半導体光増幅器内の量子効率とそれを考慮した 超高速全光ゲートの消費電力モデル

坂口 淳[†] Ferran Salleras[†], 上野芳康[†]

†電気通信大学 電子工学科 〒182-8585 東京都調布市調布ヶ丘 1-5-1

E-mail: † sakaguchi@ultrafast.ee.uec.ac.jp

あらまし半導体光増幅器(SOA)を光変調素子として利用した全光ゲートは、超高速信号処理の実用的ソリューションとして期待されている。SOA型全光ゲートがゲート動作(10~160 Gb/s)に必要とする消費電力を、SOAの基礎特性から予測するモデルを開発した。このモデルでは、SOAへの注入キャリアの量子効率が消費電力に大きく影響する。注入したキャリアが超高速制御光によって光子に変換されるまでの過程のモデル化も行い、段階ごとに分けた各過程での変換効率η₁、η₂、η₃を、構造の異なる9種のSOA試料を用いて測定評価した。そして測定した変換効率等の特性を用いてゲートの消費電力を求めた。モデル計算の結果は実測結果と良い一致を見せた。超高速ゲート動作時(~160 Gb/s)においては、MQW型で素子長の長いSOAのゲートが低消費電力となると考えられる。

キーワード 全光信号処理、半導体光増幅器、量子効率、消費電力

Quantum-conversion efficiencies in semiconductor optical amplifier and model of electric dc power consumption in ultrafast all-optical semiconductor gates using them

Jun Sakaguchi[†] Ferran Salleras[†] and Yoshiyasu Ueno[‡]

† Department of Electronic Engineering, University of Electro-Communications, 1-5-1 Tyohugaoka, Tyohu, Tokyo, 182-8585 Japan

E-mail: † sakaguchi@ultrafast.ee.uec.ac.jp

Abstract Based on nine up-to-date types of semiconductor-optical-amplifier (SOA) samples, we devised a power-consumption model of SOA-based all-optical gates as a tool to develop faster and more efficient OTDM systems for bitrates from 10 to 160 Gb/s and those over 160 Gb/s. The conventional effect of a continuous wave (cw) holding beam was included in the model. Furthermore, in this work we defined three step-wise quantum conversion efficiencies η_1 , η_2 , and η_3 from current-injected carriers through photons. The dependence of each of the three efficiencies on the SOA-structure was studied. The validity of the power-consumption model was verified by systematically measuring the effective carrier recovery rate.

Keyword All-optical signal processing, semiconductor optical amplifier, quantum efficiency, power consumption

1. イントロダクション

光通信容量の需要の増加に伴い、信号波長変換や信 号再生、ルーティング等の信号処理を光-電気-光変換 なしに高速に行える全光信号処理ゲートが活発に研究 されている。全光ゲートにおいては、披制御光に制御 光で変調を与える光変調素子が中心的な役割を果たす。 半導体光増幅器(SOA)はキャリア注入によって超高速 な光変調特性を示し、SOAを光変調素子に用いた全光 ゲート[1,2]は広帯域(40~320 Gb/s)[3-7]と低消費電力 (400~1000 mW)、低スイッチング光パワー、安定性、 小サイズを兼ね備えている為、将来の光時間多重 (OTDM)ネットワーク実現のキーデバイスとして期待 されている。そして SOA 型全光ゲートの有用性が実証 されるに伴い、ゲート動作に必要な消費電力量を SOA の基礎特性から簡潔かつ正確に設計できるモデルが必 要となってきている。

SOA型全光ゲートの消費電力は2つの要因によって 決定されると考えられる。一つは制御光がキャリアの 誘導再結合を通じて誘起する相互位相変調(XPM)等の 非線形変調量であり、もう一つは制御光が消費したキ ャリアが変調後に回復する際の緩和速度である。ゲー トの動作周波数が緩和速度を上回ると、データパター ン依存雑音が生じてしまう。キャリア緩和速度はホー ルディング光[8,9]の注入によって速める事が可能であ るが、ホールディング光は誘導放出によりキャリアの 過剰損失を起こし非線形変調量を低下させる。それゆ えゲートの動作周波数が増大するに伴い、ゲート動作 に必要な変調量を保つにはより多くのキャリア注入が 必要となる。

このようなゲート消費電力の議論を SOA 内のキャ リアダイナミクスを用いて行う為には、注入キャリア から光子への変換過程を正しく理解する事が重要とな る。本研究では注入キャリア-光子変換の量子効率に着 目し、モデル化と実測評価を行った。そして複数の構 造を持つ SOA 試料を系統的に評価し、量子効率の構造 依存性を調査した。また量子効率を考慮して SOA 内の キャリアダイナミクスをモデル化し、それに基づいて SOA ゲートの動作周波数と消費電力の関係をモデル 化した。

2. SOA 内の量子変換効率モデル

本研究では SOA 内に注入したキャリアの一部が超 高速光信号とのキャリア再結合に利用されるまでの過 程を、図1の様にモデル化した。まず総注入キャリア 数を N とする。第1 段階においてその一部(N_0)が SOA の透明化(反転分布形成)に利用され、残りが過剰キャ リア Nex=N-No となる。次の段階では Nex の一部が ASE 発光や非発光性再結合に消費され、残り(Ncw)が連続光 の増幅に利用可能となる。ゲートの動作速度が極めて 低速な場合、変調に利用可能なキャリア数はこの Ncw となると考えられる。一方、変調光が超高速パルス(数 ps)である場合には、スペクトラルホールバーニングや ASE 強度の増加などのため、再結合可能なキャリア数 は N_{cw}より更に少なくなる。超高速ゲートで利用可能 なキャリア数はこの Nnulse であり、これまでの各段階 での変換効率をη1~η,とすると、トータルの変換効 率は $\eta_T = \eta_1 \times \eta_2 \times \eta_3$ となる。ゲートの消費電力低減 には л т を高めることが有効であるが、本研究では л 1



図1: SOA 注入キャリア損失のモデル

図1の各段階でのキャリア数と変換効率は、注入電流 I_{OP} 、透明化電流 I_0 、小信号利得 G_0 、キャリア緩和時間 τ_c 、cw 光での利得飽和パワー P_{sat}^{cw} 、超高速パルスでの利得飽和エネルギー E_{sat}^{pulse} を用いて次の様に求められるものとした。

$$N = \frac{I_{OP}}{q} \tau_C. \tag{2.1}$$

$$\eta_1 = \frac{N_{ex}}{N} = \frac{I_{OP} - I_0}{I_{OP}}.$$
 (2.2)

$$\eta_2 = \frac{N_{cw}}{N_{ex}}, \qquad N_{cw} = \frac{P_{sat}^{cw} \tau_C}{hv} \ln G_0^{cw}.$$
 (2.3)

$$\eta_3 = \frac{N_{pulse}}{N_{cw}}, \qquad N_{pulse} = \frac{E_{sat}^{pulse}}{hv} \ln G_0^{pulse}. \tag{2.4}$$

3. 量子効率の測定結果

飽和エネルギー等を測定し、式(2.1)~(2.4)に代入することでSOA内での変換効率を求めることが出来る。
今回測定に用いたSOA試料は4種の製造業者A~Dによるもので、その概要は表1に示した通りである。
A種とB種については断面構造が等しく活性層長L_{eff}の異なる試料を複数用意した。

SOA 評価実験セットアップの概略を図 2 に示す。先 球ファイバーで結合した SOA チップに DFB レーザー の cw 光、あるいはキャリア緩和時間以下のレート (0.65 GHz)に分周された超高速パルス光(2 ps)を入射し、 それらに対する利得の飽和特性(図 3(a),3(b))から利得 飽和パワー P_{sat}^{cw} と利得飽和エネルギー E_{sat}^{pulse} が求め られる。低強度の cw プローブ光とパルス光を同時に 入射した場合には、その cw 波長成分の出力強度時間 波形(図 3(c))からキャリアの緩和時間 τ_c が、変調スペ クトルから相互位相変調量 $\Delta \Phi$ が求められる。

こうして測定した基礎特性から求めた、各段階の変換効率 $\eta_1 \sim \eta_3$ 及びトータル変換効率 η_T の SOA 注入 電流依存性を図4に示す。トータル変換効率は SOA の

Sample	Туре	Active region length, $L_{\rm eff}$ (μ m)	Active region width, $w_A (\mu m)$	Active region thickness, d_A (µm)	Confinement factor, Γ
A#1 A#2 A#3 A#4	Bulk	1000 700 300 700	2	0.1	0.1~0.2
B#1 B#2 B#3	MQW	1100 (*1) 700 (*1) 500 (*1)	1.25	0.038 (*2)	~0.2
C#1	Bulk	700	1.2	0.2	0.3~0.4
D#1	Bulk	1500	0.6	0.35	0.5

(*1) 有効長(テーパー領域の寄与=50%) (*2) 井戸層の合計厚さ



図 2: SOA 評価実験セットアップ概略図. VOA:可変減衰器, Pol: 偏光子, PC: 偏光制御器 PBS: 偏波分離スプリッター, BPF: バンドパス波長フィルター, MLFL: モードロックファイバーレーザー



図 3: SOA 特性測定例.

(a): cw 光に対する利得飽和

(b): 超高速パルス(2 ps)に対する利得飽和

(c): 利得変調と緩和の時間波形(相互相関計による)

表1:SOA 試料の構造一覧



(d): トータル効率 ŋ T

構造に大きく依存しているが、その最大の要因は η2 で あり、多重量子井戸(MQW)構造の B 種の効率が他のバ ルク型のものを大きく上回っていることが分かる。 η1 は SOA が長いほど低くなっており、これは透明化電流 が素子長に比例するためである。 η2 は A 種では素子長 に応じて増加し、B 種では減少する。この違いの原因 は現状明らかになっていない。3 種の効率のうちで η3 だけは、電流注入につれて低下する傾向を示している。 B 種を見た場合には、長い SOA ほど η3 の低下が高い注 入電流から始まる傾向が見て取れる。以上をまとめて、 トータルの効率は MQW 型の SOA が高く、注入電流が必 要な場合は長い SOA が効率が高いと考えられる。

4. SOA 型全光ゲートの消費電力計算

段階毎に分かれたキャリア変換効率のモデルと整合する様に、SOA内のキャリア密度 $n_{pulse}=N_{pulse}/V(V$ は活性層体積)の時間変化を以下のレート方程式でモデル化した。

$\frac{dn_{pulse}}{dt}$	$=\frac{I_{op}}{qV}\eta_1\eta_2\eta_3$	$-\frac{n_{pulse}}{\tau_c}$	$-\eta_3 \bigg\{ \exp \bigg\}$	$\left(\Gamma L_{eff}\right)$	$\frac{dg^{cw}}{dn}r$	i_{pulse}	$-1\bigg\}\frac{P_{cw}}{\hbar\omega V}$
	$-\left\{\exp\left(\Gamma L_{eff}\right)\right\}$	$r \frac{dg^{pulse}}{dn}$	n _{pulse})-	$1 \left\{ \frac{P_{puls}}{\hbar\omega V} \right\}$	e7		(4.1)

(P_{pulse} 及び P_{CW} :入射光強度, Γ : 閉じ込め係数, dg/dn:微分利得) ここで cw 光とパルス光に対する利 得飽和の違いを表すため、cw 光での誘導放出を記述す る右辺第3項に η_3 が掛けてある。 cw 光とパルス光の 利得はどちらも n_{pulse} に支配されるが、 cw 光によるキ ャリア消費は n_{pulse} 以外の部分からも行われるためで あると考えることが出来る。制御パルスの入射に伴い キャリア密度は Δn 減少し、その際の相互位相変調量は 以下で与えられる。(k_0 : 波数, n_r : 屈折率)

$$\Delta \Phi = k_0 \, dn_r / dn \, \Gamma L_{eff} \Delta n_{nuke} \tag{4.2}$$

このレート方程式モデルにより、ホールディング 光(cw 光)注入下でのキャリア緩和速度の加速や 飽和エネルギー、相互位相変調量の減少などの SOA 特性の実測結果は良く再現することが可能 である。

SOA ゲートの消費電力と動作周波数の関係は以下 の考えに従って求めることが出来る。まず実用的な限 界値に基づき、制御光エネルギーを一定値に定める (ここでは 340 fJ)。また目的とするゲート機能に応じ、 必要な変調量を定める(3R 再生や波長変換ではΔΦ~ 0.3π)。各注入電流条件において、上記の条件を満たす 最大値までホールディング光を注入すると、その時の 有効キャリア緩和速度がゲート動作周波数限界となる。



図5:ゲート周波数と消費電力のモデル計算結果

このモデルと実測した特性値に基づいて SOA 試料 A、Bについて計算したゲート消費電力を図5に示す。 MQW 型の B 種の方がA種より低い消費電力を示して おり、消費電力の少ない 10GHz 付近では B#3 試料が、 消費電力の多い100 GHz付近では B#1 試料が最も優れ た特性を示している。これらの傾向は量子効率の測定 結果を反映したものとなっている。300~1000 mWの 範囲では消費電力はゲート周波数の2乗に比例して増 加しているが、さらに高い周波数ではη3の低下の為に より増加率が高まることも考えられる。B#1 試料が周 波数 160 GHz で消費する電力は 750 mW で、過去の 160 ~320 GHz 実験における 値(400~1000 mW)[5-7]と同程 度に収まっている。またこのモデルの検証として、B#3 試料に対してΔΦ=0.3πの条件で緩和速度と消費電力の 関係を実測した(図5)。測定結果は計算結果と良く一致 しており、モデルの妥当性が示されたと考えられる。

5. 結論

SOA 型超高速全光ゲートにおける動作周波数と消 費電力の関係を、キャリア-光子変換の量子効率を考慮 してモデル化した。実際の SOA について消費電力を予 測するため変換効率の測定を行い、変換効率の SOA 構 造依存性を調べた。高注入電流の条件下では、MQW 型で素子長の長い SOA が高い効率を示すと考えられ る。消費電力についてのモデル計算結果は実測により 妥当性が確かめられた。消費電力は変換効率に応じて 増減し、動作周波数に対しておよそ2乗程度の割合で 増加する。このモデルをより高い周波数領域に発展さ せることで、将来の光ネットワーク進展の洞察をする 上でも有用になると期待される。

6. 謝辞

有益な研究討議及び一部 SOA 試料のサポートにご 助力いただいた KDDI 研究所の西村公佐博士、矢崎智 基氏に深く感謝いたします。本研究は文部科学省「サ ブテラヘルツ周波数の光論理ゲートの基礎研究」プロ ジェクト、及び通商産業省「超低エネルギー・超高速 光蓄積デバイス技術の研究開発」プロジェクトの支援 により行われました。

文 献

- K. E. Stubkjaer, "Semiconductor optical amplifier-based all-optical gates for high-speed optical processing," IEEE J. Selected Topics in Quantum Electron. 6, pp. 1428-1435, 2000.
- [2] Y. Ueno, S. Nakamura, and K. Tajima, "Nonlinear phase shifts induced by semiconductor optical amplifiers with control pulses at repetition frequencies in the 40-160-GHz range for use in ultrahigh-speed all-optical signal processing," J .Opt. Soc. Am. B19, pp. 2573-2589, 2002.
- [3] S. Nakamura, Y. Ueno, K. Tajima, "Error-free all-optical demultiplexing at 336 Gb/s with a hybrid-integrated symmetric-Mach-Zehnder switch," presented at Optical Fiber Communications Conference, FD3, Anaheim, Mar. 2002.
- [4] Y. Ueno, S. Nakamura, and K. Tajima, "Penalty-free error-free all-optical data pulse regeneration at 84 Gb/s by using a symmetric-Mach-Zehnder-type semiconductor regenerator," IEEE Photonics. Technol. Lett. 13, pp. 469-471, 2001.
- [5] S. Nakamura, Y. Ueno, and K. Tajima, "168-Gb/s all-optical wavelength conversion with a symmetric-Mach-Zehnder-type switch," IEEE Photonics. Technol. Lett. 13, pp. 1091-1093, 2001.
- [6] Y. Liu, E. Tangdiongga, Z. Li, S. Zhang, H. de Waardt, G. D. Khoe, and H. J. S. Dorren, "Error-free all-optical wavelength conversion at 160 Gb/s using a semiconductor optical amplifier and an optical bandpass filter," J. Lightwave. Technol. 24, pp. 230-236, 2006.
- [7] Y. Liu, E. Tangdiongga, Z. Li, H. de Waardt, A.M.J. Koonen, G.D. Khoe, X. Shu, I. Bennion and H.J.S. Dorren, "Error-free 320-Gb/s all-optical wavelength conversion using a single semiconductor optical amplifier," J. Lightwave. Technol. 25, pp. 103-108, 2007.
- [8] R. J. Manning and D. A. O. Davies, "Three-wavelength device for all-optical signal processing," Opt. Lett. 19, pp. 889-891, 1994.
- [9] J. L. Pleumeekers, M. Kauer, K. Dreyer, C. Burrus, A. G. Dentai, S. Shunk, J. Leuthold and C. H. Joyner, "Acceleration of gain recovery in semiconductor optical amplifiers by optical injection near transparency wavelength," IEEE Photonics Technol. Lett. 14, pp. 12-14, 2002.