

平成 24 年度 修士論文

高消光比 InP ビーム偏向型  $1 \times N$  光スイッチの  
設計と試作

Design and fabrication of high-extinction ratio  
InP beam-deflecting  $1 \times N$  optical switch

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

37-106516 崔 洙赫

平成 24 年 8 月 15 日 提出



## Abstract

光通信システムは波長多重化方式等の導入によりますますと高速化され、2004年には既に光ファイバー一本あたり 1 Tb/s のトラフィックを達成したが、これから要求されるトラフィック量はその千倍以上の 1 Tb/s を超えると予測されているのでより高速の光スイッチング技術が必要になると思われている。本研究はそういう要求に応え、光電変換の要らない光ルータ内の光スイッチの提案、設計を目的にしている。既存のルータから光電変換過程を省略することにより高速、しかも省電力な光通信が実現できると思われる。

本研究ではIII-V族の InGaAsP 系化合物を用いたビーム偏向型の  $1 \times N$  光スイッチの研究に焦点を合わせ、その設計を改善し、デバイスを試作し、評価した。デバイスの設計ではスラブ導波路の上クラッドをエッチングすることでコリメートレンズを半導体化合物上に再現するようにした。なお、偏向素子である三角プリズムはスラブ導波路上の特定部分に金属を蒸着することで再現するようにした。高消光比のスイッチングに向けてはコリメートレンズのより厳密な設計が必要であるため、その動作を等価屈折率法および光線光学と光波光学的な議論を並行することで解析した。プリズムの動作原理に関しては半導体内の電流注入による屈折率変調効果とスネルの法則に起因して解析した。その後はそれぞれの設計結果を合わせて具体的なデバイス全体の設計に移った。 $1 \times 7$  のスイッチングができるように出力ポートを7つ設計し、BPMでスイッチとしての動作を確認した。

デバイスの試作はレンズの界面がきれいに作製されるよう、ドライエッチングと補助的なウェットエッチングを行った。プリズムはウェットエッチングで InGaAs のコンタクト層を作り、その後 Ti/Au を蒸着することで作製した。

作製されたデバイスから 9~15 dB の入出力損失と 6~9 dB を消光比を得ることで7箇所出力ポートの中5箇所のスイッチングに成功した。シミュレーションでは 5 dB 以下の入出力損失と 15 dB 以下の消光比を得たが、消光比の低下原因としてはレンズ部の等価屈折率をシミュレーション上の理論値にちょうど一致させるのが難しいのでレンズの集光効果が劣化されること、または作製プロセス上に発生するスラブ導波路とレンズのアラインメントのずれがポート間のクロストークを大きくすることなどが考えられる。等価屈折率の調整にはその本質的な難しさがあると思われるが、レンズ作製の問題は作製プロセスを改善することで解決されると予想され、BPM からその妥当性も検証された。

本研究において、ビーム偏向型光スイッチの小型化と共に消光比の向上を成し遂げるためのデバイスの設計改善に成功した。単体のスイッチで得られた消光比は 6~9 dB 程度であったが、複数の光スイッチをカスケードにすることや  $N \times N$  のスイッチにすると消光比はその分大きくなるので、そういうシステムを構築することによりビーム偏向型の光スイッチについても今後の OPS ルータへの応用可能性が期待される。



# 目次

<b>Abstract</b>	i
<b>第1章 序論</b>	1
1.1 研究の背景	1
1.1.1 現世代の光通信システム	1
1.1.2 Optical Packet Switching を用いた次世代光通信システム	1
1.1.3 OPS router の構成要素	2
1.2 $N \times N$ マトリックス 光学スイッチの研究例	2
1.2.1 機械光学式スイッチ	2
1.2.2 熱光学式スイッチ	3
1.2.3 電気光学式スイッチ	4
1.2.4 $N \times N$ の拡張性に優れた $1 \times N$ 電気光学式スイッチ	4
1.3 ビームの偏向を用いたシングルステージ $1 \times N$ 光学スイッチ	5
1.3.1 既存の $1 \times N$ 光学スイッチ	5
1.3.2 モノリシックなビーム偏向型の $1 \times N$ スイッチ	6
1.4 本研究の目的と本論文の概要	6
<b>第2章 デバイスの動作原理及び設計論</b>	8
2.1 ビーム屈折型 $1 \times N$ 光スイッチの構造と動作	8
2.2 光の導波路上のモード伝搬	9
2.3 解析手法	12
2.3.1 光線光学による解析	12
2.3.2 光波光学による解析	13
2.4 非球面レンズの動作原理及び設計	18
2.4.1 等価屈折率法	18
2.4.2 光線光学に基づいたレンズ設計	20
2.4.3 光波光学の解析を考慮した設計の補正	21
2.5 三角型プリズムの動作原理及び設計	22

2.5.1	電流注入による屈折率変調.....	22
2.5.2	三角型プリズムの形態設計.....	24
2.6	デバイス上の部分的な トレンチ.....	26
2.6.1	トレンチの導入原理.....	26
2.6.2	トレンチによる消光比の改善.....	27
2.7	1×7 ビーム偏向型スイッチの形.....	27
2.8	光スイッチングのシミュレーション.....	30
2.9	第 2 章のまとめ.....	30
<b>第 3 章 作製プロセス</b>		<b>33</b>
3.1	成長基板の構造.....	33
3.2	スラブ導波路の作製.....	33
3.2.1	基板の壁開.....	33
3.2.2	フォトリソグラフィー.....	33
3.2.3	InGaAs、InP のウェットエッチング.....	35
3.3	非球面レンズ及びトレンチのハードレジスト形成.....	35
3.3.1	SiN <sub>x</sub> の成膜.....	35
3.3.2	フォトリソグラフィー.....	35
3.3.3	SiN <sub>x</sub> のエッチング.....	35
3.4	SiO <sub>2</sub> 蒸着によるレンズの保護.....	36
3.4.1	フォトリソグラフィー.....	36
3.4.2	SiO <sub>2</sub> の成膜.....	36
3.4.3	リフトオフ.....	36
3.5	ドライエッチングによる非球面レンズ及びトレンチの形成.....	37
3.5.1	トレンチ部分の 1 次ドライエッチング.....	37
3.5.2	SiO <sub>2</sub> レンズ保護膜の除去.....	38
3.5.3	レンズ部分まで含めた 2 次ドライエッチング.....	38
3.6	InGaAs 層のパターン形成.....	39
3.7	パッシベーション.....	39
3.8	電極の形成.....	40

3.8.1	Ti/Au の蒸着.....	40
3.8.2	リフトオフ.....	40
3.8.3	裏面電極の形成、アニーリング.....	40
3.9	第3章まとめ.....	41
<b>第4章</b>	<b>デバイスの特性</b>	<b>43</b>
4.1	測定系の設定.....	43
4.2	プリズムの電流—電圧特性.....	43
4.3	光スイッチングの特性.....	44
4.4	結果のまとめ.....	45
<b>第5章</b>	<b>実験結果に対する考察、及び改善策</b>	<b>54</b>
5.1	レンズ集光の劣化.....	54
5.2	電流注入しない場合の出力ポート間のクロストークの発生.....	54
5.3	試作デバイスの電流注入量と理論計算上の電流注入量の比較.....	55
<b>第6章</b>	<b>結論</b>	<b>57</b>
	<b>参考文献</b>	<b>58</b>
	<b>本研究に関わる発表</b>	<b>60</b>
	著者の学会発表.....	60
	他者の関連学会発表.....	60
	<b>付録</b>	
	実験装置一覧.....	61
	<b>謝辞</b>	<b>62</b>



# 第 1 章 序論

## 1.1 研究の背景

### 1.1.1 現世代の光通信システム

インターネットの普及による情報社会の実現は、人類の社会や経済、文化などの様々なところに大きな影響を与えてきたが、その中で情報の移動量は通信システムが進化すると共に急激に増えてきた。光ファイバを用いた通信システムは大容量の情報を高速で送受信するシステムで、現在用いられている波長多重方式 (Wavelength Division Multiplexing : WDM) は 1 本の光ファイバでも複数の情報をお互い違う波長に載せることにより情報の送受信量を飛躍的に増加させた。さらに時分割多重方式 (Time Division Multiplexing : TDM) や周波数分割多重方式 (Frequency Division Multiplexing : FDM)、直交周波数分割多重方式 (Orthogonal Frequency Division Multiplexing : OFDM) などの導入により通信システムはますます高速化され、既に 2004 年にはファイバ一本当たりの通信量が 1 Tb/s を超えたという報告がある[1-4]。

だが、社会の情報化に伴う情報量の需要増加はこれからも止まることなく、2012 年以降にはファイバ当たり 1Pb/s 以上のインターネットトラフィックが要求されると予想されている。特に現在の光通信システムでは、光信号のルーティングの際に光を電気信号に変換して信号の行き先を決めてからその信号を光信号に再変換する方式を使っているため、急激なインターネットトラフィックの増加は光通信にとって消費電力の過度な増加を引き起こしてしまう問題がある[5]。そういう背景の基で、現在より何千倍も速いながら省電力性を保つ光通信システムを構築するためには、今とは違う光信号のルーティングシステムを実現する必要があるのである。

### 1.1.2 Optical Packet Switching を用いた次世代光通信システム

今後の高速で大容量の情報通信を目指す次世代光通信システムとして、光パケットスイッチング (Optical Packet Switching : OPS) ネットワークがある[1]。その通信方式ではパケットという、データをおよそ数ビット程度の非常に小さい容量に分けたものを基本単位として送受信を行う。各パケットはラベル (label) 部とペイロード (payload) 部で構成され、ラベルにはパケットの行き先に対する情報が、ペイロードには実際に送信すべき情報が載せられている。

OPS 通信方式の特徴は、現世代の通信システムが送信側のルータと受信側のルータ 2 箇所だけを通してデータの送受信を行ったことに比べて、データを数ビットのパケットに

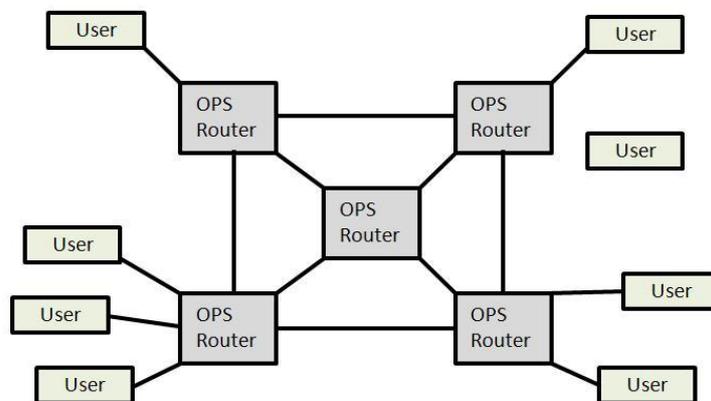


Fig 1.1 Optical-Packet-Switching Network system.

小さく分けた分くらい色々なルータを経由してパケットを目的のルータまで送信することで通信の効率をあげることである (Fig. 1.1)。そして、現在のルータでは光信号のスイッチングの前に光/電 (O/E) 変換を、スイッチングの後に電/光 (E/O) 変換を行うことに比べ、OPSシステム上のルータでは光信号を光のままにスイッチングする方式を用いるので光/電光 (O/E/O) 変換方式より電力消費量を大幅に減らすことができる。こういう送受信経路の多様化、O/O(光/光) 変換の導入で OPS 通信システムはより高速で省電力な通信システムを実現できると期待されている。

### 1.1.3 OPS router の構成要素

Fig 1.2 に OPS ルータの構造を示す。光信号の行き先の切り替えを行うのは  $N \times N$  光スイッチ ( $N \times N$  optical switch)であるが、それ以外に他に入力信号の衝突を回避するための可変光バッファ (Variable Optical Buffer)、ラベル信号を処理するためのラベルプロセッサ (Label Processor) がある。光パケットは  $N$  個の Input ポートから OPS ルータに入り、ラベル部とペイロード部は各々ラベルプロセッサと可変光バッファに入る。ラベルにはペイロード部の行き先に対する情報が含まれているため、ラベルプロセッサではその情報を処理し、可変光バッファで  $N \times N$  光スイッチにペイロードの Output ポートを指定する。ペイロードはその指定に伴って  $N \times N$  光スイッチの中でスイッチングされ、想定 Output ポートから出力される。

OPS システムの実現には ns オーダーの動作時間と  $N$  の大きい  $N \times N$  光スイッチが必要とされ、様々な方式で光スイッチが開発されてきたが、大きく分けて微小電気機械システム (Microelectromechanical system : MEMS) を用いた機械光学式スイッチ (Opto-mechanical switch)、熱光学式スイッチ (Thermo-optical switch)、電気光学式スイッチ (Electro-optical switch) がある。各方式ではそれぞれの特徴があるので、これからは三つの方式を考察、比較し、OPS システムに最も相応しいのはどちらかについて議論する。

## 1.2 $N \times N$ マトリックス 光学スイッチの研究例

### 1.2.1 機械光学式スイッチ

MEMS を用いた機械制御式光スイッチは色々な研究グループで既に開発されてきたが、その研究例の一つとして Zhejiang University の Junfeng Bao 氏らによる  $4 \times 4$  光スイッチがある [6]。Fig 1.3 にその形態と構造を示す。そのデバイスは単位セル当たり  $3 \text{ mm} \times 3 \text{ mm}$  スケールの総 16 個のセルで構成されていて、各セルはミラー、ローブ、コイルでスイッチング装置を組んでいる。あるセルに電圧がかけられるとコイルとローブの間に電磁気誘導現象が起り、ミラーが上に上がるようになる。その結果、該当セルと同じ列の Input port からの光は同じ行の Output port に反射させるようになり、スイッチングが行われる。

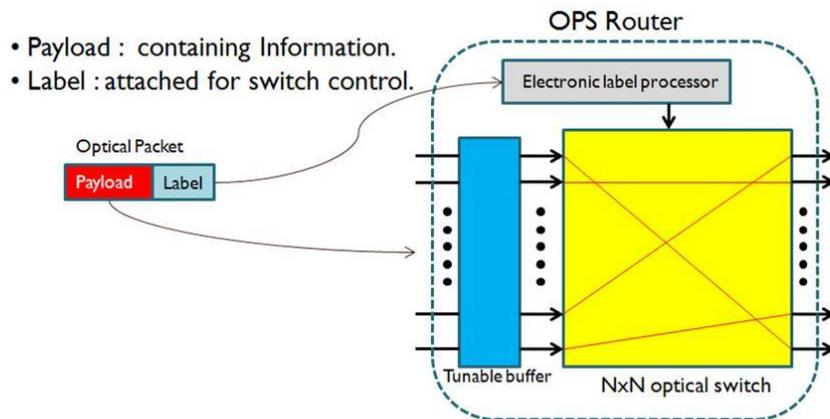


Fig 1.2 OPS Router system for switching optical packets.



Fig 1.3 4×4 optical switch assembled with the reflection cells[6].

この方式では 45 dB 以上の消光比、0.6 dB 以下の入出力損失、1ms 以上の動作時間が得られる。消光比や入出力損失に関しては他の方式より良いものの、動作時間に関しては目的の ns オーダーよりおよそ 6 桁以上の長い時間がかかるため、OPS 通信システムの実現にとっては機械光学式以外の方式を提案する必要があると評価されている。

### 1.2.2 熱光学式スイッチ

熱による屈折率変調方式を用いた光スイッチは Si や PLC (Planar Lightwave Circuit) のように電流があまり通らないながらも安価な材料によく使われる方式で、その研究例としてはマッハゼンダー干渉計 (Mach-Zehnder Interferometer) を応用した Di Yang 氏らの 2 x 2 光スイッチがある[7]。そのデバイスは SOI (Silicon-on-insulator) 基板上にリブ導波路、多モード干渉計 (Multi-Mode Interferometer : MMI)、及びヒーターを集積したもので、その構造を Fig 1.4 に示す。Input 側のポート一箇所から入射した光信号は MMI で同じパワーに分けられてから 2 箇所の導波路に伝搬されるが、ヒーターに熱を加えない場合は次の MMI で光が結合し、Input ポートとは反対の Output ポートで信号が出力される。つまり、上の Input ポートから入射した信号は下の Output ポートから、下の Input ポートから入射した信号は上の Output ポートから出力される。だが、ヒーターに熱を加えた場合はヒーターに覆われている導波路の等価屈折率が変わり、MMI 間を通る両信号の位相関係が反転する。その結果、今度は上の Input ポートから入射した信号は上の Output ポートから、下の Input ポートから入射した信号は下 Output ポートから出力される。

こういう方式では 20 dB 以下の消光比、17 dB 以下の入出力損失、10 μs 前後の動作時間が得られる。安価な材料でも使われるものの、熱を用いた方式には ns オーダーより 3 桁以上長いスイッチング時間が必要になることや、ヒーターを用いるのに比較的高い電力を使わなければならないこと等の本質的な問題があるので、機械光学式スイッチと共に OPS システムに応用するには多少難しい点があるともいえる。

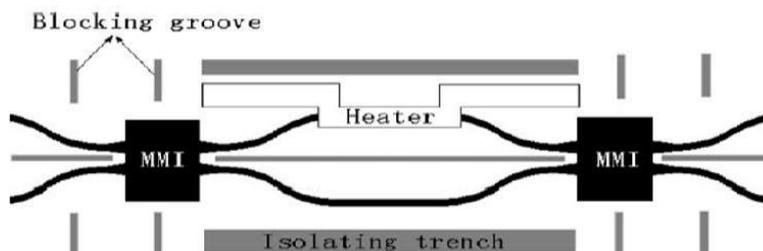


Fig 1.4 Schematic structure of the 2×2 switching unit[7].

### 1.2.3 電気光学式スイッチ

電気光学式 (Electro-optical) スイッチは導波路に電流注入や電圧印加を行うことで等価屈折率を変調し、光信号のスイッチングを行うものである。その動作時間は数~数十 ns くらいのオーダーなので機械光学式スイッチや熱光学式スイッチより何桁以上速く、OPS ルータの実現にはより相応しいスイッチング方式であろうと予想されている。

電気光学式スイッチに関しても様々な研究例があり、Gustav Muller 氏らによる方向性結合器型の  $1 \times 2$  スイッチをカスケード型に接続した  $8 \times 8$  スイッチ [8] や Nan Chi 氏らによる AVC (Active Vertical Coupler) を用いた  $4 \times 4$  スイッチ [9] 等がある (Fig. 1. 5)。前者の方は 100 ns のスイッチング時間を持ち、消光比も平均 28 dB という値を達成しているが、多数の  $1 \times 2$  スイッチをカスケード型にしたため挿入損失が平均 20 dB 程度で大きい。後者の方は 15 ns のスイッチング時間を持ち、消光比は 70 dB、挿入損失は殆ど 0 dB 程度であるため高速で低損失のスイッチを実現しているが、それはアクティブな素子をスイッチングに用いるためで、電力消費が比較的高い。OPS ルータの実現には高速で省電力の  $N \times N$  スイッチが必要であることを考えると、電気光学式スイッチの高速性を保ちながらもパッシブに動作する光スイッチを提案するのが必要となる。そして、アクティブな素子に比べてパッシブな素子は電力の面でメリットはあるものの、挿入損失、消光比は比較的低劣化されるので、可能な限りカスケード接続のような複雑な構造をとれずに一箇所のスイッチング制御で  $N$  個の Output ポートにスイッチングできるデバイスを提案することがそれからの課題となる。

### 1.2.4 $N \times N$ の拡張性に優れた $1 \times N$ 電気光学式スイッチ

$N \times N$  スイッチの形を決めるには大きく分けて三つの方法があり、 $1 \times 2$  スイッチをツリー型にカスケード接続する方法、 $2 \times 2$  スイッチを網型に接続する方法、 $1 \times N$  スイッチ及び  $N \times 1$  スイッチをマトリックス型に並べる方法がある (Fig. 1. 6)。1.2.3 で紹介した Gustav Muller 氏らのスイッチは一番目に該当し、1.2.2 で紹介した Di Yang 氏らのスイッチや 1.2.3 の Nan Chi 氏らのスイッチは二番目に該当する。 $N \times N$  のスケールが大きくなると光スイッチのスイッチングステージ、挿入損失、消費電力も大きくなるが、その増加量は光スイッチがどういう構造をとっているかによって大幅に変わる[10]。

$1 \times 2$  スイッチをツリー型に接続したものは、 $N$  の拡張と共に  $\log_2 N$  に比例してスイッチングステージが多くなり、挿入損失と消費電力も同じスケールで増える。 $2 \times 2$  スイッチを網型に接続したものも  $N$  の拡張と共にスイッチングステージ、挿入損失、消費電力が  $N$  に比例して大きくなる。それに加え、スイッチング制御の簡略さに関して全ての  $1 \times 2$  スイッチや  $2 \times 2$  スイッチに制御装置を実装しないとならないので、ツリー型や網型は  $N$  の

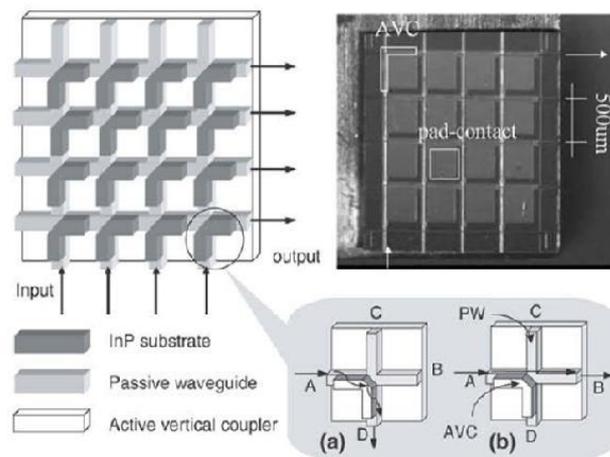


Fig 1.5 Schematics and the photograph of the 4 X 4 crosspoint switch matrix : (a) single switch cell in the ON-state, (b) single switch cell in the OFF-state[9].

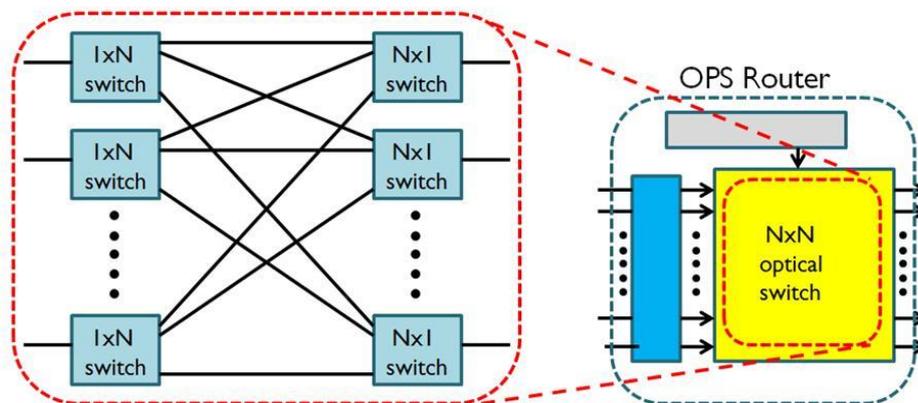


Fig 1.6 NxN optical switch consisted of 1xN and Nx1 optical switches.

大きい光スイッチを構成するには現実的に難しいことであった。

こういう構造上の難点を解決するため提案されたのが 1 x N 及び N x 1 スイッチによる N x N マトリックススイッチである。この方式ではスイッチングステージが一箇所の 1 x N スイッチ及び一箇所の N x 1 スイッチ、合わせてもただ二箇所にすぎないので、挿入損失と消費電力は N のスケールに対して無依存である。そして、スイッチング制御装置についてもツリー型では N に対して  $N \times (\text{Log}_2 N)^2$  の制御装置を、網型では  $N^2$  個のスイッチング制御装置を実装することに比べて 2N 個の制御装置だけを実装するので、操作の簡単さにとってもメリットがあるのである [10-11]。

1 x N スイッチの実現に向けた研究にも様々な例がある。その動作原理は電流注入や電圧印加による屈折率変調ということで同じものの、その応用方法は研究ごとに違うので、これからその応用原理の相違点、長短所を比較していく必要がある。

### 1.3 ビームの偏向を用いたシングルステージ 1 x N 光学スイッチ

#### 1.3.1 既存の 1 x N 光学スイッチ

1 x N 光学スイッチを実現した代表的な例として、半導体光増幅器 (Semiconductor Optical Amplifier : SOA) を用いたブロードキャスト&セレクト方式のスイッチ [12-14]や可変波長変換機 (Tunable Waveguide Converter : TWC) と自由伝搬領域 (Free Propagation Region : FPR) 及びアレイ導波路回折格子 (Arrayed Waveguide grating : AWG) を集積したスイッチ[15]、光コリメータと光学プリズムを用いたビーム偏向型の光スイッチ [16] 等がある。SOA によるブロードキャスト & セレクトスイッチでは一度入力された光信号を分波器 (Splitter) を通して全ての出力ポートに分割し、出力すべきポートの信号だけ SOA で増幅させることでスイッチングを行う。他の出力ポートに伝搬された信号は各ポートの SOA で吸収されるので、その消光比は 45 dB 以上に達している。動作時間も何 ns くらいのオーダーなので早いスイッチングができる一方、アクティブな素子を用いるのは消費電力を高くするため省電力な OPS ルータの素材には使われないと評価されている。TWC と FPR、AWG を集積したスイッチでは FPR を通って AWG に分波される前の光の波長を TWC で変調することでスイッチングするが、AWG の長さやバッファの実装などの問題で N x N スケールの増加と共にその構造がかなり複雑になる。光コリメータと光学プリズムを用いたビーム偏向型のスイッチは入力光信号を光コリメータで平行化させてから自由空間やスラブ導波路に伝搬させ、プリズムで屈折されることでスイッチングを行うので、構造や制御の面でより簡略である。だが、今までのスイッチは光コリメータとプリズムが同じ基板上に集積されていなかったのでデバイスのサイズが大きい。そして、モノリシックでなかったほどデバイスの伝搬損失も大きいので、より低損失のスイッチングを実現するためには両要素を同じ基板上に集積したモノリシックなビーム偏向型の 1 x N

光スイッチを実現させなければならないのである。

### 1.3.2 モノリシックなビーム偏向型の 1xN スイッチ

従来のビーム偏向型光スイッチとは違う、モノリシックで新しいスイッチの開発必要性に応え、光コリメータと光学プリズムを同じスラブ導波路上に集積された 1 x 8 ビーム偏向型スイッチが 2008 年に研究された [17]。Fig 1.7 にその上面図、断面図を示す。光コリメータレンズの設計には等価屈折率法を用い、InGaAsP コアの上クラッドをレンズ型にエッチングすることで実際のレンズのように動作させた。プリズムの設計には光線光学によるビームの屈折法則を用いたが、動作原理としては電流注入によるコアの屈折率変調を想定した。ポート 1 からポート 4 までのスイッチングには上向きの三角プリズムに、ポート 5 からポート 8 までのスイッチングには下向きの三角プリズムに電流を流した。

Fig 1.8 にスイッチング時の IR カメラによる光強度分布を示す。光スイッチングとしての消光比は 15 dB 以上が望ましいであるが、デバイスの消光比は実際平均 5 dB 未満であった。それはデバイスの設計過程で光の回折等の光波光学的な特性は考慮されず、理想的な光線としてビームが解析されたので、結果的にレンズの界面による回折効果や迷光の効果が設計に反映されずと予想とは違う結果になったと予測される。だが、ビームの偏向は観測されたので、これからは光の光波的な特性まで考慮した設計を改めて行い、より低い挿入損失と高い消光比の光スイッチを設計、実現する課題が残されたのである。

## 1.4 本研究の目的と本論文の概要

本研究は高速で省電力な光スイッチングをより簡単に制御するための、モノリシックなビーム偏向型 1 x N 光スイッチを改めて提案し、実現するものである。従来のビーム偏向型光スイッチでは光コリメータと光学プリズムがモノリシックに集積されていなかったため、デバイスのサイズや光信号の損失という面でデメリットがあった。既に提案されてい

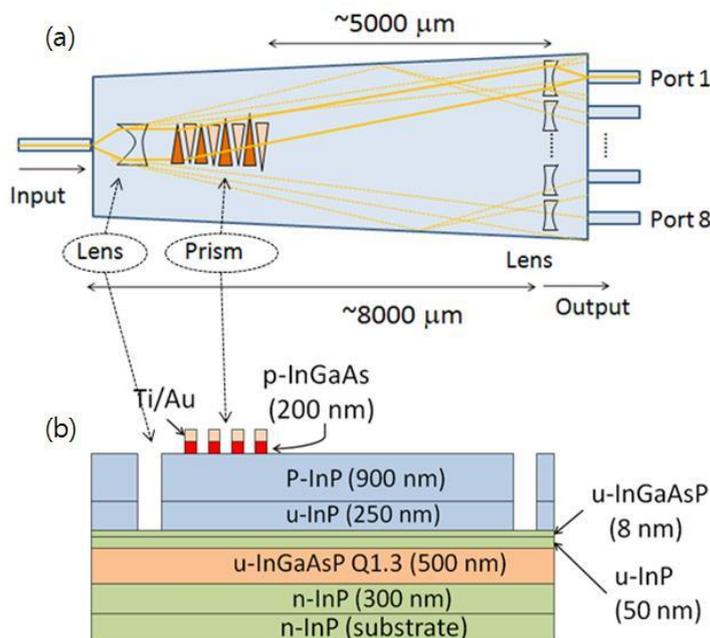


Fig 1.7 Schematics of 1xN InP beam-deflecting optical switch: (a) Top-view structure. Light propagation is shown by a yellow solid line. (b) Layer structure of slab, lens, prism.

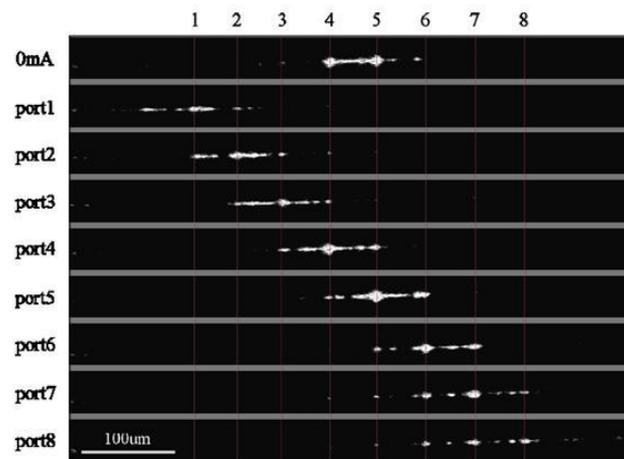


Fig 1.8 Near field image observed at output waveguides of 1X8 optical switch[17].

たモノリシックなビーム偏向型光スイッチではスラブ導波路中に電流を注入することでビームの偏向ができることを証明したので、本研究ではそのデバイスを改善してより低い挿入損失、高い消光比のスイッチングができることをシミュレーション及び実験を通じて検証する。

## 第2章 デバイスの動作原理及び設計論

この章では、素子の構造、動作、及びその設計原理について記述する。

2.1 では  $1 \times N$  光スイッチの全般的な構造、動作について述べ、2.2 からはその設計のために必要な光の導波路中のモード伝搬、等価屈折率法、電流注入による屈折率の変調等について説明する。モード伝搬の説明はリブ型導波路やスラブ型導波路で光がどのような原理で導波するのかを理解するのに必要である。等価屈折率法と電流注入による屈折率の変調効果は各々スラブ導波路中に非球面レンズを設計することやプリズムを設計するのに必要である。

次に、今度のビーム屈折型  $1 \times N$  光スイッチで新しく導入するスラブの上のトランチの形やそれがデバイスの動作に与える影響について説明する。その後はレンズ、プリズム、トランチが集積されたスラブ導波路の形をまとめることでデバイスの最終的な形を記述する。

### 2.1 ビーム屈折型 $1 \times N$ 光スイッチの構造と動作

既に関連されたモノリシックなビーム屈折型の  $1 \times N$  光スイッチは 1.3.2 の Fig 1.7 に示したが、本研究で改めて設計した  $1 \times N$  光スイッチの概形を Fig 2.1 に示す。Fig 1.7 との相違点は入力ポート側のコリメートレンズが 2 つになっていること、及びトランチというコアまでエッチングされた部分があることである。両方ともデバイスの消光比を改善するため新しく設計されたものであるが、それぞれがどのように消光比を良くするかは各々 2.4 と 2.6 で詳しく説明する。

デバイスはレンズによる平行化(コリメーション) とプリズムによる光の偏向(デフレクション) で動作する。入力ポートから入射された光は 2 つのレンズを通りながら平行化されたビームになり、プリズムを通る。出力ポートはプリズムの動作で決められるが、電流を

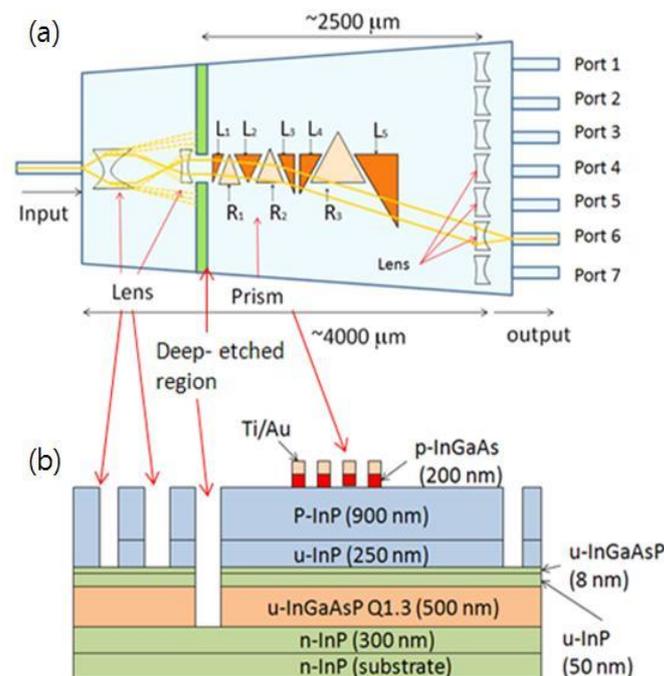


Fig 2.1 Schematics of improved  $1 \times N$  InP beam-deflecting optical switch: (a) Top-view structure. Light propagation is shown by a yellow solid line. (b) Layer structure of slab, lens, prism, and deep-etched region.

上向きのプリズムに注入するか、下向きのプリズムに注入するか、どちらにも注入しないかによってビームの結合される出力ポートが変わる。プリズムによるスイッチングの制御は2.5で詳しく説明する。

## 2.2 光の導波路上のモード伝搬

本研究の1xN光偏向型スイッチはFig1.7の断面図のように、バンド端の発光波長が1.3  $\mu\text{m}$ のQ1.3 (Quanternary 1.3) InGaAsP コアと InP の上下クラッドで構成されている。そのコアとクラッドの屈折率は各々3.4, 3.169であるので、入射された光は InGaAsP コア層に閉じ込められたままデバイスの中を伝搬するようになる。このような形の導波路をスラブ導波路と呼ぶ。

スラブ導波路中の光の伝搬を解析するためにマクスウェル方程式を考慮する。一般的に光の進行方向をz軸、進行方向の積層方向をy軸、残りの方向をx軸にして解析を行う場合が多いので、本章でも同じ軸で式を展開する[18]。

伝搬光の角周波数を $\omega$ 、伝搬定数を $\beta$ とすると、電磁界は次のように表される。

$$\mathbf{e} = \mathbf{E}(x, y) \exp[j(\omega t - \beta z)] \quad (2.1)$$

$$\mathbf{h} = \mathbf{H}(x, y) \exp [j(\omega t - \beta z)] \quad (2.2)$$

これをマクスウェル方程式

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \quad (2.3)$$

$$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} \quad (2.4)$$

に代入した結果を示すと、次のような6個の式になる。

$$\begin{cases} \frac{\partial E_z}{\partial y} + j\beta E_y = -j\omega\mu_0 H_x \\ -j\beta E_x - \frac{\partial E_z}{\partial x} = -j\omega\mu_0 H_y \\ \frac{\partial E_y}{\partial x} - \frac{\partial E_x}{\partial y} = -j\omega\mu_0 H_z \end{cases} \quad (2.5)$$

$$\begin{cases} \frac{\partial H_z}{\partial y} + j\beta H_y = -j\omega\epsilon_0 n^2 E_x \\ -j\beta H_x - \frac{\partial H_z}{\partial x} = j\omega\epsilon_0 n^2 E_y \\ \frac{\partial H_y}{\partial x} - \frac{\partial H_x}{\partial y} = -j\omega\epsilon_0 n^2 E_z \end{cases} \quad (2.6)$$

スラブ導波路ではx方向の媒質変化がないので、x方向の偏微分成分を0にすると、(2.5)及び(2.6)はそれぞれ

$$\begin{cases} \frac{\partial E_z}{\partial y} + j\beta E_y = -j\omega\mu_0 H_x \\ -j\beta E_x = -j\omega\mu_0 H_y \\ -\frac{\partial E_x}{\partial y} = -j\omega\mu_0 H_z \end{cases} \quad (2.7)$$

$$\begin{cases} \frac{\partial H_z}{\partial y} + j\beta H_y = -j\omega\epsilon_0 n^2 E_x \\ -j\beta H_x = j\omega\epsilon_0 n^2 E_y \\ -\frac{\partial H_x}{\partial y} = -j\omega\epsilon_0 n^2 E_z \end{cases} \quad (2.8)$$

となる。

(2.8)の第一式と(2.7)の第二、第三式には $[E_x, H_y, H_z]$ だけが存在し、残りの成分 $[H_x, E_y, E_z]$ とは独立されたモードが形成されるのが分かる。これを TE (Transverse Electric) モードと呼び、次の式でまとめられる。

$$\begin{cases} \frac{\partial^2 E_x}{\partial y^2} + (k^2 - \beta^2)E_x = 0 \\ H_y = \frac{\beta}{\omega\mu_0} E_x \\ H_z = -\frac{j}{\omega\mu_0} \frac{\partial E_x}{\partial y} \end{cases} \quad (2.9)$$

一方、(2.7)の第一式と(2.8)の第二、第三式には $[H_x, E_y, E_z]$ だけが存在し、残りの成分 $[E_x, H_y, H_z]$ とは独立されたモードが形成されるのが分かる。これを TM (Transverse Magnetic) モードと呼び、次の式でまとめられる。

$$\begin{cases} \frac{\partial^2 H_x}{\partial y^2} + (k^2 - \beta^2)H_x = 0 \\ E_y = -\frac{\beta}{\omega\epsilon_0 n^2} H_x \\ H_z = \frac{j}{\omega\epsilon_0 n^2} \frac{\partial H_x}{\partial y} \end{cases} \quad (2.10)$$

伝搬光の解析は(2.9)式及び(2.10)式を基本して行うが、実際の導波路では y 方向の屈折率分布が変わるので、電磁界を y 方向に沿って離散化し、境界条件を満たすように数値解析を行う(Fig.2.2)。全層数を N とし、第 1 番目の層から第 N 番目の層までそれぞれの屈折率、膜厚を各々  $n_i$ 、 $a_i$  とする。また、i 番目の波数を  $k_i = k_0 n_i$  とすれば、i 番目の層に対する TE モードの電界  $E_{xi}$ 、および TM モードの磁界  $H_{xi}$  は次式のようになる。

$$\begin{Bmatrix} E_{xi} \\ H_{xi} \end{Bmatrix} = A_i \exp[-jk_{yi}(y - y_i)] + B_i \exp[jk_{yi}(y - y_i)] \quad (2.11)$$

ただし、

$$k_{yi} = \sqrt{k_i^2 - \beta^2} = \begin{cases} \sqrt{k_i^2 - \beta^2} & (\text{for } \beta < k_i) \\ j\sqrt{\beta^2 - k_i^2} & (\text{for } \beta > k_i) \end{cases} \quad (2.12)$$

なお、第 1 層および層では  $y = \pm\infty$  で電磁界が発散しないので、係数は

$$B_1 = A_N = 0 \quad (2.13)$$

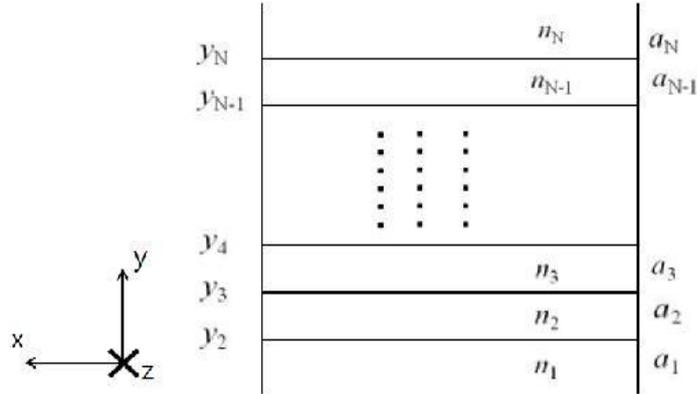


Fig 2.2 Discretization of refractive index, layer thickness for multilayers

となる。

電磁界の連続性から TE モードでは $[E_x, H_z]$ が、TM モードでは $[H_x, E_z]$ が連続になるので、次の関係が成り立つ。

$$E_{xi} = E_{xi-1}, H_{zi} = H_{zi-1} \quad (\text{TE mode}) \quad (2.14)$$

$$H_{xi} = H_{xi-1}, E_{zi} = E_{zi-1} \quad (\text{TM mode}) \quad (2.15)$$

(2.11)式を(2.14)、(2.15)に代入すると、 $A_i$ 、 $B_i$ と  $A_{i-1}$ 、 $B_{i-1}$  の関係を次のように行列を用いてまとめることができる。

$$\begin{bmatrix} A_i \\ B_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{i1} & C_{i2} \\ C_{i3} & C_{i4} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_{i-1} \\ B_{i-1} \end{bmatrix} = [C_i] \begin{bmatrix} A_{i-1} \\ B_{i-1} \end{bmatrix} \quad (2.16)$$

ただし、

$$\begin{aligned} C_{i1} &= \frac{k_{yi} + k_{yi-1}m_i^2}{2k_{yi}} \exp[-jk_{yi-1}a_{i-1}] \\ C_{i2} &= \frac{k_{yi} - k_{yi-1}m_i^2}{2k_{yi}} \exp[jk_{yi-1}a_{i-1}] \\ C_{i3} &= \frac{k_{yi} - k_{yi-1}m_i^2}{2k_{yi}} \exp[-jk_{yi-1}a_{i-1}] \\ C_{i4} &= \frac{k_{yi} + k_{yi-1}m_i^2}{2k_{yi}} \exp[jk_{yi-1}a_{i-1}] \end{aligned} \quad (2.17)$$

$$m_i = \begin{cases} 1 & (\text{for TE - Mode}) \\ n_i/n_{i-1} & (\text{for TM - Mode}) \end{cases} \quad (2.18)$$

となる。

$i$  を 2 から  $N$  まで(2.16)式に代入すると、 $A_i$ 、 $B_i$ と  $A_N$ 、 $B_N$ を次のような式に展開できる。

$$\begin{bmatrix} A_i \\ B_i \end{bmatrix} = [C_N][C_{N-1}][C_{N-2}] \cdots [C_3][C_2] \begin{bmatrix} A_1 \\ B_1 \end{bmatrix} \quad (2.19)$$

ここで  $B_1 = A_N = 0$ 、 $a_i = 0$  を代入し、(2.19)の関係を満足させる  $\beta$  を求めれば想定のスラブ導波路を伝搬する光の伝搬定数になる。ただし、電磁界は第1層と第N層で指数関数的に減少されなければならない。つまり、 $\beta$ の存在範囲は第1層と第N層では  $k_{y1}$ 、 $k_{yN}$  が虚数になり、屈折率の最も高い層では  $k_{yi}$  が実数になる範囲である。一般的に第1層は基板、第N層は空気、屈折率の最も高い層は導波路のコアに想定される。

このように存在し得る  $\beta$  を求めれば各層の  $k_{yi}$  が得られ、当該層の電磁界が決まる。さらに各層の計算結果をまとめると全体の電磁界が決まるので、その伝搬定数  $\beta$  に該当する電磁界の形を求めることができる。 $\beta$  はコアの厚さやコア、クラッド間の屈折率差により複数存在することもあるが、Fig.1.7のようにコアの厚さが 500 nm であると基本モードだけが存在するようになるので、 $\beta$  の値も一つだけ求められる。

### 2.3 解析手法

#### 2.3.1 光線光学による解析

スラブ導波路上の光は 2.2 で説明されたように、屈折率の高い InGaAsP コア層に閉じ込められた形で z 軸上を伝搬するが、その閉じ込めはコアがクラッドに阻まれて y 方向の様子であり、スラブの x 方向では物質の変化がないため光は屈折率  $n_{\text{eff}}$  (上から見たスラブの等価屈折率)の自由空間中を伝搬するように z 方向に拡散する。Fig.2.3 に各々 yz 平面上で見た光の伝搬様子と xz 平面上で見た光の伝搬様子を示す。入力側の導波路から入射された光の振幅分布はのガウス関数によって表されるので、ガウスビーム (Gaussian beam) と呼ばれる。光軸からの変位を  $r$ 、ガウスビームの半径 (spot size)を  $\omega_0$ 、比例乗数を A にすると、ガウスビームは式(2.20)のように表記される[19]。

$$\psi(x, y) = A \exp \left( -\frac{x^2 + y^2}{\omega_0^2} \right) = A \exp \left[ -\left( \frac{r}{\omega_0} \right)^2 \right] \quad (2.20)$$

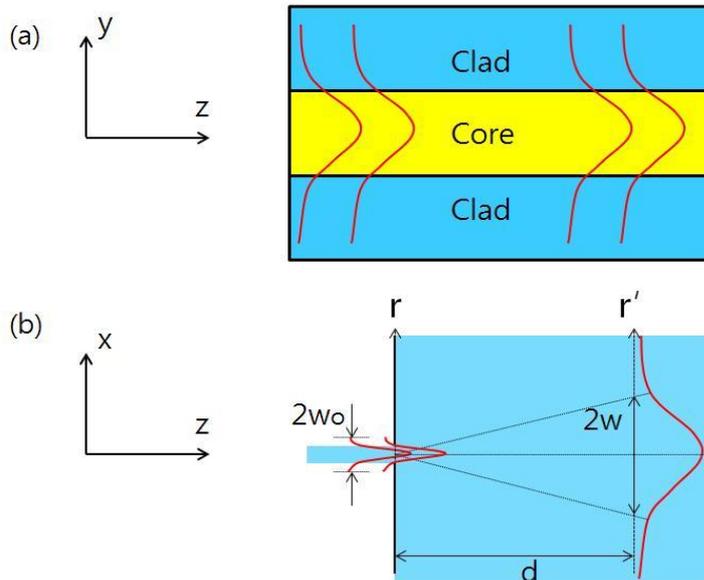


Fig 2.3 Beam propagation shape : (a) along z-y flat, (b) along z-x flat.

そして、入射されたガウスビームが光軸に沿って  $d$  ほど伝搬したときの振幅分布は式(2.21)のようになる。ただ、ビームは実際に真空ではなく、屈折率  $n_{\text{eff}}$  のスラブ導波路を伝搬しているので、式(2.21)の波数  $k$  を  $2\pi n_{\text{eff}}/\lambda$  にする必要がある。

$$\text{振幅項} = \exp\left[-\frac{x'^2+y'^2}{\left(\frac{d}{k\omega_0}\right)^2}\right] = \exp\left[-\frac{r'^2}{\left(\frac{d}{k\omega_0}\right)^2}\right] = \exp\left[-\frac{r'^2}{w^2}\right] \quad (2.21)$$

本研究では一定な等価屈折率のスラブ上に各々違う等価屈折率を持つ非球面型のレンズ、三角型のプリズムを設計する。スラブ導波路には Fig 1.7 のように、上部クラッドを一部エッチングすると該当部分のコアの等価屈折率が永久的に変わる特性や、InGaAs 層上に電極を蒸着すると電流注入時に限り電極部分の等価屈折率が変わる特性がある。そういう特性の基でレンズとプリズムの等価屈折率を計算し、「空気」上にレンズとプリズムを配置するように「スラブ」上にレンズとプリズムを配置することを構想すればデバイスの基本的な設計ができる。つまり、スネルの法則に基づいた光線光学の考え方でデバイスの設計はできるのである。その具体的な計算法は 2.4 で記述する。

ただし、本研究のデバイスでは焦点距離  $\mu\text{m}$  オーダーのレンズ等を用いるので、 $\text{mm}$  オーダーのデバイスでは無視できるほどの光の回折、あるいはコア中の光拡散による消光比の低下などの問題が生じる。そのためデバイスの設計段階では光線光学の解析だけではなく、光波光学の解析による設計の補正を行う必要である。本研究では FD-BPM を用いて光伝搬の近似計算を行ったが、その詳細を次の 2.3.2 から述べる。

### 2.3.2 光波光学による解析

マクスウェル方程式の電磁界分析による光伝搬の解析法には色々なものがあるが、その中でビーム伝搬法 (BPM : Beam Propagation Method) は導波路の形状がテーパや曲がりなどで変化する場や、屈折率分布がやわらかに変化する場の場合の電磁界特性を解析するのに有用な手法である。ここでは電磁界に差分近似を適用して伝搬方向の電磁界の変化を計算する FD-BPM (有限差分ビーム伝搬法) について記述する[20]。

式(2.3)及び(2.4)を、電流密度  $\mathbf{J}$  を 0 にした定常解を考慮して書き直すと、各々式(2.22)、(2.23)になる。

$$\nabla \times \mathbf{E} = -j\omega\mu_0\mathbf{H} \quad (2.22)$$

$$\nabla \times \mathbf{H} = j\omega\epsilon_0\epsilon\mathbf{E} \quad (2.23)$$

2.2 と同様に  $x$  方向の物質変化がないとして  $x$  の変微分項を 0 とおくと、次の式(2.24)、(2.25)が得られる。

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial E_y}{\partial z} - \frac{\partial E_z}{\partial y} = -j\omega\mu_0 H_x \\ -\frac{\partial E_x}{\partial z} = -j\omega\mu_0 H_y \\ \frac{\partial E_x}{\partial y} = -j\omega\mu_0 H_z \end{array} \right. \quad (2.24)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial H_y}{\partial z} - \frac{\partial H_z}{\partial y} = j\omega\epsilon_0\epsilon_r E_x \\ -\frac{\partial H_x}{\partial z} = j\omega\epsilon_0\epsilon_r E_y \\ -\frac{\partial H_x}{\partial y} = -j\omega\epsilon_0\epsilon_r E_z \end{array} \right. \quad (2.25)$$

式(2.24)、(2.25)から各電磁界成分を TE モードの  $[E_x, H_y, H_z]$ 、TM モードの  $[H_x, E_y, E_z]$  二組に分け、各々  $E_x$ 、 $H_x$  に関して展開すると、式 (2.26)が求められる。

$$\frac{\partial^2 E_x}{\partial z^2} + \frac{\partial^2 E_x}{\partial y^2} + k_0^2 \epsilon_r E_x = 0 \quad (\text{TE モード})$$

$$\frac{\partial^2 H_x}{\partial z^2} + \epsilon_r \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{1}{\epsilon_r} \frac{\partial H_x}{\partial y} \right) + k_0^2 \epsilon_r H_x = 0 \quad (\text{TM モード})(2.26)$$

これからは式 (2.26)の各式に差分計算を適用するための定式化を行う。TE モードに関しては、 $z$  方向に伝搬する波動関数  $E_y(x,y,z)$  を進行方向に緩やかに変化する振幅項  $\phi(x,y,z)$  と激しく振動する位相項  $\exp(-j\beta z)$  に分けて式 (2.27)のように近似する。

$$E_y(x,y,z) = \phi(x,y,z) \exp(-j\beta z) \quad (2.27)$$

ここで、伝搬定数  $\beta$  は真空中の波数  $k_0$  に導波路の等価屈折率  $n_{\text{eff}}$  を掛けた値である。(2.27)を  $z$  で2回偏微分することで式 (2.28)が求められる。

$$\frac{\partial^2 E_x}{\partial z^2} = \frac{\partial^2 \phi}{\partial z^2} \exp(-j\beta z) - 2j\beta \frac{\partial \phi}{\partial z} \exp(-j\beta z) - \beta^2 \phi \exp(-j\beta z) \quad (2.28)$$

(2.28)を(2.26)の TE モード式に代入すれば、次の式(2.29)が求められる。

$$2j\beta \frac{\partial \phi}{\partial z} - \frac{\partial^2 \phi}{\partial z^2} = \frac{\partial^2 \phi}{\partial y^2} + k_0^2 (\epsilon_r - n_{\text{eff}}^2) \phi \quad (2.29)$$

仮定より、 $\phi(x,y,z)$  は  $z$  方向で緩やかに変化する関数であるので、 $\phi(x,y,z)$  の2階微分は0に近似される。

$$\frac{\partial^2 \phi}{\partial z^2} = 0 \quad (2.30)$$

(2.30)より、(2.29)は次のフレネル近似の波動方程式となる。

$$2j\beta \frac{\partial \phi}{\partial z} = \frac{\partial^2 \phi}{\partial y^2} + k_0^2 (\epsilon_r - n_{\text{eff}}^2) \phi \quad (2.31)$$

フレネル近似について定式化を行うため、 $y$  座標と  $z$  座標を Fig2.4 のように離散化する。

$$y = p\Delta y \quad (2.32)$$

$$z = l\Delta z \quad (2.33)$$

座標  $(y,z)$  の波動関数  $\phi(y,z)$  と比誘電率  $\epsilon_r(y,z)$  は次のように略記する。

$$\phi(y,z) = \phi(p\Delta y, l\Delta z) \rightarrow \phi_p^l \quad (2.34)$$

$$\epsilon_r(y,z) \rightarrow \epsilon_r^l(p) \quad (2.35)$$

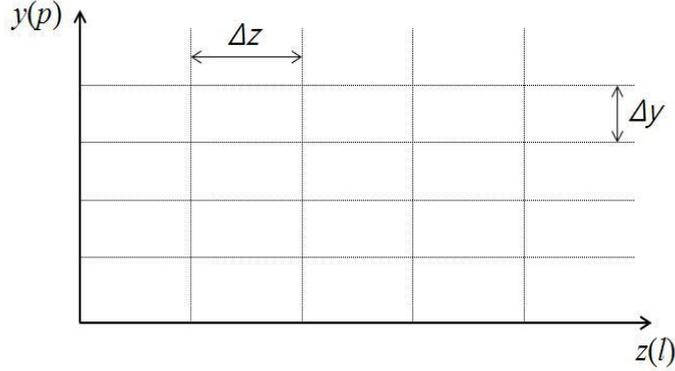


Fig 2.4 y and z axis discretization for numerical calculation.

(2.32)から(2.35)までの式を用いて式(2.31)を離散化する。z 方向に関しては後で離散化することにして、先に y 方向についてのみ離散化する。

$$\frac{\partial^2 \phi}{\partial y^2} = \frac{1}{\Delta y} \left( \frac{\phi_{p+1} - \phi_p}{\Delta y} - \frac{\phi_p - \phi_{p-1}}{\Delta y} \right) = \frac{\phi_{p+1} - 2\phi_p + \phi_{p-1}}{(\Delta y)^2} \quad (2.36)$$

$$k_0^2(\epsilon_r - n_{eff}^2) \phi = k_0^2(\epsilon_r(p) - n_{eff}^2) \phi_p \quad (2.37)$$

式(2.31)に(2.36)、(2.37)を代入して式(2.38)を求める。

$$2j\beta \frac{\partial \phi_p}{\partial z} = \frac{\phi_{p-1}}{(\Delta y)^2} + \left\{ \frac{1}{(\Delta y)^2} + k_0^2(\epsilon_r(p) - n_{eff}^2) \right\} \phi_p - \frac{2}{(\Delta y)^2} \phi_{p+1} \quad (2.38)$$

式(2.38)の左辺を座標 z について差分化すると次の式を得る。

$$2j\beta \frac{\partial \phi_p}{\partial z} = 2j\beta \frac{\phi_p^{l+1} - \phi_p^l}{\Delta z} \quad (2.39)$$

式(2.39)の差分中心は l と l+1 の中間の l+1/2 である。式(2.38)の右辺についても z に関する差分中心は l+1/2 のはずであるから、(2.38)を次の式(2.40)に書き直すこともできる。

$$2j\beta \frac{\phi_p^{l+1} - \phi_p^l}{\Delta z} = \frac{1}{2} \left[ \frac{\phi_{p-1}^l}{(\Delta y)^2} + \left\{ -\frac{2}{(\Delta y)^2} + k_0^2(\epsilon_r^l(p) - n_{eff}^2) \right\} \phi_p^l + \frac{1}{(\Delta y)^2} \phi_{p+1}^l \right]$$

$$+ \frac{1}{2} \left[ \frac{\phi_{p-1}^{l+1}}{(\Delta y)^2} + \left\{ -\frac{2}{(\Delta y)^2} + k_0^2(\varepsilon_r^{l+1}(p) - n_{eff}^2) \right\} \phi_p^{l+1} + \frac{1}{(\Delta y)^2} \phi_{p+1}^{l+1} \right] \quad (2.40)$$

式(2.40)の左辺に  $l+1$  の項を、右辺に  $l$  の項をまとめると最終的に次の式(2.41)を得る。

$$\begin{aligned} & -\frac{1}{(\Delta y)^2} \phi_{p-1}^{l+1} + \left\{ \frac{2}{(\Delta y)^2} + \frac{4j\beta}{\Delta z} - k_0^2(\varepsilon_r^{l+1}(p) - n_{eff}^2) \right\} \phi_p^{l+1} - \frac{1}{(\Delta y)^2} \phi_{p+1}^{l+1} \\ & = \frac{1}{(\Delta y)^2} \phi_{p-1}^l + \left\{ -\frac{2}{(\Delta y)^2} + \frac{4j\beta}{\Delta z} + k_0^2(\varepsilon_r^l(p) - n_{eff}^2) \right\} \phi_p^l + \frac{1}{(\Delta y)^2} \phi_{p+1}^l \end{aligned} \quad (2.41)$$

TE モードについては以上であるが、TM モードに関しても TE モードと同じ方法で定式化できる。TM モードに関しては、 $z$  方向に伝搬する波動関数  $H_x(x,y,z)$  を進行方向に緩やかに変化する振幅項  $\phi(x,y,z)$  と激しく振動する位相項  $\exp(-j\beta z)$  に分けて式(2.42)のように近似する。

$$H_x(x,y,z) = \phi(x,y,z) \exp(-j\beta z) \quad (2.42)$$

式(2.28)と同様に、 $H_x(x,y,z)$  の  $z$  に関する 2 階微分を求めて(2.26)の TM モード式に代入すると次の式(2.43)を得る。

$$2j\beta \frac{\partial \phi}{\partial z} - \frac{\partial^2 \phi}{\partial z^2} = \varepsilon_r \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{1}{\varepsilon_r} \frac{\partial \phi}{\partial y} \right) + k_0^2(\varepsilon_r - n_{eff}^2) \phi \quad (2.43)$$

仮定より、 $\phi(x,y,z)$  は  $z$  方向で緩やかに変化する関数であるので、 $\phi(x,y,z)$  の 2 階微分は 0 に近似される。

$$\frac{\partial^2 \phi}{\partial z^2} = 0 \quad (2.44)$$

式(2.44)を式(2.43)に代入することで次の式(2.45)を得る。

$$2j\beta \frac{\partial \phi}{\partial z} = \varepsilon_r \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{1}{\varepsilon_r} \frac{\partial \phi}{\partial y} \right) + k_0^2(\varepsilon_r - n_{eff}^2) \phi \quad (2.45)$$

式(2.32)~(2.35)をそのまま適用して式(2.45)を離散化する。 $z$  方向に関しては後で離散化することにして、先に  $y$  方向についてのみ離散化する。

$$\varepsilon_r \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{1}{\varepsilon_r} \frac{\partial \phi}{\partial y} \right) = \varepsilon_r(p) \frac{1}{\Delta y} \left( \frac{1}{\varepsilon_r(p+\frac{1}{2})} \frac{\phi_{p+1} - \phi_p}{\Delta y} - \frac{1}{\varepsilon_r(p-\frac{1}{2})} \frac{\phi_p - \phi_{p-1}}{\Delta y} \right) \quad (2.46)$$

ここで、式(2.47), (2.48)が成り立つ。

$$\varepsilon_r \left( p + \frac{1}{2} \right) \approx \frac{\varepsilon_r(p+1) + \varepsilon_r(p)}{2} \quad (2.47)$$

$$\varepsilon_r \left( p - \frac{1}{2} \right) \approx \frac{\varepsilon_r(p) + \varepsilon_r(p-1)}{2} \quad (2.48)$$

式(2.47), (2.48)を式(2.46)に代入すると、次の式(2.49)を得る。

$$\begin{aligned}
 \varepsilon_r \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{1}{\varepsilon_r} \frac{\partial \phi}{\partial y} \right) &= \varepsilon_r(p) \frac{1}{\Delta y} \left( \frac{2}{\varepsilon_r(p+1)+\varepsilon_r(p)} \frac{\phi_{p+1} - \phi_p}{\Delta y} - \frac{2}{\varepsilon_r(p)+\varepsilon_r(p-1)} \frac{\phi_p - \phi_{p-1}}{\Delta y} \right) \\
 &= \frac{2\varepsilon_r(p)}{\varepsilon_r(p+1)+\varepsilon_r(p)} \frac{\phi_{p+1} - \phi_p}{(\Delta y)^2} - \frac{2\varepsilon_r(p)}{\varepsilon_r(p)+\varepsilon_r(p-1)} \frac{\phi_p - \phi_{p-1}}{(\Delta y)^2} \\
 &= \frac{1}{(\Delta y)^2} \frac{2\varepsilon_r(p)}{\varepsilon_r(p+1)+\varepsilon_r(p)} \phi_{p+1} + \frac{1}{(\Delta y)^2} \frac{2\varepsilon_r(p)}{\varepsilon_r(p)+\varepsilon_r(p-1)} \phi_{p-1} \\
 &\quad - \left\{ \frac{2\varepsilon_r(p)}{\varepsilon_r(p+1)+\varepsilon_r(p)} + \frac{2\varepsilon_r(p)}{\varepsilon_r(p)+\varepsilon_r(p-1)} \right\} \frac{1}{(\Delta y)^2} \phi_p = \frac{\alpha_w}{(\Delta y)^2} \phi_{p-1} + \frac{\alpha_x}{(\Delta y)^2} \phi_p + \frac{\alpha_e}{(\Delta y)^2} \phi_{p+1}
 \end{aligned} \tag{2.49}$$

式(2.49)にはこれからの展開を簡単にするため、次の変数を定義した。

$$\left. \begin{aligned}
 \alpha_w &= \frac{2\varepsilon_r(p)}{\varepsilon_r(p)+\varepsilon_r(p-1)} \\
 \alpha_e &= \frac{2\varepsilon_r(p)}{\varepsilon_r(p)+\varepsilon_r(p-1)} \\
 \alpha_x &= -\frac{2\varepsilon_r(p)}{\varepsilon_r(p)+\varepsilon_r(p-1)} \\
 &\quad - \frac{2\varepsilon_r(p)}{\varepsilon_r(p)+\varepsilon_r(p-1)} \\
 &= -\alpha_w - \alpha_e
 \end{aligned} \right\} \tag{2.50}$$

式(2.37)、(2.49)を式(2.45)に代入すると式(2.51)が求められる。

$$2j\beta \frac{\partial \phi}{\partial z} = \frac{\alpha_w}{(\Delta y)^2} \phi_{p-1} + \frac{\alpha_x}{(\Delta y)^2} \phi_p + \frac{\alpha_e}{(\Delta y)^2} \phi_{p+1} + k_0^2(\varepsilon_r - n_{eff}^2) \phi_p \tag{2.51}$$

式(2.51)の左辺を座標  $z$  について差分化すると次の式を得る。

$$2j\beta \frac{\partial \phi_p}{\partial z} = 2j\beta \frac{\phi_p^{l+1} - \phi_p^l}{\Delta z} \tag{2.52}$$

式(2.51)の差分中心は  $l$  と  $l+1$  の中間の  $l+1/2$  である。式(2.51)の右辺についても  $z$  に関する差分中心は  $l+1/2$  のはずであるから、(2.51)の右辺を式(2.40)と同じ形で  $\phi^l$  の項、 $\phi^{l+1}$  の項に分けることができる。その後左辺に  $l+1$  の項を、右辺に  $l$  の項をまとめると最終的に次の式(2.53)を得る。

$$\begin{aligned}
 & -\frac{\alpha_w}{(\Delta y)^2} \phi_{p-1}^{l+1} + \left\{ -\frac{\alpha_x}{(\Delta y)^2} + \frac{4j\beta}{\Delta z} - k_0^2(\varepsilon_r^{l+1}(p) - n_{eff}^2) \right\} \phi_p^{l+1} - \frac{\alpha_e}{(\Delta y)^2} \phi_{p+1}^{l+1} \\
 & = \frac{\alpha_w}{(\Delta y)^2} \phi_{p-1}^l + \left\{ \frac{\alpha_x}{(\Delta y)^2} + \frac{4j\beta}{\Delta z} + k_0^2(\varepsilon_r^l(p) - n_{eff}^2) \right\} \phi_p^l + \frac{\alpha_e}{(\Delta y)^2} \phi_{p+1}^l
 \end{aligned} \tag{2.53}$$

TE、TM モードについての近似計算は式(2.41)、(2.53)によって行われるが、本研究では

TE モードレーザで光をデバイス中に入射させるため、2.4 からは主に TE モードを想定しながら議論することにする。

## 2.4 非球面レンズの動作原理及び設計

### 2.4.1 等価屈折率法

2.3.1 ではレンズの等価屈折率を求めることで、実際のレンズを空気中に配置するようにスラブ上にレンズを設計することができることを記述した。2.4.1 ではその等価屈折率を求めるための具体的な計算方法について議論する[20]。

まずは Fig 2.5(a) ようなリッジ型の導波路を想定する。最終的にはレンズの等価屈折率を求めるための議論をするべきであるが、より一般的な等価屈折率の計算法を説明するためにリッジ型導波路からその議論を始める。光源からは TE モードの光が入射され、導波路を伝搬すると仮定する。

導波路の求めるべき最終的な等価屈折率を  $n_{eff}$  として次の波動方程式を考える。

$$\frac{\partial^2 \phi(x,y)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \phi(x,y)}{\partial y^2} + k_0^2(n^2(x,y) - n_{eff}^2) \phi(x,y) = 0 \quad (2.54)$$

ここで、波動関数  $\phi(x,y)$  について座標  $x,y$  を変数分離する。

$$\phi(x,y) = f(x) \cdot g(y) \quad (2.55)$$

(2.55)を(2.54)に代入した後、全体を  $\phi(x,y)$  に割ると次の式を得る。

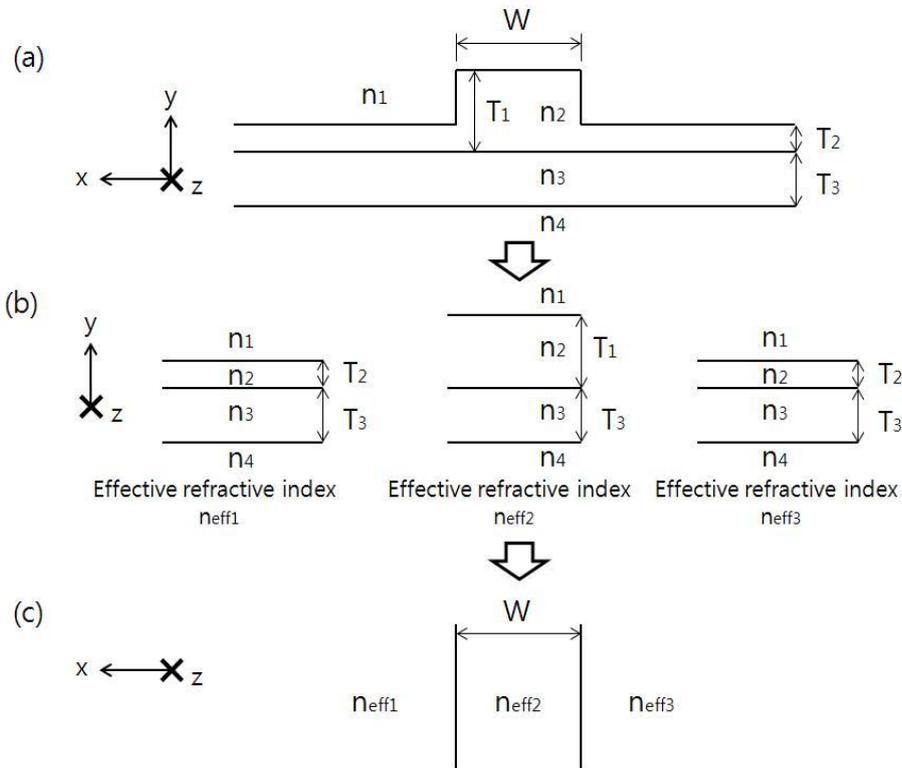


Fig 2.5 Image of effective index method

$$\frac{1}{f(x)} \frac{\partial^2 f(x)}{\partial x^2} + \frac{1}{g(y)} \frac{\partial^2 g(y)}{\partial y^2} + k_0^2(n^2(x,y) - n_{eff}^2) = 0 \quad (2.56)$$

第 2 項と第 3 項の和を  $k_0^2 N^2(x)$  と置くと、式(2.56)は変数  $x, y$  について各々次の式に分離される。

$$\frac{\partial^2 g(y)}{\partial y^2} + k_0^2(n^2(x,y) - N^2(x))g(y) = 0 \quad (2.57)$$

$$\frac{\partial^2 f(x)}{\partial x^2} + k_0^2(N^2(x) - n_{eff}^2)f(x) = 0 \quad (2.58)$$

それでは  $N(x)$  を求めるため、Fig 2.5(b)のように導波路全体を領域 1,2,3 に分離し、各領域の等価屈折率を求める。その等価屈折率  $n_{eff1}, n_{eff2}, n_{eff3}$  は式(2.9)から(2.19)までの解析手法に伴うと得られる。

結論的に  $N(x)$  は Fig 2.5(c)に示したように、 $n_{eff1}, n_{eff2}, n_{eff3}$  を  $x$  軸に沿ってプロットした関数になる。その分布を式(2.58)に代入すると  $x$  軸への関数  $f(x)$ 、及び最終的な等価屈折率  $n_{eff}$  が得られる。具体的な数値計算は  $n_{eff1}, n_{eff2}, n_{eff3}$  と同様、式(2.9)から(2.19)までの解析手法を用いればよい。

これまではリッジ型導波路という、もっとも一般的な計算例を挙げたので、今度はそれをレンズの設計に適用するための工夫について記述する。Fig 2.6(a)にレンズの断面図、層構造を示すが、Fig 2.5(a)のリッジ導波路とは反対に、中央領域が凹んだ構造である。Fig 2.6(b)のように断面図を左側の領域と真ん中の領域、右側の領域に分割し、リッジ導波路と同様に各領域の等価屈折率  $n_{eff1}, n_{eff2}, n_{eff3}$  を求める。その計算には(2.54)から(2.58)までの

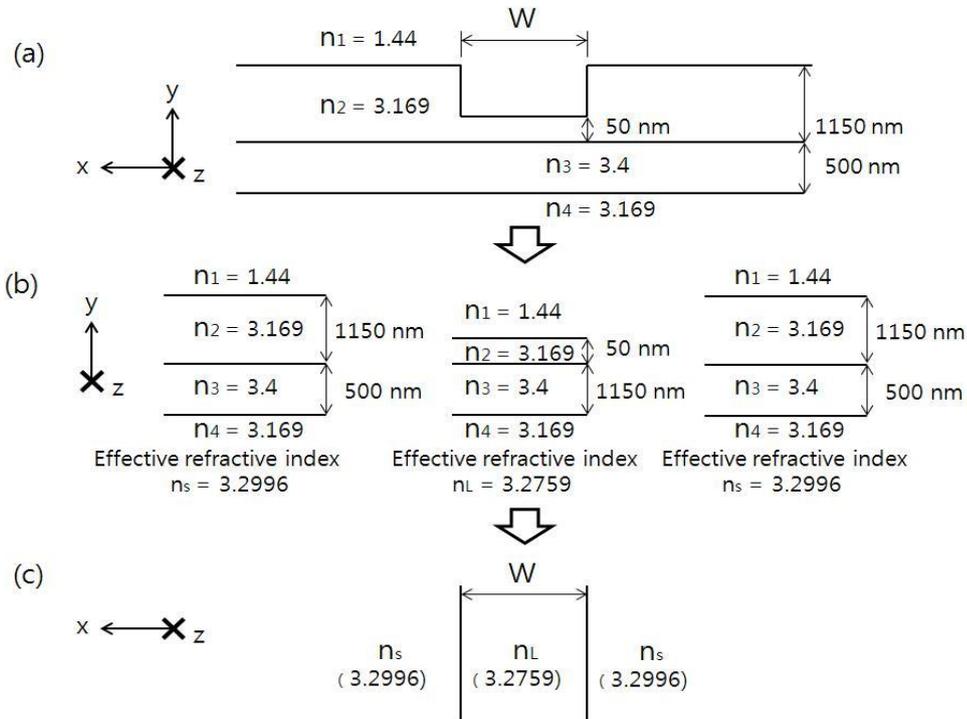


Fig 2.6 Effective index method application to collimate lenses.

式をそのまま用いれば良い。その後は全体の等価屈折率  $n_{eff}$  を求める順番であるが、レンズの場合は Fig 1.7 のようにデバイスを上面で見たときの等価屈折率だけ求めれば良いので Fig 2.6(b) の  $n_{eff1}, n_{eff2}, n_{eff3}$  が得られた時点でその計算を終了すれば良い。そして各屈折率  $n_{eff1}, n_{eff2}, n_{eff3}$  をデバイス上に分配することになるが、本研究では  $n_{eff1}, n_{eff3}$  の領域を同じ構造のスラブにするので  $n_s$  に統合し、 $n_{eff2}$  はレンズ領域の屈折率  $n_L$  に書き置き換えて Fig 1.7 のスラブ、レンズに各々の  $n_s, n_L$  を適用する。Fig 2.6(a) の層構造を(2.54)から(2.58)までの式に入れて得られる  $n_s, n_L$  の等価屈折率は各々 3.2997、3.2759 である。

これまでの議論により等価屈折率法の適用方法を説明した。これからの設計論については、本章で得られた等価屈折率  $n_s, n_L$  を常に用いながらその議論を進めることにする。

### 2.4.2 光線光学に基づいたレンズ設計

コリメートレンズの形を光線光学的方法で決めるために、屈折率  $n_s$  の媒質中に屈折率  $n_L$  のレンズがあることを想定する。レンズの中心は  $xy$  平面上の原点に、光軸は  $x$  軸の上にあるとする。レンズの焦点距離を  $f$  にし、光はその焦点  $(-f, 0)$  からレンズの方に入射されていると仮定する。その様子を Fig 2.7 に示す。

レンズの界面座標を  $(z, x)$  として  $f(z, x) = 0$  の関係があるとする。コリメートレンズになる条件は、焦点  $(-f, 0)$  から光軸に沿って原点  $(0, 0)$  に到達した光の実際経路とレンズ上のある点  $(z_0, x_0)$  を通って  $x$  軸上の  $(0, x_0)$  に到達した光の実際経路が同じであることなので、次の式(2.59)が成り立つはずである。

$$n_s f = n_s \sqrt{(z_0 + f)^2 + x_0^2} + n_L z_0 \tag{2.59}$$

(2.59) を  $f(z, x) = 0$  の形式で整理すると、次の式(2.60)が得られる。

$$\frac{\left(z_0 + \frac{n_s}{n_s + n_L} f\right)^2}{\left(\frac{n_s}{n_s + n_L} f\right)^2} + \frac{x_0^2}{\left(\frac{n_s - n_L}{\sqrt{n_s + n_L}} f\right)^2} - 1 = 0 \tag{2.60}$$

このレンズは楕円型で、長軸と短軸の長さは次のようである。

$$2a = 2 \frac{n_s}{n_s + n_L} f, \quad 2b = 2 \sqrt{\frac{n_s - n_L}{n_s + n_L}} f \tag{2.61}$$

光線光学による設計論では(2.60)の式に伴ってレンズを設計すると、光は理想的に平行化されるので消光比の良いスイッチが作製されると予想される。その設計論に伴って 1x8 の

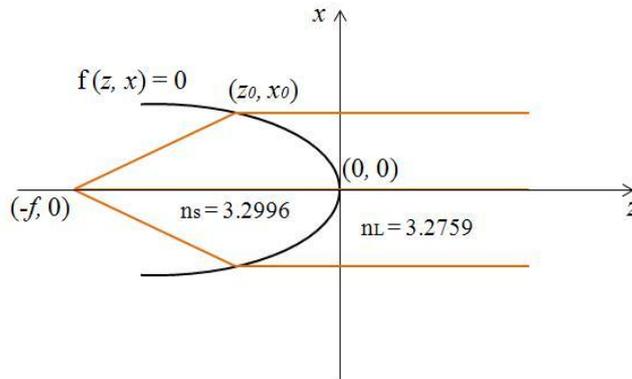


Fig 2.7 Elliptic shaped lens on  $z$ - $x$  flat.

光偏向型スイッチの研究が行われた例もある[17]。しかし、焦点距離  $1\text{mm}$  以下のマイクロスケールの光学系では光の回折現象による影響が無視できないこともあり、本デバイスのようにスラブ導波路を基にした構造では常にコア層が広がっているため、その中で伝搬光の拡散現象がよく起こってしまう等の問題もあるので、必ずしも光線光学的に理想的なレンズが光の波面を理想的に平行化するとは限らない。どのような構造を設計してもそういう問題は発生するはずなので、光線光学的な設計法だけではなく、光波光学的な立場で数値計算を行い、その設計法を補正する必要がある。

### 2.4.3 光波光学の解析を考慮した設計の補正

まずは式(2.60)に伴ってスラブ上に焦点距離  $400\ \mu\text{m}$  のレンズを設計した時、光がコアをどう伝搬していくのかをシミュレーションで計算する。焦点距離が  $400\ \mu\text{m}$ 、 $n_s$  が  $3.2996$ 、 $n_L$  が  $3.2759$  であるので、レンズは長軸  $403\ \mu\text{m}$ 、短軸  $49\ \mu\text{m}$  の楕円型になる。解析の道具としては本章の 2.3.2 で議論したビーム伝搬法(BPM)を利用する。Fig 2. 8 にその計算結果を示すが、レンズの集光効果を確認するためレンズが設計されていないスラブ導波路上の光の伝搬様子を共に示すようにする。

Fig 2. 8(a),(b)の黄色線は各々の光がレンズのない完全なる自由スラブに入ってから  $2000\ \mu\text{m}$  伝搬したところを表しているが、Fig 2. 8(c)はその線上で光信号のパワーが  $x$  軸に対してどう変わるかを示すグラフである。ただし、光がスラブ導波路に入射された時のパワーは  $x = 0\ \mu\text{m}$  で  $0\ \text{dBm}$  のピークを持つとする。レンズを通さずスラブを伝搬した光は満遍なく広がるが、レンズを通った光は前者より真ん中に集光されるのがシミュレーションの結果から確認される。だが、後者の場合でもレンズの界面から回折された光のため光軸の左右にサイドローブが発生し、出力ポートでは大きなクロストークが発生すると考えられる。

光線光学の計算では考慮されなかった回折現象が光波光学の解析では現れるので、これからはレンズの設計を修正し、回折に影響されないデバイスを設計しなければならない。

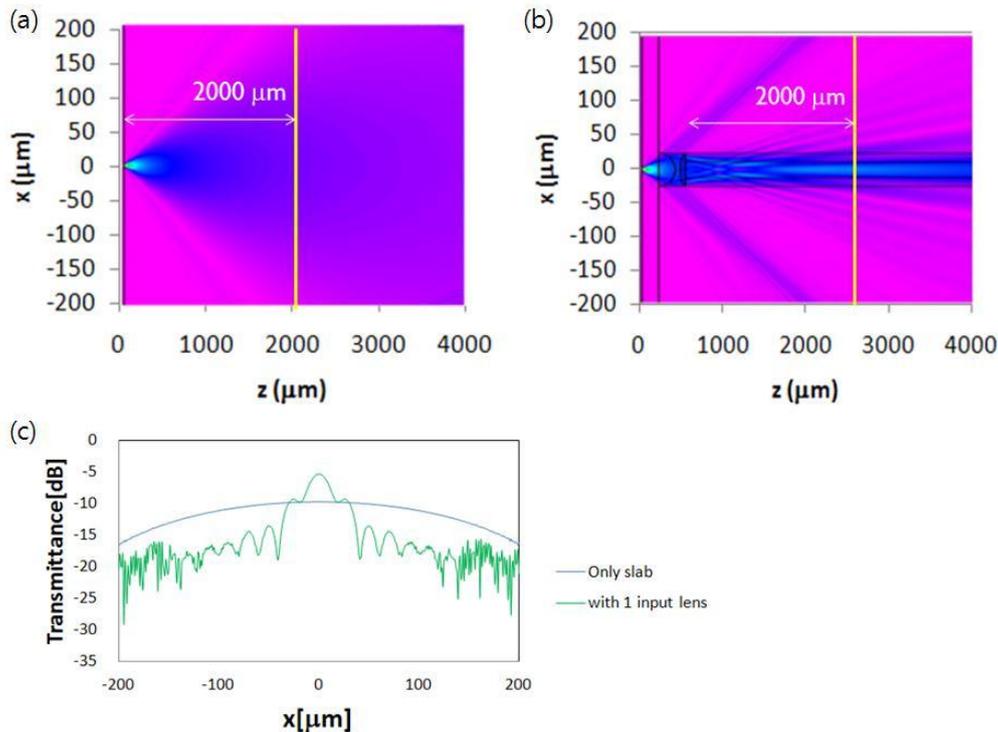


Fig 2.8 Simulation results: (a), beam propagation on the slab waveguide, (b) beam propagation collimated by one collimate lens, (c) transmittance distribution along  $x$ -axis.

その工夫として、入力側のコリメートレンズを一つから二つに増やして光を集光する方法を考える。Fig 2.9 にその単純化されたイメージを表す。黄色線の中で太い線は平行化された光を、破線は迷光を示す。光の回折とはマイクロスケールの光学系では避けられない現象であるが、Fig 2.9(b)のように左側のレンズを入力導波路の近くまで引き寄せると光は広がる前にレンズの界面に当たるので回折光の拡散は Fig 2.9(a)より抑えられる。さらに、左側レンズの右界面を長軸 800  $\mu\text{m}$ 、短軸 49  $\mu\text{m}$  の伝搬方法に長い楕円の左半分型にすることで入力導波路から 811  $\mu\text{m}$  離れたところに第二の焦点を作ることができる。その焦点を始点にして右側に伝搬する光は入力導波路から直接入射されて広がる光よりその広がり角度が 2 分の 1 程度になる。そのため、第二の焦点から右方向に焦点距離 400  $\mu\text{m}$  のコリメートレンズを配置すると、光はそのレンズを通して平行化されながらも回折現象をあまり起こさないようになり、ビームの幅も小さくなる。ただし、Fig 2.9 (b)の二番目のレンズ自体の設計は Fig 2.9(a)の入力側レンズと同様である。

Fig 2.9 (b)の設計上で光の伝搬様子をシミュレーションした結果を Fig 2.10 に示す。また、Fig 2.10(b)には Fig 2.8(c)の結果を合わせ、2 つのレンズを通った後 2000  $\mu\text{m}$  伝搬した光の光強度分布を x 軸に沿って表す。その結果、回折による迷光を少なくしたことでサイドローブも共に抑えられたことが確認される。それはクローストークの低減を意味することなので、これから Fig 2.9(b)の設計に伴って設計を進めばより消光比に優れたデバイスが作製されると考えられる。

## 2.5 三角型プリズムの動作原理及び設計

### 2.5.1 電流注入による屈折率変調

これからはプリズムの設計について述べるが、まずはどの原理でスラブ導波路上の等価屈折率を変調するのかについて説明する。その基本は Fig 1.7 のように、スラブ導波路上の等価屈折率を変調したい部分に電極を蒸着し、電流を流すことである。電流注入値  $I$  の増減で屈折率変調量  $\Delta n$  の値が変わるので、その両者の関係を確認するのがプリズムの動作原理を把握するのに中点的なこととなる。

半導体に対して屈折率変調に寄与する効果には、バンドフィリング効果と自由キャリアプラズマ効果、バンドギャップ収縮、及び熱発生による熱工学効果がある[21 - 24]。各々の効果を全部考慮して $\Delta n$ を表記するのは難しいことであるが、光ファイバ通信に用いる波長帯 1.30  $\mu\text{m}$  ~ 1.55  $\mu\text{m}$  の中では他の効果より主な屈折率変調を与えるバンドフィリング、自由キャリアプラズマ効果をそれぞれ近似的にキャリア密度に比例する式に表記できると

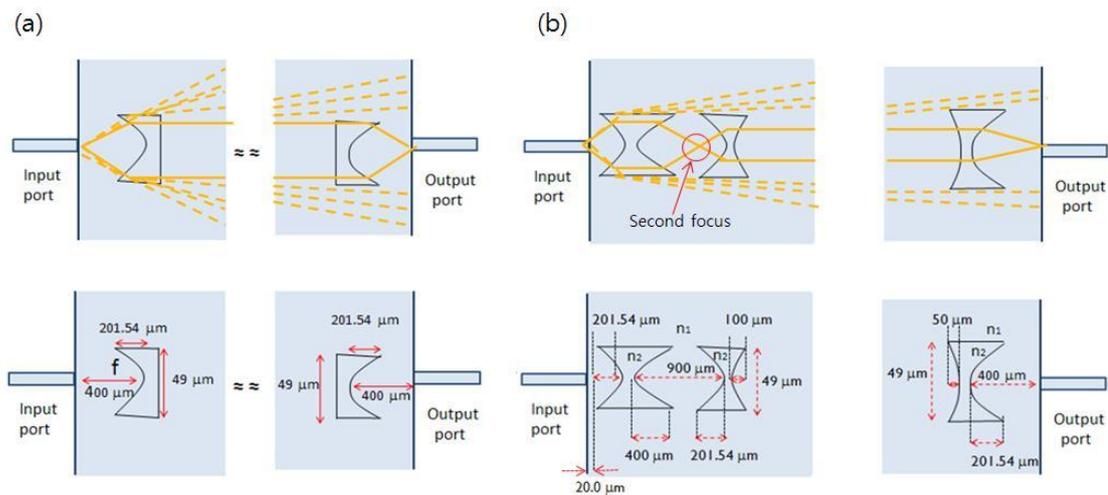


Fig 2.9 Beam propagation image : (a) while one collimate lens is inserted , (b) while two collimate lenses are inserted.

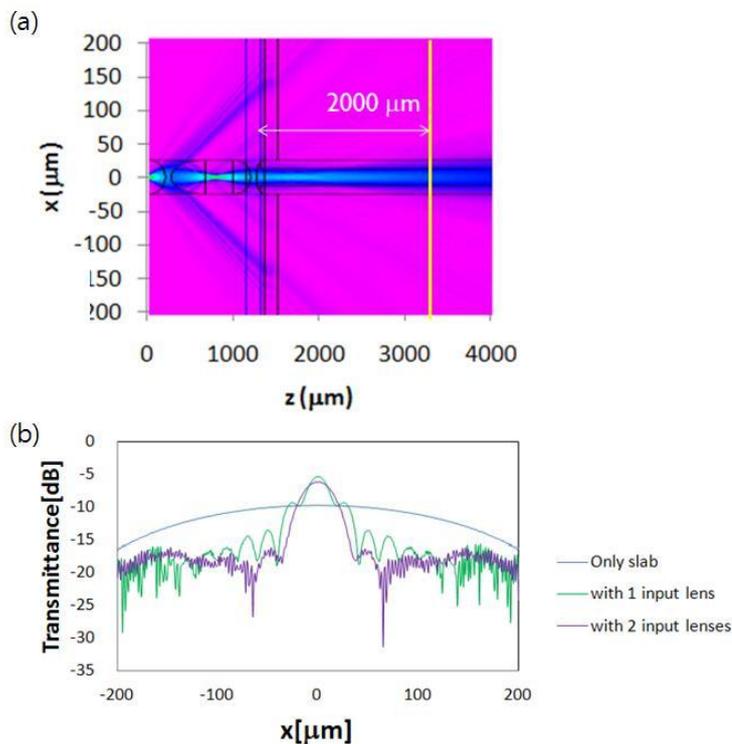


Fig 2.10 BPM simulation result while two collimate lenses are inserted: (a) beam propagation shape, (b) transmittance distributaion of yellow-line along x-axis.

議論されてきた[24]。キャリア密度を  $N$ 、比例定数を  $A$  にすると、 $\Delta n$  は次の式で示される。

$$\Delta n = AN \tag{2.62}$$

比例定数は InGaAsP コアの成分比によるが、本研究で使用する Q1.3 InGaAsP の比例定数は約  $-1 \times 10^{-20} [\text{cm}^{-3}]$  であると知られている[26]。キャリア密度  $N$  を電流値  $I$ 、InGaAsP バルク層の体積  $V$ 、電荷量  $q$ 、キャリア寿命時間  $\tau$  で式(2.63)に表記する。

$$N = \frac{I\tau}{qV} \tag{2.63}$$

ここで  $N$  と  $\tau$  の関係をレート方程式から求める。 $N$  と  $\tau$  の比はキャリアリークレート  $R_l$ 、自然再結合レート  $R_{sp}$ 、オージェ効果による非発光再結合レート  $R_{nr}$  の和で表現できる。

$$\frac{N}{\tau} = R_l + R_{sp} + R_{nr} \tag{2.64}$$

キャリアリーク  $R_l$  は  $N$  に比例する値である。 $R_{sp}$  は  $N$  の2乗に、 $R_{nr}$  は  $N$  の3乗に比例するのが実験的に証明されている[52]。つまり、各項に対しての比例定数  $A, B, C$  を与えると式(2.64)は次のように書き換えられる。

$$\frac{N}{\tau} = AN + BN^2 + CN^3 \tag{2.65}$$

ここで、キャリアリークやオージェ効果による再結合レートは自然再結合レートより十分小さいので、式(2.65)からは右辺の第1項と第3項が省略される。

$$\frac{N}{\tau} = BN^2 \tag{2.66}$$

式(2.63)と(2.66)を合わせて $\tau$ を消去し、 $N$ の式で表すと次の式を得る。

$$N = \sqrt{\frac{I}{BqV}} \tag{2.67}$$

式(2.62)に(2.67)を代入すると、 $\Delta n$  と  $I$  の関係式が得られる。

$$\Delta n = A\sqrt{\frac{I}{BqV}} \tag{2.68}$$

比例定数  $B$  は InGaAsP で  $1.0 \times 10^{-11}$  [cm<sup>3</sup>/s] から  $3.0 \times 10^{-10}$  [cm<sup>3</sup>/s] までの値をとる定数である[25–26]。Q1.3 の InGaAsP バルクでは通常  $10^{-10}$  [cm<sup>3</sup>/s] 近傍の値を持つのであるが、先行研究の結果からその値を逆算すると約  $2.5 \times 10^{-10}$  [cm<sup>3</sup>/s] 程度であったので、これからの議論ではその値を用いることにする[17]。今までの議論より式(2.68)に  $A = -1 \times 10^{-20}$  [cm<sup>-3</sup>]、 $B = 2.5 \times 10^{-10}$  [cm<sup>3</sup>/s]、 $q = 1.6 \times 10^{-19}$  [C] を代入すると体積  $V$  のコアに電流  $I$  を注入した時の屈折率変調量が得られるから、プリズムの単位面積  $1 \mu\text{m}^2$  当たりの電流注入による屈折率変調量は Fig 2.11 のようになる。ただし、この時の体積  $V$  はプリズムの単位面積  $1 \mu\text{m}^2$  にコア層の厚み 500 nm を掛けた値である。

### 2.5.2 三角型プリズムの形態設計

2.5.1 では電流注入量  $I$  と屈折率変調量  $\Delta n$  の関係を一つの数式(2.68)にまとめた。三角形プリズムの屈折率はスラブの等価屈折率  $n_s$  に  $\Delta n$  を加えた値  $n_s + \Delta n$  で示されるが、略記してこれからは  $n_p$  とする。まずは光がスラブ上の三角形プリズムを通る際の屈折角の変化をスネルの法則を基に計算する。底辺の角度がそれぞれ  $\theta_p$ 、 $\theta_q$  のプリズムを光が Fig 2.12 のように水平面から  $\theta_N$  の角度で入射するとする。また、プリズム内で光が水平面と成す角度を

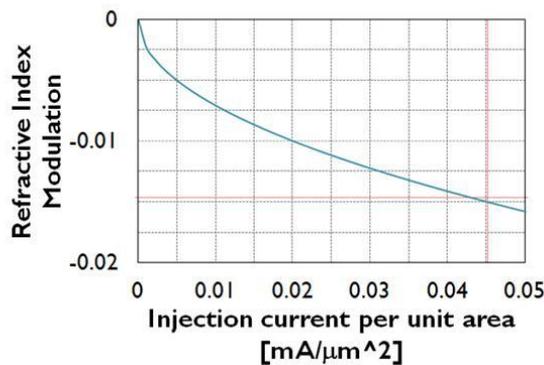


Fig 2.11 Relationship between the injection current density and refractive index change of the slab. The dotted line indicates the saturation point of modulation

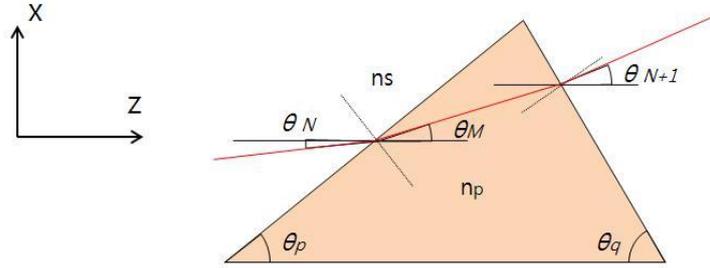


Fig 2.12 Triangular prism for beam reflection.

$\theta_M$ とし、最後にプリズムを抜き出した光が水平面と成す角度を  $\theta_{N+1}$  とする。スネル法則より、 $\theta_N$  と  $\theta_M$ 、 $\theta_{N+1}$  の間には次の式が成り立つ。

$$n_s \sin\left(\frac{\pi}{2} - \theta_p + \theta_N\right) = n_p \sin\left(\frac{\pi}{2} - \theta_p + \theta_M\right) \quad (2.69)$$

$$n_p \sin\left(\frac{\pi}{2} - \theta_q - \theta_M\right) = n_s \sin\left(\frac{\pi}{2} - \theta_q - \theta_{N+1}\right) \quad (2.70)$$

両方の式から  $\theta_M$  を消去し、 $\theta_{N+1}$  を  $\theta_N$  の式に整理すると次の漸化式が得られる。

$$\begin{aligned} \theta_{N+1} &= \frac{\pi}{2} - \theta_q \\ &+ \arcsin \left[ -\frac{n_p}{n_s} \left\{ \sin(\theta_p + \theta_q) \sqrt{1 - \left(\frac{n_s}{n_p}\right)^2 \sin^2\left(\frac{\pi}{2} - \theta_p + \theta_N\right)} + \cos(\theta_p + \theta_q) \frac{n_s}{n_p} \sin\left(\frac{\pi}{2} - \theta_p + \theta_N\right) \right\} \right] \end{aligned} \quad (2.71)$$

$\theta_{N+1}$  と  $\theta_N$  の間に漸化式の関係があるというのは、 $\theta_N$  より  $\theta_{N+1}$  が求まり、 $\theta_{N+1}$  より  $\theta_{N+2}$  が求まるということである。すなわち、複数のプリズムが順番に並んでいた場合を考えても前のプリズム抜き出し角度  $\theta_{(N+\alpha)+1}$  が求まれば次のプリズムの抜き出し角度  $\theta_{(N+\alpha)+2}$  が、その後は  $\theta_{(N+\alpha)+3}$  などが順に求まることを意味する。

さらに、式(2.71)の  $n_p$  を  $n_s + \Delta n$  に書き換えると  $\theta_{N+1}$  は  $\Delta n$  の関数となる。式(2.68)より  $\Delta n$  は  $I$  の関数にもなるので、結論的に  $\theta_{N+1}$  は  $I$  の関数として扱うことができる。式(2.71)を書き換えて、次の式(2.72)を得る。

$$\begin{aligned} \theta_{N+1} &= \frac{\pi}{2} - \theta_q \\ &+ \arcsin \left[ -\frac{n_s + A\sqrt{\frac{I}{BqV}}}{n_s} \left\{ \sin(\theta_p + \theta_q) \sqrt{1 - \left(\frac{n_s}{n_s + A\sqrt{\frac{I}{BqV}}}\right)^2 \sin^2\left(\frac{\pi}{2} - \theta_p + \theta_N\right)} + \right. \right. \\ &\quad \left. \left. \cos(\theta_p + \theta_q) \frac{n_s}{n_s + A\sqrt{\frac{I}{BqV}}} \sin\left(\frac{\pi}{2} - \theta_p + \theta_N\right) \right\} \right] \end{aligned} \quad (2.72)$$

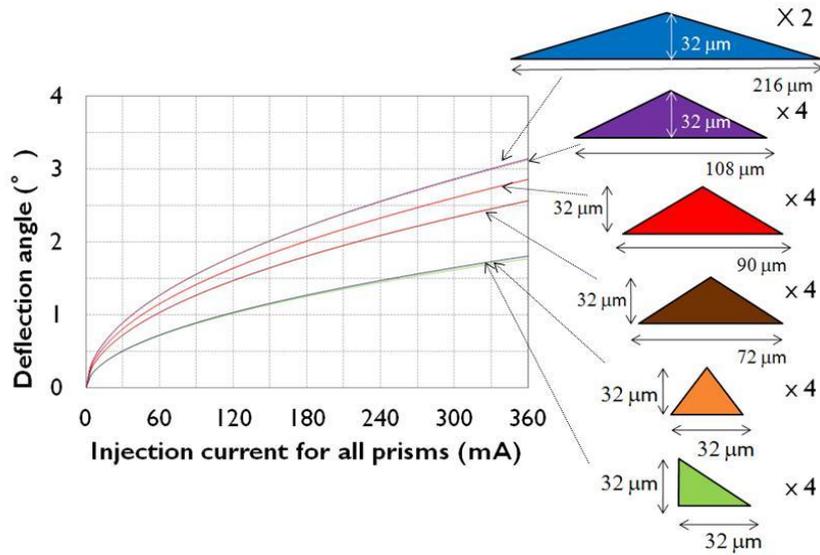


Fig 2.13 Relationship between injection current and deflection angle.

その式より、プリズムの底辺の角度  $\theta_p$ 、 $\theta_q$  とスラブの等価屈折率  $n_s$ 、プリズムの面積にコア層の厚みを掛けた体積  $V$ 、比例定数  $A$  と  $B$ 、初期角度  $\theta_N$  が分かれば最後の屈折角  $\theta_{N+1}$  が求まる。さらに、 $\theta_p$ 、 $\theta_q$  の同じプリズムが複数並んでいても  $\theta_{N+1}$  と  $\theta_N$  の漸化関係を用いれば次々と  $\theta_{N+2}$ 、 $\theta_{N+3}$ 、 $\theta_{N+4}$  等を求めることができる。

ここからはその式を基にして具体的なプリズムの外形設計について述べる。底辺角  $\theta_p$ 、 $\theta_q$  のそれぞれ違うプリズム同士では同じ電流を注入しても最終屈折角は違うはずである。様々なプリズムの電流注入による屈折角変化を Fig 2.13 に示す。グラフには違う色の線が 6 本描いてあるが、それは各々グラフの右側に描かれている同じ色のプリズムに該当する電流-屈折角曲線である。そして、各プリズムの右側に表記されている「×4」や「×2」は、各々のプリズムが何個同じ光軸上に並んでいるのかを表したものである。すなわち、「×4」と表記されたもののグラフの縦軸は光がそのプリズムを 4 つ通った時の最終屈折角がいくつになるかを示したものである。最終屈折角は最初角  $\theta_N$  を 0 にし、漸化式(2.72)を 4 回繰り返して求めた  $\theta_{N+4}$  の値である。また、グラフの横軸は 4 つのプリズム合わせて注入される電流値の総和を示したものであるので、プリズム一つ当たりの電流注入量はその該当値から 4 を割った値になる。「×2」の場合も同様で、縦軸は 2 つのプリズムを通った後の最終屈折角として考えればよく、横軸も 2 つのプリズムに注入した電流の総和として考えれば良い。

Fig 2.13 の計算結果、同じ電流を注入しても伝搬方向に長いプリズムの方が大きな屈折角を得る。6 本のグラフどちらでも縦方向 32  $\mu\text{m}$  のサイズを持っているが、「×4」の中では横方向 108  $\mu\text{m}$  の最も長い紫色のプリズムがより大きな屈折角を得た。また、「×2」の横方向に長い 216  $\mu\text{m}$  の青色プリズムは数が紫色プリズムの半分であるものの、屈折角としてはほぼ同じ値を出した。それはプリズムの最終屈折角を決めるのは同じ光軸上に置かれているプリズム同士の横方向長さの全体和であることを示したもので、紫色と青色どちらもその和は 432  $\mu\text{m}$  になることから確認される。理論上どちらを選んでもほぼ同じ屈折角を得るはずであるが、プリズムの数が多くなれば実際のスイッチング制御が複雑になる可能性があるので、デバイスの設計では横方向 216  $\mu\text{m}$  のプリズムを少数用いることにする。プリズムの具体的な最終サイズやスラブ上の配置に関しては本章の 2.7 で記述する。

## 2.6 デバイス上の部分的な トレンチ

### 2.6.1 トレンチの導入原理

2.4、2.5 から非球面レンズと三角プリズム各々の設計法を論じた。原理的にその要素だけでスイッチングは行われるはずであるが、Fig 2. 10 のシミュレーション結果から確認されたように 2 つのコリメートレンズを通っても平行化され切らなかった光信号は迷光になり、ポート間のクロストークを引き起こす原因になる。本章の 2.6 ではその迷光を遮断するための工夫として、部分的に Q1.3 InGaAsP のコアまでエッチングしたトレンチをスラブ上に導入することについて述べる。

トレンチは第一章の Fig 1.7(a)の緑色で示された部分で、光信号が Input 側のレンズ二つを通した後で入るスラブの上に作製されている。コリメートされた光信号はビーム半径 25 ~ 30  $\mu\text{m}$  を持ってからスラブ導波路を伝搬するので、両トレンチの間には 50  $\mu\text{m}$  くらいのスラブをエッチングせずに残し、ビームの電界が損失しないようにする。その一方、Input 側のレンズで平行化されずにそのまま迷光になる光はトレンチの前で遮断される。その簡単なイメージを Fig 2. 14 に示す。破線で表示されたのはその迷光である。

### 2.6.2 トレンチによる消光比の改善

トレンチを導入することで透過率がどう変化したのかをシミュレーションで計算し、Fig 2. 15 のグラフ上にその結果を示す。Fig 2. 15 (b) は Fig 2. 10 (b) のグラフにトレンチの導入結果を合わせたものである。トレンチの迷光遮断効果によってビームの中心を除いた部分の透過率は 5dB 以上下がるので、光信号が出力ポートまで伝搬された時のポート間のクロストークはその分減らすようになると予想される。

## 2.7 1×7 ビーム偏向型光スイッチの形

これまでマイクロスケールのコリメートレンズ、三角形プリズム、及びトレンチについて各々の設計論と動作原理の説明を進めた。三つの要素をスラブ導波路上に集積することでモノリシックなビーム偏向型の 1×N スイッチが作製されるが、同じ基板を用いるため各要素間の配置や入出力ポートの位置関係を明らかにする必要がある。

まずは入出力ポートとコリメートレンズ、及びトレンチの位置等を明示する。2.4.3 の Fig 2.9 で一度レンズの形を示したので、Fig 2. 16 (a)ではそれに加えてトレンチと入出力導波路の形を表示した上面図を表す。入力側の二番目のレンズから出力側の集光型レンズまでの伝搬距離は 25??  $\mu\text{m}$  であるが、その区間には三角形のプリズムが入る。出力側の集光レンズは焦点距離 400  $\mu\text{m}$  のコリメートレンズを反対向きにした形にするので、出力ポートは

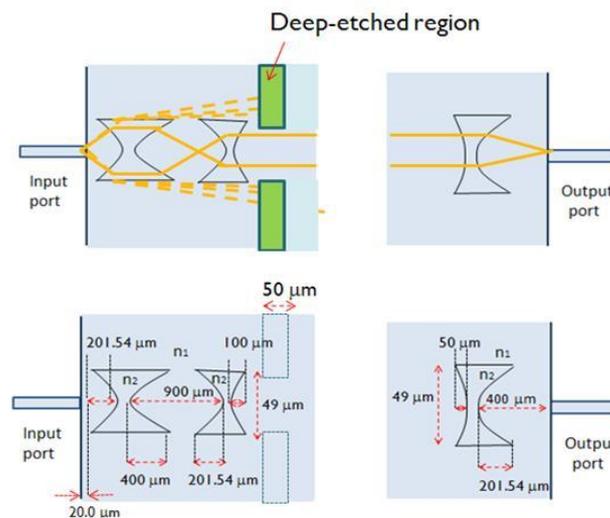


Fig 2.14 Beam propagation image while deep-etched region is inserted.

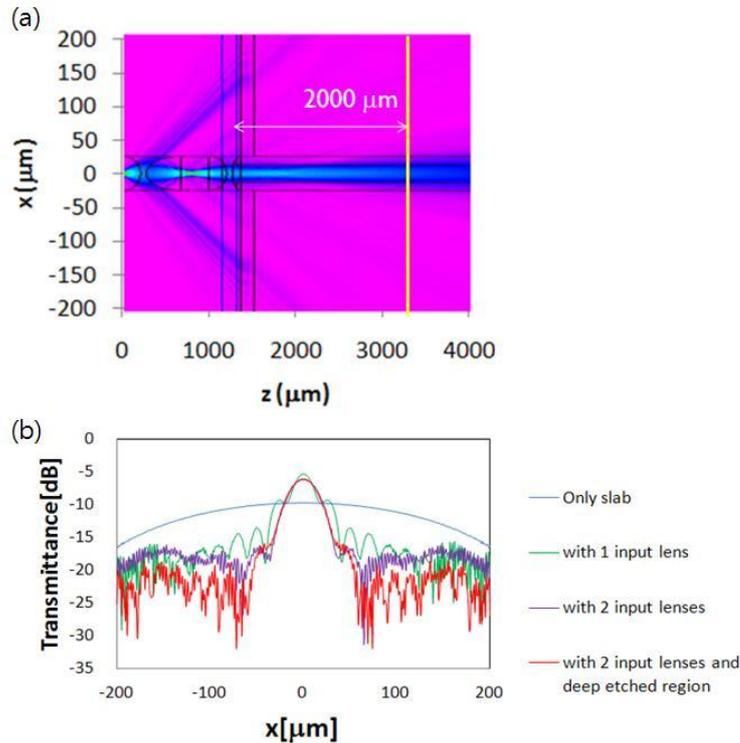


Fig 2.15 BPM simulation result while deep-etched region is inserted: (a) beam propagation shape, (b) transmittance distribution of yellow-line along x-axis.

各出力側レンズの光が集まるところに置かれるようにする。出力ポート間の間隔はポートごとに少しの偏差はあるが、およそ  $70 \mu\text{m}$  程度になる。真ん中のポートを中心に上側 3 つ下側 3 つの出力ポートを用意して総  $1 \times 7$  のスイッチングができるようにする。

入出力導波路の  $x$  軸幅は  $5 \mu\text{m}$  になっている。普段のシングルモード導波路は約  $2 \mu\text{m}$  の幅を持っているが、式(2.21)から分かるように入力導波路中のスポットサイズ  $w_0$  はスラブ導波路中のスポットサイズ  $w$  と半比例関係にあるので、入力導波路の幅を  $2 \mu\text{m}$  のままにするとスラブ内の広がり角度が大きくなり、コリメートレンズを通る光の成分が少なくなる。それはデバイスの入出力損失を大きくする原因となるので、光信号が光スイッチに入射される前に  $2 \mu\text{m}$  の導波路幅を  $5 \mu\text{m}$  まで広める必要がある。その拡張には傾き角度  $1^\circ$  以下のテーパ導波路を用いる。本デバイスでは伝搬方向  $100 \mu\text{m}$  長さのテーパ導波路を用いて導波路の拡張を行う。また、スラブ入射直前の  $5 \mu\text{m}$  まで広がった導波路の伝搬方向長さは  $100 \mu\text{m}$  にする。

出力側のレンズと導波路はそれぞれの角度で  $z$  軸から傾いているが、それはプリズムによる最終屈折角が各ポートごとに違うためである。その傾き角度はポート 1 から 7 まで各々  $5.35^\circ$ 、 $2.83^\circ$ 、 $1.43^\circ$ 、 $0^\circ$ 、 $1.46^\circ$ 、 $2.94^\circ$ 、 $5.44^\circ$  であるが (Fig 2.16 (a))、その値はプリズムによる最終屈折角を示すものでもある。

Fig 2.16 (b)ではプリズムの形を明示する。プリズム  $R_1, R_2$  は出力ポート 2 と 3 にスイッチングする時に使うもので、プリズム  $L_1, L_2, L_3$  は出力ポート 4 と 5 にスイッチングする時に使うものである。本章の 2.5.2 では縦方向  $32 \mu\text{m}$ 、横方向  $216 \mu\text{m}$  のプリズムを二つ並べてスイッチングすると述べたが、実際ビームはプリズムを通ると屈折角が大きくなるため、プリズムは  $R_1, R_2$  や  $L_1, L_2, L_3$  どちらにとってもデバイスの伝搬方向に沿って大きくならねばいけない。ただ縦：横の比は  $32 : 216$  が保たれるように縦横の長さを共に増していく。さらに、 $R_1, R_2$  は二等辺三角形を二つ並べた様子であるが、 $L_1, L_2, L_3$  の中  $L_1, L_3$  は二等辺三角形を半分に分けた直角三角形の様子である。それは下向きのプリズム全体の面積を減らすため考えられた構造である。 $L_1, L_2, L_3$  を  $R_1, R_2$  のように二つのプリズム  $L_1, L_2$  にする場合は  $32 \times 216$  と  $39 \times 262$  のプリズムを使うようになるが、三つのプリズムにする場合は  $32 \times 108$ 、 $34 \times 230$ 、 $48 \times 161$  のプリズムを使うようになり、プリズムの数は増える

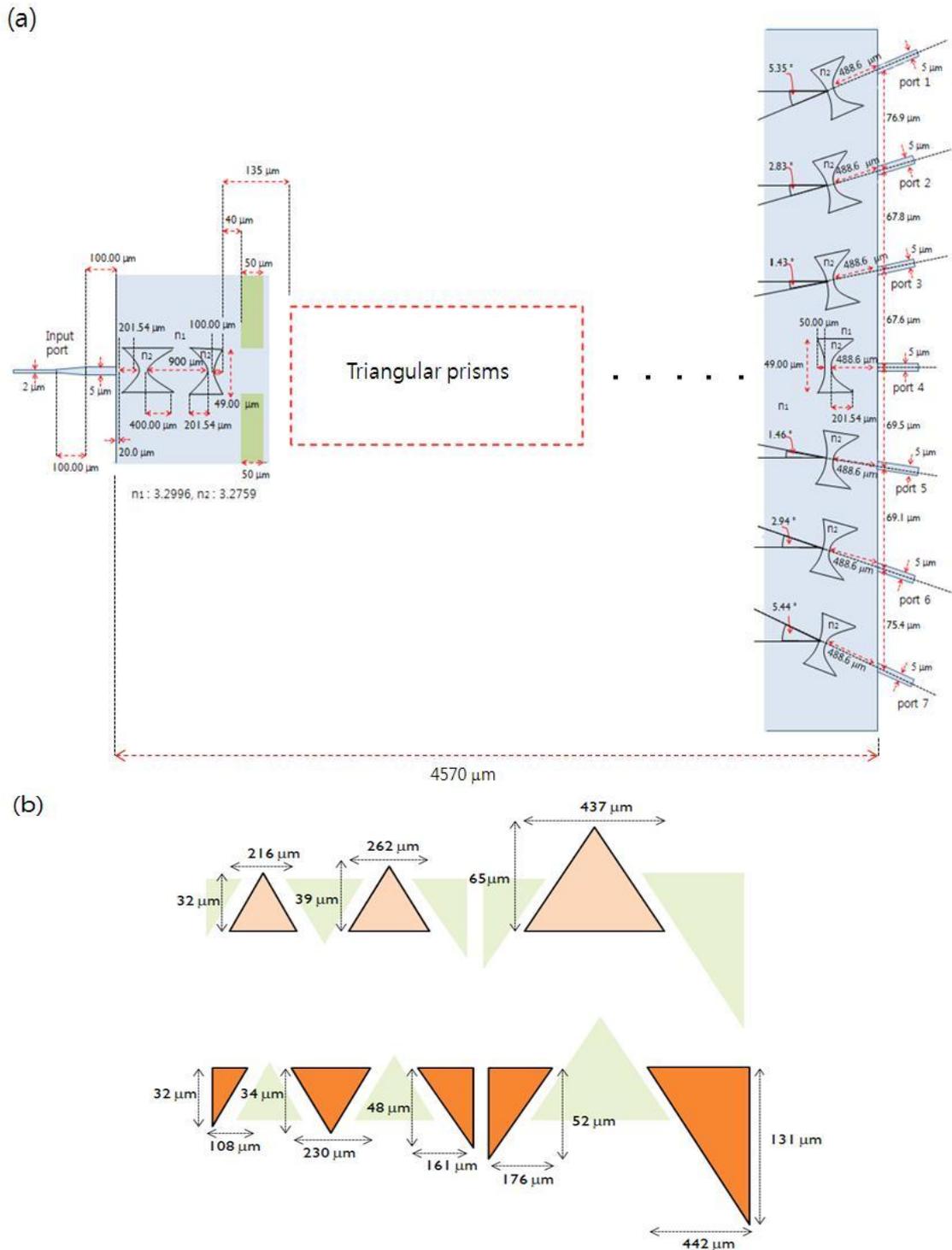


Fig 2.16 Detail specification of 1×7 optical switch : (a) lenses and slab waveguide, (b) triangular prisms.

もの下向きプリズム全体の面積は減るので電流注入量が減少するようになる。その利点のため Fig 2.16(b)に示したよう、上下非対称なプリズムの形をデバイスの設計に入れる。さらに、 $R_1, R_2$  や  $L_1, L_2, L_3$  に加えてもっと大きなプリズム  $R_3, L_4, L_5$  を設計したが、それは出力ポート 1 と 7 はかなり大きな屈折角が要るので  $R_1, R_2$  あるいは  $L_1, L_2, L_3$  だけで

は必要な屈折角が得られないため挿入したものである。すなわち、 $R_1, R_2, R_3$  を同時に駆動させれば出力ポート 1 へのスイッチングが、 $L_1, L_2, L_3, L_4, L_5$  を同時に駆動させれば出力ポート 7 へのスイッチングが可能になる。次の 2.8 ではそのプリズムによる光スイッチングのシミュレーション結果を示すが、各ポートのスイッチングごとにどのぐらいの電流をプリズムに注入してどのぐらいの等価屈折率を得るのかを共に表す。

## 2.8 光スイッチングのシミュレーション

Fig 2.17 に三角プリズムの動作による  $1 \times 7$  スwitching のシミュレーション結果を示す。Tab 2.1 にはそれぞれのスイッチングに対する駆動プリズムの予想注入電流量とそれによって変調された各プリズムの等価屈折率を表記する。特に駆動すべきプリズムの方は太い文字で表示する。また、Fig 2.18 では Fig 2.17 の結果に対し、 $z = 5500 \mu\text{m}$  の光出力導波路に光信号が結合された後の光強度分布を示す。Tab 2.2 には各ポートの入出力損失、消光比を表記するが、シミュレーションの結果によるとどちらのポートに対してもその入出力損失と消光比は各々 5 dB 以下と 15 dB 以下で、殆ど一様な特性を示すことが分かる。

## 2.9 第 2 章まとめ

以上より、ビーム偏向型の光スイッチを設計するための方法論について議論した。光を平行化するためのレンズは光線光学的な解析手法でその基本設計を行い、ビーム伝搬法による光波光学的な解析手法で設計の妥当性を検討してからその形を修正した。光の偏向部である三角形プリズムは電流注入による屈折率の変調効果を利用するが、その外形はスネルの法則を基に横縦の長さを決める形で行った。最終的に本章の 2.7 で表示したような光スイッチが設計されたので、第 3 章からはその試作を行うためのプロセス順について述べる。

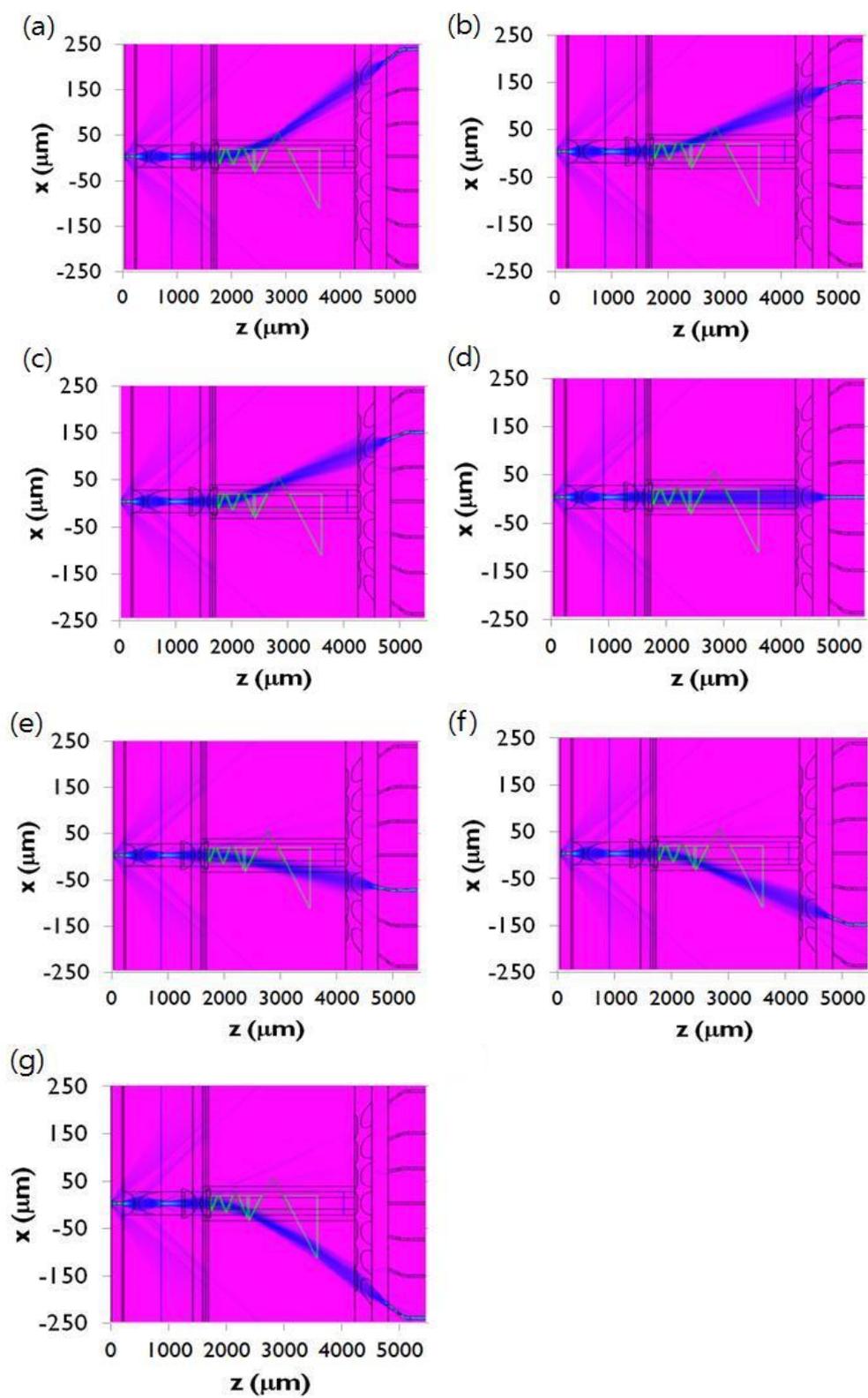


Fig 2.17 BPM simulation results : (a) port1 switching, (b) port2 switching, (c) port3 switching, (d) port4 switching, (e) port5 switching, (f) port6 switching, (g) port7 switching.

Tab 2.1 Expected Injection currents for all ports switching .

Prism	Port1 switching	Port2 switching	Port3 switching	Port4 switching	Port5 switching	Port6 switching	Port7 switching
R1 + R2 (neff of R1 and R2)	<b>252 mA</b> (3.2860)	<b>252 mA</b> (3.2860)	<b>72 mA</b> (3.2928)	0 mA (3.2997)	0 mA (3.2997)	0 mA (3.2997)	0mA (3.2997)
R3 (neff of R3)	<b>426 mA</b> (3.2860)	0 mA (3.2997)	0 mA (3.2997)	0 mA (3.2997)	0 mA (3.2997)	0 mA (3.2997)	0mA (3.2997)
L1+L2+L3 (neff of L1, L2 and L3)	0 mA (3.2997)	0 mA (3.2997)	0mA (3.2997)	0 mA (3.2997)	<b>80 mA</b> (3.2928)	<b>280 mA</b> (3.2860)	<b>280 mA</b> (3.2860)
L4 (neff of L4)	0 mA (3.2997)	0 mA (3.2997)	0mA (3.2997)	0 mA (3.2997)	0 mA (3.2997)	0 mA (3.2997)	<b>134 mA</b> (3.2860)
L5 (neff of L5)	0 mA (3.2997)	0 mA (3.2997)	0mA (3.2997)	0 mA (3.2997)	0 mA (3.2997)	0 mA (3.2997)	<b>854 mA</b> (3.2860)

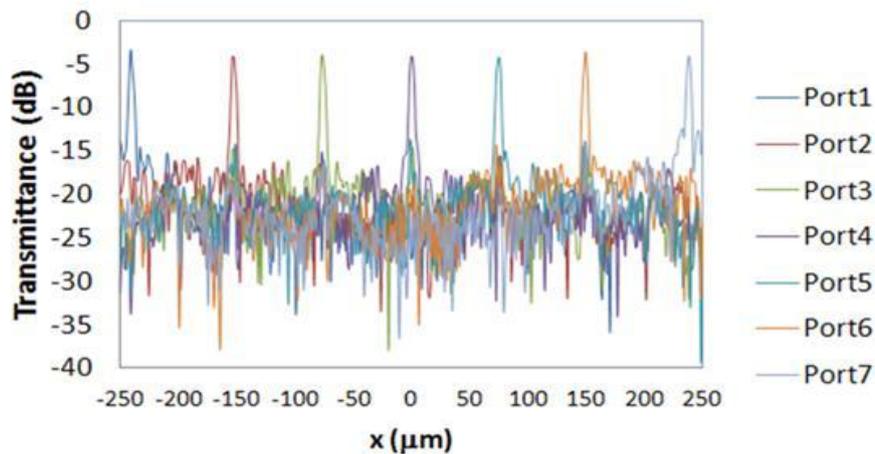


Fig 2.18 Transmittance distribution of Fig 2.17 simulation results , after reflected beams are coupled on output waveguides.

Tab 2.2 Expected insertion loss and extinction ratio for all ports switching .

	Port1 switching	Port2 switching	Port3 switching	Port4 switching	Port5 switching	Port6 switching	Port7 switching
Insetion loss	4.2 dB	3.9 dB	4.1 dB	4.0 dB	4.0 dB	4.1 dB	3.8 dB
Extinction ratio	13.5 dB	10.8 dB	11.0 dB	10.5 dB	11.6 dB	11.1 dB	12.9 dB

## 第3章 作製プロセス

この章ではデバイスの作製プロセスを、行う順番に伴って説明する。本研究で目標するビーム偏向型  $1 \times N$  の作製過程は、大きく分けてスラブ導波路の作製、非球面レンズの作製、プリズムの作製のステップになるが、各ステップの説明の前に 3.1 で成長基板のレイヤー構造について述べる。その後 3.2 ではスラブ導波路の作製過程を、3.3、3.4、3.5 では非球面レンズの作製過程を、3.6、3.7、3.8 ではプリズムの作製作成過程を順に述べていく。

### 3.1 成長基板の構造

本研究で用いた InP ベースの Q1.3 InGaAsP コア基板の構造を Fig 3.1 に示す。電極とオーミックコンタクトを取るため上クラッドの InGaAs 層と InP 層の一部は P 型に、下クラッドの InP 層は N 型に、真ん中の InGaAsP コア層とその上下の InP 層は真性のままにしている。

### 3.2 スラブ導波路の作製

#### 3.2.1 基板の壁開

Fig 3.1 の構造の 2 インチ基板を、Fig 3.2 の点線で示したように 6 分の 1 に壁開して使用する。基板は  $(001)$  の方向で成長されているが、 $(110)$  方向に沿ってウエットエッチされた導波路は順メサ構造に、 $(1-10)$  方向に沿ってウエットエッチされた導波路は逆メサ構造になるので、デバイスの伝搬方向を  $(110)$  方向にして導波路を形成する。方向の区別は基板の左側の小さな切込み、下側の大きな切込みから可能である。

#### 3.2.2 フォトリソグラフィ

基板を壁開した後、伝搬方向が  $(110)$  方向になるようにフォトリソグラフィを行う。レジストは S1805 を用いるが、その前にプライマーをコーティングしてからレジストをコーティングする。プライマーとはレジスタが基板によく密着するためのものである。スピンドーターのコーティング条件はプライマー、S1805 両方とも 500 rpm で 5 秒、その後の 5 秒間に回転数を 6000 rpm まで上げてから 6000 rpm で 40 秒にする。結果的に 500 nm の

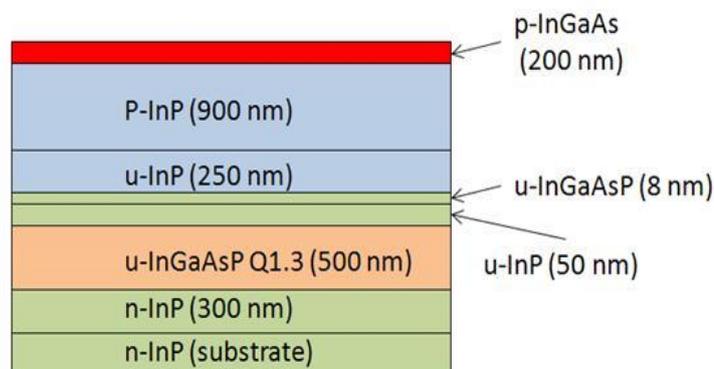


Fig 3.1 Layer structure of slab waveguide.

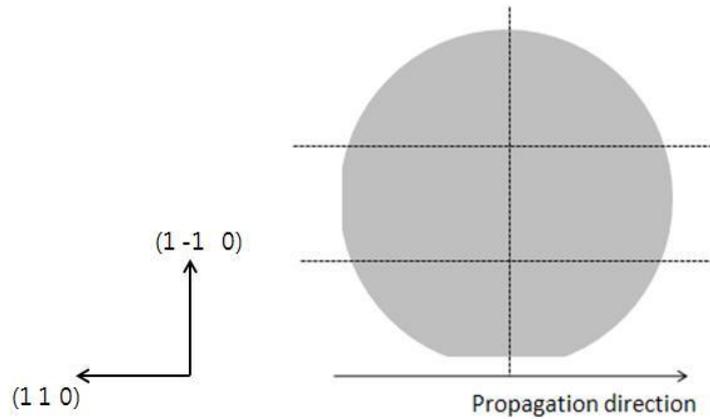


Fig 3.2 2-inch InP substrate.

レジスタ層が成膜される。レジスタ硬化のため、110 °Cのヒーターに90秒間プリベークする。その後はフォトマスクを基板に密着させてから露光する順であるが、スピンのコーティングされた基板のエッジ部分は中心部よりレジスタが厚く塗布されるため、露光の前にアセトンで塗らした綿棒でエッジ部分を拭き取る。その作業を行ってからマスクアライナを用いてフォトマスクと基板を密着し、フォトリソグラフィーを行うが、その露光強度は17.2 mW/cm<sup>2</sup>で、露光時間は4秒である。現像はNMD3溶液で9秒、現像液のリンスは純水で2回行う。その後はレジストをより固めるため、120°Cで120秒間ポストベークする。この過程を Fig 3.3 (a)、Fig 3.3 (b)、Fig 3.3 (c) に示す。

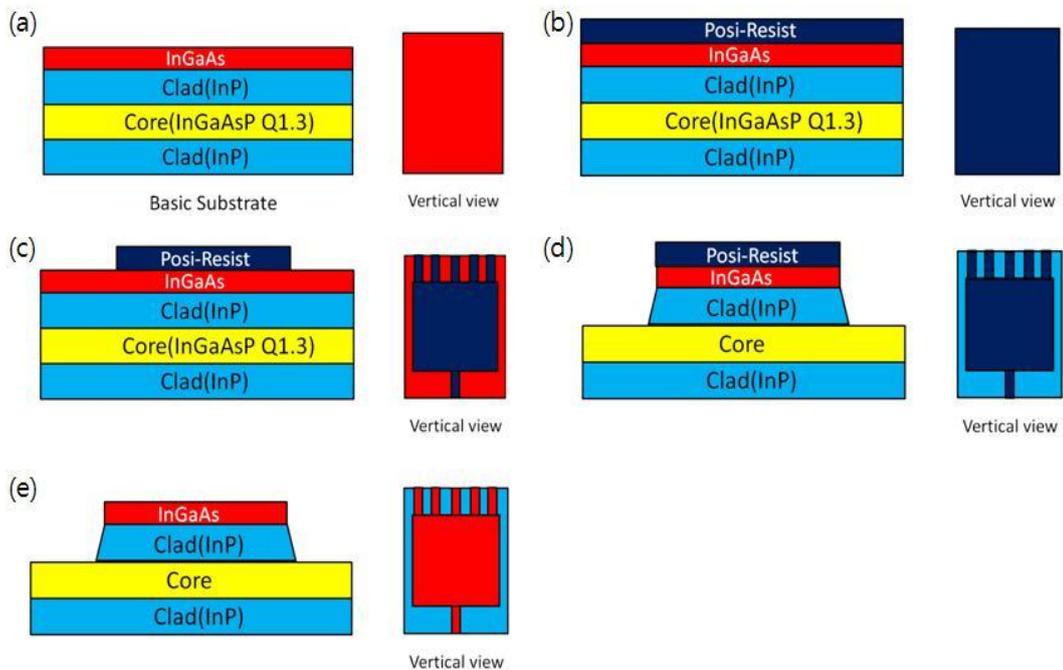


Fig 3.3 Waveguide fabrication process : (a) basic substrate, (b) S1805 resist coating, (c) photolithography, (d) wet-etching, (e) resist remove.

### 3.2.3 InGaAs 層、InP 層のウェットエッチング

S1805 のレジストでパターニングされた基板から InGaAs 層、InP 層をエッチングすることで導波路を作製する。InGaAs 層は  $\text{H}_2\text{SO}_4$ 、 $\text{H}_2\text{O}_2$ 、純水を各々 1:1:5 の比で混合した 5°C の溶液でウェットエッチングするが、今回は  $\text{H}_2\text{SO}_4$ 、 $\text{H}_2\text{O}_2$ 、純水を 8 mL、8 mL、40 mL ずつ使った。エッチレートは(200 nm/10 s) であるので、10 秒間エッチングすることで Fig. 3.3 (c) のようにレジストの下部を除外した InGaAs 層が除去された。リンスは純水で 2 回行う。その後は InP 層のウェットエッチングを行う。InP 層は 20% の HCl、36% の濃 HCl 溶液を 1:1 に混合した溶液でエッチングするが、今回は 20% と濃 HCl を 20 mL ずつ使った。エッチングレートは(200nm/5 s) であるので、30 秒間エッチングすることでレジスタの下部以外の InP 層が Fig. 3.3 (d) に示したように順メサ型でエッチングされる。理論上 30 秒のエッチングで 1200 nm の InP 層が除去されるはずであるが、コア層の上に 10 nm のエッチング阻止層があるのでその上の InP 層 1150 nm だけが除去される。

ウェットエッチングの終了後はアセトンと IPA で洗浄を行い、Fig. 3.3 (e) のように S1805 レジストを除去する。

## 3.3 非球面レンズ及びトレンチのハードレジスト形成

### 3.3.1 $\text{SiN}_x$ の成膜

次はスラブ導波路の上に  $\text{SiN}_x$  の膜を形成する。非球面レンズとトレンチは後でスラブ導波路を  $\text{Cl}_2$  でドライエッチングすることで作製するが、そのためには  $\text{SiN}_x$  膜でドライエッチングされる場所以外を保護する必要があるためこの段階で  $\text{SiN}_x$  膜をスパッタで成膜する。ターゲットは  $\text{Si}_3\text{N}_4$  で、注入するガスは Ar、 $\text{N}_2$  である。200 W のパワーで  $\text{Si}_3\text{N}_4$  の堆積レートは 16 nm/min である。そのレートからスパッタ時間を決めるが、 $\text{Si}_3\text{N}_4$  の厚さが薄ければ後の  $\text{Cl}_2$  エッチングで全ての  $\text{Si}_3\text{N}_4$  がなくなり、保護されていたところまでエッチングされる可能性があるため程度以上の厚さまで  $\text{Si}_3\text{N}_4$  を堆積させる必要がある。今回は  $\text{Cl}_2$  による  $\text{Si}_3\text{N}_4$  のエッチングレートが約 90 nm/min 程度で、総計 2 分以上  $\text{Cl}_2$  にエッチングさせることを想定してスパッタを行った。目標の厚さは 400 nm で、スパッタ時間は 25 分である。Fig. 3.4 (a) に  $\text{Si}_3\text{N}_4$  成膜後の層構造を示す。

### 3.3.2 フォトリソグラフィ

$\text{Si}_3\text{N}_4$  膜にレンズ、トレンチをパターニングするため、基板の上にプライマーと TSMR8900 レジストを順にコーティングする。比較的薄 S1805 レジスタを塗布すると  $\text{Si}_3\text{N}_4$  膜のドライエッチング時に S1805 は殆ど除去されるが、TSMR8900 は現像後の厚さが 1000 nm 以上で S1805 より 2 倍以上厚いので、ドライエッチング作業には TSMR8900 の方がより適切なレジストである。スピナーのコーティング条件は S1805 を用いる際と同様に、プライマー、TSMR8900 両方 500 rpm で 5 秒、その後の 5 秒間に回転数を 6000 rpm まで上げてから 6000 rpm その 40 秒にする。その結果 1500 nm のレジスタ層が成膜される。レジスタ硬化もスラブ導波路のウェットエッチングの場合と同様、110 °C のヒーターに 90 秒間プリベークする。その後はアセトンで塗らした綿棒で基板のエッジ部分を拭き取ってから、マスクアライナーでフォトリソグラフィを行う。露光強度は 17.2 mW/cm<sup>2</sup> で、露光時間は 4 秒である。現像は NMD3 溶液で 30 秒、リンスは純水で 2 回行う。その後はレジストをより固めるため、120°C で 120 秒間ポストベークする。

この過程を Fig. 3.4 (b)、Fig. 3.4 (c) に示す。

### 3.3.3 $\text{SiN}_x$ のエッチング

TSMR8900 レジスタでレンズ、トレンチをパターニングした後、ICP-RIE (Inductively

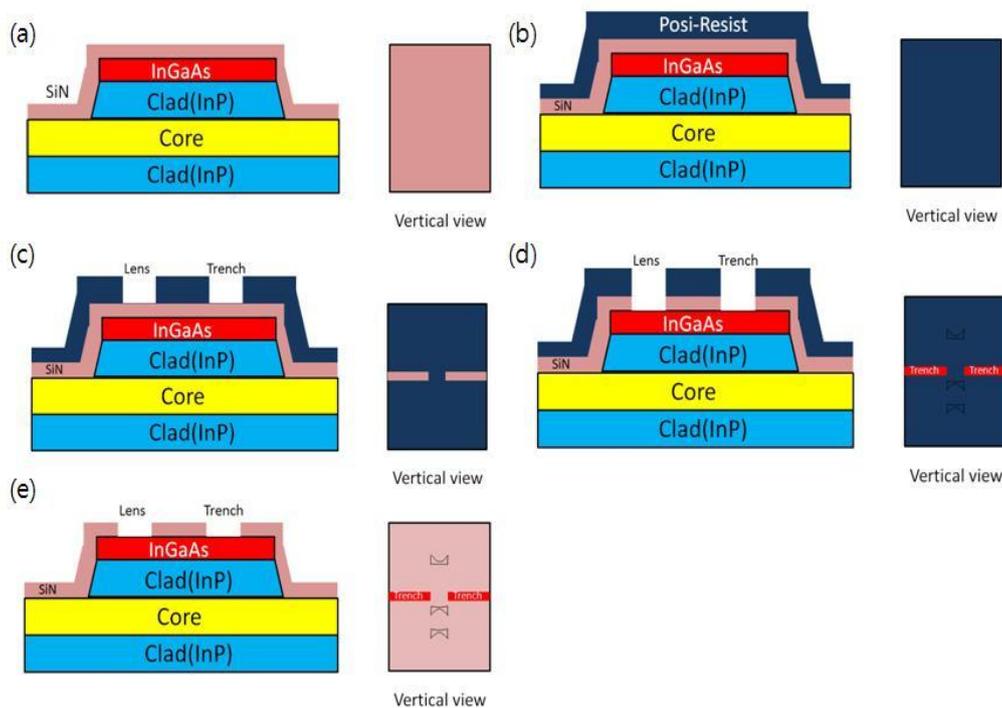


Fig 3.4 SiN hard-resist coating fabrication process : (a) SiN sputter, (b) TSMR8900 resist coating, (c) photolithography, (d) CHF3 dry-etching, (e) resist remove.

Coupled Plasma – Reactive Ion Etching) によるドライエッチングで TSMR8900 の下部を除いて  $\text{Si}_3\text{N}_4$  膜を除去する。Table 3.1 にエッチングの条件を示すが、400 nm の  $\text{Si}_3\text{N}_4$  膜は 6 分間その条件で Fig 3.4 (d) のように除去された。次は残された TSMR8900 の除去であるが、Table 3.2 の条件で 10 分間  $\text{O}_2$  によるアッシングを行うことで Fig 3.4 (e) のように TSMR8900 が除去された。

### 3.4 $\text{SiO}_2$ 蒸着によるレンズの保護

#### 3.4.1 フォトリソグラフィ

前の段階により  $\text{Si}_3\text{N}_4$  のハードレジストが形成され、それから  $\text{Cl}_2$  でドライエッチングを行うと非球面レンズ及びトランチが作製できるようになったが、レンズは InGaAsP コアの上まで、トランチはコアの下までエッチングされなければならないので、両方をお互いに違う深さにするための工程を考えないといけない。今回は先にレンズの上を  $\text{SiO}_2$  膜で保護し、1 回目のドライエッチングでトランチの InP を 800 nm 程度除去してからレンズ上の  $\text{SiO}_2$  膜を HF で除去、その後 2 回目のドライエッチングでレンズとトランチを同時にエッチングする工程で両方の深さを決めた。

$\text{SiO}_2$  保護膜を形成するため、基板の上に AZ5214 レジストをコーティングする。AZ5214 はリフトオフ作業に用いられるレジスタで、今回のデバイス作製工程では  $\text{SiO}_2$  や電極の蒸着に用いられる。スピンのコーティング条件は 500 rpm で 5 秒、その後の 5 秒間に回転数を 3000 rpm まで上げてから 3000 rpm で 60 秒にする。その結果 2000 nm のレジスタ層が成膜される (Fig 3.5 (a))。レジスタ硬化は総二回まで行うが、一回目はレジスタ成膜の後 90 °C で 60 秒間プリバークする。その後はアセトンで塗らした綿棒で基板のエッジ部分を拭き取ってから、マスクアライナでフォトリソグラフィを行う。露光強度は 17.2  $\text{mW}/\text{cm}^2$  で、露光時間は 4 秒である。その後はパターン反転のため 120°C で 120 秒間 2 回目のバークを行い、今度はフォトマスクを当てないまま同じ露光強度で 7 秒間露光する。

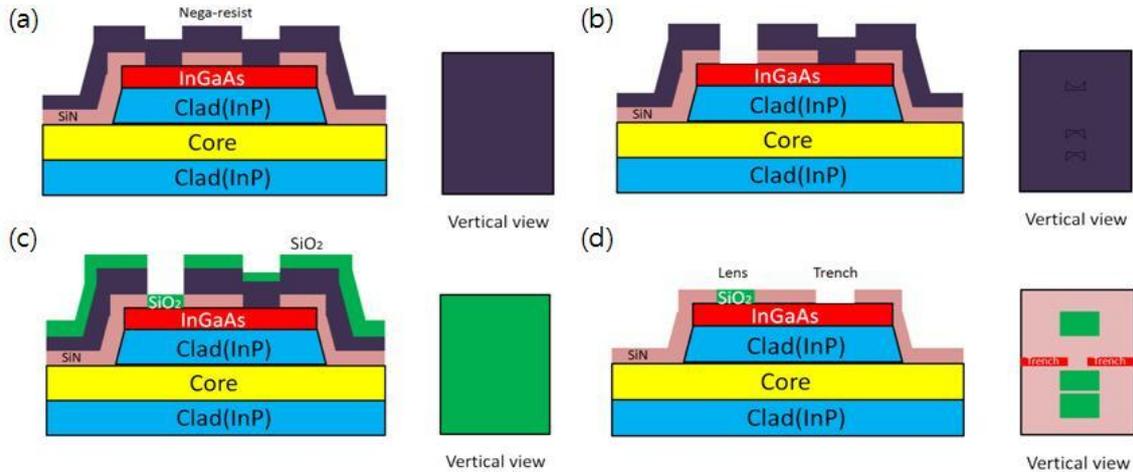


Fig 3.5 SiO<sub>2</sub> cover coating process : (a) AZ5214 coating, (b) photolithography, (c) SiO<sub>2</sub> evaporation, (d) lift-off.

現像は NMD3 溶液で 60 秒、リンスは純水で 2 回行うことでレンズの上部を除いて AZ5214 が塗布されるようにする (Fig 3.5 (b))。AZ5214 の場合はポストバークを行わずに次の工程に移る。

### 3.4.2 SiO<sub>2</sub>の成膜

次は Fig 3.5 (c)のように、SiO<sub>2</sub>膜を AZ5214 レジストの塗布された基板の上に堆積する。堆積は Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>と同様にスパッタで行うことや蒸着で行う方法があるが、スパッタで堆積すると AZ5214 の化学構造が変性し、後のリフトオフができなくなる。今回の SiO<sub>2</sub>成膜はこういう理由のため蒸着で堆積することにするが、これからのリフトオフが必要な工程は全て AZ5214 を塗布するため、今回と同様に蒸着を行うことにする。

蒸着は ANELVA 社製の EB Evaporation (電子ビーム蒸着) 装置を用いて行う。気圧は  $8.0 \times 10^{-5}$  Pa 以下、ターゲットは SiO<sub>2</sub>、電圧は 80kV、フィラメントパワーは 0、電流は 0 の条件で 18 nm/min のレートで 25 分間行う。それで 450 nm の SiO<sub>2</sub>膜が形成されるが、それは Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>による段差 400nm をカバーするために十分な厚さである。SiO<sub>2</sub>膜はより厚く堆積しても良いが、次のリフトオフ工程のため AZ5214 の厚さ 2000 nm より厚く堆積させないようにする必要がある。

### 3.4.3 リフトオフ

次は SiO<sub>2</sub>膜がレンズの上部だけに残るよう、HAKURI 106 液で AZ5214 を溶解させる作業を行う。AZ5214 は他のレジストより粘性が強いため、70 °Cに加熱した HAKURI 106 液の中に基板を 1 時間以上入れて除去する。リンスはアセトンと IPA で 1 回ずつ行う。その結果 Fig 3.5 (d)のように、レンズの上部だけ SiO<sub>2</sub>保護膜が残る。AZ5214 の溶解とともに基板から離れた SiO<sub>2</sub>膜は HAKURI 106 液の中で漂うが、基板の上に残された SiO<sub>2</sub>はリンスを繰り返して除去する。

## 3.5 ドライエッチングによる非球面レンズ及びトレンチの形成

### 3.5.1 トレンチ部分の 1 次ドライエッチング

3.4 までの工程より InGaAs 層の表面はトランチの上部を除いて Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>、SiO<sub>2</sub> で保護されるので、ICP-RIE による Cl<sub>2</sub> プラズマドライエッチングを行ってもトランチだけがエッチングされる。Tab 3.3 に InP のエッチング条件を示すが、その条件では 1 分間 870 nm の InGaAs/InP 層がエッチングされる。トランチの最終深さは InGaAsP コア層の下までエッチングすることを想定して 1800 nm 以上になるが、3.5.2 からの段階でレンズの保護層を除去してレンズ、トランチを同時に Cl<sub>2</sub> プラズマエッチングするので、現段階では 1 分だけエッチングを行い、Fig 3.6 (a) のように上クラッドの途中までエッチングする。

### 3.5.2 SiO<sub>2</sub> レンズ保護膜の除去

トランチのドライエッチングが終わった後、レンズ上部の SiO<sub>2</sub> 保護膜を HF63 溶液で除去する。SiO<sub>2</sub> 膜は HF63 で nm/s のレートで除去されるので、基板を 秒間 HF63 溶液に入れれば SiO<sub>2</sub> は全部除去される (Fig 3.6 (b))。ただし、Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> も溶液で少しずつ除去されるので、長い時間 HF63 溶液の中に放置しないようにする。

### 3.5.3 レンズ部分まで含めた 2 次ドライエッチング、および短時間のウェットエッチング

SiO<sub>2</sub> 膜が除去された時点で ICP-RIE による Cl<sub>2</sub> プラズマエッチングを行うと、レンズとトランチが同時にエッチングされるので、それから 1350 nm 程度の深さまでエッチングを行えば Fig 3.6 (c) のようにレンズの深さを 1350 nm に、トランチの深さを 2220 nm にすることができる。Cl<sub>2</sub> プラズマのドライエッチング条件は Tab 3.3 と同じであるが、今回は 1350 nm までエッチングされるようにプラズマの印加時間を増やす。InGaAs (200nm) /InP (1150nm) の Cl<sub>2</sub> プラズマによるエッチングレートは印加時間 1 分経過後から 25 nm/s で、1 分エッチングされた時の深さは 870 nm であることが実験により確認されたので、1350

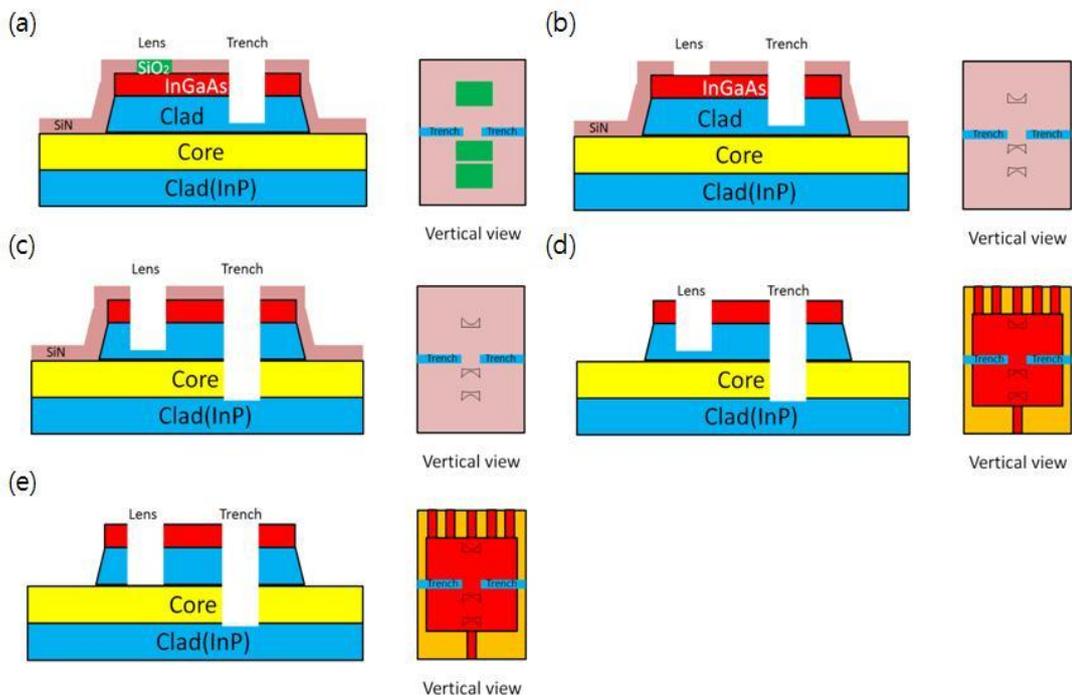


Fig 3.6 Lens and trench Cl<sub>2</sub> dry-etching process : (a) Trench dry-etching, (b) SiO<sub>2</sub> cover remove, (c) Lens and trench dry-etching, (d) SiN remove, (e) Residual InP layer wet-etching.

nm の深さを達成するには 1350 nm から 870 nm を引いた深さ 480 nm を 25 nm/s に割って、その時間を 1 分に加えて印加時間を計算し、その時間ほどドライエッチングを行えば良い。今回ではその計算結果に伴って 1 分 19 秒間エッチングを行ったが、レンズ部分の深さは 1100 nm で 4 % の偏差でエッチングの深さを得た。その後は 3.3.3 と同じ方法で Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 膜を除去し、残り 50 nm の InP 層を常温の 20% の HCL で 10 nm / 5 s のレートで 7 秒間ウェットエッチングすることで非球面レンズとトランチの作製工程を終える (Fig 3.6 (d),(e))。

### 3.6 InGaAs 層のパターン形成

次は電極を蒸着して三角プリズムを作製する順であるが、その前にプリズムの下部以外の InGaAs 層をウェットエッチングで除去する工程を行う。InGaAs 層は P 型にドーパされているので電極の部分には必要であるが、パッシブな導波路においては光吸収層として伝搬損失の要因となるので、不必要な InGaAs 層は除去した方がよい。フォトリソグラフィは 3.2.2 と同様に S1805 レジストを用いる (Fig 3.7 (a)、Fig 3.7 (b)、Fig 3.7 (c))。ウェットエッチングも 3.2.3 と同様に H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>、H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>、純水を 8 mL、8 mL、40 mL ずつ混合した溶液で行い (Fig 3.7 (d))、最終にアセトンで S1805 を除去する (Fig 3.7 (e))。

### 3.7 パッシベーション

電極形成の前段階としてコンタクトオープニングを行うが、そのために基板上の電極以外のところを SiO<sub>2</sub> 膜で覆う。その工程は AZ5214 レジストのパターニング (Fig 3.8 (a)、Fig 3.8 (b))、SiO<sub>2</sub> の蒸着 (Fig 3.8 (c))、リフトオフ (Fig 3.8 (d)) の順になるが、各々 3.4.1、3.4.2、3.4.3 と同じ方法で行う。ただし、SiO<sub>2</sub> 膜の厚さはアクティブ部分の InGaAs 層 と段差が生じないように、11 分の蒸着で 200 nm にする。

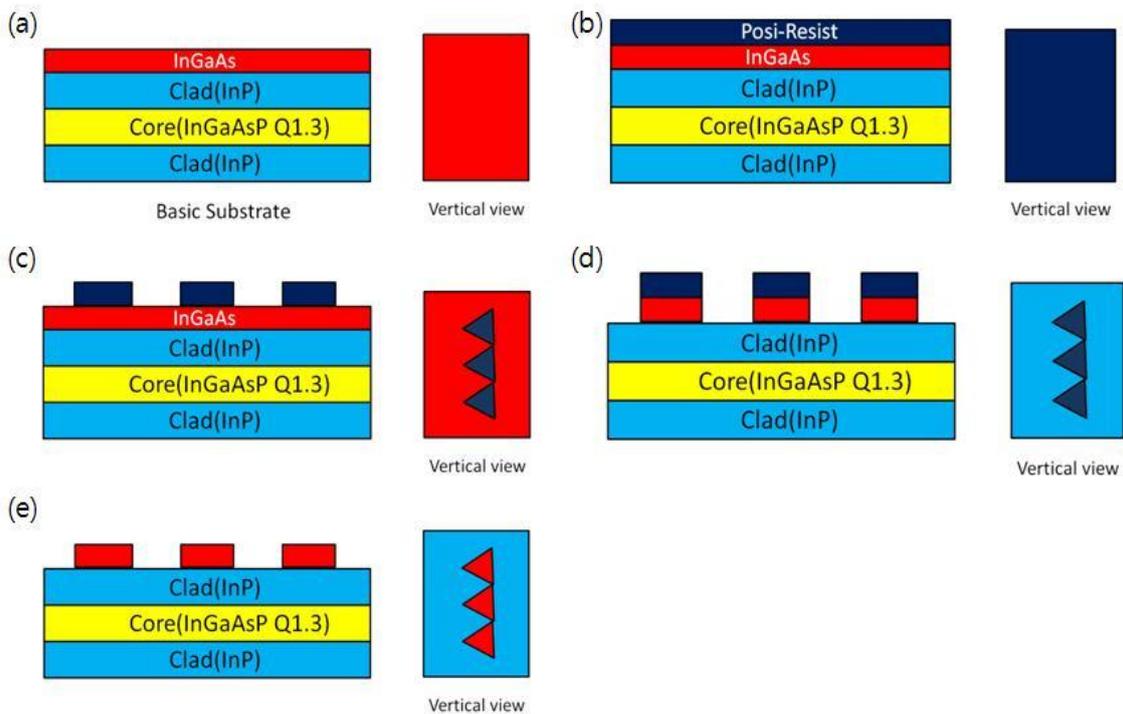


Fig 3.7 InGaAs contact layer fabrication : (a) basic substrate, (b) S1805 resist coating, (c) photolithography, (d) InGaAs wet-etching, (e) resist remove.

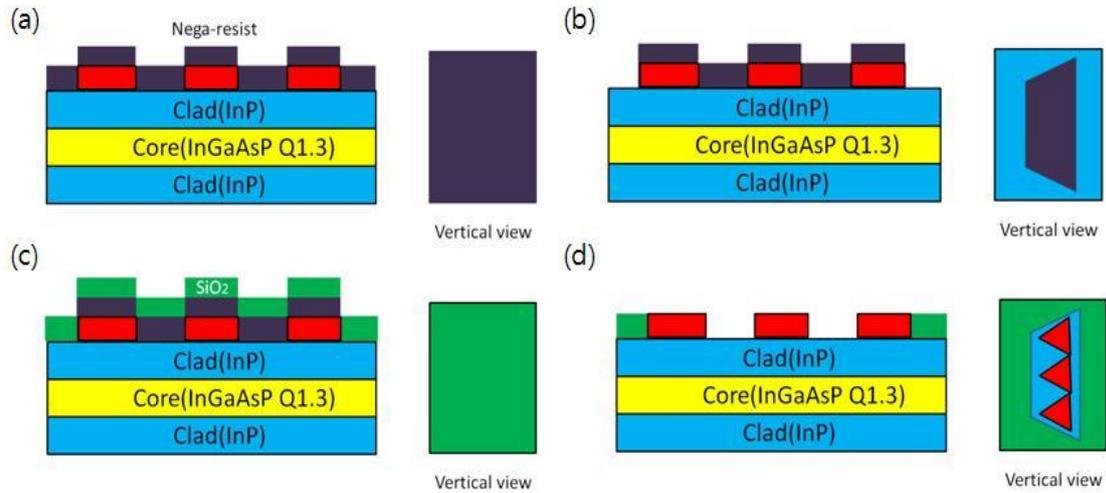


Fig 3.8 Insulation process : (a) AZ5214 resist coating, (b) photolithography, (c) SiO<sub>2</sub> evaporation, (d) lift-off.

### 3.8 電極の形成

#### 3.8.1 Ti/Au の蒸着

パッシベーション後は電極を形成したい部分に Ti/Au を蒸着するが、その前に 3.4.1 と同じ方法でフォトリソグラフィを行い、電極部分を除いて AZ5214 レジストを塗布する (Fig. 3.9 (a)、Fig. 3.9 (b))。その後 Anelva 社製の電子ビーム蒸着装置で Ti/Au の蒸着を行うが、その厚さは各々 100 nm、700 nm である (Fig 3.9 (c))。電極は厚く堆積すると強度が上がり剥がれにくくなるが、AZ5214 の厚さ (2000 nm) 程度に厚いとリフトオフができなくなる可能性があるので注意が必要である。

#### 3.8.2 リフトオフ

電極のリフトオフは 3.4.3 と同じ方法で行うが、AZ5214 上の電極が SiO<sub>2</sub> より剥がれにくいので、HAKURI 106 に 1 時間より長く入れる必要がある。今回は 70 °C で 3 時間入れ、基板上的 AZ5214 が完全に溶けるようにした。その後はアセトン、IPA で一回ずつリンスし、N<sub>2</sub> gun で要らない電極を除去する。除去されない部分は超音波洗浄で除去したが、洗浄時間が長ければ三角プリズムの部分まで剥がれるので、洗浄を 1 秒ずつ 2~3 回行い、顕微鏡で基板の様子を見ながらまだ 1 秒で 2~3 回洗浄を繰り返すことで少しずつリフトオフを行った。この工程で最終的に Fig 3.9 (d) のような三角プリズム型の電極が形成される。

#### 3.8.3 裏面電極の形成、アニーリング

電極の蒸着が終わった後は Fig 3.9 (e) のようにデバイスの裏面に約 150 nm の Au をスパッタする。レートは 10 nm/s なので、15 分間スパッタすると 150 nm 程度の金が裏面に形成されるはずである。その後は金属とコンタクト層の密着性を高めるためのアニーリング作業を行う。温度は最小の 5 分間で常温から 350°C まで上げ、その後の 10 分間 350°C を保たせるようにする。

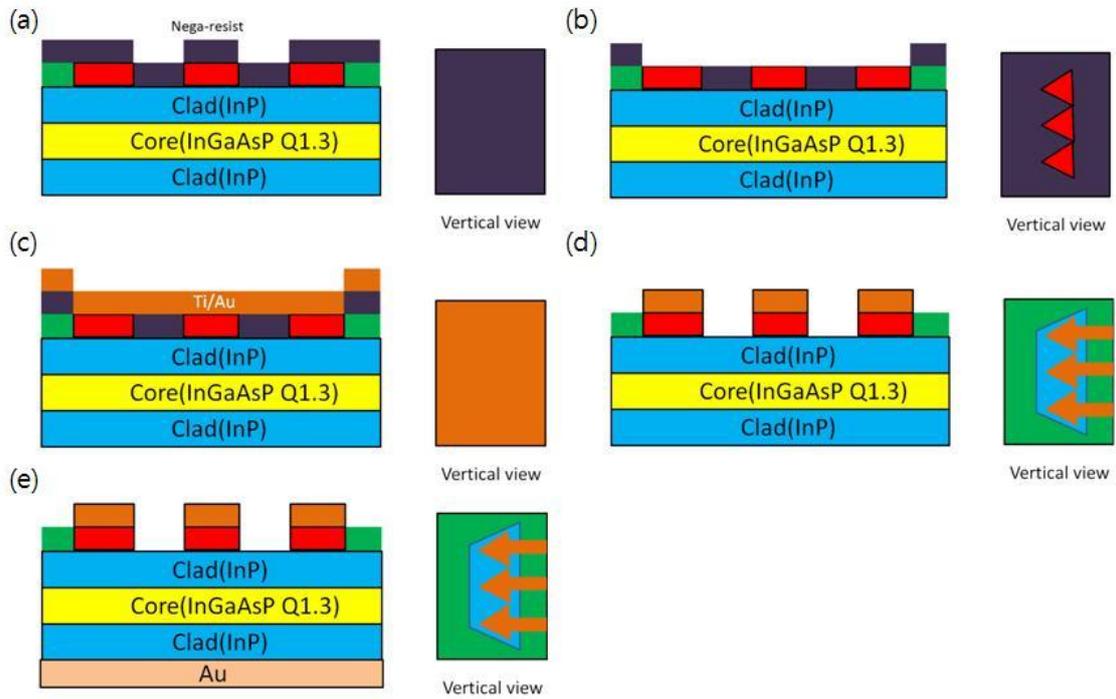


Fig 3.9 Electrode fabrication : (a) AZ5214 patterning, (b) photolithography, (c) Ti/Au evaporation, (d) lift-off, (e) back side Au sputter.

### 3.9 第3章まとめ

以上のように、ウェットエッチングとドライエッチングを併行してスラブ導波路とレンズを作製することができる。プリズムは金属の蒸着で作製できるが、その密着性を高めるためのアニーリング作業を後で行う必要がある。完成されたデバイスは壁開と銅板への貼り付け過程を通して測定可能な状態になる。全てのプロセスを終えたデバイスの写真を次の Fig 3.10 に示す。

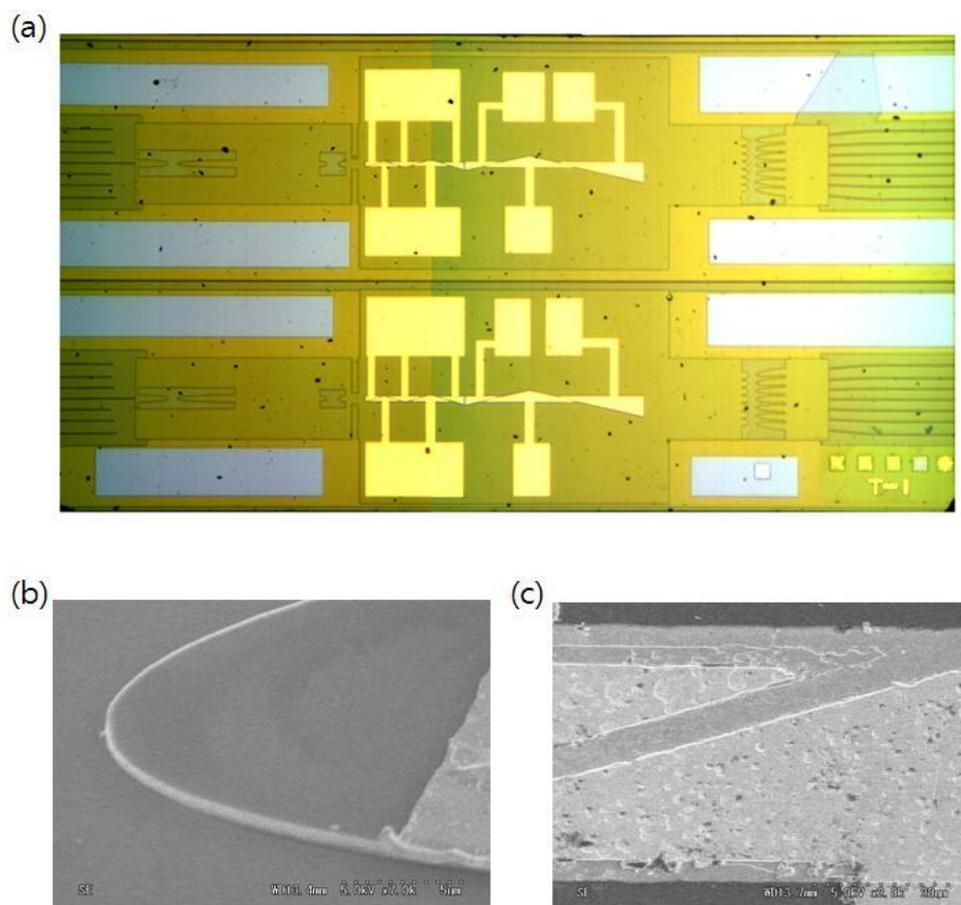


Fig 3.10  $1 \times 7$  optical switch fabricated by flow process chart : (a) overall view, (b) lens region, (c) Prism region.

## 第4章 デバイスの特性

この章では、第2章の設計法と第3章のデバイス作製プロセスに伴って試作された1×7ビーム偏向型光スイッチのデバイス特性について記述する。主に扱うべきことはプリズムの電流注入によってビームが偏向され、各出力ポートの光強度が変わるかを確認することであるが、その前に4.1では測定系の説明、4.2ではプリズムのI-V特性について評価する。その後の4.3では7つの出力ポートのスイッチング結果を示し、4.4では4.3までの議論をまとめるとともにシミュレーション結果との比較を行う。

### 4.1 測定系の設定

本デバイスの測定は入力側のポートに波長  $1.55 \mu\text{m}$  のレーザをシングルモード光ファイバーで入射し、出力側のポートでもシングルモード光ファイバーを用いてデバイスを透過してきた光信号を検出する。具体的な測定系を Fig 4.1 に示す。入力光の注入は TLC(Tunable Laser Controller)から発生された光を PC(Polarization Converter)を用いて TE モードの偏光に変え、最後にシングルモードファイバーを通して直接デバイスに入るようにする。プリズムの電流注入はその電極にプローブを当て、DC Current からの電流値を制御しながら行う。出力側からの光信号は入力側と同様にシングルモードファイバーを用いて検出するのであるが、ポート 1 から 7 までの光強度を測るため、光ファイバーを上下に移しながら測定を行う。入力光と出力光は両方 1:9 に分け、1 の信号成分を PM(Power Monitor)に送ることでその強度を測る。

しかしこういう測定系ではファイバーをデバイスに当てて信号の注入と検出を行うため、入力と出力各一度ずつ信号を空気中に出さないといけない。つまり、デバイスとファイバー間のカップリング損失を考慮しながら測定結果を評価しなければならない。今度の測定系ではその損失が各々 5.0 dB 程度であったので、全体のカップリング損を 10.0 dB にしてこれからの議論を進める。

### 4.2 プリズムの電流—電圧特性

三角形プリズムの電流注入による光の偏向効果を確認する前に、各プリズムの電流—電圧特性を測ってダイオードとしての動作を確かめる。第2章の2.8で述べたようにプリズム  $R_1$ 、 $R_2$  は同じ電極につなげて同時制御するものなので I-V 特性もそのプリズム二つをつなげたものを測るようにする。プリズム  $L_1$ 、 $L_2$ 、 $L_3$  も同様、三つのプリズムをつなげたものの特性を測るようにする。しかし、プリズム  $R_3$  と  $L_4$ 、 $L_5$  はポート 1 と 7 のスイッチングだけに使うものなので、電極も  $R_1$ 、 $R_2$  や  $L_1$ 、 $L_2$ 、 $L_3$  から離れている。そのため  $R_3$ 、 $L_4$ 、 $L_5$  に関しては単独の I-V 特性を測る。Fig 4.2 にその結果を上向きプリズムから順番に示す。

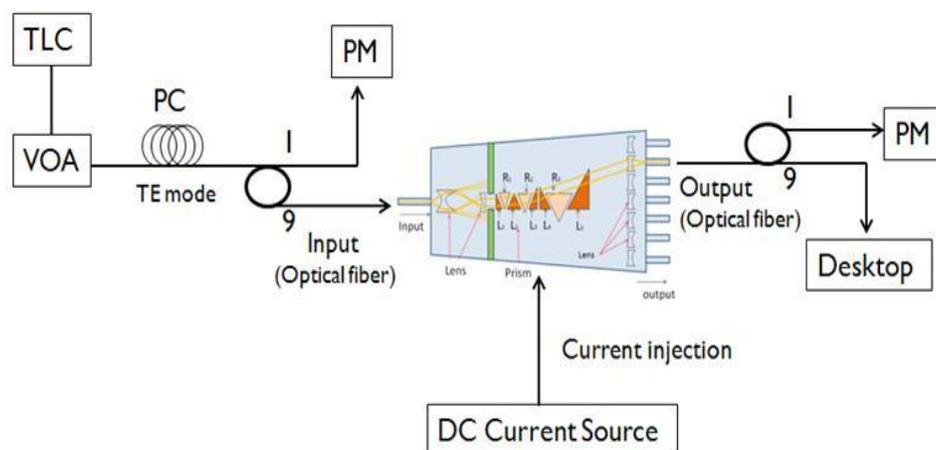


Fig 4.1 Measurement setup for monitoring optical switching.

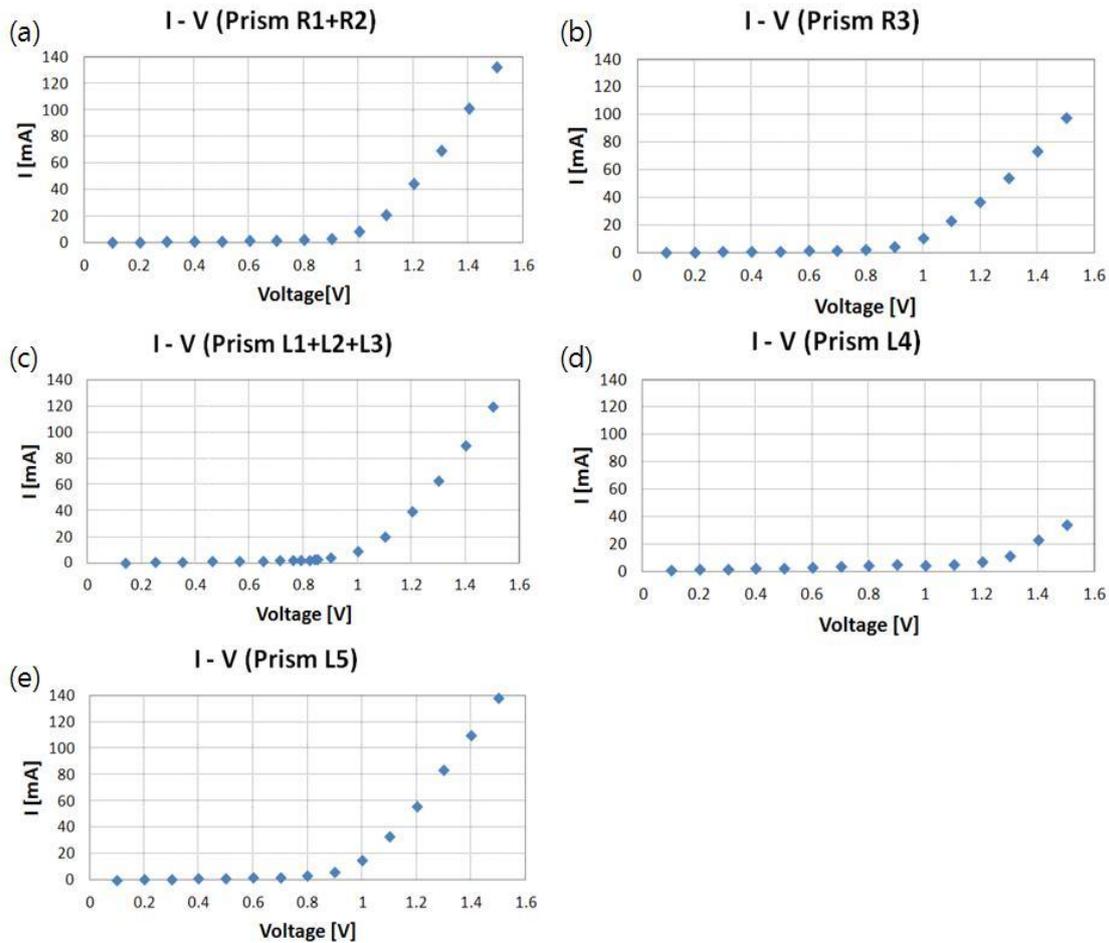


Fig 4.2 Current-Voltage properties : (a) Prism R1+R2, (b) Prism R3, (c) Prism L1+L2+L3, (d) Prism L4, (e) Prism L5.

Fig 4.3 には Fig 4.2 の結果を電流密度－電圧特性に書き換えた結果を一つのグラフにまとめる。すなわち、 Fig 4.2 の各縦軸を該当プリズムの面積に割った値を Fig 4.3 の縦軸にする。そうすることでどのプリズムの電流注入効果が良いかを評価できるが、 R<sub>1</sub>+R<sub>2</sub> の場合と L<sub>1</sub>+L<sub>2</sub>+L<sub>3</sub> の場合は他の大型のプリズム R<sub>3</sub>、 L<sub>4</sub>、 L<sub>5</sub> の場合よりその効果が高いと確認される。それは 第 3 章の 3.8 で示した InGaAs 層の破損に関する結果であると考えられ、プリズムの面積が大きいほど InGaAs の破損も大きく、電流注入効果もより劣化されると予想される。その結果から出力ポート 1 と 7 のスイッチング動作は他のポートより良くなり、消光比の減少やクロストークの増加等の問題が発生すると考えられる。

### 4.3 光スイッチングの特性

これからは出力ポートごとのスイッチング特性を示すが、その表示はポート 1 から 7 の順ではなく、ポート 4 → 3 → 2 → 1 → 5 → 6 → 7 の順番にする。それは電流注入の段階性を考慮したことで、まずは電流注入なしの場合であるポート 4 のスイッチングから Fig 4.4 に示す。その後は上向きプリズムの動作によるスイッチングの中で電流注入量の少ないポート 3 のスイッチングを Fig 4.5 に示し、次はポート 2 のスイッチングを Fig 4.6 に、ポート 1 のスイッチングを Fig 4.7 に示す。下向きプリズムの動作によるスイッチングの場合も同様、電流値の少ないポート 5 のスイッチングから Fig 4.8 に、ポート 6 のスイッチングは Fig 4.9 に、ポート 7 のスイッチングは Fig 4.10 に示す。また、各グラフの下にはスイッチング時の色々な条件を二つの表にまとめて明記するが、一つ目の表には駆動すべきプリズムの電流注入量を変えたときの該当ポートの出力光強度変化を表記する。その表からどのプリズムにどのくらいの電流を注入すれば目標のスイッチングができるかを確認できる。二つ目の表には一つ目の表の結果を含めて、駆

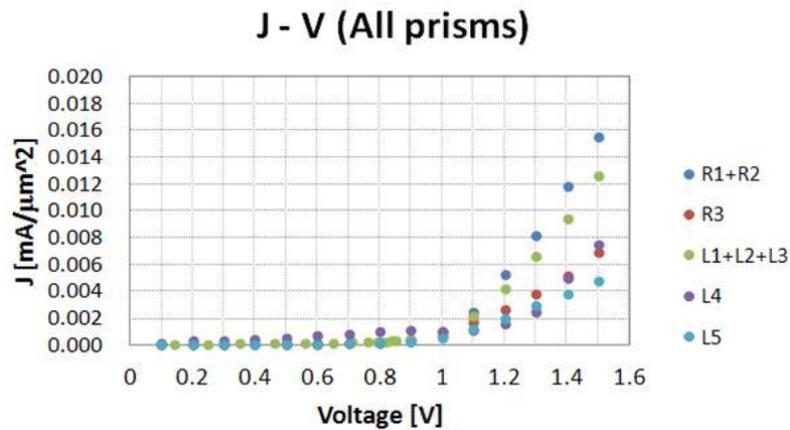


Fig 4.3 Current density-Voltage properties for all prisms.

動プリズムとその電流値、カップリング損失(10 dB)と導波路の伝搬損失(3 dB)を除いた入出力損失比、および隣のポートとの光強度比を表記する。スイッチングのグラフは 7 つあるので、表は全部で Tab 4.1 から Tab 4.14 までの 14 つになる。

#### 4.4 結果のまとめ

Fig 4.11 に Fig 4.4 から Fig 4.10 までの結果をまとめ、同じグラフ上に表示する。各結果を比較することで各ポートの消光比が分かる。その値は 6.0 dB から 9.0 dB の間にあるが、Tab 4.15 にその値を含め、各ポートの入出力損、消光比、駆動プリズムとその電流注入量等を一つの表にまとめる。シミュレーションによるデータも Tab 4.16 にまとめる。ビーム伝搬法による計算ではどちらのポートでも入出力損は 5.0 dB 程度であったが、試作したデバイスでは 9.0 dB 以下の範囲で偏向角の大きいポートのほど損失が大きくなった。それは偏向角が大きいほど出力ポートの導波路でちょうどカップリングされるのが難しく、その分の損失が発生したと予想される。消光比はシミュレーションで 10 dB 以下であったが、実際は 3~4 dB 程度大きかった。その理由は、試作したデバイスのコリメートレンズではシミュレーションで計算したくらの集光効果が得られなかったためであると考えられる。その考察は次の第五章で詳しく記述するようになる。

それ以外の考察点として次の二つがあるが、その一つは電流注入なしの場合、Fig 4.4 に示したようにポート 5 のクロストークが大きくてポート 4 との出力強度比が 4 dB しか出てこなかったことである。もう一つは電流注入の場合、各スイッチングごとの注入すべき電流量がシミュレーションの計算より全体的に半分程度低かったことである。第五章では各考察点に関する議論を行い、より良いデバイスを作製するためにはどのような工夫が必要なのかを改善策と共に記述する。

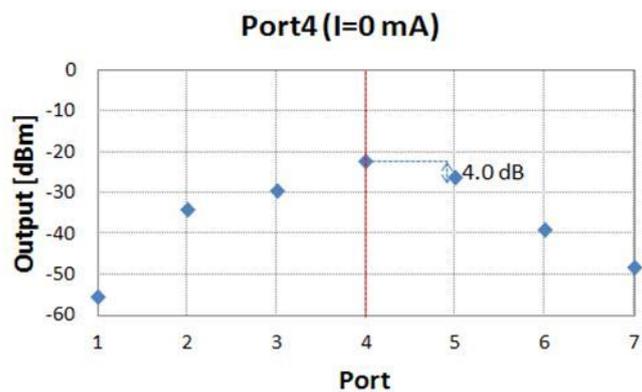


Fig 4.4 Output optical power of all ports while prisms are not injected.

Tab 4.1 Port 4 optical power by current injection.

Injected current	Port4 output power
0 mA	-22.2 dB

Tab 4.2 Port4 switching propertys.

	Property
Activated prism ( inejected current)	None
Insertion loss without coupling, propagation loss	9.2 dB
Output power difference with port 5	4.0 dB

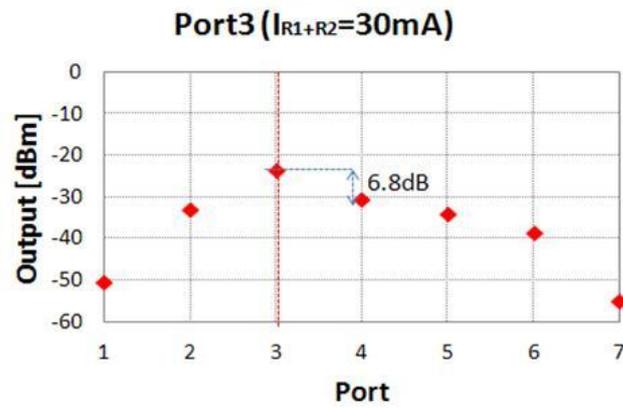


Fig 4.5 Output optical power of all ports while prisms are activated for port3 switching.

Tab 4.3 Port 3 optical power by current injection.

Injected current (Prism R1+R2)	Port3 output power
10 mA	-22.2 dB
20 mA	-26.0 dB
30 mA	-23.2 dB
40 mA	-24.5 dB

Tab 4.4 Port3 switching property.

	Property
Activated prism ( injected current)	Prism R1+R2 (30 mA)
Insertion loss without coupling, propagation loss	10.2 dB
Output power difference with port 4	6.8 dB

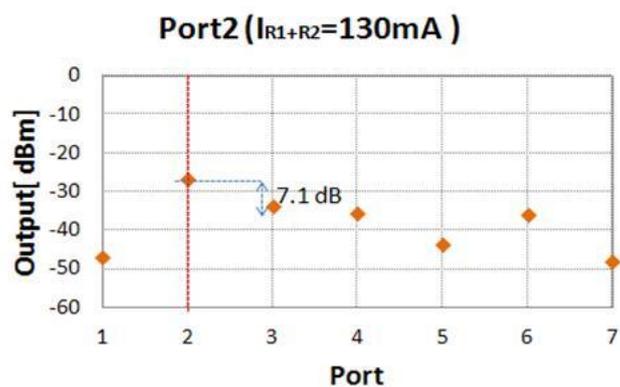


Fig 4.6 Output optical power of all ports while prisms are activated for port2 switching.

Tab 4.5 Port 2 optical power by current injection.

Injected current (Prism R1+R2)	Port2 output power
100 mA	-28.3 dB
110 mA	-26.8 dB
120 mA	-26.5 dB
130 mA	-26.3 dB
140 mA	-26.5 dB
150 mA	-27.3 dB

Tab 4.6 Port2 switching propertys.

	Property
Activated prism ( injected current)	Prism R1+R2 (130 mA)
Insertion loss without coupling, propagation loss	13.3 dB
Output power difference with port 3	7.1 dB

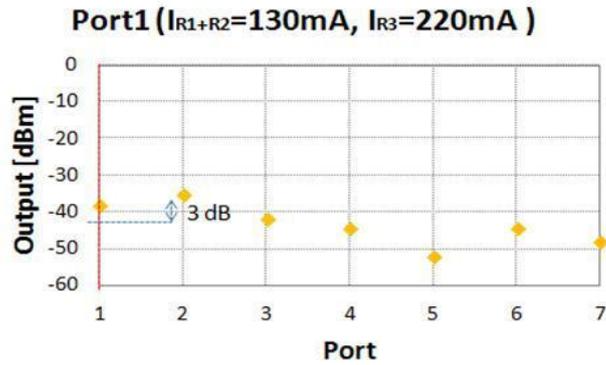


Fig 4.7 Output optical power of all ports while prisms are activated for port1 switching.

Tab 4.7 Port 1 optical power by current injection (Current for Prism R1+R2 is fixed to 130 mA).

Injected current (Prism R3)	Port1 output power
180 mA	-39.1 dB
190 mA	-38.6 dB
200 mA	-38.4 dB
210 mA	-38.3 dB
220 mA	-38.2 dB
230 mA	-38.5 dB
240 mA	-40.0 dB

Tab 4.8 Port1 switching propertys.

	Property
Activated prism ( injected current)	Prism R1+R2 (130 mA) Prism R3 (220 mA)
Insertion loss without coupling, propagation loss	25.2 dB
Output power difference with port 2	3.0 dB

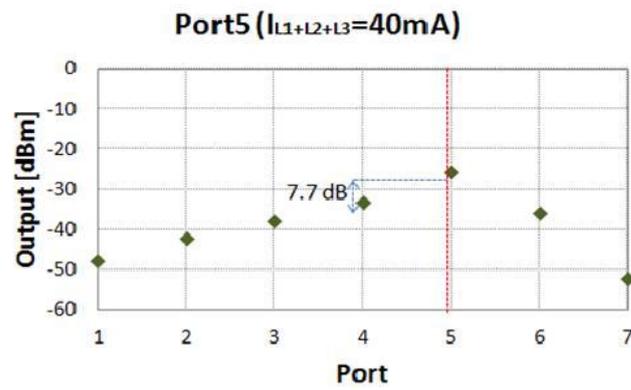


Fig 4.8 Output optical power of all ports while prisms are activated for port5 switching.

Tab 4.9 Port 5 optical power by current injection.

Injected current (Prism L1+L2+L3)	Port5 output power
10 mA	-25.1 dB
20 mA	-24.0 dB
30 mA	-23.6 dB
40 mA	-24.4 dB

Tab 4.10 Port5 switching propertys.

	Property
Activated prism ( injected current)	Prism L1+L2+L3 (30 mA)
Insertion loss without coupling, propagation loss	10.6 dB
Output power difference with port 4	7.7 dB

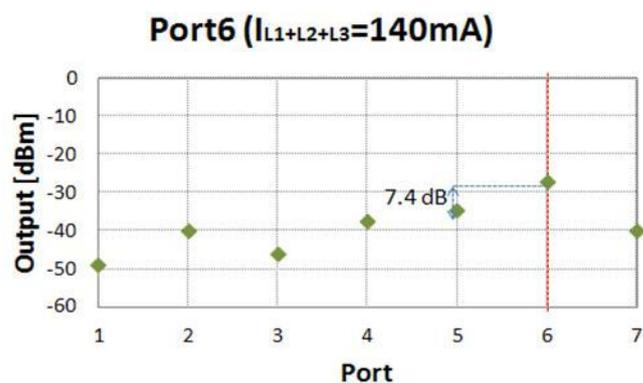


Fig 4.9 Output optical power of all ports while prisms are activated for port6 switching.

Tab 4.11 Port 6 optical power by current injection.

Injected current (Prism L <sub>1</sub> +L <sub>2</sub> +L <sub>3</sub> )	Port6 output power
120 mA	-29.0 dB
130 mA	-28.8 dB
140 mA	-28.1 dB
150 mA	-28.0 dB
160 mA	-28.3 dB
170 mA	-28.3 dB

Tab 4.12 Port6 switching property.

	Property
Activated prism ( injected current)	Prism L <sub>1</sub> +L <sub>2</sub> +L <sub>3</sub> (140 mA)
Insertion loss without coupling, propagation loss	15.0 dB
Output power difference with port 5	7.4 dB

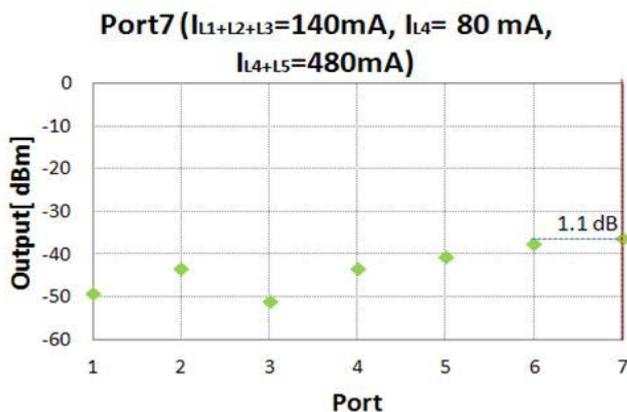


Fig 4.10 Output optical power of all ports while prisms are activated for port7 switching.

Tab 4.13 Port 7 optical power by current injection.  
(Current for Prism L1+L2+L3 is fixed to 140 mA).

Injected current (Prism L4+L5)	Port7 output power
520 mA	-38.6 dB
530 mA	-37.9 dB
540 mA	-37.9 dB
550 mA	-38.0 dB
560 mA	-37.8 dB
570 mA	-37.7 dB
580 mA	-37.8 dB

Tab 4.14 Port7 switching property.

	Property
Activated prism ( injected current)	Prism L1+L2+L3 (140 mA) Prism L4+L5 (560 mA)
Insertion loss without coupling, propagation loss	24.8 dB
Output power difference with port 6	1.1 dB

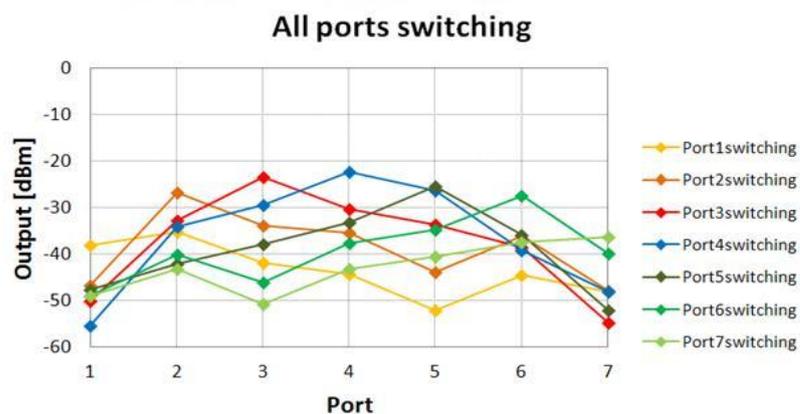


Fig 4.11 Output optical power properties for all ports switching.

Tab 4.15 Switching properties for all ports on experiment.

	Port1	Port2	Port3	Port4	Port5	Port6	Port7
Activated prism (inejected current)	R1+R2 (130 mA) R3 (220 mA)	R1+R2 (130 mA)	R1+R2 (30 mA)	None	L1+L2+L3 (30 mA)	L1+L2+L3 (140 mA)	L1+L2+L3 (140 mA) L4+L5 (560 mA)
Insertion loss without coupling, propagation loss	25.2 dB	13.3 dB	10.2 dB	9.2 dB	10.6 dB	15.0 dB	24.8 dB
Extinction ratio	8.6 dB	6.5 dB	6.3 dB	8.1 dB	0.8 dB	8.6 dB	3.6 dB

Tab 4.16 Switching properties for all ports on simulation.

	Port1	Port2	Port3	Port4	Port5	Port6	Port7
Activated prism (inejected current)	R1+R2 (252 mA) R3 (426 mA)	R1+R2 (252 mA)	R1+R2 (72 mA)	None	L1+L2+L3 (80 mA)	L1+L2+L3 (280 mA)	L1+L2+L3 (280 mA) L4+L5 (988 mA)
Insertion loss without coupling, propagation loss	4.2 dB	3.9 dB	4.1 dB	4.0 dB	4.0 dB	4.1 dB	3.8 dB
Extinction ratio	13.5 dB	10.8 dB	11.0 dB	10.5 dB	11.6 dB	11.1 dB	12.9 dB

## 第5章 実験結果に対する考察、及び改善策

この章では前章の4.4に言及された考察点をより詳しく議論し、設計法や作製プロセスの変更でデバイスの特性が改良されると考えられるのに関してはその改善策を述べるようにする。5.1では試作デバイス上のレンズの集光劣化について、5.2では電流注入しない場合の出力ポート間のクロストーク発生とその改善策について、5.3では試作デバイスの電流注入量と理論計算上の電流注入量の差について各々の考察を行う。

### 5.1 レンズ集光の劣化

レンズの設計は第二章2.4.1で記述したよう、先にレンズ部とスラブ部の等価屈折率  $n_L$ 、 $n_S$  を求めることから始まるが、その計算には Fig 2.6(a)の層構造を反映するので、InGaAsP コアの厚みや屈折率が変わると等価屈折率の値も変わるはずである。Q 1.3 In<sub>0.72</sub>Ga<sub>0.28</sub>As<sub>0.61</sub>P<sub>0.39</sub> の屈折率は1.55  $\mu\text{m}$  の伝搬波長帯で3.4であると知られているが、実際はサンプルごとの偏差値があるため必ずしもちょうど3.4になっているとは限らない[27-28]。Q 1.3 In<sub>0.72</sub>Ga<sub>0.28</sub>As<sub>0.61</sub>P<sub>0.39</sub> 層の屈折率が3.395から3.405まで変わった時のレンズ部の等価屈折率はどう変わるのかを2.4.1で記述した等価屈折率の計算法を用いて計算した結果、3.2717から3.2801までの範囲変わるようになる。すなわち、InGaAsP コア層の屈折率が $\pm 0.005$  変わることによってレンズ部の等価屈折率は約 $\pm 0.004$  程度変わることが分かる。その量はレンズ部の理想の等価屈折率3.2759に比べれば割と小さい数値であるが、スラブ部の等価屈折率が3.2996でその差が0.024程度であることを考えると0.004という数値はそれから15%以上ずれた値になる。つまり、理論上0.024変わると想定した等価屈折率が実際は0.021~0.029変わるのでレンズの集光機能もその分劣化されると考えられる。その現象はスラブとレンズの等価屈折率差を1%内に調整しなければならない本デバイスの本質的な問題であり、その影響で消光比も3~4 dB低下したと思われる。しかし、単体の1 $\times$ 7光スイッチで6~9 dBの消光比が得られたことを考えればそれを集積したN $\times$ Nの光スイッチでは13~20 dB以上の消光比が得られるはずである。実際のスイッチでは15 dB程度の消光比が要求されるので、今度試作されたデバイスもN $\times$ Nのシステムとして使えばこれからの光スイッチングに活用できるとと思われる。

### 5.2 電流注入しない場合の出力ポート間のクロストークの発生

出力ポート7箇所に対する光スイッチングの結果は第4章のFig 4.4からFig 4.10まで示した。出力ポート1と7のスイッチングを除いた結果では該当ポートの光強度が他のポートより7 dB以上高かったが、電流注入しない場合のスイッチングではその該当ポートである4番の光強度が隣のポート5より4 dBしか低くなかった。逆にそれはポート5へのクロストークが高かったのを意味するが、ポート3ではポート4より9 dB程度低い光強度が検出されたことに比べると対照的な結果である。

その原因として考えられるのは作製プロセス中に発生したレンズ部パターンニングのアライメントのずれである。第三章では3.2の段階でスラブ及び入出力導波路をウェットエッチングで作製し、3.3.2の段階でその基板の上にTSMR8900レジストを塗った後レンズのパターンニングをすると説明したが、パターンニングのアライメントとはマイクロメーターを回しながら手動で行う作業なので、少なくとも1 $\mu\text{m}$ 前後のずれは発生することである。そのずれでクロストークがどのくらい大きくなるのかをビーム伝搬法で計算した結果をFig 5.1に示す。Fig 5.1(a), (b), (c)は各々入出力導波路とレンズの中心軸がx方向に対して1 $\mu\text{m}$ 、2 $\mu\text{m}$ 、3 $\mu\text{m}$ ずれた場合の伝搬様子を表示したものである。また、Tab 5.1ではそのずれによってポート4と5の光強度がどう変わるのかをずれの量に対して表記する。正確なアライメントでは両ポートの間に10 dB以上の強度差が出るものの、1 $\mu\text{m}$ のずれでは6 dBの強度差が、2 $\mu\text{m}$ では3 dBの強度差が、3 $\mu\text{m}$ では1 dBの強度差が出た。その結果から試作デバイスでは1 $\mu\text{m}$ 以下のアライメントのずれが発生したと予想される。そして、このデバイスではレンズパターンニングのアライメントのずれによる影響が割りと大きいため、今後の改善策として3.2から3.3までの作製プロセスを修正しなければならない。Fig 5.2にその新しい作製プロセスを表示する。本デバイスの作製プロセスと違うのはスラブ導波路とレンズの作製をウェットエッチングとドライエッチングに分けるのではなく、同じフォトマスクでパターンニングして同時にエッチングすることである。そうすればスラブ導波路とレンズは最初からアライメントされたままになるので、手動的なアライメント作業によるずれの発生は防止される。

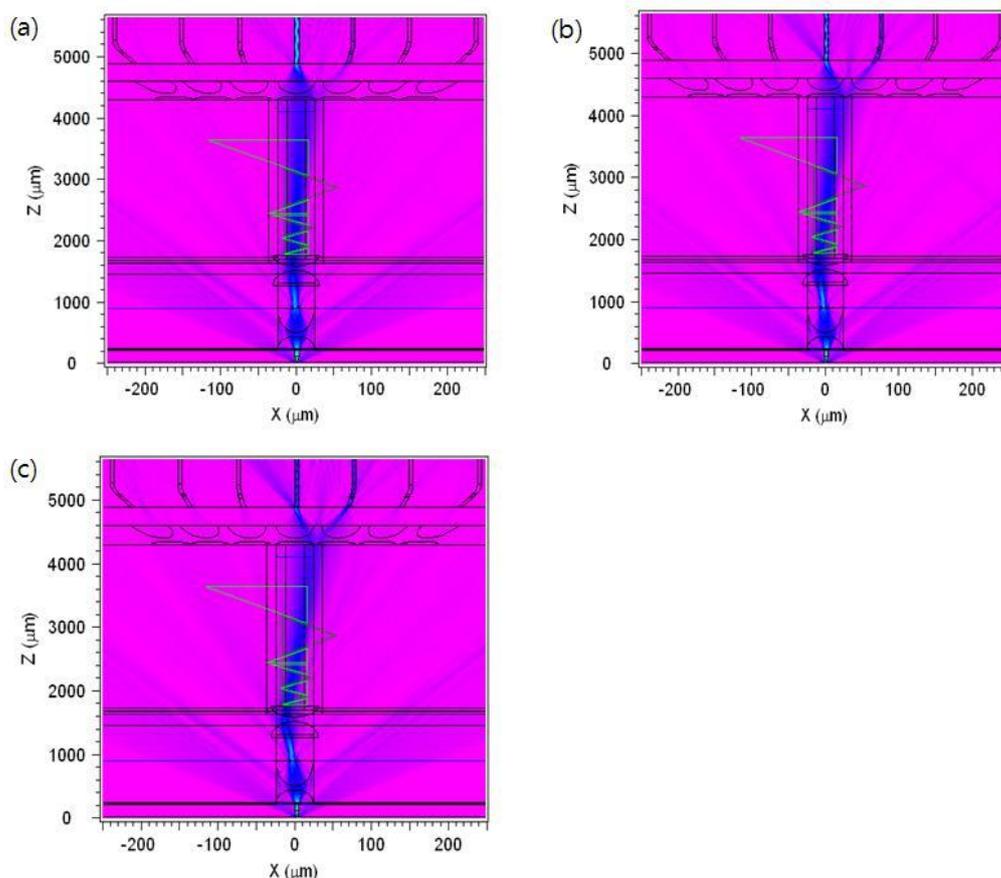


Fig 5.1 BPM simulation results : (a) 1 μm misalignment on x-axis, (b) 2 μm misalignment on x-axis, (c) 3 μm misalignment on x-axis.

Tab 5.1 Transmittance of port4 and port5 while lens patterning has misalignments.

	x-axis none misalignment	x-axis 1 μm misalignment	x-axis 2 μm misalignment	x-axis 3 μm misalignment
Port 4	- 4.0 dB	-4.1 dB	-4.5 dB	-5.8 dB
Port 5	-14.5 dB	-10.1 dB	-7.3 dB	- 6.9 dB

### 5.3 試作デバイスの電流注入量と理論計算上の電流注入量の比較

第四章の Tab 4.15 と Tab 4.16 から光スイッチング時の電流注入量を実験値と理論値合わせて比較することができる。理論上ポート 3、5 のスイッチングには 70 mA 以上の電流を、ポート 2、6 のスイッチングには 300 mA 以上の電流を注入する必要があると述べたが、実験上の電流注入値はその半分くらいで、ポート 3、5 のスイッチングには 30~40 mA の電流が、ポート 2、6 のスイッチングには 130~160 mA の電流が必要であった。どうして理論値と実験値の間にそのような差が発生したかを明示するため、第二章の 2.5 で述べたプリズムの動作原理を再び参考にする。

2.5.1 では電流注入による屈折率の変化量をキャリア密度  $N$  に関する式で近似し、最終的に式 (2.68)を得た。また、その式の中で表記された比例定数  $B$  は  $1.1 \times 10^{-11} [\text{cm}^3/\text{s}]$  から  $3.0 \times 10^{-11} [\text{cm}^3/\text{s}]$  までの値をとる定数なので、本研究では先行研究の実験結果から逆算された値  $2.5 \times 10^{-10} [\text{cm}^3/\text{s}]$  を理論値として用いることにした [25, 26]。ただし  $2.5 \times 10^{-10} [\text{cm}^3/\text{s}]$  という値は  $B$  の存在範

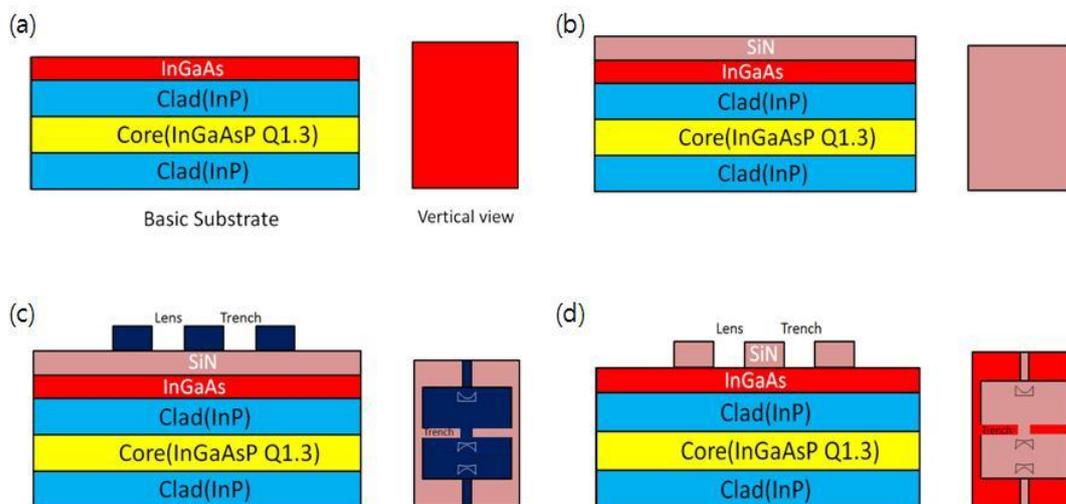


Fig 5.2 Waveguide and lens fabrication process for preventing their patterning misalignment : (a) basic substrate, (b) SiN sputter, (c) Photolithography, (d) CHF3 dry-etching and resist remove.

围の上限近傍に存在する値で、Q 1.3 の InGaAsP の場合の B は通常  $10^{-10}$  [cm<sup>3</sup>/s]であると知られているので本研究ではその値が予想値から変わることもあると想定した上で実験を行った。そして今回の実験結果から逆算された B の値は  $1.3 \times 10^{-10}$  [cm<sup>3</sup>/s]であった。それは先行研究よりも理論値に近い値なので、今回実験の電流注入値はやや妥当な値であるのが確認された。Fig 5.3 には B の値によって電流密度-屈折率変調の曲線がどう変わるのかを Fig 2.11 の計算結果を含めて表示する。同じ InGaAsP 系の材料を用いても B の値には偏差があるので、同じ原理を基に設計されたデバイスでもその屈折率変調特性は少しずつ変わると考えられる。いずれの場合でも、B は自然再結合レートに関する定数なので、なるべく小さい方が屈折率変調には相応しい。

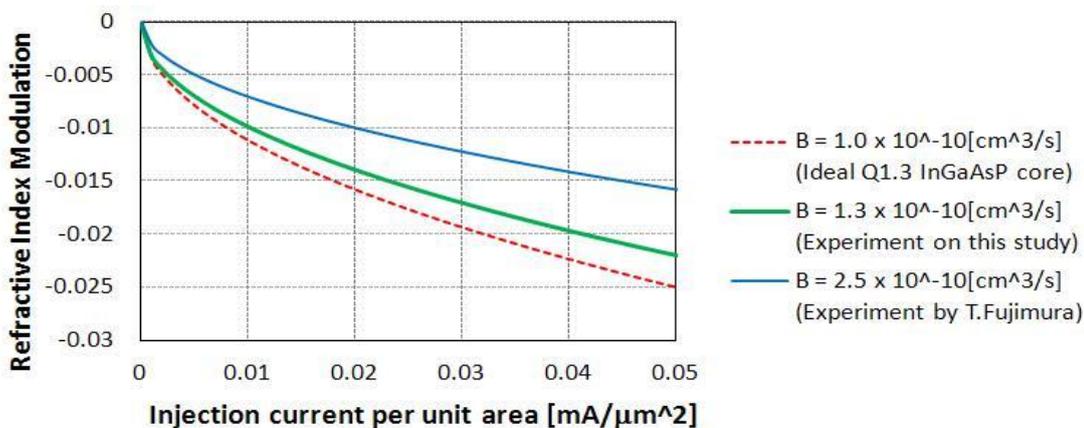


Fig 5.2 Relationship between the injection current density and refractive index change of the slab. The dotted red line indicates the ideal property of Q1.3 InGaAsP core layer.

## 第6章 結論

光ファイバを用いた通信システムの情報の送受信量は波長多重化方式等の導入によりますますと高速化されてきたが、これからの 2012 年を超えた時点ではファイバー一本あたりに要求されるトラフィック量が 1 Pb/s を超えると予測されているので光ルータ上のより速い光スイッチング素子が必要になると思われている。本研究の目的はそういう要求に応え、光ルータ内のスイッチングを光電変換なしに行うことでもっと省電力、しかも高速のスイッチングが実現できるような光スイッチを提案することである。光スイッチの動作方式には機械光学式、熱光学式、および電気光学式等があるが、その中で電気光学式は他の方式よりその動作時間が速く、ns のオーダーのスイッチング時間を得る。電気的な制御を基にするスイッチング方式にも半導体光増幅器によるブロードキャスト&セレクト方式や導波路回折格子間の位相差を利用する方式等があるが、各々省電力性や制御の簡便性にその不利得がある。本研究ではそういう不利点を少しずつ折衷したビーム偏向型の  $1 \times N$  光スイッチの設計を改めて提案し、実際にデバイスを試作し、スイッチングの結果を評価した。

第二章ではデバイスの中心要素となるコリメートレンズとプリズムの動作原理、および設計論について述べた。両方とも光線光学的な理論を基本に設計し、ビーム伝搬法で波長光学的な解析を行い、必要に応じてその設計を直した。コリメートレンズは入力側のレンズを二つに増やしながら部分的なトレンチを挿入することでより良い集光効果を検証した。三角形プリズムはビームの屈折に伴ってその大きさを段々増やし、設計上  $1 \times 7$  のスイッチングまでできるようにした。

第三章ではデバイスの作製プロセスを順番に示した。まずはスラブ導波路をウェットエッチングで作製した。レンズはドライエッチングを中心に補助的なウェットエッチングを行うことで作製した。プリズムは InGaAs のコンタクト層を先にウェットエッチングで作製し、その上に Ti/Au を蒸着することで作製した。

第四章では試作されたデバイスのスイッチング特性を評価した。先にプリズムの電流-電圧特性を測り、どのプリズムが良いダイオード特性を示すかを確認した。その後でスイッチングの測定を行い、シミュレーションとその結果を比較した。電流注入による光信号のスイッチングは各ポートの光強度が電流注入によって変わることにより確認された。シミュレーションではどのポートでもその入出力損失が 5 dB で消光比は 10~13dB であったが、実験ではスイッチングのよくできたポートの場合入出力損失が 9~15 dB で消光比は 6~9 dB であった。

第五章では実験結果の考察点を記述した。光の消光比を低下させる原因としてはレンズ部の等価屈折率を理論値にちょうど合わせるのが難しいのでレンズの集光効果が劣化されることを議論した。また、レンズの作製上に発生するスラブ導波路とのアラインメントのずれが割りとポート間のクロストークを大きくするのをシミュレーションで検証し、それを防ぐためにはレンズの作製をスラブ導波路と統合してやるべきであると記述した。プリズムの動作電流に関してはその実験値が計算値より半分程度低かった理由を理論式の比例定数から説明し、逆に今回実験から逆算された比例定数の方が通常知られているその乗数値に近いことを示した。

本研究において、電流注入の等価屈折率変調効果を用いたビーム偏向型光スイッチの改良に成功した。消光比の改善と共に、デバイスの伝搬方向長さを 8000  $\mu\text{m}$  から 5000  $\mu\text{m}$  以下に小型化する等の成果を残した。第五章で述べたように、レンズとスラブ導波路を同時にパターンニングするような作製上の改善策を行えばより消光比に優れた光スイッチを作製できると考えられる。試作デバイスに関しては単体の  $1 \times 7$  光スイッチで 6~9 dB の消光比を示したが、複数の光スイッチをカスケードにする時や  $N \times N$  のマトリクス構造にする時の消光比はその倍になるので、全体のスイッチング系に関しては 15 dB 以上の消光比が得られると考えられる。通常要求される光スイッチの消光比も 15 dB 以上であると知られているから、本研究で提案されたビーム偏向型の光スイッチについても今後の O/O(光-光)変換方式の OPS ルータへの応用可能性が期待される。

## 参考文献

- [1] S.J.B. Yoo, "Optical packet and burst switching technologies for the future photonic Internet," *J.Lightwave Technol.*, vol.24, no.12, pp.4468-4492, Dec.2006.
- [2] A.M. Odlyzko, "Internet traffic growth : Sources and implications," in *Proc. SPIE-Optical Transmission Systems and Equipment WDM Networking II*, 2003, vol. 5247, pp. 1-15.
- [3] D. Keck, "Optical fiber spans 30 years," *Lightwave*, vol. 17, no. 8, pp. 78-82, 2000.
- [4] C. Thomspson, "Supply and demand analysis in convergent networks," M.S. thesis, Sloan School Management, Cambridge, MA, 2001.
- [5] H.J.S. Dorren, N. Calabretta, and O. Raz, "Scaling all-optical packet routers : how much buffering is required?," *Journal of Optical Networking*, vol. 7, no. 11, pp.936-946, Nov. 2008.
- [6] J. Bao, Z. Cao, Y. Yuan, and X. Wu, "A non-silicon micro-machining based scalable fiber optic switch," *Sensors and Actuators A*. vol. 116, no.2, pp.209-214, Oct. 2004.
- [7] D. Yang, Y. Li, F. Sun, S. Chen, J. Yu, "Fabrication of a  $4 \times 4$  strictly nonblocking SOI switch matrix ," *Optics Communications*, 2005, vol.250, pp.48-53.
- [8] Gustav Muller et al., "Self-Aligned Packaging of an  $8 \times 8$  InGaAsP-InP Space Switch," *IEEE J. sel. Top. In Quantum Electron.*, vol.3, no.6, pp.1445-1456, Dec.1997.
- [9] N. Chi, Z. Wang, O. Ansell, S. Yu, "Improvement of switching properties and cascadability of an ultra-fast reconfigurable optical crosspoint switch matrix using DPSK payloads," *Optics Communications*, 2006, vol.265, pp.120-125.
- [10] R.A. Spanke, "Architectures for guided-wave optical space switching systems," *IEEE Communications Magazine*, vol.25, no.5, pp.42-48, May 1987.
- [11] G. I. Papadimitriou, C. Papazoglou, and A.S. Pomportsis, "Optical switcing : switch fabrics, techniques, and architectures," *Journal of Lightwave Technology*, vol.21, no.2, pp.384-405, Feb. 2003.
- [12] Tomoki Kato et al., "Hybrid integrated  $4 \times 4$  optical matrix switch module on silica based planar waveguide platform," *IEICE, Trnas.Electron.*, vol. E82-C, no.2, pp.305-311, Feb.1999.
- [13] Shotaro Kitamura et al., "Spot-size converter integrated semiconductor optical amplifiers for optical gate application", *IEEE J. of Quantum Electron.*, vol.35, no.7, pp. 1067-1074, jul. 1999.
- [14] Shinsuke Tanaka et al., "Polarization-insensitive Monolithically-integrated 8:1 gate switch with large gain and high extinction ratio," *OFC2008, OWE2*.
- [15] S.N. Khan, D. Dai, L. Liu, L. Wosinski, S. He, "Optimal design for a flat-top AWG demultiplexer by using a fast calculation method based on a Gaussian beam approximation," *Optics Communications*, 2006, vol.262, pp. 175-179.
- [16] A.L. Glebov, A. Sugama, V.I. Smirnov, S. Aoki, V. Rotar, M.G. Lee, L.B. Glebov, "Angle selective enhancement of beam deflection in high-spped electrooptic switches," *IEEE photonics technology letters*, vol.19, no.9, may.2007.
- [17] T. Fujimura, "InGaAsP/InP  $1 \times N$  Planar optical switch using beam deflection," Master thesis, The university of Tokyo, pp. 77-84,2009.
- [18] 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 ISBN: 4-339-00623-8.
- [19] 國分泰雄, "光波工学", 共立出版株式会社 ISBN: 4-320-08556-6.
- [20] 河野健治, 鬼頭勤, "光導波路解析の基礎", 現代工学社 ISBN: 4-87472-186-9-C3055.
- [21] F.G.D. Corte et al., "Temperature dependence of the thermo-optic coefficient of InP, GaAs, and SiC from room temperature to 600 K at the wavelength of 1.5  $\mu\text{m}$ ," *Apl. Phys. Lett.*, vo.77, no.11, pp. 1614-1616, Sep. 2000.
- [22] B.R. Bennett, R.A. Soref, J.A.D. Alamo, "Carrier-induced change in refractive index of InP, GaAs, and InGaAsP," *IEEE Journal of Quantum Electronics*, vol.26, no.1, Jan.1990.
- [23] O. Mikami, H. Nakagome, "InGaAsP/InP optical waveguide switch operated by a carrier-inducedchange in the refractive index," *Optical and Quantum Electronics*, vol.17, pp.449-455, 1985.
- [24] J.F. Vinchant, J.A. Cavailles, M. Erman, P. Jarry, and M. Renaud, "InP/GaInAsP Guided-Wave Phase Modulators Based on Carrier-Induced Effects : Theory and Experiment," *J.Lightwave Technol.*, vol. 10, no.1, pp. 63-70, 1992.
- [25] Larry. A. Coldren et al., "Diode Lasers and Photonic Integrated Circuits," Wiley-Interscience, ISBN: 0-471-11875-3.
- [26] Joachim. Piprek, "Semiconductor Optoelectronic Devices," Academic Press, ISBN : 0-12-557190-9.

- [27] G.H. Olsen, T.Z. Zamerowski, R.T. Smith and E.P. Bertin, "InGaAsP quaternary alloys : composition, refractive index and lattice mismatch," *Journal of Electronic materials*, vol.9, no.6, pp. 977-987, 1980.
- [28] C.H. Henry, L.F. Johnson, R.A. Logan, "Determination of the Refractive Index of InGaAsP Epitaxial Layers by Mode Line Luminescence Spectroscopy," *IEEE Journal of Quantum Electronics*, vol.QE-21, no.12, pp.1887-1892, Dec.1985.

# 本研究に関わる学会発表

## 著者の学会発表

### 【国内】

- [1] 崔洙赫, 財津勝, 肥後昭男, 種村拓夫, 中野義昭, “ビーム曲折型 1×N 光スイッチの部分エッチングによるクロストーク低減,” 電子情報通信学会ソサイエティ大会、北海道大学、2011年9月.

### 【国際】

- [2] Soohyok Che, Masaru Zaitzu, Akio Higo, Takuo Tanemura, and Yoshiaki Nakano, “Numerical Demonstration of InP 1×N Planar Optical Switch Based on Beam Deflection,” 2011 International Conference on Solid State Devices and Materials (SSDM 2011), Sep.2011.

## 他者の関連学会発表

### 【国内】

- [1] 藤村拓也, 種村拓夫, 中野義昭, “InGaAsP/InP ビーム曲折型 1×N 光スイッチに関する研究,” 2009年春季第56回応用物理学関係連合講演会, 筑波大学, 2009年3月.

### 【国際】

- [2] Takuya Fujimura, Takuo Tanemura, Yoshiaki Nakano, “Design and Fabrication of Beam-Deflecting Optical Switch on InP,” International Nano-Optoelectronic Workshop (INOW) 2008, P24, Tokyo, Aug.2008.
- [3] Takuya Fujimura, Takuo Tanemura, Yoshiaki Nakano, “Numerical and Experimental Study on Beam-Deflecting Planar Optical Switch on InP,” Laser and Electro-Optics Society (LEOS) 2008, WF3, USA(California), Nov.2008.

# 付録

## 実験装置一覧

本研究で使用した実験装置の目録を列挙する。

スピコータ	MIKASA 1H-D7
フォトリソグラフィ	Karl Suss MJB3
電子ビーム蒸着	ANELVA L-045E
スパッタリング(Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub> )	ULVAC MNS-2000RF
スパッタリング(Au 裏面電極用)	SANYU SC-701
ドライエッチング	ANELVA L-201D
EB 描画(フォトマスク)	ADVANTEST F5112 (owned by Takeda-super clean room)

## 謝辞

本研究を進める上で先生の方と教員の方、先輩と後輩の方等の大きな協力をいただきました。その感謝の言葉をこの場を借りて申し上げたいと思います。

中野義昭教授からは学部時代から光フォトニクスに関する講義を聞かせていただいて、光波工学の基本を学びました。修士課程に入ってから先端研究センターの所長として、中野、杉山、種村研究室の教授として学生の私に快適な研究環境を提供してくださいました。杉山正和准教授からも学部時代から授業や研究室会議で色々なアドバイスをいただいて、研究を進める上で大変お世話になりました。種村拓夫先生からは研究の進歩に関して必要な指導とコメントをいただきました。先生の方々に心深くご礼を申し上げます。

助教の肥後昭男先生からは研究の背景知識やシミュレーション、実験装置の使い方等に関する指導を修士2年にかけていただきました。また研究室の快適な環境造成のための備品買出し、掃除、実験装置管理等の仕事をしてくださいました。そのおかげで快適な研究室生活を過ごすことができました。渡辺健太郎先生からは研究室会議の間に色々なコメントをいただいて、これから考えるべきことは何かを考えさせていただきました。太陽電池の研究でお忙しいところでもデバイスグループのことを考えてくださいました。助教の方々にも感謝の言葉を申し上げます。

先輩と後輩の方々からのお助けもありました。博士課程の財津勝さんは学部時代からずっと中野、杉山、種村研究室の在籍になりながら後輩たちの面倒を見てくれまして、私の研究進歩や実験方法の相談、学会論文の投稿等についても毎回気遣いをしてくださいました。本研究は財津さんの面倒見なくては成し得なかったと思います。博士課程の郭命俊さんからも研究内外で色々なお助けをいただきまして、勉強中分からないことがあれば一緒に考えながら勉強したこともあり、研究外で困ったことがあればその相談に乗ってくれたこともあります。後輩の崔成漢君、金ボラムさんも郭命俊さんと共に同じ留学生として研究内外の色々なことを相談してくれました。三人のおかげでより楽しい留学生生活を過ごせました。

以上の方以外に、様々なところで私の支えになってくれた秘書の方、同期の藤井宏昌君、穴澤風彦君、大和文彦君等にも感謝しております。

最後に、私の学生生活を遠くで見守りながら支援して下さった両親にも心深く感謝の気持ちをお伝えしたいと思います。

2012年8月15日