

修士論文

フェーズドアレイを用いた  
InP オフチップ光偏向素子の研究

Research on InP Off-Chip Optical Beam Steering Devices  
Using Phased Arrays

指導教員 中野義昭 教授  
東京大学院 工学系研究科  
電気系工学専攻

37-116504 崔 成漢

平成 25 年 2 月 6 日 提出



# Abstract

Optical beam steering devices, which control the propagation direction of light, have diverse applications, including LIDAR (Light Detection and Ranging), optical wireless communication, optical imaging, and sensing. In all applications, there have been growing demands for smaller device size, faster scanning speed, and lower power consumption. Among various types of optical beam steering devices, phased-array InP optical beam steering devices have several advantages, such as compact size, fast steering speed above few hundred MHz, and integratability with laser diodes. On the other hand, InP/InGaAsP waveguide device in general suffers from a difficulty in extracting the light out of the plane efficiently, due to the relatively small refractive index difference between InP and InGaAsP.

In this research, we aim to realize efficient and compact phased-array optical beam steering devices on InP. This work consists of two parts. We first design, fabricate, and demonstrate one-dimensional (1D) optical beam steering device circuits on InP. Then, we develop a novel type of vertical optical coupler having a slanted mirror, which could be used to realize truly two-dimensional beam-steering.

The 1D optical beam steering devices are designed based on the concept of phased array, and its characteristics are calculated by using the beam-propagation method. The designed devices are fabricated by the standard III-V semiconductor optical device process. A far-field optical measurement setup is newly built to characterize the beam-steering function of the fabricated devices. We experimentally demonstrate large steering angle of  $\pm 28$  degree as well as low wavelength dependency over wide wavelength range from 1530 nm to 1570 nm.

The vertical optical coupler, having a slanted mirror, is designed by using the eigenmode expansion method. The designed optical coupler is then fabricated by  $\text{Cl}_2/\text{Ar}$  reactive-ion-etching process with the use of two newly developed Al stages. Using the fabricated structure, we demonstrate efficient vertical coupling with the fiber-to-fiber loss as low as 13.3 dB.

We expect that by integrating the demonstrated coupler structure with the above-mentioned optical beam steering device chip, we could realize wide ranges of vertically emitting beam-steering devices, including the two-dimensional (2D) beam scanners.



# 目次

<b>Abstract</b>	i
<b>第 1 章 序論</b>	1
1.1 光偏向素子の概要と応用先.....	1
1.2 光偏向素子の先行研究.....	3
1.2.1 MEMS 光偏向素子.....	5
1.2.2 液晶フェーズドアレイ光偏向素子.....	5
1.2.3 Si フェーズドアレイ光偏向素子.....	6
1.2.4 その他の光偏向素子.....	8
1.3 InP フェーズドアレイ偏向素子.....	10
1.4 InP 上の垂直出射光カップラ.....	11
1.5 研究の目的及び論文の概要.....	11
<b>第 2 章 面内 1 次元光偏向素子の動作原理及び設計論</b>	14
2.1 フェーズドアレイ光偏向素子の動作原理.....	14
2.2 光導波路上でのモード伝搬.....	15
2.3 デバイスの設計.....	19
2.3.1 リッジ導波路の設計.....	19
2.3.2 スターカップラの設計.....	22
2.3.2 フェーズドアレイ光偏向素子の全導波路設計.....	23
2.4 シミュレーションによるデバイスの特性確認.....	26
2.4.1 BPM の原理.....	26
2.4.2 BPM を用いたデバイスの特性確認.....	28
2.5 設計されたデバイスの形.....	30
2.6 第 2 章のまとめ.....	32
<b>第 3 章 作製プロセス</b>	34
3.1 フォトマスクの作製.....	34
3.2 エピウエハの情報.....	36

3.3	導波路の作製.....	36
3.3.1	エピウェハの劈開.....	37
3.3.2	SiN <sub>x</sub> の製膜.....	37
3.3.3	フォトリソグラフィ.....	39
3.3.4	SiN <sub>x</sub> のドライエッチング.....	39
3.3.5	InPのドライエッチング.....	40
3.4	パッシベーション及び平坦化.....	42
3.4.1	SiO <sub>2</sub> の製膜.....	42
3.4.2	ポリイミドの製膜と平坦化.....	42
3.4.3	コンタクトオープン.....	43
3.5	電極の作製.....	43
3.5.1	Ti/Auの蒸着.....	43
3.5.2	リフトオフ.....	44
3.5.3	裏面電極の形成とアニーリング.....	44
3.6	デバイス実装前までのまとめ及びSEM写真.....	44
3.7	デバイス実装.....	47
3.7.1	劈開とデバイスのマウント.....	47
3.7.2	ワイヤーボンディング.....	48
3.8	第3章のまとめ.....	48
<b>第4章</b>	<b>フェーズドアレイ光偏向素子の特性評価</b>	<b>50</b>
4.1	フェーズドアレイ光偏向素子の基本特性.....	50
4.1.1	直線導波路の伝搬損測定.....	50
4.1.2	I-V特性及びバイアス電流.....	52
4.2	FFPの概要.....	53
4.3	FFP光学系.....	55
4.3.1	FFP光学系の解析.....	55
4.3.2	FFP光学系の構築.....	58
4.4	フェーズドアレイ光偏向素子のFFP測定.....	60
4.4.1	デバイスのFFP確認.....	60

4.4.2	位相変調プログラムの作成.....	62
4.4.3	二つの FFP 光学系の比較.....	64
4.4.4	フェーズドアレイ光偏向素子の偏向特性評価.....	64
4.4.5	フェーズドアレイ光偏向素子の波長依存性.....	64
4.5	第 4 章のまとめ.....	66
<b>第 5 章 斜めエッチングを用いた垂直出射型光カプラ</b>		<b>68</b>
5.1	デバイスの設計.....	68
5.1.1	固有モード展開法.....	68
5.1.2	固有モード展開法を用いたデバイスの断面構造解析.....	70
5.1.3	有限要素法を用いた静電界の解法.....	72
5.1.4	有限要素法を用いたチャンバ内部の電気力線計算.....	72
5.2	作製プロセス.....	73
5.2.1	フォトマスクの作製.....	74
5.2.2	InGaAs の除去.....	74
5.2.3	SiO <sub>2</sub> 膜の形成.....	75
5.2.4	導波路パターン形成.....	75
5.2.5	SiO <sub>2</sub> のドライエッチング.....	75
5.2.6	Al 治具の SiO <sub>2</sub> コーティング.....	75
5.2.7	InP のドライエッチング.....	76
5.3	作製されたデバイスの SEM 写真とパターン配置の影響.....	77
5.4	デバイスの評価.....	79
5.4.1	使用された測定系.....	79
5.4.2	測定結果及び考察.....	80
5.5	第 5 章のまとめ.....	81
<b>第 6 章 結論</b>		<b>83</b>
<b>参考文献</b>		<b>85</b>

本研究に関わる発表等	90
付録	
実験装置一覧.....	91
略称.....	92
面内 1 次元光偏向素子の測定系写真.....	94
面内 1 次元光偏向素子の FFP.....	95
光偏向素子の測定に使用されたプログラム.....	96
ガラス治具を使用した斜めエッチング.....	98
謝辞	101





## 第 1 章 序論

本研究は、コンパクトでかつ高速偏向が可能な光偏向素子を、化合物半導体を用いて実現することを目指すものである。特に斜めエッチング技術を用いて作製される垂直射出型光偏向素子を研究目的とし、ライダー、光無線通信などへの応用に向けた機能を実証したものである。

まず序論として、光偏向素子の概要と現在の状況を説明し、次にいくつかの光偏向素子の研究例について紹介する。その後、本研究の目的と位置づけについて説明し、本論文の構成について述べる。

### 1.1 光偏向素子の概要と応用先

光の誘導放出と共振器を利用してコヒーレントで高強度の光を発生させるレーザーは、1960年カリフォルニアのヒューズ研究所の Theodore Maiman により最初の発生装置が開発され[1]、様々な領域で使用される現社会の礎になった。一方、レーザー光を正確に制御する技術は、レーザー発明以来から続けて研究されており、その中でも、光の伝搬方向を制御する研究は、長年盛んな研究が行われている。このように、光の向きを制御するデバイスを光偏向素子 (Optical beam steering device) と呼ぶ。

光の伝搬方向制御は光制御の基礎となる制御であり、すでに様々な製品で使用されている。身近なものでは、バーコードリーダ、レーザープリンタ、レーザーディスプレイなどがあり、それ以外にも、ライダー (LIDAR: Light Detection And Ranging)や光無線通信、光無線インターコネクタなどへも必要となっている。

#### ・ライダー

ライダーは光ビームを用いて遠隔測定を行う測定法(あるいは、測定装置)であり、出射された光は対象の物体に衝突し、散乱される。この光は再びライダーで受光され、この光を分析することにより対象物体の性質を把握する[2]。ライダーはレーダと同じ原理で動作するが、ライダーに使用されるビームの波長 (400~1550nm) がレーダに使用されるビームの波長 (2mm~100m) より短いため、高分解度を持つ特徴がある。このような特徴によりライダーは大気の測定、深淺計量のような科学的測定以外にも、軍事用途としての化学物質と生物センシング[3,4]など様々な分野で使用されている。ライダーでは、出射する光の向き制御が重要であり、光偏向素子は必須となる。またコンパクトなサイズで高速偏向可能な光偏向素子は、高速測定および様々な環境下での測定を可能とするため、ライダーの高性能化に向けて不可欠である。

Table 1.1 : Comparison between Radio and IM/DD for indoor wireless communication.

	IN/DD Infrared	Radio	Implication for IR
Bandwidth regulation	no	yes	Worldwide compatibility.
Passing through walls	no	yes	More easily secured , less coverage.
Multipath fading	no	yes	Simple link design.
Dominant noise	background light	other users	Limited range.
Input represents	power	amplitude	Difficult to operate outdoors.
Pass loss	high	high	

### ・光無線通信

光無線通信は RF(Radio Frequency)波の代わりに赤外光を使用し、これにより次のようないくつかのメリットを持つ。高速動作が可能な光源と検出器が安価に利用できる。そして RF 波は使用できる周波数帯域が制限されているが、赤外光の場合は、より広い周波数帯域が使用可能である。また、赤外光を含めた光は、壁のような障害物を貫くことができないため、送信された赤外信号はその部屋でしか利用できない。それによって、よりセキュリティの高いサービスが可能となる。その一方で、光無線通信では、部屋内に存在する様々な明光が受信器のノイズとして働くため、十分な信号対雑音比を確保する上で課題もある。Table 1.1 に RF 波による光無線通信と赤外光を用いた IM/DD(Intensity Modulation with Direct Detection)光無線通信との比較を表す。

効果的な光無線通信を行うために、様々なリンク方式が提案されているが、送受信器の指向性の程度によって大きく三つに分類される。送受信器両側に指向性も持つリンクが必要な **Directed** リンクと両側とも指向性を必要としない **Nondirected** リンクそして、送信側のみ指向性を持つ **Hybrid** リンクがある。更に、Fig. 1.1 に示したようにこれらの方式は送信光を受信する際に、反射を利用の有無によって **LOS(Line of Sight)** リンク、**Non-LOS** リンクに分類される[5]。この分類の中で **Directed LOS** リンクは経路が妨げられてなければ数 **Gbps** の高速の無線通信が可能となる[6]。このような **Directed LOS** リンクにおいて、光偏向素子は欠かせない重要な役割を果たす。また、低消費電力、高精度無線通信のためには、高速かつコンパクトな光偏向素子が必要になると考えられる。

### ・光無線インターコネク

マイクロプロセッサの集積度は、技術の進歩によりムーアの法則に従い、指数的に上昇している。しかし、現在の金属線を用いたチップ間配線技術は、微細化に伴うスケラビリティが得られないため[7]、チップの高性能化を行う上でのボトルネックと

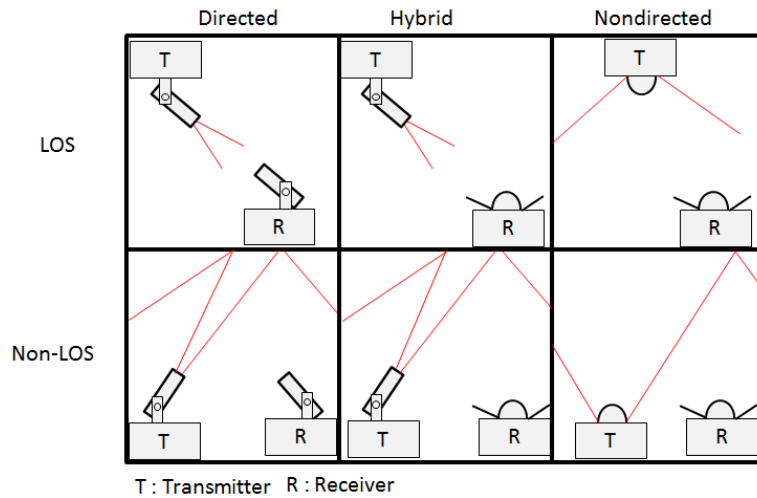


Fig. 1.1 : Classification of simple infrared links.

なっている。光インターコネクはこのような問題を解決する方法として期待され、様々な研究が行われている。特に Fig. 1.2 に示した光無線インターコネク (FSOI: Free Space Optical Interconnect) は、低遅延性、高エネルギー効率、そして、広帯域性などのメリットを持つ[8]。光無線インタコネクネットワークを構成する上で重要な技術の一つとして、コンパクトかつ高性能な光偏向素子が必要とされる。

上記のように、ライダー、光無線通信、光無線インターコネクなどでの領域では、コンパクト、高速偏向、低消費電力などの特性を有する高性能光偏向素子への要求が高まっている。それに伴い、従来の光偏向素子とは異なる光偏向素子の研究が近年活発に行われている。

## 1.2 光偏向素子の先行研究

現在、広く実用化している光偏向素子では、反射ミラーを用い、そのミラーを機械的に動かすことによって偏向を行っている。その代表的な例が Fig. 1.3 のポリゴンミラーとガルバノメータスキャナである。

ポリゴンミラーでは円周上にカットして研磨された複数のミラーを配置し、一方向に連続的に高速回転させて光を偏向させる。ポリゴンミラーはガラス板やアルミ板を回転軸に平行な正多面体にカット、研磨、コートすることによって各面に反射面を施したミラーである。ポリゴンミラーはミラーの面数とモータの回転速度によってポリゴンミラーの最大偏向角と最大周波数が決まり、現在最大周波数は 60kHz まで可能となっている。しかし、モータの回転に依存しているため、ランダムアクセスは不可となっている。

ガルバノメータは電流計の一種あり、電磁誘導を利用し、金属の針を動かすことで、

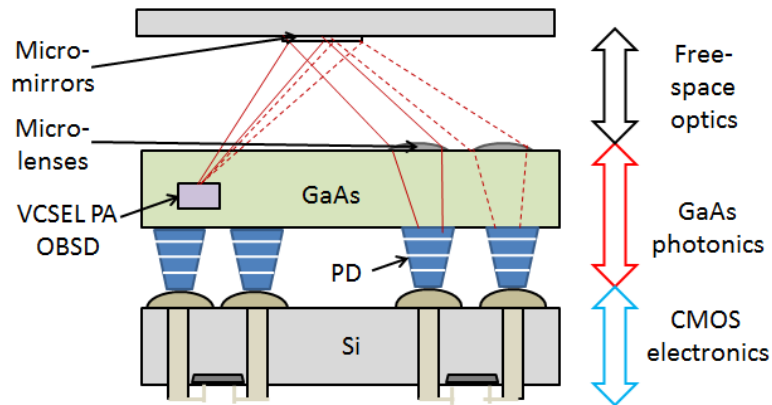
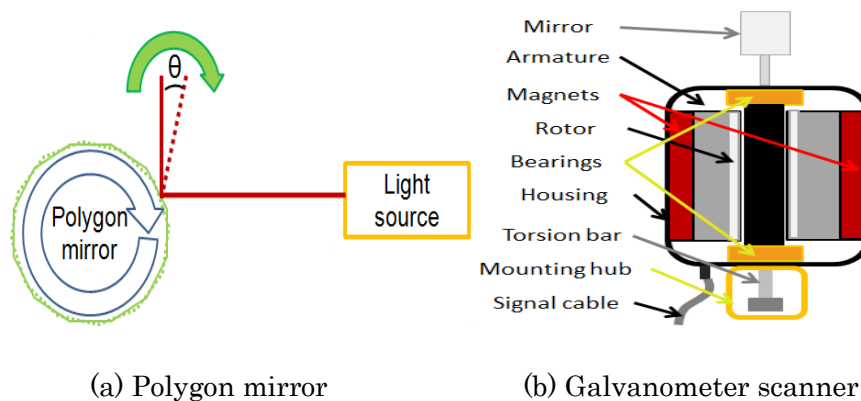


Fig. 1.2 : Schematic view of the FSOI [9].

その電流値を表示する．ここで，金属の針を反射ミラーに変えたのが，ガルバノメータスキャナ(もしくは，ガルバノスキャナ)である．ガルバノメータスキャナは可動コイルの軸にミラーを取りづけ，電気信号に応じて回転角を制御している．ポリゴンミラーと同様に機械的にミラーを動かすことで入射された光を偏向するが，電気信号による駆動制御が可能なのがポリゴンミラーとは違う．ガルバノメータスキャナの高速度化は，ガルバノメータの反復共振運動によって実現される．この共振型では， $\pm 12^\circ$  程度の偏向角が得られており，最大周波数は  $8\text{kHz}$  程度である．また，ガルバノメータスキャナでは，クローズドループ(closed loop)によるフィードバック(feedback)制御も行われている [9]．ポリゴンミラーとガルバノメータスキャナは反射ミラーで光を偏向するため，光の偏向効率がよく，スキャンできる角度が大きいというメリットを持つ．しかし，高精度の制御を実現するためには，高精度の回転システムが必要になり，系全体が複雑，高価になる．また，機械的に駆動させるため，高速スキャンや，小型化が不可能で，振動に弱く，機械的な動作による加速度に制限があるなど様々な弱点も存在する [10]．

さらなる光偏向素子の高性能化のため，様々な光偏向素子の研究が行われおり，ここで，一部の先行研究を紹介する．



(a) Polygon mirror

(b) Galvanometer scanner

Fig. 1.3 : Polygon mirror and galvanometer scanner.

### 1.2.1 MEMS 光偏向素子

MEMS (Micro Electro Mechanical System) 光偏向素子では, 多数のマイクロミラーをアレイ化した DMD (Digital Micromirror Device) で偏向を行う. この方式では, 二つの作用で光を偏向する. その一つが個々のミラーを傾けるチルト作動であり, もう一つがマイクロミラーを上下に動かして隣接するマイクロミラー間の位相制御をするピストン運動である. このような二つの作動をするマイクロミラーを TTP (Tip Tilt Piston) マイクロミラーと呼ぶ.

TTP マイクロミラーアレイはアクチュエータを動かす方式によって, 静電作動型と電熱作動型に分けられる. 静電作動型の場合は, 電熱作動型に比べ, 動作速度が速く, 消費電力が少ないというメリットを持つが, 作動角度が小さく, 作動電圧が高いというデメリットがある. MEMS 光偏向素子は, 入射された光を反射させることにより光偏向が可能となり, TTP マイクロミラーアレイの場合,  $\pm 10^\circ$  以上の大きな偏向角度が得られるため, 大きな偏向角度が必要なところに応用が可能である. その一方で, 機械的な動きに依存するため, 偏向速度は数百 kHz 程度である [11,12].

### 1.2.2 液晶フェーズドアレイ光偏向素子

ディスプレイに広く使用されている液晶 (LC : Liquid Crystal) は, 電圧を印加すると液晶内の分子が回転し, 液晶内で屈折率変化が起こる. その結果, 入射された光の位相変調が可能となる. 液晶フェーズドアレイ光偏向素子では, 電圧を印加する電極をアレイ化したフェーズドアレイ (Phased Array : PA) 方式を用いる. それぞれの電極において光の位相を変調することで, 光偏向が可能となる. Fig. 1.4(a) はネマティック液晶を用いた液晶フェーズドアレイ光偏向素子を模式的に示した図である. 液晶フェーズドアレイ光偏向素子での偏向速度を決める要因としては, 印加電圧オンの時, 分子が回転するまでの時間 (turn-on time) と印加電圧オフの時, 分子が元の状態に戻るまでの時間 (turn-off time) がある. この turn-off time と turn-on time は次式として表される.

Turn-off time :  $\tau_d$

$$\tau_d = \frac{t^2 \gamma}{k \pi^2} \quad \text{Eq. (1.1)}$$

( $t$ : 液晶の厚さ,  $\gamma$ : 粘度,  $k$ : 有効弾性係数)

Turn-on time :  $\tau_r$

$$\tau_r = \frac{\tau_d}{\left[\left(\frac{V}{V_t}\right)^2 - 1\right]} \quad \text{Eq. (1.2)}$$

( $V$ : 印加電圧,  $V_t$ : 閾電圧)

Eq. (1. 1), (1. 2)より偏向速度は $\tau_d$ に支配される. また, Eq. (1. 1)より $\tau_d$ は液晶の厚さ $t$ に二乗に比例し, 高速化のためには,  $t$ を小さくする必要がある[13]. しかし,  $t$ を小さくすると位相変調量が小さくなり, 十分な位相変調ができなくなる. そのため, 一般的にネマティック液晶を用いた偏向素子の切り替え速度は, ms オーダーとなる[14].

大きな位相変調量を保ちつつ $t$ を小さくする方法として, 液晶にポリマーを混ぜる方法が研究されている. 液晶にモノマーを混ぜ, UV 照射で液晶ポリマーの混合物を形成し, そこに力を加えることで, ストレスド液晶(Stressed Liquid Crystal : SLC)が形成される. (Fig. 1. 4(b)) このように形成された SLC はネマティック液晶に比べ, 有効屈折率変化が大きいいため, 厚さを薄くしても, 十分な位相変調が可能になる. SLC を用いることで, は $\tau_d$ はを 30  $\mu$ s まで高速化した成果が報告されている[15].

液晶フェーズドアレイ光偏向素子は低コストで作製ができるメリットを持つが, 偏向角度が大きくなると偏向効率が急激に低下するデメリットを持つ[13].

### 1.2.3 Si フェーズドアレイ光偏向素子

Si 上で作製される Si フェーズドアレイ光偏向素子では, スターカップラもしくは, MMI (Multi-Mode Interferometer)などを用いて入射された光を各導波路アレイに分岐し, 各導波路アレイでの光を変調することにより偏向を行う. この偏向素子の特徴としては, コンパクトなサイズと集積化可能ということである.

この光偏向素子では, 回折格子カップラ(grating coupler)を導入することで, 基板垂直方向への偏向が可能になり, 光の位相制御と併せて波長も制御することで 2 次元の偏向が可能になる.  $\theta$ 方向(導波路軸に平行)と $\psi$ 方向(導波路軸に垂直)偏向には, 次式が成り立つ.

$$\sin \theta = \frac{\Lambda n_{\text{eff}} - \lambda_0}{n_{\text{ct}} \Lambda} \tag{Eq. (1.5)}$$

( $\Lambda$  : 回折格子の周期,  $n_{\text{eff}}$  : 有効屈折率,  $n_{\text{ct}}$  : 空気の屈折率,  $\lambda_0 = 1550\text{nm}$ )

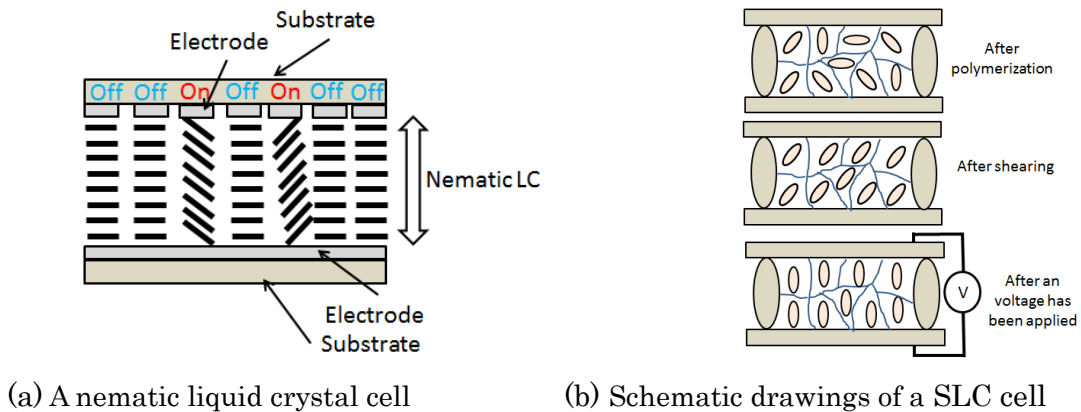


Fig. 1.4 : Nematic LC cell and SLC cell.

$$\sin \psi = \frac{\lambda_0 \phi}{2\pi d} \quad \text{Eq. (1.6)}$$

( $\phi$ : 各導波路アレイ光の位相差,  $d$ : 回折格子の間隔)

光の波長を変えると有効屈折率 $n_{\text{eff}}$ が変化し, Eq. (1.5)によって $\theta$ 方向偏向への偏向が可能になる. また, 回折格子カップラに入る光間の位相差を調整すると Eq. (1.6)により $\psi$ 方向偏向が可能になる [16].

Si フェーズドアレイ光偏向素子は各導波路アレイの上に屈折率変調のための電極を形成する. この電極に電流を流すと電極下に熱が発生し, 熱光学効果 (Thermo-optic effect) により電極下での導波路の有効屈折率が変化されることで屈折率変調が行われる. この関係を式に表したのが, 次式である [17].

$$\frac{\partial n}{\partial T} = 1.86 \times 10^{-4} \text{K}^{-1} \quad \text{Eq. (1.7)}$$

( $n$ : 電極化での導波路の有効屈折率,  $T$ : 絶対温度)

Si フェーズドアレイ光偏向素子は電極の形によって, 単電極タイプとマルチ電極タイプに分かれる.

#### ・単電極タイプ Si フェーズドアレイ光偏向素子

[16]の単電極タイプ Si フェーズドアレイ光偏向素子では, 入射された光を 15 個の MMI を用い, 16 個の導波路アレイへ分岐する. このように分岐された光は電極により形成された変調部を通過するようになる. ここで使用される電極はらせん電極から形成された三角形電極であり, 電流を流すと三角形の熱プロパイルにより各導波路アレイにリニアな位相差を与えることが可能となる. こちらのタイプは電極が一つしかないため, 電流制御が用意にできるメリットがある一方で, 同時に流せるパワーに制限があることやそれぞれの導波路アレイの独立制御が出来ないというデメリットが存在する. また, この光偏向素子では, 3.95mA の電流を流して 2.3°の偏向角が得られ, 入射する光の波長を 1500nm から 1600nm まで変化させ, 14.1°の偏向角が得られる.

#### ・マルチ電極タイプ Si フェーズドアレイ光偏向素子

[18]のマルチ電極タイプ Si フェーズドアレイ光偏向素子では, 角導波路アレイへの独立位相制御をするために独立した電極を並列に配列する. 入射された光は, スターカップラによって 16 個の導波路アレイに分岐される. ここで, サイドローブの抑制のためにスターカップラが使用されている. 位相変調部では, 各導波路アレイ上には独立制御が



できる電極が形成されており、それぞれ位相変調された光により、 $\psi$ 方向の偏向を行い、Fig. 1.8 (a)と同様に波長を制御することで、 $\theta$ 方向の偏向を行っている。この光偏向素子では、位相制御により、最大  $18^\circ$ の偏向角が得られ、 $1520\text{ nm}$  から  $1580\text{ nm}$  まで波長を変化させることによって、 $6.7^\circ$ の偏向角が得られる。

Si フェーズドアレイ光偏向素子は、高屈折率差導波路を利用するため、コンパクトな素子製作が可能であり、回折格子の形成が容易である。一方、Si は間接遷移型半導体であるため、光源との集積が困難である。また、数百 MHz 以上の高速偏向を行うには、キャリア注入効果を用いる必要があるが、一般的に、シリコンなどの間接遷移型半導体のキャリア変調効果は、直接遷移型半導体に比べて小さいため、駆動電力が大きくなってしまうという欠点がある。

### 1.2.4 その他の 光偏向素子

上記に紹介した光偏向素子以外にもいくつかの光偏向素子が存在する。ここで、いくつかの研究例を紹介する。

#### ・ KTN 結晶光偏向素子

KTN 結晶はカリウム(K), タンタル(Ta), ニオブ(Nb)から構成された酸化物で、化学式では、 $\text{KTa}_{1-x}\text{Nb}_x\text{O}_3$ で表される。この KTN 結晶は電圧をかけると屈折率が変化する電気光学効果が大きな材料である。この結晶に電極を形成し、適切な電圧をかけることで結晶内を通る光にリニアな位相遅れが与られ、その結果として光偏向が可能となる。

KTN 結晶光偏向素子はコンパクトでシンプルな構造になっているが、偏向時に必要となるバイアス電圧が高く、 $\pm 7.16^\circ$ の偏向角を得るためには、 $\pm 250\text{ V}$ のバイアス電圧が必要となる [19]。

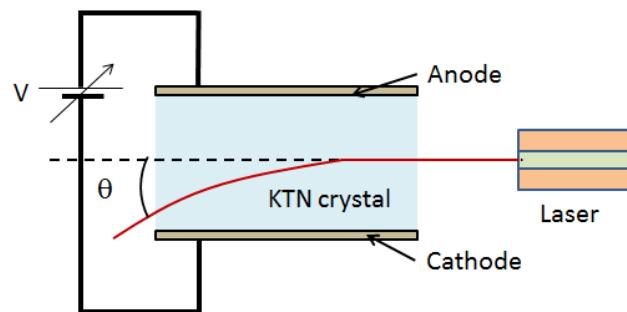


Fig. 1.5 : KTN crystal type optical beam steering device.

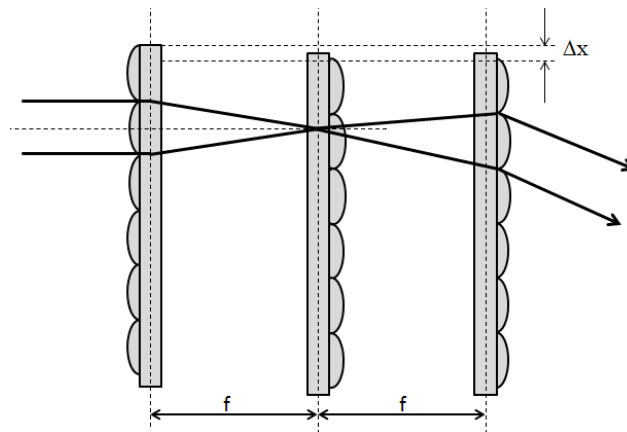


Fig. 1.6 : Schematic of the MLA type optical beam steering device.

・マイクロレンズアレイ光偏向素子

マイクロレンズアレイ (MLA : Micro Lens Array) 光偏向素子は、3 段組みの MLA から構成される。Fig. 1.7 のように最初の MLA を通過した光は焦点距離  $f$  のところでフォーカスされ、フォーカスされたところから焦点距離  $f$  だけ離れてあるところに MLA を 1 段目のレンズ中心から  $\Delta x$  だけ移動させることにより、最後の MLA の通過光は偏向されるようになる。ここで 2 番目の MLA は最初 MLA を通過した光が効果的に最後の MLA に入るように調整する役割をする[20]。

MLA 光偏向素子では、焦点距離  $f$  を調整することで広角な偏向も可能となる。しかし、可動部があるため偏向速度が制限される上に、多段の MLA を使用するため、MLA による光の散乱、反射、吸収が大きくなり、偏向を効率が下がるなどのデメリットがある[13]。

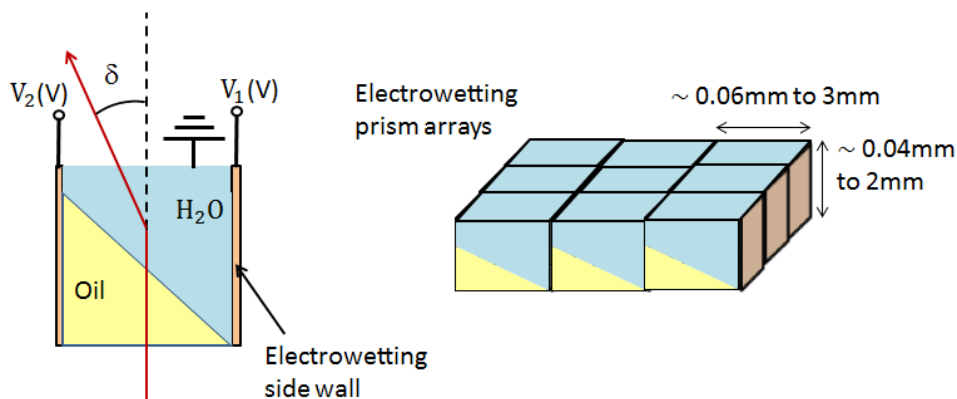


Fig. 1.7 : Diagrams of basic operation of an electrowetting prism.

Table. 1.2 : The characteristics of each optical beam steering device.

	Static TTP MEMS	SLC PA	Si-PA (one electrode)	KTN	MLA	Electrowetting
Size	mm order	cm order	mm order	mm order	mm order	mm order
Voltage Or Current	<200 V	<200 V	<4mA (<30V)	≤250 V	-	<100 V
Speed	μs order	μs order	μs order	ns order	-	ms order
Angle	±10°	< 1°	≤2.3 ° (phase tuning)	±7.16°	±17°	±45°

### ・エレクトロウェットティング(Electrowetting) 光偏向素子

この光偏向素子では、ボックス中に屈折率が小さい水と屈折率が高いオイルを入れてプリズムとして使用する。ボックスの両側に電圧をかけると Fig. 1.12 のように水とオイルの境界面が傾くようになり、このボックスに入射された光も偏向されるようになる。最大偏向角度は±45°であり、偏向速度は ms オーダーである [21,22].

ここで紹介された様々な光偏向素子の特性のまとめを Table. 1.2 に示す。

### 1.3 InP フェーズドアレイ光偏向素子

様々な研究例の中、Si-フェーズドアレイ 光偏向素子は、コンパクトなサイズで集積化可能等の様々なメリットを持つ。しかし、上記で説明した通り、Si は間接遷移型半導体であるため、光源との集積が困難であり、キャリア注入効果を用いる場合、一般的に、シリコンが間接遷移型半導体ため、駆動電力が大きくなってしまうという欠点がある。

一方、InP は直接遷移型半導体であるため、光源との集積が容易となり、低駆動電力でキャリア注入効果が得られる。そこで、InP は高性能通信用半導体光デバイスの材料として良く用いられる。特に、InP 上でフェーズドアレイを用いた光スイッチの研究が行われており [23]、この光スイッチは低波長依存性、高速動作速度、低消費電力などの様々なメリットを持っている。

近年、InP 上でのフェーズドアレイ光偏向素子を作製する研究も行われているが [24]、InP-フェーズドアレイ光偏向素子の研究が初期段階であるため、素子構造の改善などにより、更なる高性能 InP-フェーズドアレイ光偏向素子の作製が可能となると考えられる。

## 1.4 InP 上の垂直出射光カプラ

InP フェーズドアレイ光偏向素子は上記のようにコンパクトなサイズで高速偏向，光源との集積可能などの様々なメリットを持つ。また，光無線通信や光インターコネクトなどへの応用を考えると偏向された光を基板垂直方向へ取り出す光カプラが必要となる。Si フェーズドアレイ光偏向素子の場合，グレーティングカプラにより垂直方向へ光の出射が行われているが，InP フェーズドアレイ光偏向素子では，InP/InGaAsP の低屈折率差導波路を用いるため，長いグレーティングカプラを設けないと効果的に光を取り出せない。このような問題を解決する方法としてコア上下のクラッドを除去した薄膜型グレーティングカプラと斜めエッチングより形成された反射ミラーを用いた斜めグレーティングカプラが考えられる[25,26]。

薄膜型グレーティングカプラは，グレーティング部分の上下クラッドの InP を除去したものである。これにより，グレーティング部分は空気クラッドになるため，高屈折率差が得られ，グレーティングの長さを短くしても (12 $\mu\text{m}$ )，40%の光が取り出せる。しかし，プロセスが複雑であり，機械的な特性が良くない[25]。

斜めグレーティングカプラは，斜めにエッチングされた部分が反射ミラーの役割を果たすため，より効率的に垂直方向へ光を取り出すことが可能となる。このグレーティングカプラは一回の InP エッチングプロセスで製作可能で，コンパクトなサイズ (10  $\mu\text{m}$ ) を持つが，カップリング効率が最大で 18%であるため，構造の最適化が必要となる [26]。

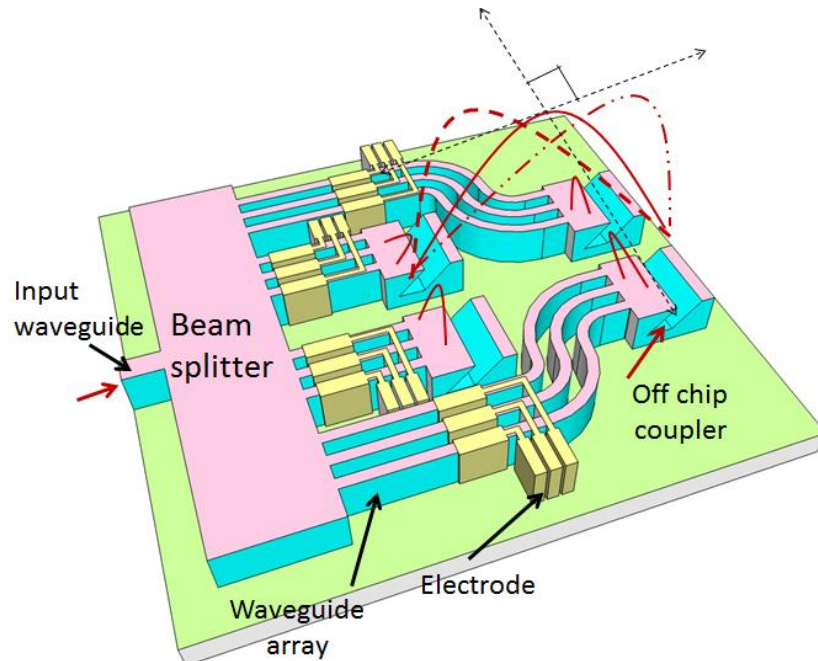
## 1.5 研究の目的及び論文の概要

本研究では，次世代の高速光センシングや光無線通信の応用にむけた光偏向素子の実現を目的とし，これまでに開発が進められてきた InP フェーズドアレイ光スイッチ[23]を応用した高速でコンパクトな InP フェーズドアレイ光偏向素子を提案・実証する。さらに，偏向させた光をオフチップ方向に出射させるための構造として斜め反射ミラーを用いた垂直出射光カプラを提案する。そして，斜めミラー構造を上記 InP フェーズドアレイ光偏向素子と容易に集積できる作製法について検討し，垂直カプラの試作・評価を行う。

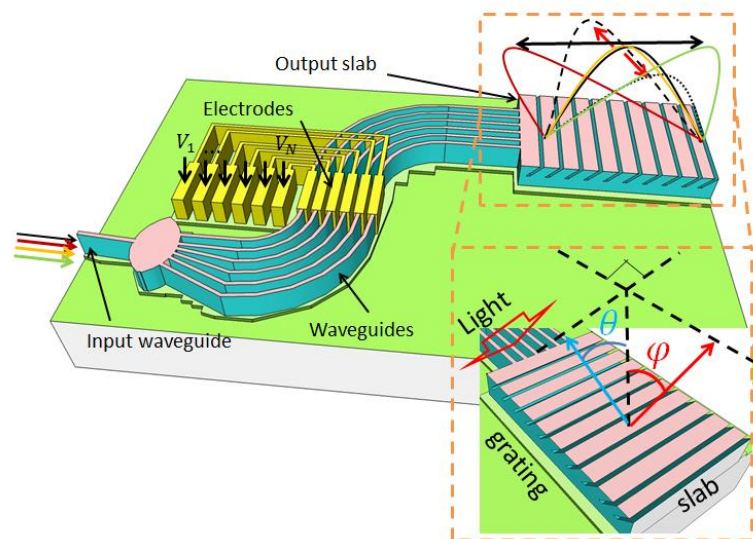
面内 1 次元光偏向素子と斜め反射ミラーを用いた垂直方向出射光カプラを集積することで，高効率のオフチップ 1 次元光偏向素子の実現できると期待される。また，将来的な目標として，この光偏向素子をアレイ化するか，もしくは，斜めミラーを用いたグレーティングカプラを形成することでオフチップ 2 次元偏向が可能となる高性能素子の実現を目指す。(Fig. 1.8)

本章では，序論として，研究の背景と研究例，そして研究目的を述べた。第 2 章から第 4 章までは面内 1 次元光偏向素子について述べる。第 2 章では，面内 1 次元光偏向

素子の動作原理および設計論を，第 3 章では，面内 1 次元光偏向素子の作製プロセスを説明し，第 4 章では，作製された光偏向素子の特性評価を行う．第 5 章では，斜め反射ミラーを用いた垂直出射光カプラについて述べる．第 6 章では，本研究を結論を述べる．



(a) 2 dimensional off chip PA optical beam steering device arrays



(b) off chip PA optical beam steering device having slanted grating couplers

Fig. 1.7 : Schematic of the proposed devices using PA optical beam steering device.



## 第 2 章 面内 1 次元光偏向素子の動作原理及び設計論

この章では、素子設計に必要な理論について述べる。

まず、フェーズドアレイ光偏向素子の動作原理について説明し、光導波路上でのモードの伝搬について述べる。そして、デバイスの各成分の設計方向について述べた後、2次元のビーム伝搬法を説明し、それを用いてデバイスの出射端での特性を確認する。

次に、設計されたフェーズドアレイ光偏向素子の形を紹介し、まとめを簡単に述べる。

### 2.1 フェーズドアレイ光偏向素子の動作原理

Karl Ferdinand Braun によって考案されたフェーズドアレイ [27] は Fig. 2.1(a) に示したようにそれぞれの強度と位相情報を持った各アレイでの成分を合わせて、電磁波の空間の分布を制御するシステム、もしくはその要素であり、フェーズドアレイアンテナアレイ、光スイッチ、光偏向素子などに使用されている。アンテナアレイで使用されたフェーズドアレイは、その後、光導波路を用いたデバイスへも使用されるようになり、AWG (Array Waveguide Grating) のように波長選択によってポート選択ができる光スイッチ [28] やフェーズドアレイ光スイッチ [23] のように屈折率変調によるダイナミックなポート選択が可能なスイッチなどに広く用いられている。

フェーズドアレイを用いた光偏向素子は Fig. 2.1(b) に示したように、元の回路から入ってきた信号はそれぞれのアレイで位相変調される。この際、各アレイでの位相間には  $\Delta\phi$  の位相差を持ち、このようになりニアな位相が与えられたアレイでの信号が出射端で合波されると各アレイ信号の干渉現象により、 $\theta$  方向へ偏向されるようになる。

本研究対象のフェーズドアレイ光偏向素子も同様な原理で動作する。入射された光を InP クラッド、InGaAsP コアから構成される導波路に閉じ込め、この導波路での光は、スターカプラにより各導波路アレイへ分岐され、この分岐された光は、屈折率変調

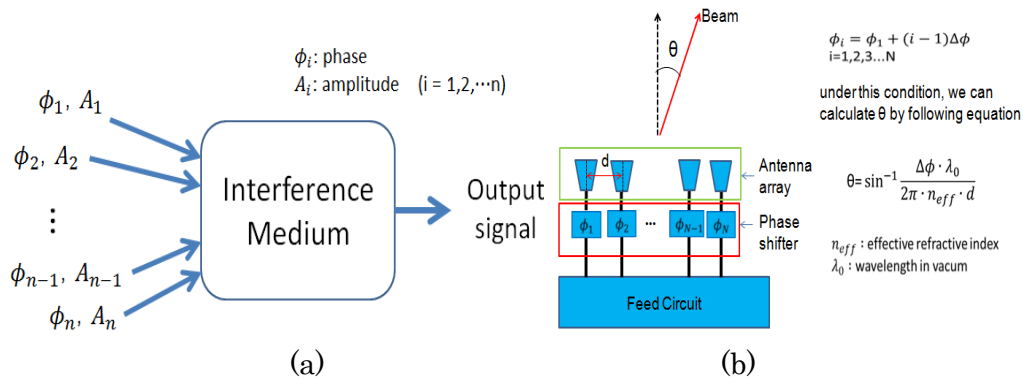


Fig. 2.1 : Explanation of a PA device. (a) General principle of operation of a PA device, (b) Beam steering at PA antenna.

することで位相変調される。また、屈折率変調は、電流注入により行われており、電流注入を行うために、p-i-n ダイオード構造が設けられている。この p-i-n ダイオード構造に電流を注入するとキャリアプラズマ効果、バンドフィリング効果等が働き [29]、これらの効果により屈折率が変化する。電流注入による位相変調速度は ns オーダーで [23]、高速な光偏向を可能とする。このように位相変調された光は、出射端のスラブで合波され、合波された光は、空中伝搬するようになり、その結果、空中での光偏向が可能となる。

## 2.2 光導波路上でのモード伝搬

光は、Snell の法則により屈折率が異なる物質に入射されると屈折・反射が生じる。特に、屈折率が高い物質から低い物質へ入射するとき、入射角がある一定以上になると入射された光が全て反射する全反射現象が生じる。光導波路では、屈折率の高いコアの周囲に屈折率の低いクラッドを設け、全反射現象により光を閉じ込め、コアに沿って、光を伝搬させる。このような導波路はスラブ導波路と呼ばれる。更に導波路として使用する部分以外のクラッドやコアを除去するとクラッドが除去されていない中心の部分の等価屈折率が周辺より高くなり、基板に対し横方向への光閉じ込めが可能となる。

本研究の対象である InP 系導波路では、クラッドとして屈折率が 3.169 の InP を使用し、コアとしては屈折率 3.4 でバンド端の発振波長が  $1.37 \mu\text{m}$  の Q1.37 (Quaternary 1.37) InGaAsP を使用した。ここでは、スラブ導波路での光の伝搬をマクスウェルの方程式より解析する [30]。

光を含めた電磁波は以下のマクスウェルの方程式を従う。

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \quad \text{Eq. (2.1)}$$

$$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} \quad \text{Eq. (2.2)}$$

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0 \quad \text{Eq. (2.3)}$$

$$\nabla \cdot \mathbf{D} = \rho \quad \text{Eq. (2.4)}$$

ここで、 $\mathbf{E}$ : 電場 (V/m),  $\mathbf{H}$ : 磁場 (A/m),  $\mathbf{D}$ : 電束密度 (C/m<sup>2</sup>),  $\mathbf{B}$ : 磁束密度 (T),  $\mathbf{J}$ : 電流密度 (A/m<sup>2</sup>),  $\rho$ : 電荷密度 (C/m<sup>3</sup>)である。また、光導波路では、電荷が存在しないので、 $\rho=0$ ,  $\mathbf{J}=\mathbf{0}$  となり、Eq. (2.1)と Eq. (2.2)が光導波路解析に必要となる。

光導波路のようにコア(屈折率:  $n_1$ ), クラッド(屈折率:  $n_2$ ) が伝搬方向 (z 軸) に対して一様な方形光導波路での電場  $\mathbf{e}$  と磁場  $\mathbf{h}$  は次式で表される。



$$\mathbf{e}(\mathbf{r}, t) = \mathbf{E}(x, y) \exp[j(\omega t - \beta z)] \quad \text{Eq. (2.5)}$$

$$\mathbf{h}(\mathbf{r}, t) = \mathbf{H}(x, y) \exp[j(\omega t - \beta z)] \quad \text{Eq. (2.6)}$$

ただし,  $\omega$ : 角周波数,  $\beta$ : 伝搬定数

Eq. (2.5) と Eq. (2.6) をそれぞれ Eq. (2.1) と Eq. (2.2) に代入すると次式のようになる.

$$\frac{\partial E_z}{\partial y} + j\beta E_y = -j\omega\mu_0 H_x \quad \text{Eq. (2.7)}$$

$$-j\beta E_x - \frac{\partial E_z}{\partial x} = -j\omega\mu_0 H_y \quad \text{Eq. (2.8)}$$

$$\frac{\partial E_y}{\partial x} - \frac{\partial E_x}{\partial y} = -j\omega\mu_0 H_z \quad \text{Eq. (2.9)}$$

$$\frac{\partial H_z}{\partial y} + j\beta H_y = j\omega\epsilon_0 n^2 E_x \quad \text{Eq. (2.10)}$$

$$-j\beta H_x - \frac{\partial H_z}{\partial x} = j\omega\epsilon_0 n^2 E_y \quad \text{Eq. (2.11)}$$

$$\frac{\partial H_y}{\partial x} - \frac{\partial H_x}{\partial y} = j\omega\epsilon_0 n^2 E_z \quad \text{Eq. (2.12)}$$

ただし,  $\mu_0$ : 真空での透磁率,  $\epsilon_0$ : 真空での誘電率,  $n$ : 屈折率

Fig. 2.2 に示したような  $z$  方向へ光が伝搬する多層スラブ構造を仮定し, 媒質は  $x$  方向に対して一様とすると, Eq. (2.7)~ Eq. (2.12) で  $\partial/\partial x=0$  とおける. 従って,

$$\frac{\partial E_z}{\partial y} + j\beta E_y = -j\omega\mu_0 H_x \quad \text{Eq. (2.13)}$$

$$-j\beta E_x = -j\omega\mu_0 H_y \quad \text{Eq. (2.14)}$$

$$-\frac{\partial E_x}{\partial y} = -j\omega\mu_0 H_z \quad \text{Eq. (2.15)}$$

$$\frac{\partial H_z}{\partial y} + j\beta H_y = j\omega\epsilon_0 n^2 E_x \quad \text{Eq. (2.16)}$$

$$-j\beta H_x = j\omega\epsilon_0 n^2 E_y \quad \text{Eq. (2.17)}$$

$$-\frac{\partial H_x}{\partial y} = j\omega\epsilon_0 n^2 E_z \quad \text{Eq. (2.18)}$$

が得られる.

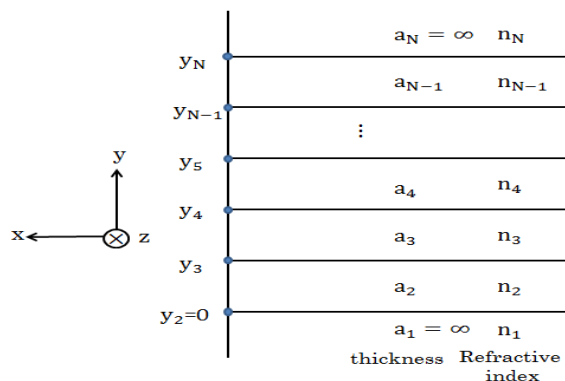


Fig. 2.2 : Multilayer slab optical waveguide.

上の関係式は、Eq. (2.14), (2.15), (2.16)から成り立つ $[E_x, H_y, H_z]$ と、Eq. (2.13), (2.17), (2.18)から成り立つ $[H_x, E_y, E_z]$ の独立な波動を表している。また、前者はTE (Transverse Electric) モードと呼ばれ、後者はTM (Transverse Magnetic) モードと呼ばれる。また、Eq. (2.15)の両辺に $\partial/\partial y$ をかけ、他のTEモードに関する関係式を用いると、次のような波動方程式が得られる。

$$\frac{\partial^2 E_x}{\partial y^2} + (k^2 - \beta^2)E_x = 0 \quad \text{Eq. (2.19)}$$

ただし、 $k=k_0n$  (波数),  $k_0 = \omega\sqrt{\epsilon_0\mu_0}$  (真空での波数)

同様に、TMモードに関しても波動方程式が得られる。

$$\frac{\partial^2 H_x}{\partial y^2} + (k^2 - \beta^2)H_x = 0 \quad \text{Eq. (2.20)}$$

一方、Fig. 2.2のようなスラブ導波路で、 $i$ 層目でのTEモードの $E_x$ 、TMモードの $H_x$ はEq. (2.19), (2.20)の一般解として次のように表される。

$$\begin{cases} E_{xi} \\ H_{xi} \end{cases} = A_i \exp[-jk_{yi}(y - y_i)] + B_i \exp[jk_{yi}(y - y_i)] \quad (i=1,2,3,\dots,N)$$

$$k_{yi} = \begin{cases} \sqrt{k_i^2 - \beta^2} & (k_i > \beta \text{ の時}) \\ j\sqrt{\beta^2 - k_i^2} & (k_i < \beta \text{ の時}) \end{cases} \quad (k_i = k_0n_i) \quad \text{Eq. (2.21)}$$

また、1層とN層で電磁界が吸束する条件と、各層間で電磁界が連続する条件はそれぞれ

れ次式のようになり、これらを用いると Eq. (2.21)での  $A_i$ ,  $B_i$  が Eq. (2.24)のように計算できる.

$$B_1=A_N=0 \quad \text{Eq. (2.22)}$$

$$E_{xi}=E_{xi-1} \text{ (TE mode)}, \quad H_{xi}=H_{xi-1} \text{ (TM mode)} \quad \text{Eq. (2.23)}$$

$$\begin{pmatrix} A_i \\ B_i \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} C_{i1} & C_{i2} \\ C_{i3} & C_{i4} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} A_{i-1} \\ B_{i-1} \end{pmatrix} \quad (i=1,2,3, \dots, N-1)$$

$$C_{i1} = \frac{k_{yi} + k_{yi-1}m_i^2}{2k_{yi}} \exp[-jk_{yi-1}a_{i-1}]$$

$$C_{i2} = \frac{k_{yi} - k_{yi-1}m_i^2}{2k_{yi}} \exp [jk_{yi-1}a_{i-1}]$$

$$C_{i3} = \frac{k_{yi} - k_{yi-1}m_i^2}{2k_{yi}} \exp [-jk_{yi-1}a_{i-1}]$$

$$C_{i4} = \frac{k_{yi} + k_{yi-1}m_i^2}{2k_{yi}} \exp[jk_{yi-1}a_{i-1}]$$

$$m_i = \begin{cases} 1 & \text{(TE モード)} \\ n_i/n_{i-1} & \text{(TM モード)} \end{cases} \quad \text{Eq. (2.24)}$$

また、 $N$  層での  $y$  の連続条件により、次のようになる.

$$\begin{pmatrix} B_N \\ B_N \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} C_{N1} & C_{N2} \\ C_{N3} & C_{N4} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} A_{N-1} \\ B_{N-1} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} C_1(\beta) \\ C_2(\beta) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} A_1 \\ A_1 \end{pmatrix}$$

$$C_{N1} = \exp[-jk_{yN-1}a_{N-1}]$$

$$C_{N2} = \exp [jk_{yN-1}a_{N-1}]$$

$$C_{N3} = -\frac{k_{yN-1}m_N^2}{k_{yN}} \exp [-jk_{yN-1}a_{N-1}]$$

$$C_{N4} = \frac{k_{yN-1}m_N^2}{k_{yN}} \exp[jk_{yN-1}a_{N-1}]$$

$$m_N = \begin{cases} 1 & \text{(TE モード)} \\ n_N/n_{N-1} & \text{(TM モード)} \end{cases} \quad \text{Eq. (2.25)}$$

Eq. (2.25)により、Eq. (2.26)を満たす $\beta$ を求めると各層での電磁界分布が求められる.

$$C_1(\beta) - C_2(\beta) = 0 \quad \text{Eq. (2.26)}$$

$k_{yi}$ が実数となるところがコアとなり、Eq. (2.26)の解はコアとクラッド間の屈折率差、コアの厚みにより、複数存在する場合がある. Eq. (2.26)の解が一つのみ(基本モード)存在するためには、適切な層構造が必要になる. そこで、本研究では、Table. 2.1 のように InP クラッドの間に、厚み 500 nm の InGaAsP コアを挿入した構造を使用した. このときの基本モードの分布を Fig. 2.3 に示す.

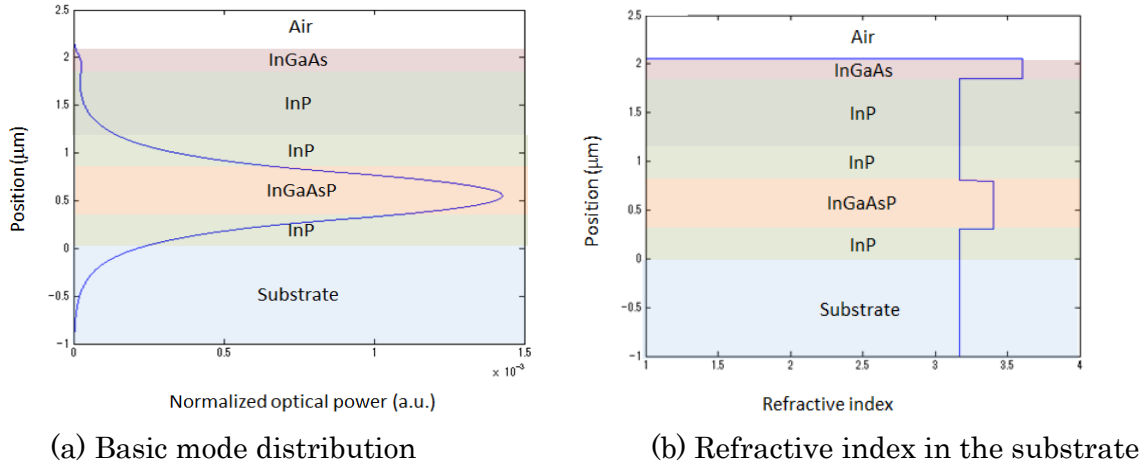


Fig. 2.3 : Basic mode distribution and refractive index in the used substrate.

## 2.3 デバイスの設計

### 2.3.1 リッジ導波路の設計

Fig. 2.3 のようなスラブ導波路を利用すると層構造方向に対しての光の閉じ込めが可能となる。また、一定幅を持ったスラブ導波路の両側クラッドを除去すると基板に平行な方向への光閉じ込めが可能となり、本研究では、このような 2 次元閉じ込めが可能な導波路を用いている。ここでは、導波路の設計方法について説明する。

Fig. 2.4 のようにリッジ(Ridge)型導波路を領域 I, II に分けて等価屈折率法を用いて導波路設計を行う。Eq. 2.26 で  $\beta$  を求めると、Eq. 2.27 によって等価屈折率を求めることが可能である。等価屈折率法では、等価屈折率 ( $n_{\text{eff}}$ ) を用いて波動方程式を解くことによって導波路での電界を解析する [30]。

$$n_{\text{eff}} = \frac{\beta}{k_0} \quad \text{Eq. (2.27)}$$

Table. 2.1 : Epitaxial design of the phased array beam steering device

Definition	Thickness (nm)	Doping ( $\text{cm}^{-3}$ )
P-InGaAs	200	$1 \times 10^{19}$
P-InP	750	$5 \times 10^{17}$
U-InP	250	N/A
U-Q1.37 InGaAsP	500	N/A
U-InP	50	N/A
N-InP	250	$5 \times 10^{17}$
N-InP	Substrate	$2 \times 10^{18}$

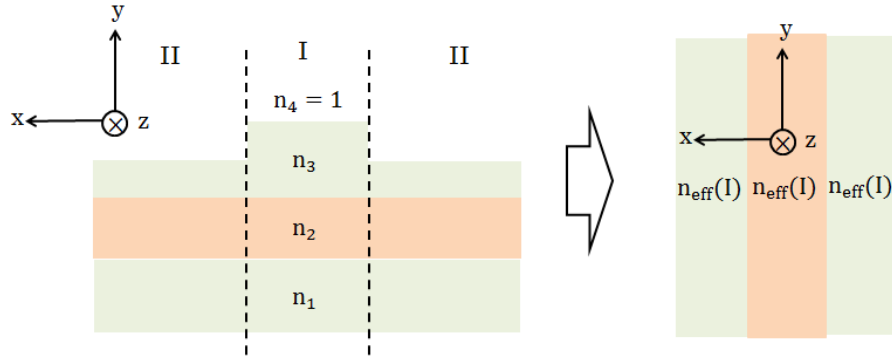


Fig. 2.4 : Ridge type waveguide for the effective refractive index method.

Fig. 2.4 の構造での電界  $E_x$  の波動方程式は次式のように表される.

$$\frac{\partial^2 E_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 E_x}{\partial y^2} + (k_0^2 n(x, y)^2 - \beta^2) E_x = 0 \quad \text{Eq. (2.28)}$$

ここで,  $E_x$  が  $x, y$  に対して変数分離できると仮定する.

$$E_x = \Psi_x(x) \Psi_y(y) \quad \text{Eq. (2.29)}$$

Eq. (2.29) を Eq. (2.28) に代入し,  $y$  に対する等価屈折率  $n_{\text{eff}}(x)$  を導入すると Eq. (2.30) が得られる.

$$\frac{1}{\Psi_x} \frac{\partial^2 \Psi_x}{\partial x^2} + \frac{1}{\Psi_y} \frac{\partial^2 \Psi_y}{\partial y^2} + (k_0^2 n(x, y)^2 - k_0^2 n_{\text{eff}}(x)^2 + k_0^2 n_{\text{eff}}(x)^2 - \beta^2) = 0 \quad \text{Eq. (2.30)}$$

Eq. (2.30) は  $\Psi_x$  に関する式と  $\Psi_y$  に関する式に分類でき,  $\Psi_x$  に関する式を表すと Eq. (2.31) となる.

$$+\frac{1}{\Psi_x} \frac{\partial^2 \Psi_x}{\partial x^2} + (k_0^2 n_{\text{eff}}(x)^2 - \beta^2) = 0 \quad \text{Eq. (2.31)}$$

領域 I, II での (TE モードの) 有効屈折率をそれぞれ  $n_{\text{eff}<I>}$ ,  $n_{\text{eff}<II>}$  とすると Eq. (2.31) は Fig. 2.4 の右側に示したような 2次元導波路の波動方程式と同じ形になる. 従ってスラブ導波路での伝搬を解析した方法と同様な方法で  $\beta$  が求められる. また, この

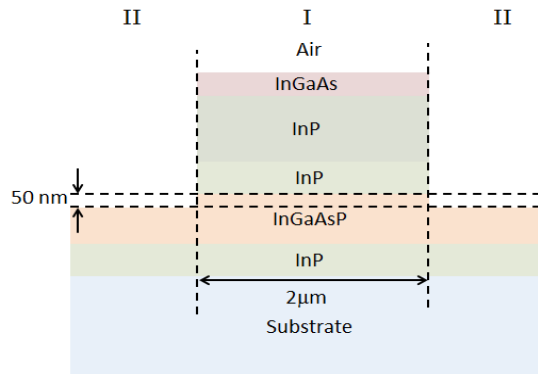


Fig. 2.5 : The waveguide used in the research.

場合でも、コアの幅によって複数の $\beta$ が存在できる。

本研究では、基本導波路として、Fig. 2.5 に示したようなクラッドと幅  $2\mu\text{m}$  のコアを持った導波路を使用する。このような導波路を用いると、 $n_{\text{eff} < \text{I} >} = 3.315$  で、 $n_{\text{eff} < \text{II} >} = 3.245$  となる。この場合、0 次と 1 次モード、二つのモードが存在するが、導波路作製時の作製誤差と導波路側面のダメージへの耐性を高めるため、基本モードのみ存在する幅より広く設計する。また、入力側では、ファイバから入射される光が導波路に結合されるが、この際、ファイバと導波路間のモード不整合による影響を低減させるため、入力側導波路の幅は  $5\mu\text{m}$  にした。

曲線導波路を通ったモードは Fig. 2.6(a) のようにその中心位置が外側へずれる。そのため、曲率半径が小さい曲線導波路の直後に直線導波路が置かれてある場合には、曲がりにより生じる放射損失と共に曲線導波路と直線導波路間のモード不整合による放射損失が問題となる。このような問題を克服する方法としては、Fig. 2.6(b) のようにモードフィールドパターンができるだけ一致するように直線導波路の中心軸を移動させる方法や曲線導波路の半径を十分大きくする方法がある [31]。本研究では、設計の簡単化のため、後者を用い、曲線導波路の最小曲率半径  $R_{\text{min}} = 500\mu\text{m}$  とした。

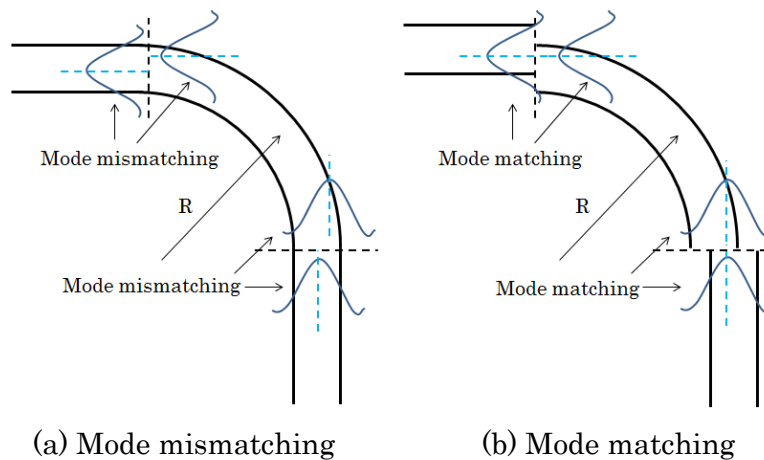


Fig. 2.6 : Mode matching between curved waveguides and straight waveguides.

各導波路アレイに位相変調を行うためには、電極を通じて導波路に電流を注入する必要がある。本研究では、位相変調するための直線導波路領域を設ける。この領域では、単位長さあたりの導波路の位相変調量を増やすために導波路幅を  $4\ \mu\text{m}$  に広げた。また、位相変調時に隣接する導波路から拡散された熱の影響を抑え、作製誤差などへも耐えられるように各導波路アレイの間隔は  $30\ \mu\text{m}$  とした。

導波路の幅を急に変更すると接続部での放射損失が大きくなり、このような影響を抑えるため、テーパ(taper)導波路を用いており、本研究では、その長さを  $100\ \mu\text{m}$  とした。

### 2.3.2 スターカップラの設計

一つの入力導波路から入って来た光を多数の導波路アレイへ分布させる方法として、スラブ導波路を用いて回折させる方法が主に用いられる。このようなスラブ導波路はその形によって、大きく MMI カプラとスターカプラ (star coupler) に分類される。Fig. 2.7(a)のような MMI カプラでは、入力導波路から入って来た光をスラブ導波路に回折させ、多数のモード間で起こる干渉現象を用いて光を分岐し、フェーズドアレイ光偏向素子では、主に二つの出力導波路に均等に光を分岐する 3 dB MMI カプラが使用され、この 3 dB MMI カプラを多段に使用することで、各導波路アレイへ均等に光を分けられる。Fig. 2.7(b)に示したスターカプラでは、入力導波路はローランド円上にあるスラブ導波路の入射端に繋がり、フラウンホーファー回折 (Fraunhofer diffraction) により回折された光は出力側の導波路に結合される。スターカプラで回折された光はガウシアンビーム形に近いので、分岐された光の強度は、中心部が高く、外側が低くなる。

フェーズドアレイ光偏向素子の出射された光のパターンは光の分岐方法に影響を受ける。同数の導波路アレイへ光を分岐する場合を想定すると、スターカプラを使用して光を分岐すると外側への光強度が低いため、多段の 3 dB MMI カプラによって光が均等に分岐される場合に比べて、実効的なアレイの数が少なくなる。フェーズドアレイ光偏向素子の出射端の光の半値幅 (FWHM: Full Width at Half Maximum) はアレイの数が多くなると小さくなり、スターカプラを使用すると 3 dB MMI カプラを使用するときより、半値幅が大きくなる [13]。しかし、スターカプラを使用すると 3 dB MMI カプラを使用したときより、サイドローブを 10 dB 以上低減させることが可能である [18]。本研究では、測定を妨げるサイドローブの低減を優先に考慮し、スターカプラを用いて設計を行った。

スターカプラを設計する際、必要になる主なパラメータとしては、スターカプラの半径 ( $R$ ) とカプラ出力側導波路間のピッチ ( $x$ ) である。まず、 $R$  はスターカプラの大きさを決めるパラメータである。 $R$  の値が大きいとカプラでの伝搬距離が長くなり、その結果広いビーム形が得られ、 $R$  の値が小さいときは、その広がりが小さくなる。 $x$  は、

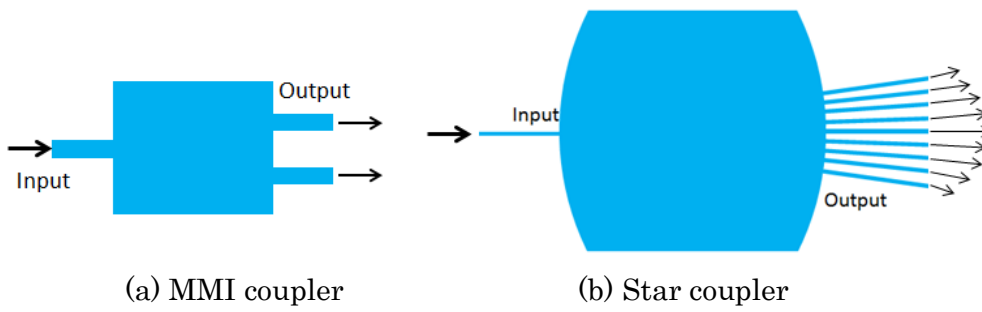


Fig. 2.7 : Beam splitter using slab waveguide.

隣接する導波路間の距離を表すパラメータであり、この値が大きすぎると導波路間で結合されずに損失になる光の成分が大きくなるため、ある程度小さくする必要があるが、プロセスの限界を考慮する必要がある。これらを考慮し、本研究では、 $x=3\ \mu\text{m}$  とし、その時の  $R$  は  $163\ \mu\text{m}$  (導波路アレイ数  $n=14$  の場合) とした。(Fig. 2.8)

### 2.3.3 フェーズドアレイ光偏向素子の全導波路設計.

フェーズドアレイ光偏向素子では、電流注入による屈折率変調を用いて位相差を与える。位相変調は電流注入する領域のみで行うため、その領域以外では、位相差を与えない設計が必要となる。その方法として、各アレイの全長を等しくする方法を使用する。ここでは、各アレイの全長が等しくなるフェーズドアレイ光偏向素子の全導波路の設計について説明する [32].

フェーズドアレイ光偏向素子の入力導波路は Fig. 2.9 に示したように、スターカプラにより多数の導波路アレイに分岐され、位相変調部を通過する。位相変調部後の各導波路アレイの光は、出射端のスラブでまた合流するようになる。ここで、各導波路アレイ全長を等しくするために、位相変調部前後に分けて導波路設計を行った。

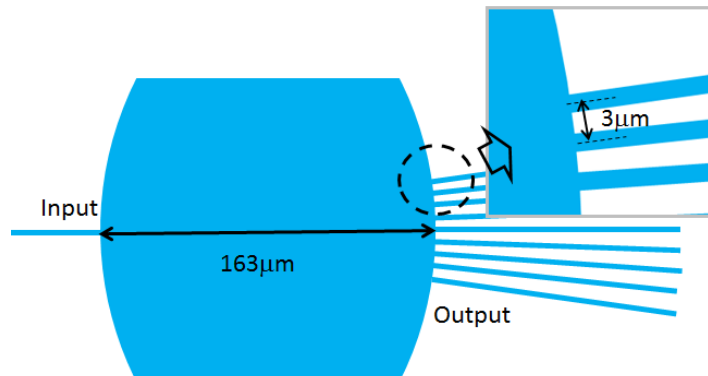


Fig. 2.8 : Designed star coupler.



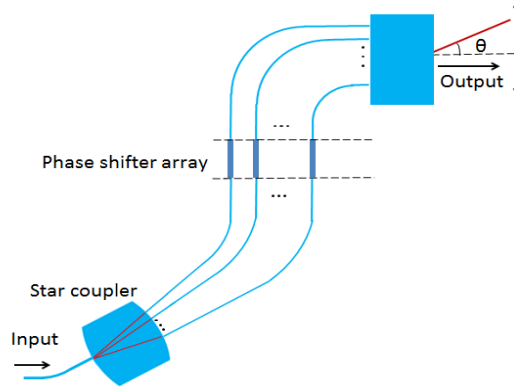


Fig. 2.9 : The waveguides design of PA optical beam steering device.

位相変調部前部では, Fig. 2.10 のような要素で構成される.  $R_0$  はスターカップラの長さ,  $A$  はスターカップラの  $z$  軸からの角度を表し,  $zAa_i (= \{2i - (n + 1)/2\} \cdot (x/R_0) + A$  (rad)) は  $i$  番目導波路アレイの角度および曲線導波路の曲げ角度である.  $L_{0t}$  はスターカップラ出力側の直線導波路アレイの長さ,  $L_0$  は  $2 \cdot L_{0t}$  となる. また,  $zL_i$  は  $i$  番目導波路アレイの延長直線導波路長さ,  $zR_i$  は  $i$  番目アレイの曲率半径を表す.  $\Delta D (= 30 \mu\text{m})$  は位相変調部の導波路ピッチ,  $S_i$  は位相変調部前の延長直線導波路であり,  $W$  はスターカップラの入力から  $n$  番目アレイまでの横幅,  $H_i$  はスターカップラ入力から  $S_i$  までの高さを表す. 各導波路アレイは, そのピッチが  $3 \text{ mm}$  から  $\Delta D$  まで広げられるため, 曲線導波路を使用した. この際, 曲線導波路を導入することにより, 位相変調部前部のアレイの全長  $L_{b_i}$  は高さ  $H_i$  を等しく維持する場合, 差が生じるようになる. この差  $\Delta L$  を  $\Delta L = L_{b_i} - L_{b_{i-1}}$  になるように設計し, 位相変調部後部で各アレイ全長間に,  $-\Delta L$  の差を与えることにより, 各導波路アレイの全長を等しくした.

以上のことを式で表すと次のようになる.

$$H_i = zR_i \cdot \sin(zAa_i) + (R_0 + L_0 + zL_i) \cdot \cos(zAa_i) + S_i \quad \text{Eq. (2.32)}$$

$$= zR_1 \cdot \sin(zAa_1) + (R_0 + L_0 + zL_1) \cdot \cos(zAa_1) + S_1 = H_1$$

$$zL_i + zAa_i \cdot zR_i + S_i - (zL_1 + zAa_1 \cdot zR_1 + S_1) = (i-1) \cdot \Delta L \quad \text{Eq. (2.33)}$$

$$\begin{aligned} & (R_0 + L_0 + zL_i) \cdot \sin(zAa_i) + zR_i \cdot \{1 - \cos(zAa_i)\} \\ & - [(R_0 + L_0 + zL_1) \cdot \sin(zAa_1) + zR_1 \cdot \{1 - \cos(zAa_1)\}] = (i-1) \cdot \Delta D \end{aligned} \quad \text{Eq. (2.34)}$$

Eq. (2.32), Eq. (2.33), Eq. (2.34)により  $zR_i$  と  $zL_i$ ,  $S_i$  が求められる. このように設計された位相変調部前部の後に長さ  $L$  の位相変調部を設けた. 位相変調部は長くなると屈折率変化が大きくなるが, 全導波路長が長くなるため損失が大きくなる. 今回の設計では,  $L = 800 \mu\text{m}$  とした.

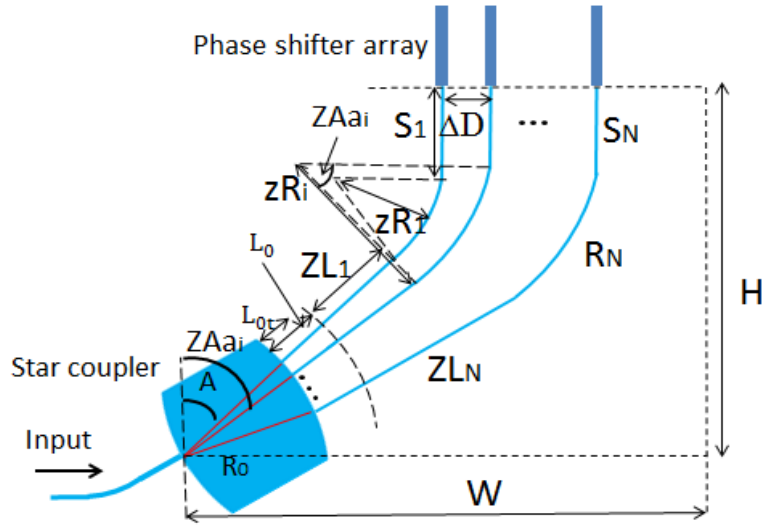


Fig. 2.10 : The waveguides before phase shifters.

位相変調部後部では, Fig. 2.11 に示したように  $X_i$ ,  $XY_i$ ,  $Y_i$  から構成される. 出射端導波路のピッチを  $dx$  にすると次式のような関係式が得られる.

$$X_i + \frac{\pi}{2} \cdot XY_i + Y_i - (X_1 + \frac{\pi}{2} \cdot XY_1 + Y_1) = (i-1) \cdot \Delta L \tag{Eq. (2.35)}$$

$$X_i + XY_i - (X_1 + XY_1) = (i-1) \cdot dx \tag{Eq. (2.36)}$$

$$XY_i + Y_i - (XY_1 + Y_1) = (i-1) \cdot \Delta D \tag{Eq. (2.37)}$$

Eq. (2.35), Eq. (2.36), Eq. (2.37)により,  $X_i$ ,  $XY_i$ ,  $Y_i$ が求められる. また, 広角の偏向角を得るため, 通常  $dx$  は数  $\mu\text{m}$  の小さな値を必要があり, 今回の設計では, 作製限界を考慮し,  $3 \mu\text{m}$  とした. しかし, このような小さなピッチの場合,  $Y_i$ が長くなると直線導波路間でモード結合が起こる. それを防ぐために, 本設計では,  $Y_1$ から  $Y_n$ までの長さの変化が小さくなるような $\Delta L$ を選択した. Eq. (2.35)からそのような $\Delta L$ が計算可能となり, 本設計では,  $20.2 \mu\text{m}$  とした.

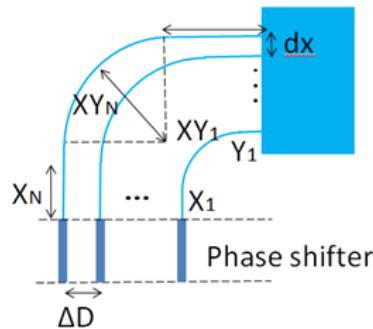


Fig. 2.11 : The waveguides after phase shifters

その他, 角度  $A$  はデバイスの大きさが小さくなるような値を選び, 本研究では,  $30^\circ$  とした. また,  $S_i$  と  $X_i$  の導波路幅が  $2\ \mu\text{m}$  に対し, 位相変調部での導波路の幅が  $4\ \mu\text{m}$  となるため,  $S_i$ ,  $X_i$  それぞれにテーパ構造が必要となる. 本研究では, テーパー導波路の長さを  $100\ \mu\text{m}$  とした. しかし, テーパー構造を導入することにより, 導波路全長が長くなってしまふ. そこで, テーパー構造による長さ増加分を減少させるため, 実際のデバイスでは,  $S_i$ ,  $X_i$  の代わりに, Eq. (2.38) の  $bp_i$  を使用した.

$$bp_i = (X_i + S_i) / 2 - \text{taper} \quad (\text{taper} = 100\ \mu\text{m}) \quad \text{Eq. (2.38)}$$

## 2.4 シミュレーションによるデバイスの特性確認

2.3 節で設計されたデバイスの特性をビーム伝搬法 (BPM : Beam Propagation Method) を用いて確認する [33]. まずは, FD-BPM の原理について説明し, その後, デバイスの出射端での偏向特性を確認する.

### 2.4.1 BPM の原理

近似化された波動方程式を用いる BPM は PIC (Photonic Integrated Circuit) やファイバフォトニックデバイスの設計時に, 最も広く使用されている伝搬法である. BPM はシンプルな概念, 複雑な構造物にもすぐ適用可能, 拡張性が高いなどのメリットを持ち [34], BPM の数値解析は様々な光デバイスの設計で使用されている [35, 36]. しかし, 近似化された式を使用するため, 屈折率差 ( $\Delta n$ ) が大きい構造体や曲げ角度が大きい場合, 逆方向への伝搬を考慮する必要がある場合への使用は困難になっている. ここでは, 2次元の BPM について説明する [31].

$y$  方向に一樣な構造を持つスラブ導波路を伝搬する TE モードは以下に表す波動方程式を満たす.

$$\frac{\partial^2 E_y}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 E_y}{\partial z^2} + k_0^2 n^2 E_y = 0 \quad \text{Eq. (2.39)}$$

ここで, (1)~(3)を仮定し,  $E_y$  を Eq. (2.40)として表すと, Eq. (2.39)の近軸式 (paraxial equation) の Eq. (2.41)が得られる. BPM では, この式を解き,  $F(x,z)$ を求めることより, ビームの伝搬を解析する.

- (1)  $z$  (ビームの伝搬方向) の逆方向に伝搬する波 (反射波) が存在しない.
- (2) 比屈折率差 ( $\Delta$ ) が 1%以下, 大きくても数%以下である.
- (3) 光の進行方向と  $z$  軸との角度が小さい.  $5^\circ$ 以下, 大きくても  $10^\circ$ 以下である.

$$E_y(x, z) = F(x, z)e^{-jk_0 n_r z} \quad \text{Eq. (2.40)}$$

ただし,  $n_r$  : 参照屈折率 (reference index)

$$j2k_0 n_r \frac{\partial F}{\partial z} = \frac{\partial^2 F}{\partial x^2} + k_0^2 (n^2 - n_r^2) F \quad \text{Eq. (2.41)}$$

BPM は, Eq. (2.41) を数値解析する方法によって, フーリエ変換を用いる FFT-BPM (Fast Fourier Transform-BPM), 差分化することにより解析する FD-BPM (Finite Difference-BPM) と有限要素法により解析する FE-BPM (Finite Element-BPM) がある. FFT-BPM は, 計算時間が長く,  $x$  方向のサンプル点は等間隔でしかとれず, その個数は  $2^n$  個に限定されるなどの欠点により, 現在では, ほとんど利用されていない. 現在は, 理解しやすく, コーディングも容易な FD-BPM が主に用いられている. この以降では, FD-BPM について説明する.

Eq. (2.41) を差分化するために, Fig. 2.12 のような離散化を行う.  $x$  方向,  $z$  方向の離散化番号をそれぞれ,  $i, j$  とすると, Eq. (2.42) のような離散化された式が得られる.

$$j2k_0 n_r \frac{F_i^{j+1} - F_i^j}{\Delta z} = \frac{1}{2} \left[ \frac{F_{i-1}^j - 2F_i^j + F_{i+1}^j}{(\Delta x)^2} + \frac{F_{i-1}^{j+1} - 2F_i^{j+1} + F_{i+1}^{j+1}}{(\Delta x)^2} \right. \\ \left. + k_0^2 \left\{ \left( n_i^{j+\frac{1}{2}} \right)^2 - n_r^2 \right\} F_i^j + k_0^2 \left\{ \left( n_i^{j+\frac{1}{2}} \right)^2 - n_r^2 \right\} F_i^{j+1} \right] \quad \text{Eq. (2.42)}$$

この陰的な定式化はクランク・ニコルソン (Crank-Nicholson) 法であり,  $z+\Delta/2$  の場所での屈折率を用いる. Eq. (2.42) の左辺に未知数, 右辺には既知の量を置くと Eq. (2.43) のように表される. また,  $x$  方向へのサンプル番号を  $0, 1, \dots, N+1$  とすると, Eq. (2.44) のような行列形式に表される.

$$aF_{i-1}^{j+1} + bF_i^{j+1} + aF_{i+1}^{j+1} = d_i \quad \text{Eq. (2.43)}$$

$$\begin{pmatrix} a & b & a & & & & \\ & a & b & a & & & \\ & & & \ddots & & & \\ & & & & \ddots & & \\ & & & & & a & b & a \\ & & & & & & a & b & a \end{pmatrix} \begin{pmatrix} F_0 \\ F_1 \\ \vdots \\ \vdots \\ F_N \\ F_{N+1} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} d_1 \\ d_2 \\ \vdots \\ \vdots \\ d_N \end{pmatrix} \quad \text{Eq. (2.44)}$$

Eq. (2.44) では, 未知数  $N+2$  に対し, 方程式は  $N$  個しかないので, 解が求められないが, 境界条件として,  $F_0^{j+1} = F_N^{j+1}$  とすると, 解が求められる.

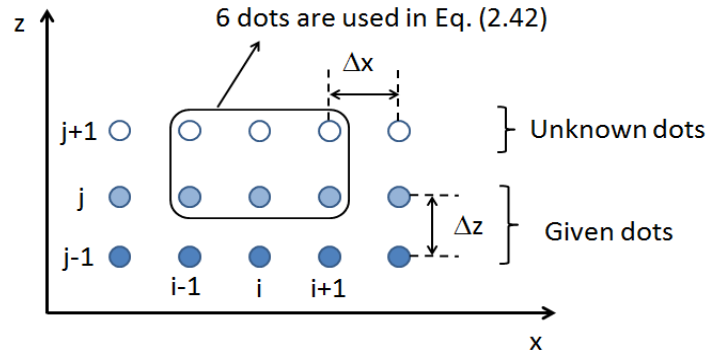


Fig. 2.12 : The discretization in Crank-Nicholson scheme.

### 2.4.2 BPM を用いたデバイスの特性確認

BPM を用いて、設計されたデバイスの出射端での偏向特性を確認する [35]. Fig. 2.13 に示したモデルを用い、それぞれの光源に規格化された光強度と位相を与えたときの出射端でのモード分布を計算した. このモデルは出射端の部分しか表示されていないため、スターカプラによる各アレイの光強度分布は計算して与えないといけない. 光強度分布の計算は以下に方法により求められる.

Fig. 2.14 に示したようにスターカプラの入力側の座標軸を  $x_0$ , フィールドを  $f_0$  とし,  $R_0$  だけ離れた出力側の座標軸を  $x_1$ , フィールドを  $f_1$  とすると,  $f_1$  と  $f_0$  の間には, フーリエ光学により, 次式が成り立つ[37].

$$f_1(x_1) = \frac{1}{\alpha} \mathcal{F}\{f_0(x_0)\} \quad (\alpha = \text{constant}) \quad \text{Eq. (2.45)}$$

Eq. (2.45)により, 入力のフィールド  $f_0$  が与えられると  $f_1$  が計算される. この  $f_1$  は,

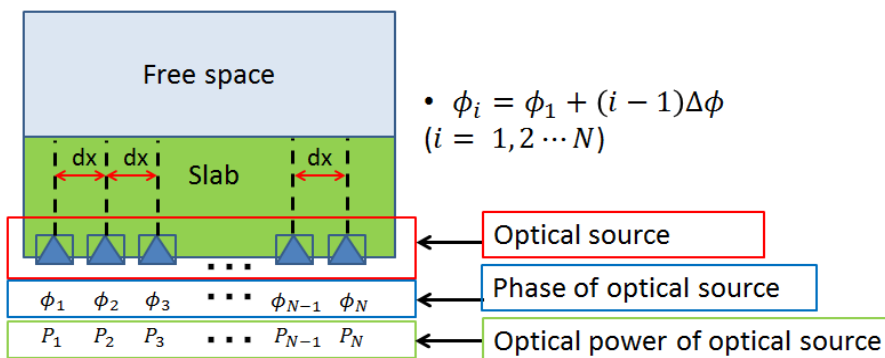


Fig. 2.13 : The simulation model.

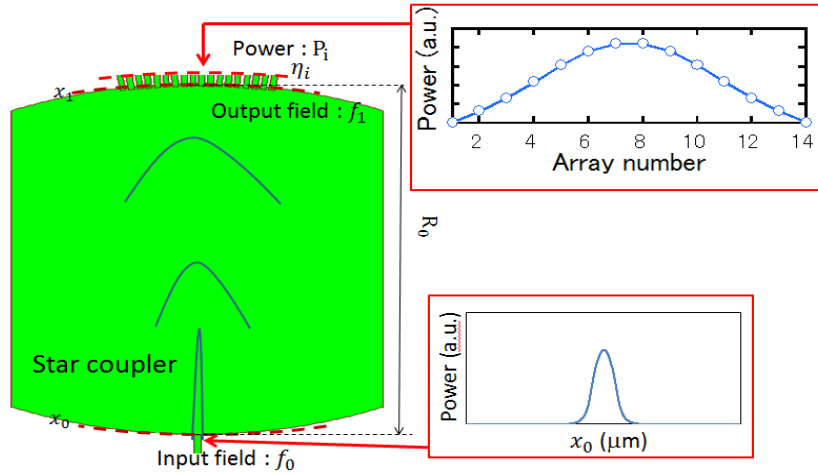


Fig. 2.14 : Field calculation in the star coupler.

N 個の導波路アレイへ結合され、その結合率 $\eta_i$ は Eq. (2.46)として表される。

$$\eta_i = \int_{-\infty}^{\infty} f_i(x_i)f_1(x_1)dx \tag{Eq. (2.46)}$$

ただし、 $f_i$  : 各導波路のモード関数、 $x_i$ : 各導波路の中心位置、 $i=1,2,3,\dots,N$

この時、パワー $P_i$ は、 $\eta_i^2$ となる。各導波路アレイでの伝搬損を無視すると、 $P_i$ を Fig. 2.13 の光源のパワーとして使用可能となる。Fig. 2.13 の光源に計算された  $P_i$ と位相  $\phi_i$ を与えて、BPM に基づいて出射端スラブ導波路でのモードの分布を計算した。自由空間では、スラブ導波路との屈折率が異なるため、スラブ導波路と自由空間の境界面では、反射および、屈折が起こる。しかし、BPM は上記の仮定により、屈折率差が大きく反射が生じる領域では、適用できない。そのため、BPM により得られたスラブ導波路でのモード分布に、Eq. (2.47)に表すスネルの法則 (Snell's law) および Eq. (2.48)に表す反射を適用させ、自由空間でのモード分布を計算した。

$$\frac{\sin \theta_A}{\sin \theta_B} = \frac{n_B}{n_A} \tag{Eq. (2.47)}$$

ただし、 $\theta_A$ : 媒質 A から媒質 B へ入射角、 $\theta_B$ : 媒質 B から媒質 S へ入射角、 $n_A$ : 媒質 A の屈折率、 $n_B$  : 媒質 B の屈折率

$$R_A = \frac{(n_A - n_B)^2}{(n_A + n_B)^2} \cdot \cos \theta_A \tag{Eq. (2.48)}$$

ただし、 $R_A$  : 媒質 A から媒質 B へ入射されるとき反射率

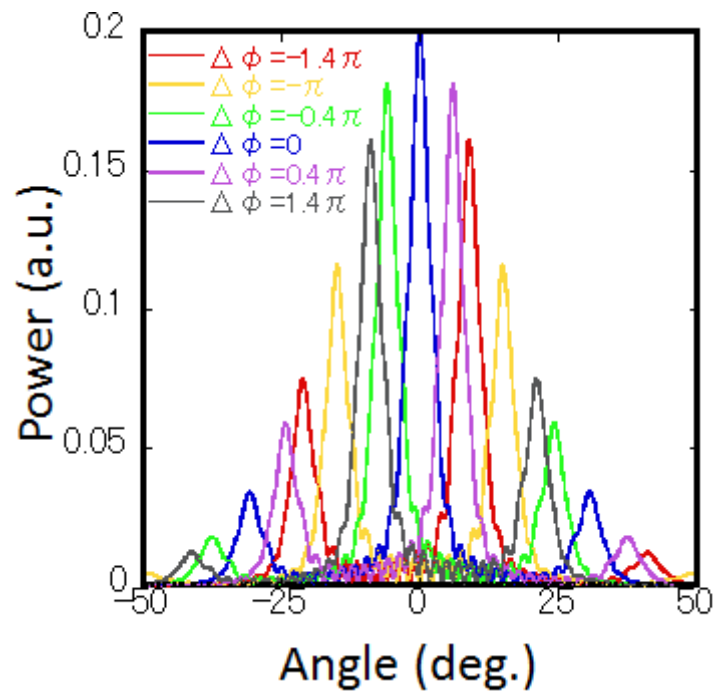
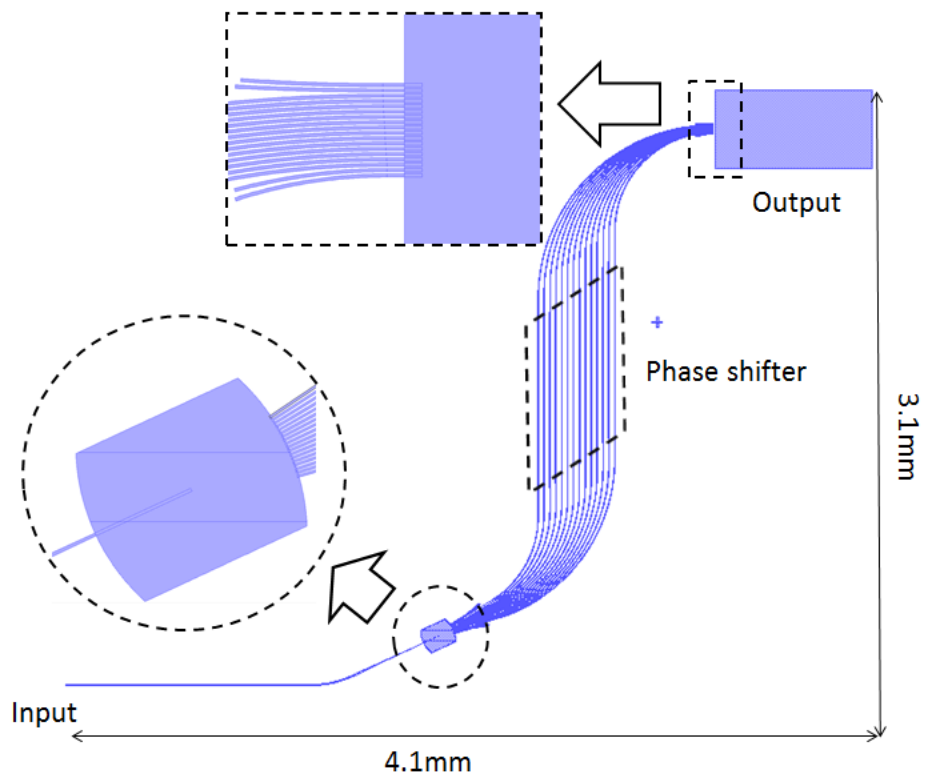


Fig. 2.15 : The calculated results of the model.

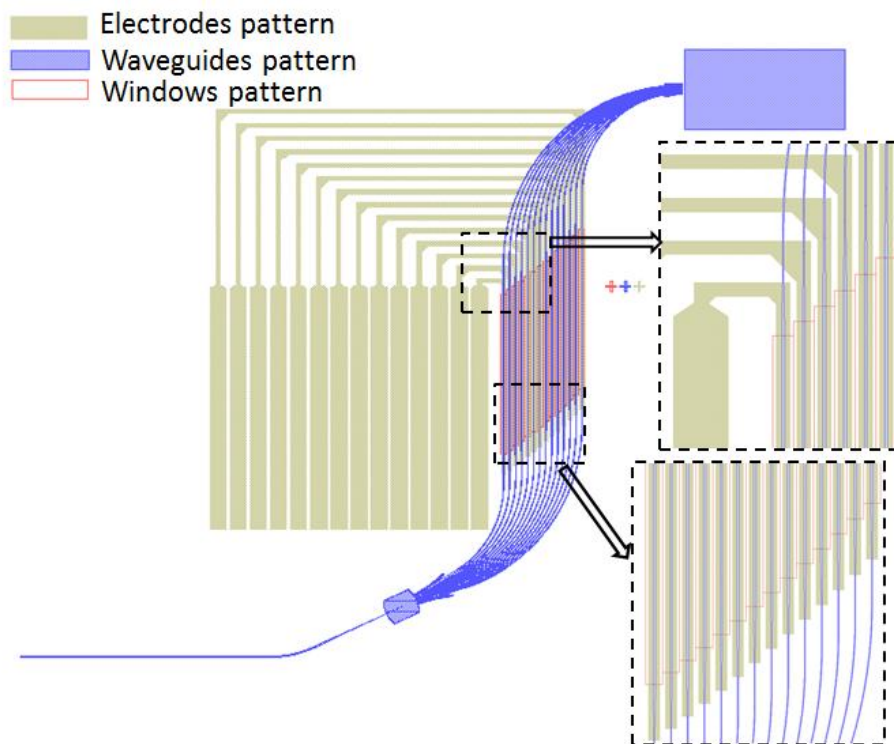
Fig. 2.15 にアレイ数  $n=14$ ,  $dx=3 \mu\text{m}$ , スラブ導波路の長さ  $1300 \mu\text{m}$  にしたときの計算結果を示す. 各アレイ間の位相差  $\Delta\phi$  が  $0$  の場合は,  $0^\circ$  のところにメインローブ (Main lobe) が立ち, メインローブの両側には  $\Delta\phi=2\pi$  に相当するグレーティングローブ (Grating lobe) が立つ.  $\Delta\phi$  が  $\pm 72^\circ$  の場合, メインローブの偏向角は  $\pm 6.1^\circ$  となる. さらに,  $\Delta\phi=\pm 144^\circ$  の場合, メインローブの偏向角は  $\pm 12.1^\circ$  となる. 位相差  $\Delta\phi$  が大きくなるほど, メインローブの偏向角は大きくなるが, それと同時にグレーティングローブの強度が増加し,  $\Delta\phi=\pm 180^\circ$  の場合, メインローブとグレーティングローブの強度は等しくなる.

## 2.5 設計されたデバイスの形

[38]のソフトを用いて作成された導波路全体と電極などを含むデバイスの全パターン (アレイの数  $N=14$ ) を Fig. 2.16 に示す. 導波路は 2 章に説明したように設計された. まずは, 幅  $5 \mu\text{m}$  の入力導波路は, テーパー導波路に繋がれ, 幅  $2 \mu\text{m}$  になった導波路はスターカプラに繋がる. スターカプラから分岐された各導波路アレイは, 幅  $4 \mu\text{m}$  の位相変調部に繋がり, 幅  $2 \mu\text{m}$  に狭まれた導波路アレイは, 出射端スラブへ繋がる. 位相変調部の領域とそうではない領域を区別するためのウインドウパターンを用意し, 位相変調部の導波路に電流を注入する際に必要となる幅  $20 \mu\text{m}$  の電極の線と電極に電流を容易に注入するための電極のパッドが入った電極のパターンも用意した.



(a) Waveguides pattern



(b) The total mask pattern

Fig. 2.16 : The total design of the device.



## 2.6 第 2 章のまとめ

第 2 章では, 面方向出射フェーズドアレイ光偏向素子の動作原理と設計について説明した. 前半では, フェーズドアレイの動作原理および, スラブ光導波路でのモードの伝搬について説明し, 後半では, 前半での原理に基づいた導波路の設計と BPM に基づいた設計されたデバイスの偏向特性の確認を述べ, 最後は設計されたデバイスの全体図を示した. 第 3 章では, 設計されたデバイスの作製プロセスについて述べる.



## 第 3 章 作製プロセス

この章では、設計したデバイスの作製プロセスについて説明する。化合物半導体を用いたフェーズドアレイ光偏向素子の主な作製工程は、電子ビーム露光によるフォトマスクの作製、結晶成長によるエピウエハの作製、エッチングによる導波路の形成、電極の作製である。この章では、それぞれの工程について説明した後、作製したデバイスのチップをチップキャリアにマウントすることまで述べる。

### 3.1 フォトマスクの作製

本研究のデバイスは、Fig. 2.16 のように設計されたデバイスのパターンをフォトマスクとして使用することにより作製されるため、デバイス作製の前にフォトマスクを作製する必要がある。まずは、設計されたデバイスのパターンを CAD (computer-aided design) を用いてデータ (gds ファイル) として作成する [33,38]。このように作成されたパターンのフォトマスク作製には、超高解像度を持つ電子ビーム露光装置を用いた電子ビームリソグラフィが主に用いられる [30]。本研究のフォトマスク作製には、ADVANTEST 社製の電子ビーム露光装置 (F5112) を使用する。電子ビームリソグラフィでフォトマスクを作製するために、作成された CAD のファイルを、電子ビーム露光データに変換する。電子ビーム露光では、矩形近似によりパターンを描画するため、データ変換時にいくつかの変換条件が必要となる。ウインドウパターンと電極のパターンは曲線がないシンプルなパターンのため厳密な変換条件が必要とならないが、曲線が多く、パターンの配置が複雑な導波路パターンの場合は、適切な変換条件を満たさないと設計された通りにフォトマスクを作製することができない。

データ変換時に必要となる変換条件としては、基本分割数、最大矩形高さ、最小矩形高さ、BEF ショットサイズなどがある。BEF ショットサイズは変換されたデータの全体領域を分割する際に、分割されたひとつの領域を指定するパラメータで、基本分割数は、その分割された領域を、更に分割する数を表す。また、最大矩形の高さと最初矩形高さは、それぞれ基本分割数で分割された矩形の最大高さと最小高さを表す。まずは、基本分割数を 50、BEF のショットサイズを 40,000 nm に固定し、最大矩形高さ、最小矩形高さを変えながら、導波路パターン作製への影響を確認した。このときの条件を Table. 3.1(a) に表す。矩形近似による作製誤差を小さくするために、最小矩形高さを小さくする必要があるが、最小矩形高さが 10 nm になるとエラーが発生するため、最小矩形高さは 20 nm 以上にする。最小矩形高さが 20 nm 以上にするとエラーは発生しなかったが、Fig. 3.1 に示したような導波路パターンが切れか、中心位置のずれが生じた。このような導波路のパターン切れや中心位置ずれは、導波路での損失を上昇させる

Table. 3.1 : The condition of data convert.

(a) Changing the heights of rectangle

Basic partition number	BEF shot size(nm)	Maximum height of rectangle (nm)	Minimum height of rectangle (nm)	Note
50	40,000	400	40	
50	40,000	400	10	error
50	40,000	400	20	
50	40,000	200	20	

(b) Changing the BEF shot size

Basic partition number	BEF shot size(nm)	Maximum height of rectangle (nm)	Minimum height of rectangle (nm)	Note
50	40,000	200	20	
50	20,000	200	20	
50	5,000	200	20	
50	2,000	200	20	success

ため、除去する必要がある。しかし、Table. 3.1(a)に表したように最大矩形高さ、最小矩形高さを変更させても、不良パターンの除去には影響がなかった。そこで、基本分割数を 50、最大矩形高さを 200 nm、最小矩形高さを 20 nm に固定し、BEF ショットサイズを変えながら、その影響を確認した。そのときの条件を Table. 3.1(b)に表す。BEF ショットサイズを 40,000 nm から 20,000 nm にしたときでは、大きな変化は見られなかった。しかし、BEF のショットサイズを 5,000 nm にすると、Fig. 3.2(a)のように、パターンずれの程度が小さくなり、2,000 nm にすると、Fig. 3.2(b)のように、導波路のパターン切れと中心位置ずれが除去された。導波路フォトマスクを作製するためには、BEF ショットサイズを 2,000 nm する必要がある、実際の導波路フォトマスクも BEF ショットサイズを 2,000 nm にして作製した。

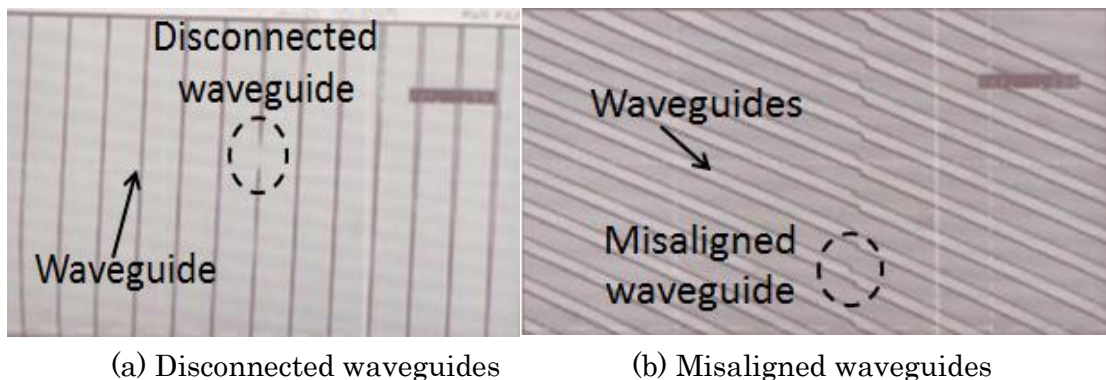


Fig. 3.1 : Microscopic images of the disconnection and misalignment in the fabricated photo mask.

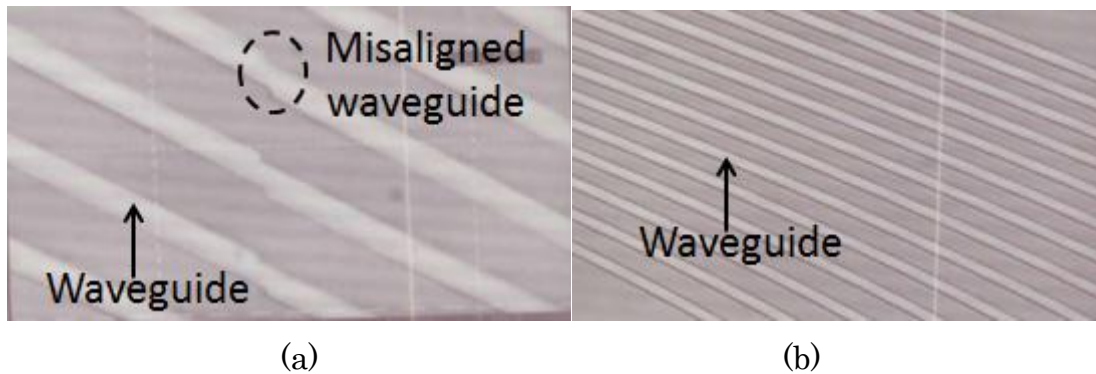


Fig. 3.2 : The effect of BEF shot size. (a) Microscopic image of 5,000 nm BEF shot size, (b) Microscopic image of 2,000 nm BEF shot size

### 3.2 エピウェハの情報

本研究で使用したエピウェハは、第 2 章の Table. 2.1 に表したように InGaAsP をコア層、InP を上下のクラッド層とするヘテロ接合構造からなっている。InGaAsP の屈折率が InP より高いため、このようなヘテロ接合構造を用いることで、光を安定的に閉じ込められる。また、電流注入を行うために、上部のクラッドは p ドープ、コア層はノンドープ、そして下部のクラッドは n ドープされた p-i-n 構造も使用される。また、電極とオーミックなコンタクトを取るために、p-InGaAs 層を設ける。バンド端の発振波長が  $1.37 \mu\text{m}$  である Q1.37 InGaAsP はバンドギャップエネルギーが約  $0.90 \text{ eV}$  であり、InP のバンドギャップエネルギー  $1.35 \text{ eV}$  より小さい[30]。そのため、p-i-n 構造に正バイアス電圧をかけるとキャリアが注入され、注入されたキャリアは、コア層に閉じ込められ、屈折率変調が可能となる。本研究で使用されたエピウェハのバンドダイアグラムを Fig. 3.3 に示す。

InGaAsP のバンド端発振波長は伝搬損と変調効率間のトレードオフ関係を持つ。InGaAsP では、アーバックテール (Urbach tail) 効果により、バンドギャップエネルギー以下の光も吸収されるため、伝搬損を小さくするためには、フォトンエネルギーと InGaAsP のバンドギャップエネルギーの差が大きい方がよい [39]。しかし、変調効率は、その差が小さくなると大きくなる [40]。そこで、本研究では、伝搬損の小さく保ちながら、変調効果も得られる Q1.37 InGaAsP を使用した。

### 3.3 導波路の作製

導波路の作製プロセスの模式図を Fig. 3.4 に示す。劈開されたウェハにフォトリソグラフィとドライエッチングを行うことで、導波路の形成が可能となる。

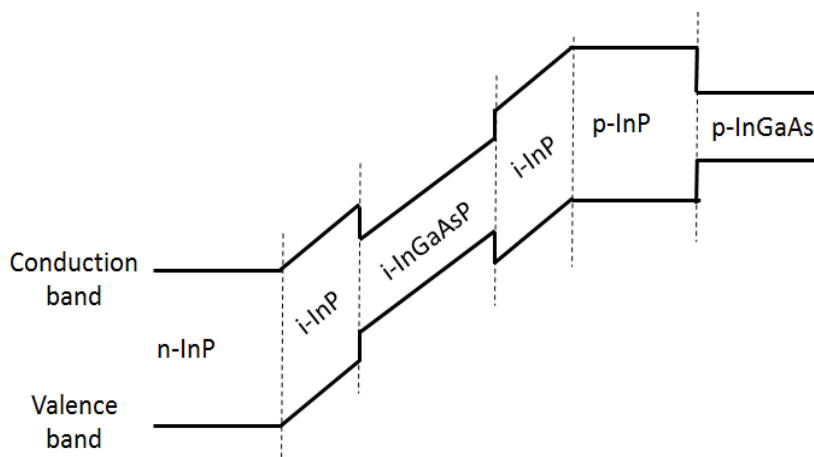


Fig. 3.3 : Band gap diagram of the epi-wafer.

### 3.3.1 エピウェハの劈開

2 インチのエピウェハをチップサイズに切り出すために劈開を行った。まず、ウェハの端面にメスで少し傷を入れる。InP ベースのウェハは、小さな力を加えることで、劈開が可能となるため、傷を入れたウェハの裏側をピンセットで軽く押し出すことで劈開を行った。本研究では、Fig. 3.5 に示したように、6 分割されたウェハを使用した。

### 3.3.2 SiN<sub>x</sub>の製膜

本研究の導波路作製では、ICP-RIE (Inductive Coupled Plasma-Reactive Ion Etching)を用いたドライエッチングが使用され、ドライエッチング際に、ハードマスクの役割をする SiN<sub>x</sub>をスパッタリング(Sputtering)法により製膜した。

スパッタリングは電磁界などで数十 eV 以上に加速されたイオンがターゲットの個体に衝突されると運動量交換によって個体の原子が弾き飛ばされる現象であり、サンプルの製膜法として広く使われている。スパッタリングは、装置構成法によって、プラズマ法とイオンビーム法に分かれるが、本デバイスの作製では、イオンビーム法より高速な製膜が可能なプラズマ法で SiN<sub>x</sub> の製膜を行った [41]。

SiN<sub>x</sub> の厚さは、ドライエッチングからの導波路部分の保護を考えると厚くしないとイケないが、解像度の面を考えると薄くしないとイケない。経験上、SiN<sub>x</sub>のエッチングレートが InP の 1/10 ということが知られており、本デバイスでは、InP を約 1.5 μm エッチングするため、SiN<sub>x</sub>の厚さを 300 μm に設定した。SiN<sub>x</sub> のスパッタリング時には、Ar と N<sub>2</sub> ガスが用いられ、Ar : 15 sccm, N<sub>2</sub> : 5 sccm, パワー 200 W にしたときのスパッタリングレートは今回用いる条件下では、約 15 nm/min と知られており、本デバイスの作製プロセスでは、スパッタリング時間を 20 分にし、その結果、厚さが 300 nm

~ 320 nm の SiN<sub>x</sub> 膜が得られた.

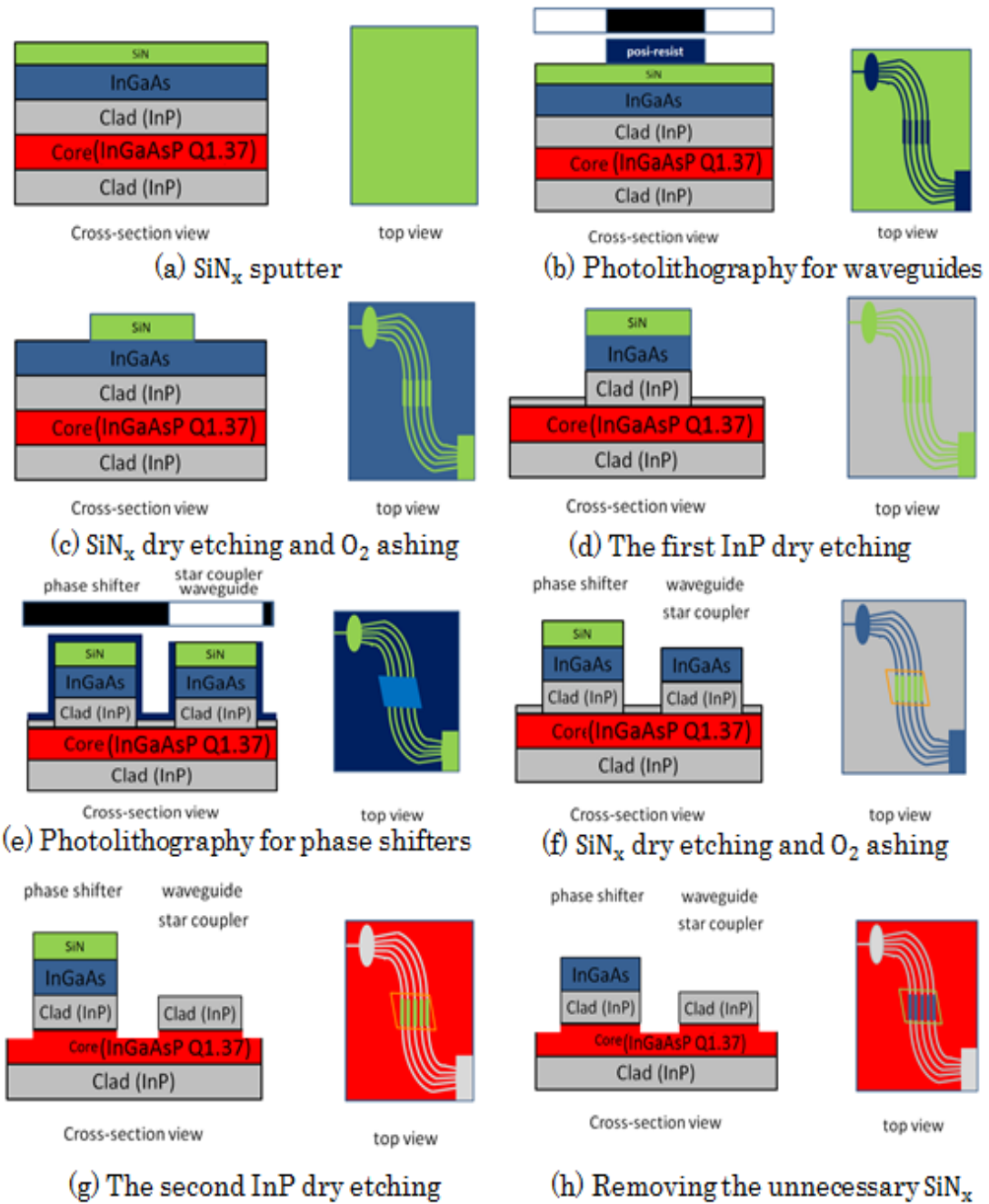


Fig. 3.4 : The schematic images of the waveguide fabrication process.

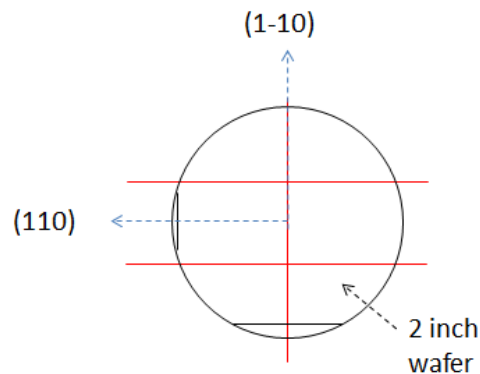


Fig. 3.5 : Cleaving of the 2 inch wafer.

### 3.3.3 フォトリソグラフィ

SiN<sub>x</sub> 膜が形成されたウェハに、フォトリソグラフィを用いて、導波路のパターン形成を行う。そのプロセス流れは、レジスト塗布、プリベーク、エッジビードの除去、露光、現像、ポストベークとなる [41]。

まずは、フォトレジストとウェハ間の密着性を上げるために、プライマーをコーティングする。フォトレジストとしては、TSMR8900 を使用し、このフォトレジストを 500 rpm で 5 秒、6000 rpm で 60 秒の条件で、スピンドコーティングをする。塗布したレジストを固めるために、110 °C で 90 秒間プリベークを行った。コーティングされたフォトレジストは、ウェハのエッジの部分で厚くなるため、ウェハのエッジのレジストを除去しないと厚みの差によって、露光時にウェハとフォトマスク間に隙間が生じる。この隙間は露光時に露光する必要がないところまで露光させる。従って、精度の高いパターン形成のためには、ウェハエッジのレジストを除去する必要がある。本デバイスの作製では、アセトンを染み込ませた綿棒を用いて、ウェハエッジのレジスト（エッジビード）を除去した。次は、作製された導波路フォトマスクを用いて、露光を行った。フォトマスクとウェハ間のアライメントを行い、その後、フォトマスクとウェハを密着させ、16.0 mW/cm<sup>2</sup> の光強度で、5 秒間露光した。露光されたウェハに、NMD3 を用いて、25~30 秒間現像を行った。現像されたウェハは純水で 2 回リンスした。顕微鏡で形成されたパターンを確認し、レジストとウェハ間の密着を良くするために、110 °C で 90 秒間ポストベークを行った。

### 3.3.4 SiN<sub>x</sub> のドライエッチング

導波路パターンが形成されたウェハに、ICP-RIE を用いて、SiN<sub>x</sub> のドライエッチングを行った。RIE (Reactive Ion Etching : 反応性イオンエッチング) はドライエッチングの一種類である。RIE では、ラジカル (Radical) 状態とイオン (Ion) 状態の高い反



応性をもつ活性分子を用い、電位差によるイオンの加速によるスパッタリング、エッチングガスとの化学作用でエッチングを行う [30]. RIE の一種である ICP-RIE は、誘導結合プラズマを用いてエッチングを行い、高密度のプラズマが得られ、イオン衝突によるダメージが少ないなどのメリットがあるため、広く使用されている. 本デバイスのドライエッチングも ICP-RIE により行い、Table. 3.2 に示した条件で  $\text{SiN}_x$  のドライエッチングを行った. フォトレジストは、 $\text{SiN}_x$  のドライエッチングの際、保護マスクとして働くため、レジストで形成された導波路パターン通りに、 $\text{SiN}_x$  がエッチングされる.  $\text{SiN}_x$  のドライエッチング後、残ったレジストは Table 3.2 に示した  $\text{O}_2$  アッシングで除去した.

### 3.3.5 InP のドライエッチング

$\text{SiN}_x$  の導波路パターンをハードマスクとして用い、InP のドライエッチングを行った. 電極とのオーミックなコンタクトを形成するための p-InGaAs は、吸収係数が大きいため、導波路の伝搬損を増加させる原因となる. そこで、InP のドライエッチングを 2 回に分けて行うことで、電流注入が必要となる位相変調部以外での p-InGaAs を除去した. 1 回目では、Table. 3.2 に示した条件で  $1\mu\text{m}$  程度 InP をエッチングした. 1 回目の InP のドライエッチング後に残った  $\text{SiN}_x$  は、2 回目の InP のドライエッチングする際に、位相変調部でのハードマスクと使用するため、位相変調部以外は除去した. フォトレジスト AZ5200NJ を 500 rpm で 5 秒、4000 rpm で 40 秒スピニングさせ、90 °C で 60 秒間プリベークをした. その後、ウインドウマスクを用い、 $16.1\text{ mW/cm}^2$

Table. 3.2 : ICP-RIE condition for each process.

	$\text{SiN}_x$ etching	$\text{O}_2$ ashing	InP etching
Gas pressure (Pa)	1.00	3.00	2.00
He flow rate (sccm)	8.00	8.00	8.00
$\text{O}_2$ flow rate (sccm)	-	10	-
$\text{CHF}_3$ flow rate (sccm)	6.3	-	-
$\text{Cl}_2$ flow rate (sccm)	-	-	2.00
Ar flow rate (sccm)	3.6	-	8.00
Source power (W)	200	200	140
Bias power (W)	25	0	110
Temperature	Room temperature	Room temperature	220 °C

で 6.1 秒間露光を行った。現像は NMD3 で 50 秒間行い、純水で 2 回リンスをした。露光後、Table. 3.2 の条件で、 $\text{SiN}_x$  のドライエッチングと  $\text{O}_2$  アッシングを行うと位相変調部でのハードマスクが形成できる。位相変調部にハードマスクが形成されたウェハに、1 回目の InP のドライエッチング時と同様な条件で、所望の深さまで、2 回目の InP ドライエッチングを行った。エッチング後不要な  $\text{SiN}_x$  は、BHF 液で全て除去した。

Fig. 3.6 に導波路作製プロセス中に撮ったレーザ顕微鏡写真を示す。

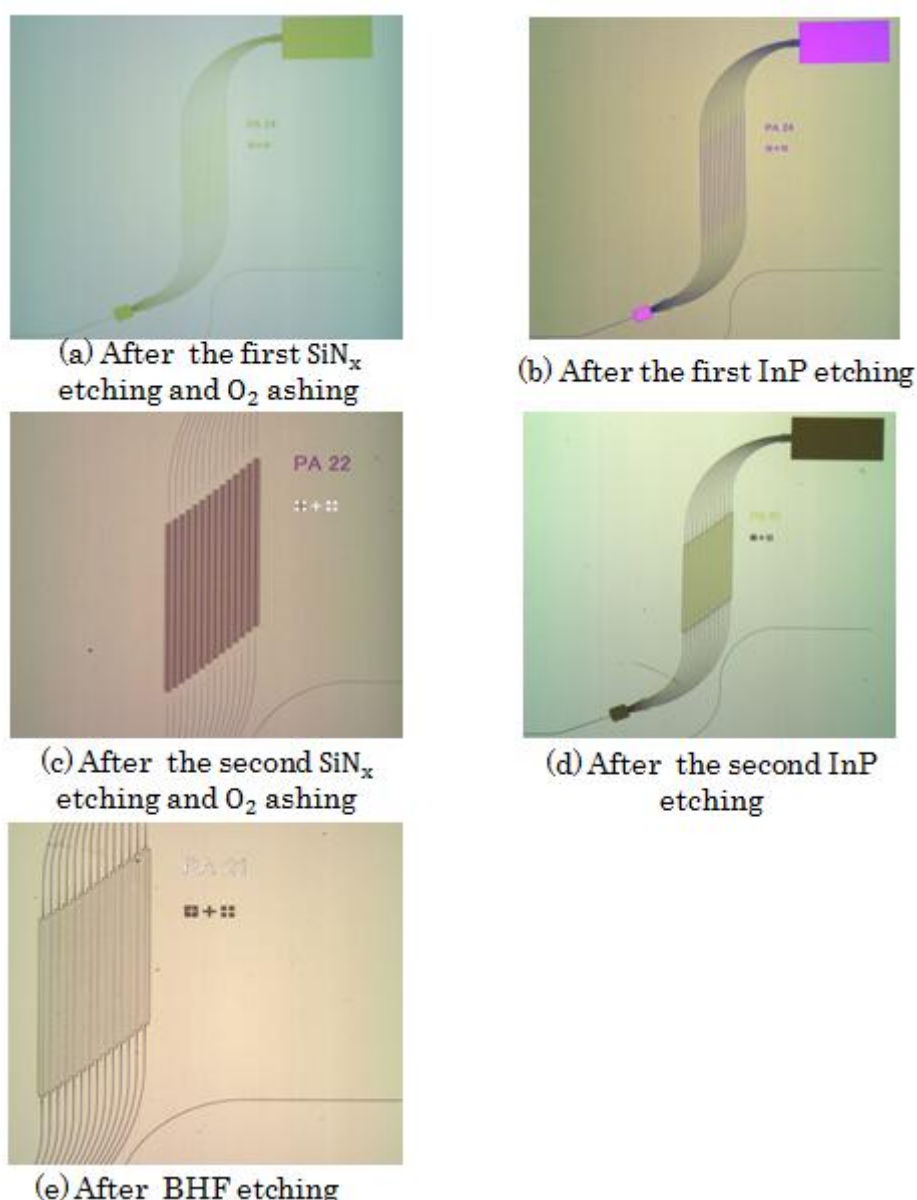


Fig. 3.6 : The laser microscopic images of the waveguides.

### 3.4 パッシベーション及び平坦化

電極を形成する前に、パッシベーションと平坦化を行う。パッシベーションを行うことにより、位相変調部以外のところで電流が流れることを防ぐ。また、平坦化は導波路がある部分とない部分との段差を小さくする役割をし、平坦化によって、電極製膜時の膜厚差を小さくすることが可能となる。

#### 3.4.1 SiO<sub>2</sub>の製膜

絶縁膜の役割をする SiO<sub>2</sub> をスパッタリング法により製膜した。SiO<sub>2</sub> の膜厚が小さい場合は、絶縁の効果が少ないため、ある程度の厚みが必要となり、本デバイスの作製プロセスでは、その厚みを 500 nm と設定した。SiO<sub>2</sub> のスパッタリング時には、Ar と O<sub>2</sub> ガスが用いられ、Ar : 15 sccm, O<sub>2</sub> : 5 sccm, パワー 200 W にしたときのスパッタリングレートは、今回用いた条件下では、約 15 nm/min と知られているため、スパッタリング時間を 35 分にした。

#### 3.4.2 ポリイミドの製膜と平坦化

SiO<sub>2</sub> の製膜後、平坦化の役割をするポリイミド (Photoneece UR-3100E) を塗布した。まず、用意したポリイミドを 500 rpm で 5 秒, 2300 rpm で 30 秒という条件でスピコーティングし、80 °C で 120 秒, 105 °C で 120 秒間ベークした。最後に、ベークされたウェハをアニーリングチャンバに入れ、350 °C で 1 時間アニーリングさせ、ポリイミドはキュアした。

ポリイミドを使用することにより、段差が数百 nm 程度小さくなる効果は得られるが、電極の断線を防ぐためには、更なる平坦化が必要となる。そこで、ポリイミドが塗布されたウェハに、TSMR8900 を 500 rpm で 5 秒, 6000 rpm で 60 秒の条件でスピコーティングをし、110 °C で 90 秒間ベークした。TSMR8900 は、ポリイミドの凸凹を埋め、更に段差を小さくすることが可能となる。TSMR8900 まで塗られたウェハを Table. 3.2 の条件で 8 分間 O<sub>2</sub> アッシングを行い、アッシング後、TSMR8900 を再び塗布し、8 分間 O<sub>2</sub> アッシングをした。この工程が重なるほど段差が小さくなる効果が得られ、本デバイスの作製プロセスでは、この工程を 2 回とした。この工程により、導波路がある部分とない部分との平坦化が可能となるが、ポリイミドが厚いため、このままで次のステップであるコンタクトオープンを行うと位相変調部と導波路の境界のところで大きな段差が生じ、電極が断線する可能性がある。そのため、ポリイミドの全体の厚さを減らすために、O<sub>2</sub> アッシングを行った。この際、導波路上のポリイミドの様子を確認しながら O<sub>2</sub> アッシングを 3~8 分間隔の数ステップに分けて行った。

### 3.4.3 コンタクトオープン

位相変調部に電流を流すためには、位相変調部導波路上の  $\text{SiO}_2$  とポリイミドを除去するコンタクトオープンが必要となる。AZ5200NJ を 500 rpm で 5 秒、4000 rpm で 40 秒スピンコーティングし、90 °C で 60 秒間プリベークをした。ここでは、AZ5200NJ をネガレジストとして使用するため、露光は 2 回行った。1 回目の露光では、ウインドウマスクを使用し、15.8 mW/cm<sup>2</sup> で 3.8 秒間露光した。その後、105 °C で 120 秒間ベークし、2 回目の露光を行った。2 回目では、マスクを使用せず、15 秒間全露光を行った。現像して得られたパターンでは、位相変調部以外のところがレジストで保護される。位相変調部導波路上に残ったポリイミドは  $\text{O}_2$  アッシングで除した。この際、 $\text{O}_2$  アッシングをしすぎると導波路以外のところの  $\text{SiO}_2$  を露出させるため、注意する必要がある。導波路上の  $\text{SiO}_2$  が露出されたら Table. 3.2 の  $\text{SiN}_x$  ドライエッチングと同じ条件で、露出された  $\text{SiO}_2$  を除去した。エッチング後の残った AZ5200NJ は、AZ remover で除去した。

## 3.5 電極の作製

パッシベーション及び平坦化されたウェハに Ti/Au 電極をリフトオフより形成した。

### 3.5.1 Ti/Au の蒸着

まず、AZ5200NJ をネガレジストと用いて、電極パターンのフォトリソグラフィを行った。電極パターンが形成されたウェハに EB 蒸着による電極の製膜を行った。真空蒸着は真空中で薄膜材料を蒸発させて製膜する方法である。真空蒸着では、蒸発材料を坩堝に装着し、真空度を  $10^{-4}$  Pa まで下げ、蒸発物質を加熱させる。加熱により蒸発された蒸発材料は低い温度のウェハ表面に凝縮され、製膜ができる。真空蒸着はその蒸発源の種類により、いくつかの方式に分類される。その内、電子ビーム加熱をする EB (Electron Beam) 蒸着では、高電圧、高電流を印加した電子銃から電子を引き出し、坩堝内の蒸発材料の表面に集める。集められた電子は蒸発材料を蒸発させ、その結果、製膜が可能となる。EB 蒸着は抵抗加熱蒸着より蒸発源にエネルギーを与えるのが効果的であるため、広く使用され [41]、本デバイスの電極蒸着では、EB 蒸着を使用した。

Au の蒸着する前に、ウェハと電極間の密着性を高めるために、Ti を 100 nm 蒸着した。電極は厚く製膜すると強度が上がり、デバイス実装する際のワイヤーボンディングするとき効果的になるが、厚すぎるとリフトオフができなくなる可能性がある。本デバイスの作製では、Au の厚みを 700 nm に設定した。

### 3.5.2 リフトオフ

リフトオフは所望の材料をレジストの上に製膜し、有機溶液等を用いて、レジストを溶かし、製膜された材料を同時に除去する工程である。蒸着されたウェハを 50~60 °C の AZ remover に 30 分程度入れ、レジストを溶かした。蒸着された金属が厚いため、溶かされたレジスト上の金属を飛ばす必要がある。そのため、ウェハを常温のアセトンに入れ、ゴムポンプを用いて不要な金属を飛ばした。リフトオフが終了したらアセトン、IPA でリンスを行い、顕微鏡で形成された電極を確認した。

### 3.5.3 裏面電極の形成とアニーリング

ウェハの裏面にスパッタリングにより Au 電極を形成した。その後、ウェハと電極間の密着性を高めるために、350 °C で 10 分間アニーリングを行った。ウェハ表面に残っているポリイミドは劈開を難しくするため、アニーリングが終了したら O<sub>2</sub> アッシングで除去した。

## 3.6 デバイス実装前までのまとめ及び SEM 写真

Fig. 3.7 にパッシベーションと平坦化から電極形成までのプロセス工程を示し、Fig. 3.8 にいくつかの段階で得られた顕微鏡写真を示す。Fig. 3.9 は作製されたデバイスの位相変調部の断面を観察した SEM (Scanning Electron Microscope) 写真である。この SEM 写真から、導波路は設計より、約 50 nm 程度深くエッチングされたことや SiO<sub>2</sub>、ポリイミド、電極が正常に形成されていることが確認できる。

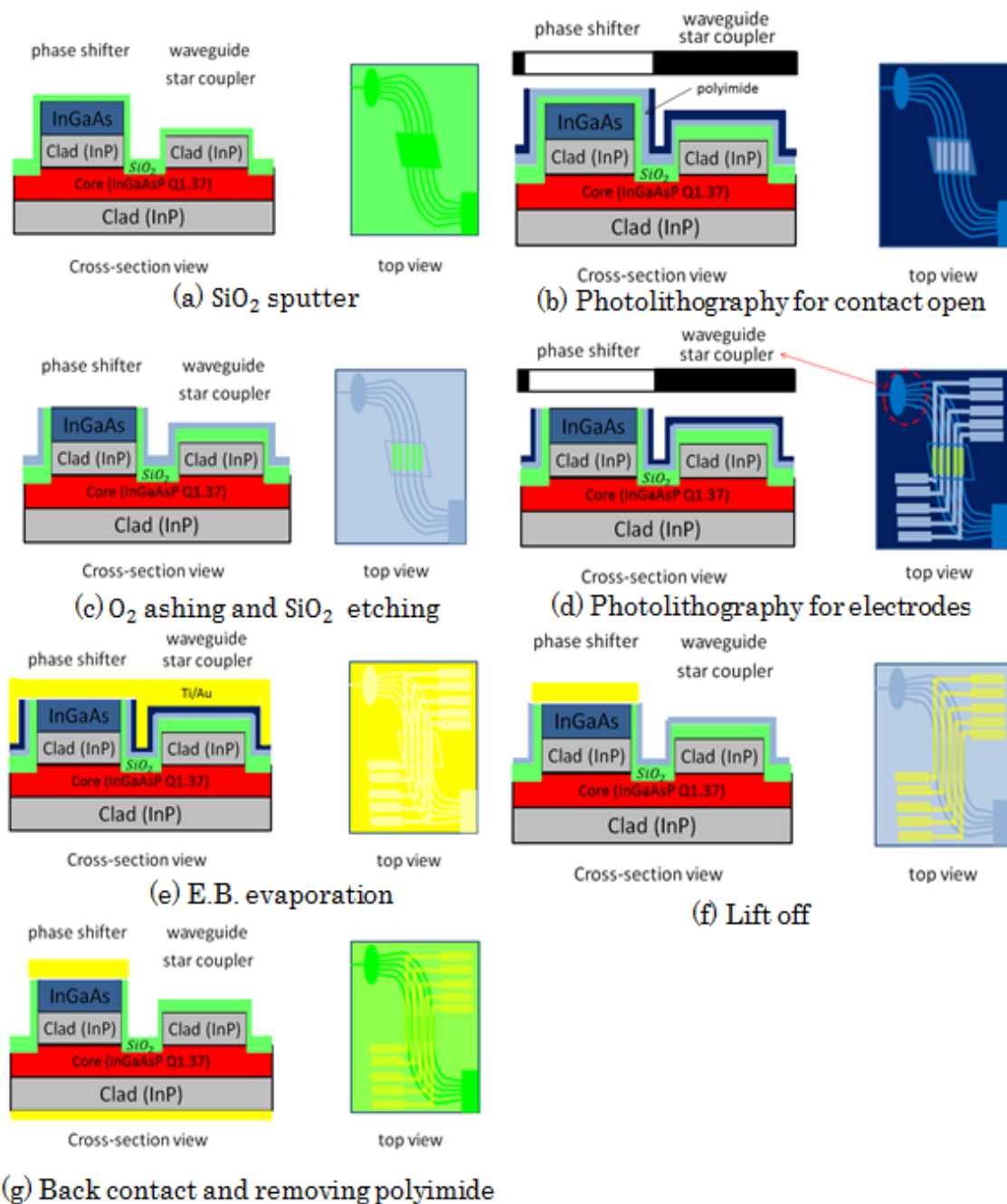


Fig. 3. 7 : The process chart after waveguides fabrication.

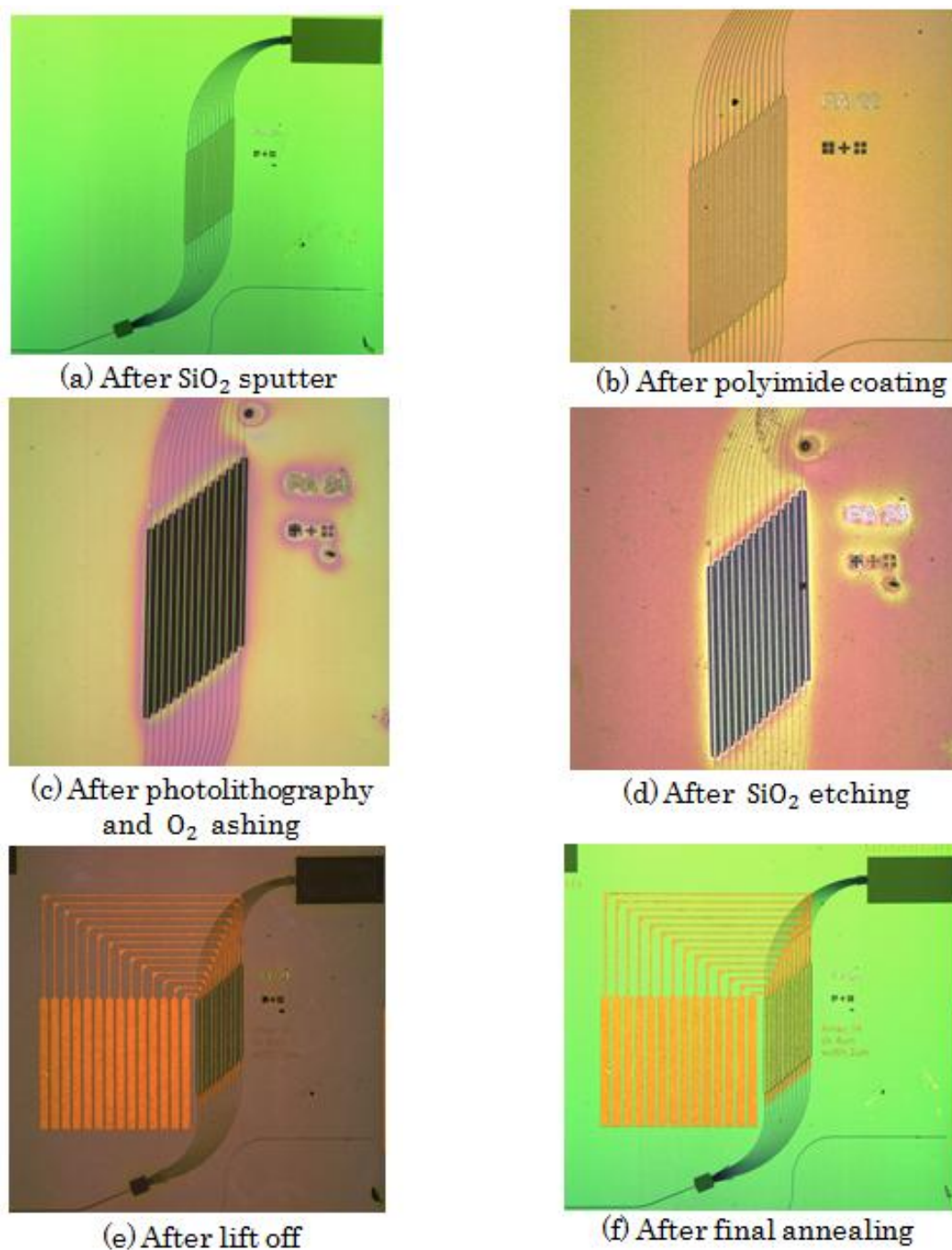
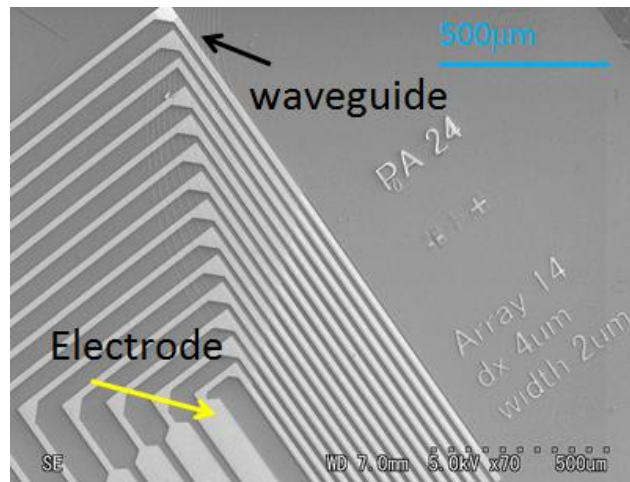
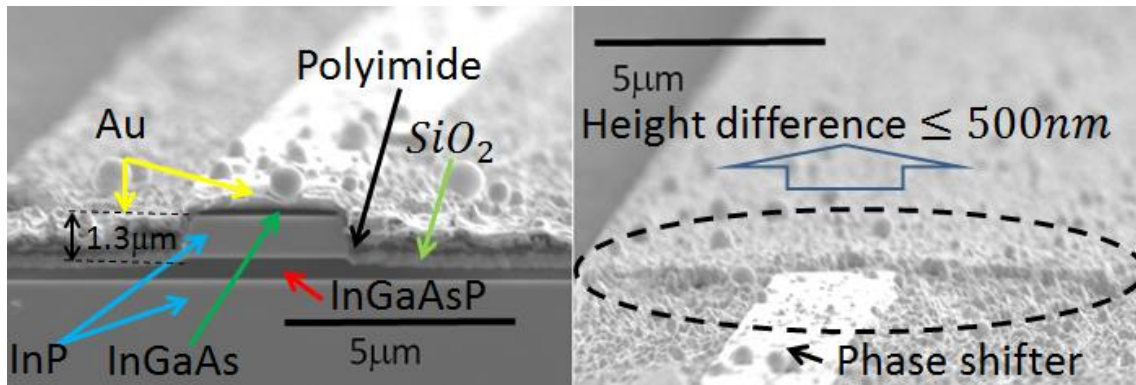


Fig. 3.8 : The microscopic images of the device.



(a) Top view of the fabricated device



(b) Cross section of the phase shifter (c) Boundary of phase shifter and waveguide

Fig. 3.9 : The SEM images of the fabricated device.

### 3.7 デバイスの実装

クリーンルームで作製されたデバイスを測定するために、ウェハを劈開して個々のデバイスに切り出し、チップキャリアにマウントし、ワイヤーボンディングで電極への配線を行った。

#### 3.7.1 劈開とデバイスのマウント

ウェハ上にあるデバイスを劈開することにより、個々のデバイスに分離する。劈開する方法は 3.3.1 に書いた方法と同様であるが、劈開面の粗さはデバイスへ光を入射したときの結合損と繋がるため、注意して劈開を行った。

劈開されたデバイスは AlN チップキャリアにマウントした。絶縁性と熱伝導性が高い AlN がチップキャリアの材料として使用され、チップキャリアにはワイヤーボンディングを容易に行えるための電極パターンが入ってある。まず、チップキャリア表面に



導電性接着剤と塗り、その上にデバイスを置いた。この際、劈開面に導電性接着剤が付くと光を入射するときに反射されるので、端面には導電性接着剤が付かないように注意する。チップキャリアにデバイスを置いたら、130 °Cで約 20 分間アニーリングし、導電性接着剤を固めた。その後、プリント基板を接着剤で固定した銅板に、チップキャリアを導電性接着剤で固定した。この時、チップキャリアとプリント基板との距離が長いとワイヤーボンディングが難しくなるため、注意して固定した。

### 3.7.2 ワイヤーボンディング

ワイヤーボンディングは数十、数百  $\mu\text{m}$  の金属線を用いて、電極間の電気配線を行う技術である。金属線の材料としては主に金 (Au)、アルミニウム (Al)、銅 (Cu) などが使用され、ボンディングする方式によって何種類に分類される。その内、サーモソニックボンディングは、熱、圧力、超音波を使用してボンディングを行う。サーモソニックボンディングの一種であるボールボンディングは、放電により生成された金属ボールを用いてボンディングを行い、信頼性が高いため、広く使用されている [42]。本デバイスのボンディングでは、ボールボンディング方式を使用する WEST BOND 社製のワイヤーボンディング装置を用いた。基板の温度、超音波の強度、超音波を与える時間はワイヤーボンディングの重要な条件である。これらの条件が最適ではないとワイヤーボンディングができなくなるため、最適な条件を探す必要がある。本研究で使用されたワイヤーボンディング条件を Table. 3.3 に表す。

## 3.8 第 3 章のまとめ

この章では、フォトマスクの作製から始め、エピウェハの層構造、デバイスの作製、デバイスの実装まで説明した。また、作製されたデバイスの導波路断面を SEM 写真より確認した。設計より多少深くエッチングされ、導波路の側壁が多少粗いが、光偏向するには大きな問題がないと考慮され、作製されたデバイスの測定を行った。

Table. 3.3 : The condition of wire bonding.

	Chip carrier → Chip		Printed circuit board → Chip carrier	
Ultrasonic power	420	230	500	385
Ultrasonic time	170 ms	50 ms	500 ms	150 ms
Force	High	Low	High	High
Temperature	180 °C			



## 第 4 章 フェーズドアレイ光偏向素子の特性評価

この章では、作製されたフェーズドアレイの測定について説明する。まず、直線導波路の伝搬損を測定する。その後、FFP (Far Field Pattern) 光学系を組み、デバイスの偏向特性を FFP より確認する。

### 4.1 フェーズドアレイ光偏向素子の基本特性

#### 4.1.1 直線導波路の伝搬損測定

導波路フォトマスクには、デバイスの上下に幅  $2\mu\text{m}$  直線導波路が配置されており、この直線導波路の伝搬損を測定することにより、デバイス内での直線導波路の伝搬損を見積もる。直線導波路の伝搬損測定には、二つのテーパファイバ (Taper fiber) が用いられる。光源からの光はシングルモードファイバ (SMF : Single Mode Fiber) を伝搬し、直線導波路の入力側に置かれたテーパファイバから出射する。出射された光は直線導波路に入射され、導波路内を伝搬する。導波路の出力側から出射された光は、出力側のテーパファイバに入射される。ファイバから伝搬してきた光強度を、パワーモニタを用いて測定することで損失を求める。入力の光強度と出力の光強度との差には、ファイバと導波路間の結合損が含まれているため、伝搬損が把握できない。そこで、導波路の伝搬損を測定するために、Fabry-P'erot 測定を用いる。

直線導波路は、両端面を反射面とする共振器として考えることが可能であり、そのため、出力光は波長依存性を持つ。Fabry-P'erot 測定では、波長変化による出力光強度の変化(Fabry-P'erot)振動 [30]を測定し、この結果から伝搬損を計算する。

Fig. 4.1 に示したように、有効屈折率  $n$ 、減衰定数  $\alpha$  の直線導波路の両端面をそれぞれ、端面1と端面2とする。また、端面1の垂直方向への透過率と反射率を  $t_1$ ,  $r_1$  と設定し、端面2の垂直方向への透過率と反射率を  $t_2$ ,  $r_2$  とし、端面外側の領域の屈折率をそれぞれ、 $n_1$  と  $n_2$  と表す。このとき、各端面でのパワー透過率、パワー反射率と屈折率間には、次式が成り立つ。

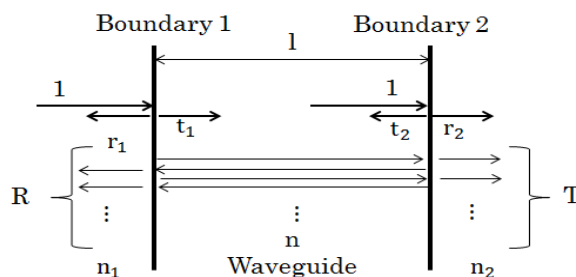


Fig. 4.1 : Fabry-P'erot Oscillation of the waveguide.

$$t_1 = \frac{2n}{n + n_1}, \quad r_1 = \frac{n - n_1}{n + n_1}, \quad t_2 = \frac{2n}{n + n_2}, \quad r_2 = \frac{n - n_2}{n + n_2} \quad \text{Eq. (4.1)}$$

この時、パワー透過係数  $T$  とパワー反射係数  $R$  は Eq. (4.2) として表される。

$$T = \frac{t_1^2 t_2^2 \exp(-2\alpha l)}{[1 - r_1 r_2 \exp(-2\alpha l)]^2 + 4r_1 r_2 \exp(-2\alpha l) \sin^2(k_0 n l)}, \quad R = 1 - T \quad \text{Eq. (4.2)}$$

$k_0 = 2\pi/\lambda_0$ ,  $\lambda_0$ : wavelength in the vacuum

実際の測定では、導波路の両端面外側は空気なので、 $n_1 = n_2 = 1$ ,  $t_1 = t_2$ ,  $r_1 = r_2$  とした。入力の光強度と出力の光強度との差は  $T$  とファイバと導波路間の結合損失の和となり、 $T$  は Eq. (4.2) により、波長を変えると振動するようになる。入力光の波長を 1549.5 nm から 1550.5 nm まで変化させ、入力の光強度と出力の光強度との差を測定し、Eq. (4.2) を用いてフィッティングした。導波路内を 1 往復したときの減衰量は  $\exp(-2\alpha l)$  となり、フィッティングすることで得られた  $\alpha$  を代入して計算することが可能である。また、導波路の伝搬損は単位長さ当たり (mm) の減衰量のため、 $l$  を 1 mm として得られた減衰量を dB 表示に変換すると計算できる。Fig. 4.2 に長さ 4.7 mm の導波路の測定結果とフィッティングの結果を示す。フィッティングから計算された伝搬損は約 0.66 dB/mm であった。また、この伝搬損は導波路側面のラフネスを改善することにより、更に小さくすることが可能であると考えられる。

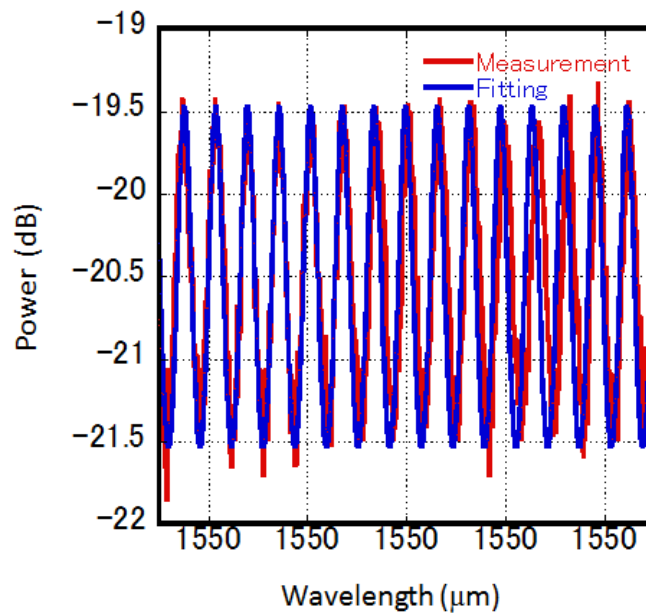


Fig. 4.2 : The comparison of measurement results and fitting results.

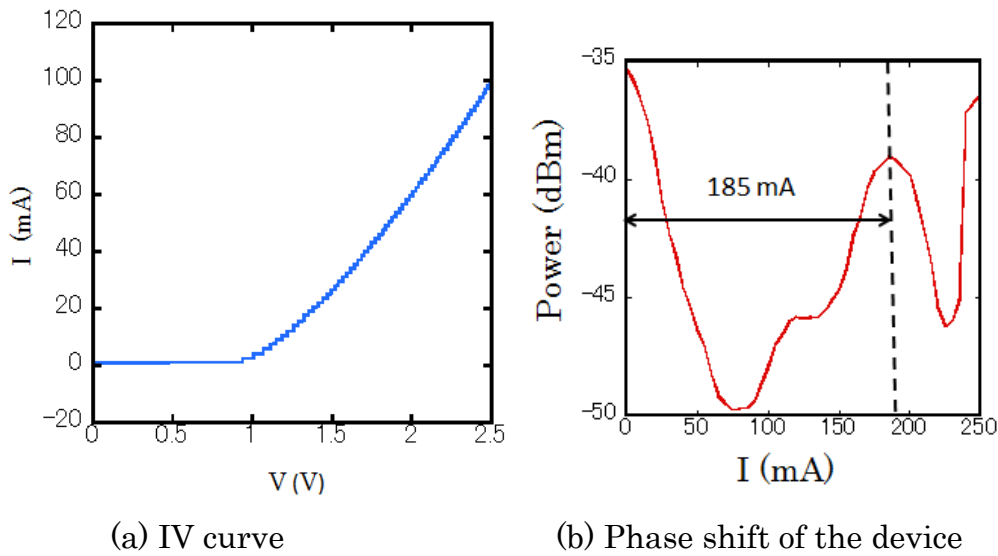


Fig. 4.3 : The basic characteristics of the PA optical beam steering device.

#### 4.1.2 I-V 特性及びバイアス電流

次に、デバイスの層構造はキャリア注入のために、 $p-i-n$  構造となっており、この構造の電圧、電流特性を測定した。作製されたデバイスの I-V 曲線を Fig. 4.3(a)に示す。Fig. 4.3(a)より、デバイスのダイオード特性が確認された。ダイオード構造による電圧の閾値は約 0.94 V となり、計算されたダイオードの抵抗値は約  $16 \Omega$  であった。この際、2.5 V のバイアス電圧かけると 100 mA の電流値が得られた。

Fig. 4.3(a)の I-V 特性を持つデバイスの位相変化に必要なとされる電流量を測定した。二つのテーパファイバを用い、一つのファイバは、デバイスへ光を入射させ、もう一つのファイバは出射端スラブに配置した。デバイスに光に入射させた状態で、一つの電極に流れる電流量を変えながら、出射端に置かれたファイバでの光強度変化を測定した。本測定では、一つの電極に一定の電流を流して位相補正を行った状態で、他の電極でのキャリア注入影響を調べた。電流値に対する光強度変化を Fig. 4.3(b)に示す。Q1.37 InGaAsP のコア層で、キャリア注入による位相変調を行う場合、位相を  $2\pi$  変化させるのに、1.5mA の電流が必要とされるが[43]、Fig. 4.3(b)では、185mA の電流が必要となる。したがって、 $2\pi$  までの位相変調には、キャリア注入効果のみではなく、電気光学効果、熱光学効果などが用いられたと考えられる。これらの原因としては、プラズマエッチング際、コア層が受けたダメージが考えられる。また、この問題は位相変調部のエッチングを上部のクラッドで止め、コア層をプラズマより保護することで改善されると考えられる[43]。

## 4.2 FFP の概要

デバイスから自由空間に出射された光は回折しながら伝搬する。伝搬距離が波長の数倍以下の領域は近視野領域と呼ばれる。この領域では出射された光の回折が十分に行われてないため、デバイスから出射された光に近い振幅分布となり、このような像は近視野像 (Near Field Pattern: NFP) と呼ばれる。また、近視野領域での回折は、フレネル-キルヒホッフの回折積分公式 (Fresnel-Kirchhoff integral) より計算できる。伝搬距離が波長の数倍以上となる領域はフレネル領域と呼ばれ、この領域では、フレネル近似 (Fresnel approximation) が適用可能となる。Fig. 4.4(a)に示したように $x_0y_0$ 平面での光が $z_0$ 離れている $x_1y_1$ 平面にフレネル回折したときのフレネル近似は次式として表される。

$$e(x_1, y_1) = \frac{je^{-jkz_0}}{\lambda z_0} e^{\frac{-jk}{2z_0}(x_1^2 + y_1^2)} \iint_{-\infty}^{\infty} e(x_0, y_0) e^{\frac{-jk}{2z_0}(x_0^2 + y_0^2)} e^{\frac{-jk}{z_0}(x_0x_1 + y_0y_1)} dx_0 dy_0 \quad \text{Eq. (4.3)}$$

伝搬距離が更に長い領域を考える。この領域では、Eq. (4.4)により、Eq. (4.3)を Eq. (4.5)に近似することができる。

$$z_0 \gg \frac{k(x_0^2 + y_0^2)}{2} \quad \text{Eq. (4.4)}$$

$$e(x_1, y_1) = \frac{je^{-jkz_0}}{\lambda z_0} e^{\frac{-jk}{2z_0}(x_1^2 + y_1^2)} \iint_{-\infty}^{\infty} e(x_0, y_0) e^{\frac{-jk}{z_0}(x_0x_1 + y_0y_1)} dx_0 dy_0 \quad \text{Eq. (4.5)}$$

Eq. (4.5)の近似はフラウンホーファ近似 (Fraunhofer approximation) と呼ばれ、フラウンホーファ近似が適用可能な領域をフラウンホーファ領域と呼ぶ。また、この領域で得られた像を遠視野像 (FFP) と呼ぶ。

Eq. (4.5)のフラウンホーファ近似は Eq. (4.6)を用いると、Eq. (4.7)のようになる。フラウンホーファ近似式はフーリエ変換式として表すことが可能で、フラウンホーファ回折から得られた FFP はフーリエ変換されたイメージとなる。また、 $\Omega_x$ ,  $\Omega_y$  は空間角周波数と呼ばれる [44,45]。

Fig. 4.5 に伝搬距離による領域分類を示す。

$$k \frac{x_1}{z_0} = -\Omega_x, \quad k \frac{y_1}{z_0} = -\Omega_y \quad \text{Eq. (4.6)}$$

$$e(x_1, y_1) = \frac{je^{-jkz_0}}{\lambda z_0} e^{\frac{-jk}{2z_0}(x_1^2 + y_1^2)} \mathcal{F}[e(x_0, y_0)] \quad \text{Eq. (4.7)}$$

$\mathcal{F}$  : Fourier transform

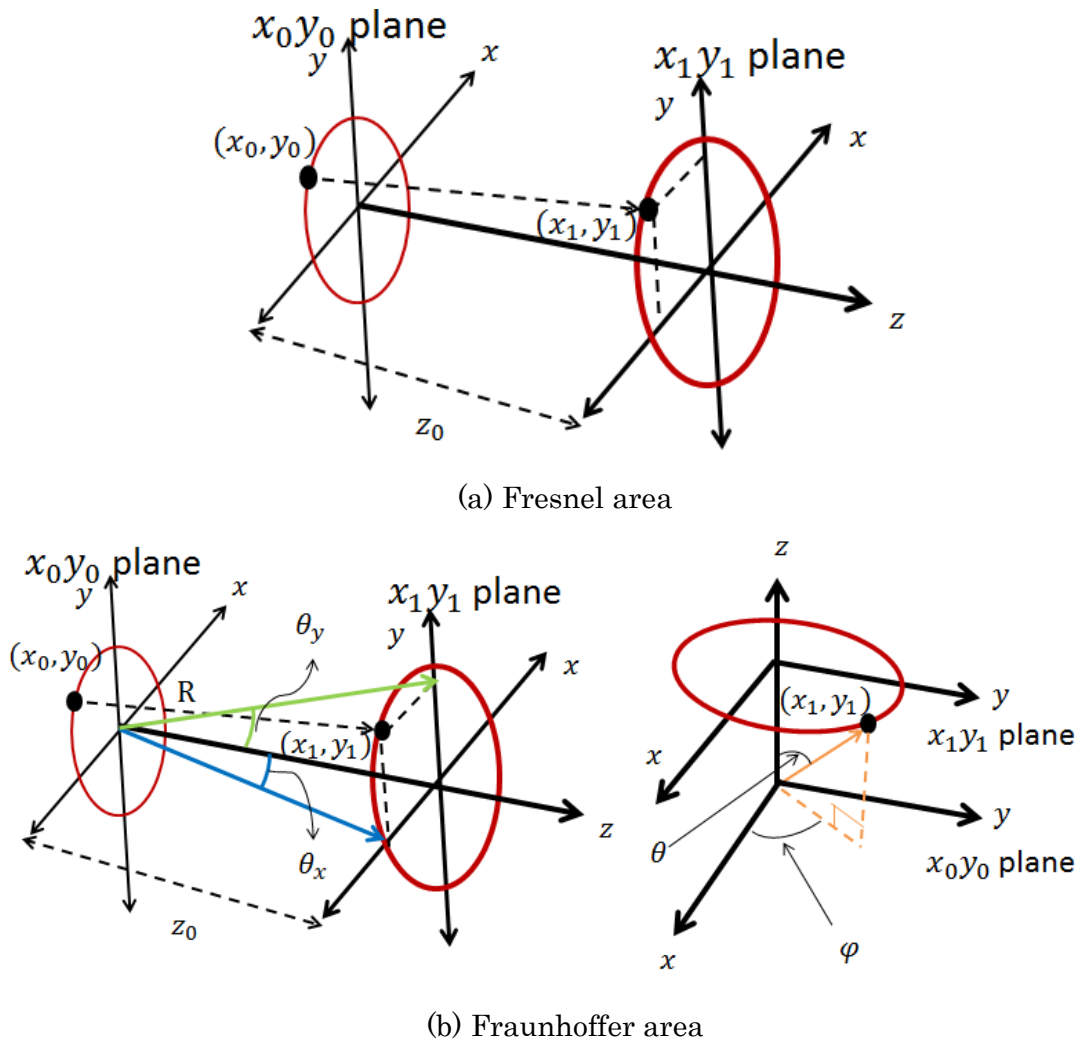


Fig. 4.4 : Coordinate axis of Fresnel area and Fraunhofer area.

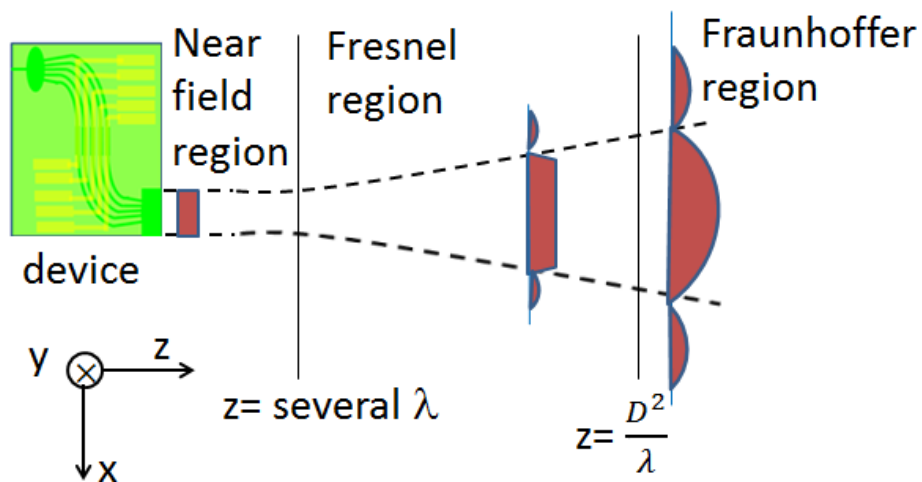


Fig. 4.5 : The relationship between propagation length and approximation region.

また、 $\theta_x$ ,  $\theta_y$  と  $\theta$ ,  $\varphi$  間では次式が成り立つ.

$$\sin \theta_x = \sin \theta \cos \varphi \quad \text{Eq. (4.8)}$$

$$\sin \theta_y = \sin \theta \sin \varphi \quad \text{Eq. (4.9)}$$

$z_0 \cong R$  とすると, 次の Eq. (4.10), Eq. (4.11) が成り立ち, Eq. (4.8)~Eq. (4.11) を用いると Eq. (4.7) は Eq. (4.12) として表示できる.

$$\frac{x_1}{z_0} \cong \frac{x_1}{R} = \sin \theta_x \quad \text{Eq. (4.10)}$$

$$\frac{y_1}{z_0} \cong \frac{y_1}{R} = \sin \theta_y \quad \text{Eq. (4.11)}$$

$$e(x_1, y_1) = h \cdot \frac{e^{-jkR}}{\lambda R} f(\theta, \varphi) \quad (h : \text{constant}, f : \text{function}) \quad \text{Eq. (4.12)}$$

Eq. (4.12) よりデバイスの FFP は角度成分  $\theta$ ,  $\varphi$  で決まることが確認される. つまり, FFP は出射光の角度分布を表すものであり, これは, 伝搬距離が十分長いフラウンホーファ領域では, 元の光分布より, 光の出射角度によって像が形成されることを意味する.

### 4.3 FFP 光学系

#### 4.3.1 FFP 光学系の解析

デバイスから出射された光の NFP と FFP を観察するためには, Fig. 4.6 に示したような光学系が必要とされる [46]. 作製された素子の偏向様子を確認するためには光の出射角度を見る必要があるため, FFP を観察する必要がある. Fig. 4.6 に示したように FFP の観察には, FFP を形成する対物レンズと形成された FFP を CCD に映すための二つの凸レンズが必要とされる. これらのレンズの選び方によって観察できる FFP の範囲, 拡大, 縮小などが決まる. 下記にこれらのレンズの役割について説明する. 対物レンズはデバイスから出射光を集光させる役割をする. Fig. 4.7(a) に示すように, 平行光に対して角度  $\theta$  を持つ光もレンズの焦点距離に相当するところに集光されるが, 平行光の集光点から  $x$  だけ離れたところで集光される. 結局, デバイスからの出射光の  $\theta$  が異なると焦点距離上での集光点が異なり, この焦点距離で得られたイメージは様々な角度情報を表すこととなる. このイメージが観察の対象である FFP である. FFP の観察範囲は最初の対物レンズの NA (Numerical Aperture) より決まる. Fig. 4.7(b) に示したように, NA により FFP の最大角度  $\theta_{\max}$  が決まり, 次式のような関係を持つ.



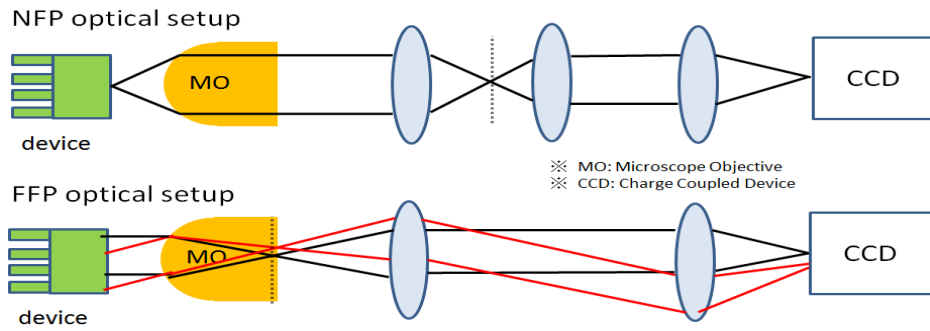
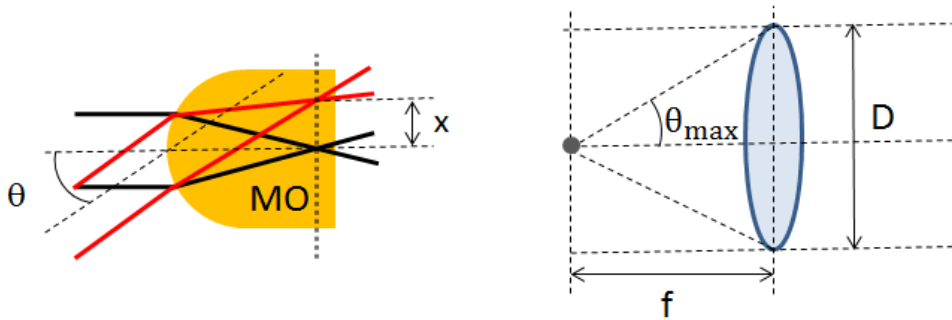


Fig. 4.6: Optical setup for near field imaging and far field imaging.



(a) Focusing of light having different angle

(b) NA of a lens

Fig. 4.7 : The analysis of Micro-Objective lens (MO lens) in the FFP optical setup.

$$NA = n \sin \theta_{\max} \cong n \frac{D}{2f}$$

$n$  : refractive index of the medium, where lens is working

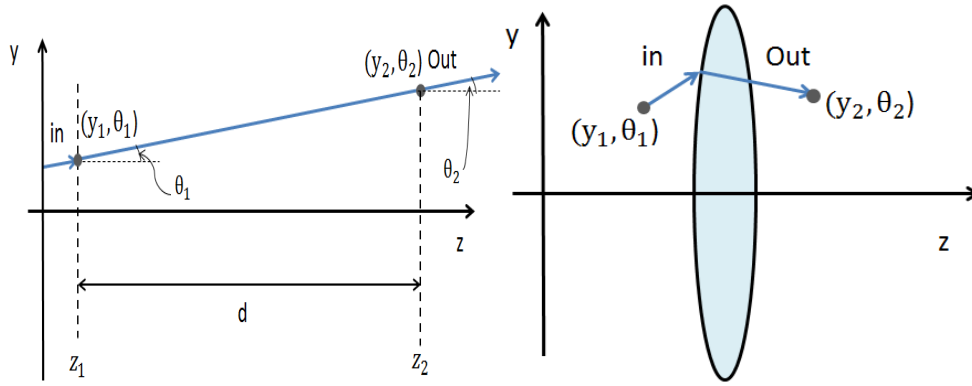
Eq. (4.13)

凸レンズを用いても FFP は形成されるが、より広い範囲の FFP の観察するためには、大きな NA が必要となり、そのような理由で凸レンズの代わりに対物レンズを使用する。対物レンズにより形成された FFP を、CCD カメラを用いて観察する必要があるが、FFP が形成される焦点距離が短いため、FFP は対物レンズ内部で形成され、直接観察することができない。対物レンズ内で形成された FFP を CCD カメラに映すために、二つの凸レンズを使用する。最初の凸レンズの焦点距離に FFP があると対物レンズにより集光された光がコリメートされる。コリメートされた光を二番目の凸レンズを用い、CCD カメラに集光させることで FFP の観察が可能となる。(Fig. 4.6)

自由空間での光の伝搬を Fig. 4.8(a)の光線光学の観点から考えると次式として表すことができる。

$$\begin{bmatrix} y_2 \\ \theta_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & d \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} y_1 \\ \theta_1 \end{bmatrix}$$

Eq. (4.14)



(a) Propagation in the free space      (b) Transmission through a thin lens

Fig. 4.8 : Matrix optics in the ray optics.

Fig. 4.8(b)に示したレンズを通過する場合は次式で表される [47].

$$\begin{bmatrix} y_2 \\ \theta_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 1/-f & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} y_1 \\ \theta_1 \end{bmatrix} \tag{Eq. (4.15)}$$

Eq. (4.14), Eq. (4.15)を用いると対物レンズにより集光された点と二つの凸レンズにより CCD カメラに集光される点との関係を式として表すことが可能である. Fig. 4.9 に示したように対物レンズにより集光されたイメージの y 方向の値を  $y_1$ , そこでの光の角度を  $\theta_1$  とし, 同様に CCD カメラで集光されたイメージの y 方向の値を  $y_2$ , そこでの光の角度を  $\theta_2$  とすると  $y_1, y_2, \theta_1, \theta_2$  の間には, Eq. (4.15)の関係が成り立つ.

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} y_2 \\ \theta_2 \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} 1 & f_2 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 1/-f_2 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & d \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 1/-f_1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & f_1 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} y_1 \\ \theta_1 \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} -f_2/f_1 & 0 \\ 1/-f_2 - (1 - d/f_2)1/f_1 & -f_1/f_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} y_1 \\ \theta_1 \end{bmatrix} \end{aligned} \tag{Eq. (4.15)}$$

結局,  $y_1$  と  $y_2$  の関係は Eq. (4.16)として表される. レンズの焦点距離  $f_1, f_2$  を調整することで, 対物レンズより形成された FFP イメージを拡大, 縮小することが可能である. 本測定では, CCD カメラの面積を考慮し, 二つの凸レンズの焦点距離  $f_1$  と  $f_2$  をそれぞれ 6cm, 10cm にした.

$$y_2 = -\frac{f_2}{f_1} y_1 \tag{Eq. (4.16)}$$

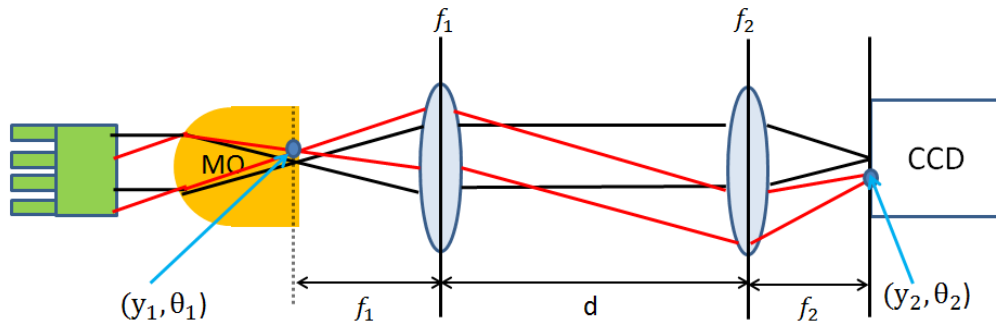


Fig. 4.9 : Application of matrix optics to the FFP optical setup.

### 4.3.2 FFP 光学系の構築

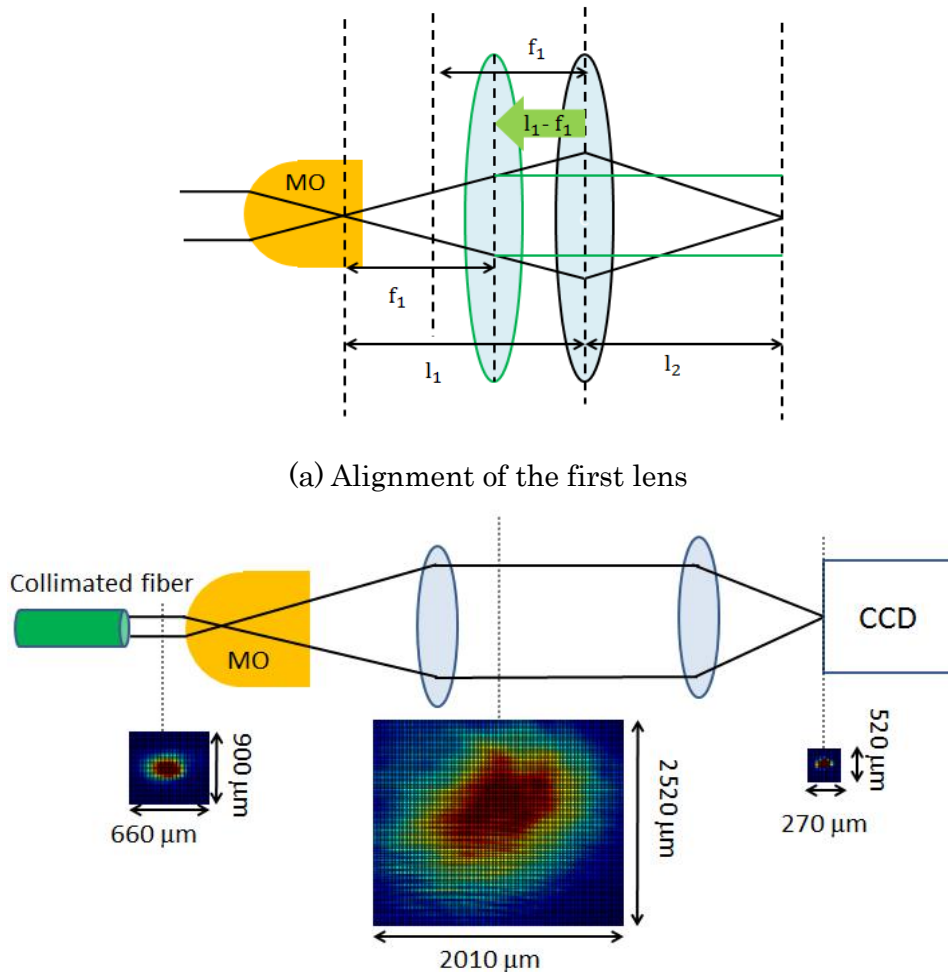
第 2 章で BPM を用いて計算された結果より，FSR (Free Spectral Range) は約  $30^\circ$  となる．両側のグレーティングローブ(Grating lobe)を観察するためには， $\theta_{\max}$  を  $30^\circ$  以上にすることが必要である．この角度を Eq. (4.13)より NA に換算すると，0.5 以上の NA が必要とされることが分かる．NA が許容する  $\theta_{\max}$  を観察するには，デバイスの出射端を対物レンズの WD (Working Distance) 内部に置かないといけない．デバイスの出射端から対物レンズまでの距離が WD より大きいと実際観察できる角度範囲は  $\theta_{\max}$  より小さくなる．また，多くの場合，NA が大きくなると WD も小さくなるので，NA が大きすぎると対物レンズとデバイスの出射端との距離調整が難しくなる．本研究では，対物レンズの NA を 0.65 (WD =0.2 mm)と選択することで，WD より遠い場所にデバイス出射端があっても 広範囲の FFP が観察できるようにした．

対物レンズにより集光された光を凸レンズによりコリメートするためには，Fig. 4.9 に示したように対物レンズ内の FFP 面から  $f_1$  だけ離れたところに最初の凸レンズを挿入しないといけない．しかし，対物レンズ内の FFP 面の位置が把握できないため，間接的な方法で焦点距離を調整する．コリメートされたファイバ光を対物レンズに入射し，Fig. 4.10(a)に示したように対物レンズ内の FFP の面から  $l_1 (>f_1)$  離れたところに凸レンズを挿入すると  $l_2$  離れたところに焦点が結ばれ，各パラメータの間には次式が成り立つ[44]．

$$\frac{1}{l_1} + \frac{1}{l_2} = \frac{1}{f_1} \tag{Eq. (4.17)}$$

$l_2$  の距離を測定すると Eq. (4.17)により  $l_1$  が決められる．最初の凸レンズを対物レンズに向かって  $l_1 - f_1$  だけ移動させることにより対物レンズから出たイメージをコリメートすることが可能となる．

二つ目の凸レンズの場合，一つ目の凸レンズを通してコリメートされた光が CCD カ



(a) Alignment of the first lens

(b) Lens alignment for FFP and the infrared image of each place

Fig. 4.10 : Lens alignment for FFP using collimated fiber.

メラ上に焦点が存在するように配置すれば良い. Fig. 4.10(b)に  $NA=0.65$  の対物レンズと  $f_1=6\text{cm}$ ,  $f_2=10\text{cm}$  の凸レンズで構成された光学系と, 点線で示された場所で CCD カメラにより撮られたイメージを示す.

最初の凸レンズと二番目の凸レンズとの距離は遠くなると最初レンズでコリメートされたイメージの一部が二番目のレンズに入られなくなる. これは広角成分の強度を低くし, 精密な測定を妨げるため, 注意する必要がある.

デバイスの測定では, 使用された光学部品と測定系を考慮したとき, 使用可能な最大レンズ径が 2 インチであったため, 2 インチの凸レンズを使用した. レンズの NA が大きくなるとレンズの解像度が上がり, より鮮明な像が得られると期待される.

CCD カメラから測定されたイメージは各ピクセルでの光強度 (カウント数) で表示されており, 角度の情報が表示されていない. デバイスの本測定を行う前に, ピクセルと角度の関係を把握するために, 角度校正を行う. コリメートされたファイバを回転治具に乗せ, ファイバを回転させたときの像が移動したピクセル数を計算することで, 一つのピクセル当たりの角度を計算する.  $0^\circ$  の場合のピーク座標を  $(x_0, y_0)$ ,  $10^\circ$  の場合の

ピーク座標を $(x_1, y_1)$ とすると  $10^\circ$ に対するピクセル値は $\sqrt{(x_1 - x_0)^2 + (y_1 - y_0)^2}$ となる。この関係により求められた  $10^\circ$ に対するピクセル値は、48.1 ピクセルとなった。

#### 4.4 フェーズドアレイ光偏向素子の FFP 測定

作製された光偏向素子を、FFP 光学系を用いて測定する。まずは、参照データとして利用するために、浜松ホトニクス社製の FFP 測定システム[48]を用いて測定を行い、その後、4.3 で説明した光学系を用いて測定を行った。

##### 4.4.1 デバイスの FFP 確認

浜松ホトニクス社製の FFP 測定システムを用いた FFP 測定系を Fig. 4.11 に示す。Fig. 4.11 の FFP 光学系では、対物レンズの代わりに  $f-\theta$  レンズを用いて FFP を形成し、このイメージをフィールドレンズ、リレーレンズを用いて CCD カメラに映し、映されたイメージは解析ソフト LEPAS12 [48]で観察した。測定には導波路アレイの数 ( $n$ ) が 6 の光偏向素子を使用した。位相変調を行ってないときのデバイスの FFP を Fig. 4.12(a) に示す。曲線導波路から漏れた光による影響とサイドローブも観察されたが、

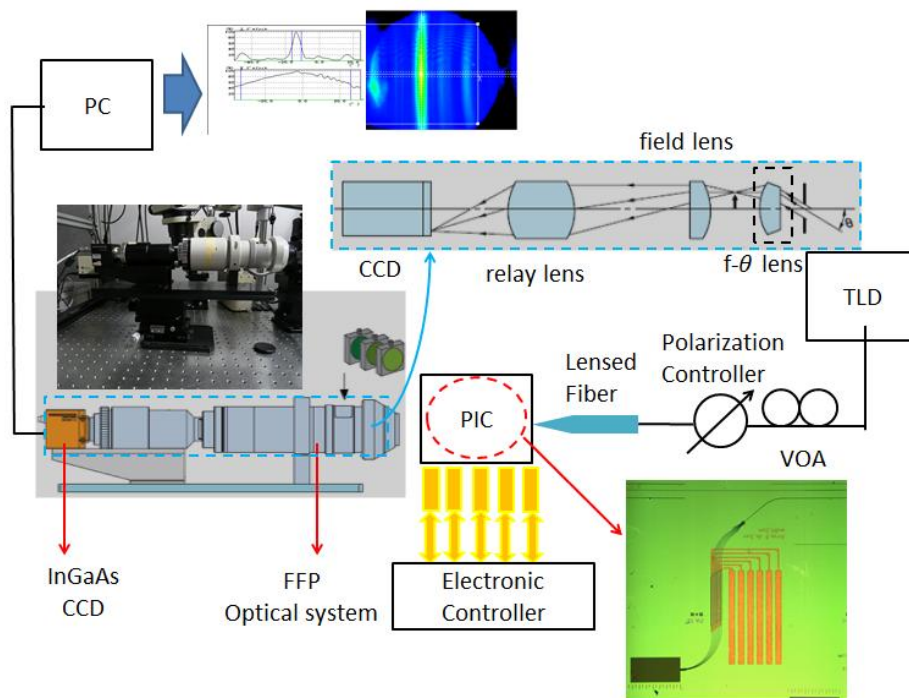


Fig. 4.11 : FFP measurement setup for reference data.

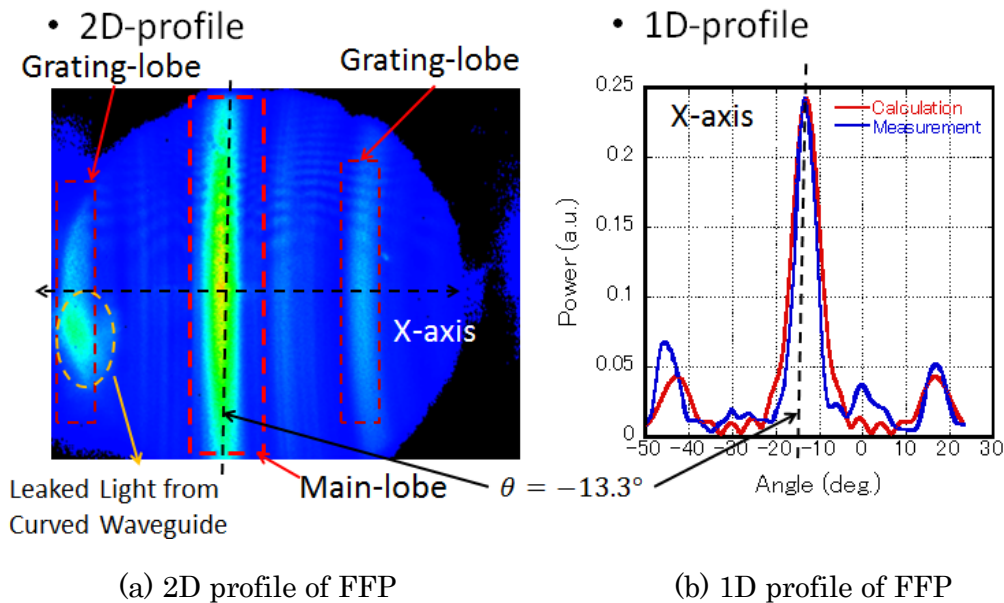


Fig. 4.12 : FFP measurement results and comparison with calculation results.

画像の中心部に高強度のメインローブが存在し、その両辺に、グレーティングローブが存在する。FFP の縦方向は、出射端の NA に応じて広がるので、縦方向に対しては長くなる。結局、重要となる情報は横方向となるので、横方向プロファイルを解析した。Fig. 4.12(a)に示した部分のプロファイルを示したのが、Fig. 4.12(b)となる。光学系のレンズの面とデバイスの出射端面が完全な平行になってないため、メインローブの位置が角度の中心から $-13.3^\circ$ 離れていた。また、メインローブから  $31.3^\circ$ 、 $-32.4^\circ$ 離れたところにグレーティングローブが存在することが確認された。

BPM を用いて計算された結果が Fig. 4.12(b)の赤線のグラフとなる。デバイスの作製誤差、導波路から光漏れなどにより計算結果とは異なる部分も存在するが、計算結果は実験の結果とよく一致しており、正しい FFP 測定ができていることと、素子が設計どおり作製されたことが確認できた。

次は、各電極に電圧をかけ、位相変調を行った。Labview [49]を用いて作成された電圧印加プログラムを用いてドライバボードに信号を送り、電極に電圧を印加した。ある点でメインローブが形成されるように手動で電圧値を調整する。その結果を Fig. 4.13 に示す。手動で電圧の値を調整することにより-偏向される様子が確認された。本来、偏向角度をより精密に調整するために、フェーズドアレイの印加電圧は出力光の状態を観察しながら自動フィードバック制御を行うことで最適化されるが(Fig. 4.14), この測定系では出力のデータを抽出してフィードバックさせることができなかったため、今回は手動での電圧調整による基礎的な検討のみとした。

この測定により、デバイスの FFP が確認され、位相変調による偏向が確認された。

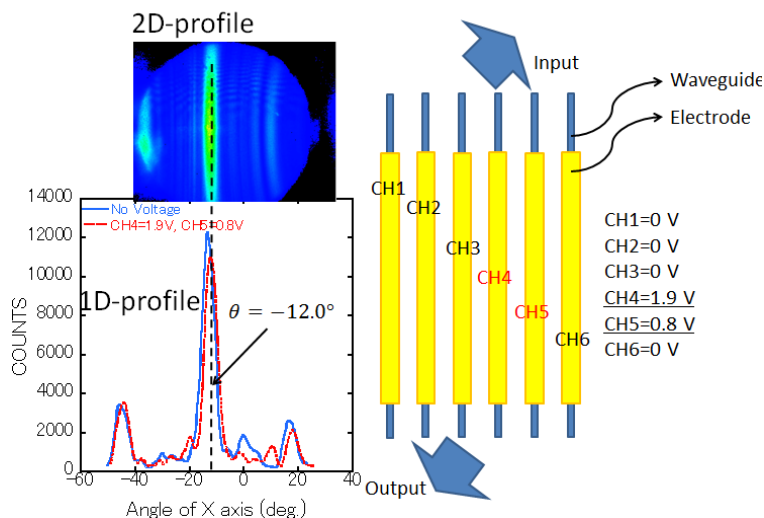


Fig. 4.13 : Beam steering in the Fig. 4.11 setup.

下記からは自作された光学系とリニアな角度変化が観察可能な測定プログラムを用い、より精密な偏向測定を行った。

#### 4.4.2 位相変調プログラムの作成

作製誤差などにより生じるデバイスの位相エラー [50]を補正し、偏向角度をより精密に調整するために、LEPAS12 DLL [49]とLABVIEWを用い、Fig. 4.14 のアルゴリズムを持つ測定プログラムを作成した。位相変調量と電流量の関係を把握し、位相変調量に応じた電流を入れても、位相変調部以外で起こる位相変化により、計算通りの位相変調はできない。そこで、より精密に偏向させるためには、出力光の状態を観察しながら自動フィードバック制御を行う最適化が必要となる。Fig. 4.14 はこのような最適化を行うアルゴリズムである。まず、観察したい場所の座標(x,y)を入力するとその場所での光強度が表示される。その後、指定されたボード ( $n_1$ ) に接続し、そのボードで指定されたチャンネル( $m_{n_1}$ )に接続する。各チャンネルはデバイス上の各電極へ接続されており、 $m_{n_1}$ に  $V_{min}$  から  $V_{max}$  まで、 $\Delta V$  間隔にバイアス電圧を印加し、その時の(x,y)での光強度をモニタする。この際、(x,y)での光強度が最大になる電圧値を $m_{n_1}$ への印加電圧として決め、 $m_{n_1}$ では、その印加電圧を維持する。同様な作業を全てのボード、チャンネルで行うことで、(x,y)への偏向が可能となる。また、このアルゴリズムを使用すると作製誤差によるデバイスの位相エラーを補正することも可能となる。下記からは Fig. 4.15 に示す自動フィードバック制御が可能となる測定系を構成し、作成された位相変調プログラムを使用して測定を行った。

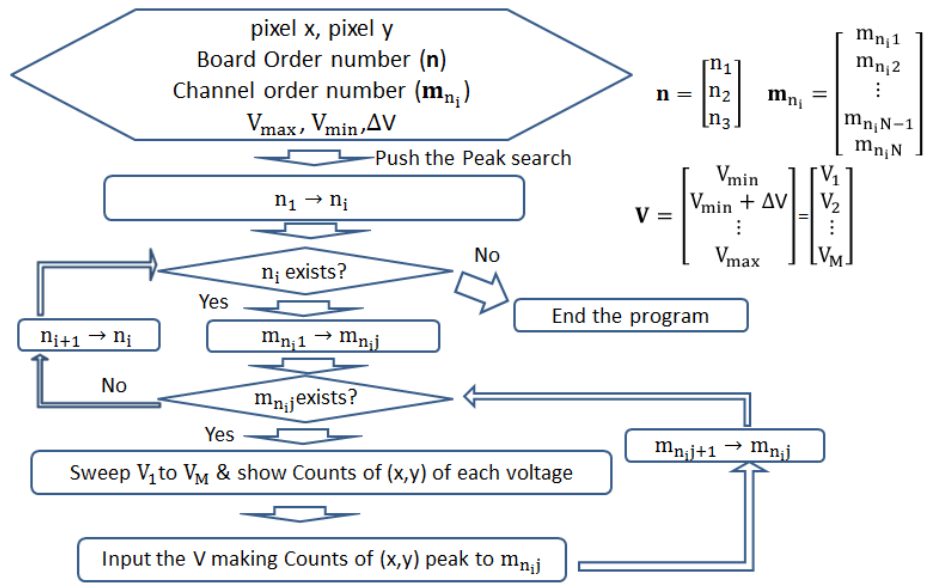


Fig. 4.14 : The algorithm of voltage determination for optical beam steering.

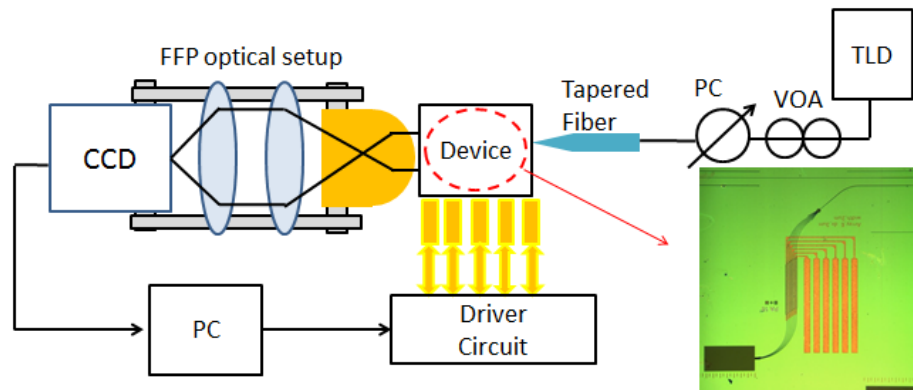


Fig. 4.15 : The measurement setup for feedback control.

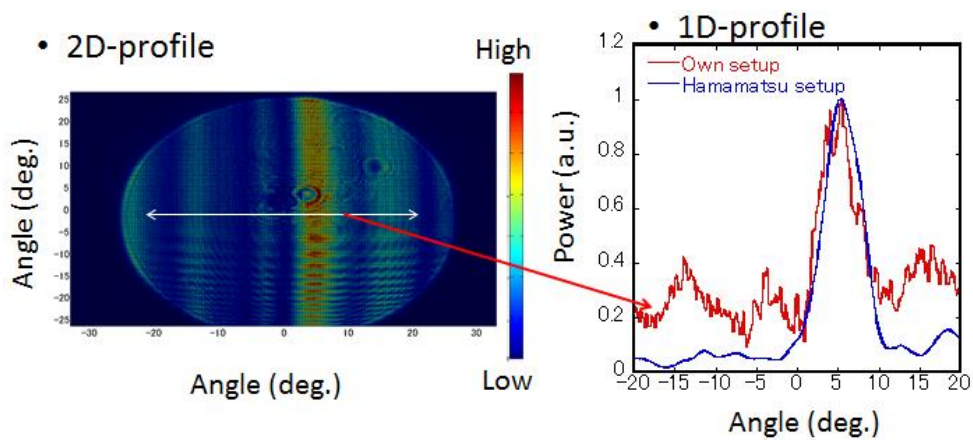


Fig. 4.16 : FFP of the PA optical beam steering device in the fabricated optical setup.



### 4.4.3 二つの FFP 光学系の比較

対物レンズと二つの凸レンズから構成された FFP 光学系を用いて測定を行った。まずは、位相補正を行ってないときの FFP イメージを観察し、4.4.1 の測定結果との比較を行った。2 インチ凸レンズを使用し、導波路アレイ数が 6 個の光偏向素子の測定結果を Fig. 4.16 に示す。図より、自作した光学系を用いてデバイスの FFP が観察された。画像に表れている干渉縞などの像の乱れはレンズの傷や埃などに起因していると考えられる。また、4.4.1 の測定結果に比べ、サイドローブの強度が増加されていることが確認できた。対出射端と対物レンズとの距離が  $WD(=0.2 \text{ mm})$  より大きいことや、対物レンズの傷、レンズ径の大きさなどがその原因と考えられ、レンズの最適化によって改善が可能である。

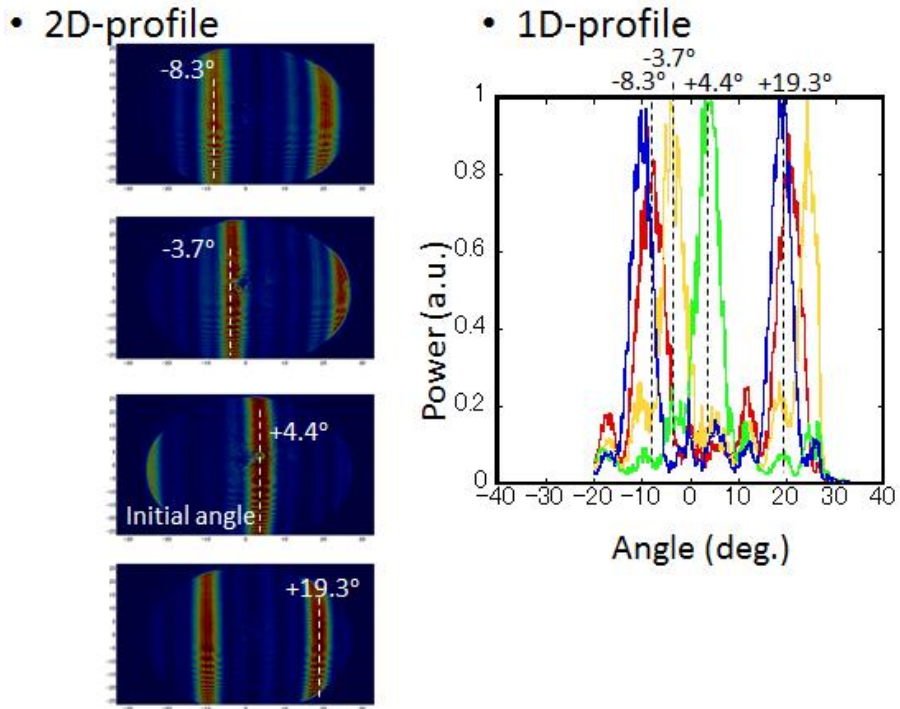
### 4.4.4 フェーズドアレイ光偏向素子の偏向特性評価

次に、デバイスの偏向測定を行う。2 インチ凸レンズと対物レンズより構成された FFP 光学系を使用し、x 方向に対して偏向を行って得られた結果を Fig. 4.17 に示す。Fig. 4.17 により位相変調による光偏向が確認される。偏向角度が大きくなると、グレーティングローブの強度大きくなり、各導波路アレイ間の位相差  $\Delta\phi=\pi$  となる角度でメインローブと等しい強度を持つ。その角度以上偏向するとグレーティングローブの強度がメインローブより大きくなる。しかし、導波路アレイが 6 個の光偏向素子の場合、偏向角度が小さい場合でもグレーティングローブとメインローブとの強度間に大きな差が見えない。この原因として、導波路アレイの数が少ないため精密な位相変調ができなかったことが考えられる。実際に Fig. 4.16(b) に示した導波路アレイが 14 個の光偏向素子の場合、上記のような強度関係がより鮮明に確認される。

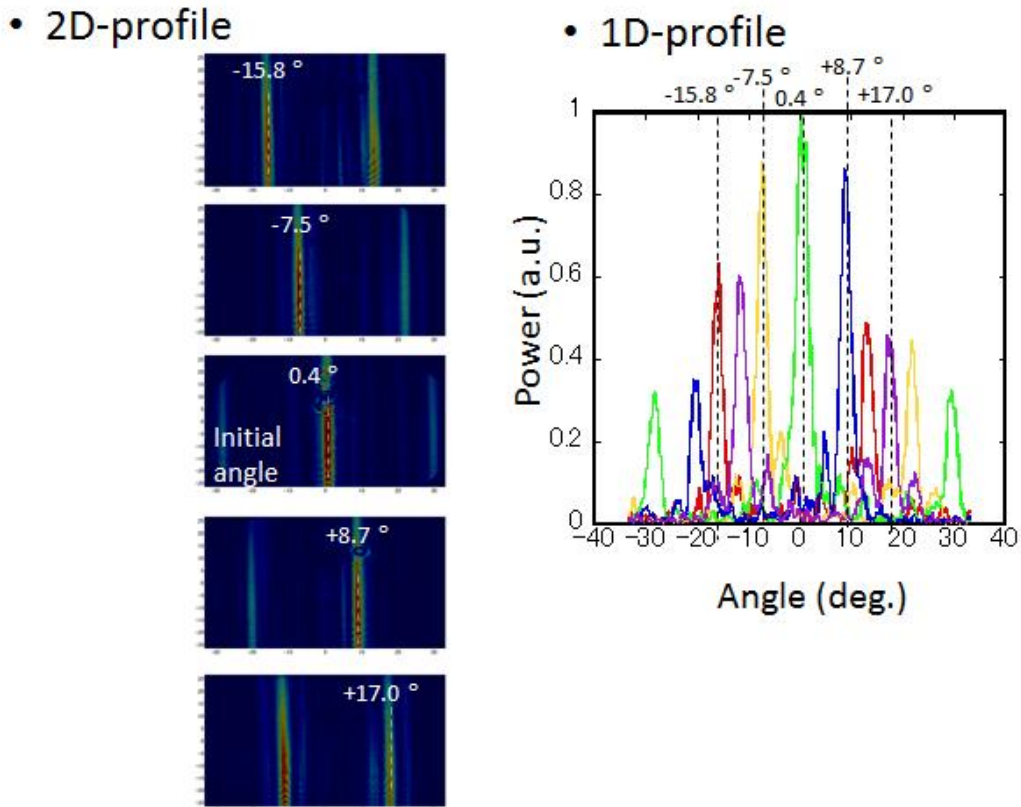
導波路アレイの数は第 2 章で述べたようにメインローブの半値幅にも影響を及ぼす。最初角度でのメインローブの半値幅は導波路アレイ 6 個の場合、約  $4.6^\circ$  であるのに対し、導波路アレイ 14 個の場合は約  $2.5^\circ$  となる。これらの結果により、より解像度の高い光偏向には導波路アレイ 14 個の方が適切であると考えられる。

### 4.4.5 フェーズドアレイ光偏向素子の波長依存性

波長を 1530 nm から 1570 nm まで変化させて得られた測定結果を Fig. 4.18 に示す。位相制御せず、波長を変えた時、導波路アレイの数が 6 個の場合、メインローブは  $2.3^\circ$  移動し、14 個の場合、 $4.8^\circ$  移動した。しかし、位相が制御された状態で波長を変えると変化は小さくなり、特に導波路アレイ数が 14 個の場合、 $0.8^\circ$  となった。デバイスの

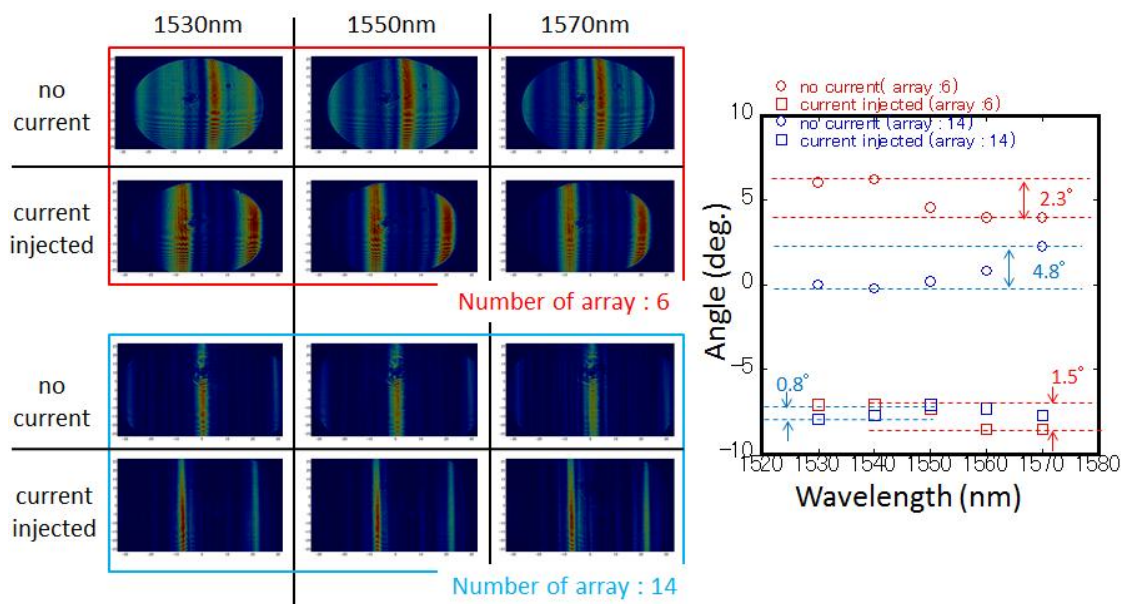


(a) FFP of the PA optical beam steering device having 6 waveguide arrays



(b) FFP of the optical beam steering device having 14 waveguide arrays

Fig. 4.17 : Beam steering device of the fabricated PA optical beam steering device.



(a) FFP of the different wavelength

(b) Main lobe peak shift

Fig. 4.18 : The wavelength dependency of the PA optical beam steering device.

位相エラーで生じた位相差の影響で、位相制御されてない時、サイドローブの変化やメインローブの移動が多少大きくなると思われる。しかし、位相変調により、各導波路アレイ間での位相を補正された最適条件下で、波長を変えるとその変化が小さくなった。実際の使用を考えると、位相制御された場合での波長依存性が重要となり、Fig. 4.18の結果より作製された素子のCバンド帯内(1530 nm~1565 nm)での低波長依存性が確認された。また、この低波長依存性は、フェーズドアレイ光偏向素子の設計方針となる[32]から作製されたフェーズドアレイ光スイッチ[51]の低波長依存性と一致すると考えられる。

#### 4.6 第4章のまとめ

作製されたフェーズドアレイ光偏向素子の伝搬損、IV特性などを含めた基礎特性評価を行い、FFP光学系を用いてデバイスの偏向特性、波長依存性などを測定した。基礎特性測定により、0.66 dB/mmの直線道路伝搬損が得られ、ダイオード特性が確認された。また、製作されたFFP光学系を用いて、デバイスの偏向様子を確認し、導波路アレイ数の影響も確認した。導波路アレイ数が多くなるとメインローブの半値幅が小さくなり、サイドローブも低減され、より精密な偏向が可能となった。最後に、波長依存性測定を行い、位相制御された状態で、デバイスの低波長依存性を確認した。



## 第 5 章 斜めエッチングを用いた垂直出射型光カプラ

この章では、斜めエッチングより形成された反射ミラーを用いた垂直出射型光カプラの設計、製作、そして評価について述べる。

### 5.1. デバイスの設計

まず、固有モード展開法 (EME method : Eigen-Mode Expansion method)を用いて斜め反射ミラーの角度と出射光の強度との関係を確認する。また、斜めエッチング時に傾斜面があるアルミニウム治具が使用されるので、有限要素法 (FEM : Finite Element Method) を用いてエッチングチャンバー内での電界分布の様子を確認する。

#### 5.1.1. 固有モード展開法

光の伝搬方向を  $z$  とし、Fig. 5.1 のように領域を分割し、分割された領域内では  $z$  方向に対して屈折率が一様と仮定する。この領域内を伝搬する電界は次のように表される。

$$E(x, y, z) = e_m(x, y)e^{i\beta_m z} \quad \text{Eq. (5.1)}$$

すなわち  $e_m(x, y)$  の 2 次元分布を持った電界 (または磁界) が伝搬定数  $\beta_m$  に従って  $z$  方向に伝搬する。この  $e_m(x, y)$  および伝搬定数  $\beta_m$  はそれぞれ 2 次元 ( $x, y$  平面) の屈折率分布より定義される波動方程式の固有関数および固有値として求めることができる。これは 2 次元の固有モードを解析する際に用いられるが、それに加えて  $z$  方向への伝搬を考慮した位相の項を付加し、定義された 3 次元構造に対して逐次計算によって電界の伝搬を計算することが可能となる。このような計算の手法を固有モード展開 (Eigenmode expansion) 法と呼ぶ。BPM が一方向のみの伝搬解析であるのに対して、 $z$  軸の伝搬として  $\exp(j\beta z)$  と  $\exp(-j\beta z)$  を考慮することで逆伝搬についても解析が可能である特徴を持つが、固有モードが計算できる構造にしか適用できないという欠点もある。Eq. (5.1) より得られたモードはシンプルな  $z$  依存性を持つことが分かる。そのため、 $z$  方向に緩やかに変化する構造体での解析には、固有モード展開法が効果的である。

リニアに変化する構造体でのマックスウェル方程式の解は進行波と後退波の和として表現することができる。それを式として表すと次式のようになる。

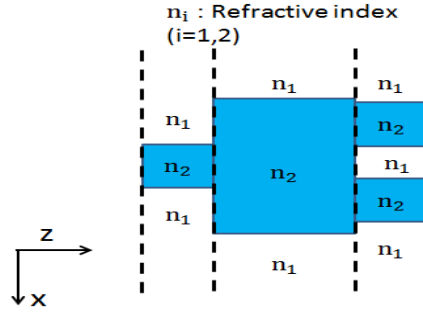


Fig. 5.1 : The structure representation in EME method.

$$\mathbf{E}(x, y, z) = \sum_{k=1}^M (a_k e^{i\beta_k z} + b_k e^{-i\beta_k z}) \mathbf{E}_k(x, y) \quad \text{: electric field} \quad \text{Eq. (5.2)}$$

$$\mathbf{H}(x, y, z) = \sum_{k=1}^M (a_k e^{i\beta_k z} - b_k e^{-i\beta_k z}) \mathbf{H}_k(x, y) \quad \text{: magnetic field} \quad \text{Eq. (5.3)}$$

$a_k$  : Forward amplitude,  $b_k$  : Backward amplitude,  $\beta_k$  : Propagation constant,  $\mathbf{E}_k(x, y)$  : Mode profile of electric field,  $\mathbf{H}_k(x, y)$  : Mode profile of magnetic field

これらの式を用いて隣接する二つの領域の境界での解析について説明する. Fig. 5.2 に示したように領域 a での進行波の振幅を  $a_k^+$ , 後退波の振幅を  $a_k^-$  とし, 同様に領域 b での進行波の振幅を  $b_k^+$ , 後退波の振幅を  $b_k^-$  とすると二つの領域の境界では, マックスウェルの連続条件を満たす. つまり, Eq. (5.4) のように両側の電界のタンジェント成分が等しくならないといけなく, 電界と磁界の間には, Eq. (5.5) のような正規直交性が成り立つ.

$$\sum_{k=1}^M (a_k^+ e^{i\beta_k z} - a_k^- e^{-i\beta_k z}) \mathbf{E}_{k,t}^a(x, y) = \sum_{k=1}^M (b_k^+ e^{i\beta_k z} - b_k^- e^{-i\beta_k z}) \mathbf{E}_{k,t}^b(x, y) \quad \text{Eq. (5.4)}$$

$$\int (\mathbf{E}_{x,j} \mathbf{H}_{y,k} - \mathbf{E}_{y,j} \mathbf{H}_{x,k}) \cdot d\mathbf{S} = \delta_{jk} \quad \text{Eq. (5.5)}$$

Eq. (5.4) と Eq. (5.5) を用いると Eq. (5.6) に表した分散行列  $S_J$  が求まり, この  $S_J$  を求めることで異なる二つの領域での電界が計算できる.

$$\begin{bmatrix} \mathbf{a}^- \\ \mathbf{b}^+ \end{bmatrix} = S_J \begin{bmatrix} \mathbf{a}^+ \\ \mathbf{b}^- \end{bmatrix} \quad \text{Eq. (5.6)}$$

これらの式では,  $z$  方向に伝搬するという仮定のみ使用し, 方程式を計算する際, 近似が使用されていないためマックスウェルの方程式の厳密解と言える. しかし, 数値計算で固有モード展開法を行う場合には, 有限のモードで計算が行われる. より高次のモードを含めて計算すると計算の精度は高くなるが, 計算時間が長くなる. 固有モード展開法は進行波と後退波が両方含まれているため, 反射が計算でき, 分散行列を用いる手法

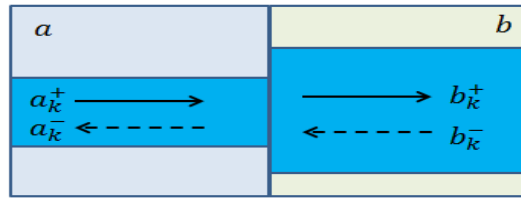


Fig. 5.2 : The relationship of mode coefficients at a join

は全ての入力に対して解を提供するが、計算する領域が大きくなると計算時間が長くなるので、小さな領域での解析に良く用いられる [52].

本研究では、固有モード展開法解析に [33] の ModePROP を使用する。このソフトでは、伝搬方向に垂直な方向の解析にフーリエ級数展開を使用する。フーリエ級数展開をマックスウェルの方程式に代入することで効果的に固有値を求める。

### 5.1.2. 固有モード展開法を用いたデバイスの断面構造解析

Fig. 5.3 に示す垂直出射光カプラの断面構造の解析を 2 次元固有モード展開法で行う。幅 500 nm のコア層の上下に厚さ 1.05  $\mu\text{m}$  のクラッドが設けられ、更に上部のクラッド上に反射防止膜の役割をする  $\text{SiO}_2$  があるスラブ導波路を想定し、出射するところに斜めにエッチングされた反射ミラーを導入する。導波路の左端に導波路の固有モードと同じ入力光を定義し、反射ミラー透過光，垂直出射光，導波路への反射光の強度を計算した。このモデルで得られたシミュレーション結果を Fig. 5.4 に示す。

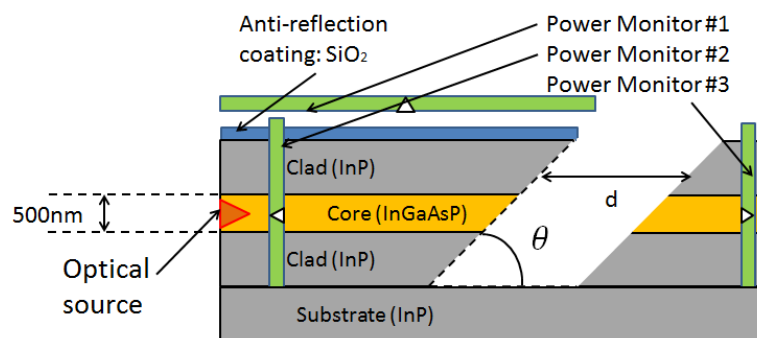


Fig. 5.3 : The simulation model.

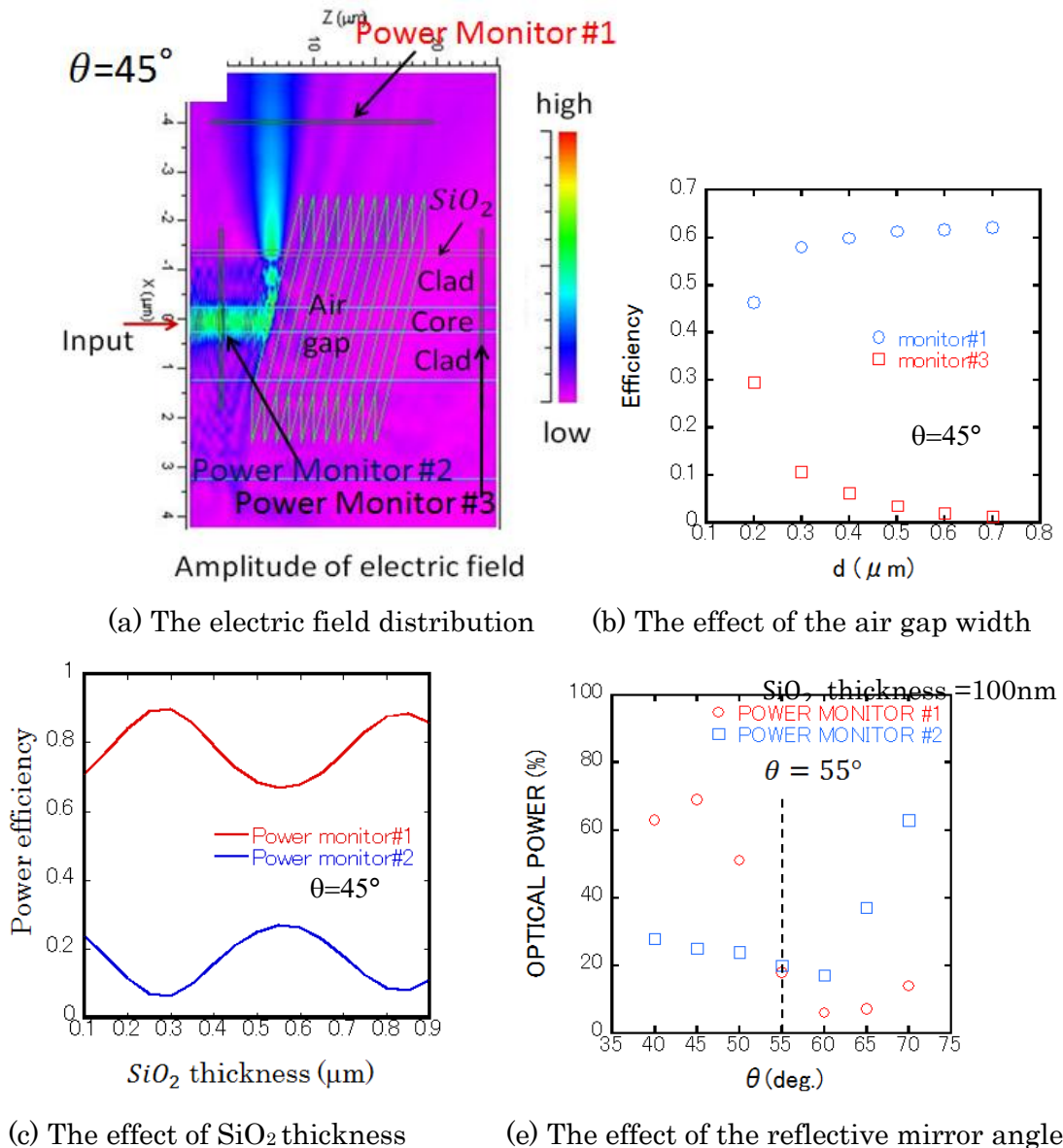


Fig. 5.4 : The simulation results of the device.

Fig. 5.4(a)は電界分布の様子を表しており、この結果より、導波路内の光が反射ミラーで反射され、基板に対して垂直な方向へ出射されることが確認できる。この際、斜めエッチングされた領域の幅  $d$  は垂直方向へ出射される光の強度に影響を及ぼす。(SiO<sub>2</sub>膜がない場合、)その関係を示したグラフが Fig. 5.4(b)となる。 $d$  が小さい場合では、反射ミラーでのエバネッセント波が反射ミラー後の導波路と結合するため、垂直出射されず透過する成分の光強度が大きくなり、 $d=0.7 \mu\text{m}$  で  $d$  に対する変化が十分小さくなる。このことから、斜め反射ミラーの構造をグレーティングカップラとして使用する場合は  $d$  を  $0.7 \mu\text{m}$  以下にする必要があるが、単反射ミラーで効率的に垂直方向へ光を出射させるためには、 $d$  を  $0.7 \mu\text{m}$  以上にする必要がある



反射ミラーから反射された光の一部は導波路の空気との境界で反射され、入力導波路方向へ戻ってしまう。これは上部クラッド上に  $\text{SiO}_2$  を設けることで低減することができる。  $\text{SiO}_2$  の厚みの影響を示したグラフが Fig. 5.4(c)である。多層膜干渉により各パワーモニタでの光強度は  $\text{SiO}_2$  の厚みに対して周期的な値を持ち、  $\text{SiO}_2$  の厚みが 300 nm のとき、約 90%の光が垂直方向へ出射され、導波路へ反射される光は 7%以下まで低減できる。今回の計算では  $\text{SiO}_2$  単層のみを扱ったが、屈折率の異なる  $\text{SiN}_x$  などの材料と組み合わせた多層膜とすることで、さらなる特性改善が期待できる。

反射ミラー角度 $\theta$ も各パワーモニタでの光強度に大きな影響を及ぼす。 $\theta$ が大きくなると導波路方向へ反射される光の成分が多くなる。そのため、垂直方向への光強度が減り、入力導波路方向への光強度が増加する。その関係を示したグラフが Fig. 5.4(d)である。パワーモニタ#1 で光強度は $\theta$ が  $45^\circ$ のとき最大となり、  $55^\circ$ 以上になると急激に低下する。そのため、垂直出射光カプラとして使用するには、 $\theta$ を  $55^\circ$ 以下にする必要がある。

### 5.1.3. 有限要素法を用いた静電界の解法

有限要素法では、有限要素 (Finite element) で領域を細かく分割し、各要素で計算されたエネルギーの総和が最小になるような条件を求める [53]。このような有限要素法を用い、2次元の誘電率分布があつて境界での電圧値が与えられたとき、ポアソン方程式に基づいて電界分布を計算する。この際、斜めの構造があるため、差分法による三角メッシュの要素法が適していると考え、三角メッシュを使用した。

有限要素法に基づいたソフト [54]を用いて、斜めエッチングする際のチャンバ内部の電気力線を計算する。

### 5.1.4. 有限要素法を用いたチャンバ内部の電気力線計算

対向する傾斜金属治具を用い、ドライエッチングすることで斜め端面の作製が可能となる [55]。しかし、Si ウェハ上に治具を配置するため、質量の重い金属治具を使用すると Si ウェハが割れてしまう恐れがある。そこで、垂直出射光カプラの斜め導波路端面を形成するのに当たって、軽くて安価の Al 治具を使用した。モデルを簡略化するために、Fig. 5.5(a)のような平行平板型 RIE を想定し、対向する Al 製  $45^\circ$ 斜め治具と InP サンプルを設置し、RIE 上面に 100 V、Al 治具下方の基板を接地して計算を行う。下面の境界は設置された Si ウェハを想定し、誘電率は Al=1000000、InP=10.9、Si=12.1 とし、領域の大きさは Fig. 5.5(a)のように設定する。

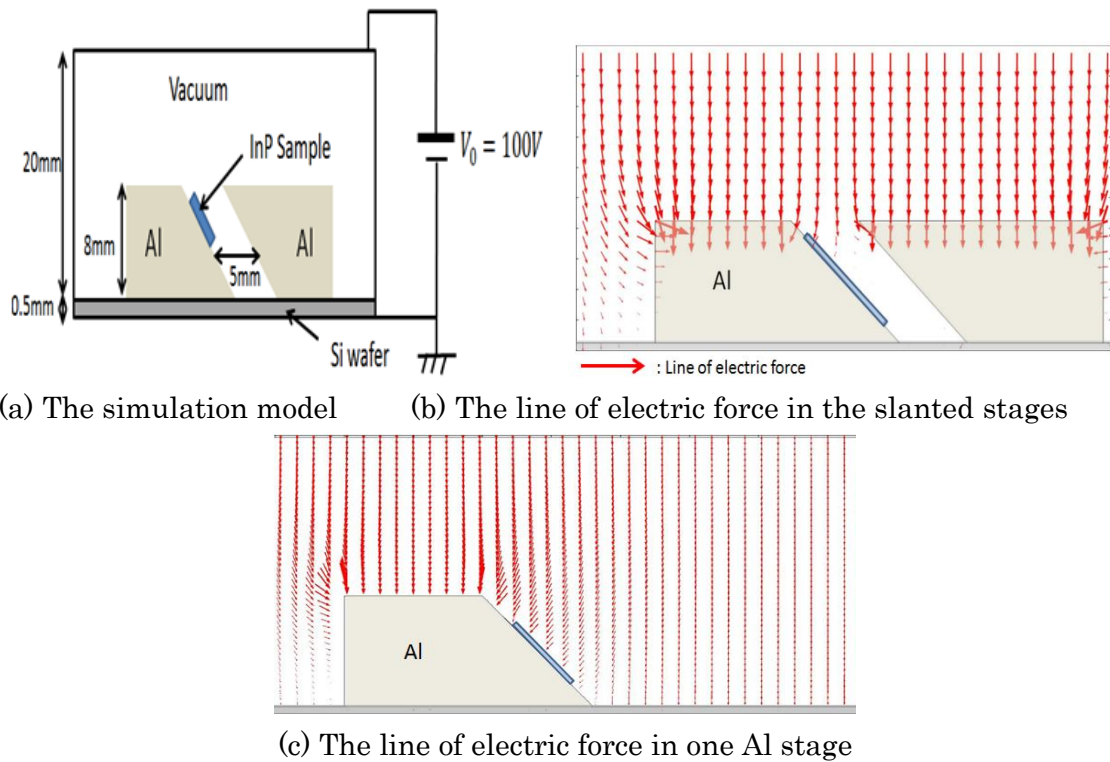


Fig. 5.5 : The effect of Al stages in the etching chamber.

Fig. 5.5(b)は Fig. 5.5(a)のモデルを用いて得られた電気力線の分布であり, Fig. 5.5(c)は一つの治具のみ使用した時の電気力線分布である. 金属である Al 治具を使用するため, 治具周辺での電気力線は治具の方に曲げられる. そのため, 治具を一つのみ使用すると反応性分子が基板に対して垂直に衝突する. しかし, 対向した Al 治具を設置すると反応性分子は対向した治具に曲げられ, 吸収される. 結局, 垂直方向へエネルギーを持った反応性分子が基板に衝突するようになり, その結果として斜めエッチングが可能となる. また, 治具の下部に行くほど, 電気力線の遮蔽効果が大きいため, Fig. 5.3の $\theta$ が小さくなると予想される.

## 5.2. 作製プロセス

使用するウェハの層構造は Table. 2.1 と同様であるが, コア層は InGaAsP Q1.37 より伝搬損が小さい InGaAsP Q1.3 を使用した. フォトマスクの作製から始め, ウェハウェットエッチング, スパッタ, ドライエッチングまでの作製工程により垂直出射光カプラを作製した.

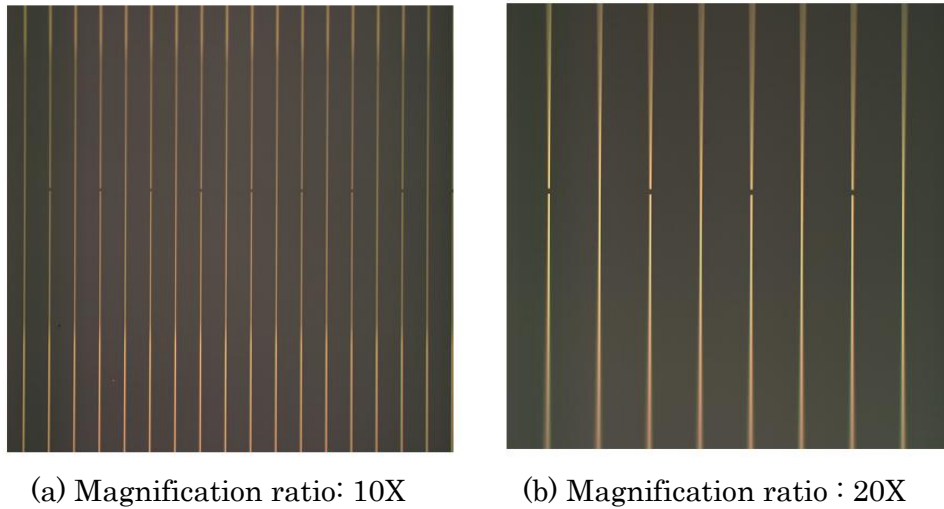


Fig. 5.6 : Fabricated photo mask.

### 5.2.1. フォトマスクの作製

フォトリソグラフィの際、使用するフォトマスクを作製する。反射ミラーを形成するためには、Fig. 5.3 のような長さ  $d$  のギャップが必要となる。本デバイスの作製では、 $d$  はシミュレーション結果により  $0.7 \mu\text{m}$  以上必要となるが、出射端ファイバとの位置調整を用意を行うために、本作製では、 $10 \mu\text{m}$  とした。フォトマスクのパターンとしてギャップが入った直線導波路とギャップが入ってない直線導波路を用意し、直線導波路は  $100 \mu\text{m}$  間隔で配列した。ギャップがない直線導波路は伝搬損を計算する際に使用する。このようにデザインされたパターンを用いて EB リソグラフィによりフォトマスクを作製した。Fig. 5.6 に作製されたフォトマスクのレーザ顕微鏡写真を示す。

### 5.2.2. InGaAs の除去

p-InGaAs は電極とオーミックなコンタクトを形成する役割をするが、吸収係数が大きい。今回作製する垂直出射光カプラでは電流注入する必要がないので、はじめにウェットエッチングにより、p-InGaAs を除去した。  $\text{H}_2\text{SO}_4$  と  $\text{H}_2\text{O}_2$  と純水を 1:1:5 の割合で混合し、 $5^\circ\text{C}$  に保った薬液でエッチングを行った。この溶液に劈開したウェハを入れ、約 40 秒間ウェットエッチングを行う。エッチングする際に表面の色が変化していくので、p-InGaAs がエッチングされる様子が確認できる。今回はパターンなしで基板の InGaAs をすべて除去するので、エッチング時間は十分長くして完全に InGaAs を除去できるようにした。ただし、パターンがある場合はアンダーカットの進行が速いため、エッチングしすぎないように注意する必要がある。エッチング終了後、表面の状態を確認した後、次のステップであるスパッタを行う。

### 5.2.3. SiO<sub>2</sub>膜の形成

SiO<sub>2</sub>膜は、光学的には上記のように反射防止膜の役割をするが、作製プロセスではドライエッチング時のハードマスクとするため、ドライエッチングからパターンが保護できる厚さにしないとイケない。特に、治具の遮蔽効果より、治具の下部での InP/SiO<sub>2</sub> 選択比は通常より小さくなる。そのため、治具のない時に比べ、長時間エッチングを行い、治具上部のパターンを保護するためにはハードマスクを厚くする必要がある。本研究では、厚みを 1.3 μm に設定し、20 分以上のドライエッチングに耐えられるようにした。スパッタリングにより SiO<sub>2</sub>膜を形成するが、この際、ハードマスクの膜質を高めるために 120℃に加熱した状態で 130 分間スパッタリングを行う。これにより、約 1.3 μm の SiO<sub>2</sub>を製膜した。

### 5.2.4. 導波路パターン形成

フォトリソグラフィにより導波路パターンを形成した。フォトレジスト TSMR8900 を、500 rpm で 5 秒、6000 rpm で 60 秒の条件でスピンコーティングした。塗布したレジストを固めるために、110℃で 90 秒間プリベークを行った。アセトンでエッジビードを除去したのち、先述のフォトマスクを用いて露光を行った。露光が終わったウェハは NMD3 で 27 秒現像を行い、純水で 2 回リンスを行った。現像されたパターンを顕微鏡で確認し、110℃でポストベークを行った。SiO<sub>2</sub>ドライエッチングは低ソースパワーで 40 分以上行うので、レジストのエッチング耐性を十分高める必要がある。ポストベークを行うことでエッチング耐性が高くなるため、5 分程度行う。

### 5.2.5. SiO<sub>2</sub>のドライエッチング

導波路パターンが形成されたウェハに、ICP-RIE を用いて、Table. 5.1 の条件で SiO<sub>2</sub>のエッチングを 60 分行った。エッチング後に顕微鏡で表面の状態を確認しながら、必要に応じて追加のエッチングを行った。SiO<sub>2</sub>のドライエッチングが終了後残ったレジストは Table. 5.1 に示した O<sub>2</sub>アッシングで除去した。

### 5.2.6. Al 治具の SiO<sub>2</sub>コーティング

Al 治具は Cl<sub>2</sub>ガスを用いた InP ドライエッチングする際、Cl<sub>2</sub>ガスに反応し、反応より生じた副生成物が InP のエッチングを妨げると考えられる。これを防ぐために、Al 治具に EB 蒸着を用いて SiO<sub>2</sub>コーティングを行った。蒸着の前に、研磨剤を用いて Al 治具の表面を平坦にし、アセトン溶液に入れて超音波洗浄に 10 分間かけ、さらに IPA

Table. 5.1 : ICP-RIE condition for each process.

	SiO <sub>2</sub> etching	O <sub>2</sub> ashing	InP etching
Gas pressure (Pa)	1.00	3.00	2.00
He flow rate (sccm)	8.00	8.00	8.00
He inlet time (min.)	0	0	20
O <sub>2</sub> flow rate (sccm)	-	10	-
CHF <sub>3</sub> flow rate (sccm)	5.0	-	-
Cl <sub>2</sub> flow rate (sccm)	-	-	2.00
Ar flow rate (sccm)	5.0	-	8.00
Source power (W)	60	200	140
Bias power (W)	25	0	110
Temperature	Room temperature	Room temperature	260 °C

で洗浄した。表面に残った IPA を拭き取った治具に 2 回の EB 蒸着により、SiO<sub>2</sub> コーティングを行った。Al 全面を覆う必要があるため、複数回の製膜が必要となる。まずは、傾斜面がある部分に厚さ 1.5 μm の SiO<sub>2</sub> を蒸着させた。2 回目の蒸着では、基板を載せない治具のみ裏返し、再び 1.5 μm 蒸着させた。SiO<sub>2</sub> の厚みが厚くなるほど Cl<sub>2</sub> ガスから Al 治具を保護できる時間が長くなるが、製膜時の蒸着源が不足しないように注意を要する。

### 5.2.7. InP のドライエッチング

SiO<sub>2</sub> コーティングされた Al 治具を用い、InP のドライエッチングを行う。InP をエッチングする際、200 °C 以上の高温にしないとエッチングにより生じた副生成物が除去されにくくなる。経験上、InP の最適なエッチング温度は 220 °C である。InP の温度を 220 °C まで上げるためには、Al 治具の温度を 220 °C まで上げる必要がある。放熱用シリコン(熱伝導率 0.96 W/m·K, サンハヤト SCH-30)を Si 基板と Al 治具間に塗ることで、Si 基板と治具間の熱伝導性を高めた。また、実際に Al 治具上面の温度が上昇しているかを確認するため、サーモテープを用いて Al 治具を 220 °C まで温めるために必要なヒータの温度と加熱時間を測定した。実験の結果、ヒータの温度 260 °C の場合、約 20 分間加熱すると治具の温度が 220 °C に達した。これに基づき、InP のドライエッチング時にヒータの温度を 260 °C に設定し、He ガスを Si ウェハの裏に流しながら 20 分間加熱を行った後、Ar/Cl<sub>2</sub> を導入して 22 分 20 秒間 InP のエッチングを行った。

Fig. 5.7 に作製プロセスの模式図を示す。

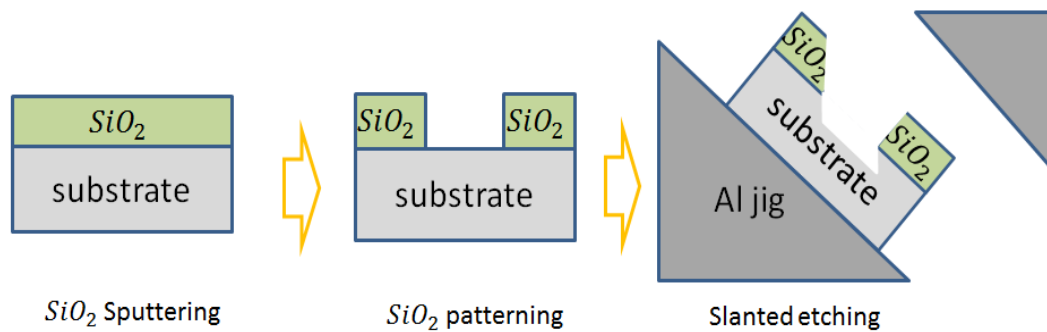
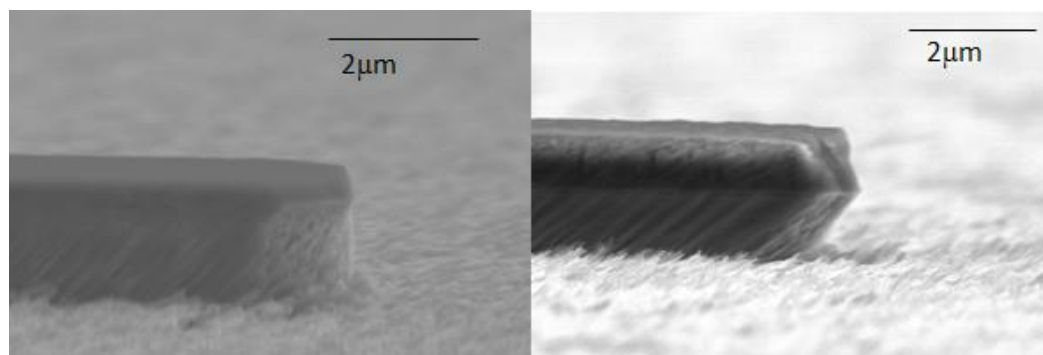


Fig. 5.7 : Slanted waveguide process chart.



(a) The result with no coated jigs                      (b) The result with coated jigs

Fig. 5.8 : The effect of jig coating.

### 5.3. 作製されたデバイスの SEM 写真とパターン配置の影響

Fig. 5.8 に Al 治具を SiO<sub>2</sub> コーティングしたときの結果とコーティングしてないときの結果を示す. SiO<sub>2</sub> コーティングされていない Al 治具を使用すると Fig. 5.9(a)のように Al のエッチングにより生じた副生成物が InP のエッチングに影響を与え, 表面荒れが発生しておりエッチングレートも遅くなった. それに対し, SiO<sub>2</sub> コーティングで Al 治具を保護するとこの影響を抑制させることが可能となり, Fig. 5.8(b)のような表面荒れの少ない斜めエッチング面が得られた.

5.1.4 で書いたように治具下部では, 治具の遮蔽効果が大きく, 治具上部では, その効果が小さい. この差は斜めエッチングする際のエッチング深さとエッチングされた面の角度 $\theta$ に影響を与える. Fig. 5.9 にパターンの配置と各位置で得られたパターンの SEM 写真を示す. Fig. 5.9 より全てパターンに斜めの反射ミラーが形成されたことが確認できるが, 治具上部の方の $\theta$ が大きく, エッチング深さも大きいことが確認できる. 各パターンは 1.82 mm 間隔で置かれてある. 治具の一番上部に配置されたパターンからの距離を  $x$  にしたとき, 各パターンでのエッチングレート(D), エッチングされた面

の角度 $\theta$ と  $x$  間の関係を示したのが Fig. 5.10 となる. Fig. 5.10 から分かるように治具上でパターンの配置を調整することで  $D$  と  $\theta$  を制御することができる. Fig. 5.4 より, 垂直出射光カプラとして理想的な角度 $\theta$ は  $45^\circ$ であるが, 作製された $\theta=45^\circ$ のパターンはコア下部のクラッドがエッチングされてないため, 測定には,  $\theta=50^\circ$ のパターンを使用した.

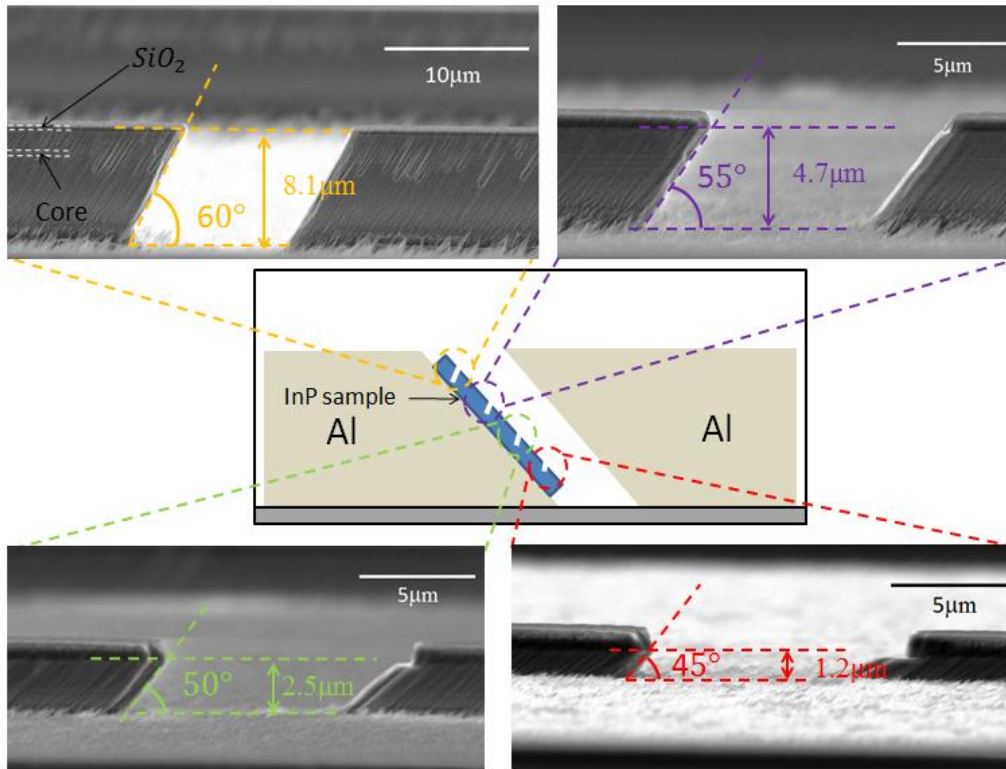


Fig. 5.9 : The SEM images of the fabricated devices on different places.

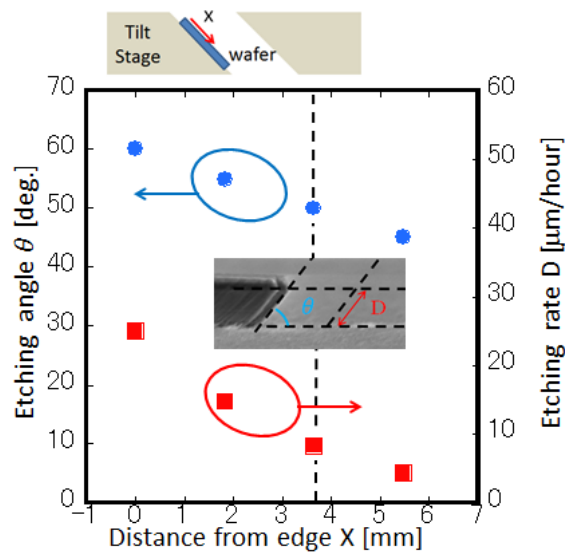


Fig. 5.10 : The effect of pattern place on the Al stages.

### 5.4. デバイスの評価

劈開された $\theta=50^\circ$ 、幅  $3.5 \mu\text{m}$  のパターンを光学測定することにより、デバイスの評価を行った。

#### 5.4.1. 使用された測定系

Fig. 5.11 にデバイスの測定に使用された測定系を示す。波長可変レーザ (Tunable laser diode: TLD) から出射された光を偏波制御器 (Polarization controller: PC) を用いて入力ファイバから TE モードとして出射されるよう調整した。偏波制御器から出た光は光減衰器 (Variable optical attenuator: VOA) により、テーパ SMF から強度 0 dBm で出射されるように調整した。この出射光は幅  $5 \mu\text{m}$  の導波路に入射される。その後、光はテーパ構造より  $3.5 \mu\text{m}$  まで狭めた導波路を伝搬し、斜めの反射ミラーで基板に垂直な方向に反射され、上面に出射される。このとき撮られた赤外線イメージを Fig. 5.11 に示す。左側に見えるスポットは導波路入力部における散乱光であり、右側の大きなスポットが反射され出射された光である。出射された光はテーパ SMF、もしくは、ノーマル SMF に結合され、この光強度は光パワーモニタ (Optical power monitor: OPM) で測定した。

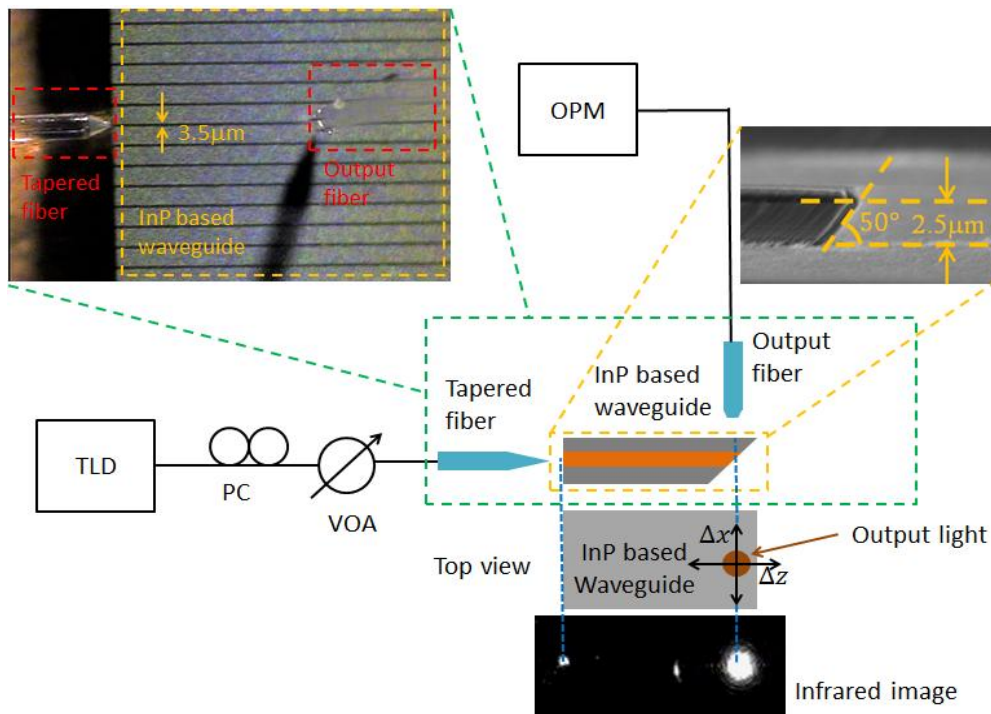


Fig. 5.11 : Optical setup for the optical coupler. TLD : tunable laser diode, PC : polarization controller, VOA : variable optical attenuator, OPM : optical power monitor.



5.4.2. 測定結果及び考察

まずは、作製された幅  $3.5 \mu\text{m}$ 、導波路の伝搬損を Fabry-Pérot 測定法を用いて測定した。垂直出射光カプラ作製用フォトマスクには、Fig. 5.6 に示したようにギャップが入ってあるパターンと入っていないパターンが交互に並んでおり、導波路伝搬損測定には、斜めの反射面が入っていない導波路を用いた。第 4 章で説明した方法と同様な方法で測定を行い、 $1.0 \text{ dB/mm}$  の伝搬損が得られた。作製された導波路は下部のクラッドまでエッチングされたハイメサタイプの導波路であるため側面の荒さの影響を強く受け、第 3 章での光偏向素子の導波路より伝搬損が大きくなったと考えられる。

次に、二種類のファイバを使用し、光カプラのトレランス測定を行った。Fig. 5.11 に示したように出射端のファイバを  $\Delta x$ ,  $\Delta z$  方向に移動させて得られた結果を Fig. 5.12 に示す。テーパ SMF、ノーマル SMF で測定して得られたトレランス結果の半値幅は  $\Delta x$  方向の場合、 $3.3 \mu\text{m}$ ,  $5.5 \mu\text{m}$  であり、 $\Delta z$  方向の場合、 $2.4 \mu\text{m}$ ,  $5.6 \mu\text{m}$  である。また、波長  $1550 \text{ nm}$  での入出力ファイバ間の総損失は、テーパ SMF の場合、 $13.3 \text{ dB}$  であり、ノーマル SMF の場合、 $19.8 \text{ dB}$  であった。先述のように伝搬損は  $1.0 \text{ dB/mm}$  で、入力テーパファイバと入力導波路間の結合損を約  $5 \text{ dB}$  と見積ると光カプラと出力 SMF 間の結合損は、テーパ SMF のとき  $7.3 \text{ dB}$ 、ノーマル SMF のとき  $13.8 \text{ dB}$  となった。ノーマル SMF で測定するとテーパ SMF で測定した時より、トレランス特性が改善されたが、結合効率が悪くなった。これは光カプラのモードサイズとノーマル SMF モードサイズとの差がテーパ SMF の場合より大きいためである。上部クラッド上にレンズ構造を挿入し[56]、モードのサイズを拡大することでノーマル SMF との結合効率が改善されると考えられる。

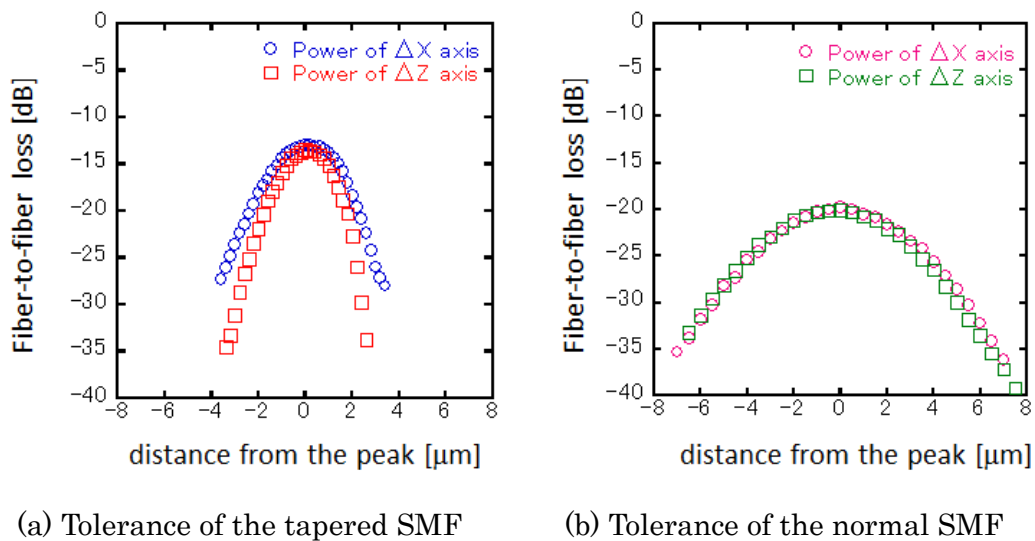


Fig. 5.12 : The tolerance characteristics of the optical coupler.

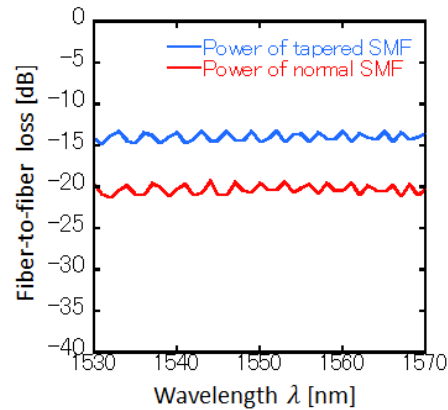


Fig. 5.13 : Wavelength dependency of the fabricated optical coupler.

Fig. 5.13 に光カプラの波長依存性を示す。素子内の Fabry-Pérot 振動に起因する強度の変動が多少みられるが、C バンド帯内での低波長依存性が確認された。

### 5.5. 第 5 章のまとめ

第 5 章では、斜め反射ミラーを用いた垂直出射光カプラについて説明した。固有モード展開法、有限要素法でデバイスの設計および特性評価を行い、対向した Al 治具を用いたドライエッチングによりデバイスを作製した。作製されたデバイスのファイバ間の総損失は出力側のファイバがテーパ-SMF の場合、13.3 dB が得られ、ノーマルファイバの場合、19.8 dB が得られた。また、C バンド帯内で低波長依存性を示した。この光カプラは作製プロセスが簡単であり、光を基板垂直方向へ効率的に結合させることが可能であることが示された。



## 第 6 章 結論

本研究は、高性能光偏向素子の実現を目的とし、InP フェーズドアレイ光スイッチを応用した高速でコンパクトな InP フェーズドアレイ光偏向素子を提案・実証した。さらに、偏向させた光をオフチップ方向に出射させるための構造として斜め反射ミラーを用いた垂直出射光カプラを提案・実証した。

第 2 章から第 4 章までは、面内 1 次元光偏向素子について述べた。直線導波路，曲線導波路，スラブなどを用いて導波路の設計を行い，2 次元ビーム伝搬法を用いて，設計されたデバイスの出射光の様子と偏向を解析した。設計された光偏向素子は化合物半導体プロセスを用いて作製した。また，作製された光偏向素子の光学測定をするために，FFP 光学系を構築した。使用された FFP 光学系は  $NA=0.65$  の対物レンズと二つの凸レンズにより構成され，凸レンズの組み合わせにより，FFP を拡大，縮小することが可能である。また，光偏向素子の偏向特性を測定するために，フィードバック制御を用いた位相変調プログラムを作成した。測定結果，FSR は  $28.6^\circ$  となり，位相変調による連続的な光偏向が確認された。また，導波路アレイの数が多くなると波形の半値幅が狭まり，より精密な偏向が可能となった。また，素子の波長依存性を確認し，アレイ数 14 個の光偏向素子の  $1530\text{nm}\sim 1570\text{nm}$  でのメインローブ移動量は  $0.8^\circ$  に収めた。

第 5 章では，斜め反射ミラーを用いた垂直出射光カプラについて述べた。二つの対向した Al 治具を用いて作製される垂直出射光カプラは作製プロセスがシンプルというメリットを有する。また，反射防止膜を設けることにより，更に結合効率を向上させることが可能である。作製された幅  $3.5\ \mu\text{m}$ ，高さ  $2.5\ \mu\text{m}$  のハイメサ導波路型光カプラを，シングルモードファイバを用いて測定し，テーパファイバ間の結合損は  $13.3\ \text{dB}$  となった。また，C バンド帯での低波長依存性も確認した。

以上のように本研究では，面内 1 次元光偏向素子と垂直出射光カプラの設計，作製，測定を行い，デバイスの実現と原理検証に成功した。面内 1 次元光偏向素子と斜め反射ミラーを用いた垂直方向出射光カプラを集積することで，高効率のオフチップ 1 次元光偏向素子の実現できると期待される。また，この光偏向素子をアレイ化するか，もしくは，斜めミラーを用いたグレーティングカプラを形成することで，オフチップ 2 次元偏向可能な高性能素子の実現されると期待する。



## 参考文献

- [1] T. H. Maiman, "Stimulated Optical Radiation in Ruby," *Nature*, vol. 187, pp. 493-494, 1960.
- [2] P. S. Argall, F. Jacka, "High-pulse repetition-frequency lidar system using a single telescope for transmission and reception," *Applied Optics*, vol. 35, no. 15, pp. 2619-2629, 1996.
- [3] N. S. Higdon, E. V. Browell, P. Ponsardin, B. E. Grossmann, C.F. Butler, T. H. Chyba, M. N. Mayo, R. J. Allen, A. W. Heuser, W. N. Grant, S. Ismail, S. D. Mayor, and F. Carter, "Airborne differential absorption lidar system for measurements of atmospheric water vapor and aerosols," *Applied Optics*, vol. 32, no. 27, pp. 6422-6438, 1994.
- [4] B. T. N. Evnas, E. Yee, G. Roy, and J. Ho, "REMOTE DETECTION AND MAPPING OF BIOAEROSOLS," *Journal of Aerosol Science*, vol. 25, no. 8, pp. 1546-1566, 1994.
- [5] J. M. Kahn, and J. R. Barry, "Wireless Infrared Communications," *Proceedings of the IEEE*, vol. 83, pp. 265-298, 1997.
- [6] H. L. Minh, D. O'Brien, G. Faulkner, O. Bouchet, M. Wolf, L. Grobe, and J. Li, "A 1.25-Gb/s Indoor Cellular Optical Wireless Communications Demonstrator," *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 22 no.21, pp. 1598-1600, 2010.
- [7] D. A. B. Miller, "Device Requirements requirements for Optical Interconnects to Silicon Chips," *Proceedings of the IEEE*, vol. 97, no. 7, pp.1166-1185 (2009).
- [8] J. Xue, A. Garg, B. Ciftcioglu, S. Wang, J. Hu, I. Savidis, M. Jain, M. Huang, H. Wu, E. G. Friedman, G. W. Wicks, D. Moore, "An Intra-Chip Free-Space Optical Interconnect," *Proceedings of the 37th annual international symposium on Computer architecture (Proceedings of ISCA '10)*, pp. 94-105, 2010.
- [9] 黒田和男, 山本和久, 栗村直, "レーザディスプレイ," オプトロニクス社, 2010.
- [10] S. Yin, J. H. Kim, F. Wu, P. Ruffin, and C. Luo, "Ultra-fast speed, low grating lobe optical beam steering using unequally spaced phased array technique," *Optics Communications*, vol. 270, pp. 41-46, 2007.
- [11] V. Milanovic', G. A. Matus, and D. T. McCormick, "Gimbal-Less Monolithic Silicon Actuators for Tip-Tilt-Piston Micromirror Applications," *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, vol. 10, no. 3, pp.462-470, 2004.
- [12] L. Wu, S. Dooley, E. A. Watson, P. F. Mcnamon, and H. Xie, "A Tip-Tilt-Piston Micromirror Array for Optical Phased Array Applications," *Journal of*

- Microelectromechanical systems, vol. 19, no. 6, pp. 1450-1461, 2010.
- [13] P. F. McManamon, J. Bos, M. J. Escuti, J. Heikenfeld, S. Serati, H. Xie, and E. A. Watson, "A Review of Phased Array Steering for narrow-Band Electrooptical Systems," *Proceedings of the IEEE*, vol. 97, no. 6, pp. 1078-1096, 2009.
- [14] P. F. McManamon, T. A. Dorschner, D. C. Corkum, L. J. Friedman, D. S. Hobbs, M. K. O. Holz, S. Liberman, H. Nguyen, D. P. Resler, R. C. Sharp, and E. A. Watson, "Optical phased array technology," *Proc.IEEE*, vol. 84, no. 2, pp. 268–298, 1996.
- [15] B. Wang, G. Zhang, A. Glushchenko, J. L. West, P. J. Bos, and P. F. McManamon, "Stressed liquid-crystal optical phased array for fast tip-tilt wavefront correction," *Applied Optics*, vol. 44, pp. 7754-7759, 2005.
- [16] K. V. Acoleyen, W. Bogaerts, J. Jágorská, N. Le Thomas, R. Houdré, and R. Baets. "Off-chip beam steering with a one-dimensional optical phased array on silicon-on-insulator," *Optics letters*, vol. 34, no.9, pp. 1477-1479, 2009.
- [17] V. M. N. Passaro, F. Magno, "Investigation of thermo-optic effect and multi-reflector tunable filter/multiplexer in SOI waveguides," *Optics Express*, vol. 13, no. 9, pp. 3429-3447, 2005.
- [18] K. V. Acoleyen, K. Komorowska, W. Bogaerts, and R. Baets, "One-Dimensional Off-Chip Beam Steering and Shaping Using Optical Phased Arrays on Silicon-on-Insulator," *Journal of Lightwave Technology*, vol. 29, no. 23, pp. 3500-3505, 2011.
- [19] K. Nakamura, J. Miyazu, M. Sasaura, and K. Fujiura, "Wide-angle, low-voltage electro-optic beam deflection based on spacecharge-controlled mode of electrical conduction in  $\text{KTa}_{1-x}\text{Nb}_x\text{O}_3$ ," *Applied Physics Letters*, vol. 89, pp. 13115-1-3, 2006.
- [20] E. A. Watson, W. E. Whitaker III, C. D. Brewer, S. R. Harris, "Implementing Optical Phased Array Beam Steering with Cascaded Microlens Arrays," *IEEE Aerospace Conference Proceedings*, vol.3, 1429-1436, 2002.
- [21] N. R. Smith, D. C. Abeysinghe, J. W. Haus, and J. Heikenfeld, "Agile wide angle beam steering with electrowetting micropisms," *Optics Express*, vol.14, no. 14, pp. 6557-6563, 2006.
- [22] N. R. Smith, L. Hou, J. Zhang, and J. Heikenfeld, "Experimental validation of > 1 kHz electrowetting modulation," In 17th Biennial University Government Industry Micro Nano Symposium Proceedings (UGIM 2008).
- [23] I. M. Soganci, T. Tanemura, and Y. Nakano, "Integrated  $1 \times 8$  Optical Phased - Array Switch With Low Polarization Sensitivity for Broadband Optical Packet

- Switching,” *IEEE. Photonics Journal*, vol.1, pp.80-87, 2009.
- [24] W. Guo, P. R. A. Binetti, C. Althouse, H. P.M.M. Ambrosius, L. A. Johansson, and L. A. Coldren, “Improved Performance of Optical Beam Steering through an InP Photonic Integrated Circuit,” the Conference on Lasers and Electro-Optics Technical Digest (CLEO Technical Digest), CW1K.2, 2012.
- [25] L. Chen, L. Zhang, C. R. Doerr, N. Dupuis, N. G. Weimann, and R. F. Kopf, “Efficient Membrane Grating Couplers on InP,” *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 22, no. 12, pp. 890-892, 2010.
- [26] F. V. Laere, M. V. Kotlyar, D. Taillaert, D. V. Thourhout, T. F. Krauss, and R. Baets, “Compact Slanted Grating Couplers Between Optical Fiber and InP-InGaAsP Waveguides,” *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 19, no. 6, pp. 396-398, 2007.
- [27] W. H. Wee and J. B. Pendry, “Super phase array,” *New Journal of Physics*, vol. 12, pp. 033047, 2010.
- [28] H. Takahashi, S. Suzuki, K. Kato, and I. Nishi, “Arrayed-waveguide grating for wavelength division multi/demultiplexer with nanometer resolution,” *Electronics Letters*, vol. 26, pp.87–88, 1990.
- [29] J. F. Vinchant, J. A. Cavailles, M. Erman, P. Jarray, and M. Renaud, “InP/GaInAsP Guided-Wave Phase Modulators Based on Carrier-Induced Effects: Theory and Experiment,” *Journal of lightwave technology*, vol. 10, pp. 63-69, 1992.
- [30] 池上徹彦, 土屋治彦, 三上修, 半導体フォトニクス光学, コロナ社, 1995.
- [31] 山内潤治, 藪哲郎, 光導波路解析入門, 森北出版株式会社, 2007.
- [32] T. Tenemura, and Y. Nakano, "Scalability of Photonic 1×N Switch Based on Arrayed Phase Shifters,” *IEEE. International Conference on Photonics in Switching (PS)*, 2008, Sapporo, Japan.
- [33] RSOFT Design Group: <http://www.rsoftdesign.com/>
- [34] R. Scarmozzino, A. Gopinath, R. Pregla, and S. Helfert, “Numerical Techniques for Modeling Guided-Wave Photonic Devices,” *IEEE Journal of selected topics in quantum electronics*, vol. 6, pp. 150-162, 2000.
- [35] L. Eldada, M. Ruberto, R. Scarmozzino, M. Levy, and R. M. Osgood, “Laser - Fabricated Low-Loss Single-Mode Waveguides Devices in GaAs,” *Journal of lightwave technology*, vol.10, pp. 1610-1616, 1992.
- [36] I. Ilic, R. Scarmozzino, R. M. Osgood Jr., J. T. Yardley, K. W. Beeson, and M. J. McFarland, “Modeling Multimode-Input Star Couplers in Polymers,” *Journal of lightwave technology*, vol. 12, pp. 996-1003, 1994.



- 
- [37] P. Muñoz, D. Pastor, and J. Capmany, "Modeling and Design of Arrayed Waveguide Gratings," *Journal of lightwave technology*, vol. 20, pp. 661-674, 2002
- [38] Tanner EDA software tools : <http://www.tannereda.com/>
- [39] S. John, C. Soukoulis, M. H. Cohen, and E. N. Economou, "Theory of electron band tails and the Urbach optical-absorption edge," *Physical Review Letters*, vol. 57, no. 14, pp. 1777 - 1780, 1986.
- [40] B. R. Bennett, R. A. Soref, and J. A. Del Alamo, "Carrier-induced change in refractive index of InP, GaAs, and InGaAsP," *IEEE Journal of Quantum Electronics*, vol. 26, no. 1, pp. 113-122, 1990.
- [41] 板生清, 海野邦昭, 大平文和, 河西敏雄, 西澤紘一, 安永暢男, 米津宏雄, 光デバイス精密加工ハンドブック, オプトロニクス社, 1998.
- [42] HYBOND Inc. : <http://www.hybond.com/index.php>.
- [43] I. M. Soganci, T. Tanemura, K. Takeda, M. Zaitso, M. Takenaka, and Y. Nakano, "Monolithic InP 100-port photonic switch," in *Proc. European Conference on Optical Communication (ECOC'10)*, Turin, Italy, 2010, Paper PD1.5.
- [44] 國分 泰雄, "光波工学," 共立出版株式会社, 2001.
- [45] A.-J. Liu, W. Chen, W.-J. Zhou, B. Jiang, F. Fu, H.-W. Qu, and W.-H. Zheng, "Squeeze effect and coherent coupling behaviour in photonic crystal vertical-cavity surface-emitting," *Journal of physics D: Applied Physics*, 44, 115104, 2011.
- [46] N. L. Thomas, R. Houdré, M. V. Kotlyar, D. O'Brien, and T. F. Krauss, "Exploring light propagating in photonic crystals with Fourier optics," *Vol.24, No.12*, pp. 2964-2971, 2007.
- [47] B.E.A Saleh, M.C. Teich, "FUNDAMENTALS OF PHOTONICS Second Editions," WILEY, 2007.
- [48] 浜松ホトニクス半導体レーザー FFP 測定システム : [http://jp.hamamatsu.com/products/opto-meas/pd287/pd290/ffp/index\\_ja.html](http://jp.hamamatsu.com/products/opto-meas/pd287/pd290/ffp/index_ja.html)
- [49] NATIONAL INSTRUMENTS LabVIEW システム開発ソフトウェア : <http://www.ni.com/labview/ja/>
- [50] W. Jiang, N. K. Fontaine, F. M. Soares, J. H. Baek, K. Okamoto, S. J. B. Yoo, F. Olsson, and S. Lourdudoss, "Dynamic phase-error compensation for high-resolution InP arrayed-waveguide grating using electro-optic effect," in *Proc. IEEE Lasers and Electro-Optics Society Annual Meeting*, 2008, Paper MF2.

- 
- [51] I. M. Soganci, T. Tanemura, K. A. Williams, N. Calabretta, T. de Vries, E. Smalbrugge, M. K.Smit, H. J. S Dorren, and Y. Nakano, “Monolithically integrated InP 1×16 optical switch with wavelength-insensitive operation,” *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 22, no. 3, pp.143-145, Feb. 2010.
- [52] D. F. G. Gallagher, T. P. Felici, “Eigenmode Expansion Methods for Simulation of Optical Propagation in Photonics – Pros and Cons,” *SPIE Photonics West*, San Jose, USA, pp. 4987-10, 2003.
- [53] 河野照哉, 桂井誠, 岡部洋一, 電気磁気学基礎論, 電気学会, 2007.
- [54] COMSOL 4.2a : <http://www.comsol.com/>.
- [55] M. Nakada, K. Takahashi, T. Takahashi, A. Higo, H. Fujita, and H. Toshiyoshi, “Development of Skewed DRIE Process and its Application to Electrostatic Tilt Mirror,” in *Proc. 22<sup>nd</sup> IEEE Int. Conf. on Micro Electro Mechanical Systems*, Sorrento, Italy, pp. 1087-1090, 2009.
- [56] M. B. Stern, and T. R. Jay, “Dry etching for coherent refractive microlens arrays,” *Optical Engineering*, vol.33, no.11, pp.3547-3551, 1994.

---

## 本研究に関わる発表等

### 国際発表

[1] S. Choi, A. Higo, K. Kikuta, H. Toshiyoshi, and Y. Nakano, "A Slanted InP Waveguide for Fiber Coupler using Skewed Dry Etching Process," Optical MEMS & Nanophotonics Conference, 2012 August 8, WP26, The Banff Centre, Banff Canada.

### 国内発表

[1] 崔成漢, 郭命俊, 財津優, 崔洙赫, 肥後昭男, 種村拓夫, 中野義昭: 「フェーズドアレイを用いた半導体光偏向素子の設計」, 2012 年電子情報通信学会総合大会, 2012 年 3 月 23 日, C-3-80, 岡山大学, 岡山.

[2] 崔成漢, 郭命俊, 財津優, 崔洙赫, 肥後昭男, 種村拓夫, 中野義昭: 「InGaAsP/InP フェーズドアレイ光偏向素子の設計および特性検討」, 第 37 回光学シンポジウム, 2012 年 6 月 15 日, 18, 東京大学, 東京.

[3] 崔成漢, 肥後昭男, 財津優, 年吉洋, 中野義昭: 「InP 斜めエッチングを用いた垂直出射型光カプラの開発」, 2012 年 10 月 24 日, 3F2-5, 北九州国際会議場および西日本総合展示場, 福岡.

### 学術論文

[1] Sunghan Choi, Akio Higo, Masaru Zaitu, Myung-Joon Kwack, Masakazu Sugiyama, Hiroshi Toshiyoshi, and Yoshiaki Nakano, "Development of a Vertical Optical Coupler Using a Slanted Etching of InP/InGaAsP Waveguide," IEICE Electronics Express, 2013. (Accepted)

---

## 付録

### 実験装置一覧

本研究でデバイスの作製プロセス際、主に使用された実験装置を列挙する。

Table. A.1 : The list of experimental equipment for device fabrication.

EB描画(フォトマスク)	ADVANTEST F5112*
スピンドータ	MIKASA 1H-D7
フォトリソグラフィ	Karl Suss MJB3
スパッタリング (Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub> , SiO <sub>2</sub> )	ULVAC MNS-2000RF
スパッタリング (SiO <sub>2</sub> )	ANELVA E-200S
ドライエッチング	ANELVA L-201D
電子ビーム蒸着	ANELVA L-042E
スパッタリング(Au 裏電極用)	SANYU SC-701
アニーリング	YONEKURA
ワイヤーボンディング	WEST BOND 7700D

\*武田先端知ビルスーパークリーンルーム所有

---

## 略称

本論文に登場した略称の正式名称を以下のようにまとめる.

LIDAR : Light Detection And Ranging

RF : Radio Frequency

IM/DD : Intensity Modulation with Direct Detection)

LOS : Line of Sight

FSOI : Free Space Optical Interconnect

MEMS : Micro Electro Mechanical System

TTP : Tip Tilt Piston

LC : Liquid Crystal

PA : Phased Array

SLC : Stressed Liquid Crystal

PhC : Photonic Crystal

MMI : Multi-Mode Interferometer

SOA : Semiconductor Optical Amplifier

MLA : Micro Lens Array

AWG : Array Waveguide Grating

FWHM : Full Width at Half Maximum

BPM : Beam Propagation Method

PIC : Photonic Integrated Circuit

FFT-BPM: Fast Fourier Transform-BPM

FD-BPM : Finite Difference-BPM

FE-BPM : Finite Element-BPM

CAD : Computer-Sided Design

ICP-RIE : Inductive Coupled Plasma-Reactive Ion Etching

RIE : Reactive Ion Etching

EB : Electron Beam

SEM : Scanning Electron Microscope

FFP : Far Field Pattern

SMF : Single Mode Fiber

CCD : Charge Coupled Device

NFP : Near Field Pattern

NA : Numerical Aperture

MO lens: Micro Objective lens

FSR : Free Spectral Range

WD : Working Distance

EME method : Eigen-Mode Expansion method

FEM : Finite Element Method

TLD : Tunable Laser Diode

PC : Polarization Controller

VOA : Variable Optical Attenuator

OPM : Optical Power Monitor

面内1次元光偏向素子の測定系写真

面方向出射光偏向素子のFFPの測定の前に、CCDカメラのピクセルと角度との関係を調べるために行った実験に使用された測定系の写真をFig. A.1に示す。Fig. A.1の光学系はNA=0.65の対物レンズと焦点距離がそれぞれ4cmと6cmの1インチ凸レンズから構成されている。2インチ凸レンズ（焦点距離：6cm，10cm）を使用した場合も同様な測定系を使用した。

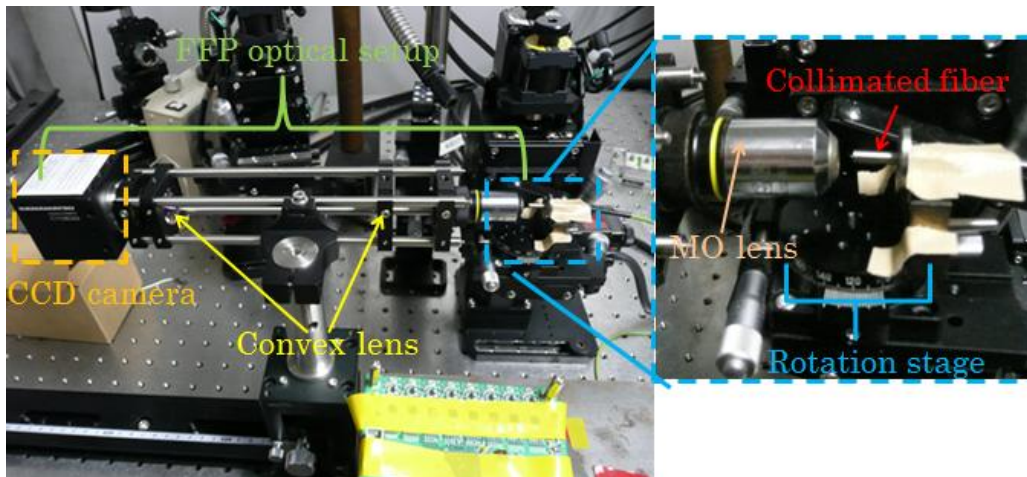


Fig. A.1 : Measurement setup for collimated fiber FFP image.

Fig. A.1の測定系で1ピクセル当たりの角度変化量を計算し、Fig. A.2の測定系を用いて光偏向素子の測定を行う。

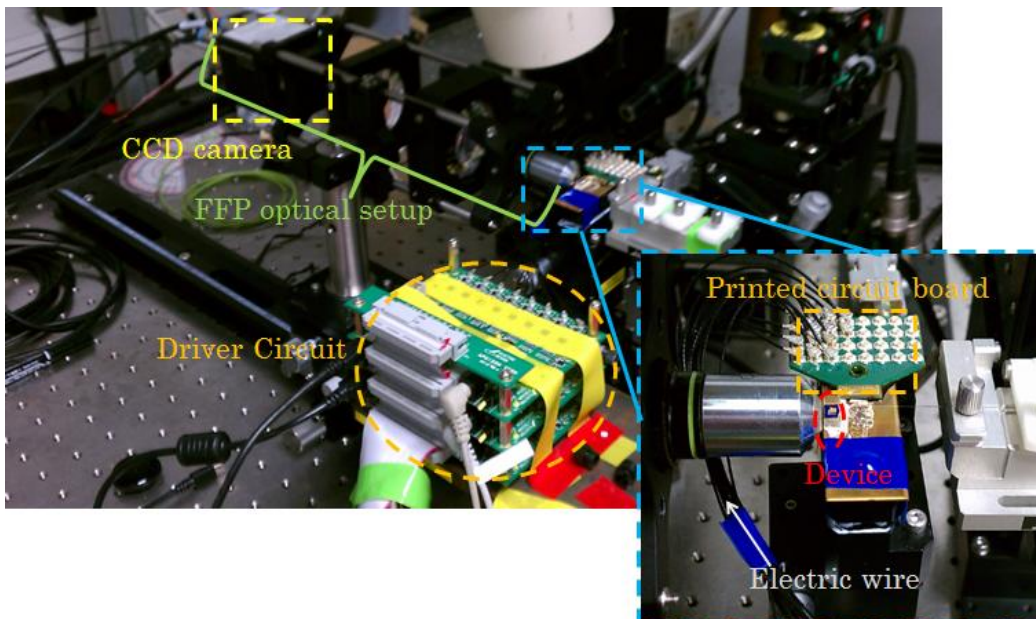
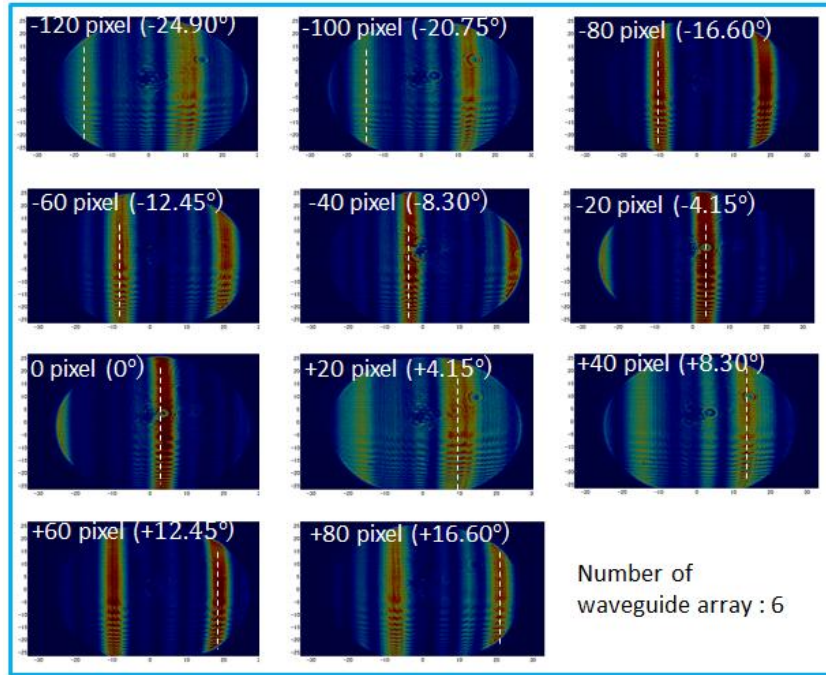


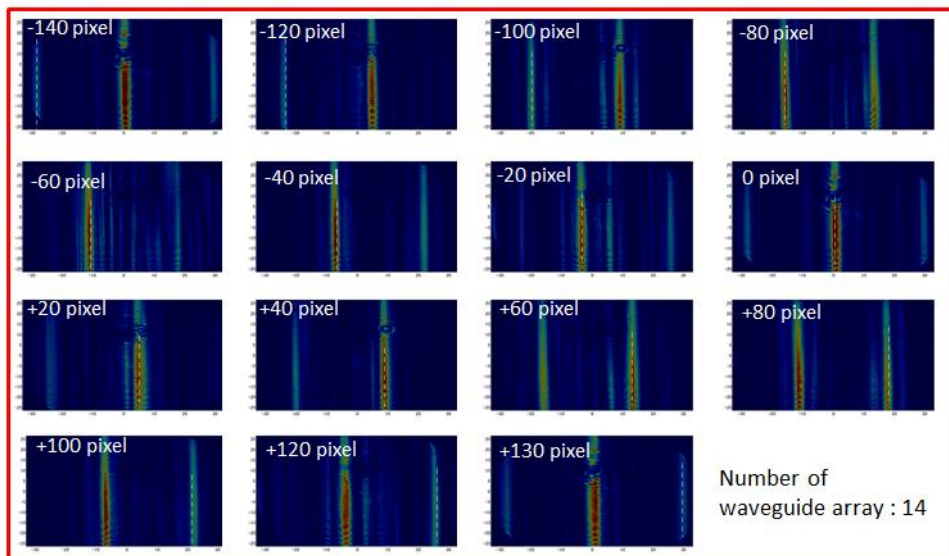
Fig. A.2 : Measurement setup for optical beam steering device.

面内1次元光偏向素子のFFP

光偏向素子の偏向特性を測定する際、ピークになる位置をx方向に対して20ピクセル間隔に変えて測定を行った. 2インチ凸レンズを使用した光学系でのFFP測定結果をFig. A.3に示す. 導波路アレイ数が多い方が波形の半値幅が狭まり, より偏向角度の制御がやりやすい.



(a) The FFP of the beam steering device having 6 waveguide arrays



(b) The FFP of the beam steering device having 14 waveguide arrays

Fig. A.3 : Beam steering characteristics of the fabricated device.



## 光偏向素子の測定に使用されたプログラム

LEPAS12 DLL[48]を用い、LABVIEW[49]から作成した光偏向素子測定用のプログラムのメイン画面をFig. A.4に示す。また、下記にプログラムのボタン、表示の意味を書いておく。

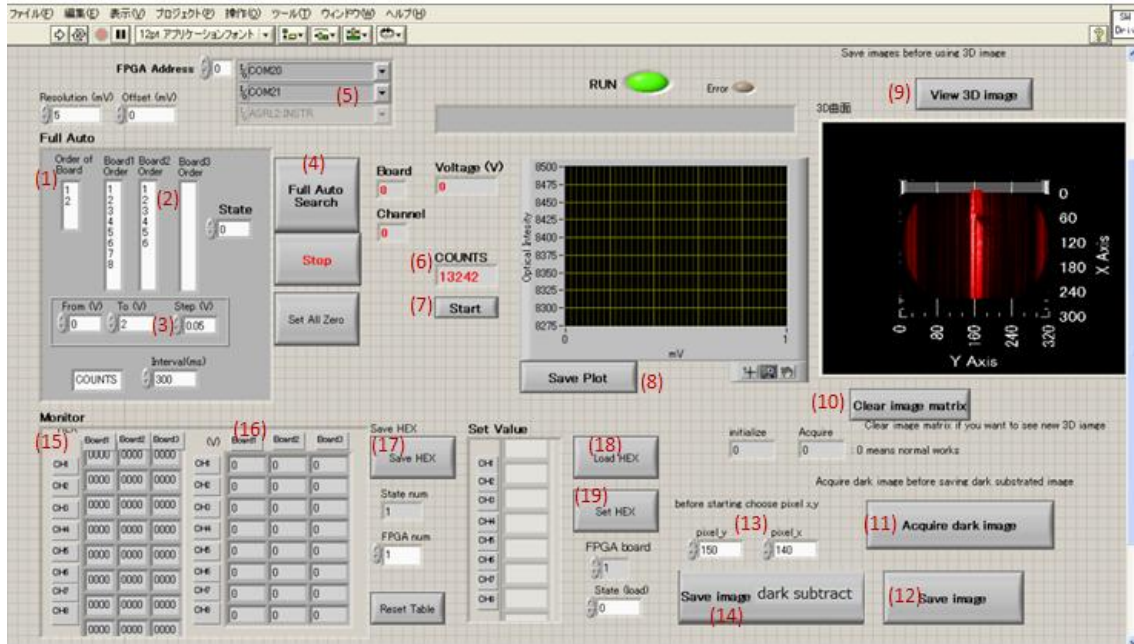


Fig. A.4 : The measurement program for beam steering.

- (1) 電圧を印加するボードの順番を表す。
- (2) 電圧を印加するチャンネルの順番を表す。
- (3) バイアス電圧の最小値，最大値，間隔を決める。
- (4) 指定した座標で光強度が最大になる電圧値を探す(ピークサーチ)。
- (5) ドライバボードのアドレスを指定する。
- (6) 与えられた座標での光強度(カウント数)を表す。
- (7) カウントを始める。
- (8) ピークサーチにより作成された電圧-光強度のグラフを保存する。
- (9) 保存されたイメージを3次元グラフに表示する。
- (10) メモリ内に保存されたイメージを削除する。
- (11) ダークイメージを取得する。(ダークイメージ取得時は，光を入射しない。)
- (12) ダーク減算されていないイメージを保存する。
- (13) 観察しない座標を指定する。
- (14) ダーク減算されたイメージを保存する。

- (15) 各チャンネルに印加する電圧を16進数で表示する.
- (16) 各チャンネルに印加する電圧を10進数で表示する.
- (17) 現在に印加する電圧値を保存する.
- (18) 保存された電圧値を読み出す.
- (19) 読み出された電圧値を各チャンネルに印加する.

CCDカメラとドライバボードと接続し、別のモニタよりデバイスからの出射光の様子を確認された状態で使用を始める。まず、(13)より観察したい場所の座標を入力し、(5)で電圧を印加するドライバボードのアドレスを指定する。その後、左上の白い矢印ボタンを押すことでプログラムを起動させる。エラー発生の有無を確認した後、(7)を押して光強度がカウントされることを確認する。この際、内部メモリには、カウントする度の全ピクセルの情報が保存される。これを保存、3次元グラフ化したい場合は、次の通りの作業を行う。カウントを止め、光を入射させてない時、(11)よりダークイメージを取得する。その後、(14)よりダーク減算されたイメージを保存することができる。この状態で(9)を押すとダーク減算されたイメージが3次元グラフ化される。新しいイメージを保存したい場合は、(10)を押してメモリ内部のイメージを削除し、光強度をカウントする作業に戻り、同様な作業を行う。

フィードバック制御によるピークサーチを行う場合は、(1)と(2)でボード順番、チャンネル順番を設定し、(3)で印加する電圧の最大値、最小値、間隔を設定する。その後、光強度がカウントされている状態で、(4)を押すことでピークサーチが行われ、その時の各チャンネルの電圧値は(15)、(16)に表示される。

ガラス治具を使用した斜めエッチング

SiO<sub>2</sub>で保護された対向Al治具を使用することで斜めエッチングは可能となるが、一部Alはドライエッチングする際、反応してしまい、InP基板の表面に影響を与える。そのため、基板表面が黒く見える現象が生じる。ガラス治具を使用すると治具の反応による影響は無視できるが、誘電体治具を使用するため、反応性分子の移動様子がAl治具を使用する場合とは異なる。Fig. A.5に示したFEMを用いたシミュレーション結果より、ガラス治具を使用する場合、一つの治具でも斜めエッチングが形成されることが確認できる。また、ガラスの熱伝導性がAl治具より良くないため、InP基板を加熱するのに、Al治具より高温の加熱温度と、長い加熱時間を必要とする。サーモテープを用いて測定した結果、InPの基板を220°Cまで加熱するためには、加熱温度を280°Cに設定し、25分以上の加熱時間が必要となることを確認した。45°の傾斜面を有するガラス治具を使用して作製された垂直出射光カップラのSEM写真をFig. A.6に示す。

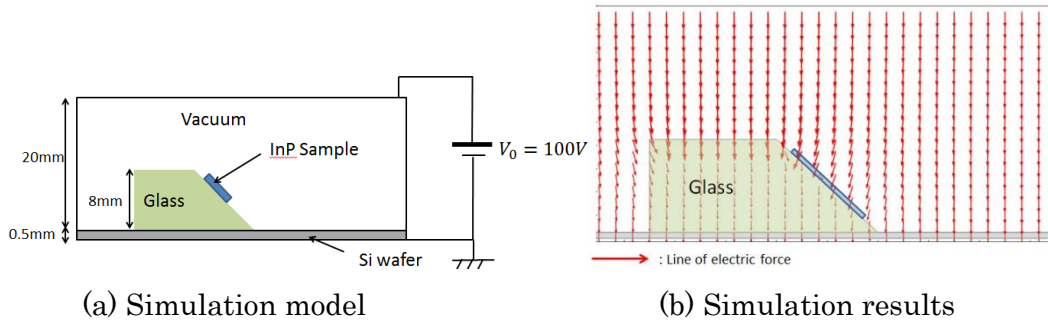


Fig. A.5 : FEM simulation for glass jig.

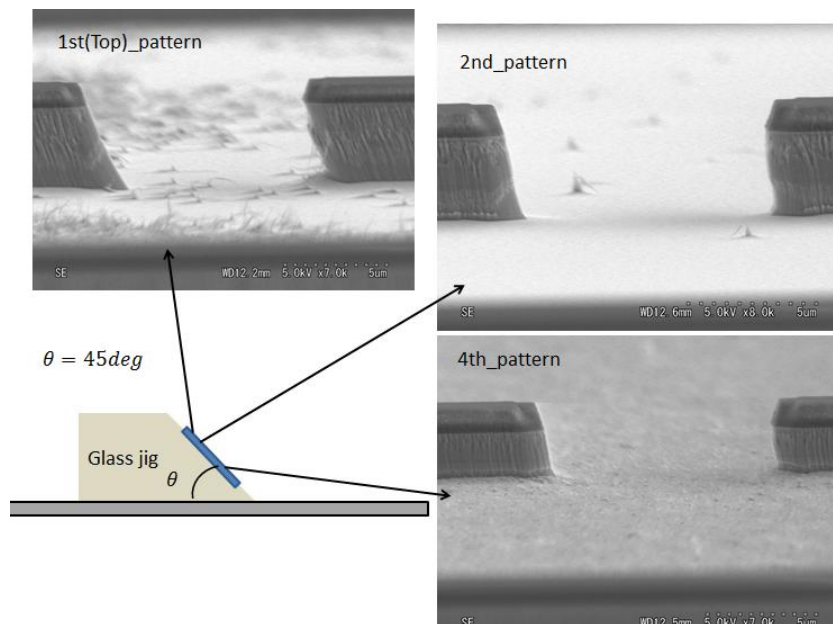
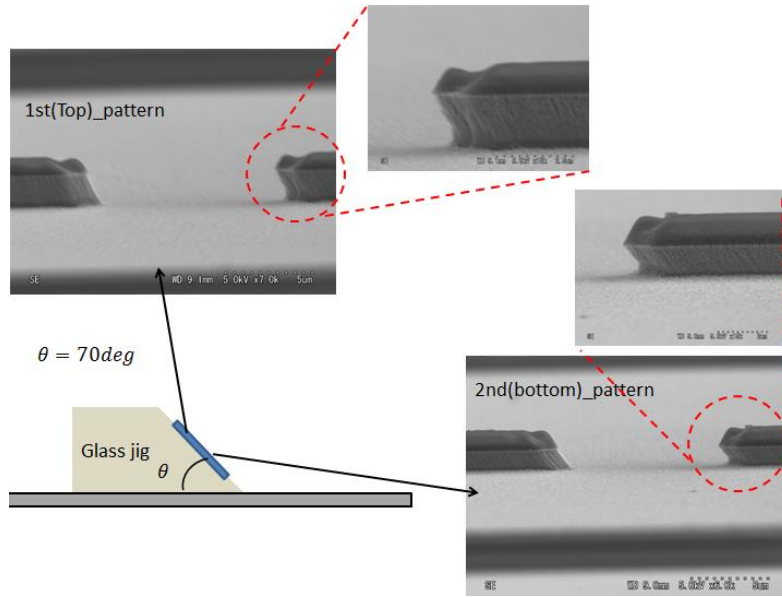
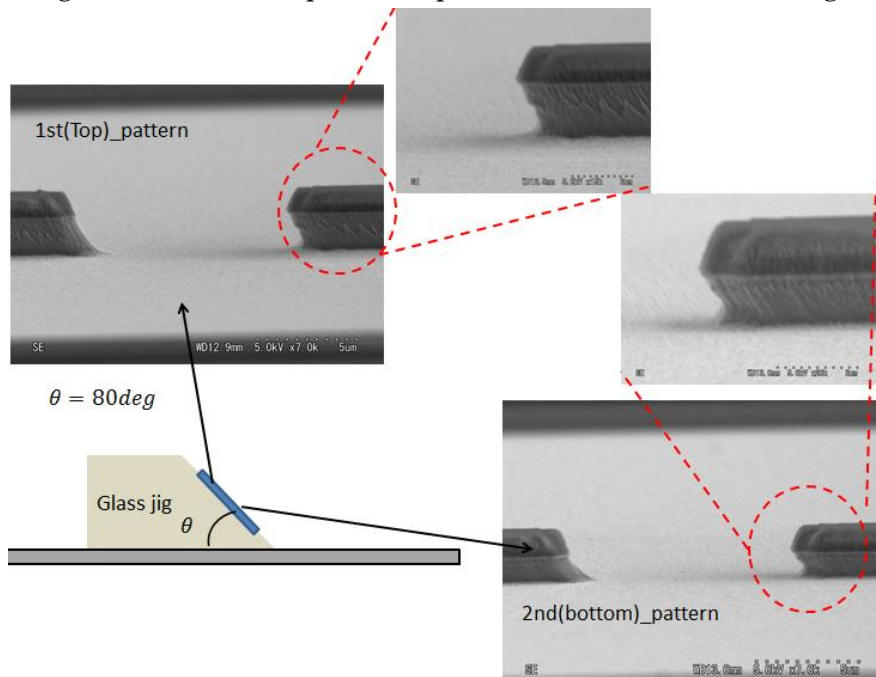


Fig. A.6 : SEM image of the vertical optical coupler fabricated on the glass jig.

治具上部に配置されたパターンの場合、基板の加熱が不十分に行われてエッチングにより生成された副生成物が完全に除去されず、一部が基板上に残ったと考えられる。また、斜めエッチングは形成されたが、その角度が大きく、光カップラとして使用するには不十分である。そこで、傾斜面の角度を70°と80°にしたガラス治具を使用してドライエッチングを行った。その結果をFig. A.7に示す。



(a) SEM image of the vertical optical coupler fabricated on the 70° angled jig



(b) SEM image of the vertical optical coupler fabricated on the 80° angled jig

Fig. A.7 : The effect of the glass jig angle.

治具の傾斜面の角度を調整することにより、角度の小さい斜め面が得られ、特に治具の角度が $80^\circ$ の場合、基板下部のパターンの角度は約 $34^\circ$ となった。しかし、エッチングされた面が平坦ではなく、曲がっている。光カプラと使用するためには、この効果も制御しないとイケない。そのため、本研究では、より平坦なエッチング面が得られるAl 治具を使用して垂直出射光カプラを作製した。

## 謝辞

本研究を進める上に先生方、教員の方、先輩、後輩方等から大きな協力をいただき、この場を借りて感謝の言葉を申し上げたいと思います。

中野義昭教授からは修士課程を入学する前から多くの助言をいただきました。また、修士課程に入学した後は、素晴らしい研究設備を提供してくださって2年間充実な研究生活ができました。お忙しい中でも、研究、進路などで悩む私にたくさんのアドバイスをしてくださいました。杉山正和准教授からは、研究室発表などで適切で重要なアドバイスをいただき、研究を進めるのに大変お世話になりました。種村拓夫准教授からは、研究の方向性や研究に関連する背景知識などの大切な情報を教えていただきました。特に、修士1年の時は、海外にいらっしゃった先生から遠隔会議などを通じて熱心な指導をいただきました。また、研究室発表、グループ会議などでいつも適切で大切なアドバイスをしてくださいました。肥後昭男助教は修士1年の時、勉強会を開くことにより研究で必要となる様々な知識を勉強する機会を提供してくださいました。特に、デバイス作製プロセスする時は、大きな協力をいただき、大変お世話になりました。また、様々な学会での発表を薦めてくださって、貴重な経験ができました。研究以外でも留学生活で多くの悩みを持っていた私にいつも親切に相談してくださいました。渡辺健太郎助教からは研究室会議などで様々なアドバイスをいただきました。また、実験装置の使用方法を尋ねた時に、親切に説明してくださいました。久保田雅則助教からは、デバイス作製プロセスする際に様々な助言をいただきました。王云鵬助教、ソダーバンルハッサネットさんからも研究を進めるのに大きな協力をいただきました。

先輩の方々にも大変お世話になりました。博士の郭命俊さんからはデバイスの設計から始め、作製、測定までの研究全般でたくさんのアドバイスをいただきました。また、悩みがあるときは、いつも相談してくれて、最後まで研究ができました。また、博士の財津優さんからは解析、デバイス作製などに関連する様々な知識を教えていただき、発表準備の際には、細かいところまでアドバイスしてくれました。金ボラムさんは研究内外での様々な相談に乗ってくれて、2年間の研究生活の大きな励ましになりました。他の同期生の藤本悠君、渡辺翔太君、陳超さんにも感謝しております。

以上の方以外に、博士の方、秘書の方、後輩の方にも感謝しております。

また、研究に専念できるようにいつも支えてくれた彼女の金銀斌さんに感謝しております。最後に海外で勉強している私をいつも支援してくれた家族に心深くから感謝しております。

2013年2月