22aⅧ1

(招待講演) モード同期半導体レーザーによる超高速光信号処理

Ultrafast all-optical signal processing with mode-locked diode lasers

横山弘之 栗田寿一 小倉一郎 橋本陽一 清水隆徳 (NEC光・超高周波デバイス研究所)

H. Yokoyama, H. Kurita, I. Ogura, Y. Hasimoto and T. Shimizu

Optoelectronics and Highfrequency Device Research Laboratories, NEC Corporation

1. はじめに

光通信技術の超大容量化の流れの中で、1波長あたりの情報伝送速度としては、現在10 Gb/sの光通信システムが実用化の段階に達している。Tb/sの伝送容量については、当面は現在確立された技術の延長上の路線で、1波長あたり10ないし20 Gb/sの伝送速度と波長多重方式(WDM)とで実用化が推進されていく動向である。その一方で、1波長あたりの伝送速度の一層の向上を図る努力もたゆまず続けられており、40 Gb/s、100 Gb/sという速度の光通信では、これまで超高速分光という科学分野で長年培われてきた技術であるピコ秒領域の光パルスの生成、波形制御、光検出が基本的技術として用いられようとしている。これらの機能は、半導体レーザー、光変調器、フォトダイオードなど小型かつ高信頼性の光デバイスによって担われる。また、現状~40 Gb/s程度のエレクトロニクススピードの制約を越える1波長あたりの通信速度を実現するために、光学的時間多重伝送(OTDM)やそのシステム中での全光学的な光信号処理の技術の研究も進められている。全光学的な光信号処理においては非線形光学効果が利用されるが、これまで主に用いられてきた光ファイバによる構成に代わって、最近、半導体レーザー増幅器(LDA)を用いての実用化も期待できる小型デバイス構成での技術が進展している。

以上のような技術動向を背景として、本論文では、OTDMのキーデバイスであると捕えて筆者らが研究開発を進めてきたモード同期半導体レーザー(MLLD)による、超高速光パルス発生と全光信号処理の技術について述べる。ここでいう光信号処理は光信号の識別再生(3R)やDEMUXを念頭においているが、これらの処理においては光クロック抽出と高速光ゲートが基本機能となる。MLLDが内包する非線形光学現象を適切に利用することにより、非常に簡単な構成で上記の機能が実現されることを示す。

2. 高安定コヒーレントな超高速光パルス列の発生

通常1mm以下のサイズである超小型レーザーであり、また過飽和吸収体(SA)の位置をマイクロプロセスで精密に制御可能であるという特徴を活かして、設計次第ではMLLDからTHzオーダーの超高速繰り返しパルスの光パルスを得ることもできる[1]。これは従来のレーザーでは得難い特徴といえよう。しかし、光通信应用の上では超高速繰り返しとは別の観点から厳しい条件が課せられ、実はこの要求を満たすのがはるかに難しい。これらは、電気信号との同期、余分な周波数帯域を持たないフーリエ変換限界(TFL)の時間幅の光パルス、波長制御性、そして長時間の動作安定性等である。10チャンネルの10 Gb/sからなる100 Gb/sのOTDM光伝送系を考えると、10 GHzの電気信号に同期して0.5 ps以下のジッタであり、約4 psの時間幅を持つTFL光パルスが要求される。また、ファイバ光増幅器(EDFA)の増幅帯域内(1.53 - 1.56 μm)に中心波長があり、光ファイバの群速度分散の影響の最小の波長を利用しようとするれば波長選択可能であることも必要である。

以上の機能を実現するために、電気的に制御可能な半導体導波路過飽和吸収体(SWSA)のみならず、分布帰還型反射器や吸収型変調器、また位相調整領域などをモノリシックに集積したMLLDの開発が進められている[2,3]、現状では要求性能をすべて満たす動作はまだ実現されていない。筆者らは外部共振器構成のMLLDの開発を進めてきたが、最近、100 Gb/sのOTDMの要求に合致する動作特性を、小型堅牢なモジュール(PhotoOscillator)によって得ることができた。図1にPhotoOscillator本体の外観を示す。PhotoOscillator内のMLLDチップはSWSA領域と利得領域からなる2電極型の量子井戸LDであるが、SWSA領域には逆バイアスを印可するとともにシンセサイザからのマイクロ波を重畳してハイブリッドモード同期動作させる。図2に、PhotoOscillatorのハイブリッドモード同期動作時のSHG相関波形と、低ジッタ性を反映して急峻化したマイクロ波スペクトルを示す。SHG相関波形ではMLLD素子の反射防止膜(ARコート)の残留反射に起因する数%程度の強度のサブパルス成分が見られるが、この成分はPhotoOscillatorからの光パルスを外部のSWSA素子を通過させるという手段により抑制することができる[4](SWSAについては3-2を参照)。

図1. 外部共振器型モード同期半導体レーザーモジュールPhotoOscillatorの外観。

図2. ハイブリッドモード同期動作時のPhotoOscillatorの光パルス出力のSHG相関波形 (a)、マイクロ波スペクトル (b)。

3. 全光信号処理への応用

ここで述べる全光処理は、エレクトロニクスでは実現困難な速度の処理を一部光学的に処理して次段のエレクトロニクスの処理に受け渡す、もしくはエレクトロニクスの手法では複雑な構成にならざるを得ないが光学的な手法で大幅に簡単化できる等のメリットが得られるような、OTDM方式において新たに必要になる限定された処理を意味する。例えば100 Gb/sのOTDMでは、伝送の中継における光3 Rや、受信端で100 Gb/sから10 Gb/sの速度にdemultiplex (DEMUX) する機能が必要である。この光3 R、DEMUXいずれにおいても、構成要素となる機能は光クロック抽出と光ゲートに集約することができる [5]。以下では、この2つの機能がMLLDデバイスを利用して実現可能であることを示す。

3-1 超高速光クロック抽出

受動モード同期状態のMLLDに外部からこれとほぼ同じ基本周波数（あるいはその整数分の1の周波数）を持ったパルス列を入射すると全光クロック抽出を行うことができる。これは、注入する光パルスに同期してMLLDの光パルス生成のタイミングが安定化される注入同期現象を応用している [6]。

超高速の光データ列は、上述したPhotoOscillatorからの10 GHzの周波数の光パルスを光変調器でデータ変調した後に、平面型光回路 (PLC) でmultiplex (MUX) することによって得ている。光クロック抽出に用いたMLLDはSWSA領域とゲイン領域を有する2電極型モノリシックデバイスである。MUX後の光データ列の新たなクロック周波数とほぼ同じ繰り返し周波数のMLLDに光データ列を注入すると、同期した光クロックパルス列を得ることができる [5]。この同一レートでの光クロック抽出は光3 R処理のために必要である。一方、受信端での光DEMUXでは、MUXされた光データ列からもとの10 GHzの光クロックを再生しなければならない。この分周光クロック抽出は、最初の基本周波数である10 GHz動作のMLLDを用いることで実現できることが確認された。この全光クロック抽出では、-18 dBmの光データの入射パワーで0.1 ps以下の非常に小さな過剰タイミングジッタの動作が観測されている。すなわち、これまで複雑な光PLL回路等によって行っていたクロック抽出方式を、MLLDデバイス1個による極めて簡単な構成の本方式で置き換え得ると考えられる。光データのレートについても、200 Gb/sまでの光データパルス列を用いて、10 GHzへの分周クロックの抽出に成功している [7]。

図3. 両面ARコートを行ったMLLD内のSA領域の吸収回復時間のポンプ・プローブ法による測定結果。

図4. 分周光クロック抽出とSWSA光ゲートを組み合わせた全光DEMUXの構成。

3-2 超高速光ゲート動作

OTDMでの利用を意図した光ゲートは、最近では、光ファイバの非線形光学効果を用いた干渉計型のものからLDA中の非線形光学効果を利用する干渉計構造によるものに研究の重点が移ってきた。LDA中の非線形光学効果は、周波数差の大きい場合の四光波混合ではサブピコ秒キャリアのバンド内緩和の寄与が大きいのでTHzの応答帯域を有するが、光ゲートの多くではサブナノ秒応答のキャリアのバンド間遷移による利得・吸収の変化、およびそれと結びついた屈折率変化が利用される。後者では、最大繰り返し動作周波数は数十GHz程度に制限される。しかし、100 GHz程度の超高速光クロックをゲート入力として動作する、あるいは逆に100 Gb/sの光データをゲート入力として動作する光ゲートの機能を実現するには、>100 GHzの帯域を有する超高速応答の現象を利用することが必要である。しかも、光3Rへの応用までを考えた場合には、波長シフトの生じないことも要求される。以上のような観点から、筆者らは、MLLDの構成要素でもあり、光強度に依存する非線形な透過特性を有するSWSAに着目して、これを光ゲートとして利用する可能性について検討を進めた。MLLDの受動モード同期を担うSAについては、現在では、LDの電極を2つ以上に分離し、1つの電極より低電流注入や逆バイアス印可を行うことでSWSAとしての機能を得ることができる。しかしながら、このようなSWSAの挙動については、いくつかの実験報告があるものの依然不明な点が多かったため、筆者らは、その光学応答特性を詳細に調べた。評価にあたっては、10 GHzのMLLDの動作における光パルス条件を念頭において、主に100 μm長のSWSAを対象としたが、-2 V程度の逆バイアス時に、<1 pJの飽和光エネルギーと<8 psの吸収回復時間を有することがわかった [5]。図3は、吸収の回復時間を2 ps幅の光パルスを用いてポンプ・プローブ法で測定した結果を示している。この高速な吸収回復は、光励起されたキャリアが活性層から引き抜かれデバイス内部の容量に移動する時間で決まっており、バイアス回路等の電気的な時定数では直接には制限されないことによる。この動作の評価結果により、MLLD内に含まれるSWSAが1 pJ程度の光パルス入力でゲート動作可能な高速光ゲートとして機能し得ることが示された。

3-4 全光DEMUX処理

MLLDに内在するSWSAの光ゲートの機能を利用した光信号処理として、3-2で述べたMLLDの光クロック抽出機能と組み合わせて、図4に示す構成で、40 Gb/sの時間多重信号から10 Gb/sの信号を抜き出す全光DEMUXを試みた [5]。

ここでは、SWSA素子としては、両端面にARコートを施した200 μm長のSA領域を有するMLLDを用いた。まず、40 Gb/sの光データ列を10 GHz動作のMLLDに注入してデータ列に同期した10 GHzの光クロックを抽出し、これを光ゲート素子の利得領域側から注入してSWSAの吸収を飽和させ、このSWSA側から入射した40 Gb/sの光データ列から、光クロックに同期した10 Gb/sの光データ列を透過させる。図5は、40 Gb/sの光データ列 (a)、抽出された10 GHz光クロック (b)、およびDEMUX処理で得られた10 Gb/sの光データ列 (c)のサンプリングオシロスコープ波形であり、200 μm長のSWSAによって消光比10の良好なDEMUX動作が実現されたことを示している。

レーザー学会学術講演会第18回年次大会

図5. 図4の構成による全光DEMUX動作の結果を示すサンプリングオシロスコープ波形. 40 Gb/sの光データ列 (a)、分周全光クロック抽出によって得られた10 GHz光クロックパルス列 (b)、およびSA光ゲートでDEMUXされた10 Gb/sの光データ列 (c).

5. おわりに ー超100 Gb/s OTDMデバイスの今後の展望ー

以上、超100 Gb/s OTDM技術のキーとなる光機能デバイスの実現を目指して、MLLDデバイスをベースにして、本来の超高速光源としての機能だけでなく、光クロック抽出および光ゲートという基本的な光信号処理機能をも実現できることを示した。

今後の技術的課題として、まず光源としては、実用化という点でやはり外部共振器型からさらに進んで集積モノリシック型デバイスの早期実現が望まれる。次に、光クロック抽出では、分周クロック抽出の際に同期するチャンネルを確定してクロックのタイミング飛びが決して生じないようにする安定化機構を設けなければならない。また、光ゲートとしてのSWSCは、100 Gb/sの速度のDEMUXのみならず光3 Rに対応するには、一層の高速化と同時に低エネルギー動作化が必要である。ただし、光3 RでなくDEMUXへの応用では、光データ列からの波長シフトが許容され、さらに動作速度も10 GHzでよいために、用いるデバイスや原理などSWSAの機能には限定されず多くのバリエーションが考えられる。実際、図4と同様の全光学的構成で、SWSAを利得領域に反転させた上でLDA中の四光波混合を利用して>100 Gb/sの光データ列のDEMUXに成功し、エラーフリー動作も確認された [7]

このような、超高速の新しい光機能デバイスの基礎技術の研究を進めていくことで、単にOTDM方式に留まらず、ソリトン方式やWDM方式にも適用できる新規なデバイス・技術も派生するものと期待している。

謝辞

MLLD製作技術に関してご支援いただいた山口昌幸、佐々木達也、山田博仁、佐々木善浩の各氏、また、日頃ご討論いただく小川正毅、水戸郁夫、笠原健一の各氏（以上NEC）に感謝する。また、MLLDのシステム応用の視点から多くのご討論とご支援をいただく北山研一氏（CRL）に感謝する。

参考文献

1. T. Shimizu, I. Ogura, and H. Yokoyama, Electron. Lett., vol. 33, p. 1868, 1997.
2. S. Arahira et al., IEEE Photon. Tech. Lett., vol. 5, p. 1362, 1993.
3. K. Sato et al., Appl. Phys. Lett., vol. 65, p. 1, 1994.
4. Y. Hashimoto, H. Kurita, and H. Yokoyama, submitted to CPT'98, Tokyo, Jan. 1998.
5. H. Kurita, I. Ogura, and H. Yokoyama, accepted for the publication in the IEICE Transaction (Feb. 1998 issue).
6. H. Yokoyama et al., Opt. Rev., vol. 2, p. 85, 1995.
7. H. Kurita, Y. Hashimoto, and H. Yokoyama, submitted to CPT'98, Tokyo, Jan. 1998.