半導体光増幅器の相互利得変調を用いた波長変換

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
(〒226-8503 神奈川県横浜市緑区長津田4259)

Wavelength Conversion Based on Cross-Gain Modulation in a Semiconductor Optical Amplifier

Hiroyuki UENOHARA

Microsystem Research Center, P&I Lab., Tokyo Institute of Technology,
4259 Nagatsuta, Midori-ku, Yokohama, Kanagawa 226-8503

(Received February 23, 2004)

All-optical wavelength conversion based on cross-gain modulation (XGM) using semiconductor optical amplifiers (SOA's) is attractive because of its high-speed, simple configuration, wide operation wavelength range, and large optical gain capability. In this paper, first, operation principle of XGM and the wavelength conversion performance are described analytically and experimentally. It is pointed out that the dominant factor for operation speed is carrier recovery time when the input signal turns from 1 level to 0 level. Next, the investigation of optimized condition for XGM in terms of power penalty are explained. The optimized condition for minimizing the power penalty results from the degradation of the extinction ratio at small signal power and the slow carrier recovery time at high signal power. Then, application to an all-optical regeneration system using XGM is presented. The improvement of received power is realized by a cross-gain modulation-type wavelength converter-cascaded optical regenerator (CGCOR).

Key Words: Cross-gain modulation, All-optical wavelength conversion, Semiconductor optical amplifier, Optical regeneration

1. はじめに

近年のインターネットの急激な成長を反映してIP系トラフィックは年率2倍程度で増加しており、高効率なデータ転送を低消費電力・小型なデバイスで実現することが求められている。これまで波長分割多重(Wavelength division multiplexing, WDM)と1波あたり的高速化による大容量化が進められてきた。また都市内・企業内に代表されるメトロ系ネットワークを中心に、より転送効率の高いトポロジを目的としてメッシュ状のネットワークへと変遷し始めている。ノードに集中するデータの各パスに異なる波長を割り当て、ノードにおいて波長を変換することによりパスを接続していく方法を採用すると、同じ出力ポートあるいはファイバに出力されるデータの競合を避けることができ高効率なデータ転送が可能となる。この場合、ノード内で各波長信号に分離(DEMUX)し、波長を変換した後に波長多重して伝送する必要がある。またノードを何段階かホップして目的地に到達することを考えると、強度ゆらぎや時間ジッタの累積が信号品質に深刻な影響を与えるためノード内での信号再生機能は必須であ

る。

従来は以上の機能を光/電気(O/E)変換-電子回路-電気/光(E/O)変換の構成で実現してきた。電子回路は集積化による高機能化・小型化が可能であり、またメモリや演算が得意であるなど機能性に富むため、信号再生のような複雑な機能を担ってきた。しかしながら、伝送速度は10 Gbpsに達し、更に40 Gbpsへ的高速化も間近となっている。WDMの波長数も200波近いシステムが商用化されている。従って今後のシステムとしては1ノード内で膨大な波長数の信号を一旦DEMUXし、1波長信号ごとに電子回路で信号再生した後に再びMUXする能力が求められる。電子回路は高速化とともに消費電力が増大するため、高速・小型な装置を実現することに対して限界が指摘され始めている。このため今後の高速・大容量化の段階でも低消費電力動作・小型化が可能なデバイスが求められている。全光波長変換技術はその実現を目的としており、またその技術を用いた全光信号再生技術の実現はシステムの発展に大いに寄与すると期待される。

我々はその1技術である半導体光増幅器(Semiconductor optical amplifier, SOA)の相互利得変調(Cross-gain

modulation, XGM)による波長変換動作に着目し、検討を行ってきた。本論文ではその特徴を解説し、我々の研究を中心に波長変換特性の現状レベルと今後の展望について論じたい。

2. 相互利得変調(XGM)波長変換技術の特徴

全光波長変換技術の研究の歴史は古く、1980年代から提案・動作検討が行われてきた。Table 1にその主な技術と特徴を示す。光デバイスとしてはSOA¹⁻¹²⁾、電界吸収型光変調器(Electroabsorption modulator, EAM)¹³⁻¹⁵⁾、半導体レーザー¹⁶⁾、電気光学結晶(代表例としてはLiNbO₃)^{17,18)}、光ファイバ¹⁹⁻²³⁾が代表的である。速度、サイズ、波長変換効率の観点から比較すると、光ファイバは高速であるが非線形定数が小さいためにkmオーダのサイズが必要(ただし近年、高非線形性の光ファイバが開発されており、使用用途によっては可能性が広がると考えられる)である。電気光学結晶は光ファイバよりも非線形定数が大きく、数mm程度のサイズで波長変換が可能であり、多波長一括変換、低チャープ特性が特徴である。しかしながら半導体と比較すると効率が低いため、励起光パワーとして100 mWを超える高パワーが必要である。一方、半導体は高速・高効率波長変換特性、1 mm以下の小型化の面から材料として非常に有望である。デバイスとしても多種多様なものが取り組まれてきた。EAMでは80 Gbpsの高速波長変換が報告され、ASE雑音の影響が無視できる特徴があるが、原理的に挿入損失が発生する点が課題である。また半導体レーザーを基本とした波長変換は、利得があるものの速度が緩和振動周波数に律則され、数Gbps程度が限界である。また共振波長に依存した波長依存性があり、システム応用にとっては障害となる。これらに対してSOAは100 Gbps程度の高速度性、高利得、高変換効率などのメリットがあり、全光波長変換デバイスとして最有力候補の一つとして挙げられよう。更にSOAの波長変換技術としてXGM¹⁻³⁾、相互位相変調(Cross-phase modulation, XPM)⁴⁻⁹⁾、4光波混合(Four-wave mixing, FWM)¹⁰⁻¹²⁾が検討されている。FWMは高速性に優れるが波長依存性や偏波依存性があり、量子ドットを利用した改善など今後の特性向上が待たれる。高速性の観点からはXPMが現状では最高性能を示しており、160 Gbpsでの動作、光再生(光

3R)システムへの応用など幅広く検討されている。ただしマッハ・ツェンダー型干渉計などを利用するため構成が複雑であり、また入力光に対するダイナミックレンジが狭いという課題がある。XGMは消光比が小さいという課題があるもののSOAに対して信号光とCWプローブ光を入力するだけであり簡易な構成で実現できる。またXPMと比較して入力ダイナミックレンジが大きいという特徴を有している²⁴⁾。

以上から、我々は全光波長変換としてSOAのXGMを選択し、その基本的動作と光3Rシステムへの応用を検討してきた^{25,26)}。以下、その内容について解説していく。

3. XGM波長変換の動作原理

最初にSOAのXGM波長変換動作の原理を説明する。Fig. 1にその概要を示す。前述のようにXGMは1個のSOAに信号光とCWプローブ光を入力するだけで実現できる。CWプローブ光は信号光の入力が無い場合にはSOAに常に一定パワーで入力されるため、主にSOAのバイアス電流と共振器長で決まる利得を受けて増幅され、一定パワーの出力光として出射される。この時、誘導放出によってキャリア密度が減少するため、CWプローブ光はSOA内のキャリア密度の定常値を決めるとも言える。この状態でランダム信号系列を持つ信号光を入力すると、SOA内で増幅される過程で誘導放出によるキャリア密度の低減を引き起こし、CWプローブ光に対する利得を減少させる、いわゆる利得飽和現象を引き起こす。すなわち信号光はCWプローブ光の利得を変調する効果を持つ。以上の現象によって信号光のビット系列はCWプローブ光に波長変換される。ただし原理的に信号光の強度の強弱が反転される点に注意を要する。Fig. 1のように入力光とプローブ光を同方向から入力する場合には、出力部でプローブ光波長を信号光と波長フィルタで分離する必要があるため、波長フィルタで分離可能な離調が必要となる波長上の制約がある。ただしプローブ光を信号光と逆方向に入力し、SOAの入力部にサーキュレータを設置すれば同一波長での波長変換も可能となる。この場合、動作速度などの特性は同方向・逆方向入射条件で異なることが報告されており注意を要する¹⁾。

Table 1 Several wavelength conversion techniques and their features.

Device	Semiconductor Optical Amplifier			EA modulator	Electro-Optic Crystal	Optical Fiber
Physical Phenomenon	XGM	XPM	FWM	XPM	Second-order optical nonlinearity	FWM SPM
Material	InGaAsP bulk MQW	InGaAsP bulk MQW	InGaAsP bulk MQW QD	InGaAsP bulk MQW	PPLN	DSF HNLF
Speed (Reported)	100Gbps	336Gbps	1Tbps	80Gbps	~1Tbps	~1Tbps
Extinction Ratio	10dB	25dB	25dB	>10dB	25dB	25dB
Light Power (Typical)	Signal: Probe: 10~400m	Signal: Probe: 10~400m	Signal: 20~400m Probe: 200m	Signal: 150m Probe: 100m	Signal: 100m Probe: 100m	Signal: 200m (SPM case)
Size (Typical)	1mm	1mm	1mm	100mm	50mm	~1km

Fig. 1 Operation principle of cross-gain modulation (XGM) based wavelength conversion.

4. XGM波長変換動作特性

動作原理で述べたように、

- ・CWプローブ光はSOA内のキャリア密度の定常値を決定する

- ・信号光によるキャリア密度変調によってプローブ光に波長変換される

ことから、XGM波長変換の速度・消光比・波長変換光品質は信号光・プローブ光それぞれの波長・パワーに依存する。従って最適条件を把握することは重要である。本論文では解析的・実験的検証からその点について述べた。

Fig. 2にXGMの構成系を示す。信号光とプローブ光は同方向入射条件とした。信号光はNRZ(Non Return to Zero), RZ(Return to Zero)の両方を対象とし、信号の帯域と波形の影響を考慮できるようにした。

速度10 Gbps, $2^{31}-1$ NRZ PRBS信号のXGM波長変換波形をFig. 3に示す。信号光の波長は1555 nmであり、プローブ光波長を1535~1562 nmの27 nmの範囲で変化させた。信号光の平均パワーは-3.0 dBm, プローブ光パワーはいずれの波長においても+3.0 dBmである。使用したSOAは共振器長900 μm , 駆動電流300 mAにおける飽和光出力+10 dBm, ファイバーファイバ間利得は最大で25 dBの特性を示す。図からわかるように、速度10 Gbpsにおいて波長範

Fig. 2 Configuration of XGM wavelength conversion.

Fig. 3 Waveforms of input signal and wavelength conversion signals.

囲27 nmにわたって明瞭なアイ開口が得られている。SOAは半導体共振器の両端面に無反射コーティングを施し、高注入電流動作時におけるレーザー発振動作を抑制すると同時にファブリ・ペロー共振による波長依存性を低減する工夫を施している。XGMの動作波長範囲も同様の効果により、広帯域動作が可能となっている。

ただし同図より別の特徴を見出すことができる。XGM波長変換波形は元の信号光と比べてアイ開口が狭い。これは0レベルから1レベルへの遷移時間が長いめに起きていると考えられる。XGMの動作原理は、前節で述べたようにCWプローブ光の利得の信号光による変調である。信号光が入力される(0レベルから1レベルへの変化)状態では誘導放出が主要因であり、50 ps以下の速度で利得変化が生ずる。一方、信号光が入力されない(1レベルから0レベルへの変化)状態ではキャリア密度が自発的に元のレベルに回復する現象が支配的になり、100 ps程度の緩和過程の影響を受ける。そのため、XGM動作を40 Gbps以上に高速化するためには、キャリア回復時間の高速化が不可欠である。その手段として、バイアス電流の増加(電流密度30 kA/cm^2 程度)や長共振器化(1000 μm 以上)による誘導放出の増強が一般的に採られる手法であるが、素子内部の発熱や作製上の限界がある。その克服手段として利得スペクトルの短波長側(利得と吸収の境界に相当する波長付近)の光を第3の入力光(アシスト光)として導入する方法が解析的・実験的に検討され、高速化の効果と最適なアシスト光波長条件が検討されている。この手法は、キャリア密度の回復過程においてアシスト光波長を吸収領域に設定することにより、アシスト光自体の吸収によるキャリア密度増加の効果を狙ったものである。その詳細については参考文献を参照されたい²⁸⁻³⁰⁾。

また波長変換光の品質としては消光比も重要なファクターである。動作原理からわかるようにXGMは信号光によるプローブ光波長の利得の変調により生じるが、完全に利得をなくすだけの大きなキャリア密度変調を起こすのは難しく、波長変換光の0レベル(信号光は1レベル入射)にCW成分が残る。そのため消光比としては10 dB程度の報告が多い。また、プローブ光波長依存性を考えてみると、そのときの特性はSOA内部の利得スペクトルの変化に影響される。半導体の利得はキャリア密度の増加にともなって増大するが、同時にキャリア密度分布が高エネルギー側にシフトするため利得ピーク波長は短波長側にシフトする傾向を持つ。XGMでは信号光入射による誘導放出にともないキャリア密度が減少するため、上述とは逆に利得ピーク波長は長波長側にシフトする。従って利得の変化量いわゆる微分利得は短波長側では大きく、長波長側で小さくなる。そのため消光比は短波長側で大きく、長波長側で小さくなる。報告例としては20 nmの波長の違いに対して消光比は2~4 dBの差が生じる²⁾。従って実用上は消光比および波長依存性を低減するための検討が今後必要になると考えられる。

以上論じてきたXGM動作の特徴の理解を深めるため、式(1)(2)のレート方程式をトランスファー・マトリクス法³¹⁾により解析を行い、キャリア密度と波長変換光の時

間変化を求めた.

$$\frac{\partial A(z,t)}{\partial t} + \frac{1}{v_g} \cdot \frac{\partial A(z,t)}{\partial t} = -\frac{j}{2} \alpha \cdot \Gamma \cdot g_m \cdot A(z,t) + \frac{1}{2} \cdot g_m \cdot A(z,t) \quad (1)$$

$$\frac{dN}{dt} = \frac{I}{qV} - N(c_1 + c_2 N + c_3 N^2) - \sum v_g \cdot g_m \cdot S \quad (2)$$

ここで、 $A(z,t)$ は光電界、 v_g は光の群速度、 α は線幅増大係数、 Γ は光閉じ込め係数、 g_m は材料利得、 N はキャリア密度、 q は電荷素量、 V は活性層体積、 c_1 、 c_2 、 c_3 はキャリア寿命とキャリア密度を関係付ける再結合係数、 S はフォトン密度である．式(1)はSOA共振器方向に進行する信号光電界の増幅と位相変化を表し、式(2)は誘導放出とキャリア再結合過程、外部注入電流によるキャリア密度変化を表現している．

Fig. 4(a)～(c)はNRZ、RZそれぞれの信号波形、波長変換光波形、キャリア密度の解析結果を示したものである²⁷⁾．太線がNRZ、細線がRZを表す．速度はいずれも10 Gbpsとした．同図(a)と(b)を比較すると、波長変換光の波形は信号光と0レベル、1レベルが反転している様子がわかる．同図(c)のキャリア密度の結果からは、信号光の1レベルが連続している場合と、1レベルと0レベルが交互に続く場合とでは内部のキャリア密度の水準に差が生じることを示している．特に信号光が1レベルから0レベルに遷移してキャリア密度が高い水準に戻る過程には緩や

Fig. 4 Simulation results of XGM wavelength conversion. (a) Input signal. (b) Wavelength conversion signal. (c) Carrier density in a SOA. In each figure, bold line indicates NRZ format, and thin line indicates RZ format.

かな過程が含まれるため、同図(b)の波長変換光波形も緩やかな出力増大の傾向を示すことがわかる．この現象はいわゆるパターン効果と呼ばれ、波長変換動作の律則要因となる．またNRZとRZを比較すると、RZは1レベルの連続するビット系列であっても必ずタイムスロット内で0レベルに戻る．そのためキャリア密度の変動はNRZほど大きくないという状況も起こりえる．RZはNRZよりも広い信号帯域を持ち波長変換動作の速度としては厳しいと考えられるため、一見相反する現象に思われるが、SOAのキャリア密度がある程度追従する速度範囲内で起こる現象であると考えられる．

以上から、信号光に対するキャリア密度変動が信号品質に影響することがわかる．

次に実験的にXGM動作の最適条件を検討した結果について述べる．実験では、SOAはバルク活性層の共振器長900 μm のものを用い、バイアス電流300 mAに設定した．信号光は波長可変レーザーの出力光をLiNbO₃変調器で10 Gbps、2³¹-1 PRBS信号に変調して生成した．変調フォーマットとしてはNRZとRZの2種類とし、ビット誤り率(Bit error rate, BER)の測定により特性の比較ができるようにした．

Fig. 5にBERのパワー・ペナルティの信号光パワー依存性を示す²⁷⁾．ここでパワー・ペナルティとは、BER=10⁻⁹となる信号光の受信感度を基準としたときの、波長変換光の受信感度の差と定義している．NRZ、RZともパワー・ペナルティを最小にする信号光パワーが存在する．この原因は低パワー側と高パワー側に分けて説明することができる．低パワーの信号光では、誘導放出によるキャリア密度変調効果が大きくできないため、出力光の消光比が小さい．特に0レベルに大きなCW成分が存在するため、受信感度の劣化の原因となる．信号光パワーの増大とともに消光比が向上し、パワー・ペナルティが小さくなる．しかしながら高パワーになりすぎるとキャリア密度の変化が大きくなり、その周波数特性に動作が律則されるようになる．その様子を示したのがFig. 6であ

Fig. 5 Dependence of power penalty on signal light power. In each figure, solid line indicates RZ format, and dotted line indicates NRZ format.

Fig. 6 Dependence of rise and fall time on signal light power. In each figure, solid line indicates RZ format, and dotted line indicates NRZ format.

る。波長変換光の立ち上がり時間(低パワーから高パワーへの遷移時間、信号光にとっては状態'1'から'0'への変化に相当する)・立ち下がり時間(立ち上がり時間と逆の過程)の信号光パワー依存性を示したものであるが、立ち下がり時間はパワーの増加とともに誘導放出効果が大きくなるため、減少する。一方、立ち上がり時間は信号光パワーの増大とともに増加する傾向を示し、前述の内容を実証している。以上のことから信号光に対する最適値の存在が説明できる。

同様にプローブ光パワーに対してもパワー・ペナルティを最小にする条件が観察されている。前述の通りプローブ光はSOA内のキャリア密度の定常値を決定し、高プローブ光では大きな誘導放出効果によってキャリア密度は小さくなる。そのため信号光に対するキャリア密度変化量は少なくなり、動作速度は高速化するが、消光比は小さくなる。この傾向は信号光に対する依存性と逆の特徴を有する。

以上から、システムへの応用上は動作信号光範囲を勘案し、パワー・ペナルティの最小値を与えるプローブ光パワーを選択することが必要である。

5. XGM波長変換の全光信号再生への応用

波長変換器を用いた全光信号再生技術の研究が近年、その完成度の向上から熱を帯びてきている。特に前述のようにXPMを原理に用いた対称マッハ・ツェンダー型差動遅延システムは、SOA内のキャリア密度回復の遅い緩和過程を位相干渉によってキャンセルし、160 Gbps程度の高速な波長変換と320 Gbpsでの時分割多重データのDEMUX動作が報告されている^{4,5)}。ただし入力光パワーのダイナミックレンジを拡大することが課題として残されている。我々はこの課題克服のため、光入出力特性にしきい値性のようなS字状の非線形性を有する光デバイスの検討を行っている。このような特性を活用すると、入力信号光の低パワー・高パワーの領域において強度ゆらぎ(雑音成分)を抑圧し、また入力光パワーが増加した場合にも雑

音抑制効果を維持できることが期待できる。しかし単体のSOAでは線形動作・非線形動作領域ともにS字状の入出力特性を持たないため、従来にはない工夫が必要である。

ここでXGMの入出力特性を考えてみよう。信号光パワーの増加にともないSOA内のキャリア密度が誘導放出によって減少するため、波長変換光のパワーは減少する。ただし誘導放出によって減少できるキャリア密度には限りがあるので、この程度は次第に緩やかになる。入出力特性の曲線としては双曲線状となる。今、この特性を2段カスケード接続すると、S字状の特性が実現できることがわかる。その原理を説明したのがFig.7である。この図では理解を助けるために1段の入出力特性を極端に表現し、入力信号光が低パワーの領域で線形に出力光パワーが減少し、あるパワーを境に変化しない特性として表している。信号光が低パワーの領域[1]では1段目の波長変換器で出力が減少する。この出力光パワーが2段目波長変換器の飽和領域であると、システムとしては入力光パワーの変動に対して出力光が変化しない特性となる。入力光がより大きな領域[2]においては、1段目波長変換器の出力光パワーが2段目波長変換器の出力光パワー変化の領域に相当し、入力光パワーの増加に対応して出力光パワーも増加する。入力光の高パワーの領域[3]では1段目波長変換器において出力光パワー変動が抑圧されるため、全体としての出力光パワー変動も抑圧される。従ってXGMカスケード型システムは入出力特性にS字状の特性を有することがわかる。われわれはこのシステムをCross-gain modulation-type wavelength converter-cascaded optical regenerator (CGCOR)と呼んでいる²⁵⁾。

この検証を目的として、Fig. 8のような測定系を構成し、入出力特性を測定した。XGM波長変換器の基本構成はFig. 2と同様であるが、1段目のSOAは共振器長1200 μm 、バイアス電流533 mA、プローブ光波長1533 nmとし、2段目のSOAは共振器長900 μm 、バイアス電流400 mA、プローブ光波長1530 nmとした。この条件は1段目での消光比をできる限り大きくし、入出力特性の非線形性が最適となるように設定したものである。

Fig.9に測定結果を示す²⁵⁾。上記の説明通りS字状の非線形特性が観測された。明確なしきい値特性には至っていないが、その理由はXGMの消光比が10 dB程度と十分に大

Fig. 7 Operation principle of a cross-gain modulation type wavelength converter cascaded optical regenerator (CGCOR).

Fig. 8 Configuration of a CGCOR.

Fig. 9 Optical input / output characteristics.

きくないこと、信号光の高パワー側でも出力光パワーが漸減する特性による。特性改善のためにはSOAの構造自体に工夫をする必要があり、今後の検討課題と考えている。

Fig. 9のような非線形特性が信号光の品質に与える影響を検討するため、信号光に10 Gbps NRZの $2^{31}-1$ PRBSを用い、出力光のBERを測定した。Fig. 10は入力信号と出力再生光のアイパターンを示したものである。再生機能の有無を検証する目的として、信号光に意図的にEDFAのASE雑音を重畳した。その影響がFig. 10(a)のように1レベルの強度拡がりとして顕著に現れている。これに対して出力再生光はFig. 10(b)に示す通り1レベル・0レベルとも同等の強度拡がりに抑制されており、信号対雑音比が改善されている様子が伺える。

この信号再生機能を定量的に評価するため、信号光・出力光のBERの結果を比較した。Fig. 11にその結果を示す²⁵⁾。出力光は信号光に対して4.1 dBの受信感度の改善が見られた。このことから実際にXGMカスケード型システムには雑音抑制による信号対雑音比の改善効果があることが分かった。このことは相対強度雑音(Relative Intensity Noise, RIN)をRFスペクトルアナライザで測定した結果からも、1レベル・0レベルともに雑音レベルが低減していることから実証できている²⁶⁾。

ただしASEを重畳しない信号光の受信感度と比較すると3.7 dBのパワー・ペナルティが観測されており、XGM波長変換器の消光比が十分でないために発生する出力光のDC成分や変調信号入力時の時間ジッタの影響が無視できない。また詳細な検討を行っていないため本論文では触れ

Fig. 10 Eye-patterns. (a) Signal light. (b) Regenerated signal.

Fig. 11 Experimental results of bit error rate (BER).

ないが、SOA内のキャリア密度変動を積極的に活用する方式であるためチャープ特性が無視できない。ただしチャープについては波長フィルタにより一部を除去することによって改善することも検討されており、改善の余地はあると考えている。今後、各特性の改善を目指して検討を進める予定である。

6. まとめ

本論文においてSOAのXGM波長変換動作の原理と基本動作特性およびパワー・ペナルティを最小にする最適条件、全光信号再生システムへの適用可能性について、我々の取り組みを中心に述べた。XGMは10 Gbpsを超える

高速性, 30 nmにわたる波長帯域, 簡易な構成というメリットを有すると同時に, 論理レベルの反転, キャリア回復時間律則, 低消光比という欠点を併せ持つ. 技術的課題を克服するためにSOA素子レベルでの工夫が必要であると考えられ, 今後自らを含め関係者の努力に期待したい.

謝 辞

日頃研究内容に関してご議論いただく東京工業大学伊賀 健一名誉教授, 小林 功郎教授, 小山 二三夫教授, 宮本 智之助教授に感謝致します. また本研究の推進を担っていただいております博士課程武田 秀和氏に感謝致します. DFB-EAモジュールをご提供いただきました富士通研究所若尾 清秀氏(現(株)日本イー・エム・シー), LiNbO₃変調器をご提供頂きました富士通(株)箱木 浩尚氏, SOAモジュールをご提供いただきました富士通研究所森戸 健氏に深謝致します. またご支援いただきましたカシオ科学振興財団に感謝致します.

参考文献

- 1) C. Joergensen, S. L. Danielsen, K. E. Stubkjaer, M. Shilling, K. Daub, O. Doussiere, F. Po mmerau, P. B. Hansen, H. N. Poulsen, A. Kloch, M. Vaa, B. Mikkelsen, E. Lach, G. Laube, W. Idler, and K. Wunstel: IEEE J. Selected Topics in Quantum Electron. **3** (1997) 1168.
- 2) T. Durhuus, B. Mikkelsen, C. Joergensen, S. L. Danielsen, and K. E. Stubkjaer: J. Lightwave Technol. **14** (1996) 942.
- 3) A. D. Ellis, A. E. Kelly, D. Nasset, D. Pitcher, D. G. Moodie, and R. Kashyap: Electron. Lett. **34** (1998) 1958.
- 4) S. Nakamura, Y. Ueno, and K. Tajima: IEEE Photon. Technol. Lett. **13** (2001) 1091.
- 5) S. Nakamura, Y. Ueno, and K. Tajima: Proc. 2002 Optical Fiber Communication Conference (OFC2002) FD3-1 (2002).
- 6) B. Lavigne, P. Guerber, P. Brindel, E. Balmeffre, and B. Dagens: Proc. 27th European Conference on Optical Communication (ECOC2001), Amsterdam, (2001) 290.
- 7) J. Leuthold, G. Raybon, Y. Su, R. Essiambre, S. Cabot, J. Jaques, and M. Kauer: Electron. Lett. **38**, (2002) 890.
- 8) Y. Hashimoto, R. Kuribayashi, S. Nakamura, K. Tajima, and I. Ogura: Proc. 29th European Conference on Optical Communication (ECOC2003), Rimini (2003) 90.
- 9) Y. Shibata, N. Kikuchi, S. Oku, T. Ito, H. Okamoto, Y. Kawaguchi, Y. Kondo, Y. Suzuki, and Y. Tohmori: Electron. Lett. **38** (2002) 1273.
- 10) H. Kuwatsuka, H. Shoji, M. Matsuda, and H. Ishikawa: J. Quantum Electron. **33** (1997) 2002.
- 11) H. Kuwatsuka, T. Simoyama, and H. Ishikawa: J. Quantum Electron. **35** (1999) 1817.
- 12) T. Akiyama, H. Kuwatsuka, N. Hatori, Y. Nakata, H. Ebe, and M. Sugawara: IEEE Photon. Technol. Lett. **14** (2002) 1139.
- 13) N. Edagawa, M. Suzuki, and S. Yamamoto: IEICE Trans. Electron. **E81-C** (1998) 1251.
- 14) T. Otani, T. Miyazaki, and S. Yamamoto: IEEE Photon. Technol. Lett. **12** (2000) 431.
- 15) K. Nishimura, R. Inohara, M. Tsurusawa, and M. Usami: Electron. Lett. **39** (2003) 792.
- 16) H. Yasaka, H. Ishii, K. Takahata, K. Oe, Y. Yoshikuni, and H. Tsuchiya: Electron. Lett. **30** (1994) 133.
- 17) T. Sahara, and H. Nishihara: J. Quantum Electron. **26** (1990) 1265.
- 18) M. Asobe, O. Tadanaga, H. Miyazawa, and H. Suzuki: Electron. Lett. **37** (2001) 962.
- 19) K. Inoue: J. Lightwave Technol. **10** (1992) 1553.
- 20) P. V. Mamyshev: Proc. 24th European Conference on Optical Communication (ECOC1998) **1** (1998) 475.
- 21) M. Matsumoto: IEEE Photon. Technol. Lett. **14** (2002) 319.
- 22) G. Raybon, Y. Su, J. Leuthold, R. -J. Essiambre, T. Her, C. Joergensen, P. Steinvurzel, K. Dreyer, and K. Feder: Proc. 2002 Optical Fiber Communication Conference (OFC2002), FD10-1 (2002).
- 23) Y. Su, G. Raybon, R. -J. Essiambre, and T. -H. Her: IEEE Photon. Technol. Lett. **15** (2003) 350.
- 24) J. -H. Bang, S. -H. Kim, N. Kim, and W. Seo: IEEE Photon. Technol. Lett. **12** (2000) 275.
- 25) H. Takeda and H. Uenohara: Jpn. J. Appl. Phys. **42** (2003) L1446.
- 26) H. Takeda and H. Uenohara: to be published in Jpn. J. Appl. Phys. (2004).
- 27) H. Takeda, F. Kondo, and H. Uenohara: Jpn. J. Appl. Phys. **42** (2003) L252.
- 28) M. Usami, M. Tsurusawa, and Y. Matsushima: Appl. Phys. Lett. **72** (1998) 2657.
- 29) R. Inohara, K. Nishimura, M. Tsurisawa, and M. Usami: IEEE Photon. Technol. Lett. **15** (2003) 1192.
- 30) 辻 健一郎, ドウイ・チャヒョ・クンチョロ, 渡邊 拓也, 小野寺 紀明, 猿渡 正俊: 2003年信学会エレクトロニクスソサイエティ大会予稿集, C-4-49 (2003).
- 31) H. Lee, H. Yoon, Y. Kim, and J. Jeong: IEEE J. Quantum Electron. **35** (1999) 1213.

レーザーワード

相互利得変調(cross-gain modulation)

ある波長の信号を, 異なる波長に変換する波長変換技術の一種. 半導体光増幅器に電流を注入して大きな利得を発生させている状態で, ある波長のCW光(プローブ光と呼ぶ)を入力し, それとは異なる波長の信号光を同時に入力する. 信号光の増幅のために誘導放出が生じる過程で半導体光増幅器内のキャリア密度が変動し, CW光の利得が変調されるため, 信号情報がCW光に転写され波長変換出力が得られる. 構成として半導体光増幅器1個と信号光・プローブ光, 光合波器, 波長フィルタのみを必要と

するため, 容易に実現できる. また波長変換光は元の信号光に対して0・1の論理が反転するのが特徴である. 速度律則要因は半導体光増幅器のキャリア密度の回復時間であり, 一般的には100 ps以下である. 従って波長変換速度は10 Gbps程度である. 高速化の手法としては高注入電流や長共振器構造, 第3の波長のCW光(アシスト光)を用いて誘導放出を大きくし, キャリア寿命を低減することが試みられている. (植之原 裕行)