半導体光増幅器の相互利得変調を用いた タンデム波長変換型の光トライオード

前田 佳伸, 幸元 直樹

豊田工業大学 工学部先端工学基礎学科 (〒468-8511 愛知県名古屋市天白区久方2-12-1)

All-Optical Triode Based on a Tandem Wavelength Converter using Cross-Gain Modulation in Semiconductor Optical Amplifiers

Yoshinobu MAEDA and Naoki SACHIMOTO

Advanced Science and Technology Department, Toyota Technological Institute, 2-12-1 Hisakata, Tempaku, Nagoya, Aichi 468-8511

(Received October 4, 2004)

An all-optical triode based on a tandem wavelength converter was realized in reflective InGaAsP-InP semiconductor optical amplifiers using the same 1551 nm wavelength for input, control and output. The output power ranged from 0 to 2 mW when the average control power was varied from 0 to 0.3 mW. Therefore, the output-input characteristics can be changed dynamically by low control powers. The output modulation degree was retained at around 90 % over a wide control power range of 0.01 – 1 mW. The dependence of the output modulation degree on the input signal frequency indicates that the device can be operated with an input signal frequency up to 5 GHz. Because of its characteristics, this device can become a key component in future all-optical signal processing.

Key Words: Cross-gain modulation, Semiconductor optical amplifier, Optical triode, Optical signal processing

1. はじめに

近年のマルチメディア通信容量の増大・多様化と共に、基幹系からアクセス系に至るまで通信容量の拡大が必須となってきた。特に、波長分割多重(WDM)技術を利用して光ファイバの全帯域を活用するフォトニックネットワークを実現するためには、光信号を光のまま別波長の光信号に変換して信号処理する全光信号処理技術の確立が不可欠である。全光信号処理を実現するための光デバイス技術の研究は、半導体レーザーの発明を契機として始まり、電気信号処理が適応できない超高速の領域における利用を目指して長く研究が進められてきた。また、光通信以外の光エレクトロニクスの分野においても光信号で直接光信号を制御することが望まれている。しかし、エレクトロニクスにおけるトランジスタや三極管に相当する3端子の信号増幅作用を有する光デバイスが実現されていないのが最大の課題である。

一方、波長変換技術の研究の歴史も古く、1980年代から提案・動作検討が行われてきた。半導体光増幅器(Semiconductor optical amplifier, SOA)は、高速性、高利得、高変換効率などのメリットがあり、主に相互利得変調(Cross-gain modulation, XGM)¹⁾、相互位相変調(Cross-phase modulation, XPM)²⁾、4光波混合(Four-wave mixing, FWM)³⁾の3つの方式が検討されている。一般的には、

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。前報において、我々は一端が反射タイプのReflective SOA (RSOA)におけるXGMを2段用いたタンデム波長変換型の光トライオードを提案し、エレクトロニクスの三極管に相当する入出力特性が得られることを示した⁴⁾。すなわち、第1のRSOAにおいて波長 λ_1 の入力信号光の強度変化を波長 λ_2 のプローブレザー光に一度波長変換し、さらに第2のRSOAにおいて λ_2 のプローブ光に波長 λ_1 (λ_3 でもよい)の制御光を重畳することによって、微小な制御光パワーで入力光信号を増幅して λ_1 (または λ_3)の出力光を得る方式である。本方式のデメリットの一つとしては、入力光と制御光の信号の外にCWのプローブ光が必要なことであった。本研究では、このCWのプローブ光の代わりに第1のRSOAで発生する λ_1 の周囲の自然放光を利用することによってプローブ光を不要とした。したがって、信号光としては入力光および制御光のみを入力して、出力光を得る光信号の3端子増幅素子(光トライオード; Optotriode)を実現した。

2. 実験方法

Fig. 1は、光トライオードの構成図を示す。2つの一端が反射タイプのRSOAは、InGaAsP-InPリッジタイプの半導

Fig. 1 Block diagram of the optical triode. F-1 and F-2: Add/drop filter, F-3: Band pass filter.

体光増幅器を用いた、多重量子井戸で構成されたInGaAsPの活性層の中心波長は約1550 nmであり、200 mAの注入電流でファイバ端の利得で約18 dBが得られた。波長可変レーザー光源から得られた波長1551 nmのレーザー光を光変調器で強度変調し、Er添加光ファイバ増幅器(EDFA)で信号増幅した後バンド幅1 nmのフィルタを透過させて入力光とした。その入力光を第1のアド・ドロップフィルタF-1(中心波長: 1550 nm, バンド幅: 13 nm)の透過ポートから入射ポートに接続された第1の半導体光増幅器RSOA-1に入力した。RSOA-1内では1551 nmの入力光が増幅されると同時に、その周囲の自然放光はXGM効果によって入力信号に対して逆位相の強度変化をして放出される。その自然放光の内F-1フィルタによって反射された周囲光 L_s ($L_s < 1543.5$ nm, 1556.5 nm $< L_s$)は、F-1フィルタの反射ポートに出力される。その周囲光は第2のアド・ドロップフィルタF-2(中心波長: 1550 nm, バンド幅: 13 nm)の反射ポートから入射ポートに導かれ、同時に透過ポートより別の波長可変レーザー光源および変調器から得られた波長1551 nmの制御光を入力し、入射ポートから光サーキュレータを介して第2のRSOA-2に入力される。RSOA-2内では入力信号の反転した信号を有する周囲光 L_s がXGM効果を生じさせる。そのRSOA-2内にさらに制御光が重畳されると、周囲光 L_s のXGM効果によって伝搬された入力光の信号が増幅されて出力される。光サーキュレータの出力ポートより出力された光の内からバンドパスフィルタF-3(中心波長: 1551 nm, バンド幅: 0.8 nm)を用いて1551 nmの波長の出力光を得た。

3. 実験結果

Fig. 2(a), (b)および(c)はそれぞれ入力光、制御光および出力光の波形を示す。同図(a) および(b)の入力光および制御光はそれぞれ1 GHzおよび0.1 GHzで変調されており、制御光の平均パワー(P_c)はそれぞれ0.01, 0.05, 0.1, 0.2, 0.3 mWである。入力光の平均パワーは約0.64 mWであり、出力光の平均パワーはそれぞれ0.02, 0.1, 0.2, 0.4, 0.5 mWであった。同図より、制御光が入射したON状態の場合だけ入力信号が増幅されて出力が得られており、制御光のパワーを増加すると信号強度が増幅されていることがわかる。ここで興味深い物理現象としては、(c)の出力光波形は(a)の入力光および(b)の制御光波形の和算ではなく、積算した波形を示していることである。

Fig. 2 (a) Input and (b) control signal waveforms. (c) Output waveforms for five values of the control average power ($P_c = 0.01, 0.05, 0.1, 0.2$, and 0.3 mW).

Fig. 3は制御光パワー(P_c)をパラメータとした場合の光入出力特性を示す。制御光の平均パワー(P_c)はFig. 2と同様にそれぞれ0.01, 0.05, 0.1, 0.2, 0.3 mWである。ここで重要な特性は、小さな制御光パワーを重畳することによって光入出力特性を大きく変化させられることである。例えば、入力光パワーが0.5 mWの場合、制御光パワーを0.01から0.1 mWに増加すると、出力光パワーは0.2から0.5 mWに増加しているのがわかる。Fig. 4は、出力光の変調度に対する制御光の平均パワーの依存性を示す。Fig. 2に示したように、入力光の変調度はほぼ100%で

Fig. 3 Output power versus input power for five values of the control average power ($P_c = 0.01, 0.05, 0.1, 0.2$, and 0.3 mW).

Fig. 4 Output modulation degree versus control average power.

ある。尚、変調度 M は、 $M = 100 \times (P_{\max} - P_{\min}) / (P_{\max} + P_{\min})$ [%]で定義され、 $P_{\max}$ および $P_{\min}$ はそれぞれ波形の最大および最小の値を示す。Fig. 4より、制御光の平均パワーを0.01から1 mWまで増加した場合においても、出力光の変調度は約90 %程度が得られている。Fig. 2-4から明らかなように、制御光パワーを増加した場合、出力光強度はそれに伴って増加しているにもかかわらず変調度は一定の値を示している。すなわち、出力光より桁違いに小さい制御光パワーを入力することによって、入力信号を忠実に増幅していることがわかる。Fig. 5は、制御光の平均パワーに対する出力光の平均パワーの特性を示す。ここでは入力光の平均パワー(P_{in})が0.64 mWの場合のデータを示す。同図より、制御光の平均パワーが約0.2 mWより小さい領域では特性曲線の傾きは約2が得られている。さらに制御光の平均パワーを増加させるとその傾きは徐々に飽和して、制御光の平均パワーが1 mWにおいては1程度の値が得られている。尚、この制御光パワーに対する出力光パワーの特性は入力光パワーに強く依存している。入力光が飽和強度より小さい場合はXGMが顕著に生じないため線形性が増すが、飽和強度以上では特性は飽和してFig. 5に示すようになる。

Fig. 6 (a), (b), (c)および(d)は、入力信号光の変調周波数をそれぞれ0.5, 1, 5および10 GHzにした場合の出力光波形を示す。制御光の平均パワーは約0.05 mWの場合のデータである。同図より、5 GHzまでの出力光波形はほぼ対称で高い変調度を有しているが、10 GHzにおいては変調度が極端に低下している。また、10 GHzにおいては出力光波形が全体に非対称になっており、制御光の強度が増加する側においては波形の変調度は大きく、逆に強度が減少する側での変調度が小さくなっている。Fig. 7は出力光と入力光の変調度の比($M_{\text{out}}/M_{\text{in}}$)に対する入力信号光の周波数依存性を示す。尚、実験に用いた光変調器には周波数依存性があり、高い変調周波数においては入力光自身の変調度が低下する。その入力光の周波数依存性を取り除くために、パラメータとして出力光と入力光の変

Fig. 5 Output average power versus control average power for the input average power of 0.64 mW.

(a) 0.5 GHz

(b) 1 GHz

(c) 5 GHz

(d) 10 GHz

Time [ns]

Fig. 6 Output waveforms for four values of the input signal frequency. (a) 0.5 GHz, (b) 1 GHz, (c) 5 GHz, and (d) 10 GHz.

調度の比($M_{\text{out}}/M_{\text{in}}$)を用いた。同図より、入力信号の変調周波数が5 GHzまでは約0.8程度の高い値を維持し、その後値が急激に減少する結果が得られた。すなわち、本光トライオードの応答周波数は約5 GHz程度であることが理解できる。

Fig. 7 Output modulation degree versus input signal frequency.

4. 討 論

これまでSOAの相互利得変調の研究は、主に波長変換デバイスの観点からなされてきた。このXGMのメリットとしては構成がシンプルであることが挙げられるが、出力の消光比が小さいというデメリットがあり、本研究においては出力信号光の変調度が小さくなることに対応する。したがって、これまでの研究ではXGMを2段直列に使用することはあまり行われていない。事実、通常の進行波型のSOAを2つ用いて本研究の光トライオードを構成した場合、その出力光の信号変調度は極端に低下して、光入出力特性はほとんど意味を成さないほど劣化することを確認している。しかし、前論文において、我々は一端が反射型のSOAを2段用いて良好な信号特性が得られることを報告している。反射型のSOAを用いた場合に出力信号の変調度が高くなる理由は、ただ単に反射によるダブルパス(往復光路)効果だけでないことは2つの進行型SOAを用いた基礎実験から明らかである。この現象の詳しい解明を行うのが今後の課題である。

一方、本研究においては入力光信号に対して反転強度を有する周囲光 L_0 を用いて、一段目のSOAからの信号を2段目のSOAに伝達している。前論文においては一段目のSOAにおいてXGMにより生じた反転信号を増強するために、バイアス光と呼んだCWのプロロープレーザー光を用いている。これはいわゆる通常のXGMで用いられる手法で、CWのプロロープ光に反転信号を複写したことになる。しかし、本研究において、CWのプロロープレーザー光を用いなくとも、反転強度を有した幅広いスペクトルの周囲光をそのまま利用すれば、2段目のSOAで十分にXGM効果が得られることが確認された。すなわち、周囲光である自然放出光はそれぞれの波長において強度的に微弱でも広いスペクトルを積算すれば、十分に2段目のSOAでXGMを生じさせるmWオーダーの強度が得られる。要は2段目のSOAに反転信号を伝達できる強度があれば、必ずしもレーザー光である必要はない。この周囲の自然放出光を利用する大きなメリットとしては、これまで必要であったCWのプロロープレーザー光が不要になったことであり、

工業的な効果は非常に大きい。なぜなら、従来の構成では一つの光トライオードに一つのバイアス用レーザー光源が必要であり、モノリシックするためにはSOAと半導体レーザーを併設する必要があったからである。また、半導体レーザーの出力および波長は温度変化などに敏感であり、その変動が光トライオードの特性に大きく影響することは避けられないことであった。本研究の広いスペクトル幅の周囲光を用いることは、周囲温度の変化などの影響を受けにくく、周囲環境に堅固な素子を実現できるものと期待される。以上の研究成果により、真の意味での光信号増幅3端子素子が実現できた。すなわち、外部から入力するのは入力および制御光信号のみであり、その信号を増幅した出力光が得られることが確認された。

現在のエレクトロニクスの発展が、信号増幅作用のある三極管またはトランジスタによってもたらされたことは誰もが知るところである。翻って、光エレクトロニクスの分野にはまだトランジスタに相当するような素子は得られていない。本研究で示した光トライオードは同一波長の光信号の入力、制御および出力光のみで動作し、信号増幅作用を有する3端子素子であることから「光版のトランジスタ」としてのポテンシャルを十分に有していると考ええる。さらに、光通信では波長分割多重技術が重要な位置を占め、波長を変換して信号処理する必要がある。本研究では波長変換については詳しいデータを示していないが、本光トライオードにおいては制御光の波長を変えることによって、出力光の波長を変換することが可能である。また、XGMを1段のみ用いた波長変換デバイスでは信号が反転する欠点があったが、本光トライオードでは2段用いているため信号は正転して得られるメリットがある。すなわち、本光トライオードは光スイッチングすると同時に波長変換する機能を有している。

今後の課題としては、本研究で示した原理に則ってモノリシック化することである。その場合に波長選択フィルタとして導波路型グレーティングフィルタを用いることが有用であると考えられる。他方、実験結果より本光トライオードの有効な応答速度は約5 GHzである。これは用いたSOAのキャリアの緩和時間に起因するものと考えられる。XGMの動作原理は、CWプロロープ光の利得の光入力による変調である。光入力ある(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る。一方、光入力がない(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程度以上の緩和過程の影響を受ける。Fig. 6(d)の10 GHzにおける出力光波形が全体に非対称になっており、制御光の強度が増加する側においては波形の変調度は大きく、逆に強度が減少する側での変調度が小さくなっているのは上記の理由によると考えられる。したがって、XGMを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、キャリア回復時間が数psと高速な量子ドットSOAを用いるのが有効であると考えられる。

5. まとめ

反射型の半導体光増幅器(RSOA)における相互利得変調をタンデムに用いた光トライオードを実現した。特に本研究では、第1段目のSOAに信号光のみを入力し、その信号光の周囲波長の信号反転した自然放出光を第2段目のSOAに入力する手法によって、第1段目のSOAに入力するプローブ光と呼ばれるCWのレーザー光を不要とした。すなわち、入力および制御光のみを光トライオードに入力し、信号増幅して出力する完全な光3端子素子を実現した。その特徴としては、小さな制御光パワーで光入出力特性を大きく変化させることができることを示した。また、制御光パワーが約1 mW程度までは、出力光の変調度は維持されたまま信号増幅可能であることがわかった。さらに、光トライオードの応答速度としては入力光の変調周波数で約5 GHzまで有効であることがわかった。本光

トライオードは入出力および制御光を同一波長で動作させることが可能であるばかりでなく、光スイッチングすると同時に波長変換する機能も有することから今後の波長分割多重通信や光波長資源を活用する光エレクトロニクス分野のキーデバイスとして発展することが期待される。

参考文献

- 1) B. Glance, J. M. Wiesenfeld, U. Koren, A. H. Gnauck, H. M. Presby, and A. Jourdan: Electron. Lett. **28** (1992) 1714.
- 2) T. Durhuus, C. Joergensen, B. Mikkelsen, R. J. S. Pedersen, and K. E. Stubkjaer: IEEE Photon. Technol. Lett. **6** (1994) 53.
- 3) J. M. Wiesenfeld: J. High Speed Electronics and Systems **7** (1996) 179.
- 4) Y. Maeda and L. Occhi: IEEE Photon. Technol. Lett. **15** (2003) 257.