

高速半導体全光ゲートの直流電力消費量の

入力光信号波長依存性の研究

先進理工学専攻 上野研究室 坂野 将太

1. 序論

半導体光増幅器(SOA)は GaAsP 等の III - V 族化合物半導体で形成される光増幅器の一種である。超高速動作、低エネルギー、小型で集積化可能という利点から全光通信を実現する素子として研究が盛んに行われている[1]。全光通信を実現する方法の一つに SOA を用いた遅延干渉型波長変換器(DISC)がある。

DISC ゲートは SOA とマッシュツェンダー干渉計から構成される全光波長変換器である。DISC の消費電力は過去に 160 Gb/s で 750 mW という結果があり、SOA の非線形位相シフト量(NPS)とキャリア回復時間によって大きく左右される[2]。

本研究の研究目標は SOA の波長依存性を評価し、DISC 消費電力と SOA との関係性を解明、より低消費電力の全光ゲートを設計する事である。今回、バルク SOA の入力光周波数測定とそれに基づいた DISC 消費電力の評価報告をする。

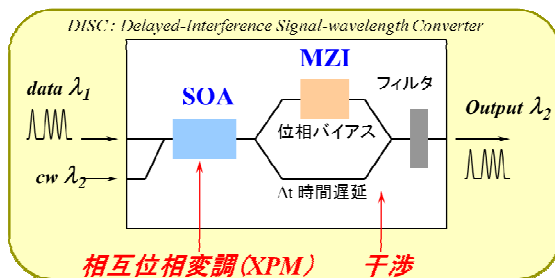


図1 DISC ゲート概念図

2. アシスト光を用いた光加速効果

光加速を利用しない場合、SOA に cw 光とパルス光を同時に入力するとキャリアがパルス光の増幅に消費されて減少し、その後、注入電流によってキャリア密度が回復する。現在光加速の方法のひとつに、信号光と制御光の他に、第3の波長の光を透明波長に入力するアシスト光である[3]

図2は一般的な SOA の利得スペクトルと入力光波長の関係を示している。

アシスト光の原理は、SOA の利得がパルス入射によるキャリア消費により利得が A から B へと全体的に下がる。すると透明波長に入力されているアシスト光が利得負の領域となり、光が吸収しキャリアの励起に使用される。したがってアシスト光を入力した場合には、注入電流によるキャリア回復とアシスト光の吸収によるキャリア回復の2種類となるため SOA の回復時間を短縮することができる。

アシスト光を入力したレート方程式は次式で表すことができる。

$$\frac{1}{\tau_{assist}} = \frac{1}{\tau_{carrier}} + \Gamma \left. \frac{dg}{dN} \right|_{transp.} I_{SOA} \quad (1)$$

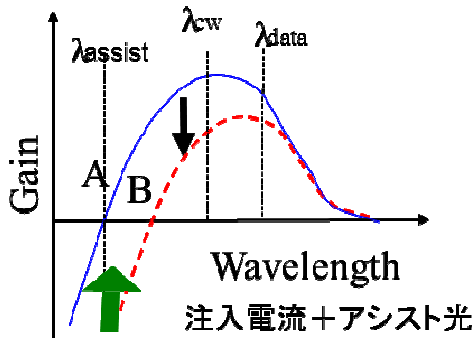


図2 SOAの利得スペクトル

第1項はアシスト光のない状態でのキャリア寿命を示している。第2項は透明波長の利得差はアシスト光の強度に比例することを表している。 Γ は光閉じ込め係数である。

3. 実験構成

SOAのNPSとキャリア回復時間の評価実験の構成には、ポンプ・プローブ計測方法にヘテロダイン計測方式を加えた、光ヘテロダイン方式ポンプ・プローブ計測システム[4][5]を使用した(図3)。OPO光源からは繰り返し周波数80 MHz、幅500 fsのパルスが出力される。このシステムではSOA(Inphenix社製chip型)のNPSとキャリア回復時間をサブピコ秒スケールで同時に計測できる。我々はこの構成を用いてバルクSOAのNPSとキャリア回復時間を測定し、DISC消費電力に着眼し評価した。

またSOAの消費電力を評価するために、広帯域波長可変cw光源を使用してSOAの利得

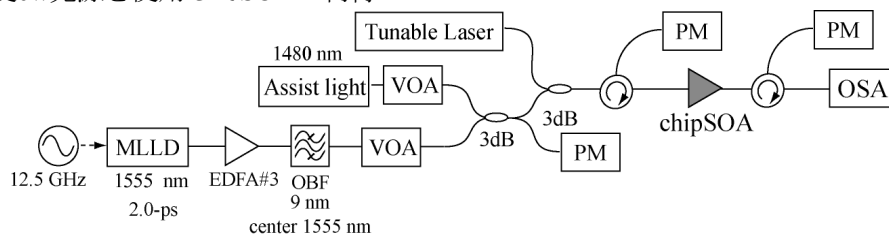


図4 利得、NPS スペクトル実験セットアップ

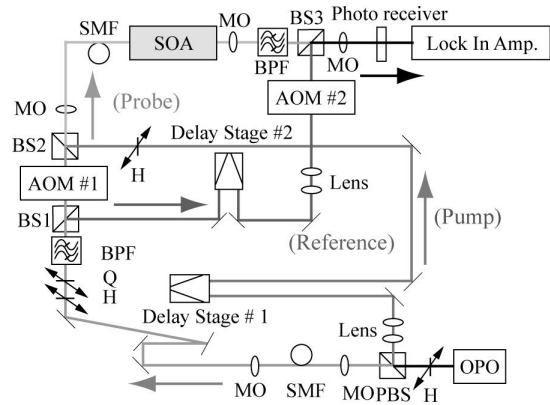


図3 光ヘテロダイン方式ポンプ・プローブ計測システム(OPO: Optical Parametric Oscillator, AOM: Acousto-Optic Modulator, PBS: Polarizing Beam Splitter, SMF: Single Mode Fiber, BPF: Band Pass Filter, BS: Beam Splitter, MO: Microscope Objective, H: Half-wave plate, Q: Quarter-wave plate)

スペクトルと位相スペクトルの測定を行った。またアシスト光を使用しての利得スペクトル位相スペクトルの測定を行った。今回使用した実験セットアップは図6に示す。Tunable Laserには3つのエタロンを使用したバーニア効果を利用した広帯域波長可変cw光源を、アシスト光には中心波長1480 nmのファブリ・ペローレーザ(FP-LD、図5)のアシスト光使用し、励起パルスには繰り返し周波数12.5 GHz、中心波長1555 nm、パルス幅2.0 psを用いた。これらのセットアップを用いてバルク型chip型SOAの評価を行った。

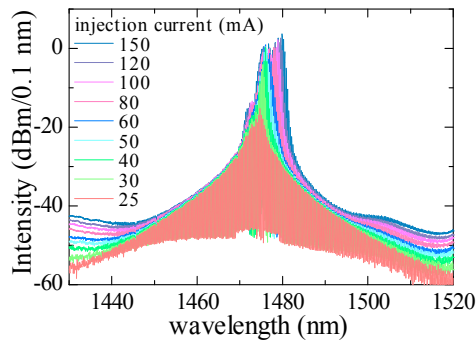


図5 アシスト光のスペクトル

4. SOAのキャリア回復時間の入力光周波数依存性と利得、位相スペクトル

図6(a)にバルク型SOA(活性層長700 μm)とエルビウム添加ファイバー増幅器(EDFA)の利得スペクトルを示す。また透明波長付近に第3の光としてアシスト光(中心波長1475 nm, ファブリペローレーザー)を入射した状態のSOAの利得スペクトルを示す。透明波長付近のアシスト光はSOAの利得を大きく下げることが結果から見て取れる。またSOAの利得帯域はEDFAのそれと比べCバンド帯域を超えて広く分布している。

図6(b)にSOAのキャリア回復時間とNPSの入力プローブ光周波数依存性の図を示す。緩和時間測定時のSOA注入電流は150 mAである。SOAの消費電力は、NPSが 0.3π となる電力をNPSのSOA注入電流依存特性の実験結果を利用し求めた。電力値は電圧電圧特性の結果から電圧と電流をかけた値で計算している($P_{\text{soa}} = V_{\text{soa}} * I_{\text{soa}}$ [mW])。

利得スペクトル同様キャリア回復時間の入力周波数に対する依存性は広い帯域で回復時間の差が40 ps以内と少ない結果となった。この原因としてはバルク型のSOAを使用しているため、キャリアが広い帯域にわたり分布していることによると考えられる。

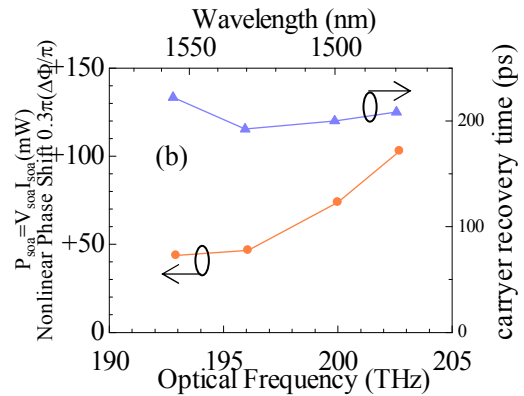
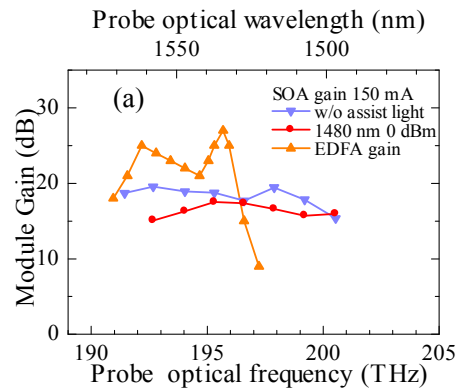


図6 SOAの入力光信号波長依存性

(a)SOA と EDFA の利得スペクトル(EDFA利得スペクトル^[5])、(b)SOA のキャリア回復時間と NPS

5. DISC の 1 ビット当たりの消費電力量の入力光周波数依存性

図7にバルクSOA(活性層長1000 μm)のNPSの直流電流消費量依存性を示す。注入直流電力に伴いNPSは指数関数的に増加する傾向を示した。今回はこのデータを使用しNPSが 0.3π となる電力を求めた。

図8には入力光周波数のデータ信号1ビット当たりに消費する電力量の依存性を示す。電力量はDISCで波長変換を行うのに必要なNPS量である 0.3π を基準に電力量をDISCの

動作周波数(今回はSOAのキャリア緩和時間を使用した。)を割ることで算出した。グラフから入力光周波数が低くなるほど消費電力は減少していることがわかる。この要因としては入力光周波数のNPS量の依存性が多く影響しているためと考えられる。考察の理由として図6(b)SOAのキャリア回復時間の入力周波数依存性の結果から、キャリアの回復時間は入力周波数に対する影響は少ないことがわかる。次に図7を見るとNPS 0.3π を満たす電力では長波長(低入力光周波数)側で高い値を示している。この緩和時間とNPSの結果からSOA消費電力の入力光周波数依存性はNPSの影響が大きいと考えた。

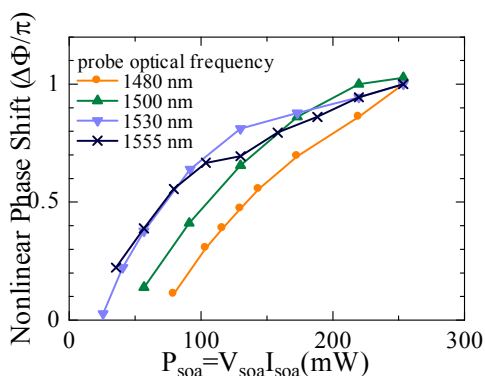


図7 NPSのSOA直流電力量依存性

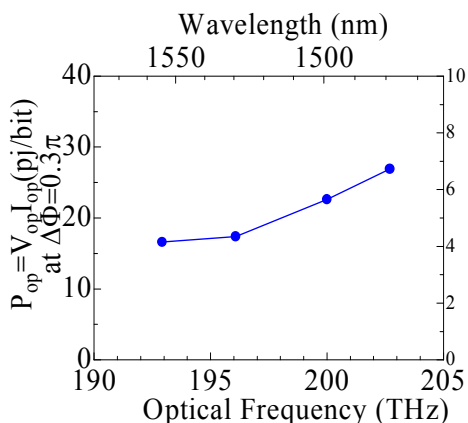


図8 NPS 0.3π での1ビット当たりの直流電力消費量の入力プローブ光依存性

6. 透明波長にアシスト光を入力する光加速効果を利用したSOA消費電力の抑制実験結果

図9にSOAの図10にSOA消費電力のアシスト光強度依存性の図を表す。SOA透明波長にレーザ(図5、中心波長1475 nm, FP-LD)を入力しているので図6(a)と同様に強い光強度でも、NPS量を下げるといった、キャリア密度の低下を起こしていない。アシスト光強度を強めるに従ってキャリア回復時間が短縮された。ただしアシスト光強度4 mWで100 ps(SOA 150 mA、活性層長700 μm)に達すると、それ以上緩和時間は短縮されなかった。1つ目の原因として使用したアシスト光がFP-LDで出力帯域が1460-1490 nmと広範囲であるため、光強度が強いと出力がSOA利得帯域部分にかかるため利得を減らしてしまった。2つ目として透明波長に入射しているため、キャリア回復に使われる光強度量が少ないので、入射強度を強くしても効果が少ないことが挙げられる。今回入射した光強度は8 mWまでだが、高強度の光をSOAに入射するとSOAの端面が焼けて損傷する恐れがある。そのため8 mW以上の実験は現在研究室では困難なためこれ以上の加速効果は難しい。

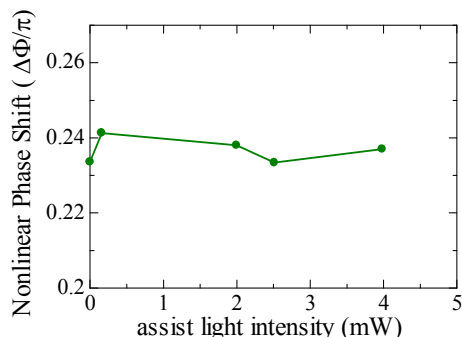


図9 NPSのアシスト光強度依存性

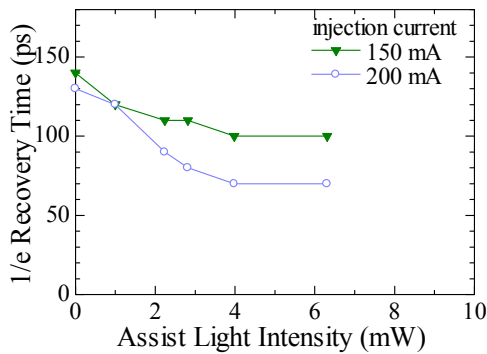


図10 光加速効果のアシスト光依存性

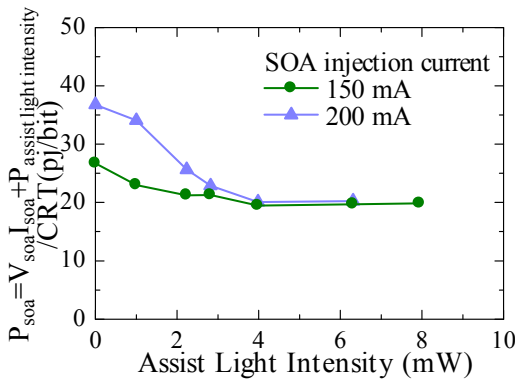


図10 1ビット当たりの直流電力消費量のアシスト光依存性

6. 結論

今回はバルクSOAの消費電力に対して入力周波数依存性について調査し、そのうえでどのような条件や状態がDISCゲートの消費電力の抑制に好ましいかを調査した。

初めにバルク型SOA(活性層長700 μm)の利得スペクトルとキャリア回復時間の入力周波数依存性を測定した。SOAの利得は195 THzを中心に10 THzの広い帯域にわたり20 dB程度の利得を得られた。キャリア回復時間も利得と同様の範囲で回復時間に差が40 ps以内と少ない結果を得られた。この原因としてはバルク型のSOAを使用しているため、キ

ャリアが広い帯域にわたり分布していることと考えられる。

次にSOA消費電力の入力周波数依存性は傾向として長波長側で消費電力が低い結果を得た。この要因としては光周波数のNPS量の差が影響していると考えられる。理由としてキャリアの回復時間は入力周波数に対する影響は少なく、NPS量の入力周波数依存性は0.3□を満たす低い電力では長波長(低光周波数)で高い値を示している。この2つの結果から消費電力の入力光周波数依存性はNPSの影響が大きいと考えた。

最後にSOA消費電力のアシスト光強度依存性を評価した。今回使用したアシスト光(中心波長1475 nm, FP-LD)はアシスト光強度を強めるに従ってキャリア回復時間が短縮された。ただし4 mWで100 ps(SOA 150 mA、活性層長700 μm)に達すると、それ以上短縮されなかった。原因としてアシスト光のレーザの出力帯域が1460-1490 nmと広範囲であるため、光強度が強いと出力がSOA利得帯域部分にかかるため回復に使われなかったと考えられる。

今後の課題としてはアシスト光の入力周波数による消費電力の依存性の分析。構造の異なる半導体材料(例えば量子井戸、量子ドット)を用いて消費電力に関する評価を行う、また今回の評価はSOAの消費電力をキャリア回復レートとNPSから間接的に評価したものであるので、実際にDISCゲート動作時の消費電力を評価し消費電力の低減を行えるSOAを判断するなどが挙げられる。

本研究が今後の光半導体の発展に少しでも役立つことを期待する。

参考文献

- [1] Y. Ueno, S. Nakamura, and K. Tajima, J. Opt. Soc. Am. B, vol.19, No.11, pp2573-2589 (2002).
- [2] J. Sakaguchi, F. Salleras, K. Nishimura, Y. Ueno, Optics Express, vol. 15, No. 22, pp. 14887-14900, (2007).
- [3] M. A. Dupertuis, J. L. Pleumeekers, T. P. Hessler, P. E. Selbmann, B. Deveaud, B. Dagens, and J. Y. Emery, “Extremely fast high-gain and low-current SOA by optical speed-up at transparency,” IEEE Photon. Technol. Lett., 12, 2000, 1453-1455.
- [4] M. Honma, F. Salleras, T. A. Nguyen, Y. Ueno, N. Ozaki, K. Asakawa, IEICE-LQE-2009-G15.
- [5] H. Nakamura, K. Kanamoto, Y. Nakamura, S. Ohkouchi, H. Ishikawa, J. Appl. Phys, vol. 96, No. 3, pp. 1425-1434, (2004).

発表実績

- [1] 坂野将太、Nguyen Tuan Anh、吉川恵太、上野芳康、「バルク型半導体光増幅器の入力光周波数依存消費電力調査」、2012年春季 第59回応用物理学会関係連合講演会、18a-GP4-8
- [2] S. Sakano, K. Hirai, T. A. Nguyen, and Y. Ueno, “Dependences of dc-power consumptions in ultrafast all-optical semiconductor gates on their input-data's optical center frequencies,” Triangle Symposium on Advanced ICT 2012, CD-6