

単一QD-SOAを用いた全光半加算器

畑 洋樹 (八嶋弘幸教授, 柴田凌助教)

1 はじめに

近年のインターネット通信端末の増加と普及により, 光通信による通信の高速化と大容量化が必要不可欠となっている. 現在の光通信では, 信号処理を行う際に一度光信号から電気信号へと変換するため, 通信速度の最大値が電気信号の処理速度に依存してしまうという課題がある. 従って電気信号への変換処理が必要ない全光信号処理技術を構成する全光論理回路の研究が進められている. また, 従来研究として実装されている全光論理回路の多くは光がデバイスに入射した際に発生する非線形光学効果を利用している. その中でも量子ドット半導体光増幅器 (Quantum-Dot Semiconductor Optical Amplifiers: QD-SOA) を用いた全光論理回路が提案されている.

従来研究として提案されている全光 XOR 回路ではマッハツェンダー干渉計 (Mach-Zehnder Interferometer: MZI) が多く用いられている. しかし, MZI を用いた全光回路は同一特性の QD-SOA を 2 つ使用しなければならない, 同一特性の QD-SOA を製造することは非常に困難という問題がある. 上記の問題点を踏まえ, 特定の波長の光を切り出すデバイスである Optical Filter (OF) の波長を任意に変更することで, 出力として XOR 回路としてだけでなく AND 回路としても使用でき, 半加算器として使用する.

2 QD-SOA

QD-SOA は量子ドット構造の活性層を持つ光増幅器のことであり, 電子を量子ドット内に閉じ込めることで従来の光増幅器よりも大きな利得を得ることができる.

2.1 非線形光学効果

弱い光によって生じる光の直進, 屈折, 回折といった様々な光学効果はすべて線形光学効果と呼ばれる. ここでいう線形とは光に対する物質の応答が光電場によって比例しているということである. これは光の電界によって発生する分極によるものであるが, 光の強度が大きくなると分極が光の強度に比例しなくなり非線形性が見られることがある. これが光の非線形光学効果の発生原理である.

2.1.1 相互位相変調 (XPM)

光カー効果により物質の屈折率が変化することで物質を進む光の位相が変化する. この現象を利用することで, クロック光の強度を変化させることにより入射光の位相を制御させることができる.

2.1.2 相互利得変調 (XGM)

QD-SOA の光の増幅利得は有限であり, 入力光強度が大きくなるとそれ以上光を増幅できない. この特性を利用することで, クロック光の強度を変化させ, 入射光の利得を制御させることができる.

2.2 非線形光学効果によるスペクトルの広がり

QD-SOA に複数の光を入射した場合, XPM や XGM は他の光のスペクトルを広げるという性質を有する. 入力光同士の強度は等しく, クロック光の強度のみが異なっている条件下でクロック光が存在しない場合は, クロック光による非線形光学効果が QD-SOA 内で生じないため入力光のスペクトルは広がらないが, クロック光が存在する場合は m クロック光による非線形光学効果が生じるためクロック光のスペクトルが広がる.

3 提案する単一QD-SOAを用いた全光半加算器

3.1 半加算器について

表 1: 半加算器の動作

X	Y	C	S
0	0	0	0
0	1	0	1
1	0	0	1
1	1	1	0

半加算器は1桁の2進数を2つ加算する. 加算する値をX,Yとし桁上りをC, 和をSとすると表1の真理値表のように動作する.

3.2 提案回路の構成

図1に提案する全光半加算器を示す. 提案回路ではまず, 入力光A,BをPowerCombiner(PC)に入射し光を合波する. その後合波された光とクロック光をQD-SOAに入力させることにより, 光スペクトルが変化する. 最後に特定の波長の光を切り出すデバイスであるOptical Filter(OF)を用いて基本論理回路として必要な波長のみを取り出し, それぞれXOR 演算,AND 演算として動作するよう出力する.

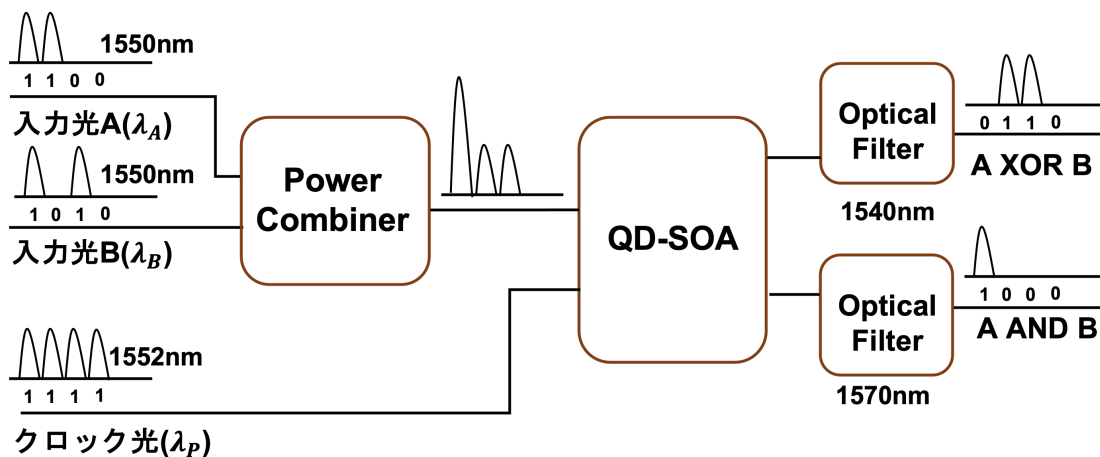


図 1: 提案する全光半加算器の構成

3.3 光フィルタの波長選択

QD-SOA から出力されるスペクトラムを入力光の値ごとにまとめると以下のようなになる. 光フィルタを用いて実線で囲った波長を分離させると XOR 演算として機能し, 破線で囲った波長を分離すると AND 演算として機能する.

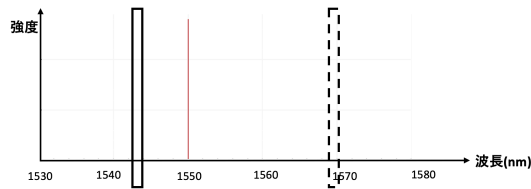


図 2: A=0,B=0 の場合のスペクトラム

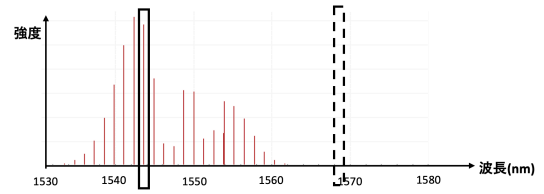


図 3: A=1,B=0 の場合のスペクトラム

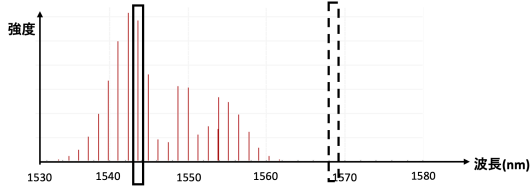


図 4: A=0,B=1 の場合のスペクトラム

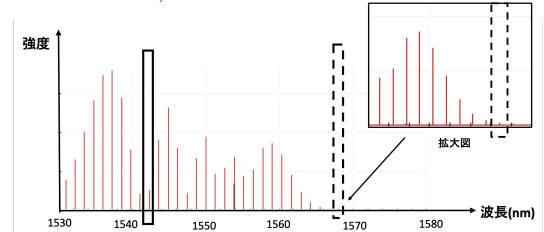


図 5: A=1,B=1 の場合のスペクトラム

入力光が互いに 0 の場合

QD-SOA 内で非線形光学効果が発生せずクロック光が大きく増幅される.

入力光のどちらかのみが 1 の場合

QD-SOA 内で非線形光学効果である XGM によって入力光に利得が奪われるためクロック光があまり増幅されない. さらに XPM によってスペクトルが大きく広がる.

入力光が互いに 1 の場合

XGM によってクロックはほとんど増幅されない. さらに XPM によってどちらかが 1 の場合よりもスペクトルが大きく広がる.

4 シミュレーション

本研究では OptiSystem16.1.0, MATLAB 2019a を用いてシミュレーションを行った. QD-SOA は光の伝搬方程式, キャリアのレート方程式及び伝達行列法 (Transfer Matrix Method:TMM) を用いてシミュレーションを行った. ビットレートは 160Gbps とした. 光の伝搬方程式は QD-SOA 内の光電界に関する式であり, キャリアのレート方程式は QD-SOA 内の時間変化によるキャリアの変化を表す式である. また, 伝達行列法は QD-SOA を光の伝搬方向に対して細かく分割しキャリア密度, 光子密度, 利得を繰り返し求めることで結果的に出力される光電界を求める手法である. 今回シミュレーションで使用するパラメータは表 1 に示したものをを用いた.

表 2: シミュレーションで用いるパラメータ [1]

パラメータ名	値	単位	パラメータ名	値	谷
QD-SOA の長さ	3.0×10^{-3}	m	注入電流	5.0×10^{-2}	A
QD-SOA の厚さ	0.25×10^{-6}	m	最大利得	12.0	cm^{-1}
QD-SOA の幅	3.0×10^{-6}	m	損失係数	2.0	cm^{-1}
量子ドット密度	5.0×10^{14}	m^{-2}	線幅増大係数	12	—
キャリア寿命 (WL → ES)	3.0×10^{-12}	s	入力 A,B の光強度	10	dBm
キャリア寿命 (ES → WL)	1.0×10^{-9}	s	クロック光強度	-20	dBm
キャリア寿命 (WL → 系外)	2.0×10^{-9}	s	A の波長	1552	nm
キャリア寿命 (ES → GS)	0.16×10^{-12}	s	B の波長	1552	nm
キャリア寿命 (GS → ES)	1.2×10^{-12}	s	クロック光の波長	1550	nm
キャリア寿命 (GS → 系外)	0.4×10^{-9}	s	通過帯域幅	2	nm
群速度	8.3×10^{-7}	m/s			

5 結果

AND 演算および XOR 演算を行った場合のシミュレーション結果の入出力波形を図 6 に, アイダイアグラムを図 7,8 に示す.

上から入力 A, 入力 B, 各光フィルタ通過後の出力を表している. 1540nm の波長を取り出す OF 通過後の出力は XOR 演算として動作し, 1570nm の波長を取り出す OF 通過後の出力は AND 演算として動作していることが出力波形から読み取ることができる. ここで, 本研究では評価指標としてアイダイアグラム (eye diagram) および消光比 (Extinction Ratio: ER) を用いる. アイダイアグラムとは信号光を 1 ビット幅間隔で分割し, 重ね合わせて描画したグラフのことであり, 消光比は P_{min}^1 を “1” として出力された光の中で最も強度が弱いときの光強度の値, P_{min}^0 を “0” として出力された光の中で最も強度が強い時の光強度の値としたときに

$$ER[dB] = 10 \log 10 \frac{P_{min}^1}{P_{min}^0}$$

で算出される指標である. この値が大きいほど出力光が “0”, “1” の区別が付きやすい優れた波形であることを示し信号品質が良いと判断することができる. AND 演算における消光比は 14.88dB, XOR 演算における消光比は 11.03dB が得られたので 160Gbs の高速伝送において良好な ER が得られることがわかった.

6 まとめと今後の課題

単一 QD-SOA を用いた全光半加算器を提案した. シミュレーション結果より論理回路の動作を確認でき, 評価指標からも AND 演算, XOR 演算共に期待通り動作していることがわかる. 今後の課題としてより現実状態に近い性能評価を行うため, QD-SOA 内で生じる ASE 雑音の考慮や提案デバイスを様々な回路に組み込んだ場合の性能評価が挙げられる.

参考文献

- [1] H.Sun, Q.Wang, H.Dong and N.K.Dutta, “XOR performance of a quantum dot semiconductor optical amplifier based MachZehnder interferometer”, Department of Physics, University of Connecticut, Storrs, CT 06269, 2005.

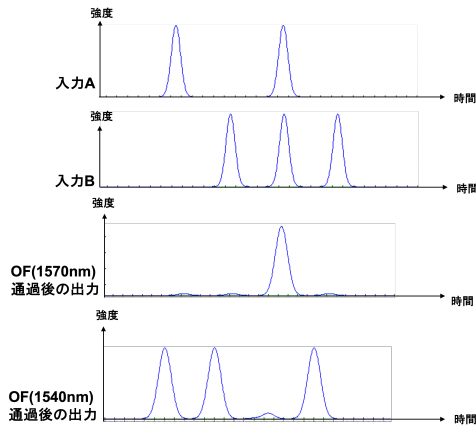


図 6: 提案デバイスの入出力波形

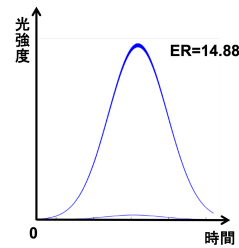


図 7: AND 演算のアイダイアグラム

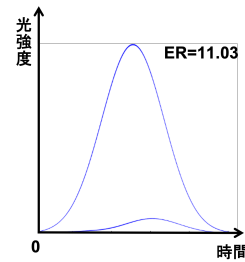


図 8: XOR 演算のアイダイアグラム