

省電力高次機能半導体レーザーの研究

Study of low-power-consumption highly functional semiconductor lasers



河口 仁司 (Hitoshi KAWAGUCHI, Dr. Eng.)

奈良先端科学技術大学院大学

物質創成科学研究科 教授

(Professor, Graduate School of Materials Science,
Nara Institute of Science and Technology)

電子情報通信学会 フェロー、応用物理学会、日本光学会、日本物理学会、
IEEE Photonics Society, OSA, SPIE 会員

受賞:平成23年度科学技術分野の文部科学大臣表彰科学技術賞(2011年度)、
KDDI財団優秀研究賞(2010年度)、A Best Paper Award (OECC)(2002年度)

著書: Bistabilities and nonlinearities in laser diodes, ARTECH House
(1994年度)

研究専門分野: 超高速光エレクトロニクス

あらまし 高速、低コスト、かつ急増するトラフィックにフレキシブルに対応できる超高速フォトニックネットワークの実現が期待されている。本稿では、面発光半導体レーザー (VCSEL) の発振偏光の双安定について簡単に述べるとともに、双安定から得られるメモリ機能・AND ゲート機能を用いた全光型信号処理について筆者らの研究を述べる。偏光双安定 VCSEL の 2 次元アレイを用いることにより、各 VCSEL に光信号を 1 ビットずつ記録し、必要なタイミングに合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高速光パケットメモリが実現できる。20 Gb/s 疑似ランダム (PRBS) RZ 信号のメモリ動作、シフトレジスタ機能を用いた 4 ビットメモリ動作を実現した。又、全光型パケットヘッダ識別にもとづく光パケットスイッチングも実現した。さらに、酸化狭窄構造の導入による低消費電力動作実現、および省電力高次機能半導体レーザーの創成をめざした試みについても述べる。

1. はじめに

半導体レーザーの光出力に双安定性が得られることは、古くレーザーダイオードの研究の初期から知られており、全光型信号処理への応用も検討された。その後、半導体レーザーの光双安定性や光非線形性を用いた光信号処理の研究が継続して行われ、半導体レーザーの物理の解明や特性向上とともに、双安定半導体レーザー自体の性能向上や、各種光信号処理への応用が進展してきた。本稿では、平成 21 年度～23 年度に実施した「省電力高次機能半導体レーザーに関する研究」の報告として、偏光双安定面発光半導体レーザー (VCSEL: Vertical-Cavity Surface-Emitting Laser) を用いた高速光メモリ、多ビットメモリ、ヘッダ識別への応用、低消費電力動作について述べるとともに、新しい省電力高次機能半導体レーザーについても述べる。

2. 双安定半導体レーザーとその光信号処理への応用

全光型ネットワークを実現するため、光パケット単位のルーティング技術が必要とされている。現在のネットワークにおける IP パケットのルーティングはルータ等において電氣的に行われている。しかし、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。超高速フォトニックネットワーク実現のためには、ノードにおいて光信号を電気信号に変換することなく中継信号処理を行う技術が必要となる。光信号のまま IP パケット毎にルーティング処理を行うフォトニックパケットルータでは、入力端で光信号に変換された信号は、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。フォトニックパケットルータの主要部であるフォトニックパケットスイッチの構成を図 1 に示す。スイッチには、短時間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。又、フォトニック技術は、ヘッダの高速識別にも極めて有用である。

省電力高次機能半導体レーザの研究

Study of low-power-consumption highly functional semiconductor lasers

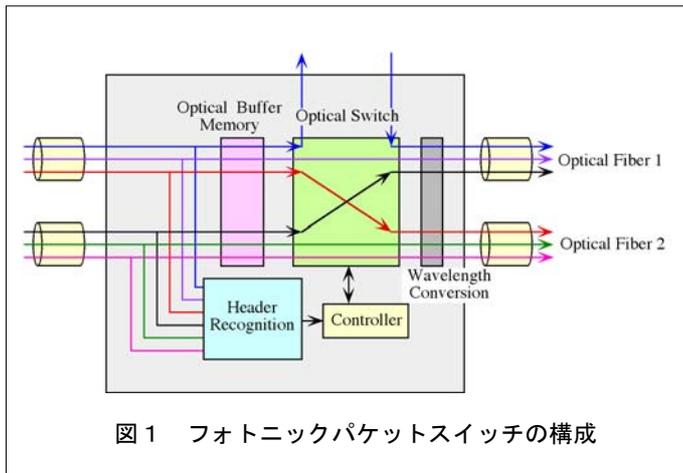


図1 フォトニックパケットスイッチの構成

筆者らは、図2に示すVCSELの偏光双安定性を利用した全光型信号処理、および1つのVCSELに1ビットのメモリ機能を持たせ、その2次元アレイ化によるバッファメモリを検討してきた。偏光双安定VCSELは正方形のメサを持ち、その辺に沿った直交する2つの直線偏光（0°、90°）のいずれかで発振する[1], [2]。発振光の偏光に直交した偏光をもつ制御光を適切な光強度で入力すると、発振偏光を制御光の偏光方向にスイッチすることが出来る。

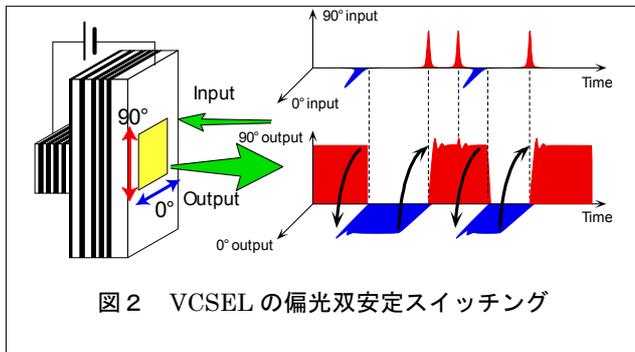


図2 VCSELの偏光双安定スイッチング

図3に示すように、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VCSEL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が実現できる[3]。90°偏光の入力データ信号と90°偏光のセットパルスをVCSEL (M_{1x})に注入すると、データ信号“1”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、セット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。その後リセットパルスを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。

又、偏光双安定VCSELで実現される光AND機能とメモリ機能を用い、全光型パケットヘッダ識別にもとづく光パケットスイッチングシステムを構築した。ANDゲート動作により4ビットのヘッダ中の1ビットを識別し、40 Gb/s NRZ信号のペイロードのスイッチングを実現した[4], [5]。

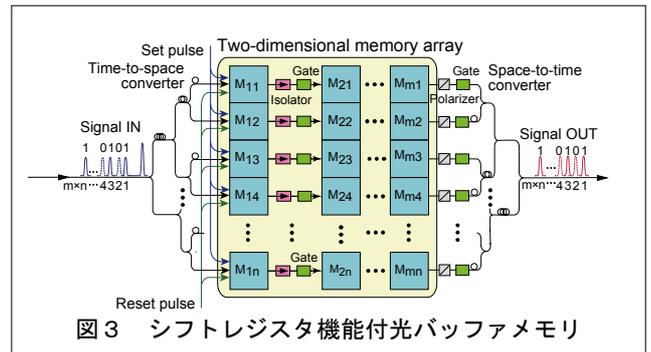


図3 シフトレジスタ機能付光バッファメモリ

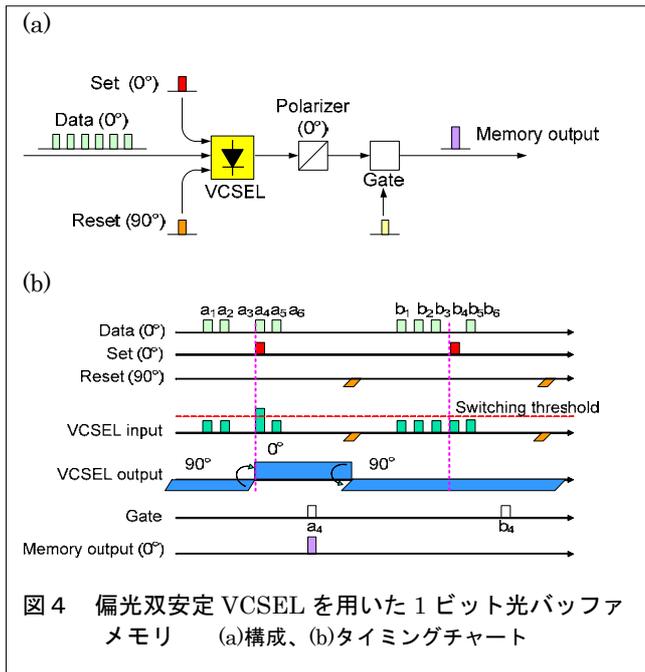
3. 高速全光型メモリ動作

3.1 高ビットレートの光入力信号に対する動作

偏光双安定VCSELは1ビットの情報を偏光状態として記録する全光型メモリとして使用できる。図4に示すように、データ信号光中の記録したいビットに時間を合わせてセット光を合波し、VCSELの発振偏光（90°）と直交する偏光（0°）で入射する。“1”のデータ光とセット光を合波した時にVCSELの偏光スイッチング閾値を越えるANDゲート動作をするように光強度を設定すれば、データ光の“1”か“0”かに応じてVCSELの発振偏光が90°か0°に定まる。そして、記録した信号は、VCSELの光出力にゲートを用いることで、任意のタイミングで読み出すことが出来る。

省電力高次機能半導体レーザの研究

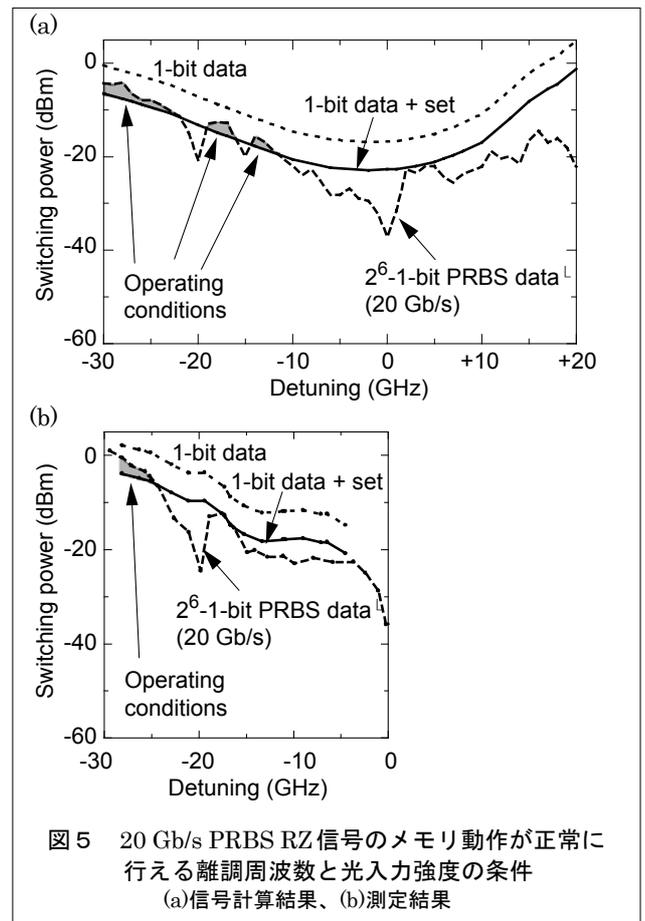
Study of low-power-consumption highly functional semiconductor lasers



データ信号の速度が速くなるに従い、データ信号光とセット光の光パルスの時間幅は短くなり、偏光スイッチングに必要な光ピーク強度は大きくなる。さらに連続したデータビット列を入射した際に、VCSEL 共振器内に光パルスが多数蓄積し、活性層中のキャリア数の変化が大きくなり、セット光パルスを入射していない場合でも偏光がスイッチし、メモリが誤動作する場合が生ずる。

VCSEL 発振光に対するデータ信号光の周波数の差(離調周波数)を大きくすると、共振器内での入力光パルスの寿命が短くなり、蓄積が抑制されこの問題は低減できる[6]。偏光スイッチングに必要な入力光強度は、入射光と偏光スイッチ後の VCSEL 発振光との間の離調周波数に強く依存するので、光メモリが正常に動作する離調と光パワーの条件を、レート方程式を解析することにより求めた[7], [8]。図 5 (a)は計算結果で、(b)は実測した離調特性に基づくものである。点線は 1 ビットのデータ光のみでスイッチングする最小パワーである。実線はデータ光とセット光が同じ強度で同位相であることを仮定して、点線よりも 6 dB 低い値を示している。これが偏光スイッチングが可能なデータ光強度の下限となる。波線はセット光を入力しない場合でも 2^6-1 ビットの疑似ランダム (PRBS) データパ

ルス列のみでスイッチングする光パワーで、誤スイッチングが生じない上限となる。下限より上限が大きくなる領域が正常にメモリ動作する領域であり、20 Gb/s の PRBS 信号の場合には、離調が -24 GHz 以下になることが分かった。



3. 2 高ビットレート光入力信号のメモリ動作

20 Gb/s 2^6-1 PRBS RZ および 40 Gb/s NRZ 信号の光メモリ動作を実現した。図 6 に示すような、 $6 \times 6 \mu\text{m}^2$ のメササイズの 980 nm 帯 InGaAs/GaAs VCSEL を作製し、偏光双安定状態となる駆動電流 9.28 mA で動作させる。この時の光出力は約 430 μW であった。

レート方程式解析や、離調特性の測定により求めたメモリ動作条件を基にして、VCSEL 発振光とデータ及びセット光の離調が約 -23 GHz、データ光強度 250 μW 、セット光強度 190 μW で 20 Gb/s RZ データ信号のメモリ動作を行った[7]。図 7 に示すように、データ光は 2^6-1 ビットの PRBS RZ 信号を 9 回入力している。

省電力高次機能半導体レーザの研究

Study of low-power-consumption highly functional semiconductor lasers

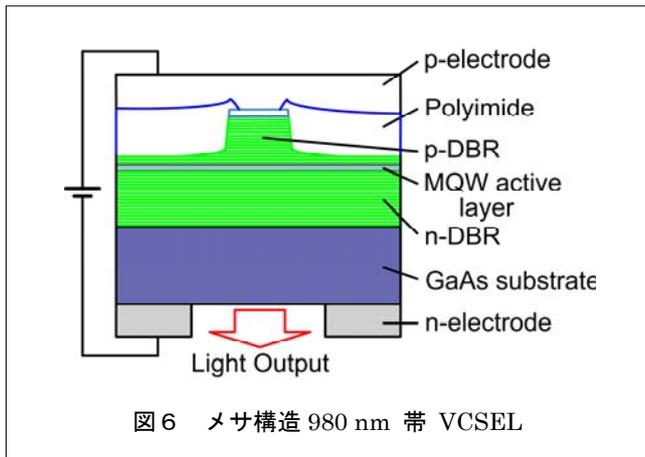


図6 メサ構造 980 nm 帯 VCSEL

信号パルスの共振器内への蓄積が少ない最初の3回と、多く蓄積される可能性のある最後の3回が同じ条件で正しく動作していることから、蓄積が抑制されていることが分かる。以上の結果から 20 Gb/s の1ビットのデータ信号列の任意のビットに対してメモリ動作が可能な事が分かる。このような高ビットレートにおいても、430 μ W の VCSEL 出力よりも弱い 250 μ W の入力光強度で動作しており、光利得を持った全光型メモリ動作をしている。

ほぼ同様の構成で 40 Gb/s 6ビット NRZ 信号の光メモリ動作を実現した。この 40 Gb/s NRZ 信号においても光利得を持った全光型メモリ動作が実現された。

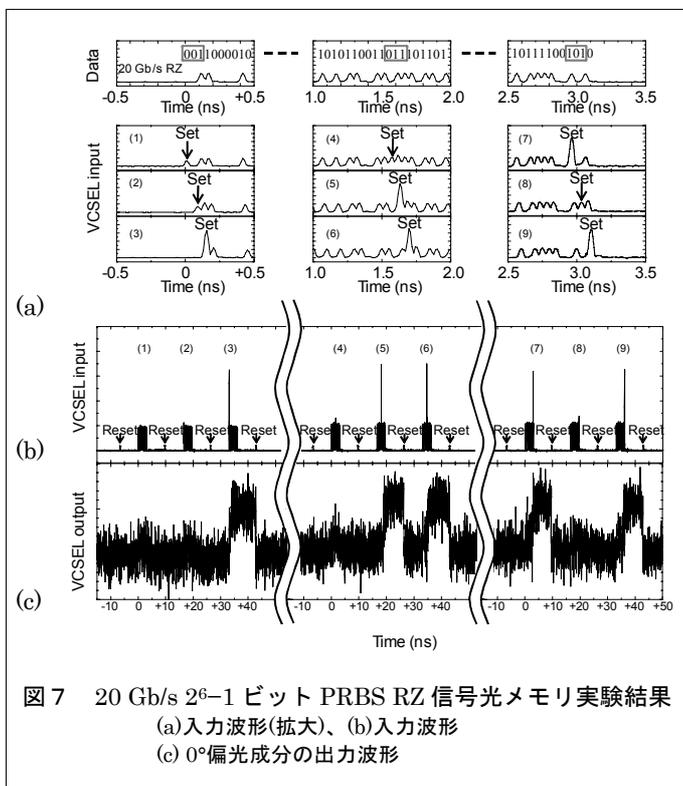


図7 20 Gb/s 2^6-1 ビット PRBS RZ 信号光メモリ実験結果
(a)入力波形(拡大)、(b)入力波形
(c) 0° 偏光成分の出力波形

最初の3回は 2^6-1 ビットのデータ列の最初の3ビットを、次はデータ列の中央辺りの3ビットを、最後の3回はデータ列中の最後の3ビットを対象として、各回毎に異なるビットにセット光を合わせて VCSEL に入射している (図7 (a), (b))。“1”のデータ光とセット光が重なった時に VCSEL の発振偏光が 90° から 0° に変化している事が、 0° 偏光の出力光波形からわかる (図7(c))。入力光信号の波長と強度を変えず、セット光のタイミングのみを変えて実験している。データ光

4. 多ビット光メモリ

4.1 1.55 μ m 帯偏光双安定 VCSEL

光通信の中で用いるためには、波長を 1.55 μ m にすることが望ましい。正方形メサ構造を有する 1.55 μ m 帯 VCSEL (図8) を試作し、偏光双安定特性を実現した[9]。

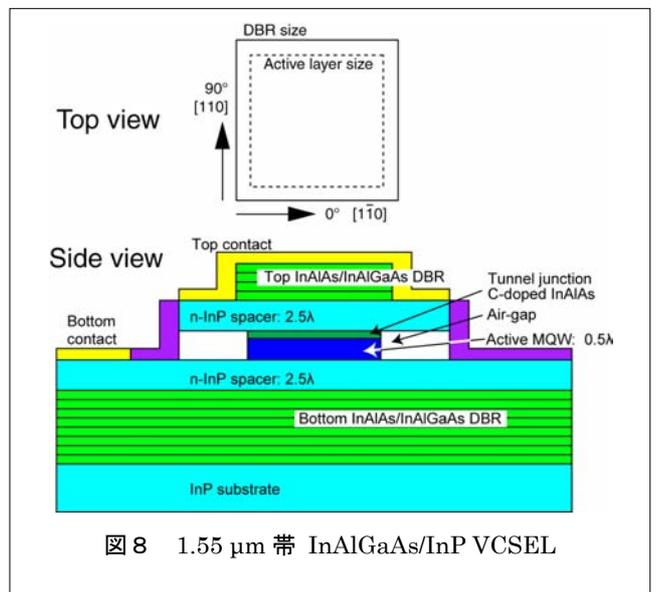


図8 1.55 μ m 帯 InAlGaAs/InP VCSEL

VCSEL の上部 DBR および活性層の形状と大きさを設計し、試作した。VCSEL 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。上部の n-InP と活性層の間に、炭素をドープした InAlAs 層によるトンネル接合層が設けられ

省電力高次機能半導体レーザの研究

Study of low-power-consumption highly functional semiconductor lasers

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。正方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[110]軸に沿っている。全ての VCSEL で良好な単一縦モード発振が得られ、サイドモード抑圧比は 30 dB 以上であった。また、基板結晶の[110]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。偏光分解電流-光出力特性を測定した結果、DBR および活性層のサイズが 10 μm の素子では、多くの素子がヒステリシスを伴う偏光スイッチ特性を示した。直線偏光で発振し、直交偏光抑圧比は約 31 dB であった。VCSEL は両偏光とも単一波長・最低次単一横モードで動作する。この VCSEL を用い 3.1 GHz でのフリップ・フロップ動作を光入力 10 fJ で実現した[10]。

4. 2 シフトレジスタ機能と 4 ビット光メモリ

図 8 に示した偏光双安定 VCSEL を 2 個並列に用いた 2 ビット動作、およびシフトレジスタ動作が実現されている[11]-[13]。さらに、シフトレジスタ機能を持つ光メモリを 2 個並列に接続することにより、4 ビットのデータの記録と任意のタイミングでの再生が行える、シフトレジスタ機能付き 4 ビット光バッファメモリを初めて実現した[14]。実験構成と実験結果を図 9 に示す。データ信号“1”とセット信号を同時に VCSEL に入力したとき、注入光のパワーが偏光スイッチングの閾値を上回る AND ゲート動作により、1 列目の VCSEL(A1,B1)の発振偏光が 0°に切り替わる。これにより、4 ビットのデータの中から 1, 2 ビット目の情報が VCSEL の偏光状態として記録される。そして 1 列目の VCSEL 発振光(0°)を 2 列目の VCSEL(A2,B2)へ入力することにより、2 列目の VCSEL の偏光が 0°に切り替わり、情報が転送される。

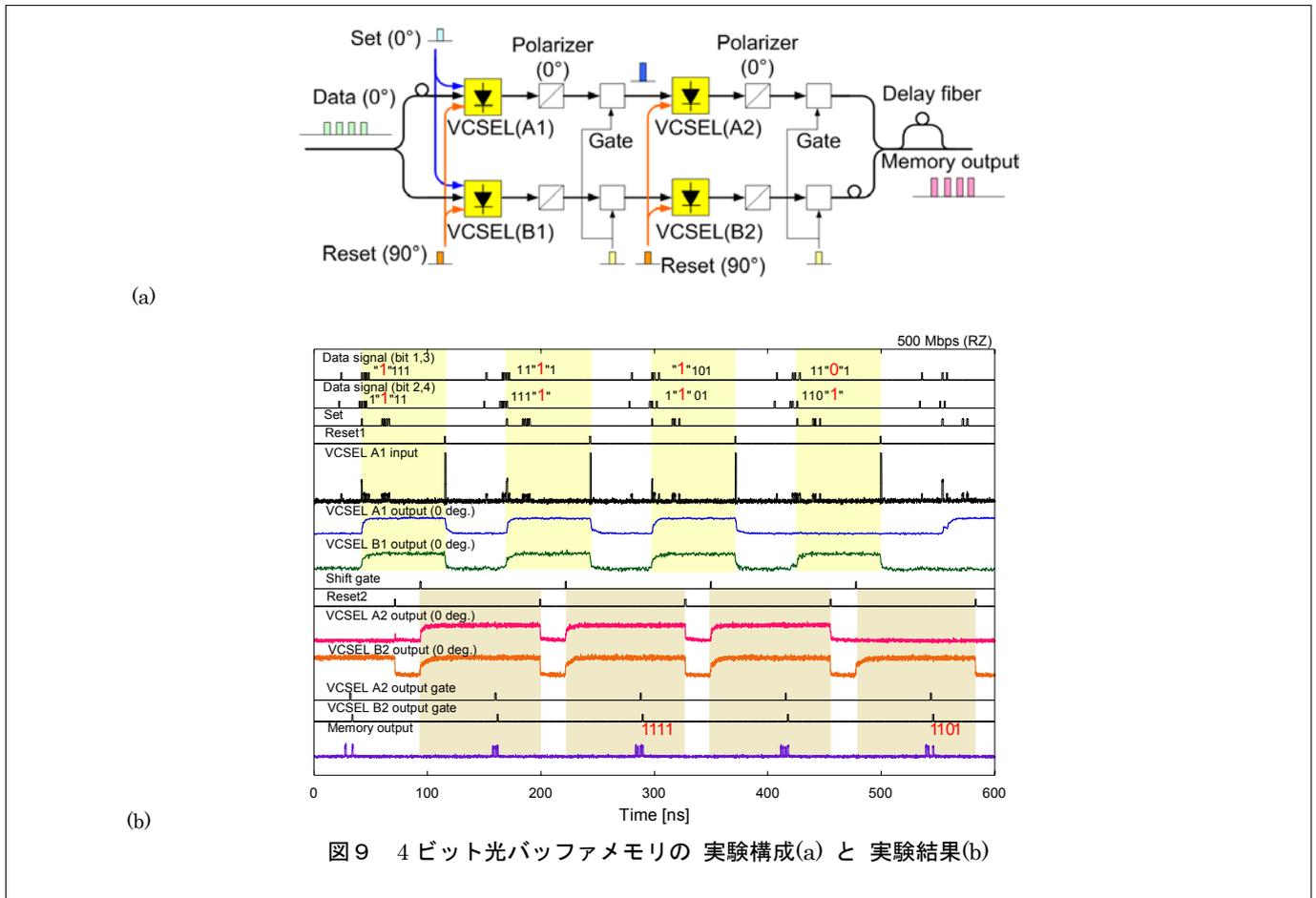


図 9 4 ビット光バッファメモリの 実験構成(a) と 実験結果(b)

省電力高次機能半導体レーザーの研究

Study of low-power-consumption highly functional semiconductor lasers

さらに 1 列目の情報が 90°偏光のリセット信号により消去された後、VCSEL に新たに 4 ビットのデータの中から 3, 4 ビット目のデータを記録することにより、光メモリに 4 ビットの情報が記録される。この実験では並列化の規模が 2 つであり小さいため、4 ビットのデータを 2 回に分けて読み込み、さらに出力信号を出力直前の遅延ファイバで 1 周期遅延して合波することにより 4 ビットのデータの記録と再生を行った。その結果、図 9 に示すようにビットレート 500 Mb/s の RZ 光入力信号に対しシフトレジスタ機能付き 4 ビット光バッファメモリ動作を実現した。

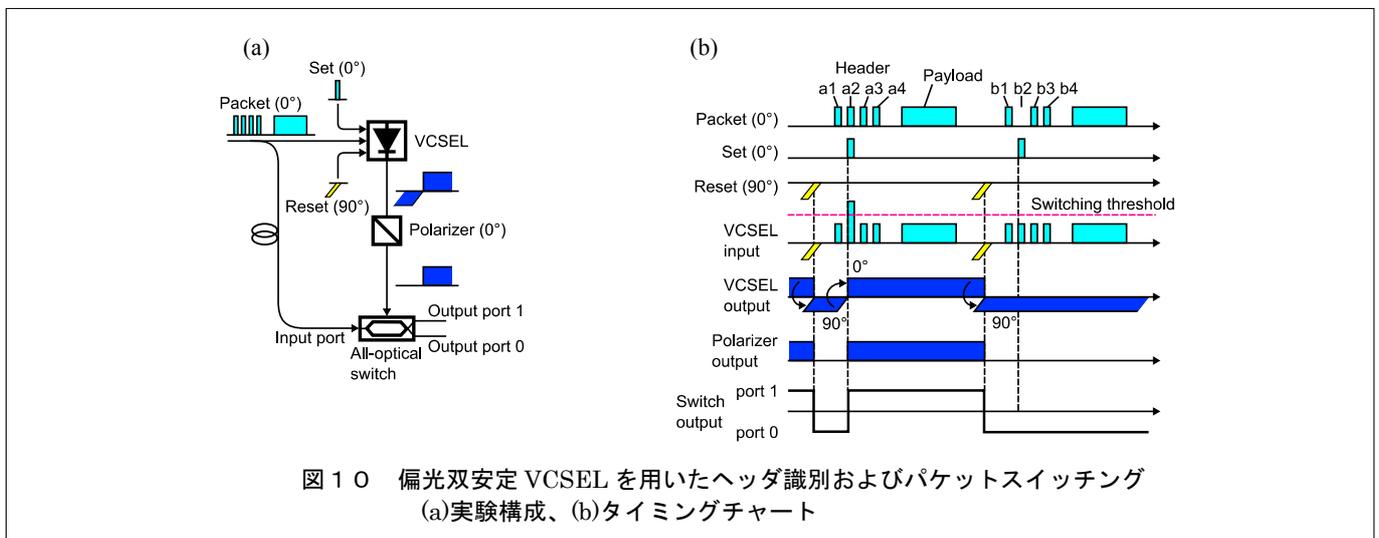
5. 全光型ヘッダ識別による光パケットスイッチング

偏光双安定 VCSEL を用いた全光型パケットヘッダ識別にもとづく光パケットスイッチングシステムを検討した。光双安定のもつ AND ゲート動作により 4 ビットのヘッダ中の 1 ビットを識別し、ホールディング機能 (メモリ機能) により 40 Gb/s NRZ 信号のペイロードのスイッチングを実現した[4], [5]。

偏光双安定 VCSEL は、制御光の入射により発振偏光をスイッチできるため、全光型のフリップ・フロップとして使用できる。この特性を利用して、図 10 (a) の構成により全光型ヘッダ識別が実現できる。光パケット中の識別したいヘッダビット (図 10 (b)のタイミングチャート中の a2, b2) に時間を合わせてセット光を合波し、90°発振状態の VCSEL に対して 0°偏光で入射する。

“1”のヘッダビットとセット光を合波した時に VCSEL の偏光スイッチング閾値を超えるように光強度を設定することで、ヘッダビットの“1”か“0”かに応じて VCSEL の発振偏光が 0°か 90°かに定まり、AND ゲート動作によるヘッダ識別が実現する。VCSEL の出力光を偏光子を通して 0°発振時 (ヘッダビットが“1”のとき) にのみ光出力が得られるようにし、これを光パケットが通過する光スイッチの制御信号とすることで、ヘッダ識別の結果にもとづく光パケットスイッチングが可能となる。実験装置の制限により、フォトダイオードと LN スイッチを使用した。SOA-MZI などの光入力制御型スイッチを用いれば、全光型のパケットスイッチングが可能となる。

光パケットのヘッダ部を 4 ビットの 500 Mb/s RZ 信号、ペイロード部を 40 Gb/s 2¹¹-1 ビット PRBS NRZ 信号とし、ヘッダの 2 ビット目の信号によりペイロードの出力先を切り替えた (図 11)。光パケット信号の光強度は 0.4 μW、セット光は 0.6 μW、リセット光は 2.0 μW である。最初の光パケットのヘッダの 2 ビット目は“0”であり、セット光を合波しても光強度は VCSEL の偏光スイッチング閾値を超えず 90°発振を維持し、0°偏光出力はなく、ペイロードは LN スイッチのポート 0 に出力されている。次の光パケットのヘッダの 2 ビット目は“1”で、セット光との合波により光強度が偏光スイッチング閾値を超え、0°偏光出力が生じ、ペイロードは LN スイッチのポート 1 に出力されている。



省電力高次機能半導体レーザーの研究

Study of low-power-consumption highly functional semiconductor lasers

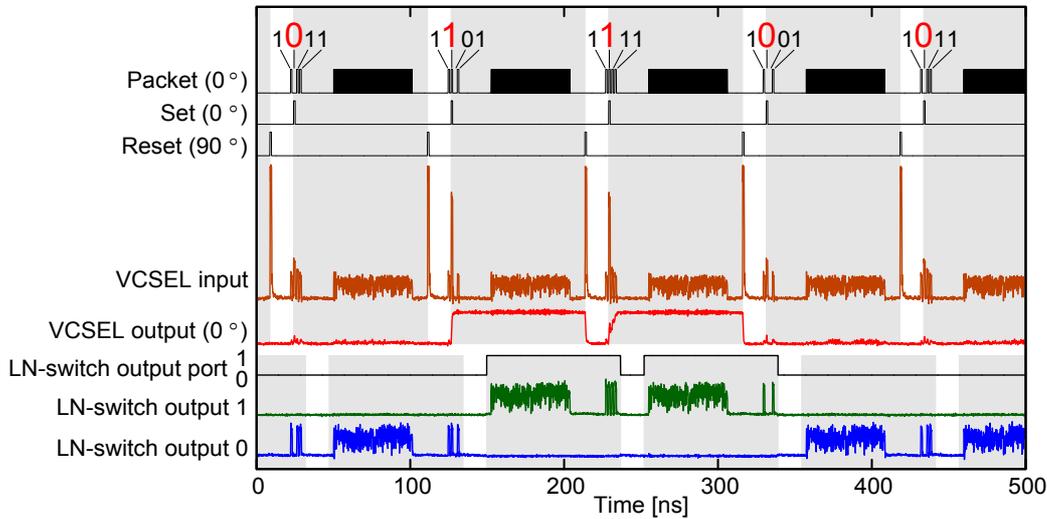


図 1 1 500 Mb/s RZ ヘッダ信号、40 Gb/s PRBS NRZ ペイロード信号での動作

6. 酸化狭窄による偏光双安定 VCSEL の低消費電力化

これまでに述べた実験では VCSEL の駆動電流はいずれも 10 mA のオーダーであった。メモリ容量を増加するため多数の VCSEL を用いる場合には、消費電力が問題になる。活性層近傍の AlAs 層を外周より酸化して絶縁することにより電流を狭窄し、活性層へ注入する電流密度を増加する酸化狭窄構造は VCSEL の低閾値化に有効な手法である。この手法を偏光双安定 VCSEL に導入し、閾値電流を低減することにより、双安定動作が可能な電流も下がり、消費電力の低減が期待できる。

作製した 980 nm 帯酸化狭窄構造 VCSEL を図 12 に示す[15]。Al_{0.90}GaAs/Al_{0.16}GaAs の DBR によりレーザー共振器を構成している。p-DBR は 5.5×6.0 μm の矩形光導波路で、横モードを規定する。酸化狭窄層、活性層 (In_{0.18}GaAs/GaAs 3QW) および光出射側となる n-DBR は 50 μm 角の正方形のメサをもつ。酸化狭窄、p-DBR メサ導波路形成の後、ポリイミドで埋め込み、その上に p 側電極を形成する。電流狭窄層となる高 Al 組成層 (Al_{0.98}GaAs) は、厚さ 30 nm であり、50 μm 角のメサ側面から選択的に酸化し、最終的に 50 μm 角メサの中心部に約 3 μm 角の電流アパーチャを形成した。

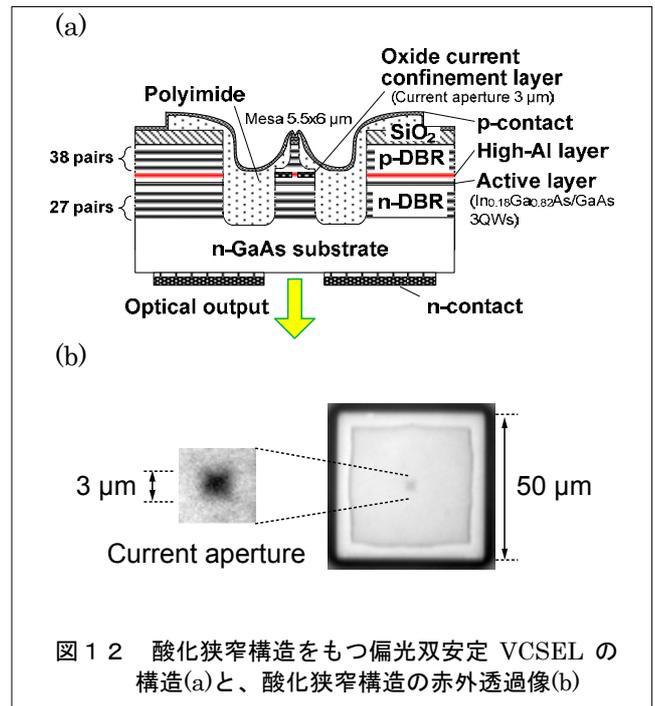


図 1 2 酸化狭窄構造をもつ偏光双安定 VCSEL の構造(a)と、酸化狭窄構造の赤外透過像(b)

10°C における閾値電流は 0.22 mA であり、偏光双安定 VCSEL としては世界最小である。VCSEL のバイアス電流を 0.85 mA に設定し、外部光を注入することにより、発振偏光の制御を行う全光型フリップ・フロップ動作を実証した[16]。図 13 に示す様に、90°偏

省電力高次機能半導体レーザーの研究

Study of low-power-consumption highly functional semiconductor lasers

光で発振している VCSEL に 5 Gb/s NRZ 信号に相当する 200 ps 幅の 0° 偏光パルスを入力したところ発振偏光が 0° にスイッチした。その状態を保持したまま 7.3 ns 後に 90° 偏光パルスを入力したところ発振偏光が 90° にスイッチし、18.3 ns 後に再び 0° 偏光パルスを入力して 0° 偏光に切り換えるまでその発振状態を保持した。この時 VCSEL の光出力は 258 μW で、入力光パルスのパワーは 3.6 μW (パルスエネルギー: 0.72 fJ) であり、この様な低バイアス動作でも光利得を持ったフリップ・フロップ動作を得た。

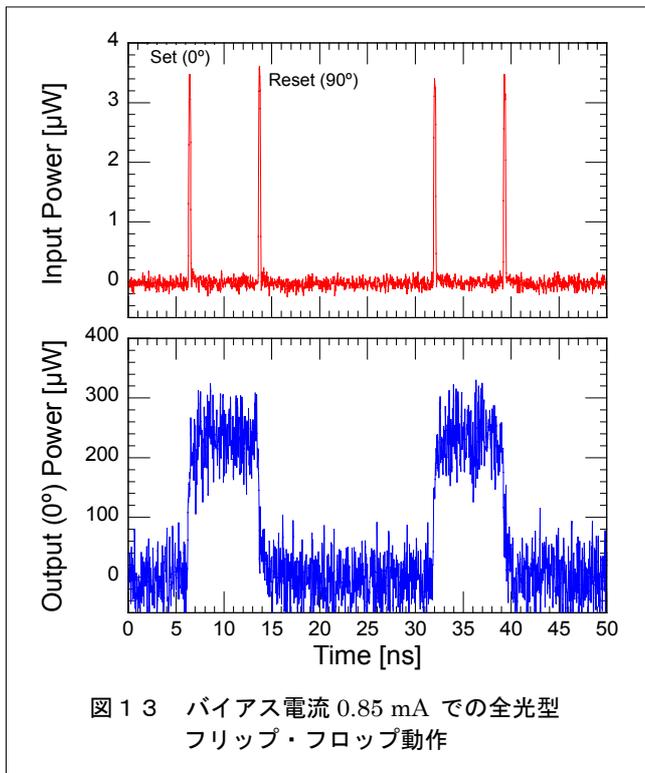


図 13 バイアス電流 0.85 mA での全光型フリップ・フロップ動作

7. 新しい構造の省電力高次機能半導体レーザー

7.1 長距離伝搬表面プラズモンを用いたナノレーザー

室温電流駆動プラズモニックナノレーザーの実現に向けて、伝搬損失の小さい長距離伝搬表面プラズモンに着目し、基本的なナノ共振器構造を提案した[17], [18]。金属ナノワイヤー上の長距離伝搬 SP モードによるナノレーザー構造を検討し、利得係数 1590 cm⁻¹において発振が得られることが分かった。金属ナノワイヤー上の長距離伝搬 SP モード(HE₁ モード)に対する共振器を構成するため、モードのカットオフによる長手方向の閉じ込めを考える (図 14(a))。中心の領域では HE₁

モードが存在するが、上下の領域ではカットオフとなり存在しない。このため、中心部分を伝搬する HE₁ モードは、上下の領域との境界で自由空間へ結合するか、反射して元のモードに結合することになる。自由空間への結合を遮断し、高い反射率を得るために、構造の周囲に金属シールドをおいた。この金属シールドの伝搬モードへの影響を見るために、 $n_2 = 3.5$ の半導体の外側に半径 r_2 の金属シールドを配置した場合 (図 14 (b)) のカットオフ半径近傍の損失係数を図 14(c) に示す。 r_2 を大きくすることによりこの損失は小さくなり、 $r_2 = 400$ nm では低損失を維持できる。半導体領域に利得を与え、共振モードの Q 値の変化を計算したところ、1590 cm⁻¹ で Q 値が発散した。この値は共振モードの線幅 $\Delta\lambda = \lambda/Q$ が急激に狭くなるレーザー発振の閾値利得係数に対応している。半導体では 1000 cm⁻¹ 程度の利得が得られることから、この共振モードによる室温レーザー発振が期待できる。

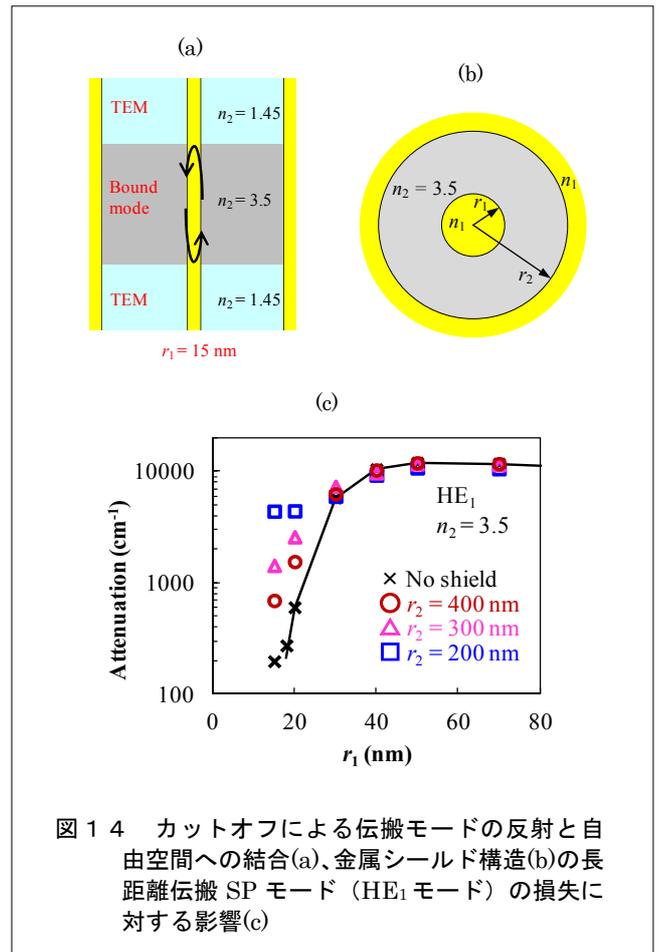


図 14 カットオフによる伝搬モードの反射と自由空間への結合(a)、金属シールド構造(b)の長距離伝搬 SP モード (HE₁ モード) の損失に対する影響(c)

省電力高次機能半導体レーザーの研究

Study of low-power-consumption highly functional semiconductor lasers

7. 2 光導波路結合型 HCG-VCSEL

偏光双安定 VCSEL と偏光無依存高屈折率差サブ波長回析格子 (HCG: High-Index-Contrast Subwavelength Grating) [19]を組み合わせることにより、発振偏光によって出力する光導波路を切り替えることが可能なデバイスを (図 15) を考案し[20]、3次元有限差分時間領域(FDTD)法を用いてその光出力特性を解析した。SOI 基板の Si 層に HCG および光導波路を形成し、その上に SiO₂ 接合層を介して活性層および DBR を配置している。活性層は、量子井戸および InP スペーサ層で構成されており、解析では利得は考慮していない。入射光は E_x 直線偏光でガウス型の平面波であり、強度が 1/e² になる全幅を 3 μm とした。

モニター X、Y における光強度および電磁界分布を図 16 に示す。光強度はモニター Y の強度の最大値、電磁界振幅はモニター Y の E_x および H_z の最大値で規格化している。図 16 に示すように E_x 偏光を入力したとき、y 方向光導波路を伝搬する光強度が x 方向よりも約 4.5 倍強くなる。これは、偏光によって出力する光導波路を選択できることを示している。光導波路の幅を細くし単一モード光導波路にすることにより、x 方向導波路光出力と y 方向導波路出力の比は、約 12 に改善される。この場合、光出力が大きい導波路では TE モードで、光出力が弱い導波路では TM モードで伝搬することがわかった。最近、この HCG-VCSEL の光励起レーザー発振にも成功した[21]。

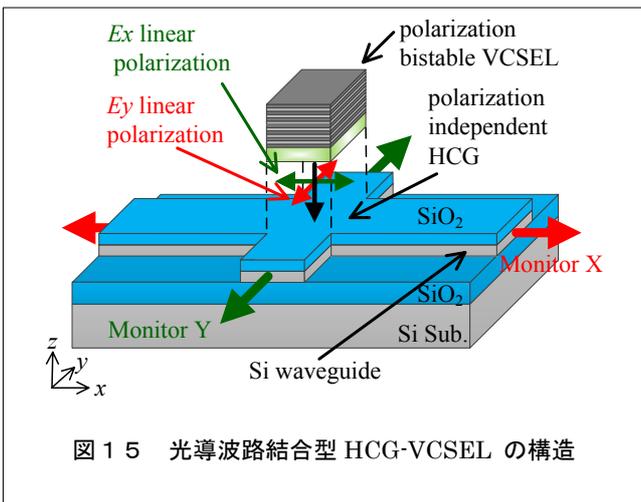


図 15 光導波路結合型 HCG-VCSEL の構造

8. おわりに

双安定半導体レーザーとその光信号処理への応用に関し、筆者らが行ってきた研究成果を報告した。世界最高である 20 Gb/s PRBS RZ 信号のメモリ動作と 4 ビットメモリを実現するとともに、1.7 mW の消費電力で 1 ビットのメモリを実現した。消費電力の面からだけ考えれば、10 k ビット (1 チップの消費電力 17 W) のメモリ実現も可能と考えられる。又、ヘッダ識別への応用についても報告した。プラズモンを用いた微小共振器半導体レーザーでの光双安定の実現や SOI 基板への集積化により、一層広い応用が可能になると期待している。

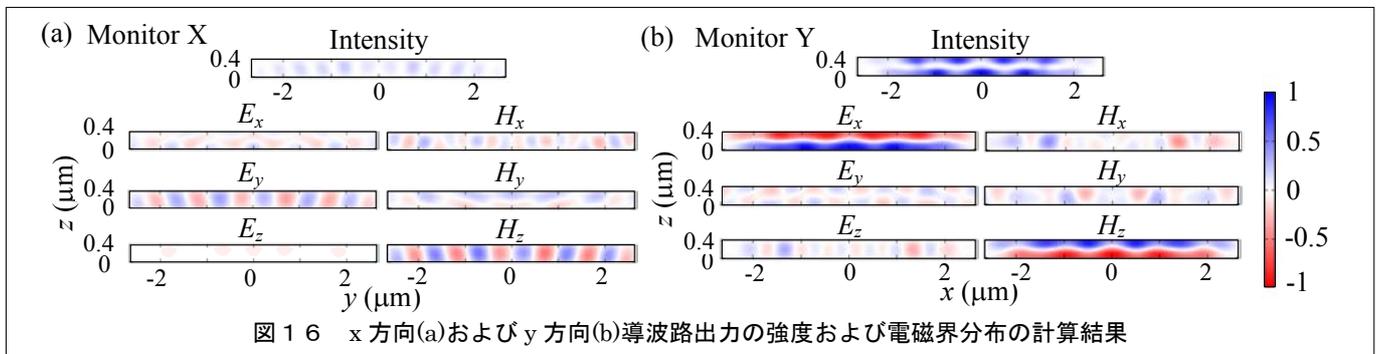


図 16 x 方向(a)および y 方向(b)導波路出力の強度および電磁界分布の計算結果

省電力高次機能半導体レーザーの研究

Study of low-power-consumption highly functional semiconductor lasers

参考文献

- [1] H. Kawaguchi, "Bistable laser diodes and their applications: state of the art," *IEEE J. Selected Topics in Quantum Electronics*, Vol.3, No. 5, (1997) 1254.
- [2] H. Kawaguchi, "Polarization bistable vertical-cavity surface-emitting lasers - application for bit memory," *Opto-electronics Review*, Vol. 17, No. 4, (2009) 265.
- [3] 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 (2006) 894.
- [4] T. Katayama, T. Okamoto, and H. Kawaguchi, "All-optical header recognition and packet switching using polarization bistable VCSEL," *IEEE Photon. Tech. Lett.*, Vol.25, No. 9 (2013) 802.
- [5] T. Katayama, T. Okamoto, and H. Kawaguchi, "Optical Packet Switching by All-Optical Header Recognition Using 1.55- μ m Polarization Bistable VCSEL," *The European Conference on Lasers and Electro-Optics and the International Quantum Electronics Conference (CLEO/Europe-IQEC 2013)*, CI-5.1 (2013).
- [6] T. Mori, Y. Sato, and H. Kawaguchi, "10-Gbps optical buffer memory using a polarization bistable VCSEL," *IEICE Trans. Electron.*, Vol. E92-C, No. 7 (2009) 957.
- [7] J. Sakaguchi, T. Katayama, and H. Kawaguchi, "All-optical memory operation of 980-nm polarization bistable VCSEL for 20-Gb/s PRBS RZ and 40-Gb/s NRZ data signals," *Optics Express*, Vol.18, No.12 (2010) 12362.
- [8] J. Sakaguchi, T. Katayama, and H. Kawaguchi, "High Switching-Speed Operation of Optical Memory Based on Polarization Bistable Vertical-Cavity Surface-Emitting Laser," *IEEE J. Quantum Electron.*, Vol. 46, No.11 (2010) 1526.
- [9] T. Katayama, Y. Sato, T. Mori, and H. Kawaguchi, "Polarization bistable characteristics of 1.55 μ m vertical-cavity surface-emitting lasers," *Japanese J. Appl. Phys.*, Vol. 46, No. 49 (2007) 1231.
- [10] T. Katayama, T. Kitazawa, and H. Kawaguchi : *Technical Digest of Conference on Lasers and Electro-Optics/Quantum Electronics and Laser Science Conference (CLEO/QELS 2008) CME5 (2008)*.
- [11] T. Katayama, T. Ooi, and H. Kawaguchi, "Optical buffer memory with shift register function using 1.55- μ m polarization bistable VCSELs," *The 21st Annual Meeting of the IEEE Lasers & Electro-Optics Society (LEOS 2008)*, ThG1 (2008) 739.
- [12] H. Kawaguchi, "All-Optical flip-flop operation in polarization bistable VCSELs and its application for photonic buffer memory," *Technical Digest of 2009 IEEE/LEOS Winter Meeting*, TuB2.4 (2009).
- [13] T. Katayama, T. Ooi, and H. Kawaguchi, "Experimental demonstration of multi-bit optical buffer memory using 1.55- μ m polarization bistable vertical-cavity surface-emitting lasers," *IEEE J. Quantum Electron.*, Vol. 45, No. 11 (2009) 1495.
- [14] T. Katayama, T. Ooi, and H. Kawaguchi, "4-bit all-optical buffer memory with shift register function using polarization bistable VCSELs," *Technical Digest of OFC 2009*, JThA33 (2009).
- [15] T. Katayama, A. Yanai, K. Yukawa, S. Hattori, K. Ikeda, S. Koh, and H. Kawaguchi, "All-optical flip-flop operation at 1-mA bias current in polarization bistable vertical-cavity surface-emitting lasers with an oxide confinement structure," *IEEE Photon. Tech. Lett.*, Vol. 23, No. 23 (2011) 1811.

省電力高次機能半導体レーザーの研究

Study of low-power-consumption highly functional semiconductor lasers

- [16] 片山健夫, 河口仁司、「酸化狭帯偏光双安定 VCSEL を用いた全光フリップ・フロップのサブ mA 動作」、2011 年電子情報通信学会ソサイエティ大会エレクトロニクス講演論文集 1, C-4-2 (2011) 217.
- [17] K. Ikeda, Y. Fainman, K. A. Shore, and H. Kawaguchi, “Modified long-range surface plasmon polariton modes for laser nanoresonators,” J. Appl. Phys., Vol. 110, No. 6 (2011) 063106-1.
- [18] K. Ikeda and H. Kawaguchi, “Metaric nanowire lasers,” J. Opt. Soc. Am. B., Vol.30, No.7 (2013) 1981.
- [19] K. Ikeda, K. Takeuchi, K. Takayose, I-S. Chung, J. Mørk, and H. Kawaguchi, “Polarization-independent high-index contrast grating and its fabrication tolerances,” Applied Optics, Vol. 52, No. 5 (2013) 1049.
- [20] 常深義博、池田和浩、河口仁司、「偏光無依存 HCG を用いた光導波路結合型 HCG-VCSEL の光出力特性の解析」、2013 年（平成 25 年）春季、第 60 回応用物理学関係連合講演会講演予稿集、29p-B3-20, (2013) 05-092.
- [21] 常深義博、横田信英、間嶋翔太、池田和浩、片山健夫、河口仁司、「SOI 基板上 1.55 μm 帯 HCG-VCSEL の光励起レーザー発振」、2013 年電子情報通信学会ソサイエティ大会 (2013)発表予定.

この研究は、平成 20 年度 S C A T 研究助成の対象として採用され、平成 21 ~ 23 年度に実施されたものです。