位相マスク干渉法によるファイバブラッググレーティングを用いた 負帰還半導体光増幅器の雑音抑制効果

前田 佳伸^{1,3}, 谷本 浩一¹, 松尾 達弥¹, 高木 正和², 中山 秀樹³

¹近畿大学 理工学部電気電子学科 (〒577-8502 大阪府東大阪市小若江3-4-1)

²タツタ電線(株) (〒620-0853 京都府福知山市長田野町3-17)

³光トライオード(株) (〒577-0817 大阪府東大阪市近江堂2-10-41)

Noise Reduction Effect of Negative Feedback Semiconductor Optical Amplifiers Using Fiber Bragg Gratings Based on Phase Mask Interferometer

Yoshinobu MAEDA,^{1,3} Koichi TANIMOTO,¹ Tatsuya MATSUO,¹ Masakazu TAKAGI,² and Hideki NAKAYAMA³

¹Department of Electric and Electronic Engineering, School of Science and Engineering,
Kinki University, 3-4-1 Kowakae, Higashi-Osaka, Osaka 577-8502

²Tatsuta Electric Wire & Cable Co., Ltd., 3-17 Osadano, Fukuchiyama, Kyoto 620-0853

³Hikari-triode Co., Ltd., 2-10-41 Ohmido, Higashi-Osaka, Osaka 577-0817

(Received November 13, 2009)

A negative feedback semiconductor optical amplifier was realized in an InGaAsP-InP amplifier using a fiber Bragg grating based on a phase mask interferometer. The gratings must possess such functions as the transmission of input light through a semiconductor optical amplifier and the reflection of the surrounding light emitted by optical amplification. Two gratings of slightly different center wavelengths were imprinted onto the fiber next to each other. The negative feedback effect recovers the signal loss to a higher definition and lower error probability. The optical amplifier with negative feedback provided an output signal whose gain and waveform was stabilized optically. A noise reduction effect was obtained at a central wavelength of the fiber Bragg grating.

Key Words: Fiber Bragg grating, Phase mask interferometer, Semiconductor optical amplifier, Cross-gain modulation, Negative feedback optical amplification effect

1. はじめに

今日の光通信は、波長分割多重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が構築されようとしている。半導体光増幅器(Semiconductor optical amplifier: SOA)は、小型で量産性に優れるというメリットがあるが現状ではほとんど実用化されていない。実用化されていない要因としては、エルビウムなどの希土類元素を添加した光ファイバ増幅器に比べて偏波依存性や雑音特性が劣るという問題がある。これまでに我々は一端が反射タイプの半導体光増幅器(Reflective Semiconductor Optical Amplifier: RSOA)における相互利得変調(XGM)を2段用いたタンデム波長変換型の光トライオード(Optical triode)を提案し、3端子の信号増幅作用を有することを示してきた^{1,2)}。また、RSOAのXGM³⁾における消光比が向上する原因を究明した結果、SOAの雑音抑制技術として負帰還光増幅効果(Negative feedback optical amplification effect)⁴⁾を見出した。本効果は、入力光信号に対してSOA内で発生した自然放出光をSOAに帰

還(フィードバック)させることによって実現する。この自然放出光はSOAのXGMによって入力光信号の強度変化に対して強度反転しており、SOA内部の利得を入力光信号に応じて動的に変調し、エレクトロニクスの負帰還増幅技術と同様な雑音抑制効果を得ている。

エレクトロニクスにおいては負帰還増幅技術が広く活用されており、利得の安定や低雑音な電気信号増幅を可能としている。エレクトロニクスでは電氣的に正・負が存在するため、負帰還増幅技術を実現することは容易なことであるが、光信号には負の値が存在しないため種々の工夫がなされている。SOAの利得安定化技術として、信号バンド外で生成させたレージングモードを用いたゲインクランプSOA⁵⁾が多くの研究機関で研究・開発されている。他方、我々が提案した方法と同様なバンドパスフィルタを用いたフィードバックループ実験系で、ゲインコントロールSOA⁶⁾が報告されている。

本研究では、周囲光の帰還を実現するために特別に設計した反射波長特性を有した光ファイバ型フィルタ(FBG: ファイバブラッググレーティング)を位相マスク

干渉法で作製した。このFBGを搭載した光ファイバの先端をレンズ化して、SOAと結合させて負帰還SOAを構成した。本研究では入力信号のビット誤り率や雑音指数などの波長依存性について測定し、その雑音抑制効果を示す。

2. FBGの作製と負帰還光増幅効果

本研究で用いたファイバブラッググレーティング (FBG) は光ファイバ内に形成された回折格子である。ブラッグ回折格子には特定波長の光を反射する性質がある。FBGは光の進行方向に屈折率の高い部分と低い部分が交互に繰り返される屈折率変調型グレーティングであり、グレーティング周期 Λ と反射される波長(ブラッグ波長) λ_B とは(1)式で関係づけられる。

$$\lambda_B = 2n_{\text{eff}}\Lambda \quad (n_{\text{eff}}: \text{実効屈折率}) \quad (1)$$

光ファイバのコアには屈折率をクラッドより高めるため GeO_2 が添加されている。この GeO_2 が SiO_2 中に酸素欠乏欠陥を生じさせ240 nm近傍に吸収帯を持つ。したがって240 nm近傍の紫外線を照射するとクラマース・クロニッヒの関係(光の吸収と屈折率の変化との関係)により屈折率が上昇すると説明されるが、あるいは紫外光照射による分子再配列からガラス構造の圧縮が起こるともいわれている⁷⁾。また、あらかじめ高圧水素処理により紫外光に対する感度を大幅に改善することができることも報告されている⁸⁾。この現象(光誘起屈折率変化)を利用して、ファイバコア内に屈折率変調を形成する。

代表的な作成方法が位相マスク法である。被覆を除去したファイバの側方(円周方向)から位相マスクを介して強い紫外線レーザービームを照射すると、レーザー光は位相マスクにより回折光となり、ファイバコア上に干渉縞が形成される。ファイバコア内にはこの干渉縞周期に対応した屈折率変調が形成される。コア内のグレーティング周期 Λ は位相マスクのグレーティング周期 d の1/2になり、良好な再現性が得られる。位相マスク法の利点は可干渉性(コヒーレンシ)の低いレーザービームでも使用できることである。他方、二光束干渉露光法は再現性は低いものの、高額消耗品である位相マスクを必要とせず、同一の光学系で幅広い波長対応が可能ことから、多品種少量生産に適した手法といえる。ただし、グレーティング周期を次第に変化させ、反射波長帯域を広げるようなチャープグレーティングの作製では干渉計にレンズ系を組み込むなど、さらに調整の困難さが伴う。

本研究では、位相マスク法の高い再現性と二光束干渉露光法の広い対応波長域を兼ね備える製造手法であるFig. 1に示す位相マスク干渉法⁹⁾を用いた。この手法では位相マスクで回折される ± 1 次光のみをミラーで折り返し、その角度を調整することで干渉縞の周期を制御している。従って、高次回折光との干渉を抑制することが可能であり、透過帯域での損失低減を実現している。本研究におけるファイバグレーティングフィルタに求められる機能は、SOAへ入力された入力光の波長は透過さ

Fig. 1 Phase mask interferometer.

せ、増幅により発生した周囲光の一部をSOAに戻すことである。そのためにFig. 2に示す透過および反射スペクトルをもつ反射率92 %のFBGを作製した。周囲光はある一定の広がりを持ち、ファイバグレーティングの反射帯域にも広がりを持たせる必要がある。このため反射中心波長のわずかに異なる二種類のチャープグレーティング(反射中心波長1548 nmと1554 nm)を光ファイバの近接した二箇所へそれぞれ書き込んだ。このとき位相マスク干渉法を用いることで、中心波長の選択、制御やファイバ書き込み位置の調整などが容易に実現された。さらに、従来目視に頼ることの多かった光ファイバの位置やミラー角度を、独自の調整アルゴリズムと光学系のコンピュータ制御によりFBG作製の高い安定性と再現性を実

Fig. 2 Transmission and reflection spectrum of fiber Bragg grating for negative feedback optical amplifier.

現した。試作したFBGの先端をレンズファイバ化し、SOAの一端に結合して負帰還半導体光増幅器(NF-SOA)を構成した。

Fig. 3は、我々が提唱する負帰還光増幅効果の原理を説明する概念図である。同図(a)に示すように波長 λ_1 の入力光がSOAに入射したとき、SOA内での相互利得変調によって λ_1 の周囲波長(λ_b)の自然放光が入力光に対して逆位相に強度変調を受ける。その強度変化の様子を同図(b)の実線で示している。この $P_f(\lambda_b)$ を負帰還光としてSOAに帰還させると、SOA内部の相互利得変調により波長 λ_1 に対する利得が同図(c)の実線で示すように変調される。もし負帰還光 P_f が無い場合は同図(c)の点線で示したように、SOAの利得は一定である。利得が一定の増幅器においては、信号も雑音も同利得で増幅されるため、信号対雑音比(S/N)を改善することは原理的に不可能である。しかし、負帰還光 P_f がある場合は波長 λ_1 に対する利得が同図(c)の実線に示すように変調される。このように動的に利得が変調されたSOAに同図(a)に示す入力光が入射された場合、入力光強度が低いLowの場合は利得が小さいため増幅度が低く、出力光の0レベルは負帰還光 P_f がない場合より低下し、同図(d)に示すように高い変調度(高い消光比)が得られてS/Nを改善することが可能となる。Fig. 3は出力光の変調度の改善を定性

Fig. 3 Concept diagram of a negative feedback optical amplification effect. The straight-line represents the case where the SOA was used with negative feedback, and the dotted line represents the case of the SOA without negative feedback.

Fig. 4 Block diagram of the negative feedback semiconductor optical amplifier (NF-SOA) and measurement system.

的に示しただけであるが、前報⁴⁾において、我々は出力光の波形歪みの低減および変調度の改善が可能であることを実験的に負帰還光増幅効果として示している。

3. 測定結果

Fig. 4はNF-SOAの構成図および測定系を示す。SOAは、InGaAsP-InPリッジタイプの半導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1500 nmであり、250 mAの注入電流でファイバ端の利得で約17 dBが得られた。Fig. 5は、1550 nmの入力信号に対するゲイン飽和特性を示す。出力光パワーで-25から0 dBmの範囲でゲインが一定で、飽和パワーは約7 dBmであることがわかる。Fig. 6はSOAから放射された自然放光(ASE)スペクトルを示す。出力端にFig. 2に示す特性のFBGを搭載しているために、1550 nm付近でその特性が現われている。

測定系では波長可変レーザー光源から得られた種々の波長のレーザー光をニオブ酸リチウム(LN)光変調器で強度変調し、Er添加光ファイバ増幅器(EDFA)で信号増幅した後にバンド幅1 nmの可変フィルタを透過させ、可変光減衰器(VOA)で強度調整をして入力信号光とした。負帰還光増幅効果により出力光の波形歪みの低減が可能であることを実験的に検証するために、光通信で用

Fig. 5 Characteristic of saturation gain for NF-SOA.

Fig. 6 ASE spectrum for NF-SOA.

Fig. 7 Eye-pattern waveforms of (a) 1530, (b) 1544, (c) 1550 and (d) 1558 nm for NF-SOA.

いられているランダムビットを伝送した場合のビット誤り率(BER)の測定を行った。BERの測定にはアンリツ製のPM-1800シグナルクオリティアナライザ装置を用いた。パターン発生器は、10 GbpsでNRZ 2³¹-1疑似ランダムビットシーケンスの連続信号を発生した。

Fig. 7 (a), (b), (c)および(d)は、NF-SOAに入力信号(−7 dBm)のレーザー光の波長を1530, 1544, 1550および1558 nmに設定した場合、出力光をそれぞれオシロスコープで観測したアイパターン波形を示す。同図より求めた開口率は、それぞれ(a)0.35, (b)0.37, (c)0.50および(d)0.41である。同図(c)に示すFBGの透過中心波長の1550 nmに対する波形は、他の波形に比べて開口率が良好なアイパターンが観測されている。Fig. 8は、レー

Fig. 8 Measured BER results for NF-SOA (● : 1550 nm, △ : 1544 nm, ◇ : 1530 nm, ○ : 1558 nm) and SOA (□ : 1550 nm).

ザー光の波長を1530, 1544, 1550および1558 nmに設定した場合のビット誤り率をNF-SOAに対して測定した結果を示す(● : 1550 nm, △ : 1544 nm, ◇ : 1530 nm, ○ : 1558 nm). 同図のBER曲線より、1550 nmを用いた測定結果は、他波長の同じ受光パワーに比べて低いBER値が観測され、パワーペナルティーが約1dB以上あることがわかる。また、参照のために同図中に入力光信号の波長を1550 nmとした場合、通常のSOAに対するBERを測定した結果を示す(□ : 1550 nm). 同図のBER曲線より、1550 nmとした場合のNF-SOAを用いた測定結果は、通常のSOAの同じ受光パワーに比べて低いBER値が観測されることがわかる。

NF-SOAおよび通常のSOAの諸特性をTable 1および2にそれぞれ示す。 $G_{\max}$ および $G_{\min}$ はそれぞれ利得の最大値および最小値を示し、PDGおよびNFはそれぞれ偏光依存性利得および雑音指数を示している。PDGは入力光信号の偏光状態で決定される光増幅器の利得であり、一般的に偏光依存性が小さい方が高性能な増幅器である。PDGはミューラー法で観測し、NFは光信号のSN比(OSNR)から算出した。Table 1に示したNF-SOAの利得はFBGによって自然放出光の一部が帰還されている関係で、Table 2に示した通常のSOAに比べて減少している。一方、Table 1に示したNF-SOAの雑音指数NF値はTable 2に示した通常のSOAの約9 dBに比べてそれぞれ低減(1530 nm:8.3 dB, 1544 nm:6.1 dB, 1558 nm:6.2 dB)されていることがわかる。特に、FBGの透過中心波長の1550 nmに対するNF値は5.1 dBと最小値を示しており、負帰還光増幅効果による低雑音化を実現している。また、Table 1に示したNF-SOAのPDG値はTable 2に示した通常のSOAに比べて各波長において0.1 dB程度減少しており、偏光依存性の小さい良好な特性を示している。

Table 1 Specification of gain, PDF and NF for NF-SOA.

Wavelength	$G_{\max}$	$G_{\min}$	PDG	NF
1530 nm	18.3 dB	17.7 dB	0.62 dB	8.3 dB
1544 nm	16.8 dB	16.2 dB	0.63 dB	6.1 dB
1550 nm	17.1 dB	16.0 dB	0.68 dB	5.1 dB
1558 nm	17.2 dB	15.8 dB	0.69 dB	6.2 dB

Table 2 Specification of gain, PDF and NF for SOA.

Wavelength	$G_{\max}$	$G_{\min}$	PDG	NF
1530 nm	24.8 dB	24.1 dB	0.78 dB	9.3 dB
1544 nm	22.9 dB	22.7 dB	0.70 dB	8.9 dB
1550 nm	22.0 dB	21.5 dB	0.75 dB	9.0 dB
1558 nm	20.9 dB	20.1 dB	0.76 dB	9.1 dB

4. 討 論

光増幅器に正帰還を施せばレーザー発振現象が生じる。エレクトロニクスでも同様に正帰還させた増幅器においては発振現象が生じ、発振器として種々の電子回路に活用されている。一方、エレクトロニクスにおいては増

増幅器に負帰還を施して、利得の安定や低雑音な電気信号増幅を可能としている。また、元来不安定な半導体素子を安定化して低雑音な電気信号増幅を可能としている。つまり、電子回路における負帰還増幅回路では帰還率を決定する抵抗によって増幅度が決まり、温度依存性の大きい半導体トランジスタの増幅度には依存しないことが重要な技術である。しかし、光技術の分野では負帰還の光増幅技術はほとんど活用されていないのが実情である。光信号を用いた光エレクトロニクスが発展するためには負帰還の光増幅技術が将来的に必要な不可欠であると考えられる。また、本研究においては半導体材料に比べて温度依存性が小さいガラス材料を主成分とするFBGを用いて負帰還を実現している。このことは負帰還増幅の電子回路と同様に、原理的には半導体SOAに比べて温度依存性が小さいFBGを使用することによって温度安定化に有効であると考えられる。すなわち、不安定なSOAをパッシブなFBGで制御して、雑音指数などの光増幅特性を改善できる点が優れている。今後これらの観点から詳細な実験を行って証明する必要がある。

Table 1および2においてNF-SOAのPDG値が通常のSOAに比べて0.1 dB程度改善される理由を考察する。FBGに偏光依存性がなければ、SOAに戻される光も偏光依存性はないと考えられる。一方、信号光はFBGの偏光無依存性の影響を直接受けないが、負帰還増幅によりSOA全体の利得に信号光の偏光依存性が与える影響が小さくなっているため、全体としてPDGが下がったのではないかと考えられる。しかし、まだ初期段階のデータであることから、さらにPDGに関するデータを蓄積して解明する必要がある。

負帰還光増幅器の応答速度を検討する必要がある。なぜなら、負帰還光増幅は信号光と帰還光が時間遅れなく重畳されないと効果を発揮しないばかりか、逆に悪影響を及ぼす可能性を有しているからである。SOAの相互利得変調の動作原理は、プローブ光に対する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程度以上の緩和過程の影響を受ける。したがって、相互利得変調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。本研究では、FBGを用いて周囲光をSOAにフィードバックさせることによって負帰還光増幅器を実現しているが、入力光の信号と負帰還光の信号が時間的に重ならないと効果が得られない。今回の試作においてはSOAとFBGの間隔は1 mm以下であり、信号の90 %程度が重なると計算すれば10 Gbps程度まで負帰還効果が得られることになるが、詳細に検討する必要がある。

本研究において、ビット誤り率や雑音指数の入力光信号の波長依存性について検討する。Fig. 6に示したSOAのゲインには波長依存性が存在する。一方、FBGによって帰還される負帰還光の強度は自然放出光なので、入力信号の波長依存性はなくほぼ一定と考えられる。した

がって、信号光に対する負帰還光の強度が負帰還光増幅効果の度合いを決定することから、ゲインの高い波長の入力光信号を用いた場合、負帰還光増幅効果の影響が相対的に小さくなると考えられる。例えば、本実験で1530 nmの光信号を用いた場合、Fig. 6およびTable 1&2の特性からゲインが大きいので出力信号の強度は他波長より強くなる。一方、FBGによって帰還される負帰還光の強度はほぼ一定と考えられる。したがって、1530 nmの入力光信号を用いた場合、負帰還光増幅効果の影響が他波長(1544, 1550, 1558 nm)に比べて小さくなり、雑音の抑制効果が減少すると考えられる。すなわち、SOAのゲインが小さい1550および1558 nmの方がFBGによる負帰還効果の影響を強く受けることにより、雑音の抑制効果が大きいと考えられる。さらに、FBGの中心波長である1550 nmの方が1558 nmに比べてビット誤り率およびNF値が小さい理由は、FBGによって反射される光波長の媒質中を伝搬する速度依存性が影響していることが考えられる。他方、負帰還光をフィードバックさせることによって低雑音化が可能となるが、フィードバックをかけない場合に比べて出力(増幅度)が低下することが懸念される。そこでFBGの設計指針としては、負帰還効果が十分に得られ且つ出力が大きく取れる要求を満たすことが応用的には重要となる。

以上のことから、本研究ではSOAの利得を入力信号に応じて動的に変調することによって、負帰還光増幅が可能であることを提案した。利得を動的に変調するのにSOAの相互利得変調を利用しており、SOA内部から発生する自然放出光を上手く活用している。さらに、SOAにFBGを搭載した光ファイバを付加するだけのシンプルな構成で実現できることは工業的にも有益である。また、NF-SOAを活用することにより従来のSOAの問題点である偏波依存性と雑音特性を改善できることを示した。したがって、今後提案した負帰還光増幅器が多くの光エレクトロニクス分野で使われることが予期され、光版の負帰還増幅技術の一方法を提示した意義は大きいと考えられる。

5. まとめ

位相マスク法の高い再現性と二光束干渉露光法の広い対応波長域を兼ね備える製造手法である位相マスク干渉法を用いて、負帰還光増幅器用のファイバブラッググレーティングを作製した。FBGに求められる機能は、半導体光増幅器へ入力される入力光の波長を透過させると同時に発生した周囲光の一部をSOAにフィードバックさせることである。このため反射中心波長のわずかに異なる二種類のチャープグレーティングを光ファイバの近接した二箇所へそれぞれ書き込んだ。このとき位相マスク干渉法を用いることで、中心波長の選択、制御やファイバ書き込み位置の調整などが容易に実現された。試作したFBGの先端をレンズドファイバ化し、SOAの一端に結合して負帰還半導体光増幅器(NF-SOA)を構成した。10 Gbpsの疑似ランダム信号を用いたビット誤り率の測

定において, FBGの中心透過波長である1550 nmを用いた場合, 他波長に比べて開口率が良好なアイパターンをNF-SOAで観測した. また, BER曲線より, 1550 nmを用いた測定結果は, 他波長に比べてビット誤り率を低く抑制できることがわかった. さらに, 雑音指数が5.1 dBに低減された. これらの実験結果から, FBGを用いた負帰還半導体光増幅器によって光増幅の低雑音化が可能であることを示した.

謝 辞

本研究は科学研究費補助金基盤研究(C)(21560048)の助成を受けたものである.

参考文献

- 1) Y. Maeda and L. Occhi: IEEE Photon. Technol. Lett. **15** (2003) 257.
- 2) 前田 佳伸, 幸元 直樹: レーザー研究 **33** (2005) 189.
- 3) B. Glance, J. M. Wiesenfield, U. Koren, A. H. Gnauck, H. M. Presby, and A. Jourdan: Electron. Lett. **28** (1992) 1714.
- 4) Y. Maeda: Appl. Phys. Lett. **88** (2006) 101108.
- 5) M. Bachmann, P. Doussiere, J. Y. Emery, R. N'Go, F. Pommereau, L. Goldstein, G. Soulage, and A. Jourdan: Electron. Lett. **32** (1996) 2076.
- 6) K. K. Qureshi, H. Y. Tam, C. Lu, and P. K. A. Wai: IEEE Photon. Technol. Lett. **19** (2007) 1401.
- 7) 水波 徹: 応用物理 **67** (1998) 1029.
- 8) P. J. Lemaire, R. M. Atkins, V. Mizrahi, and W. A. Reed: Electron Lett. **29** (1993) 1191.
- 9) 前田 佳伸, 岡嶋 亮輔, 高木 正和, 中山 秀樹: レーザー研究 **37** (2009) 540.