

光スペクトル合成型半導体全光ゲートに向けたSOAの応答特性

電子工学科 上野研究室

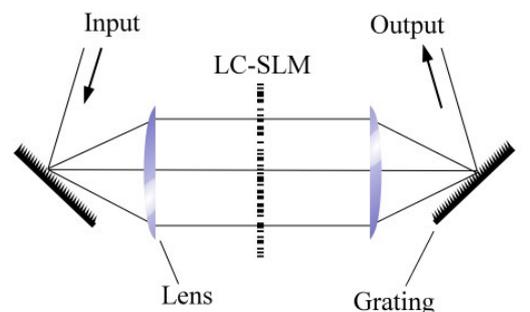
0722032 萬 明久

1. 研究背景

SOA(Semiconductor Optical Amplifier)を用いた波長変換器の方式の一つに遅延干渉型全光波長変換器 DISC(Delayed Interference Signal-Wavelength Converter) が在り、160~320 Gb/s の高速な波長変換ゲート動作の実験実証が報告されている。しかし、DISC 型全光ゲートにおいて、半値全幅 (Full width at half maximum, FWHM) 2 ps 以下のパルスを入射すると SOA 内でのキャリアヒーティングに起因する第二キャリア緩和時定数が出力波形に歪みを生じる事が報告されていた。この問題を解決する為に、時間領域ではなく、周波数領域で信号処理を行う光スペクトル合成 (Optical Spectrum Synthesizer, OSS) 型全光ゲートが提案された。これまで研究室では SOA について、位相変調量や緩和時間に関する研究が行われているが OSS ゲートの制御対象となる XPM(Cross phase modulation)スペクトルについての研究は行われていなかった。また、スペクトル合成シミュレーションの出力スペクトルの長波長側が実験値と比較して高く見積もられるという不一致が指摘され続けていた。本研究の目的は SOA 出力の XPM スペクトルの決定要因調査、シミュレータ出力の実験結果との不一致についての検証である。

2. 光スペクトル合成の原理

光スペクトル合成方式では、時間軸ではなくスペクトル上で強度、位相を制御する。OSS には、主に液晶空間光学変調素子 (Liquid crystal spatial light modulator, LC-SLM) やアレイ導波路回折格子 AWG (Arrayed wave-guide grating, AWG) が用いられている。LC-SLM を用いたスペクトル合成について述べる。まず、入射光は回折格子により分光される。次にレンズにより平行光として、LC-SLM に入射する。LC-SLM には強度制御用と位相制御用の二つの液晶マスクが存在し、これは制御波長数に応じた多数のセルの集合であり、各セルごとに独立して制御可能である。セル内には細長い形状のネマティック液晶分子が封入されている。長軸と短軸により異なる屈折率を持ち、電界を印加していない状態では配向膜で定められた方向に整列している。電界を印加すると、液晶分子に対して回転角を持たせることが出来、電界強度の強弱により位相、強度を制御出来る。これを複数のセルに対して個別に制御する事で、求める特性のスペクトルフィルターとして機能させる。最後に、位相、強度変調を受けた LC-SLM 透過光は、レンズ、回折格子により光束を狭められ、出力される。



LC-SLM : Liquid crystal spatial light modulator

図1. LC-SLMの構成

3. 入射光のパルス幅と XPM の関係

入射光のパルス幅が XGM 波形のディップの形状を決定するのではないかと仮定し、FWMH 2.2 ps と 5.9 ps のパルス光を用いて SOA の XGM、XPM を測定した結果、XPM スペクトルに顕著な差異が認められた。そこで、注入電流、パルス光エネルギー、cw 光強度一定とし、分散減少ファイバ(Dispersion Decreasing Fiber, DDF)を用いてソリトン断熱圧縮によりパルス幅を 5、4、3、2 ps とし、入射光パルス幅の XPM に対する影響を系統的に測定した。実験構成を図 2 に示す。

パルス光の幅とスペクトルの長波長、短波長側の広がりとの関係を調べる為、DDF を用いてパルス圧縮を行いながら、その XPM スペクトルを測定した。SOA 注入電流 150 mA、パルスエネルギー 80 fJ で一定とした。パルスの圧縮量については、DDF 直前の EDFA の注入電流制御により DDF への入射パルス

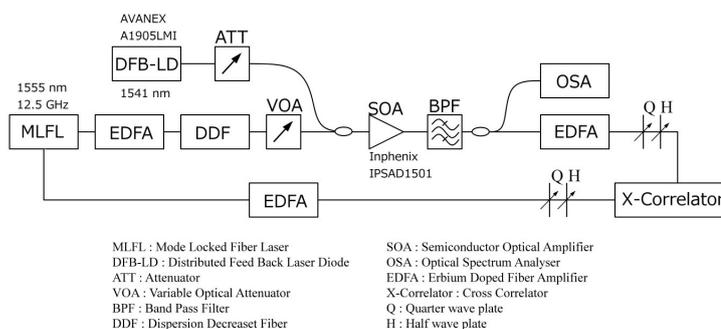


図2. 実験構成

ス光強度を変える事で調整した。XPM を見ると、パルス幅が狭まるに従い長波長側と比較して短波長側に顕著な広がりが認められる。(図 3.)

更にパルス幅を狭め、1 ps 以下のパルスを入射すれば XPM の短波長側が長波長側に対して相対的に広いスペクトルを持つと予測される。OSS 型全光ゲートにおける消光比が高く歪の無い出力パルスを得る条件に、スペクトル成分群の包絡線がガウシアン曲線に沿う様に強度制御する、が在る。これはガウシアン曲線に沿うよう不要なスペクトル成分を減衰させる事を意味する。フーリエ変換の関係からパルス光の時間分解波形の幅が狭くなるに従い、パルス光のスペクトルは広がるというトレードオフの関

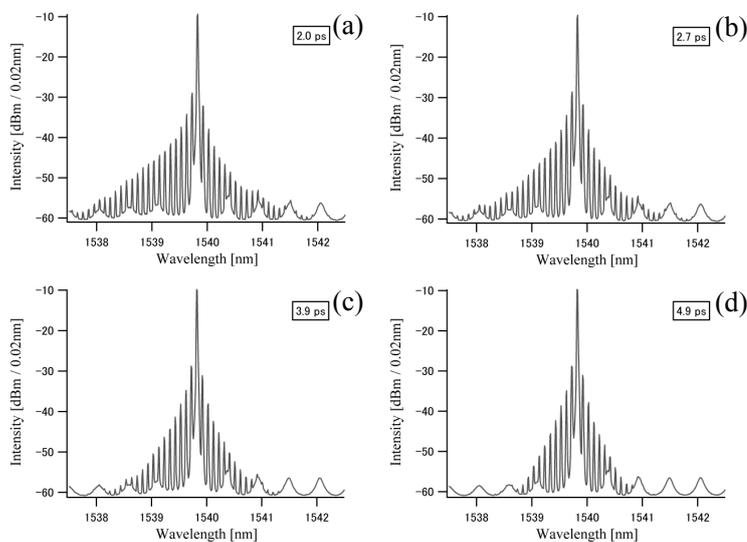


図3. 入射光パルス幅のXPMスペクトルに対する影響

Input pulse FWHM (a) 2.0 ps (b) 2.7 ps (c) 3.9 ps (d) 4.9 ps

係がある。これまでの強度制御プロファイル設計は基本的に cw 光のスペクトルをガウシアン曲線の中心としていたが、XPM はパルス光の幅を狭くした際の長波長、短波長側のスペクトルの形状、広がり幅は非対称である。例として、入射光のパルス幅を狭めるに従い短波長側のスペクトルが広がると仮定すると、効率よくスペクトルを整形し、消光比を高い出力パルス光を得るには OSS 後のガウシアン曲線状スペクトルのピーク波長を短波長側にシフトする必要があると考えられる。そのため、スペクトル整形時の目標値に、パルス幅を優先するか、スペクトル強度を優先するか

といった選択性を生じる事になる。(図 4.)

また、XPM はキャリア密度変調によるため、入射パルス光の幅が狭くスペクトルが広い場合でも、XPM 出力スペクトルが同程度の広がりを持つ訳では無い。その為、OSS 後に出力光のパルス幅が広がる可能性を持つ。よって、OSS 型全光ゲートの信号周波数限界は、SOA での XPM によるスペクトルの広がりによって、消光比は位相変調量により制限される。また、スペクトルの広がりには波長多重方式においてもクロストーク等の問題となり得る。

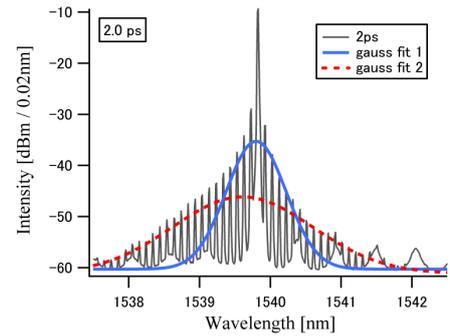


図4. スペクトル整形目標値の選択性

4. シミュレーターの問題点

シミュレーターの問題点として、XPM スペクトルの長波長側の強度が実験値に対して高く見積もられるという現象が認められていた。現在のシミュレーターでは、SOA 内のキャリア密度が設定した値 n_{trans} と一致した時点で緩和時定数を切り替えるという方式を採用している。この急激な切り替わりが悪影響を及ぼしているのではないかと仮定し、第一、第二緩和時定数が同時に作用し、その比率を切り替えるという方法でプログラムシミュレーションを行ったが、有意な結果は得られなかった。次に、XGM 波形を厳密に一致させ、その後屈折率等を微調整すれば良い結果が得られるのではないかと仮定したが、依然として XPM スペクトルの長波長側の強度が高い事がわかる。(図 5) 実験結果の XGM 波形は相互相関計を用いて測定しており、第二緩和時定数領域のディップは実際にはさらに鋭いピークをもつのではないかと仮定し、XGM 波形のディップ部分が不一致を示しても XPM が測定結果と近づく様に各パラメータを調整したが、長波長側の強度が実験値に近づく事は無かった。そこで、計算過程に問題があるのではないかと考え、常に長波長側が高く見積もられるという点に着目した。これは、より周波数の高いスペクトルが低く見積もられる事を示している。計算には sech パルス時間波形に対し正弦波を乗じたものを FFT するという方法を採用している。結果として、時間波形の始点、終点の連続性、0 に収束しているかといった条件により、FFT の演算結果の長波長、短波長の強度の比率に差異が認められる。(図 6, e) 図 5 に示した XPM 波形の不一致も、このような FFT 計算時の処理による影響を受けている可能性がある。特に、SOA 内部の屈折率振動、利得振動の算出にはキャリア密度振動の時間分解波形 (図 6, d) を用いており、そのデータは始点、終点の不連続であり、0 に収束もしていない。よって、FFT 時の窓関数を用いた信号の始点、終点の 0 収束処理をシミュレータープログラムに追加する事で、XPM 波形の改善が期待できる。しかし、キャリア密度に対するオーギュメント効果による影響、第二緩和時定数区間でのキャリアプラズマ効果による非線形位相シフト量の抑制といった XGM、XPM に強く影響を及ぼすと考えられる項目を考慮し、レート方程式を拡張しない限り厳密な一致は得られないと考えられる。

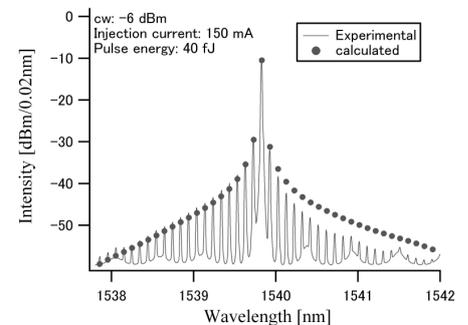


図5. 実験結果とシミュレーションによるXPM波形比較

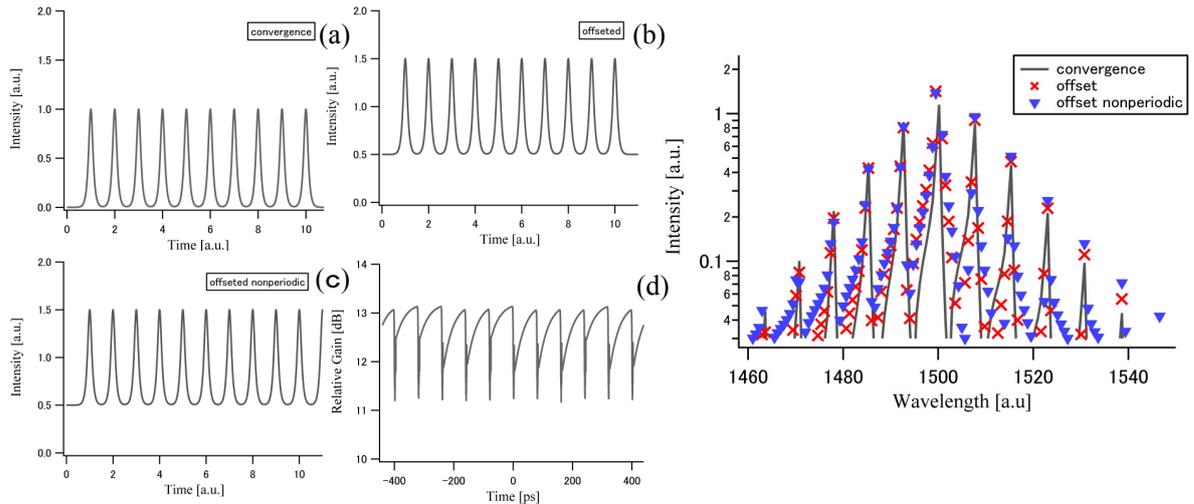


図6. 時間波形の始点、終点の状態がFFTの結果に及ぼす影響,
 (a) 両端が0に収束, (b) 両端が0.5に収束, (c) 両端の値が連続で無い,
 (d) シミュレーションのキャリア密度振動波形, (e) a,b,cのスペクトル比較

5. 結論

ここまで、入射光パルス幅が狭まるに従い、XPM スペクトルの短波長側が長波長側に対して顕著にスペクトルが広がる事を系統的実験結果により示した。また、スペクトル整形時にその非対称性から消光比が低下する可能性、フィルター特性設計時に消光比とパルス幅の選択性が生じることについて述べた。次にシミュレーション結果と実験結果の比較を行い、XPM スペクトルの不一致の原因について考察を述べた。また、フーリエ変換の手法によりスペクトルに歪みを生じる可能性がある事、その改善方法について示した。今後の課題としては、入射パルス幅に対する OSS 出力のパルス幅の追従限界、消光比評価といった事が挙げられる。

光スペクトル合成は今後の光通信において非常に期待の持てる方式である。XPM スペクトルのより正確な予測が実現すれば、集積化する際に各チャンネル強度のモニタ、負帰還制御によるスペクトル整形といった必要が無くなる。残念ながら本研究ではシミュレーターのフーリエ変換のプロセスを変更した結果を示すことは出来なかったが、フーリエ変換時の入力波形の始点と終点の連続性、周期性の影響が現在の研究室のシミュレーターの XPM スペクトルの不一致と類似した傾向を持つことを指摘した。また、OSS 方式の制御対処となる XPM の決定要因についての実験結果と考察を示した。今後のシミュレーター改良の一助となり、より正確な SOA の XPM スペクトルが得られる事を期待する。