

# 光加速中の半導体光増幅器を用いる複素スペクトル合成方式全光ゲートの研究

先進理工学専攻 上野研究室 山本 輝

## 1. 序論

半導体光増幅器(SOA)を含む全光ゲートは、超高速光通信に必要な波長分割多重方式を実現する装置として期待されており、既に複素光スペクトル合成器(OSS)を利用する全光ゲート(OSS-Gate)方式が提案され、その有効性が示されている[1, 2]。

本研究の目的はOSS-Gateの強度・位相制御フィルタプロファイルの設計手法を開発し、人工的に波形を整形・制御することで300GHz級のOSS-Gate方式超高速全光ゲートを達成することである。

一般に、SOAを利用する全光ゲートの動作周波数限界はSOAのキャリア緩和時間に依存する。そのため研究目的を達成するためにはキャリア緩和時間を短縮する必要がある。既に、SOAへ入力する連続光(cw)強度を高めていくことで光加速効果を利用する方法やバンドパスフィルタを用いる方法が提案され、これらの光加速効果を用いた遅延干渉型などの全光ゲートの出力波形の高速動作検証は既に多数報告されている[3, 4, 5]。

今回は、はじめてSOAに光加速作用を加えて緩和時定数を短縮したOSS-Gate方式の出力波形特性を検証したので報告する。

## 2. 光加速の原理

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。

次に、光加速を利用する場合、SOAに入力するcw光を徐々に強めていくと飽和出力強度を目安に利得が飽和してSOAのキャリアの定常状態レベルが低下する。このとき、先と同様にパルス光を加える。SOAは既に飽和しているためパルス光の増幅に使われるキャリアが減少する。注入電流は一定であると仮定すると回復速度は同じであるため、cw光が強い方が短い時間で定常状態に戻ることができる。

光加速効果により短縮される時定数は次式で表すことができる。

$$\tilde{\tau} = \frac{\tau}{1 + \frac{P_1}{P_{sat}}} \quad (1)$$

$\tilde{\tau}$ は光加速効果によって短縮された緩和時定数、 $\tau$ は光加速を利用しないときの緩和時定数、 $P_1$ は入力するcw強度、 $P_{sat}$ はSOAの飽和出力強度である。

この式をもとに短縮された緩和時定数を計算した結果を図1に示す。

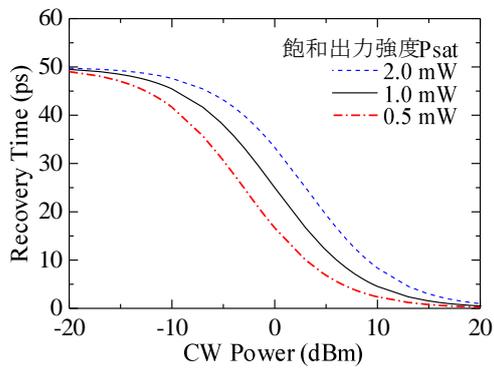


図 1 緩和時定数の短縮効果

光加速効果による緩和時定数の短縮は SOA 自身の飽和出力強度に依存することがわかり、入力光強度を十分に高める必要があることがわかる。

### 3. 光加速効果の観測実験

光加速効果の観測実験の構成を図 2 に示す。パルス光源 (MLLD、繰り返し周波数: 10 GHz、波長: 1550 nm、時間幅: 2.7-3.0 ps) から出力したパルスとレーザ光源から出力した cw 光 (波長: 1545 nm) を SOA モジュール (応用光電研究室社製: 注入電流 100 mA) に同時に入射した。SOA 内で相互利得変調 (XGM) と相互位相変調 (XPM) を受けた cw 光のみを、5 nm 帯域幅の BPF により透過して観測した。まず、光加速効果の起きる cw 強度を決めるために、cw 光強度を -30 dBm から +5 dBm まで徐々に強めていき、非線形位相シフト量、時間波形を測定した。このとき、パルスを 80 GHz まで多重化した場合についても同様に測定した。入力パルスエネルギーはすべての実験で 40 fJ/pulse に平均強度を観測しながら調整した。まず、繰り返し周波数 10 GHz のときの XGM 波形を図 3 に示す。緩和時定数は cw 強

度が強くなるほど短くなっていくことがわかる。また、図 4 を見ると緩和時定数の短縮は強度が強くなるにしたがって徐々に緩やかになっていることがわかる。

第 1 緩和時定数は cw 強度 +5 dBm のときに最も短く実測値で 25 ps、-10 dBm のとき 45 ps であった。

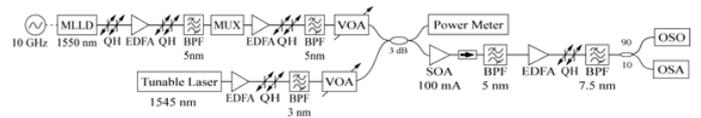


図 2 光加速効果の観測実験

BPF: Band Pass Filter, OSO: Optical Sampling Oscilloscope, OSA: Optical Spectrum Analyzer, VOA: Variable Optical Attenuator

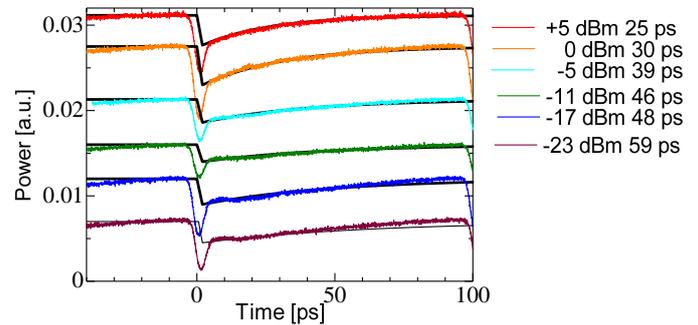


図 3 cw 強度毎の緩和時間波形

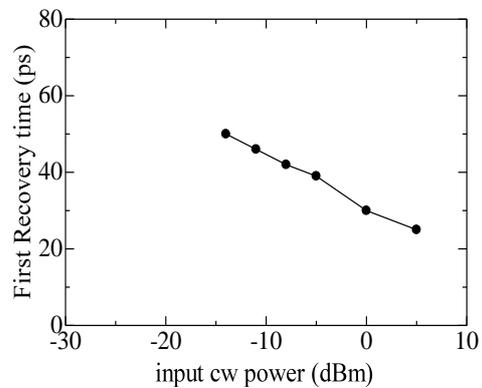


図 4 cw 強度に対する緩和時定数

次に、繰り返し周波数を 80 GHz まで多重化したときの XGM 波形、光スペクトル波形を図 5 に示す。図 5(a)および(b)を見ると cw 強度が強いほど利得変調量が低下していることがわかる。また、図 5(c)を見ると cw 強度が強まるほど、ASE レベルが下がり、中心波長と短波長側の隣のピークとの差が大きくなっていき、非線形位相シフト量が減少していることがわかる。これは、キャリア密度の定常状態が低下し、光加速効果が表れていることを示していると判断した。

また、計算モデルを用いて第 2 緩和時定数は cw 強度+5 dBm のとき 8 ps、-10 dBm のとき 4 ps である

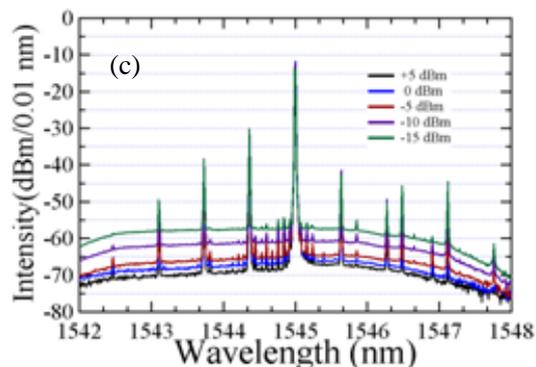


図 5 実験結果

(a)相互利得変調 (XGM) 波形

cw: +5 dBm

(b)相互利得変調 (XGM) 波形

cw: -10 dBm

(c)相互位相変量 (XPM) スペクトル波形

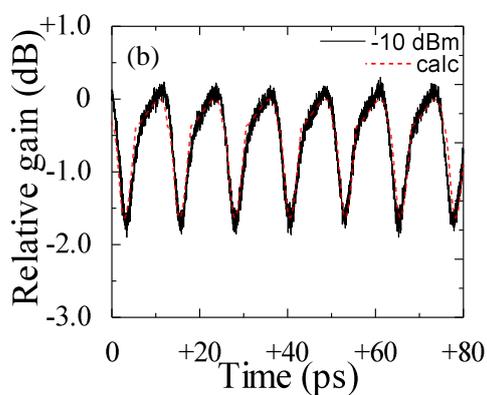
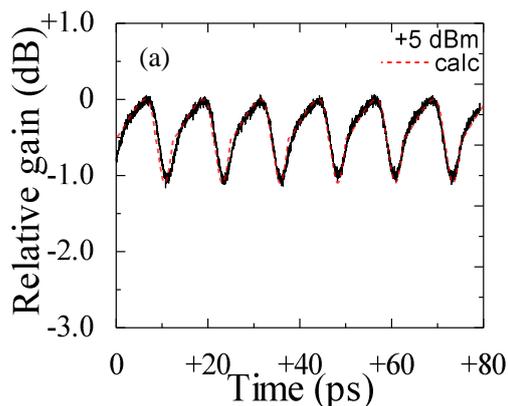


図 5(c)に示した光スペクトルから非線形位相シフト量を示した結果と SOA に cw のみ入力した場合の飽和特性を図 6 に示す。

cw 光強度が-10 dBm を超えると NPS が減少するとともに、緩和時定数が短縮していくことがわかる。この結果より、光加速効果を利用できる cw 強度として+5 dBm を選択し、非加速状態を-10 dBm とした。

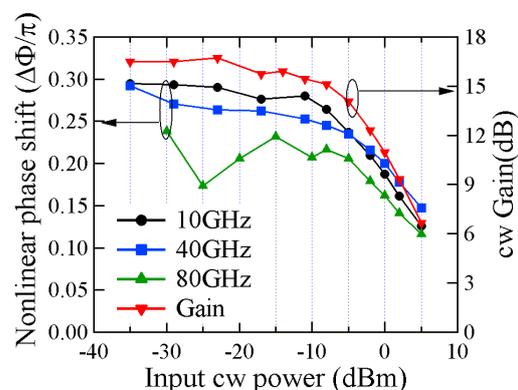


図 6 飽和利得特性と NPS 量

#### 4. シミュレーションによる OSS-Gate 動作 プロファイル設計

2節の実験結果をもとに、シミュレーションによる位相スペクトルの予想を行った結果が図 7 である。SOA 出力の位相スペクトルは中心波長成分と、その近傍成分はほとんど同一であるのに対して、中心波長成分からは離れるにつれて差異が大きくなるのがわかる。

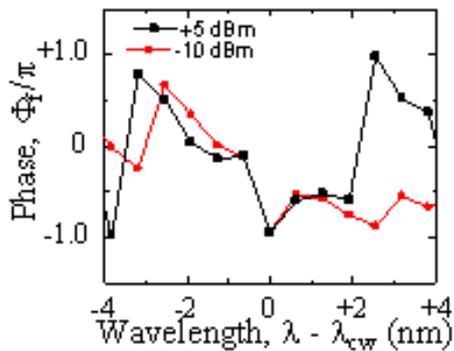


図 7 SOA 出力位相スペクトル

図 5(a) (b) および図 7 の結果をもとに OSS-Gate 出力波形のシミュレーションを行った。

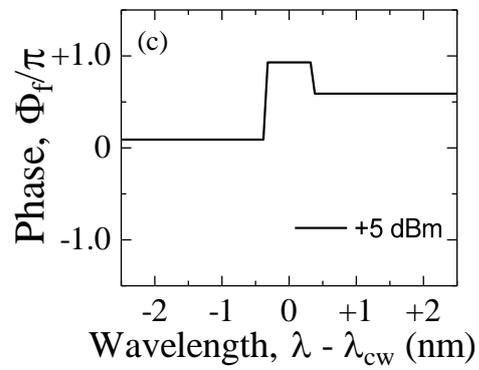
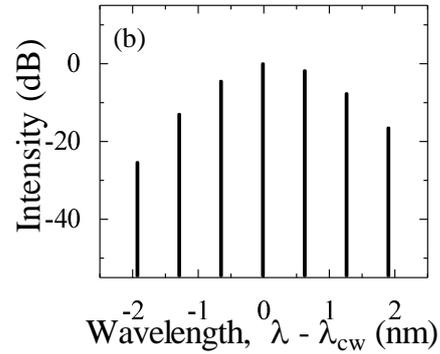
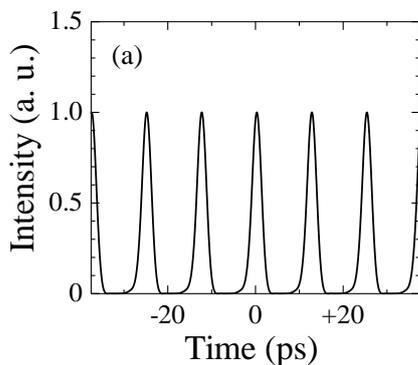


図 8 OSS-Gate の出力波形と位相プロファイル

(a) 出力時間波形 (b) 出力スペクトル  
(c) 位相制御プロファイル

位相制御については図 8(c) のように長波長側成分、短波長側成分、中心波長成分の 3 つの帯域に区別して位相制御量を調節し、強度制御については図 8(b) のようなスペクトル強度を持つように制御することで図 8(a) のような歪のない時間波形を得ることができる見込みがたった。次節以降、この設計結果を用いた実験結果について述べる。

#### 5. OSS-Gate 実験構成・実験結果

OSS-Gate の実験構成を図 9 に示す。

MLLD(時間幅 : 2.7-3.0 ps) の出力を光時分割多重器 (MUX) で 80 GHz に多重し、cw 光と同時に SOA へ入射した。変調を受けた cw 光のみを、5 nm 帯域幅のフィルタにより透過し、帯域可変スペクトルシェイパ(VBS)に入射した。本研究では、オプトクエスト社製 VBS を用いて実験を行った。

VBS は最大強度消光比: +40 dB、最大位相制御量: 2 $\cdot$ 、周波数分解能: 10 GHz の性能を有している。

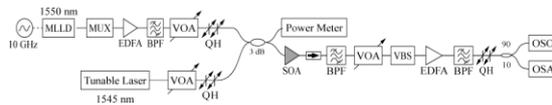


図 9 OSS-Gate 実験構成

VBS: Variable Bandwidth Spectrum Shaper

歪のない出力パルス波形を得られるようにプロファイル設計し、VBS にプロファイルに忠実な強度・位相制御を施して出力波形を観測した。

結果を図 10 に示す。モデル通りに設計した場合の消光比は著しく低い結果となった。これは、実験時に VBS への過入力为了避免するために VBS 直前に減衰器を配置して信号強度を減衰させているのに加え、モデルに対して忠実な強度分布を実現するため、中心波長成分を強く減衰させていることで観測系に使用している EDFA へ入力される信号強度が小さくなってしまったためであると推測している。

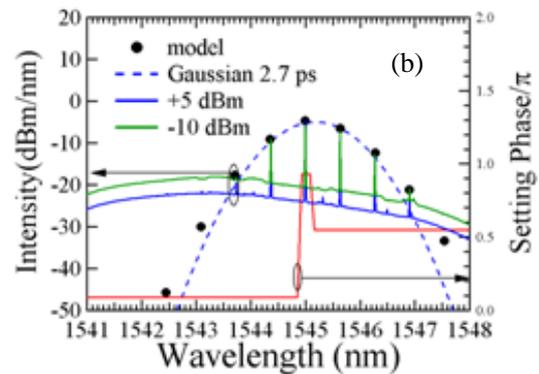
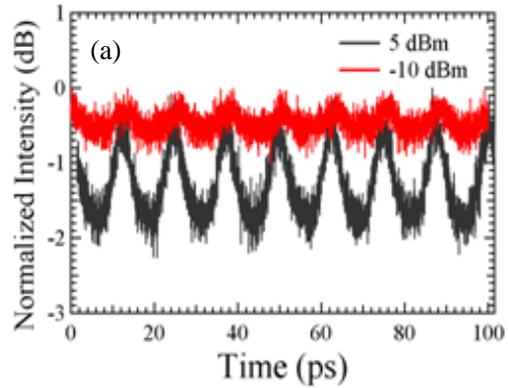


図 10 モデルに忠実な制御を施した際の出力波形

(a) 時間波形 (b) スペクトル

そこで、経験的に短波長成分を優先させてモデルに一致させて出力波形の改善を試みた。結果を図 11 に示す。

80 GHz クロック波長変換において、cw 強度 +5 dBm のとき最大で消光比 12 dB、パルス幅 5.1 ps のパルスを得た。このときの VBS 制御位相プロファイルを使用したまま、出力スペクトルの各ピーク間の強度比を保ちながら cw 強度を徐々に弱めていくと、消光比の低下とともに、波形の立ち上がり、立ち下り部に歪が見られ、パルス幅が広がっていった。

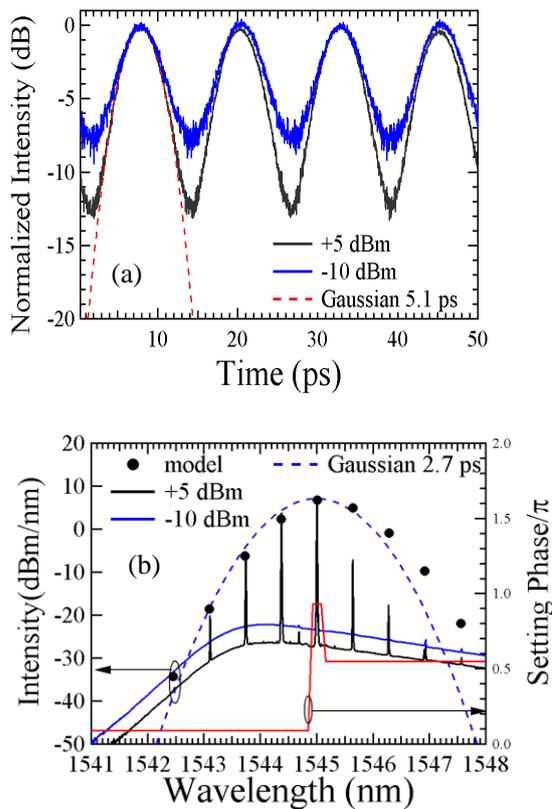


図 11 出力波形  
(a) 時間波形 (b) 光スペクトルと位相プロファイル

cw 強度を弱めると消光比が低下する主な原因は第1緩和時定数の増大であると考えられる。今回の結果より、OSS-Gate 方式においても光加速効果を利用することで出力波形消光比を改善することができることを実証した。一方、VBS 位相制御プロファイルを固定し、スペクトルのピーク間強度比を一定に保っているにもかかわらず波形歪が表れた原因は、光加速の強度を弱めたことで SOA 内部のキャリア密度の定常状態が変わり、出力光の位相スペクトルを変動させているためであると推測している。

## 6. 結論

SOA の光加速作用を利用した OSS-Gate 方式で繰り返し周波数 80 GHz の波長変換を検証した。光加速効果を実際に観測し、SOA の緩和時定数は cw 強度+5 dBm のとき、25 ps、-10 dBm のときに 45 ps となった。80 GHz での OSS-Gate 実験においてはスペクトルの強度分布・位相プロファイルを固定したにも関わらず、cw 強度を弱めると波形が変動したことから、光加速効果を用いた OSS-Gate を行う場合には位相プロファイルの調整が必要であることがわかった。この原因としては、光加速効果の強弱が、SOA 内部のキャリア密度の振動へ影響を与え、結果として出力位相スペクトルに変動をもたらしたためであると考えている。この結果はデータ信号を用いる際に、パターン効果による出力信号強度、消光比のばらつきだけでなく、波形歪の発生の可能性を示している。今後は、データ信号を入力した場合の OSS-Gate 出力波形特性の検証を行っていく予定である。

## 参考文献

- [1]Y. Ueno et al., Optics Express **14**, 2006, 12655.
- [2]T. Nishida et al., LEOS 2009, TuB4, 143.
- [3]R. J. Manning et al., Opt. Lett. **19**, 1994, 889-991.
- [4]Y. Liu et al., OSA/IEEE J. Lightwave Technol. **25**, 2007, 103.
- [5]J. Sakaguchi et al., Jpn. J. Appl. Phys. **47**, 9, 2008, 7182-7189.