半導体光増幅器の低雑音動作

Semiconductor Optical Amplifier with Low Noise Figure

長谷川英明	* 舟橋政樹 *	丸山一臣*	清田和明*	横内則之*
Hideaki Hasegawa	Masaki Funabashi	Kazuomi Maruyama	Kazuaki Kiyota	Noriyuki Yokouchi

概要 次世代の光通信の変調フォーマットとして期待されている多値位相変調方式においては,多 値度が高くなると光送受信器が複雑となるため,挿入損失が増大する傾向にある。そのため,挿入損 失を補償するためのシングルチャネル用の小型光増幅器が求められてきている。このような光増幅器 として, EDFA (erbium doped fiber amplifier)よりも利得媒体が小さく他の光デバイスと集積可能な 半導体光増幅器 (SOA:semiconductor optical amplifier)が注目されている。本研究では,シミュレー ション技術を用いてSOA構造の最適設計をおこない,SOAの試作を行った。試作したSOAは電流 100 mAにおいて,出力5 dBm以上, 雑音指数 (NF:noise figure)4 dB以下であり,EDFA相当のシン グルチャネルアンプの要求特性を満足しており,小型,低消費電力,低雑音光増幅器として有望である。

1. はじめに

次世代の光通信として,受信感度,周波数利用効率及び分散 トレランスの点で、従来のOOK (on-off keying) 方式よりも優 れている PSK (phase shift keying) 方式に代表される多値位相 変調方式が注目されている。しかし、多値位相変調のために、 送信側では多段の変調器、受信側では遅延回路や差動光受信器 が用いられており,多値度が高くなると光部品数が増えるため, 挿入損失は増大する傾向にある。図1は16QAM (quadrature amplitude modulation)の変調器の構成を示しており、4個の マッハツェンダ型位相変調器から成り、挿入損失は10 dB程度 と高い1)。このような高い挿入損失を補償する用途として、小 型なSOAが注目されている。SOAは他の化合物半導体光デバ イスとモノリシックに集積可能であるほか、スポットサイズ変 換器 (SSC: spot size converter) を搭載することにより1 dB以 下の低結合損失で石英の光導波路であるPLC (planar lightwave circuit)とハイブリッド集積することも可能である²⁾。 また, SOAには簡易な電流励起, 小型, 低消費電力, 及び低 コストなどのメリットも期待されている。一方、このSOAを 光通信のシングルチャネルアンプとして用いるためには, EDFA相当の低雑音かつ偏波無依存であることが求められる。 本研究では、SOAの低雑音化と高出力化を両立することによ り、シングルチャネルアンプの要求特性を満たすSOAを開発 することを目的としている。すでに、高出力かつ低雑音なSOA 特性が文献3)などによって報告されている。しかし、これらの 論文にはNFの活性層幅,利得長,及びMQW (multi quantum well)活性層構造の依存性については記されていない。そこで 我々は、NFの活性層幅、利得長、及び活性層構造依存性につ

いて数値解析と実験により詳細に調べた。さらに,活性層幅, 利得長を最適化することによりシングルチャネルアンプの典型 的なNF,出力の要求値を満たすSOA特性を実現した。



図1. 16QAM 変調器の構成 Schematic structure of the 16QAM modulator.

2. SOA特性の解析手法

ここでは、SOAのNF及び出力特性の解析方法について述べる。SOAのNF特性の解析手法については文献⁴⁾で紹介されている。本解析で用いている基本方程式であるキャリア密度の時間変化を記述したレート方程式を(1)式に示す。

$$\frac{dN(z,t)}{dt} = \frac{I}{eN_{QW}dWL} - R(N(z,t)) - \frac{\Gamma}{N_{QW}dW}g(N)[Q_{k}^{\dagger}(z,t) + Q_{\bar{k}}(z,t)] - \frac{2\Gamma}{N_{QW}dW}g(N)K[Q_{j}^{\dagger}(z,t) + Q_{\bar{j}}(z,t)]$$
(1)

左辺のN(z,t)はキャリア密度,右辺第1項においてIは電流, eは電荷量,dは量子井戸層厚,N_{QW}は量子井戸数,Wは活性

^{*} 研究開発本部横浜研究所半導体研究開発センター

層幅, LはSOAの利得領域の長さ, Kは端面反射の多重度を表 す係数である。第2項のR(N(z,t))は再結合の項を, 第3項の Γ は光閉じ込め係数, g(N)は材料利得係数, $Q_k^+(z,t)$, $Q_k^-(z,t)$, はそれぞれ前後方向に伝搬する信号光の光子密度, 第4項の $Q_j^+(z,t), Q_j^-(z,t),$ は前後方向に伝搬する自然放出光の光子密 度である。このレート方程式と信号光, 自然放出光(ASE: amplified spontaneous emission)の伝搬方程式を連立させて解 くことにより, 信号光とASE光の分布を求めることができる。 利得をG, 入力側の結合効率をCE, 出力のASE光強度を P_{ASE} とすると, 雑音指数NF(dB)は次式から算出することができる。

$$NF(dB) = 10 \log_{10} \left(\frac{2P_{ASE}(v)}{hv \Delta v G(v)} + \frac{1}{G(v)} \right) \cdot CE$$
(2)

(2) 式より, NFは主に利得GとASE光のパワーにより決ま ることが分かる。

また,(1)式における材料利得係数g(N)には,レーザ解析 の場合,(3)式のような簡易モデルが用いられている⁵⁾。

$$g(N) = g_0 ln(N/N_0) \tag{3}$$

(3) 式の簡易モデルを(1) 式に代入することにより, MQW-SOAの特性解析を行うことができる。ここで, g_0 は利得係数, Nはキャリア密度, N_0 は透明キャリア密度である。図2には, (3) の簡易モデルから求めたネットゲインとHakki-Paoli法⁶⁾によ り実測したネットゲインを示す。ネットゲイン G_{net} は, (4) 式 のように表される。

$$G_{net}(N) = \Gamma g(N) - \alpha(N) \tag{4}$$

α (N) は損失である。

図2に示したように、(3)の簡易モデルは高注入側でもネットゲインが増大する傾向にあるが、実測されたネットゲインは 高注入キャリア側では急激に飽和する傾向にある。レーザでは キャリアがクランプされるため、低注入キャリアで動作させる こととなる。一方で、SOAは高い注入キャリアで動作させる ため、高注入キャリアでのネットゲインが重要となる。(3)式 の簡易モデルでは高キャリアでの材料利得は正確に表現されて いないため、本研究では実測したネットゲインを用いることと した。図3にネットゲインの簡易モデル及び実測値を用いて計 算した時の利得とNF特性を示す。従来の簡易モデルでは、利 得において4.1 dB、NFにおいて0.7dBあった実験結果との差 が、実測されたネットゲインを用いることにより、1.2 dB、 0.2 dBまで近づくことがわかった。



図3. ネットゲインの簡易モデル及び実測値を用いたときの 計算結果と実験結果 Experimental results and calculated results with measured net-gain and approximated model.

3. 低雑音SOAの設計

前述の解析手法を用いて、低雑音SOAの導波路構造を設計 した。図4にSOAの構造パラメータを示す。設計するパラメー タとしては、活性層幅W,利得長L,光閉じ込め係数 Γ ,損失 αなどがある。今回製作する素子は, GaInAsP材料からなる活 性層を用いており、導波路構造は埋め込みヘテロ (BH: buried heterostructure)構造を採用している。図5には活性層が3層 の量子井戸構造(3QW),光閉じ込め係数Γ1.1%の素子におけ る, 電流100 mA, 入力-5 dBmの時の活性層幅W, 利得長L の関係を示す。図より、NFはメサ幅が広く、利得長が短くな るほど低下する傾向にあることが分かる。また、光閉じ込め係 数及び損失が低い程,NFは低減されることが報告されてい る6)。つまり、活性層幅が広く、利得長が短く、損失が低く、 光閉じ込め係数が低い程,NFは低減される傾向にある。図6 には、光閉じ込め係数が異なるSOAにおける進行方向での信 号光の分布の計算結果を示している。図より、光閉じ込め係数 Γが低いほど長手方向に対して信号光が飽和しにくく,NFも 低い傾向があることが分かる。このような構造では、信号光の 利得飽和が生じにくいので、注入されたキャリアは雑音光より も信号光に変換されるため、NFは低減される傾向にある。低 雑音特性を実現するためには, 信号光が飽和しにくい構造に設 計することが重要となる。また,図5(a),(b)における青い実 線は、それぞれ目標の特性である光出力5 dBm、チップ NF 4 dBを示している。さらに図中の赤い実線で示すメサ幅 2.8 µmがシングルモード条件を満たす境界となる。実際に、 目標の光出力、NF及びシングルモード条件を満たす導波路構 造として,活性層幅2.8 µm,利得長1000 µmに設定し試作を行 なった。



図 4. SOA の構造パラメータ Structure parameters of the SOA.



図 5. 光出力(a)とNF(b)の活性層幅と利得長依存性 Output power(a) and NF(b) depending on active width and length.



図6. 各閉じ込め係数Γの SOA における長手方向に対する 信号光の分布 The signal light distribution in SOAs with different optical confinement factors.

4. 低雑音SOAの試作

導波路構造を前章で設計した構造に固定し、さらに3QW に 固定していた井戸層数を、5QW及び8QWまで増やし、試作を 行なった。結晶成長にはMOCVD (metal organic chemical vapor deposition)を用い、活性層は0.8%の圧縮歪を有する GaInAsP量子井戸とした。電流狭窄、導波路構造は埋め込み ヘテロ型構造を有している。さらにpドープの上部クラッド層 での光吸収を低減するために、多段の分離閉じ込め層 (SCH: separate confinement heterostructure)構造を採用している。 また、端面には反射防止膜がコーティングされている。図7に、 試作した3,5,及び8QWのSOAの光出力とNF特性を示す。 測定は自動調心系を用いて、ベンチトップで行なった。測定波 長は、3、5、8QWのそれぞれの利得ピーク波長である 1500 nm, 1560 nm, 及び1560 nmに設定している。■は 3QW, ●は5QW, 及び▲は8QWの光出力とNFの実測値を示 す。実線は計算値である。計算で使用したΓはモード解析に より求めており、3QW、5QW、及び8QWで、それぞれ1.1、2.3、 4.4%である。損失については、SOAはキャリア密度が高い駆 動条件で動作させるため、活性層における吸収損が支配的であ る。活性層における吸収損は、近似的にΓに比例した値で与 えられることが知られている7)。損失は、3QW構造では 8 cm-1であり、実測値を使用している。また、5QW、8QWで は17 cm-1及び32 cm-1であり、Γに比例した推定値を用いて いる。実験結果より、NFに関しては、3QWと5QWではほと んど変わらない。QW層数を増やすと動作キャリア密度が低下 し、利得が飽和しにくくなり、NFが低減される効果(効果①) と、活性層の吸収損が増大することによりNFが増大する効果 (効果②)がある。3QWと5QWでは、この2つの効果が相殺す るためにNFはほとんど変化しないものと考察される。一方, 8QWでは②の効果が支配的となるため、NFは急激に増大する。 出力に関しては、3QW, 5QW 及び8QW と井戸層数が増えると、 Γに比例してネットゲインが高くなるため、-5 dBm以下の低 入力側では出力は高いが、高入力側では利得飽和により出力が 低下することが分かる。また、シングルチャネルアンプの動作 条件と考えている-5 dBm以下の光入力で、今回試作した活性 層構造のうち、5QWで出力とNFが両立できていることが明 らかになった。



図7. 試作した SOA の光出力と NF 特性 Output and NF characteristics of fabricated SOAs.

5. おわりに

本論文では、SOA 特性を予測するために実測したネットゲ インを取り入れて数値解析を行い、低NFとなるSOAの設計 と試作を行なった。試作した5QW構造のSOAでは、2 dB程 度の結合損失などを考慮してもEDFA相当のモジュール NF6dBを実現できる見通しが得られた。また、チップ出力も 5dBm以上得られており、これらはシングルチャネルアンプ の要求特性を十分満たすものである。以上の結果より、SOAは、 次世代光通信用の小型、低消費電力、低雑音光増幅器として有 望である。

参考文献

- T. Sakamoto, A. Chiba and T. Kawanishi, "50-Gb/s 16 QAM by a quad-parallel Mach-Zehnder modulator", European Conference on Optical Communications Conf., Tech. Dig, 2007 paper No. PDS 2.8, (2007)
- 2) T. Hashimoto, Y. Nakasuga, Y. Yamada, H. Terui, M. Yanagisawa, K. Moriwaki, Y. Suzaki, Y. Tohmori, Y. Sakai, H. Okamoto, "Hybrid integration of spot-size converted laser diode on planar lightwave circuit platform by circuit platform by passive alignment technique", IEEE Photon. Technol. Lett., vol. 8, no. 11, (1996), 3
- 3) K. Morito, S.Tanaka, S.Tomabechi, and A. Kuramata, "A broadband MQW semiconductor optical amplifier with high saturation output power and low noise figure," IEEE Photon. Technol. Lett., vol. 17, no. 5, pp. (2005), 3
- M. J. Michael, "Wideband Semiconductor Optical Amplifier Steady-State Numerical Model," IEEE J. Quantum Electron, vol. 37, no. 3, (2001), 9
- T. Makino, "Analytical formulas for the optical gain of quantum wells," IEEE J. Quantum Electron, vol. 32, no. 3, (1996), 9
- B. W. Hakki and T. L. Paoli, "Gain spectra in GaAs doubleheterostructure injection lasers," J. Appl. Phys., vol. 46, no. 3, pp. (1975), 8
- 7) H. Hasegawa, M. Funabashi, N. Yokouchi, K. Kiyota, and K. Maruyama, "Design and Fabrication of Semiconductor Optical Amplifier with Low Noise Figure," OptoElectronics and Communications Conf., Tech. Dig, 2010 paper No. 7D2-3, (2010)