

平成21年度 修士論文

ポリマー及び液晶材料を用いた光機能性デバイスの設計と  
作製に関する研究

指導教員 花泉 修 教授

群馬大学大学院工学研究科  
電気電子工学専攻

町田 裕貴

平成二十一年度

修士学位論文

ポリマー及び液晶材料を用いた光機能性デバイスの設計と作製に関する研究

町田 裕貴

背表紙は縦書き横書きどちらでも可（サンプルは縦書き）  
冊子の厚さに応じて、適宜フォント（文字のサイズ）を変えること。

# 目次

第1章 緒言	1
1. 1 研究背景	1
1. 2 研究目的・概要	2
1. 2. 1 ポリマー材料を用いた光スイッチの設計と作製に関する研究	2
1. 2. 2 PBW 法による導波路の作製に関する研究	2
1. 2. 3 液晶と多層膜を用いた光デバイスの設計と作製に関する研究	3
1. 2. 4 液晶導波路の設計と作製に関する研究	4
1. 3 本論文の構成	5
第2章 ポリマー材料を用いた光スイッチの設計と作製に関する研究	6
2. 1 はじめに	6
2. 1. 1 光スイッチ全体図	7
2. 1. 2 光スイッチ動作原理	7
2. 1. 3 導波路材料「グラシア」	8
2. 2 光スイッチの設計とシミュレーション	9
2. 2. 1 アンテナ結合型 Y 分岐	9
2. 2. 2 アンテナ結合型 Y 分岐の BPM 法による損失評価	11
2. 2. 3 曲がり導波路概要	12
2. 2. 4 曲がり導波路設計	15
2. 2. 5 Al 電極と Ti ヒータの設計	16
2. 3 試料の作製と評価	17
2. 3. 1 導波路の作製	17
2. 3. 2 Ti 蒸着	22
2. 3. 3 Ti エッチング	25
2. 3. 4 Al 蒸着・エッチング	27
2. 3. 5 スイッチング特性の評価	28
2. 3. 6 スイッチン動作に要する温度上昇	31
2. 4 まとめ	32

<b>第3章 PBW を利用した光導波路の設計と作製に関する研究</b> .....	<b>33</b>
3. 1 はじめに .....	33
3. 1. 1 PBW 装置について .....	34
3. 1. 2 プロトンビーム照射による PMMA への影響 .....	37
3. 2 PBW を利用した光導波路の設計と作製（プロトンビーム透過型） .....	38
3. 2. 1 作製する光導波路の構造 .....	38
3. 2. 2 PBW 照射条件 .....	39
3. 2. 3 導波路作製方法 .....	42
3. 2. 4 光学顕微鏡によるサンプルの表面観察 .....	43
3. 2. 5 近視野像観測結果 .....	45
3. 2. 6 損失評価 .....	48
3. 2. 7 考察 .....	49
3. 3 PBW を利用した光導波路の設計と作製（埋め込み型） .....	50
3. 3. 1 作製する光導波路の構造 .....	50
3. 3. 2 PBW 照射条件 .....	51
3. 3. 3 導波路作製方法 .....	52
3. 3. 4 導波路評価結果と考察 .....	52
3. 4 まとめと今後の展開 .....	60
<b>第4章 液晶と多層膜を用いた光デバイスの設計と作製</b> .....	<b>61</b>
4. 1 はじめに .....	61
4. 1. 1 液晶について .....	61
4. 1. 2 液晶の光学的性質 .....	62
4. 1. 3 液晶の光熱効果 .....	63
4. 1. 4 Ta <sub>2</sub> O <sub>5</sub> /SiO <sub>2</sub> 多層膜について .....	64
4. 1. 5 ファブリーペロー共振器 .....	64
4. 1. 6 液晶の配向方向の計算方法 .....	65
4. 1. 7 多層膜の光学特性の計算方法 .....	70
4. 2 Ta <sub>2</sub> O <sub>5</sub> /SiO <sub>2</sub> 多層膜の設計と作製 .....	76
4. 2. 1 多層膜の設計原理 .....	76

4. 2. 2	多層膜の設計シミュレーション	77
4. 2. 3	多層膜作製条件	78
4. 2. 4	多層膜の光学特性の評価	80
4. 3	液晶と Ta <sub>2</sub> O <sub>5</sub> /SiO <sub>2</sub> 多層膜を用いた波長可変フィルタの設計と作製	81
4. 3. 1	液晶波長可変フィルタの設計とシミュレーション	81
4. 3. 2	液晶波長可変フィルタの構造及び作製工程	81
4. 3. 3	液晶波長可変フィルタの光学特性の評価方法	85
4. 3. 4	液晶波長可変フィルタの光学特性評価結果	86
4. 3. 5	シミュレーションと結果の比較	87
4. 4	液晶の光熱効果を用いた波長可変フィルタ	90
4. 4. 1	光熱効果を用いた波長可変フィルタ評価方法	90
4. 4. 2	評価結果	91
4. 5	液晶導波路の試作	92
4. 5. 1	液晶導波路について	92
4. 5. 2	液晶導波路作製方法	95
4. 5. 3	液晶導波路屈折角測定方法	95
4. 5. 4	液晶導波路評価結果	96
4. 6	まとめ	98
<b>第5章 結言</b>		<b>100</b>
	謝辞	102
	参考文献	103
	付録 A BPM 法によるシミュレーション結果	105
	付録 B 結合効率の導出	110
	付録 C 近視野像測定における問題	112
	付録 D へき開	114
	付録 E MFD(Mode Field Diameter)の算出	115
	付録 F 屈折率算出方法	118

# 第1章 緒言

## 1. 3 研究背景

近年の情報化社会の発展は著しいものであり、家庭でも高精細な動画のような大容量コンテンツの通信が行われるようになった。このような通信トラヒックの増加に伴い1994年以來ブロードバンド通信において家庭への光ファイバ通信システム導入(FTTH: Fiber To The Home)が進められ、今では光通信は我々の身近なものとなっている。大容量通信を可能にする技術として例えば高密度波長分割多重通信(DWDM: Dense Wavelength-Division Multiplexing)のような技術が導入され、通信トラヒックは2008年11月時点で988.4Gbpsにまでのぼる[1]。

光通信が発展するとともに携帯電話のように身近なデジタル関連機器においても大容量の情報のやり取りが欠かせないものとなってきた。従来、このような情報量の増大に対しては、スケーリング則に則るようにLSIなどの半導体デバイスを小型化することで対応してきたが、プリント基板上における電気配線の帯域限界、クロストーク、チャンネル数の増大など、電気回路に頼るやり方では問題も多い[2]。

このようなデジタル関連機器においても問題を解決する手段はやはり光通信である。光を通信手段として利用することで、発熱、ノイズ、クロストークの問題が解消されるため、今後いっそう増えるであろう通信トラヒックにも対応できると考えられる。

以上のような背景から光通信には欠かせない、光導波路、発光素子、ルータといった各光デバイスの低コスト、高性能化が今後は必要となると考えられる。そこで本研究では光スイッチ、導波路、波長可変フィルタの作製を試みる。

光スイッチでは既存の石英を利用するものに変わり、ポリマーを利用した光スイッチの試作を試みる。感光性のポリマーを使用することで石英系に比べ、製造コストを抑えることができ、さらに熱光学効果が石英に比べて大きいため、低消費電力、また、スイッチの小型化が見込める。

また、近年新たな微細加工技術としてPBW(Proton Beam Writing)技術が注目を浴びている。これはPMMAやSU8といった高分子材料にプロトンビームを照射し、照射部の材料改質を利用して微細加工を行うものだが、PMMAにプロトンビームを照射した際に起こる屈折率上昇効果を利用することでマスクレスで導波路形成が可能となる。いずれ光スイッチの導波路作製にこの技術を用いることを目標に、まずは光通信において用いられる $1.55\mu\text{m}$ 帯の波長域でシングルモードとなる直線導波路の作製を試みた。

DWDMにおいては、複数の波長から必要な波長のみをとりだすフィルタが必要となるが、石英と五酸化タンタルとからなる多層膜の性質と、液晶の配向制御による屈折率変化を利用することで必要な波長をとりだすだけでなく、その波長が電界制御可能な可変型の波長フィルタを作製することができる。そこで、本研究では波長可変フィルタを

作製し、さらに素子への光照射による光熱効果を利用し、波長可変フィルタの光制御についても検討を行う。

人工的な複合材料や物質（メタマテリアル）において負の屈折が観測されたという報告があるが、近年では  $\text{YVO}_4$  による複屈折材料において負の屈折が生じるという報告がなされ、さらに液晶においてもその効果が観測されたという報告がある[3]。本研究では液晶を扱った光デバイス作製を試みているが、この負の屈折を利用することで光の伝搬方向を大きく変えるような素子の作製が可能と考えられるため、負の屈折を利用した液晶導波路について作製、評価を行うこととした。

## 1. 2 研究の目的・概要

### 1. 2. 1 ポリマー材料を用いた光スイッチの設計と作製に関する研究

本研究ではポリマー材料として日本ペイント社の感光性ポリシラン「グラシア」を使用し、光通信で使用される  $1.55\mu\text{m}$  波長帯を想定した光スイッチを作製する。特に、今回は MZ 型のシングルモード導波路を形成し、熱光学効果 (Thermal Optical effect) を利用した光スイッチの作製を試みる。ポリマーは石英系の材料に比べ熱光学効果が大きいいため、消費電力を抑えることができると考えられる。さらに導波路の分岐部分にアンテナ結合型 Y 分岐構造をとり入れることで、素子の小型化を見込むことができる。

NTT 技術ジャーナル[4]を参考にすると、平面型の光スイッチ素子当たりの電力は通常  $100\text{mW}$ 、研究レベルでは  $30\text{mW}$  となっている。また、文献[5]から「DWDM 実システムへの適用には、同一波長の信号光をスイッチングする場合には  $30\text{dB}$  以上の消光比が必要」という記述より、本研究では  $30\text{mW}$  以下の消費電力で  $30\text{dB}$  以上の消光比を実現する光スイッチの作製を試みる。

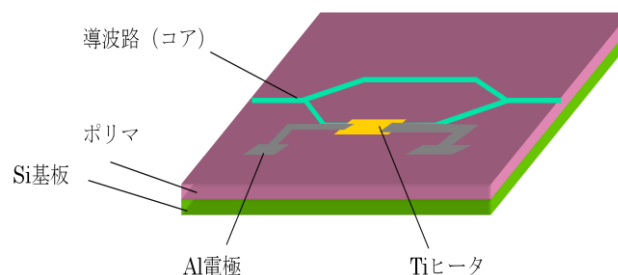


図 1-1 ポリマーを利用した光スイッチ概略図

### 1. 2. 2 PBW 法による導波路の作製に関する研究

PBW (Proton Beam Writing) とは、1997 年ごろより国立シンガポール大学イオンビーム応用センターで開発された、プロトンビームを利用した次世代型微細加工技術であり、現在ではナノインプリント、あるいはマイクロフレイディクスといった応用面で盛んに研究がおこなわれている。

一方、高い透過率から導波路材料としてもよく利用される PMMA(Poly methyl methacrylate)にプロトンビームを照射すると、分解反応などによりビーム照射部の屈折率を上げることができる。この性質、また PBW の特長を活かすことでマスクレスで複雑な導波路構造の作製も可能になると考えられる。

そこで、本研究では日本原子力研究開発機構と芝浦工業大学との共同研究で、PBW 技術を利用した波長  $1.55 \mu\text{m}$  においてシングルモード導波路となる直線導波路の試作を行う。なお、日本原子力研究開発機構と芝浦工業大学ではプロトンビームの照射エネルギーが異なるため、異なる構造で導波路作製を目指す。

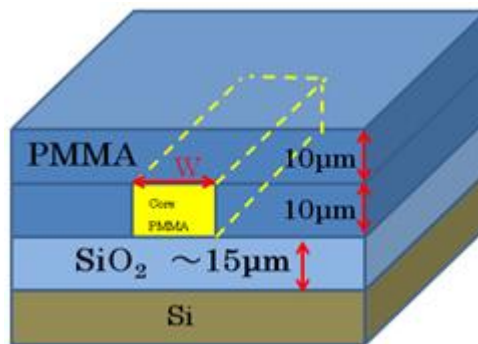


図 1-2 PBW を用いた導波路構造 (日本原子力研究開発機構)

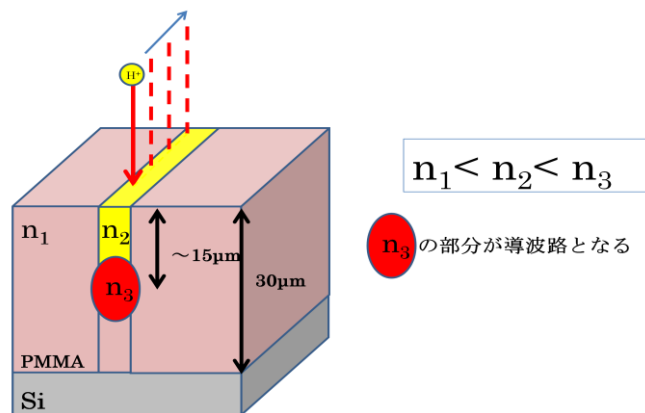


図 1-3 PBW を用いた導波路構造 (芝浦工業大学)

### 1. 2. 3 液晶と多層膜を用いた光デバイスの設計と作製に関する研究

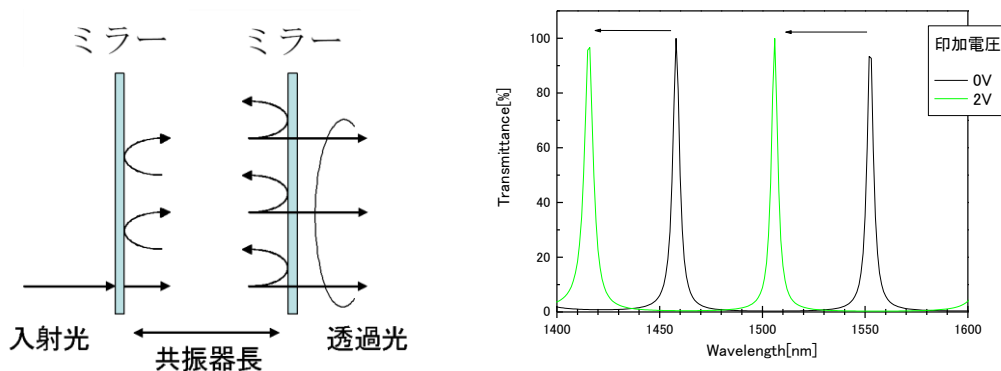
液晶は現在、表示デバイスの材料として活躍しており、腕時計、テレビ、自動車の電子表示部等に利用されている。液晶を利用したデバイスが利用される背景の一つとして低電圧、低消費電力動作が可能なが挙げられるが、これらの特長を光通信デバイス作製に活かすことも可能である。

まず、石英と、高屈折率かつ低損失材料である五酸化タンタルとからなる多層膜を作製し、光通信において使用される波長  $1.55 \mu\text{m}$  帯において光の伝搬しない波長域 (ス



トップバンド)を持つ素子とする。これを $5\mu\text{m}$ のギャップで貼り合わせ、ファブリーペロー共振器のミラーとして利用することで、ある波長のみを透過する素子の作製が可能となる。ギャップに液晶を注入し、電界制御によって液晶分子の配向方向を変えることで、液晶の屈折率を制御し、ピーク波長のシフトを実現する。以上のような仕組みで、波長可変フィルタが完成となる。

波長可変フィルタは電界制御型が一般的だが、液晶の光熱効果を利用することで、電界制御ではなく、光照射によって波長可変フィルタを機能させることも可能であると考えられる。そのため、本研究では作製した波長可変フィルタに対し、入射光強度を変化させることによる光制御を試みた。



(a)ファブリーペロー共振器の概略図

(b)波長可変フィルタ特性

図 1.4 ファブリーペロー共振器と液晶セルの概略図

#### 1. 2. 4 液晶導波路の設計と作製に関する研究

液晶の複屈折を利用した新たな現象として、等方性媒質と一軸異方性のネマチック液晶の界面において負の屈折が観測されるという報告例がある[3]。負の屈折は液晶へ電界をかけることで通常の屈折に変えることも可能であり、これを利用することで光の伝搬方向を大きく変え得る光デバイスを作製することが可能になると考えられる。特に、このデバイス作製方法は波長可変フィルタの作製工程とほぼ同様の手順で可能であることから、本研究では波長可変フィルタ作製技術を活かして、光の伝搬方向を大きく変え得る液晶導波路の作製を試みる。

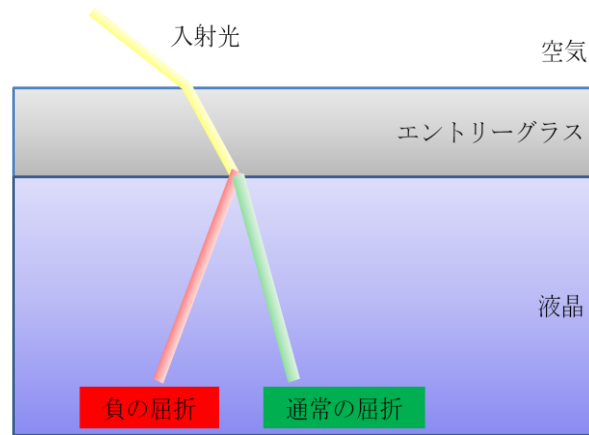


図 1.5 負の屈折概要  
(負の屈折では入射側に光が曲がる)

### 1. 3 本論文の構成

第1章は緒言である。

第2章はポリマー材料を用いた光スイッチの設計と作製に関する研究について述べる。

第3章はPBWを利用した光導波路の設計と作製に関する研究について述べる。

第4章は液晶と多層膜を用いた光デバイスの設計と作製に関する研究について述べる。

第5章は結言である。

## 第2章 ポリマー材料を用いた光スイッチの設計と作製に関する研究

### 2.1 はじめに

情報化社会の発展に伴い、通信網だけでなく身近なデジタル機器においても光を利用する光インターコネクタ技術が注目を浴びている。光インターコネクタは距離が長い基板間の伝送（ボード間）から導入され、その後ボード内、続いて半導体の中（チップ内）へ導入されるといわれている[2]。

光通信に使用する材料として石英系の導波路作製方法についてはすでに確立されているが、この場合火炎堆積法と呼ばれる 1000℃以上の高温過程を経なければならず、より安価な製造過程が必要となっている[2]。一方でポリマー材料は石英に比べ低温過程（本研究では最高 370℃）で導波路作製が可能のため、その安価な作製工程から将来の光インターコネクタ技術において使用される材料として注目されている。

実際に光通信を行う場合導波路だけでは通信は不可能であり、発光・受光素子、コネクタ、スイッチなど多くの素子や部品が必要となる。本研究ではそのなかで信号の割り振りを担う光スイッチに着目する。

光スイッチにも多くの種類があり、ミラーの反射を利用する MEMS 式、ファイバ自体を動かし光の伝送を ON,OFF する機械式などがあるが、本研究では光スイッチの小型化、量産化に適した、平面基板上で動作可能な熱光学効果を利用する TO (Thermal Optical effect)型光スイッチを作製する。具体的にはポリマー材料として日本ペイント株式会社の感光性ポリシラン「グラシア」を用いてフォトブリーチング法で MZ (Mach Zehnder)型光導波路を作製し、熱光学効果型の光スイッチを試作する。特に、本研究では、導波路の分岐部において、曲がり導波路を採用し、かつアンテナ結合型と呼ばれる、伝搬光を一度クラッド部に放射させ、その後もう一度導波路に結合させるという構造を分岐部において採用することで素子の小型化を図る。

## 2. 1. 1 光スイッチ全体図

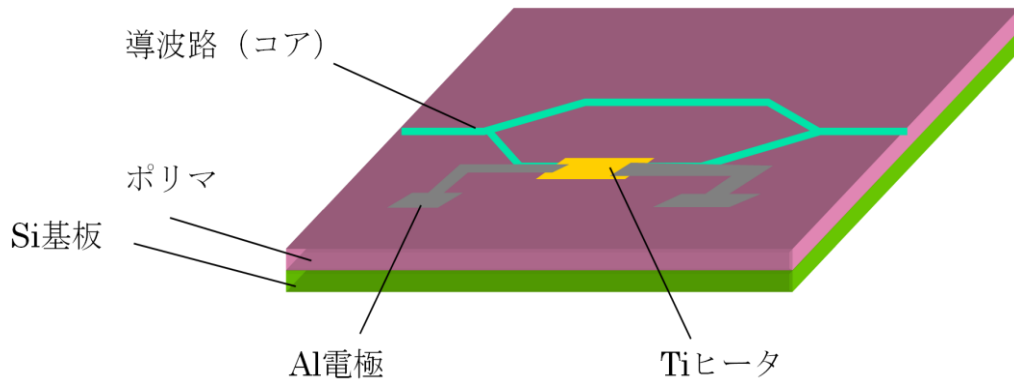


図 2-1.1 光スイッチ概略図

本研究で作製する光スイッチ全体図を図 2-1.1 に示す。導波路はマッハツェンダー (MZ) 型導波路となっており、導波路が一度分岐し二手に分かれた後、再び合流する構造となっている。基板として Si を使用し、その上に導波路材料であるポリマーが成膜されている。また、導波路上部にはコアに沿ってチタン (Ti) ヒータ及びアルミニウム (Al) 電極が積載されている。

## 2. 1. 2 光スイッチ動作原理

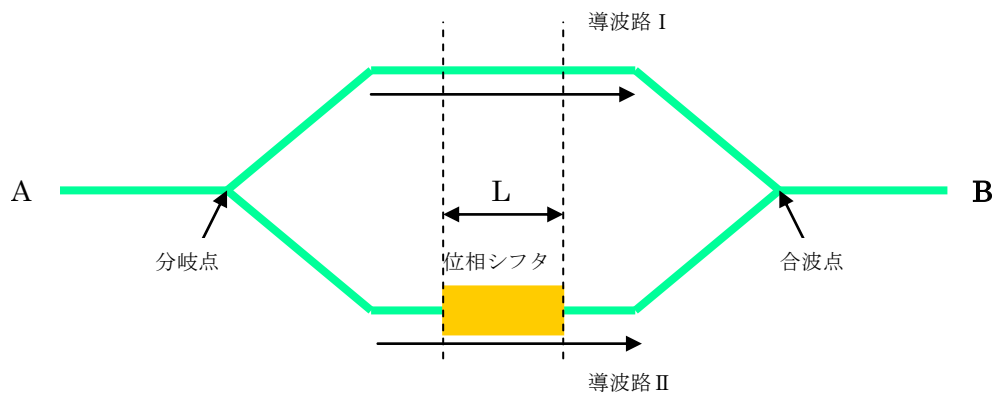


図 2-1.2 MZ 型光スイッチの原理説明図

導波路材料の温度を変えると、熱光学効果により屈折率が変わるだけでなく、熱膨張によって、光路長が変化する。図 2-1.2 において A 側から入射した光は分岐点で等分され、それぞれ導波路 I、導波路 II を進む。導波路 I、II は寸法、屈折率分布は全く等し

く、異なるのは導波路Ⅱに位相シフタが設けられていることである。導波路Ⅱの位相シフタに電流を流しても導波路Ⅰの温度が変化しないように導波路Ⅰ、Ⅱの間隔を  $310\mu\text{m}$  としている。二つの導波路を通った光は合波点で結合するが、結合直前の位相差は図 2-1.2 で波線をつけた部分で生じたものである。位相差が半波長の奇数倍のとき導波路Ⅰ、Ⅱを通る光は結合導波路において奇モードが励振され、その後導波路間隔が零になると 1 次モードの光となる。さらに光が進んで単一モード導波路へとなる過程で 1 次モードの光はシングルモード導波路を伝搬できなくなるため、放射され、結局 B に光は現れない。位相差が波長の整数倍のときは、偶モードが励振され、その後 0 次モード（基本モード）の光となり、入射光と同じ強度の光が B で観測される。このような原理で光を透過させる場合とさせない場合のスイッチングが可能となる。

### 2. 1. 3 導波路材料「グラシア」

導波路材料にポリマーを用いることは既に述べたが、本研究では日本ペイント社の「グラシア」というフォトリソ効果を持った材料を用いる。この材料は従来のフッ化ポリイミドのようにドライエッチングをすることなしに、スピコート、露光（紫外線を当ててその部分の屈折率を変える）、焼成というプロセスだけで導波路を作製できる。図 2-1.3 に石英系の光導波路とポリマー光導波路の作製工程を比較したものを示す。なお、緑は基板、黄色は導波路を表し、黄色の色が濃いほど屈折率が高いことを示す。

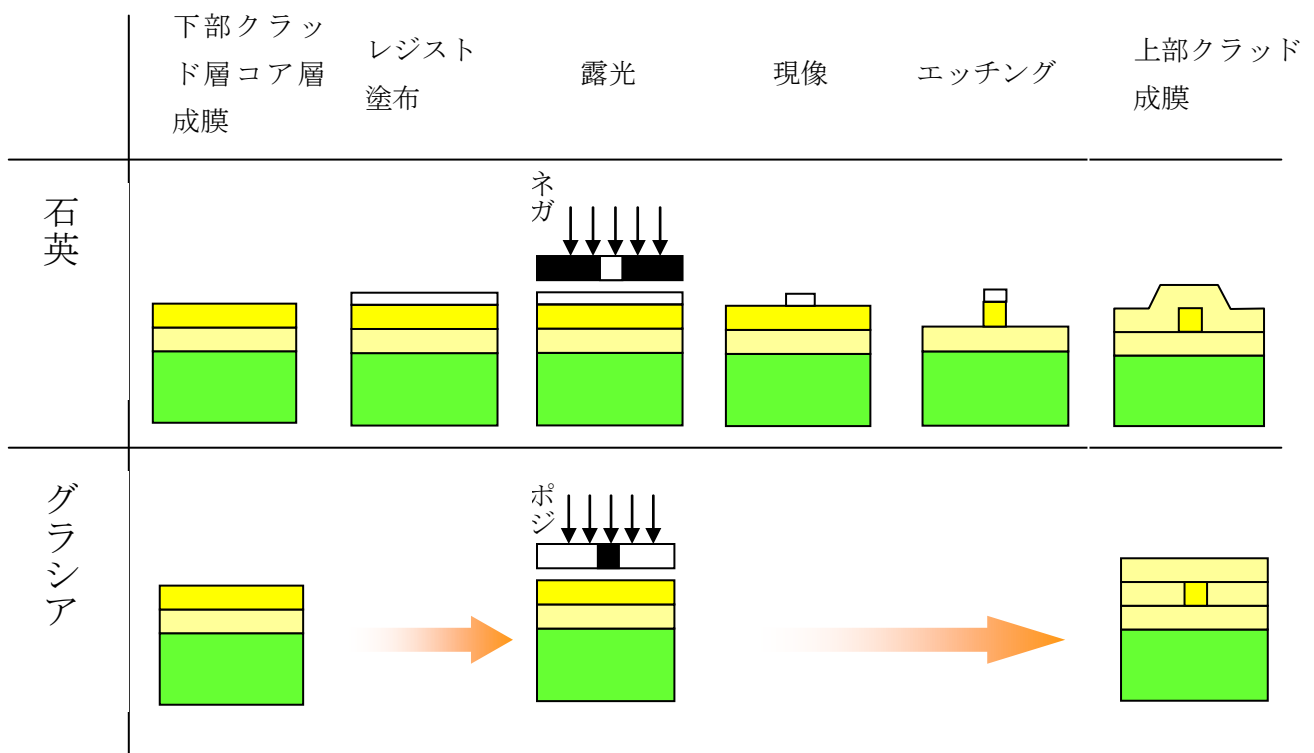


図 2-1.3 導波路の作製プロセス

石英を使った場合、レジスト塗布、露光、現像、エッチングを通して導波路完成となる。一方、ガラスは露光により屈折率を下げる特性を持っているため、露光だけで導波路を作製することが可能である。

## 2. 2 光スイッチの設計とシミュレーション

本研究では、導波路構造に二種類の特長がある。具体的には

- ①アンテナ結合型 Y 分岐を用いていること
- ②曲がり導波路を用いていること

である。以下、この原理と設計について、シミュレーションを踏まえ説明する。

### 2. 2. 1 アンテナ結合型 Y 分岐

分岐部における放射損失が MZ 型導波路作製においては問題となる。コアとクラッドの屈折率差を大きくすることで分岐部における放射損失を比較的小さくできるが、導波光とファイバ光のスポットサイズを合わせる必要性などから単純に屈折率差を設けて損失低減を図るわけにはいかない。また、光スイッチの応用を考えた際に素子の小型化の必要性から分岐角は大きいほうがよい。だが、分岐部分における光の損失というものは、分岐角度が大きくなるにつれ増大する（図 2-2.1 参照）。

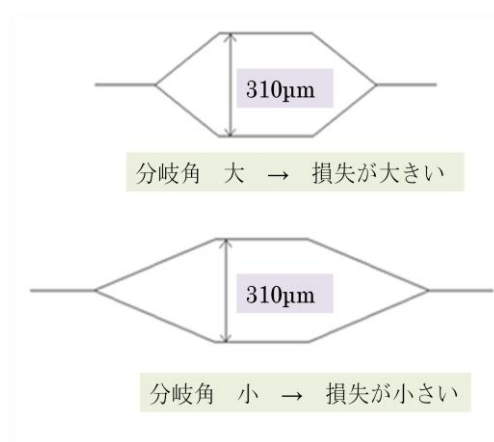


図 2-2.1 分岐角と損失説明図

このような問題に対し、分岐部を工夫することで単に従来型の Y 字型の分岐部を作製するよりも低損失で分岐角を大きくすることができる[6]。この工夫がアンテナ結合型 Y 分岐である。比較のため、図 2-2.2 に従来型 Y 分岐の概略図と光学顕微鏡を使用して観察した実際のフォトマスクの像を、図 2-2.3 にアンテナ結合型 Y 分岐の概略図、フォトマスクの像を示す。

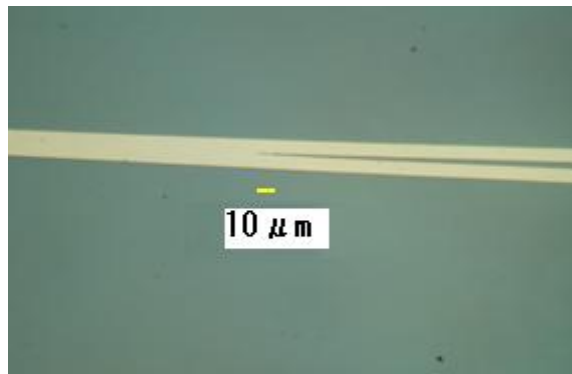
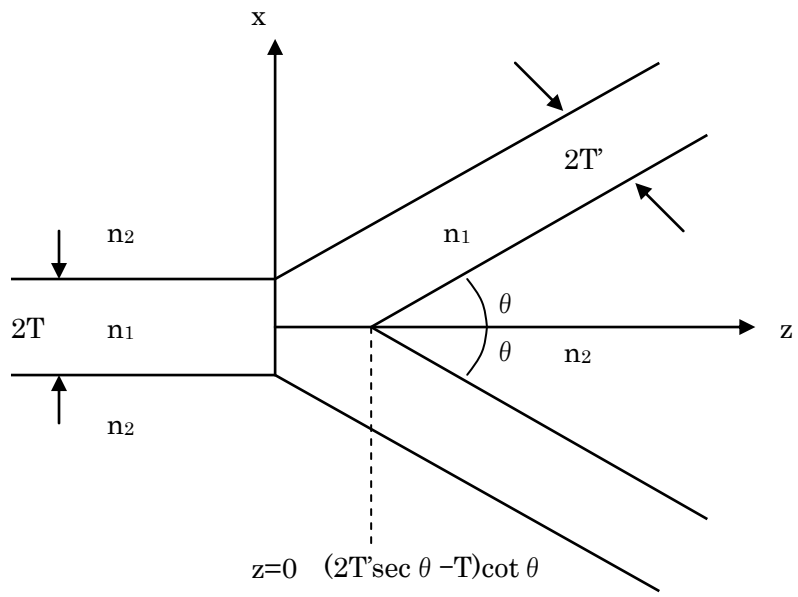


图 2-2.2 従来型 Y 分岐構造

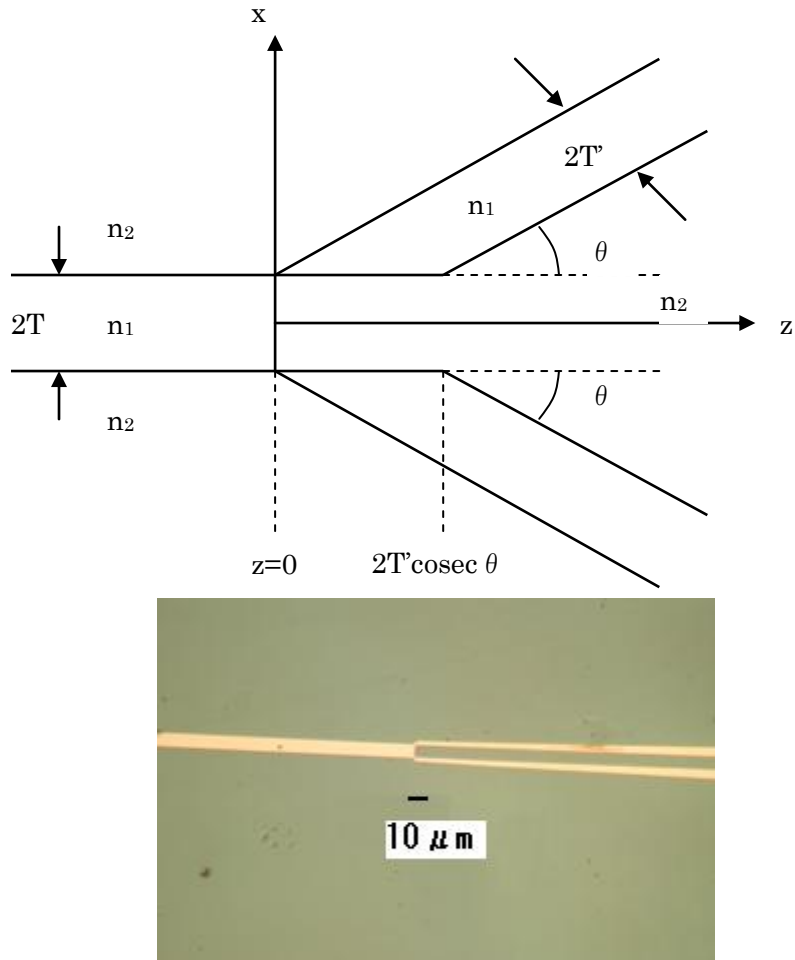


図 2-2.3 アンテナ結合型 Y 分岐構造

このように、アンテナ結合型 Y 分岐では分岐部において導波路が途切れており、光はクラッド部へと放射される。その際、導波路とクラッドの境界においてスネルの法則を満たすように光はその伝搬方向を変えるが、クラッド部の屈折率は導波路の屈折率に比べ低いため、その伝搬方向は導波路の光軸に対して高角度となる。そのため、放射光の伝搬方向を分岐後の導波路の伝搬方向と整合させることが可能となり、損失低減が可能となる。

次に、過去に行われた両導波路の伝搬損失についてのシミュレーション結果を載せる。

## 2. 2. 2 アンテナ結合型 Y 分岐の BPM 法による損失評価

BPM(Beam Propagation Method)によって得られる正規化された界  $E(x,z)$  に対し、 $x = 0$  に関して対称であるような  $TE_0$  モードの正規化された固有関数  $\phi_0$  の 2 つの導波路への電力透過率  $\eta'$  は、



$$\eta' = 2 \left| \int_0^{\infty} E(x, z) \phi_0(x - x_c) \exp(jk_0 n_2 \sin \theta x) dx \right|^2 \quad (2-1)$$

となる。ここに、 $x_c$ は分岐後の導波路の中心の座標であり、 $\exp(jk_0 n_2 \sin \theta x)$ は  $E(x, z)$  と  $\phi_0(x - x_c)$ の位相面の傾きを補正する項である。 $\eta'$ は積分が  $z$ に依存しなくなった所で評価し、 $-10 \log \eta'$ で分岐損失を定義する。シミュレーション結果から、分岐損失を計算した[7]。

図 2-2.4 は分岐損失と分岐角の関係である。図 2-2.4 から従来型 Y 分岐の分岐角度  $2\theta$  が小さくなる（ゼロに近づく）ほど損失も小さくなっているのに対して、アンテナ結合型 Y 分岐では分岐角度が  $2\theta = 3^\circ$  の時一番損失が小さく、分岐角度が  $2\theta = 3^\circ$  より小さくなる（ゼロに近づく）と再び損失が増加していることがわかる。

従来型 Y 分岐の分岐角度  $2\theta = 1^\circ$  のときの損失と、アンテナ結合型 Y 分岐の分岐角  $2\theta = 3^\circ$  の時の損失がほぼ等しいことから、低損失で分岐角を大きくでき、結果的に導波路のサイズを小さくできる。この結果より、導波路作製において分岐角度  $2\theta = 3^\circ$  のアンテナ結合型 Y 分岐を用いることとする。

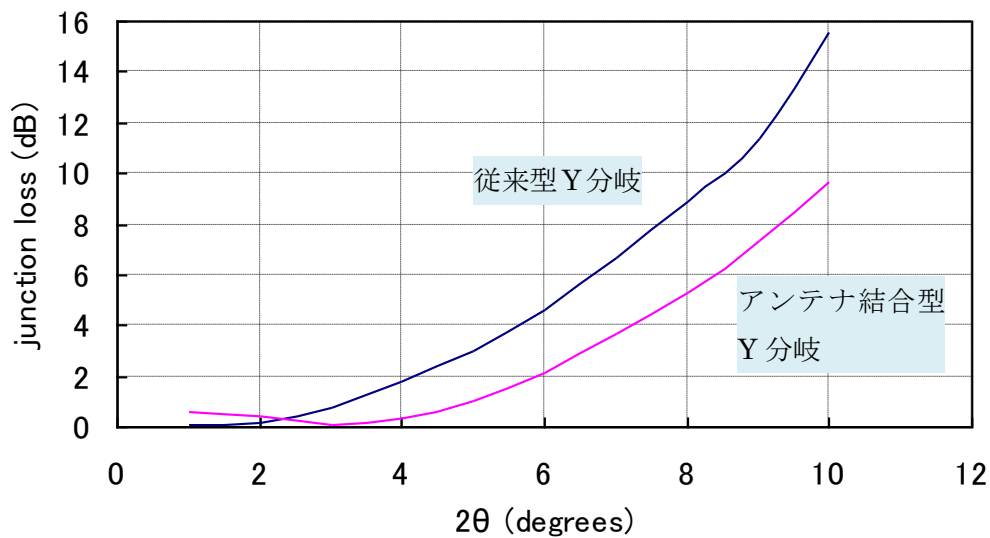


図 2-2.4 導波路のコア幅  $2T = 10 \mu m$  の場合の分岐角度  $2\theta$  と分岐損失の関係[7]

### 2. 2. 3 曲がり導波路概要

2. 2. 2 節では全て直線で構成された導波路についてその損失について述べたが、図 2-2.5 のように分岐後一移送シフタ間の導波路に曲率半径を指定した曲がり導波路構造を取り入れる事で、移送シフタとの交点（図中③）における損失を少なくすることができる。

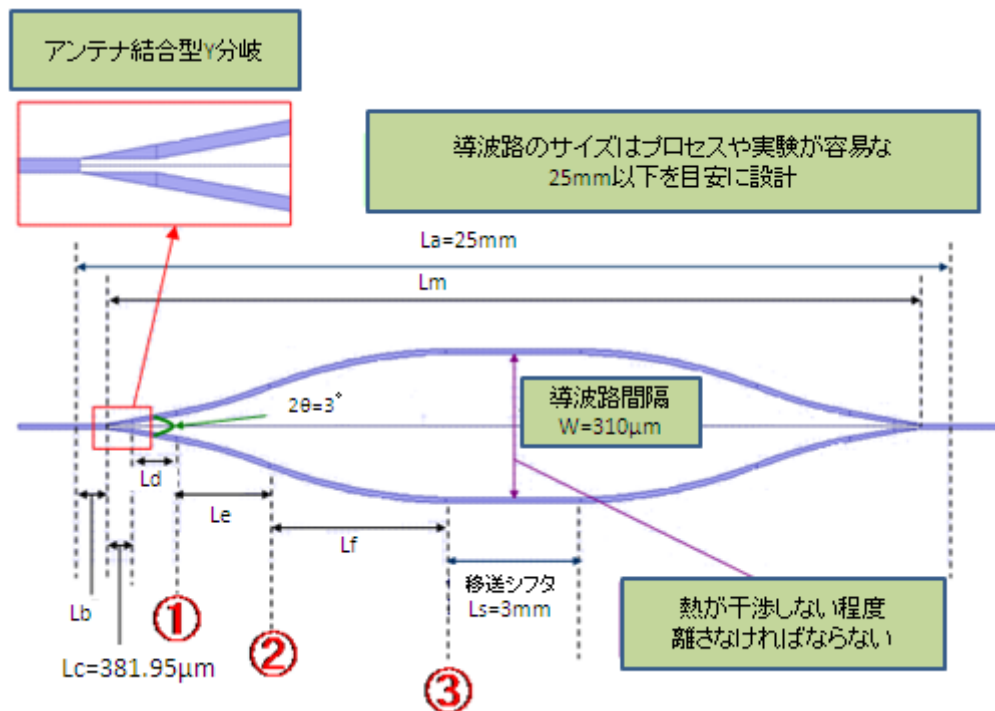


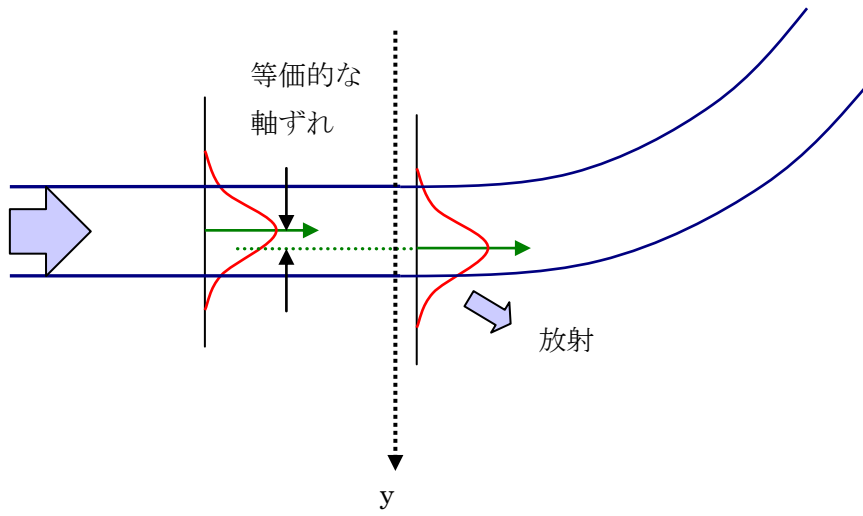
図 2-2.5 曲がり導波路で構成された MZ 型導波路のレイアウト図

ここで、 $L_d$  は直線、 $L_e$ 、 $L_f$  は同じ曲率半径の曲線となっている。

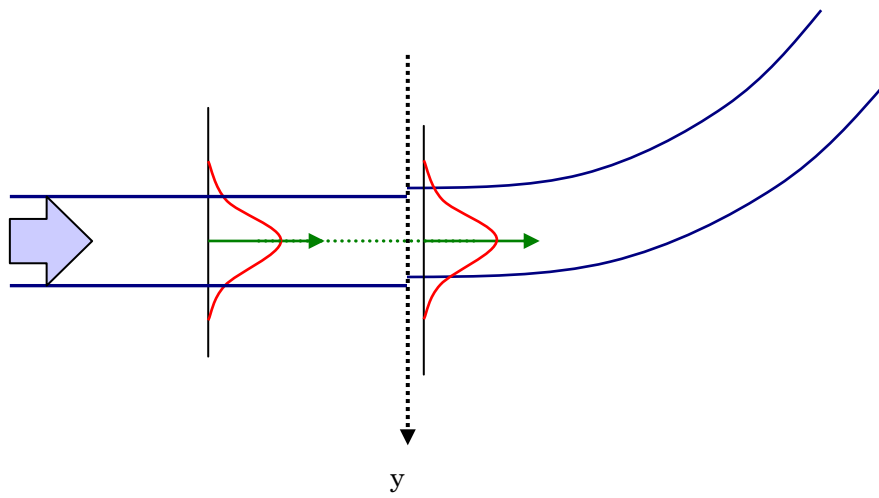
曲がり導波路設計の際に気をつけなければならないのは図 2-2.5 中の①、②、③の導波路接続部における電磁界分布の整合である。一般に、光の伝搬には電磁界分布の変形が大きな影響を及ぼす。電磁界分布は図 2-2.6 のように屈折率分布が  $y$  軸に沿って傾くと、全体が屈折率の大きいほうに引き寄せられるように  $y$  の正方向にずれる。したがって、直線導波路から曲がり導波路に光が入射すると、図 2-2.6 (a) に示すようにモード電磁界分布の中心が一致しないので損失が起きる。これを低減するには、図 2-2.6 (b) のように電磁界分布の中心が一致するように導波路の中心軸をずらして設計する必要がある。曲率が逆向きの導波路同士を接続する場合も、同様の工夫が必要である。

曲がり導波路の軸ずれは BPM でシミュレーションすることで求められる。シミュレーションにより曲がり導波路に入射した光の界分布がグラフ化されるので、その界分布の中心が導波路の中心座標からどれくらいずれているかをグラフから読み取るというものである。曲率が逆の曲がり導波路同士を接続する場合は、前述の軸ずれの値を 2 倍にした値を軸ずれの値としている。シミュレーションの詳細については過去に当研究室にて福田俊介氏が行ったものを付録 A にて載せる。このシミュレーションの曲率は実際にフォトマスクの設計値として採用されているものである。

以下、軸ずれの値のことをオフセット値と呼ぶことにする。



(a) 導波路の中心を合わせた場合



(b) 界分布の中心を合わせた場合

図 2-2.6 直線導波路から曲がり導波路への接続部の電磁界分布[7]

## 2. 2. 4 曲がり導波路設計

曲がり導波路の設計のために、図 2-2.5 における  $L_m$  (分岐点から分岐点までの長さ) が計算されている[7]。これを表 2-2.1 に示す。

表 2-2.1 分岐点から対称な分岐点までの長さ (図 2-2.5 の  $L_m$  部) [7]

MZ 型導波路	分岐角度 $2\theta$ [°]	曲率半径 (cm)	$L_a$ [mm]	$L_b(=L_c)$ [mm]	$L_m$ の長さ (mm)
アンテナ結合型 Y 分岐	$3^\circ$	7	14.67	54.53	14.67
		12	17.30	67.70	17.30
		17	19.17	77.03	19.19
		20	20.07	81.55	20.07
従来型 Y 分岐	$1^\circ$	17			22.04

ここで、以下の点を考慮し設計値は決められている。

- MZ 型導波路はプロセスや実験が容易な 25mm 以下を目安としている。
- 分岐角度は図 2-2.4 の分岐角—損失のグラフから、全て  $3^\circ$  としている。
- 位相シフタ部の導波路長は  $L_s=3\text{mm}$  とする
- 位相シフタ部の導波路間隔は熱の影響がない  $W=310\mu\text{m}$  としている。
- 曲率半径は、従来型の Y 分岐導波路のサイズとほぼ一緒となる  $R=7\text{cm}$  を最小値とし、少しでも低損失にするために、5cm おきに大きくした  $R=12\text{cm}$ 、 $R=17\text{cm}$  の MZ 型導波路、図 2-2.5 の曲がり導波路部  $L_e$  を省いた曲率半径  $R=20\text{cm}$  となっている。

表 2-2.2 に BPM 法を用いて得られたそれぞれのオフセット値、損失を示す。作製上限界に近いサイズの導波路として従来型 Y 分岐で分岐角度  $2\theta=1^\circ$ 、曲率半径  $R=17\text{cm}$  の MZ 型導波路についても示す。

表 2-2.2 設計した MZ 型導波路 (1) ~ (7) のそれぞれの全体の損失 [7]

MZ 型導波路		分岐角度 $2\theta$	曲率半径 (cm)	オフセット ( $\mu\text{m}$ )	損失 (dB)
(1)	従来型 Y 分岐	$3^\circ$	0	0	4.593
(7)		$1^\circ$	17	0.15	0.1542
(2)	アンテナ結合型 Y 分岐	$3^\circ$	0	0	3.397
(3)			7	0.4	0.2041
(4)			12	0.22	0.1941
(5)			17	0.15	0.175
(6)			20	0.1	0.1561

応用を考えた際、損失の目安として 1dB 以下となることが望ましい。表 2-2.2 から、アンテナ結合型 Y 分岐を用いた曲がり導波路を採用することで、 $3^\circ$  という広い分岐角で曲率半径を 7cm としても、その損失は 1dB 以下となることが分かった。よって、表 2-2.2 における (3)~(7) の導波路と、Ti ヒータ、Al 電極のパターンをフォトマスクにのせることにした。なお、フォトマスクの作製は業者に委託している。

## 2. 2. 5 Al 電極と Ti ヒータの設計

チタン (Ti) ヒータ及びアルミニウム (Al) 電極の寸法は、文献[7]を参考にして決めた。ヒータ、電極 (含むパッド) 材料の Ti 及び Al はいずれも抵抗加熱式の真空蒸着で蒸着させる。

位相シフタの形状を図 2-2.7 に示す。Ti ヒータの幅はエッチングの段階におけるサイドエッジを考慮し、 $1\mu\text{m}$  余分にとって、 $11\mu\text{m}$  としている。厚さ  $0.1\mu\text{m}$ 、長さ 2.5mm でコア直上にできるように位置を合わせた。Al 電極も同様に幅  $11\mu\text{m}$ 、厚さ  $0.3\mu\text{m}$  である。取り回しは図 2-2.7 に示すよう、ヒータとの接続部からコアの直上に  $500\mu\text{m}$  沿わせた後、コアと直角に曲げ、コアから  $100\mu\text{m}$  離れた後ボンディング用のパッドを設けた。パッドは  $100\mu\text{m}$  角とし、厚さは電極と同じく  $0.3\mu\text{m}$  である。

コアの直上を  $500\mu\text{m}$  にわたり電極を引き回したのは、導波路加熱をヒータだけでなくヒータによって温まった電極も使うためである。これはヒータから電極に流れ出す熱の有効利用である[8]。

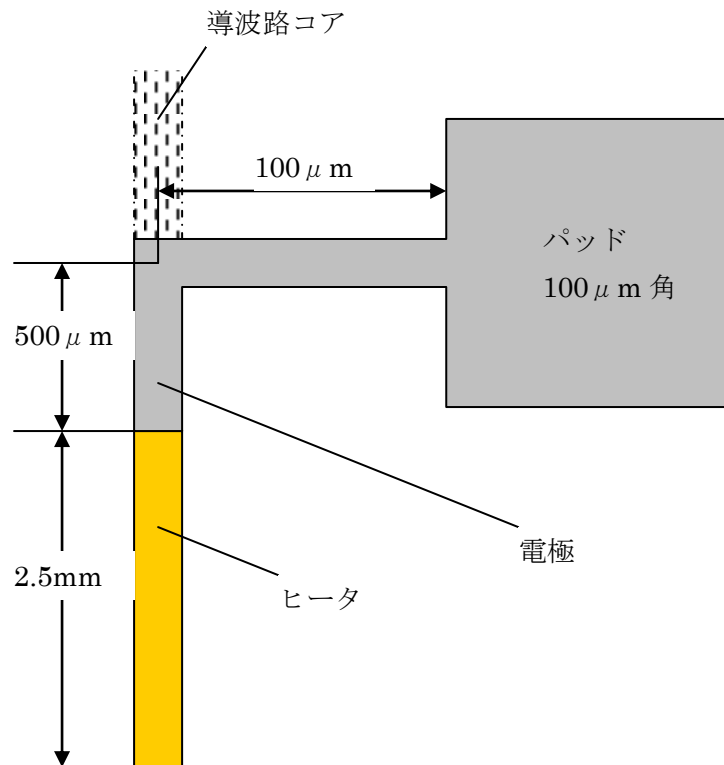


図 2-2.7 位相シフタ形状概略[7]

## 2. 3 試料の作製と評価

### 2. 3. 1 導波路の作製

導波路は次のような手順で作製される。

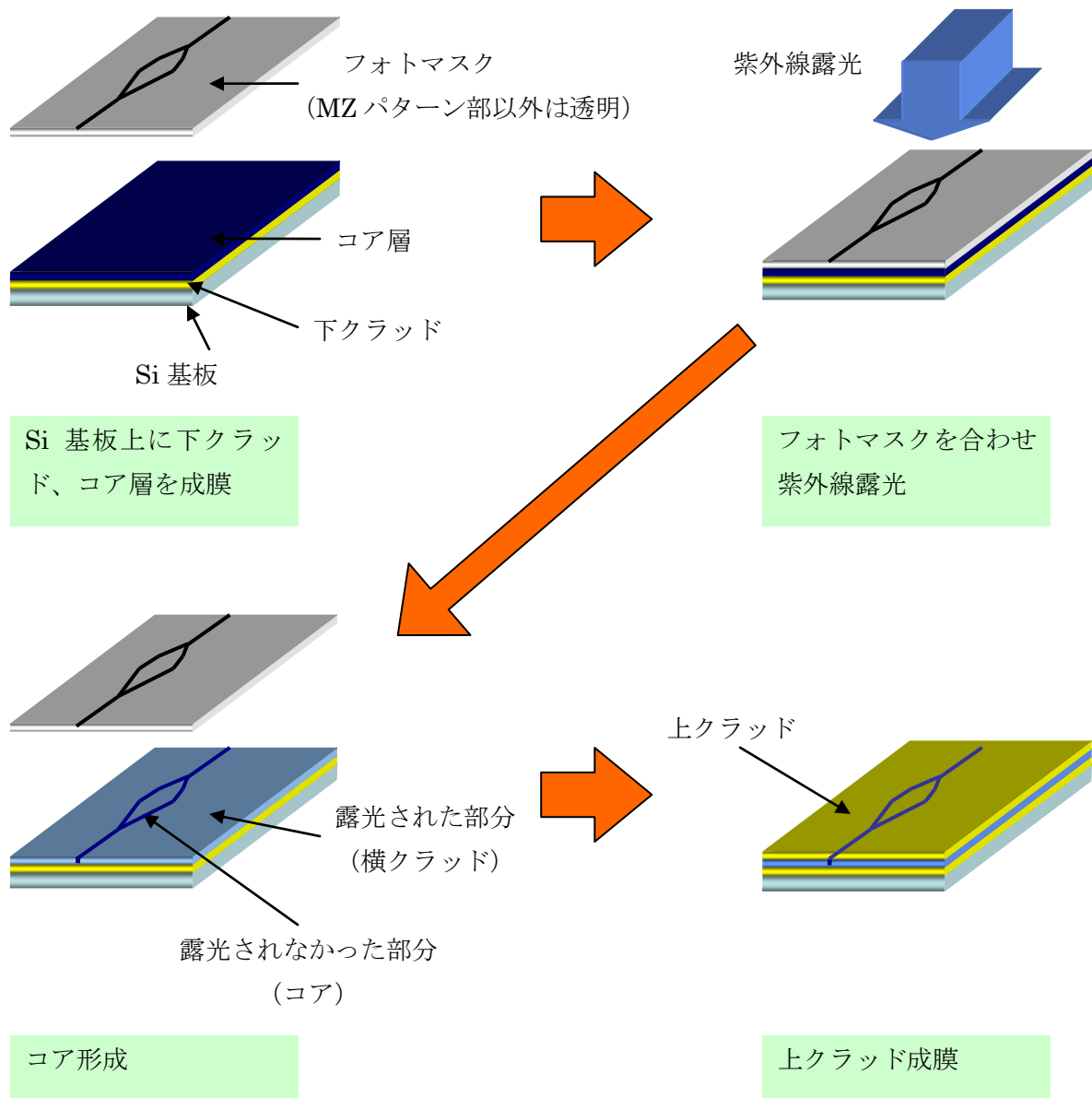
- ①. Si 基板をアセトン、エタノール、純水という順で超音波洗浄する。フッ酸処理はせず、酸化膜は付いたままにした。
  - ②. スピンコーターでグラシアを Si 基板上に貼り付ける。回転数 (rpm×秒) は 1st 800[rpm]×3[s]—2nd 1000×20—3rd 5000×2 とした。
  - ③. ホットプレートで加熱する (プリベーク)。
  - ④. 試料にフォトマスクを被せ紫外線露光を行う (紫外線が照射された部分の屈折率が低下する)。
  - ⑤. マッフル炉で試料を加熱する (ポストベーク)。導波路の下クラッドの完成。
  - ⑥. ②~⑤の手順を繰り返してコア、上クラッド層を作製し導波路の完成となる。
- 下クラッド、コア層、上クラッドの作製において、プリベーク、露光、ポストベーク時の作製条件を表 2-3.1 に示す。また、作製工程を図 2-3.1 に示す。

表 2-3.1 導波路作製条件

	プリベーク	露光	ポストベーク
下クラッド	140℃ 20分後 250℃ 30分	なし	140℃ 10分後 370℃ 45分
コア層	140℃ 20分後 250℃ 30分	6分	140℃ 10分後 350℃ 45分
上クラッド	140℃ 20分後 250℃ 30分	15分	140℃ 10分後 350℃ 45分

プリベークはホットプレートの温度が 140℃になってからサンプルを入れ、20 分ベークを行う。20 分後、サンプルを入れたままホットプレートのセット温度を変え、ベークする。つまり、250℃30分というベーク条件は上昇温度を含んだ時間となっている。

ポストベークも同様に、マッフル炉の温度が 140℃となったらサンプルを入れ、それ以降サンプルをとりだすことなく温度を上げるため、高温過程の 45 分という時間は上昇時間を含んだものとなっている。



※ 下クラッド、コア層、上クラッド、の導波路材料は「感光性ポリシラン“グラシア”」

図 2-3.1 導波路作製工程[7]



上記の条件で作製された導波路に対し、図 2-3.2 に示すような測定系で近視野像の測定を行い、評価を行った。

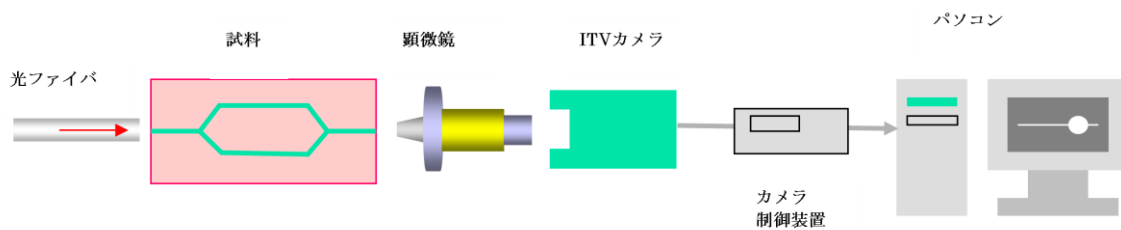


図 2-3.2 近視野像測定系

評価項目は次の三点である。

①MFD(Mode Field Diameter)の算出

まず、波長 1550nm のレーザ光を光ファイバに通し、光ファイバからの光を試料の入射端から入れ、出射端から出た光を顕微鏡を通して ITV カメラで読み取り、パソコンで光強度をデータ化した。この画像を bmp 形式で保存し、ドットひとつひとつを 256 段階の輝度で振り分けるフリーソフト「bmp2csv」で数値に変換する。その数値の最大値から  $1/e^2$  になるまでの距離を 2 倍した値 (Mode Field Diameter : MFD) をグラフから読み取り、近視野像のサイズの指標として用いる。

②結合効率の算出

光デバイスとして光ファイバとの結合を考えるうえで導波路の結合効率を高めることは重要である。結合効率  $\eta$  の式は次のように表される [7]。

$$\eta = \frac{\left| \int_{-\infty}^{\infty} E^{(1)}(x) E^{(2)*}(x) dx \right|^2}{\left[ \int_{-\infty}^{\infty} |E^{(1)}(x)|^2 dx \right] \left[ \int_{-\infty}^{\infty} |E^{(2)}(x)|^2 dx \right]} \quad (2-3.1)$$

\* : 複素共役

ここで、それぞれのパラメータは以下の通りである。

$E^{(1)}$ 、 $E^{(2)}$  : それぞれ入射側、出射側導波路の基本モードの横方向電磁界分布関数

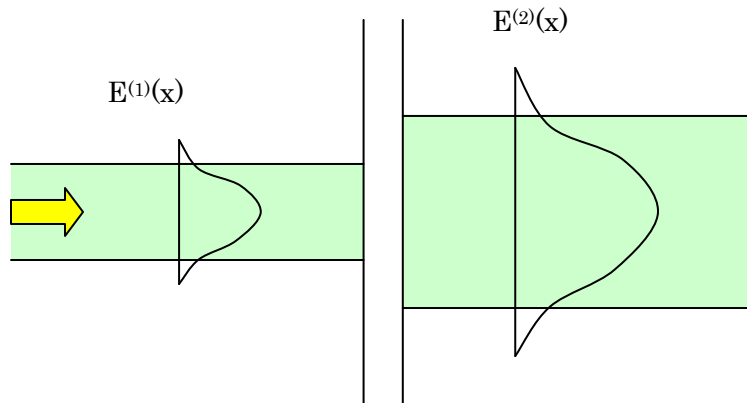


図 2-2.3 2つの導波路同士の突合せ結合

ここで、本研究は導波路と光ファイバの結合を考えているので、 $E^{(1)}$ 、 $E^{(2)}$ をそれぞれ光ファイバと導波路の電磁界分布と考える。ここで、簡単化のため近似を用いる(付録 B)。付録 B より、求める結合効率  $\eta$  は、光ファイバ及び導波路の MFD によって与えられ、

$$\eta = \frac{4W_{x1}W_{y1}W_{x2}W_{y2}}{(W_{x1}^2 + W_{x2}^2)(W_{y1}^2 + W_{y2}^2)}$$

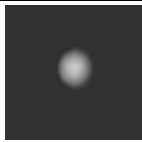
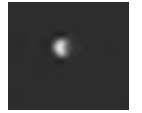
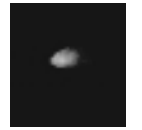
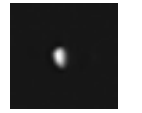
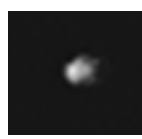
となる。

### ③シングルモード導波路の確認

複数のモードが伝搬しうる光導波路においてモード次数  $N$  が大きくなるほど電磁界のクラッドへのしみだしが顕著になる[7]。光のクラッドへのしみだしが大きいと、実際問題として外乱の影響を受けやすくなる。結果、金属電極の影響や、導波路表面の凹凸による散乱によって損失が増大する。そのため、光スイッチをシングルモード導波路にする必要があると考えられるが、実際の応用を考えた際、必ずしも完全なシングルモード導波路でなくとも高い消光比のスイッチ作製は可能であると言われる。ただ、本研究ではシングルモードに焦点を絞って実験を行うこととする。

以上の三項目を考慮し、表 2-3.2 に示す過去に本研究室で測定された近視野像測定結果を確認する。この結果より、作製した導波路は全てシングルモードであることが分かる。また、MFD については、曲率半径  $R=7\text{cm}$  の導波路が一番結合損失の少ない値をとることが分かった。ただ、近視野像測定の際の ITV カメラのパラメータ設定による MFD 値が変わり得ること、また MFD 算出の際に近視野像のサイズが小さすぎて確かな値が得られているかなど、データを取る際、あるいは MFD 算出の際に気をつけるべきことがある。そこで、付録 C に近視野像測定の際の問題点について触れる。

表 2-3.2 近視野像評価結果[7]

	横方向 MFD Wx[ $\mu$ m]	縦方向 MFD Wx[ $\mu$ m]	伝搬効率 $\eta$	近視野像
光ファイバ	9.75	10.5	1	
曲率半径 R=7cm	10.4	9.6	0.994	
曲率半径 R=12cm	8	7.5	0.957	
曲率半径 R=17cm	13	9	0.949	
曲率半径 R=20cm	9.0	6.0	0.859	

### 2. 3. 2 Ti 蒸着

導波路完成後、図 2-3.2、2-3.3 に示す蒸着装置を用いて試料の上に Ti を蒸着する。蒸着では、ベルジャー内に試料及び Ti ワイヤをセットし、ロータリーポンプ及びディフュージョンポンプでチャンバー内を  $10^{-6}$ Torr 台の高真空にする。この後、外部電源により Ti ワイヤに電流を流し、Ti ワイヤを蒸発させて試料表面に Ti を  $0.1 \mu$  m 堆積させる。蒸着の際、膜厚を知る目安として水晶振動子を用いてその発振周波数から膜厚を算出している。具体的には 900Hz 分の発振周波数の低下で  $0.1 \mu$  m の膜厚を得ることができる。

蒸着の際注意しなければならないのは、サンプルを試料台(図 2-3.3 の蓄熱ブロック)に貼りつける際、あらかじめ試料台のサンプル設置部分にまんべんなく Ga を塗っておくことである。この上にサンプルを置くことでサンプルと試料台を密着させ、放熱を促がし、蒸着中の温度変化を抑えることができる。実際、Ga を塗らないまま蒸着を行ってしまうとひび割れが目立つが、Ga を塗ることで大きなひび割れは防ぐことができる。

今回、Ga 塗布以外のひび割れをなくすアプローチとして、蒸着回数を増やして冷却

時間を増やすことを試みた。具体的には従来の

・ 400Hz→1時間置く→500Hz→1時間置く→取り出し

という手順を、

・ 300Hz→1時間置く→300Hz→1時間置く→300Hz→3時間置く→取り出し

とすることで、蒸着後、よりサンプルを冷やしてからとり出すというものである。これにより、真空を破る際の急激な温度変化をなくし、ひび割れが解消できるものと考えたが、時間を増やしてもあまり期待する結果は見られなかった。そのほか、サンプル設置場所を変え、Ti ワイヤー-基板間距離の調節を試みたが、やはり効果はなかった。

これらのことから、ひび割れは蒸着中に生じているものと考えられ、蒸着中の放熱をいかによくするかがひび割れをなくすポイントであることが分かった。そして現状では Ga を塗布することで対応するしかないといえる。

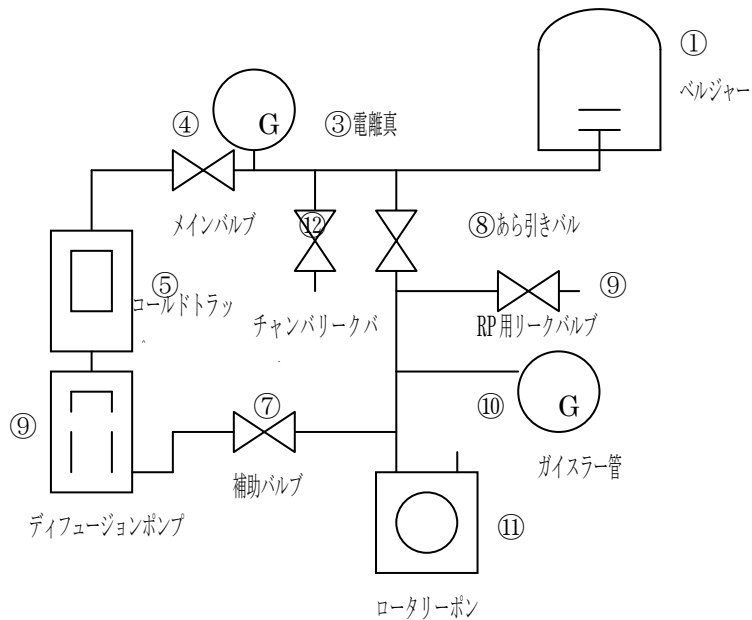


図 2-3.2 蒸着装置全体図[7]

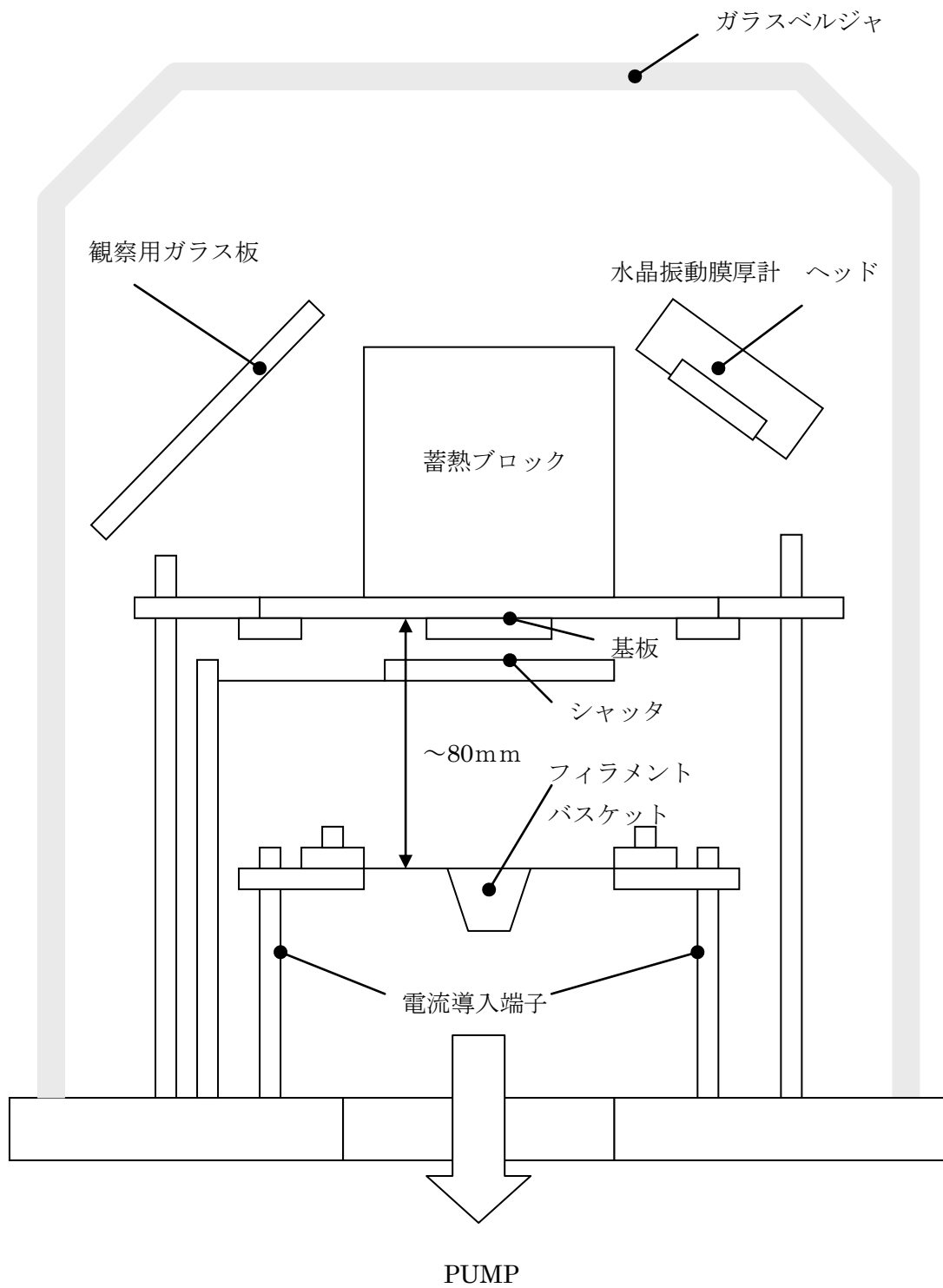


図 2-3.3 ベルジャー内の構造[7]

### 2. 3. 3 Ti エッチング

Ti 蒸着後、スピナ（回転数は下クラッド層作製時と同じ）でレジスト(TSMR8900)を塗布し、プリバーク（80℃ 3分）を行う。その後、フォトマスクを合わせて1.4秒露光し、現像（NMD3 現像液）する。その後、フッ酸により Ti をエッチングする。エッチングが完了した後、Ti ヒータ上のレジストをアセトンにより剥離させる。こうして、Ti ヒータの完成となる。作製過程の概略を図 2-3.4 に示す。

なお、今一番の問題となっているのがこの Ti エッチングである。エッチングの際にヒータ部の Ti までも剥がれてしまうことが多く、完成するサンプル数が少ないのが現状である。そこで、改善案について 2-3.5 節において後述する。

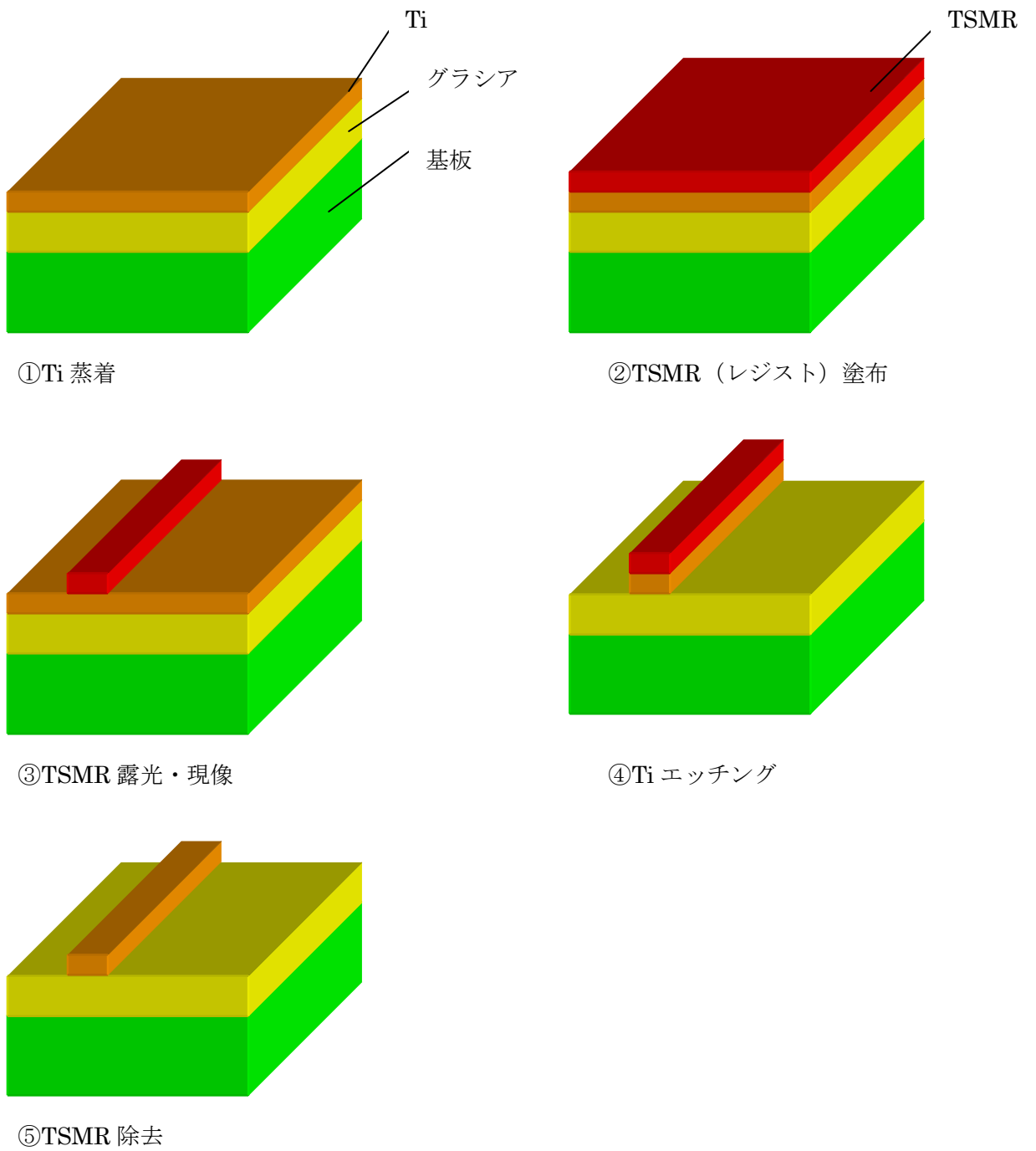


図 2-3.4 ヒータ作製工程

### 2. 3. 4 Al 蒸着・エッチング

Ti ヒータ作製後、蒸着装置を用いて Al を試料表面に蒸着する。Al の蒸着には図 2-3.3 のベルジャー内構造図のバスケット内に Al の 5mm の玉を入れて蒸発させ、サンプル表面に  $0.3\mu\text{m}$  蒸着させる。その後、Al をエッチングする。エッチング作業工程は Ti の時と同じで、エッチング液のみが異なり、リン酸、硝酸、水を 20:1:1 の割合で混合したものを使用して 2~4 分エッチングする。その後、レジストをアセトンにより剥離させる。

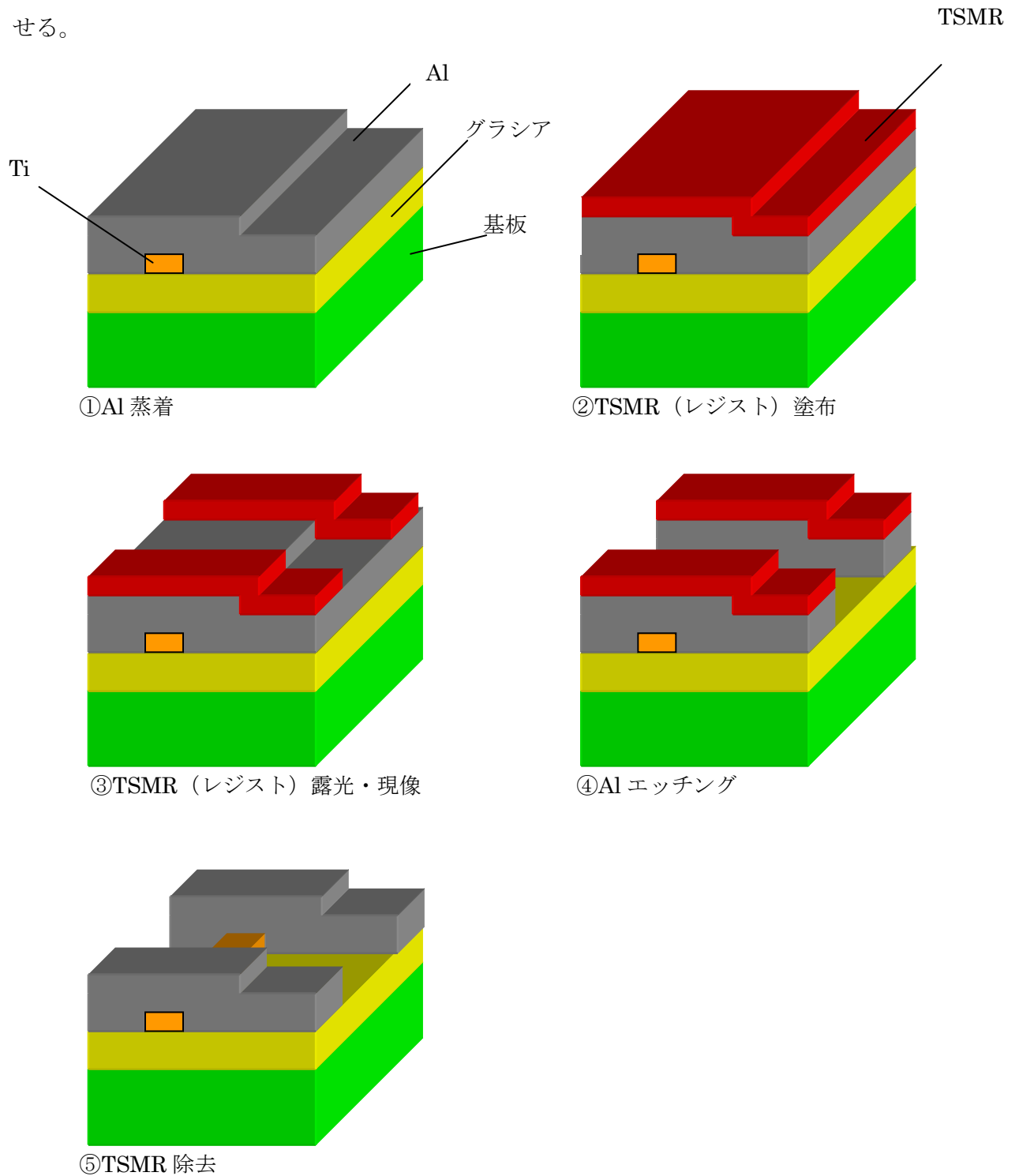


図 2-3.5 Al 電極作製



### 2. 3. 5 スイッチング特性の評価

図 2-3.6 にスイッチング特性測定系を示す。これは、図 2-3.2 の近視野像測定系に定電流源回路をとりつけたものとなっている。

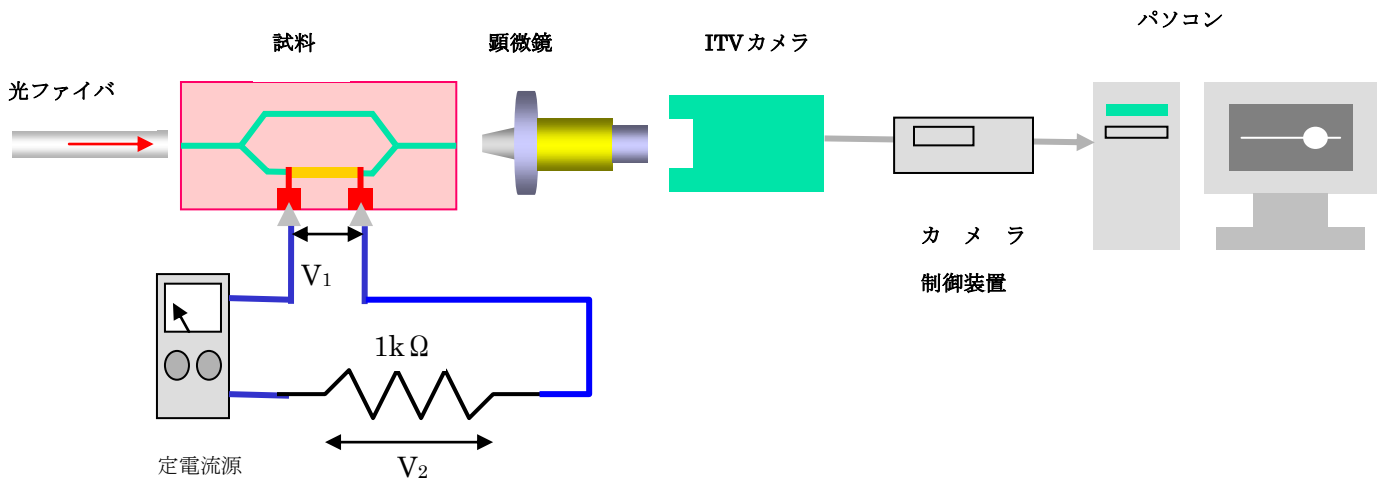


図 2-3.6 スイッチング特性評価の概略

スイッチング特性の評価では、まず Al 電極に定電流源により電流を流し、プローブ間電圧  $V_1$  及び抵抗間電圧  $V_2$  をテスタで測定する。

$V_2$  を  $1k\Omega$  で割ると Ti ヒータに流れる電流  $I$  が分かる。その  $I$  と  $V_1$  を掛け合わせることでヒータ間の電力値  $W$  を求めることができる。定電流源の電流値を上げていき、そのときの近視野像を bmp 形式で保存し、フリーソフト「bmp2csv」で数値化し、それぞれの強度の最大値を調べる。このようにして先程のヒータ間電力値  $W$  と光強度の関係のグラフを作成する。

まず、過去に得られたスイッチング特性の結果を図 2-3.7 に示す。この結果は、一番損失の少ない分岐角  $2\theta=3^\circ$  のアンテナ結合型 Y 分岐導波路に対するものである。これより、 $6.8mW$  の電力で  $3.5dB$  の消光比が得られていることが分かる。1.2.1 で述べたように目標値は  $30mW$  以下であることなので、この  $6.8mW$  という電力値は目標を達成しているといえる。一方で、消光比に関しては  $-30dB$  はほしいところであるので、まだまだ改善の余地があるといえる。消光比が良好でない原因としては、導波路がシングルモードでない可能性や、導波損失が大きいためだと考えられる。

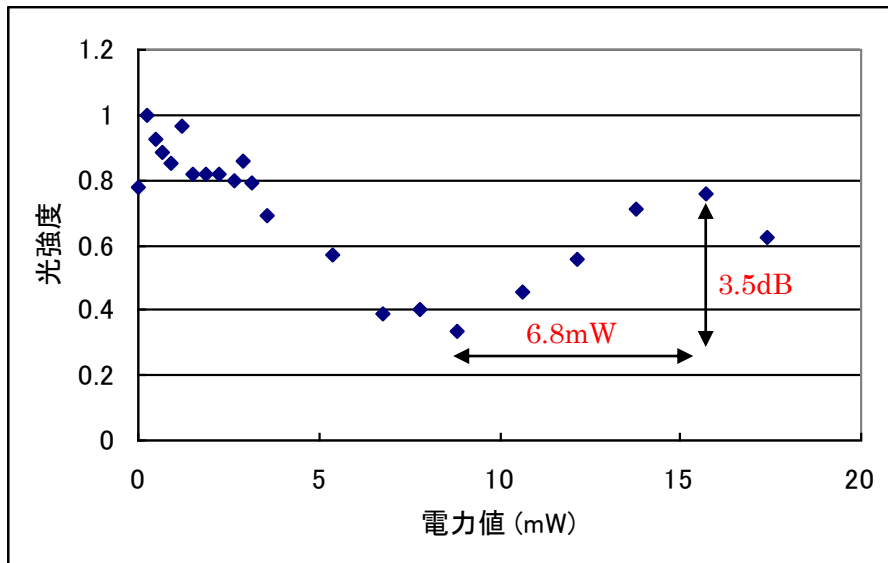


図 2-3.7 スイッチング特性[7]

次に、昨年度得られた実験結果を示す。昨年度は導波路作製後まではシングルモードを確認することはできたが、ヒータ設置後、導波路はマルチモード導波路となってしまった。そのため、近視野像の確認では図 2-3.8 に示すような高次モードが観測された。

マルチモードではあるが参考のため、ヒータに電流を流し、スイッチング特性が得られるかどうかを試した。図 2-3.9 にスイッチング特性を示す。スイッチング特性測定には光の強度変化が顕著に見られた光（赤い縦線の左側の光）を利用した。この結果をみると、sin カーブのような形になっていることが分かるが、通常、ヒータが OFF（電力 0mW）の状態では近視野像が確認できるはずである。これはマルチモードのため、異なるモードの光が足し合わされている結果であると考えられる。消光比に注目すると、マルチモードではあるが、10.56[dB]と過去の研究結果より優れていることが分かる。今後、シングルモードの光スイッチが完成すれば、より優れた消光比を達成できるものと考えられる。

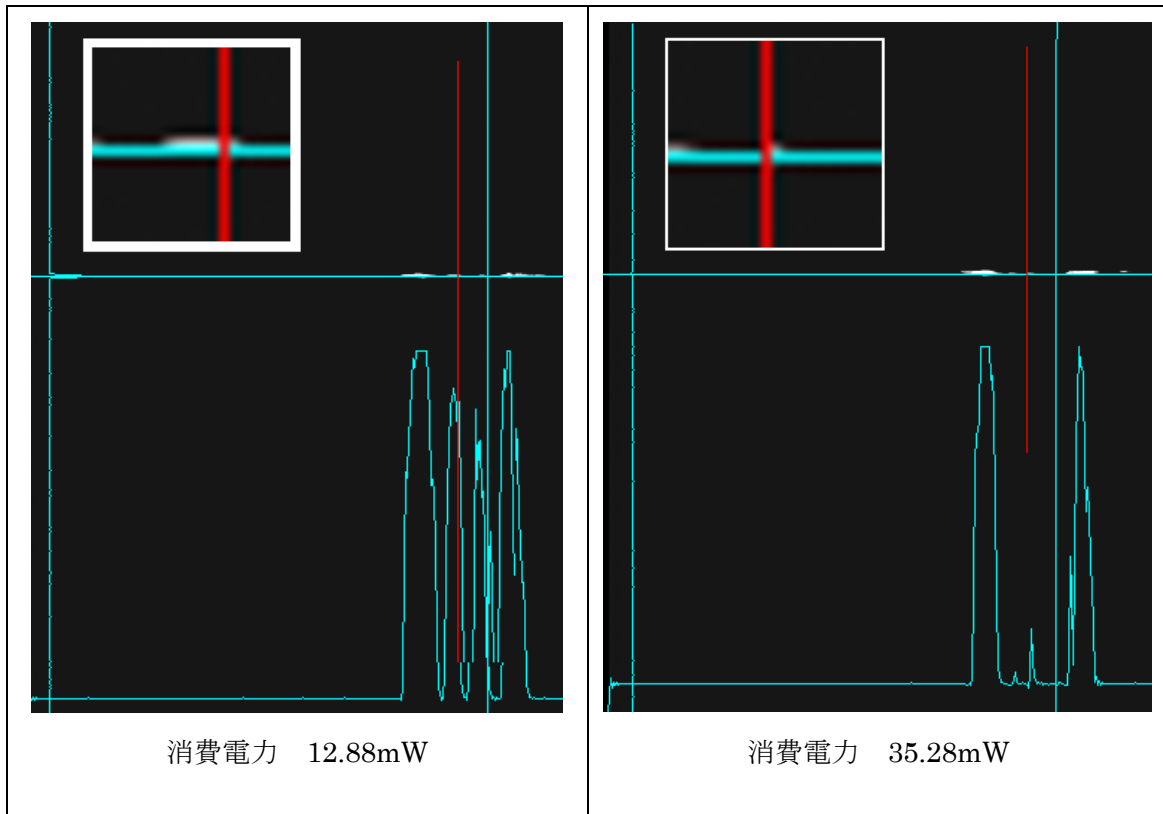


図 2-3.8 スイッチング特性評価 近視野像

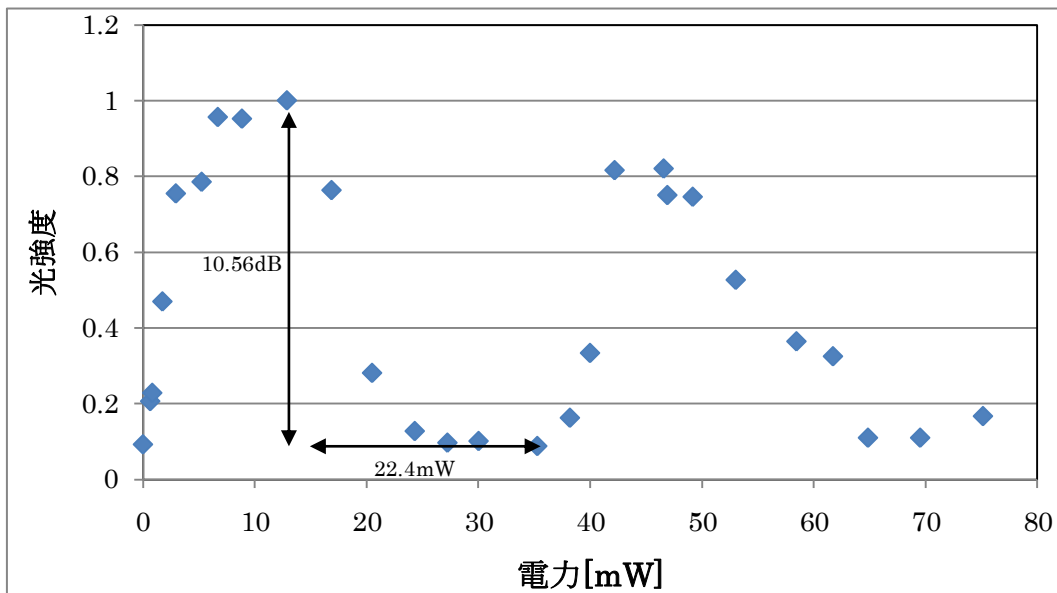


図 2-3.9 スイッチング特性評価

続いて今年度の結果だが、グラシアが手元にない期間が多かったこと、また、私のミスで蒸着装置のベルジャーを割ってしまったことにより、数個しかサンプル作製ができなかった。その数個のサンプルについては、エッチングの際に Ti ヒータも一緒に剥離

してしまうということが起きたため、一つとしてシングルモードの光スイッチを作製することはできなかった。

今後、サンプル作製ができるようになった際、同じミスをしないうためにエッチング方法の改善を提案することにした。従来、Tiのエッチングの際にはフッ酸の中でサンプルをピンセットでつまみ、手で振るといったやり方を行っていたが、これでは人によってエッチングに差が出てしまい、エッチング時間は人の感覚に頼るほかなかった。過去、このような方法をとっていたのは液中でサンプルを振らないとエッチングができないため、という理由からであったが、今年度実際に静かに浸したままエッチングを行ったところ、Tiが溶けることを確認することができた。そこで今後のエッチング方法を模索するため蒸着の際にサンプルのほかにもう一枚テストサンプルを用意し、このテストサンプルでエッチングに要する時間を測定した。その後このエッチング時間で本番のサンプルについても同様にエッチングを行うとTiヒータが剥がれることなくエッチングができることが分かったため、今後は毎回テストサンプルでエッチング時間を測り、同じ時間サンプルをエッチング液に浸漬させることで問題を解決したい。

### 2. 3. 6 スイッチング動作に要する温度上昇

今回、12.88mWにおいて近視野像は最大強度をとり、35.28mWにおいて最大消光比10.56dBを得ることができた。本節ではこの値を利用して、ヒータの温度を見積もる。なお、計算は文献[8]を参考にして行う。

ヒータの温度 $T_H$ はヒータへの電圧印加で発生するジュール熱 $Q$ 、ヒータの熱抵抗 $R_w$ 、電極の熱抵抗 $R_E$ 、周囲の温度 $T_A$ で決定することができ、

$$T_H = \frac{Q}{\frac{1}{R_w} + \frac{1}{R_E}} + T_A \quad (2.3.1)$$

と表すことができる。本来であれば $R_w$ ,  $R_E$ は有限要素法を用いて求めねばならないが、今回は文献[8]を参考にヒータの熱抵抗 $R_w$ にはフッ化ポリイミドの値を用いることとし、また電極の熱抵抗 $R_E$ に金(Au)の熱抵抗を利用することとする。結果、 $R_w^{-1}$ は0.75[mW/°C・mm]であり、 $R_E^{-1}$ は0.17[mW/°C・mm]となり、これを式(2.3.1)に代入する。 $T_A$ を20[°C]とすれば、 $Q=12.88$ [mW]においては34[°C]、一方で $Q=35.28$ [mW]においては58.3[°C]となることが分かった。よって、スイッチングに必要な温度上昇は24.3[°C]であることを見積もることができる。ただ、この計算は実際の光スイッチと比べ、材料、構造ともに異なるため、あくまで目安でしかなく、今後は有限要素法を用いてシミュレーションを行う必要があるだろう。過去、スイッチング特性測定中にヒータが断線したことがあったため、スイッチング特性測定の際に起こるヒータへのダメージを考えるためにも、ヒータ温度の計算が重要となると考えられる。

## 2. 4 まとめ

ポリマー材料『グラシア』を用いてMZ型光導波路を作製し、TO型光スイッチの作製を試みた。まず、導波路の分岐部分にはアンテナ結合型Y分岐を用い、分岐後の導波路には曲がり導波路を採用し、BPM法でシミュレーションが行われた。結果、分岐角度 $3^\circ$ という角度で伝搬損失1dBを下回る導波路作製が可能であることが分かった。

実際にサンプルを作製すると、Tiヒータ蒸着前まではシングルモードの光が確認できるが、Tiヒータ、Al電極蒸着後にはマルチモードとなってしまう、シングルモードの光スイッチを作製することはできなかった。参考にマルチモード導波路の光スイッチに電流を流したところ、近視野像に変化がある部分においては、22.4mWの電力で10.56[dB]の消光比を確認することができた。今後シングルモード導波路が作製できた際にはこれ以上の消光比を期待することができると考えられる。

今回、Ga塗布以外のひび割れをなくすアプローチとして、蒸着回数を増やして冷却時間を増やす、あるいは基板の設置場所を変えることでTi分子の堆積時間を変えることを試みたがどちらも期待する結果を得ることはできなかった。これらのことから、ひび割れは蒸着中に生じているものと考えられ、Ti成膜中に放熱をいかによくするかが、ひび割れをなくすポイントであることが分かった。そして現状ではGaを塗布することで対応するしかないと考えている。また、エッチング方法の改善案として、今後は人の感覚に依らない方法を提案した。これにより、エッチングにおいて、ヒータごと剥がれるということがなくなるものと考えられる。

## 第3章 PBW を利用した光導波路の設計と作製に関する研究

### 3.1 はじめに

近年の微細加工技術の進展は目覚ましいもので、半導体のメモリ分野では、数十 nm オーダーの微細加工が必要とされている。各メモリデバイスによる微細化傾向の違いを表にしたものを文献[9]より引用する。

表 3-1.1 デバイスによる微細化傾向の違い[9]

年	2007	2010	2013	2016	2019
DRAM ハーフピッチ(nm)	65	45	32	22	16
フラッシュメモリー ハーフピッチ(nm)	57	40	28	20	14
コンタクトパターン (レジスト上) (nm)	70	50	35	25	18

このような微細加工を可能にする技術として、EUV リソグラフィ(Extreme Ultraviolet Lithography)、電子線描画 (EB: Electron Beam)といったものがあるが、EUV 技術では波長 13.5nm の軟 X 線領域の光を利用することで従来の露光技術よりも優れた解像度で数十 nm オーダーの微細加工が可能となり、半導体集積回路の高集積化に貢献してきた。EB 露光技術では電子線をサンプルに照射しパターンを形成することでマスクレス加工が可能となる。そのため、フォトリソグラフィ用のフォトマスクの作製に利用される。また、CP (Character Projection, Cell Projection, あるいは、部分図形一括転写) 露光技術と呼ばれるマスクを利用する方法で微細加工技術が可能となる [10]。

このように、通信のニーズに合わせて微細加工技術が発展する中、1997 年ごろより、国立シンガポール大学イオンビーム応用センターにて次世代型微細加工技術として PBW(Proton Beam Writing)技術の研究が進められてきた。PBW の特徴は①低散乱 (高い直進性)、②高効率である。

①の低散乱とはプロトンビームが物質内に進入した際に、ビームが横方向に逸れずに直線的に侵入するというものである (図 3-1 参照)。そして、この侵入深さは加速電圧でコントロール可能である。

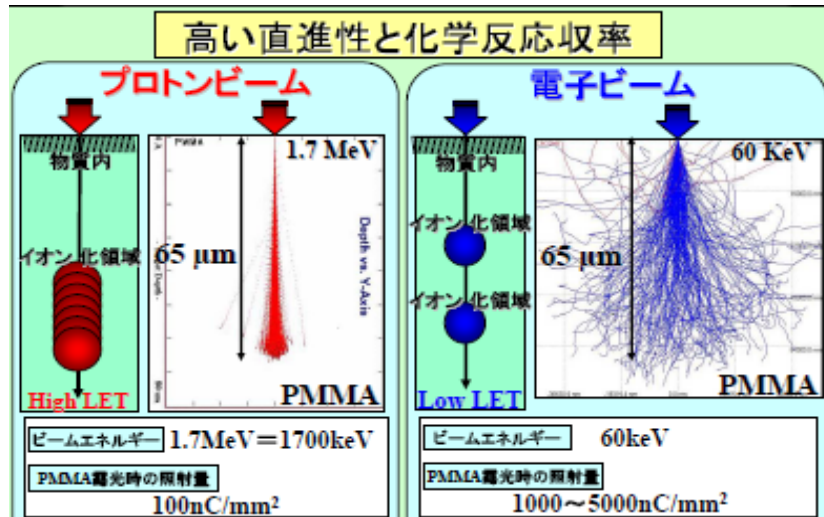


図 3-1 プロトンビーム 低散乱特徴説明図 [11]

そのため、ピラー構造などの高いアスペクト比が必要となる 3次元加工において重宝される。

②の高効率とは、収率が高いことで少ない照射量で露光することができるというものである。電子ビームと比較し、その効率は数十倍以上である。

これらの特徴から PBW はナノインプリントにおけるモールドの形成、マイクロフルイディクスにおける細胞を成長させる土台の作製等に応用されている[12]。

一方でプロトンビームをポリマー材料 PMMA(poly methyl methacrylate)に照射すると PMMA 中の主鎖が切断され、圧縮効果が起こり密度が上昇し、ビーム照射部の屈折率が上昇するという性質がある。この性質を利用することで導波路形成が可能となる。そこで、本研究では第 2 章で示したポリマーを用いた光スイッチの作製において、導波路作製にこの技術を利用することを目標とし、直線導波路の作製と評価を行う。

### 3. 1. 1 PBW 装置について

本研究では共同研究先の日本原子力研究開発機構 (JAEA) と芝浦工業大学の PBW 装置を使用してサンプルの作製を行う。図 3-1.1 に日本原子力研究開発機構イオン照射実験施設(TIARA)内の 3MV シングルエンド加速器とビームラインを示す[13]。左図の加速管の中には高電圧発生部、RF イオン源があり、そこでプロトン(H<sup>+</sup>)が生成され、その後加速管を通してプロトンビームが放出される。加速器を発射したプロトンビームは右図のビームラインを通り、サンプルへと照射される。ビームラインの中にはスリットや、四重極レンズといったビーム電流を調節するもの、あるいはビームの集光に必要な装置が組み込まれている。



3MVシングルエンド加速器の外観



使用したビームライン

図 3-1.1 加速器とビームライン [13]

表 3-1.1 に国内外の高エネルギーイオン加速器の設置例について、まとめた表を載せる[11]。日本原子力研究開発機構では高エネルギーの照射が可能のため、プロトンビームが PMMA を透過する際に起こる反応を利用して導波路を作製する。一方、芝浦工業大学ではビームエネルギーを抑え、ブラッグピークを導波路とするサンプル作製を行う。参考のために、図 3-1.2 に加速エネルギーと飛程との関係を示した図を載せる[11]。



表 3-1.1 国内外の高エネルギーイオン加速器の設置例[11]

設置場所 (メーカー)	サイズ	加速器	エネルギー	イオン種	用途
市販装置 (神戸製鋼所)	1.5m× 5.2m	HRBS1000	1.0 MV	He <sup>+</sup>	高分解能 RBS
芝浦工業大学 CFM (神戸製 鋼所)	7m×4m	シングルエ ンド加速器	1.3MV	H <sup>+</sup> (He <sup>+</sup> ,N <sup>+</sup> ) H <sub>2</sub> <sup>+</sup>	PBW 専用
日本原子力研 究開発機構 (日新HV)	17m× 24m	シングルエ ンド加速器	3.0MV 6.0MV	H <sup>+</sup> ,He <sup>+</sup>	多目的 (PIXE,SEU,PBW)
国立シンガポ ール大学 CIBA(HVEE)	13m× 13m	シングルエ ンド加速器	3.5MV	H <sup>+</sup> ,H <sub>2</sub> <sup>+</sup>	PBW,PIXE,RBS

PMMAへのプロトン照射(~3MeV)

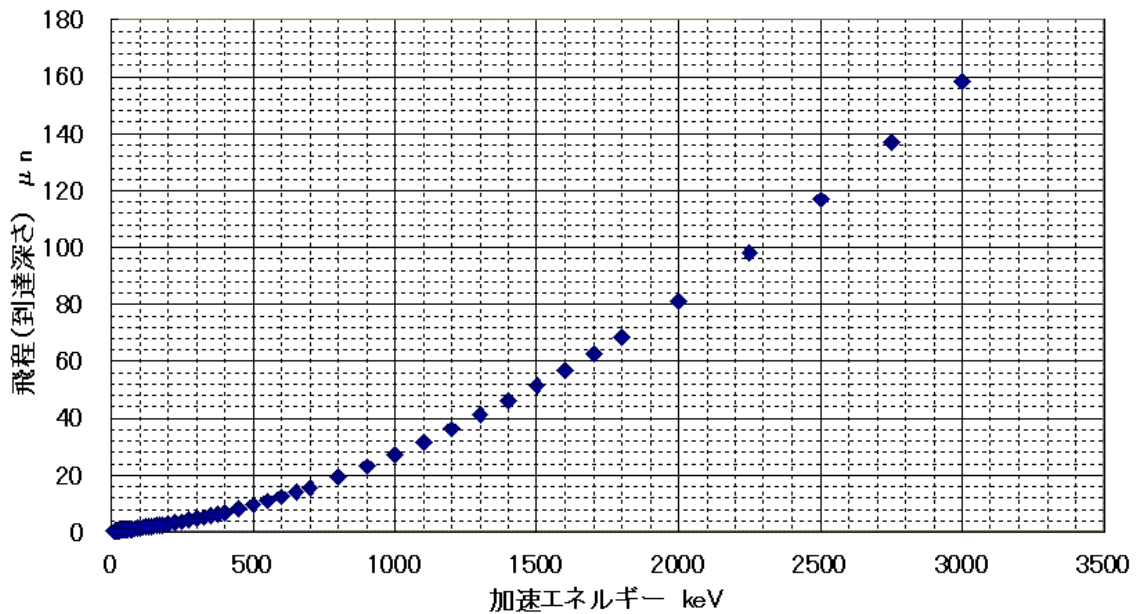


図 3-1.2 加速エネルギーと飛程[11]

### 3. 1. 2 プロトンビーム照射による PMMA への影響

本研究では導波路材料として図 3.1.3 に示すような構造式のポリマー材料 PMMA(poly methyl methacrylate)を利用する。PMMA にプロトンビームを照射すると主鎖が切断され、圧縮効果が起こり、密度が上昇する。そのため、ビーム照射部の屈折率が上昇する。この性質を利用することで、導波路の形成も可能となる。

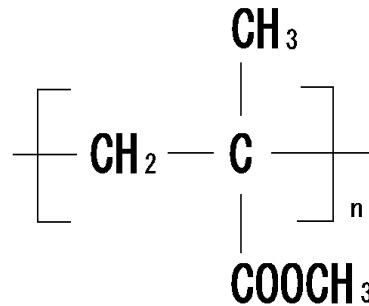


図 3-1.3 PMMA 化学構造式

プロトン照射による PMMA の屈折率の変化は文献[14]にあるプロトンビーム侵入深さと屈折率変化の関係を示した図から見積もることができる。図 3-1.4 を見て気がつくのは、ビーム終端部分において屈折率上昇効果が大きくなっていることである。ビーム終端部分をブラッグピークと呼ぶが、このブラッグピーク付近においてはビーム透過部とは異なる反応が起き、屈折率も大きく変化する。具体的には、透過部が分解反応、架橋反応によってその屈折率を上げるのに対し、ブラッグピークでは水素イオン注入効果による反応によって屈折率上昇効果が起こる[14]。なお、このブラッグピークを導波路とする構造については、波長 632.8nm の光に対するマルチモード導波路の研究で成果が出ている[15]。

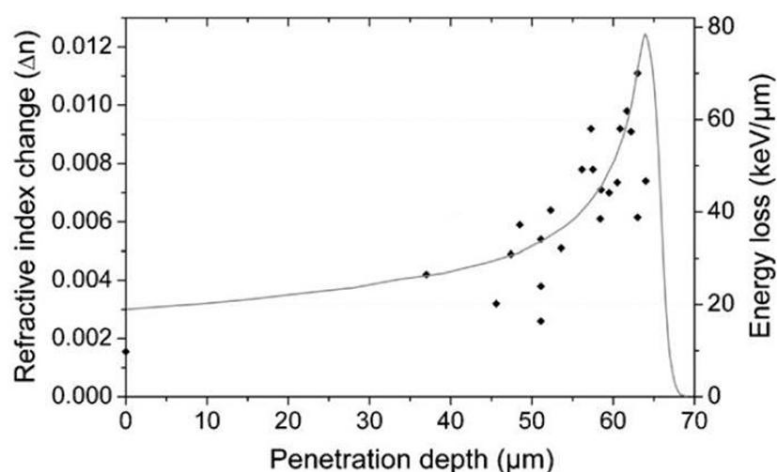


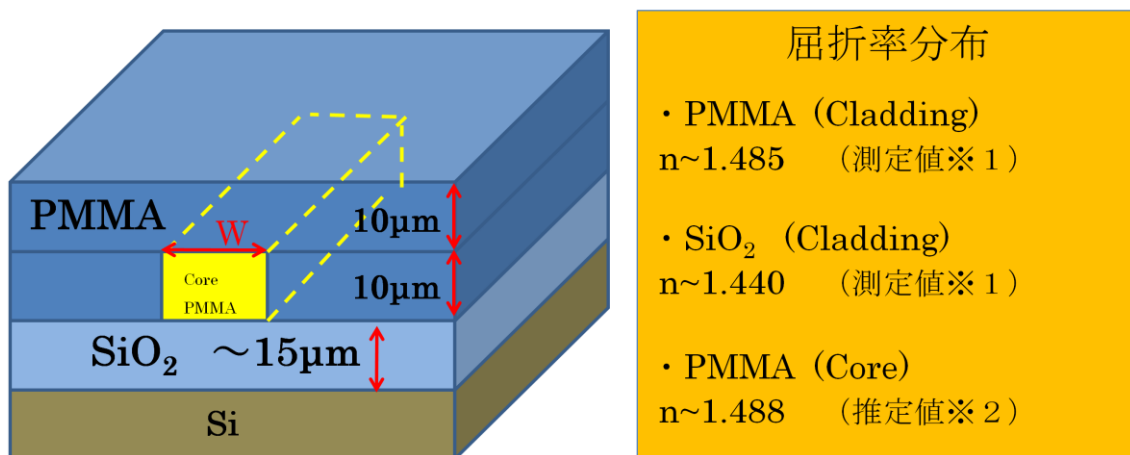
図 3-1.3 PMMA へのプロトンビーム侵入深さと屈折率変化 (2MeV 時) [14]

### 3. 2 PBW を利用した光導波路の設計と作製（プロトンビーム透過型）

本研究ではプロトンビームが PMMA 中を透過する際に引き起こす屈折率変化を利用した導波路（透過型）、また、ブラッグピークにおける屈折率変化を利用する導波路（埋め込み型）の作製を行う。まず、本節では透過型の、波長  $1.55\mu\text{m}$  の光に対し、シングルモードとなる導波路の作製について述べる。

#### 3. 2. 1 作製する光導波路の構造

3. 1 節で既に述べたように、日本原子力研究開発機構（JAEA）のイオン照射実験施設(TIARA)内の 3MV シングルエンド加速器を利用することで、プロトンビーム透過部における屈折率変化を利用して導波路作製が可能となる。そこで、本研究では図 3-2.1 に示すような構造の導波路を提案、作製した。



※1 メトリコン社製プリズムカプラ Modes2010/M を使用して測定  
(測定波長 1548nm、TE モード)

※2 [14]参考

図 3-2.1 導波路構造概要

基板には Si を用いる。過去、SiO<sub>2</sub> を基板として使用したこともあったが、導波路の端面出しのために行うへき開の際、カットがうまくできないことから Si 基板を利用するようになった。

SiO<sub>2</sub> 層は RF スパッタリングで、PMMA 層はスピコートで成膜する。SiO<sub>2</sub> の屈折率は 1.440、PMMA 非照射部の屈折率は 1.485 となっており、これらの値はプリズムカプラを使用して測定した実測値である。コアの屈折率は、クラッド部の PMMA に図 3-1.3 を参考に屈折率 0.003 を加えた推定値となっている。

### 3. 2. 2 PBW 照射条件

シングルモードが得られたサンプルについてのみ、その照射条件を表 3-2.1 から表 3-2.4 に示す。

表 3-2.1 2009 年 4 月 22 日 PBW 実施 in 高崎 Sample NO.1

照射エネルギー	1.7MeV
ドーズ量	100 nC/mm <sup>2</sup>
導波路幅	8,9,10 μ m(設定値)
導波路長	10mm
ビーム電流	~25pA
照射時間	540 sec/sample
<p>描画方法</p> <p>(①→②→③→①・・・の順でビーム照射位置を変える。その際、ステージは矢印の方向へ移動し続ける。ステージが一往復してビーム照射完了となる)</p>	<p>ビームを打ち続ける</p> <p>①</p> <p>②</p> <p>③</p> <p>ステージを移動させる</p>

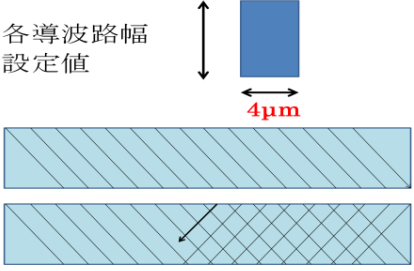
表 3-2.2 2009年4月22日 PBW 実施 in 高崎 Sample NO.5

照射エネルギー	1.7MeV
ドーズ量	80 nC/mm <sup>2</sup>
導波路幅	8,9,10 μ m
導波路長	10mm
ビーム電流	~25pA
照射時間	540 sec/sample
描画方法	<p>(①→②→③→②→①→②・・・の順でビーム照射位置を変える。その際、ステージは矢印の方向へ移動し続ける。ステージをが四往復してビーム照射完了となる)</p>

表 3-2.3 2009年6月30日 PBW 実施 in 高崎 Sample NO.1

照射エネルギー	1.7MeV
ドーズ量	100 nC/mm <sup>2</sup>
導波路幅	4, 6, 8, 10, 12, 14, 16 μ m
導波路長	15mm
ビーム電流	~60pA
照射時間	1750 sec/sample
照射速度	9sec/15mm
ビーム径	X:1.5 μ m Y:1.0 μ m
描画方法	<p>(4 μ 幅の四角を描くプログラム設定で、ステージを動かしつつ描いている。ステージを一往復させて導波路を描く)</p>

表 3-2.4 2009年6月30日 PBW 実施 in 高崎 Sample NO.5

照射エネルギー	1.7MeV
ドーズ量	200 nC/mm <sup>2</sup>
導波路幅	4, 6, 8, 10, 12, 14, 16 μm
導波路長	15mm
ビーム電流	~120pA
照射時間	1750 sec/sample
照射速度	9sec/15mm
ビーム径	X:1.5 μm Y:1.0 μm
描画方法  (4 μm 幅の四角を描くプログラム設定で、 ステージを動かしつつ描いている。ステー ジを一往復させて導波路を描く)	 <p>各導波路幅 設定値</p> <p>4μm</p>

照射条件において描画方法まで載せたのは、条件により導波光の確認ができる場合とできない場合とがあるためである。例えば 6 月 30 日 PBW 実施の Sample NO.5 については 100 μm 幅の四角を描くプログラム設定でも描画を行ったが、この場合、図 3-2.2 に示す 10 μm 幅の導波路を含めすべての導波路で近視野像を確認することができなかつた。このことから、描画方法も重要なパラメータとなり得ることが分かる。

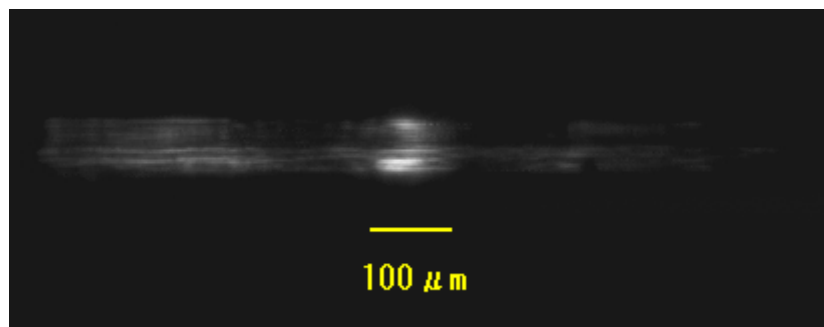


図 3-2.2 0630-NO5 100 μm 幅の四角で描画 近視野像  
(描画方法が異なるために近視野像を観測できなかったと思われる)

### 3. 2. 3 導波路作製方法

導波路作製方法概略を図 3-2.3 に示す。

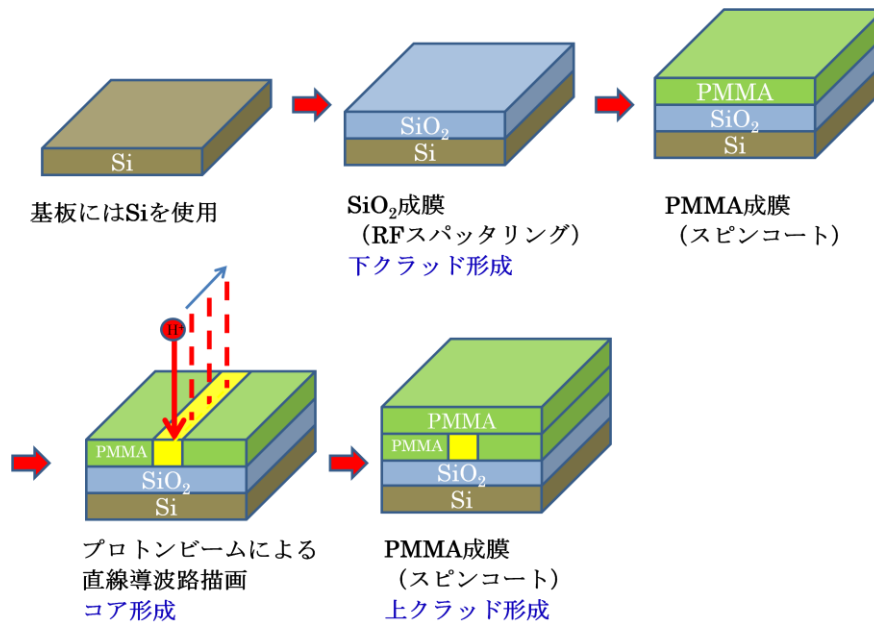


図 3-2.3 導波路作製方法概略

3.2.1 節で述べたように、導波路の端面出しのために後でへき開することを考慮し、基板には Si (20mm<sup>2</sup>) を用いる。その上に RF スパッタリングで SiO<sub>2</sub> を 15~20μm 成膜し、これを下クラッドとする。スパッタ条件を表 3-2.5 に示す。

表 3-2.5 SiO<sub>2</sub> スパッタ条件

プリスパッタ	5[min]
メインスパッタ	922[min]
電力	200W
ガス流量	Ar:10[sccm]

SiO<sub>2</sub>膜の上に PMMA をスピコートで成膜し、そこに 3.2.2 節で示した条件でプロトンビームの照射を行う。その後、上クラッドとして PMMA を成膜し、導波路の完成となる。この際、スピコート、バーク条件は次のようになっている。

- ・ 1350[rpm] 30[s]
- ・ バーク 120[°C] 2分
- ・ この工程を 2 回繰り返して 10μm の厚みとなる。  
(1 回のスピコートで、5μm 成膜される)

### 3. 2. 4 光学顕微鏡によるサンプルの表面観察

作製した導波路の表面、端面を光学顕微鏡で観察した。なお、端面観察にはへき開の作業が必要となるが、へき開の方法によっては近視野像の観測が出来なくなる。参考のために今回行ったへき開の方法を付録 D に載せる。

図 3-2.4 から図 3-2.7 に 0422-NO1、0422-NO5、0630-NO1、0630-NO5 について、光学顕微鏡を使用したサンプル表面観察結果を示す。なお、表面観察は上クラッド形成前に行っている。

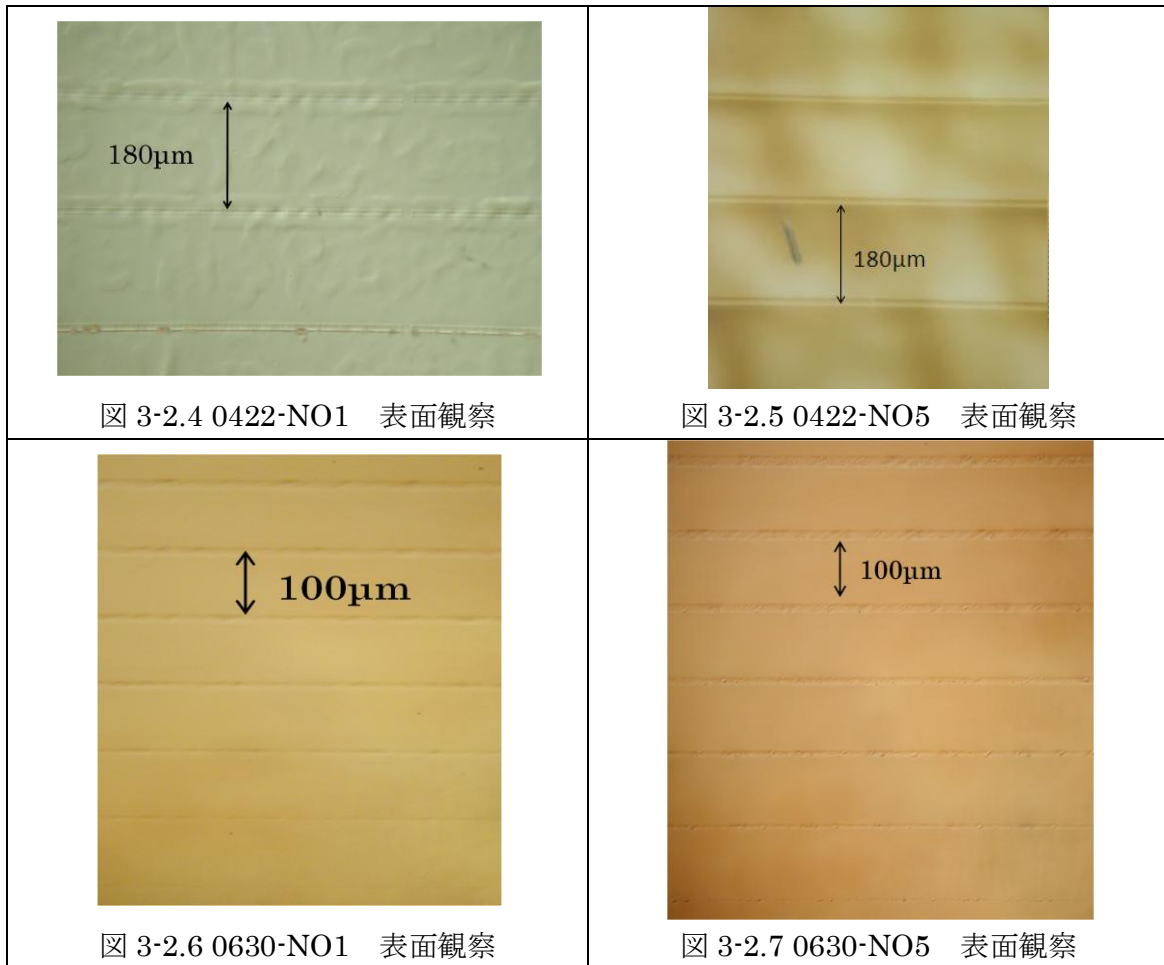


図 3-2.4、図 3-2.5 のサンプル表面観察結果では、わずかに溝を確認することができる。これは、プロトンビーム照射による、圧縮効果がおきたために形成されたものである。また、光学顕微鏡の観察から、照射幅は、ほぼ設定値通りの値となっていることが分かった。

また、図 3-2.8 に 0422-NO1 表面観察結果の拡大図を示す。これをみると、 $13\mu\text{m}$  程度の導波路の欠陥があることが分かる。だが、結果的にこのサンプルについてはシングルモードを観測することができたので、この程度の欠陥は問題とならないことが分かる。



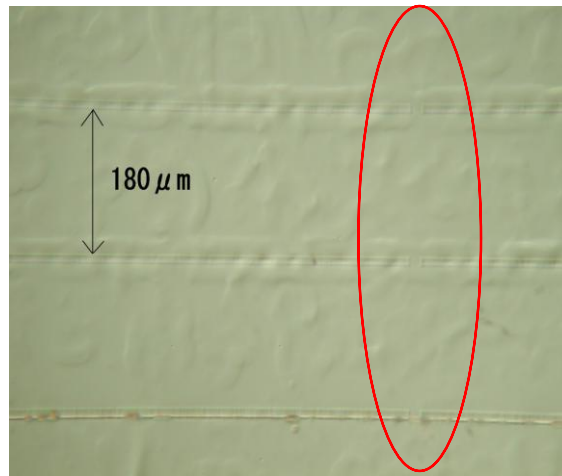
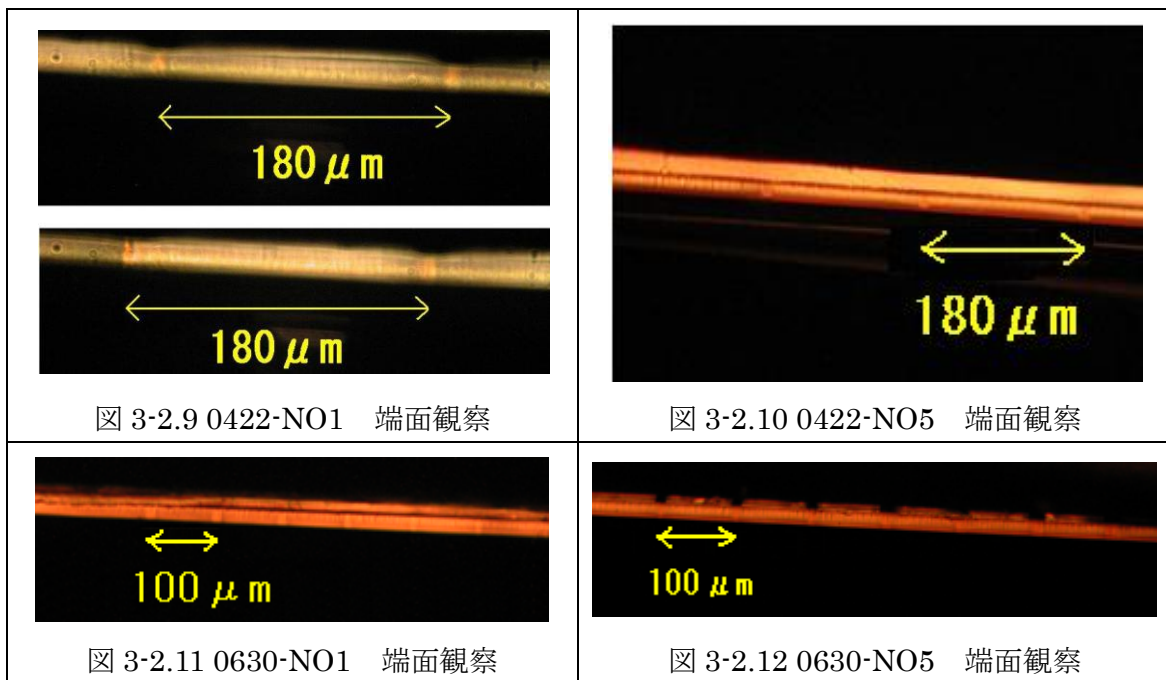


図 3-2.8 0422-NO1 表面観察結果 拡大図

続いて、図 3-2.9 から図 3-2.12 に光学顕微鏡を使用したサンプル端面観察結果を示す。



端面観察の結果から、照射部分が明るくなっていることが分かる。光学顕微鏡の端面観察においてこのように照射部分が明るく見えない場合、ITV カメラでも導波光を観測することができないことが過去の経験から分かっている。そのため光学顕微鏡の端面観察は導波路がしっかりと形成されているか、あるいは端面出しに成功しているかを知る良き指標となる。

### 3. 2. 5 近視野像観測結果

図 3-2.13 から図 3-2.21 に近視野像測定結果を示す。測定系は第 2 章の図 2-3.2 と同じものを使用した。なお、6 月 30 日作製のサンプルについては、顕微鏡接眼レンズと ITV カメラの距離をあけることで像を拡大している。

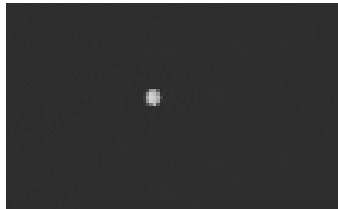


図 3-2.13 光ファイバ 近視野像

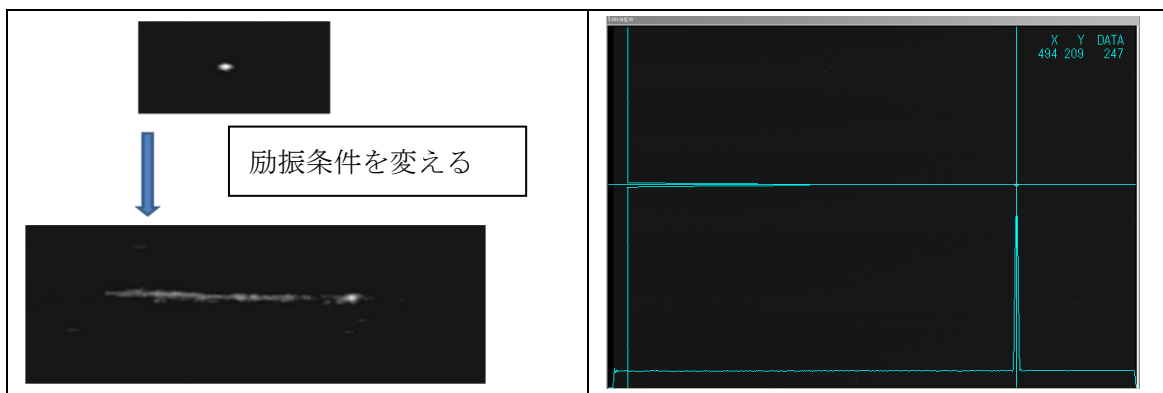


図 3-2.14 0422-NO1 8  $\mu$  m 幅 近視野像測定結果

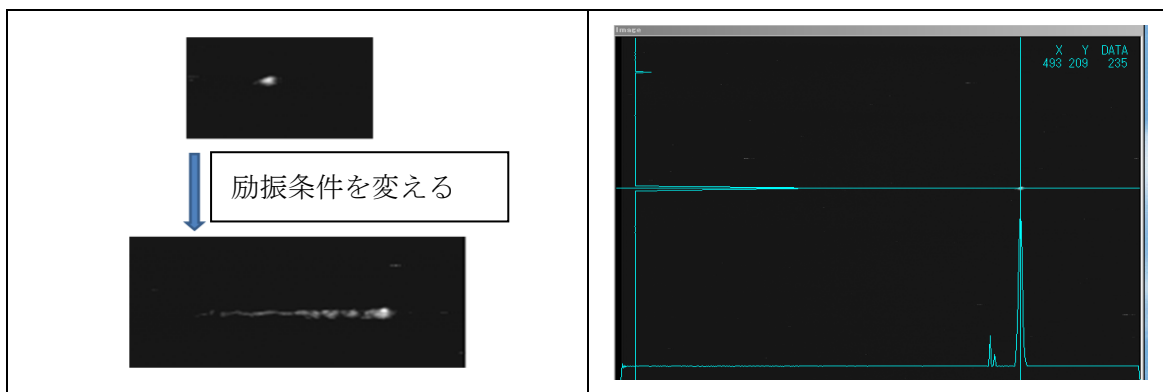


図 3-2.15 0422-NO1 9  $\mu$  m 幅 近視野像測定結果

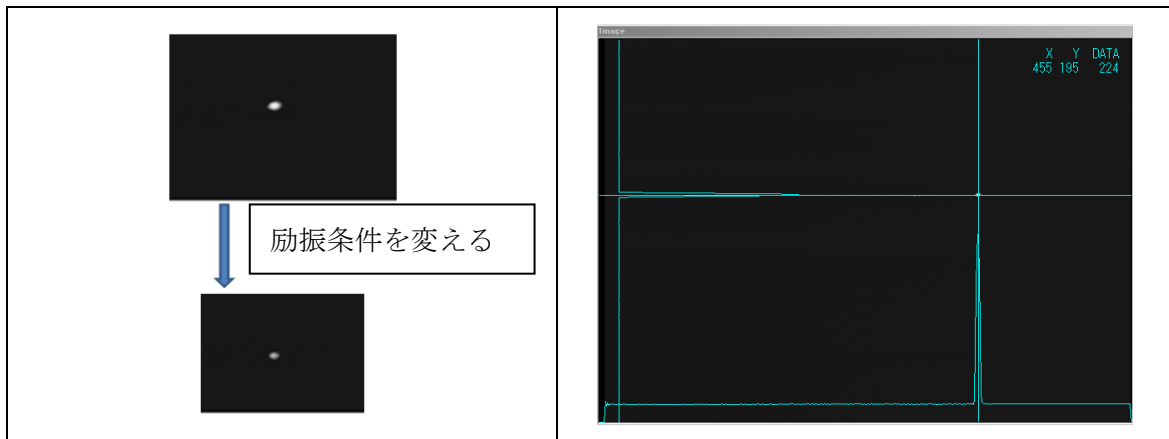


図 3-2.16 0422-NO1 10  $\mu$  m 幅 近視野像測定結果

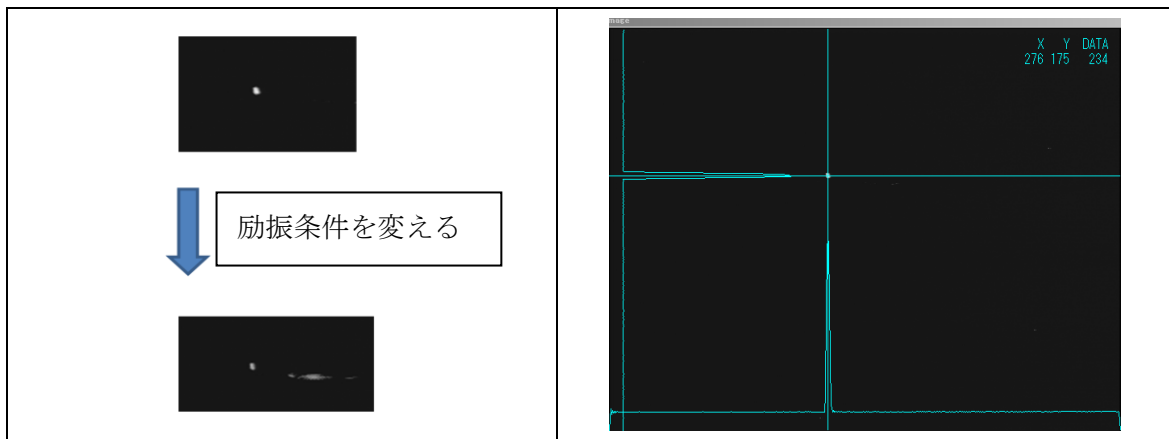


図 3-2.17 0422-NO5 8  $\mu$  m 幅 近視野像測定結果

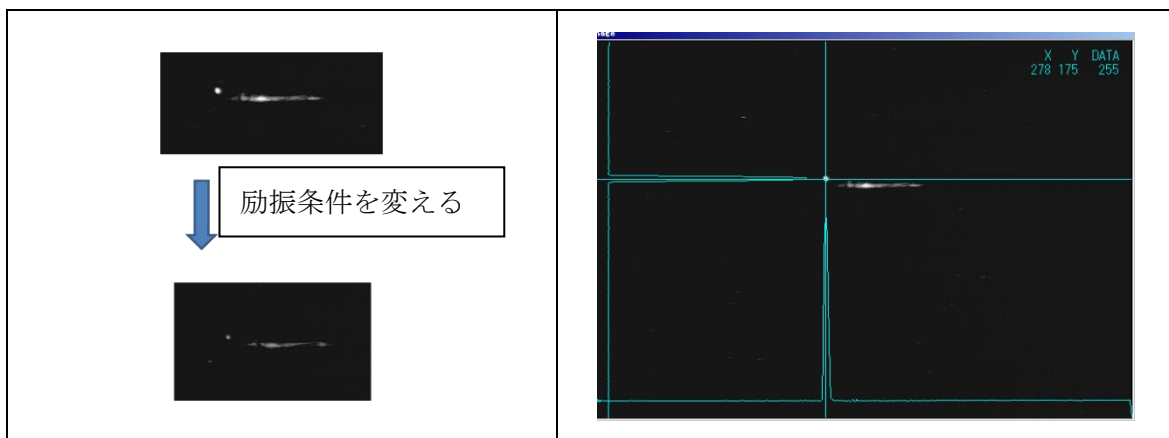


図 3-2.18 0422-NO5 9  $\mu$  m 幅 近視野像測定結果

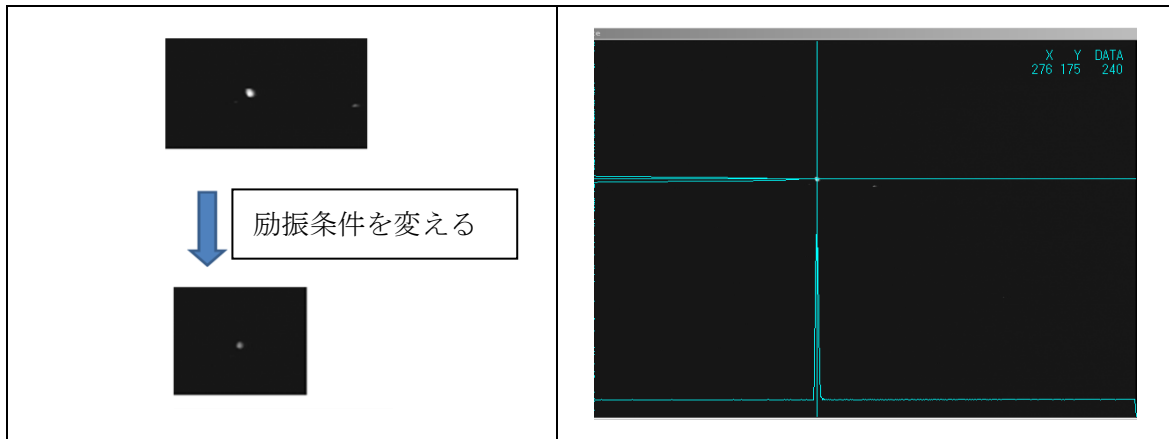


図 3-2.19 0422-NO5 10  $\mu$  m 幅 近視野像測定結果

6 $\mu$ m幅	8 $\mu$ m幅	10 $\mu$ m幅	12 $\mu$ m幅	14 $\mu$ m幅	16 $\mu$ m幅
シングル	シングル	マルチ	シングル	マルチ	マルチ

図 3-2.20 0630-NO1 近視野像測定結果

(下の近視野像はファイバの先端を導波路からわずかにずらした(励振条件を変えた)ときの観測結果である。4  $\mu$  m 幅の近視野像はうまく観測できなかったため、今回は載せていない。また、4月22日作製のサンプル評価方法とは違い、顕微鏡とITVカメラ間の距離をあけることで像を拡大している)

4μm幅	6μm幅	8μm幅	10μm幅	12μm幅	14μm幅	16μm幅
シングル	シングル	シングル	マルチ	マルチ	マルチ	マルチ

図 3-2.21 0630-NO5 近視野像測定結果

(下の近視野像はファイバの先端を導波路からわずかにずらした(励振条件を変えた)ときの観測結果である)

この結果をみると、図 3-2.1 に示すような導波路構造で、シングルモード導波路を作製することが可能であることが分かった。また、図 3-2.21 では  $12\mu\text{m}$  導波路幅でシングルモードとなっており、図 3-2.22 では  $8\mu\text{m}$  までの導波路のみがシングルモード導波路となっていることから、ドーズ量が多くなることでシングルモードとなる導波路幅は狭まることが分かった。

### 3. 2. 6 損失評価

0630-NO1 のサンプルについては図 3-2.23 に示すように導波路長の異なるサンプル 2 枚をうまくへき開することができた。そこで、この 2 枚のサンプルの導波光強度を比較することで伝搬損失、結合損失の算出を試みた。

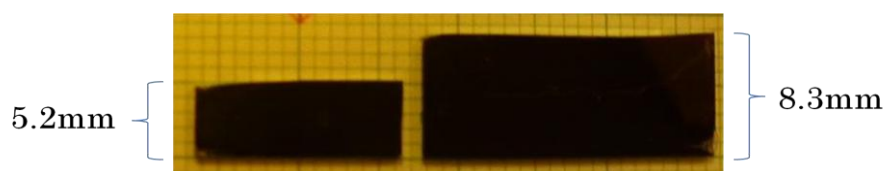


図 3-2.23 0630-NO1 サンプル 損失評価に使用

導波光強度の測定は図 2-3.2 の近視野像測定系において、ITV カメラをパワーメータ(光マルチメータ 安藤電気株式会社 AQ2140)に置き換えて行った。この際、サンプル無しの光強度と各導波光強度とを比較し、損失の評価を行った。結果を図 3-2.24

に示す。

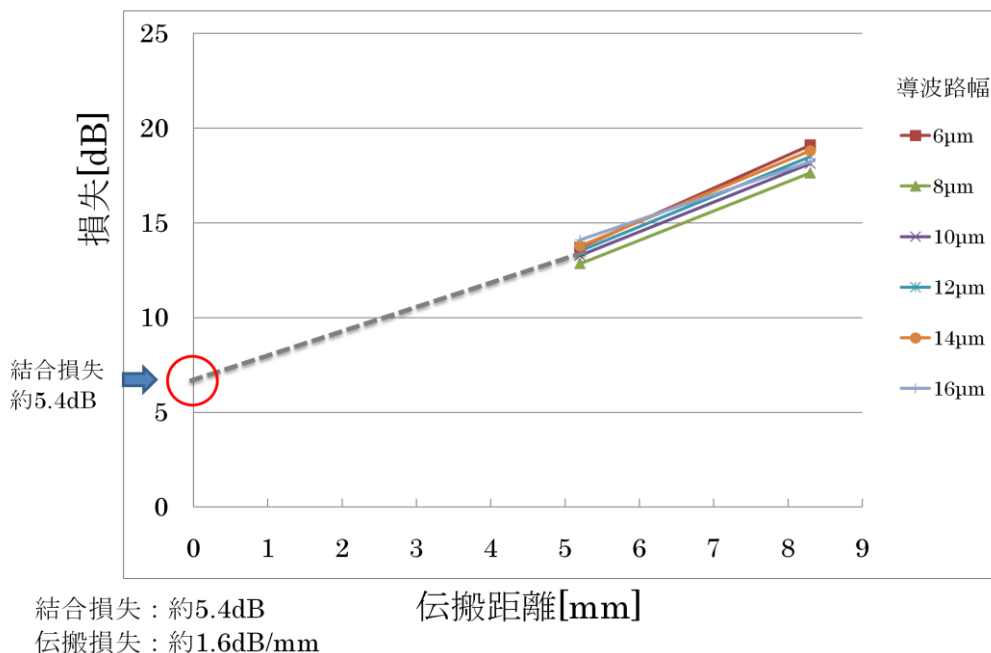


図 3-2.24 0630-NO1 損失評価結果

図より、5.2[cm]から 8.3[cm]へと伝搬距離が延びることで損失が大きくなっていることが分かる。両損失差から伝搬損失は 1.6[dB/mm]と求めることができ、この値から、伝搬距離 0 における損失を見積もると 5.4[dB]となった。この値は主にファイバからサンプルへと光が入射する際に生じる損失（結合損失）であると考えられる。文献[15]を参考にすると伝搬損失は 632.8[nm]帯の波長に対しては  $0.14 \pm 0.02$  [dB/mm]という報告があり、今回の値と比較すると 10 分の 1 以下の値となっている。この文献は 1550[nm]の波長に対する文献ではないため比較することは難しいが、導波路構造の違い、入射端の状態、あるいは照射条件において文献ではドーズ量を  $50 \text{ nC/mm}^2$  としている点などが損失の差に影響するのかもしれない。今後も引き続き損失評価を行い、再現性を確認することで損失の値を計算していきたい。

### 3. 2. 7 考察

以下、実験結果から分かったことを列挙していく。

- ・図 3-2.1 に示すような導波路構造で、シングルモード導波路を作製することが可能であることが分かった。
- ・図 3-2.21 では  $12 \mu\text{m}$  導波路幅でシングルモードとなっており、図 3-2.22 では  $8 \mu\text{m}$  までの導波路のみがシングルモード導波路となっていることから、ドーズ量が多くなることでシングルモードとなる導波路幅は狭まることが分かった
- ・MFD を計算するには至っていないが、近視野像のサイズはファイバの MFD 値とほ

ぼ等しいサイズとなっていることが分かった。なお MFD の計算法を検討したので、付録 E にて詳述する。

- ・へき開が失敗し、近視野像が確認できないサンプルが数多くあった。このことから、へき開の良し悪しで近視野像の光強度も大きく変化するものと考えられる。今後損失の評価を行う際には全ての試料において結合損失が異なるということを考慮すべきであるといえる。

- ・6月30日作製の試料 NO5 より、PBW 照射の際には  $100\mu\text{m}$  幅の四角を描くよりも  $4\mu\text{m}$  幅の四角を描きながら土台を動かす方が、シングルモードが得やすいということがわかった。ただ、評価を行ったサンプル数が少ないので、再現性があるかどうかはまだ判断できない。

- ・6月30日作製の試料 NO1 において伝搬損失の評価を行ったが、文献[15]において  $632.8[\text{nm}]$  帯で測定された損失に比べ、10倍以上大きな値となった。これは導波路構造の違い、入射端の状態、照射条件の違いで差によるものと考えられる。今後も引き続き損失評価を行い、再現性を確認することで損失の値を計算していきたい。

### 3. 3 PBW を利用した光導波路の設計と作製 (埋め込み型)

本節ではプロトンビーム終端部を導波路とする構造で波長  $1.55\mu\text{m}$  の光に対しシングルモードとなる導波路作製について述べる。なお、本研究は 2009 年から本格的に始動した研究であり、まだまだサンプル数も少なく情報も少ない状況である。そのため、今後の参考のためにも過去の照射条件について全て載せることにする。

#### 3. 3. 1 作製する光導波路の構造

図 3-3.1 に作製する導波路の概要を示す。図において、黄色の  $n_2$  部分がプロトンビームが透過することで屈折率が上昇した部分であり、赤い  $n_1$  の部分がビーム終端部において屈折率が上昇した部分を示している。

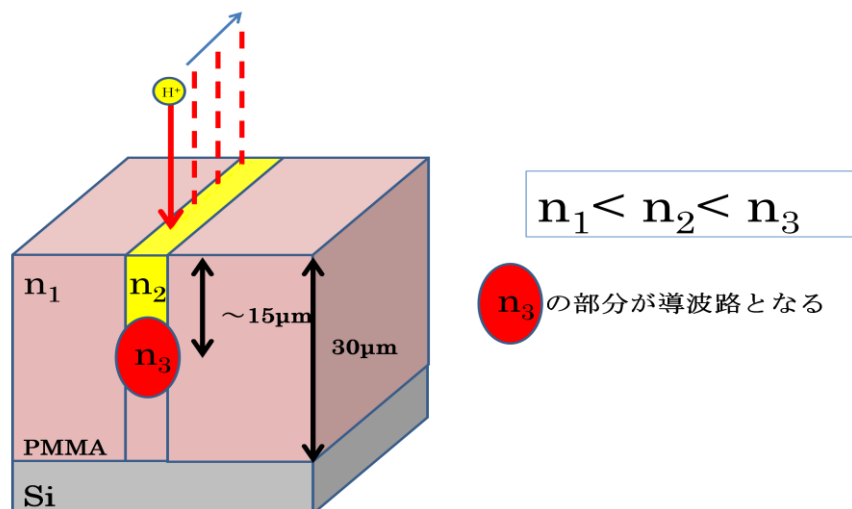


図 3-3.1 埋め込み型導波路 概略図

このような埋め込み導波路は 632.8 $\mu\text{m}$  帯の波長で既にシングルモード導波路として機能することが確かめられている[15]。本研究では、この構造において、ドーズ量、導波路幅、あるいはその他のパラメータを調節することで、1.55 $\mu\text{m}$  の波長の光でシングルモードとなる導波路条件の模索を行う。

### 3. 3. 2 PBW 照射条件

埋め込み型導波路については、実際に作製したサンプルの評価結果を受けてその後の条件を決めている。本節では過去に作製した全てのサンプル作製条件を示す。

表 3-2.1 2009 年 11 月 5 日 PBW 実施 in 芝浦 Sample NO.1,2

照射エネルギー	1MeV
ドーズ量	100nC/mm <sup>2</sup>
導波路幅	10 $\mu\text{m}$ (設定値)
ビーム電流	80pA
上クラッド	有り (10 $\mu\text{m}$ )

表 3-2.2 2009 年 11 月 25 日 PBW 実施 in 芝浦 Sample NO.3,4

照射エネルギー	1MeV
ドーズ量	100nC/mm <sup>2</sup>
導波路幅	10 $\mu\text{m}$ (設定値)
ビーム電流	85pA
ビーム径	2.8 $\mu\text{m}$
上クラッド	無し

表 3-2.3 2009 年 12 月 8 日 PBW 実施 in 芝浦 Sample NO.5,

照射エネルギー	1MeV
ドーズ量	30,50,70nC/mm <sup>2</sup>
導波路幅	10 $\mu\text{m}$ (設定値)
ビーム電流	10pA
ビーム径	1.36 $\mu\text{m}$
上クラッド	無し



表 3-2.4 2009 年 12 月 15 日 PBW 実施 in 芝浦 Sample NO.6,7

照射エネルギー	1MeV
ドーズ量	30,50,70,90nC/mm <sup>2</sup>
導波路幅	10 μ m(設定値)
ビーム電流	15pA
ビーム径	1.33 μ m
上クラッド	無し

### 3. 3. 3 導波路作製方法

埋め込み導波路については、へき開前の状態まで芝浦工業大学で作製していただいている。具体的には、スピコートで Si 基板上に PMMA 6 回塗り（1 回当たり 5 μ m 成膜で、30 μ m 厚）を行った後、PBW を行っていただいている。それ以降のへき開、表面観察、近視野像の観察などを本研究室で行う。

### 3. 3. 4 導波路評価結果と考察

作製したサンプルの順番 (①NO1,2 ②NO3,4 ③NO5 ④NO6,7) にその結果を載せ、同時に考察を述べていく。

#### ①NO1,2 評価結果

サンプル NO1,2 は表 3-2.1 の条件で作製したものだが、このサンプルは上クラッドまで芝浦工業大学で作製していただいた状態で、こちらに送って頂いたものである。へき開の際に NO2 のサンプルは膜が剥がれてしまい、うまく導波光を観測することができなかつたので今回は載せていない。NO1 についても、図 3-3.1 の光学顕微鏡によるサンプル表面観察結果からわかるように、一部、膜が剥がれたと思われる個所があった。

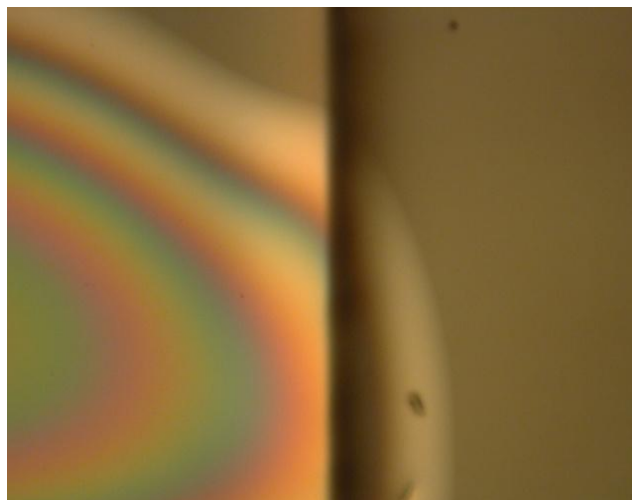


図 3-3.1 サンプル NO1 顕微鏡表面観察

端面観察結果を図 3-3.2 に示す。これを見ると、端面はきれいにカットできたように思える。なお、図は導波路が存在していると思われる場所での観測結果である。



図 3-3.2 NO1 顕微鏡端面観察結果

ITV カメラで NO1 の近視野像の観測を行った。結果を図 3-3.3 に示す。なお、測定系は第 2 章の図 2-3.2 と同じものを使用した。

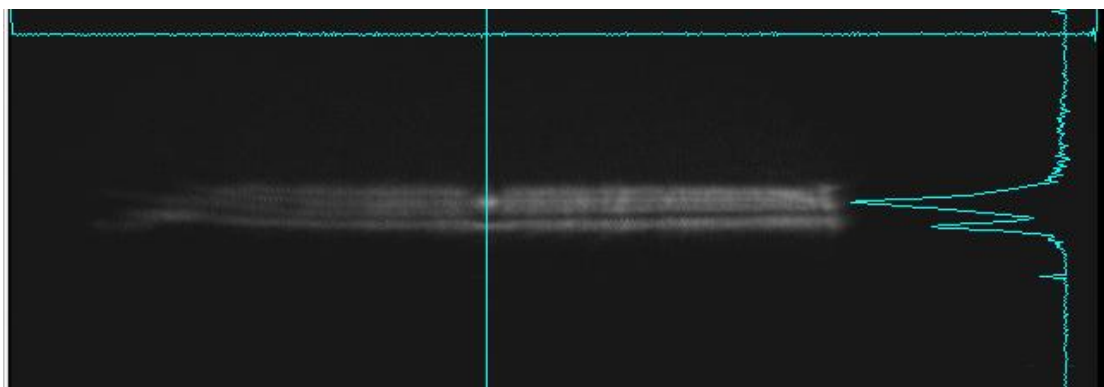
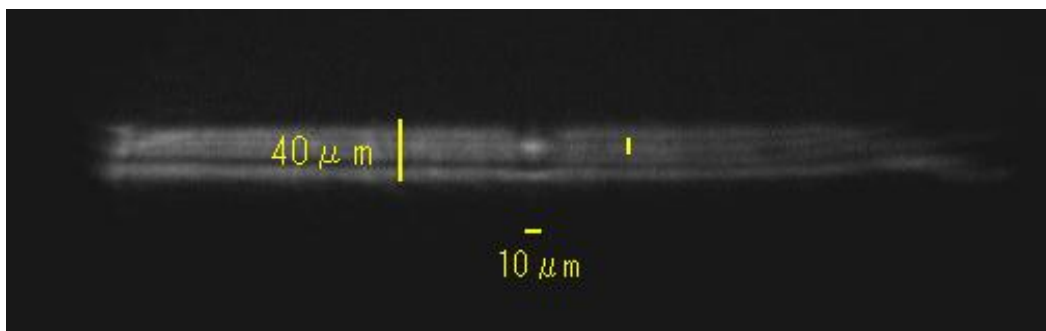


図 3-3.3 埋め込み導波路 NO1 近視野像測定結果

これを見ると、導波光らしき楕円状の光が見られるが、強度が低いこと、また、クラッド部の光も同時に観測されているため、導波路として機能しているとは言えない。

この結果を受け、次のサンプル NO3,4 では、上クラッドなしの状態、NO1,2 と同様の照射条件のサンプルを作製していただいた。

## ②NO3,4 評価結果

NO3,4 の照射条件は NO1,2 の照射条件のまま、上クラッドが付いていない状態の

ものである。まず、光学顕微鏡によるサンプル端面観察結果を図 3-3.4 に示す。この結果をみると、NO1 の時とは違い、ビーム照射部分がはっきりと見えていることが分かる。また、導波路幅は  $15\mu\text{m}$  程度で、侵入深さは  $20\mu\text{m}$  程度であることが分かった。また、ひびらしきものも観測することができた。

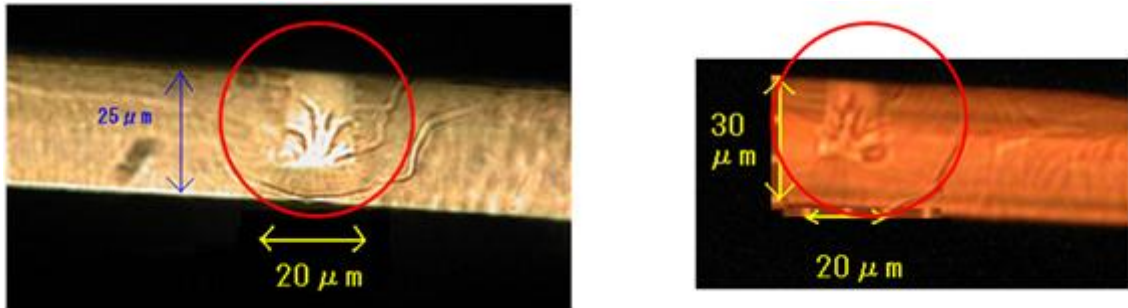


図 3-3.4 サンプル NO3,4 顕微鏡端面観察 (左 : NO3 右 : NO4)

図 3-3.5 に NO3 の近視野像を、図 3-3.6 に NO4 の近視野像を示す。

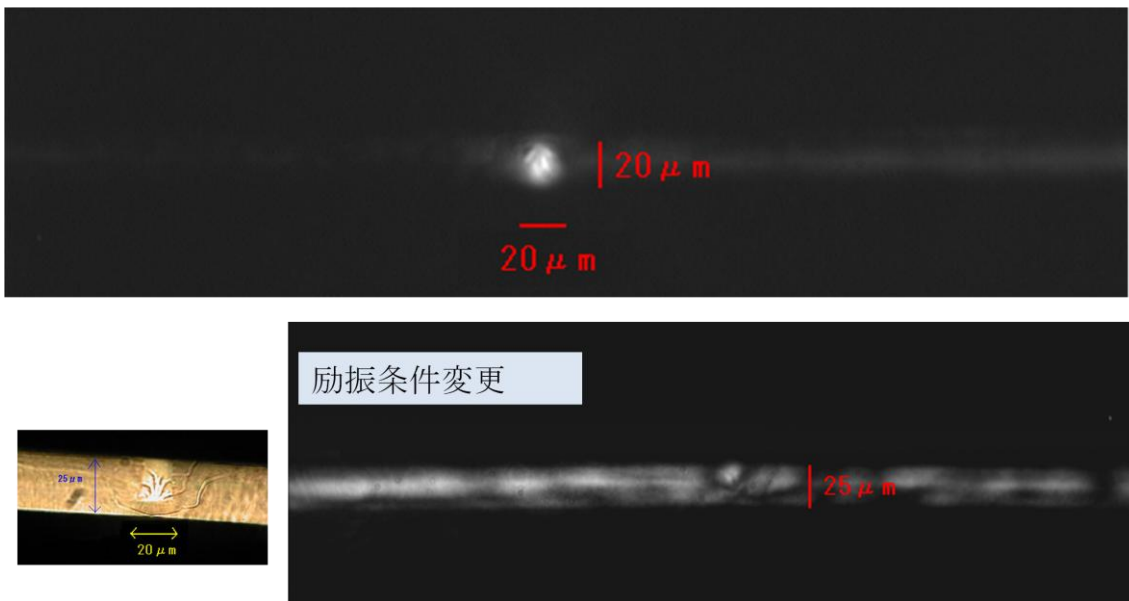
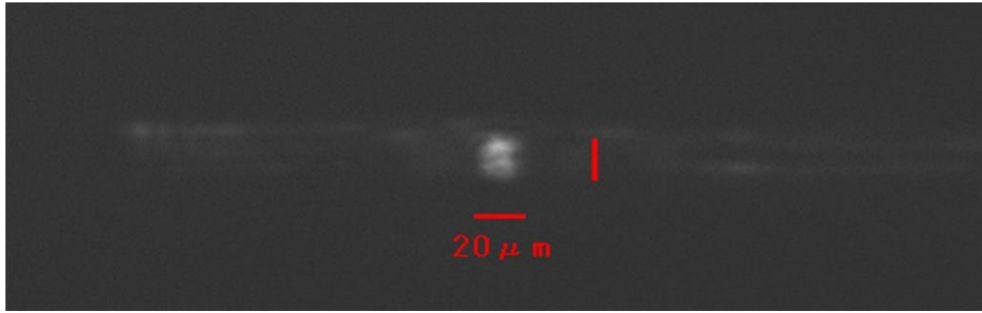


図 3-3.5 サンプル NO3 近視野像測定結果



励振条件変更

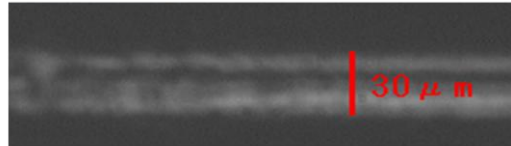
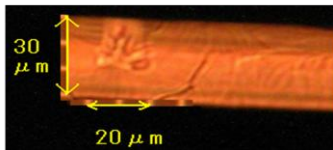


図 3-3.6 サンプル NO4 近視野像測定結果

この結果より、NO1 の時のようにクラッド部まで光が洩れていないため、導波路ができていることが分かる。ただ、NO3,4 どちらの導波光についても光が分裂しているので、この導波路はマルチモードであることが分かる。

以上の結果から、NO1 では上クラッドがあったために導波路の閉じ込めが弱く、導波路として機能しなかったように見える。だが、NO1 は膜が一部はがれていることから、上クラッドが原因で導波路ができなかったと決めつけてしまうのにはまだ早いと思われる。これについては、今後、上クラッド付きのサンプルについて再び評価を行い確認する予定である。

NO3,4 がマルチモード導波路となっていたことから、NO5,6,7 ではドーズ量を調整することで屈折率上昇効果を小さくし、シングルモード導波路を作製することを試みた。

### ③NO5 評価結果

NO5 は表 3-2.3 の条件で作製したサンプルである。まず光学顕微鏡による端面観察結果を示す。図 3-3.7 は反射光の、図 3-3.8 は透過光の観測結果である。この結果をみると、導波路幅は  $10\mu\text{m}$  程度で侵入深さは  $15\mu\text{m}$  程度となっていることが分かる。また、導波路部分からの透過光がとても弱くなっていることが分かる。

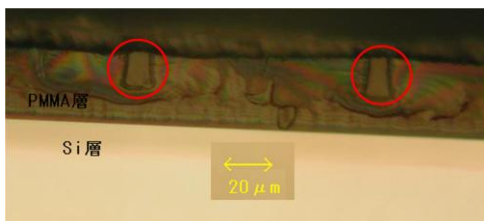


図 3-3.7 反射光観測結果

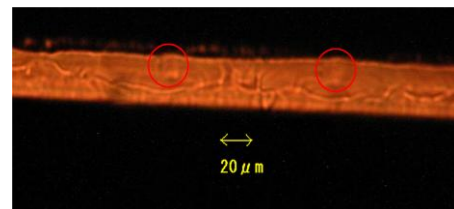


図 3-3.8 透過光観測結果

ITV カメラで NO5 の観測を行ったが、導波光をうまく観測することができなかった。やはり端面観察において透過光の確認の際、クラッド部との差がはっきりしていることが近視野像測定がうまくいくかどうかを左右すると言える。

### NO6,7 評価結果

NO6,7 は表 3-2.4 の条件で作製したサンプルである。図 3-3.9、3-3.10 に光学顕微鏡による端面観察の結果を示す。測定は反射光を測定している。この結果をみると、どの導波路も侵入深さは  $20\mu\text{m}$  程度であり、導波路幅は  $10\mu\text{m}$  程度であることが分かる。

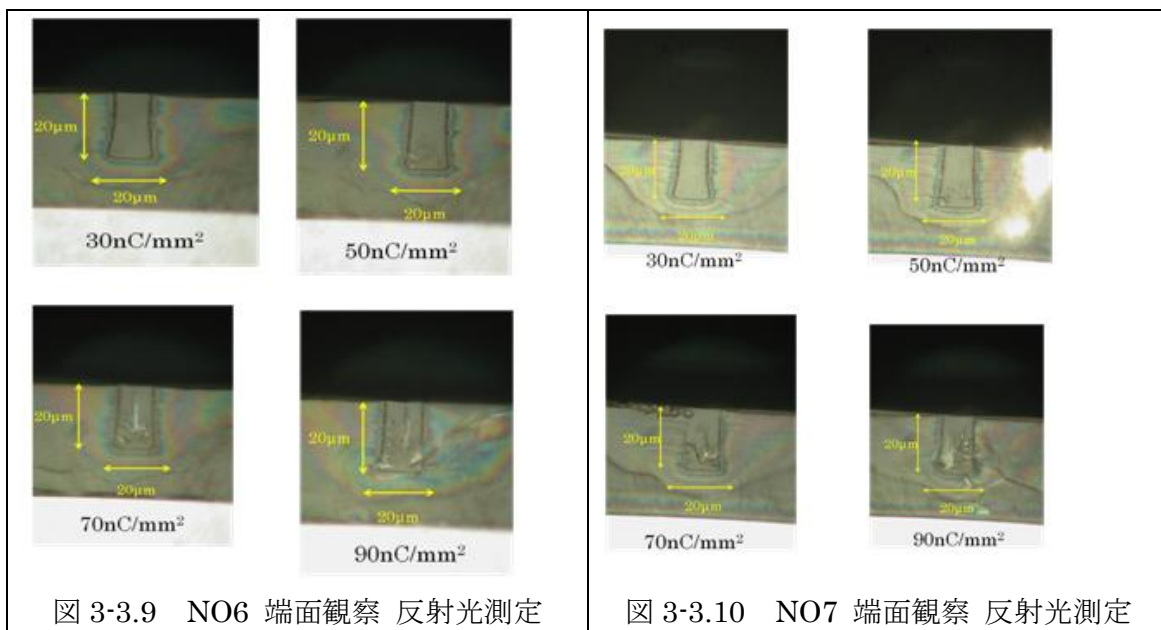


図 3-3.9 NO6 端面観察 反射光測定

図 3-3.10 NO7 端面観察 反射光測定

次に、図 3-3.11、図 3-3.12 に光学顕微鏡による透過光の観測結果を示す。

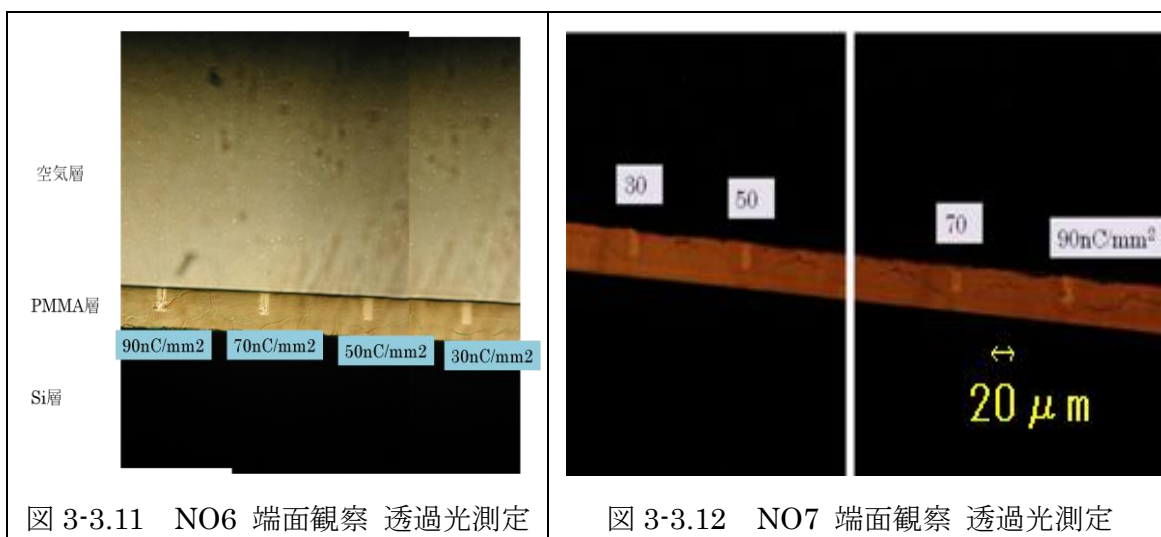


図 3-3.11 NO6 端面観察 透過光測定

図 3-3.12 NO7 端面観察 透過光測定

透過光の観察結果では、NO5 と違い、すべての導波路をはっきりと確認することができた。続いて、ITV カメラの観測結果を図 3-3.13 から 3-3.20 に示す。

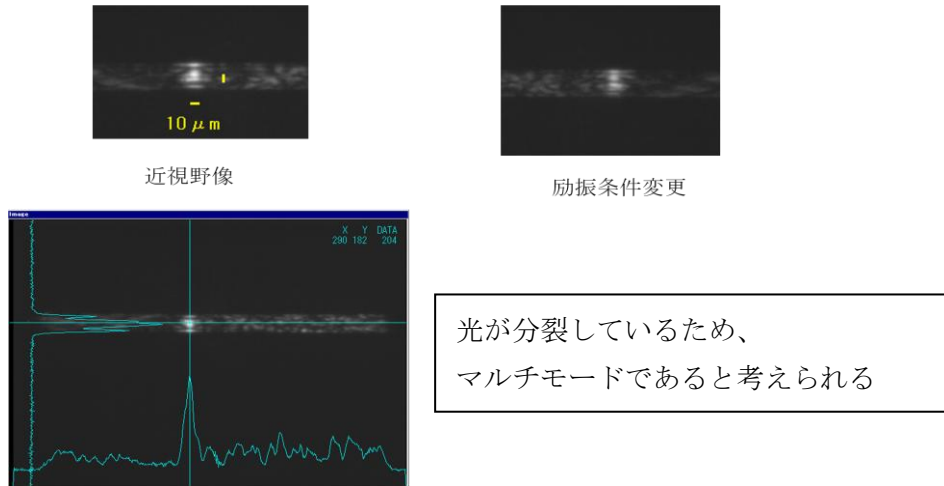


図 3-3.13 NO6 ドーズ量 30nC/mm<sup>2</sup> 近視野像評価結果

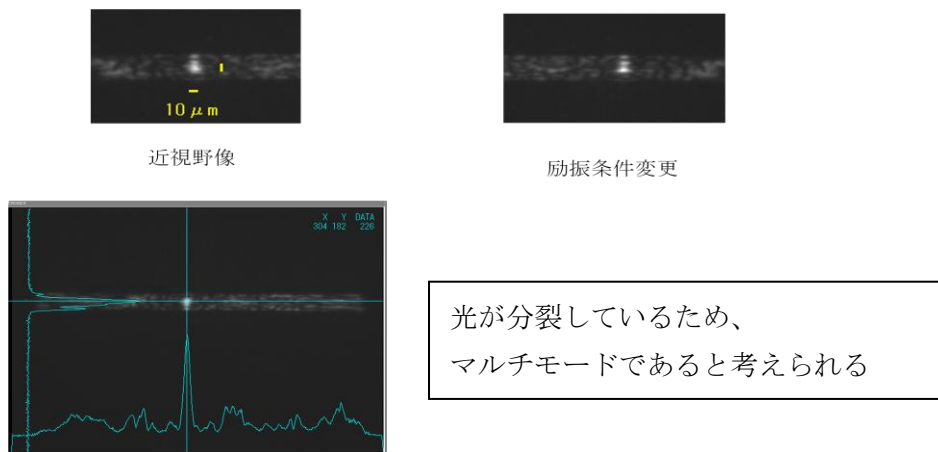


図 3-3.14 NO6 ドーズ量 50nC/mm<sup>2</sup> 近視野像評価結果

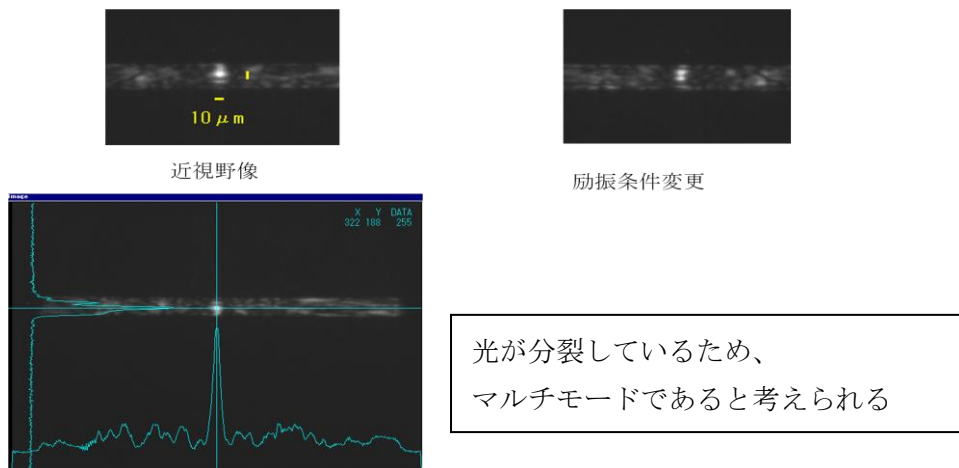


図 3-3.15 NO6 ドーズ量 70nC/mm<sup>2</sup> 近視野像評価結果

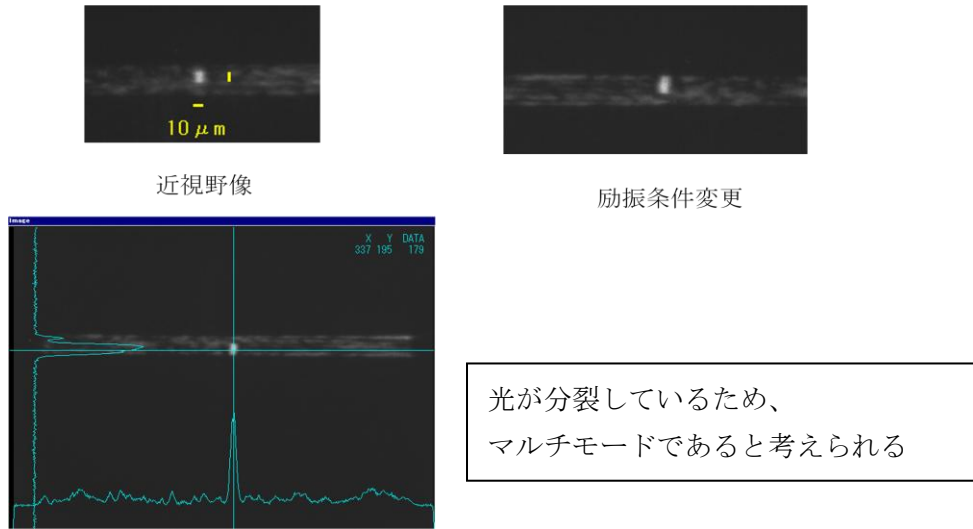


図 3-3.16 NO6 ドーズ量 90nC/mm<sup>2</sup> 近視野像評価結果

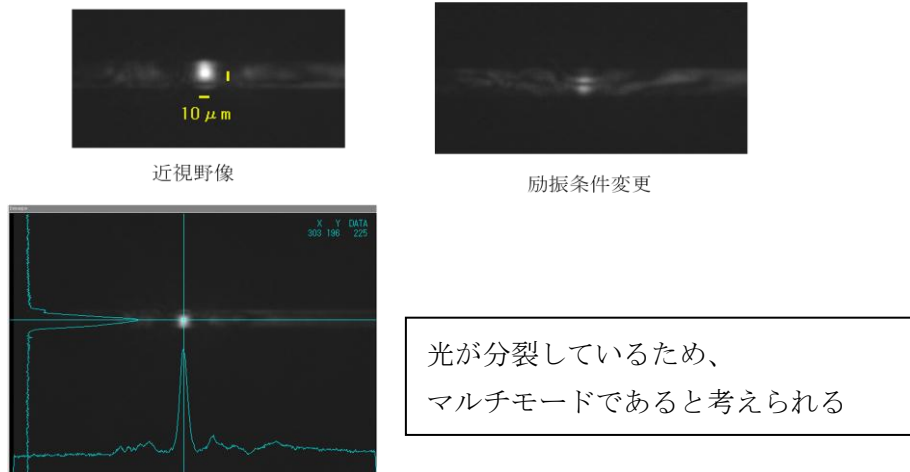


図 3-3.17 NO7 ドーズ量 30nC/mm<sup>2</sup> 近視野像評価結果

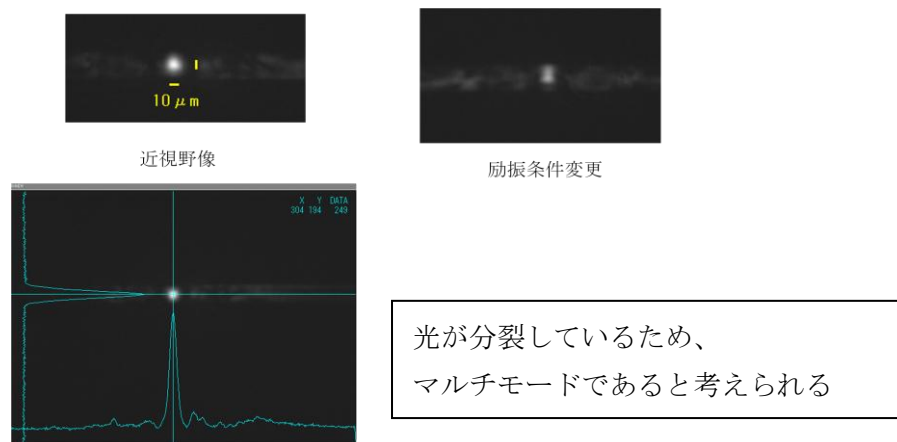


図 3-3.18 NO7 ドーズ量 50nC/mm<sup>2</sup> 近視野像評価結果



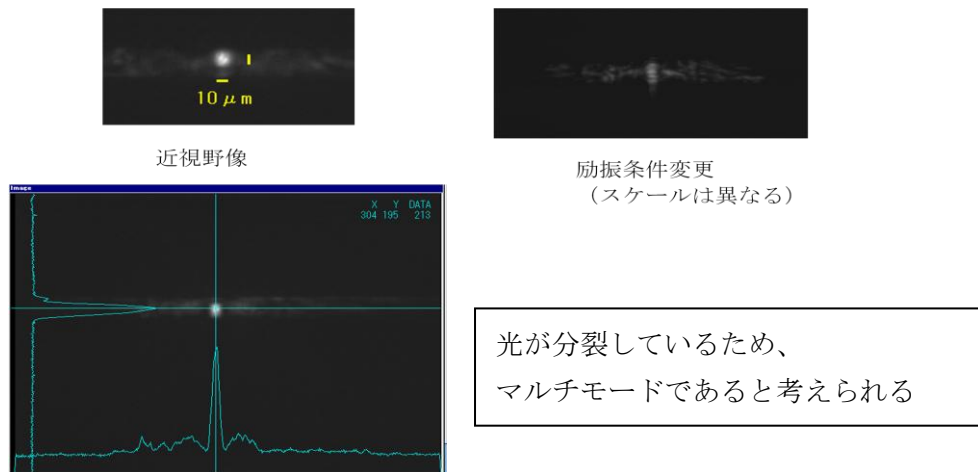


図 3-3.19 NO7 ドーズ量 70nC/mm<sup>2</sup> 近視野像評価結果

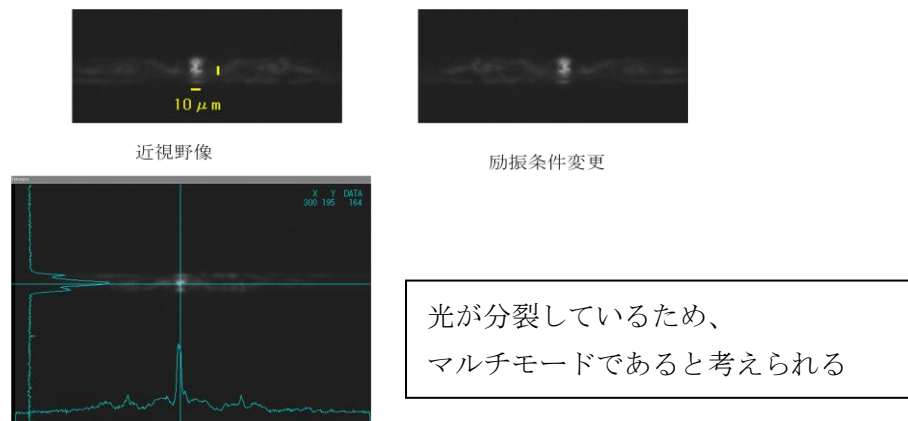


図 3-3.20 NO7 ドーズ量 90nC/mm<sup>2</sup> 近視野像評価結果

サンプル NO6、NO7 の近視野像の観測結果より、どちらも導波路として機能していることは確認できた。しかし、どのドーズ量の導波路も、マルチモード導波路となってしまう。原因として考えられることは、図 3-3.16 NO6 ドーズ量 90nC/mm<sup>2</sup> の結果を見るとよくわかるが、照射部分すべてが導波路となっており、ブラッグピークと透過部とで、屈折率差が無くなっているということである。原因はまだ不明だが、侵入深さ 20 μm の照射部すべてが導波路となってしまうことで、導波路サイズが大きいため、マルチモードになってしまっているということが原因の一つとして考えられる。

なお、ITV カメラで近視野像を観察している際にファイバを動かすと、近視野像もそれに伴い移動したことからもマルチモードであることが分かる。もし導波路がシングルモード導波路であれば近視野像はただ暗くなるはずであるが、位置が変わるということは、励振条件が変わることで異なるモードの近視野像が見えているということになるためである。そのため、今後は導波路幅を狭めることでシングルモード形成を目指す。



### 3. 4 まとめと今後の展開

新たな微細加工技術である PBW 法を利用することで、 $1.55\ \mu\text{m}$  帯の波長で機能するシングルモードの直線導波路作製を試みた。共同研究先である日本原子力研究開発機構ではビームエネルギーが強いため、コアとなる PMMA 層をビームが貫通する際の、分解、架橋反応を利用することで導波路作製を行った（透過型）。また、芝浦工業大学では PMMA 中にブラッグピーク（ビーム終端部）を生じさせ、そこで起こる大きな屈折率変化により導波路作製を試みた（埋め込み型）。

まず、透過型サンプルについてはシングルモード導波路作製に成功した。近視野像のサイズはファイバの MFD 値である  $10\ \mu\text{m}$  程度と考えられるため、ファイバとの整合性もよいものと考えられる。さらに、導波路幅をパラメータとして振ることによってシングル、マルチモードの境界を確認することができた。最終的には MZ 型光導波路作製を目標としているため、今後は曲がり導波路を形成し、損失等を確認する予定である。

一方、埋め込み型サンプルについては、マルチモードではあったが、導波光を確認することができた。シングルモード導波路を得るためにドーズ量を少なくしたものを作製したが、どれもマルチモード導波路となってしまった。原因として、ブラッグピークだけでなくプロトンビーム侵入部全てが導波路となってしまっていることが考えられる。これは光学顕微鏡による端面観察の様子から、照射部全体が一様に光っていることから推測した。また、ITV カメラで近視野像を観察している際にファイバを動かすと、近視野像もそれに伴い動くことから、導波路はマルチモードであると考えられる。これらの結果を受け、今後は導波路幅を狭めることでシングルモード形成を目指す。

本研究は始まってまだ 1 年と少ししか経っておらず、まだまだデータ数も少なく、プロトンビーム照射による屈折率向上効果がどの程度なのかもまだ分かっていない。理論についてもあまり触れることができていない状況なので、今後は

- ・プリズムを使用する、あるいは近視野像観測結果から屈折率上昇値を逆算する
- ・BPM(Beam Propagation Method)法等を用いてシングルモード条件を割り出す
- ・伝搬損失の評価を行う
- ・最適な構造、材料の選定を行う

といった検討を行う必要があるといえる。

## 第4章 液晶と多層膜を用いた光デバイスの設計と作製

### 4・1 はじめに

現在液晶は、テレビ、時計、自動車等の電子表示部に利用されており、我々の身近な材料となっている。液晶は既に100年以上前に発見されており、これまでに、高強度・高弾性率繊維等の材料系、あるいは細胞膜・DNA等のバイオに至るまで、幅広く応用されてきた[17]。そして、近年では光学特性の変化とその低消費電力動作が可能なことを利用し、光通信デバイスの材料としての利用への関心が高まっている。

特に本研究では、高密度波長分割多重通信 (DWDM : Dense Wavelength Division Multiplexing) において必要となる波長選択素子に着目した。DWDMでは一つのファイバにいくつもの波長の光を通すため、必要な波長の信号のみをとりだすデバイスが必要となる。このような光学フィルタは多層膜を利用したファブリーペロー共振器を作製することで実現可能となるが、これに液晶を利用することでチューナブルな波長可変フィルタとなる[18]。このようなフィルタは既に作製報告があるが、本研究室では液晶の実験を始めて間もないということもあるので、このフィルタの作製を通じて液晶を扱う実験のノウハウを確立しつつ、液晶を使った新たな光デバイスの作製の模索も行う。

具体的には  $\text{Ta}_2\text{O}_5/\text{SiO}_2$  多層膜ミラーを用いてファブリーペロー共振器を形成し、共振器のギャップに液晶を満たして波長可変フィルタを作製する。また、通常電界制御とともに、今回は光制御についても検討を行う。さらに液晶の複屈折性を利用し、波長可変フィルタとほぼ同様の作製手順で液晶導波路の作製も試みる。

#### 4. 1. 1 液晶について

液晶とは、液体と固体の中間の性質をもつような物質である。固体、液晶、液体との関係は、表4-1.1のように表すことができる[19]。

表 4-1.1 空間的な一様性の段階的消失 - 位置の無秩序化度合[19]

3次元的に結晶		通常の結晶
2次元的に結晶で、	1次元的に液体	中間層 (液晶)
1次元的に結晶で、	2次元的に液体	//
	3次元的に液体	通常の液体 (相)

液晶は相変化の起源から、温度変化によって液晶が形成されるサーモトロピック液晶、溶液濃度、温度によって形成されるリオトロピック液晶に分類される。そして分子形状から棒状分子で形成されるもの (カラムチック)、円盤状分子で形成されるもの (ディスクチック) 等に分類される。また、相状態からネマチック液晶、スメクチック液晶、コレステリック液晶などに分類される。

本研究では棒状分子で、重心位置の秩序のない、E7(メルク株式会社 N-I点 58.6°C)というネマチック液晶を用いて、波長可変フィルタの作製を目指す。ネマチック液晶は液晶ディスプレイの材料として、工業的にもっともよく用いられている液晶でもある。

#### 4. 1. 2 液晶の光学的性質

通常、液晶分子はランダムな方向を向いているが、電界を加えることにより配向ベクトル  $\mathbf{n}$  をそろえることができる (図 4-1.1 参照)。

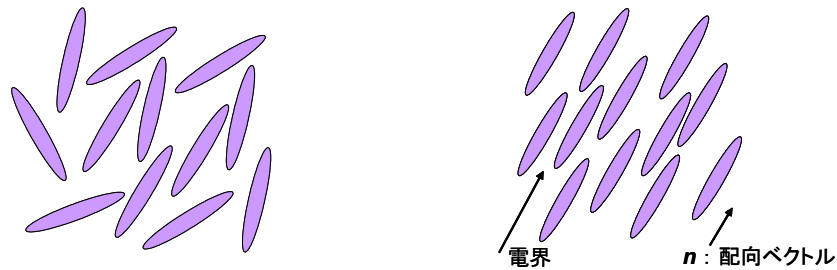


図 4-1.1 液晶分子の配列の概略

そして液晶に光を入射した際、配向ベクトル  $\mathbf{n}$  と光の電界が垂直か平行かで屈折率は異なる。この性質を利用することで、電界制御型の光通信素子を作製することができる。なお、光が  $\mathbf{n}$  に対して平行に入射して光の電界が  $\mathbf{n}$  に対して垂直になるときの屈折率を常光屈折率  $n_o$  といい、光が  $\mathbf{n}$  に対して垂直に入射して光の電界が  $\mathbf{n}$  に対して平行になるときの屈折率を異常光屈折率  $n_e$  という[20]。

なお、液晶に印加する電圧は交流である(本研究では矩形波 450Hz)。これは、直流電圧をかけると電気化学反応が起き、液晶が使用できなくなってしまうためである[21]。

### 4. 1. 3 液晶の光熱効果

本研究で用いるネマチック液晶は図 4-1.2 に示すようにネマチック相と等方相の相転移温度(NI 転移温度) $T_{NI}$  付近において、温度変化によりその屈折率が変化するという性質がある[22]。

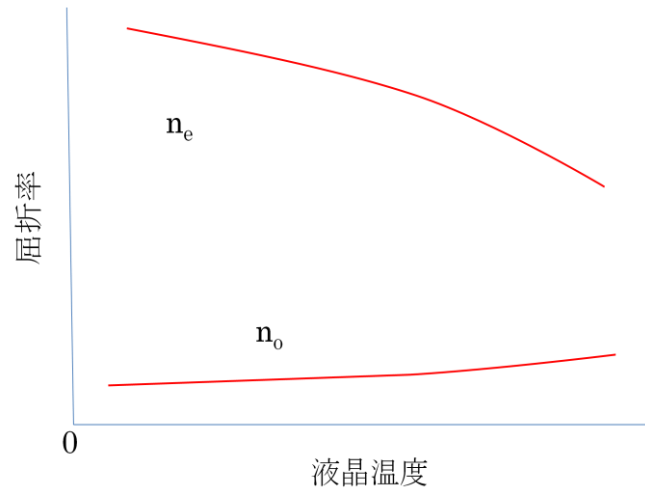


図 4-1.2 光熱効果の概略[22]

この性質を利用することで、4. 1. 2 節で述べた電界制御ではなく、光制御型のデバイス作製が可能になると考えられる。光照射を行った際のネマチック液晶の屈折率を

$$n = n_0 + n_2 I \quad (4-1.1)$$

として考える。ここで、 $n_0$ は光照射前の屈折率、 $n_2$ は非線形屈折率、 $I$ は照射光強度である。図 4-1.2 からわかるように  $n_2$ は正の値も負の値も取り得る。本研究で用いている E7 における  $n_2$ は常光よりも異常光においてその屈折率変化が大きいため、異常光を利用することで光制御が可能になると考えられる。

ネマチック液晶では色素を少量添加することで一般的な非線形光学材料と比べて(絶対値が)大きな  $n_2$  が得られるため、非線形光学材料として様々な光デバイスへの応用が試みられている。

#### 4. 1. 4 Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/SiO<sub>2</sub>多層膜について

ある波長域において特別な透過特性を持つ光学フィルタのような光学デバイスを作製する際、光学薄膜による多層膜を用いることが多い。多層膜フィルタを2つの材料で作製する際、屈折率差が大きい材料であることが好ましい。そこで高密度波長分割多重 (DWDM : Dense Wavelength Division Multiplexing) 用多層膜フィルタの材料として多く使われている五酸化タンタル (Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub>) は、高屈折率かつ低損失材料として知られている。屈折率は 2.11 ( $\lambda=1.55\mu\text{m}$ )、伝搬損失は 0.1dB/mm ( $\lambda=1.55\mu\text{m}$ ) である。また屈折率差を出すために、低屈折率材料として、SiO<sub>2</sub> は屈折率が 1.45 と低く、十分な屈折率差が得られ、低損失でもあるので多層膜フィルタとして適した材料である。実際に、DWDM 用多層膜フィルタの材料として Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/SiO<sub>2</sub> の多層膜は多く使われている。

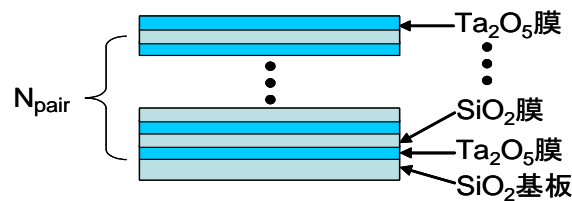


図 4-1.3 Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub> /SiO<sub>2</sub> 多層

#### 4. 1. 5 ファブリーペロー共振器

一定領域に特定の波長の光を定在波として閉じ込めた光の共振器は、多重干渉により非常に鋭い周波数特性をもつ干渉計である。周波数を制御する典型的な素子として、レーザ、波長フィルタなど幅広く利用されている。共振器の中でもファブリーペロー共振器 (Fabry-Perot resonator) について説明する。

平行に配置されている2つの鏡に光が入射する場合を考える。光は反射され、2つの鏡を透過することは出来ないと考えられるが、実際には干渉によって特定の波長の光だけ透過する。この干渉計をファブリーペロー共振器と言う。

鏡に垂直に光が入射すると、2つの鏡の間で反射を繰り返す。2つの鏡の間の距離とその間の媒質の屈折率の関係から導き出される波長の光が入射すると0回反射、2回反射、4回反射・・・し、この重ね合わせの光が透過光となる。鏡の反射率が高いほど、透過スペクトルは鋭くなる。このように特定の波長の光だけ透過させることが出来る共振器は、バンドパスフィルタとして応用ができると言える。また、共振器長、もしくは共振器間の屈折率を可変にすることによって波長可変フィルタや発振波長が可変なレーザへの応用も考えられる[23]。

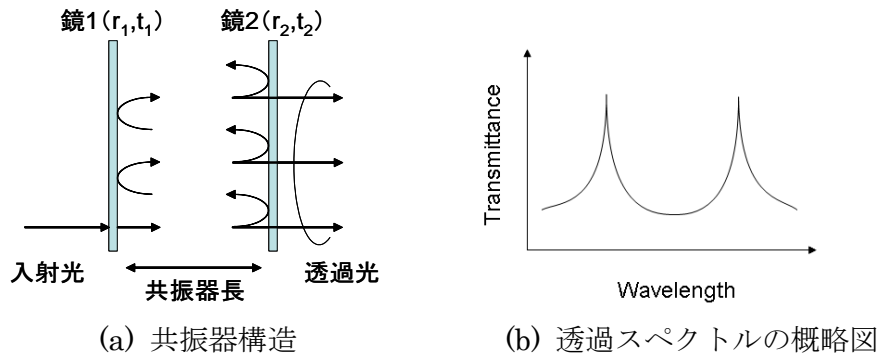


図 4-1.4 ファブリーペロー共振器の構成

#### 4. 1. 6 液晶の配向方向の計算方法

液晶の配向方向を議論する際、微視的構造まで着目する必要はなく、連続体として扱うことでその配向を計算することができる（液晶の連続体理論）。以下、文献[24][25]を参考にしながら、ネマチック液晶セルへの電界印加による配向制御について、その理論を簡潔に述べる。

液晶に外的な力が何も働かないとき、液晶分子の長軸方向は全て配向方向に揃うことで基底状態、つまり最小エネルギーをとる。この最小エネルギーを  $F_0$ 、配向が場所によって変化するような場合のエネルギーを  $F$  として

$$F - F_0 = \int f_{elas} dr \quad (4-1.2)$$

で定義される  $f_{elas}$  をフランクの弾性自由エネルギー密度という。このとき、積分は液晶全体にわたって行われる。液晶の配向方向ベクトル（以下ダイレクター）を  $\mathbf{n}$ 、配向の歪みを  $\nabla \mathbf{n}$  とすると、 $f_{elas}$  は  $\nabla \mathbf{n}$  の関数として表わされ、フランクの弾性自由エネルギー密度は

$$f_{elas} = \frac{1}{2} K_1 (\nabla \cdot \mathbf{n})^2 + \frac{1}{2} K_2 (\mathbf{n} \cdot \nabla \times \mathbf{n} + q_0)^2 + \frac{1}{2} K_3 (\mathbf{n} \cdot \nabla \times \mathbf{n})^2 \quad (4-1.3)$$

と表すことができる。ここで、 $K_1$ 、 $K_2$ 、 $K_3$  はそれぞれ空間的広がり、ねじれ、曲がりに関する弾性定数である。ここで、図 4-1.5 のような構造を考える。この場合、電場は  $z$  方向に加えられており、 $\mathbf{n}$  は  $xz$  面内で変化するので、 $\mathbf{n}$  と  $x$  軸のなす角を  $\theta$  として

$$\mathbf{n} = (\cos \theta(z), 0, \sin \theta(z)) \quad (4-1.4)$$

と表すことができる。(4-1.4)を(4-1.3)に代入して

$$f_d = \frac{1}{2} K(\theta) \left( \frac{d\theta}{dz} \right)^2 \quad (4-1.5)$$

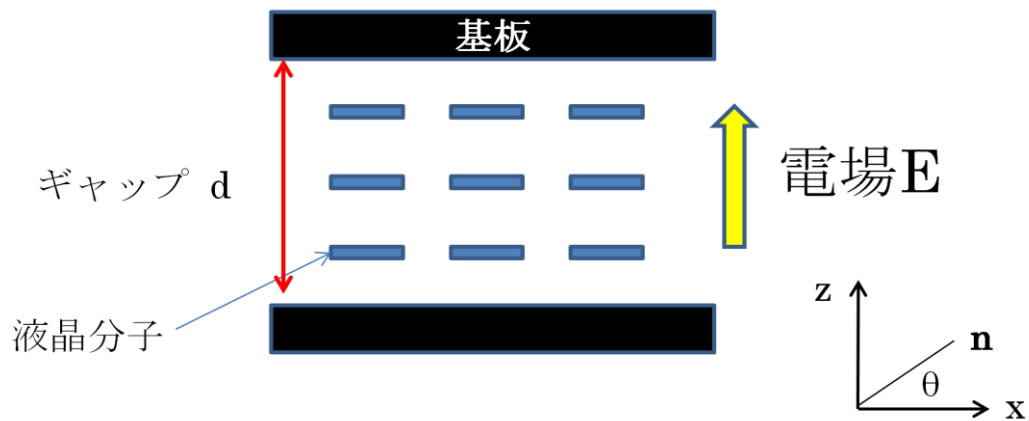


図 4-1.5 液晶の配向と電場の向き

$$K(\theta) = K_1 \cos^2 \theta + K_3 \sin^2 \theta \quad (4-1.6)$$

を得る。一方、セルに電場が与えられると、セル内の電気エネルギーは単位断面あたり、

$$f_e = -\frac{1}{2} \int_0^d \mathbf{D} \cdot \mathbf{E} dz \quad (4-1.7)$$

のように表すことができる。途中の式は割愛するが、結局

$$f_e = \frac{1}{2} (\varepsilon_{\perp} + \varepsilon_a \sin^2 \theta) \left( \frac{d\phi}{dz} \right)^2 \quad (4-1.8)$$

と表すことができる。なお、 $\varepsilon_{\parallel}, \varepsilon_{\perp}$  をそれぞれ電場とダイレクターが平行な時の液晶の比誘電率、電場とダイレクターが垂直な時の液晶の比誘電率とし、 $\varepsilon_a = \varepsilon_{\parallel} - \varepsilon_{\perp}$  を誘電率異方性という。図 4-1.5 のような系において、この系が持つ熱量を  $Q$ 、温度を  $T$  で表わすと、エントロピー  $S$  は次式のようになる

$$S = \frac{Q}{T} \quad (4-1.9)$$

熱力学第 2 法則によれば、系の状態変化によりエントロピーは必ず増大するため、次の不等式が成り立つ

$$T\Delta S > \Delta Q \quad (4-1.10)$$

ただし、等温過程とした。次式で状態量  $F$  を定義する。

$$F = U - TS \quad (4-1.11)$$

$F$  は内部エネルギー  $U$  のうち、熱的な作用しかしない部分  $TS$  を除いた、電氣的、機械的工作に代わり得る部分である。この意味で  $F$  を自由エネルギーと呼ぶことができる。

F の等温過程での変化は

$$\Delta F = \Delta U - T\Delta S \quad (4-1.12)$$

であらわされる。一方、系の内部エネルギーの増加  $\Delta U$  は系が外部から受け取った熱量  $\Delta Q$  と、外部が系にした仕事  $\Delta W$  との和に等しい(エネルギー保存則、熱力学第一法則)から、

$$\Delta U = \Delta W + \Delta Q \quad (4-1.13)$$

これを式(4-1.11)に代入すると

$$\Delta F = \Delta W + \Delta Q - T\Delta S \quad (4-1.14)$$

となる。ここで、(4-1.9)の関係から、

$$\Delta F < \Delta W \quad (4-1.15)$$

である。あるいは、

$$G = F - W \quad (4-1.16)$$

で定義される G を用いると、

$$\Delta G < 0 \quad (4-1.17)$$

となる。すなわち、系は G が減少する向きに変化していくことが分かる。それゆえ、変化の止んだ平衡状態では G は最小値をとる。今回の系では、F は

$$F = F_d + F_e \quad (4-1.18)$$

である。また、W は平衡状態に達するまでに系外の低電圧源がセル(系)にした仕事であり、

$$W = \frac{1}{2} \int_0^d (\varepsilon_{\perp} + \varepsilon_a \sin^2 \theta) \left( \frac{d\phi}{dz} \right)^2 dz \quad (4-1.19)$$

と表すことができる。以上より、

$$G = \frac{1}{2} \int_0^d \left[ K \left( \frac{d\theta}{dz} \right)^2 - (\varepsilon_{\perp} + \varepsilon_a \sin^2 \theta) \left( \frac{d\phi}{dz} \right)^2 \right] dz \quad (4-1.20)$$

を最小とする  $\theta$  が配向角となる。 $\theta$  が G を最小にする時、G は  $\theta$  の変動について低留置をとる。従って、 $\delta \theta$  を与えたとき、 $\delta G$  は 0 でなければならない。また、 $z=0, d$  において、配向角  $\theta$ 、電位  $\phi$  は 0 とすると、

$$\int_0^d \left[ K \frac{d^2 \theta}{dz^2} + \varepsilon_a \sin \theta \cos \theta \left( \frac{d\phi}{dz} \right)^2 \right] d\theta dz \quad (4-1.21)$$

となり、任意の  $\Delta \theta$  に対して、必ず式(4-1.21)が成り立つためには

$$K \frac{d^2 \theta}{dz^2} + \varepsilon_a \sin \theta \cos \theta \left( \frac{d\phi}{dz} \right)^2 = 0 \quad (4-1.22)$$



でなければならない。この式が平衡状態のダイレクター配向  $\theta$  を与える方程式と考えてよい。

なお、詳細は割愛するが、マクスウェル方程式  $\text{div } \mathbf{D}=0$  より、電位  $\phi(z)$  については次式が成り立つ。

$$\left(\varepsilon_{\perp} + \varepsilon_a \sin^2 \theta\right) \frac{d^2 \phi}{dz^2} + \varepsilon_a \sin 2\theta \frac{d\theta}{dz} \frac{d\phi}{dz} = 0 \quad (4-1.23)$$

ここで、境界条件は

$$\theta(0) = \theta(d) = \theta_0, \quad \phi(0) = 0, \quad \phi(d) = V \quad (4-1.24)$$

である。式(4-1.23) (4-1.24)を差分近似して数値解を求める。まず、 $z$  軸の区間 $[0,d]$ を  $N$  等分割し、各点  $z_j=jh$  における  $\theta$ 、 $\phi$  の値を求めることを考える。ただし、 $h=d/N, j=0,1, \dots, N$  である。まず、 $g$  を  $\theta$ 、あるいは  $\phi$  として考え、 $g_j=g(z_j)$  とする。液晶層内部の各点  $z_j$  における微分係数を次のようにして近似する。 $g_{j\pm 1}$ (ただし、 $j=1, \dots, N-1$ )を  $z_j$  のまわりに Taylor 展開して、

$$g_{j\pm 1} = g_j \pm h \left. \frac{dg}{dz} \right|_{z=z_j} + \frac{h^2}{2} \left. \frac{d^2 g}{dz^2} \right|_{z=z_j} \pm \frac{h^3}{3!} \left. \frac{d^3 g}{dz^3} \right|_{z=z_j} + O[h^4] \quad (4-1.25)$$

を得る。ただし、 $O[h^n]$ は  $h^n$  および、それより高次項の総和である。式(4-1.25)より

$$\left. \frac{dg}{dz} \right|_{z=z_j} \sim \frac{g_{j+1} - g_{j-1}}{2h} \quad (4-1.26)$$

$$\left. \frac{d^2 g}{dz^2} \right|_{z=z_j} \sim \frac{g_{j+1} + g_{j-1} - 2g_j}{h^2} \quad (4-1.27)$$

を得る。なお、このとき、 $h$  は十分小さいとして、 $O[h^n]$ は無視している。式(4-1.22)と(4-1.23)の微分係数をそれぞれ式(4-1.26), (4-1.27)の右辺第1項で置き換える。境界条件(4-1.24)に注意して、

$$-8(\varepsilon_{\perp} + \varepsilon_a \sin^2 \theta_j) \phi_1 + [4(\varepsilon_{\perp} + \varepsilon_a \sin^2 \theta_1) + \varepsilon_a (\theta_0 - \theta_2) \sin 2\theta_1] \phi_2 = 0$$

$$[4(\varepsilon_{\perp} + \varepsilon_a \sin^2 \theta_1) + \varepsilon_a (\theta_{j-1} - \theta_{j+1}) \sin 2\theta_j] \phi_{j-1} - 8(\varepsilon_{\perp} + \varepsilon_a \sin^2 \theta_j) \phi_j + [4(\varepsilon_{\perp} + \varepsilon_a \sin^2 \theta_j) + \varepsilon_a \sin 2\theta_j (\theta_{j+1} - \theta_{j-1})] \phi_{j+1} = 0$$

$$[4(\varepsilon_{\perp} + \varepsilon_a \sin^2 \theta_{N-1}) + \varepsilon_a (\theta_{N-2} - \theta_N) \sin 2\theta_{N-1}] \phi_{N-2} - 8(\varepsilon_{\perp} + \varepsilon_a \sin^2 \theta_{N-1}) \phi_{N-1} \\ = -[4(\varepsilon_{\perp} + \varepsilon_a \sin^2 \theta_{N-1}) + \varepsilon_a \sin 2\theta (\theta_N - \theta_{N-2})] V$$

$$(4-1.28)$$

$$\begin{aligned}
-2\theta_1 + \theta_2 &= -\theta_0 - \frac{\varepsilon_a}{4K} \phi_2^2 \sin \theta_1 \cos \theta_1 \\
\theta_{j-1} - 2\theta_j + \theta_{j+1} &= -\frac{\varepsilon_a}{4K} (\phi_{j-1} - \phi_{j+1})^2 \sin \theta_j \cos \theta_j \\
\theta_{N-2} - 2\theta_{N-1} &= -\theta_N - \frac{\varepsilon_a}{4K} (\phi_{N-2} - V)^2 \sin \theta_{N-1} \cos \theta_{N-1}
\end{aligned}
\tag{4-1.29}$$

を得る。ただし、 $j=2, \dots, N-2$  である。これらの式を用い、以下のような手順で配向角を求める。

- ・与えられている初期ダイレクター配向  $\{\theta_j^0\}$  に対する電位分布を求める。
  - ・  $\{\theta_j^0\}$  を式(4-1.28)に代入し、解を  $\{\phi_j^0\}$  とする。これを式(4-1.29)右辺に代入する。同式は  $\theta_1, \dots, \theta_{N-1}$  についての方程式になるが、非線形なので、以下の反復手続により解く。
  - ・与えられている  $\{\theta_j^0\}$  を右辺に代入して一次方程式とする。
  - ・解  $\{\theta_j^1\}$  を再び式(4-1.28)に代入して解く。これを  $\{\phi_j^1\}$  とする。
  - ・恐らく  $\{\theta_j^1\} \neq \{\theta_j^0\}$  であろうから、 $\{\theta_j^1\}$ 、 $\{\phi_j^1\}$  を式(4-1.29)右辺に、 $\{\theta_j^1\}$  を同式左辺に代入すると等号は成立しなくなる。そこで、 $\{\theta_j^1\}$ 、 $\{\phi_j^1\}$  を式(4-1.29)右辺に代入したまま  $\theta_j$  について解く。
  - ・解  $\{\theta_j^2\}$  を式(4-1.28)に代入して解  $\{\phi_j^2\}$  を求める。
  - ・  $\{\theta_j^2\}$ 、 $\{\phi_j^2\}$  を先程同様、式(4-1.29)両辺に代入してみて等号の成否を調べる。
  - ・両辺が等しくないなら、 $\{\theta_j^2\}$ 、 $\{\phi_j^2\}$  を式(4-1.29)右辺に代入したまま、 $\{\theta_j^3\}$  を求める。
- 以上の手続きを両辺の差が所定の値以下になるまで続ける。ただし、集束しない場合に備えた対策を講じておく。例えば、 $\{\theta_j^{m+2}\}$  を求める際に、 $\{\theta_j^{m+2}\}$  を直接式(4-1.29)の右辺に代入せず、前回の  $\{\theta_j^m\}$  を加味して  $\{(1-s)\theta_j^m + s\theta_j^{m+1}\}$  を代入するなどである。s は分割数 N、計算速度、安定性などを勘案して調節される。

#### 4. 1. 7 多層膜の光学特性の計算方法

多層膜の光学特性を解析するには、電気回路モデルを用いる方法があるが、今回は  $4 \times 4$  マトリックス法を用いて計算した。 $4 \times 4$  マトリックスは誘電率がある方向 (z 方向) で変わるような媒質内の光の伝搬を扱うのに適している。以下、 $4 \times 4$  マトリックス法について述べる。

MKS 単位系で、マクスウェル方程式は次のように与えられる。

$$\text{rot}\mathbf{E} = -\frac{\partial\mathbf{B}}{\partial t} \quad (4-1.27)$$

$$\text{rot}\mathbf{H} = \frac{\partial\mathbf{D}}{\partial t} \quad (4-1.28)$$

$$\text{div}\mathbf{D} = 0 \quad (4-1.29)$$

$$\text{div}\mathbf{B} = 0 \quad (4-1.30)$$

ここで、媒質中に電荷、電流は存在しないものとする。媒質が磁性体でなければ、

$$\mathbf{D} = \varepsilon_0 \varepsilon \mathbf{E} \quad (4-1.31)$$

$$\mathbf{B} = \mu_0 \mathbf{H} \quad (4-1.32)$$

ここで、 $\varepsilon_0$ 、 $\mu_0$  は真空での誘電率と透磁率である。 $\varepsilon$  は比誘電率で、媒質が異方性媒質であった場合テンソル量となる。(4-1.27)、(4-1.31)から

$$\text{rot}\mathbf{E} = -\mu_0 \frac{\partial\mathbf{H}}{\partial t} \quad (4-1.33)$$

(4-1.28)、(4-1.31)から

$$\text{rot}\mathbf{H} = -\varepsilon_0 \varepsilon \frac{\partial\mathbf{E}}{\partial t} \quad (4-1.34)$$

を得る。ここで、 $\varepsilon$  は z の関数である。x z 平面の電界と磁界は次のように書ける

$$\mathbf{E} = \mathbf{E}_0(z) \exp(ik_x x - i\omega t) \quad (4-1.35)$$

$$\mathbf{H} = \mathbf{H}_0(z) \exp(ik_x x - i\omega t) \quad (4-1.36)$$

等方性媒質 (屈折率  $n_1$ ) から異方性媒質へ光が入射した場合 (図 4-1.6)、 $z=0$  における、x 方向成分の光の連続性から、 $k_x$  は次のようになる。

$$k_x = \frac{n_1 \omega}{c} \sin \theta_i \quad (4-1.37)$$

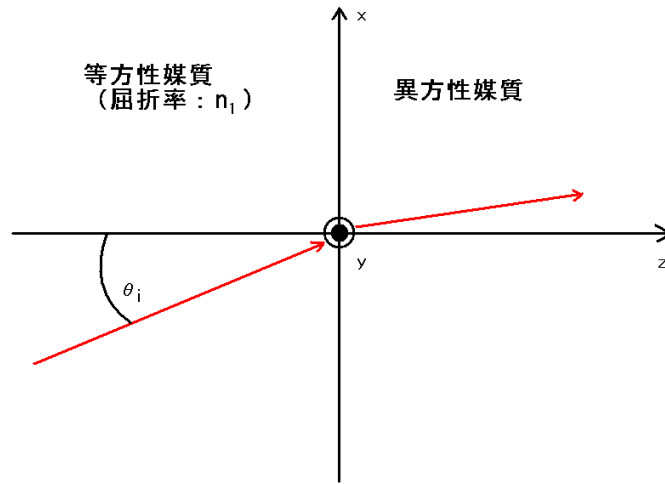


図 4-1.6 等方性媒質から異方性媒質への光の伝搬

式(4-1.35)、(4-1.36)を(4-1.33)、(4-1.34)へ代入する

$$\begin{aligned}
 (\text{rot}\mathbf{E})_x &= \frac{\partial E_z}{\partial y} - \frac{\partial E_y}{\partial z} = -\frac{\partial E_{0y}}{\partial z} e^{i(k_x x - \omega t)} \\
 &= \mu_0 \frac{\partial H_{0x}}{\partial t} = i\omega\mu_0 H_{0x} e^{i(k_x x - \omega t)}
 \end{aligned} \tag{4-1.38}$$

これより

$$\frac{\partial E_{0y}}{\partial z} = -i\omega\mu_0 H_{0x} \tag{4-1.39}$$

を得る。同様にして

$$\frac{\partial E_{0x}}{\partial z} = ik_x E_{0z} + i\omega\mu_0 H_{0z} \tag{4-1.40}$$

$$k_x E_{0y} = \omega\mu_0 H_{0z} \tag{4-1.41}$$

$$\frac{\partial E_{0y}}{\partial z} = i\omega\epsilon_0 (\epsilon_{11} E_{0x} + \epsilon_{12} E_{0y} + \epsilon_{13} E_{0z}) \tag{4-1.42}$$

$$\frac{\partial H_{0x}}{\partial z} = ik_x H_{0z} - i\omega\epsilon_0 (\epsilon_{21} E_{0x} + \epsilon_{22} E_{0y} + \epsilon_{23} E_{0z}) \tag{4-1.43}$$

$$k_x H_{0y} = -\omega\epsilon_0 (\epsilon_{31} E_{0x} + \epsilon_{32} E_{0y} + \epsilon_{33} E_{0z}) \tag{4-1.44}$$

を得る。式(4-1.42)、(4-1.43)、(4-1.44)で

$$\boldsymbol{\epsilon} = \begin{bmatrix} \epsilon_{11} & \epsilon_{12} & \epsilon_{13} \\ \epsilon_{21} & \epsilon_{22} & \epsilon_{23} \\ \epsilon_{31} & \epsilon_{32} & \epsilon_{33} \end{bmatrix} \tag{4-1.45}$$

と置き、式(4-1.39)～(4-1.45)から  $E_{0z}$ 、 $H_{0z}$  を消去する。(4-1.42)式

$$H_{0z} = \frac{k_x}{\omega\mu_0} E_{0y} \quad (4-1.46)$$

(4-1.44)式

$$E_{0z} = -\frac{1}{\varepsilon_{33}} \left( \frac{k_x}{\omega\mu_0} H_{0y} + \varepsilon_{31} E_{0x} + \varepsilon_{32} E_{0y} \right) \quad (4-1.47)$$

を(4-1.40)、(4-1.42)、(4-1.43)へ代入する。

$$\frac{\partial E_{0x}}{\partial z} = \left( i\omega\mu_0 - \frac{ik_x^2}{\varepsilon_{33}\omega\varepsilon_0} \right) H_{0y} - \frac{ik_x}{\varepsilon_{33}} (\varepsilon_{31} E_{0x} + \varepsilon_{32} E_{0y}) \quad (4-1.48)$$

$$\frac{\partial H_{0y}}{\partial z} = i\omega\varepsilon_0 \left\{ \left( \varepsilon_{11} - \frac{\varepsilon_{13}\varepsilon_{31}}{\varepsilon_{33}} \right) E_{0x} + \left( \varepsilon_{12} - \frac{\varepsilon_{13}\varepsilon_{32}}{\varepsilon_{33}} \right) E_{0y} - \frac{\varepsilon_{13}k_x}{\varepsilon_{33}\omega\varepsilon_0} H_{0y} \right\} \quad (4-1.49)$$

$$\frac{\partial H_{0x}}{\partial z} = -i\omega\varepsilon_0 \left\{ \left( \varepsilon_{21} - \frac{\varepsilon_{23}\varepsilon_{31}}{\varepsilon_{33}} \right) E_{0x} + \left( \varepsilon_{22} - \frac{\varepsilon_{23}\varepsilon_{32}}{\varepsilon_{33}} - \frac{k_x^2}{\omega^2\varepsilon_0\mu_0} \right) E_{0y} - \frac{\varepsilon_{13}k_x}{\varepsilon_{33}\omega\varepsilon_0} H_{0y} \right\} \quad (4-1.50)$$

を得る。(4-1.39)、(4-1.48)、(4-1.49)、(4-1.50)を次のようにまとめる

$$\frac{\partial E_{0x}}{\partial z} = -\frac{ik_x\varepsilon_{31}}{\varepsilon_{33}} E_{0x} + \left( i\omega\mu_0 - \frac{ik_x^2}{\varepsilon_{33}\omega\varepsilon_0} \right) H_{0y} - \frac{ik_x\varepsilon_{32}}{\varepsilon_{33}} E_{0y} \quad (4-1.51)$$

$$\frac{\partial H_{0y}}{\partial z} = i\omega\varepsilon_0 \left( \varepsilon_{11} - \frac{\varepsilon_{13}\varepsilon_{31}}{\varepsilon_{33}} \right) E_{0x} - \frac{i\varepsilon_{13}k_x}{\varepsilon_{33}} H_{0y} + i\omega\varepsilon_0 \left( \varepsilon_{12} - \frac{\varepsilon_{13}\varepsilon_{32}}{\varepsilon_{33}} \right) E_{0y} \quad (4-1.52)$$

$$\frac{\partial E_{0y}}{\partial z} = -i\omega\mu_0 H_{0x} \quad (4-1.53)$$

$$\frac{\partial H_{0x}}{\partial z} = -i\omega\varepsilon_0 \left( \varepsilon_{21} - \frac{\varepsilon_{23}\varepsilon_{31}}{\varepsilon_{33}} \right) E_{0x} - \frac{i\varepsilon_{23}k_x}{\varepsilon_{33}} H_{0y} - i\omega\varepsilon_0 \left( \varepsilon_{22} - \frac{\varepsilon_{23}\varepsilon_{32}}{\varepsilon_{33}} - \frac{k_x^2}{\omega^2\varepsilon_0\mu_0} \right) E_{0y} \quad (4-1.54)$$

電場、磁場を同じ次元にするために (CGS 単位系を使えばどちらも一緒になる)、

$\varepsilon_0^{1/2} E_{0x}, \varepsilon_0^{1/2} E_{0y}, \mu_0^{1/2} H_{0x}, \mu_0^{1/2} H_{0y}$  これを  $\tilde{E}_{0x}, \tilde{E}_{0y}, \tilde{H}_{0x}, \tilde{H}_{0y}$  とし、 $\varepsilon_0\mu_0 = 1/c^2$  の関係を使うと、次式を得る。

$$\frac{\partial \tilde{E}_{0x}}{\partial z} = -\frac{ik_x\varepsilon_{31}}{\varepsilon_{33}} \tilde{E}_{0x} + \left( i\frac{\omega}{c} - \frac{ick_x^2}{\varepsilon_{33}\omega} \right) \tilde{H}_{0y} - \frac{ik_x\varepsilon_{32}}{\varepsilon_{33}} \tilde{E}_{0y} \quad (4-1.55)$$

$$\frac{\partial \tilde{H}_{0y}}{\partial z} = i \frac{\omega}{c} \left( \epsilon_{11} - \frac{\epsilon_{13}\epsilon_{31}}{\epsilon_{33}} \right) \tilde{E}_{0x} - i \frac{\epsilon_{13}k_x}{\epsilon_{33}} \tilde{H}_{0y} + i \frac{\omega}{c} \left( \epsilon_{12} - \frac{\epsilon_{13}\epsilon_{32}}{\epsilon_{33}} \right) \tilde{E}_{0y} \quad (4-1.56)$$

$$\frac{\partial \tilde{E}_{0y}}{\partial z} = -i \frac{\omega}{c} \tilde{H}_{0x} \quad (4-1.57)$$

$$\frac{\partial \tilde{H}_{0x}}{\partial z} = -i \frac{\omega}{c} \left( \epsilon_{21} - \frac{\epsilon_{23}\epsilon_{31}}{\epsilon_{33}} \right) \tilde{E}_{0x} + i \frac{\epsilon_{23}k_x}{\epsilon_{33}} \tilde{H}_{0y} - i \frac{\omega}{c} \left( \epsilon_{22} - \frac{\epsilon_{23}\epsilon_{32}}{\epsilon_{33}} - \frac{c^2 k_x^2}{\omega^2} \right) \tilde{E}_{0y} \quad (4-1.58)$$

行列表記では

$$\frac{\partial}{\partial z} \begin{bmatrix} \tilde{E}_{0x} \\ \tilde{H}_{0y} \\ \tilde{E}_{0y} \\ \tilde{H}_{0x} \end{bmatrix} = \frac{i\omega}{c} \begin{bmatrix} -\frac{\epsilon_{31}}{\epsilon_{33}} \frac{ck_x}{\omega} & 1 - \frac{1}{\epsilon_{33}} \left( \frac{ck_x}{\omega} \right)^2 & -\frac{\epsilon_{31}}{\epsilon_{33}} \frac{ck_x}{\omega} & 0 \\ \epsilon_{11} - \frac{\epsilon_{13}\epsilon_{31}}{\epsilon_{33}} & -\frac{\epsilon_{13}}{\epsilon_{33}} \frac{ck_x}{\omega} & \epsilon_{12} - \frac{\epsilon_{13}\epsilon_{31}}{\epsilon_{33}} & 0 \\ 0 & 0 & \epsilon_{33} & -1 \\ \frac{\epsilon_{23}\epsilon_{31}}{\epsilon_{33}} - \epsilon_{21} & \frac{\epsilon_{23}}{\epsilon_{33}} \frac{ck_x}{\omega} & \left( \frac{ck_x}{\omega} \right)^2 - \epsilon_{22} + \frac{\epsilon_{23}\epsilon_{32}}{\epsilon_{33}} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{E}_{0x} \\ \tilde{H}_{0y} \\ \tilde{E}_{0y} \\ \tilde{H}_{0x} \end{bmatrix} \quad (4-1.59)$$

となる。電磁場成分からなる列ベクトルを  $\Psi$ 、4行4列の行列を  $\mathbf{D}$  とおくと、

$$\frac{\partial \Psi(z)}{\partial z} = \frac{i\omega}{c} \mathbf{D}(z) \Psi(z), \quad (4-1.60)$$

となる。 $\mathbf{D}$  を微分伝播行列という。

$\mathbf{D}$  が  $z$  に依存しない場合、媒質の厚さを  $d$  とすると、 $\Psi(d)$  は

$$\Psi(d) = \Psi(0) \exp\left( i \frac{\omega d}{c} \mathbf{D} \right) \equiv \mathbf{P} \Psi(0), \quad (4-1.61)$$

と求めることができる。ここで、 $\mathbf{P}$  を伝播行列という。 $\mathbf{P}$  は正方行列であることから形式的にマクローリン展開して、

$$\mathbf{P} = \sum_{n=0}^{\infty} \left[ \frac{1}{n!} \left( \frac{i\omega d}{c} \right)^n \mathbf{D}^n \right], \quad (4-1.62)$$

と書くことができる。上式を用い、収束性を考慮して適当な項まで計算することで  $\mathbf{D}$  が

ら  $\mathbf{P}$  を近似的に求めることが可能となる。 $\mathbf{D}$  が  $z$  に依存する場合は、 $\mathbf{D}$  が一定である微小区間  $(z, z + \Delta z)$  において

$$\Psi(z + \Delta z) = \Psi(z) \exp\left(i \frac{\omega \Delta z}{c} \mathbf{D}(z)\right) \equiv \mathbf{P}(z, \Delta z) \Psi(z), \quad (4-1.63)$$

を考える。ここで、 $\mathbf{P}(z, \Delta z)$  を局所伝播行列という。これを用いることで、

$$\Psi(d) = \mathbf{P}(d - \Delta z, \Delta z) \mathbf{P}(d - 2\Delta z, \Delta z) \cdots \mathbf{P}(0, \Delta z) \Psi(0) \equiv \mathbf{F}(0, d) \Psi(0), \quad (4-1.64)$$

と書くことができる。 $\mathbf{F}$  は全体の伝播行列であり、それぞれの位置における局所伝播行列を計算することで求めることができる。ここで、図 4-1.7 のような媒質を考えると、入射波、反射波、透過波は次の関係で表すことができる。なお、式の導出については割愛する。

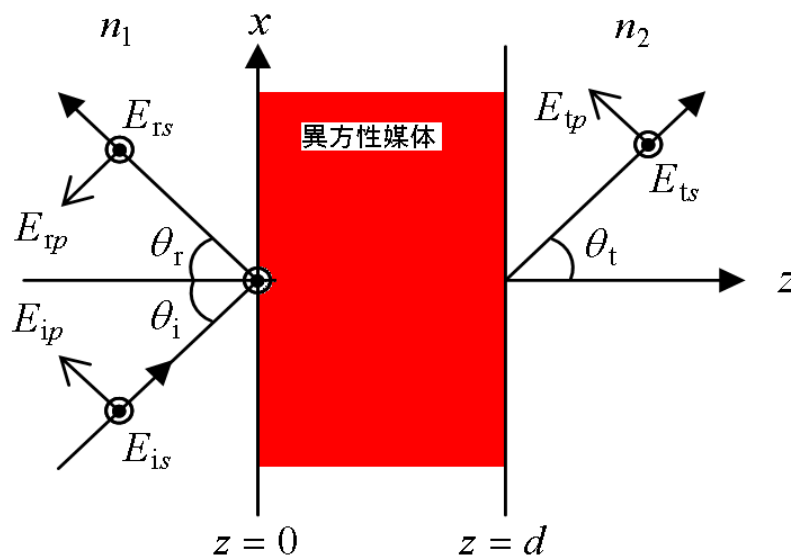


図 4-1.7 異方性媒体透過光計算の説明図

$$\begin{bmatrix} \cos\theta_t & 0 & F_{11}\cos\theta_i - F_{12}n_1 & -F_{13} - F_{14}n_1\cos\theta_i \\ n_2 & 0 & F_{21}\cos\theta_i - F_{22}n_1 & -F_{23} - F_{24}n_1\cos\theta_i \\ 0 & 1 & F_{31}\cos\theta_i - F_{32}n_1 & -F_{33} - F_{34}n_1\cos\theta_i \\ 0 & -n_2\cos\theta_t & F_{41}\cos\theta_i - F_{42}n_1 & -F_{43} - F_{44}n_1\cos\theta_i \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_{tp} \\ E_{is} \\ E_{rp} \\ E_{rs} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_{11}\cos\theta_i + F_{12}n_1 & F_{13} - F_{14}n_1\cos\theta_i \\ F_{21}\cos\theta_i + F_{22}n_1 & F_{23} - F_{24}n_1\cos\theta_i \\ F_{31}\cos\theta_i + F_{32}n_1 & F_{33} - F_{34}n_1\cos\theta_i \\ F_{41}\cos\theta_i + F_{42}n_1 & F_{43} - F_{44}n_1\cos\theta_i \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_{ip} \\ E_{is} \end{bmatrix} \quad (4-1.65)$$

(4-1.65)式は4元の連立方程式であり、これを解くことにより透過波の電界成分( $E_{tp}, E_{ts}$ )と反射波の電界成分( $E_{rp}, E_{rs}$ )を入射波の電界成分( $E_{ip}, E_{is}$ )の関数として求めることができる。実際に(4-1.65)式を解くと、

$$E_{tp} = \frac{1}{G_3G_4 - G_1G_2} [(G_4G_5 - G_2G_6)E_{ip} + (G_4G_7 - G_2G_8)E_{is}], \quad (4-1.66)$$

$$E_{rs} = \frac{1}{G_3G_4 - G_1G_2} [(G_3G_6 - G_1G_5)E_{ip} + (G_3G_8 - G_1G_7)E_{is}], \quad (4-1.67)$$

$$E_{tp} = \frac{1}{G_{11}} (L_{11}E_{ip} + L_{12}E_{is} - G_{13}E_{rp} - G_{14}E_{rs}), \quad (4-1.68)$$

$$E_{ts} = \frac{1}{G_{32}} (L_{31}E_{ip} + L_{32}E_{is} - G_{33}E_{rp} - G_{34}E_{rs}), \quad (4-1.69)$$

となる。ここで、 $G_{lm}$  及び  $H_{lm}$  はそれぞれ  $\mathbf{G}$  及び  $\mathbf{L}$  の  $l$  行  $m$  列成分を表す。また、

$$G_1 = G_{42}G_{33} - G_{32}G_{43}, \quad (4-1.70)$$

$$G_2 = G_{21}G_{14} - G_{11}G_{24}, \quad (4-1.71)$$

$$G_3 = G_{21}G_{13} - G_{11}G_{23}, \quad (4-1.72)$$

$$G_4 = G_{42}G_{34} - G_{32}G_{44}, \quad (4-1.73)$$

$$G_5 = G_{21}L_{11} - G_{11}L_{21}, \quad (4-1.74)$$

$$G_6 = G_{42}L_{31} - G_{32}L_{41}, \quad (4-1.75)$$

$$G_7 = G_{21}L_{12} - G_{11}L_{22}, \quad (4-1.76)$$

$$G_8 = G_{42}L_{32} - G_{32}L_{42}, \quad (4-1.77)$$

である。



## 4. 2 Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/SiO<sub>2</sub>多層膜の設計と作製

### 4. 2. 1 多層膜の設計原理

多層膜である Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/SiO<sub>2</sub> 膜厚は、光ファイバ通信でよく使われる波長帯  $\lambda = 1.55 \mu\text{m}$  帯の光を透過せずに反射するものを設計する。ブラッグ反射により光の伝搬が禁止されることから、そのストップバンド、ひいては膜厚を考えることができる[26]。

屈折率  $n_1$ 、厚さ  $d_1$  の膜と、 $n_2$  と  $d_2$  の膜が周期的に積層された構造において、光が伝搬しない条件は

$$k_1 d_1 + k_2 d_2 = \pi \quad (4-2.1)$$

とあらわせる。そして、

$$k_i = \frac{2\pi}{\lambda} n_i \quad (i = 1, 2) \quad (4-2.2)$$

であるので

$$\frac{2\pi}{\lambda} n_1 d_1 + \frac{2\pi}{\lambda} n_2 d_2 = \pi \quad (4-2.3)$$

となり、式(4-2.3)を

$$\begin{cases} \frac{2\pi}{\lambda} n_1 d_1 = \frac{\pi}{2} \\ \frac{2\pi}{\lambda} n_2 d_2 = \frac{\pi}{2} \end{cases} \quad (4-2.4)$$

とわけられ、そして光学膜厚  $d$  は

$$\begin{cases} d_1 = \frac{\lambda}{4n_1} \\ d_2 = \frac{\lambda}{4n_2} \end{cases} \quad (4-2.5)$$

となる。

したがって、 $\lambda = 1.55 \mu\text{m}$  として、Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub>の屈折率を  $n_1$  とすると  $n_1 = 2.11$  ( $\lambda = 1.55 \mu\text{m}$ )、SiO<sub>2</sub>の屈折率を  $n_2$  とし  $n_2 = 1.45$  ( $\lambda = 1.55 \mu\text{m}$ )と置く。すなわち Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub>の厚さ  $d_1$  と、SiO<sub>2</sub>の厚さ  $d_2$  はそれぞれ、184nm、267nm と求められる。したがって、多層膜におけるそれぞれ膜厚を式(4-2.5)で求めた値で作製すると、波長  $1.55 \mu\text{m}$  付近で、光の透過はなくなり、ミラーのように反射が起きると考えられる。設計におけるシミュレーション及び作製においてこの値を用いる。

#### 4. 2. 2 多層膜の設計シミュレーション

Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/SiO<sub>2</sub>の多層膜の透過スペクトルの計算結果を図4-2.1に示す。Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub>膜とSiO<sub>2</sub>膜の1層ずつを1つのペアとして、そのペア数をN<sub>pair</sub>としている。

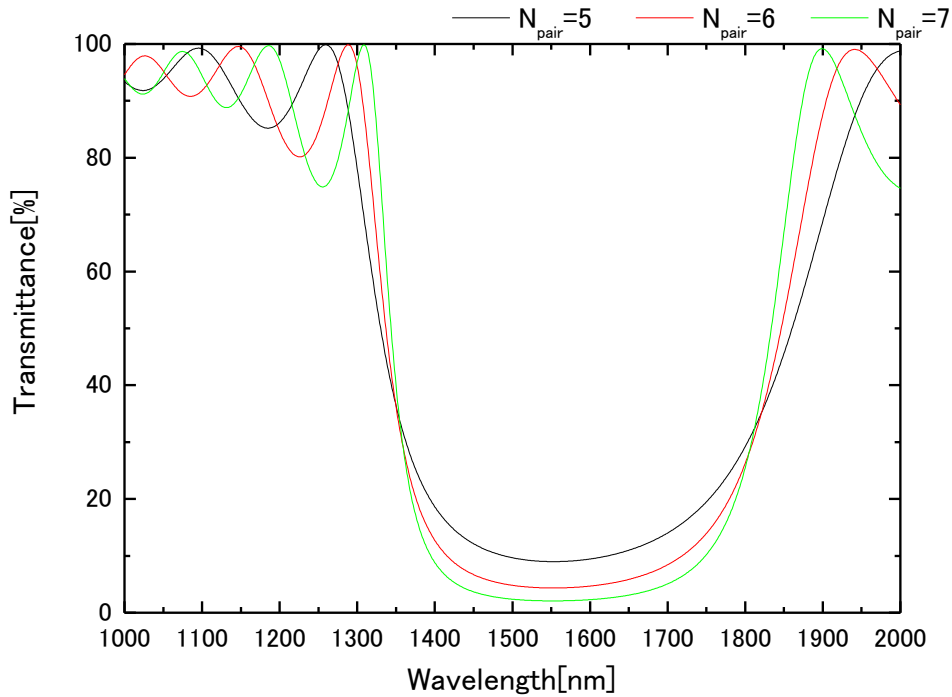


図4-2.1 多層膜の透過スペクトルの計算結果

層数N<sub>pair</sub>の数によって、透過特性が変化しているのが分かる。そしてN<sub>pair</sub>の数が大きくなるにつれて、ストップバンドにおける透過率が低くなっていることも分かる。すなわちミラーとして反射が起きている。共振器の性質を得るにはストップバンドにおける透過率が低い方がよいが、層数を増やすとそれだけサンプル作製にかかる時間も多くなるため、今回はN<sub>pair</sub>=5~7の多層膜で波長可変フィルタを作製することにした。

#### 4. 2. 3 多層膜作製条件

Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub> と SiO<sub>2</sub> の交互多層膜の作製には RF スパッタリング法を用いた。スパッタ法を用いると 1 層ずつの制御が簡単であり、多層膜構造になっても単純なプロセスで薄膜作製が可能である。スパッタターゲットには Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub> プレートと SiO<sub>2</sub> プレートを用いた。この 2 種類のターゲットを用いて、Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub> と SiO<sub>2</sub> の交互多層膜を作製した。今回作製した多層膜は、SiO<sub>2</sub> 基板上に、1 層目として Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub> を成膜し、2 層目に SiO<sub>2</sub>、3 層目に Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub>…を成膜して、N<sub>pair</sub>=5~7 で作製した。そして最終層は Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub> とした。例として N<sub>pair</sub>=6 の場合、全体の層数は 6(N<sub>pair</sub> のこと)×2(層)+1(層)=13(層)となる。

スパッタ条件を表 4-2.1 に示す。また、過去に研究室で測定された Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 膜と SiO<sub>2</sub> 膜の屈折率を示す。屈折率は、Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 膜は透過スペクトルから、SiO<sub>2</sub> 膜は反射スペクトルから算出した。算出法については付録 F を参照されたい。透過スペクトルの測定には分光光度計（島津製作所：UV-3101PC）を使用した。

表 4-2.1 スパッタ条件

ターゲット	Ta <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	SiO <sub>2</sub>
RF 電力[W]	300	200
Ar ガス流量[sccm]	3	10
O <sub>2</sub> ガス流量[sccm]	1	0

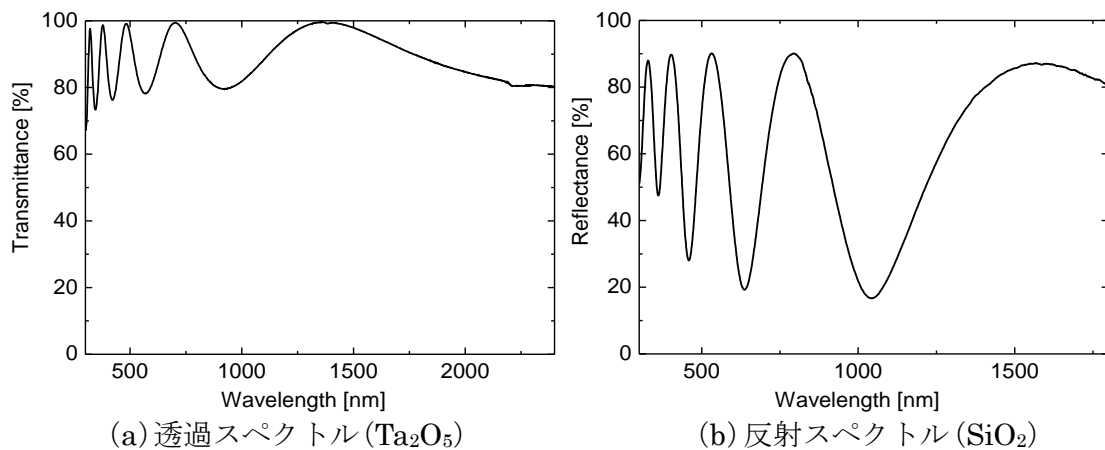
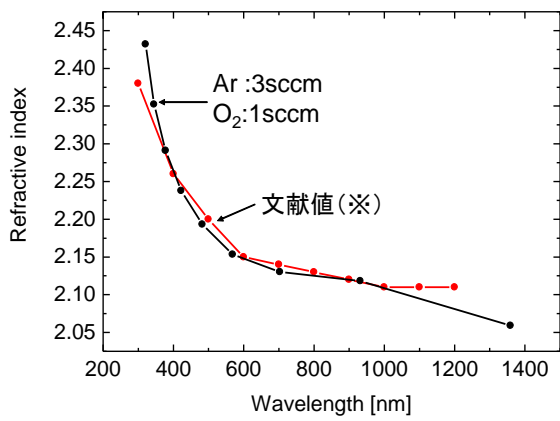
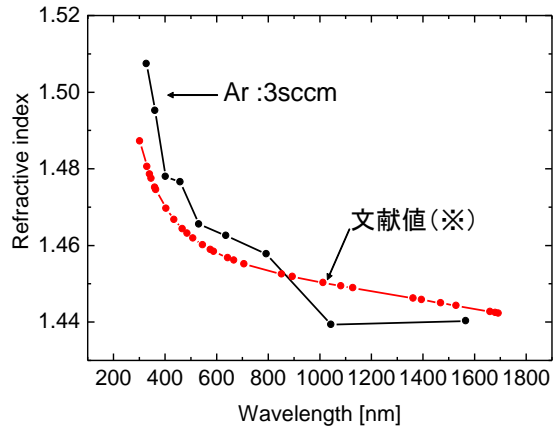


図 4-2.2 Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub> の透過スペクトルと SiO<sub>2</sub> の反射スペクトル



(a) 屈折率 (Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub>)



(b) 屈折率 (SiO<sub>2</sub>)

図 4-2.3 Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub>と SiO<sub>2</sub>の屈折率と文献値

(※) 文献値の屈折率もあわせて示した。Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub>の屈折率[27]。SiO<sub>2</sub>の屈折率[28]

このように、表 4-2.1 に示したスパッタ条件で Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub>膜と SiO<sub>2</sub>膜を作製することで、文献値の屈折率にほぼ近い値での作製が出来ている。したがって、この条件で Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/SiO<sub>2</sub>多層膜を作製する。

#### 4. 2. 4 多層膜の光学特性の評価

作製した試料の光学特性として透過スペクトルの測定を行った。透過スペクトルの測定には、分光光度計（島津製作所：UV-3101PC）を使用した。以下に作製した試料の透過スペクトルを示す。

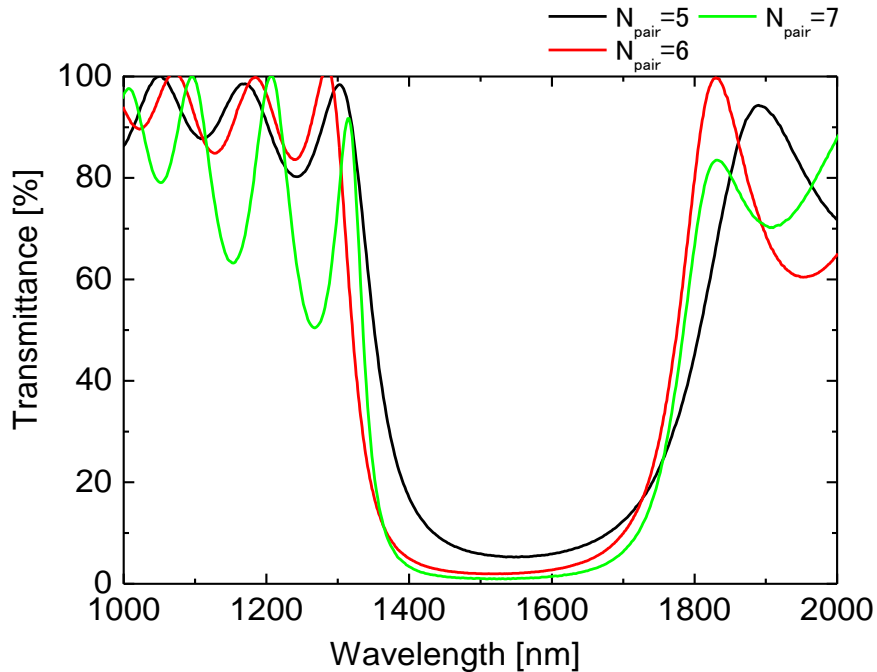


図 4-2.4 多層膜の透過スペクトル

図 4-2.4 に示した理論値に近い形で波長  $1.55 \mu\text{m}$  付近においてストップバンドが形成されたことが確認された。また  $N_{\text{pair}}$  が大きくなるにつれてストップバンドにおける透過率が低くなっていることも観測された。したがって波長  $1.55 \mu\text{m}$  付近においてミラーとして使うことができ、ファブリーペローの共振器構造のミラーとしても用いることができる。なお結果をみると、 $N_{\text{pair}}$  が 6 層でも 7 層でも低透過率を実現していることから、 $N_{\text{pair}}=6$  として、サンプル作製を行うこととした。

### 4. 3 液晶と Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/SiO<sub>2</sub>多層膜を用いた波長可変フィルタの設計と作製

#### 4. 3. 1 液晶波長可変フィルタの設計とシミュレーション

作製する液晶セルの概略図を図 4-3.1 に示す。このように SiO<sub>2</sub> 基板上に作製した多層膜で液晶を挟む構造となっている。また、この構造は 4.1.5 節でも述べたファブリーペロー共振器構造を用いている。すなわち、両端で挟んでいる多層膜はミラーの作用をするようになっている。なお、本研究では液晶材料に E7 (メルク株式会社 N-I 点 58.6°C)を用いる。

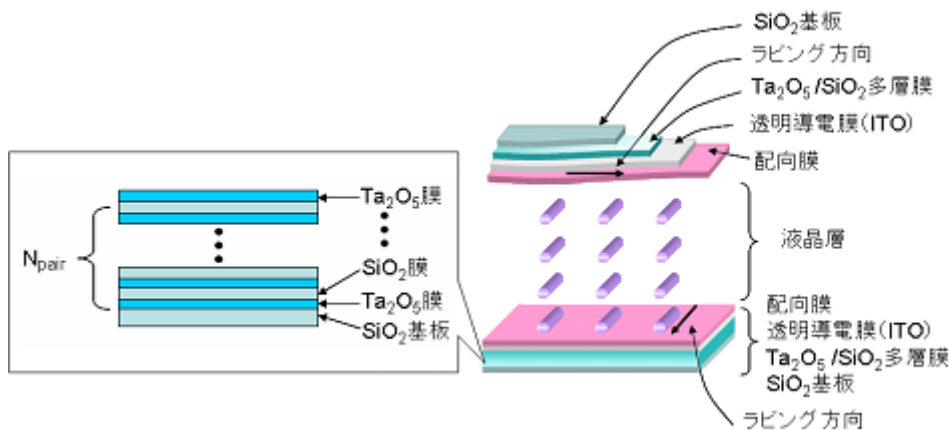
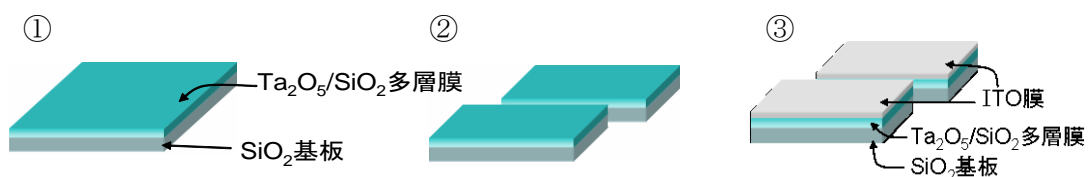


図 4-3.1 液晶セル概略

#### 4. 3. 2 液晶波長可変フィルタの構造及び作製工程

ここで、多層膜を用いた液晶セルの作製手順について述べる。



##### ①. 基板作製

RF スパッタリング法を用いて図 4-3.2 に示すように SiO<sub>2</sub> ガラスに多層膜を成膜する。

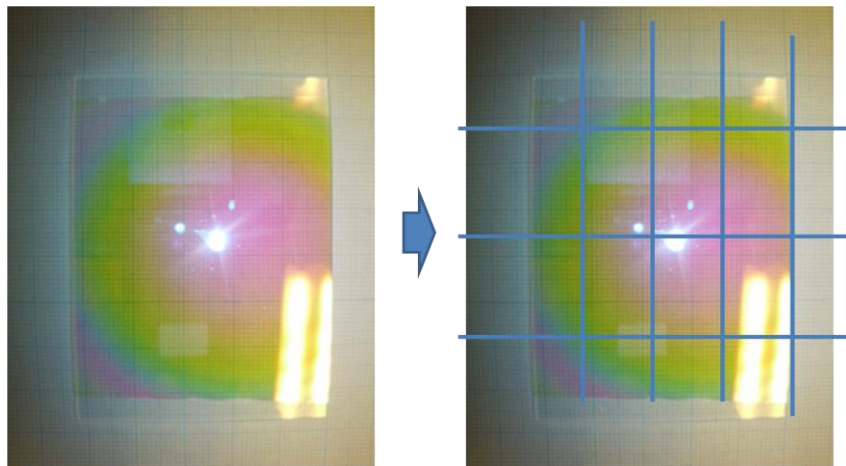


図 4-3.2 多層膜作製後サンプル写真

スパッタの際、このサイズでは試料ホルダーを使用することができないため、端をテープで留めて固定する。その際、途中で落ちることの無いよう、しっかりと貼りつけることが重要である。

#### ②. サンプルカット

スパッタ後、サンプルのカットを行う。縦 10mm,横 20mm のサイズになるよう、ダイヤペンを用いて裏面に傷を付けることでカットを行う。基板洗浄の際にカットした部分で手を切りやすいので、カット部分はやすりを使って削る。

その後、基板洗浄を以下の手順で行う。

- ・洗剤を使い、手で擦って洗う
- ・洗剤をよく流した後、きれいなスポンジでこする。これは洗剤を落とすために行う
- ・再度よく水道水で流してアセトンにつけ、超音波洗浄を 20 分行う。この際、アセトンが蒸発しないよう、ビーカーにアルミをかぶせ、超音波洗浄を行う
- ・アセトンを純水で洗い流して、ドライオーブンで 100℃、1h 乾かす

#### ③. ITO 膜形成

カットした試料に、それぞれ、透明導電膜を形成する。透明導電膜には ITO 溶剤（技研科学：GIP-In500EA）を用いる。スピコートにより ITO 溶剤を塗布しベーキングを行うことで透明導電膜を作製する。スピコートにはスピコータ（MIKASA：1H-D7）を使用した。ベーキングにおけるソフトベークにはドライオーブン（iuchi：DO-300）、ハードベークにはマッフル炉（デンケン：KDF S-70）を使用した。スピコート及びベーキングの詳細は以下に示す。

- ・使用溶剤：ITO
- ・スピコート条件

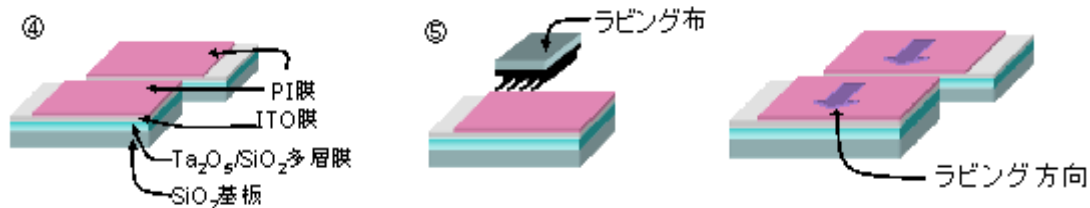
1000rpm×3sec+7000rpm×30sec+2000 rpm×2 sec

- ・ベーキング条件

ソフトベーク：100℃×15min

ハードベーク：500℃×20min

バーク後、テスターを用いて表面の抵抗を測定し、 $k\Omega$  オーダーを示すことを確認する。



#### ④. 配向膜形成

配向膜の作製には PVA(polyvinyl alcohol)溶液を使用する。まず、電子分析天秤 (Sartorius 株式会社 ME215P)を使用し、質量比が

純水 : PVA 粉末=99:1

になるように評量を行う。評量後、棒磁石を利用した攪拌器で 6 時間程度混ぜる。

次にこの溶液をスピコートで塗布し、ベーキングを行うことで成膜した。ベーキングにはドライオーブンを使用した。PVA 膜のスピコート及びベーキングの詳細を以下に示す。

- ・使用溶剤 : PVA3500

- ・スピコート条件

2000rpm×20sec

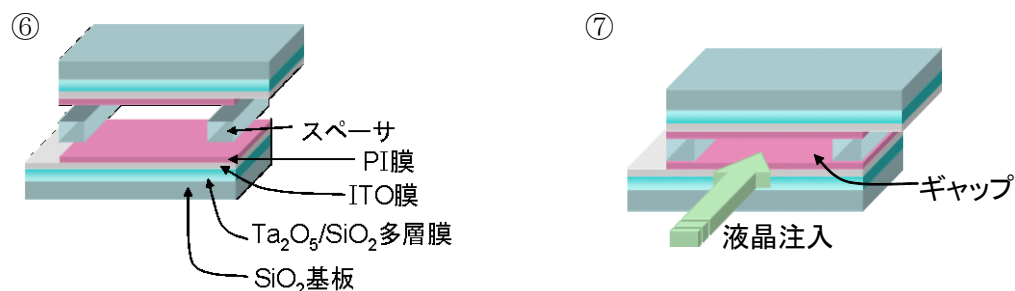
- ・ベーキング条件

100°C×3h

バーク後、デシケータなどほこりのつかないところで 30 分放置し、室温まで戻す。

#### ⑤. ラビング

PVA 膜の膜表面を布でラビングをする。一方向に膜表面を擦ることで細かい溝が形成され、その溝に沿って液晶分子が配向するといわれているが、布で擦ることによって生じる静電気の影響で配向するともいわれているおり、原因は定かではない。本研究ではホモジニアス配向を実現するため、基板両側のラビング方向は図のように同一方向としている。



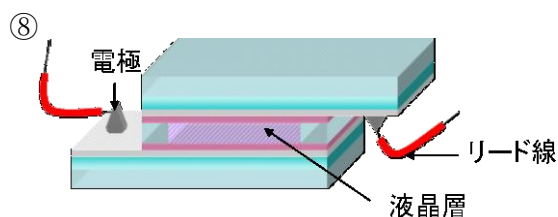


#### ⑥. ギャップ作製

スペーサー(ガラスファイバ (住田光学ガラス : FT-5、Size :  $5\mu\text{m}$ ) )及び接着剤 (セメダイン株式会社 : CA-185) )を用いて一定のギャップを作製する。この際、干渉縞に注意し、極力基板中央付近に干渉縞があまりない、つまりギャップが一様である部分を作るように気をつけることで、共振器としての性質を得やすくなる。接着後は一定の圧力を加え硬化させる。ギャップサイズは  $5\mu\text{m}$  である。

#### ⑦. 液晶注入

硬化後、ギャップ中に液晶を注入する。液晶は毛細管現象でセル全体に広がる。液晶はメルク社製の E7(メルク株式会社 N-I 点  $58.6^{\circ}\text{C}$ )を使用した。



#### ⑧. 電極作製

導電性エポキシ接着剤 (CHEMTRONICS : CW2400) を用いて ITO 導電膜に電極部を作製しリード線を取り出す。

以上で、多層膜を用いた液晶セルの作製は完了となる。そしてリード線から、矩形波の電圧を印加させることで、液晶の配列の変化を見ることが出来る。

### 4. 3. 3 液晶波長可変フィルタの光学特性の評価方法

4.3.2 節で述べた作製手順によって作製した試料に対する透過率測定を行い、液晶セルに電圧を印加させることで透過特性の変化を測定した。光学測定系を図 4-3.3 に示す。測定には分光光度計（島津製作所：UV-3101PC）を用いた。分光光度計の試料室に偏光板と試料をセットし、試料にマルチプログラマブル交流電源(エヌエフ回路設計ブロック：EC1000S)を接続する。そしてプログラマブル電源から矩形波 ( $f=450\text{Hz}$ ) の電圧 ( $V_{p-p}=0\sim 20\text{V}$ ) を印加する。なお、偏光板を通して常光、あるいは異常光となるよう偏光方向を調整する。サンプル設置の際、干渉縞がない部分を測定することで、共振器の性質を確認することができる。

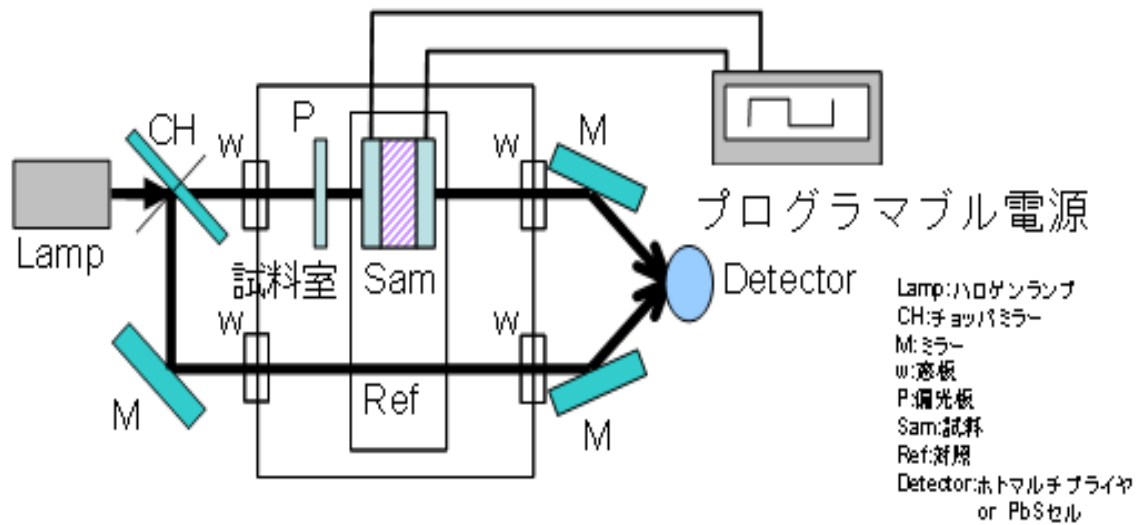


図 4-3.3 波長可変フィルタ測定系

#### 4. 3. 4 液晶波長可変フィルタの光学特性評価結果

作製した液晶セルの透過スペクトル、ピーク波長のシフトの様子を示す。測定波長は、共振ピークが現れる 1300~1700nm とした。なお、図 4-3.4 に異常光に対する透過スペクトルを、図 4-3.5 に常光に対する透過スペクトルを示す。

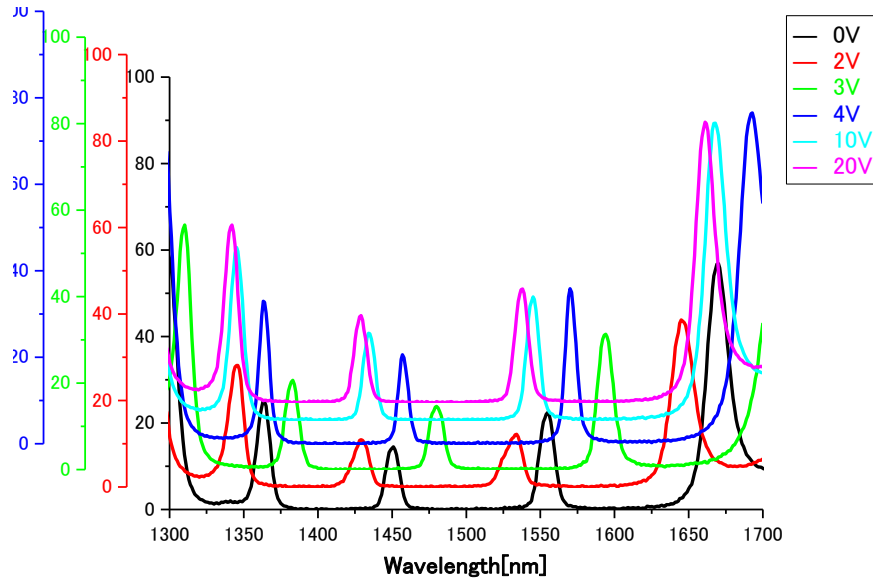


図 4-3.4 液晶セルの透過スペクトル（異常光、印加電圧 0~20V）

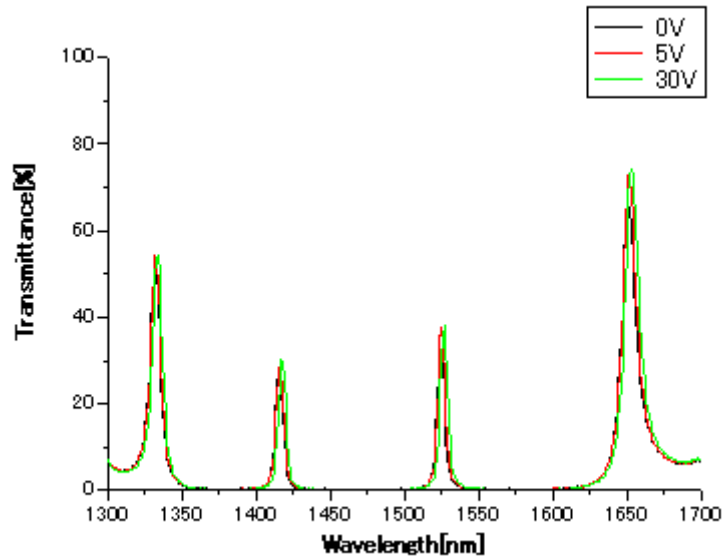


図 4-3.5 液晶セルの透過スペクトル（常光、印加電圧 0~30V）

結果をみると、異常光を入射した際、0Vで1555nm（ピーク強度22.4%）にあったピークが20Vで1430nm（ピーク強度20.13%）の波長にまで移動していることが分かる。よって、波長可変フィルタの作製に成功したといえる。また、グラフでは示していないが、1.5Vではシフトは確認されなかったため、しきい値電圧は1.5~2Vの間にあることが分かる。後で4.3.5節で述べるがこの値は理論値に近い値であり、電界印加についても問題はないと思われる。

また、常光では30Vまで電圧を印加してもピークのシフトは確認されなかったが、これは液晶分子がラビング方向に配向している、つまりは電界方向と直行して並んでいることを示している。

#### 4. 3. 5 シミュレーションと結果の比較

本研究で作製した波長可変フィルタにおいて、最大シフト量が得られているのかを確認するため、配向分布、透過スペクトルの計算を行い、実験結果と比較した。計算に必要なパラメータは以下のようにして決定した。

配向分布に必要なパラメータとその決定方法

①電場とダイレクターが平行な時の液晶の比誘電率  $\epsilon_{\parallel}$ 、電場とダイレクターが垂直な時の液晶の比誘電率  $\epsilon_{\perp}$

$\epsilon_{\parallel}$ 及び $\epsilon_{\perp}$ は、実験条件である450Hzの周波数に対する文献値が見当たらなかったことから、周波数1kHz、温度24°Cに対する文献値を採用し、 $\epsilon_{\parallel}$ 、 $\epsilon_{\perp}$ とした[29]。

②液晶の弾性定数 K

Kは配向変化のしきい値電圧と関係があるため、しきい値電圧の実測値と計算値のフィッティングから求めた。文献値が12~19.5pNとなっていたことから[30]、フィッティングはこの範囲に限定して行い、K=19.5pNと決定した。

透過スペクトル計算のための光学定数の決定

①SiO<sub>2</sub>膜の厚さ  $d_s$  と屈折率  $n_s$ 、Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub>膜の厚さ  $d_T$  と屈折率  $n_T$

SiO<sub>2</sub>膜の厚さ  $d_s$  と屈折率  $n_s$ 、Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub>膜の厚さ  $d_T$  と屈折率  $n_T$  はそれぞれ、4・2・3節で述べた方法で、それぞれ  $d_s=267\text{nm}$ 、 $n_s=1.45$ 、 $d_T=184\text{nm}$ 、 $n_T=2.11$  とした[31]

②常光屈折率  $n_o$

比較的波長依存性の小さい  $n_o$  に対して、波長1550nm、温度24°Cにおける文献値を採用し、 $n_o=1.50$  とした[30,31]

③液晶(E7)層の厚さ  $d_L$

電圧無印加時の常光に対する透過スペクトルの測定結果とのフィッティングにより、 $d_L$  を決定した。具体的には波長1550nmに最も近い透過ピークの位置が、測定結果と計算結果とで一致するように決めた。5 $\mu\text{m}$ のスペーサを持ち手いることから、5 $\mu\text{m}$ 以上の最小値を採用し、 $d_L=6.08\mu\text{m}$  とした。

#### ④異常光屈折率 $n_e$

電圧無印加時の異常光に対する透過スペクトルの測定結果とのフィッティングにより、 $n_e$ を決定した。具体的には波長 1550nm に最も近い透過ピークの位置が、測定結果と計算結果とで一致するように決めた。波長 1550nm、温度 24°C に対する  $n_e$  の文献値 1.68 に最も近い値を採用し、 $n_e=1.66$  とした[31]。

電圧印加による液晶配向分布のシミュレーション結果を図 4-3.6 に示す。

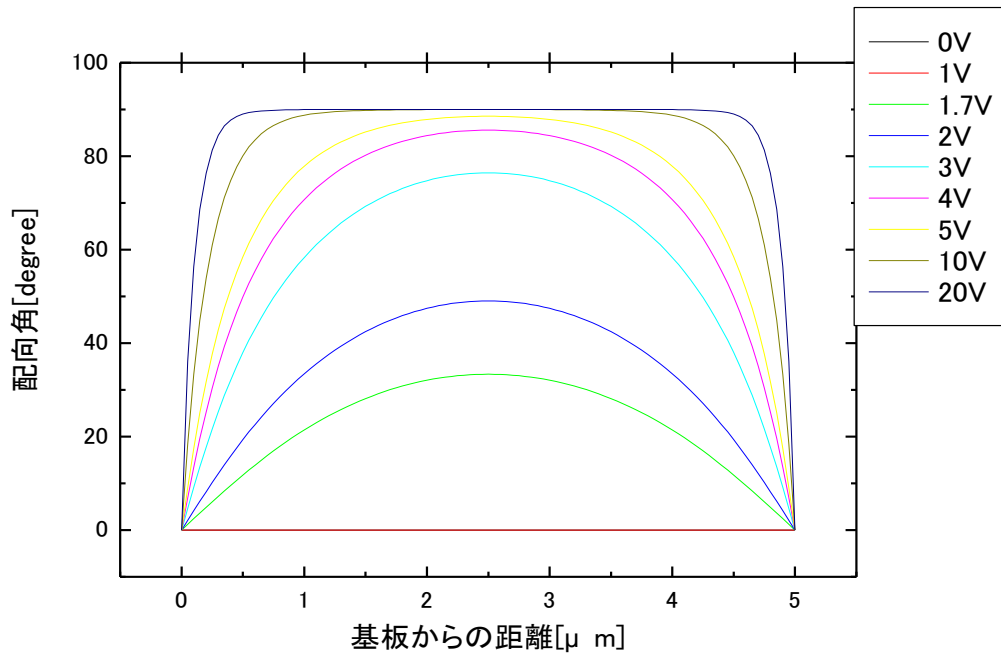


図 4-3.6 液晶配向分布のシミュレーション結果

この結果をみると、電圧が上昇するにつれて、配向角が大きくなっていることが分かる。また、20V ではほとんどの位置で 90° の傾きとなっており、最大のシフト量が得られることが予想される(実験の最大印加電圧 20V はこれで決定している)。

液晶セルにおける光の透過特性、また、電圧印加によるピークシフトについてシミュレーションしたものを図 4-3.7 に示す。この際、液晶の配向については液晶配向分布のシミュレーション結果を使用している。

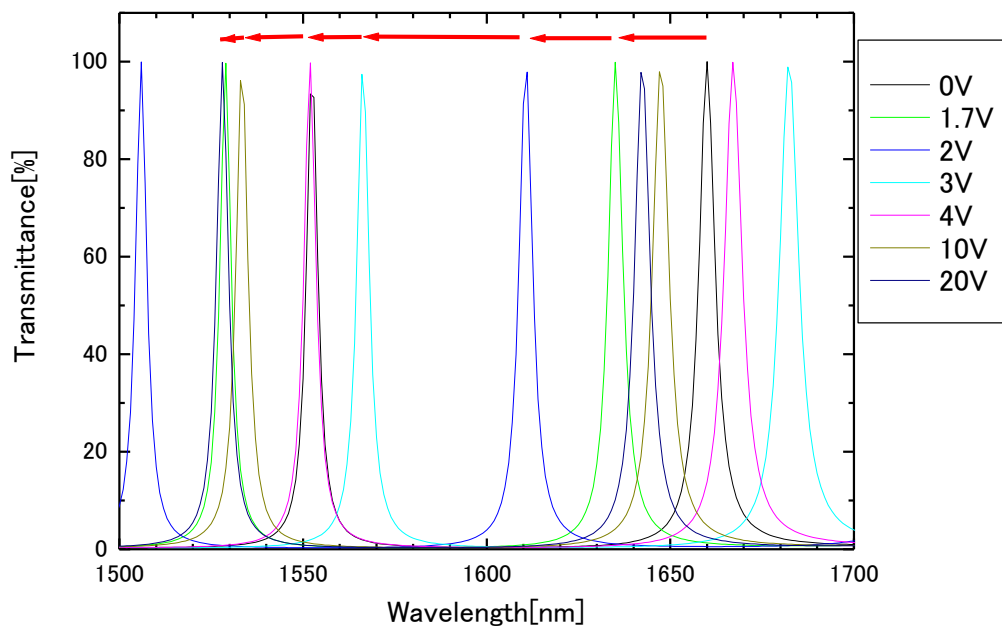


図 4-3.7 ピークシフト シミュレーション結果

実験結果から、0V のときの 1552nm のピークに着目し、そのシフトの変化を見ていくと、

0V→1552nm  
 1.7V→1529nm  
 2V→1506nm  
 3V→1465nm  
 4V→1452nm  
 10V→1435nm  
 20V→1430nm

にそれぞれピークがある。これより、理論値としては 20V の電圧印加で 122nm のピークシフトを実現できると思われる。このグラフにおいて、0V と 1V の傾き角は横軸とほぼ重なっている。

これを元に図 4-3.8 に実験結果とシミュレーションのシフト量を比較した図を示す。これをみると、実験値と理論値がほぼ一致していることが分かる。グラフにおいて、シフト量は負の値となっているが、これはシフト量が低波長側にシフトすることを示している。これらの結果より、波長可変フィルタの作製に成功したといえる。

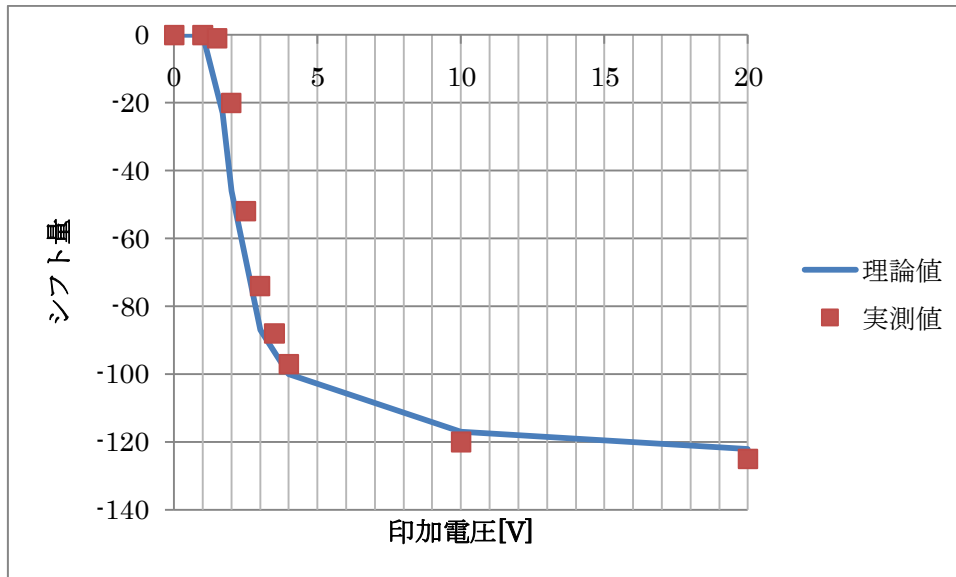


図 4-3.8 シフトの変化 実測値とシミュレーションの結果

#### 4. 4 液晶の光熱効果を用いた波長可変フィルタ

4.3 節において波長可変フィルタの作製に成功したことを述べた。4.3 節においては電界印加によって透過波長のシフトを実現したが、本節では液晶セルに光を照射することで位相のシフトを実現することを試みる。光で制御が可能となれば液晶セルに透明電極、リード線などを設ける必要がなくなるため、作製工程の簡略化に加え、セルの小型化につながるものと考えられる。

##### 4. 4. 1 光熱効果を用いた波長可変フィルタ評価方法

図 4-4.1 に測定系を、図 4-4.2 に使用するサンプルの異常光に対する透過率を示す。

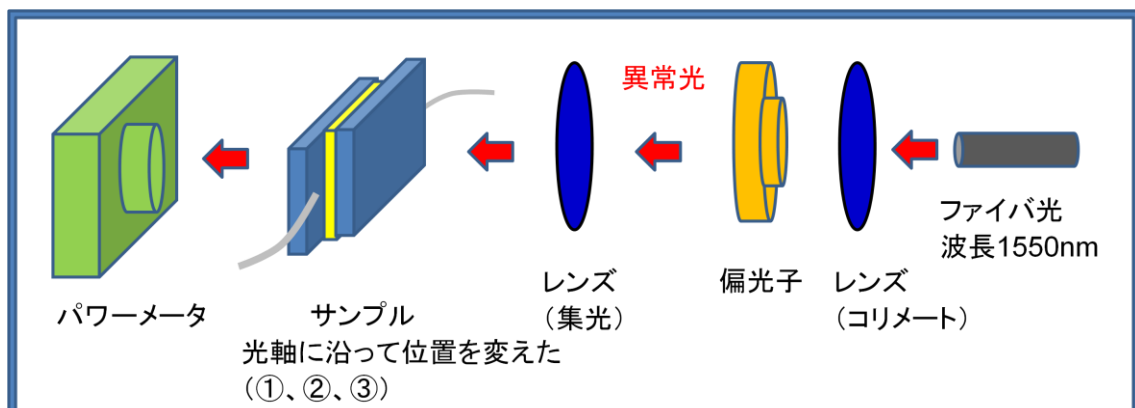


図 4-4.1 波長可変フィルタ 光制御測定系

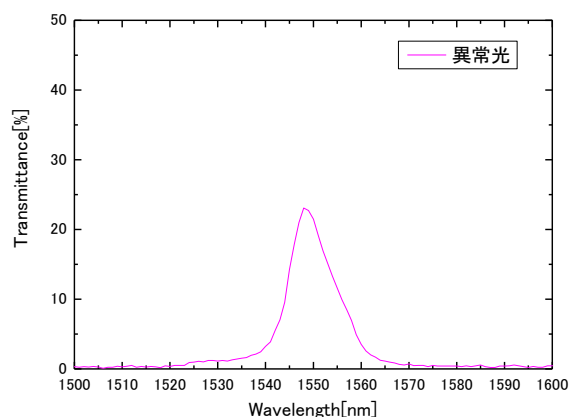


図 4-4.2 波長可変フィルタ透過率

光源となるレーザの波長を 1550nm とする。この値は、透過率が最大となる波長を選ぶことで、少しの屈折率変化でも透過光の変化を確認できるようにするためである。ファイバを出た光はレンズでコリメートされ、偏光子を通して直線偏光となる（異常光）。光熱効果を得るには光を集光してパワー密度を上げる必要があるため、レンズを透過してから集光位置付近にサンプルを置くこととする。サンプルを透過した光の強度をパワーメータで観測する。レーザ光源の出力を変え、サンプルなし、ありのときのそれぞれの光強度を観測することで、透過率を算出する。透過率が変化していれば、それは光熱効果によるものとなる。以下、具体的な作業手順について述べる。

- ①サンプルを設置し、レーザの出力を最大値にして透過光強度が最大となる波長を探す。なお、波長は光源で調節する。
- ②各レーザ出力に対し、サンプル有りの時の光強度  $I_1$  を測定する。
- ③サンプルを外し、同様にサンプル無しの時の光の強度  $I_2$  を測定する
- ④透過率  $I_1/I_2$  を計算し、グラフ化する

なお、サンプルを完全な集光位置に設置するのは困難なため、サンプルの位置を光軸方向に移動させ、①、②、③の 3 点でパワー密度が最も大きい場所をさがしつつ測定を行った。

#### 4. 4. 2 評価結果

図 4-4.3 に評価結果を示す。どの位置においても大きな透過率変化を観測することはできなかった。ただ、位置①については他の位置とは異なり、強度の変化とともにわずかではあるが透過率が変化している。はじめにレーザの出力を最大にして透過光が最大強度となるような波長を選んでいるために、レーザ出力が弱まるにつれて光熱効果はなくなり、屈折率変化が起きて透過率は下がり続けるはずである。だが、結果は光強度が下がるにつれて一度下がった透過率がまた上昇するものとなった。透過率の変化が大き



いわけではないので、これが光熱効果による屈折率変化からくるものなのかは今のところ判断できていない。今後、より強力なレーザーで透過率の変化を測定し、同様の変化を観測することができるのかを試す予定である。

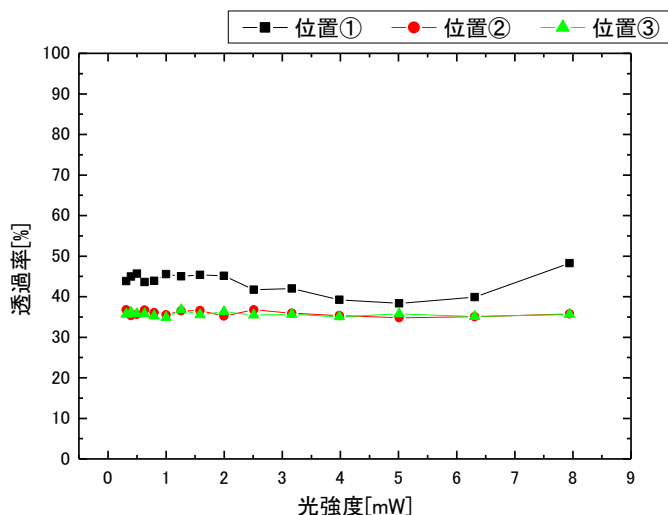


図 4-4.3 波長可変フィルタ光制御評価

#### 4. 5 液晶導波路の試作

4. 3 節において液晶を用いた波長可変フィルタの作製に成功したことは既に述べた。これは、本研究室において、液晶を利用した光デバイスの作製が可能な環境が整ったことを意味する。そこで、波長可変フィルタ作製の技術を生かし、本節では液晶を利用した導波路の作製を試みる。

##### 4. 5. 1 液晶導波路について

液晶導波路は負の屈折を利用した光デバイスである。過去、 $YVO_4$  による複屈折材料において負の屈折が生じるという報告がなされ、近年では液晶においてもその効果が観測されている[3]。

負の屈折が起こる際、液晶材料内において異常光の位相とエネルギーの伝搬方向が異なる。液晶でこの性質が確認されたのはごく最近（文献[3]は 2006 年）であり、固体と比較して液晶では光の伝搬方向を電界印加によって容易に制御することが可能なことが利点となる。また、液晶では電界印加によって通常の屈折へと変えることも可能である。以下、文献[3]と図 4-5.1 を参考に負の屈折の理論について述べる。

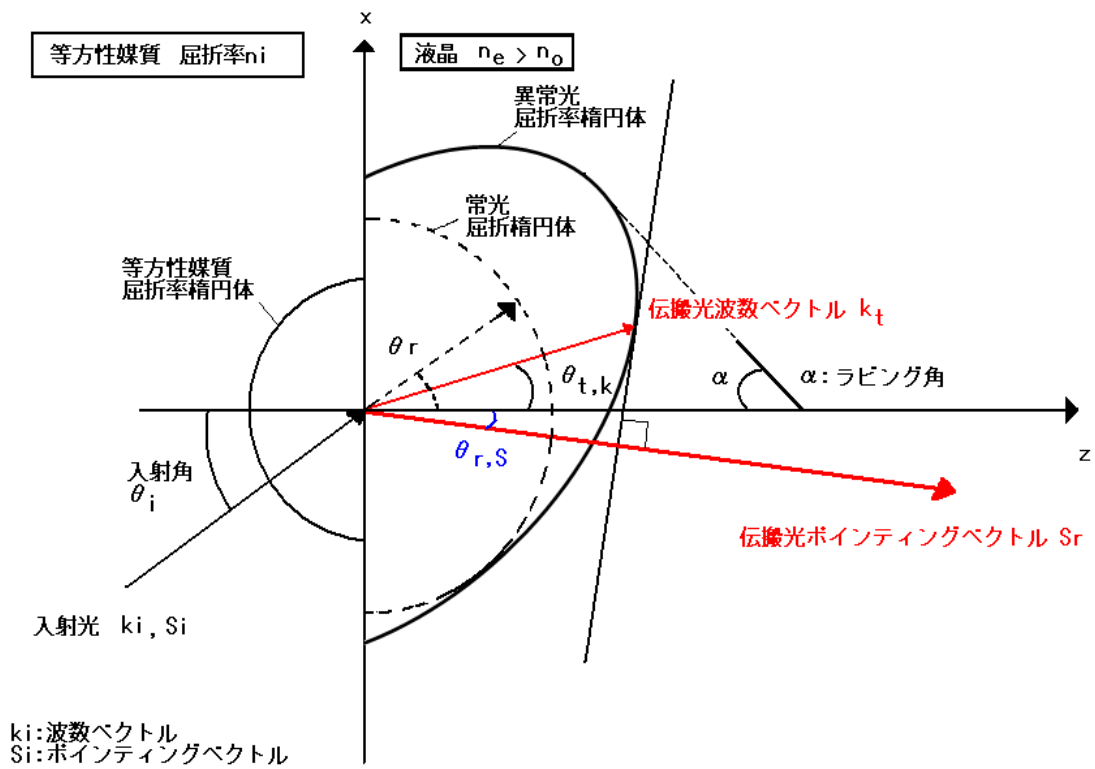


図 4-5.1 負の屈折説明図[3]

$$k_{ix}^2 + k_{iz}^2 = n_i^2 \quad (4-5.1)$$

となり、液晶中では

$$ak_{tx}^2 + bk_{tz}^2 + ck_{tx}k_{tz} = 1 \quad (4-5.2)$$

となる。ここで、

$$a = n_o^{-2} \sin^2 \alpha + n_e^{-2} \cos^2 \alpha \quad (4-5.3)$$

$$b = n_o^{-2} \cos^2 \alpha + n_e^{-2} \sin^2 \alpha \quad (4-5.4)$$

$$c = \sin 2\alpha (n_e^{-2} - n_o^{-2}) \quad (4-5.5)$$

である。透過光の波数ベクトル  $\mathbf{k}_t$  は角度

$$\theta_{t,\mathbf{k}} = \tan^{-1}(k_{tx} / k_{tz}) \quad (4-5.6)$$

を決定する。ポインティングベクトルの方向  $\mathbf{S}_r$  は  $\mathbf{z}$  軸方向であり、 $\mathbf{k}_t$  表面に垂直である。そしてどの点  $(k_{tx}, k_{tz})$  においても次式から求めることができる

$$\tan \theta_{r,s} = (\partial\varphi/k_{tx})/(\partial\varphi/k_{tz}) \quad (4-5.7)$$

ここで、

$$\varphi(k_{tx}, k_{tz}) = ak_{tx}^2 + bk_{tz}^2 + ck_{tx}k_{tz} \quad (4-5.8)$$

である。境界条件  $\mathbf{k}_{ix}=\mathbf{k}_{tx}$  ( $z=0$ ) と、 $k_{tz}$  を  $k_{tx}$  で表わすと、(4-5.2)式は

$$\theta_{t,k} = \tan^{-1} \frac{2bn_i n_o n_e \sin \theta_i}{2\sqrt{bn_o^2 n_e^2 - n_i^2 \sin^2 \theta_i} - cn_i n_o n_e \sin \theta_i} \quad (4-5.9)$$

$$\theta_{r,s} = \tan^{-1} \frac{2n_i \sin \theta_i + cn_o n_e \sqrt{bn_o^2 n_e^2 - n_i^2 \sin^2 \theta_i}}{2bn_o n_e \sqrt{bn_o^2 n_e^2 - n_i^2 \sin^2 \theta_i}} \quad (4-5.10)$$

となる。もし入射角  $\theta_i$  が  $0^\circ$  なら  $\theta_{t,k}=0$  で、入射角が少し増えると  $\theta_{t,k}$  も少し増える。 $\theta_{r,s}$  の場合は、 $\theta_i=0$  で負の値となり、 $\alpha \neq 0, \pi/2$  とし、

$$\theta_{r,s}(\theta_i = 0) = -\tan^{-1}[(n_e^2 - n_o^2)\sin \alpha \cos \alpha / (n_o^2 \sin^2 \alpha + n_e^2 \cos^2 \alpha)]$$

となる。 $\theta_{r,s}$  と入射角の関係をグラフで示す。なお、文献[3]を参考に各パラメータは  $n_i=1$ ,  $\alpha=45^\circ$ ,  $n_o=1.52$ ,  $n_e=1.74$  (at 633nm) となっている。

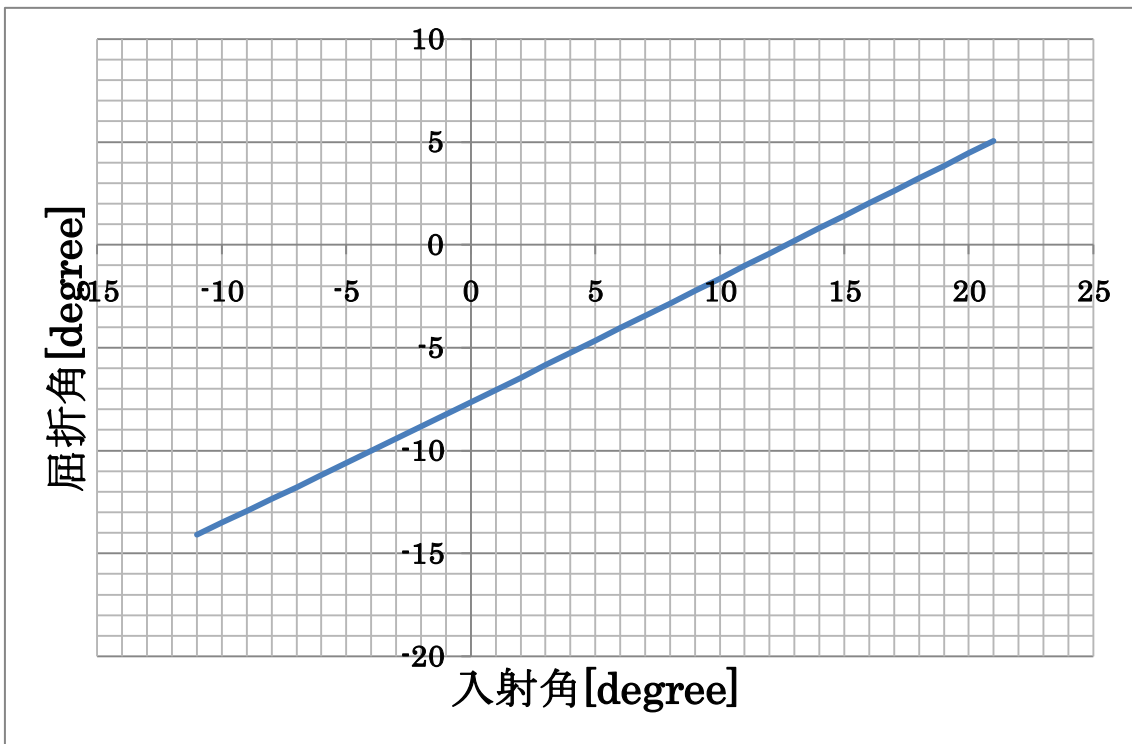


図 4-5.2 液晶導波路屈折角特性

#### 4. 5. 2 液晶導波路作製方法

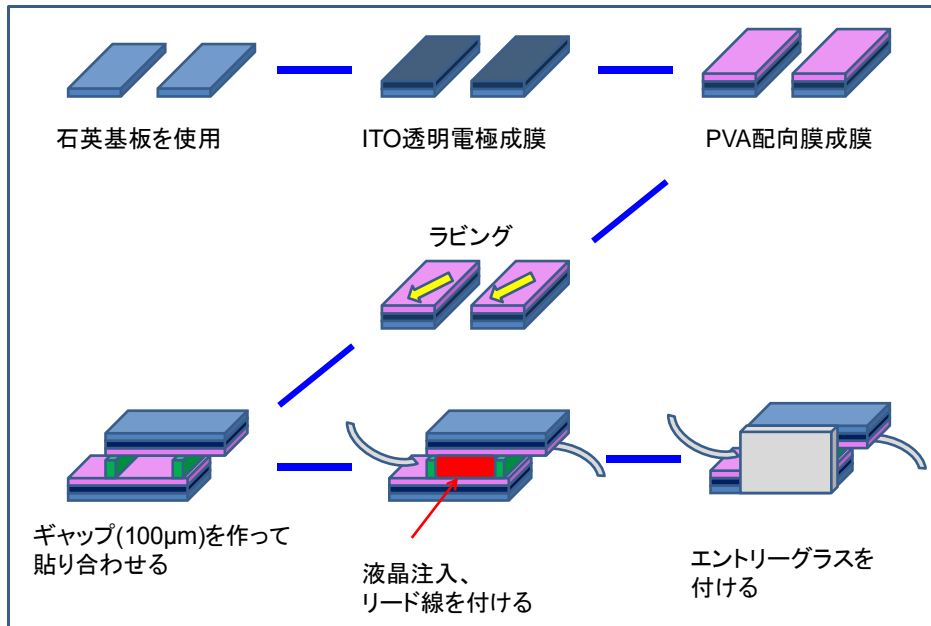


図 4-5.3 液晶導波路

導波路作製方法を図 4-5.3 に示す。波長可変フィルタの作製方法とほぼ同じで、異なるのは多層膜を付けないこと、ラビング方向が光軸から  $45^\circ$  の傾きとなっていること、ギャップが  $100\mu\text{m}$  であること、最後にエントリーガラスを付けることである。このラビング方向は入射角  $0^\circ$  において負の屈折が  $7.7^\circ$  と最大値になるラビング方向が光軸から  $49^\circ$  の傾きの時であり、それに近い値をとっている。エントリーガラスには PVA 配向膜を成膜し、ラビング方向に合わせてラビングを施している。これによりエントリーガラス界面付近における液晶のラビング方向を揃えることができると考えられる。

#### 4. 5. 3 液晶導波路屈折角測定方法

液晶導波路測定系を図 4-5.4 に示す。

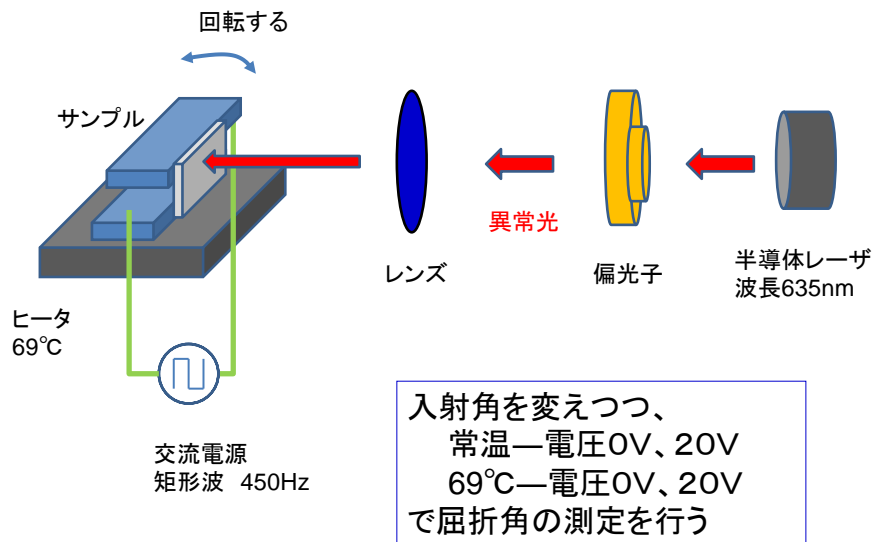


図 4-5.4 液晶導波路測定系

光源には波長 635nm の半導体レーザを使用する。レーザは偏光子を通して異常光となるような直線偏光となり、レンズで集光されてサンプルへと入射する。サンプルは回転機構を持つステージ上で固定し、回転台によって光の入射角を変えてゆく。また、ステージ上部にヒータを設けることでサンプルを加熱することが可能となっている。これは相転移以上の温度 (69°C) にまでサンプルを熱することで、光の伝搬方向の変化が散乱によるものか、屈折によるものかを判断するためである。配向秩序が無くなることで、液晶は等方性媒質となり、エントリーガラスと液晶の界面において負の屈折率は生じなくなるものと考えられる。

屈折角はデジタルカメラを使用して液晶層入射後の光の伝搬方向を撮影し、PC 上で見積もった。

#### 4. 5. 4 液晶導波路評価結果

図 4-5.6, 4-5.7 にそれぞれ常温、相転移温度以上 (69°C) のときの光の入射角—屈折角の変化の様子を示す。

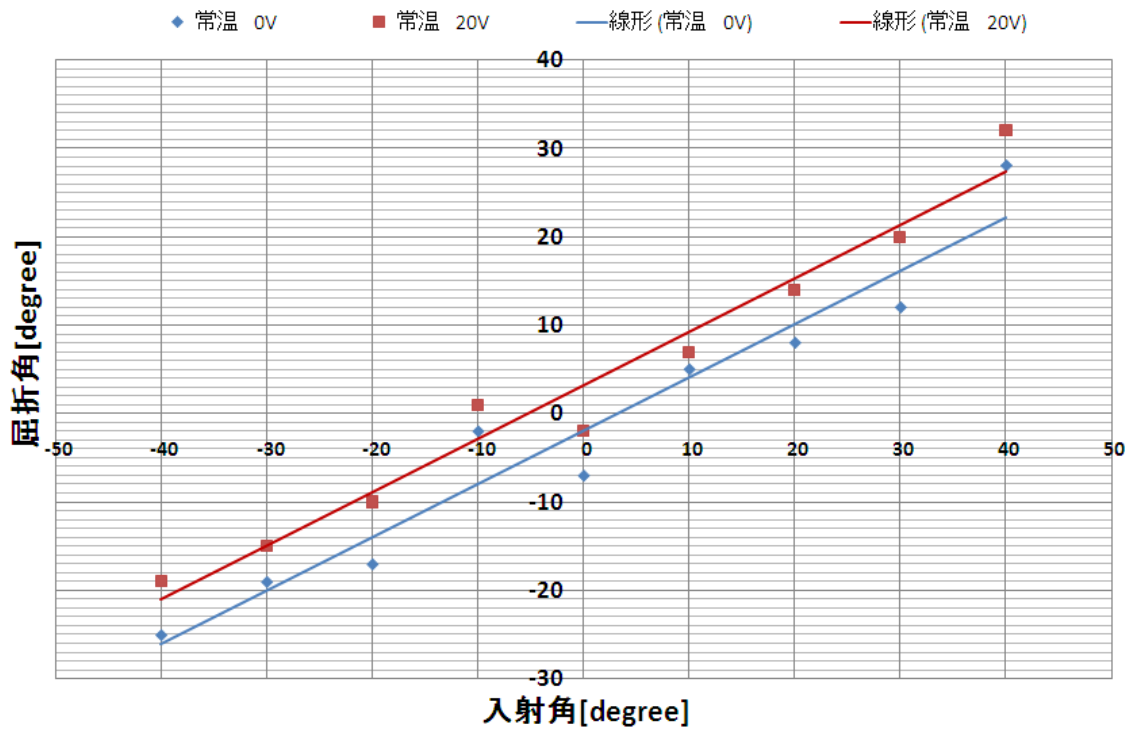


图 4-5.6 液晶導波路屈折測定 常温

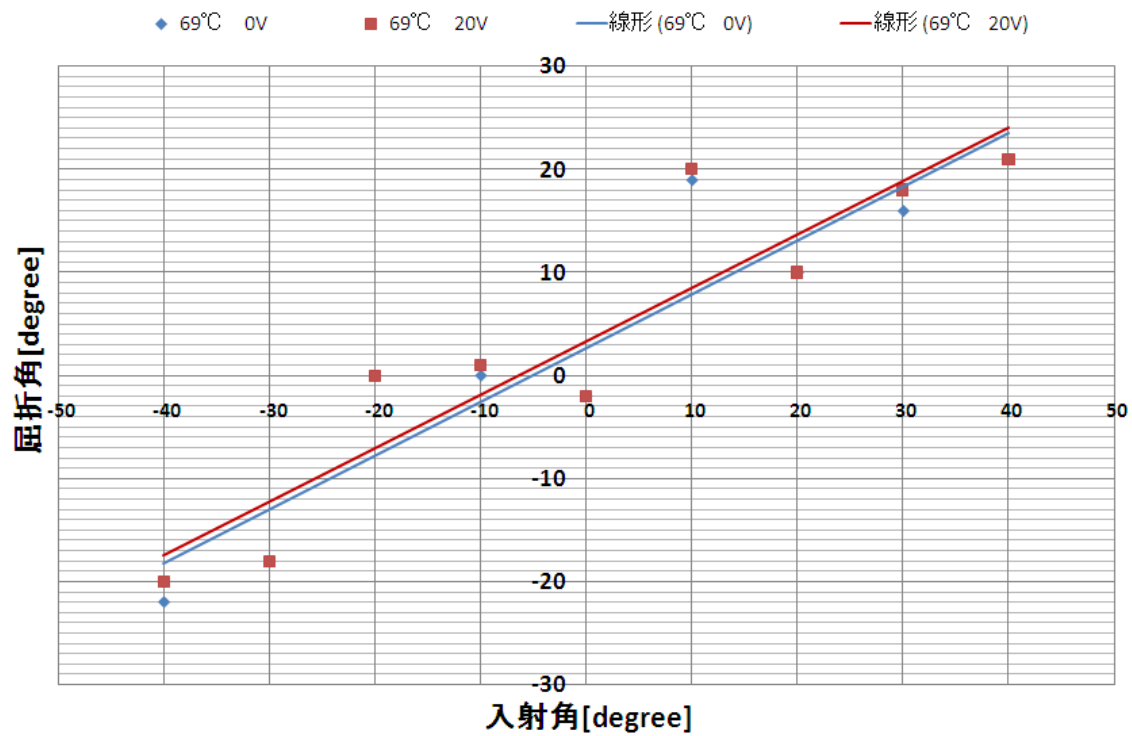


图 4-5.7 液晶導波路屈折角測定 高温 (69°C)

この結果をみると、常温において電圧の有無で屈折角は平均で約  $5^\circ$  変化していることが分かる。一方、 $69^\circ\text{C}$  では電圧印加による変化が約  $0.5^\circ$  となっており、常温での屈折角の値と比べ、明らかに変わっていることが見てとれる。これは液晶温度が転移温度を越え、一軸異方性媒質から等方性媒質へと変化したことによる負の屈折の消失を示しているといえる。実際、常温において液晶に電界を印加することでも負の屈折はなくなると言われているが、常温  $-20\text{V}$ 、 $69^\circ\text{C}-0\text{V}$ 、 $69^\circ\text{C}-20\text{V}$  それぞれの条件における平均屈折角はどれも近い値となっており、これらが通常の屈折角を示している一方で、常温  $-0\text{V}$  においてのみ負の屈折の効果が表れていると考えられる。

今後の課題としては、プロット結果がばらばらとなっており、理論のような線形性を示していないことから、以下の改善を試みる必要がある。

- ・測定中、サンプルの測定箇所によって屈折角が大きく変わってしまうことが確認されたので、今後は場所に依らない良質なサンプル作製を目指す、あるいは測定中はビーム入射場所を常に一定に保っておく測定系の確立が必要になると言える。

- ・屈折角を見積もる際、デジタルカメラで光の様子を撮影し、PC 上で屈折角を確認するという方法をとったが、これでは人の感覚に頼ってしまう点や、誤差が大きく出る恐れがあるように感じたため、今後はより精密な屈折角測定方法を考案する必要があると言える。

#### 4. 6 まとめ

本章では、液晶材料を使用した光通信デバイスとして、波長可変フィルタの作製を試みた。 $\text{Ta}_2\text{O}_5/\text{SiO}_2$  多層膜を RF スパッタリングによって成膜し、光通信において使用される波長  $1550\text{nm}$  帯でストップバンドを形成するようブラッグ反射の条件を計算して設計を行った。この多層膜をミラーとして使用したファブリーペロー共振器を作製し、特定の波長のみを透過する素子を作製した。共振器のギャップに液晶を注入し、電圧印加によって配向を制御し屈折率変化を生じさせ、 $122\text{nm}$  のピーク波長のシフトを確認することができた。

作製した波長可変フィルタの特性を MATLAB で作製したシミュレーションと比較することで、作製したサンプルが理論値通りの特性を示していることを確認した。以上より、波長可変フィルタの試作に成功したといえる。

作製した波長可変フィルタは電界印加によって制御するが、液晶への光照射による光熱効果を利用することでも屈折率変化を起こすことが可能なため、電界を使用せずに光照射のみで波長可変フィルタを使用することを試みた。実験方法としては、光源のレーザ出力を変えつつ、サンプルを設置したときと外した時とで強度を比較し、そこから透過率を算出することで光熱効果が起こっているのかどうかを確認するという方法をとった。結果、透過率に変化が観測されたが、期待するほどの変化は見られなかったため、今後はより出力の大きなレーザ光源を使用して再測定を行う必要があるといえる。

等方性媒質と一軸異方性ネマチック液晶間で負の屈折が生じるという報告例[\*]を参考に、光の伝搬方向を大きく変え得る光導波路の作製を行った。評価の際にはサンプルをヒータの上に設置することで E7 の N-I 点 58.6°C 以上にサンプルを熱することができるようにした。これにより常温、高温 (69°C) それぞれにおける電圧印加による屈折角の変化を確認した。結果、常温において平均 5° の屈折角の変化を確認し、高温においてはその屈折角変化が 0.5° と小さくなることを確認することができた。この結果は負の屈折が生じているかどうかの差を示しているものと思われる。今後は屈折角が場所に依らない良質なサンプルの作製、あるいは測定系の改善を行う必要があると言える。また、屈折角の確認方法についても今後はより正確な測定法を考案する必要があるといえる。



## 第5章 結言

本研究ではポリマーと液晶材料に着目し、光通信で信号の割り振りを行う光スイッチ、新たな微細加工技術として注目を浴びている PBW 技術による直線導波路の作製、波長分割多重通信で使用される波長可変フィルタの試作を行った。

第2章ではポリマー材料『グラシア』を用いた MZ 型光導波路の TO 型光スイッチの作製について述べた。まず、導波路の分岐部分にはアンテナ結合型 Y 分岐を用い、分岐後の導波路には曲がり導波路を採用し、BPM 法でシミュレーションが行われた。分岐角度  $3^\circ$  という角度で伝搬損失 1dB を下回る導波路の作製に成功している。

実際にサンプルを作製すると、Ti ヒータ蒸着前まではシングルモードの光が確認できるが、Ti ヒータ、Al 電極蒸着後にはマルチモードとなってしまい、シングルモードの光スイッチを作製することはできなかった。

参考にマルチモード導波路の光スイッチに電流を流したところ、近視野像に変化がある部分においては、22.4mW の電力で 10.56[dB] の消光比を確認することができた。今後シングルモード導波路が作製できた際にはこれ以上の消光比を期待できると考えられる。

第3章では新たな微細加工技術である PBW 法を利用することで、 $1.55\mu\text{m}$  帯の波長で機能するシングルモードの直線導波路作製を試みた。共同研究先である日本原子力研究開発機構ではビームエネルギーが強いため、コアとなる PMMA 層をビームが貫通する際の、分解、架橋反応を利用することで導波路作製を行った（以後、透過型）。また、芝浦工業大学では PMMA 中にブラッグピーク（ビーム終端部）を生じさせ、そこで起こる大きな屈折率変化により導波路作製を試みた（以後、埋め込み型）。

まず、透過型サンプルについてはシングルモード導波路作製に成功した。近視野像のサイズはファイバの MFD 値である  $10\mu\text{m}$  程度と考えられるため、ファイバとの整合性もよいものと考えられる。さらに、導波路幅をパラメータとして振ることでシングル、マルチモードの境界を確認することができた。最終的には MZ 型光導波路作製を目標としているため、今後は曲がり導波路を形成し、損失等を確認する予定である。

一方、埋め込み型サンプルについては、マルチモードではあったが、導波光を確認することができた。シングルモード導波路を得るためにドーズ量を少なくしたものを作製したが、どれもマルチモード導波路となってしまった。原因として、ブラッグピークだけでなくプロトンビーム侵入部全てが導波路となってしまっていることが考えられる。今後は導波路幅を狭めることでシングルモード形成を目指す。

第4章では、液晶材料を使用した光通信デバイスとして、波長可変フィルタの作製について述べた。Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/SiO<sub>2</sub> 多層膜を RF スパッタリングによって成膜し、光通信におい

て使用される波長 1550nm 帯でストップバンドを形成するようブラッグ反射の条件を計算して設計を行った。この多層膜をミラーとして使用したファブリーペロー共振器を作製し、特定の波長のみを透過する素子を作製した。共振器のギャップに液晶を注入し、電圧印加によって配向を制御し屈折率変化を生じさせ、122nm のピーク波長のシフトを確認することができた。

作製した波長可変フィルタの特性を計算結果と比較することで、作製したサンプルが理論値通りの特性を示していることを確認した。以上より、波長可変フィルタの試作に成功したといえる。

作製した波長可変フィルタは電界印加によって制御するが、液晶への光照射による光熱効果を利用することでも屈折率変化を起こすことが理論的には可能なため、電界を使用せずに光照射のみで波長可変フィルタを使用することを試みた。実験方法としては、光源のレーザ出力を変えつつ、サンプルを設置したときと外した時とで強度を比較し、そこから透過率を算出することで光熱効果が起こっているのかどうかを確認するという方法をとった。結果、透過率に変化が観測されたが、期待するほどの変化は見られなかったため、今後はより出力の大きなレーザ光源を使用して再測定を行う必要があるといえる。

等方性媒質と一軸異方性ネマチック液晶間で負の屈折が生じるという報告例[3]を参考に、光の伝搬方向を大きく変え得る光導波路の作製を行った。評価の際には常温、それから液晶層の転移温度以上である高温(69°C)において、電圧印加による屈折角の変化を確認した。結果、常温において平均 5° の屈折角の変化を確認し、高温においてはその屈折角変化が 0.5° と小さくなることを確認することができた。この結果は負の屈折が生じているかどうかの差を示しているものと思われる。今後は屈折角が場所に依らない良質なサンプルの作製、あるいは測定系の改善を行う必要があると言える。また、屈折角の確認方法についても今後はより正確な測定法を考案する必要があるといえる。

## 謝辞

本研究を行うに当たり、幅広い知識での確なご指導、ご助言をしてくださった花泉修教授に心から感謝いたします。お忙しいなかでも常にアドバイスを下さる姿勢に大変感動を覚えました。また、このような大変興味深い研究テーマの下、大学院二年間の研究生活を送ることができ、大変うれしく思います。

本論文の作成に当たり、お忙しい中審査をしてくださった、高田和正教授に感謝いたします。

本論文の作成に当たり、お忙しい中審査をしてくださった、高橋佳孝准教授に感謝いたします。

PBW 技術を使用した光デバイスの共同研究を行うに当たり、的確なアドバイスを下さり、また、貴重なサンプルをご提供して頂いた芝浦工業大学の西川宏之教授に深く感謝いたします。共同研究のあり方など、明確な視点からご指摘いただいたことで研究の重要性について学ぶことができました。

PBW 技術を使用した光デバイスの共同研究を行うに当たり、お忙しい中サンプルの作製をしていただいた日本原子力研究開発機構の小嶋拓治氏、神谷富裕氏、石井保行氏、佐藤隆博氏、高野勝昌氏、大久保猛氏、山崎明義氏、井上愛知氏、江夏昌志氏、横山彰人氏に心より感謝いたします。

本研究を行うにあたり、親身になって研究生活を支えてくださった三浦健太助教に心より感謝いたします。実験では細かい作業でつまづくことが多く、その都度助けていただいたことで、研究を進めることができました。

本研究を行うにあたり、理論から実際のサンプル作製方法までご教授くださった佐々木友之助教に心より感謝いたします。多くの資料をご提供いただき、液晶について学びながら実験を進めることができました。

マスクアライナー使用に当たりご協力を頂いた櫻井浩教授、尾池弘美技術職員、福長隆之研究生に心より感謝いたします。

PBW 光デバイスの共同研究を行うに当たり、サンプル作製をしていただき、また、貴重なご意見を下さった西川研究室の学生の皆様に感謝いたします。

日々の研究を行うにあたり、実験のサポートをして下さった Post-doctor の Jaspal Parganram Bange 氏、博士 3 年の Mayank Kumar Singh 氏、修士 1 年の上原政人氏、橋本幸子氏、学部 4 年の桐生弘武氏、高橋敬氏、徳江一貴氏、研究生の陳静氏に心より感謝いたします。

本研究を行うにあたり、共に助け合い、研究生活含め日常生活各所において有意義なものにしてくれた同期院生、後輩の皆さんに心より感謝します。

本研究は多くの方々のご指導・ご助言のもとになされたものであり、様々な面で協力をいただいた関係諸氏に改めて感謝し、お礼申し上げます。

## 参考文献

- [1] 総務省 総合通信基盤局 電気通信事業部 データ通信課 HP  
[http://www.soumu.go.jp/main\\_content/000010367.pdf](http://www.soumu.go.jp/main_content/000010367.pdf)
- [2] 日本ペイント株式会社 TECHNO-COSMOS 2006 Mar. Vol.19
- [3] Oleg P. Pishnyak, Oleg D. Lavrentovich *APPLIED PHYSICS LETTERS* **89**, 251103 (2006)
- [4] NTT 技術ジャーナル 2009.12  
<http://www.ntt.co.jp/journal/0912/files/jn200912024.pdf>
- [5] 武藤真三「超高速フォトニックネットワーク用光スイッチデバイスにかかわる研究開発」 SCOPE 第2回成果発表会 予稿集
- [6] Osamu Hanaizumi et.al *Optics Communications* Volume 51, number 4 (1984)  
pp 236-238
- [7] 福田 俊介、“ポリマー導波路型光スイッチに関する研究”、群馬大学大学院修士学位論文、2007.3
- [8] 平谷雄二、花泉修、萩谷吉樹、“感光性ポリシランを用いた低消費電力熱光学素子”、電子情報通信学会技術研究報告 OPE2004-220(2005-02)、220号、pp13-18. 2004.
- [9] 岡崎信次 「ハーフピッチ 32nm 技術対応のリソグラフィ技術」  
『O plus E』 Vol.29 No.9 (2007年9月) pp 890-894  
株式会社 新技術コミュニケーションズ
- [10] 山田章夫 「電子ビーム直描 MCC-CP 装置の開発」  
『O plus E』 Vol.29 No.9 (2007年9月) pp 915-919  
株式会社 新技術コミュニケーションズ
- [11] 芝浦工業大学 フレキシブル微細加工技術センター ホームページ  
<http://www.cfm.ae.shibaura-it.ac.jp/ResearchEquip.html> 2010/01/27
- [12] A.A.Bettioli et al., *Nuclear Instruments and Methods in Physics Reserch B* **231** (2005) 364-371
- [13] 独立行政法人 日本原子力研究開発機構 高崎量子応用研究所 イオン加速器管理課 ホームページ [http://www.taka.jaea.go.jp/tiara/662/662j/index/index\\_j.htm](http://www.taka.jaea.go.jp/tiara/662/662j/index/index_j.htm)  
2010/01/27
- [14] I. Rajta et al., *Nucl. Instr. And Meth. B* **260**, 400 (2007)
- [15] T.C. Sum et al., *Journal of Lightwave Technology*, Vol, 24, NO. 10, October 2006
- [16] A. A. Bettioli et al., *J. Crystal Growth* **288** (2006) 209.
- [17] 液晶便覧編集委員会 編 「液晶便覧」 丸善株式会社 2000年
- [18] 依田秀彦 大寺康夫 川上彰二郎「液晶を用いた波長可変フィルタ」  
電子情報通信学会技術研究報告 TECHNICAL REPORT OF IEICE. OME95-48,

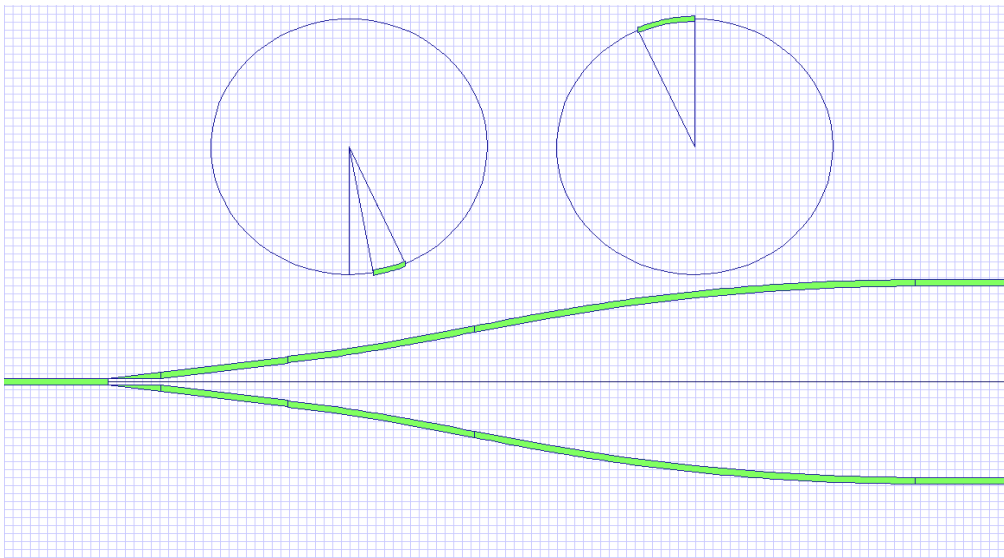
OPE95-89 (1995-10)

- [19]岡野光治、小林駿介 編 「液晶・基礎編」 培風館 1985年
- [20] 吉野勝美 武田寛之 ” フォトニック結晶の基礎と応用” コロナ社 pp.165-184
- [21] 野中 克彦 編「液晶ディスプレイ ―その開発の歴史―」  
『パテント』 Vol. 59 No.11 (2006年) pp 82-95
- [22] S. Chandrasekhar, Liquid Crystals, 2<sup>nd</sup> ed. (Cambridge University Press, 1992
- [23] 黒川 隆志、南條 光章 “先端光エレクトロニクス シリーズ 12 光機能デバイス” 共立出版株式会社 pp.29-33
- [24]北村道夫 「第 18 章 ネマチック液晶の電気・光学応答 LCD 設計役立つ基礎理論と数値解析手法 (その 1)」 『液晶化学実験入門』シグマ出版 pp.195-206
- [25] 赤羽正志 「液晶の連続体理論とその外場応答への応用」2001年 日本液晶学会物理・物性フォーラム研究会講演要旨集 pp1-20
- [26] 三木哲也 須藤昭一 編「光通信技術ハンドブック」オプトロニクス社 pp339-342
- [27] Samad M.Edlou, Ali Smahkiewicz, Ghanim Aal-Jumaily “Optical properties and environmental stability of oxide coatings deposited by reactive sputtering”APPIED OPTICS Vo.32, No.28 October 1993 pp.5601-5605
- [28] Edward D.Palik, “Handbook of Optical Constants of Solids” ACADEMIC PRESS pp.760-763
- [29] [A. Ghanadzadeh and M. S. Beevers, J. Mol. Liq. **94**, 97 (2001)]
- [30] [P.Yeh and C. Gu, Optics of Liquid Crystal Displays (Wiley, 1999)]
- [31] [S. Brugioni and R. Meucci, Infrared. Phys. Tech.**49**, 210 (2007)]

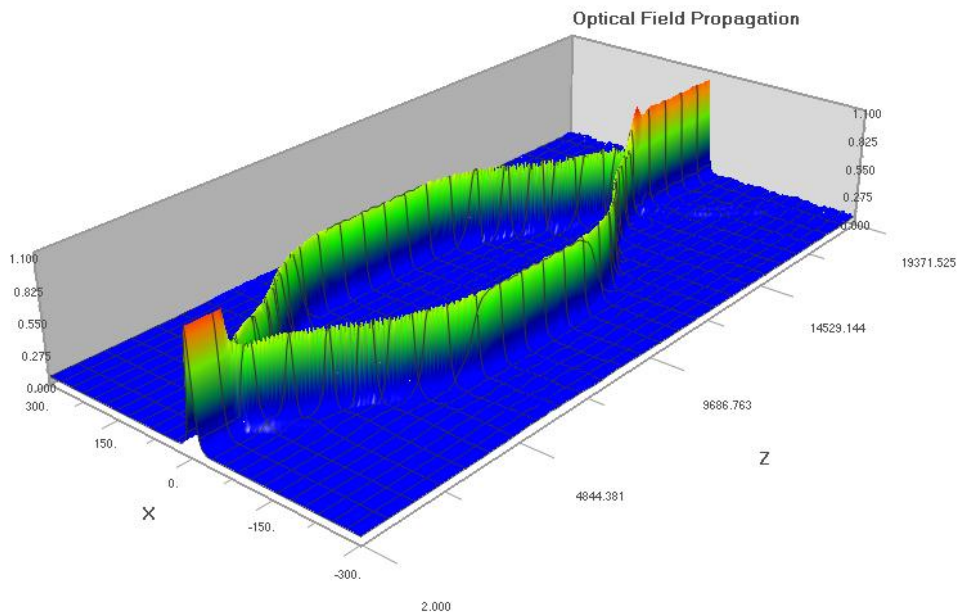
## 付録A BPM法によるシミュレーション結果 [7]

MZ型導波路の半分のレイアウト図と、MZ型導波路全体のシミュレーション結果を次の(1)～(5)に示す。

- (1) アンテナ結合型 Y 分岐、分岐角度  $2\theta=3^\circ$ 、曲率半径  $R=7\text{cm}$ 、オフセット  $0.4\mu\text{m}$  の曲がり導波路で構成された MZ 型導波路

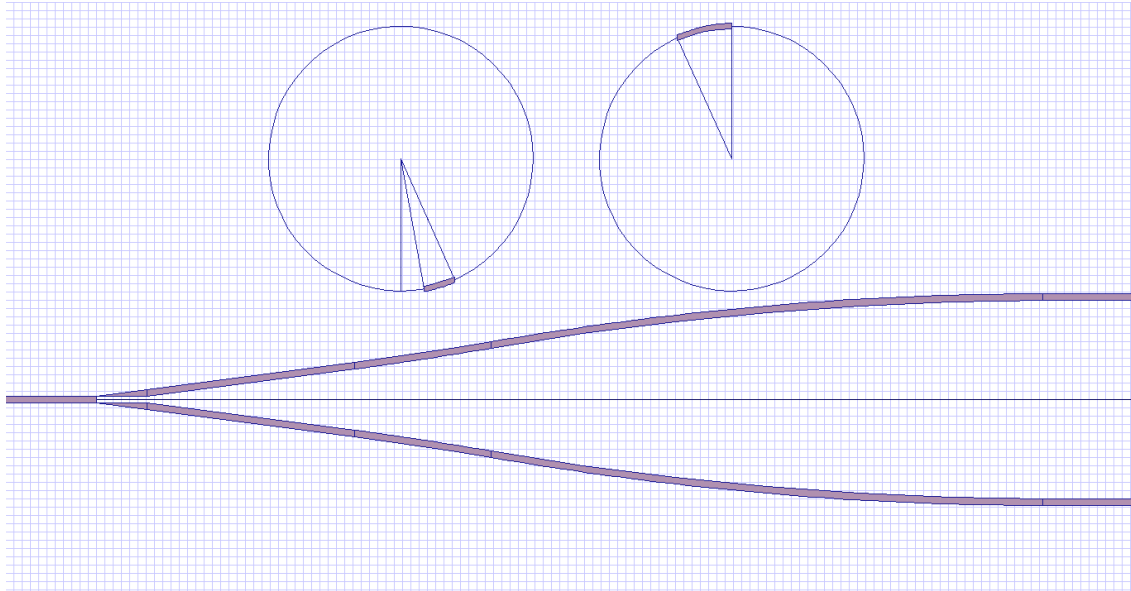


(a) MZ型導波路の半分のレイアウト図

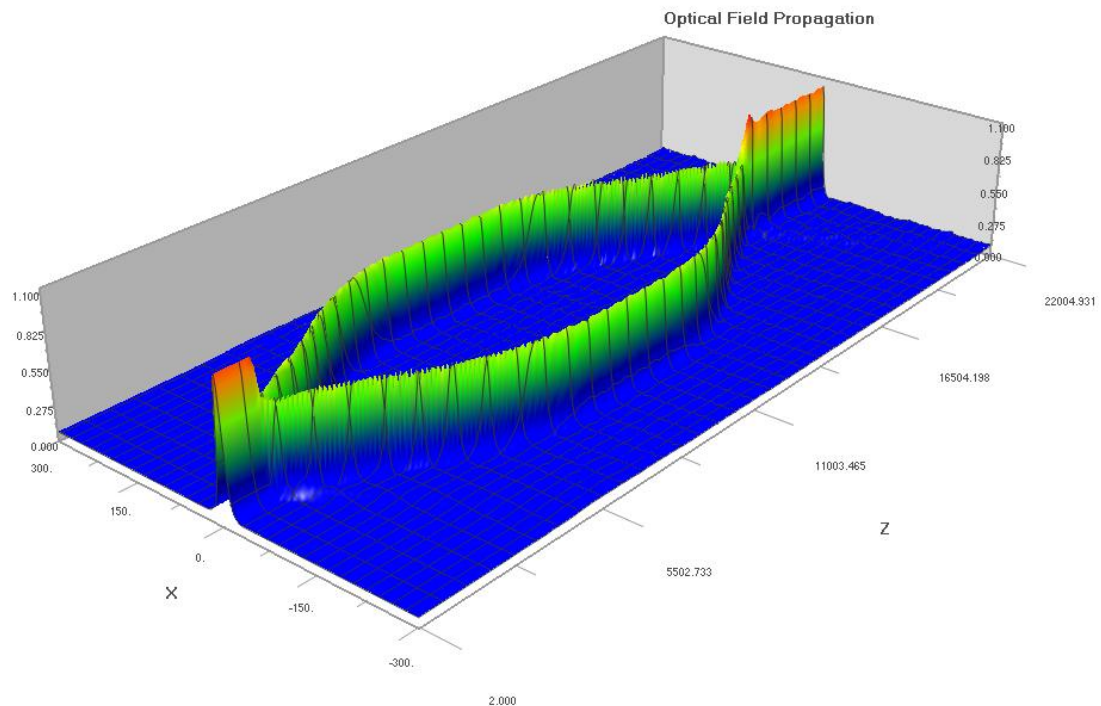


- (b) MZ型導波路全体の x-z 平面上の界分布  $|E(x,z)|$   
(縦軸の単位は Amplitude、x 及び z 軸の単位は  $\mu\text{m}$ ) (全体の損失  $0.2041\text{ dB}$ )

(2) アンテナ結合型 Y 分岐、分岐角度  $2\theta=3^\circ$ 、曲率半径  $R=12\text{cm}$ 、オフセット  $0.22\ \mu\text{m}$  の曲がり導波路で構成された MZ 型導波路

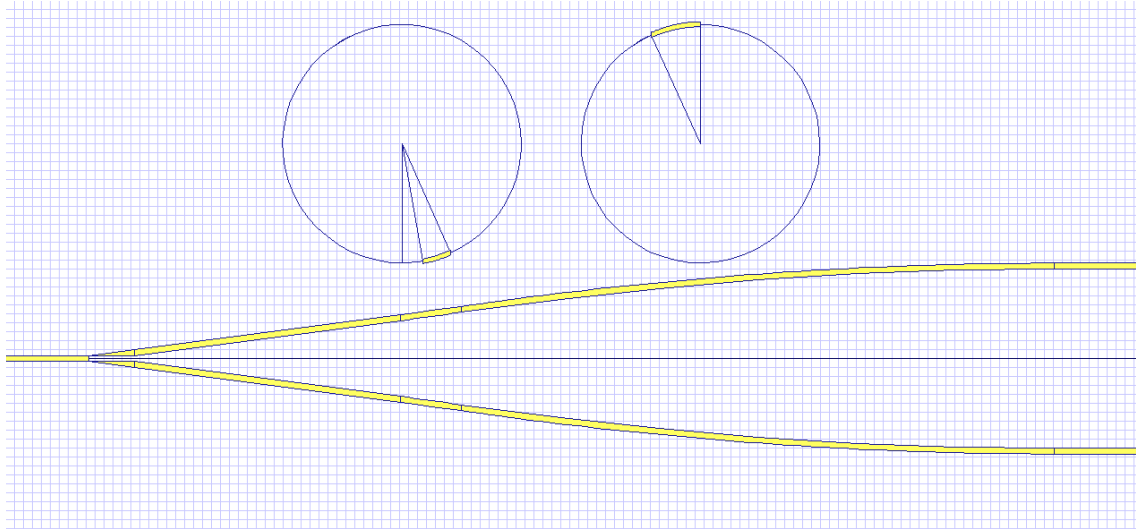


(a) MZ 型導波路の半分のレイアウト図

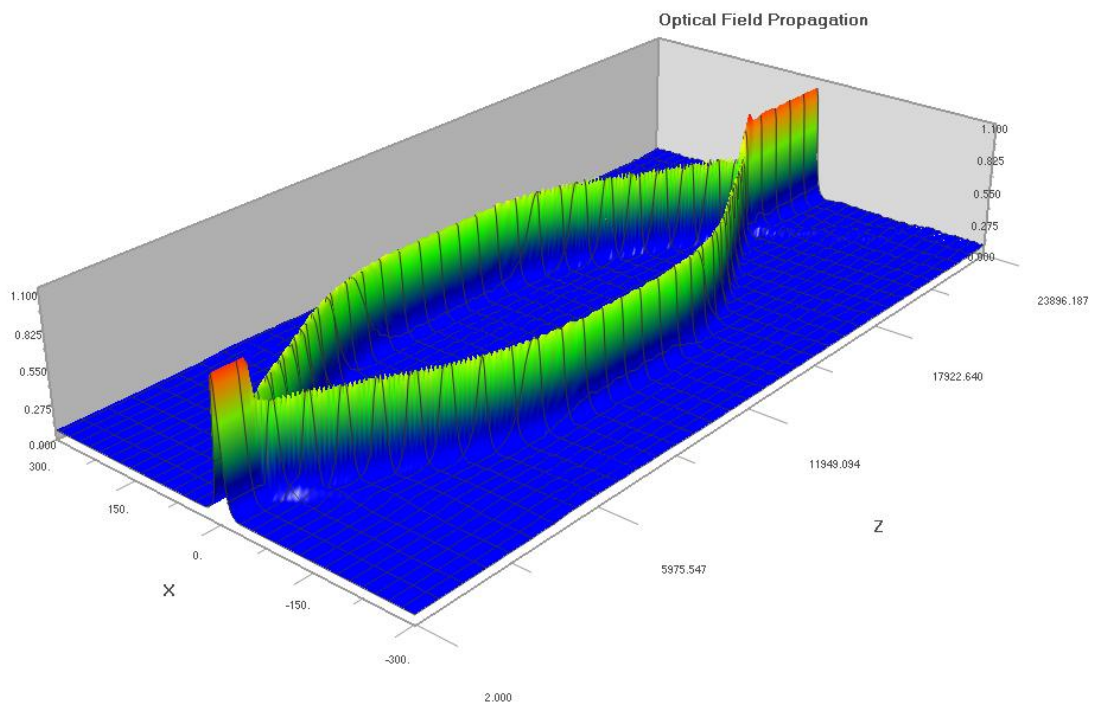


(b) MZ 型導波路全体の MZ 型導波路全体の  $x$ - $z$  平面上の界分布  $|E(x,z)|$   
 (縦軸の単位は Amplitude、 $x$  及び  $z$  軸の単位は  $\mu\text{m}$ ) (全体の損失  $0.1941\ \text{dB}$ )

(3) アンテナ結合型 Y 分岐、分岐角度  $2\theta=3^\circ$ 、曲率半径  $R=17\text{cm}$ 、オフセット  $0.15\ \mu\text{m}$  の曲がり導波路で構成された MZ 型導波路



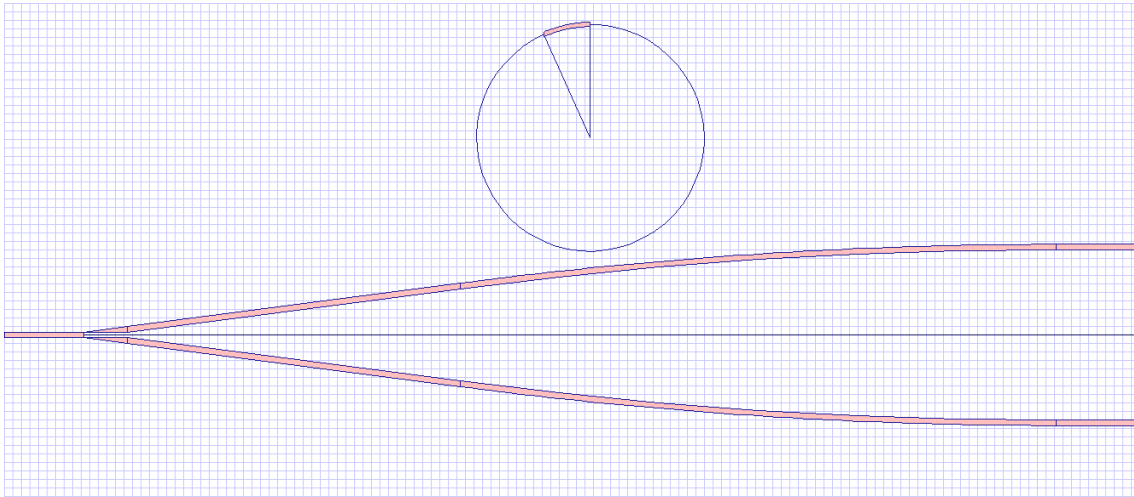
(a) MZ 型導波路の半分のレイアウト図



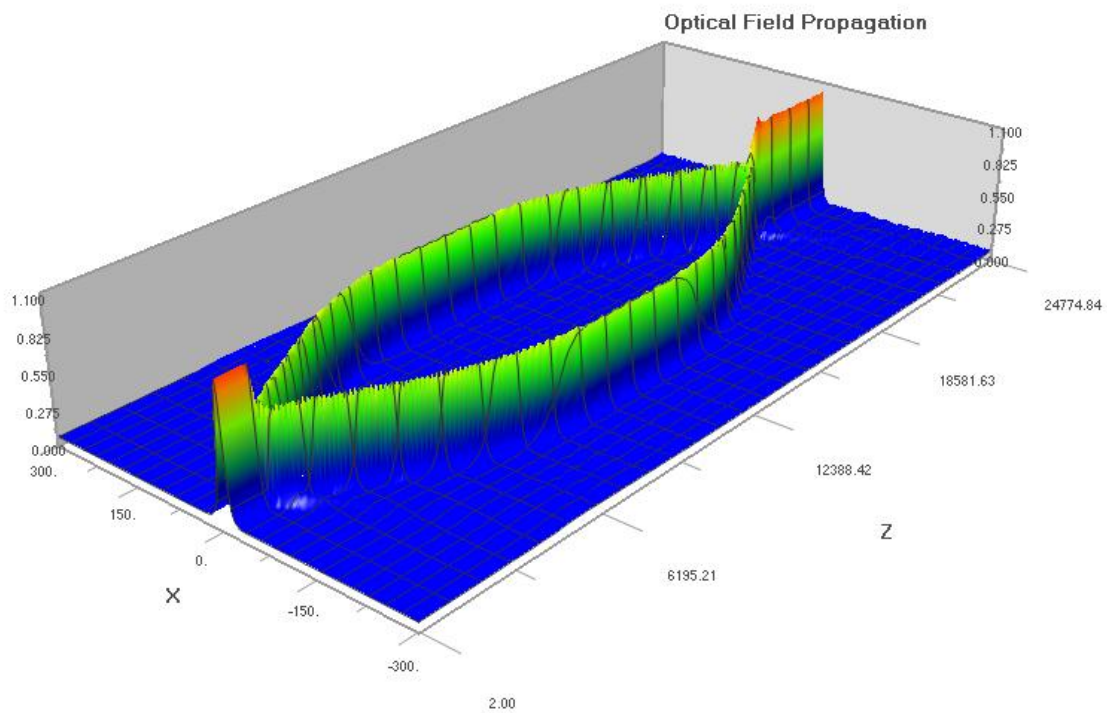
(b) MZ 型導波路全体の MZ 型導波路全体の  $x$ - $z$  平面上の界分布  $|E(x,z)|$   
 (縦軸の単位は Amplitude、 $x$  及び  $z$  軸の単位は  $\mu\text{m}$ ) (全体の損失  $0.1750\ \text{dB}$ )



(4) アンテナ結合型 Y 分岐、分岐角度  $2\theta=3^\circ$ 、曲率半径  $R=20\text{cm}$ 、オフセット  $0.1\mu\text{m}$  の曲がり導波路で構成された MZ 型導波路

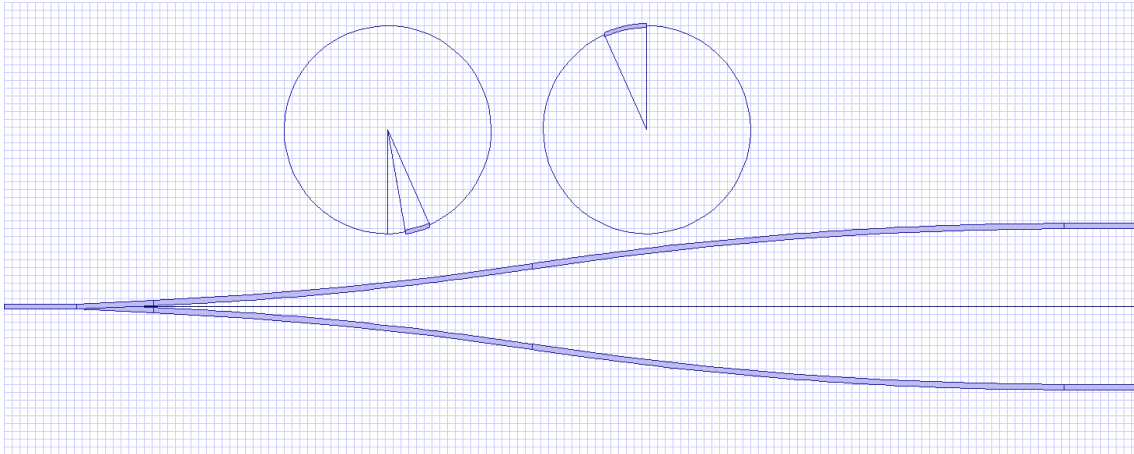


(a) MZ 型導波路の半分のレイアウト図

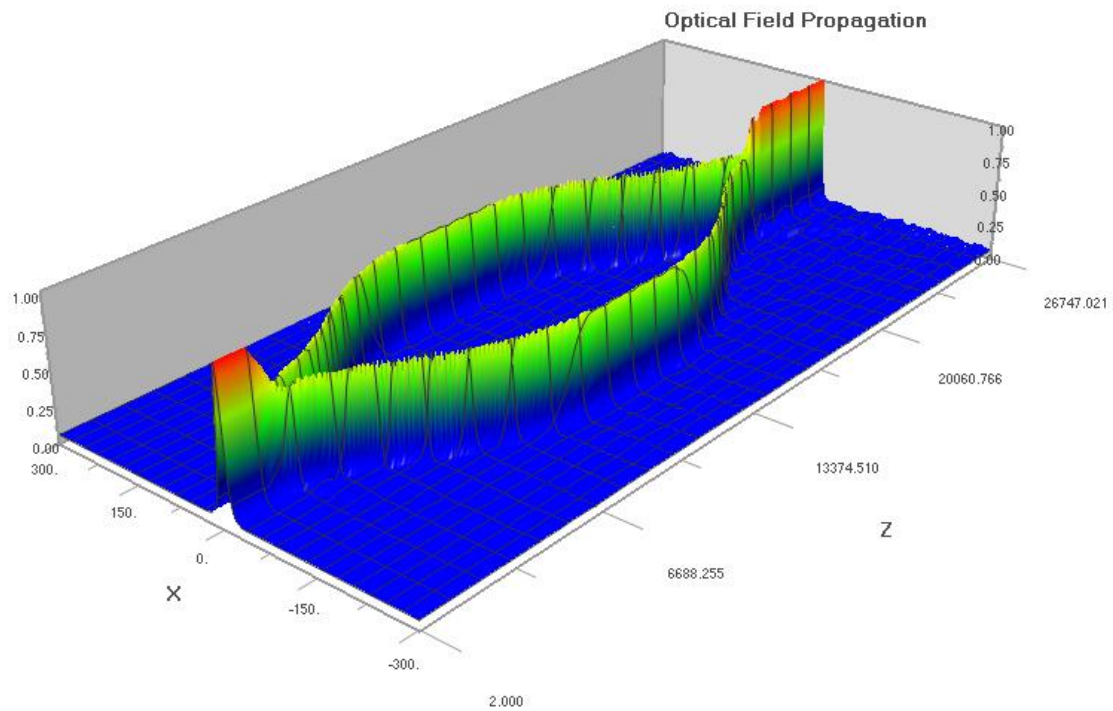


(b) MZ 型導波路全体の MZ 型導波路全体の  $x$ - $z$  平面上の界分布  $|E(x,z)|$   
 (縦軸の単位は Amplitude、 $x$  及び  $z$  軸の単位は  $\mu\text{m}$ ) (全体の損失  $0.1561\text{ dB}$ )

- (5) 従来型 Y 分岐、分岐角度  $2\theta=1^\circ$ 、曲率半径  $R=17\text{cm}$ 、オフセット  $0.15\ \mu\text{m}$  の曲がり導波路で構成された MZ 型導波路



(a) MZ 型導波路の半分のレイアウト図



- (b) MZ 型導波路全体の MZ 型導波路全体の  $x$ - $z$  平面上の界分布  $|E(x,z)|$   
 (縦軸の単位は Amplitude、 $x$  及び  $z$  軸の単位は  $\mu\text{m}$ ) (全体の損失  $0.1542\ \text{dB}$ )

## 付録 B. 結合効率の導出

光導波路内の伝搬モードの電磁界分布はガウス関数で近似することができるので、式 (2-3.1) の  $E^{(1)}$ 、 $E^{(2)}$  をそれぞれガウス関数で近似すると、次のようになる。

$$\begin{aligned} E^{(1)}(x, y) &\approx \exp\left\{-\left[\left(\frac{x}{w_{x1}}\right)^2 + \left(\frac{y}{w_{y1}}\right)^2\right]\right\} \\ E^{(2)}(x, y) &\approx \exp\left\{-\left[\left(\frac{x}{w_{x2}}\right)^2 + \left(\frac{y}{w_{y2}}\right)^2\right]\right\} \end{aligned} \quad (\text{B.1})$$

ここで、それぞれのパラメータは以下の通りである。

- $w_{x1}$  : 光ファイバの x 軸方向の MFD (モードフィールドダイアミータ)
- $w_{y1}$  : 光ファイバの y 軸方向の MFD
- $w_{x2}$  : 導波路の x 軸方向の MFD
- $w_{y2}$  : 導波路の y 軸方向の MFD

式(B.1)を式(2-3.1)に代入すると、次のように表される。

$$\eta = \frac{\left| \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} E^{(1)}(x, y) E^{(2)*}(x, y) dx dy \right|^2}{\left[ \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} |E^{(1)}(x, y)|^2 dx dy \right] \left[ \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} |E^{(2)}(x, y)|^2 dx dy \right]} \quad (\text{B.2})$$

ここで、それぞれの部分の計算を行う。

$$|E(x, y)|^2 = \exp\left\{-2\left[\left(\frac{x}{w_x}\right)^2 + \left(\frac{y}{w_y}\right)^2\right]\right\} \quad (\text{B.3})$$

ガウス関数の公式[B.2]を用いて、

$$\begin{aligned} \left[ \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} |E(x, y)|^2 dx dy \right] &= \int_{-\infty}^{\infty} \exp \left[ -2 \left( \frac{x}{w_x} \right)^2 \right] dx \int_{-\infty}^{\infty} \exp \left[ -2 \left( \frac{y}{w_y} \right)^2 \right] dy \\ &= \sqrt{\frac{\pi}{2/w_x^2}} \sqrt{\frac{\pi}{2/w_y^2}} = \frac{\pi}{2} w_x w_y \end{aligned} \quad (\text{B.4})$$

$$\begin{aligned} E^{(1)}(x, y) E^{(2)}(x, y) &= \exp \left\{ - \left[ \left( \frac{x}{w_{x1}} \right)^2 + \left( \frac{x}{w_{x2}} \right)^2 + \left( \frac{y}{w_{y1}} \right)^2 + \left( \frac{y}{w_{y2}} \right)^2 \right] \right\} \\ &= \exp \left\{ - \left[ \left( \frac{w_{x1}^2 + w_{x2}^2}{w_{x1}^2 w_{x2}^2} \right) x^2 + \left( \frac{w_{y1}^2 + w_{y2}^2}{w_{y1}^2 w_{y2}^2} \right) y^2 \right] \right\} \end{aligned} \quad (\text{B.5})$$

$$\begin{aligned} \left| \int_{-\infty}^{\infty} E^{(1)}(x, y) E^{(2)*}(x, y) dx dy \right|^2 &= \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \exp \left\{ - \left[ \left( \frac{w_{x1}^2 + w_{x2}^2}{w_{x1}^2 w_{x2}^2} \right) x^2 + \left( \frac{w_{y1}^2 + w_{y2}^2}{w_{y1}^2 w_{y2}^2} \right) y^2 \right] \right\} dx dy \\ &= \int_{-\infty}^{\infty} \exp \left[ - \left( \frac{w_{x1}^2 + w_{x2}^2}{w_{x1}^2 w_{x2}^2} \right) x^2 \right] dx \int_{-\infty}^{\infty} \exp \left[ - \left( \frac{w_{y1}^2 + w_{y2}^2}{w_{y1}^2 w_{y2}^2} \right) y^2 \right] dy \\ &= \left\{ \sqrt{\frac{\pi}{\frac{w_{x1}^2 + w_{x2}^2}{w_{x1}^2 w_{x2}^2}}} \sqrt{\frac{\pi}{\frac{w_{y1}^2 + w_{y2}^2}{w_{y1}^2 w_{y2}^2}}} \right\}^2 \\ &= \frac{\pi^2 w_{x1}^2 w_{x2}^2 w_{y1}^2 w_{y2}^2}{(w_{x1}^2 + w_{x2}^2)(w_{y1}^2 + w_{y2}^2)} \end{aligned} \quad (\text{B.6})$$

よって結合効率  $\eta$  は式(B.1)~(B.6)より、

$$\begin{aligned} \eta &= \frac{\pi^2 w_{x1}^2 w_{x2}^2 w_{y1}^2 w_{y2}^2}{(w_{x1}^2 + w_{x2}^2)(w_{y1}^2 + w_{y2}^2)} \\ &= \frac{\pi^2}{4} w_{x1} w_{y1} w_{x2} w_{y2} \\ &= \frac{4 w_{x1} w_{y1} w_{x2} w_{y2}}{(w_{x1}^2 + w_{x2}^2)(w_{y1}^2 + w_{y2}^2)} \end{aligned} \quad (\text{B.7})$$

## 付録 C 近視野像測定における問題

光ファイバからの光を ITV カメラで観測する際、OFF SET 機能を使用しなければプロファイルは図 C-1 に示すようなガウシアン分布にしたがった強度分布を示す。一方、ITV カメラの OFF SET 機能を使うと強度分布が図 C-2 のように、歪なものとなることわかる。そのため MFD 計算の際、OFF SET 機能はノイズ除去に必要な最低限の値とすべきである。また、Gain を使用することでも強度分布が本来の式とは異なることが考えられるため使用すべきではない。

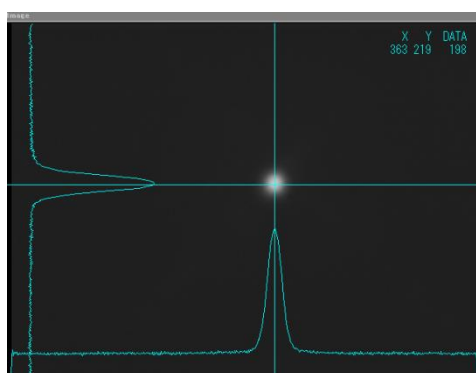


図 C-1 近視野像 OFF SET なし

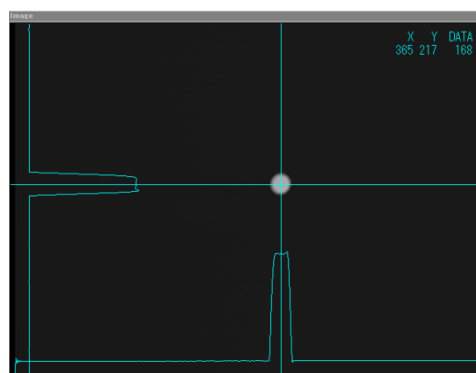


図 C-2 近視野像 OFF SET あり

もう一点、MFD 算出の際、近視野像をビットマップ形式で保存して強度ごとに数値化するが、得られた導波光のデータが図 C-3 に示すようなサイズるとき、フリーソフト「bmp2csv」で各輝度毎に数値化すると図 C-4 のようになる。

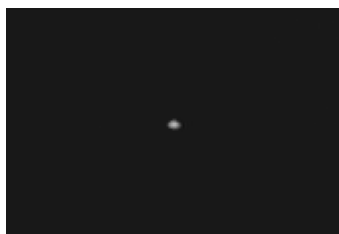


図 C-3 近視野像測定結果

(顕微鏡の対物レンズを 40 倍としても、通常の導波光観測ではこの程度の大きさの近視野像しか観測することができない)

	IP	IQ	IR	IS	IT	IU	IV	IW	IX	IY	IZ	JA
48	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7
49	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7
50	7	7	7	8	7	7	7	7	7	7	7	7
51	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7
52	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7
53	7	7	7	7	7	7	7	8	7	7	7	7
54	7	7	7	7	7	7	7	7	8	7	7	7
55	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7
56	7	7	7	7	12	39	35	7	6	8	7	7
57	7	7	8	30	89	105	93	45	16	5	8	8
58	7	7	27	97	137	182	159	117	58	17	2	8
59	7	8	38	105	142	183	158	124	74	28	0	8
60	7	7	12	57	95	104	108	78	44	13	3	8
61	7	7	7	7	13	37	31	25	8	6	8	8
62	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7
63	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7
64	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7
65	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7
66	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7
67	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7
68	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7
69	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7
70	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7
71	7	7	7	7	7	8	7	7	7	7	7	7
72	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7
73	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	8

図 C-4 「bmp2csv」で図 C-3 の近視野像を数値化したもの

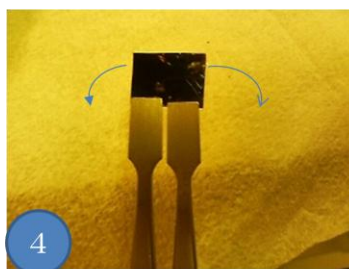
MFDを求めるために図 C-4において最大強度から  $1/e^2$  となる強度までの距離を見積もろうとしても Excel 上で数マス程度にしか相当しない。よって 1 マス当たりの距離が大きく、ここから MFD をここから見積もることは困難であることが分かる。また、付録 E にて述べている MFD 算出法を実行するときも、図 C-4 のデータ数では誤差が大きく、正確な MFD 値を求めることはできないと思われる。そのため、ITV カメラ - 接眼レンズ間を離して像を拡大したが、この方法が正しいのかはまだ確かめられていない。

## 付録D へき開

図 D1 にへき開の手順を示す。



表面端をカッターあるいは  
メスなどで傷つける



傷つけた部分が中央に来るように持ち、  
ピンセット等で開くようにして割る



へき開後、PMMA部分だけ残ることが  
なければ成功

図 D1 へき開の方法説明図

近視野像を観測する際、へき開に失敗すると導波光を観測することができない。コツを以下に列挙する。

- ・カッターで傷つける際に力を入れすぎると基板が割れることがあるので注意が必要
- ・手順④において、ピンセットの中央に傷がくるように持つ
- ・極力ピンセットの先端でサンプルを持つようにする
- ・カットした際、PMMA ごと一度に切れる方が、近視野像が確認しやすいように思える。

## 付録 E MFD(Mode Field Diameter)の算出

現状では MFD の算出ができていないが、現状の測定方法とその問題点について述べる。まず、MFD の定義について説明する。

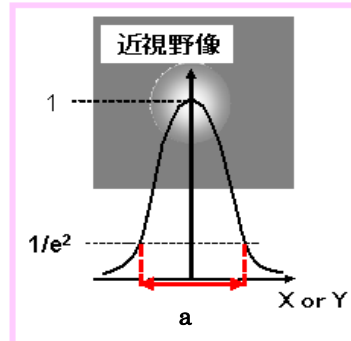


図 E1 MFD 説明図

図 E1 において、近視野像の最大強度を 1 とし、強度がその  $1/e^2$  になるまでの距離(図中の a)が MFD の値となる。シングルモード光ファイバではこの値が  $10\mu\text{m}$  程度となっている。

この測定を行う際、より厳密な測定を行うためには、ガウシアン分布と近視野像の測定結果をフィッティングするという方法をとる。以下に例として、シングルモードファイバの MFD 算出方法について述べる。

シングルモードファイバ MFD 算出方法

- ①シングルモードファイバの近視野像をビットマップ形式で保存する
- ②ドットひとつひとつを 256 段階の輝度で振り分けるフリーソフト「bmp2csv」で近視野像のデータを数値化する(エクセルデータとなる)
- ③数値化したデータを必要なサイズに切り取る
- ④近視野像において、光のない部分(黒い部分)の数値(通常は 20 程度)を全体から差っ引く。
- ⑤測定したデータは  $\gamma$  補正がかかっているため、輝度は本来の電界分布とは異なるものとなっている。そのため全ての数値を次の式で  $\gamma$  補正前の値に直す。

$$\gamma \text{ 補正前の値} = \left( \frac{[\text{データの値}]}{255} \right)^{0.6} \cdot 255 \quad (\text{E-1})$$

ここで、0.6 という数字が  $\gamma$  値であり、これは ITV カメラ(高性能ビジコンカメラ)の仕様書から確認した値である。

- ⑥ガウシアン

$$I = \exp \left[ -2 \left( \frac{r}{w} \right)^2 \right] \quad (\text{E-2})$$

において、w が MFD の値となるため、この式の I と  $\gamma$  補正前の値を比較し、フィッテ



ングを行う。具体的には、図 E2 に示すように中心位置から同じマス目の値同士を比較する。

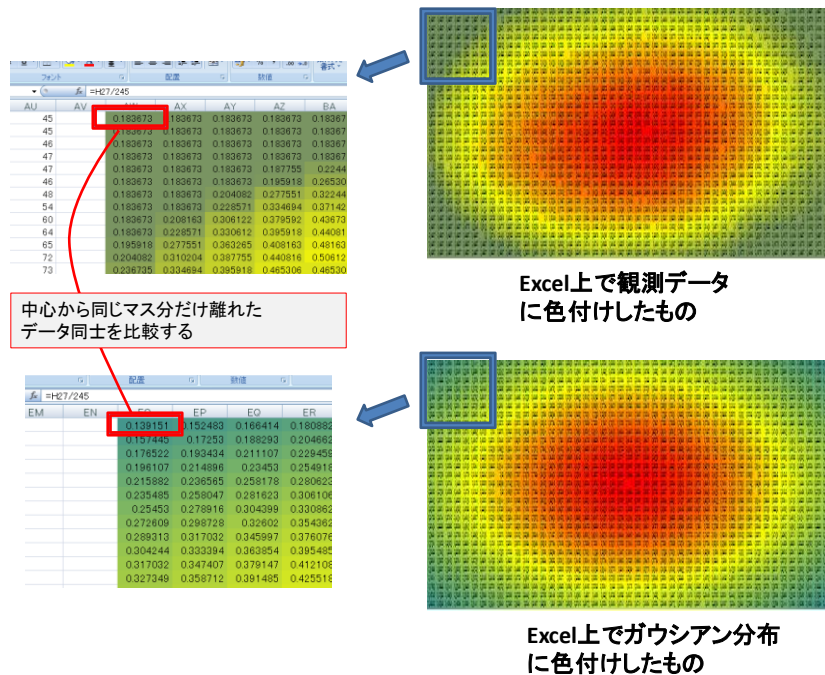


図 E2 MFD 計算方法

この際、比較には最小二乗法を用いる。

$$V = \sum_{\min} |Y(i, j) - Y_f(i, j)|^2 \quad (\text{E-3})$$

ここで  $\Sigma$  は全てのマス目で比較することを意味し  $Y(i, j)$  は中心から横  $i$  番目、縦  $j$  番目のマスのガウシアン分布の強度を示している。同様に  $Y_f(i, j)$  は中心から横  $i$  番目、縦  $j$  番目の近視野像の輝度値を示す。この  $V$  が最小となるような値を求める。

なお、(E-2) のガウシアン分布の計算式のままではエクセル上での距離を指定することができない。そこで、次のような工夫をした。

$$I = \exp \left[ - \left( 2 \frac{i \times A}{w_x} \right)^2 - \left( 2 \frac{i \times B}{w_y} \right)^2 \right] \quad (\text{E-4})$$

ここで、 $A, B$  はそれぞれエクセル上で行方向に対する 1 マス当たりの距離、列方向に対する 1 マス当たりの距離を示す値である。この値は、ファイバの近視野像測定時に、測定系を変えずにマイクロメータを画面上に映し出し、スケールを決める、あるいはファイバの位置をステージの調節目盛で動かし、実際に画面上で動いた距離と照らし合わせる等の方法で求めることができる。

こうして計算した  $I$  を式 (E-3) の  $Y_f(i, j)$  とし、 $V$  を最小とする  $w_x, w_y$  を求める。作業としては  $w_x, w_y$  を適当に当てはめていき、 $V$  が最小となるような  $w_x, w_y$  を探すというものになるが、この際、Excel の Visual Basic を使用する。なお、 $w_x, w_y$  を 2 倍したも

のが MFD となることに注意が必要である。

#### 問題点

ファイバの MFD は  $10\mu\text{m}$  ということが分かっているので、ファイバの近視野像とガウシアンとのフィッティングの結果から求められる MFD の値もこの付近とならなければならない。だが、現状ではどうしても  $10\mu\text{m}$  よりも大きい値が出てしまう。以下、現状で考えられる問題点について列挙する。

- ・近視野像とガウシアン分布のフィッティングを行うにはある程度大きな近視野像を観測する必要がある。そのため、現状では ITV カメラ-接眼レンズ間距離を大きくし、ファイバー対物レンズ間距離をピントが合うような距離にして倍率を上げ、像を拡大させている。ただ、この方法で問題ないのかはまだ確かめてはいない。

- ・観測する近視野像の明るさによって、MFD が異なるという結果が得られた。傾向としては光が弱い場合に MFD が小さくなり、逆に光が強いと MFD は大きい値を示した。ただ、再現性がないためにこの傾向についても確信を持てるものではない。

- ・MFD の規格値が  $750\mu\text{m}$  から  $850\mu\text{m}$  と分かっている He-Ne レーザに対してフィッティングを行ったところ、フィッティングによる MFD 値は規格値の範囲内となった。これより、計算過程自体に問題はないということが分かった。また、He-Ne レーザの測定の際にはレンズを使用していないため、レンズを使用した測定系に問題があると思われる。

以上の点から、まずは ITV カメラ-接眼レンズを離して拡大させる方法が正しいのかどうかを確認する、あるいは対物レンズの倍率を上げる必要があると言える。

## 付録 F 屈折率算出方法

本研究における屈折率の算出方法を以下に示す。

まず、作製した薄膜の屈折率が、基板やそれを挟む他の材料（主に空気）とどのような関係になっているのかを知っておく必要がある。今回用いた材料に関しては、各種物性事典等に記載されているものを参考として、その差について比較した。

基板、薄膜、他の材料（主に空気）の順に屈折率をそれぞれ  $n_0$ 、 $n_1$ 、 $n_2$  とすると、 $n_0 < n_1 > n_2$  となることが分かる。

次に、透過率の測定結果をグラフにしたものを用意する。図 F1 に透過率のグラフを示す。

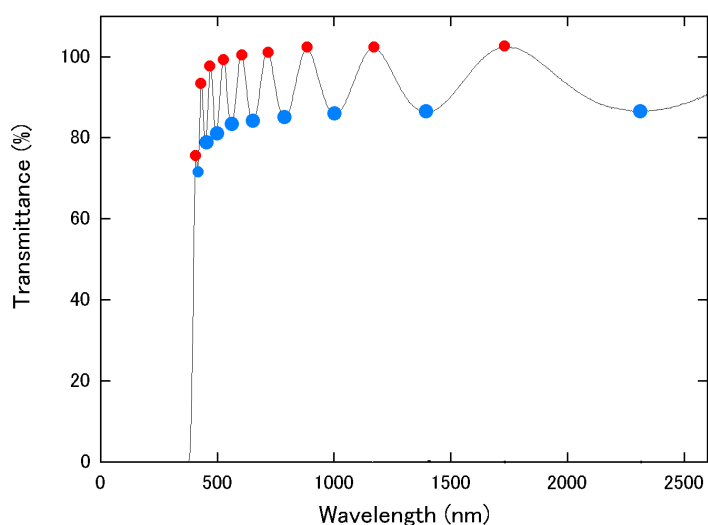


図 F1 透過率

これを見ると、透過率の高い波長域において共振（リップル）が存在していることが分かる。これは、試料中で透過・反射を繰り返す、透過してきた光の光路長が、波長の整数倍となって透過光を強めることが原因である。

この極大値、極小値を用いて屈折率の計算を行う。

各極大、極小値における波長をとり、その波長の逆数を横軸、極大値を偶数次、極小値を奇数次として、波長の長いほうから順に短いほうへとその次数を縦軸のパラメータとして割り振る。図 F2 にその様子を示す。

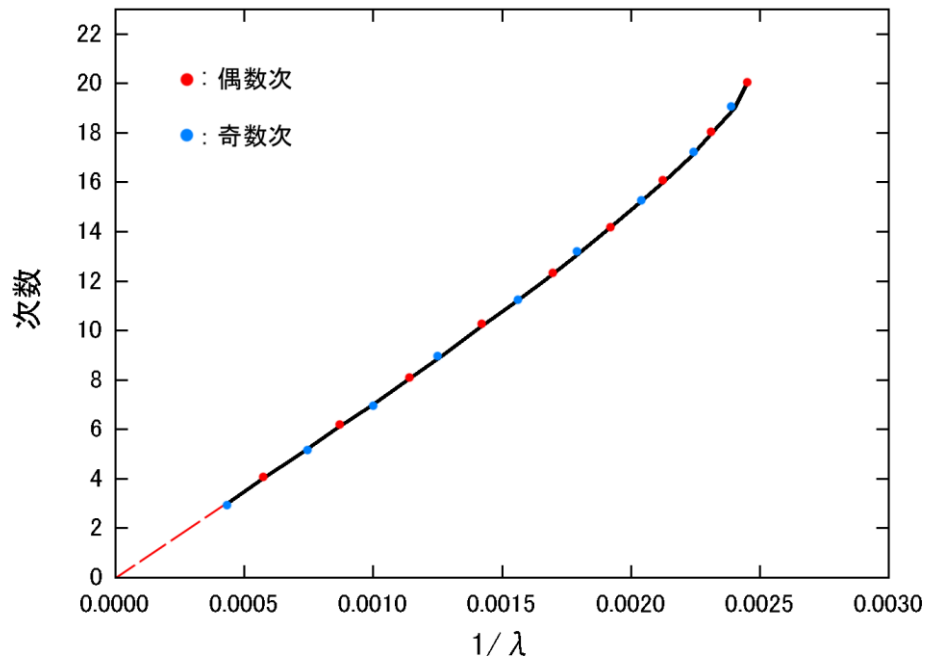


図 F2 次数決定

このとき作製された曲線の近似線が、縦軸、横軸の0（原点）と交わるようにそれぞれに与えた値を調節する。それが屈折率を決定する際の次数  $m$  となる。

以下にその式を示す。

$$n = \frac{m \lambda_m}{4d} \quad (m : \text{次数})$$

$d$  は膜厚である。これによって、各波長での屈折率を計算する。

グラフにしたものを図 F3 に示す。

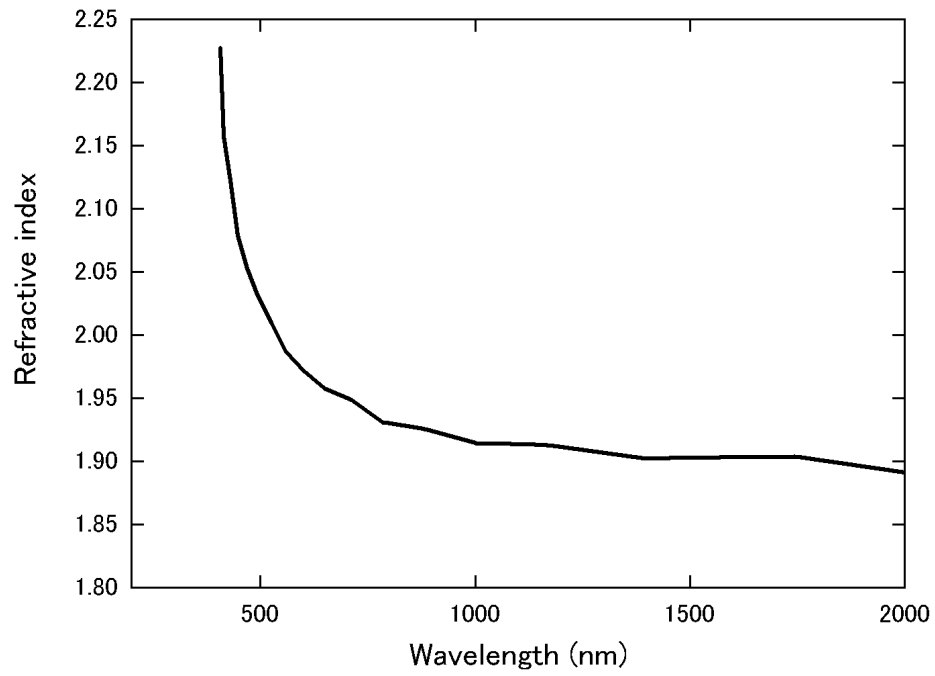


図 F3 屈折率