

単一パリティチェックを用いた 全光誤り検出回路の特性解析

工学修士学位請求論文

平成25年度

東京理科大学大学院工学研究科経営工学専攻

4412603 入江 孝憲

指導教員：工学博士 八嶋 弘幸

工学博士 宮部 博史

博士(工学) 藤沢 匡哉

目次

第1章	序論	3
1.1	背景	3
1.2	目的	4
1.3	構成	5
第2章	関連研究	6
2.1	誤り訂正・検出技術	6
2.1.1	誤り訂正・検出技術の概要	6
2.1.2	単一パリティチェック	6
2.2	非線形光学現象	8
2.2.1	非線形光学現象の概要	8
2.2.2	四光波混合	8
2.2.3	光カー効果と自己・相互位相変調	9
2.3	全光信号処理デバイス	10
2.3.1	光カプラ	10
2.3.2	マッハツェンダー干渉計	11
2.3.3	SOA	12
2.3.4	QD-SOA	13
2.3.5	QD-SOA-based MZI	21
2.3.6	AOWC	24
2.4	Transfer Matrix Method	27
第3章	単一パリティチェックを用いた 全光誤り検出回路	30
3.1	提案回路に用いる論理ゲート	30
3.2	本論文で用いる全光信号処理デバイス	31
3.3	提案回路の構成	33

第 4 章	性能評価	34
4.1	数値解析の概要とパラメータ設定	34
4.1.1	数値解析の概要	34
4.1.2	パラメータ	37
4.2	数値解析結果による性能評価	40
4.2.1	出力信号光波形	40
4.2.2	アイダイアグラム	43
4.2.3	雑音耐性	45
第 5 章	結論	48
謝 辞		49
参考文献		50
付 録 A	QD-SOA(XPM)	52
付 録 B	QD-SOA(FWM)	57

第1章 序論

1.1 背景

FTTH(Fiber To The Home)に代表されるブロードバンドインターネットアクセス，モバイル通信などにより IP(Internet Protocol) パケットを中心としたデータトラフィックが爆発的に増加している．莫大なデータトラフィックのニーズに応じて波長多重技術が飛躍的に進歩し，光ネットワークでは，1本の光ファイバに毎秒テラビットのデータを伝送できるようになった [1]-[4]．

光ネットワークでは，伝送路である光ファイバの他に，ルーティング，誤り訂正・検出，光増幅，信号再生などの信号処理部分が存在する．このような信号処理部分では，光信号は一旦電気信号に OE(Optical-to-Electrical) 変換されたあと，信号処理を施され，EO(Electrical-to-Optical) 変換されたあと，光信号として再び光ファイバを伝送される．もし，OE-EO 変換せずに，光信号のまま信号処理を行うことができれば，いわゆるトランスペアレントな状態が保たれ，真の意味での光ネットワーク，つまり全光ネットワークとなる．全光ネットワークのメリットとして，以下のことが考えられる．

- (i) 伝送レート的大幅な向上
- (ii) OE-EO 変換の省略によるネットワークの低消費省電力化
- (iii) 遅延の少ない情報転送

光ネットワークの全光化については，ルーティングや光増幅，信号再生に関するさまざまな研究報告がされている [5]．しかし一方で，誤り訂正・検出技術の全光化に関する報告は全くなされていないのが現状である．将来の光ネットワークにおいて伝送レート高速化による光信号の歪みや通信路における雑音の影響を低減し，高品質な通信を実現するためには，誤り訂正・検出技術は必要な技術である．図 1.1 に既存および将来の誤り訂正検出技術を示す．図 1.1 に示すように，O/E-E/O 変換の省略によるボトルネック解消のためには，その全光化は重要な課題である [5]-[8]．

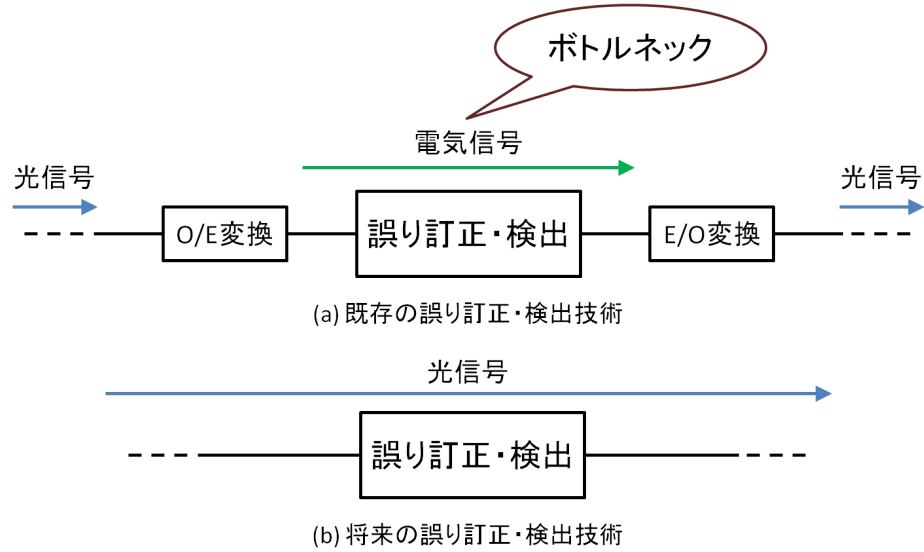


図. 1.1: (a) 既存および (b) 将来の誤り訂正・検出技術

誤り訂正・検出技術の全光化を目指す上で、光論理ゲートを用いることが考えられる。これまで、光 XOR、光 AND、光 NOR、光 OR など、多くの光論理ゲートが提案されてきた [9][10]。特に、マッハツェンダ干渉計 (MZI: Mach-Zehnder Interferometer) の両アームに SOA (Semiconductor Optical Amplifier) を設置した構成の光 XOR ゲートは、入出力特性・処理速度などの面において、さまざまな利点を有する [10]。また、SOA を量子ドット半導体光増幅器 (QD-SOA : Quantum-Dot SOA) [11]-[14] に置き換えることで、さらなる高性能化を実現した光 XOR ゲートも報告されている [15][16]。

1.2 目的

本論文では、将来の光ネットワークにおける誤り訂正・検出技術の全光化を目的に、単一パリティチェックを用いた全光誤り検出回路を提案し、性能評価を行う。これまでの研究において、全光型の論理回路が多く提案されてきたが、それらを用いた誤り訂正・検出技術については考えられていなかった。本論文では、将来の全光型誤り訂正・検出技術に向けた第一歩として、誤り検出技術の一つである単一パリティチェックに着目し、その全光信号処理回路を提案し、その入出力特性を数値解析により評価する。

1.3 構成

本論文の構成について述べる．まず，第2章で関連研究として，誤り検出技術の一つである単一パリティチェックと本論文で用いる全光信号処理デバイスの動作原理および理論モデルについて述べる．第3章では本論文で提案する単一パリティチェックを用いた全光誤り検出回路の概要と詳細を示す．次に，第4章では提案回路について波形，アイダイアグラム，消光比，雑音耐性の面から性能評価を行う．最後に，第5章では本論文のまとめと今後の課題について述べる．

第2章 関連研究

本章では、本論文の関連研究について述べる。

2.1 誤り訂正・検出技術

本節では、誤り訂正・検出技術の概要と本論文で用いる単一パリティチェックについて述べる。

2.1.1 誤り訂正・検出技術の概要

誤り訂正技術とは送信したい信号に冗長を加え符号語として送信し、通信路で誤りが発生したときに受信側で誤りを訂正・検出をする技術である [17]。通信システムにおいては情報が正確に伝送されることが極めて重要であるが、実際のシステムにおいては雑音や歪みなどにより情報が正確に伝送されない場合がある。そこで、デジタル信号の伝送における誤りを軽減し、信頼性を高めるためには、誤り訂正・検出技術が重要となる。

2.1.2 単一パリティチェック

単一パリティチェックとは、最も簡単な誤り検出技術の一つである [18]。例として8ビットの偶重み単一パリティチェックを以下に示す。長さ7の情報信号系列 \mathbf{x} を

$$\mathbf{x} = (x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6, x_7), x_i \in \{0, 1\}, i = 1, \dots, 7 \quad (2.1)$$

とする。この情報信号系列に冗長信号 c を付け加えて、長さ $8 = 7 + 1$ の符号語

$$\mathbf{u} = (x_1, x_2, \dots, x_7, c) \quad (2.2)$$

を作る。ただし、記号 c は符号語 \mathbf{u} 内の信号 “1” の個数が偶数になるように決める。すなわち、

$$c = x_1 \oplus x_2 \oplus \cdots \oplus x_7 \quad (2.3)$$

を満たす．ここで， \oplus は排他的論理和 (XOR:Exclusive OR) の演算を示す．

いま，符号語 u に誤りが生じて，符号語内に含まれる信号“1”の個数が奇数になったとすると，受信側では，符号語として使われるはずのないパターンを受信したわけであるから，送信された符号語に誤りが生じていることが分かる．つまり，誤りの個数が奇数であれば，必ず誤りが生じていることを知ることができる．

2.2 非線形光学現象

本章では、本論文で重要となる非線形光学現象について述べる。

2.2.1 非線形光学現象の概要

レーザーの出現によって、時間的・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さまざま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、弱い光によって起こる、直進、反射、屈折、回折、干渉、吸収、発光、散乱といったさまざまな光学現象は、すべて線形光学現象と呼ばれる。ここで線形であるとは、光に対する物質の応答が線形、すなわち光電場に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、物質を構成している分子や原子がつくる電気双極子モーメントの大きさが変化するため、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 [19]。

いま、2つの周波数成分を持つ光 $A(t)$ が

$$A(t) = A_1 \cos \omega_1 t + A_2 \cos \omega_2 t \quad (2.4)$$

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、

$$A(t)^2 = \{A_1 \cos \omega_1 t + A_2 \cos \omega_2 t\}^2 = A_1^2 \cos^2 \omega_1 t + A_2^2 \cos^2 \omega_2 t + 2A_1 A_2 \cos \omega_1 t \cos \omega_2 t \quad (2.5)$$

で表されるように、 $2\omega_1$, $2\omega_2$ 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乗の関係にあるとき発生する現象を3次の非線形光学現象と呼ぶ。全光機能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、次節においてその代表的な現象について述べる。

2.2.2 四光波混合

四光波混合 (FWM: Four Wave Mixing) [20] とは、3次の非線形光学現象の1つであり、3つの角周波数 ω_1 , ω_2 , ω_3 から $\omega_1 \pm \omega_2 \pm \omega_3$ の光が発生する現象である。特に、 $\omega_1 = \omega_2 = \omega_0$,

$\omega_3 = \omega_0 + \Delta\omega$ のとき, $\omega_4 = \omega_0 - \Delta\omega$ の光が発生することを利用した波長変換デバイスが報告されている. 四光波混合を用いた波長変換の応答はきわめて速く, これに対応した波長帯域まで変換が可能である.

2.2.3 光カー効果と自己・相互位相変調

光カー効果 [20] 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. 屈折率が変わることによって, 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), 他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.

2.3 全光信号処理デバイス

本節では，本論文に関する全光型の信号処理デバイスについて述べる．

2.3.1 光カプラ

光カプラ [20] は光を分岐あるいは結合する光デバイスである．図 2.1 に光カプラのモデルを示す．

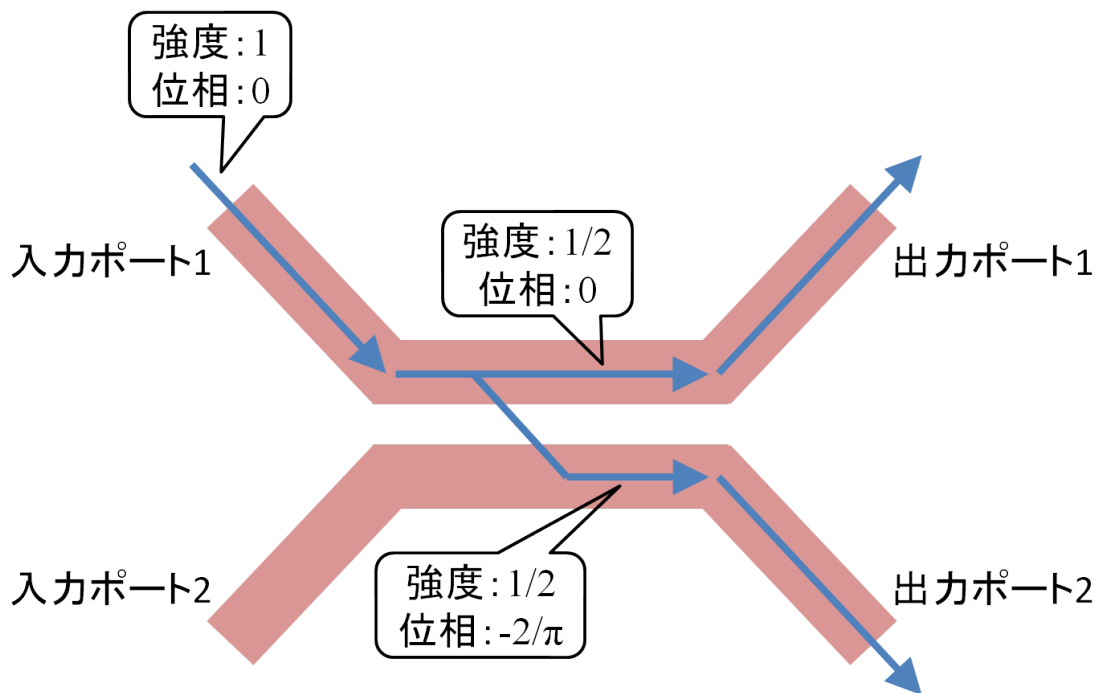


図. 2.1: 光カプラ

入力光を 2 つの導波路に半分ずつ均等に光パワーを分岐する光カプラを 3dB カプラと呼ぶ．本論文では，3dB カプラを光カプラとして扱う．図に示すように，光カプラは入力光の光パワーを 2 つの導波路に半分ずつ分岐させる．また，光が異なる導波路に移る場合，位相が $-2/\pi$ 変化する．導波光学系における光カプラは空間光学系での半透明鏡に相当し，この特性を利用した光デバイスとしてマッハツェンダー干渉計がある．

2.3.2 マッハツェンダー干渉計

図 2.2 にマッハツェンダー干渉計 (MZI:Mach-Zehnder Interferometer)[20] を示す. マッハツェンダー干渉計とは図 2.2 に示すような光学構成の干渉計である.

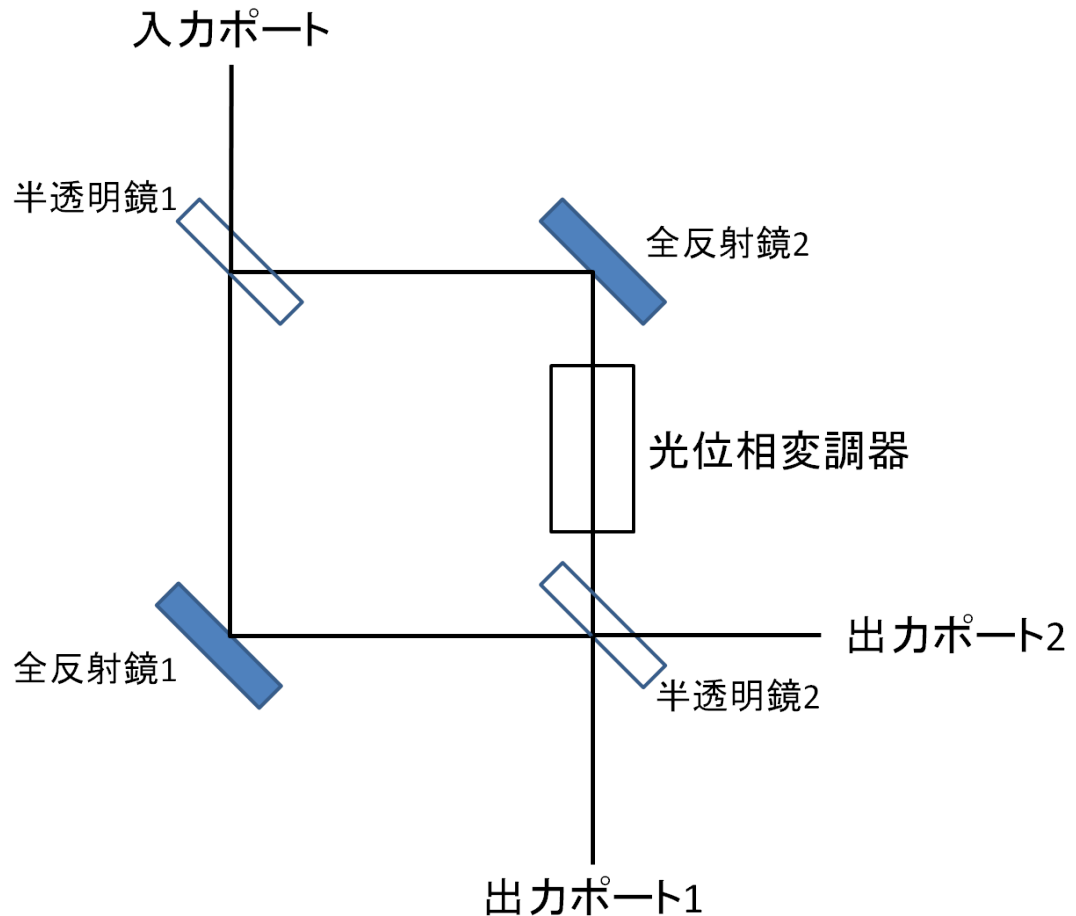


図. 2.2: マッハツェンダー干渉計

動作原理について述べる. 入射光は半透明鏡1で2分され2つの光路を通して半透明鏡2の上で合波, 干渉する. 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の方向では干渉の結果強め合い, 出力ポート2の方向では打ち消し合う. 光位相変調器が光路長を半波長分だけ変化させれば, 出力ポート1の方向で打ち消し合い, 出力ポート2の方向で強め合う. これは光スイッチングである. 図 2.2 の光路をすべて光導波路で置き換え, 光位相変調器を半導体光増幅器 (SOA) で置き換えたものが SOA-MZI である.

2.3.3 SOA

SOA(半導体光増幅器)[21]は、もともとは光通信の光増幅素子として研究された光デバイスであり、小型かつ他の光デバイスとの集積化が可能といった利点がある。SOAは光非線形性が大きいので、非線形光学現象を起こしやすく、光を光で制御する全光機能デバイスへの応用が可能である。

SOAの動作原理について説明する。半導体のエネルギー構造は、電子(キャリア)が存在する伝導帯と、正孔(ホール)が存在する価電子帯からなる。この構造に電流を注入すると、同じ領域内で、伝導帯には電子、価電子帯には正孔が同時に存在する状態を作ることができる。このような領域を活性層と呼ぶ。そこへ外部から光が入射されると、入射光に刺激されて電子と正孔が再結合し、それに伴って光が放射される。これを誘導放出と呼ぶ。図2.3に半導体のエネルギー構造と誘導放出のモデルを示す。

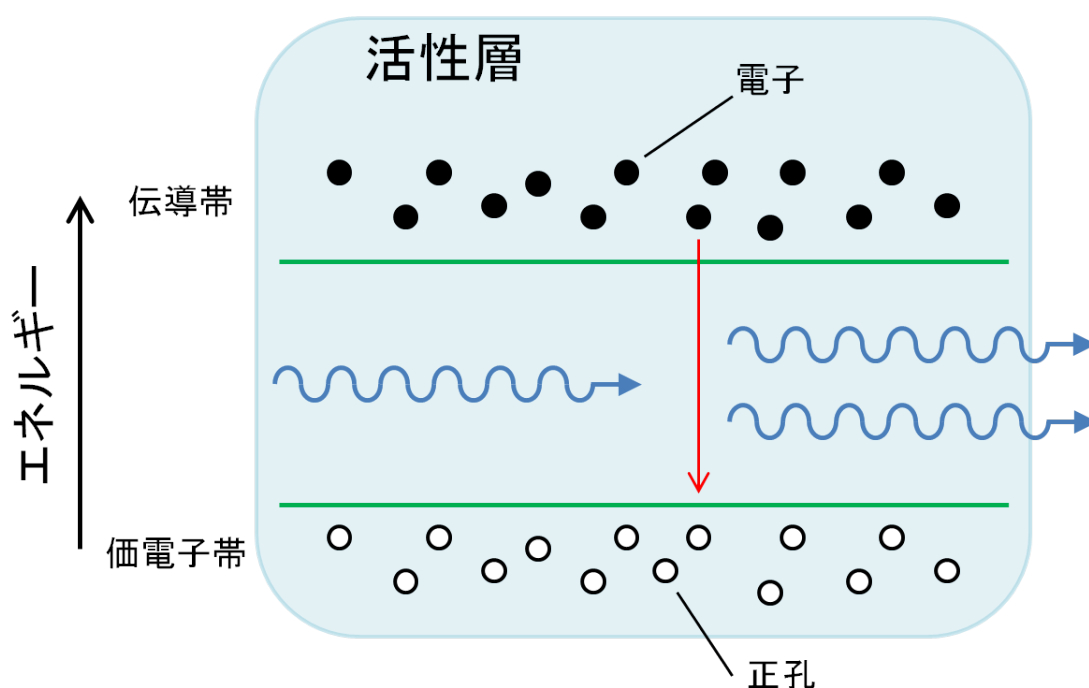


図. 2.3: 半導体のエネルギー構造と誘導放出

放射光は、入射光に刺激されて発生するので、その周波数および位相は、入射光に同期している。そのため、入射光に同位相で加算され、入射光が増幅されたことと等価となる。これがSOAの基本動作原理である。

2.3.4 QD-SOA

QD-SOA は、量子ドット構造の半導体光増幅器であり、優れた増幅特性や高速な非線形応用、波長範囲の広帯域性など、多くの利点を有する光増幅器である。本節では、QD-SOA の動作原理および増幅特性について説明する [12]-[14]。

まず、QD-SOA の動作原理について述べる。図 2.4 は QD-SOA 活性層のエネルギー構造である。QD-SOA は SOA と異なり、量子ドット (QD) から誘導放出が行われる。よって、増幅特性について述べるために、QD のエネルギー構造について説明する。

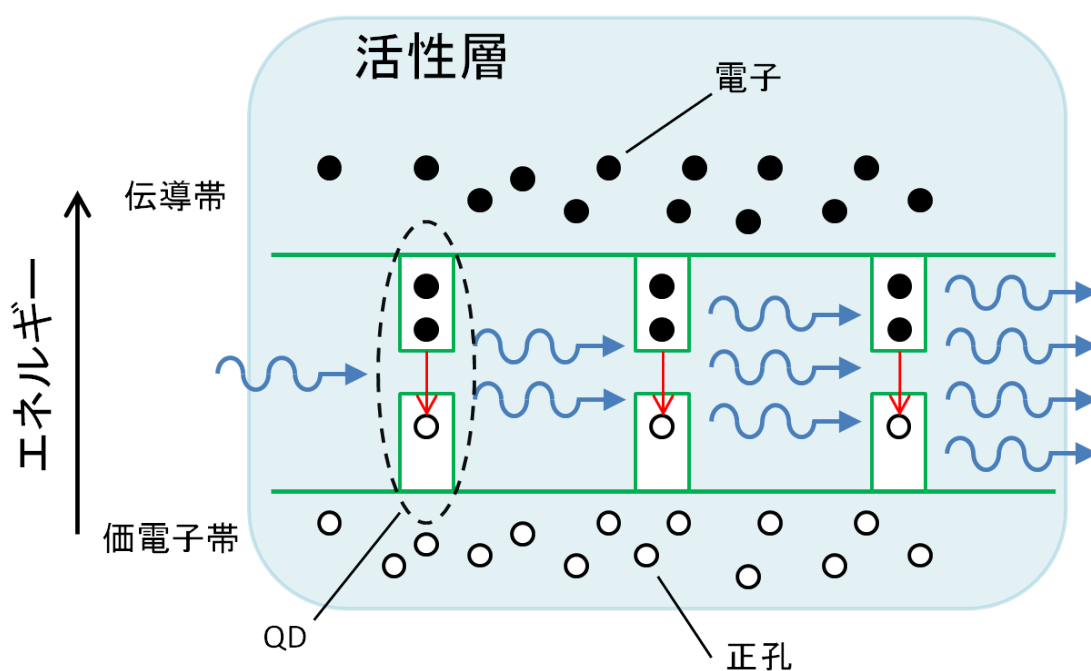


図. 2.4: QD-SOA のエネルギー構造

図 2.5 は QD のエネルギー構造モデルである.

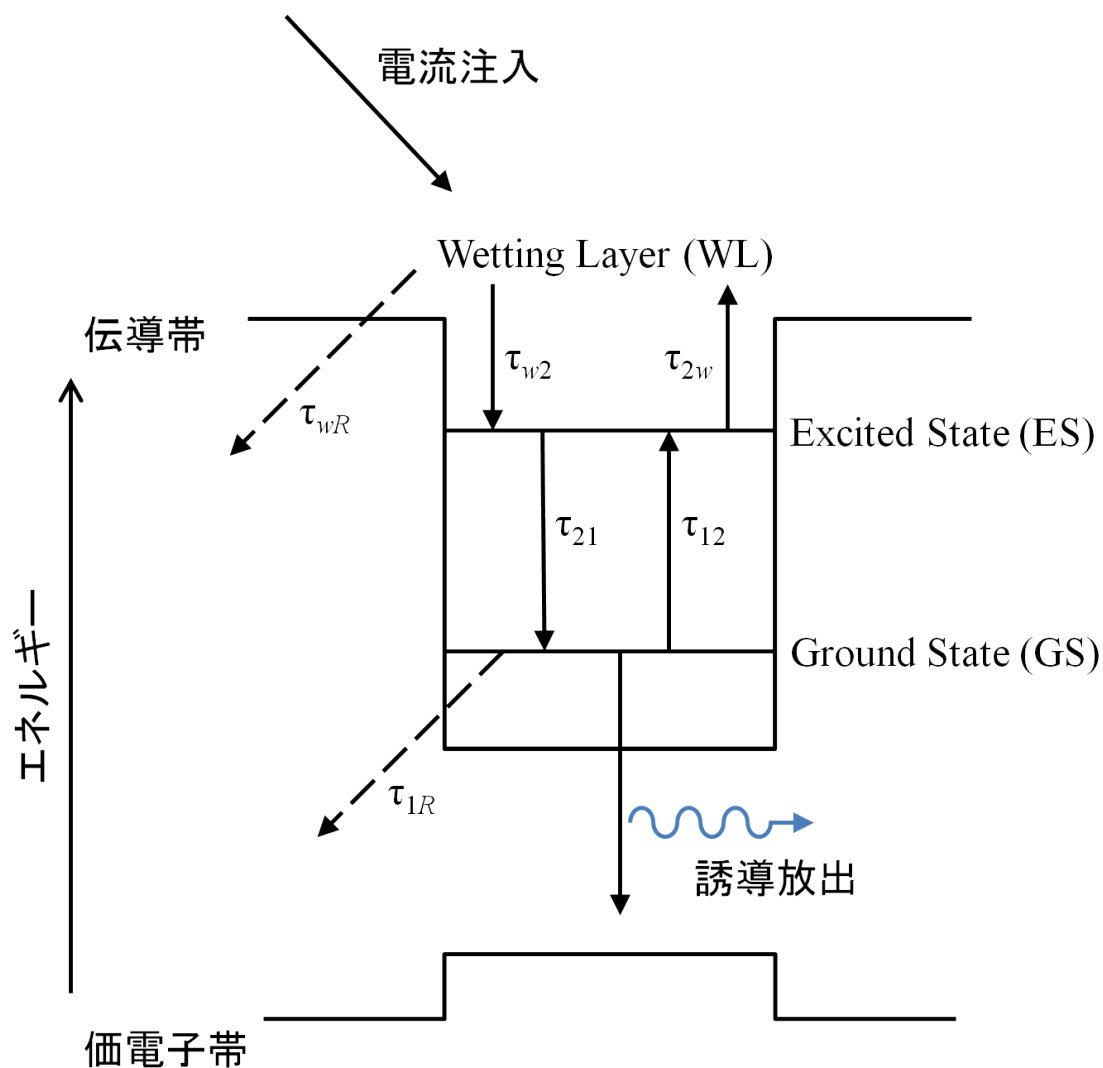


図. 2.5: QD のエネルギー構造モデル

QD のエネルギー準位は、WL(Wetting Layer)、GS(Ground State)、ES(Excited State) の三準位でモデル化される．ここで、 τ_{w2} 、 τ_{2w} 、 τ_{wR} 、 τ_{21} 、 τ_{12} 、 τ_{1R} はそれぞれ、キャリア緩和時間 (WL \rightarrow ES)、キャリア脱出時間 (ES \rightarrow WL)、WL における自然放出時間、キャリア緩和時間 (ES \rightarrow GS)、キャリア脱出時間 (GS \rightarrow ES)、GS における自然放出時間である．電流励起により、WL に注入されたキャリアは、量子ドット内の ES を介して、GS で捕獲され、続いて誘導放出と ES への脱出を行う．光増幅は、GS におけるキャリアの再結合による誘導放出を利用しているため、増幅特性は GS におけるキャリア占有率を求め

ることので得ることができる。

次に、QD-SOA の増幅特性について述べる。前節で述べたように、伝導体キャリアと光との相互作用の結果、光増幅現象が起こる。したがって、その増幅動作は、キャリア密度に関する式と、光強度に関する式の連立式により記述される。活性層領域におけるキャリア密度の挙動は、レート方程式と呼ばれる以下の式 (2.6), (2.7), (2.8) で与えられる。

$$\frac{\partial N_w}{\partial t} = \frac{I}{qV} - \frac{N_w(1-h)}{\tau_{w2}} + \frac{N_Q h}{L_w \tau_{2w}} - \frac{N_w}{\tau_{wR}} \quad (2.6)$$

$$\frac{\partial h}{\partial t} = \frac{L_w N_w (1-h)}{N_Q \tau_{w2}} - \frac{h}{\tau_{2w}} - \frac{(1-f)h}{\tau_{21}} + \frac{f(1-h)}{\tau_{12}} \quad (2.7)$$

$$\frac{\partial f}{\partial t} = \frac{(1-f)h}{\tau_{21}} - \frac{f(1-h)}{\tau_{12}} - \frac{f^2}{\tau_{1R}} - \frac{gL_w V_g}{N_Q} S \quad (2.8)$$

N_w は WL におけるキャリア密度, h , f はそれぞれ ES および GS におけるキャリア占有率を示し, t は時間である。その他の文字の意味は以下の表 2.1 に示す。

表 2.1: 文字とその意味

Symbol	Description
I	注入電流
q	電荷素量
V	活性層の体積
L	活性層の長さ
L_w	活性層の厚さ
A_{eff}	活性層の断面積
V_g	群速度
N_Q	QD の表面密度
g_{max}	最大利得
h	プランク定数
c	光速
α_{int}	損失係数
α_{LEF}	線幅増大係数
j	虚数単位
λ	波長
τ_{w2}	キャリア緩和時間 (WL \rightarrow ES)
τ_{2w}	キャリア脱出時間 (ES \rightarrow WL)
τ_{wR}	WL における自然放出時間
τ_{21}	キャリア緩和時間 (ES \rightarrow GS)
τ_{12}	キャリア脱出時間 (GS \rightarrow ES)
τ_{1R}	GS における自然放出時間

ここで、各式の詳細について以下に述べる．式 (2.6) は微小時間における WL におけるキャリア密度の挙動である．右辺各項について説明する．

式 (2.6) 第 1 項 $\frac{I}{qV}$

第 1 項は電流励起により WL に注入されるキャリアを表す．注入電流 $I[\text{C/s}]$ を電荷素量 $q[\text{C}]$ で割っているのは電流をキャリア数に換算するためであり，活性層体積 $V[\text{m}^3]$ で割っているのは密度に換算するためである．

式 (2.6) 第 2 項 $-\frac{N_w(1-h)}{\tau_{w2}}$

第 2 項は WL から ES へのキャリア緩和を表す． $(1-h)$ はキャリアに占有されていない ES の割合を表し， N_w のキャリア密度 $N_w[\text{m}^{-3}]$ との乗算は，ES に遷移できる N_w のキャリアの数を表している．キャリア緩和時間 (WL \rightarrow ES) $\tau_{w2}[\text{s}]$ での除算は，単位時間当たりの密度への換算であり， τ_{w2} 秒間隔でこの状態が発生することを表している．

式 (2.6) 第 3 項 $\frac{N_Q h}{L_w \tau_{2w}}$

第 3 項は ES から WL へのキャリア脱出を表す．QD の表面密度 $N_Q[\text{m}^{-2}]$ と ES のキャリア占有率 h の乗算は，キャリアが占有している ES の表面密度を表している．また，活性層の厚さ $L_w[\text{m}]$ とキャリア脱出時間 (ES \rightarrow WL) $\tau_{2w}[\text{s}]$ での除算は，単位時間当たりの密度への換算であり， τ_{2w} 秒間隔でこの状態が発生することを表している．

式 (2.6) 第 4 項 $-\frac{N_w}{\tau_{wR}}$

第 4 項は WL におけるキャリアの自然放出を表す． N_w のキャリア密度 $N_w[\text{m}^{-3}]$ が WL の自然放出時間 τ_{wR} で割られていることは，単位時間当たりの密度への換算であり， τ_{wR} 秒間隔でこの状態が発生することを表している．

式 (2.7) は微小時間における ES におけるキャリア占有率の挙動である．右辺各項について説明する．

式 (2.7) 第 1 項 $\frac{L_w N_w (1-h)}{N_Q \tau_{w2}}$

第 1 項は WL から ES へのキャリア緩和を表し，式 (2.6) 右辺第 2 項に対応している．式 (2.6) 右辺第 2 項と異なる点として，活性層の厚さ L_w との乗算と QD の表面密度 N_Q との除算がなされている．これは，密度を占有率に換算するためである．

式 (2.7) 第 2 項 $-\frac{h}{\tau_{2w}}$

第 2 項は ES から WL へのキャリア脱出を表し，式 (2.6) 右辺第 3 項に対応している．

ES のキャリア占有率 h がキャリア脱出時間 $(ES \rightarrow WL)\tau_{2w}[s]$ で割られていることは、単位時間当たりの密度への換算であり、 τ_{2w} 秒間隔でこの状態が発生することを表している。

式 (2.7) 第 3 項 $-\frac{(1-f)h}{\tau_{21}}$

第 3 項は ES から GS へのキャリア緩和を表す。 $(1-f)$ はキャリアに占有されていない GS の割合を表し、 h との乗算は、ES がキャリアに占有されている、かつ GS がキャリアに占有されていない QD の割合を表す。キャリア脱出時間 $(ES \rightarrow WL)\tau_{21}[s]$ での除算は、単位時間当たりの密度への換算であり、 τ_{21} 秒間隔でこの状態が発生することを表している。

式 (2.7) 第 4 項 $\frac{f(1-h)}{\tau_{12}}$

第 4 項は GS から ES へのキャリア脱出を表す。 $(1-h)$ はキャリアに占有されていない ES 割合を表し、 h との乗算は、ES がキャリアに占有されていない、かつ GS がキャリアに占有されている QD の割合を表す。キャリア脱出時間 $(ES \rightarrow WL)\tau_{12}[s]$ での除算は、単位時間当たりの密度への換算であり、 τ_{12} 秒間隔でこの状態が発生することを表している。

式 (2.8) は微小時間における GS におけるキャリア占有率の挙動である。式 (2.8) について説明する前に、QD-SOA の単位長さ当たりの利得 g 、単位長さ当たりの光子密度 S について述べる。

QD-SOA の利得 g は

$$g = g_{max}(2f - 1) \quad (2.9)$$

で与えられる。 $g_{max}[\text{m}^{-1}]$ は QD-SOA の最大利得である。式 (2.9) 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

$$S = \frac{|E|^2}{A_{eff}V_g h(c/\lambda)} \quad (2.10)$$

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 $A_{eff}[\text{m}^2]$ 、群速度 $V_g[\text{m/s}]$ 、光子 1 つ当たりのエネルギー $h(\frac{c}{\lambda})$ 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

$$\frac{\partial E}{\partial z} = \frac{E}{2} [-\alpha_{int} + (1 - j\alpha_{LEF})g] \quad (2.11)$$

で与えられる． z は距離， j は虚数単位を表す．式 (2.11) は，光の電場が活性層を進む様子を表している． α_{int} は素材に依存する損失係数， α_{LEF} は線幅増大係数である．ここで，式 (2.11) を変形すると，

$$\frac{\partial E}{\partial z} = \frac{E}{2} [(g - \alpha_{int}) - j\alpha_{LEF}g] \quad (2.12)$$

となり，光電場が $(g - \alpha_{int})$ の振幅増加と $\alpha_{LEF}g$ の位相ずれを受けながら微小距離 ∂z ごとに進む様子が分かる．

ここで，式 (2.8) 右辺各項について説明する．

式 (2.8) 第 1 項 $\frac{(1-f)h}{\tau_{21}}$

第 1 項は ES から GS へのキャリア緩和を表し，式 (2.7) 第 3 項に対応している． $(1-f)$ はキャリアに占有されていない GS の割合を表し， h との乗算は，ES がキャリアに占有されている，かつ GS がキャリアに占有されていない QD の割合を表す．キャリア緩和時間 (ES \rightarrow GS) τ_{21} [s] での除算は，単位時間当たりの密度への換算であり， τ_{21} 秒間隔でこの状態が発生することを表している．

式 (2.8) 第 2 項 $-\frac{f(1-h)}{\tau_{12}}$

第 2 項は GS から ES へのキャリア脱出を表し，式 (2.7) 第 4 項に対応している． $(1-h)$ はキャリアに占有されていない ES 割合を表し， h との乗算は，ES がキャリアに占有されていない，かつ GS がキャリアに占有されている QD の割合を表す．キャリア脱出時間 (GS \rightarrow ES) τ_{12} [s] での除算は，単位時間当たりの密度への換算であり， τ_{12} 秒間隔でこの状態が発生することを表している．

式 (2.8) 第 3 項 $-\frac{f^2}{\tau_{1R}}$

第 3 項は GS におけるキャリアの自然放出を表す．GS のキャリア密度 f の 2 乗は，GS がキャリアに占有されている，かつ価電子帯の正孔も占有されている状態を表す．GS における自然放出時間 τ_{1R} での除算は，単位時間当たりの密度への換算であり， τ_{1R} 秒間隔でこの状態が発生することを表している．

式 (2.8) 第 4 項 $-\frac{gL_wV_g}{N_Q}S$

第 4 項は GS におけるキャリアの誘導放出を表す．利得 g と単位長さ当たりの光子密度 S との乗算は，誘導放出されるキャリアの数を表す． V_g が掛けられているのは

単位時間あたりのキャリア密度に換算するためであり， L_w との乗算と N_Q での除算によって占有率に換算されている．

本節では，QD-SOA のエネルギー構造と増幅特性について述べた．キャリアはエネルギー構造に従って挙動し，増幅特性は GS のキャリア占有率に依存する．次節以降において，その応用デバイスについて述べる．

2.3.5 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[15][16]. QD-SOA-based MZIを図2.6に示す.

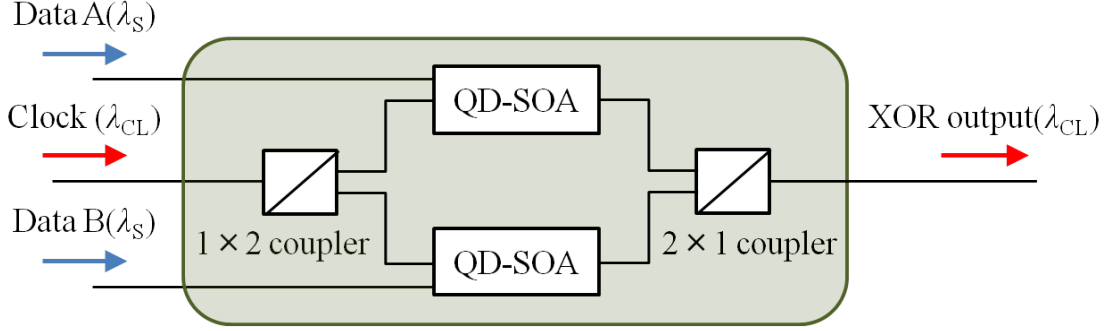


図. 2.6: QD-SOA-based MZI

Clock, Data A 出力信号光 B, XOR output はそれぞれクロックパルス, 入力信号光, 出力信号光を示し, λ_S , λ_{CL} は対応する波長である.

まず, 動作原理について述べる. クロックパルスは 1×2 coupler によって分岐し, 両アームを進んだのち, 2×1 coupler によって合波する. ここで, Data A および Data B の入力がない, すなわち入力信号光が “0”, “0” の場合, 両アームを通るクロックパルスの光路長は等しいため, 合波する際に光は打ち消し合い, 出力信号光は “0” となる. ところが, Data A または B のどちらかに入力がある, すなわち入力信号光が “0”, “1” あるいは “1”, “0” の場合, XPM によって, 上, 下アームどちらか一方を通るクロックパルスの位相が変化する. これにより, 合波する際に光は強め合い, 出力信号光は “1” となる. また, Data A, B 両方に入力がある, すなわち入力信号光が “1”, “1” の場合, 両アームで XPM によってクロックパルスの位相が変化する. しかし, 両アームを通るクロックパルスの位相は等しいため, 合波する際に光は打ち消し合い, 出力信号光は “0” となる. 表 2.2 は, 上で述べた QD-SOA-based MZI の入出力特性をまとめたものである. 表 2.2 から, QD-SOA-based MZI が XOR 論理演算を行っていることが分かる.

表 2.2: QD-SOA-based MZI の入出力特性

Data A	Data B	XOR output
“0”	“0”	“0”
“0”	“1”	“1”
“1”	“0”	“1”
“1”	“1”	“0”

また、これまで述べた動作原理から、出力信号光 (XOR output) の波長はクロックパルスと完全に一致することが分かる。つまり、QD-SOA-based MZI は、入力信号光の波長 λ_S に対し、波長 λ_{CL} となる出力信号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、出力信号光の物理的特性について述べる。出力信号光強度 P_{XOR} は以下の式 (2.13) から求められる。

$$P_{XOR}(t) = \frac{P_{CL}(t)}{4} \left\{ G_u(t) + G_l(t) - 2\sqrt{G_u(t)G_l(t)} \times \cos \left[-\frac{\alpha_{LEF}}{2} \times \ln \left(\frac{G_u(t)}{G_l(t)} \right) \right] \right\} \quad (2.13)$$

ここで、 P_{CL} はクロックパルス強度を示す。クロックパルス強度 P_{CL} に $1/4$ が掛けられているのは、光カプラにおけ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。 $G_u(t)$ 、 $G_l(t)$ はそれぞれ MZI の上アームおよび下アームの QD-SOA 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 $-2\sqrt{G_u(t)G_l(t)} \times \cos \left[-\frac{\alpha_{LEF}}{2} \times \ln \left(\frac{G_u(t)}{G_l(t)} \right) \right]$ は位相差によって光が強め合うもしくは弱め合う状態になることを表している。項 $\ln \left(\frac{G_u(t)}{G_l(t)} \right)$ 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 $-2\sqrt{G_u(t)G_l(t)} \times \cos \left[-\frac{\alpha_{LEF}}{2} \times \ln \left(\frac{G_u(t)}{G_l(t)} \right) \right]$ が負もしくは正の値となり、出力信号光強度 P_{XOR} が変動する。ここで、 $G_u(t)$ 、 $G_l(t)$ は

$$G_u(t) = g_u L \quad (2.14)$$

$$G_l(t) = g_l L \quad (2.15)$$

で与えられる. g_u , g_l はそれぞれ上アームおよび下アームにおける単位長さ当たりの利得を表し, 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.

2.3.6 AOWC

全光波長変換器 (AOWC : All-optical Wavelength Converter) は, 入力信号光の波長を変換・出力する光デバイスである [22]. 図 2.7 に QD-SOA を用いた AOWC を示す.

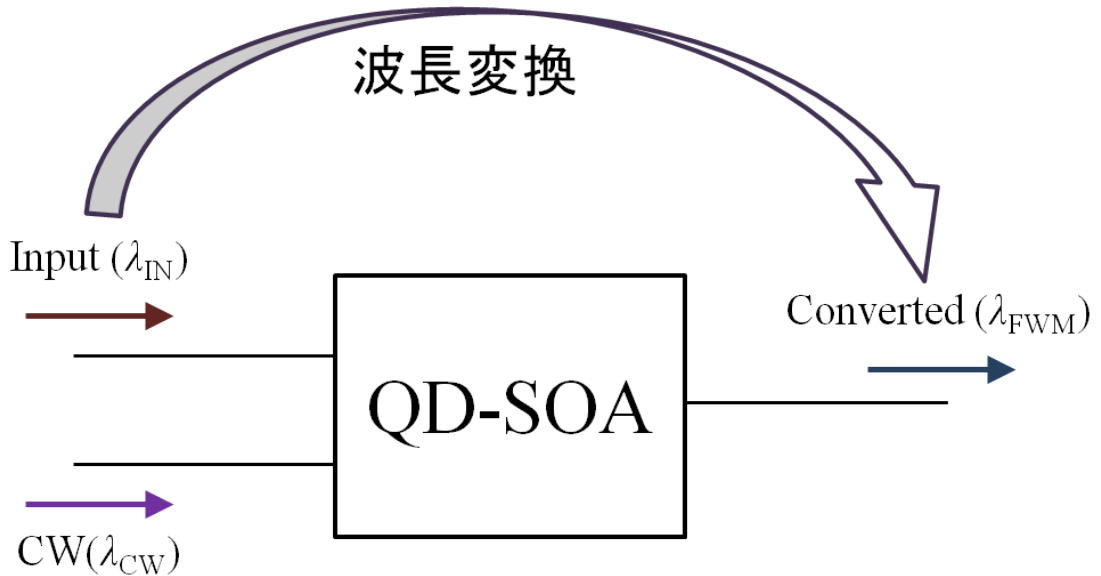


図. 2.7: AOWC

まず, 動作原理について述べる. Input, CW, Converted はそれぞれ入力光, 連続波, ビート (波長変換) 光を示し, λ_{IN} , λ_{CW} , λ_{FWM} は対応する波長である. AOWC は非線形光学効果の一つである FWM を利用している. ただし, FWM の発生は, CW 光強度が入力光強度よりも十分大きいことを条件としている. 入力光と連続波が QD-SOA に入射したとき, そのビートとなる光が発生する. ここで, その波長 λ_{FWM} は $\lambda_{CW} \times 2 - \lambda_{IN}$ で与えられる. 図 2.8 は各波長の関係図である.

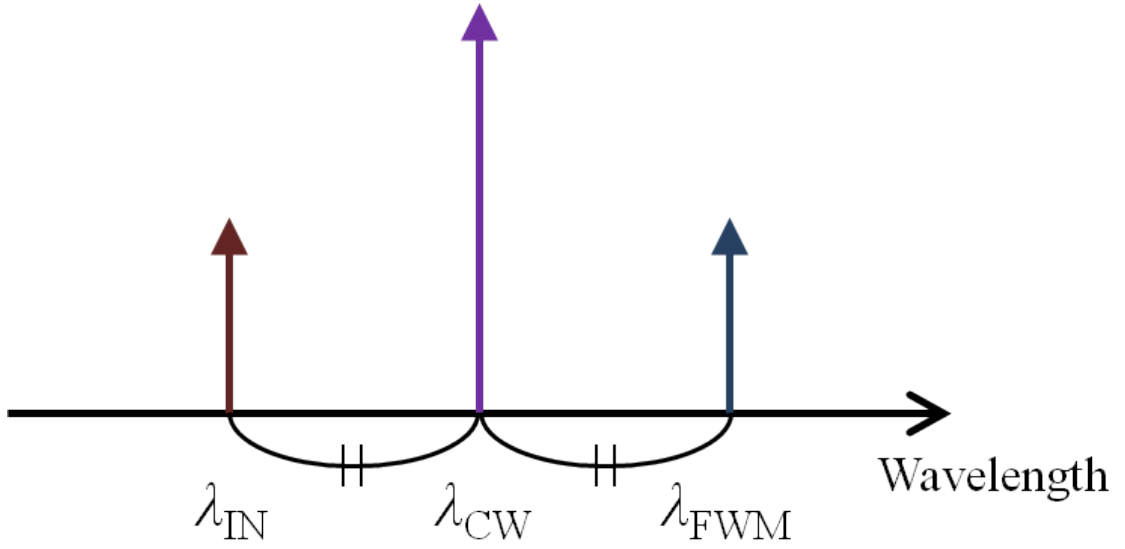


図. 2.8: FWMにおける各波長の関係

ここで, QD-SOA に波長の異なる二つの光が入射されたとき, つまり入力光が “1” のとき, FWM が発生するため, ビート光は “1” となる. しかし, 入力光が “0” のとき, QD-SOA には連続波だけが入射されている状態となるため, FWM は発生しないため, ビート光は “0” となる. すなわちこれは, 入力光の信号情報がビート光に転写されることを示しており, 波長変換が行われていることが分かる.

次に, AOWC を進む光の物理的特性について述べる. CW 光, 入力光およびビート光の電場はそれぞれ以下の式 (2.16), (2.17), (2.18) から求められる.

$$\frac{\partial E_0}{\partial z} = \frac{E_0}{2} [-\alpha_{int} + (1 - j\alpha_{LEF}) g] \quad (2.16)$$

$$\frac{\partial E_1}{\partial z} = \frac{E_1}{2} [-\alpha_{int} + (1 - j\alpha_{LEF}) g - H(-\Omega) |E_0|^2] - \frac{1}{2} H(-\Omega) E_0^2 E_2^* \quad (2.17)$$

$$\frac{\partial E_2}{\partial z} = \frac{E_2}{2} [-\alpha_{int} + (1 - j\alpha_{LEF}) g - H(+\Omega) |E_0|^2] - \frac{1}{2} H(+\Omega) E_0^2 E_1^* \quad (2.18)$$

ここで,

$$H(\Omega) = \left[\left\{ -j\Omega + \frac{1}{\tau_{1R}} + 2a_0 S \right\}^{-1} + \left\{ -j\Omega + \frac{1}{\tau_{uf}} \right\}^{-1} \right] \times \{ 2a_0 g (1 - j\alpha_{LEF}) \} \quad (2.19)$$

である. $H(\Omega)$ は入力光と CW 光間の周波数差 Ω に依存する関数であり, FWM の変換効

率を表す．また，その値はGSにおける自然放出時間 $\tau_1 R$ ，作動利得 a_0 ，スペクトルホールバーニング時間 τ_{uf} に影響を受ける．

式 (2.16)，(2.17)，(2.18) について説明する．

式 (2.16) $\frac{\partial E_0}{\partial z} = \frac{E_0}{2} [-\alpha_{int} + (1 - j\alpha_{LEF})g]$

式 (2.16) は CW 光の電場の挙動であり，式 (2.11) と同様に CW 光が増幅されて進む様子を表している．CW 光の電場は入力光および波長変換光にポンプされるため減衰するが，ここでは CW 光強度が十分大きいとして無視している．

式 (2.17) $\frac{\partial E_1}{\partial z} = \frac{E_1}{2} [-\alpha_{int} + (1 - j\alpha_{LEF})g - H(-\Omega)|E_0|^2] - \frac{1}{2}H(-\Omega)E_0^2 E_2^*$

式 (2.17) は入力光の電場の挙動である．項 $-\alpha_{int}$ と $(1 - j\alpha_{LEF})g$ は入力光の電場が式 (2.11) と同様に増幅される様子を表している．また，項 $-H(-\Omega)|E_0|^2$ と項 $-\frac{1}{2}H(-\Omega)E_0^2 E_2^*$ は FWM の発生により，入力光から CW 光と波長変換光へ光をポンプしている様子を表す．その変換効率は $H(\Omega)$ に依存する．

式 (2.18) $\frac{\partial E_2}{\partial z} = \frac{E_2}{2} [-\alpha_{int} + (1 - j\alpha_{LEF})g - H(+\Omega)|E_0|^2] - \frac{1}{2}H(+\Omega)E_0^2 E_1^*$

式 (2.18) は波長変換光の電場の挙動である．項 $-\alpha_{int}$ と $(1 - j\alpha_{LEF})g$ は波長変換光の電場が式 (2.11) と同様に増幅される様子を表している．また，項 $-H(+\Omega)|E_0|^2$ と項 $-\frac{1}{2}H(+\Omega)E_0^2 E_1^*$ は FWM の発生により，波長変換光から CW 光と入力光へ光をポンプしている様子を表す．その変換効率は $H(\Omega)$ に依存する．

2.4 Transfer Matrix Method

伝達行列法 (TMM: Transfer Matrix Method)[23] とは，物質を通る光に対する数値解析法の 1 つである．図 2.9 に TMM を用いた SOA の解析モデルを示す．

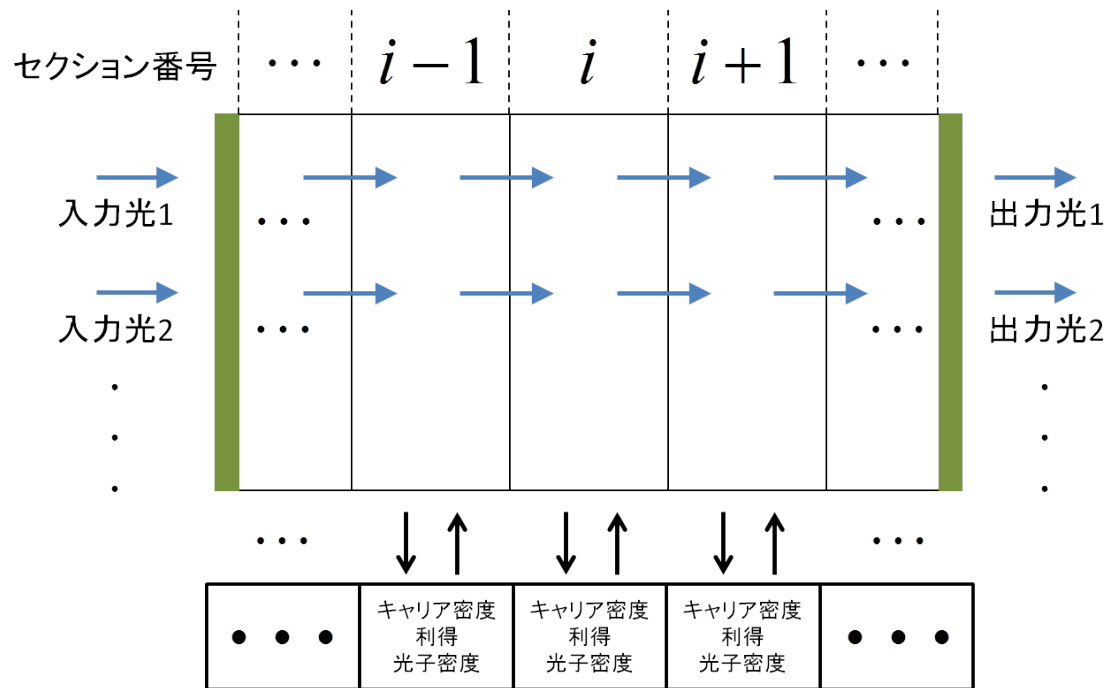


図. 2.9: Transfer matrix method による SOA の数値解析

TMM による SOA の解析では，SOA を任意のセクション数 $i \in \mathbb{N}$ に分割し，微小時間 Δt ごとに各セクションの光電場，キャリア密度，利得，光子密度を計算することで，SOA の入出力特性を得ることができる．

TMM を用いた QD-SOA 解析例を図 2.10 に示す.

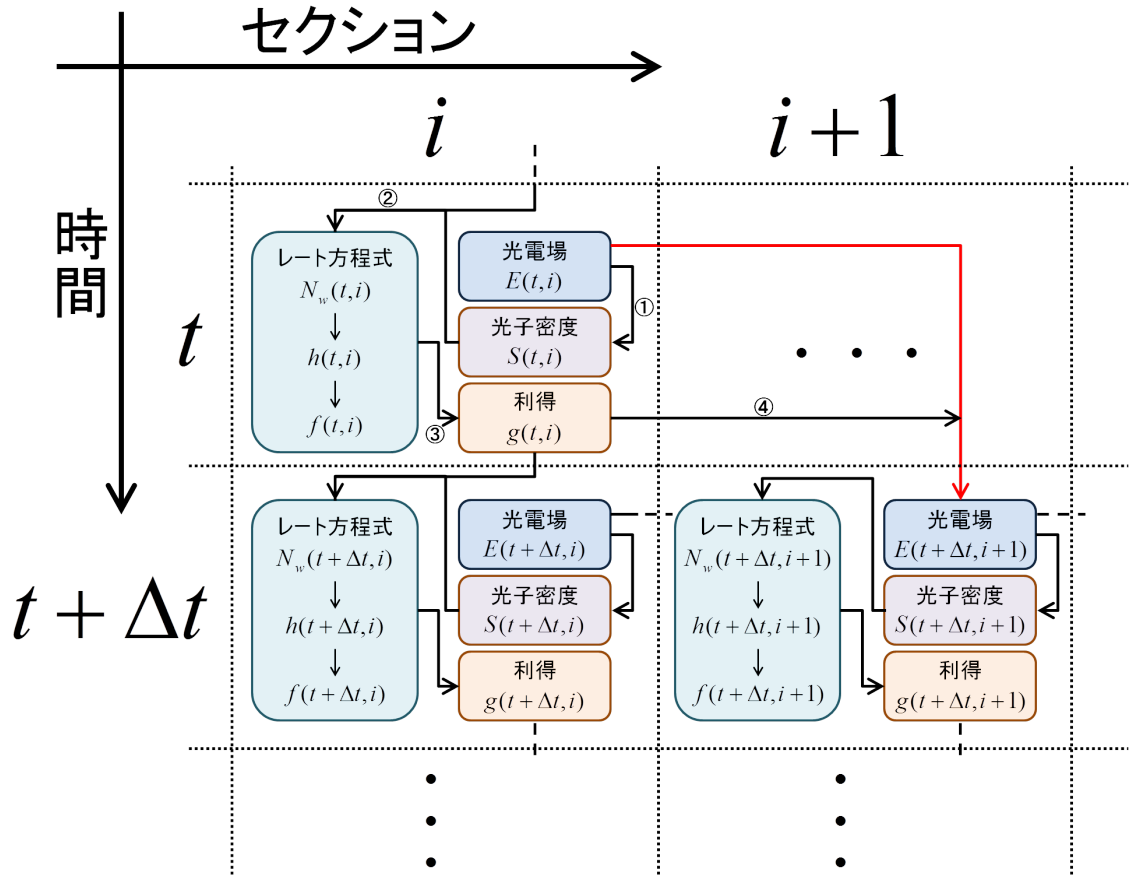


図. 2.10: TMM による QD-SOA 解析例

添え字である (t, i) はそれぞれ時間とセクション番号を示している. 例えば, $N_w(t + \Delta t, i + 1)$ は, 時間 $t + \Delta t$, セクション $i + 1$ における WL のキャリア密度を表す. 光電場は Δt 秒でセクションを 1 つ移動する.

図 2.10 の解析例を用いてアルゴリズムを説明する. いま, 時間 t , セクション i から, 時間 $t + \Delta t$, セクション $i + 1$ に進む光電場 $E(t, i) \rightarrow E(t + \Delta t, i + 1)$ (図中の赤線) について考えるとする.

(ステップ番号と図中の矢印番号は対応している.)

ステップ①

光電場 $E(t, i)$ から, 式 (2.10) を用いて光子密度 $S(t, i)$ を求める.

ステップ②

レート方程式 (2.6), (2.7), (2.8) から GS のキャリア占有率 f を求める. 式 (2.8) における利得 g と光子密度 S は, それぞれ $g(t - \Delta t, i)$ とステップ①から得られた $S(t, i)$ を用いる.

ステップ③

ステップ②で得られた GS のキャリア占有率 f から, 式 (2.9) を用いて利得 $g(t, i)$ を求める.

ステップ④

式 (2.11) にステップ③で得られた利得 $g(t, i)$ を代入し, $\rightarrow E(t + \Delta t, i + 1)$ を求める

以上のステップを微小時間 Δt ごとに各セクションについて計算することで, QD-SOA を進む光の電場の特性を得ることができる.

第3章 単一パリティチェックを用いた 全光誤り検出回路

本章では，提案回路に用いる論理ゲートについて述べたあと，提案回路の構成，その詳細について述べる．

3.1 提案回路に用いる論理ゲート

提案回路について述べる前に，用いる論理ゲートについて示す．図 3.1 は，XOR ゲートを用いた，8 ビット符号語に対する偶重み単一パリティチェックを行う回路である．提案回路は以下に示す図 3.1 における信号の演算処理を全光化するものである．

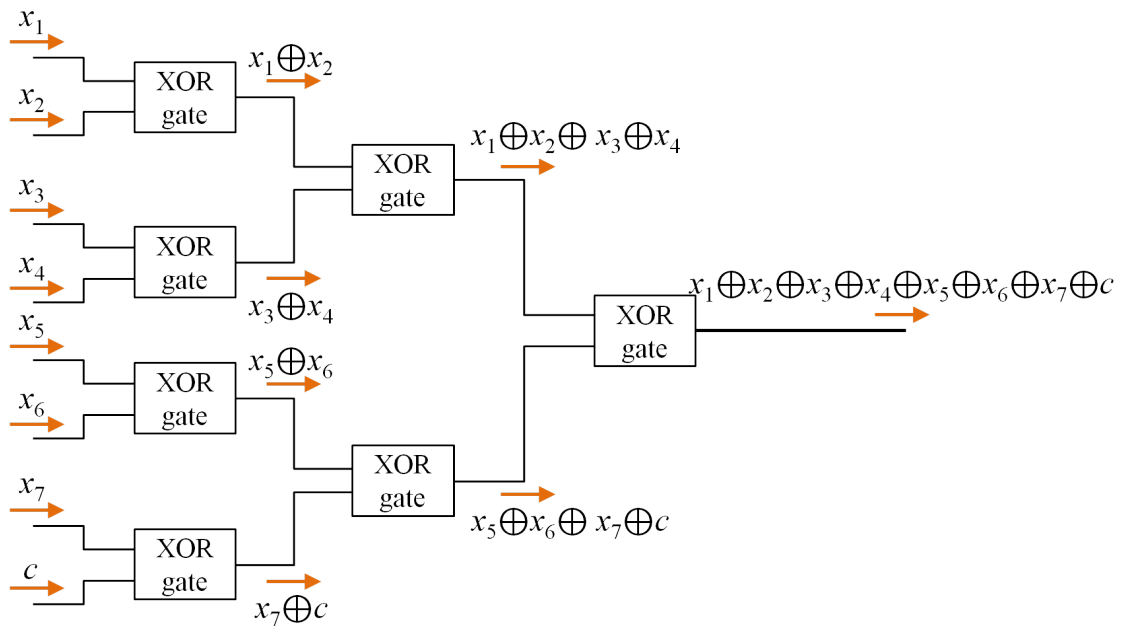


図. 3.1: 8 ビット符号語に対する偶重み単一パリティチェック回路

図 3.1 における信号の演算処理について述べる．この単一パリティチェック回路は，並列に入力された x_1, x_2, \dots, x_7, c の符号語に対し，2 ビットごとに XOR 論理演算を施し，最

後に全ビットの XOR 論理演算結果が出力する．ここで，符号語内の信号 “1” の個数が偶数であれば信号 “0” を出力し，信号 “1” の個数が奇数であれば信号 “1” を出力する．つまり，符号語内の誤りが 1 つであれば，出力信号を参照することで符号語に誤りがあるかどうかを検出することができる．

3.2 本論文で用いる全光信号処理デバイス

前節で述べた単一パリティチェック回路には，XOR 論理演算を用いた．提案回路では，これを全光信号処理するためのデバイスとして，2.3.5 節で述べた QD-SOA-based MZI を用いる．3.1 節で示したように，本論文では XOR ゲートの直列接続を考える．XOR ゲートを QD-SOA-based MZI に置き換えた回路を図 3.2 に示す．

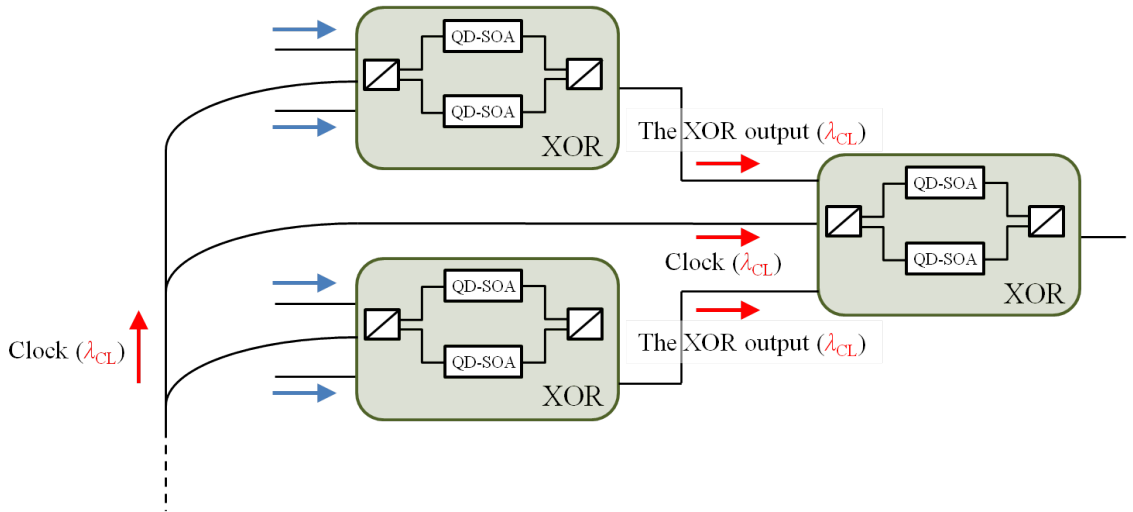


図. 3.2: QD-SOA-based MZI の直接接続

図 3.2 に示すように，クロックパルスは全ての QD-SOA-based MZI において共通である．そのため，この構成では次段の QD-SOA-based MZI において，入力信号光の波長がクロックパルスの波長と完全に一致してしまう．この場合，QD-SOA-based MZI は所望の動作をしない．よって，QD-SOA-based MZI を直列に接続するため，図 3.3 のように波長変換器 (WC:Wavelength Converter) を設置する．

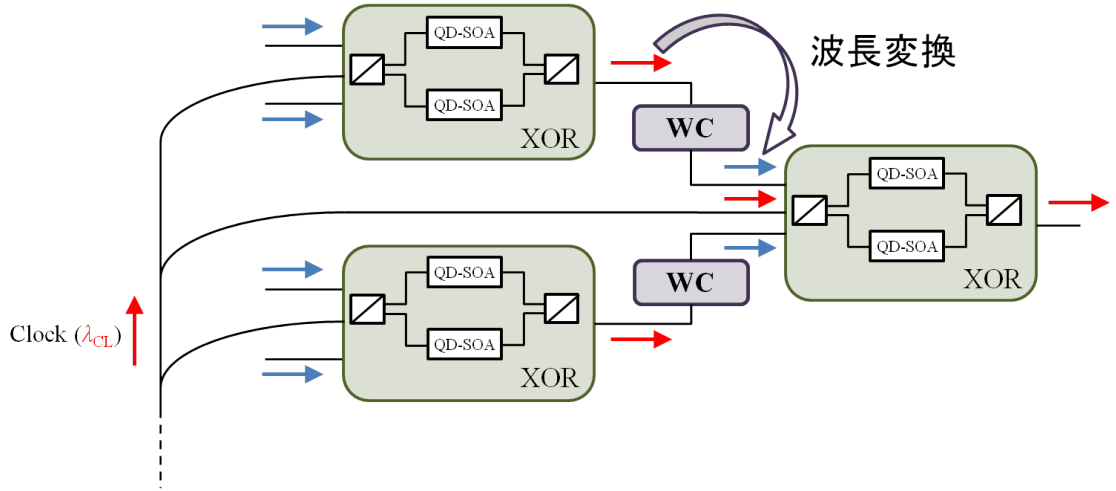


図. 3.3: QD-SOA-based MZI 間への WC の設置

本論文では, WC として 2.3.6 節で示した FWM を利用した全光波長変換器を用いる. QD-SOA-based MZI と AOWC を 1 つのブロックとして, 以下の図 3.4 に示す.

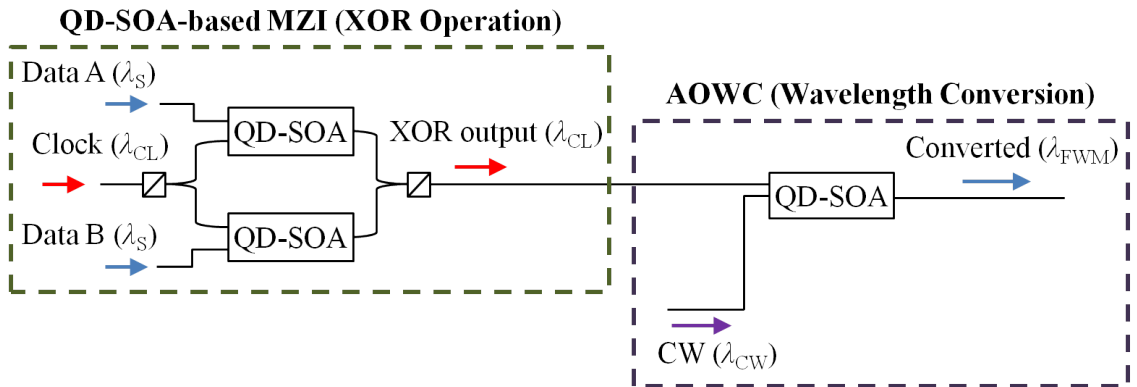


図. 3.4: QD-SOA-based MZI と AOWC

次節において, この QD-SOA-based MZI と AOWC を用いた提案回路を示す.

3.3 提案回路の構成

単一パリティチェックを用いた全光誤り検出回路の構成は以下の通りである．

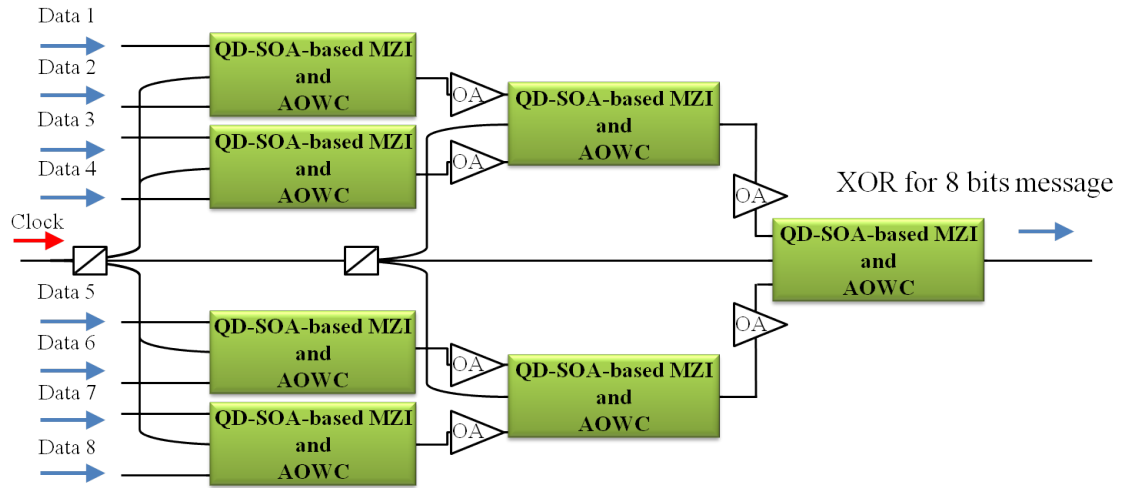


図. 3.5: 単一パリティチェックを用いた全光誤り検出回路

提案回路は7つの QD-SOA-based MZI と AOWC で構成される．OA(Optical Amplifier) は光増幅器を示し，次段の QD-SOA-based MZI and AOWC に関する入力光強度を調整している．Data 1, 2, \dots , 8 は入力信号光であり， x_1, x_2, \dots, x_7, c からなる符号語に相当する．3.1 節で述べたように，入力信号光は2ビットずつ XOR 論理演算処理され，最後に全ビットの XOR 演算結果を出力する．出力信号光から符号語内の信号 “1” の個数の偶奇が分かり，誤りを検出することができる．

第4章 性能評価

本章では，数値解析による提案回路の性能評価を行う．

4.1 数値解析の概要とパラメータ設定

結果を示す前に，数値解析の概要と用いたパラメータを本節にて示す．

4.1.1 数値解析の概要

2.3.5 節と 2.3.6 節で述べた，QD-SOA-based MZI の理論モデルである式 (2.13) と AOWC の理論モデルである式 (2.16)，(2.17)，(2.18) をもとに，Opti-System-11 および Matlab-7.5 によって数値解析を行う．QD-SOA の解析には 2.4 で述べた TMM を用いる．Optisystem による提案回路と QD-SOA-based MZI と AOWC のモデルを以下の図 4.1，4.2 に示す．また，Optisystem に組み込む QD-SOA の Matlab プログラムのソースコードを付録に添付した．

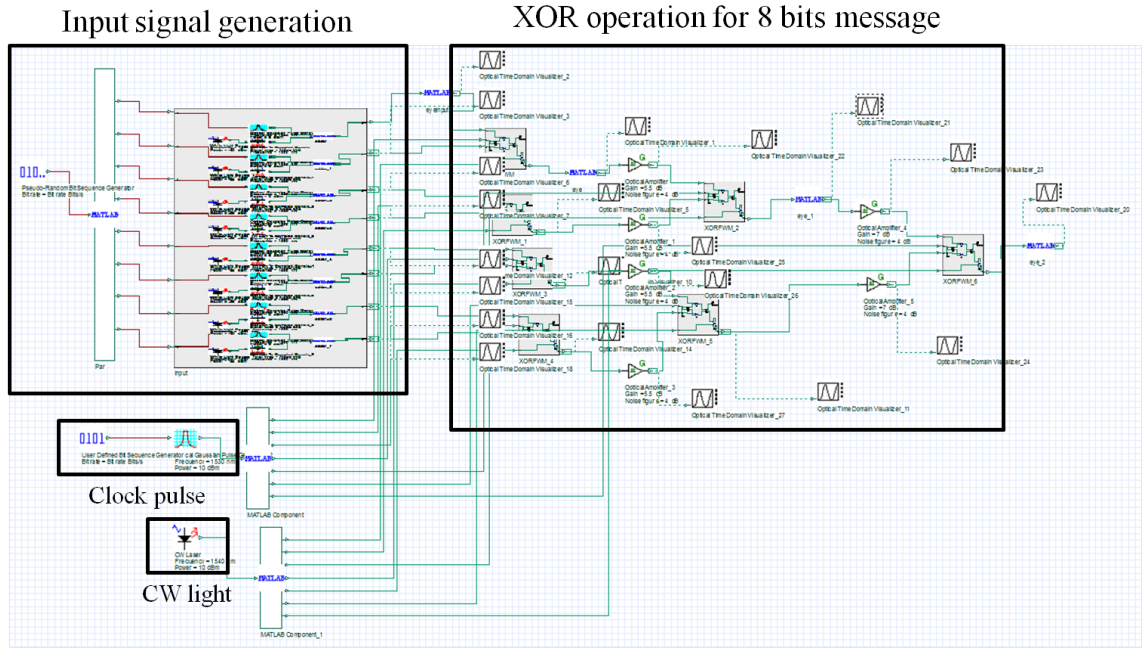


図. 4.1: Optisystem を用いた提案回路のモデル化

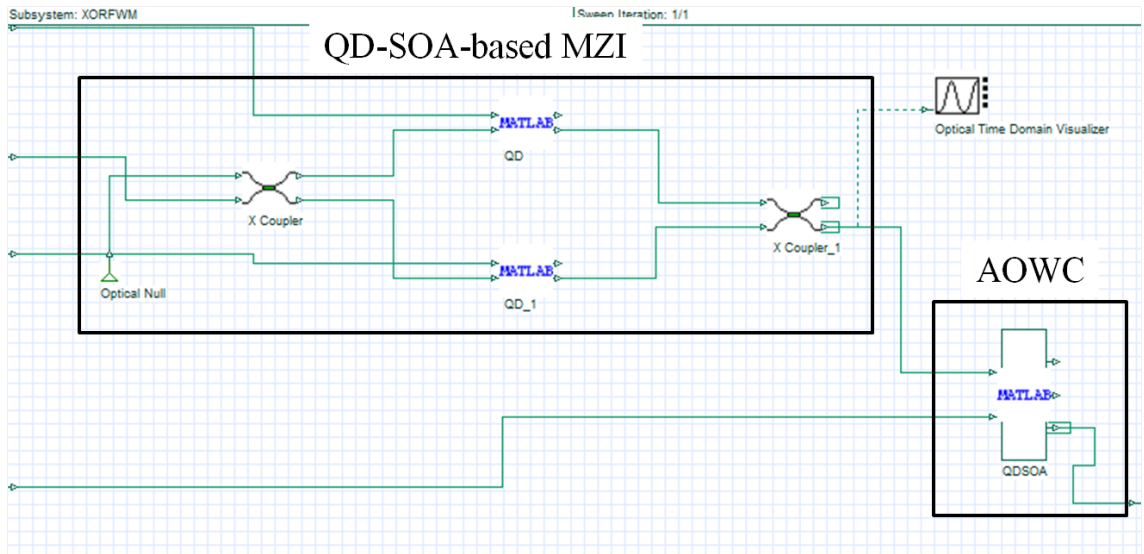


図. 4.2: Optisystem を用いた QD-SOA-based MZI と AOWC のモデル化

まずビットレートを変化させたときの提案回路の出力信号光 (XOR for 8 bits message) 波形を示す. 次に図 4.3 に示すステージにおける出力信号光について, アイダイアグラムおよび式 (4.1) から得られる消光比 (ER : Extinction Ratio) を示すことで, 提案回路の性

能評価を行う。

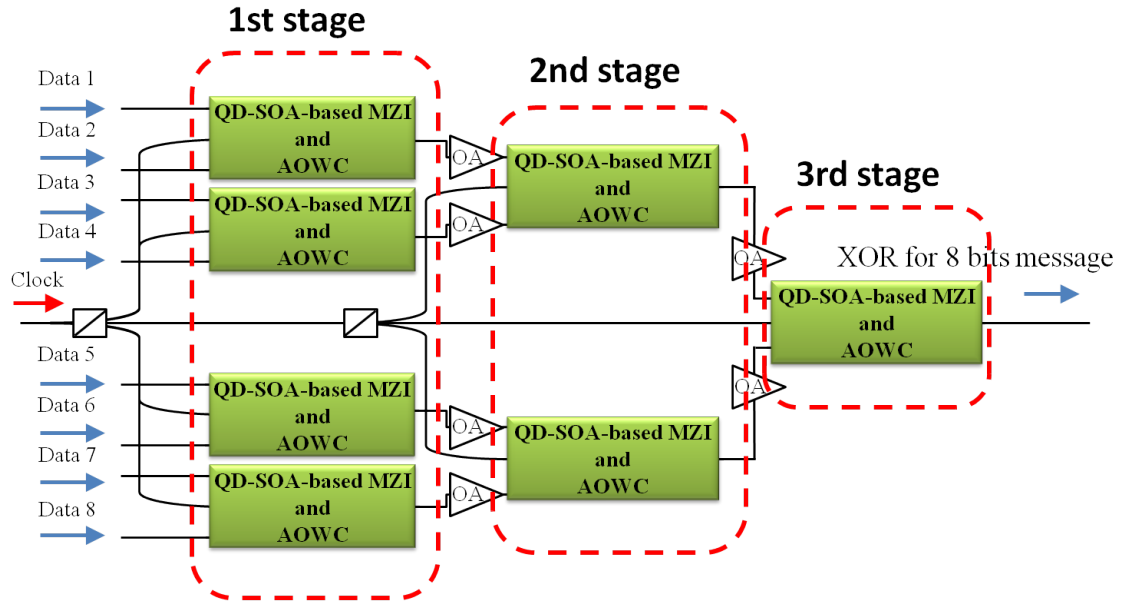


図. 4.3: 性能評価に関するステージ分け

$$ER(dB) = 10 \log \left(\frac{P_{MIN}^1}{P_{MAX}^0} \right) \quad (4.1)$$

P_{MIN}^1 は “0” 信号の光強度の最大値, P_{MAX}^0 は “1” 信号の光強度の最小値を示す. 最後に, 入力信号光に白色ガウス雑音を付加したときの各ステージにおける出力信号光の特性を明らかにし, 提案回路の雑音耐性について評価を行う.

4.1.2 パラメータ

まず，光信号のパラメータについて述べる．入力信号光 (Data 1,2,3,⋯,8) は，波長 $\lambda_S = 1550\text{nm}$ ，最大光強度 1mW ，FWHM(Full Width at Half Maximum)= 20% のランダムな RZ(Return to Zero) ガウシアンパルスである．また，ビットレートを 250, 500, 750Gbps と変化させた．入力信号光の波形を以下の図 4.4 に示す．

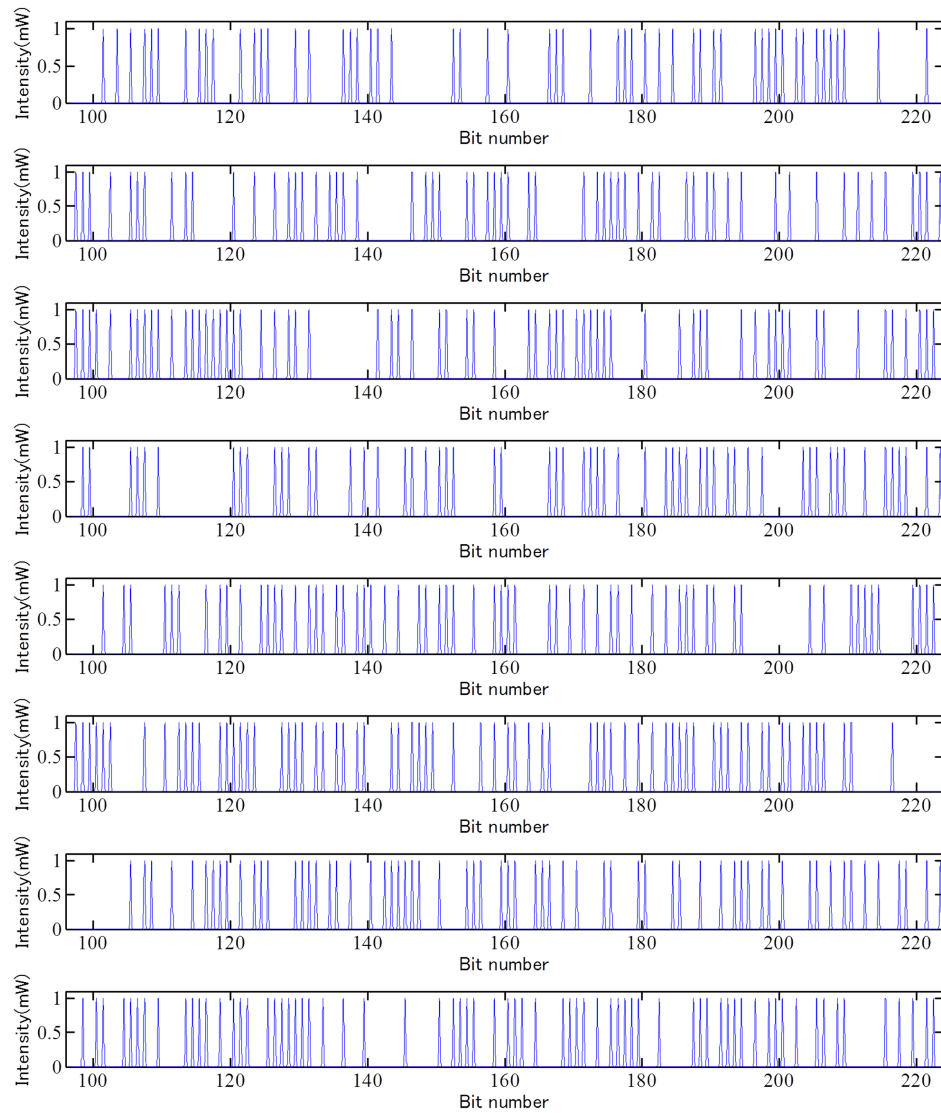


図. 4.4: 入力信号光波形

クロックパルス (Clock) は、波長 $\lambda_{CL} = 1530\text{nm}$ ，最大光強度 10mW ，FWHM= 20% のランダムな RZ ガウシアンパルスである．繰り返し周波数はビットレートに対応して変化した．クロックパルスの波形およびアイダイアグラムをそれぞれ図 4.5，4.6 に示す．また，CW 光 (CW) は、波長 $\lambda_{CW} = 1540\text{nm}$ ，最大光強度 10mW の連続波とした．

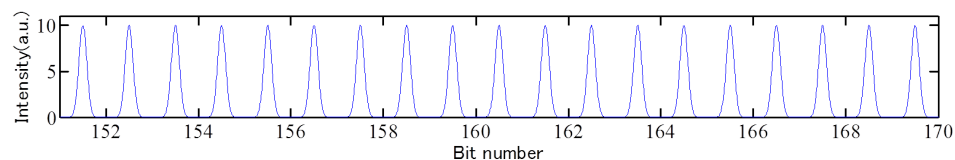


図. 4.5: クロックパルス波形

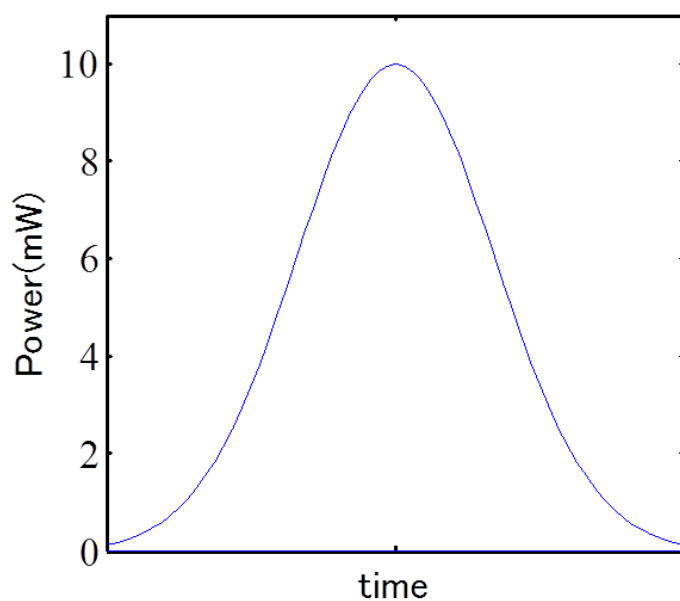


図. 4.6: クロックパルスのアイダイアグラム

次に, QD-SOA のパラメータについて述べる. QD-SOA のパラメータは表 4.1 の通りである [15][22][24].

表 4.1: QD-SOA のパラメータ

Symbol	Description	Value	Unit
V	活性層の体積	1.5×10^{-15}	m^3
L	活性層の長さ	2000×10^{-6}	m
L_w	活性層の厚さ	0.25×10^{-6}	m
A_{eff}	活性層の断面積	0.75×10^{-12}	m^2
V_g	群速度	8.3×10^7	m/s
q	電荷素量	1.602×10^{-19}	C
g_{max}	最大利得	14×10^2	m^{-1}
N_Q	QD の表面密度	5×10^{14}	m^{-2}
α_{int}	損失係数	2×10^2	m^{-1}
α_{LEF}	線幅増大係数	4.5	-
τ_{w2}	電子緩和時間 (WL \rightarrow ES)	3×10^{-12}	s
τ_{2w}	電子脱出時間 (ES \rightarrow WL)	1×10^{-9}	s
τ_{wR}	WL における自然放出時間	1×10^{-9}	s
τ_{21}	電子緩和時間 (ES \rightarrow GS)	0.16×10^{-12}	s
τ_{12}	電子脱出時間 (GS \rightarrow ES)	1.2×10^{-12}	s
τ_{1R}	ES における自然放出時間	0.2×10^{-9}	s
τ_{uf}	スペクトルホールバーニング時間	50×10^{-15}	s
I	注入電流	50	mA
a_0	差動利得	5.6×10^{13}	m^2

4.2 数値解析結果による性能評価

本章では、数値解析結果を示し、その考察を述べる

4.2.1 出力信号光波形

本節では、提案回路の出力信号光 (XOR for 8 bits message) 波形について述べる．まず，提案回路が動作を確認する．以下の図 4.7 に入力信号光波形の一部を示した．

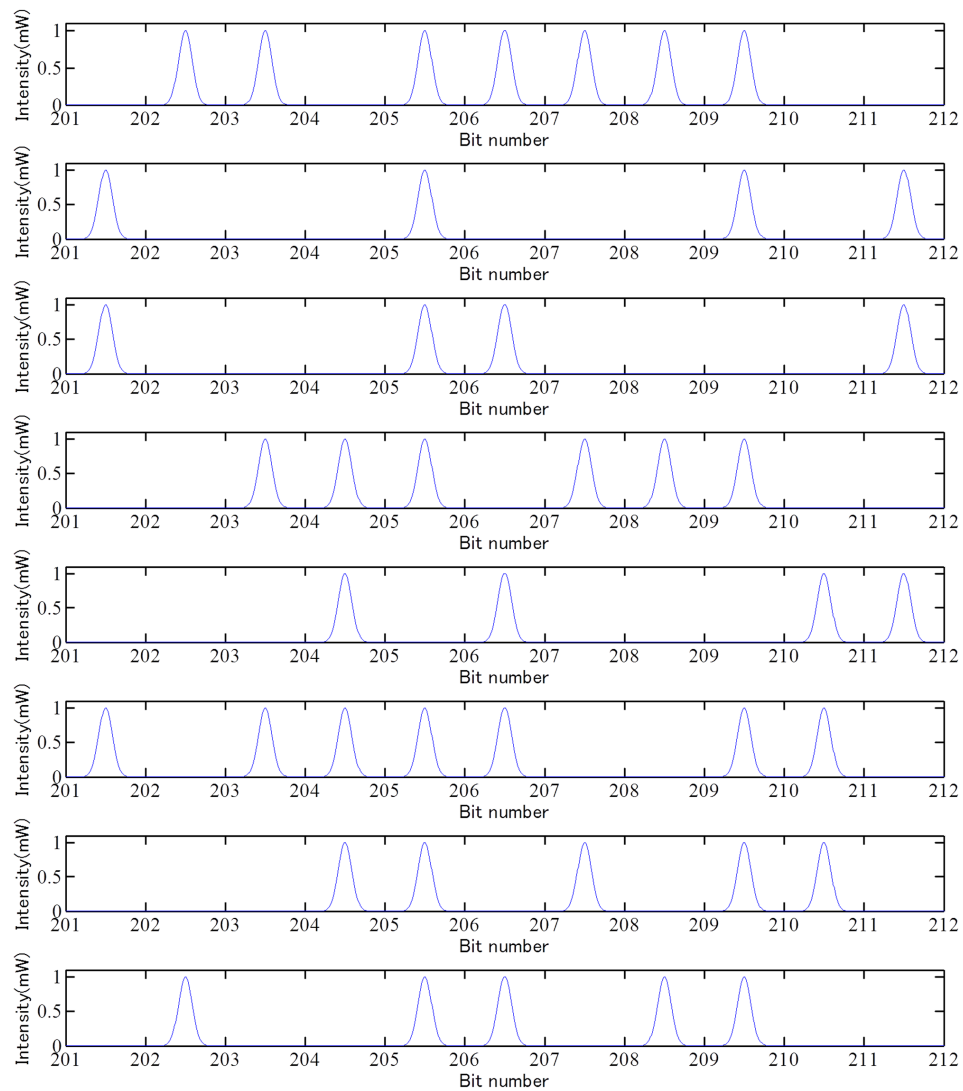


図. 4.7: 入力信号光波形の一部

この入力信号光に対する出力信号光として、信号 $\{1,0,1,0,0,1,1,1,1,0,1,1\}$ を得ることができれば、提案回路が正しい動作をしていると言える．出力信号光波形を以下の図 4.8 に示す．(a)，(b)，(c) はそれぞれビットレート 250，500，750Gbps に対応する．

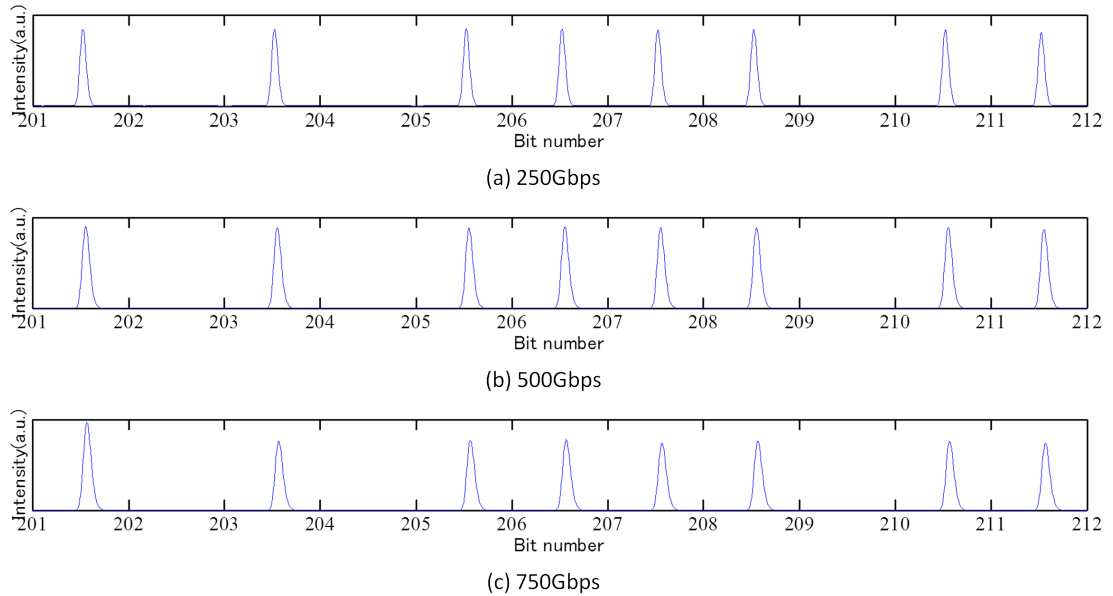


図. 4.8: 出力信号光波形の一部

図 4.8 から提案回路が正しく 8 ビットの符号語に対して XOR 論理演算を行っていることが分かる．同様に、図 4.4 で示した入力信号光に対して、正しい出力ができていることを確認した．図 4.9 は図 4.4 に示した入力信号光に対する提案回路の出力信号光である．(a)，(b)，(c) はそれぞれビットレート 250，500，750Gbps に対応する．

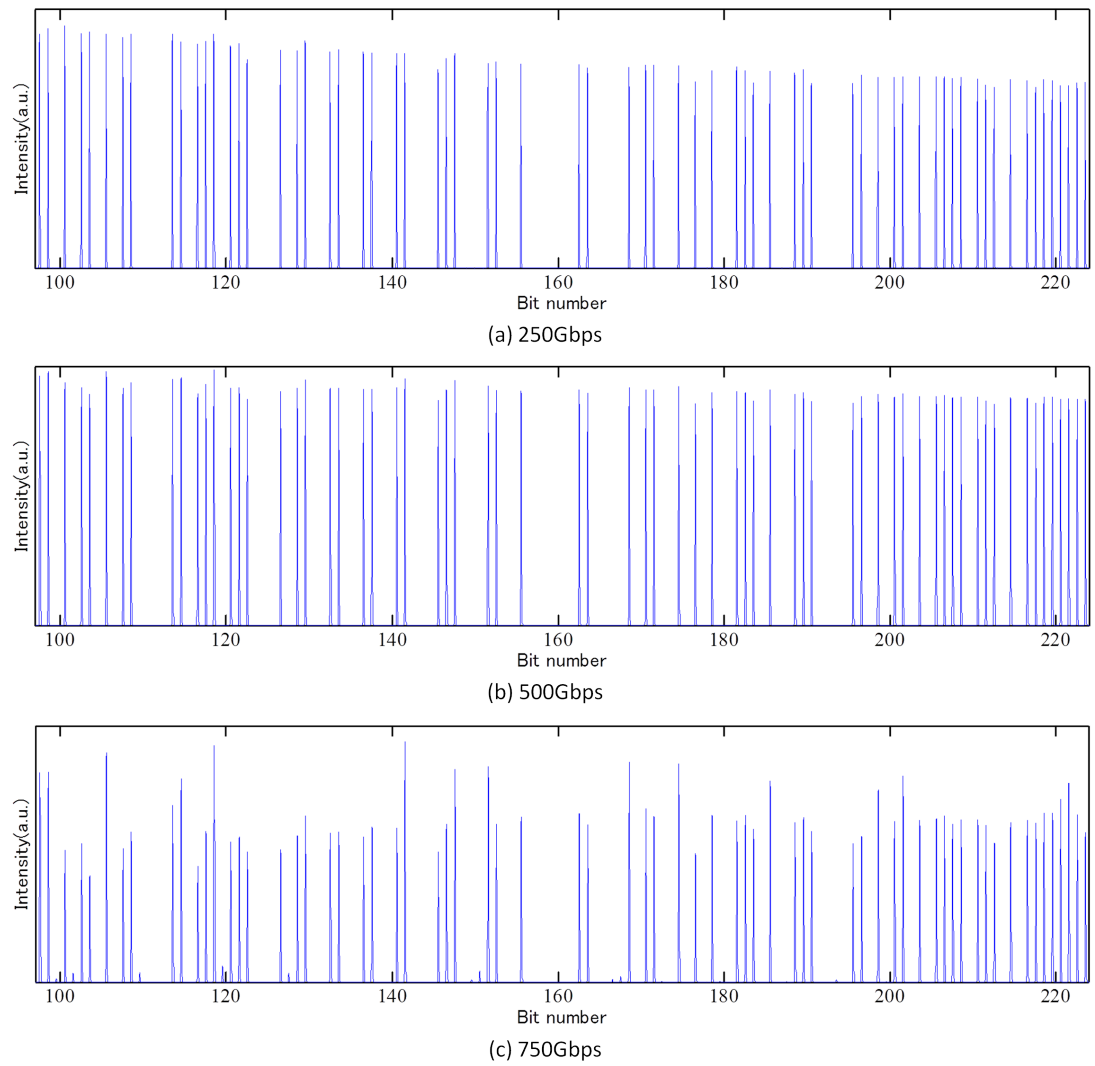


図. 4.9: 出力信号光波形

本節で述べたことから，提案回路は単一パリティチェックによる誤り検出を行うことができることが分かった．次節において，その出力信号光の特性について述べる．

4.2.2 アイダイアグラム

本節では、アイダイアグラムと ER による提案回路の性能評価を行う。以下の図 4.10 は入力信号光のアイダイアグラムである。入力信号光は雑音を含んでいない。

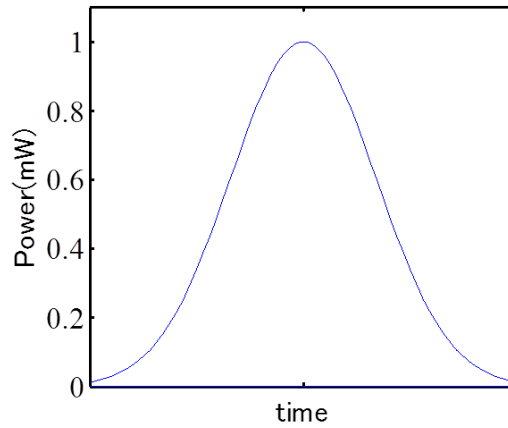


図. 4.10: 入力信号光のアイダイアグラム

図 4.11, 4.12, 4.13 はそれぞれビットレート 250, 500, 750Gbps における、図 4.3 で示した各ステージにおけるアイダイアグラムである。各図の (a), (b), (c) はそれぞれ 1st, 2nd, 3rd stage を示す。

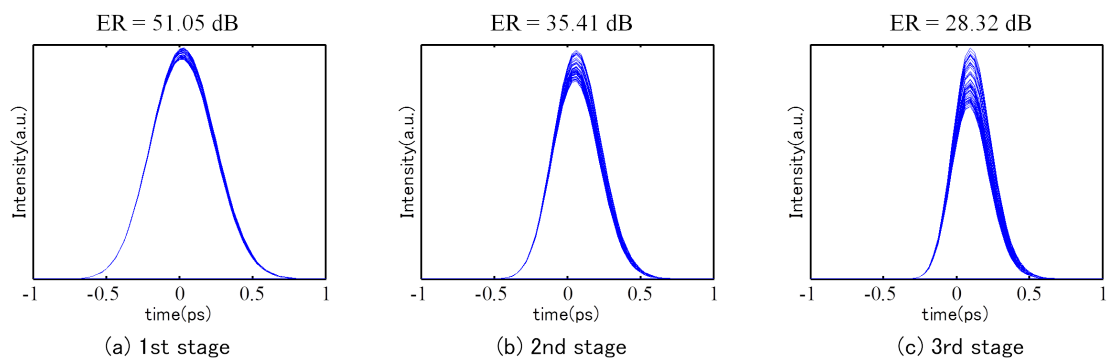


図. 4.11: 各ステージにおけるアイダイアグラム (250Gbps)

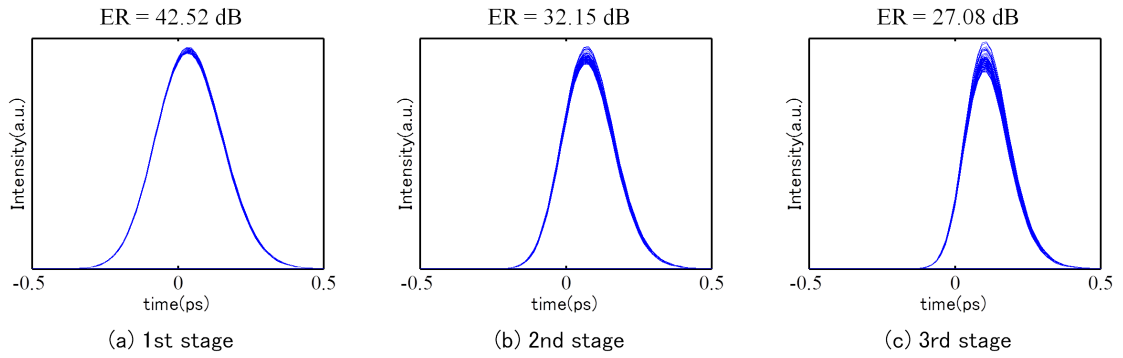


図. 4.12: 各ステージにおけるアイダイアグラム (500Gbps)

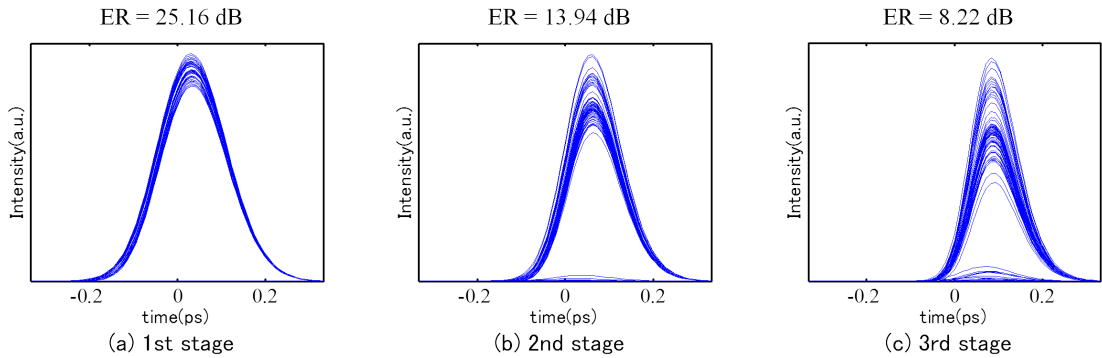


図. 4.13: 各ステージにおけるアイダイアグラム (750Gbps)

図 4.11, 4.12 から, 提案回路はビットレート 250, 500Gbps において良好なアイ開口および ER 値を示していることが分かる. 一方, 図 4.13 から, ビットレート 750Gbps においてはアイ開口が小さくなっており, “1” 信号の光強度差も大きい. これは, 高ビットレートな信号光が入力されることにより, QD-SOA のキャリア回復遅れが発生し, パターン効果が現れているからであると考えられる. また, 共通して確認できることとして, ステージが進むにつれ, ER 値が減少している. これは “1” 信号の光強度差が次段の QD-SOA-based MZI の出力に大きく影響を与えているからであると考えられる.

4.2.3 雑音耐性

前節では、ビットレート 250Gbps および 500Gbps について、提案回路の良好な入出力特性を確認した。本節では、提案回路が高い性能を発揮できるビットレート 500Gbps において、雑音耐性を評価する。図 4.14, 4.16, 4.18 はそれぞれ白色ガウス雑音を付加した状態の入力信号光である。このような入力信号光に対する各ステージにおけるアイダイアグラム (図 4.15, 4.17, 4.19) を示す。

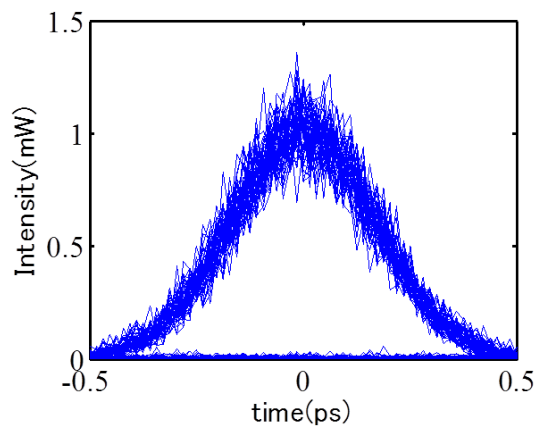


図. 4.14: 入力信号光, 雑音パターン 1(500Gbps)

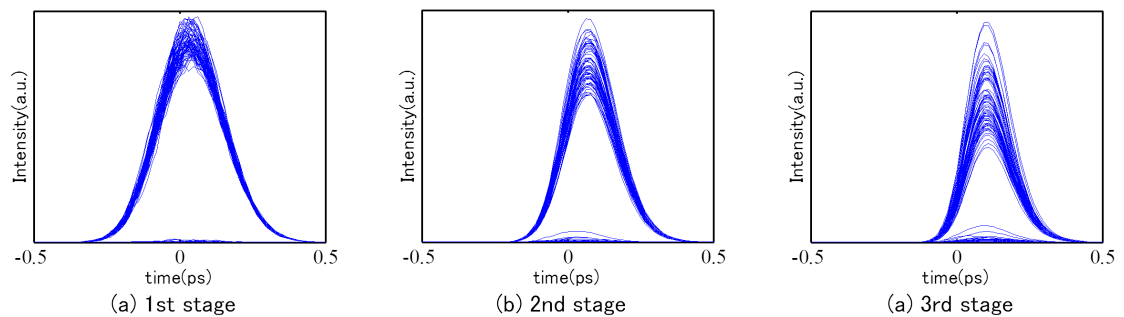


図. 4.15: 雑音パターン 1 の入力信号光に対する各ステージにおけるアイダイアグラム (500Gbps)

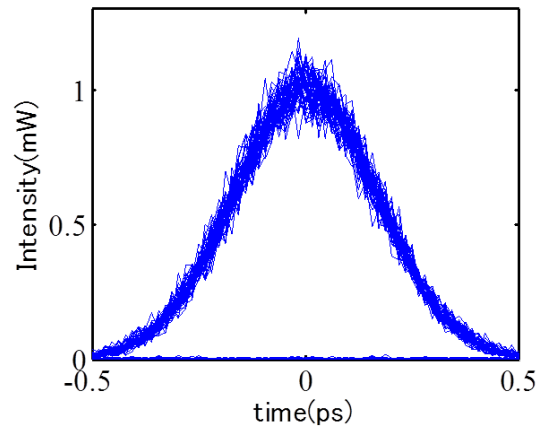


図. 4.16: 入力信号光, 雑音パターン 2(500Gbps)

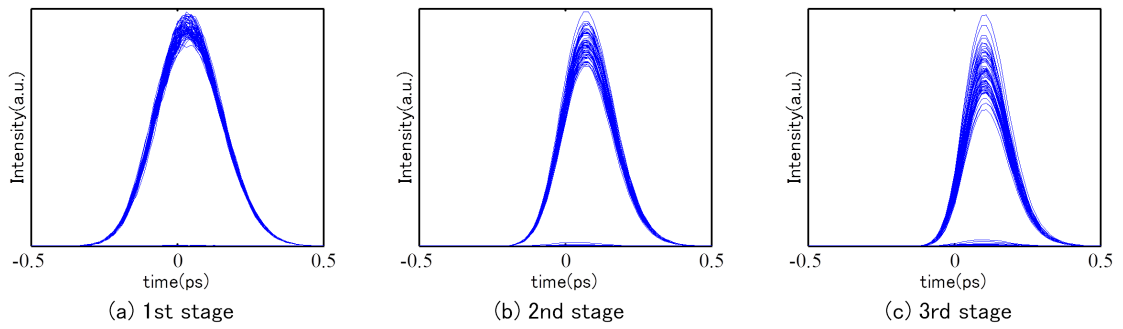


図. 4.17: 雑音パターン 2 の入力信号光に対する各ステージにおけるアイダイアグラム (500Gbps)

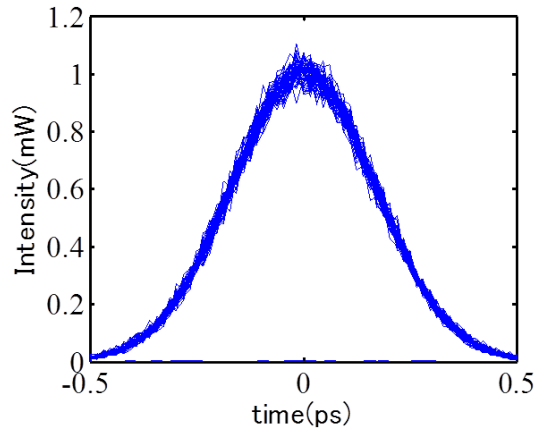


図. 4.18: 入力信号光，雑音パターン 3(500Gbps)

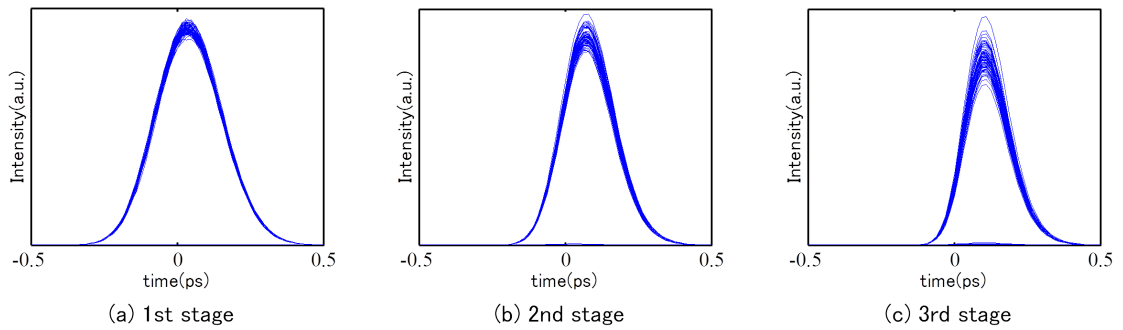


図. 4.19: 雑音パターン 3 の入力信号光に対する各ステージにおけるアイダイアグラム (500Gbps)

各図の 1st stage のアイは白色ガウス雑音が低減され，入力信号光のアイに比べて開いていることが分かる．これは，QD-SOA-based MZI において，2つの入力信号光の XOR 演算処理結果がクロックパルスに転写されることで得られているからであると考えられる．このような動作原理から，XOR 演算結果はクロックパルスのアイの状態 (図 4.6) が強く反映されるため，白色ガウス雑音の影響は非常に小さくなる．また，ステージが進むにつれ，アイ開口が小さくなっていくことは前節と同様の理由と考えられる．このことから，提案回路の性能は，白色ガウス雑音よりもパターン効果や “1” 信号の光強度差に強く影響を受けることが分かる．

第5章 結論

本論文では単一パリティチェックを用いた全光誤り検出回路を提案した。QD-SOA-based MZI による XOR 論理演算を用い、全光信号処理での誤り検出ができることを示した。QD-SOA-based MZI の出力信号光とクロックパルスの波長が全く同一となる問題については、FWM を利用した AOWC による波長変換によって解決している。

また、数値解析により、出力信号光波形、アイダイアグラム、ER、雑音耐性の面から性能評価を行った。まず、出力信号光波形から、エラーフリーの演算処理が行われていることを確認した。次に、アイダイアグラムから、ビットレート 250, 500Gbps について、十分なアイ開口を確認した。一方、ビットレート 750Gbps では、アイ開口は前者に比べ閉じていることが分かった。これは QD-SOA のキャリア回復遅れを原因としたパターン効果の影響であると考えられる。3rd ステージ (出力信号光部分) における ER は、ビットレート 250, 500, 750Gbps について、それぞれ 28.32dB, 27.08dB, 8.22dB であり、提案回路の 500Gbps での良好な動作が示された。最後に、雑音耐性について述べる。入力信号光に白色ガウス雑音が付加された状態でも、その XOR 演算結果の信号光は、クロックパルスのアイの状態を強く受けるために、雑音が大きく除去されることが分かった。これにより、提案回路は白色ガウス雑音に対し、強い耐性を持つことが分かる。

今後の課題として、自然放出 (ASE: Amplified spontaneous emission) 雑音の考慮が考えられる。今回は誘導放出時間に比べ自然放出時間が十分長いとして ASE 雑音を考慮していないが、より詳細な提案回路の性能評価のためには、それを含めた解析が必要であると考えられる。

謝 辞

本研究を進めるにあたり，熱心なご指導をいただいた八嶋弘幸教授，有益なご助言とご指導をしてくださった細谷剛助教に深く感謝いたします。また，いくつもの貴重なご意見，ご指摘をしていただいた経営工学科の先生方，並びに八嶋研究室の皆さまに御礼申し上げます。

平成 25 年 2 月 10 日

入江 孝憲

参 考 文 献

- [1] 土橋恭介, 井辺博之, 大島茂, “全光ネットワークのトラフィック収容効率向上技術”, 東芝レビュー, Vol.61, No.7, 2006.
- [2] 情報通信研究機構, “光ネットワーク技術のすべて”, 日本実業出版社, 2005.
- [3] 一番ヶ瀬広, 本島邦明, 水落隆司, 清水克宏, “次世代トランスポート技術”, <http://www.mitsubishielectric.co.jp/corporate/giho/0802/pdf/0802104.pdf>, 最終閲覧日: 2014/1/20.
- [4] 山下真司, “光ファイバ通信のしくみがわかる本”, 技術評論社, 2002.
- [5] 北山研一, “光通信工学”, オーム社, 2012.
- [6] 吉田英夫, 松本渉, 宮野好邦, “光通信システムにおける誤り訂正符号技術の動向”, 電子情報通信学会技報, CS2005-1, 2005.
- [7] 田島一人, 中村滋, 上野芳康, “超高速全光スイッチとそれを用いた全光信号処理技術の研究動向”, 電子情報通信学会誌, Vol.86, No.2, pp.114-119, 2003.
- [8] 相原洋平, 清水智, 植之原裕行, “全光型誤り訂正技術の実現に向けた光 XOR 回路に関する動作特性の特性分析”, 2010 年電子情報通信学会総合大会, B-12-14, 2010.
- [9] A. Matsumoto, K. Kuwata, A. Matsushita, K. Akahane, K. Utaka, “Numerical Analysis of Ultrafast Performances of All-Optical Logic-Gate Devices Integrated with InAs QD-SOA and Ring Resonators”, IEEE J. Quantum Electronics, Vol.49, No.1, 2013.
- [10] H. Sun, Q. Wang, H. Dong, Z. Chen, N. K. Dutta, “All-Optical Logic XOR Gate at 80 Gb/s Using SOA-MZI-DI”, IEEE J. Quantum Electronics, Vol.42, No.8, 2006.
- [11] G. Contestabile, A. Maruta, S. Sekiguchi, K. Morito, M. Sugawara, and K. Kitayama, “All-Optical Signal Processing using QD-SOA”, OECC2010, Technical Digest 7D2-1, 2010.

- [12] Y. B. Ezra, B. I. Lembrikov, M. Haridim, “Acceleration of Gain Recovery and Dynamics of Electrons in QD-SOA”, IEEE J. Quantum Electronics, Vol.41, No.10, 2005.
- [13] Y. B. Ezra, B. I. Lembrikov, M. Haridim, “Specic Features of XGM in QD-SOA”, IEEE J. Quantum Electronics, Vol.43, No.8, 2007.
- [14] 吉田隆, “量子ドットエレクトロニクスの最前線”, NTS, 2011.
- [15] Y. B. Ezra, B. I. Lembrikov, M. Haridim, “Ultrafast All-Optical Processor Based on Quantum-Dot Semiconductor Optical Amplifiers”, IEEE J. Quantum Electronics, Vol.45, No.1, 2009.
- [16] A. Rostami, H. B. A. Nejad, R. M. Qartavol, H. R. Saghai, “Tb/s Optical Logic Gates Based on Quantum-Dot Semiconductor Optical Amplifiers”, IEEE J. Quantum Electronics, Vol.46, No.3, 2010.
- [17] 八嶋弘幸, “畳み込み符号と Viterbi 復号”, トリケップス, 2000.
- [18] 汐崎陽, “情報・符号理論の基礎”, オーム社, 1992.
- [19] 服部利明, “非線形光学入門”, 裳華房, 2009.
- [20] 黒川隆志, “光機能デバイス”, 共立出版, 2004.
- [21] 井上恭, “ファイバー通信のための非線形光学”, 森北出版, 2011.
- [22] O. Qasaimeh, “Theory of Four-Wave Mixing Wavelength Conversion in Quantum Dot Semiconductor Optical Amplifiers”, IEEE Photonics Technology. Lett, Vol.16, No.4, 2004.
- [23] H. Lee, H. Yoon, Y. Kim, J. Jeong, “Theoretical Study of Frequency Chirping and Extinction Ratio of Wavelength-Converted Optical Signals by XGM and XPM Using SOA ’ s”, IEEE J. Quantum Electronics, Vol.35, No.8, 1999.
- [24] D. K. Gayen, A. Bhattachryya, T. Chattopadhyay, J. N. Roy, “Ultrafast All-Optical Half Adder Using Quantum-Dot Semiconductor Optical Amplifier-Based Mach-Zehnder Interferometer”, IEEE J. Lightwave Technology, Vol.30, No.21, 2012.

付 録 A QD-SOA(XPM)

%添え字 1…Signal

%添え字 2…Pomp

num = par;

%Outout 作成

OutputPort1 = InputPort1;

OutputPort2 = InputPort2;

%電流

I = 50 * 10⁻³;

%固定パラメータ

q = 1.602 * 10⁻¹⁹;

h = 6.626 * 10⁻³⁴;

vg = 8.3 * 10⁷;

L = 2000 * 10⁻⁶;

W = 3 * 10⁻⁶;

Lw = 0.25 * 10⁻⁶;

Nq = 5 * 10¹⁴;

gmax = 14 * 10²;

aint = 2 * 10²;

aLEF = 4.5;

%遷移時間

Tw2 = 3 * 10⁻¹²;

T2w = 1 * 10⁻⁹;

TwR = 1 * 10⁻⁹;

```

T21 = 0.16 * 10^-12;
T12 = 1.2 * 10^-12;
T1R = 0.4 * 10^-9;
%変換係数
a0 = 5.6 * 10^13;
Tuf = 50*10^-15;

%固定パラメータから計算
Aeff = W * Lw;
NQ = Nq / Lw;
V = L * W * Lw;

%データ読み込み
tlim = length(InputPort1.Sampled.Time);
time = InputPort1.Sampled.Time;
dt = time(2) - time(1);
dz = dt * vg;
k = round(L/dz);

OutputPort1.Sampled.Signal = zeros(1,tlim);
OutputPort2.Sampled.Signal = zeros(1,tlim);

freq1 = InputPort1.Channels;
freq2 = InputPort2.Channels;

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

%変数設定
Nw = zeros(tlim,k);
Nh = zeros(tlim,k);
Nf = zeros(tlim,k);
%      NwP = zeros(1,tlim);
%      NhP = zeros(1,tlim);

```

```

%      NfP = zeros(1,tlim);
      A1 = zeros(tlim+1,k+1);
      A2 = zeros(tlim+1,k+1);
%      phase = zeros(tlim,k);
      S1 = zeros(tlim+1,k+1);
      S2 = zeros(tlim+1,k+1);
      G1 = zeros(tlim,k);
      G2 = zeros(tlim,k);
      Aout1 = zeros(1,tlim);
      Aout2 = zeros(1,tlim);

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%QD-SOA
for x = 1:tlim
    A1(x,1) = InputPort1.Sampled.Signal(1,x);
    A2(x,1) = InputPort2.Sampled.Signal(1,x);
    S1(x,1) = abs(A1(x,1))^2 / (Aeff*vg*h*freq1);
    S2(x,1) = abs(A2(x,1))^2 / (Aeff*vg*h*freq2);

    for y = 1:k
        %レート方程式
        %WL
        if x == 1
            Nw(x,y) = ( I/(q*V) - Nw(x,y)*(1-Nh(x,y))/Tw2 + NQ*Nh(x,y)/T2w
                - Nw(x,y)/TwR ) * dt;
        else
            Nw(x,y) = Nw(x-1,y) + ( I/(q*V) - Nw(x-1,y)*(1-Nh(x-1,y))/Tw2
                + NQ*Nh(x-1,y)/T2w - Nw(x-1,y)/TwR ) * dt;
        end

        %ES
        if x >= 2
            Nh(x,y) = Nh(x-1,y) + ( Nw(x-1,y)*(1-Nh(x-1,y))/(NQ*Tw2)

```

```

        - Nh(x-1,y)/T2w - (1-Nf(x-1,y))*Nh(x-1,y)/T21
        + Nf(x-1,y)*(1-Nh(x-1,y))/T12 ) * dt;
end

%GS
if x >= 3
    Nf(x,y) = Nf(x-1,y) + ( (1-Nf(x-1,y))*Nh(x-1,y)/T21
        - Nf(x-1,y)*(1-Nh(x-1,y))/T12 - Nf(x-1,y)^2/T1R -
        gmax*(2*Nf(x-1,y)-1)/NQ*(S1(x-1,y)+S2(x-1,y))*vg ) * dt;
end

%
NwP(1,x) = NwP(1,x) + Nw(x,k);
%
NhP(1,x) = NhP(1,x) + Nh(x,k);
%
NfP(1,x) = NfP(1,x) + Nf(x,k);

%利得係数
G1(x,y) = gmax*(2*Nf(x,y)-1) * (1 - aLEF * i);
G2(x,y) = gmax*(2*Nf(x,y)-1) * (1 - aLEF * i);

%波動方程式
A1(x+1,y+1) = A1(x,y) * exp(1/2 * (G1(x,y) - aint) * dz);
A2(x+1,y+1) = A2(x,y) * exp(1/2 * (G2(x,y) - aint) * dz);

%プロット用位相角情報
%phase(x,y) = angle(A2(x,y));

%光子密度
S1(x+1,y+1) = abs(A1(x+1,y+1))^2 / (Aeff*vg*h*freq1);
S2(x+1,y+1) = abs(A2(x+1,y+1))^2 / (Aeff*vg*h*freq2);
end

%出力
Aout1(1,x) = A1(x+1,k+1);

```



```

        Aout2(1,x) = A2(x+1,k+1);

    end

    for x = 1:tlim-k
        OutputPort1.Sampled.Signal(1,x) = Aout1(1,k+x);
        OutputPort2.Sampled.Signal(1,x) = Aout2(1,k+x);
    end

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

%プロット
% figure(1)
% plot(time,NwP)
%
% figure(2)
% plot(time,NhP)
%
% figure(num)
% plot(time,NfP)
%
% for z = 14000:100:16000
%     hold on
%     figure(num+1)
%     plot(phase(z,:))
% end

```

付 録 B QD-SOA(FWM)

%添え字 1…Signal

%添え字 2…Pomp

%添え字 3…FWM

%Outout 作成

OutputPort1 = InputPort1;

OutputPort2 = InputPort2;

OutputPort3 = InputPort2;

%電流

I = 50 * 10⁻³;

%固定パラメータ

q = 1.602 * 10⁻¹⁹;

h = 6.626 * 10⁻³⁴;

vg = 8.3 * 10⁷;

L = 2000 * 10⁻⁶;

W = 3 * 10⁻⁶;

Lw = 0.25 * 10⁻⁶;

Nq = 5 * 10¹⁴;

gmax = 14 * 10²;

aint = 2 * 10²;

aLEF = 4.5;

%遷移時間

Tw2 = 3 * 10⁻¹²;

T2w = 1 * 10⁻⁹;

```

TwR = 1 * 10^-9;
T21 = 0.16 * 10^-12;
T12 = 1.2 * 10^-12;
T1R = 0.4 * 10^-9;
%変換係数
a0 = 5.6 * 10^13;
Tuf = 50*10^-15;

%固定パラメータから計算
Aeff = W * Lw;
NQ = Nq / Lw;
V = L * W * Lw;

%データ読み込み
tlim = length(InputPort1.Sampled.Time);
time = InputPort1.Sampled.Time;
dt = time(2) - time(1);
dz = dt * vg;
k = round(L/dz);

OutputPort1.Sampled.Signal = zeros(1,tlim);
OutputPort2.Sampled.Signal = zeros(1,tlim);
OutputPort3.Sampled.Signal = zeros(1,tlim);

freq1 = InputPort1.Channels;
freq2 = InputPort2.Channels;
freq3 = 2 * freq2 -freq1;
omega = freq2-freq1;

OutputPort3.Channels = freq3;
OutputPort3.Sampled.CentralFrequency = freq3;
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

```

```

%変数設定
Nw = zeros(tlim,k);
Nh = zeros(tlim,k);
Nf = zeros(tlim,k);
%      NwP = zeros(1,tlim);
%      NhP = zeros(1,tlim);
%      NfP = zeros(1,tlim);
A1 = zeros(tlim+1,k+1);
A2 = zeros(tlim+1,k+1);
A3 = zeros(tlim+1,k+1);
S1 = zeros(tlim+1,k+1);
S2 = zeros(tlim+1,k+1);
S3 = zeros(tlim+1,k+1);
G1 = zeros(tlim,k);
G2 = zeros(tlim,k);
G3 = zeros(tlim,k);
Aout1 = zeros(1,tlim);
Aout2 = zeros(1,tlim);
Aout3 = zeros(1,tlim);

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%QD-SOA
for x = 1:tlim
    A1(x,1) = InputPort1.Sampled.Signal(1,x);
    A2(x,1) = InputPort2.Sampled.Signal(1,x);
    S1(x,1) = abs(A1(x,1))^2 / (Aeff*vg*h*freq1);
    S2(x,1) = abs(A2(x,1))^2 / (Aeff*vg*h*freq2);

    for y = 1:k
        %レート方程式
        %WL
        if x == 1
            Nw(x,y) = ( I/(q*V) - Nw(x,y)*(1-Nh(x,y))/Tw2 + NQ*Nh(x,y)/T2w

```

```

        - Nw(x,y)/TwR ) * dt;
else
    Nw(x,y) = Nw(x-1,y) + ( I/(q*V) - Nw(x-1,y)*(1-Nh(x-1,y))/Tw2
        + NQ*Nh(x-1,y)/T2w - Nw(x-1,y)/TwR ) * dt;
end

%ES
if x >= 2
    Nh(x,y) = Nh(x-1,y) + ( Nw(x-1,y)*(1-Nh(x-1,y))/(NQ*Tw2)
        - Nh(x-1,y)/T2w - (1-Nf(x-1,y))*Nh(x-1,y)/T21
        + Nf(x-1,y)*(1-Nh(x-1,y))/T12 ) * dt;
end

%GS
if x >= 3
    Nf(x,y) = Nf(x-1,y) + ( (1-Nf(x-1,y))*Nh(x-1,y)/T21
        - Nf(x-1,y)*(1-Nh(x-1,y))/T12 - Nf(x-1,y)^2/T1R -
        gmax*(2*Nf(x-1,y)-1)/NQ*(S1(x-1,y)+S2(x-1,y))*vg ) * dt;
end

%
    NwP(1,x) = NwP(1,x) + Nw(x,k);
%
    NhP(1,x) = NhP(1,x) + Nh(x,k);
%
    NfP(1,x) = NfP(1,x) + Nf(x,k);

%利得係数
G1(x,y) = gmax*(2*Nf(x,y)-1) * (1 - aLEF * i);
G2(x,y) = gmax*(2*Nf(x,y)-1) * (1 - aLEF * i);
G3(x,y) = gmax*(2*Nf(x,y)-1) * (1 - aLEF * i);

Ptotal = abs(A1(x,y))^2 + abs(A2(x,y))^2 + abs(A3(x,y))^2;
%变换係数
H1 = a0*G1(x,y) * (-(-omega)*i + 1/T1R + 2*a0*Ptotal)^-1
+ a0*G1(x,y) * (-(-omega)*i + 1/Tuf)^-1;

```

```

H3 = a0*G3(x,y) * (-(omega)*i + 1/T1R + 2*a0*Ptotal)^-1
+ a0*G3(x,y) * (-(omega)*i + 1/Tuf)^-1;

%波動方程式
A1(x+1,y+1) = A1(x,y) * exp(1/2 * ((G1(x,y) - aint)
- H1 * abs(A2(x,y))^2) * dz) - 1/2 * H1 * A2(x,y)^2 * A3(x,y)' * dz;
A2(x+1,y+1) = A2(x,y) * exp(1/2 * (G2(x,y) - aint) * dz);
A3(x+1,y+1) = A3(x,y) * exp(1/2 * ((G3(x,y) - aint)
- H3 * abs(A2(x,y))^2) * dz) - 1/2 * H3 * A2(x,y)^2 * A1(x,y)' * dz;

%光子密度
S1(x+1,y+1) = abs(A1(x+1,y+1))^2 / (Aeff*vg*h*freq1);
S2(x+1,y+1) = abs(A2(x+1,y+1))^2 / (Aeff*vg*h*freq2);
S3(x+1,y+1) = abs(A3(x+1,y+1))^2 / (Aeff*vg*h*freq3);
end

%出力
Aout1(1,x) = A1(x+1,k+1);
Aout2(1,x) = A2(x+1,k+1);
Aout3(1,x) = A3(x+1,k+1);

end

for x = 1:tlim-k
    OutputPort1.Sampled.Signal(1,x) = Aout1(1,k+x);
    OutputPort2.Sampled.Signal(1,x) = Aout2(1,k+x);
    OutputPort3.Sampled.Signal(1,x) = Aout3(1,k+x);
end

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

%プロット
% figure(1)
% plot(time,NwP)

```

```
%  
% figure(2)  
% plot(time,NhP)  
%  
% figure(3)  
% plot(time,NfP)
```