

佐藤孝嗣

平成 27 年 1 月

工学部

佐藤孝嗣

内容梗概

# 目次

<b>1</b>	<b>はじめに</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>光デバイスを用いたベクトル行列積演算器の紹介</b>	<b>3</b>
2.1	基本素子の紹介	3
2.1.1	方向性結合器	3
2.1.2	位相シフタ	4
2.1.3	マッハツェンダ干渉器	4
2.1.4	光増幅器	5
2.1.5	フォトディテクタ	5
2.2	MZI を用いたベクトル行列積演算器	5
<b>3</b>	<b>MZIVMM を構成する光素子の動作原理と雑音</b>	<b>6</b>
3.1	光源の雑音	6
3.1.1	レーザーの動作原理	6
3.1.2	レーザーの雑音	8
3.2	光増幅器の雑音	8
3.2.1	光増幅器の動作原理	8
3.2.2	光増幅器の雑音特性	8
3.3	位相シフタの雑音	10
3.4	フォトディテクタの雑音	10
3.4.1	フォトダイオードの動作原理	10
3.4.2	フォトダイオードの雑音	11

# 第 1 章

## はじめに

現在、インターネットが一般に広く普及しており、パソコンやスマートフォンなどの通信機器もインターネットとともに普及し、我々の社会生活に深く浸透した。また、IoT によって世の中に存在する様々なものが通信機能をもつようになり、インターネットに接続されることにより、さらに大量のデータの低レイテンシでの処理が要求されている。

過去 40 年以上にわたって、CMOS を含む MOS 集積回路の性能向上と低消費電力化は MOSFET の微細化によって達成されてきた。これは微細化によって MOSFET の電気容量が減少して、MOSFET のスイッチ時間が減少するからであり、また電気容量減少に加え電源電圧の減少も伴うので電気容量の充放電で消費される電力が減少するからである。しかし、この微細化が物理的な限界を迎えると考えられており、劇的な低レイテンシ化を期待できない。

そこで極低レイテンシを実現する手段として、光技術が注目されている。光を情報の媒体として用いることにより、~~~~~

本稿では、ナノフォトニックデバイスの性質に基づくアナログ行列演算方式に着目する。現在、ナノフォトニックデバイスを用いたアナログ行列演算器が提案されており、低遅延かつ低消費電力で演算できることが示されている。しかし、アナログ演算の特性上、演算時の雑音の影響や、AD 変換時の量子化誤差から演算に誤差が生じ、演算精度が劣化するという問題がある。演算精度を知ることはその演算器がある条件下で精度を保って実用できるかどうかを決める判断の指標となるため、明らかにしておきたい。そこで、本稿ではナノフォトニックデバイスを用いたアナログ行列演算器が一定の精度を保って実用できる条件を知るた

めに、演算時に各光素子で雑音がどのように生じるかを調査し、一部の光素子について、演算結果にどれほど影響を及ぼすかを評価する。

## 第 2 章

# 光デバイスを用いたベクトル行列積演算器 の紹介

本章では、はじめに光デバイスを用いたベクトル行列積演算器の用いられている基本素子について紹介し、その後どのようにベクトル行列積演算器を実現しているかを説明する。

## 2.1 基本素子の紹介

### 2.1.1 方向性結合器

図 2.1 に示す方向性結合器 (DC : Direcional Coupler) とは、1 つの伝達経路（以下、導波路）から光信号を 2 つの導波路に分岐したり、あるいは 2 つの導波路からの光信号を 1 つの導波路に結合する機能を有するデバイスである。2 つの導波路を十分に近い距離で平行に並べると、光波は 2 つの導波路間を移動する。入力ポート 1 に入力された光波が、他方の出力側導波路である出力ポート 2 に移動することをクロス、同一の出力側導波路である出力ポート 1 を通過することをスルーと呼ぶ。入力光のエネルギーに対するクロスした光波のエネルギー比率を透過率と呼び、スルーした光波のエネルギー比率を反射率と呼ぶ。これらの比率は 2 本の並行する導波路の長さと同結合係数に依存して決定される。また導波路型の DC においては、クロスへの透過で位相が  $\pi/2$  シフトするという特徴を持つ。

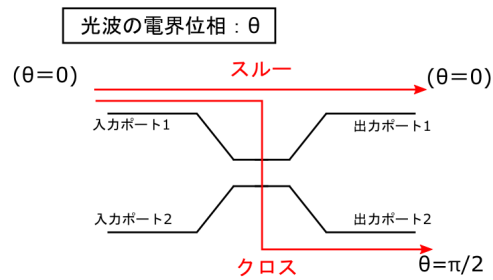


図 2.1: 方向性結合器

### 2.1.2 位相シフタ

位相シフタ (PS : Phase Shifter) は入力ポートに入射してきた光の位相を、制御ポートのからの信号の大きさに応じて変化させて出力ポートに出力するデバイスである。このとき、位相の変化量  $\Delta\theta$  は制御信号の大きさ  $I$  に比例する。

$$\Delta\theta = kI \quad (k: \text{比例定数}) \quad (2.1)$$

### 2.1.3 マッハツェンダ干渉器

マッハツェンダ干渉器 (MZI: Mach-Zehnder Interferometer) の回路図を図 2.2 に示す。MZI は、2つの DC と 1つの PS から構成され、PS によって生じた位相差に従って出力光の強度を変化させるという特徴を有する。たとえば、DC の反射率、透過率ともに 0.5 であり、PS は制御信号により位相を  $\pi$  シフトする (ON 時) もしくは位相シフトしない (OFF 時) という 2 値制御が可能な構成を考える。この際入力ポート 1 から入力された光波は、PS が ON 時に出力ポート 1 から出力され、逆に OFF の時には出力ポート 2 から出力される経路切替スイッチとしての機能を果たす。

### 2.1.4 光増幅器

光増幅器とは入力ポートから入射してきた光信号の電界強度を電気信号に変換することなく増幅させ、出力ポートに出力する増幅器の機能をもつデバイスである。

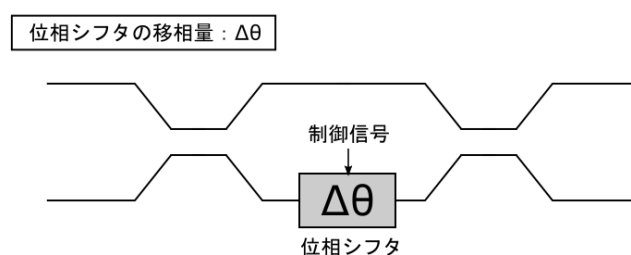


図 2.2: マッハツェンダー干渉器

### 2.1.5 フォトディテクタ

フォトディテクタは光信号を電気信号に変換する計測用デバイスであり、受光素子 (光電変換素子) に入射した光の強度に比例した電流を出力する機能を持つ。

## 2.2 MZIを用いたベクトル行列積演算器

本節では、MZI を用いたベクトル行列演算器の構成についての概略についてまとめる。まず、MZI を用いた回路において任意のベクトル行列積を表現するために、MZI を用いて任意のユニタリ行列を表現する方法について説明し、そのユニタリ行列を用いて任意のベクトル行列積演算を表現する方法をまとめる。

### 2.2.1 MZI によるユニタリ行列演算

MZI は、PS の位相操作により入力光波のエネルギーを任意の比率で出力ポートに分配することが可能であり、透過した光波のユニタリ変換を行うアナログ回路とも見なされている。図??のようなこの MZI の 2 つの入力ポートと片側出力ポートに PS を追加した素子を考える。

### 2.2.2 光デバイスを用いた任意のベクトル行列積演算



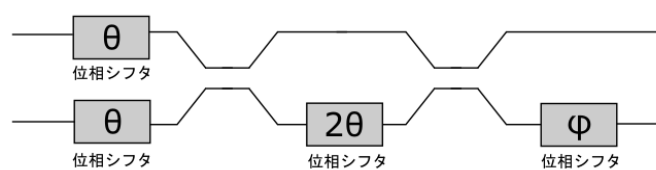


図 2.3: 位相シフタを追加したマッハツェンダー干渉器

## 第 3 章

# MZIVMM を構成する光素子の動作原理と雑音

本章では MZIVMM を構成する各光素子の動作原理と、各光素子でどのように雑音が生じるかを示す。

### 3.1 光源の雑音

MZIVMM の光の干渉を利用して光信号を処理・演算するという特徴から、MZIVMM で使用する光源は位相のそろった (コヒーレントな) 光を発する必要がある。そこで MZIVMM の光源にはレーザーを採用する。レーザー (laser) とは「放射の誘導放出による光増幅」(Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation) の頭文字から作られた言葉である。本節ではレーザーの動作原理を説明し、そこから雑音について説明する。

#### 3.1.1 レーザーの動作原理

エネルギー準位とは原子や分子などが定常状態にあるときのエネルギーの状態のことである。物質中の電子のエネルギー準位は任意の値をとることはできず、不連続なとびとびの値を持つ。

まず、2つのエネルギー準位からなる原子を考える．エネルギーの低い準位を準位 1，高い準位を準位 2 とし，それらのエネルギーをそれぞれ  $W_1, W_2$  とする．図 3.1 に示すように，原子が準位 1 の状態にあるときに角周波数  $\omega = (W_2 - W_1)/\hbar$  の光，つまり  $W_1$  と  $W_2$  の差と同じ大きさのエネルギーを持つ光が原子に入射すると，入射光のエネルギーによって原子が準位 1 から準位 2 にあげられる（励起される）．これを光の吸収と呼ぶ．また，逆に図 3.2 のように高いエネルギー準位にいる原子が角周波数  $\omega = (W_2 - W_1)/\hbar$  の電磁波を放出して，低いエネルギー準位に移る過程も存在する．この過程を光の放出と呼ぶ．

図 3.3 のように，原子が準位 2 の状態にあるときに，角周波数  $\omega = (W_2 - W_1)/\hbar$  の光を原

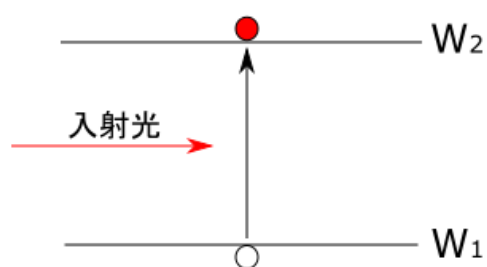


図 3.1: 2 準位系における光の吸収

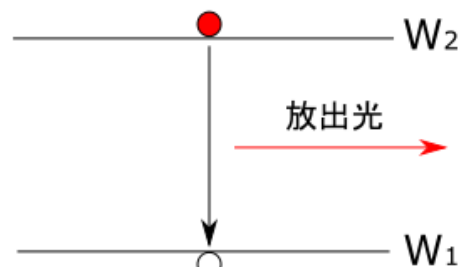


図 3.2: 2 準位系における光の放出

子に入射させると，この光に誘発されて原子は角周波数  $\omega = (W_2 - W_1)/\hbar$  の光を放射する．これを誘導放出と呼ぶ．誘導放出された光は入射光と進行方向および位相が同じであるという特徴がある．レーザーは強い誘導放出を起こさせ，進行方向および位相のそろった強い光を放射している．

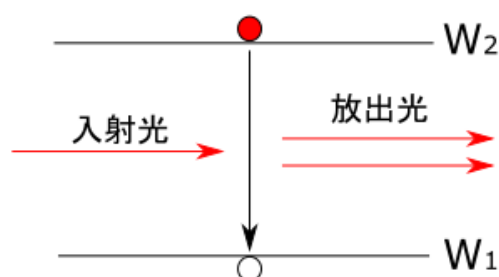


図 3.3: 光の誘導放出

光の放出は原子の周囲に光が存在しない時にも自発的に起こることがある．これを自然放出と呼ぶ．このとき，放出光の位相はランダムな値をとる．

角周波数  $\omega = (W_2 - W_1)/\hbar$  の光は、準位 2 の状態にある原子から光を誘導放出させるが、準位 1 の状態にある原子によって吸収されてるので、角周波数  $\omega = (W_2 - W_1)/\hbar$  の強い光を作るためには準位 2 の状態にある原子の数を準位 1 の状態にある原子の数より多くさせる必要がある。このために外部から電流の注入などを行い励起した原子の数を増やすことをポンピングという。また低いエネルギー準位にある原子よりも高いエネルギー準位にある原子の方が多数の状態を反転分布と呼び、この状態を作ることがレーザーにより強い光を放射するために必要な条件である。

### 3.1.2 レーザーの雑音

レーザーにおける雑音は自然放出に起因している。自然放出により生じた自然放出光も誘導放出により増幅される。この誘導放出により増幅された自然放出光を ASE (Amplified Spontaneous emission) と呼ぶ。ASE は元の光の誘導放出により放出された誘導放出光と位相、方向がそろっていないため、誘導放出光と干渉を起こし雑音を発生させる。

## 3.2 光増幅器の雑音

### 3.2.1 光増幅器の動作原理

光増幅器の動作原理は 3.1.1 節で紹介した誘導放出で説明できる。光増幅器内部では反転分布が形成されており、光増幅器に入射した光は光増幅器内部の励起された原子により生じた誘導放出で増幅される。

### 3.2.2 光増幅器の雑音特性

光増幅器の雑音性能を表す指標として、雑音指数 (Noise Figure : NF) を用いる。雑音指数の定義は入力信号の SNR と出力信号の SNR を用いて次のように表される。ただし、SNR (Signal-to-Noise Ratio) とは  $SNR = \frac{(\text{信号パワー})}{(\text{雑音パワー})}$  で定義される。

$$NF = 10 \log_{10} \left[ \frac{(SNR)_{in}}{(SNR)_{out}} \right] \quad (3.1)$$

ここで光の場合，信号光を理想的な光検出器で電気信号へ変換した時の電流の平均値の二乗で信号パワー，分散で雑音パワーを定義できる．また，光検出器で電気信号に変換した時の電流の大きさは入力光子数に比例するので，入力光子数の平均値  $N$  と分散  $\sigma^2$  を使って

$$SNR = \frac{N^2}{\sigma^2} \quad (3.2)$$

と表せる．

入力光の単位時間あたりの入力光子数はポアソン分布に従い，分散は平均値に一致しているので，光子数の平均と分散は平均入力光パワー  $P_0$  とプランク定数  $h$ ，振動数  $f$  を使って

$$\text{平均} : \frac{P_0}{hf} \quad \text{分散} : \frac{P_0}{hf} \quad (3.3)$$

となり，入力光の SNR は

$$(SNR)_{in} = \frac{(P_0/hf)^2}{P_0/hf} = \frac{P_0}{hf} \quad (3.4)$$

と表せる．

一方，光増幅器の出力光電場は入力光が誘導放出により増幅された増幅信号光  $E_{sig}$  と，自然放出により生じた光が増幅器内で増幅された光  $E_k (k = 1, 2, 3, \dots)$  の足しあわせで表現される．

$$E_{out} = \sqrt{G} E_{sig} + \sum_k E_k \quad (G : \text{光増幅器のゲイン}) \quad (3.5)$$

この光パワーは

$$P_{out} = |E_{out}|^2 = G E_{sig}^2 + 2\sqrt{G} \sum_k (|E_{sig} E_k|) + \sum_k \sum_{k'} E_k E_{k'} \quad (3.6)$$

ここで，上式の第 3 項は第 1 項，第 2 項に比べ十分小さいので無視する．上式の第 1 項を光パワーの平均，第 2 項の二乗を分散とすると

$$\text{平均 : } GP_0 \quad \text{分散 : } 4GA_0^2 \sum_k |E_k|^2 = 2GA_0 \sum_k E_k^2 \quad (3.7)$$

ここで自然放出光の全パワー  $\sum_k E_k^2$  は  $(G-1)n_{sp}hf$  と表せることを用いて

$$(n_{sp} = \frac{N_2}{N_2 - N_1} \quad N_2 : \text{励起状態の原子数} \quad N_1 : \text{基底状態の原子数})$$

$$\text{分散 : } 2GA_0(G-1)n_{sp}hf \quad (3.8)$$

よって出力光パワーの SNR は

$$(SNR)_{out} = \frac{G^2 P_0^2}{2GP_0(G-1)n_{sp}hf} = \frac{GP_0}{2(G-1)n_{sp}hf} \approx \frac{P_0}{2n_{sp}hf} \quad (3.9)$$

以上より、光増幅器の NF は

$$NF = 10\log_{10} \frac{(SNR)_{in}}{(SNR)_{out}} = 10\log_{10}(2n_{sp}) \quad (3.10)$$

と導出できる。

この NF を決める要因となっている  $n_{sp} = \frac{N_2}{N_2 - N_1}$  の極限は  $N_1/N_2 = 0$  のときで  $n_{sp} = 1$  となる。つまり最小でも NF=3dB しかない。

### 3.3 位相シフトの雑音

### 3.4 フォトディテクタの雑音

フォトディテクタは受光素子にフォトコンダクタを用いたものとフォトダイオードを用いたものの 2 種類が存在する。本稿では MZIVMM のフォトディテクタに用いる受光素子は雑音が小さいという点で優れているフォトダイオードとして話を進める。

#### 3.4.1 フォトダイオードの動作原理

フォトダイオードは p 型半導体と真性半導体と n 型半導体を接合した pin 接合という構造を持ち、半導体内で発生した電子や正孔が移動することにより電流が流れる。この電流のこ

とを光電流と呼ぶ．流れる光電流の大きさは受光器に入射した光の強度に比例する．図 3.4 にフォトダイオードのエネルギーバンド図を示す．フォトダイオードの空乏層に十分なエネ

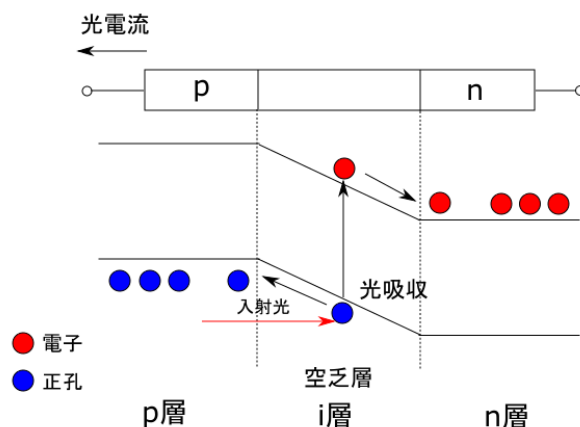


図 3.4: フォトダイオードのエネルギーバンド図

ルギーを持った光子 1 つが入射した際に，光の吸収により電子が励起して，自由電子と正孔のペア 1 つを生成する．これにより生じた自由電子と正孔はそれぞれ空乏層内の電界によって n 層と p 層に流れ，外部に自由電子と正孔が流れることで電流が生じる．

### 3.4.2 フォトダイオードの雑音

フォトダイオードの雑音は熱雑音とショットノイズの 2 つに分類できる．

#### 熱雑音

熱雑音とは受光素子を動作させる回路に存在する抵抗体内の自由電子の不規則な熱運動から生じる雑音である．1 つの抵抗を考えると，全体では電荷量がつり合って電氣的に中性になっているが，自由電子が熱運動するため，局部的に密度に揺らぎが生じ，その結果抵抗の両端に雑音電圧が発生する．熱雑音の雑音電流  $i_j$  はボルツマン定数  $k$  と素子の絶対温度  $T$ ，雑音の帯域幅  $B$  をもちいて

$$i_j = \sqrt{\frac{4kTB}{R_{sh}}} [A] \quad (3.11)$$

と表せる．

## ショットノイズ

ショットノイズとは、光子の粒子性が原因となり、検出される光子の数がゆらぐことにより生じる雑音である。電子同士が互いに無関係に励起して、電流が流れる場合を考える。この電子が励起する確率はポアソン分布に従うので  $t$  秒間に励起する電子の平均数  $N$  と、その分散  $\sigma^2$  は一致している。 ( $N = \sigma^2$ )。ここで流れる電流の大きさを  $I$  とすると、 $I = \frac{qN}{t}$  と書けるので、変形して  $N = \frac{q}{t}I$  となる。よって、分散  $\sigma^2$  も  $\sigma^2 = \frac{q}{t}I$  となる。 $t$  秒ごとに区切って平均を考えることは、周波数  $f = \frac{1}{t}$  でフォトダイオードを動作させることと同じなので  $f = \frac{1}{t}$  を代入して、

$$\sigma^2 = 2qIf \quad (3.12)$$

よって、ショットノイズによる電流の大きさ  $I_S$  は

$$i_S = \sqrt{2qIf} \quad [A] \quad (3.13)$$

フォトディテクタにおけるショットノイズは暗電流に起因するもの  $i_{SD}$  と、光電流に起因するもの  $i_{SL}$  の 2 種類である。ここで暗電流とは光電効果を示す半導体などの電気素子に電圧を加えた時に、熱的原因、絶縁不良、結晶欠陥などによって起こる、光を電気素子に当てなくても流れる電流のことである。また光電流は光を当てることによって生じた電流である。

$$i_{SD} = \sqrt{2qI_D f} \quad [A] \quad (3.14)$$

$$i_{SL} = \sqrt{2qI_L f} \quad [A] \quad (3.15)$$

( $q$ : 1 電子あたりの電荷量  $I_D$ : 暗電流  $I_L$ : 光電流  $f$ : フォトダイオードの動作周波数)