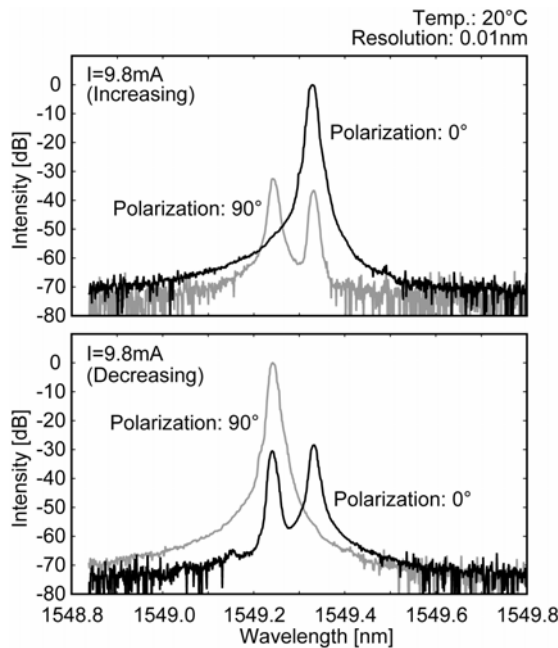


図 39. 偏光分解スペクトル特性

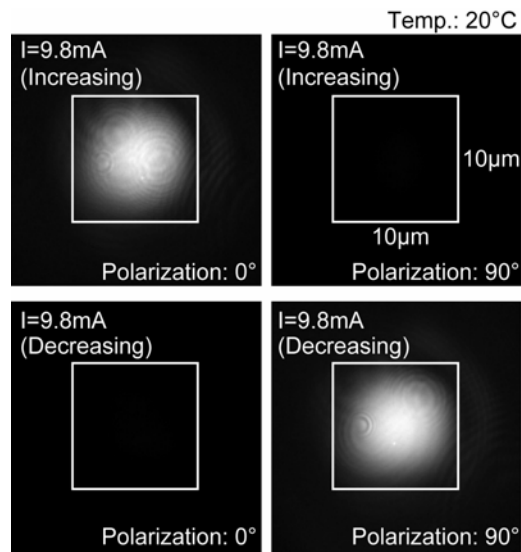


図 40. 偏光分解近視野像

H-3 全光型フリップ・フロップ動作

偏光双安定 VCSEL を双安定特性を有する電流値に設定し、発振偏光に直交した光を注入すると、発振偏光の方向が切り替わり、光注入を停止しても切り替わった方向で発振偏光が保持された。注入光の波長は、切り替える偏光方向の発振波長に合わせた。図 41 に偏光双安定 VCSEL を用いて全光型の偏光フリップ・フロップ動作を行った結果を示す。VCSEL は 20°C で 9.8 mA で動作させ、その時の光出力は 720 μW であった。初期状態では、偏光双安定 VCSEL は 0°方向で発振していて、その波長は 1549.332 nm であった。そこで 90°方向のトリガーパルスとして、波長可変光源から偏光双安定 VCSEL の 90°方向の発振波長と同じ 1549.240 nm の光を入力したところ、0°から 90°に発振偏光が切り替わった。入力した

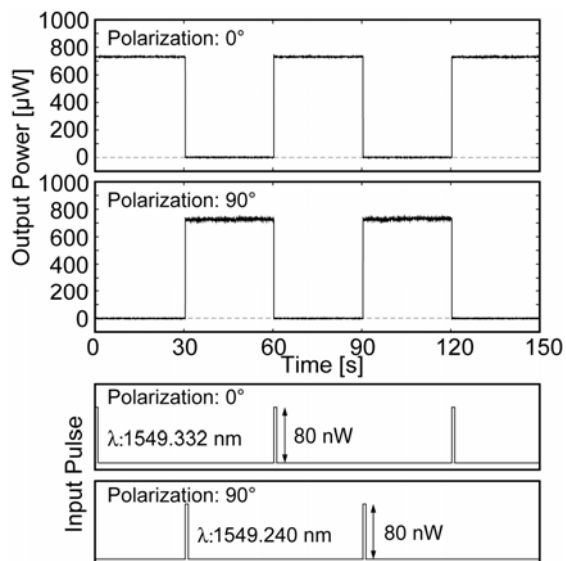


図 41. 全光型フリップ・フロップ動作の実験結果

光パルスの時間幅は約 1 秒で、光強度は 80 nW と偏光双安定 VCSEL の光出力と比べて非常に小さい。約 30 秒後に 0° 偏光で 1549.332 nm の光パルスを偏光双安定 VCSEL に入力したところ、偏光が 90° から 0° に切り替わった。つまり 2 つの直交する偏光間で全光型のフリップ・フロップ動作を示した。この結果は、1.55 μm 帯の光通信波長帯においても、前述のシフトレジスタ機能付光バッファメモリが実現できることを直接に示している。

I. 全光型信号再生

VCSEL の偏光双安定性と高速スイッチング特性を用いて、種々の光信号処理が実現できる。図 42 に原理を示すように、信号強度が弱くなり、波形が劣化した信号から全光型で信号を再生する全光型信号再生が可能である。90° 偏光のデータ信号とセットパルスと同じタイミングで VCSEL に入射し、両者が同時に入射したときに、VCSEL の発振偏光が 90° にスイッチするように信号とセットパルスの強度を設定する。又、0° 偏光のリセットパルスをパルス幅分の時間遅延を与えて VCSEL に入射する。この結果、VCSEL 出力光の 90° 偏光成分は、データ信号と同じビット符号をもつ光再生信号となる。図 42 に示すように、再生信号の立ち上りはセットパルスの立ち上りで、再生信号の立ち下りはリセットパルスの立ち上りで決まるため、リタイミング動作が実現できる。

今回、タイミングジッタを付加した入力信号を準備し、リタイミング動作によりジッタを低減した。全光型信号再生の実験の構成を図 43 に示す。外部共振器付 LD と LN 変調器を用いてデータ信号、Set パルス、Reset パルスを生成し、偏波コントローラ(PC)によりデータ信号と Set パルスを 90° 偏光、Reset パルスを 0° 偏光に調整し、VCSEL に注入した。使用した VCSEL は、河川研究室作製のメサ構造 980 nm 帯 VCSEL である。パルスパターン発生器によりデータ信号に ± 1 ns のタイミングジッタを付加した。データ信号と Set パルスは同一波長であり、同相で合波した。

図 44 に実験結果を示す。入力信号として 2 ns 幅のジッタを付加した 90° 偏光のデータ信号(図 44(a))と、リタイミングのためのクロック信号として 90° 偏光のセット光(b)と 0° 偏光のリセット光(c)とを外部共振器付 LD と LN 変調器を用いて生成し、VCSEL に注入した。データ信号とセット光の強度を、それぞれ偏光スイッチングの閾値より小さくすると、両光が

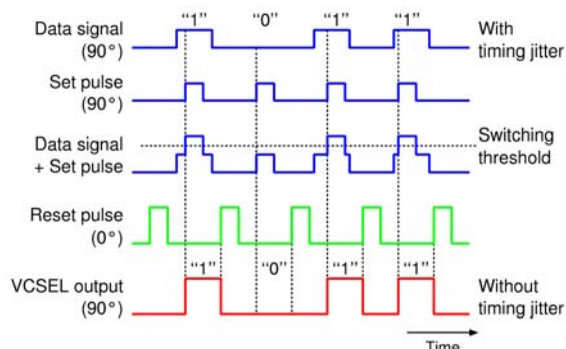
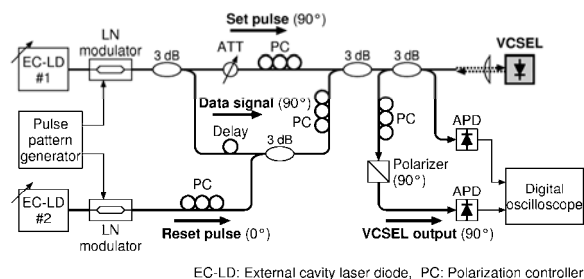


図 42. 全光型信号処理再生の原理



EC-LD: External cavity laser diode, PC: Polarization controller

図 43. 全光型信号処理再生の実験系

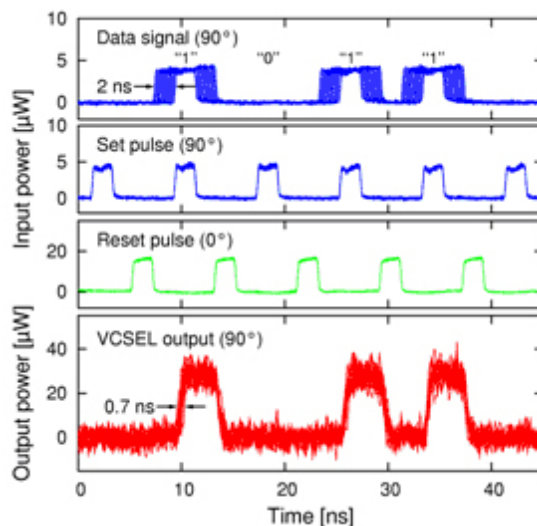


図 44. 全光型信号処理再生の実験結果

同時に注入された時にのみ VCSEL の発振偏光が 90° に切り替わり、リセット光が注入された時に発振偏光が 0° に切り替わる。よって、VCSEL 出力光を 90° 方向の偏光子に通すと、データ信号と同じビットパターンの再生出力が得られる。偏光が切り替わるタイミングはセット光とリセット光によって決まるため、リタイミング機能を持つ。実験の結果、図 44(d)に示すように、入力信号よりもジッタの少ない出力信号(ジッタ 0.7 ns 幅)が得られ、リタイミング動作によるジッタ低減を確認した。

(2)研究成果の今後期待される効果

A. 今後の展開見込

本研究では、980 nm 帯偏光双安定 VCSEL の作製およびそれを用いたバッファメモリの 10 Gbit/s 動作、さらにシフトレジスタ機能の実現を達成し、当初の目標を実現した。又、 $1.55\ \mu\text{m}$ 帯 VCSEL でも偏光双安定性を実現し、これらの技術が通信波長帯でも通用できることを示した。この様に研究は、ほぼ当初の計画に従って進んだ。

それと同時に、次に行うべき研究項目もはっきりしてきた。1 番目は、高速化である。全光化のメリットの 1 つは高速化と言える。注入光の離調を大きくすることにより高速化が可能ながことが明らかになった。 $980\ \text{nm}$ 帯では周辺の光学部品があまり開発されていないことから、10 Gbit/s にとどまったが、 $1.55\ \mu\text{m}$ 帯ではより一層高速化が計れるものと期待している。2 番目は、多ビット化・モジュール化である。本研究では光メモリの構成に光ファイバ系を用いたが、あまり多ビット化に向けた構成とは言えない。そこで図 45 に示す空間並列型の光バッファメモリを考案した(特許出願済)。図 45 の配置では、空間変調器を短時間開くことにより、VCSEL の記録している信号を隣りの VCSEL へ転送・記録することができる(特許出願済)。VCSEL に対して入出力とも軸をはずす必要がないこと、口径の大きな光アイソレータ1ヶを用いれば良いこと、などの特徴をっており、多ビット化が比較的容易になる利点をもつとともに、モジュール化によりサブシステムでの実験が行えるようになるものと期待している。

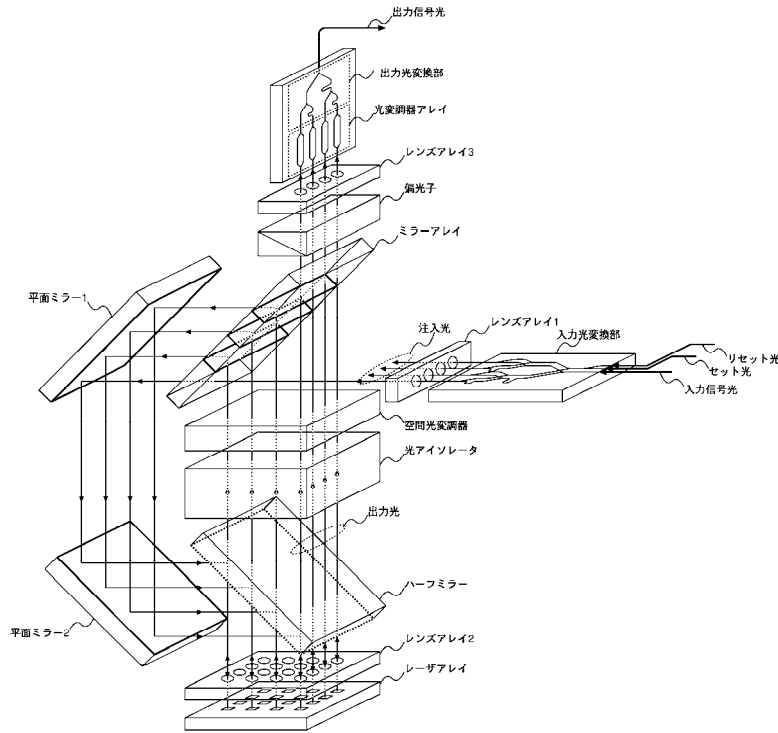


図 45. 全光型シフトレジスタ機能付バッファメモリモジュールの概念図

B. 科学技術や社会への波及効果

今後の情報量の増大に応えるためには、より一層の超高速光通信システムの開発が望まれているが、その超高速化のためには信号処理も光が行う全光化が期待されている。とりわけ、全光型でのパケット単位のルーティング技術が必要とされている。従来、ファイバ遅延線バッファメモリを用いることが提案されているが、各ビット毎の制御や必要なタイミングに情報を読み出すことが困難であった。このような困難を解決し、現在存在する技術を用いて、パケット交換を行おうとする試みも始

まっている。例えば、時系列信号を空間並列信号に変換した後、各チャンネル毎に分岐し、全てのチャンネルの信号をそれぞれ受光器で受け、電気信号に変換した後、処理しようとするものである。各ノードで一度光信号と電気信号の変換を行う必要があり構成法が極めて複雑であるため、多くの困難が予想される。5年間の研究期間中にスローライト(slow light)の研究が極めて活発になった。種々の構成法が検討されているが、いずれも今だ原理検証の段階である。将来、光パルスの位相制御や数ビットの光バッファメモリが実現できる可能性はあるが、それ以上のビット数をもつ光バッファメモリの実現は困難と思われる。又、同一基板上に導波路型の2個の光学的に結合したリングレーザを作製し、1ビットの光メモリが実現されているが、光アイソレータの導入が極めて困難なことなどから、多ビット化への見通しはない。従って、5年間の研究期間で本研究の重要性は何ら変化がないと思われる。ここ数年間の間に光パケットスイッチングの研究が活発化していることを考えると、より重要性が増したと言える。前述した様に、高速化、多ビット化、モジュール化が進めば、これまでフォトリックネットワーク技術で是非必要と言われながらも実現されてこなかった、全光パケットメモリが比較的容易な方法で実現され、フォトリックネットワークの構成を基本的に変えるほど大きな波及効果、インパクトをもつものと期待している。

3.2 光ヘッダ識別回路の研究(東京工業大学 精密工学研究所 マイクロシステム研究センター 光データ処理研究グループ)

(1)研究実施内容及び成果

近年のインターネットの急激な成長 近年のインターネットの急激な成長を背景に、データトラフィックの増大によるルータの処理負荷増大と消費電力の増加が問題となっている。図 46 にパケットスイッチの構成を示す。上段に示した従来の電気処理では、光パケットを電気信号に変換後、全ビットをRAMにバッファし、アドレス解析と遅延のスケジューリングを行った後に出力にスイッチし、光パケットとして出力する。そのため 40Gbps 以上の高速なパケット処理に要するシリアル・パラレル変換やアドレス解析の負荷が高くなり、処理遅延の増大や消費電力の増加をもたらす要因となる。

これに対して下段に示した光パケットスイッチでは、光パケットのアドレス部のみをラベル識別器で解析後、電子回路で解析可能な速度に整合し、アドレス解析とスケジューリングを行って光パケットを光スイッチ・光バッファを経由して出力する。全ビットを高速に処理してバッファするのではなく、アドレス部のみ解析に留めるとともに、高速な光信号を低速な電子回路で処理可能な波形整形を光回路で行うことにより、高速動作・低消費電力化を目指すものである。

電気処理と比較して、光回路(光DA変換・光SP変換)が消費電力メリットがあるかどうかを解析的に検討した。図 47 に解析に用いたモデルを示す。上段の各ビットを高速にシフトレジスタにてシリアル・パラレル変換する電気処理に対して、光ラベルをビット数分に分岐後、処理すべきビットスロットのみ光ゲートで処理する光シリアル・パラレル(SP)変換(下段)、数ビットずつを光レベルでDA変換し、光ゲート数をさらに削減する光デジタル・アナログ(DA)変換(中段)の3種類を対象とした。さらに光DA変換では1単位で処理するビット数をパラメータとしている。また ODAC では入力光パワーの変動を抑える必要があり、そのための OEO 型利得等化器も考慮に入れている。

図 48 に消費電力の解析結果を示す。(a)は処理ビット数依存性、(b)は ODAC の処理ビット数単位に対する依存性である。まず(a)より、7~8ビットを超えたビット数の処理において ODAC での消費電力が低くなることがわかる。これは、高速な処理をパッシブな光回路に置き換える効果と、光ゲート数の削減効果が光利得等化器の消費パワーの追加分を上回るためと考えられる。また ODAC の消費電力は単一処理ビット数にも依存することが同図(b)からわかり、4ビット付近で最小となることもわかった。光DA変換器での消費電力メリットとその条件を示したのは初めてである。

次に光 DA 変換器の半導体集積化の検討内容について説明する。

図 49 に4ビット対応を例に光 DA 変換器の原理図を示す。入力4ビットラベルを4分岐し、前半2ビットと後半2ビットを空間並列で処理する。すなわち最小処理単位は2ビットとした。2ビット光 DA 変換部を見ると、短い導波路と長い導波路の組み合わせとなっており、導波路長の差はラベルのビット間隔に合わせて設計する。10Gbps であれば約 1cm、40Gbps であれば約

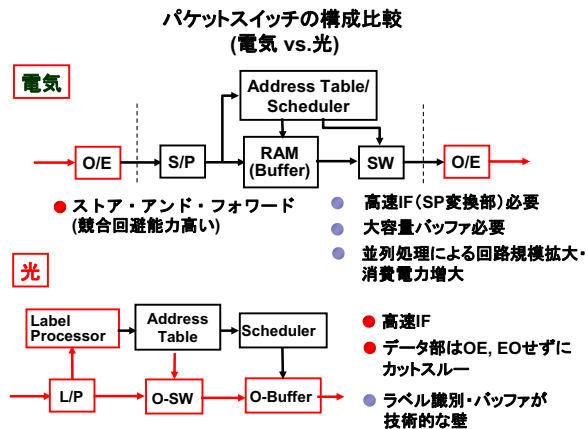


図 46. パケットスイッチの構成ブロック図
(上:従来の電気処理, 下:光パケットスイッチ)

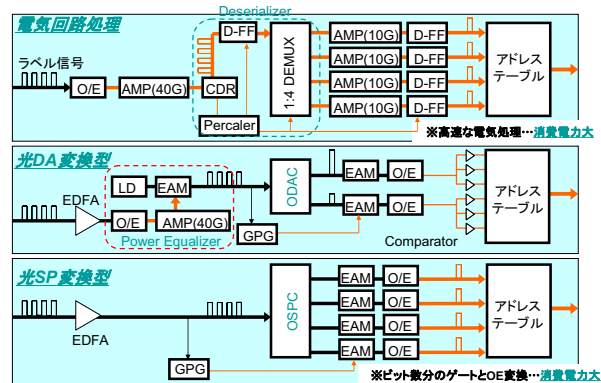


図 47. 各種パケットスイッチのラベル識別器の構成(上:電子回路、中:光DA変換、下:光SP変換)

2.5mm となる。また長短導波路間に強度差3dBをつける。本素子では長い導波路の伝搬損失を利用している。2分岐導波路の伝搬信号を適切な光位相で再度合波すると、光強度に差が生じる光 DA 変換処理ができる。2分岐光信号の合波出のうち、DA 変換のビットスロットの前後は不要な光信号となるので、光ゲートで光 DA 変換部のビットスロットのみ抽出し、光 DA 変換処理が完了する。前半2ビットと後半2ビットの処理を同期させるため、前半2ビット処理部に2ビットの遅延部を設ける。

図 50 に作製した素子のレイアウト図を示す。また図の左下に導波路の断面構造を示した。半導体と空気の高い屈折率差を利用すると、石英材料よりも強い光閉じ込め効果によって曲げ導波路の曲率半径を $100\mu\text{m}$ 前後まで小さくでき、素子サイズの縮小の効果がある。単一モードと偏波無依存特性を両立するため、ウエハ構造は厚さ $0.5\mu\text{m}$ のノドープ InGaAsP ($\lambda_g = 1.06\mu\text{m}$) を厚さ $1.5\mu\text{m}$ のノドープ InP で挟んだ構造とした。導波路構造は入力部の 1×4 MMI (幅 $16.4\mu\text{m} \times$ 長さ $141.0\mu\text{m}$)、導波路長差 $9466\mu\text{m}$ 、曲げ導波路の曲率半径 $250\mu\text{m}$ 、出力部の 2×1 MMI (幅 $8.2\mu\text{m} \times$ 長さ $71.4\mu\text{m}$) で構成した。

作製した素子の写真を図 51 に示す。素子は SiO₂ をマスクとした Br 系ドライエッチングにてメサ高さ約 $4\mu\text{m}$ のハイメサ導波路構造を作製しており、外注にて対応した。現在はステップ露光を外注し、ドライエッチングは内製で対応可能である。高屈折率差を利用した曲げ半径の小さな素子は側壁荒れによる放射損失が特性劣化の主な要因となるが、SEM による観察によって 20nm 以下の側壁荒れにとどまっていることを確認している。

平滑な導波路の作製によって、図 52 に示すように直線導波路部、 1×2 MMI 部、 1×4 MMI 部ともに単一モードでの良好な光導波を確認できた。ただし MMI では分岐部の損失が不均一になっており、今後原因究明と特性改善を進める予定である。

素子の伝搬損失については、図 50 の光 DA 変換器の出力 2×1 MMI を切断し、長短導波路の出力波形を観測して強度差から評価した。図 53 にその結果を示す。導波路長差 $9466\mu\text{m}$ に対して強度差が約 2.7dB ついており、従って 2.7dB/cm の伝搬損失と見積もられる。10Gbps 対応では遅延導波路長が $9466\mu\text{m}$ であり、ほぼ 1cm のため光 DA 変換動作に必要な 3dB

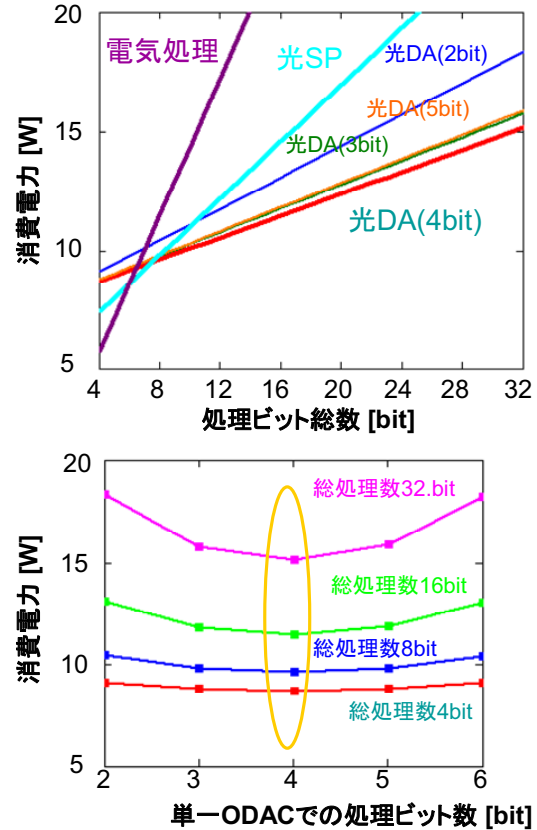


図 48. 消費電力の解析結果

- (a) 処理ビット数依存性
- (b) 単一 ODAC の処理ビット数依存性

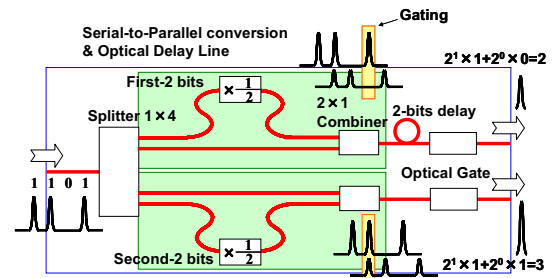


図 49. 光 DA 変換器の構造図

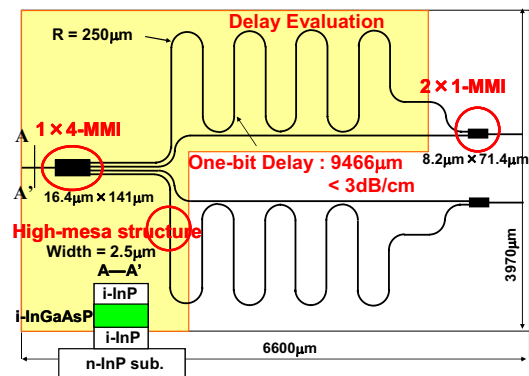


図 50. 作製した光 DA 変換器のレイアウト図

損失に相当し、同時に 10Gbps 1ビットスロットにほぼ相当する遅延も観測できた。

十分に光 DA 変換動作ができる素子特性が得られたため、NRZ 変調の 10Gbps 2ビット光ラベル素子に入力し、その出力波形を観測した。測定結果を図 54 に示す。2ビットの“00”，“01”，“10”，“11”それぞれに対応して、異なる光ピーク強度を得ることができ、初めて半導体で作製した光 DA 変換器での光 DA 変換動作を確認することができた。

ただし素子は分岐光信号の再合波を用いるため、合波時の位相の変動によりピーク強度の変動を引き起こし、アドレス識別に適用した際の特性劣化を引き起こす。図 55(a)(b) はそれぞれ温度、信号光波長依存性を測定した結果である。また位相差による強度変動の理論式を用いた解析結果を実線で示した。測定結果は解析結果に良く一致しており、半導体の屈折率の温度依存性および遅延部による位相差の波長依存性を反映していることがわかる。従って、逆に素子の遅延導波路の一部に温度制御の位相制御領域(長さ $160\mu\text{m}$ 程度)を設けると位相差 $\pi/180 \sim 2\pi$ までを温度差 40 度以内で制御でき、最適な位相に制御可能であることも分かった。

光 DA 変換器の出力強度変動によるラベル識別動作への影響を見積もるため、OE 変換後の信号の BER を数値解析し、所定の BER を 10^{-9} に設定して入力光パワー、位相変動、チャープ、消光比それぞれに対して基準値からの変動許容量を導出した。その結果を表 1 に示す。光パワーの基準値は通常の半導体レーザの標準的な出力ピークパワーを、位相はビット“1”と“1”の合波の強度が干渉の効果により最大となる0度を、チャープは0を、そして消光比は SDH の光源の値付近で、かつ変動に対して耐性の幅をある程度広く取れる値として 0.025 (16dB) に設定した。各パラメータのみが変動すると仮定したときの各パラメータに対する耐性をまず解析し、表 1 の真ん中の行に示したが、実際は全パラメータが同時にランダムに変動する可能性がある。そこで入力光パワー変動は OEO 型利得等化器(電気増幅器のリミッタ特性を利得等化器に利用し、PD・電気増幅器・LD・外部変調器の組合せによる利得等化器)の測定例として $\pm 0.6\text{dB}$ 、位相変動は温度制御により可能な ± 1 度を設定した。またチャープの変動は LiNbO3 強度変調器の仕様表から変動値を位相変動値に変換して ± 21.2 度とした。それらの値から、消光比の変動として 0.044 (13.6dB) 以下の結果を得た。すなわち全パラメータを適切な技術を用いて $\text{BER}=10^{-9}$ 以下を満たす条件があることがわか

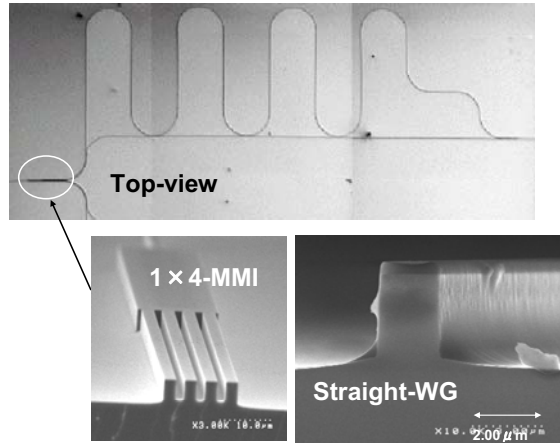


図 51. 作製した 10Gbps 対応半導体光 DA 変換器の写真

(上段: 表面、下段左: 1×4 MMI、下段右: ハイメサ導波路部)

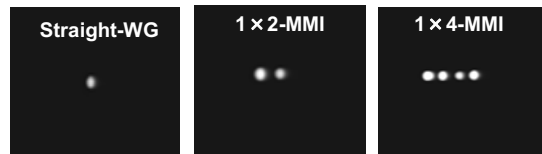


図 52. ハイメサ導波路からの発光近視野像

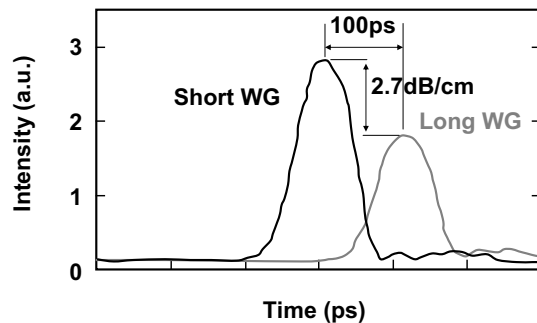


図 53. 導波路の伝搬損失の評価結果

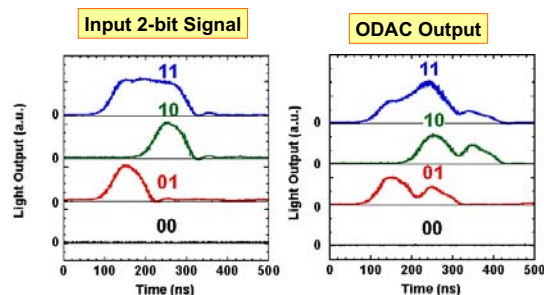


図 54. 10Gbps 2ビット光 DA 変換動作
(左: 入力光ラベル、右: 出力光)

った。半導体 ODAC の基本的な特性が得られたことから、電気回路で構成したアドレステーブルと接続してラベル識別動作の検証を行った。図 56 に測定系を示す。2 ビットラベルは EA 変調器集積化光源の EA 変調器をパルスパターン発生器 (PPG) の信号で変調して発生した。速度は 10Gbps, ラベルパターンとしては”11”, ”10”, ”01”の3種類が交互に発生するパターンを用いた。ラベル間隔は 51.2ns である。モジュール化した ODAC に入力した後、整形された出力を一旦 EDFA で増幅し、EA 変調器で DA 変換に相当するビットスロットを抽出後、OE 変換しベッセルフィルタ (帯域 467MHz) でパルス幅を広げてアドレステーブルが反応可能な状態とし、アドレステーブルに入力した。アドレステーブルは各入力部に4個の並列コンパレータがあり、閾値電圧として 100mV, 200mV, 300mV に設定している。設定閾値電圧を超えるかどうかで入力ラベルパターンを識別することができる。その後、SR フリップ・フロップにて入力信号をラッチし、アドレステーブルの信号を読み出す構成となっている。波形はサンプリングオシロスコープで観測した。

図 57 に測定波形を示す。(a)はラベルであり、パターンごとの波形も下に示した。ラベルパターン”11”と”10”, ”01”を比較するとピーク強度に若干差があるが、これは低デューティ比の電気パルスに対して EA 変調器の効率が異なっているためと考えられる。(b)の ODAC 出力より、ラベルの違いに対応してほぼ線形なピーク強度に整形されていることがわかる。ベッセルフィルタでパルス幅を拡張した波形を同図(c)に示す。パルス幅が 100ps からほぼ 1ns に拡張しているにもかかわらず、振幅のラベル依存性は大きく変化していないことがわかる。この出力をアドレステーブルに入力し、得られた出力を同図(d)に示す。ラベルの違いに対応した電流値が出力できていることがわかった。10Gbps 光ラベルの識別は光 DA 変換器のみならず、他のラベル識別手法の報告例と比較しても高速である。

2ビット半導体光 DA 変換器による 10Gbps ラベル識別動作の可能性を示すことはできたが、更なる特性改善として何点かを挙げると以下の通りとなる。

(1) 入力パケットタイミングに同期した光ゲー

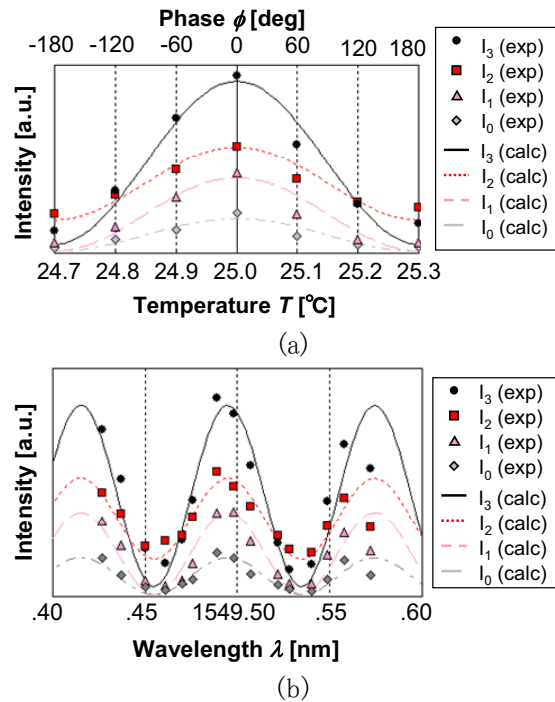


図 55. 光 DA 変換出力の(a)温度依存性(b)信号光波長依存性

表 1 ODAC の動作耐性

	Reference Values	Fluctuation Tolerances for each parameter	Fluctuation Tolerances for all parameters
Pin [dBm]	0dBm	-1.01~0.96	±0.6
$\Delta\phi$ [deg]	0deg	±57.7	±1
ϕ_c [deg]	0	±112.9	±21.2
S	0.025	Less than 0.051	Less than 0.044

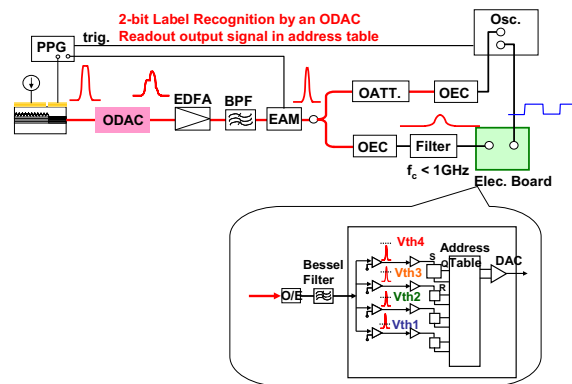


図 56. 10Gbps 対応2ビットODACによるラベル識別動作の測定系

トパルスの自動生成と光 DA 変換部との連動

(2) 10Gbps から 40Gbps への高速化

(3) 単一処理のビット数の拡張

(3)は時間の関係で実験的検証には至らなかったが、数値解析により4ビット構成において4ビット16種類のラベルに対し異なるピーク強度への波形整形が可能であることはわかっている。ただし受信側での SN 比の要求は2ビット処理と比較して厳しくなるため、現実的な動作範囲で所定の BER が確保できるかどうか、引き続き検討が必要である。

(1)については位相シフトプリアンプ方式による自動パルス生成手法を提案し、その基本的動作を実証した。図 58 にその構成を示す。送信側では、光パケットの先頭に2ビットのプリアンプを追加する。先頭1ビットのみ、他のビットと比較して位相を $\pi/2$ シフトさせる。送信器としては DFB レーザの CW 出力光を 2 段の EA 変調器で RZ 符号化した後、先頭ビットのみ位相変調器で位相をシフトさせる。受信側では1ビット遅延干渉計 (MZDI) を用い、隣接ビット同士の合波を行う。MZDI の合波部での位相条件を $\pi/2$ 位相シフトさせると、先頭と隣接ビットの合波は干渉が最大・最小になる条件となり、2出力の差信号をバランス型 PD でとることによって1ビットスロット幅の電気パルスが発生できる。一方、他の隣接ビットの合波についてはビット“1”と“0”の合波は位相 $\pi/2$ ずれた条件で行われるため強度の合波となり、MZDI2出力には同一強度の信号が出力される。ビット“1”と“0”あるいはその逆の合波は単なるパワー分岐となるため同様である。従ってバランス型 PD で差信号をとるとキャンセルされ、出力は0となる。以上から、位相を $\pi/2$ シフトさせたビット位置に必ず単一パルスが生成できる。本方式は、パッシブ素子での波形整形であるため 40Gbps 以上の高速化にも対応可能であり、またランダムなパケットに対して適用可能であるメリットを有する。

図 59 に測定結果を示す。(a)は入力光パケットであり、速度 10Gbps、32 ビット周期、パケット間隔3ビットとした。(b)は生成された単一電気パルスである。生成パルス振幅と抑圧された他のビットスロットの最大振幅の比を抑圧比と定義したとき、10dB 以上の抑圧比を実現できた。抑圧比は入力信号光の消光比に影響され、ビット“0”の位相とチャープ条件により抑圧比劣化の原因となる。実験では信号光の消光比を 10dB 以上に設定することによ

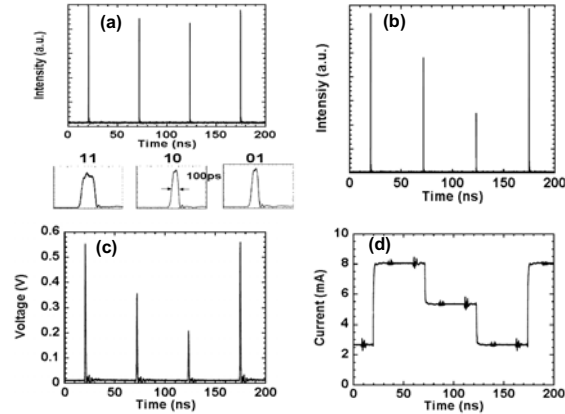


図 57. 測定波形

(a) 入力ラベルパターン (b) ODAC出力 (c) ベッセルフィルタ出力 (d) アドレステーブル出力

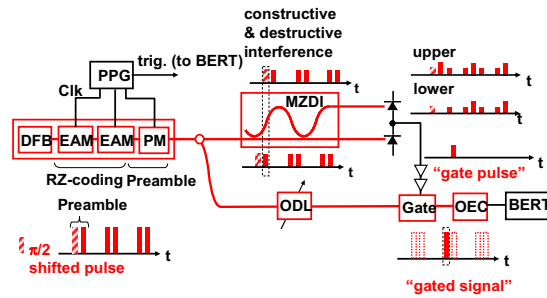


図 58. 位相シフトプリアンプによるパケット入力タイミング抽出・自動ゲートパルス生成の測定系

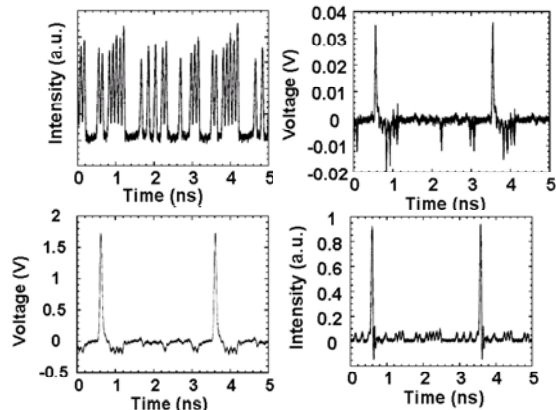


図 59. 自動ゲートパルス生成動作結果

(a) 入力光パケット (b) 生成ゲートパルス (c) ドライバアンプでの増幅波形 (d) 入力パケットからゲートされた単一出力パルス

て、高い抑圧比を実現することができた。同図(c)は EA 変調器を変調するためのドライバンプで増幅した波形であり、ピーク電圧 1.7V を得るとともにマイナス側の電圧値が低減されている。これはドライバンプの帯域制限を受けたためと考えられるが、EA 変調器の駆動時にはマイナス側は影響しないため問題にならない。この電気パルスを利用して入力光パルスの中の1ビットをゲートした結果が同図(d)である。消光比 10dB 程度でのゲート動作が確認できた。この動作を利用すると光シリアル・パラレル変換にも応用が可能である。消光比は充分とはいえないが、EA 変調器のバイアス電圧を下げるとともに電気パルスの振幅を増大することによって特性改善が可能である。本手法はランダム信号に対して、また 10Gbps を超える光ラベルに対しても対応可能な原理であり、その動作特性は NTT (OEIC 型光シリアル・パラレル変換器) や NiCT (光符号分割多重方式) の報告例に匹敵するレベルと考えている。

次に(b)の 40Gbps への高速化の検討について述べる(図 60)。動作原理は図 49、図 50 と同じであり、構造的には1ビット遅延線の長さを 10Gbps 対応の4分の1 ($2366 \cdot \mu\text{m}$) にすれば 40Gbps 対応となる。また2ビット遅延線の長さが $4732 \cdot \mu\text{m}$ であり、伝搬損失が 1.5dB 程度に収まるため前半2ビットと後半2ビットの処理の時間同期をとる2ビット遅延線を半導体上に集積することが可能となる。

作製した素子の光 DA 変換動作の検証を行った。信号光は 40Gbps (1ビットスロット 25ps) の2ビットであり、ラベル“11”, “10”, “01”の波形を図 61(a)に示す。40Gbps 信号は 10Gbps 4ch PPG の4チャンネル出力を電気 MUX にて 40Gbps 1ch に多重化し、LiNbO3 強度変調器をドライブして DFB レーザからの CW 出力光を変調して生成した。光 DA 変換出力波形(波長 1549.88nm, 24.5 °C)を同図(b)に、信号光波長のみを変化させて測定した出力波形を同図(c)に示した。図中の破線で囲ったビットスロットが DA 変換部に相当し、ラベルの違いに対応して 40Gbps の速度でも出力強度の差が得られることが初めて実証できた。また波長の違いによる位相条件のずれの影響で、出力光強度が変動する様子も見られた。

40Gbps 対応素子の 10Gbps 対応素子との特性差を比較するため、本素子でも温度・波長依存性を測定した。その結果を図 62 に示す。温度による屈折率変化および波長による位相変化の影響を考慮した出力強度の解析式より計算した結果を実線で示している。測定結果は解析結果とよい一致を示しており、ODAC の特性を評価する上で速度に依存せず指針を与えるものといえる。また図 55(a)と図 62(a)の温度依存性を比較すると、10Gbps 対応素子では温度差 0.6 度がほぼ位相差 2π であるのに対して、40Gbps 対応素子では 2.3 度であり約4倍の耐性が示されている。これは遅延線の長さ

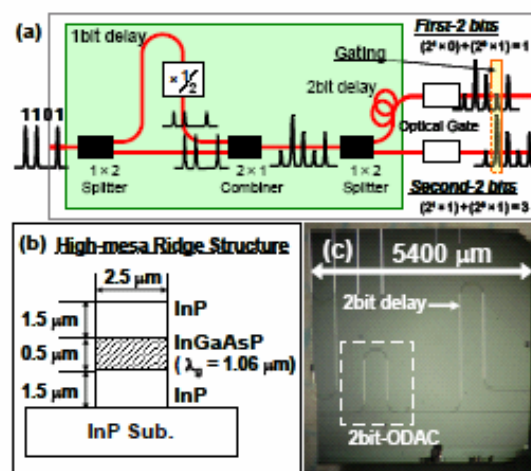


図 60. 40Gbps 対応 ODAC の構成
(a) 構成ブロック図 (b) 断面構造 (c) 作製素子の表面写真

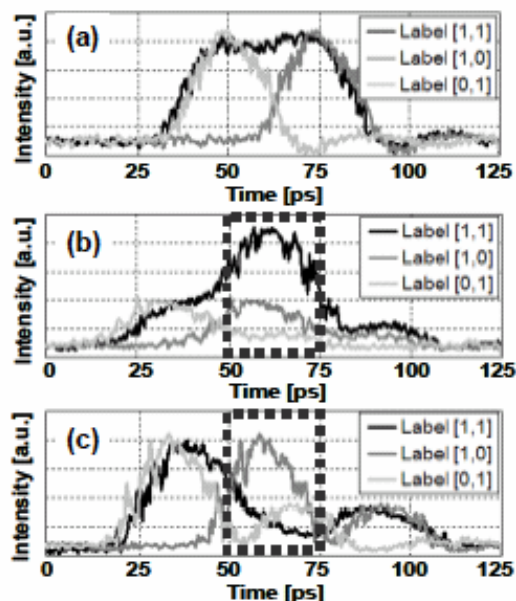


図 61. 40Gbps 対応 ODAC の動作測定結果
(a) 2ビット光ラベル波形
(b) 出力波形 (1549.88 nm, 24.5 °C)
(c) 出力波形 (1549.72 nm, 24.5 °C)

が4分の1であることに起因する。また図55(b)と図62(b)の波長依存性を比較すると、10Gbps 対応では0.08nm (10GHz) 周期であり、40Gbps では0.32nm (40GHz) 周期となっており周期的なフィルタ状の透過率を反映している。以上から、速度や波長などの条件が変化した際の半導体 ODAC の動作特性を見積もる上でも、合波時の位相条件を考えれば検討可能であることがわかった。

最後に、半導体 ODAC を光識別器に用いた光ラベルスイッチの検討について述べる。図63に測定系を示す。測定はペイロード 10Gbps、ラベルはパルス幅 1ns、パルス間隔 1ns、4ビットで行った。光パケットは EA 変調器集積化光源の EA 変調器部を PPG で変調してラベルとペイロード部を生成し、2段目の EA 変調器にてラベル強度をペイロードより 1~3dB 強くなるよう設定した。これはゲートパルス生成器にてラベルのみで選択的に反応するための工夫である。入力パケットは2分岐後、片方はラベル処理部、残りは光スイッチ部へと送られる。ラベル処理部はさらに PD とコンパレータによる閾値判別・1ns 幅の単一パルス生成回路からなるゲートパルス生成器、および PD+電気増幅器・ドライバアンプからなる OEO 型利得等化器で構成される。利得等化された信号光は、光ファイバベースの2ビット ODAC に入力後、2分岐され2台の EA 変調器(光ゲート)を通して前半2ビット・後半2ビットの DA 変換信号を生成する。EA 変調器はゲートパルス生成器からの信号で駆動される。DA 変換出力はアドレステーブルに入力され、アドレスに対応した出力信号を出力する。出力信号は入力パケットを波長変換する波長可変レーザ(SSG 型)の波長に対応して設定されている。SSG 型 DBR レーザを用いるため ns オーダの高速波長選択が可能である。また波長変換器には SOA の相互利得変調(XGM) 特性を利用した。波長変換出力は AWG を通して波長に対応した出力にパケットを転送する。全体として ns オーダの高速なスイッチが可能な構成である。

図64に測定結果を示す。本実験ではラベル時間幅をアドレステーブルが直接反応可能な 1ns に設定しているが、光パケット(a)に対して DA 変換出力(b)とアドレステーブル出力(c)、SSG の波長選択(d)、波長変換後のパケット転送が実現できた。入力光パケットから自律的にラベルを識別し、パケットの転送を行う動作の実証は国内では NTT、NiCT、海外でも Univ. California, Santa Barbara や UC Davis, Univ. Essex くらいしか実現できておらず、最先端の動作を実現できたと考えている。

まだラベルのビット数の拡張やラベルの高速動作、波長数の増大、高速な利得等化器の導入など課題は多いが、前述のフィルタによるラベル速度と電子回路の速度整合、位相シフトプリアンブルによるゲートパルス生成などを導入して特性改善が実現できると考えられる。

以上から、半導体 ODAC の基本動作と光ラベルスイッチへの適用可能性を示せたと考えている。

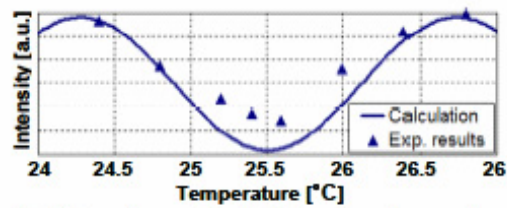


Fig.3 Dependence of output intensity on temperature ($\lambda=1549.72\text{nm}$)

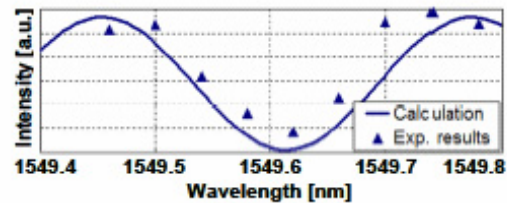


図 62. ODAC 出力強度
(a) 温度依存性 (b) 波長依存性

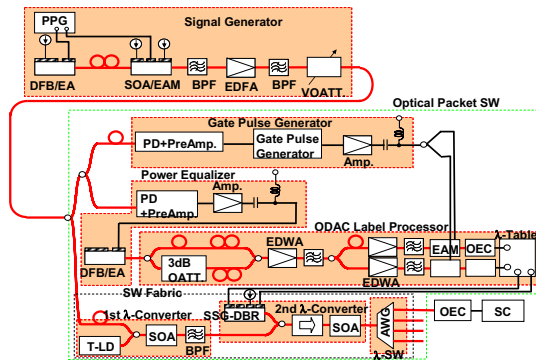


図 63 自動ゲートパルス生成器と光利得等化器を導入した4ビットODAC型光ラベルスイッチの測定系

(2)研究成果の今後期待される効果

5年の研究期間内では素子の4ビットを超える高集積化や8ビット以上の処理を充分に対応できたとは言えないため、今後はその実現に向けて引き続き検討を進めていきたい。基本的には集積化はパッシブ光導波路とアクティブ光ゲートのモノリシック集積化、その結合損失の低減・ゲートの偏波無依存化・導波路分岐数と並列光ゲート数の増加により対処していく。

本研究の成果は、超高速光信号の情報処理の構成にパラダイムシフトを起こす可能性がある。特に信号のビットごとの処理はすべて電気処理に任せてきた既成観念から、高速な光素子により低速な電気回路で低負荷で処理できる波形に整形する構成に概念を変化させていくことになる予測される。

本研究では光信号処理のアプリケーションを光ラベルスイッチのラベル識別器に注力して進めてきたが、同概念は信号処理全般に適用可能である。

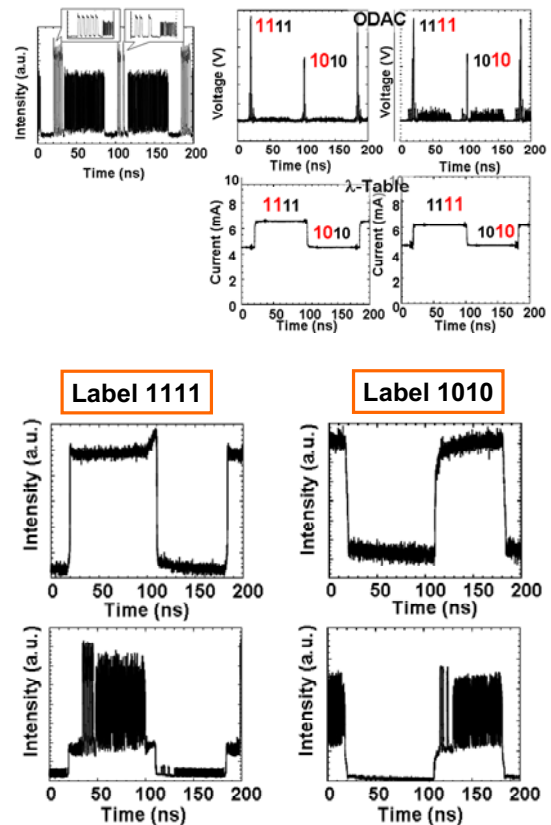


図 64. 光ラベルスイッチの動作特性

- (a) 入力光パケット
 (b) ODAC 出力(左:前半2ビット、右:後半2ビット)
 (c) アドレステーブル出力(左:前半2ビット、右:後半2ビット)
 (d) SSG-DBR-LD 出力(左:1553.0nm, 右:1553.8nm) (e) ルーティング出力(左:1553.0nm, 右:1553.8nm)

3. 3 時空間変換型光パケット生成・転送方式の研究(慶応義塾大学 時空間変換光制御方式研究グループ)

(1)研究実施内容及び成果

(a) 時空間変換型光パケット生成方式の検討

光パケット生成のための時空間変換処理を行うキーデバイスであるアレイ導波路回折格子の性能向上に努め、限られた基板面積を有効に利用し、低損失に長尺のアレイ導波路を配置する新規の構造を提案した。従来のアレイ導波路回折格子と同程度の性能を持つアレイ導波路回折格子を約 1/10 のチップ面積で実現可能になった。アレイ導波路の位相誤差を補償する方法を研究中であり、位相誤差補償と微小化構造の利用によって時空間変換性能を10倍に高めることが出来ると期待している。また、時空間変換によって光パケットを生成するために、空間光変調器集積用の周波数分光される等位相面が平坦となったアレイ導波路回折格子を設計、試作して動作デモンストレーションを行った。

(i) V字型微小曲げ導波路構造を利用した超小型アレイ導波路回折格子

アレイ導波路回折格子を高分解能化するためには、アレイ導波路部の遅延時間を長くする必要があるが、基板面積の制限と導波路曲げ半径の制限によって規定される。本研究では、図 65(a)～(c)に示すように導波路内にミラーをしたV字型微小曲げ導波路構造を用いて、光を微小領域で曲げることによって超小型かつ高分解能なアレイ導波路回折格子を構成することができた。さらに、曲げ構造を複数設けることによって、遅延時間を長くして超高分解能アレイ導波路回折格子を構成することが可能になる。これらのアレイ導波路回折格子の透過スペクトル形状を図 66(a)～(c)に、導波路設計パラメータを表 2 示す。各アレイ導波路回折格子の寸法は従来技術を利用して作製した同様の分光特性を持つものと比較して約 1/10 の寸法になっている。各アレイ導波路回折格子の透過スペクトル特性において、挿入損失、クロストークはそれぞれ(a) 5.2 dB, -20.9 dB, (b) 8.3 dB, -15.8 dB, (c) 13.4 dB, -7.8 dB である。曲げ回数を増やすに従って透過率が下がり、隣接するチャネルのクロストークが増大していることが分かる。透過ピーク波長における損失増大の要因は、導波路ミラーの損失が、2-3 dBあること、クロストーク劣化に伴い帯域幅が増えたことに起因する。クロストーク劣化の原因は主としてアレイ導波路の位相誤差である。

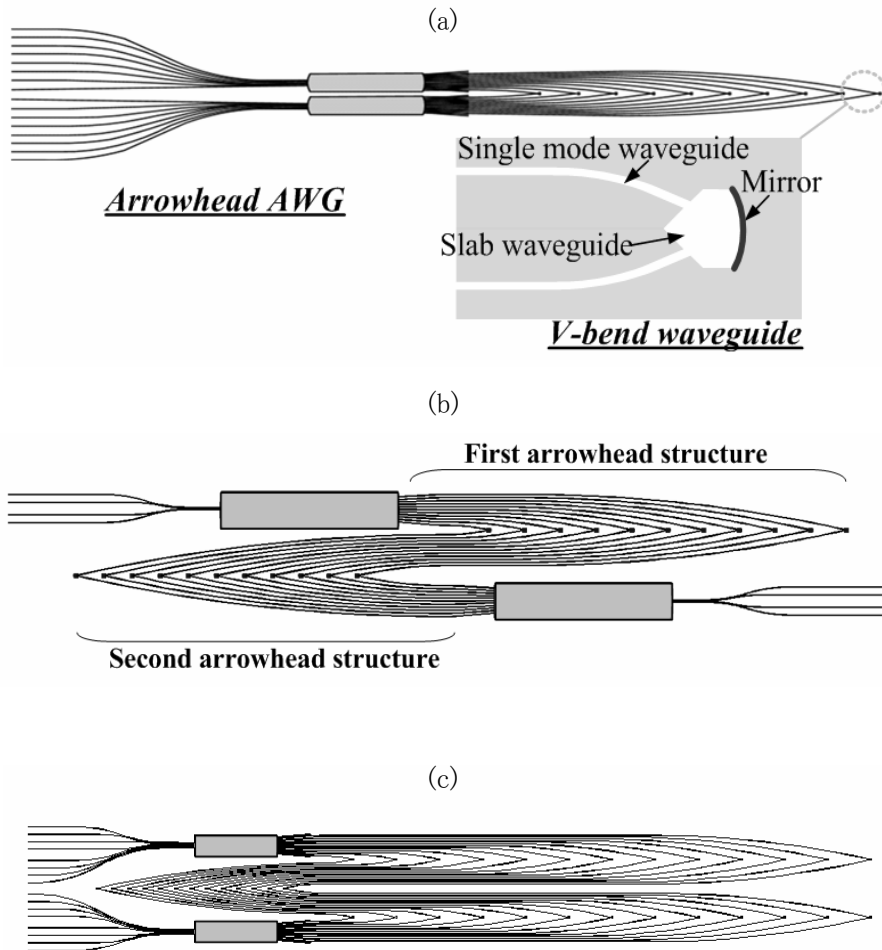


図 65. V字型微小曲げ導波路構造を利用した超小型アレイ導波路回折格子

表 2. アレイ導波路回折格子の設計パラメータ

導波路曲げ回数	1	2	3
チャンネル数	8	16	8
チャンネル間隔 [GHz]	25	100	6.25
回折次数 (中心波長)	951	118	3807
隣接導波路長差 [μm]	1017.62	127.202	4070.46
チップサイズ [mm^2]	4.2×23	8.2×30	4.2×34

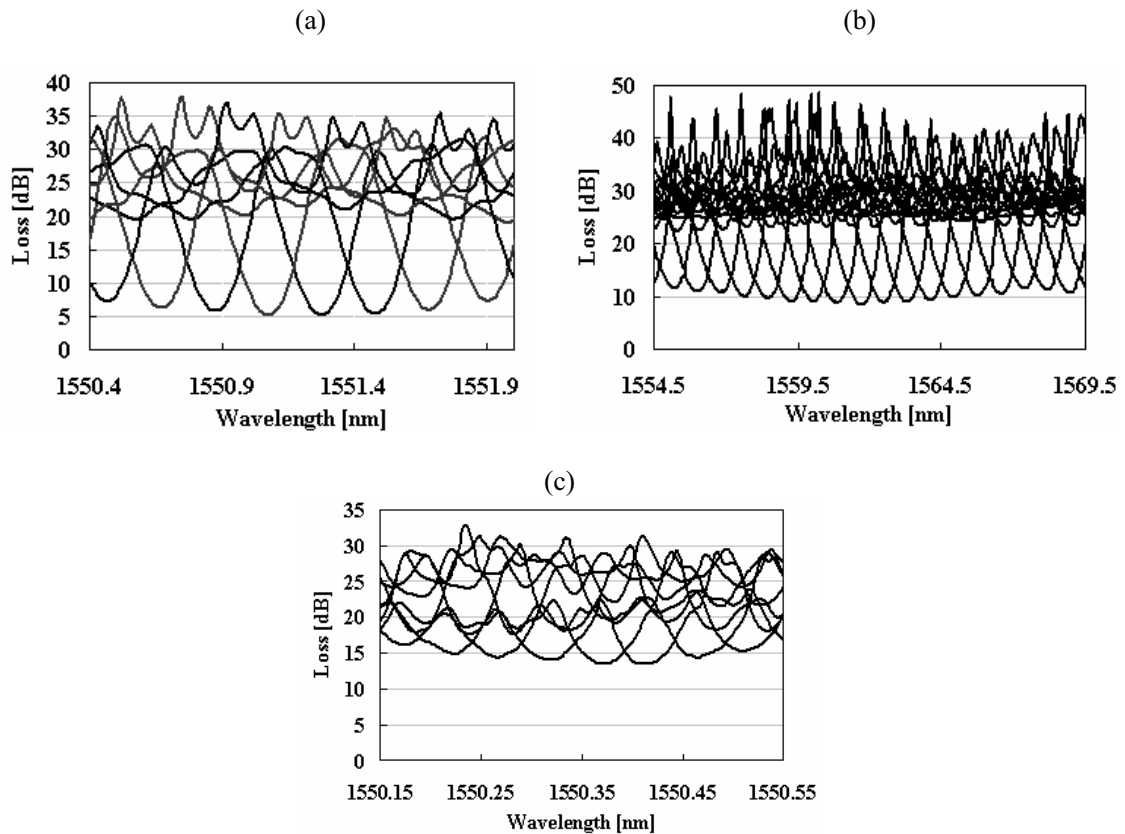


図 66. (a)曲げ回数1回、(a) 曲げ回数 2 回、(b) 曲げ回数 3 回のアレイ導波路回折格子の波長透過特性

(ii) 空間光変調器集積用アレイ導波路回折格子

光ヘッダの符号化／復号化を検討するために図 67 に示す空間光変調器集積用アレイ導波路回折格子を設計し、試作した。アレイ導波路回折格子のスラブ導波路を切断し、位相変調用の空間フィルタを取り付ける構造である。レンズ形状の溝と紫外線硬化性樹脂を用いてアレイ導波路回折格子のスラブ導波路にレンズ系を導入し、平坦な等位相面を持つ。これにより、外部空間光変

調器との集積が容易になる。各アレイ導波路からスラブ導波路へ拡散する光波の等位相面はほぼ円弧状であり、レンズ系の焦点距離がアレイ導波路端の中央とレンズ系主平面間の距離と等しくなるように設計した。反応性イオンエッチングにより深溝を形成し、その溝を紫外線硬化性樹脂で埋めてレンズ系が構成される。複数の薄肉レンズから構成される多段レンズ系を用いることにより、放射損失を低減することが可能である。レンズ中央部の溝幅 $27.7\ \mu\text{m}$ 、焦点距離 $8000\ \mu\text{m}$ 、レンズの曲率半径 $636.3\ \mu\text{m}$ のレンズをレンズ間隔 $53\ \mu\text{m}$ で3枚配置した。出力面とレンズ系の中心の距離は $304\ \mu\text{m}$ であった。また、レンズの直径は $214\ \mu\text{m}$ であり、これは設計したアレイ導波路回折格子の自由空間領域よりも十分に大きな値である。樹脂とスラブ導波路の屈折率はそれぞれ 1.51、1.452 であった。設計したレンズ系における放射損失は、BPM シミュレーションにより 0.435 dB と求められた。なお、放射損失低減のためレンズの中心間隔は最適化されている。FSR は 100 GHz、チャネル数 8、チャネル間隔 12.5 GHz のハイブリッド集積用 AWG を設計、作製した。中心波長における挿入損失、偏波依存性損失(PDL)はそれぞれ 9.3 dB、0.3 dB であった。隣接チャネル間クロストークは、-17.4 dB であった。測定後、目標とする切断線から数百ミクロンの位置でチップを切断し、精密研磨を行った。出力端面における線分散は約 $0.696\ \text{GHz}/\mu\text{m}$ であった。

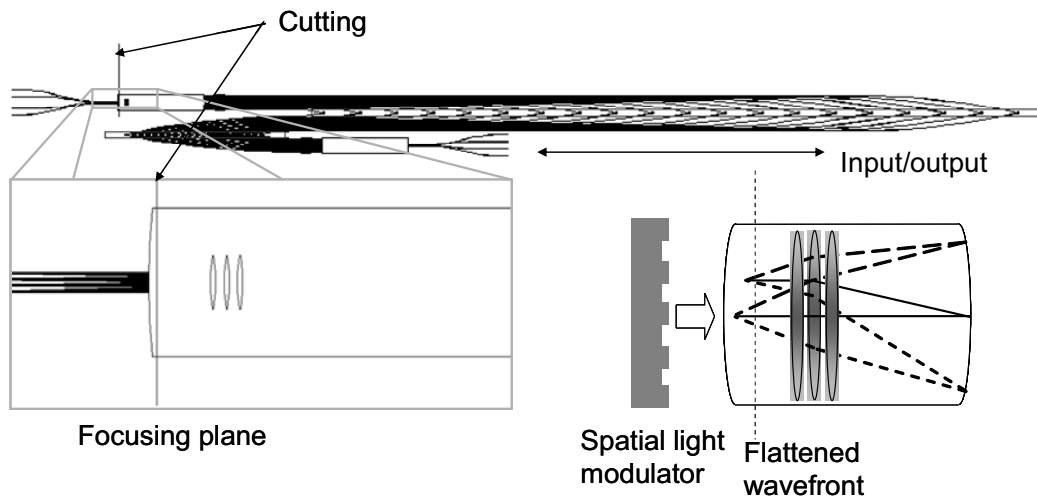


図 67. 空間光変調器集積用アレイ導波路回折格子

等位相面の歪みを測定するために、作製したアレイ導波路回折格子に平面ミラーを取り付け、光パルスの入出力波形を観察した。ミラーはガラス基板に Au を堆積することにより作製し、アレイ導波路回折格子の自由空間領域と等しい幅を持つ。また、アレイ導波路回折格子とミラーの空気ギャップをマッチングオイルで埋めることにより、フレネル損失の低減を行った。入力光には、図 68(a)に示すように、8つのモードから形成される、繰り返し周波数 12.5 GHz の光周波数コムを用いた。オートコリレータを用いて観測した入出力パルスの波形を図 68(b)に示す。入出力パルスの半値全幅(FWHM)の相対比は約 10.2%であり、これは円弧状の等位相面の歪みを仮定した場合には位相差 0.35 rad に相当する。

次に、図 69(a)に示すように、平面ミラーを縞状ミラーに置き換え、8本のモードから一つおきに4本のモードを抑圧した。縞状ミラーは4つの長方形反射領域を持ち、その幅、間隔共に $18\ \mu\text{m}$ であり、反射領域と非反射領域の位置が 12.5 GHz の周波数コムのピークに一致する。元のチャネルと抑圧したチャネルのパワー比は約 19 dB であった。その結果、図 69(b)に示すように、2倍の繰り返し周波数をもつパルス列を生成することに成功した。

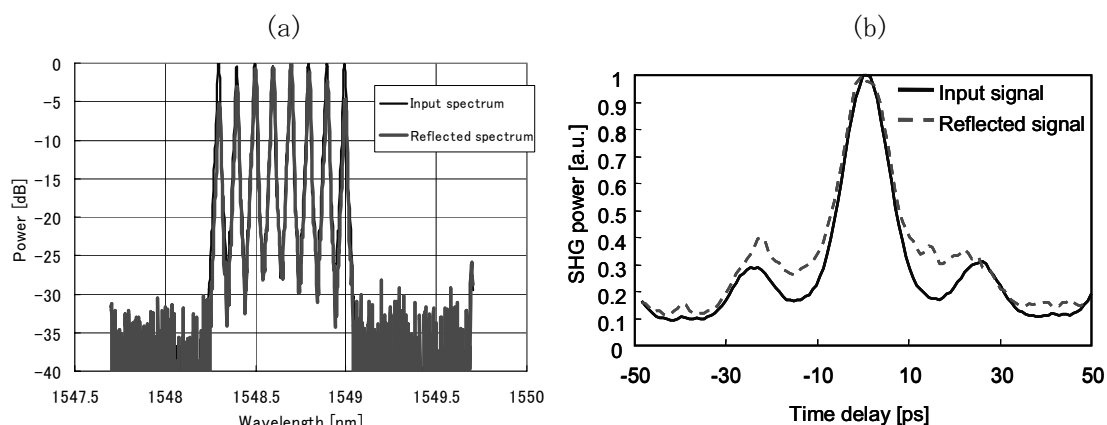


図 68. : (a) 空間光変調器集積用アレイ導波路回折格子への入射パルス列スペクトル、
(b) 入射パルス及び反射パルスの SHG 自己相関波形

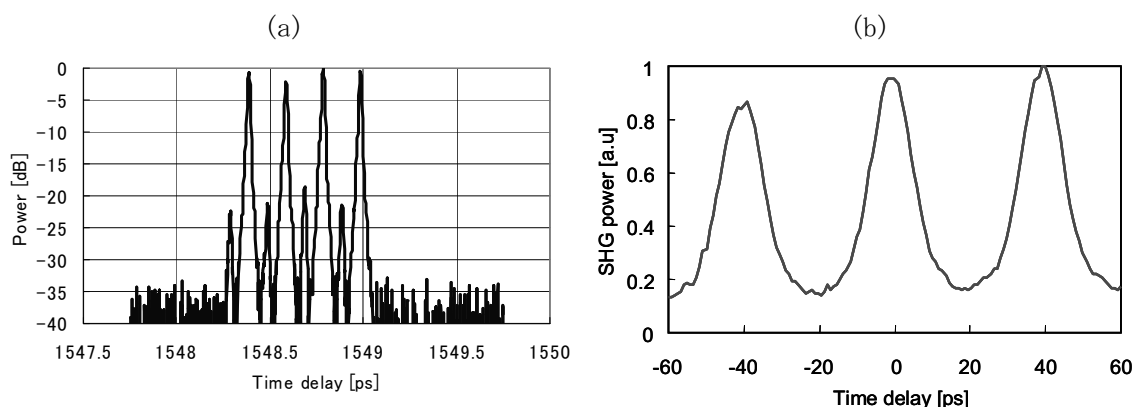


図 69. (a) 縞状ミラーを集積したアレイ導波路回折格子からの反射パルス列スペクトル、
(b) 反射パルスの SHG 自己相関波形（繰り返し周波数 2 通倍）

(b) 全光パケットヘッダ認識方式の検討

アレイ導波路回折格子の一層の小型化、性能の向上、作製の容易さを目標に、新規の微小曲げ回路を提案し、アレイ導波路回折格子に適用した。また、光パルスシンセサイザによる任意波形発生方法を検討し、光パケットヘッダ用固定光符号生成回路の試作と符号化／復号化検証実験を実施した。

(i) 低屈折率材料充填溝構造を利用した超小型アレイ導波路回折格子

コアの両側に空気溝を作成することによって横方向の光の閉じ込めを強め、曲げ半径を小さくするという研究が報告されているが、シングルモード条件を満たすコア幅は $0.74 \mu\text{m}$ と非常に細いため、メサが壊れやすい。また、溝部分に埃や不純物が混入することで特性が悪化する恐れがあり、安定した性能を得ることが難しくなる。我々は、溝部分に低屈折率材料を充填することで、これらの問題を解決することを提案し、低屈折率材料でコア両側の溝を埋め込み、小型化したアレイ導波路回折格子を作製した。低屈折率材料埋め込み導波路を用いて 8 チャンネル、チャンネル間隔 12.5 GHz の、導波路を 3 回折り曲げた Arrowhead 型アレイ導波路回折格子を作製した。作製したアレイ導波路回折格子の模式図を図 70 に示す。微小曲げ導波路の曲げ角度は 150 度である。アレイ導波路とスラブ導波路を含むチップ面積は $4.33 \times 23.43 \text{ mm}^2$ である。これは同じチャンネル数、チャンネル間隔、アレイ導波路

本数の従来の $\Delta = 1.5\%$ のAWGの約1/4のサイズに相当する。また、透過特性を図71とした。

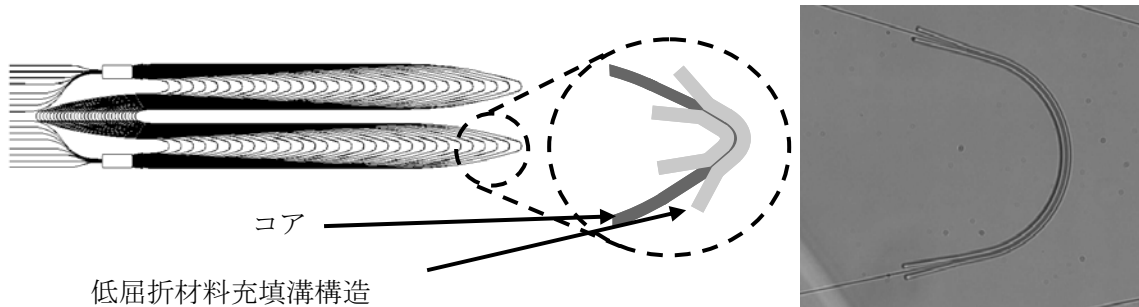


図70. 導波路を3回折り曲げた Arrowhead 型アレイ導波路回折格子

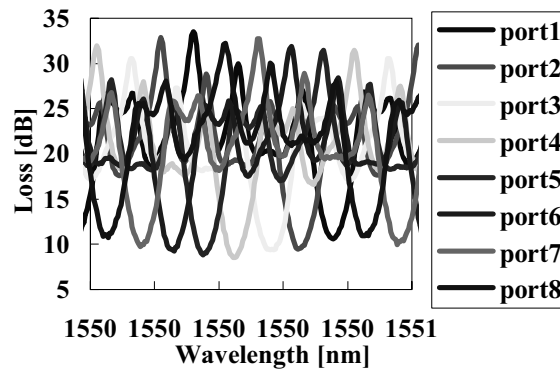


図71. トリプル Arrowhead 型アレイ導波路回折格子の透過特性

(ii) 光パルスシンセサイザの構成と波形制御

光周波数コム発生器と光周波数スペクトル整形器によって光パルスシンセサイザが構成される。光周波数コム発生器（図72(a)）は、周波数安定化された光源、可変波長光源から出力されたコヒーレンスの高いレーザ光を位相変調器及び強度変調器によって変調し、平坦で広帯域な光周波数コムを生成することが出来る。モードロックレーザ等の方法に比較して安定で低雑音なコムである。また、光周波数スペクトル整形器（図72(b)）はアレイ導波路回折格子の各出力チャンネルに位相変調器と強度変調器が集積されており、光周波数コムの各モードを独立に位相・振幅制御可能である。

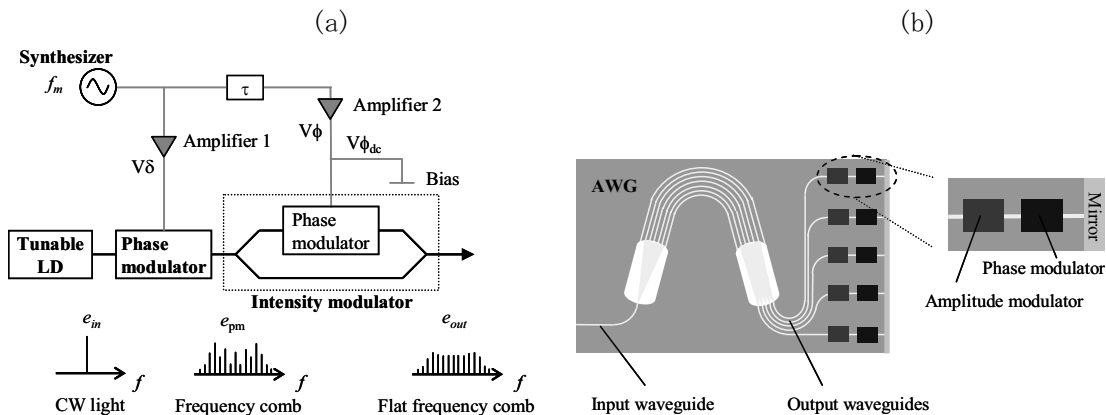


図72. (a) 光周波数コム発生回路、(b) 光周波数スペクトル整形器

図 73(a)に光周波数コム生成器の出力スペクトルを示す。位相変調指数 $\cdot$ は 5.28 rad、中心周波数 f_0 は 193.115 THz、周波数間隔 f_m は 10 GHz であった。この光周波数コムを光周波数スペクトル整形器に通し、中心周波数に近い周波数チャンネル 12 本を制御し、周波数スペクトルがガウス形になるように整形した。SHG 自己相関波形をそれぞれ図 73(b)に示す。ガウシアンパルスのパルス幅は自己相関波形から 6.31 ps と算出された。シミュレーションの値は 5.6 ps なので、フーリエ変換限界に近いパルスが生成できたが、相関波形に裾引きが見られ、スペクトル整形の改善が必要である。ガウシアンパルスの他に、幅 50 ps の矩形パルス、20 ps の時間間隔をもつダブルガウシアンパルスの生成を行った。それぞれ図 73(c)、(d)に示すような SHG 自己相関波形が観測された。

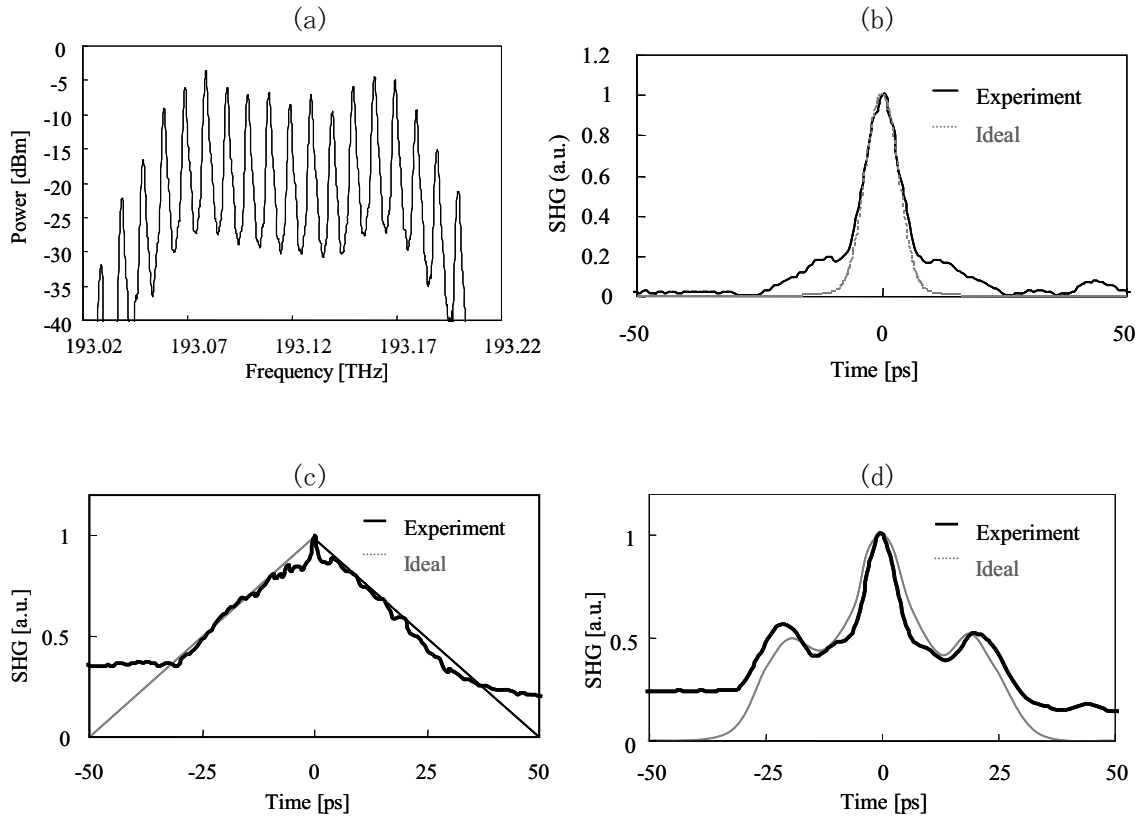


図 73. (a) 光周波数コムスペクトル、(b)ガウシアンパルス SHG 自己相関波形、
(c) 矩形波形 SHG 自己相関波形、(d) ダブルガウシアンパルス SHG 自己相関波形

(iii) スペクトル位相符号化デバイスと光パルス符号化実験

アレイ導波路回折格子と、導波路内深溝を用いた位相制御構造を集積したスペクトル位相符号化デバイスを提案・試作し、特性の評価およびこれを用いた光パルスの位相符号化実験を行った。図 74 にスペクトル位相符号化素子構造を示す。

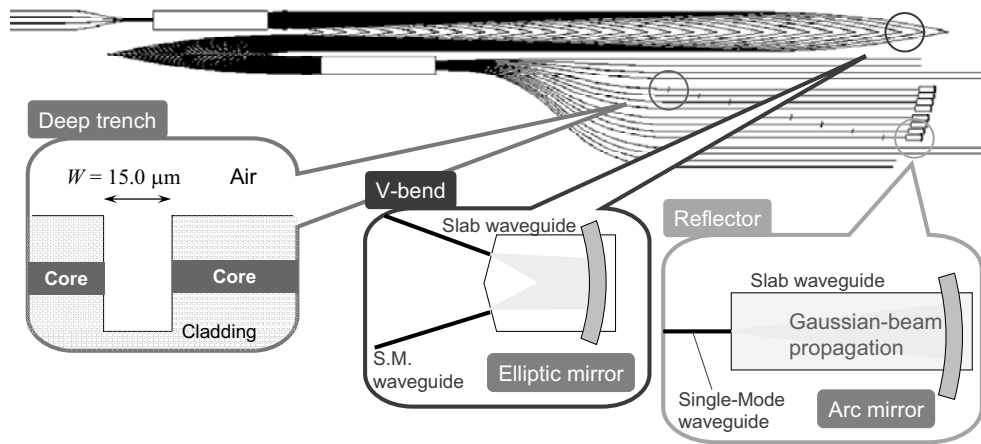


図 74. スペクトル位相符号化回路構成

アレイ導波路回折格子によって周波数分解された各モード成分は、シングルモード導波路上に作製された深溝構造による位相調整機構によって位相を制御される。相対位相のシフト量は深溝に注入する樹脂の屈折率を変えることによって調整することが可能である。チップに相対位相シフト量 $\{5\pi/4, \pi/4, 0, 3\pi/4, 3\pi/2, \pi, 7\pi/4, \pi/4\}$ を位相符号として割り当て、位相制御を行った状態で光パルス波形の評価を行った。図 75 は上記の位相符号化を行った出力波形の実測値と理論値の比較であるが、良く一致する結果を得ることが出来た。

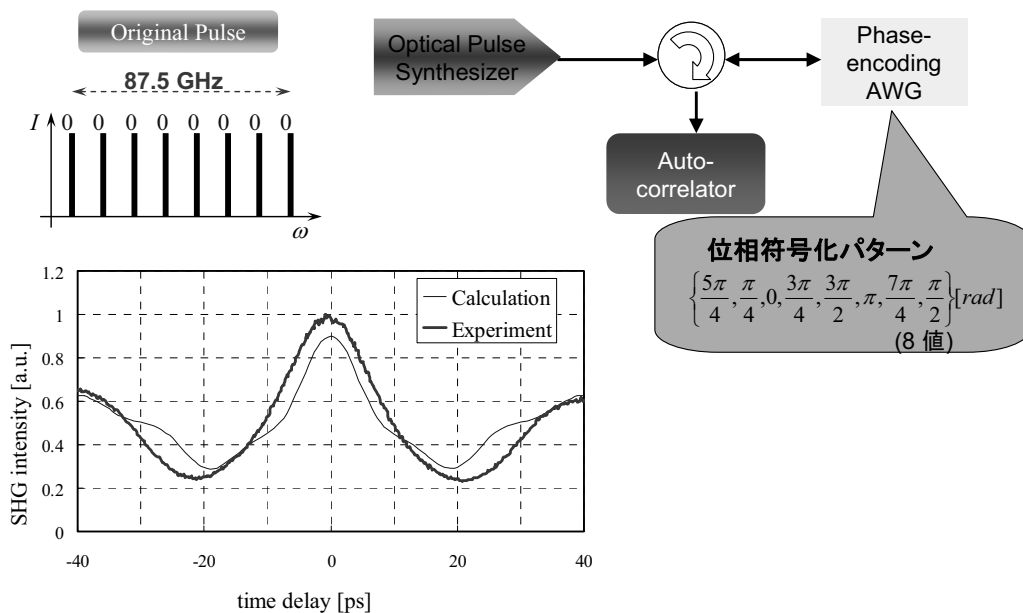


図 75. 光パルス符号化実験

(2)研究成果の今後期待される効果

時空間変換型光パケット生成・認識のために、石英光回路の小型化、高性能化に係わる新しい技術、回路構成の提案、実証を行うことが出来た。これらの知見は、バックボーンネットワークから、メトロネットワーク、アクセスネットワーク、並びに光 LAN における光合分波回路に適用可能である。また、本研究で得られた高精度の光信号処理技術は、各種高度計測技術に適用可能である。

3. 4 長波長帯 InGaAsSbN 半導体結晶の MBE 成長の研究(大阪府立大学 産学官連携機構 先端科学イノベーションセンター 結晶成長研究グループ)

(1)研究実施内容及び成果

GaAs 基板上の $1.3\ \mu\text{m}$ 帯 InGaAsSbN レーザの MBE 成長に関しては、室温での EL 波長 $1.27\ \mu\text{m}$ を実現するとともに、波長 $1.2\ \mu\text{m}$ (150K) でのレーザ動作を達成した。さらに Sb 原子の添加と N 原子に関連した局在準位形成との関係を実験的に初めて明らかにした。また InP 基板上の InGaAsSbN レーザの成長も試み、波長 $2.5\ \mu\text{m}$ での EL 動作、及び波長 $2.3\ \mu\text{m}$ (190K) でのレーザ動作も実現した。InP 基板上の InGaAsSbN 系発光素子としては $2.5\ \mu\text{m}$ は世界最長波長である。以下、より具体的に研究実施内容と成果についてのべる。

① N原子導入の基礎実験

InGaAsSbN レーザを作製するための基礎実験として GaAs 層への N 原子添加の実験を行い、N 原子導入により実際にバンドギャップが減少することを実験的に確認した。N 源としては通常は RF プラズマ源が使用される場合が多いが、本研究では低濃度のドーピングも可能である ECR プラズマ源を用いた。図 76 は窒素濃度と成長した GaAsN 層のバンドギャップおよび格子定数の関係を示したものである。図からわかるとおり、窒素濃度とともにバンドギャップは減少しており、窒素 1.4% で $200\ \text{meV}$ 程度の低下が観測されている。またこれと同時に格子定数が減少していることもわかり、微量窒素導入で通常の混晶半導体とは異なり、格子定数は減少しながらバンドギャップも減少するという特有の効果が得られることがわかる。

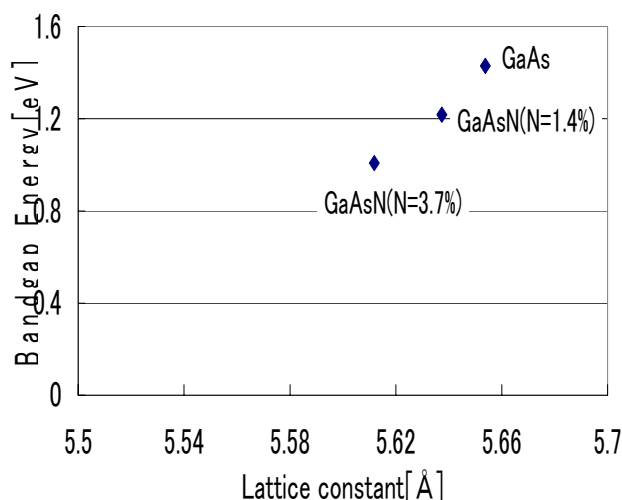


図 76. N 濃度と GaAsN 層のバンドギャップ・格子定数の関係

② Sb原子導入の効果の基礎実験

次に InGaAsSbN 層を作製する上で N 原子の次に重要となる Sb 原子の導入効果に対する基礎実験を行った。

InGaAsN 層においては N 濃度が増加すると結晶欠陥や組成揺らぎが増大し、量子井戸層を作製した場合に良好な界面が形成されず発光特性が劣化するという問題がある。これを解決する手段として微量の Sb 原子を導入することにより N 原子を添加し

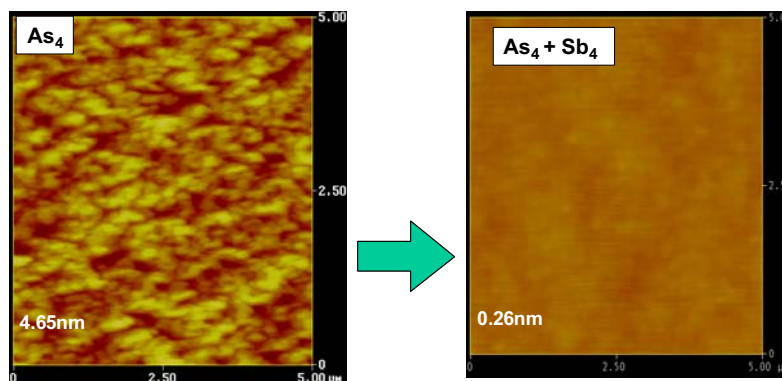


図 77. InGaAsN 層 及び Sb を微量添加した InGaAsSbN 層の表面の AFM 像の比較

た場合におこる3次元成長や組成揺らぎを低減させることが提案され、実際に良好な波長 $1.3 \mu\text{m}$ のレーザが実現されている。本研究では Sb 原子の添加が実際に結晶表面を平坦化することを原子間力顕微鏡 (AFM) により観測した結果について示す。図 77 は N 原子を約1%含む InGaAsN 層のAFM像と、これにやく2%の Sb 原子を添加した場合のAFM像を比較したものである。図よりあきらかな通り、 Sb の微量添加により結晶表面が平坦化されていることがわかる。これは Sb 原子のいわゆるサーファクタント効果の表れであり、表面エネルギーの低下により3次元成長が抑制され、2次元成長が促進されたことによるものと考えられる。

③ GaAs 基板上的波長 $1.3 \mu\text{m}$ 帯 InGaAsSbN 量子井戸レーザの試作

以上で、 N 原子の導入および Sb 原子の添加に関しての基礎実験を行い、その効果の確認を行ったので、次に実際に InGaAsSbN 量子井戸レーザの作製にとりかかることにした。

作製した GaAs 基板上的量子井戸レーザのバンド図を図 78 に示した。 $1.3 \mu\text{m}$ 帯の GaAs 基板上的レーザとしては、 $\text{InGaAsSbN}/\text{GaAsN}$ タイプ I 量子井戸活性層を有するレーザ構造を作製した。素子構造は、 n-GaAs 基板上に Si-AlGaAs クラッド層($1 \mu\text{m}$)、 non-GaAs 光ガイド層(120nm)、3ウェルの InGaAsSbN 量子井戸層(7nm) / GaAsN バリア層(5nm)、 non-GaAs 光ガイド層(120nm)、 Be-AlGaAs クラッド層($1.5 \mu\text{m}$)、 Be-GaAs 層(50nm)を順次積層させた構造とした。量子井戸活性層の Sb 組成が異なる2種類の試料 ($\text{Sb}=0.5\%$, 及び $\text{Sb}=2.5\%$) に関して、発光特性のアニール効果を調べた。なお量子井戸層における他の組成については以下の値に固定している ($\text{In}=0.36$, $\text{Ga}=0.64$, $\text{As}=0.972$, , $\text{N}=0.01$)。量子井戸活性層の成長温度は 500°C 、その他の層の成長温度は 600°C とした。素子は幅 $100 \mu\text{m}$ の電極ストライプ構造とし、キャビティ長は約 $500 \mu\text{m}$ とした。なお、試料の熱処理としては、窒素ガス雰

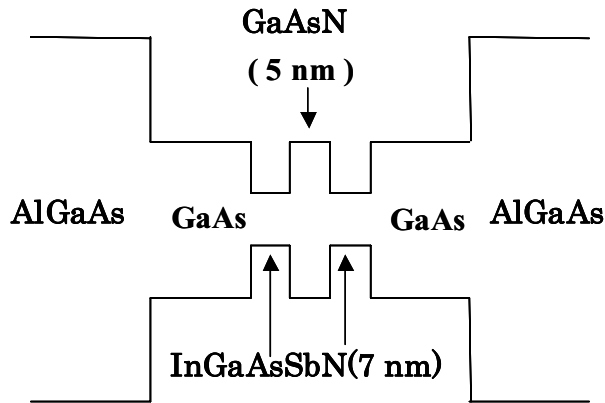


図 78. GaAs 基板上的 InGaAsSbN 量子井戸レーザのバンド構造

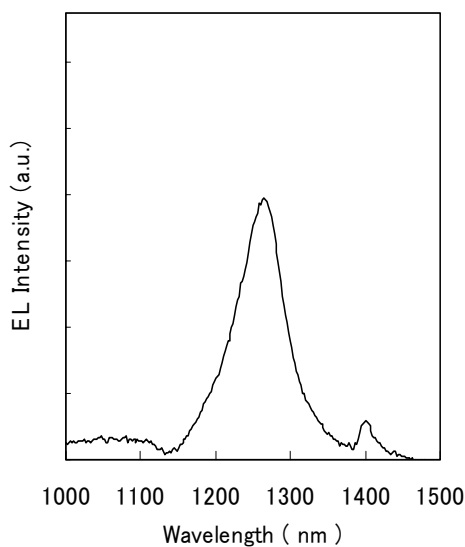


図 79. ELスペクトル (300K)
 $\text{In}=0.36$, $\text{Sb}=0.005$ の場合

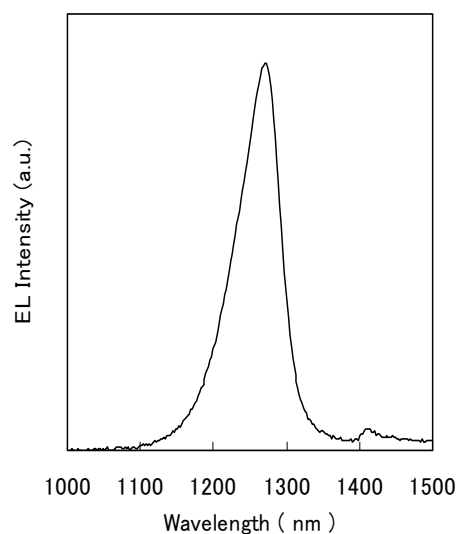


図 80. ELスペクトル (300K)
 $\text{In}=0.36$, $\text{Sb}=0.025$ の場合

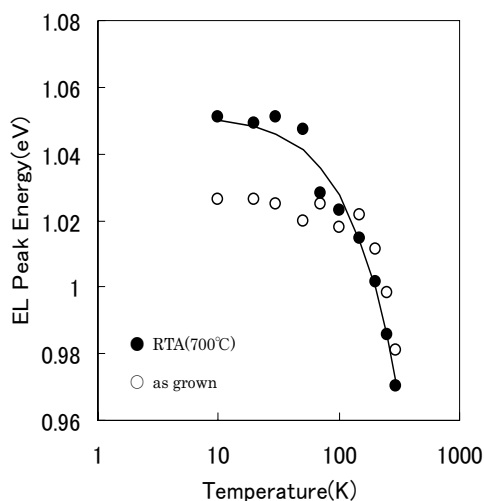


図 81. EL ピークエネルギーの温度依存性
In=0.36, Sb=0.005 の場合

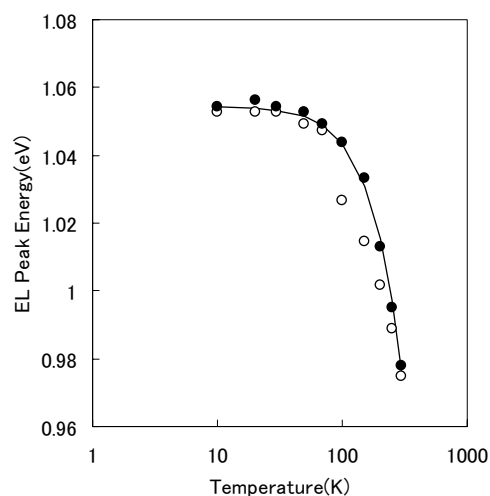


図 82. EL ピークエネルギーの温度依存性
In=0.36, Sb=0.025 の場合

囲気中で Rapid Thermal Annealing (RTA)を 700°C, 30 秒の条件で行った。

図 79 及び図 80 に Sb=0.5%と Sb=2.5%のダイオード(熱処理前)の 300Kにおける EL スペクトルをそれぞれ示す。どちらのダイオードにおいても 300Kでの発光波長はおおよそ $1.27\mu\text{m}$ となっているが、半値幅は Sb=2.5%の方が 53meV、Sb=0.5%の方が 59 meV と前者の方が若干狭くなっていることがわかる。

図 81 は Sb=0.5%のダイオードの熱処理前後におけるピークエネルギーの温度依存性を示している。熱処理前においては低温領域での発光エネルギーが低くなっているのに対し、熱処理後は高エネルギー側にシフトし、Varshini の式でのフィッティングが可能となっている。このことは、熱処理前の試料に存在した In 又は N 組成の揺らぎに起因した局在準位が熱処理により消滅したことを示唆している。他方、図 82 は Sb=2.5%のダイオードの熱処理前後におけるピークエネルギーの温度依存性を示している。熱処理前においても Sb=0.5%のダイオードで観測された低温領域における局在準位による発光は観測されておらず、熱処理前とほぼ同様な温度特性が得られていることがわかる。このことは Sb 原子の増大により局在準位の形成が抑制されたことを示している。おそらく組成ゆらぎが減少したものと考えられる。図 83 に Sb を 2.5%導入した素子の RTA 前後の発振閾値の温度依存性を示す。どちらの場合も T_0 は 90K 程度と比較的高い温度が得られてはいるものの、発振閾値電流密度は、150K において $2.8\text{KA}/\text{cm}^2$ とかなり高くなっている。図 84 は 150K における RTA 無しの素子の発振スペクトルである。発振波長は $1.2\mu\text{m}$ となっている。発振閾値が低減しない事の原因として、Al と N が同一成長室に存在することが原因となっている可能性がある。実際、Al と N を分離することにより閾値の低減が実現したとの報告がある。今後は Al の代わりに P を使用してクラッド層に InGaP を用いることを検討する必要があると考えている。

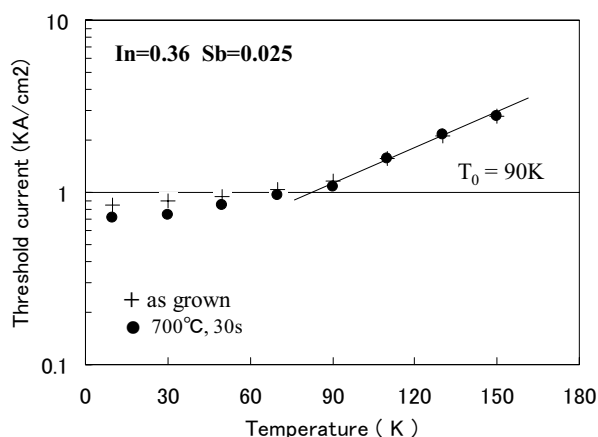


図 83. In=0.36, Sb=0.005 の場合のレーザの
発振閾値の温度依存性

③InP 基板上的の波長 $2\mu\text{m}$ 帯 InGaAsSbN 量子井戸レーザの試作

最後に InP 基板上的の波長 $2\mu\text{m}$ 帯 InGaAsSbN 量子井戸レーザの試作結果について述べる。この波長帯のレーザは環境計測、化学分析、医療などの分野での応用が期待されているが、InP 基板上に波長 $2\mu\text{m}$ 帯のレーザが作製できれば、光通信用レーザとしての高度な作製技術が可能であるため、高性能な単一波長可変レーザの実現などが容易となる。図 85 に InP 基板上的の波長 $2\mu\text{m}$ 帯レーザの素子構造を示す。レーザ構造は、n-InP 基板上に Si-InAlAs クラッド層 ($1\mu\text{m}$)、Si-InGaAs/InAlAs 超格子光ガイド層 (100nm)、InGaAs 光ガイド層 (100nm)、InAsSbN 量子井戸層 (3nm)、InGaAN バリア層 (10nm)、InAsSbN 量子井戸層 (3nm)、InGaAs 光ガイド層 (100nm)、Be-InGaAs/InAlAs 超格子光ガイド層 (120nm)、Be-InAlAs クラッド層 ($2\mu\text{m}$)、Be-InGaAs 層 (100nm) を順次積層させた構造とした。成長温度はすべての層において 500°C とした。量子井戸活性層の組成は $\text{As}=0.897$ $\text{Sb}=0.014$, $\text{N}=0.014$ とした。また熱処理として 600°C 、及び 700°C で 30 秒の RTA を施した。電極等は $1.3\mu\text{m}$ 帯と同様である。

図 86 は as grown、RTA(600°C)、RTA(700°C) の 3 種のダイオードの 10K での EL スペクトルを示したものである。RTA(600°C) ではピークの blue-shift が生じ半値幅が減少しているが、RTA(700°C) では逆にピークの Red-shift が見られ、半値幅が増大している。図 81 は各ダイオードのピークエネルギーの温度依存性を示している。RTA(600°C) の場合は低温領域での発光エネルギーが高エネルギー側にシフトしており、図 81 の場合と同様、熱処理により局在準位が消滅したためであると考えられる。これに対し、RTA(700°C) の場合は、全温度領域に渡って発光波長が低エネルギー側にシフトしている。これはバンドギャップそのものの変化であると考えられるが、現在のところメカニズムは明確になっていない。図 87 にそれぞれの場合の発振閾値の温度依存性を示した。RTA 600°C で処理したものが最も閾値が下がっていることが見ておれる。特性温度はどの条件においても 60 K 程度であった。図 88 に RTA 600°C で処理した素子の 210K における発振スペクトルを示した。

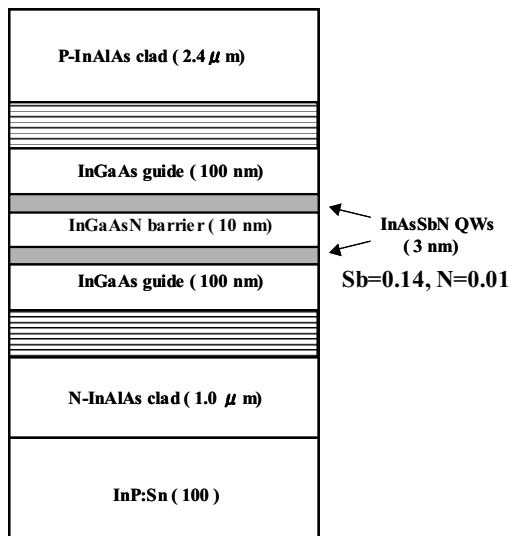


図 85. InP 基板上的の InGaAsSbN 量子井戸レーザの構造

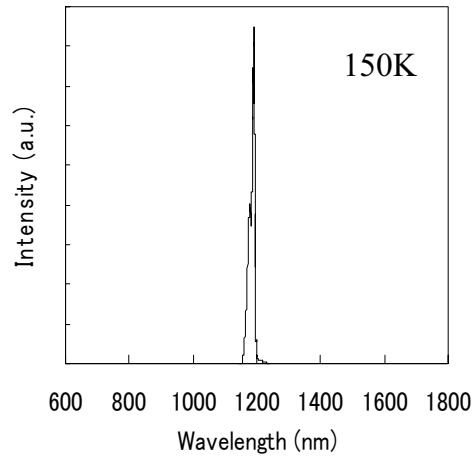


図 84. 発振スペクトル (150 K)
In=0.36, Sb=0.025 の場合

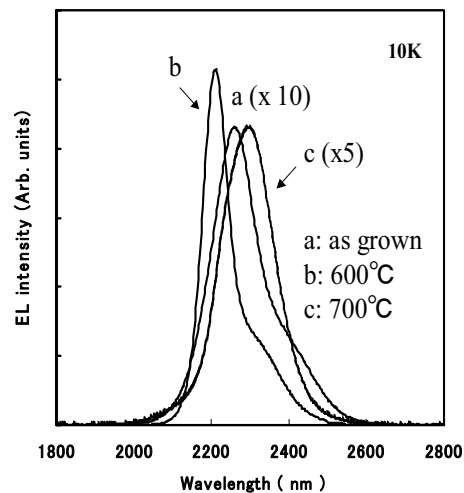


図 86. EL スペクトルのアニール効果

発振波長は約 $2.3\ \mu\text{m}$ となっており、さらに低閾値化が得られれば、室温で波長 $2.5\ \mu\text{m}$ 程度でのレーザ動作が期待出来る。

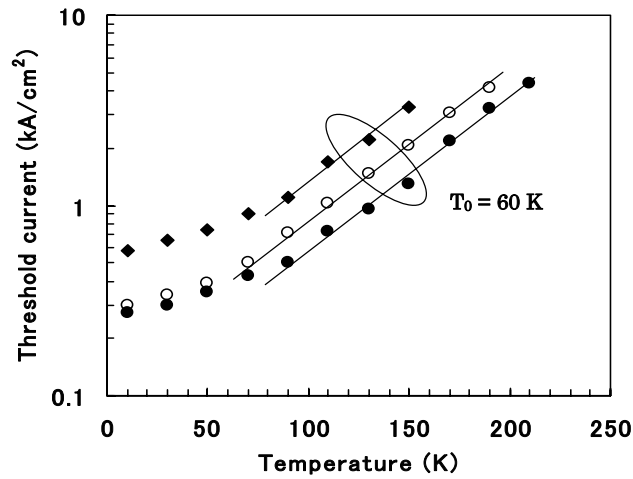


図 87. EL スペクトルのアニール効果

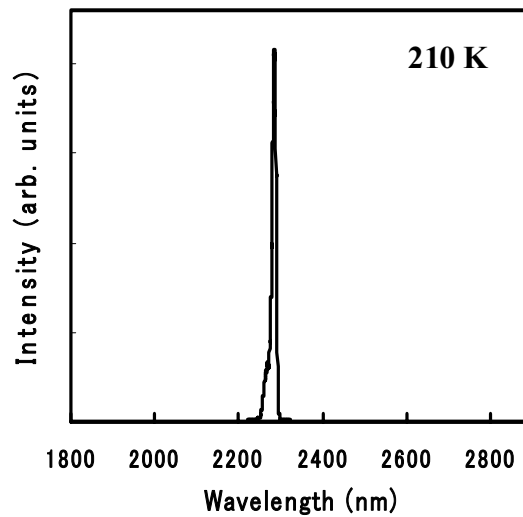


図 88. RTA600℃で処理した素子の 210 K における発振スペクトル

(2)研究成果の今後期待される効果

MBE装置の改造、成長条件の改善等により GaAs 基板上の $1.3\ \mu\text{m}$ 帯 InGaAsSbN レーザの特性はさらに向上出来ると考えられる。これにより高性能の光通信用面発光レーザの作製が実現可能となり、フォトニックネットワークのさらなる高度化が進むものと考えられる。また InP 基板上の波長 $2\ \mu\text{m}$ 帯レーザも室温動作が実現すれば環境・医療の分野での応用が期待出来ると思われる。

4 研究参加者

①超高速光メモリ研究グループ(二次元アレイ偏光双安定面発光半導体レーザを用いたシフトレジスタ機能付超高速光メモリの研究)

氏 名	所 属	役 職	研究項目	参加時期
河口 仁司	奈良先端科学技術大学院大学 物質創成科学研究科	教授	超高速光パケットメモリ構成法の研究と全体のとりまとめ	平成 14 年 11 月～ 平成 20 年 3 月
高橋 豊	山形大学工学部	准教授	偏光双安定性の理論的解明	平成 14 年 11 月～ 平成 18 年 3 月
片山 健夫	奈良先端科学技術大学院大学 物質創成科学研究科	助教	超高速光ゲート素子の研究	平成 14 年 11 月～ 平成 20 年 3 月
山吉 康弘	山形大学工学部	技術専門職員	半導体レーザ用結晶成長	平成 16 年 4 月～ 平成 18 年 3 月
佐藤 祐喜	奈良先端科学技術大学院大学 物質創成科学研究科	CREST 研究員	結晶成長および面発光半導体レーザ作製	平成 15 年 3 月～ 平成 20 年 3 月
森 隆	奈良先端科学技術大学院大学 物質創成科学研究科	CREST 研究員	偏光双安定スイッチング特性の実験的検討	平成 15 年 4 月～ 平成 19 年 10 月
清水 成	山形大学工学部	D1 研究補助員	半導体レーザ用結晶成長	平成 17 年 6 月～ 平成 17 年 10 月
山内 俊也	奈良先端科学技術大学院大学 物質創成科学研究科	M2 研究補助員	半導体レーザ用結晶成長	平成 18 年 6 月～ 平成 19 年 2 月
富岡 友美	奈良先端科学技術大学院大学 物質創成科学研究科	チーム事務員	物品購入、成果報告書作成等、研究事務一般	平成 15 年 3 月～ 平成 20 年 3 月

②光データ処理研究グループ(光ヘッダ識別回路の研究)

氏 名	所 属	役 職	研究項目	参加時期
植之原 裕行	東京工業大学 精密工学研究所 マイクロシステム研究センター	准教授	・半導体集積化の設計 ・作製検討 ・光DA変換器の高機能化 ・偏波制御回路の検討 ・光パワーリミッタの設計・評価	平成 14 年 11 月～ 平成 20 年 3 月
関 剛志	東京工業大学	M2	・光 DA 変換器のビット数拡張 ・偏波制御回路の検討	平成 15 年 4 月～ 平成 16 年 3 月
澤田 憲吾	東京工業大学	学部 4 年～M2	・半導体光 DA 変換器の作製・特性評価	平成 17 年 5 月～ 平成 20 年 3 月

③時空間変換光制御方式研究グループ(時空間変換型光パケット生成・転送方式の研究)

氏 名	所 属	役 職	研究項目	参加時期
津田 裕之	慶應義塾大学	教授	時空間変換型光パケット生成・転送方式の研究と取りまとめ	平成 14 年 11 月～ 平成 20 年 3 月
鈴木 崇功	慶應義塾大学	M2～D3 研究補助員	・超高分解能石英光回路 ・分散補償回路	平成 16 年 5 月～ 平成 18 年 3 月
萬代 浩平	慶應義塾大学	M2	・超短パルス発生システム	平成 17 年 10 月～ 平成 18 年 3 月
宮本 大輔	慶應義塾大学	M2	・超短パルス発生システム ・光パケット生成回路	平成 18 年 6 月～ 平成 19 年 3 月
伊藤 二郎	慶應義塾大学	M2	・超高分解能石英光回路 ・PLZT 光回路	平成 19 年 5 月～ 平成 20 年 3 月
伊熊 雄一郎	慶應義塾大学	M1	・超高分解能石英光回路 ・光波形整形回路	平成 19 年 8 月～ 平成 20 年 3 月

④結晶成長研究グループ(長波長帯 InGaAsSbN 半導体結晶成長の研究)

氏 名	所 属	役 職	研究項目	参加時期
河村 裕一	大阪府立大学 産学官連携機 構 先端科学イ ノベーションセ ンター	准教授	分子線結晶成長	平成 14 年 11 月～ 平成 20 年 3 月
中川 智克	大阪府立大学	M2 研究補助 員	分子線結晶成長	平成 15 年 4 月～ 平成 17 年 3 月

5 招聘した研究者等

氏 名(所属、役職)	招聘の目的	滞在先	滞在期間
なし			

6 成果発表等

(1)原著論文発表 (国内誌 1件、国際誌 43件)

[国際誌]

1. Y. Kawamura, M. Amano, K. Ouchi, and N. Inoue, "Photoreflectance characterization of ordered/disordered GaAs_{0.5}Sb_{0.5} layers grown on InP substrates by molecular beam epitaxy," Japanese J. Appl. Phys., Vol. 42, No. 7A, pp. 4288-4289, July, 2003.
2. Y. Sato, Y. Takahashi, Y. Kawamura, and H. Kawaguchi, "Field dependence of electron spin relaxation during transport in GaAs," Japanese J. Appl. Phys., Vol. 43, No. 2A, pp. L230-L232, February, 2004.
3. H. Uenohara, T. Seki, and K. Kobayashi, "Investigation of high-speed wavelength routing and bit error rate performance of an optical packet switch with an optical digital-to-analog conversion-based header processor," IEEE Photonics Technology Lett., Vol.16, No.3, pp.951-953, March, 2004.
4. H. Uenohara, T. Seki, and K. Kobayashi, "High-speed optical packet switch with an optical digital-to-analog conversion-type header processor," Optical Review, Vol.11, No.2, pp.113-118, March-April, 2004.
5. H. Uenohara, T. Seki, and K. Kobayashi, "Four-bit optical header processing and wavelength routing performance of optical packet switch with optical digital-to-analogue conversion-type header processor," Electron. Lett., Vol. 40, No. 9, pp. 558-560, April, 2004.
6. Y. Kawamura, T. Nakagawa, M. Amano, K. Ouchi, and N. Inoue, "2.43 μ m light emission of InGaAsSbN quantum well diodes grown on InP substrates," Japanese J. Appl. Phys., Vol. 43, No. 4B, pp. L530-L532, April, 2004.
7. Y. Shibata, T. Suzuki, and H. Tsuda, "Design and evaluation of an N:N optical coupler using an integrated waveguide mirror," Optical Review, Vol. 11, No. 3, pp. 182-187, May-June, 2004.
8. T. Mori and H. Kawaguchi, "Characteristics of nondegenerate four-wave mixing in electroabsorption modulator," Applied Physics Letters, Vol. 85, No. 6, pp. 869-871, August, 2004.
9. T. Seki and H. Uenohara, "Study on stable operation condition and multi-level recognition of optical digital-to-analog conversion-type header processor for optical packet switch," Japanese J. Appl. Phys., Part2, Vol. 43, No. 8B, pp. L1051-L1053, August, 2004.
10. Y. Kawamura, T. Nakagawa, and N. Inoue, "Annealing effect on electroluminescence and laser operation of InGaAsSbN quantum well diodes grown on InP substrates," Japanese J. Appl. Phys., Vol. 43, No. 10A, pp. L1320-L1322, October, 2004.
11. T. Mori and H. Kawaguchi, "Ultrafast all-optical switching of OTDM signal for wavelength routing using FWM in SOA," IEICE Transactions on Electronics, Vol. E87-C, No. 12, pp. 2189-2192, December, 2004.
12. Y. Sato, Y. Takahashi, Y. Kawamura, and H. Kawaguchi, "Electron spin relaxations in the electric-field applied GaAs/ InGaAs heterostructure," Journal of Superconductivity : Incorporating Novel Magnetism, Vol. 18, No. 2, pp. 201-205, April, 2005.
13. V. V. Lysak, H. Kawaguchi, and I. A. Sukhoivanov, "Gain spectra and saturation power of asymmetrical multiple quantum well semiconductor optical amplifiers," IEE Proc. -Optoelectronics, Vol. 152, No. 2, pp. 131-139, April, 2005.
14. T. Suzuki and H. Tsuda, "Ultra small arrowhead arrayed-waveguide grating with V-shaped bend waveguides," IEEE Photonics Technology Lett., Vol. 17, No. 4, pp. 810-812, April, 2005.
15. T. Katayama and H. Kawaguchi, "Measurements of self- and cross-gain saturation dynamics using two-color heterodyne pump-probe technique," IEEE Photonics Technology Lett., Vol. 17, No. 6, pp. 1244-1246, June, 2005.
16. V. V. Lysak, H. Kawaguchi, I. A. Sukhoivanov, T. Katayama, and A. V. Shulika, " Ultrafast gain dynamics in asymmetrical multiple quantum well semiconductor optical amplifiers," IEEE J. Quantum Electron, Vol. 41, No. 6, pp. 797-807, June, 2005.
17. Y. Kawamura, T. Nakagawa, and N. Inoue, "InAsSbN quantum well laser diodes operating at 2- μ m-wavelength region grown on InP substrates," Japanese J. Appl. Phys., Vol. 44, No. 35, pp. L1112-L1114, August, 2005.

18. Y. Kawamura, T. Nakagawa, and N. Inoue, "Lasing characteristics of InGaAsSbN quantum well diodes at 2 μ m wavelength region grown on InP substrates," Japanese J. Appl. Phys., Vol. 44, No.8, p.6000-6001, August, 2005.
19. Y. Kobayashi and H. Tsuda, "Crosstalk reduction using tapered intersecting waveguides," Optical Review, Vol. 12, No. 5, pp. 387-390, September, 2005.
20. Yasuhide Takase, and Hiroyuki Uenohara, "Switching performance of a novel optical label switch with time-domain-separated WDM labels," IEEE Photonics Technology Lett., Vol.17, No.11, pp.2466-2468, November, 2005.
21. H. Uenohara and R. Kurosawa, "Semiconductor optical digital-to-analogue converter," Electron. Lett., Vol.41, No.23, pp.1299-1300, November, 2005.
22. T. Suzuki and H. Tsuda, "Planar lightwave circuit dispersion compensator using a compact arrowhead arrayed-waveguide grating," IEICE Electronics Express, Vol. 2, No. 23, pp. 572-577, December, 2005.
23. T. Suzuki and H. Tsuda, "Dispersion compensator using a compact arrayed-waveguide grating with a dispersion-adjusting structure," IEICE Electronics Express, Vol. 3, No. 3, pp. 58-63, February, 2006.
24. H. Uenohara, S. Shimizu, and K. Kobayashi, "Demonstration of an optical label switch using an optical digital-to-analog conversion-type label processor with a self-gate-pulse generator and a power equalizer," IEEE Photon. Technol. Lett., Vol. 18, No. 5, pp. 694-696, March, 2006.
25. T. Mori, Y. Yamayoshi, and H. Kawaguchi, "Low switching-energy and high-repetition-frequency all optical flip-flop operations of a polarization bistable vertical-cavity surface-emitting laser," Appl. Phys. Lett., Vol. 88, 101102-1~3, March, 2006.
26. Y. Sato, T. Mori, Y. Yamayoshi, and H. Kawaguchi, "Polarization bistable characteristics of mesa structure 980 nm vertical-cavity surface-emitting lasers," Japanese J. Appl. Phys., Vol. 45, No. 16, pp. L438-L440, April, 2006.
27. Y. Kawamura, T. Nakagawa, and N. Inoue, "Emission properties of InGaAsSbN quantum well laser diodes in 2 μ m wavelength region on InP substrates," Japanese J. Appl. Phys., Vol. 45, No. 4B, pp.3453-3456, April, 2006.
28. K. Masuda, A. Tate, and H. Tsuda, "A novel 2 x 2 multi-arm type of optical switch using multimode interference couplers," IEICE Electronics Express, Vol. 3, No. 9, pp.191-196, May, 2006.
29. M. Yasumoto, T. Suzuki, A. Tate, and H. Tsuda, "Arrayed-waveguide grating with wavefront compensation lenses for spatial filter integration," IEICE Electronics Express, Vol. 3, No. 11, pp. 221-226, June, 2006.
30. T. Suzuki and H. Tsuda, "Compact arrayed-waveguide grating with multiple-arrowhead structures," Japanese J. Appl. Phys., PT1, Vol. 45, No. 7, pp. 5775-5781, July, 2006.
31. H. Kawaguchi, T. Mori, Y. Sato, and Y. Yamayoshi, "Optical buffer memory using polarization-bistable vertical-cavity surface-emitting lasers," Japanese J. Appl. Phys., Express Lett., Vol. 45, No. 34, pp. L894-L897, August, 2006.
32. A. Tate, T. Suzuki, and H. Tsuda, "Multistage polymeric lens structures integrated into silica waveguides," Japanese J. Appl. Phys., PT1, Vol. 45, No. 8A, pp. 6288-6293, August, 2006.
33. K. Masuda, A. Tate, M. Ishida, T. Suzuki, and H. Tsuda, "Beam Steering Type 1:4 Optical Switch Using Thermo-Optic Effect," Optical Review, Vol. 13, No. 4, pp. 184-188, July-August, 2006.
34. J. Ito, T. Y. Fan, T. Suzuki, and H. Tsuda, "Compact silica arrayed-waveguide grating with small bend radius utilizing trenches filled with low-refractive index material," IEICE Electronics Express Vol. 3, No. 23 pp.499-503, December, 2006.
35. M. Ishida, Y. Ikuma, T. Suzuki, and H. Tsuda, "180 degree-bend structures using light reflection at a double elliptic mirror in a slab waveguide," Japanese J. Appl. Phys., PT1, Vol. 46, No. 1, pp. 168-174, January, 2007.
36. S. Shimizu, K. Kobayashi, and H. Uenohara, "Start-bit detection and gate-pulse generation using phase-modulated preamble for asynchronous packet processing," IEEE Photon. Technol. Lett., Vol.19, No.4 pp.236-238, February, 2007.
37. Y. Takahashi, Y. Sato, F. Hirose, and H. Kawaguchi, "Spin drag effect in temperature dependence of spin-polarized electron mobilities," Japanese J. Appl. Phys., Vol. 46, No. 4B, pp. 2585-2591, April, 2007.

38. Y. Kawamura and N. Inoue, "Properties of InAsSbN quantum well laser diodes at 2 μm wavelength region on InP substrates," J. Crystal Growth, Vol. 301-302, pp. 963-966, April, 2007.
39. Y. Takahashi, F. Hirose, Y. Sato, and H. Kawaguchi, "Electron-electron scattering in the spin polarized transport: A feasibility of observing spin drag," Journal of Applied Physics, Vol. 101, No. 9, pp. 093707-1~093707-8, May 1, 2007.
40. T. Mori and H. Kawaguchi, "Dynamical lasing wavelength variation in polarization bistable switching of vertical-cavity surface-emitting lasers by light injection," Japanese J. Appl. Phys., Vol. 46, No. 18, pp. L433-L436, May, 2007.
41. Y. Kawamura and N. Inoue, "Electroluminescence of InGaAN/GaAsSb type II quantum well light emitting diodes grown on InP substrates by molecular beam epitaxy," Japanese J. Appl. Phys., Vol. 46, No.6A, pp. 3380-3381, June, 2007.
42. T. Katayama, Y. Sato, T. Mori, and H. Kawaguchi, "Polarization bistable characteristics of 1.55 μm vertical-cavity surface-emitting lasers," Japanese J. Appl. Phys., Lett., Vol. 46, No. 49, pp. L1231-L1233, December, 2007.
43. J. Ito, T. Y. Fan, T. Suzuki, and H. Tsuda, "Compact arrayed-waveguide grating using high-mesa small-bend waveguides," IEICE TRANSACTIONS on Electronics, Vol. E91-C, No.1, pp. 110-112, January, 2008.

[国内誌]

1. 津田裕之、「超高速光信号処理用アレー導波路回折格子」、電子情報通信学会論文誌 C, Vol. J88-C, No. 6, pp. 421-427, 2005.

(2)その他の著作物（総説、書籍など）

1. 河川仁司、「偏光双安定面発光半導体レーザーによる超高速光信号処理と光バッファへの応用」、O plus E, Vol. 25, No. 7, pp. 782-787, 2003 年 7 月.
2. 河川仁司、「光双安定デバイス」、小林孝嘉 企画・監修、超高速光エレクトロニクス技術ハンドブック、リアライズ理工センター, 9.2 章, pp. 478-488, 2003 年 7 月 31 日.
3. 河川仁司、「偏光双安定性を用いた超高速光信号処理」、応用物理, Vol. 72, No. 11, pp. 1393-1399, 2003 年 11 月.
4. 河川仁司 他 分担, “Handbook of Laser Technology and Applications,” Institute of Physics publishing, B2.8, pp. 707-748, 2003 年.
5. 「山形大学、河川教授 G、全光型の超高速信号処理システムを開発 面発光半導体レーザーを利用 パケットメモリの実現に期待」、ナノテク専門ニューズレター 日経先端技術 69, 2004 年 9 月 13 日.
6. 権田俊一、平山秀樹、河村裕一、「パワー半導体レーザーの応用と動向」、電気学会論文誌, Vol. 125, No. 2, pp. 160-168, 2005 年.
7. 河村裕一、「InGaAsSbN 系中赤外量子井戸レーザーの開発」、電気学会 光・量子デバイス研究会報告書, OQD-06-39, 2006 年 12 月.
8. 河川仁司、「VCSEL の全光型信号処理への応用」、O plus E, Vol. 29, No. 4, pp. 343-347, 2007 年 4 月.
9. 河村裕一「2 ～ 5 μ m 帯半導体レーザー」、光産業技術振興協会 光技術動向調査報告書, pp. 11-13, 2007 年.

(3)学会発表(国際学会発表及び主要な国内学会発表)

① 招待講演 (国内会議 9件、国際会議 12件)

[国際会議]

1. H. Kawaguchi, "Supercontinuum short optical pulse generation and its application to gain dynamics measurements of SOAs," (招待論文) 5th International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON 2003), Mo.A.2, pp. 2-5, Warsaw, Poland, June 30, 2003.
2. H. Kawaguchi, "All-optical signal processing using polarization bistable VCSELs for ultrafast photonics networks," (招待講演) International Conference on Advanced Optoelectronics and Lasers (CAOL '2003), pp. 4-6, Alushta, Ukraine, September 16, 2003.
3. H. Kawaguchi, "Ultrafast all-optical switching using four-wave mixing in semiconductor optical amplifiers for wavelength routing," (招待論文) 6th International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON 2004), We.B1.1, pp. 33-36, Wroclaw, Poland, July 7, 2004.
4. H. Kawaguchi, "All-optical signal processing using polarization bistable VCSELs," (招待論文) 7th International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON 2005), We.A2.1, pp. 87-90, July 6, 2005.
5. H. Kawaguchi, "Polarization bistable VCSELs for all-optical signal processing," (招待論文) Optical Amplifiers and Their Applications (OAA 2005), SuB8, August 7, 2005.
6. H. Kawaguchi, "Semiconductor active devices for all-optical signal processing," (招待論文) Proceedings of SPIE ITCOM 2005, Vol. 6014, 601406, October 24, 2005.
7. H. Kawaguchi, "All-optical signal regeneration and optical buffering using polarization bistable VCSELs," (招待論文) 8th International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON 2006), Mo.B1.6, pp. 24-27, Nottingham, United Kingdom, June 19, 2006.
8. H. Uenohara, "Optical label processing scheme using optical digital-to-analog converters and self-gate pulse generator with phase modulated preamble," (invited) Joint workshop on OPS and OCDMA, Beijing, China, December, 2006.
9. H. Kawaguchi, "Optical Buffer Memory with a Shift Register Function Using Polarization Bistable VCSELs," (招待論文) 9th International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON 2007), Mo.C2.1, pp. 17-20, July 2, 2007.
10. H. Tsuda, "PLZT photonic functional devices for future network systems," (招待講演) 12th Optoelectronics and Communications Conference/16th Integrated Optics and Optical Fiber Communication (OECC/IOOC2007), 12E1-1, Yokohama, Japan, July 9-13, 2007.
11. H. Uenohara, "40Gbps Operation of a Semiconductor Optical DA Converter and its Application to Label Processing," (招待論文) Joint workshop on OPS and OCDMA, Tokyo, Japan, November, 2007.
12. H. Kawaguchi, "Photonic buffer memory based on polarization bistability in VCSELs," (招待論文) APOC 2007, 6782-4, Wuhan, China, November 2, 2007.

[国内会議]

1. 河口仁司、「(招待論文) 面発光半導体レーザの偏光双安定スイッチング」、電子情報通信学会 信学技報, Vol. 103, No. 527, OPE2003-195, LQE2003-132, pp. 13-16, 2003年12月19日.
2. 河口仁司、「(招待講演) 偏光双安定面発光半導体レーザを用いた全光型信号処理」、2004年電子情報通信学会ソサイエティ大会 シンポジウム講演, CS-3-3, pp. S-29-S-30, 徳島, 2004年9月23日.
3. 河口仁司、「(招待講演) 偏光双安定面発光半導体レーザを用いた全光型信号処理」、2005年(平成17年)春季、第52回応用物理学関係連合講演会 シンポジウム講演, 30p-ZH-8, さいたま, 2005年3月30日.
4. 河口仁司、「全光型信号処理用半導体光デバイス」、第1回「超高速光エレクトロニクス研究会」, 2005年4月4日.
5. 河口仁司、「VCSELの偏波スイッチング」、第96回微小光学研究会「偏光と微小光学」, Vol. 23, No. 2, pp. 15-20, 2005年5月19日.

6. 河川仁司、「全光型信号処理用偏光双安定面発光半導体レーザー研究の最近の進展」、第 66 回応用物理学会学術講演会, 8p-ZE-7, 徳島, 2005 年 9 月 8 日.
7. 河川仁司、「VCSEL 光信号処理・光メモリ回路」、レーザー学会学術講演会第 26 回年次大会, 10pII6, pp. S47-S48, 埼玉, 2006 年 2 月 10 日.
8. 河川仁司、「(招待講演) 全光型信号処理用偏光双安定面発光半導体レーザー」、第 2 回超高速フォトリソシンポジウム 第 5 回超高速光エレクトロニクス研究会, p. 67-70, 東京, 2006 年 7 月 20 日.
9. 河川仁司、「(フェロー記念講演) 半導体光非線形機能デバイスの発展」、フォトリソネットワーク研究会, 電子情報通信学会技術研究報告 Vol. 106, No. 546, PN2006-93, pp. 49-52, 屋久島, 2007 年 3 月 6 日.

② 口頭発表 (国内会議 71件、国際会議 60件)

[国際会議]

1. Y. Sato, M. Yamaguchi, Y. Takahashi, Y. Kawamura, and H. Kawaguchi, "Spin relaxation measurement of the spin-polarized electrons during transport in GaAs using double-quantum well heterostructure," the CLEO/Europe-EQEC Conference, EE-1-4-WED, Munich, Germany, June 25, 2003.
2. Y. Sato, Y. Takahashi, Y. Kawamura, and H. Kawaguchi, "Electron spin relaxation during transport in GaAs," International Conference on Solid State Devices and Materials 2003(SSDM 2003), E-3-6L, pp. 306-307, Tokyo, Japan, September 17, 2003.
3. H. Uenohara, T. Seki, and K. Kobayashi, "High-speed wavelength routing performance of optical packet switch with an optical digital-to-analog converter," 29th European Conference on Optical Communications, Tu1.4.3, September, 2003.
4. V. V. Lysak, H. Kawaguchi, T. Katayama, and I. A. Sukhoivanov, "Amplification and saturation properties of asymmetrical multiple quantum-well traveling wave semiconductor optical amplifiers," 3rd International Conference on Numerical Simulation of Semiconductor Optoelectronic Devices (NUSOD-03), ThA4, pp. 74-75, Tokyo, Japan, October 16, 2003.
5. H. Uenohara, T. Seki, and K. Kobayashi, "Optical packet routing performance of an optical packet switch with an optical digital/analog-conversion-type header processor (wavelength label switch)," The 8th OptoElectronics and Communications Conference (OECC2003), paper 15E3-2, Shanghai, P.R. China, October 13-16, 2003.
6. T. Mori, Y. Yamayoshi, and H. Kawaguchi, "All-optical time division and wavelength division demultiplexing of 160 Gbit/s OTDM signal by FWM in SOA," The 16th Annual Meeting of the IEEE Lasers & Electro-Optics Society (LEOS 2003), TuV2, pp. 358-359, Tucson, AZ, USA, October 28, 2003.
7. T. Seki, and H. Uenohara, "A Study on Stable Operation Condition and Multi-Level Recognition of an Optical Digital-to-Analog Conversion-Type Header Processor for an Optical Packet Switch," The 16th Annual Meeting of the IEEE Lasers & Electro-Optics Society (LEOS 2003), TuG3, October 28, 2003.
8. V. V. Lysak, H. Kawaguchi, T. Katayama, and I. A. Sukhoivanov, "Simulation of optical gain and gain recovery for asymmetrical multiple quantum well semiconductor optical amplifiers," 7th International Symposium on Contemporary Photonics Technology (CPT 2004), P-7, pp. 79-80, Tokyo, Japan, January 15, 2004.
9. A. Tate, T. Suzuki, Y. Shibata, and H. Tsuda, "Proposal of WDM multi/demultiplexer with deep grooves and parabolic mirrors," 7th International Symposium on Contemporary Photonics Technology (CPT2004), PDP-1, Tokyo, January 14-16, 2004.
10. H. Uenohara, T. Seki, and K. Kobayashi, "Novel header processing technique and wavelength routing performance of an optical packet switch with a multi-bit optical digital-to-analog conversion-type header processor," OFC2004, ThV4, February 26, 2004.
11. T. Mori and H. Kawaguchi, "All-optical switching of 160 Gbit/s OTDM signal using FWM in SOA for wavelength routing," Conference on Lasers and Electro Optics (CLEO 2004), CFJ7,

- San Francisco, USA, May 21, 2004.
12. T. Nakagawa, Y. Kawamura, and N. Inoue, "Electroluminescence of InGaAsSbN quantum well diodes grown on InP substrates," 16th International Conference of InP and related materials, Kagoshima, Japan, May 31-June 4, 2004.
 13. T. Suzuki, Y. Shibata, K. Masuda, and H. Tsuda, "Compact arrowhead arrayed waveguide grating using v-bend optical waveguides," Topical Meeting on Integrated Photonics Research (IPR2004), IFH2, San Francisco, June 30-July 2, 2004.
 14. T. Mori and H. Kawaguchi, "Detuning characteristics of nondegenerate four-wave mixing in electroabsorption modulator," 9th Opto Electronics and Communications Conference (OECC 2004), 13E2-2, pp. 92-93, Yokohama, Japan, July 13, 2004.
 15. H. Uenohara, T. Seki, and K. Kobayashi, "A multi-level recognition of a four-bit optical header and its conversion to a single current output using optical digital/analog conversion-type header processors for an optical packet switch," 9th Opto-Electronics and Communication Conference (OECC 2004), pp.22-23, July, 2004.
 16. Y. Sato, Y. Takahashi, Y. Kawamura, and H. Kawaguchi, "Electron spin relaxations in the electric-field applied GaAs/ InGaAs heterostructure," The 3rd International Conference on Physics and Applications of Spin-Related Phenomena in Semiconductors (PASPS III), p. 112, Santa Barbara, USA, July 22, 2004.
 17. H. Uenohara and K. Kobayashi, "An optical packet switch performance with four-bits optical digital-to-analog conversion-type header processor," ECOC 2004, TH1.6.5, September, 2004.
 18. V. V. Lysak, H. Kawaguchi, I. A. Sukhoivanov, Y. T. Lee, T. Katayama, and A. V. Shulika, "Ultrafast dynamics in asymmetrical multiple quantum well SOAs," Physics and Applications of Optoelectronics Devices-Conference-Optics East 2004, 5594-03, Philadelphia, USA, October 25, 2004.
 19. M. Yasumoto, T. Suzuki, A. Tate, K. Masuda, and H. Tsuda, "Design of an arrayed-waveguide grating with wavefront compensation lenses in a slab waveguide for hybrid integration," 8th International Symposium on Contemporary Photonics Technology (CPT2005), PDP-1, Tokyo, January 14-16, 2005.
 20. K. Masuda, A. Tate, M. Ishida, T. Suzuki, and H. Tsuda, "Beam steering type 1:4 optical switch with polymer thermo-optic phase shifters in a silica arrayed-waveguide," Photonics West 2005, 5728-47, San Jose, USA, January 22-27, 2005.
 21. M. Ishida, A. Tate, K. Masuda, T. Suzuki, and H. Tsuda, "Organic prism deflector switch fabricated on a silica waveguide," Photonics West 2005, 5728-48, San Jose, USA, January 22-27, 2005.
 22. T. Suzuki, K. Masuda, A. Tate, and H. Tsuda, "25-GHz spacing, 8-ch compact arrowhead arrayed-waveguide grating using v-bend waveguides," Photonics West 2005, 5728-49, San Jose, USA, January 22-27, 2005.
 23. A. Tate, T. Suzuki, and H. Tsuda, "Multistage polymeric lens structure in silica-waveguides for photonic functional circuits," Photonics West 2005, 5724-52, San Jose, USA, January 22-27, 2005.
 24. H. Kawaguchi, T. Mori, Y. Yamayoshi, and Y. Sato, "All-optical signal processing using polarization bistable VCSELs," 12th European Conference on Integrated Optics (ECIO 2005), WeA2-6, pp. 73-76, April 6, 2005.
 25. T. Suzuki, K. Masuda, and H. Tsuda, "Dispersion Compensator Using a Compact Arrowhead Arrayed-Waveguide Grating," Topical Meeting on Integrated Photonics Research and Applications (IPRA2005), IMB3, San Diego, USA, April 11-13, 2005.
 26. T. Mori, Y. Yamayoshi, and H. Kawaguchi, "Experimental demonstration of all-optical regeneration using a polarization bistable VCSEL," Conference on Lasers and Electro Optics/Quantum Electronics and Laser Science Conference (CLEO/QELS 2005), CThA3, Baltimore, USA, May 26, 2005.
 27. Y. Sato, T. Mori, Y. Yamayoshi, and H. Kawaguchi, "Polarization bistable characteristics of mesa structure 980 nm VCSELs," the European Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO/Europe-EQEC 2005), CI2-2-THU, Munich, Germany, June 16, 2005.
 28. T. Katayama and H. Kawaguchi, "Measurement of ultrafast self-and cross-gain saturation dynamics using two-color heterodyne pump-probe technique," International Quantum

- Electronics Conference 2005 and the Pacific Rim Conference on Lasers and Electro-Optics 2005 (IQEC and CLEO-PR), CFM1-3, pp. 1520-1521, Tokyo, Japan, July 15, 2005.
29. T. Mori, Y. Yamayoshi, and H. Kawaguchi, "Low switching-power operation of a polarization bistable VCSEL," International Quantum Electronics Conference 2005 and the Pacific Rim Conference on Lasers and Electro-Optics 2005 (IQEC and CLEO-PR), CTuJ2-5, pp. 166-168, Tokyo, Japan, July 15, 2005.
 30. T. Suzuki and H. Tsuda, "16ch, 100 GHz-spacing compact arrayed-waveguide grating using a double bending structure in each array waveguide," International Quantum Electronics Conference 2005 and the Pacific Rim Conference on Lasers and Electro-Optics 2005 (IQEC and CLEO-PR), CTuK3-3, Tokyo, Japan, July 11-15, 2005.
 31. H. Uenohara, S. Shimizu, and K. Kobayashi, "Operation performance of an optical digital-to-analog converter with regeneration-type power equalization," 10th Opto-Electronics and Communication Conference (OECC2005), 6B3-4, Seoul, Korea, July, 2005.
 32. Y. Takahashi, Y. Sato, F. Hirose, and H. Kawaguchi, "Feasibility of observing a spin drag effect in the electronic transport," 2005 International Conference on Solid State Devices and Materials (SSDM 2005), P9-7, pp. 788-789, Kobe, Japan, September, 2005.
 33. Y. Kawamura, T. Nakagawa, N. Inoue, "Molecular beam epitaxial growth and characterization of InGaAsSbN quantum well laser diodes at 2 μ m wavelength region grown on InP substrates," 2005 International Conference on Solid State Devices and Materials (SSDM 2005), E-2-4, Kobe, Japan, September 22-24, 2005.
 34. H. Uenohara, S. Shimizu, and K. Kobayashi, "Switching Performance of an Optical Label Switch using Optical Digital-to-Analog Conversion-based Header Processor with Self-Gate-Pulse-Generator and Power Equalizer," 31th European Conference on Optical Communication (ECOC 2005), Th3.4.1, Glasgow, UK, September, 2005.
 35. H. Uenohara, and R. Kurosawa, "First Demonstration of a Semiconductor-Integrated Optical Digital-to-Analog Converter," 31th European Conference on Optical Communication (ECOC 2005), Tu3.6.4, Glasgow, UK, September, 2005.
 36. H. Tsuda, and T. Kurokawa, "Analog and digital optical pulse synthesizers using arrayed-waveguide gratings for Tbit/s photonic signal processing," 31th European Conference on Optical Communication (ECOC 2005), Th1.5.5, Glasgow, UK, September 25-29, 2005.
 37. T. Suzuki, K. Masuda, H. Tsuda, R. Inohara, H. Takahashi, H. Ishikawa, Y. Abe, S. Kashimura, and H. Uetsuka, "Dispersion Compensation Experiments of 40 Gbit/s NRZ Signal Using Arrayed-Waveguide Grating Based Dispersion Compensator," 31th European Conference on Optical Communication (ECOC 2005), Th1.5.1, Glasgow, UK, September 25-29, 2005.
 38. M. Yasumoto, T. Suzuki, A. Tate, K. Masuda, and H. Tsuda, "Wavefront compensation lens system in an arrayed-waveguide grating for hybrid integration of a phase encoding mirror," 2005 Frontiers in Optics/Laser Science conferences, FWE4, Tucson, USA, October. 16-20, 2005.
 39. T. Komada, M. Ogawa, M. Hakamata, H. Tsuda, and N. Kitano, "Design and the Fabrication of a Multi-Level Phase Hologram Using Subwavelength-Scale Hole Array Structures," 2005 Frontiers in Optics/Laser Science conferences, FWL2, Tucson, USA, October 16-20, 2005.
 40. M. Ohkado, and H. Uenohara, "Performance of Two-Bit Optical Serial-to-Parallel Converter using Cascaded Electroabsorption Modulators," 11th microoptics Conference, K4, Tokyo, Japan, November, 2005.
 41. T. Y. Fan, J. Ito, T. Suzuki, and H. Tsuda, "Compact arrayed-waveguide grating using air trench and high mesa structures," Integrated Photonics Research and Applications Topical Meeting (IPRA2006), IMB3, Uncasville, Connecticut, USA, April 24-26, 2006.
 42. K. Miura, Y. Nagai, Y. Iguchi, H. Okada, Y. Kawamura, "MBE growth of thick InGaAsN layers with absorption edge at 1.95 μ m on InP substrates," International Conf. of InP and related materials, WeP-27, Princeton, USA, May 7-11, 2006.
 43. T. Mori, Y. Sato, Y. Yamayoshi, and H. Kawaguchi, "Timing jitter reduction by all-optical regeneration using a polarization bistable VCSEL," Conference on Lasers and Electro-Optics/Quantum Electronics and Laser Science Conference (CLEO/QELS 2006), CWG6, Long Beach, USA, May 24, 2006.
 44. H. Kawaguchi, T. Mori, Y. Sato, and Y. Yamayoshi, "Optical buffer memory using a

- polarization bistable VCSEL,” Conference on Lasers and Electro-Optics/Quantum Electronics and Laser Science Conference (CLEO/QELS 2006), CWG7, Long Beach, USA, May 24, 2006.
45. M. Ohkado and H. Uenohara, “Demonstration of an optical label switch with an EA modulator-cascaded optical serial-to-parallel converter,” 5th International Conference on Optical Internet (COIN2006), TuA2-4, Jeju, Korea, July, 2006.
 46. K. Sawada and H. Uenohara, “Operation performance of a semiconductor integrated optical digital-to-analog converter by external phase control,” 12th Microoptics Conference (MOC2006), Seoul, Korea, July, 2006.
 47. J. Ito, T. Suzuki, T. Fan, A. Tate, and H. Tsuda, “Compact arrayed-waveguide grating using low-refractive index material filled trenches,” The 11th Optoelectronics and Communications Conference (OECC2006), 5B2-2, Kaohsiung, Taiwan., July 3-7, 2006.
 48. A. Gomyo, S. Ohkouchi, and Y. Kawamura, “Atomic arrangement in an MBE-grown CuPt-B type ordered GaAsSb layer as observed by cross sectional scanning tunneling microscope,” The 14th International Conf. on Molecular Beam Epitaxy, ThB-3-5, Tokyo, Japan, September 3-8, 2006.
 49. Y. Takahashi, Y. Sato, F. Hirose, and H. Kawaguchi, “A spin drag effect in temperature dependence of spin-polarized electron mobilities,” 2006 International Conference on Solid State Devices and Materials (SSDM 2006), P-9-10, pp. 734-735, Yokohama, September 14, 2006.
 50. S. Shimizu, H. Uenohara, and K. Kobayashi, “A novel scheme of start bit detection and single pulse generation for high-speed optical signal processing,” 32th European Conference on Optical Communication (ECOC2006), Th2.4.2, Cannes, France, September 24-28, 2006.
 51. D. Miyamoto and H. Tsuda, “Spectral Phase Encoder Using an Arrayed-Waveguide Grating with Phase-Adjustable Structures,” International Conference on Photonics in Switching 2006 (PS2006), O16.2, Herakleion (Crete), Greece, October 16-18, 2006.
 52. T. Mori, Y. Sato, and H. Kawaguchi, “2-bit optical buffering using polarization bistable VCSELs,” 19th Annual Meeting of the IEEE Lasers and Electro-Optics Society (LEOS 2006), WJ2, pp. 510-511, Montreal, Canada, November 1, 2006.
 53. H. Kawaguchi, T. Mori, and Y. Sato, “Optical Buffer Memory Using Polarization Bistable Vertical-Cavity Surface-Emitting Lasers,” 13th European Conference on Integrated Optics (ECIO 2007), WeC-4, Copenhagen, Denmark, April 25, 2007.
 54. J. Ito and H. Tsuda, “A compact arrayed-waveguide grating with a locally enhanced optical confinement structure using trenches filled with low-refractive index materials,” 13th European Conference on Integrated Optics (ECIO 2007), ThA6, Copenhagen, Denmark, April 25-27, 2007.
 55. T. Mori, Y. Sato, and H. Kawaguchi, “Shift register function in optical buffer memory using polarization bistable VCSELs,” Conference on Lasers and Electro-Optics/Quantum Electronics and Laser Science Conference (CLEO/QELS 2007), CTuGG6, Baltimore, USA, May 8, 2007.
 56. Y. Iguchi, M. Tsubokura, H. Okada, K. Miura, Y. Nagai, and Y. Kawamura, “MBE Growth of InGaAsN Layers lattice-matched to InP Substrates,” International Conf. of InP and related materials, WeA2.2, Matsue, Japan, May 14-18, 2007.
 57. K. Sawada, and H. Uenohara, “Investigation of Operation Tolerance of a Semiconductor Optical Digital-to-Analog Converter on Phase and Intensity Fluctuation”, Conference on Optical Internet / Australian Conference on Fiber Technology (COIN/ ACOFT2007), Melbourne, Australia, June, 2007.
 58. K. Okamoto, and H. Uenohara, “Demonstration of a Semiconductor-based Multi-Wavelength Light Source and its Application to Optical Label Processing”, 12th Optoelectronics and Communications Conference / 16th International Conference on Integrated Optics and Optical Fiber Communication (OECC/IOOC2007), 13A3-3, Yokohama, July, 2007.
 59. T. Mori, Y. Sato, and H. Kawaguchi, “10 Gb/s optical buffer memory using a polarization bistable VCSEL,” 33rd European Conference and Exhibition on Optical Communication (ECOC 2007), 3.4.3, September 18, 2007.
 60. T. Katayama, Y. Sato, T. Mori and H. Kawaguchi, “All-optical flip-flop operation of 1.55 μm polarization bistable VCSELs,” 20th Annual Meeting of the IEEE Lasers and Electro-Optics Society (LEOS 2007), WZ2, Lake Buena Vista, USA, October 24, 2007.

〔国内会議〕

1. 佐藤祐喜、山口雅剛、高橋豊、河村裕一、河口仁司、「光励起スピン偏極電子のスピン輸送緩和特性」、2003 年(平成 15 年)春季第 50 回応用物理学関係連合講演会, 30a-ZH-13, p. 1570, 2003 年 3 月.
2. 河村裕一、天野政信、大内一浩、井上直久、「波長 2 μm 帯の InP 基板上の InGaAsSb 系量子井戸レーザ」、電子情報通信学会 電子材料研究会, ED38, 豊橋, 2003 年 5 月 15 日-16 日.
3. 森隆、山吉康弘、河口仁司、「SOAを用いた 160Gbit/s OTDM の時間分割/波長分割 DEMUX」、電子情報通信学会 機構デバイス/電子部品・材料/光エレクトロニクス/レーザ・量子エレクトロニクス研究会, LQE2003-41, pp. 23-27, 千歳, 2003 年 8 月 29 日.
4. 片山健夫、河口仁司、「パルス圧縮したスーパーコンティニウム光を用いた 2 色ポンプ・プローブ法による半導体光増幅器の高速利得緩和現象の測定」、2003 年(平成 15 年)秋季第 64 回応用物理学学会学術講演会, 31-p-YK-17, p. 1084, 福岡, 2003 年 8 月 31 日.
5. V. V. Lysak, H. Kawaguchi, T. Katayama, I. A. Sukhoivanov, 「Gain properties of asymmetrical multiple quantum-well traveling wave SOAs」、2003 年(平成 15 年)秋季第 64 回応用物理学学会学術講演会, 1a-YK-6, p. 1086, 福岡, 2003 年 9 月 1 日.
6. 関剛志、植之原裕行、「光 D/A 変換型ヘッダ識別器における合波相対偏波角度と符号誤り率の関係の検討」、2003 年(平成 15 年)秋季第 64 回応用物理学学会学術講演会, 1a-YK-10, 福岡, 2003 年 9 月 1 日.
7. 河村裕一、天野政信、大内一浩、中川智克、井上直久、「InP 基板上に成長した GaAsSb 層のフォトリフレクタンスによる評価」、2003 年(平成 15 年)秋季第 64 回応用物理学学会学術講演会, 1a-K-3, 福岡, 2003 年 9 月 1 日.
8. 森隆、片山健夫、河口仁司、「周波数領域干渉法による複数の短パルス光の位相測定」、2003 年電子情報通信学会ソサイエティ大会, C-3-114, p. 247, 新潟, 2003 年 9 月 23 日.
9. V. V. Lysak, H. Kawaguchi, T. Katayama, I. A. Sukhoivanov, A. V. Shulika, 「Ultrafast gain dynamics in asymmetrical multiple quantum-well SOAs」、2003 年電子情報通信学会ソサイエティ大会, C-4-19, p. 295, 新潟, 2003 年 9 月 25 日.
10. 鈴木崇功、柴田泰、津田裕之、「楕円ミラーを利用した光路変換石英導波路の基本特性」、2003 年電子情報通信学会ソサイエティ大会, C-3-88, 2003 年 9 月 25 日.
11. 森隆、山吉康弘、河口仁司、「SOA 中の FWM を用いた 160 Gbit/s 信号の時間分割/波長分割 DEMUX」、2003 年電子情報通信学会ソサイエティ大会, C-4-48, p. 324, 新潟, 2003 年 9 月 26 日.
12. 山口雅剛、清水成、佐藤祐喜、山吉康弘、河口仁司、「メサ構造 InGaAs/ GaAs 面発光半導体レーザの作製と評価」、2003 年(平成 15 年)応用物理学学会東北支部 第 58 回学術講演会, 5aA12, pp. 76-77, 盛岡, 2003 年 12 月 5 日.
13. 鈴木崇功、石田麻里子、柴田泰、津田裕之、「導波路内ミラーを利用した微小曲げ導波路の設計と試作」、レーザ・量子エレクトロニクス研究会, 2004 年 1 月 28 日.
14. 石田麻里子、鈴木崇功、津田裕之、「2枚の導波路ミラーを用いた曲げ構造の検討」、第4回レーザー学会東京支部大会, P7, 2004 年 3 月 12 日.
15. 楢敦次、鈴木崇功、柴田泰、津田裕之、「周期深溝構造を有する導波路型波長合分波回路」、第4回レーザー学会東京支部大会, P6, 2004 年 3 月 12 日.
16. 植之原裕行、「光デジタル・アナログ変換型ヘッダ識別器と波長スイッチング動作を用いた光パケットスイッチ構成の検討」、電子情報通信学会総合大会, B-12-12, 東京, 2004 年 3 月 22 日.
17. 森隆、河口仁司、「SOA 中の FWM を用いた OTDM 信号の全光超高速スイッチング」、2004 年電子情報通信学会総合大会, C-4-33, p. 361, 東京, 2004 年 3 月 25 日.
18. 小林洋介、津田裕之、「低損失石英交差光導波路の設計」、2004 年電子情報通信学会総合大会, C-3-151, 2004 年 3 月 25 日.
19. 楢敦次、鈴木崇功、柴田泰、津田裕之、「導波路集積ミラー及び深溝構造を利用した波長合分波素子の提案」、2004 年(平成 16 年)春季、第 51 回応用物理学関係連合講演会, 28p-N-13, 東京, 2004 年 3 月 28 日.

20. 佐藤祐喜、高橋豊、河村裕一、河川仁司、「GaAs 中を輸送されるスピン偏極電子のスピン緩和の電界依存性」、2004 年(平成 16 年)春季、第 51 回応用物理学関係連合講演会, 30p-ZK-2, p. 1657, 東京, 2004 年 3 月 30 日.
21. 中川智克、河村裕一、大内一浩、井上直久、「InP 基板上 InGaAsSbN 赤外歪量子井戸ダイオードの EL スペクトル」、2004 年(平成 16 年)春季、第 51 回応用物理学関係連合講演会, 30p-YG-14, 東京, 2004 年 3 月 30 日.
22. 森隆、河川仁司、「電界吸収型光変調器の 4 光波混合特性」、2004 年(平成 16 年)春季、第 51 回応用物理学関係連合学術講演会, 31p-ZK-2, p. 1317, 東京, 2004 年 3 月 31 日.
23. 清水成、佐藤祐喜、森隆、山吉康弘、河川仁司、「面発光半導体レーザーの発振偏光のメサ形状依存性」、2004 年(平成 16 年)秋季、第 65 回応用物理学学会学術講演会, 1a-ZN-34, p. 1028, 仙台, 2004 年 9 月 1 日.
24. 中川智克、河村裕一、井上直久、「InP 基板上 InGaAsSbN 赤外歪量子井戸ダイオードのアニール効果」、2004 年(平成 16 年)秋季、第 65 回応用物理学学会学術講演会, 1a-P1-18, 仙台, 2004 年 9 月 1 日.
25. 片山健夫、河川仁司、「ヘテロダイン・ポンプ・プローブ法による半導体光増幅器の高速利得回復の測定」、2004 年(平成 16 年)秋季、第 65 回応用物理学学会学術講演会, 2p-ZM-1, p. 1049, 仙台, 2004 年 9 月 2 日.
26. 大門真、植之原裕行、「カスケード型光シリアル・パラレル変換器の基礎研究」、電子情報通信学会ソサイエティ大会, C-4-12, 2004 年 9 月 21 日.
27. 高瀬恭英、植之原裕行、「WDM ヘッドを用いた光パケットスイッチの波長ルーティング特性」、電子情報通信学会ソサイエティ大会, B-12-6, 2004 年 9 月 22 日.
28. 山吉康弘、河川仁司、「偏光双安定面発光半導体レーザーを用いた全光型 3R 中継器の動作特性」、2004 年電子情報通信学会ソサイエティ大会, C-4-41, p. 295, 徳島, 2004 年 9 月 24 日.
29. 鈴木崇功、津田裕之、「V字型微小曲げ構造を利用した小型アレイ導波路回折格子」、フォトニックネットワーク研究会, PN2004-58 (2004-10), 2004 年 10 月 22 日.
30. 中川智克、河村裕一、井上直久、「MBE 成長 InGaAsSbN 量子井戸ダイオードの発光特性」、第 45 回真空に関する連合講演会, 大阪, 2004 年 10 月 27 日-29 日.
31. 山吉康弘、森隆、河川仁司、「偏光双安定面発光半導体レーザーを用いた全光型信号再生」、2005 年電子情報通信学会総合大会, C-4-11, p. 318, 大阪, 2005 年 3 月 21 日.
32. 増田健一、楯敦次、石田麻里子、鈴木崇功、津田裕之、「位相シフターを有するアレイ導波路型光スイッチの提案」、2005 年電子情報通信学会総合大会, C-3-17, 2005 年 3 月 21 日.
33. 石田麻里子、楯敦次、増田健一、鈴木崇功、津田裕之、「1 x 2 石英偏向型プリズムスイッチの検討」、2005 年電子情報通信学会総合大会, C-3-15, 2005 年 3 月 21 日.
34. 鈴木崇功、津田裕之、「超高分解能アローヘッド型アレイ導波路回折格子」、2005 年電子情報通信学会総合大会, C-3-18, 2005 年 3 月 21 日.
35. 正村哲也、楯敦次、鈴木崇功、津田裕之、「周期溝構造を用いた偏光分離光導波路の提案」、2005 年電子情報通信学会総合大会, C-3-16, 2005 年 3 月 21 日.
36. 大門真、植之原裕行、「EA 変調器を用いた光シリアル・パラレル変換器のパルスゲート動作」、電子情報通信学会総合大会, B-12-22, 大阪, 2005 年 3 月 24 日.
37. 中川智克、河村裕一、井上直久、「InP 基板上 MBE 成長 InGaAsSbN 量子井戸レーザーの特性」、2005 年(平成 17 年)春季、第 52 回応用物理学関係連合講演会, 31p-ZM-10, 埼玉, 2005 年 3 月 31 日.
38. 森隆、佐藤祐喜、山吉康弘、河川仁司、「メサ構造面発光半導体レーザーの偏光双安定特性」、2005 年(平成 17 年)春季、第 52 回応用物理学関係連合講演会, 1a-ZQ-13, さいたま, 2005 年 4 月 1 日.
39. 森隆、河川仁司、「面発光半導体レーザーの偏光双安定スイッチングと注入同期」、2005 年(平成 17 年度)秋季、第 66 回応用物理学学会学術講演会, 8a-T-20, 徳島, 2005 年 9 月 8 日.
40. 河村裕一、中川智克、井上直久、「InP 基板上 InGaAsSbN 赤外歪量子井戸ダイオードの発光特性の Sb 組成依存性」、2005 年(平成 17 年度)秋季、第 66 回応用物理学学会学術講演会,

- 10a-ZA-2, 徳島, 2005 年 9 月 10 日.
41. 楯敦次、鈴木崇功、津田裕之、「樹脂充填による石英導波路多段レンズ構造」、2005 年電子情報通信学会ソサイエティ大会, C-3-73, 2005 年 9 月 20 日.
 42. 大門真、植之原裕行、「カスケード型光シリアル・パラレル変換器の基礎研究」、2005 年電子情報通信学会ソサイエティ大会, B-12-6, 札幌, 2005 年 9 月 21 日.
 43. 清水智、植之原裕行、「光デジタル・アナログ変換器のダイナミックレンジ改善に関する研究」、2005 年電子情報通信学会ソサイエティ大会, B-12-7, 札幌, 2005 年 9 月 21 日.
 44. 森隆、佐藤祐喜、山吉康弘、河川仁司、「偏光双安定面発光半導体レーザを用いた 1 ビット光バッファメモリ」、2005 年電子情報通信学会ソサイエティ大会, C-4-5, p. 286, 札幌, 2005 年 9 月 22 日.
 45. 鈴木崇功、増田健一、津田裕之、猪原涼、高橋英憲、石川弘、阿部由紀雄、檜村誠一、上塚尚登、「アローヘッド型アレイ導波路回折格子を利用した分散補償器」、2005 年電子情報通信学会ソサイエティ大会, C-3-104, 2005 年 9 月 22 日.
 46. 増田健一、楯敦次、石田麻里子、鈴木崇功、津田裕之、「マルチアーム干渉型光スイッチに関する研究」、レーザー学会学術講演会第 26 回年次大会, F09pVIII3, 大宮, 2006 年 2 月 9 日.
 47. 楯敦次、鈴木崇功、津田裕之、「多段ポリマー充填構造による石英導波路レンズ構造」、レーザー学会学術講演会第 26 回年次大会, F09pVIII2, 大宮, 2006 年 2 月 9 日.
 48. 津田裕之、鈴木崇功、楯敦次、石田麻里子、宮本大輔、安本光浩、「ミラー及びレンズを集積した光導波路型機能デバイス」、次世代フォトニックネットワーク研究会, 神奈川(三浦市), 2006 年 3 月 17 日.
 49. 澤田憲吾、植之原裕行、「半導体デジタル・アナログ変換器の動作特性評価」、2006 年(平成 18 年度)春季、第 53 回応用物理学関係連合講演会, 22p-Y-7, 東京, 2006 年 3 月 22 日.
 50. 森隆、佐藤祐喜、山吉康弘、河川仁司、「偏光双安定 VCSEL を用いた全光信号再生のリタiming特性」、2006 年(平成 18 年度)春季、第 53 回応用物理学関係連合講演会, 22p-Y-13, 東京, 2006 年 3 月 22 日.
 51. 三浦広平、永井陽一、猪口康博、岡田浩、河村裕一、「InP 基板上への厚い InGaAsN 層の MBE 成長」、2006 年(平成 18 年度)春季、第 53 回応用物理学関係連合講演会, 24p-P-4, 東京, 2006 年 3 月 24 日.
 52. 河村裕一、中川智克、井上直久、「InP 基板上 MBE 成長 InAsSbN 量子井戸レーザの特性」、2006 年(平成 18 年度)春季、第 53 回応用物理学関係連合講演会, 24p-P-14, 東京, 2006 年 3 月 24 日.
 53. 植之原裕行、清水智、「光ラベルスイッチ用自動ゲートパルス生成光デジタル・アナログ変換器の動作特性」、2006 年電子情報通信学会総合大会, C-3-21, 東京, 2006 年 3 月 24 日.
 54. 伊藤二郎、トムファン、鈴木崇功、楯敦次、津田裕之、「低屈折材料埋め込みによる石英微小曲げ導波路」、2006 年電子情報通信学会総合大会, C-3-44, 東京(国士舘大学), 2006 年 3 月 25 日.
 55. 安本光浩、鈴木崇功、楯敦次、宮本大輔、津田裕之、「等位相面補償レンズを持つハイブリッド集積用アレイ導波路回折格子」、レーザ・量子エレクトロニクス研究会, LQE2006-37, pp.27-32, 北海道(千歳アルカディア・プラザ), 2006 年 8 月 24 日.
 56. 伊藤二郎、鈴木崇功、トムファン、楯敦次、津田裕之、「低屈折率材料を用いた微小曲げ構造を有する小型アレイ導波路回折格子の作製」、レーザ・量子エレクトロニクス研究会, LQE2006-38, pp.33-37, 北海道(千歳アルカディア・プラザ), 2006 年 8 月 24 日.
 57. 河村裕一、井上直久、「InP 基板上 InAsSbN 赤外量子井戸ダイオードの発光特性のアニール効果」、2006 年(平成 18 年度)秋季、第 67 回応用物理学学術講演会, 29a-B-11, 滋賀, 2006 年 8 月 29 日.
 58. 森隆、佐藤祐喜、河川仁司、「偏光双安定面発光半導体レーザを用いた 2 ビット光バッファメモリ」、2006 年電子情報通信学会ソサイエティ大会, C-3-28, p. 150, 金沢, 2006 年 9 月 20 日.
 59. 宮本大輔、津田裕之、「光位相制御構造をもつアレイ導波路回折格子による符号化」、2006

- 年電子情報通信学会ソサイエティ大会 C-3-29, 金沢, 2006 年 9 月 20 日.
60. 清水智、植之原裕行、小林功郎、「位相変調を利用した光信号処理用自動ゲートパルス生成器の基本動作」、2006 年電子情報通信学会ソサイエティ大会, B-12-6, 金沢, 2006 年 9 月 22 日.
 61. 澤田憲吾、植之原裕行、「半導体デジタル・アナログ変換器の動作特性に関する基礎検討」、電子情報通信学会 OPE 研究会, 2007 年.
 62. 成田優、安本光浩、津田裕之、「多モード導波路部に平行電極を用いた多モード干渉型光スイッチの提案」、2007 年電子情報通信学会総合大会, C-3-3, 名古屋, 2007 年 3 月 20 日.
 63. 岡本健資、植之原裕行、「全半導体デバイス構成の光ラベルスイッチ用多波長光源に関する研究」、2007 年電子情報通信学会総合大会, B-12-12, 名古屋, 2007 年 3 月 21 日.
 64. 森隆、佐藤祐喜、河川仁司、「偏光双安定面発光半導体レーザを用いた光シフトレジスタ」、2007 年電子情報通信学会総合大会, C-4-4, p. 266, 名古屋, 2007 年 3 月 22 日.
 65. 河村裕一、井上直久、「InP 基板上 InAsSbN 赤外量子井戸ダイオードの発光特性のアニール効果 (II)」、2007 年(平成 19 年度)春季、第 54 回応用物理学関係連合講演会, 29a-Q-7, 神奈川, 2007 年 3 月 29 日.
 66. 三浦広平、永井陽一、猪口康博、坪倉光隆、岡田浩、河村裕一、「InP 基板上に格子整合した InGaAsN 層の MBE 成長条件最適化」、2007 年(平成 19 年度)春季、第 54 回応用物理学関係連合講演会, 29p-Q-17, 神奈川, 2007 年 3 月 29 日.
 67. 澤田憲吾、植之原裕行、「半導体デジタル・アナログ変換器の動作特性評価」、2007 年(平成 19 年度)春季、第 54 回応用物理学関係連合講演会, 30a-SG-11, 神奈川, 2007 年 3 月 30 日.
 68. 伊藤二郎、津田裕之、「低屈折率材料埋め込み溝構造による高分解能アレイ導波路回折格子の小型化」、レーザ・量子エレクトロニクス研究会, LQE2007-14, pp. 65-68, 石川(金沢大学), 2007 年 5 月 25 日.
 69. 森隆、佐藤祐喜、河川仁司、「偏光双安定面発光半導体レーザを用いた 10 Gb/s 光バッファメモリ」、2007 年電子情報通信学会ソサイエティ大会, B-12-1, 鳥取, 2007 年 9 月 10 日.
 70. 伊熊雄一郎、安本光浩、宮本大輔、伊藤二郎、津田裕之、「導波路ループミラーを用いた小型反射型アレイ導波路回折格子」、2007 年電子情報通信学会ソサイエティ大会, C-3-65, 鳥取, 2007 年 9 月 10 日.
 71. 伊藤二郎、津田裕之、「低屈折率材料充填溝構造を用いた高分解能アレイ導波路回折格子の作製」、2007 年電子情報通信学会ソサイエティ大会, C-3-64, 鳥取, 2007 年 9 月 10 日.

③ ポスター発表 (国内会議 5件、国際会議 9件)

〔国際会議〕

1. K. Ouchi, Y. Kawamura, and N. Inoue, "Optical control of InGaAs/GaAsSb type II resonant tunneling diodes," 11th International Conference on Modulated Semiconductor Structures, PC62, Nara, Japan, July 14-18, 2003.
2. J. Ito, T. Suzuki, A. Tate, and H. Tsuda, "Proposal of silica waveguide buried with a low-refractive index material for compact planar lightwave circuits," 8th International Symposium on Contemporary Photonics Technology (CPT 2005), PDP-3, Tokyo, January 11-13, 2006.
3. K. Miura, Y. Nagai, Y. Iguchi, H. Okada, and Y. Kawamura, "Improvement of crystal quality of thick InGaAsN layers grown on InP substrates by adding antimony," The 14th International Conf. on Molecular Beam Epitaxy, WeP-27, Tokyo, Japan, September 3-8, 2006.
4. Y. Kawamura and N. Inoue, "Properties of InAsSbN Quantum Well Laser Diodes Operating at 2 μ m Wavelength Region Grown on InP Substrates," The 14th International Conf. on Molecular Beam Epitaxy, WeP-51, Tokyo, Japan, September 3-8, 2006.
5. Y. Narita, M. Yasumoto, and H. Tsuda, "Proposal of Multimode Interference Photonic Switches with Parallel Electrodes in Multimode Waveguide Regions," 10th International Symposium on Contemporary Photonics Technology (CPT 2007), LM-5, Tokyo, January 10-12, 2007.
6. Y. Ikuma and H. Tsuda, "Proposal of a Small Helical Reflective Arrayed Waveguide Grating,"

- 10th International Symposium on Contemporary Photonics Technology (CPT 2007), LM-7, Tokyo, January 10-12, 2007.
7. Y. Narita, M. Yasumoto, and H. Tsuda, "Novel 2x2 Photonic Switch Based on Multimode Interference Effect," 12th Optoelectronics and Communications Conference / 16th International Conference on Integrated Optics and Optical Fiber Communication (OECC/IOOC 2007), 12P-31, Yokohama, July 9-13, 2007.
 8. K. Sawada, and H. Uenohara, "First demonstration of 40-Gbit/s operation of a semiconductor integrated optical digital-to-analog converter", 33th European Conference on Optical Communication (ECOC 2007), P037, Berlin, Germany, September 16-20, 2007.
 9. Y. Ikuma, M. Yasumoto, D. Miyamoto, J. Ito, and H. Tsuda, "Small Helical Reflective Arrayed-Waveguide Grating with Integrated Loop Mirrors," 33th European Conference on Optical Communication (ECOC 2007), P044, Berlin, Germany, September 16-20, 2007.

[国内会議]

1. 河村裕一、中川智克、井上直久、「InP 基板上 InGaAsSbN 赤外量子井戸ダイオードの発光特性」、日本表面科学会 関西支部講演大会, p. 26, 大阪, 2005 年 10 月 28 日.
2. 河村裕一、井上直久、「InP 基板上 InAsSbN 赤外量子井戸ダイオードの発光特性のアニール効果」、日本表面科学会 関西支部講演大会, p-46, 大阪, 2006 年 11 月 6 日.
3. 河川仁司、森隆、「VCSEL の偏光双安定特性と光信号処理への応用」、Optics Japan 2005, 24aAS9, pp. 312-313, 東京, 2005 年 11 月 24 日.
4. 片山健夫、佐藤祐喜、森隆、河川仁司、「1.55 μm 帯面発光半導体レーザの偏光双安定特性と全光フリップ・フロップ動作」、2007 年(平成 19 年度)秋季、第 68 回応用物理学会学術講演会, 4p-P3-29, 北海道, 2007 年 9 月 4 日.
5. 澤田憲吾、植之原裕行、「40-Gbit/s 半導体 2 光デジタル・アナログ変換器の動作特性」、2007 年(平成 19 年度)秋季、第 68 回応用物理学会学術講演会, 4p-P3-30, 北海道, 2007 年 9 月 4 日.

(4)特許出願

①国内出願 (8件)

1. 発明の名称: 双安定半導体レーザを用いた超高速光メモリ方法及びその装置
発 明 者: 森隆、河川仁司、片山健夫
出 願 人: 独立行政法人科学技術振興機構
出 願 日: 平 14 年 11 月 25 日 (優先権主張日: 平 14 年 3 月 12 日)
出願番号: 特願 2002-340372
2. 発明の名称: 半導体レーザ素子
発 明 者: 河村裕一
出 願 人: 財団法人大阪産業振興機構
出 願 日: 平成 14 年 12 月 19 日
出願番号: 特願 2002-368067
3. 発明の名称: 光機能導波路
発 明 者: 柴田泰、津田裕之、鈴木崇功
出 願 人: 学校法人慶應義塾
出 願 日: 平成 15 年 8 月 8 日
出願番号: 特願 2003-290962
4. 発明の名称: 光パルスの位相測定方法および装置
発 明 者: 森隆、河川仁司、片山健夫
出 願 人: 独立行政法人科学技術振興機
出 願 日: 平 15 年 8 月 25 日
出願番号: 特願 2003-299463
5. 発明の名称: アレイ導波路回折格子
発 明 者: 鈴木崇功、津田裕之
出 願 人: 学校法人慶應義塾
出 願 日: 平成 16 年 2 月 19 日
出願番号: 特願 2004-43702
6. 発明の名称: 光パワーリミッタ回路及び方法
発 明 者: 植之原裕行
出 願 人: 東京工業大学長
出 願 日: 平成 16 年 3 月 10 日
出願番号: 特願 2004-67052
7. 発明の名称: 偏波制御回路及び方法
発 明 者: 植之原裕行
出 願 人: 東京工業大学長
出 願 日: 平成 16 年年 3 月 10 日
出願番号: 特願 2004-67060
8. 発明の名称: シフトレジスタ型光メモリ装置
発 明 者: 森隆、河川仁司、片山健夫
出 願 人: 国立大学法人奈良先端科学技術大学院大学

出 願 日:平 19 年 4 月 13 日
出願番号:特願 2007-106297

②海外出願 (0件)

(5)受賞等

①受賞

1. 下記論文にて Student Paper Award 受賞(2006 年 7 月 6 日)
伊藤二郎、鈴木崇功、Tom Fan、楯敦次、津田裕之, “Compact arrayed-waveguide grating using low-refractive index material filled trenches,” The 11th OptoElectronics and Communications Conference (OECC 2006)
2. 河川仁司:電子情報通信学会フェロー、「半導体光非線形機能デバイスに関する先駆的研究」に対して(2006 年 9 月 20 日)
3. 下記論文にて IEICE ELEX Best Paper Award in the year 2005 受賞(2006 年 9 月 20 日)
T. Suzuki, K. Masuda, H. Ishikawa, Y. Abe, S. Kashimura, H. Uetsuka and H. Tsuda, “Planar lightwave circuit dispersion compensator using a compact arrowhead arrayed-waveguide grating,” IEICE Electronics Express, Vol. 2, No. 23, pp. 572-577(2005).
4. 下記論文にて Best Paper Award を受賞(2007 年 6 月).
K. Sawada, and H. Uenohara, “Investigation of Operation Tolerance of a Semiconductor Optical Digital-to-Analog Converter on Phase and Intensity Fluctuation”, Conference on Optical Internet / Australian Conference on Fiber Technology (COIN/ACOFT2007), Melbourne, Australia, June, 2007.

②新聞報道 なし

③その他 なし

7 研究期間中の主な活動(ワークショップ・シンポジウム等)

年月日	名称	場所	参加人数	概要
平成 15 年 1 月 10 日	CREST「シフトレジスタ機能付超高速光メモリの創製」第1回研究会	山形大学工学部	5人	研究全体計画および各研究グループの研究計画、事務処理説明。
平成15年11月13～14日	CREST「シフトレジスタ機能付超高速光メモリの創製」第2回研究会	山形大学工学部	20人	各研究グループの研究概要報告、および、研究発表。研究総括の特別講演。山形大学工学部河口研究室の実験室見学
平成16年11月18～19日	CREST「シフトレジスタ機能付超高速光メモリの創製」第3回研究会	慶應義塾大学 矢上キャンパス	25人	各研究グループの研究概要報告および研究発表。研究総括の特別講演。慶應義塾大学津田研究室の実験室見学
平成 17 年 9 月 5～6 日	CREST「シフトレジスタ機能付超高速光メモリの創製」第4回研究会	大阪府立大学 先端科学イノベーションセンター	15人	各研究グループの研究概要報告および研究発表。研究総括の特別講演。大阪府立大学河村研究室の実験室見学
平成 18 年 11 月 16～17 日	CREST「シフトレジスタ機能付超高速光メモリの創製」第5回研究会	東京工業大学 すずかけ台キャンパス	22人	各研究グループの研究概要報告および研究発表。東京工業大学マイクロシステム研究センターの実験室見学。
平成 19 年 8 月 29～30 日	CREST「シフトレジスタ機能付超高速光メモリの創製」第6回研究会	奈良先端科学技術大学院大学	25人	各研究グループの研究概要報告(全期間を通しての目標と成果および最近 1 年間の成果)および研究発表。奈良先端科学技術大学院大学 河口研究室の実験室見学。

8 研究成果の展開

(1)他の研究事業への展開

超高速光メモリ研究グループ（奈良先端科学技術大学院大学）

超高速光メモリ研究グループで推進した偏光双安定 VCSEL を用いた信号再生などの全光型信号処理の研究は、文部科学省科学研究費補助金、特定領域研究「新世代光通信へのイノベーション」の中の計画研究「偏光双安定面発光半導体レーザを用いた全光型信号処理」（平成 17 年度－平成 20 年度、研究代表者 河 口 仁 司）の 3R など全光型信号処理へ発展している。

又、同グループで推進した光バッファメモリおよび 1.55 μm 帯 VCSEL の研究は総務省戦略的情報通信研究開発推進制度 (SCOPE) による「長波長偏光双安定面発光半導体レーザを用いた全光パケットスイッチノードに関する研究開発」（平成 19 年度－平成 21 年度、研究代表者 河 口 仁 司）の研究へ発展している。

光データ処理研究グループ（東京工業大学）

光データ処理研究グループで推進した光ヘッダ識別回路の成果は、文部科学省特定領域研究「新世代光通信へのイノベーション」の中の計画研究「全光ラベル処理および光バッファリングを用いたパケットルーティング」（代表者 小林 功 郎）の光バッファ処理の一部機能として活用されている。

時空間変換光制御方式研究グループ（慶応義塾大学）

本研究で得られた光回路設計技術、回路構成法に基づく分散補償回路に関して、科学研究費補助金の助成を得て、課題名「再構成可能光ネットワーク用可変分散補償回路の研究」で研究を推進している。

結晶成長研究グループ（大阪府立大学）

JST シーズ発掘試験「波長 2～3 μm 帯レーザの開発」へ展開した。

(2)実用化に向けた展開

超高速光メモリ研究グループ（奈良先端科学技術大学院大学）

該当事項はありません

光データ処理研究グループ（東京工業大学）

該当事項はありません

時空間変換光制御方式研究グループ（慶応義塾大学）

本研究の石英アレイ導波路回折格子の設計法に関わる知見を PLZT に適用し、高速の波長選択フィルタ、再構成可能光分岐挿入装置用集積チップを実現するためのプロジェクト (NEDO 大学発事業創出実用化研究開発費助成金、課題名「波長多重高速フォトニック集積回路の開発」) を実施した。15 ns で 16 nm に渡る世界最高水準の高速波長選択を実現した。

結晶成長研究グループ（大阪府立大学）

InP 基板上 InGaAsSbN 系の MBE 成長に関する研究が、企業との共同研究へ展開し、そのテーマが次世代戦略技術実用化開発助成事業 (NEDO) に採用された。

9 他チーム、他領域との活動とその効果

(1) 領域内の活動とその効果

超高速光メモリ研究グループ（奈良先端科学技術大学院大学）

領域会議での議論を通じて、偏光双安定スイッチングと注入同期との関係など、物理的考察の重要性をより強く認識し、この部分の研究が進展した。又、研究の重点を、980 nm 帯でのシフトレジスタ機能の実現や光バッファメモリの高速化に絞るか、光通信波長帯である 1.55 μm 帯への展開を同時に進めるかについて深く考えるきっかけになった。両者を並行して行い、結果として幸いにも、10 Gbit/s での光バッファメモリ動作実現、シフトレジスタ機能実現、および 1.55 μm 帯 VCSEL による全光型フリップ・フロップ動作実現のいずれも達成することができた。

光データ処理研究グループ（東京工業大学）

該当事項はありません

時空間変換光制御方式研究グループ（慶応義塾大学）

研究チームの研究会での議論を通じて、石英導波路中のミラー構造、レンズ構造を改善する手がかりが得られ、研究が進展した。

結晶成長研究グループ（大阪府立大学）

該当事項はありません

(2) 領域横断的活動とその効果

超高速光メモリ研究グループ（奈良先端科学技術大学院大学）

全体発表会に参加し、ポスター発表で分野のやや異なる研究者と討論することにより、偏光双安定性の起源についてより深く検討するきっかけとなった。

光データ処理研究グループ（東京工業大学）

該当事項はありません

時空間変換光制御方式研究グループ（慶応義塾大学）

該当事項はありません

結晶成長研究グループ（大阪府立大学）

該当事項はありません

10 研究成果の今後の貢献について

(1) 科学技術の進歩が期待される成果

超高速光メモリ研究グループ（奈良先端科学技術大学院大学）

980 nm 帯 VCSEL を自作し偏光双安定特性を実現した。その結果、VCSEL では 2 つの直交偏光間で双安定性が一般性をもって生ずることを初めて明らかにした。又、全光型フリップ・フロップを 0.2~0.3 fJ という極めて小さな光入力で実現できたことは、大きな光入力が必要であるという光非線形の概念をくつがえして、光非線形素子の新しい分野を切り開くことになると考えられる。

又、偏光双安定スイッチング動作中の動的な発振波長変化をヘテロダイン検波により測定した。偏光双安定スイッチング時のビート信号を離散フーリエ変換して、VCSEL の 90°偏光発振光のスペクトログラム（スペクトルの時間変化）を求めた。このスペクトログラムによるスペクトルの時間変化測定は、半導体レーザの発振波長の時間変化を高分解能（実験例では、周波数分解能 0.41 GHz、時間分解能 1.2 ns）で測定できるなど、計測に広く応用できるものと期待される。

光データ処理研究グループ（東京工業大学）

今後実現が強く求められる速度 40 Gbps 以上の超高速光通信・信号処理の分野において、単に信号を適切に伝送するだけではなく、信号の中の情報を解析するために必要なビット処理や信号解析を低負荷の光素子と電子回路で実現する手段に貢献できると考えられる。

本成果の中では、半導体で作製されたハイメサ光導波路の分岐・合波・強度調整・位相調整によって複数ビットのデジタル信号を1ビット時間の複数の振幅レベルのアナログ信号に変換し、その振幅をコンパレータの処理できる帯域にフィルタで波形整形した後、振幅のレベルを処理してアドレステーブルで識別を実現した成果が相当する。

時空間変換光制御方式研究グループ（慶応義塾大学）

石英導波路中に形成するミラー構造、レンズ構造を利用することによって、従来、空間に配置されて構成された光学システムを、全光導波路で構成することが可能になる。各種光学システムを安定に小型化することが可能であり、光通信だけでなく、光計測、光メモリなど多くの分野に貢献すると思われる。また、光パケット生成のために、高精度に時間及び空間領域で光信号を操るワンチップ石英導波路回路を構成する技術を開発した。これは、全光信号処理技術全般の進展に寄与すると思われる。

結晶成長研究グループ（大阪府立大学）

InGaAsSbN 系半導体結晶は通信用レーザのみでなく、新規な光・電子デバイス実現の可能性を秘めた材料系であり、動作波長範囲が 1.3 μm から 3 μm まで拡大可能なことが示せたことは今後の科学技術の進歩が期待される成果と言える。

(2) 社会・経済の発展が期待される成果

超高速光メモリ研究グループ（奈良先端科学技術大学院大学）

今後の情報量の増大に応えるためには、全光型でのパケット単位のルーティング技術が必要とされている。従来、ファイバ遅延線バッファメモリを用いることが提案されているが、各ビット毎の制御や必要なタイミングに情報を読み出すことが困難であった。このような困難を解決し、現在存在する技術を用いて、パケット交換を行おうとする試みも始まっている。例えば、時系列信号を空間並列信号に変換した後、各チャンネル毎に分岐し、全てのチャンネルの信号をそれぞれ受光器で受け、電気信号に変換した後、処理しようとするものである。各ノードで一度光信号と電気信号の変換を行う必要があり構成法が極めて複雑であるため、多くの困難が予想される。5 年間の研究期間中にスローライト(slow light)の研究が極めて活発になった。種々の構成法が検討されているが、いずれも未だ原理検証の段階である。将来、光パルスの位相制御や数ビットの光バッファメモリが実

現できる可能性はあるが、それ以上のビット数をもつ光バッファメモリの実現は困難と思われる。又、同一基板上に導波路型の 2 個の光学的に結合したリングレーザを作製し、1 ビットの光メモリが実現されているが、光アイソレータの導入が極めて困難なことなどから、多ビット化への見通しはない。従って、5 年間で当初構想した本研究の重要性は何ら変化がないと思われる。ここ数年間の間に光パケットスイッチングの研究が活発化していることを考えると、より重要性が増したと言える。本研究で実現したシフトレジスタ機能付光メモリをさらに発展させ、高速化、多ビット化、モジュール化を進めれば、これまでフォトニックネットワーク技術では是非必要と言われながらも実現されてこなかった、全光パケットメモリが比較的容易な方法で実現され、フォトニックネットワークの構成を基本的に変えるほど大きな波及効果、インパクトをもつものと期待している。

光データ処理研究グループ（東京工業大学）

(1)と同様の成果になるが、速度 40 Gbps の超高速信号を光レベルでデジタル・アナログ変換し、振幅方向に変換された信号のビット情報を1ビット時間で電子回路で解析しアドレス認識を行った成果は、ルータのアドレス解析そのものである。従ってルータの光化の際に重要な技術になると考えられる。

時空間変換光制御方式研究グループ（慶応義塾大学）

石英光回路を小型化する二種類の方法を提案、実証しているが、これらの技術を利用して光通信ノードの光化をさらに進めて、光ネットワークの経済化に貢献すると思われる。また、勿論、本研究成果のみで次世代のフォトニックネットワークを構築することは出来ないが、そのためのキーデバイスを提供することは可能であると思われる。

結晶成長研究グループ（大阪府立大学）

InGaAsSbN 系レーザに関して今回得られた成果はIT、環境、医療といった分野での応用が期待される。

11 結び

超高速光メモリ研究グループ（奈良先端科学技術大学院大学）

A. 研究の目標等から見た達成度、得られた成果の意義等の自己評価

研究目標は達成できたと考えている。又、本研究を通じて幸いにも、光ビットメモリの分野で世界のトップレベルの研究成果を挙げることができたと自負している。主な成果を列挙すると、

(a) 980 nm VCSEL が自作できるようになり、この素子で偏光双安定性が実現できたこと。

ここ数年前まで、一般には VCSEL の偏光スイッチ特性、又は、偏光双安定スイッチ特性は、素子構造や作製プロセス、マウントなどに依存し、制御が困難な特性と考えられていた。他の研究所で作製された VCSEL と、我々が作製した VCSEL とでは、その構造や作製プロセス、マウントなどが大きく異なるにもかかわらず、両方で全く同様の偏光双安定性が得られたことから、極めて一般性のある現象であることを示した。この結果は我々の行った理論解析でも裏付けられている。

(b) 全光型フリップ・フロップ動作で世界最小のスイッチングパワー (0.2~0.3 fJ)、世界最高速 (10 GHz) を実現した。

(c) 10 Gbit/s RZ 信号の光バッファ動作を世界で初めて実現した。

(d) シフトレジスタ機能を実現した。

(e) 1.55 μm 帯 VCSEL による偏光双安定を実現した。

光通信波長帯で偏光双安定を実現したことにより、光通信への応用が進むものと期待される。

B. 今後の研究の展開

1. 高速化

全光化のメリットの 1 つは高速化と言える。注入光の離調を大きくすることにより高速化が可能なことが明らかになった。980 nm 帯では周辺の光学部品があまり開発されていないことから、10 Gbit/s にとどまったが、1.55 μm 帯ではより一層高速化が計れるものと期待している。当面 40 Gbit/s での動作実現、将来的には 160 Gbit/s 動作を目指している。

2. 多ビット化・モジュール化

本研究では光メモリの構成に光ファイバ系を用いたが、あまり多ビット化に向くとは言えない。そこで空間並列型の光バッファメモリを考案した (特許出願済)。空間変調器を短時間開くことにより、VCSEL の記録している信号を隣りの VCSEL へ転送・記録することができる。VCSEL に対して入出力とも軸をはずす必要がないこと、口径の大きな光アイソレータ 1 個を用いれば良いこと、などの特徴をもっている。又、モジュール化により、サブシステムでの検証実験が可能になるものと期待している。

3. サブシステムでの光バッファメモリ検証

偏光双安定 VCSEL を用いた光メモリは、小型で集積度が高く、ビット単位の遅延量可変など有用な光メモリ技術になる可能性をもつ。偏光双安定 VCSEL スイッチアレイにより構成した光バッファメモリを実際のサブシステムに導入し、その動作実証を行う必要がある。光メモリの研究はデバイス単体で終結している例が多いが、システム実装レベルでの実証を行い、問題点などを早期にデバイス研究にフィードバックすることにより、光パケットシステム開発上最大の課題である、光バッファメモリの実現を加速できるものと考えられる。

C. 研究代表者としてのプロジェクト運営

本研究は、平成 14 年度~17 年度は山形大学を、平成 18 年度~19 年度は、研究代表者の異動により奈良先端科学技術大学院大学を拠点として、東京工業大学、慶應義塾大学、大阪府立大学が参加し、強力に研究を推進した。相互の情報交換、研究の方向性の確認などのため、年 1 回、計 6 回、研究総括の榊先生にも加わっていただき、研究チーム内研究会を開催した。会場を

各大学持ち回りにしたことにより研究室見学などもでき、意義深い会議であったと言える。又、この研究会で、大学院生にも発表していただくことにより、若手研究者の育成に大きな効果があった。

光データ処理研究グループ（東京工業大学）

5年間の研究期間を通して 40 Gbps の光信号を半導体導波路素子でデジタル・アナログ変換し、電子回路で処理可能な帯域に波形整形した後にアドレス識別を行うことができたため、最低限の目標は達せられたと考えている。また光デジタル・アナログ変換素子自体の特性をBERの観点から数値解析し、所望のBERを達するために要求される信号変動レベル・チャープ量・位相変動などの影響を考慮し、その実現性を見出した点も価値があることと考えている。

一方、1回の処理で扱えるビット数が限られている原理上の課題をいかに克服するか、アクティブなゲートパルスによる消費電力をいかに削減するか、入力パワーの変動をある範囲に抑えるための利得等化器をいかに実現するか、など技術的な課題もいくつか見出され、今後実用レベルに到達するための乗り越えるべき課題と捕らえており引き続き取り組むべき内容であると考えている。

光データ処理研究グループとしては設備面よりは半導体素子を作製するためのエピ基板やステップパ露光用レチクル、ステップパ露光の外注など、現在の世の中の技術水準で実現可能な特性をいかに短期間に効率よく進められるか、に重点を置いてきた。結果として素子の動作を実現できた面は良かったが、若手技術者の育成の観点からは素子の作製プロセス自体をもっと本人に手がけさせるような進め方もあったかと思う。あくまで許される予算で整備可能な設備に限りがあり、今回は素子作製まで手がけられなかったのは事実であり、若手技術者の教育と成果を得ることの両立の難しさを感じる。

時空間変換光制御方式研究グループ（慶応義塾大学）

博士後期課程への進学を促す上で、修士課程において研究に注力させることは重要である。修士課程在学中の学生を時給制で雇用し、国際会議等で発表させることが出来たことが、学生の進学と研究実施に非常に有効であった。

結晶成長研究グループ（大阪府立大学）

波長 $1.3\ \mu\text{m}$ 帯の GaAs 基板上 InGaAsSbN 系レーザに関しては、レーザ特性としては目標を達成出来なかったが、Sb 原子の振る舞いなどについて物性的にあらたな知見を得ることが出来たと考えている。また InP 基板上 InGaAsSbN 系レーザの試作も行い波長 $2\ \mu\text{m}$ 帯レーザが実現可能であることを示せたことも成果であると考えている。研究費は有効に結晶成長の実験に使用出来たと考えている。



図 89. 河口研究チーム第 6 回研究会
(平成 19 年 8 月 30 日、奈良先端科学技術大学院大学 物質創成科学研究科 玄関前にて)



図 90. 980 nm VCSEL 作製用分子線結晶成長装置
(超高速光メモリ研究グループ:奈良先端大)



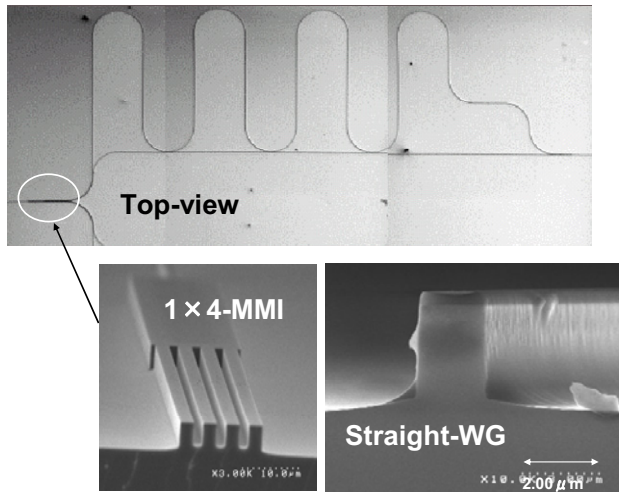


図 92. 作製した 10Gbps 対応 ODAC
(上段:表面写真、下段左:1×4-MMI、下段右:ハイメ
サ導波路断面)
(光データ処理研究グループ:東工大)

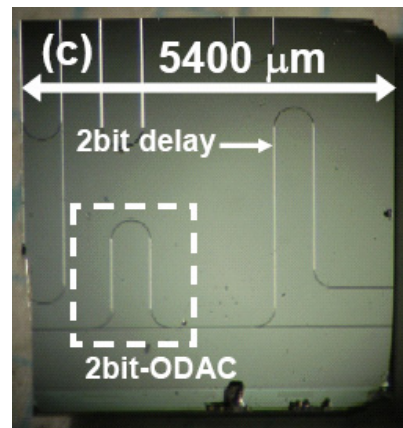


図 93. 作製した 40Gbps 対応 ODAC
(光データ処理研究グループ:東工大)

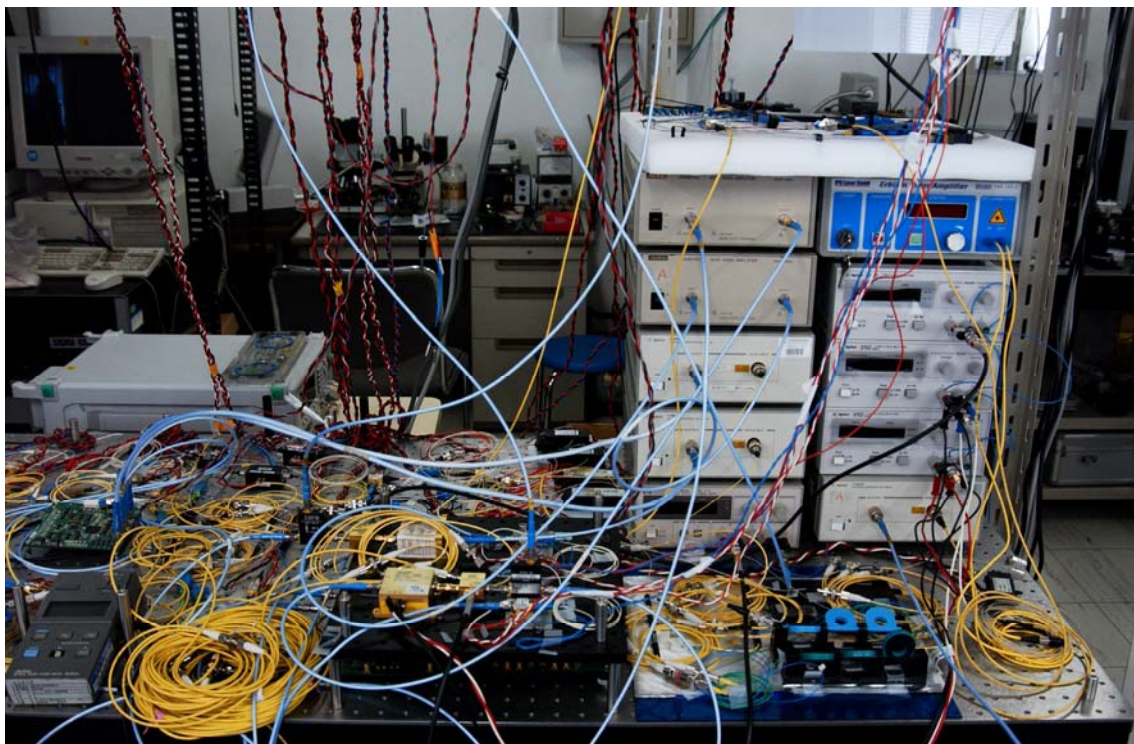


図 94. 光ラベルスイッチ測定系(光データ処理研究グループ:東工大)



図 95. 平成19年度研究室集合写真(光データ処理研究グループ:東工大)

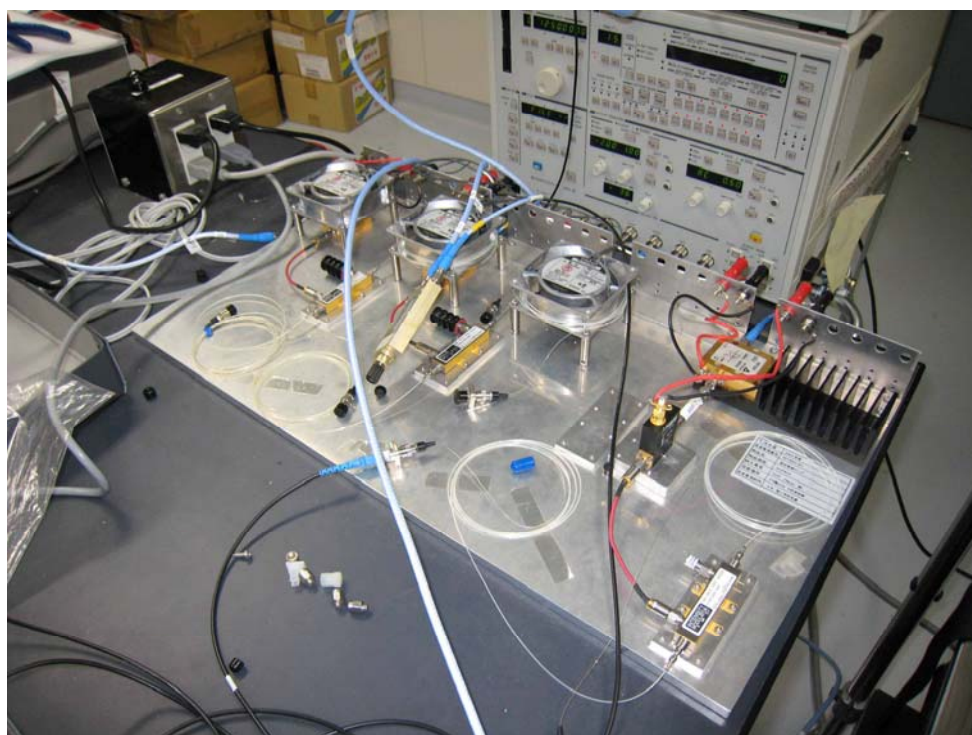


図 96. 時空間変換光信号処理用光源(時空間変換光制御方式研究グループ:慶應大)



図 97. 光信号処理用実験風景(時空間変換光制御方式研究グループ:慶應大)



図 98. InGaAsSbN 用分子線結晶成長装置(結晶成長研究グループ:阪府大)