

目次

| | |
|---|----|
| 1.1 背景 | 1 |
| 1.2 本研究の目的 | 1 |
| 1.3 本論文の構成 | 1 |
| 第 2 章 本研究に関連する基礎事項 | 2 |
| 2.1 非線形光学効果 | 2 |
| 2.1.1 非線形光学効果の概要 | 2 |
| 2.2 光ファイバカプラ | 3 |
| 2.4 半導体光増幅器 (SOA : Semiconductor Optical Amplifier) | 5 |
| 2.4.1 SOA の基本構造 | 5 |
| 2.4.2 SOA を構成する半導体 | 6 |
| 2.4.3 半導体の光反応 | 8 |
| 2.5 QD-SOA (Quantum Dot-SOA) | 10 |
| 2.5.1 QD-SOA の基本構造 | 10 |
| 2.5.2 QD-SOA のエネルギーバンド構造 | 11 |
| 2.6 TMM(Transfer Matrix Method)による QD-SOA の数値解析 | 12 |
| 2.6.1 キャリアのレート方程式 | 13 |
| 2.7 アイダイアグラム | 15 |
| 2.8 QD-SOA based MZI | 17 |
| 2.9 全光 AND ゲート | 18 |
| 2.10 従来法 | 19 |
| 第 3 章 提案法 | 21 |
| 3.1 提案全光半加算器モデル | 21 |
| 3.2 動作原理 | 22 |
| 3.3 数値解析 | 23 |
| 3.3.1 XOR ゲート | 23 |
| 3.3.2 AND ゲート | 24 |
| 第 4 章 解析条件・結果 | 25 |
| 4.1 解析手法 | 25 |
| 4.2 解析条件 | 26 |
| 4.3 結果 | 28 |
| 4.3.1 パターン①における提案デバイスの動作確認 | 29 |
| 4.3.2 動作パターン②における提案デバイスの動作 | 32 |

| | |
|-----------------|----|
| 第 5 章 まとめ・今後の課題 | 40 |
| 5.1 まとめ | 40 |
| 5.2 今後の課題 | 40 |
| 謝辞 | 41 |
| 参考文献 | 42 |

| | |
|---|----|
| 図 1 : 3dB カプラの模式図 | 3 |
| 図 2 : 3dB カプラによる強度と位相変化 | 3 |
| 図 3 マッハツェンダー干渉計 | 4 |
| 図 4 : SOA の簡易構造 | 5 |
| 図 5 : 真性半導体の結晶構造 | 6 |
| 図 6 : p 型半導体の結晶構造 | 6 |
| 図 7 : n 型半導体の結晶構造 | 7 |
| 図 8 : 光の吸収過程 | 8 |
| 図 9 : 光の放出過程 | 8 |
| 図 10 : 光の誘導放出過程 | 9 |
| 図 11 : 量子ドット構造のイメージ | 10 |
| 図 12 : 電子のエネルギーバンド構造 | 11 |
| 図 13 : QD-SOA による光の増幅過程 | 12 |
| 図 14. 信号波形とアイダイアグラムの関係 | 15 |
| 図 15. 信号品質の異なるアイダイアグラム | 16 |
| 図 16. アイダイアグラムと消光比の関係 | 16 |
| 図 17. QD-SOA based MZI | 17 |
| 図 18. 全光 AND ゲート動作モデル | 18 |
| 図 19 : 従来法的全光半加算器モデル | 20 |
| 図 20 : 提案する全光半加算器モデル | 21 |
| 図 21 : OptiSystem で構成した提案デバイス | 25 |
| 図 22 入出力波形 | 29 |
| 図 23. ビットレート 500Gbps におけるアイダイアグラム(a:sum,(b)carry) | 30 |
| 図 24. ビットレート 500Gbps における入出力波形 | 32 |
| 図 25. ビットレート 500Gbps におけるアイダイアグラム(a:sum,b:carry) | 33 |
| 図 26. ビットレートと消光比の関係(動作パターン②) | 34 |
| 図 27. 消光比と電流の関係 | 35 |

1.1 背景

現在、デジタルコンピュータ技術の発展に伴い、その応用範囲が拡大し、処理すべきデータは大幅に増加している傾向にある。そのためコンピュータの能力向上が求められる。しかし、現在のコンピュータでは光情報を電気情報に変換し、情報処理を行っているため、送られてくる光情報に対して処理スピードが追い付かない。[1]

これを解決するために大容量データを高速に処理することができる光コンピューティングが期待されている。光コンピューティングは光電変換せず高速な情報処理が可能であり広く研究が行われている。特に全光論理演算処理デバイスの半加算器は全加算器やシフトレジスタなど複雑な回路に応用されることから研究が多く行われている。[2]

しかし従来の全光半加算器はビットレート 160Gbps、消光比 9.23dB_[2]であり、全加算器への応用が難しいという問題がある。[3]

1.2 本研究の目的

従来法の QD-SOA based MZI を縦続に組み合わせた全光半加算器モデルに対して、出力光強度に関するパラメータを変化させた際の数値解析を行い、入出力特性を分析する。また入出力特性の改善を目的として、全光 XOR ゲートと全光 AND ゲートを並列に組み合わせたモデルを提案する。提案法のモデルについて数値解析を行い、従来法の入出力特性と比較し、提案法の有効性を示す。

1.3 本論文の構成

第 2 章に本研究に関連する従来の諸研究を示し、第 3 章にて提案する全光半加算器のモデルを示す。また、第 4 章に解析条件および結果を示し、第 5 章にて本研究のまとめと今後の課題を示す。

第 2 章 本研究に関連する基礎事項

2.1 非線形光学効果

2.1.1 非線形光学効果の概要

レーザーの出現によって時間、空間的に光のエネルギーを集中させることが可能になり、その結果弱い光では生じなかった様々な現象が観測されるようになった。レーザー出現以前に知られていた弱い光によっておこる直進、反射、屈折、回折、干渉、吸収、発光、散乱といった様々な光学現象はすべて線形光学現象と呼ばれる。ここで線形であることは光に対する物質の応答が線形すなわち光電場が比例しているということを意味している。

光に対する物質の応答は分極として現れる。この分極と光電場が比例した関係のとき、線形光学現象がなりたつ。しかし光電場が大きいとき物質を構成する分子や原子が作る電気双極子モーメントの起き差が変化するため、光電場と分極は比例関係とならない。このとき発生する現象が非線形光学現象である。[4]

今 2 つの周波数成分を持つ光 $A(t)$ が

$$A(t) = A_1 \cos \omega_1 t + A_2 \cos \omega_2 t$$

で与えられたとする。 A_1, A_2 は振幅、 ω_1, ω_2 は角周波数、 t は時間を示す。この光を物質に入射し、分極が光電場の 2 乗に比例するとしたとき

$A(t)^2 = \{A_1 \cos \omega_1 t + A_2 \cos \omega_2 t\}^2 = A_1^2 \cos^2 \omega_1 t + A_2^2 \cos^2 \omega_2 t + 2A_1 A_2 \cos \omega_1 t \cos \omega_2 t$ で表さるようになり、 $2\omega_1, 2\omega_2$ など、分極から新たな角周波数成分を持つ光が発生する。ここで分極が光電場の 2 乗の関係にあるとき発生する現象を 2 次の非線形光学現象、3 乗の関係にある時発生する現象を 3 次の非線形光学現象と呼ぶ。全光デバイスに応用されるのは主に 3 次の非線形光学現象であり、次節において本研究で利用する現象について述べる。

2.2.2 光カー効果と自己・相互位相変調

光カー効果[5]とは物質の屈折率が光強度に応じて変化する現象である。屈折率が変化することによって物質を進む光の位相の変化が起こる。このとき、自分自身の光によって生じる位相変調を自己位相変調(SPM:Self Phase Modulation)、ほかの光によって生じる位相変調を相互位相変調(XPM:Cross Phase Modulation)と呼ぶ。

2.2 光ファイバカプラ

光ファイバカプラ(optical fiber coupler)は光信号を分岐・結合する受動光デバイスである。特に分岐比が 1:1 のものは入力光強度が半分(-3dB)になることから、3dB カプラと呼ばれている。図 6 にカプラの模式図を示す。カプラの接合部では両者の光ファイバのコアが近接しているため、それぞれの光ファイバでモード結合が起こり、光強度がストレート側とクロス側とに分岐される[6]。

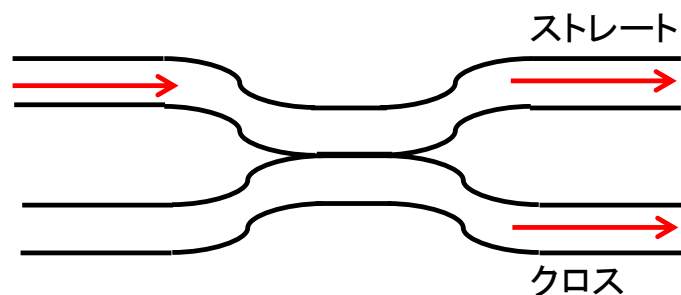


図 1 : 3dB カプラの模式図

また, 3dB カプラにおいて, 入力光がストレート側の光ファイバに分岐される場合には, 位相が保持される。しかしクロス側の光ファイバに分岐される場合には, 入力された光の位相を基準(‘0’)としたとき, 位相は $\pi/2$ 変化する[7]。図 7 に, カプラによる強度と位相の変化を示す。

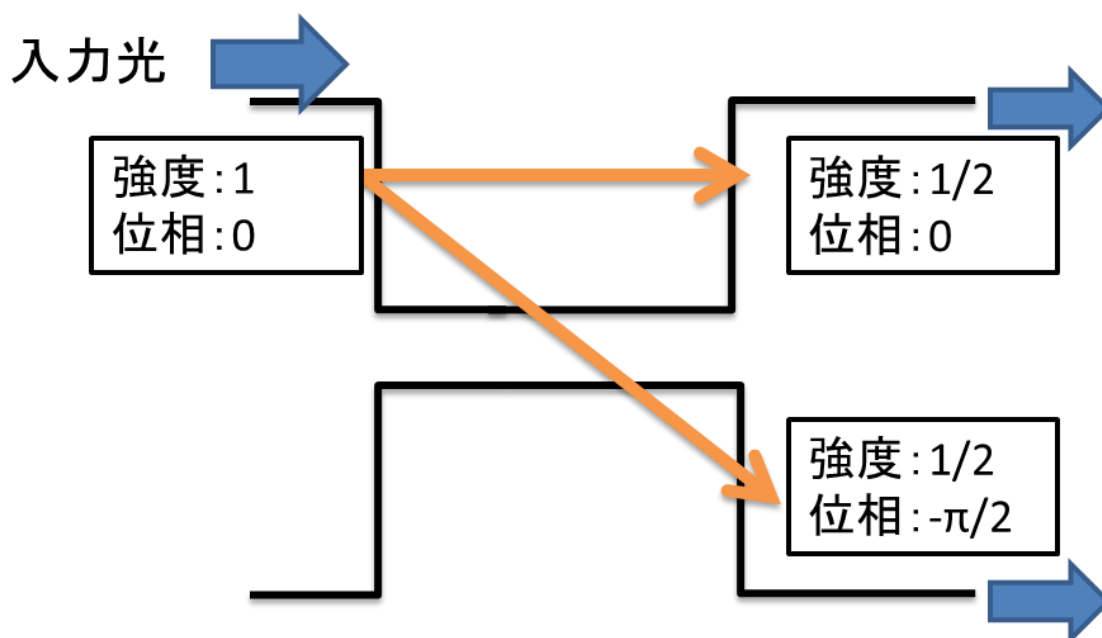


図 2 : 3dB カプラによる強度と位相変化

2.3 マッハツェンダー干渉計 MZI (Mach-Zehnder Interferometer)

図にマッハツェンダー干渉計(MZI:Mach-Zehnder Interferometer)[6]を示す. マッハツェンダー干渉計とは図に示すような光学構成の干渉計である.

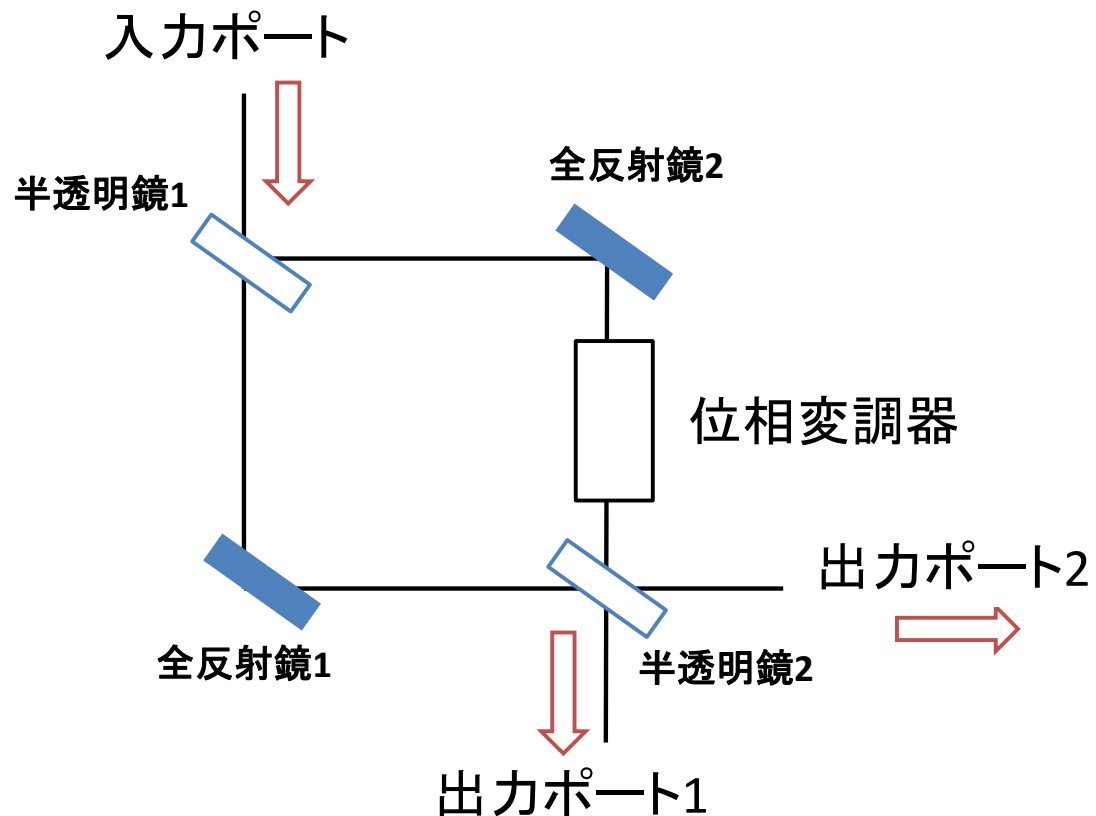


図 3 マッハツェンダー干渉計

動作原理を述べる. 入射光は半透明鏡 1 で 2 つに分岐し 2 つの光路を通して半透明鏡 2 で結合する. 2 つの光路長が等しければ光は半透明鏡 2 を通過後, 出力ポート 1 では干渉の結果, 光が出力され, 出力ポート 2 で光が打ち消され出力されない.

また光路長が異なるとき, 出力ポート 1 では光が打ち消され出力されず, 出力ポート 2 では出力される. 図の位相変調器を半導体光増幅器(SOA:Semiconductor)に置き換えたものが SOA based MZI である. また MZI は 2 つの 3dB カプラを組み合わせで構成されるものがあり本研究ではそれを MZI として用いる

2.4 半導体光増幅器 (SOA : Semiconductor Optical Amplifier)

SOA は半導体を用いた光増幅器である。SOA に外部から励起させた半導体に光を照射すると、入射光の強さに比例した位相も周波数も同じ光を放出する、誘導放出という現象を利用し、増幅した光を出力する[6]。

2.4.1 SOA の基本構造

図 11 に SOA の簡易構造を示す。SOA は p 型と n 型の異なる原子配列を持った半導体に活性層が挟み込まれた構造となっており、この活性層で光が増幅される。活性層には単一の元素からなる、不純物を含まない真性半導体がいられるが、p 型と n 型の半導体には、キャリア（自由電子や正孔のように電荷を運ぶもの）を増やし電気伝導率を上げるために真性半導体に不純物を添加した不純物半導体を用いる。このうち、自由電子キャリアを増加させたものを n 型半導体、自由正孔キャリアを増加させたものを p 型半導体と言う。

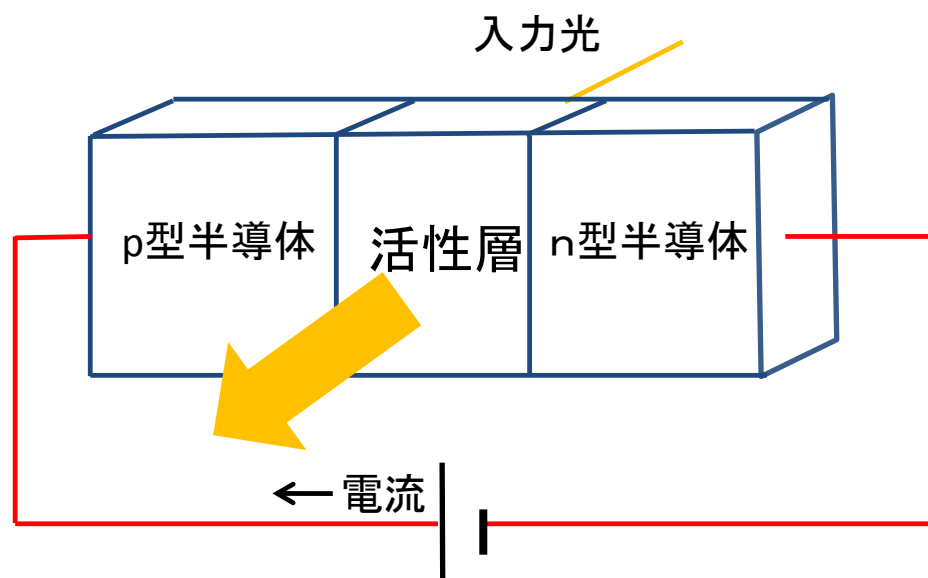


図 4 : SOA の簡易構造

2.4.2 SOA を構成する半導体

ここでは SOA を構成する半導体について説明する。まず，真性半導体の結晶構造を示す。ここではⅣ族の元素を例にとる。図 12 のように，1 個の原子は平面的に 4 つの最近接原子で取り囲まれて，共有結合をしている。

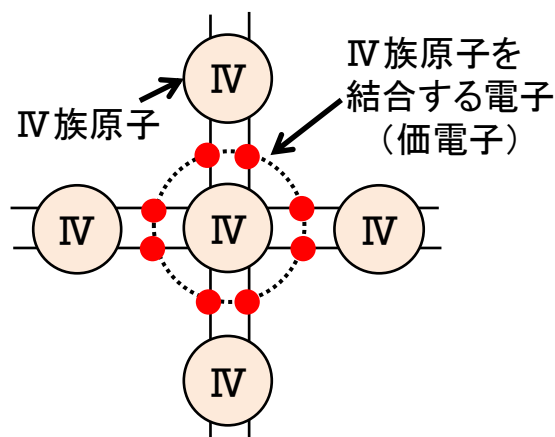


図 5：真性半導体の結晶構造

Ⅳ族の原子が持つ価電子の数は 4 個であるが，この真性半導体にⅢ族の元素を添加した p 型半導体について述べる。図 13 に p 型半導体の結晶構造を示す。Ⅲ族の元素は 3 個の価電子しか持たないため，図のように共有結合をするときには価電子が 1 個不足する。この価電子が不足した部分の電気的な穴を正孔（ホール）と言う。正孔には他の共有結合の電子が入り込め，この電子の移動は正の電荷を有した正孔が電子と逆方向に移動しているのと等価となる。この正孔は電子が 1 個少なくなったⅢ族の元素の原子核にクーロン力で引き付けられているが，外部からの熱エネルギーを受けてこのクーロン力を振り切り自由な正孔となって動き回ることによって，電気の流れやすい半導体になる[9]。

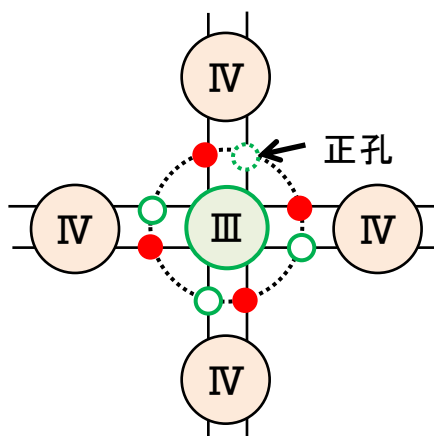


図 6：p 型半導体の結晶構造

次に、先ほどのIV族の真性半導体にV族の元素を添加した n 型半導体について述べる. 図 14 に n 型半導体の結晶構造を示す. V 族の元素は 5 個の価電子を持つため, 図のように共有結合をするときには 1 個余分な価電子が生じる. この価電子は V 族の元素の原子核とクーロン力で結びついているが, 外部からの熱エネルギーを受けてこのクーロン力を振り切り自由電子となって動き回ることによって, 電気の流れやすい半導体になる[9].

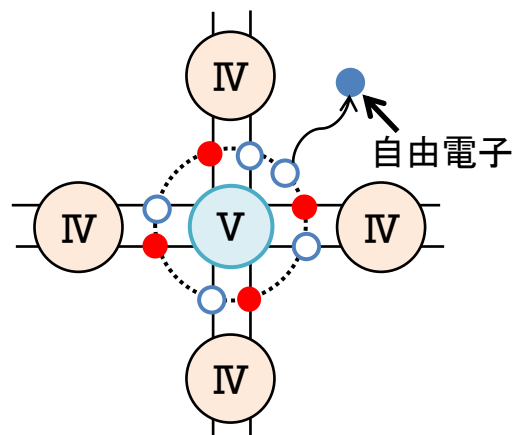


図 7 : n 型半導体の結晶構造

2.4.3 半導体の光反応

半導体の光反応には主に 3 つの過程があり，図 15～17 は，半導体における電子と光子の相互作用を示している[9]．図 15 は吸収過程であり，電子は通常エネルギー準位の低い価電子帯に存在し安定した状態を取っているが，光子のような外部からのエネルギーを吸収することで，エネルギー準位の低い価電子帯からエネルギー準位の高い伝導帯に遷移する．また，伝導帯と価電子帯の間の電子が存在できない領域を禁止帯と呼ぶ．

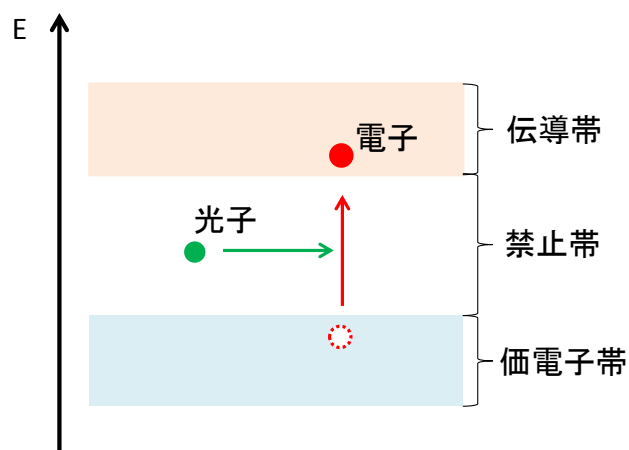


図 8 : 光の吸収過程

図 16 は，自然放出過程であり，伝導帯にある電子はある緩和時間が経つと安定な状態を求めて価電子帯に遷移する．このとき，エネルギー準位差分のエネルギーを光子（光）として放出する．

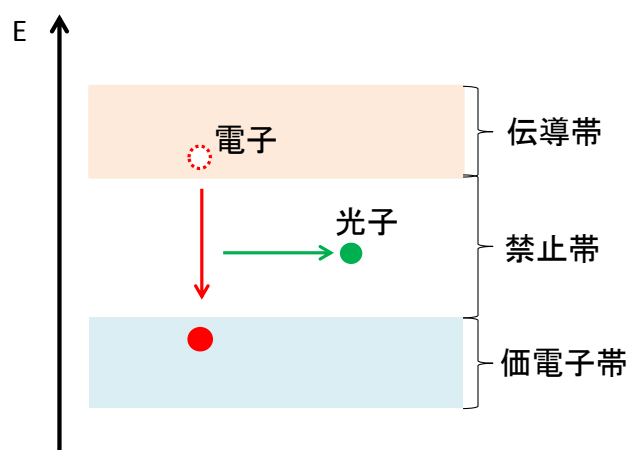


図 9 : 光の放出過程

図 17 は、誘導放出過程であり、外部から光を入射すると、それに刺激されて電子が価電子帯に遷移する際に光が放出される現象である。通常電子は、ボルツマン分布に従って必ず価電子帯に多数集まっており、伝導帯には少ししか存在しない。価電子帯の電子の数を n_1 、伝導帯の電子の数を n_2 で表すならば、通常の状態では $n_1 > n_2$ である。この状態では、外部から光を当てても光は吸収されて減衰してしまう。しかし、電流を流して電子を注入する方法などで外部からエネルギーを与えれば、 $n_2 > n_1$ 状態にすることができる。これを反転分布という。反転分布の状態では、誘導放出と吸収の発生する割合は誘導放出の方が多くなり、入射した光子の数に比例して光子が放出されるので光増幅の作用がある。SOA ではこのような誘導放出を基に光を増幅しており、反転分布を実現するために、常に電流を流し電子のエネルギー準位を上げている。このとき放射される光は、入射光と同一周波数・同一位相となる。そのため、多くの光子を誘導放出させることができれば、エネルギー、位相、進行方向のそろった強い光を放出させることができる。

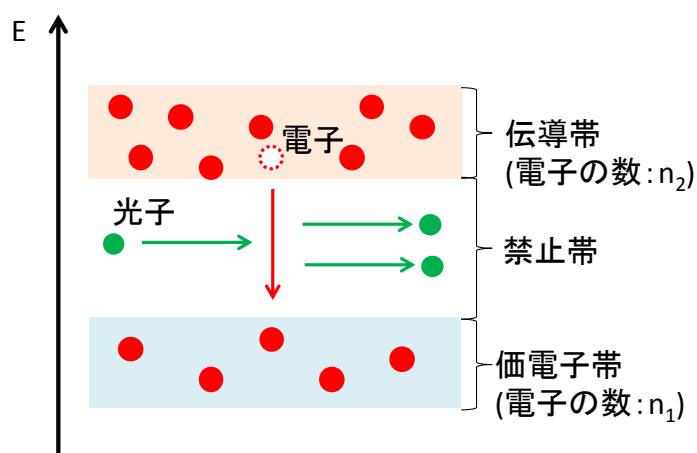


図 10：光の誘導放出過程

2.5 QD-SOA (Quantum Dot-SOA)

量子ドット(Quantum Dot)とは、ナノメートルサイズの半導体結晶で構成されており、閉じ込めた電子のエネルギー準位を完全に量子化するという特徴を持つ。SOA は活性層の構造によって増幅効率が変化し、これまでにいくつもの構造が考案されてきた。現在、最も増幅効率が高いとされているのは量子ドット構造であり、増幅に必要な電流値が小さい、利得の回復が早い、温度に対する依存性が低いなどの特性が報告されている[7]。

2.5.1 QD-SOA の基本構造

図 18 に量子ドット構造のイメージ図を示す。量子ドット構造では、この量子ドット層が積層された構造となっており、電子を 3 次元的に閉じ込めることができる。そのため、電子のエネルギー準位が離散化し、活性層に注入された電子は低い準位に集中する。その結果、活性層に注入した電子の大部分が発光と光増幅に寄与し、極めて効率の良い増幅ができる。

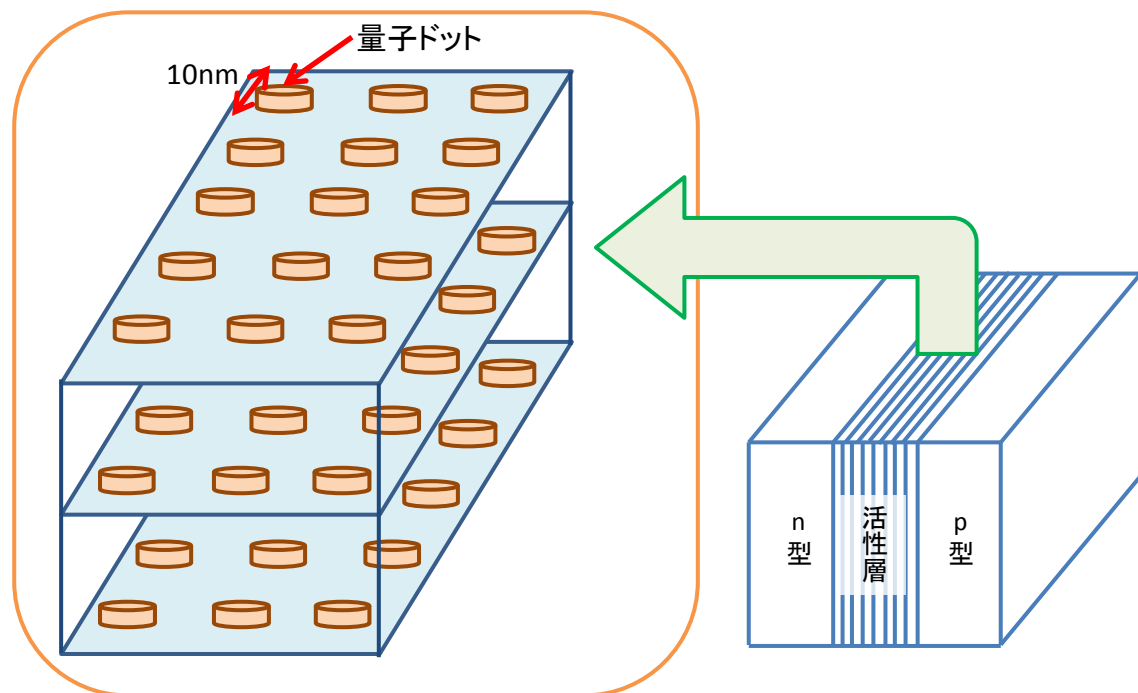


図 11：量子ドット構造のイメージ

2.5.2 QD-SOA のエネルギーバンド構造

図 19 に QD-SOA のエネルギーバンド構造を示す. QD-SOA の伝導帯部分は階層構造となっており, WL(Wetting Layer), ES(Excited State), GS(Grand State)の 3 層に分かれている [13]. 伝導帯に注入された電子は隣り合った層を遷移して GS に移り, 外部から光を入射することによって刺激された電子が, GS から価電子帯に遷移する際に光が放出される. 各階層における電子の時間変化は, 後述のレート方程式によって求めることができる.

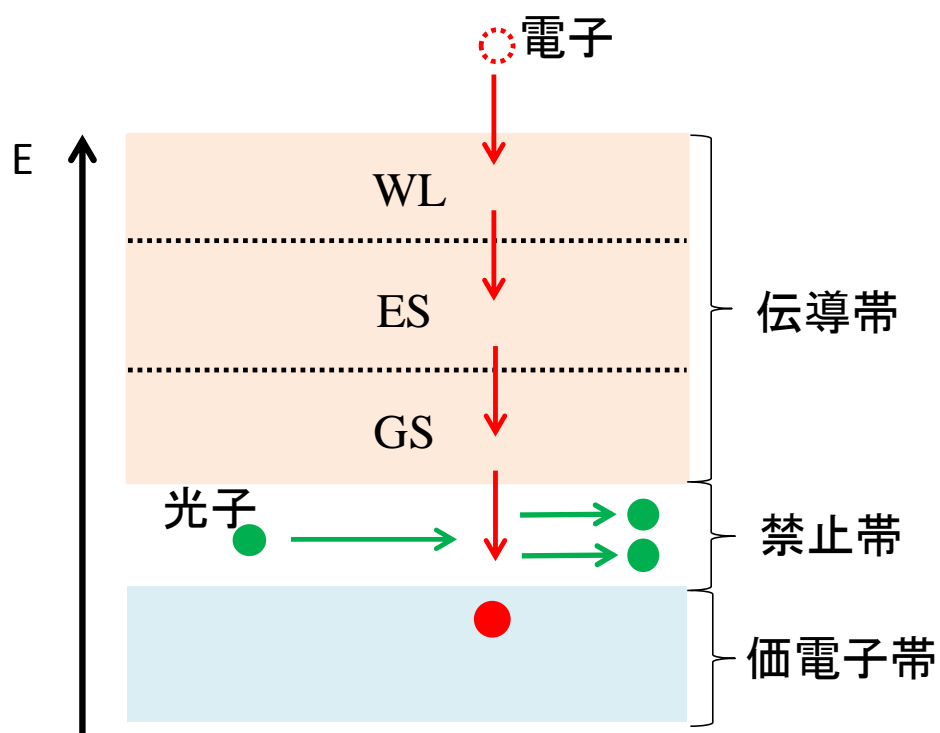


図 12 : 電子のエネルギーバンド構造

2.6 TMM(Transfer Matrix Method)による QD-SOA の数値解析

光は物理的性質として、波動性と粒子性を兼ね備えた物質であり、その強度は波動方程式や光子密度の方程式を解くことによって求められる。しかし、光の強度は電子のエネルギー分布や時間や位置に依存して絶えず変化するため、入力時の波動方程式や光子密度の方程式から出力時の光の強度を求めることはできない。ここで、[9]に示した論文では、光の波動方程式に対して TMM(Transfer Matrix Method)を適用することにより、QD-SOA の入出力関係を数値解析している。これは QD-SOA を任意の数のセクションに分割し、各セクションにおいて電子のエネルギー分布から光子密度と位相変化量を順時求めるという方法であり、これにより最終的に出力される光の強度と位相を求めることが出来る。図 20 は QD-SOA による光の増幅過程を表し、セクションごとに光子の数と位相が変化している様子を示している。

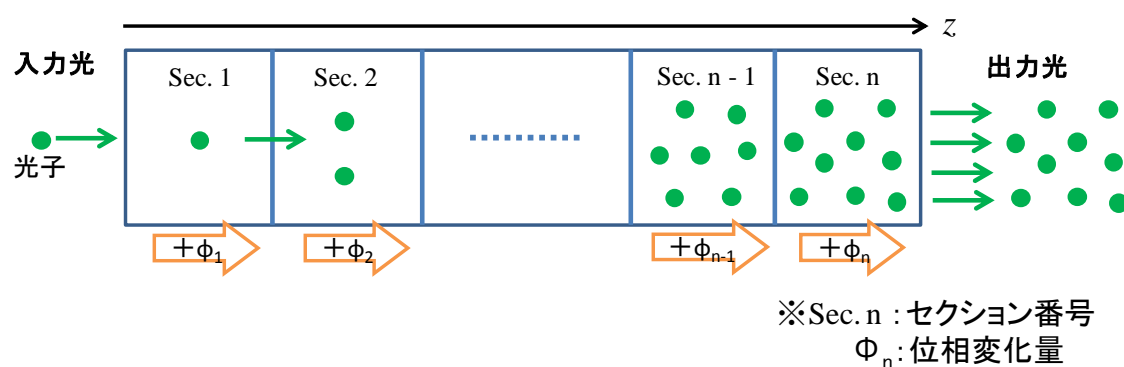


図 13 : QD-SOA による光の増幅過程

2.6.1 キャリアのレート方程式

$$\frac{\partial N_w}{\partial t} = \frac{I}{qV} - \frac{N_w(1-h)}{\tau_{w2}} + \frac{N_Q h}{L_w \tau_{2w}} - \frac{N_w}{\tau_{wR}} \quad (1)$$

$$\frac{\partial h}{\partial t} = \frac{L_w N_w (1-h)}{N_Q \tau_{w2}} - \frac{h}{\tau_{2w}} - \frac{(1-f)h}{\tau_{21}} + \frac{f(1-h)}{\tau_{12}} \quad (2)$$

$$\frac{\partial f}{\partial t} = \frac{(1-f)h}{\tau_{21}} - \frac{f(1-h)}{\tau_{2w}} - \frac{f^2}{\tau_{1R}} - \frac{gL_w V_g}{N_Q} S \quad (3)$$

(1)～(3)式は、それぞれ QD-SOA の伝導体部分における、2.5.2 で表される各階層のキャリア密度の変化を表し、キャリアのレート方程式と呼ばれる[10]。各パラメータはそれぞれ、 N_w :キャリア密度(WL), N_Q :量子ドット密度, h :キャリア占有率(ES), f : キャリア占有率(GS), τ_{w2} :キャリア寿命(WL→ES), τ_{2w} : キャリア寿命(ES→WL), τ_{wR} : キャリア寿命(WL→自然放出), τ_{21} : キャリア寿命(ES→GS), τ_{12} : キャリア寿命(GS→ES), τ_{1R} : キャリア寿命(GS→自然放出), I :電流, q :電荷素量, V :活性層体積, g :利得, S : 入力光 i に対する光子密度, V_g :群速度, t :時間を表している

(1)～(3)式の左辺はいずれもキャリア密度の時間微分を表している

(1)式の右辺の第 1 項が電流によって励起されるキャリアの密度を, 第 2, 第 3 項が WL-ES 間を遷移するキャリアの密度を, 第 4 項が WL から自然放出光として系外へ出ていくキャリアの密度を表している。

また, (2)式の右辺は第 1, 第 2 項が WL-ES 間を遷移するキャリアの密度を, 第 3, 第 4 項が ES-GS 間を遷移するキャリアの密度を表しており,

(3)式の右辺は第 1, 第 2 項が WS-GS 間を, 第 3 項が GS から自然放出光として系外へ出ていくキャリアの密度を, 第 4 項が誘導放出光として系外へ出ていくキャリアの密度を表しており, この項における光子密度 S によって f の値も変化する。

また QD-SOA の単位長さあたりの利得 g は

$$g = g_{max}(2f - 1) \quad (4)$$

で与えられる。 $g_{max}[\text{m}^{-1}]$ は QD-SOA の最大利得である。式(4)は QD-SOA の利得が GS におけるキャリア占有率に依存して変化することを表している。

また光子密度 S は

$$S = \frac{|E^2|}{A_{\text{eff}} V_g h(c/\lambda)} \quad (4)$$

で与えられる. E は QD-SOA を進む光の電場であり, その絶対値の 2 乗は光強度を表す. 光強度を, 活性層の断面積 $A_{\text{eff}}[\text{m}^2]$, 群速度 $V_g[\text{m/s}]$, 光子 1 つあたりのエネルギー $h(\frac{c}{\lambda})$ で割ることによって, 単位体積当たりの光子密度 $S[\text{m}^{-3} \cdot \text{s}]$ に換算される.

ここで, 光の電場 E について述べる. QD-SOA を進む光の電場は

$$\frac{\partial E}{\partial z} = \frac{E}{2} [-\alpha_{\text{int}} + (1 - j\alpha_{\text{LEF}})g] \quad (5)$$

で与えられる. (4)式は QD-SOA の光子エネルギーの変化を表す方程式である[2]. ここで, α_{LEF} は線幅増大係数, α_{int} は損失係数, g_{max} は最大利得, z は SOA 内での位置 (セクション) を表し, GS におけるキャリア占有率: f に応じて光子エネルギーは値を変化させる. また, 各セクションにおける光の強度(単位時間のエネルギー) は, 光子エネルギーの絶対値の 2 乗で表せられる.

2.7 アイダイアグラム

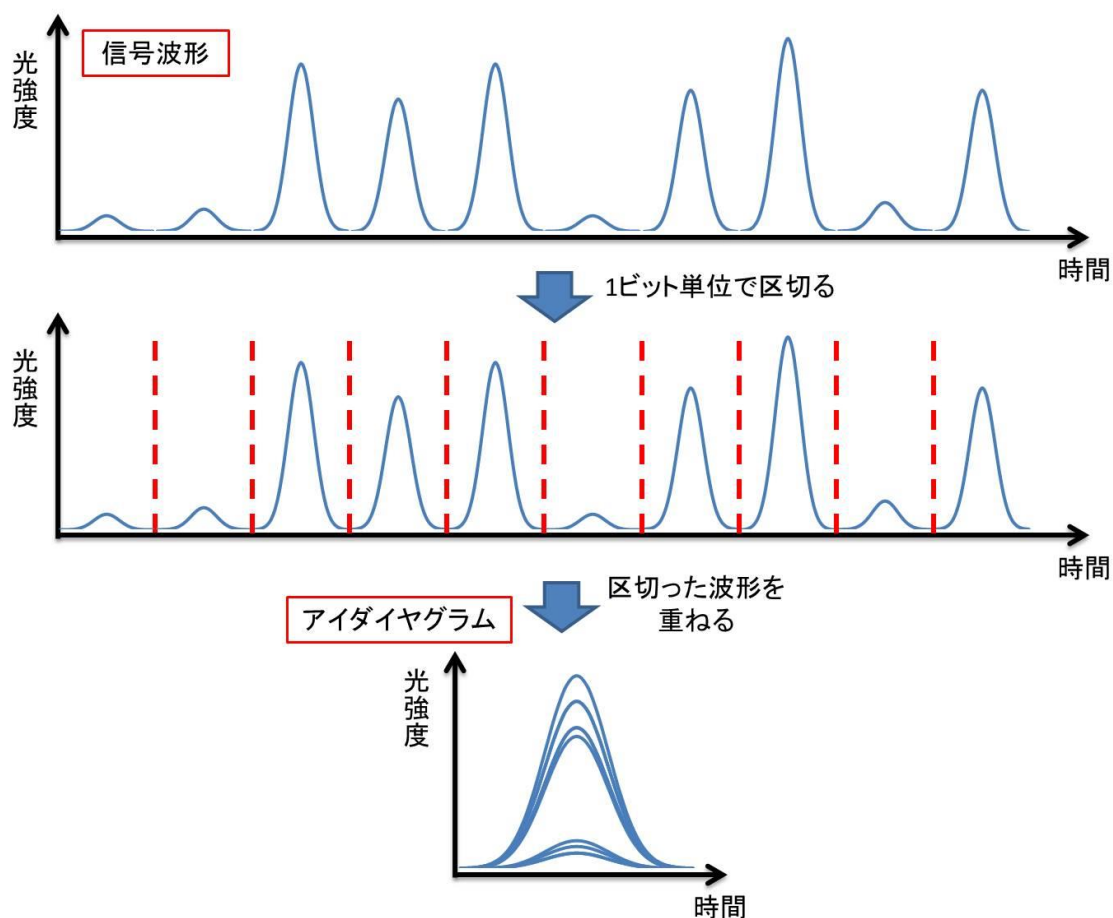


図 14. 信号波形とアイダイアグラムの関係

図 19 に信号波形とアイダイアグラムの関係性を示す。アイダイアグラムとは伝送された信号波形の多数のビットを 1 ビット幅の間隔で重ねたものである。アイダイアグラムを用いることによって、パターン効果、すなわちデジタル伝送において送信信号の信号パターンが引き起こす送信特性や受信特性の変化を観測することが可能となる[7]。

図 19 は信号品質の良いアイダイアグラム(左)と信号品質の悪いアイダイアグラムを表したものである。“1”に対応する光強度と“0”に対応する光強度のスペースの空き具合をアイ開口という。ここで左の図ではアイ開口がはっきりと開いていることがわかる。一方、右の図を見ると波形の重なりが悪く出力強度が大きくばらついていることがわかる。それに伴い、アイ開口も小さくなっていることがわかる。

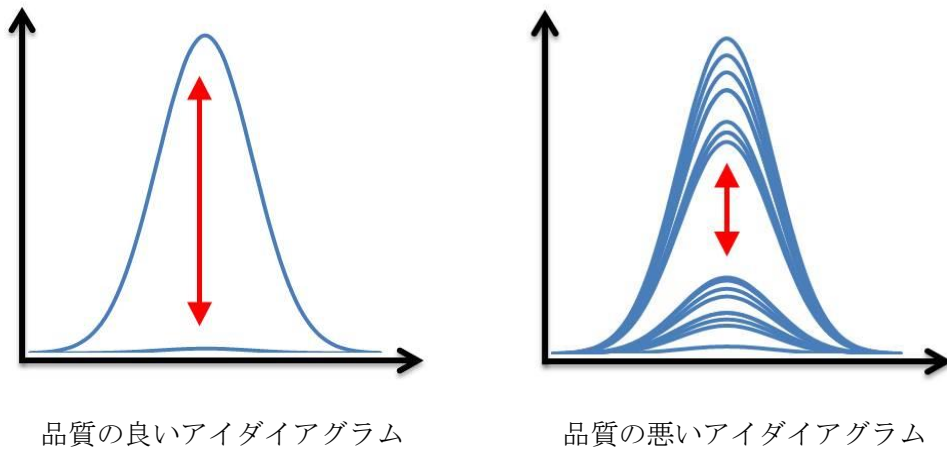


図 15. 信号品質の異なるアイダイアグラム

2.8 消光比

アイダイアグラムを数値的に評価する指標として消光比(ER:Extinction Ratio)が用いられ、これは論理ゲートを考える上での一つの性能指標となる。消光比(ER) は式によって表される。

$$ER = 10 \log \frac{P_{min}^1}{P_{max}^0} \quad (6)$$

ここで、 P_{min}^1 および P_{max}^0 は図 21 に対応しており、それぞれ出力信号光 “1” に対応する最小光強度，出力信号光 “0” に対応する最大光強度を表す。

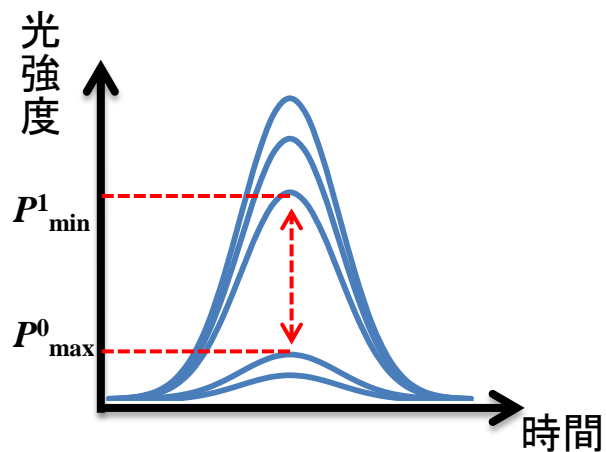


図 16. アイダイアグラムと消光比の関係

2.8 QD-SOA based MZI

QD-SOA based MZI は MZI の両アームに QD-SOA を配置した光デバイスである[9].

QD-SOA based MZI を図 21 に示す. また QD-SOA based MZI の真理値表を示す.

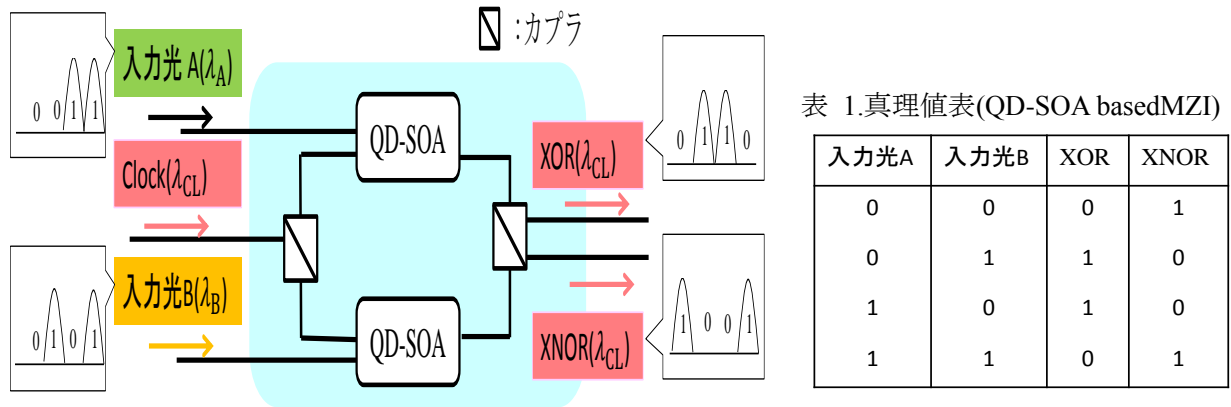


図 17. QD-SOA based MZI

Clock, 入力光 A, B, XOR, XNOR はそれぞれクロックパルス, 入力光, 出力光を示し λ_{CL} , λ_A , λ_B はそれぞれ対応する波長を示す. また表中の “1” は光強度が “1” の時の光を示し, “0” は光強度が “0” の時の光を示す.

まず動作原理を述べる. クロックパルスはカプラによって分岐され QD-SOA に入力され, その後カプラによって結合される. ここで入力光 A,B の光強度が共に “0” のとき, クロックパルスの位相は変化しない. よって結合する光の位相は同じになるため XOR, XNOR の出力光強度はそれぞれ “0”, “1” となる. また入力光 A,B の光強度が “1”, “0” または “0”, “1” のとき, 上アームまたは下アームのクロックパルスの位相が XPM により変化する. よって結合する光の位相は異なるので, XOR, XNOR の出力光強度はそれぞれ “1”, “0” となる. また入力光強度が共に “1” のとき, 光の位相は上下アームの QD-SOA で XPM により変化する. ここで位相の変化量は上下アームで同じである. よって結合する光の位相は同じになるため XOR, XNOR の出力光強度はそれぞれ “0”, “1” となる.

以上より QD-SOA based MZI は表 1 の真理値表と同じ動作であることがわかる.

2.9 全光 AND ゲート

全光 AND ゲートは 2.7 同様に MZI の両アームに QD-SOA を配置した光デバイスである．AND ゲートではクロックパルスではなく入力光 B をカプラで分岐し，QD-SOA に入力した後，カプラで分岐する．すなわち入力光 B の位相を変化させ，出力を変化させる．図 23 に全光 AND ゲートを示す．また全光 AND ゲートの真理値表を示す．

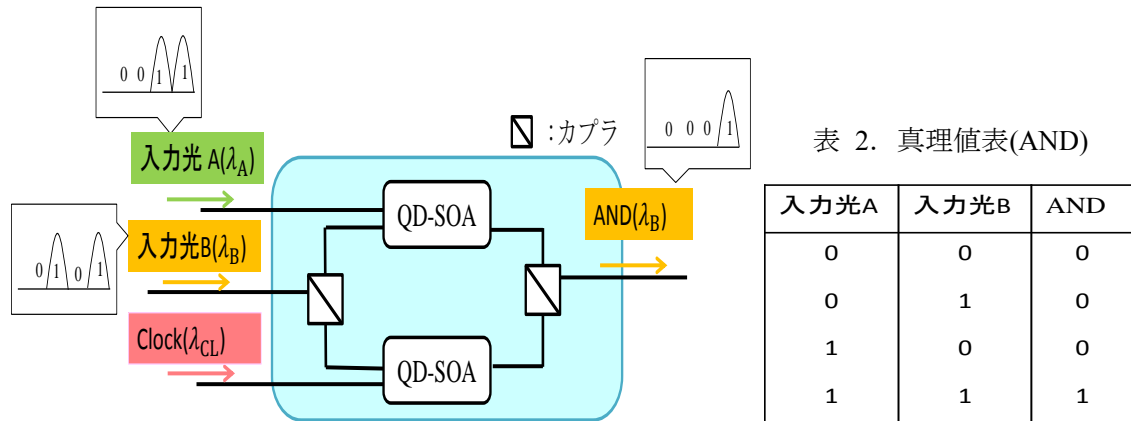


図 18. 全光 AND ゲート動作モデル

Clock, 入力光 A, B, AND はそれぞれクロックパルス, 入力光, 出力光を示し $\lambda_{CL}, \lambda_A, \lambda_B, \lambda_{CL}$ はそれぞれ対応する波長を示す．また表中の“1”は光強度が“1”の時の光を示し，“0”は光強度が“0”の時の光を示す．

まず動作原理を述べる．入力光 B はカプラによって分岐され QD-SOA に入力され，その後カプラによって結合される．また下アームでは常にクロックパルスが QD-SOA に入力されている．しかしクロックパルスは入力光 B の“0”と同じ光強度であるため XPM はおこらない．ここで入力光 B の光強度が“0”の時，入力光 A に関わらず，XPM は起きないため位相が変化しない．よって結合時の光は同位相のため，AND の光強度は“0”となる．また入力光 A, B の光強度が“0”，“1”のとき，入力光 B の位相は変化しない．よって結合する光の位相は同じになるため AND の出力光強度は“0”となる．また入力光強度が共に“1”のとき，入力光 B の位相は上アームで QD-SOA で XPM により変化する．

2.10 半加算器

半加算器とは同じ桁の2進数の加算を行うデバイスである。
加算と桁上がりの結果を二種類に分けて出力する。
例として4桁の2進数 $A=0,0,1,1$ と $B=0,1,0,1$ で加算を行う。

| A | B | Carry | Sum |
|---|---|-------|-----|
| 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 1 | 0 | 1 |
| 1 | 0 | 0 | 1 |
| 1 | 1 | 1 | 0 |

ここで Carry は桁上がりの結果で, Sum は加算の結果である。Carry は A,B の値が共に“1”の場合に桁上がりが起こり, 結果は“1”となる。つまり論理ゲートの一つ AND ゲートを用いることで演算することができる。また Sum は A,B のいずれかが“1”の場合に“1”となる。つまり論理ゲートの一つ XOR ゲートをもちることで演算することができる。よって半加算器は XOR ゲートと AND ゲートを組み合わせることによって動作させることができる。図に XOR ゲートと AND ゲートを組み合わせた半加算器を示す。

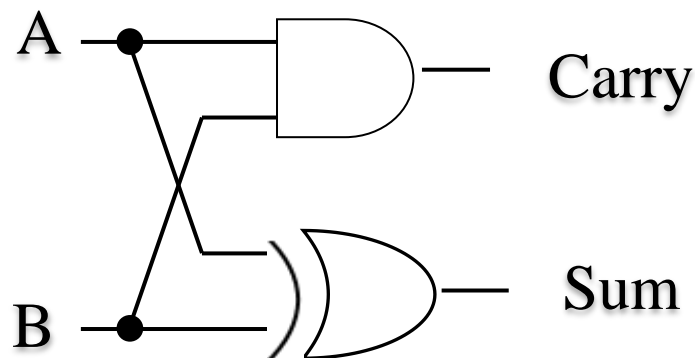


図 19. 半加算器回路図

よって本研究では2.8,2.9で述べた全光 XOR ゲート(QD-SOA based MZI)と全光 AND ゲートを組み合わせて半加算器を実現する。

2.11 従来法

従来法の全光半加算器は QD-SOAbased MZI を縦続につないだものである． [3]

図 23 は従来デバイスのモデル図を示している．

Port1 からは Sum が出力され,Port2 からの出力結果は②のデバイスに入力される.②は Carry を出力するデバイスであり,Port2 からの出力光に対して入力光 B で位相を変化させ出力結果を変化させる．

例えば,②への XNOR が無いとき,位相を変化させられる光が無いので入力光 B の入力に関係なく②からの出力光は無い.また Port2 に光があるとき,入力光 B の有無により出力結果が変化する.まず入力光 B が無いとき,Port2 の光はカプラで分岐し上下の QD-SOA に入射するが,その際入力光 B が無いので位相の変化が起きない.よって QD-SOA 通過した後,カプラで合波するとき,上と下の光の位相は同じなので出力されない．次に入力光 B があるとき Port2 の光はカプラで分岐され上下の QD-SOA に入射されるが,その際入力光 B があるので XPM が発生し,下の光の位相が変化する.よって QD-SOA を通過後,合波される際に上下の光の位相は異なるので光は出力される.すなわち Port2= “1”,入力光 B= “1” のとき,Carry= “1” となる.以上より表 1 の真理値表の通りに出力し,半加算器として動いていることがわかる．

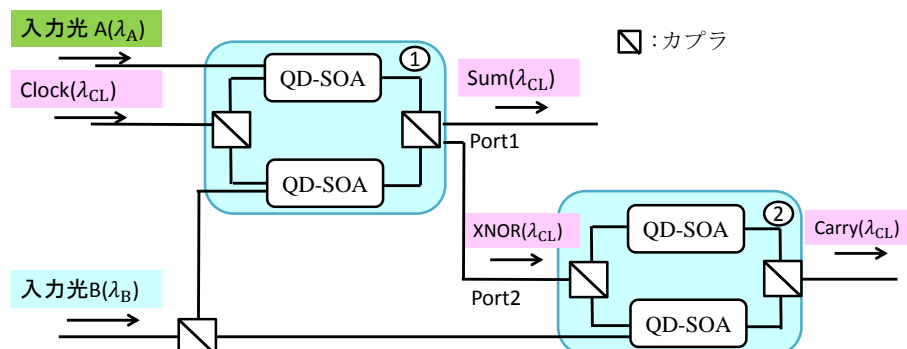


図 20：従来法の全光半加算器モデル

第 3 章 提案法

3.1 提案全光半加算器モデル

従来法では Carry を求めるために 2 つの縦続した QD-SOA based MZI を組み合わせていた。そのため、Sum と Carry は同時に出力されなかった。またビットレートは最大で 160Gbps であり、ビットレートを高くするほど出力光が劣化するという問題がある。

そこで本研究では新しい全光半加算器を提案する。従来法の問題である出力の遅延を無くし Sum と Carry を同時に出力し、ビットレートの向上を図る。

図 21 に提案デバイスの動作モデルを示す。Clock はクロックパルス、Sum, Carry は入力光 A, B に対する出力光を表す。 λ_A は入力光 A の波長を示す。 λ_B は入力光 B と Carry の波長を示す。また λ_{CL} はクロックパルスと Sum の波長を示す。表 3 に真理値表を示す。表 1 中の“1”は光強度が“1”の時の光を示し、“0”は光強度が“0”の時の光を示す。表 1 の“1”は光の入出力があることを示し、“0”は光の入出力がないことを示す。また一列目の①から④はこれから述べる動作原理のパターンを示している。

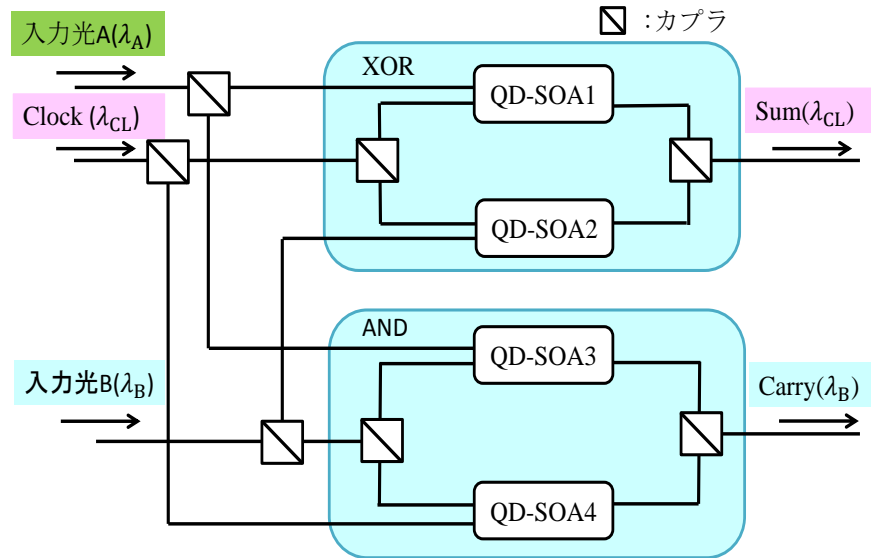


図 21：提案する全光半加算器モデル

表 3. 真理値表(半加算器)

| | 入力光A | 入力光B | Sum | Carry |
|---|------|------|-----|-------|
| ① | 0 | 0 | 0 | 0 |
| ② | 0 | 1 | 1 | 0 |
| ③ | 1 | 0 | 1 | 0 |
| ④ | 1 | 1 | 0 | 1 |

3.2 動作原理

提案デバイスは二つの QD-SOA based MZI が並列に組み合わせた構造となっている。カプラで入力光 A, B を 1 対 1 の割合で分岐し、それぞれを XOR, AND ゲートに入力する。またクロックパルスをも 1 対 10^{-6} の割合で分岐させ、それぞれを XOR, AND ゲートに入力する。

XOR ゲートではクロックパルスがカプラにより分岐され QD-SOA1, 2 を進んだ後カプラで合波される。ここで合波時の光の位相が異なると Sum が出力される。また AND ゲートでは入力光 B がカプラにより分岐され QD-SOA3, 4 を進んだ後カプラで合波される。ここで合波時の光の位相が異なると Carry が出力される。例えば①の場合、入力光 A, B の光強度が共に “0” のため XOR ゲートでは上下の QD-SOA1, 2 で位相は変化しない。よって QD-SOA にクロックパルスが入力され、その後カプラで合波する光は同位相のため Sum の出力強度は “0”。また AND ゲートは入力光 B の光強度が “0” の場合、入力光 B の位相は変化しない。よって QD-SOA3 に入力され、その後合波する光は同位相であるため Carry の出力強度は “0” となる。

②では入力光 A, B の光強度がそれぞれ “0”, “1” である。XOR ゲートでは QD-SOA2 で XPM によりクロックパルスの位相が変化する。よって QD-SOA に入り、その後カプラで合波する光の位相は異なるため Sum の光強度は “1”。また AND ゲートでは入力光 A の光強度が “0” のため入力光 B は位相の変化しない。よって QD-SOA3 を進んだ後カプラで合波する際には上下の光の位相は同じなので Carry は出力されない。

③では入力光 A の入力があり、入力光 B の入力がないので XOR ゲートでは QD-SOA で XPM により Clock の位相が変化する。よって合波する際、上と下の光の位相は異なるので Sum は出力される。また AND ゲートでは①と同様に入力光 B がない。すなわち位相を変化させる光の入力がないので Carry は出力されない。

④では入力光 A, B の光強度が “1” である。XOR ゲートでは QD-SOA1,2 両方で XPM によりクロックパルスの位相が同じだけ変化する。よって QD-SOA に入力され、その後カプラで合波する際には光の位相は同じであるため出力されない。また AND ゲートでは入力光 A の光強度が “1” であるため、QD-SOA3 で XPM により入力光 B の位相が変化する。よって合波する光の位相は異なるので Carry の光強度は “1” となる。

このように二つの独立したデバイスを用いて Sum と Carry をそれぞれ演算することで出力の遅延を無くし、半加算器としての性能を向上させる。

3.3 数値解析

3.3.1 XOR ゲート

3.2 で述べた動作原理から、出力光 Sum の波長はそれぞれクロックパルスと完全に一致することが分かる。つまり提案する全光半加算器における XOR ゲートは入力光 A,B の波長 λ_A, λ_B に対し、波長 λ_{CL} となる出力光を出力していることになるため、波長変換効果の特性を持っていることを示している。

次に、出力光の物理特性について述べる。出力光強度 P_{Sum} は以下の式から求められる [10].

$$P_{Sum}(t) = \frac{P_{CL}(t)}{4} \left\{ G_1(t) + G_2(t) - 2\sqrt{G_1(t)G_2(t)} \times \cos \left[-\frac{\alpha_{LEF}}{2} \times \ln \left(\frac{G_1(t)}{G_2(t)} \right) \right] \right\} \quad (6)$$

ここで、 $P_{CL}(t)$ はクロックパルスの光強度を示す。クロックパルスの光強度 P_{CL} に 1/4 がかけられているのは、光カプラによる分岐と結合によって光がそれぞれ 1/2 の強度になるためである。 $G_1(t)$ 、 $G_2(t)$ はそれぞれ上アームおよび下アームの QD-SOA1,2 における利得を示し、それぞれのアームにおいて光が増幅されることを表す。項 $-2\sqrt{G_1(t)G_2(t)} \times \cos \left[-\frac{\alpha_{LEF}}{2} \times \ln \left(\frac{G_1(t)}{G_2(t)} \right) \right]$ は位相差によって光が強めあうもしくは弱めあう状態になることを表している。項 $\ln \left(\frac{G_1(t)}{G_2(t)} \right)$ は上下アーム間の利得の比であり、線幅増大係数 α_{LEF} との乗算で位相差が求まる。さらに、その \cos を計算することによって、項 $-2\sqrt{G_1(t)G_2(t)} \times \cos \left[-\frac{\alpha_{LEF}}{2} \times \ln \left(\frac{G_1(t)}{G_2(t)} \right) \right]$ が負もしくは正の値となり、出力光強度 P_{Sum} が変動する。

ここで、 $G_1(t)$ 、 $G_2(t)$ は

$$G_1(t) = g_1 L \quad (7)$$

$$G_2(t) = g_2 L \quad (8)$$

で与えられる。 g_1 、 g_2 はそれぞれ QD-SOA1,2 における単位長さあたりの利得を表し、QD-SOA の長さ $L[\text{m}]$ との掛け算は QD-SOA の長さ $L[\text{m}]$ 当たりの利得を表す。

3.3.2 AND ゲート

3.2 で述べた動作原理から，出力光 Carry の波長は入力光 B と完全に一致することが分かる．つまり提案する全光半加算器における AND ゲートは入力光 A,B の波長 λ_A, λ_B に対し，波長 λ_B となる出力光を出力していることになるため，波長変換効果の特性を持っていることを示している．

次に，出力光の物理特性について述べる．出力光強度 P_{carry} は以下の式から求められる．

$$P_{carry}(t) = \frac{P_B(t)}{4} \left\{ G_3(t) + G_4(t) - 2\sqrt{G_3(t)G_4(t)} \times \cos \left[-\frac{\alpha_{LEF}}{2} \times \ln \left(\frac{G_3(t)}{G_4(t)} \right) \right] \right\} \quad (6)$$

ここで， $P_B(t)$ は入力光 B の光強度を示す．入力光 B の光強度 P_B に 1/4 がかけられているのは，光カップラによる分岐と結合によって光がそれぞれ 1/2 の強度になるためである． $G_3(t)$ ， $G_4(t)$ はそれぞれ上アームおよび下アームの QD-SOA_{3,4}における利得を示し，それぞれのアームにおいて光が増幅されることを表す．

項 $-2\sqrt{G_3(t)G_4(t)} \times \cos \left[-\frac{\alpha_{LEF}}{2} \times \ln \left(\frac{G_3(t)}{G_4(t)} \right) \right]$ は位相差によって光が強めあうもしくは弱めあう状態になることを表している．項 $\ln \left(\frac{G_3(t)}{G_4(t)} \right)$ は上下アーム間の利得の比であり，線幅増大係数 α_{LEF} との乗算で位相差が求まる．さらに，その \cos を計算することによって，項 $-2\sqrt{G_3(t)G_4(t)} \times \cos \left[-\frac{\alpha_{LEF}}{2} \times \ln \left(\frac{G_3(t)}{G_4(t)} \right) \right]$ が負もしくは正の値となり，出力光強度 P_{carry} が変動する．

ここで， $G_3(t)$ ， $G_4(t)$ は

$$G_3(t) = g_3 L \quad (7)$$

$$G_4(t) = g_4 L \quad (8)$$

で与えられる． g_3 ， g_4 はそれぞれ QD-SOA_{3,4}における単位長さあたりの利得を表し，QD-SOA の長さ L [m]との掛け算は QD-SOA の長さ L [m]当たりの利得を表す．

第 4 章 解析条件・結果

4.1 解析手法

本研究は Optiwave 社の OptiSystem というソフトウェアを用いて数値解析およびシミュレーションを行う。OptiSystem は光通信システムの設計やシミュレーションを行なうソフトウェアで、MATLAB との連携も可能であるため、作成したプログラムを組み込むことができる。図 28 に OptiSystem を用いて構成した提案する全光半加算器のモデルを示す。

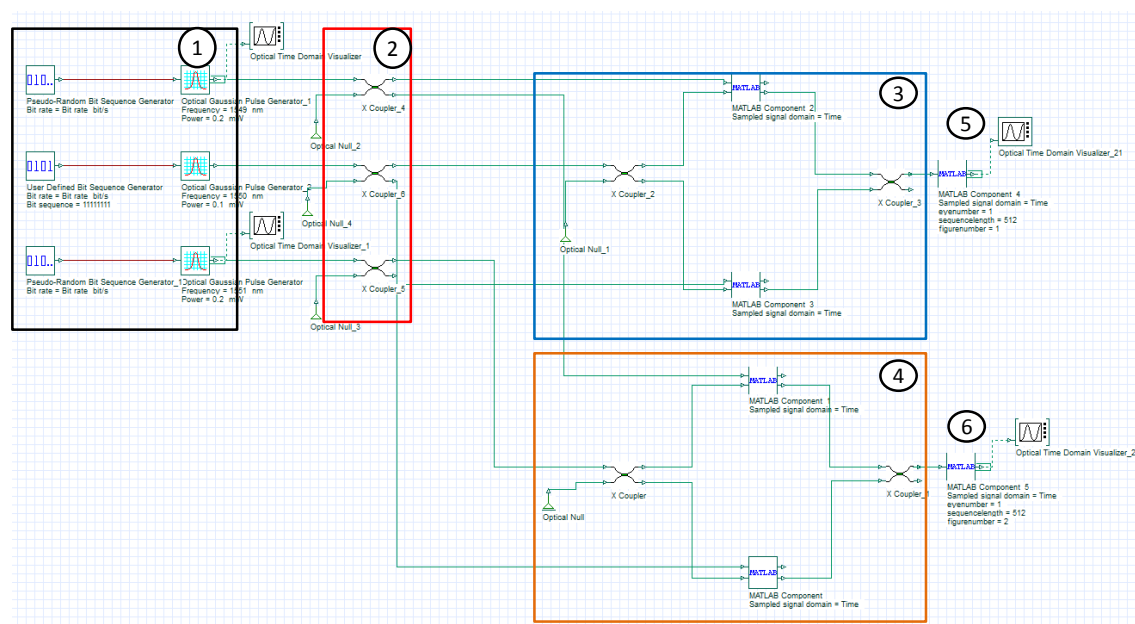


図 22 : OptiSystem で構成した提案デバイス

図中の赤線と緑線はそれぞれ光の通信路を示す。まず、黒枠の①では囲まれた部分で信号光 A,B とクロックパルスを発生させる。そして次に②のカプラで信号光 A,B とクロックパルスを 2 つに分岐し、それぞれを③、④に入力する。ここで分岐する割合は入力光 A,B が 1 対 1、クロックパルスは 1 対 1×10^{-9} とする。③は XOR ゲートである。③ではまずカプラでクロックパルスを分岐する。次に入力光 A とクロックパルスを上の MATLAB に入力し、入力光 B とクロックパルスを下の MATLAB に入力する。MATLAB は QD-SOA で、ここで光の強度の増幅、位相の変化を行い、光をカプラで結合し上側のポートから出力する。出力を得る。④は AND ゲートである。④ではまずカプラで入力光 B を分岐する。次に入力光 A と分岐した入力光 B を上の MATLAB に入力し、クロックパルスと分岐した入力光 B を下の MATLAB に入力する。ここの MATLAB は QD-SOA で、

光の強度の増幅, 位相の変化を行う. そして光をカップラで結合し上側のポートから出力結果を得る. ⑤, ⑥の MATLAB は出力結果のアイダイアグラムを計算するものである.

また本研究では従来法に対する性能分析を行うため, 図 23 に OptiSystem を用いて構成した従来法の全光半加算器のモデルを示す.

4.2 解析条件

本研究で使用する数値解析パラメータを表 4 に示す.

表 4 : 数値解析パラメータ

| Symbol | Description | Value | Unit |
|----------------|---------------|------------------------|----------|
| L_w | QD-SOA の厚さ | 0.25×10^{-6} | m |
| W | QD-SOA の幅 | 3×10^{-3} | m |
| N_Q | 量子ドット密度 | 2×10^{-3} | m^{-2} |
| v_g | 群速度 | 2×10^{-3} | m/s |
| α_{int} | 損失係数 | 200 | m^{-1} |
| τ_{w2} | キャリア寿命(WL→ES) | 3×10^{-12} | s |
| τ_{2w} | キャリア寿命(ES→WL) | 1×10^{-9} | s |
| τ_{wR} | キャリア寿命(WL→系外) | 1×10^{-9} | s |
| τ_{21} | キャリア寿命(GS→ES) | 0.16×10^{-12} | s |
| τ_{12} | キャリア寿命(GS→ES) | 1.2×10^{-12} | s |
| τ_{1r} | キャリア寿命(GS→系外) | 0.4×10^{-9} | s |
| α_{LEF} | 線幅増大係数 | 4.5 | |

本研究では表 4 に記載していない QD-SOA の長さ L , 励起電流 I , 最大利得 g_{max} とビットレートを変化させ提案デバイスと従来デバイスの性能分析を行う.

4.3 提案法に対する性能分析

クロックパルス，入力光 A,B の光強度，波長を以下に示す．

- 光強度

入力光 A,B:0.2mW

クロックパルス:0.1mW

- 波長

入力光 A:1549nm

入力光 B:1550nm

クロックパルス:1551nm.

以上の光のパラメータに対して QD-SOA の長さ，ビットレート，QD-SOA への励起電流をそれぞれ以下に設定して，ビットレートを変化させシミュレーションを行った．

以下に動作確認を行うパラメータを示す．

1. 長さ $L=4 \times 10^{-3}[m]$
最大利得 $g_{max}=1400[m^{-1}]$
励起電流 $I=30[mA]$
ビットレート：100~1000[Gbps]
2. 長さ $L=2 \times 10^{-3}[m]$
最大利得 $g_{max}=3000[m^{-1}]$
励起電流 $I=50[mA]$

パラメータ 1,2 に対してビットレートを変化させ，入出力特性を確認する．

またパラメータ 2 においては QD-SOA の長さ L と励起電流 I を変化させ入出力特性の変化を確認する．

4.3.1 パラメータ 1 における提案デバイスの動作確認

本項のパラメータは従来法におけるものであり, 本項では従来法との消光比の比較も行う.

図 24 にビットレート 100Gbps における提案デバイスの入出力波形を示す.

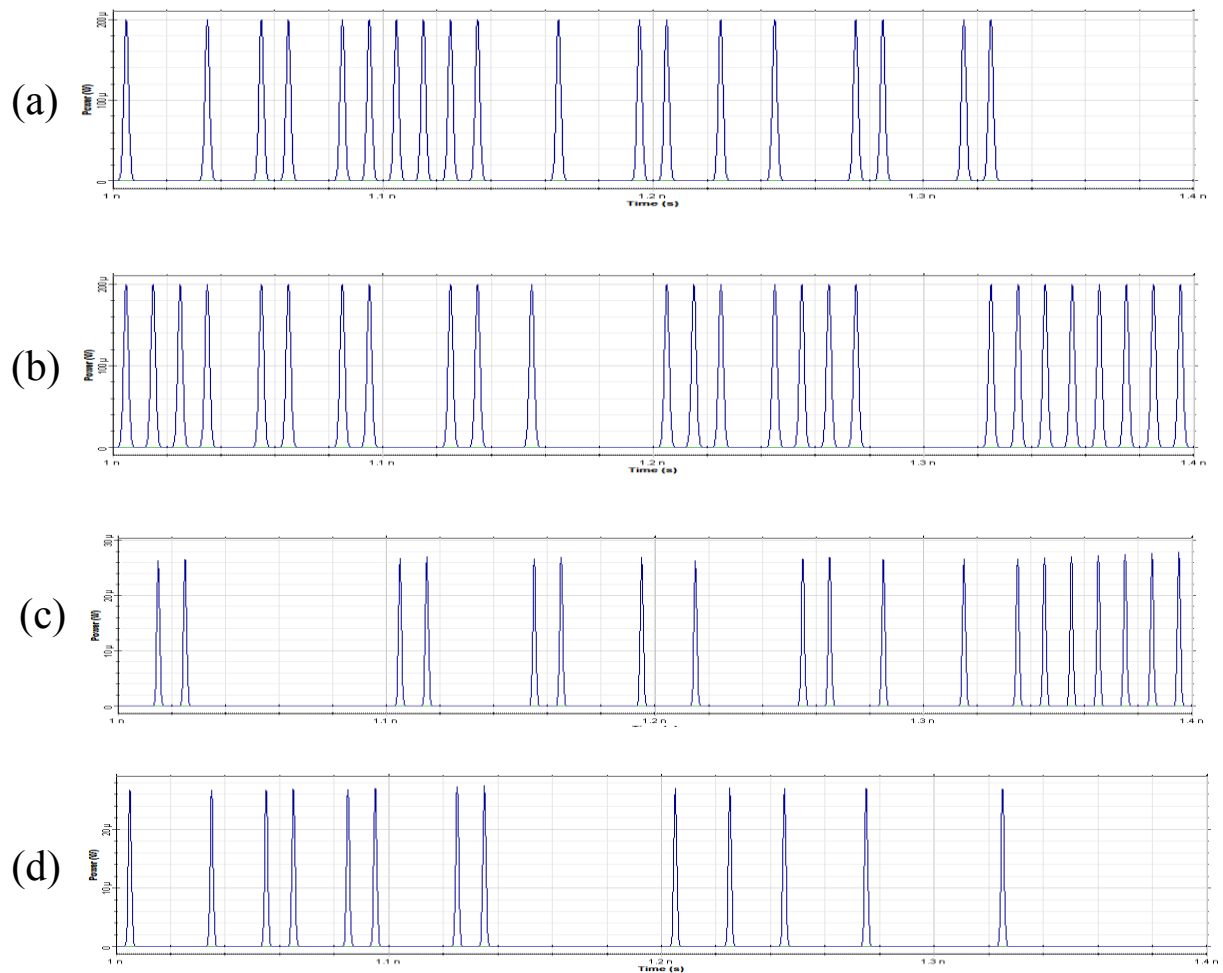


図 23 入出力波形

図中において横軸は時間, 縦軸は光強度である. それぞれ(a)入力光 A の波形, (b)入力光 B の波形, (c)Sum の波形, (d)Carry の波形を示し, 全光半加算器の入力 A,B および出力光 Sum,Carry に対応する. 図より, 入力光 A, B の光強度のいずれかが大きいときのみ Sum の出力光強度は大きくなっている. また入力光 A,B の光強度が共に大きいときのみ Carry の出力光強度は大きくなっている. よって全光半加算器として動作していることがわかる.

- パラメータ 1 におけるアイダイアグラム(200Gbps)

図 25 にパラメータ 1 の提案デバイスのアイダイアグラムを示す.

図 25 より Sum, Carry は共にアイ開口がはっきりと見られる. また図のアイダイアグラムからは Sum, Carry の消光比(ER)はそれぞれ $ER_{\text{sum}}=44.13\text{dB}$, $ER_{\text{carry}}=42.46\text{dB}$ の値を得ている. よって提案デバイスは従来法のパラメータでも十分な動作ができることを示す.

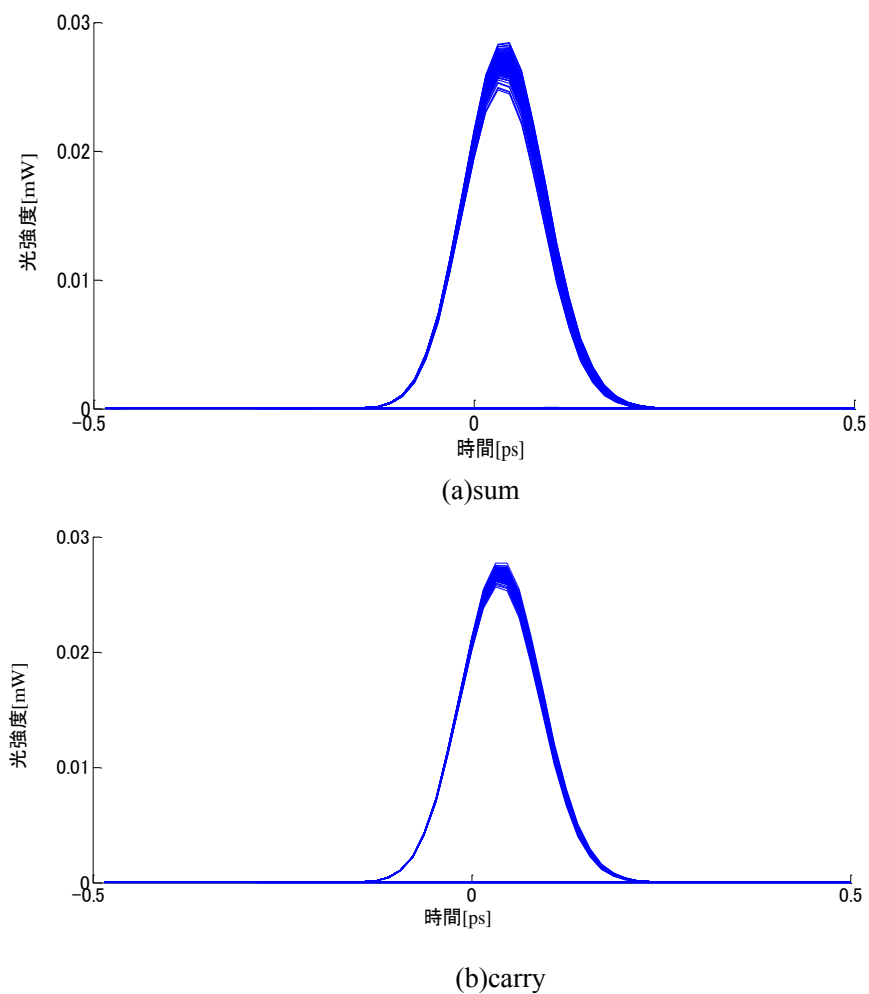


図 24. ビットレート 200Gbps におけるアイダイアグラム(a)sum,(b)carry

パラメータ 1 におけるビットレートと消光比の関係

図 27 にパラメータ 1 におけるビットレートを 100Gbps から 1Tbps まで 100Gbps 刻みで提案デバイスの動作を示す。

図よりビットレートが高くなるにつれて、消光比が小さくなり 800Tbps では sum, carry の消光比はそれぞれ 6.98dB, 10.98dB となっている。よってこれ以上ビットレートを高くすると“1”の光強度と“0”の光強度の判別が不可能になる。これはビットレートを高くすることによって QD-SOA での光の増幅が間に合わなくなっているためであると考えられる。しかし 1Tbps でも十分な消光比を得ることが確認できた。

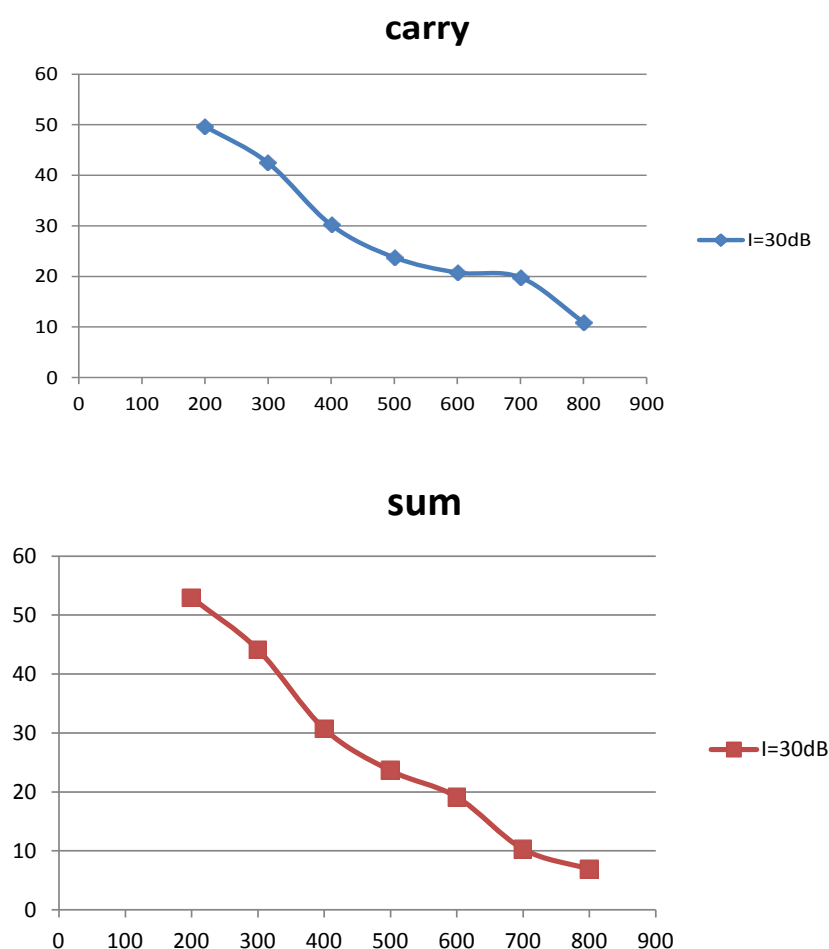


図 25. ビットレートと消光比の関係(パターン①)

4.3.2 パラメータ 2 における提案デバイスの動作

図にビットレート 500Gbps における提案デバイスの入出力波形を示す.

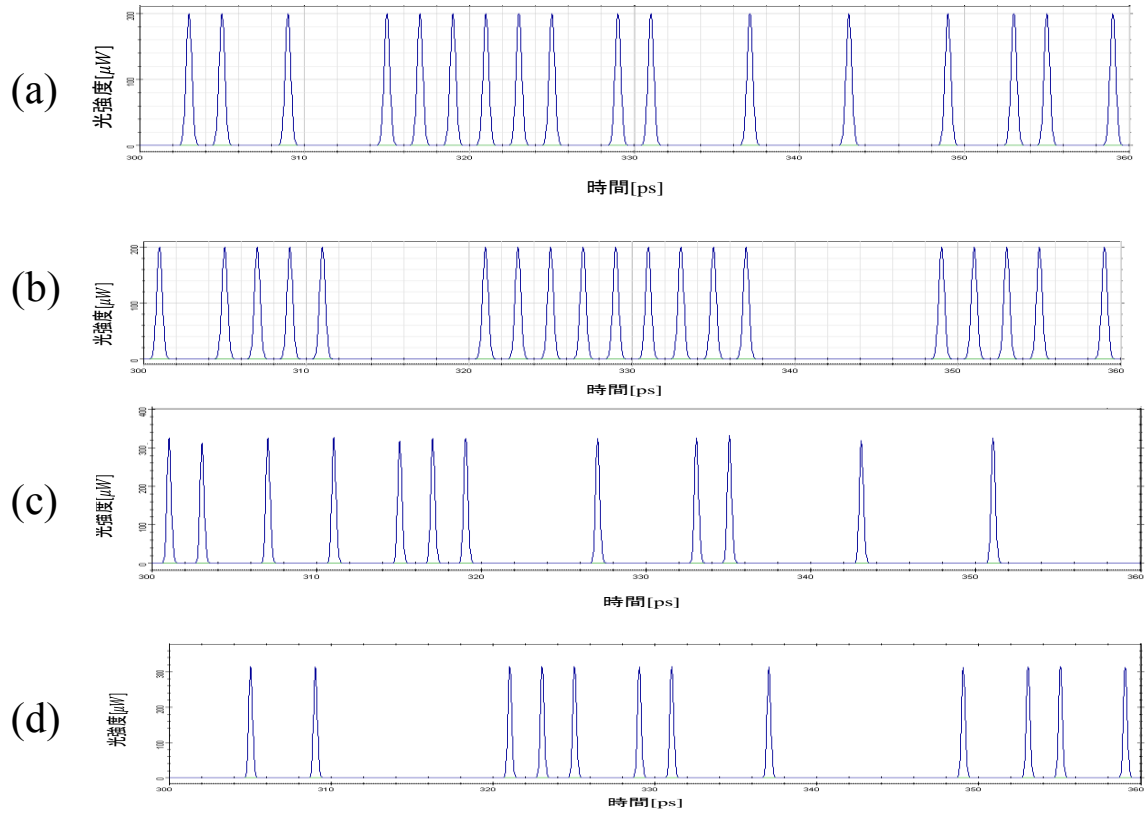


図 26. ビットレート 500Gbps における入出力波形

図中において横軸は時間、縦軸は光強度である. それぞれ(a)入力光 A の波形, (b)入力光 B の波形, (c)Sum の波形, (d)Carry の波形を示し, 全光半加算器の入力 A,B および出力光 Sum,Carry に対応する. 図より, 入力光 A, B の光強度のいずれかが大きいときのみ Sum の出力光強度は大きくなっている. また入力光 A,B の光強度が共に大きいときのみ Carry の出力光強度は大きくなっている. よって全光半加算器として動作していることがわかる.

パラメータ 2 におけるアイダイアグラム(500Gbps)

図 28 にパラメータ 2 における提案法のアイダイアグラムを示す.

図より Sum, Carry は共にアイ開口がはっきりと見られる. また図のアイダイアグラムからは Sum, Carry の消光比(ER)はそれぞれ $ER_{\text{sum}}=45.6[\text{dB}]$, $ER_{\text{carry}}=49.94[\text{dB}]$ の値を得ている. よって提案デバイスは従来法のパラメータでも十分な動作ができることを示す.

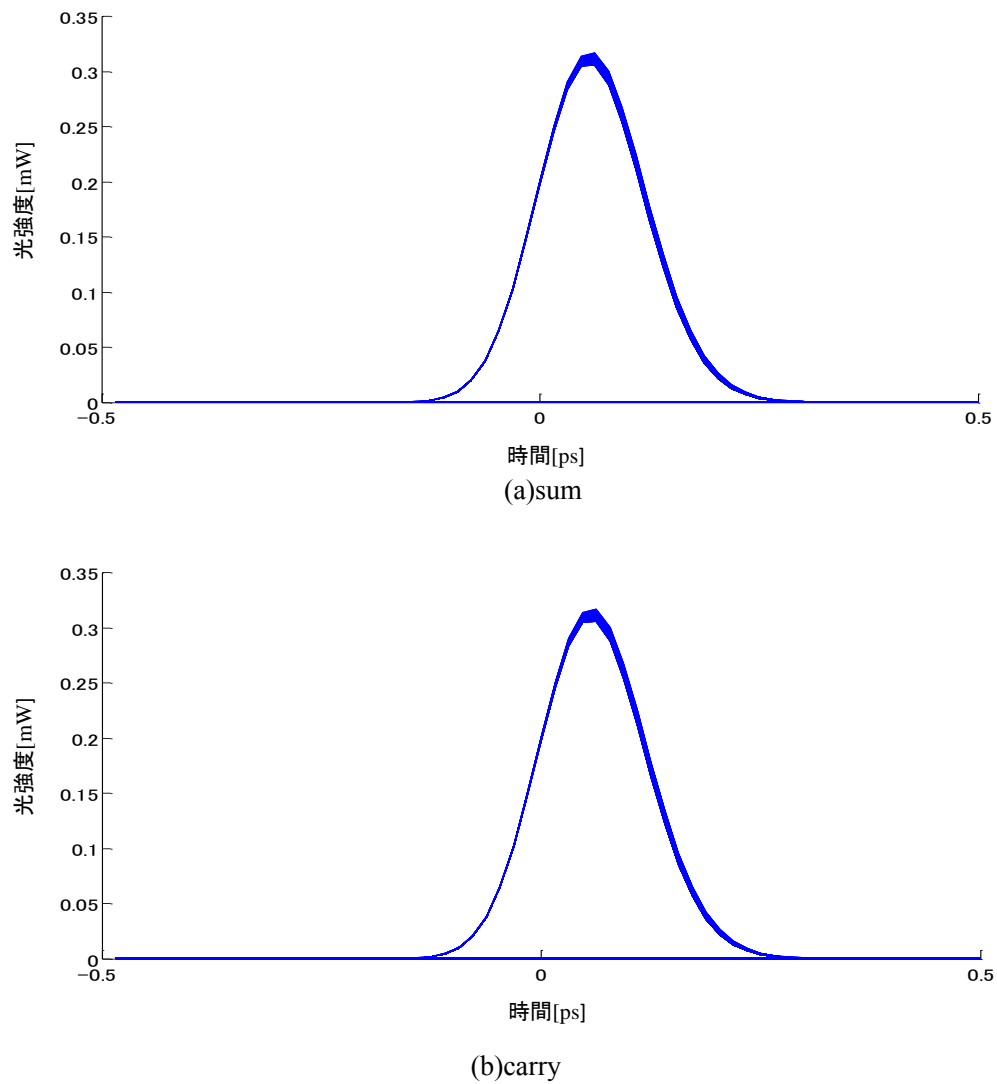


図 27. ビットレート 500Gbps におけるアイダイアグラム(a:sum,b:carry)

パラメータ 2 におけるビットレートと消光比の関係(提案デバイス)

図 29 にパラメータ 2 におけるビットレートを 500Gbps から 1Tbps まで 100Gbps 刻みで提案デバイスの動作を示す。

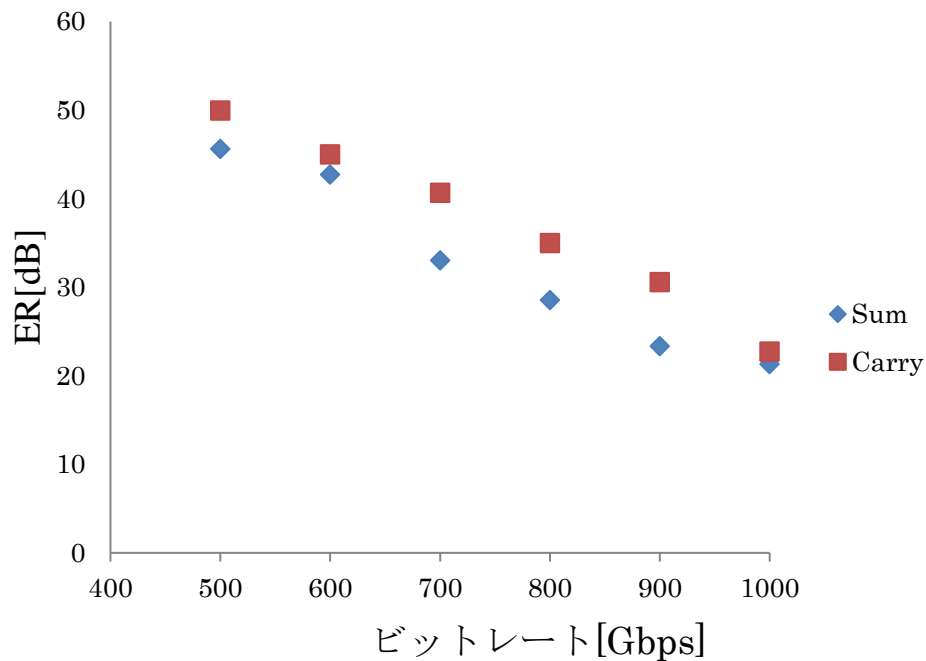


図 28. ビットレートと消光比の関係(パラメータ 2)

図 28 よりビットレートが高くなるにつれて、消光比が小さくなっていることがわかる。これはビットレートを高くすることによって QD-SOA での光の増幅が間に合わなくなっているためであると考える。

しかし 1Tbps でも十分に高い消光比を得ることが確認できた。

パラメータ 2 における電流と消光比の関係

図 30 に消光比と電流の関係を示す.

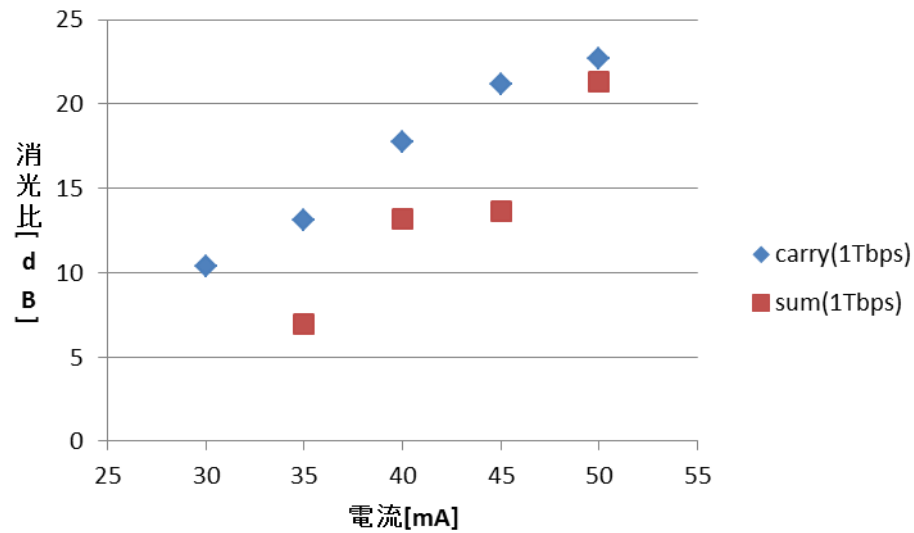


図 29. 消光比と電流の関係

図 29 より電流が大きくなるほど消光比は良好な値を得ることができている.

QD-SOA は電流が小さいと利得の回復が遅い. 回復が遅れると誘導放出が続き, 光が“0”のときでも増幅されてしまうためと考える.

また図 29 より 50mA の電流において sum と carry の消光比は近い値を得ることができた.

4.4 従来法に対する性能分析

ここで従来法に対する入力光，クロックパルスの波長，光強度を示す．

入力光 A

- 波長：1550nm
- 光強度：5.29mW

入力光 B

- 波長：1550nm
- 光強度:5.3mW

クロックパルス

- 波長：1550nm
- 光強度：1mW

入力光 A,B で光強度が異なるのは，入力光 B は図 20 よりカブラで分岐され 2 つ目の QD-SOA based MZI の下アームの QD-SOA に入力するためである．

またカブラの分岐率は Port2 から出力される XNOR の光強度に合わせる必要があるため，0.001 とした．ただし Port2 から出力される光は非常に高い光強度のため減衰器に通し，光強度を元の光強度の 1%まで弱めた．

また QD-SOA のパラメータは表 4 と 4.3 に示したパラメータ 1, 2 を用いる．

パラメータ 1, 2 を再度記載する．

1. 長さ $L=4 \times 10^{-3}[m]$
最大利得 $g_{max}=1400[m^{-1}]$
励起電流 $I=30[mA]$
ビットレート：100~1000[Gbps]
2. 長さ $L=2 \times 10^{-3}[m]$
最大利得 $g_{max}=3000[m^{-1}]$
励起電流 $I=50[mA]$

4.4.2 パラメータ 2 における従来法の動作確認

ビットレート 100Gbps における従来法の信号光波形を示す.

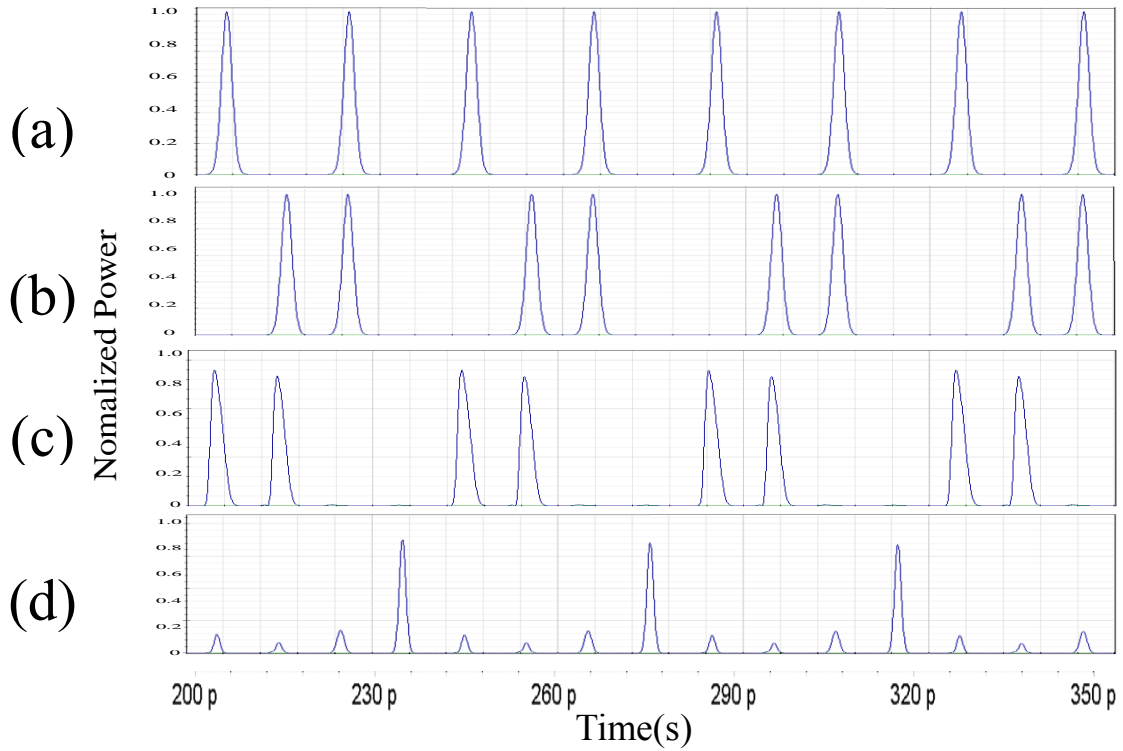


図 30 従来法入出力波形(パラメータ 2)

図中の(a)は入力信号 A, (b)は入力信号 B, (c)は Sum, (d)は Carry を表している.

図 30 より Sum は入力信号 1,2 のどちらかが入力されているときのみ出力されていることがわかる. また Carry は光が入力されていないときに出力されているように見える. これは従来法の構成により 1 つ目の QD-SOAbasedMZI からでてくる光を利用して Carry を演算するためである. そのため Carry はおよそ 1 ビット遅れて出力されているので Sum と Carry を同時に出力するためには, Sum を出力するポートに遅延線を設置する必要がある.

また Carry の出力波形からは余計な光も出力されていることがわかる. これは 1 つ目の QD-SOAbasedMZI からの光が安定していないためであると考えられる.

ビットレート 100Gbps における従来法のアイダイアグラムを示す.

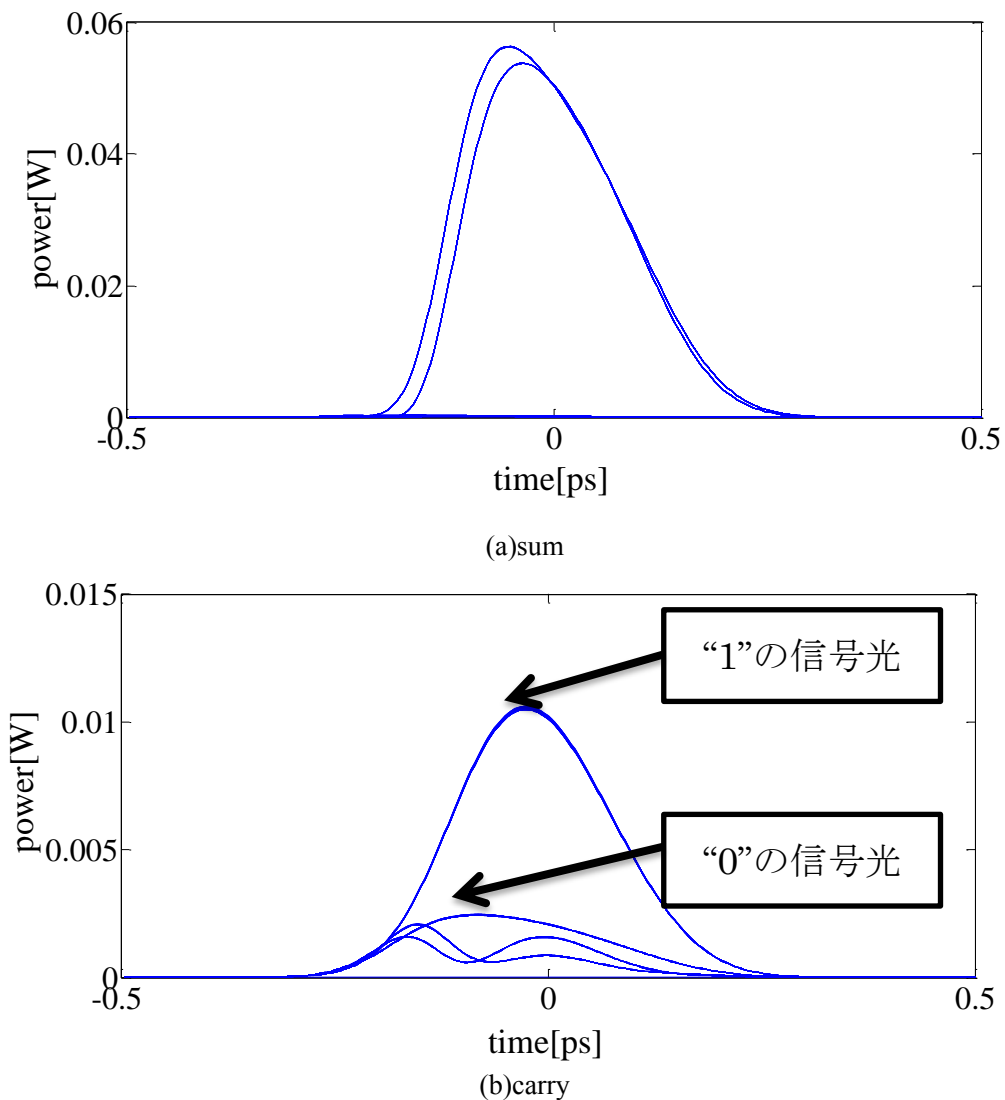


図 31 従来法アイダイアグラム

図 31 より sum のアイダイアグラムは“1”の光強度には少しずれがある．これは二つの入力光 A,B の強度が異なるため，位相の変化量も異なってしまうためである．しかし ER は 30.15 と十分な値をとれている．

一方で carry のアイダイアグラムは“0”の光強度の波形が大きく見られ，ER は 6.29dB しか得ることができていない．これは一つ目の QD-SOA based MZI からの出る XNOR には余計な光があり，その光も XPM で位相の変化が起き Carry のポートから出力してしまうためと考えられる．よって従来法ではこれ以上ビットレートを高くすることはこのパラメータでは難しいと考える．

パラメータ 2 におけるビットレートと消光比の関係(従来デバイス)

図に従来デバイスにおける 100Gbps から 200Gbps までのビットレートと消光比(ER)の関係を示す。

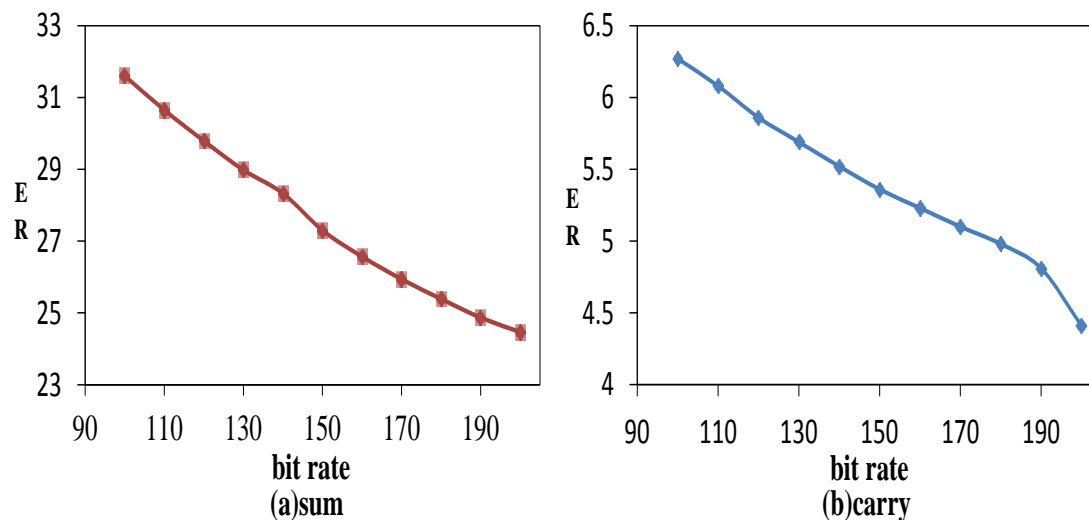


図 32 従来デバイスにおけるビットレートと消光比の関係(パラメータ 2)

図 32 より sum と Carry ではビットレートに対して消光比が異なることがわかる. 200Gbps における Sum の消光比はおよそ 24db である. それに対して carry の消光比はおよそ 4.5db と”1”の信号と”0”の信号を判別するが難しくなっており, 誤りが発生する可能性が非常に高い. この原因として Sum は一つの QD-SOA based MZI で演算できるが, Carry は 2 つの縦続している QD-SOA based MZI で演算する必要がある, 一つ目の QD-SOA based MZI からくる光が劣化しているため, 二つ目の QD-SOA based MZI でより光が劣化してしまうためであると考え.

第 5 章 まとめ・今後の課題

5.1 まとめ

本研究では、全光 XOR ゲートと全光 AND ゲートを組み合わせた全光半加算器を提案した。提案した全光半加算器に対し数値解析を行った。また各ビットレートにおける提案デバイスの入出力特性とアイダイアグラムを確認し、消光比を求めた。これにより 1Tbps という高いビットレートでも動作することがわかった。よって提案するデバイスが半加算器として有効であることを示した。

5.2 今後の課題

本研究では新たに全光 XOR ゲートと全光 AND ゲートを並列に組み合わせた全光半加算器を提案したが、半加算器は全加算器など様々な論理回路の基礎である。その為、提案デバイスを用いた全光全加算器などを構築することが今後の課題である。

謝辞

本研究を進めるにあたり，数多くのご指導およびご助言を頂きました指導教官の八嶋弘幸教授，細谷剛助教，島田裕助教に深く感謝し，御礼を申し上げます．先生方のおかげで，順調に研究を進めることができました．また，研究以外の面においても，様々な指摘や叱咤激励を頂きました古谷侑菜さんをはじめとする八嶋研究室の皆様にも深く感謝いたします．

平成 27 年 1 月

東京理科大学工学部第二部経営工学科 八嶋研究室
桜庭 陽介

参考文献

- [1] 谷田貝豊彦著 光コンピューティング 共立出版株式会社 2004.
- [2] B. Dai, S. Shimizu, X. Wang, and N. Wada, “Simultaneous All-Optical Half-Adder and Half-Subtractor Based on Two Semiconductor Optical Amplifiers,” *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 21, no. 1, pp. 91-99, Jan. 2013.
- [3] D. K. Gayen, A. Bhattacharyya, T. Chattopadhyay, and J. N. Roy, “Ultrafast All-Optical Half Adder Using Quantum-Dot Semiconductor Optical Amplifier-Based Mach-Zehnder Interferometer,” *IEEE J. Lightw. Technol.*, vol. 30, no. 21, pp. 3387-3393, Nov. 2012.
- [4] 服部利明 非線形光学入門, 裳華房, 2009
- [5] 黒川隆志著 光機能デバイス, 共立出版, 2004.
- [6] 井上恭 ファイバー通信のため非線形光学, 森北出版, 2011.
- [7] 荒川泰彦著 量子ドットエレクトロニクスの最前線, エヌ・ティー・エス, 2011.
- [8] 加藤宜雄 光通信技術入門 コロナ社 2005
- [9] H. Lee, H. Yoon, Y. Kim, and J. Jeong, “Theoretical Study of Frequency Chirping and Extinction Ratio of Wavelength-Converted Optical Signals by XGM and XPM Using SOA’s”, *IEEE JOURNAL OF ELECTRONICS*, VOL.35, No.8, pp.1213-1219, Aug. 1999.
- [10] 入江孝憲, “単一パリティチェックを用いた全光誤り検出回路”, 東京理科大学大学院工学研究科経営工学専攻修士論文, 2014