

同一波長光加速・偏光分離方式に基づく

高速半導体ゲートの研究

電子工学専攻 上野研究室 山路 健瑠

1. はじめに

現代のインターネットサービスには高画質な動画や容量の大きなデータ通信の需要が高まり、ネットワークには更なる高速化・大容量化が求められている。そんな高速・大容量な次世代ネットワークの実現のため、電気信号を介さない全光ゲートの実用化が期待されている。特に、半導体光増幅器 (Semiconductor Optical Amplifier, SOA) を用いた全光ゲートは超高速応答・低消費電力・集積化可能性などの観点から、活発な研究が行われている[1]。SOA は入力光に対して非線形位相シフトを与える非線形素子として使われ、ゲート動作で用いる非線形位相シフト量は 0.2π 程度で十分とされている。また、SOA を用いた全光ゲートの動作周波数は SOA 内のキャリアの緩和時間に依存する。一般的にこの緩和時間と非線形位相シフト量の間にはトレードオフ関係が存在する[2]。過去の SOA を用いた全光ゲート研究はバンドパスフィルタ (Band Pass Filter, BPF) による信号の取り扱いが容易な異波長方式が主流であった。しかし、異波長方式では緩和時間と非線形位相シフト量のトレードオフ作用を必要以上に高める可能性が高かった。

本研究では異波長方式におけるトレードオフの増大作用を示すと共に、SOA へ入力する信号の波長を同一波長にすることで、上述の問題を解消し、光加速作用

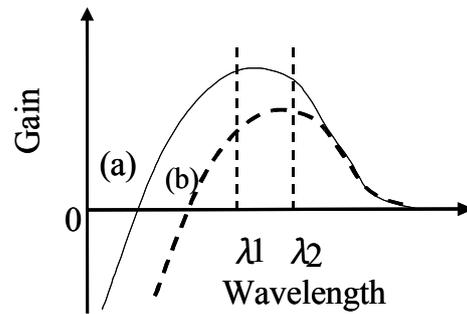


図1. 入力光子密度による利得スペクトルの変動

- (a)SOA内のキャリア密度 大 (実線)
- (b)SOA内のキャリア密度 小 (破線)

を高める効果があることを実証した。

2. 原理

図1に一般的なSOAの利得スペクトルモデル図を載せた。 λ_1 と λ_2 はそれぞれSOAに対する入力連続光 (continuance wave, cw光) と入力パルス光の波長を表す。緩和時間はSOA内のキャリア密度変動に依存する。そのため、cw光でSOA内のキャリアを常に消費し、キャリア密度の定常レベルを下げることで緩和時間の短縮が可能となる(Holding Beam 効果, HB効果[3])。一方、非線形位相シフト量はパルス光によって消費されるキャリア数に比例する[4]。

以上の2つが要因となり、異波長方式では緩和時間と非線形位相シフト量のトレードオフ作用が顕著になる可能性が高かった。それは、パルス光の利得よりもcw光の利得が大きい領域(図1(a))では、HB効

果により緩和時間を加速できる。しかし、非線形位相シフト量を大きくするには、強い強度を持ったパルス光が必要となる。強いパルスを入力すると、利得スペクトルは図1(b)の曲線になり、2つの信号に対する利得の大小関係が反転する。この状態ではcw光で消費するキャリアが減少し、HB効果が弱まるためSOAの緩和時間を増加させる。この利得の反転が緩和時間と非線形位相シフト量のトレードオフを必要以上に高めていた。

本研究では cw 光とパルス光を同一波長にすることで、各信号に対する利得の大小関係の反転を抑え、前述のトレードオフ作用の増大を抑制することが可能になる。

3. 実験構成

本研究では異波長方式と同一波長方式の2つの条件で、緩和時間と非線形位相シフト量を測定した。その実験構成の概要を図2に示す。モードロックファイバレーザ(Mode Locked Fiber Laser, MLFL)から出力した 12.5 GHz のクロックパルスは中心波長を 1555 nm とした。cw 光光源には分布帰還型レーザダイオード(Distributed Feedback Laser Diode, DFB-LD)を用い、その中心波長は異波長

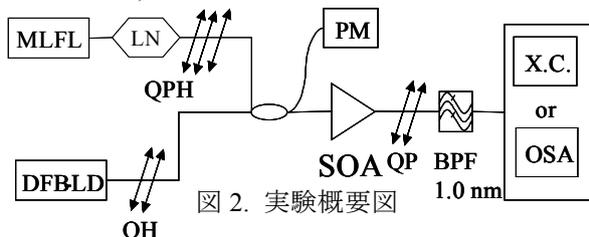


図 2. 実験概要図

- Q: Quarter wavelength plate
- H: Half-wavelength plate
- P: Polarizer PM: Power Meter

入力時が 1540 nm、同一波長入力時が 1555 nm とした。緩和時間測定は入力パルスエネルギーを 300 fJ、繰返し周波数を 1.25 GHz、入力 cw 光強度を -10, -3, 0, +3 dBm の条件で行い出力時間波形を相互相関計 (Cross Correlator, XC) で計測した。この時、パルス光の繰返し周波数を 1.25 GHz へ下げる際に、LN 変調器を使用した。また、非線形位相シフト量の測定では入力 cw 光強度を 0 dBm とし、パルスのエネルギーを増減させ、出力スペクトル波形を光スペクトラムアナライザ (Optical Spectrum Analyzer, OSA) で計測した。全ての測定は SOA への注入電流を 150 mA に固定して行った。

SOA の入出力部には、偏光制御素子を用いた。これは従来の異波長方式では cw 光とパルス光に対して BPF による波長分離を行っていたが、同一波長方式では波長分離が不可能なため、cw 光とパルス光を直交偏光にする偏光分離方式を採用するためである。同一波長方式で用いた BPF の役割は、SOA から出力される増幅自然放出 (Amplified Spontaneous Emission, ASE) を除去するためである。なお、SOA は偏光無依存のものを使用した。

さらに、実験結果と原理の関連性を調べるために、SOA 内のキャリア密度の変動に対する SOA の利得の波長依存性、及び上記の緩和時間測定時と同様の条件で、SOA の利得スペクトルの測定を行った。

4. 結果と考察

4.1 異波長入力時の各波長の獲得利得

実際に SOA へ異なる波長の光を入力したときの強度と利得の変動を測定した。

実験条件は2つのDFB-LDからそれぞれ-20 dBmのcw光を入力し、SOAへの注入電流を0 mAから250 mAまで増加させた時の各cw光が受け取る利得を測定した。また、SOAへの注入電流を150 mAに固定し、2つのDFB-LDからのcw光入力強度を-30 dBmから+3 dBmまで増加させた時の各cw光が受け取る利得を測定した。結果はそれぞれ図3の(a)と(b)である。

図3(a)から、SOAへの注入電流を増加させると、1555 nmのcw光と1540 nmのcw光との利得の大小関係が反転していることがわかる。この実験はSOAへの注入電流を増減させることにより、SOA内の

キャリア密度の値を増減させている。SOAの利得スペクトルは、キャリア密度が高い場合はピークが短波長側にシフトし、キャリア密度が低い場合はピークが長波長側にシフトする。従って、注入電流の増加に伴い、キャリア密度が次第に増加していくためピークが短波長側にシフトし、1540 nmと1555 nmのcw光が獲得する利得が次第に反転したといえる。

続いて図3(b)について述べる。図3(b)でも図3(a)の結果と同じように各cw光の獲得する利得が反転しているのがわかる。この実験では注入電流は一定の元で、入力cw光強度を増加させることにより、SOA内のキャリアを消費することでキャリア密度の低下を促している。従って、キャリア密度の低下により、SOAの利得スペクトルのピーク波長は長波長側にシフトし、1540 nmと1555 nmのcw光が獲得する利得量が反転したといえる。

これらの結果から、SOA内のキャリア密度の変動により、制御光と信号光の利得が反転するという結論が得られる。従って、キャリア密度の変動による利得の変動が緩和時間と非線形位相シフト量のトレードオフ関係を必要以上に高めていた傍証を得ることが出来たといえる。

4.2 各入力方式による緩和時間

実際に入力方式の違いによる緩和時間波形を測定した後、緩和時間を算出し、緩和時間の入力cw光強度依存性を調査した。測定条件は注入電流を150 mA、入力パルスエネルギーを300 fJに固定し、入力cw強度を-10 dBm、-3 dBm、+3 dBmの3種類で行った。

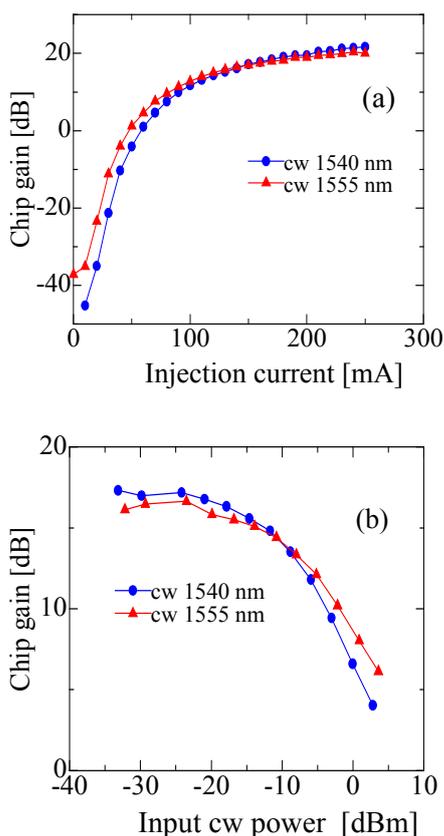


図3 異なる波長の獲得する利得の注入電流と入力光強度依存性

- (a) 注入電流依存性
- (b) 入力光強度依存性

実際の緩和時間波形の一例を図 4 に示す。これから同一波長入力時に比べて異波長入力時では利得変調量が大きくなっていることがわかる。また両方式でその利得変調量は cw 光強度を大きくすると小さくなる傾向があった。これは cw 光強度によって SOA のキャリアが消費され、利得が下がる、HB 効果を表している。

次に、緩和時間の cw 光強度依存性を図 5 に示す。なお、緩和時間の定義は種々あるが、本研究では緩和時間の定義を SOA の 2 種類の緩和過程のうち、遅い緩和過程にのみ着目し、遅い緩和が定常状態の $1/e$ (63.2%) まで回復するまでの時間を緩和時間と定義した。図 5 から、入力方式に関わらず入力 cw 光強度を増加させると緩和時間は短縮されることがわかる。これは前述した HB 効果による作用で、HB 光によって SOA 内のキャリアが減少しキャリア密度の定常状態レベルが下がるために起きている現象である。異波長入力時では HB 効果が発生することは過去の研究から知られていたが、同一波長入力時でも HB 効果が起きることを本実

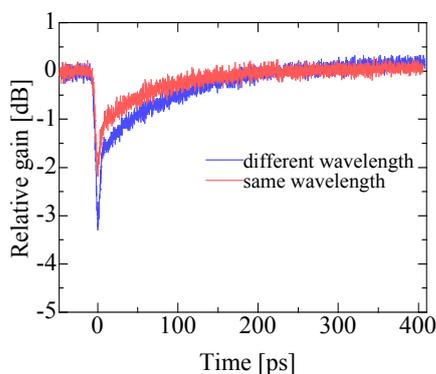


図 4 緩和波形の一例
 入力 cw 光強度 +3 dBm
 入力パルスエネルギー 300 fJ

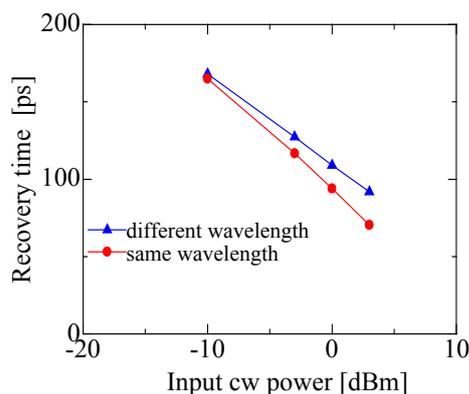


図 5 入力 cw 光強度と緩和時間の関係

験結果から得ることが出来た。また、cw 光強度が弱い場合では入力方式による緩和時間の差は小さいが、cw 光強度を強くするに従い、緩和時間に差が出てきている。その傾向は同一波長入力時の方が短い緩和時間となり、HB 効果が大きい結果となった。その定量的解析を、入力 cw 光強度が 3 dBm の条件で行うと、異波長入力時の緩和時間が 92 ps であったのに対して、同一波長入力時では 71 ps となった。その短縮率は約 23 %となる結果が得られた。

この現象について考察する。実際の cw 光の波長にはパルス光も存在するため、両者が利得を奪い、その場合はパルス光の利得が小さくなり、パルス光が消費するキャリアが異波長入力時に比べて、同一波長入力時では相対的に少なくなる。従って、HB 効果を高めることがいえる。以上により、同一波長方式の HB 効果による緩和時間加速作用が実証された。

4.3 各入力方式による非線形位相シフト量

次に異波長入力と同一波長入力による非線形位相シフト量を測定し、入力連続光との関係性を調べた。入力パルス光の

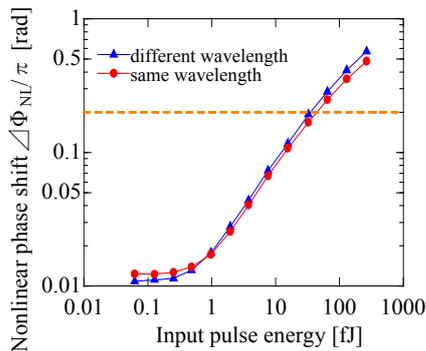


図 6 入力パルスエネルギーと非線形位相シフト量の関係

繰返し周波数は 12.5 GHz とし、SOA への注入電流は 150 mA とした。また、SOA へ入力する cw 光強度を -3 dBm、0 dBm、+3 dBm の 3 種類で行った。

HB 光強度が 0 dBm の時の非線形位相シフト量を図 6 に示した。非線形位相シフト量は高パルスエネルギー時において、同一波長入力時が異波長入力時に比べて小さくなることがわかった。その定量的解析では、入力パルスエネルギーが 266 fJ の場合で、異波長入力時の非線形位相シフト量は 0.57π であったのに対して、同一波長入力時では 0.48π となった。減少率であらわすと約 16 % となった。

以上の結果について考察すると、異波長入力時ではパルスエネルギーの増加に伴い、cw 光よりパルス光の利得が高くなる。よって、cw 光で消費するキャリアよりもパルス光で消費するキャリアが多くなるために、非線形位相シフト量が増加したと考えられる。

4.4 緩和時間と利得スペクトルの関係

SOA の利得スペクトルを測定することで前節までの現象の裏づけを行う。SOA の利得スペクトルは緩和時間を測定した

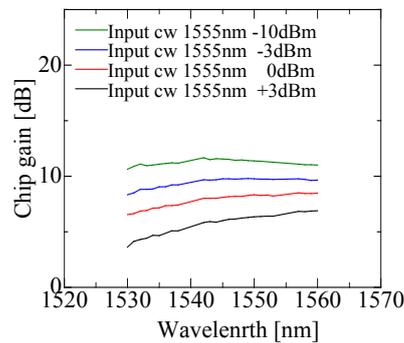


図 7 入力 cw 光強度による SOA の利得スペクトル

条件と同一条件で測定した。実際の利得スペクトルの測定結果を図 7 に示す。利得スペクトルは入力 cw 光強度が増加するに従い、利得を下げ、そのピークが短波長側から長波長側へシフトする。これはバンドフィリング効果によるものであるが、この現象がはっきりと確認できる。従って異波長入力時では利得の差が生じていることがわかる。

さらに、cw 光強度が -10 dBm の条件では 1540 nm と 1555 nm の利得量はほぼ等しいことがわかる。HB 光強度が -10 dBm の場合、異波長と同一波長で緩和時間がほぼ等しいのはこの為だと考えられる。そして、同時入力の場合、1555 nm の cw 光強度を -3 dBm より大きい条件で入射させると常に 1555 nm の利得量が 1540 nm の利得量より大きい。このため、HB 光強度が -3 dBm 以上の条件では常に異波長入力時は同一波長入力時に比べて、緩和時間と非線形位相シフト量のトレードオフ作用がより一層増大していると考えられる。

4.5 各方式における緩和時間と非線形位相シフト量の関係

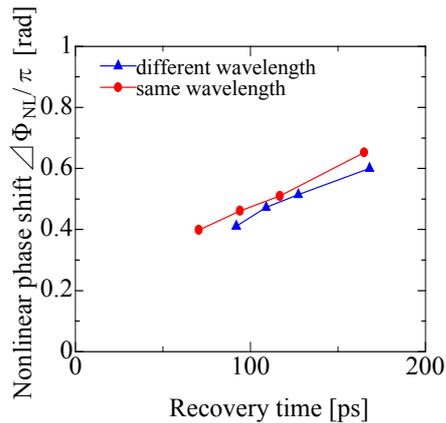


図8 入力方式の違いによる非線形位相シフト量と緩和時間の関係

これまでに得られた結果を元に、入力方式による緩和時間と非線形位相シフト量の相対関係について解析する。

図8は入力方式別に緩和時間と非線形位相シフト量の関係を表したものである。これより、入力方式によらず、緩和時間と非線形位相シフト量のトレードオフ関係を確認することが出来る。さらに、入力方式による緩和時間と非線形位相シフト量の関係について着目すると、同一波長方式の方が、異波長方式に比べて、同じ非線形位相シフト量に対して緩和時間が常に速い結果となった。これは過去の異波長方式で潜在していた緩和時間と非線形位相シフト量のトレードオフの関係が同一波長方式にすることによって抑制された結果であり、同一波長方式の有用性を示す証拠と言える。

これらの現象を定量的に解析する。同量の非線形位相シフト量に対する緩和時間の短縮率を求めると緩和時間の測定と同様に、異波長方式に比べて、同一波長方式では23%の短縮率となった。

5. まとめ

本研究では、過去のSOAを用いたゲー

ト研究で行われていた異波長入力方式の欠点を指摘し、その解決策として同一波長入力方式を提案し、その有用性を調べた。

異波長方式には cw 光とパルス光の利得が異なることから、緩和時間と非線形位相シフト量のトレードオフの増大作用が必要以上に働いていた可能性があった。本研究ではそのトレードオフの増大作用を顕在化し、同一条件における同一波長方式での測定を行い、同一波長方式によるトレードオフ作用の増大を抑制した。

結果として図8に示したように、同一波長方式では、異波長方式に比べて、同じ非線形位相シフト量に対して緩和時間が常に速い結果となった。その短縮率は23%となり、同一波長方式における有用性を示した。

今後は本方式のより効率的な効果の実証があげられる。本研究の成果は同一波長方式による有用性は示せたものの、当初見込んでいた効率よりも低い結果となってしまった。また、さらなる上位目標として、本方式を利用した超高速な全光論理ゲートの実現を期待している。

引用文献

- [1] J. Sakaguchi. *et al.*, Opt Comm., 282, 2009, 1728-1733.
- [2] J. Sakaguchi, *et al.*, Opt. Express., 15, 2007, 14887-14990.
- [3] Y. Ueno. *et al.*, ECOC2000, 1, 2000, 13-14..
- [4] Y. Ueno. *et al.*, J. Opt. Soc. Am., B19, 2002,2573.