

# 博士論文

集積型光センシング回路のための

水平スロット導波路の研究

神奈川工科大学 大学院 工学研究科

電気電子工学専攻

氏名 端山 喜紀

指導教員 中津原 克己 教授

令和3年2月11日

# 集積型光センシング回路のための水平スロット導波路の研究

## 目次

<b>第1章 序論</b>	<b>4</b>
1.1. 光学式センサの動向	4
1.1.1. 光ファイバガスセンサ(オプトード方式)	4
1.1.2. レーザドップラ式流量計	6
1.1.3. 液体糖度センサ(屈折計)	6
1.1.4. 非分散型赤外線式ガスセンサ	7
1.1.5. 光波干渉式ガスセンサ	7
1.2. 光導波路素子の研究動向	8
1.2.1. 石英系 PLC	9
1.2.2. Si フォトニクス	9
1.3. 光導波路形センサ素子	10
1.4. スロット導波路構造によるセンサ素子	12
1.4.1. 縦スロット導波路	12
1.4.2. 水平スロット導波路	13
1.5. Nb <sub>2</sub> O <sub>5</sub> 材料を用いた水平スロット導波路の検討	13
1.5.1. 高屈折率媒質の選択	14
1.5.2. Nb <sub>2</sub> O <sub>5</sub> 材料	15
1.5.3. Nb <sub>2</sub> O <sub>5</sub> 材料を用いた水平スロット導波路	15
1.6. 研究目的	17
1.7. 論文構成	17
<b>第2章 動作原理</b>	<b>19</b>
2.1. 光導波路	19
2.2.1. 導波原理	19
2.2.2. 導波路の構造	20
2.2.3. 等価屈折率法	21
2.2. スロット導波路	23
2.2.1. 縦スロット導波路の導波原理	23
2.2.2. 水平スロット導波路の導波原理	25
2.3. Grating 導波路	26
2.3.1. Grating 導波路の基本構造	26
2.3.2. Vertical Grating	27

2.3.3.	理論解析手法 .....	28
2.3.4.	屈折率変化の検出原理 .....	31
<b>第3章</b>	<b>理論解析 .....</b>	<b>33</b>
3.1.	解析手法 .....	33
3.1.1.	有限要素法.....	33
3.1.2.	時間領域差分法 .....	34
3.2.	Nb <sub>2</sub> O <sub>5</sub> 水平スロット導波路の基本特性.....	35
3.2.1.	解析構造 .....	35
3.2.2.	正規化处理.....	37
3.2.3.	光強度分布.....	38
3.2.4.	等価屈折率.....	40
3.2.5.	ピーク強度の構造依存性.....	41
3.2.6.	スロット導波路と他種導波路との接続 .....	42
3.2.7.	曲げ損失の見積もり .....	45
3.2.8.	導波路側壁角度の影響 .....	49
3.2.9.	スロット位置依存性 .....	52
3.2.10.	多層スロット .....	53
3.2.11.	縦スロット導波路との比較 .....	54
3.2.12.	まとめ .....	58
3.3.	屈折率センサのための導波路構造 .....	59
3.4.	ガスセンサとしての理論動作 .....	63
3.5.	Grating 導波路の設計.....	66
<b>第4章</b>	<b>水平スロット導波路の製作.....</b>	<b>68</b>
4.1.	製作条件の検討 .....	68
4.1.1.	ドライエッチング .....	68
4.1.2.	2 層レジスト.....	78
4.1.3.	パターニング .....	82
4.1.3.1.	電子線描画装置 .....	82
4.1.3.2.	Dose 量 .....	83
4.1.3.3.	フィールドつなぎ .....	90
4.1.4.	選択性エッチング .....	92
4.2.	Air-Slot 構造の製作 .....	93
4.2.1.	製作プロセス .....	93
4.2.2.	素子製作 .....	94
4.2.3.	評価 .....	99

4.2.3.1.	SEM 観察 .....	99
4.3.	SiO <sub>2</sub> -Slot 導波路の製作 .....	101
4.3.1.	製作プロセス .....	101
4.3.2.	素子製作 .....	102
4.3.3.	評価 .....	106
4.3.3.1.	SEM 観察 .....	106
4.3.3.2.	波長特性 .....	106
4.3.3.3.	検証.....	108
4.4.	SiO <sub>2</sub> -Slot Grating 導波路の製作 .....	111
4.4.1.	評価 .....	114
4.4.1.1.	SEM 観察 .....	114
4.4.1.2.	波長特性 .....	115
4.5.	Air-Slot Grating 導波路の製作.....	117
4.5.1.	評価 .....	118
4.5.1.1.	SEM 観察 .....	118
4.5.1.2.	波長特性 .....	120
<b>第 5 章</b>	<b>結論 .....</b>	<b>122</b>
5.1.	本研究の成果.....	122
5.2.	今後の課題 .....	123
5.3.	今後の展望 .....	124
<b>謝辞</b>	<b>.....</b>	<b>125</b>
<b>参考文献</b>	<b>.....</b>	<b>126</b>



## 第1章 序論

### 1.1. 光学式センサの動向

日常生活や化学工業、医療分野において、これまでに様々な化学物質をセンシングする多種多様のセンサ素子が開発、実用化されている。センシング技術の応用分野は医療診断、感染症検査、生物研究、食品検査、危険物質検査、環境モニターなど多岐にわたり、その重要性が増している。

液体や気体のセンシングに用いられるセンサ素子は、その用途や求められる性能、検出対象物質に合わせて様々な方式が存在する。近年では触媒技術や MEMS(Micro Electro Mechanical System)、光導波路といった、微細加工技術の応用が盛んに行われている。また近年では、センサ素子の新たな利用形態の実現のため、センサ素子の小型化、高集積化、低消費電力化、高感度化、長期安定性の向上が求められている[1]。

これらの要求に対応するため、様々な方式の液体・ガスセンサが開発されてきた。中でも、光学式センサは検知対象物質による光波の吸収や屈折率の変化、干渉などの現象を利用したセンサである。一般的に他の方式のセンサと比較し、電磁界の影響を受けず、測定精度と長期安定性に優れている。また無接点のため、引火性・爆発性を有する物質に対する安全性が高いという特長がある。ここでは代表的な光学式センサの研究開発例[2-8]を表 1.1 に示す。本項では表 1.1 に示す、光学式センサの測定原理と特徴をまとめた。

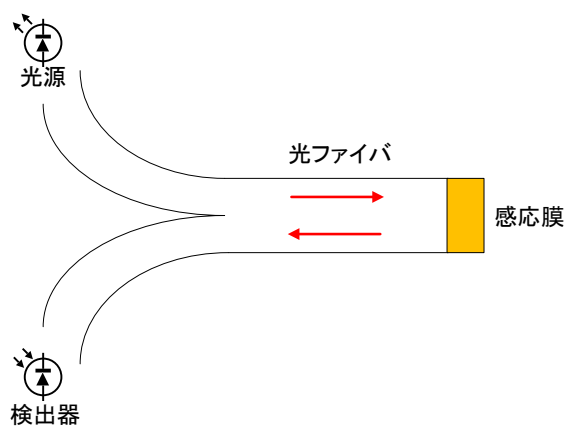
表 1.1. 代表的な光学式センサ

方式	形状	検知対象
光ファイバガスセンサ(オプトード方式)	光ファイバ	気体の濃度
レーザドップラ式流量計	空間光学	液体の流量
液体糖度センサ(屈折計)	空間光学	液体の糖度、濃度など
非分散型赤外線式ガスセンサ	空間光学	気体の濃度
光波干渉式ガスセンサ	空間光学	気体の濃度

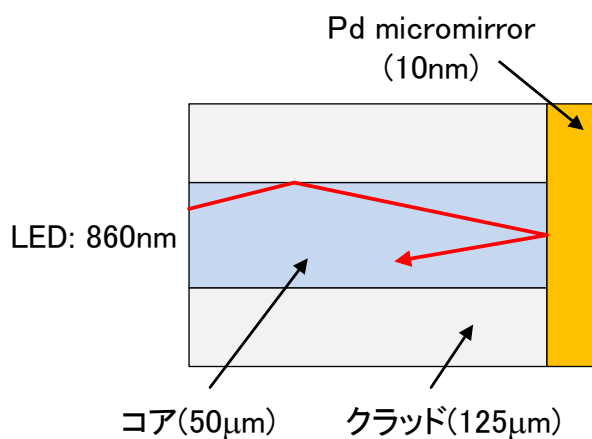
#### 1.1.1. 光ファイバガスセンサ(オプトード方式)

光ファイバセンサは細径で可とう性が大きく、OTDR(Optical Time Domain Reflectometry)技術を用いて光ファイバライン上の空間濃度分布を取得可能であり、また他の光ファイバを利用した物理センサ(ひずみ、温度など)と一体化できるといった特徴がある。オプトード方式は光ファイバセンサの 1 つの方式であり、気体の濃度センサとして開発された。図 1.1 はオプトード方式の光ファイバガスセンサの構成である。センサ部は光ファイバの端面に感応膜を固定化した構造となっている。水素センサの場合、光ファイバを伝搬した光は端面に固定化された Pd マイクロミラーあるいは Pd/WO<sub>3</sub> 薄膜を用いた感応膜で反射・吸収され

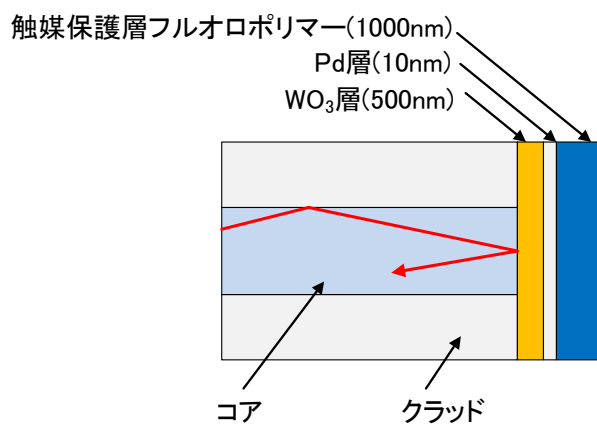
るが、水素濃度によって屈折率および吸収係数が変化するので反射光の強度変化から水素を検出することができる[2]。実用化例としては酸素濃度センサなどがある[3-4]。



(a). 構造



(b). Pd マイクロミラーを用いた場合の光ファイバ端面の拡大図

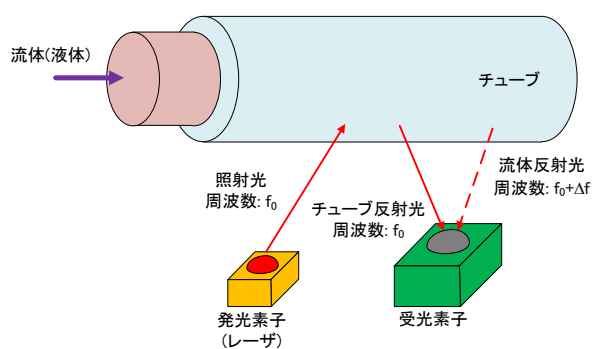


(b). Pd/WO<sub>3</sub> 薄膜を用いた場合の光ファイバ端面の拡大図

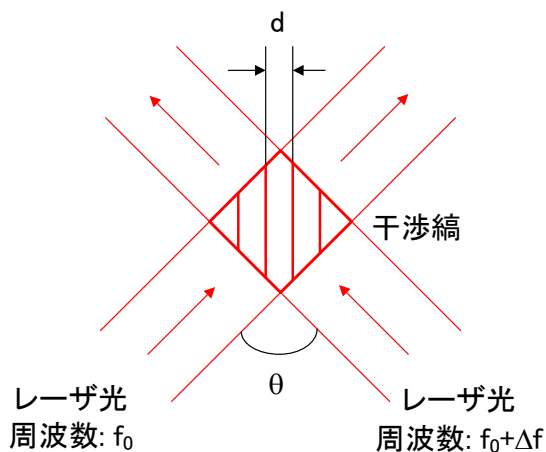
図 1.1. オプトード方式の光ファイバセンサ

### 1.1.2. レーザドップラ式流量計

レーザドップラ方式の光学式センサは LDV(Laser Doppler Velocimeter)を測定原理とし、液体の流量計として実用化されている[5]。図 1.2a はレーザドップラ方式の液体の流量センサの構成である。このセンサはチューブ内に流れる液体にレーザを照射し、光が液体内を移動する粒子にあたることで生じる反射波の周波数変化(ドップラ効果)から液体の流量を測定する方式である。図 1.2b は測定原理を示しており、図 1.2a のチューブ表面の反射光と流体の反射光の 2 つのビームが干渉することにより、干渉縞が生じ、干渉縞の変化によって、液体の流量を求めることができる[6]。



(a). 構造



(b).原理

図 1.2. LDV 式流量計

### 1.1.3. 液体糖度センサ(屈折計)

屈折計は一般的に糖度計として実用化されている[7]。測定原理としては光の屈折を利用しており、屈折計の構造を図 1.3 に示す。屈折計は光源、プリズム( $n_D = 1.768$ )、CCD アレイから構成されており、プリズム上の試料による CCD アレイ上の明暗から臨界角を求め、屈折率を測定し、液体の糖度と対応させることで

測定できる。

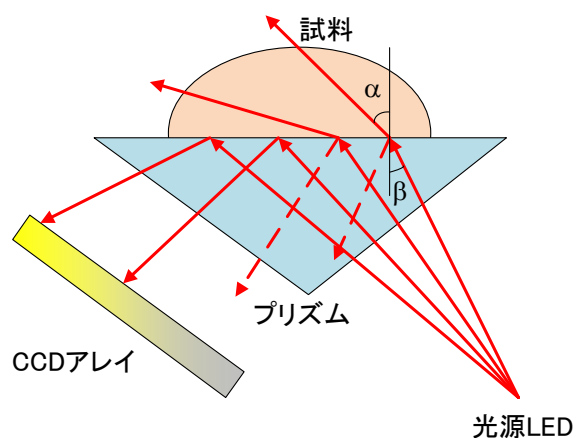


図 1.3. 屈折計を用いた液体の光学式糖度センサ

#### 1.1.4. 非分散型赤外線式ガスセンサ

赤外線光源と赤外線センサの間に測定セルと光学フィルタを配置した構造をとる。光源からの赤外線は測定セル内部と光学フィルタを通過し赤外線センサで検出される。光学フィルタは検知対象ガスが吸収する波長帯のバンドパスフィルタである。測定原理としては測定セル内部に検知対象ガスを導入するとガスによって特定の波長帯の赤外光が吸収され、赤外線センサで検出される光量が減少することで検知対象ガスの濃度を測定することができる。濃度の算出には予め、既知の濃度のガスを数種類、導入し、その際の赤外線センサの出力値の減少量を把握しておく必要がある[8]。

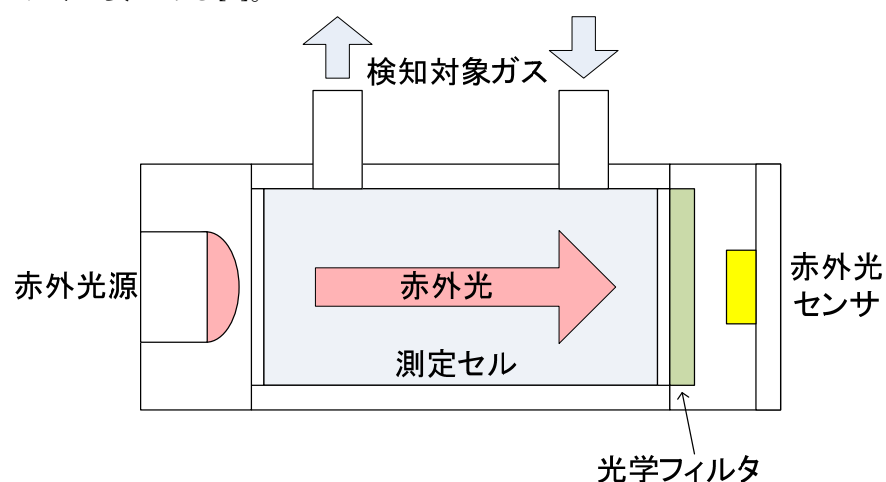


図 1.4. 非分散型赤外線式センサ

#### 1.1.5. 光波干渉式ガスセンサ

センサは 2 種類の光源(LED)とプリズム、平行平面鏡、ミラー、レンズとイメ

ージセンサから構成される。光源の出力光は平行平面鏡により 2 分岐され、プリズムで反射される。一方の光波は検知対象ガスが流れるガスチャンバを、他方の光波はリファレンスガスが流れるガスチャンバを一往復する。2 つの光束は平行平面鏡で合波されミラーとレンズを介してイメージセンサ上に干渉縞を形成する。干渉縞は検知対象ガスとリファレンスガスとの屈折率差が変化することで移動する。ガス濃度は干渉縞の移動量により求めることができる[8]。

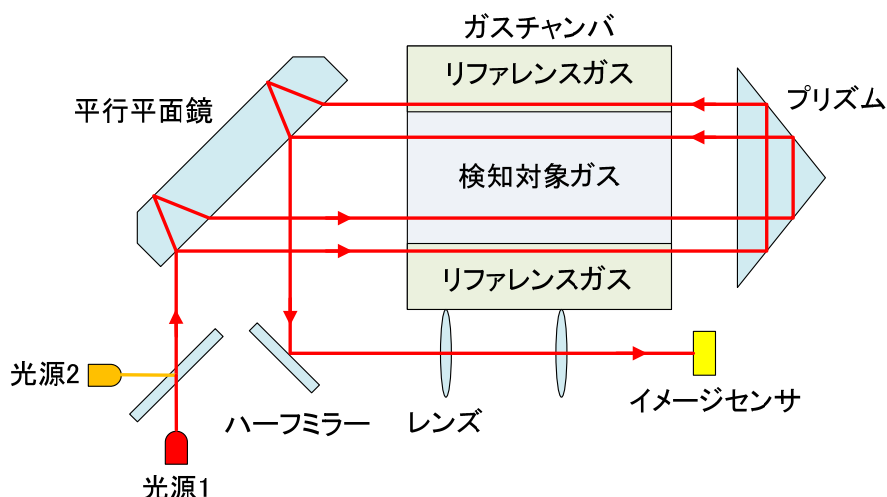


図 1.5. 光波干渉式センサ

光ファイバと同様に平面基板上に形成する光導波路も導波構造を有し、ミラーやレンズを用いる空間光学系素子と比べて集積化が容易である。

## 1.2. 光導波路素子の研究動向

近年、光導波路は近年のインターネットトラフィックやデータセンター内トラフィックの増大に対応するために、さらに研究が進められている。主として通信用伝送装置に用いる各種要素素子(光スイッチ、光変調器、光フィルタなど)の集積に用いられ、導波路コア材料により特徴が異なる。導波路は、屈折率の異なるコアとクラッドによって構成される。特に誘電体や半導体などの基板上に様々な機能素子を作りこむ光集積回路に導波路構造が用いられる。導波路では、数 $\mu\text{m}$ のコア部分に光を強く閉じ込めることができるため、素子サイズの小型化が可能である。また、一枚の基板上に導波路で光配線された異なる機能の素子を一括で製作できるため、素子間の光軸アライメントの問題がなく信頼性の高い高機能な集積素子の実現が容易である。また、半導体導波路を用いることで、光源となる半導体レーザや光検出器のPD(Photodetector)といったアクティブ素子など、電子回路との組み合わせも容易になる。

導波路形の素子で動的な機能を持たせるためには、電気光学 (EO: Electro-optic)

効果、熱光学 (TO: Thermo-optic) 効果、音響光学 (AO: Acousto-optic) 効果、磁気光学(MO: Magneto-optic)効果等によって導波路の屈折率や吸収係数などの変化を利用する。

#### 1.2.1. 石英系 PLC

光が伝搬するコア材料として  $\text{SiO}_2$  を用いる石英系 PLC (Planar Lightwave Circuit) ではアレイ導波路回折格子(AWG: Arrayed Wave guide Grating)と光スイッチを組み合わせた再構成可能光アドドロップ多重化装置(ROADM: Reconfigurable Optical Add-Drop Multiplexer)の報告がある[9-12]。導波路形を用いることで素子の集積化が可能である。またコア材料として  $\text{SiO}_2$  を用いているため、光ファイバとの結合が良く、低損失である。しかし、一般的に石英系 PLC ではコア材料とクラッド材料との屈折率差が小さいため、光のコアへの閉じ込めが弱く、曲り半径を小さくできない。したがってデバイスサイズは比較的大きくなってしまふ。石英系 PLC を用いたデバイスのサイズは数 mm のものから 32 ch 大規模集積マトリクススイッチの例では十数 cm ほどのサイズとなる[13]。

$\text{SiO}_2$  は各種光学効果に乏しく、可変動作のために一般的には熱光学効果を用いる。熱光学効果は導波路近傍に製作した薄膜ヒータを用いてコアを加熱するため、状態維持のためには連続してヒータを動作させる必要があり、消費電力が大きくなる。また集積化をする際には隣接するヒータ間で熱干渉が生じるため、大規模集積化が難しい。

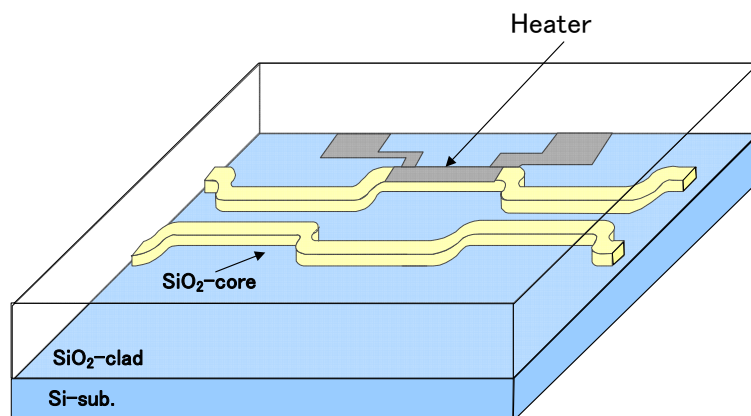


図 1.6. 石英系 PLC を用いた光スイッチ

#### 1.2.2. Si フォトニクス

近年、導波路形の光機能素子の研究では Si フォトニクスという技術を用いた研究が盛んである。Si フォトニクスは Si をベースにした光電子集積回路システムを対象とする技術であり、従来の光デバイス技術では到達し得ないレベルの高

集積化、低消費電力化、低コスト化を実現できる可能性を有している[14]。特にスーパーコンピュータをはじめとする HPC(High Performance Computing)分野で注目を集めている。従来、コンピュータの高速化は CPU の動作クロックの高速化と製造プロセスの微細化によって達成されてきたが、集積されるトランジスタのリーク電流や発熱により、クロックの高速化は限界へ達している。近年ではクロックの高速化は行わずに、並列分散処理させるメニーコア化を行うことで性能向上が図られている。しかし、CPU コア間通信には従来から用いられてきている電気配線が用いる。電気配線においても通信速度の限界に達しており、コア数を増やしても効率的に処理速度が上がらない。このため現在、光電子融合基盤技術研究所(PETRA)が中心となってプロセッサやメモリ等のチップ間の光配線技術の研究が行われている[15]。

Si 導波路は光を閉じ込めるために下部クラッドが必要となる。このため使用する基板には SiO<sub>2</sub> の BOX(Buried Oxide)層を有する SOI(Silicon-On-Insulator)ウェハを用いる。Si 材料は次に示す特徴を持つ[16-17]。

- ① 地球上に豊富に存在する元素であること
- ② LSI の基板材料であるため LSI との集積化が容易であること
- ③ 既存の CMOS 製造プロセスと互換性があること
- ④ 通信波長帯域の赤外光に対して透明で高い屈折率を持つこと

ここで挙げた特徴のうち、①～③は主に従来から発光・受光素子などとして用いられてきた InGaAsP といった化合物半導体と比較した場合の優位な特徴であり、②～④は従来から光導波路・光フィルタなどとして用いられてきた石英系材料と比較した場合に優位な特徴である。また④は Si が高屈折率材料であるためにクラッドとの非常に大きな屈折率差を有し、強い光の閉じ込めを得られる。このため、石英系 PLC と比較して素子を小型化できるというメリットがある。

### 1.3. 光導波路形センサ素子

光学式センサは長期安定性、検知精度、可燃性物質や毒性物質に対する優れた安全性、電磁界の影響を受けないといった特長があるが、空間光学系を用いる構造であるため、光軸アライメントや信頼性について問題となる。また光学部品の小型化にも限界があるため、他方式のセンサと比較しサイズが大きく、cm オーダのサイズになってしまう。

近年では、光源やフォトディテクタといった素子との集積が可能であり、小型の素子を実現できる、導波路形のセンサの研究が行われている[18-21]。検知原理としては光波干渉式センサと同様に、検知対象による屈折率変化を利用している。また

このほかにも、検知対象による光波の吸収や非線形光学効果を利用することで検知することもできる。屈折率変化の検知のために図 1.7 から図 1.9 に示すマイクロリング共振器(MRR: Micro Ring Resonator)、マッハ・ツェンダー干渉計(MZI: Mach-Zhender Interferometer)や Grating 構造を利用したパッシブデバイスが報告されている[12-13, 15]。またアクティブデバイスではフォトニック結晶レーザの発振波長シフトを利用したセンサ[22-25]が報告されている。

今後、各種センサの新たな利用形態の実現、信頼性が高く、多機能なセンサの実現のためには、センサの小型化や制御回路、光源、光フィルタなどの素子の集積化が必要になる。また、検知精度、分解能といった基本的な性能の向上のほかに、防爆設計といった観点も重要となる。既存のセンサ素子に対し、小型で集積性がよく、信頼性に優れた素子が実現できれば、今後の各種センシング分野において有用であると考えられる。本研究では、既存のセンサと比較し、小型で集積性に優れた導波路形のセンサ素子を検討した。

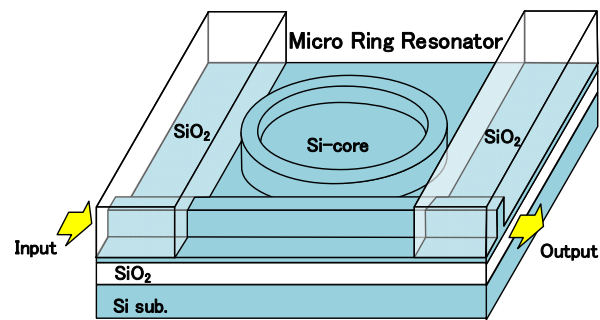


図 1.7. 導波路形マイクロリング共振器

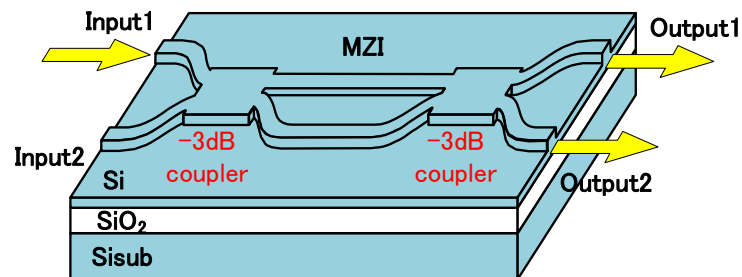


図 1.8. 導波路形マッハ・ツェンダー干渉計



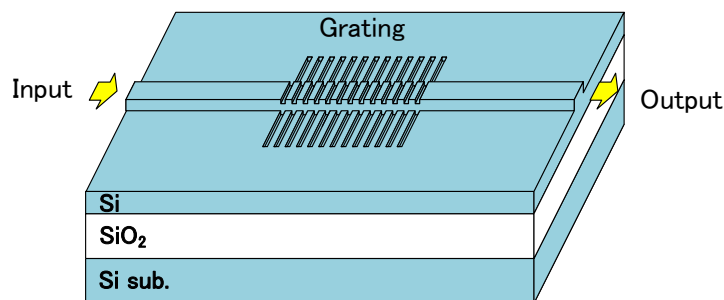


図 1.9. 導波路形 Grating

#### 1.4. スロット導波路構造によるセンサ素子

スロット導波路は 2 つの高屈折率媒質に挟まれた微小な領域の低屈折率媒質を有する構造をもつ。スロット導波路の特徴として、光電界の不連続性からモードがスロット内に局在することが知られている[26]。スロット導波路は構造の違いから縦スロット導波路と水平スロット導波路の 2 種類に分類される。

##### 1.4.1. 縦スロット導波路

縦スロット導波路は 2 本のチャネル導波路やリブ導波路を平行に配置した構造である。単一の高屈折率材料層から形成することが可能で、SOI(Silicon on Insulator)ウェハを用いた単結晶シリコンや窒化シリコンを用いた素子が報告されている[27-47]。一般的なチャネル導波路やリブ導波路と比較し、低屈折媒質の微小なスロット領域に強い光の閉じ込めを実現できる。高屈折率媒質を横方向に配置する構造をもつため、縦スロット導波路は quasi-transverse electric (TE) モード( $E_x$  成分)の光に対し動作する。応用例としては、センサ素子[23-34]、非線形光学効果素子[41-43]、発光素子[44]、小型の偏波スプリッタ[45]、高感度なフォトディテクタ[46]、波長フィルタ[47]が報告されている。縦スロット導波路構造は幅方向への微細なパターンニングが必要であり、また導波路側壁のラフネスの影響を受けやすい。

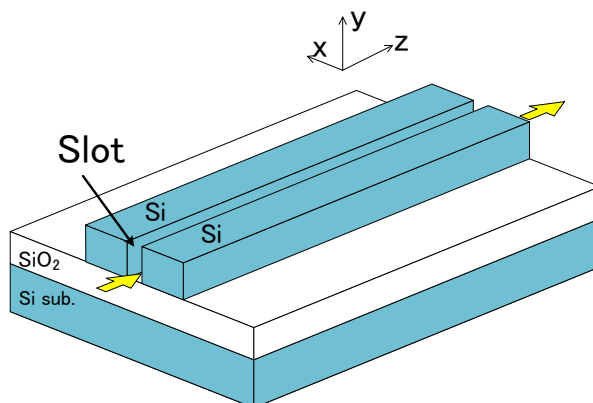


図 1.10. 縦スロット導波路

#### 1.4.2. 水平スロット導波路

水平スロット導波路は縦スロット導波路の構造を  $90^\circ$  回転させ、厚さ方向にスロット構造を形成する。薄膜の膜厚制御によりスロット界面のラフネスの少ないスロット導波路が比較的容易に形成が可能である。水平スロット導波路は **quasi-transverse magnetic (TM)** モード ( $E_y$  成分) の光に対し動作し、縦スロット導波路と同様の強い光の閉じ込めが得られるという特徴がある[48-62]。応用例としては、センサ素子[52-55]、非線形光学効果素子[56]、偏波スプリッタ[57]、小型のカプラ[58-59]が報告されている。水平スロット導波路は製作においては、はじめに 3 層のスロット構造を用意する必要がある。コア材料として一般的な Si を用いる場合は、低損失な単結晶 Si では、スロット構造を有する特殊な SOI ウェハを用意する必要がある。アモルファス Si や微結晶 Si を成膜する技術が存在するが導波光に対する伝搬損失が単結晶と比較し、大きくなってしまう[62]。

本研究では、これらの特徴を持つ、水平スロット導波路をセンサの基本構造として検討した。水平スロット導波路は低屈折率媒質のスロット層を Air とした中空構造とすることが可能である。このため、伝搬光が局在するスロット領域を検知対象物質で満たすことが可能で、導波路からの染み出し光(エバネッセント光)を利用したチャネル導波路やリブ導波路構造の導波路形センサよりも、敏感に検知できると考えられる。また、縦スロット導波路と比較し、薄膜の膜厚制御によってスロット領域を形成できるため、精度よくスロット層厚を調整できると考えられる。

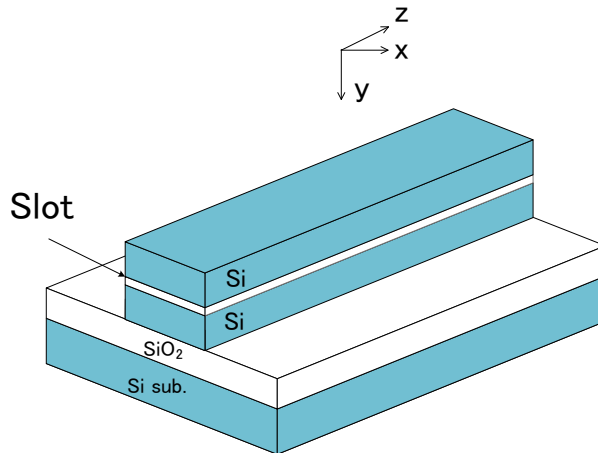


図 1.11. 水平スロット導波路

#### 1.5. $\text{Nb}_2\text{O}_5$ 材料を用いた水平スロット導波路の検討

光導波路製作のためにはクラッド材料、またはコア材料として様々な種類の光学薄膜が用いられる。表 1.2 に代表的な光学薄膜の成膜方法[63]をまとめた。近年、通信光学デバイスとして研究が進められてきた Si フォトニクスはコア材料として

Si を用いるために、単結晶 Si を熱酸化 Si ウェハ上に張り合わせた(スマートカット法[64]など)SOI ウェハが用いられる。クラッド材料としては SiO<sub>2</sub> が用いられるのが一般的である。また近年では Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> や Silicon-rich Nitride といった材料をコア材料とした導波路の研究もおこなわれている[65-68]。

表 1.2. 各種光学薄膜の成膜技術と材料の代表例

成膜技術 \ 材料		ポリマ	ガラス	LiNbO <sub>5</sub> LiTaO <sub>5</sub>	Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub>	Nb <sub>2</sub> O <sub>5</sub> Ta <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	YIG	ZnO	ナイド カルコゲ
堆積	スピン コーティング	○							
	スパッタリング		◎			○		◎	◎
	CVD		○		○			○	◎
	重合	○							
熱拡散				◎					
イオン交換			◎	○					
イオン注入			○						
エピ タキ シ ヤ ル 成 長	LPE			○			○		
	VPE							○	

#### 1.5.1. 高屈折率媒質の選択

本研究で用いる水平スロット導波路は高屈折率媒質層と低屈折率媒質層から成る 3 層構造が必要である。光導波路のコア材料として一般的な Si は低損失な単結晶 Si 薄膜を成膜することができないため、ほかの材料を選択する必要がある。そこで、本研究では Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 材料をスロット導波路の高屈折率媒質として検討した。Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 材料は 2.2 程度の屈折率を有しており、Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> の  $n = 1.9$  程度と比較し、高屈折率材料である。このため、Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> と比較し、高い光の閉じ込めを実現可能で、導波路の曲線部においては曲率半径を小さくし、小型化できると考えられる。また、コア材料を自由に成膜できるため、図 1.12 に示すような 3 次元構造といった導波路も実現できると考えられる。Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 材料については次の 1.5.2 項で述べることとする。

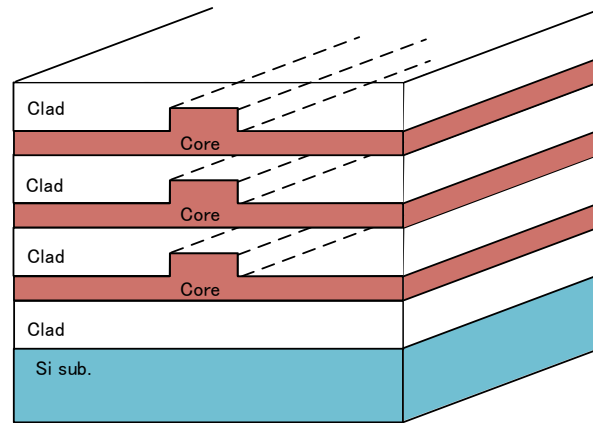


図 1.12. 三次元積層構造

### 1.5.2. $\text{Nb}_2\text{O}_5$ 材料

重金属酸化物である  $\text{Nb}_2\text{O}_5$ (五酸化ニオブ)は酸化物誘電体としては高い屈折率を有しており、比較的低損失の導波路を実現できることが知られている[69-74]。また、可視光から赤外光に対し透明であり、一般にはカメラ等のレンズの反射防止膜として用いられる材料として知られている[74]。 $\text{Nb}_2\text{O}_5$ の薄膜は金属膜の熱酸化または金属ターゲットを用いた反応性スパッタにより成膜される[69]。前者ではスパッタまたは真空蒸着により金属膜を成膜した後、 $\text{O}_2$  雰囲気中で  $500^\circ\text{C}$  程度に加熱して酸化させる。後者のスパッタには DC, RF いずれの装置でも使用できるが、スパッタガスとして Ar や  $\text{N}_2$  などの不活性ガスに  $\text{O}_2$  を混合したものを用いる。この反応性スパッタでは金属膜の場合に比べて成膜速度は遅く、数  $\text{\AA}/\text{min}$  である。得られる薄膜の屈折率はガス圧、混合比に依存し、 $2.1\sim 2.3$  の値となる。したがって、条件により屈折率を制御できるが[70]、低損失な膜が得られる範囲は広くはない。伝搬損失は  $1\sim$  数  $\text{dB}/\text{cm}$  となることが多いが、 $\text{SiO}_2/\text{Si}$  基板の導波路で  $0.5 \text{ dB}/\text{cm}$  程度のものが得られている。

本研究室では、成膜速度が  $35\sim 60 \text{ \AA}/\text{sec}$  と高速成膜が可能である株式会社昭和真空製の反応性 DC スパッタリング装置(SPS-208CW)を用いて屈折率が  $2.235$  の  $\text{Nb}_2\text{O}_5$  を成膜した、低損失な導波路を得ている[75-76]。

### 1.5.3. $\text{Nb}_2\text{O}_5$ 材料を用いた水平スロット導波路

$\text{Nb}_2\text{O}_5$  材料を用いた水平スロット導波路は表 1.3 にまとめた特徴を有する。素子サイズに関しては主として導波路コア材料の屈折率に依存する。高屈折率材料であれば、クラッドとの屈折率差を大きくすることが可能で、高い光の閉じ込めにより、主として曲線部の曲率半径を小さくすることで、小型の素子を実現できる。本研究の  $\text{Nb}_2\text{O}_5$  材料は  $n = 2.2$  の屈折率を有し、 $\text{Si}_3\text{N}_4$  材料の  $n = 1.9$  より高く、Si 材料の  $n = 3.48$  よりも小さいことから、これらの材料の中では中程度

の素子サイズとなる。製作プロセスの難易度は主として材料の成膜法とスロット構造の形成の容易さに依存する。材料については  $\text{Nb}_2\text{O}_5$  材料と  $\text{Si}_3\text{N}_4$  材料はスパッタ法と CVD により低損失な薄膜を得られるが、Si 材料は低損失な単結晶 Si 薄膜を得ることは難しい。またスロット構造の形成の難易度は、一般的に縦スロットでは数十 nm から数百 nm の微細なスロット領域をパターンニングする必要があることや、ドライエッチング時のマイクロローディング効果により、微細なトレンチを形成することが難しいため、高いと考えられる。スロットのサイズも同様に縦スロット導波路よりも成膜時の膜厚制御によりスロット層厚が決定する水平スロット導波路が優れると考えられる。

こうしたスロット導波路は他の研究機関からの報告例がある。Si 材料を用いた縦スロット導波路は東京農工大学からスロット幅 200 nm の縦スロットとリング共振器を組み合わせた水素ガスセンサが報告されている[77]。実際の測定結果が報告されている縦スロット導波路はスロット幅が狭いもので 40 nm 程度[32]である。一方、水平スロット導波路は、その報告の多くが解析のみの報告である。測定結果が報告されたものとしては、 $\text{Si}_3\text{N}_4$  材料を用い、40 nm 厚の中空スロット領域をもつマイクロディスク共振器が KAIST から報告されている[53]。これは筆者の知る限り、唯一、中空のスロット領域を持ち、測定結果が報告されたものだが、U-bend ファイバにより入出力を行っており、一般的な導波路形ではない。Si 材料を用いた水平スロット導波路の測定結果も NTT から報告されている[62]。これは導波路形ではあるが、スロット層は中空ではなく、 $\text{SiO}_2$  となっている。またスロット上部の上部高屈折率媒質層はアモルファス Si を用いており、損失が大きい。本研究ではセンシングに適した中空の水平スロット導波路を基本構造とし、屈折率変化をとらえるために Grating 構造を組み合わせた。さらに、水平スロット導波路の高屈折率媒質として  $\text{Nb}_2\text{O}_5$  材料を用い、小型で低損失な水平スロット導波路の実現を図った。これらの組み合わせは筆者の知る限り、解析並びに動作実証例は他になく、本研究特有のものである。

表 1.3. 各種材料を用いたスロット導波路の比較

種類	材料	素子サイズ	製作プロセス	スロットサイズ
Si-Vertical Slot	Si	◎	△	○
Si-Horizontal Slot	Si	◎	×	◎
$\text{Si}_3\text{N}_4$ -Vertical Slot	$\text{Si}_3\text{N}_4$	△	△	○
$\text{Si}_3\text{N}_4$ -Horizontal Slot	$\text{Si}_3\text{N}_4$	△	○	◎
$\text{Nb}_2\text{O}_5$ -Horizontal Slot	$\text{Nb}_2\text{O}_5$	○	○	◎

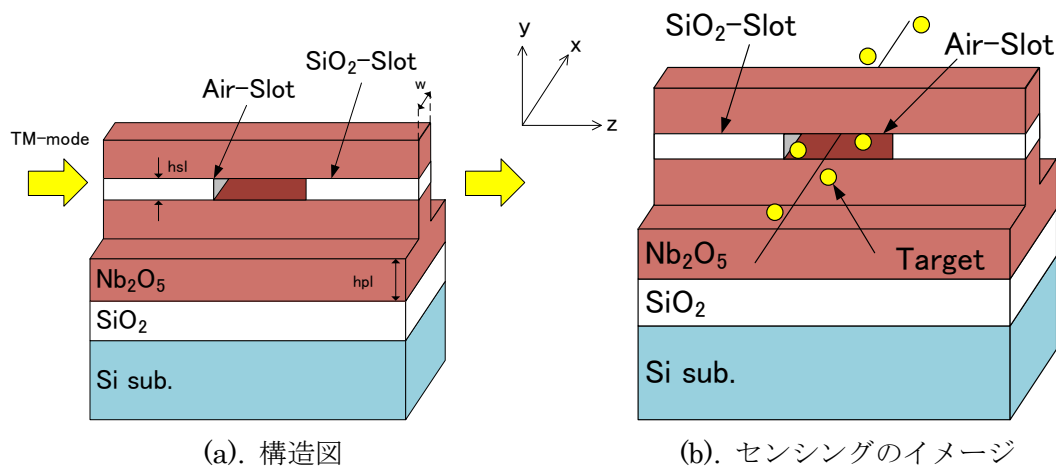


図 1.13. Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 水平スロット導波路

## 1.6. 研究目的

本研究の目的は、安全性、長期安定性に優れた光学式センサのうち、小型で集積性に優れる導波路形センサを実現するための水平スロット導波路を実証することである。本研究では、水平スロット導波路の高屈折率材料として Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 材料を提案した。この材料はスパッタ法を用いて簡単に成膜することができ、自由度が高く、低損失な導波路を実現できる。検知対象をとらえる原理として屈折率変化を利用する RI(Refractive Index)形センサを目指す。また検知対象による屈折率変化をとらえる仕組みとして Grating 構造を用いる。Grating 構造は導波路に周期的な屈折率変化を設けることによって実現でき、非常に鋭い単一波長選択性を持つ。本研究では導波路側壁に凹凸をつけた縦型の Grating 導波路を用いている。本研究では Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 材料を用いた水平スロット導波路の理論解析を行い、その特性を縦スロット導波路と比較しながら明らかにする。また実際に素子を試作するための製作プロセスの検討を行う。そしてセンサとして動作させるための課題や有用性について検討を行う。

## 1.7. 論文構成

本論文は、以下の 5 章で構成される。

1 章では、研究背景として、液体ならびに気体センサ素子について実用化の例をもとに説明した。今後のトレンドとして MEMS や光導波路を応用したセンサの有用性を示した。また、本研究の特色である Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 材料を用いた水平スロット導波路を他機関から報告されたスロット導波路と比較しながら、その特長について述べた。センサデバイスの実現のための Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 水平スロット導波路の概要を述べ、本研究の目的を示した。

2 章では、本研究で提案する Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 水平スロット導波路の素子構造や動作原理について述べる。基本となるリブ形導波路とスロット導波路の動作原理を述べたのち、組み合わせる Grating 構造の動作原理についても述べる。

3 章では、水平スロット導波路の解析のために用いる FEM 法と FDTD 法の概略を述べ、理論解析によって得られた構造依存性、モード分布の違いをリブ形導波路と比較しながら述べる。モード分布が特徴的なスロット導波路と他の導波路との接続についても解析し、評価を行う。

4 章では、実際の素子を製作するために必要な製作プロセスと製作条件の検討について述べる。実験によって得られた中空の水平スロット構造を示し、 $\text{SiO}_2$  スロット導波路の伝搬特性の評価を示す。また、 $\text{SiO}_2$ -Slot Grating 導波路と Air-Slot Grating 導波路の設計、製作、評価の結果を示す。

5 章では、実験と解析から得られた成果についてまとめ、今後の技術的課題や、 $\text{Nb}_2\text{O}_5$  水平スロット導波路を用いたセンサデバイスの有用性について述べる。

## 第2章 動作原理

第 2 章では光導波路および、スロット導波路の導波原理と、屈折率変化を検知する導波路構造として **Grating** 構造の動作原理について述べる。

### 2.1. 光導波路

光導波路は、光の通るコアとその外側を包むクラッドの屈折率差を利用して光信号を全反射によりコアに閉じ込めながら伝送するものである。光ファイバは光導波路の一種であり、円形の断面で細くて長い繊維状のケーブル化に適した構造になっている[78]。近年、通信用デバイスとして広く研究が行われている Si フォトニクスで用いられる Si 導波路は光導波路の一種である。Si 導波路は SOI ウェハ上に形成する矩形の導波路であり、光集積回路の形成に適している。SOI ウェハは Si 基板と上部の Si 導波層により絶縁層である SiO<sub>2</sub> 層を挟んだ構造になっている。Si、SiO<sub>2</sub> の屈折率はそれぞれ約 3.48、1.45 である。したがって、下部クラッドを SiO<sub>2</sub> 層、コアを Si 導波層、上部クラッドを Air とした 3 層構造ができあがる。Si 導波層の屈折率は上下のクラッドよりも高いため、縦方向の強い閉じ込めが実現でき、Si 導波層に光が閉じ込められる。しかし、このままでは、横方向には閉じ込めることができないため、横方向において光を閉じ込める構造が必要である。同様にクラッド材料よりも高屈折率な任意の材料を導波路のコア材料として用いることができる。

#### 2.2.1. 導波原理

光導波路の中で光が伝搬されていく原理は、直感的に全反射の現象で説明できる。図 2.1 において屈折率の異なる 2 つの媒質( $n_1 > n_2$ )の境界面に光が入射する時、入射角 $\theta_1$ と屈折角 $\theta_2$ の関係は式(2-1)のスネルの法則で表される[79]。

$$\frac{\sin \theta_1}{\sin \theta_2} = \frac{n_2}{n_1} \cdot \cdot \cdot (2.1)$$

入射角を大きくしていくにつれ、出射角は大きくなる。出射角が 90° となる時の入射角 $\theta_1$ を臨界角 $\theta_c$ といい式(2-2)で表される。

$$\sin \theta_c = \frac{n_2}{n_1} \cdot \cdot \cdot (2.2)$$

更に入射角 $\theta_1$ が大きくなると屈折率  $n_2$  の媒質への透過光がなくなり、境界面で全ての光が反射するようになる。この現象を全反射という。

光導波路の中を伝搬する光は、以上の原理より図 2.2 のように媒質の境界面で全反射を繰り返しながら伝搬していく。



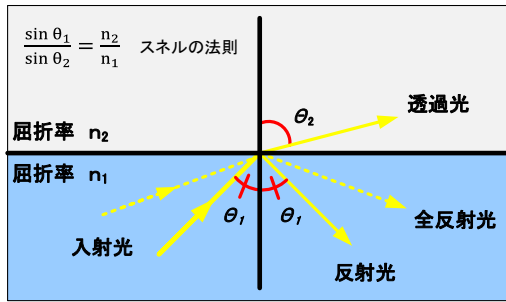


図 2.1. スネルの法則

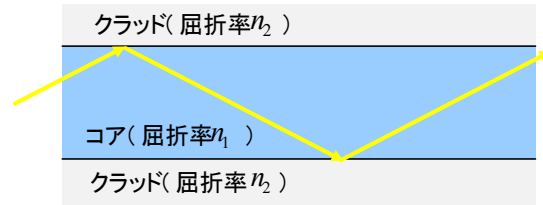


図 2.2. 導波路中の光の伝搬

導波路内での光の電界分布はマクスウェルの方程式と境界条件を用いて解くと、図 2.3 に示される電界分布となり、クラッド内にも電界  $E(x)$  は存在する。コアから離れていくにつれて電界  $E(x)$  は低くなっていく。このクラッド内部に電界  $E(x)$  が浸透した光(電磁波)のことをエバネッセント成分という。このエバネッセント成分はクラッドの屈折率の影響を受けるため、導波路を伝搬する光が実際に感じる等価屈折率が変化する[80-81]。

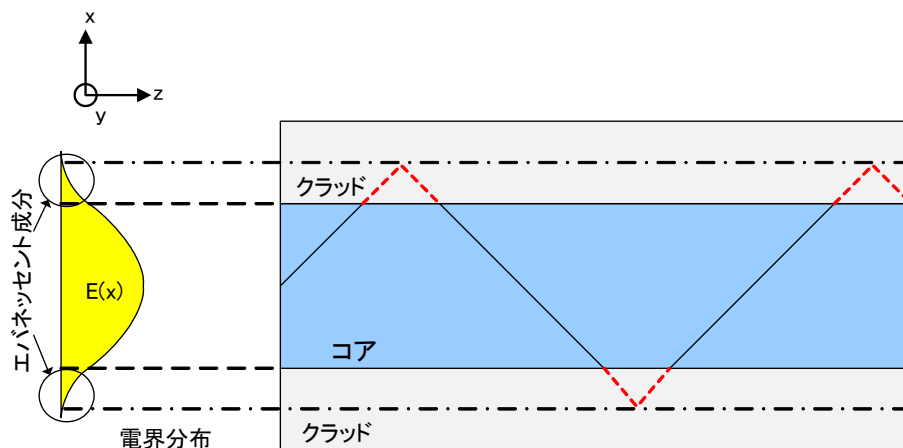


図 2.3. エバネッセント成分

### 2.2.2. 導波路の構造

光導波路には大きく分けて図 2.4 に示される二次元光導波路と三次元光導波路の 2 種類の構造に分類される[82]。屈折率の高いコアと低いクラッドを用いてコアへ光を閉じ込め伝送する点は共通するが、光を閉じ込める次元が異なる。

#### ・二次元光導波路（スラブ光導波路）

高屈折率媒質のコア層が低屈折率媒質のクラッドに挟まれた 3 層構造から構成される。導波路に入射した光は導波路の厚さ方向により閉じ込められる。一方、幅方向へは閉じ込めはなく、光は横方向に広がる。光集積回路として平

面状に経路を形成する場合は、横方向への光の閉じ込めがないため、不適である。

- ・ 三次元光導波路（チャネル導波路）

三次元光導波路は幅方向と厚さ方向の双方向で光を閉じ込める構造を持つ。図 2.4 に示す三次元導波路をチャネル導波路という。一例として、Si フォトニクスでは超小型化、超高密度集積化のために、チャネル構造を用いた Si 細線導波路が用いられる。Si 細線導波路は SOI ウェハの下部クラッド層に達するまでエッチングを行い、クラッドを形成する。このため、コアの幅方向にも強い光の閉じ込めが得られる。シリコン細線導波路におけるシングルモード条件は導波路高さ 220 nm、幅 440 nm 程度[83]であり、微細な加工技術が必要である。近年では ArF 光源のステッパ露光装置や電子線描画装置といったリソグラフィー技術の進歩によって、製作が可能である[83]。

本学では設備の都合上、このような細線導波路の製作は困難であったことから、図 2.5 に示すリブ形導波路を用いてデバイスの原理実証を行ってきた[84-86]。リブ形導波路はコア層の上部を数十 nm 程度のエッチングを行い、形成する。導波路の両サイドはすべて取り除かないが、コア層厚の変化によってエッチング部分と導波路部分で等価屈折率の変化が生じ、光を閉じ込めることができる。またリブ形導波路は幅方向への光の閉じ込めが弱いため、導波路幅を数 $\mu\text{m}$ 程度としても、高次モードの光は放射し、実質的にシングルモードの導波路として扱うことができる。このため、UV(Ultra Violet)光源を用いたコンタクト露光装置によるフォトリソグラフィによるパターンニングが可能である。

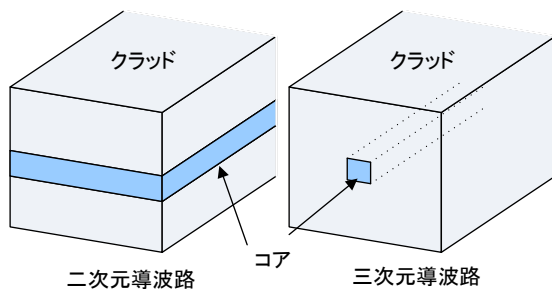


図 2.4. 光導波路の構造

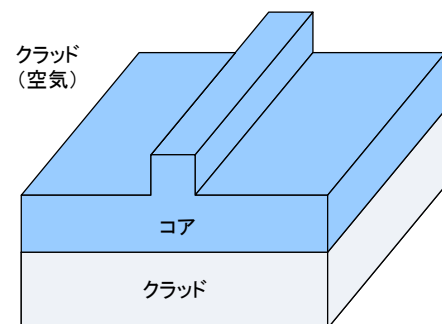


図 2.5. リブ形導波路の構造

### 2.2.3. 等価屈折率法

導波路形デバイスを設計するうえで、導波路内を伝搬する光が感じる実効的な屈折率を見積もることが必要となる。この屈折率は材質が持つ屈折率とは異なる。導波路を伝搬する光が感じる実効的な屈折率のことを等価屈折率といい  $N_{\text{eff}}$  で

表す。

等価屈折率を求める方法としては、後述する有限要素法や等価屈折率法で見積もることができる。ここでは等価屈折率法について述べる。等価屈折率法は図 2.6 のように三次元導波路を二次元導波路に置き換え、縦方向と横方向の双方向からの固有値方程式を解析的に解くことで等価屈折率  $N_{\text{eff}}$  を求める方法である。TE モード場合の等価屈折率は下記の手順で求める[87-88]。TM モードの場合は使用する固有値方程式を入れ替える。

- ①マクスウェル方程式と境界条件から導いた TE モードの固有値方程式(式 2.3) に各層の厚さ  $T_a$ 、 $T_b$  を代入し、それぞれに対応する等価屈折率  $N_a$ 、 $N_b$  を解析的に求める。
- ② $N_a$  部分コア、 $N_b$  部分をクラッドとしたスラブ導波路に置き換え、TM モードの固有値方程式(式 2.4)に各値を置きかえて代入し、再び  $N$  を解析的に求める。

この等価屈折率  $N_{\text{eff}}$  が導波光の感じる実効的な屈折率である。

TE モードの固有値方程式

$$k_0 \sqrt{n_f^2 - N^2} T = (m + 1)\pi - \tan^{-1} \left( \frac{\sqrt{n_f^2 - N^2}}{\sqrt{N^2 - n_s^2}} \right) - \tan^{-1} \left( \frac{\sqrt{n_f^2 - N^2}}{\sqrt{N^2 - n_c^2}} \right) \cdot \cdot \cdot (2.3)$$

TM モードの固有値方程式

$$k_0 \sqrt{N^2 - n_f^2} T = (m + 1)\pi - \tan^{-1} \left( \left( \frac{n_s}{n_f} \right)^2 \left( \frac{\sqrt{n_f^2 - N^2}}{\sqrt{N^2 - n_s^2}} \right) \right) - \tan^{-1} \left( \left( \frac{n_c}{n_f} \right)^2 \left( \frac{\sqrt{n_f^2 - N^2}}{\sqrt{N^2 - n_c^2}} \right) \right) \cdot \cdot \cdot (2.4)$$

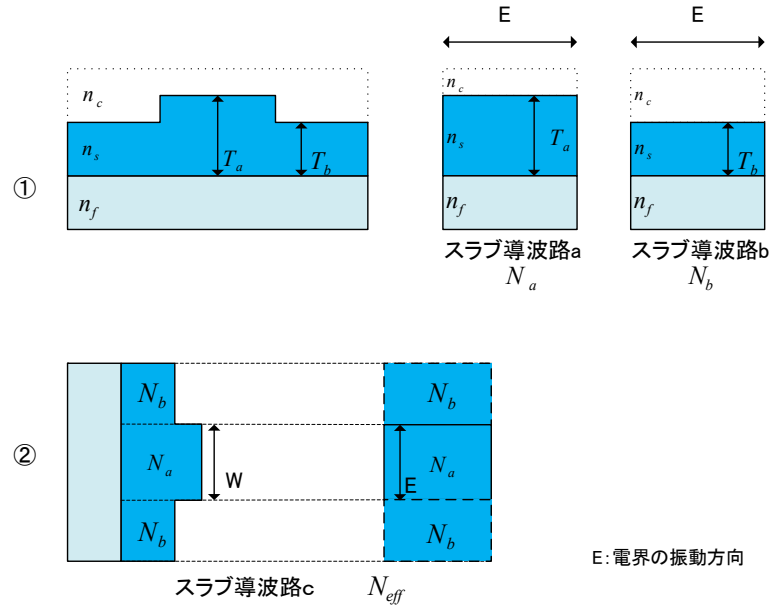


図 2.6. 等価屈折率法

## 2.2. スロット導波路

2.1 項で述べた二次元または三次元導波路は導波路のコアと周囲を囲むクラッドとの屈折率差により、光をコアに強く閉じ込めることができる。二次元、三次元導波路の導波原理は全反射であるため、低屈折率材料に囲まれた、高屈折率材料のコアに光が閉じ込まる。

一方、近年、低屈折率材料の領域を導波する光を外部反射や干渉によって強める導波路構造が提案されている[89]。これらの導波路構造は本質的にはリークモードであり、干渉を利用するために波長特性が表れる。

スロット導波路は 2004 年に V. R. Almeida らによって提案された導波路構造の 1 つである[25]。スロット導波路は電界の不連続性により、ナノメートル幅の低屈折率媒質のスロット領域に光を強く閉じ込めることができる。スロット導波路は構造と動作モードの違いから、縦スロットと水平スロットの 2 種類に分類することができるが、基本的な動作原理は同じである。

### 2.2.1. 縦スロット導波路の導波原理

マクスウェル方程式より、高屈折率コントラストの境界面では、電束密度  $\mathbf{D}$  の連続性を満たすために、対応する電界  $\mathbf{E}$  は低屈折率媒質側で、大きな不連続が生じる。スロット導波路はこの電界  $\mathbf{E}$  の不連続性を利用して、低屈折率媒質に光を閉じ込めることができる。スロット導波路の動作原理は図 2.7 の二次元構造によって説明することができる。

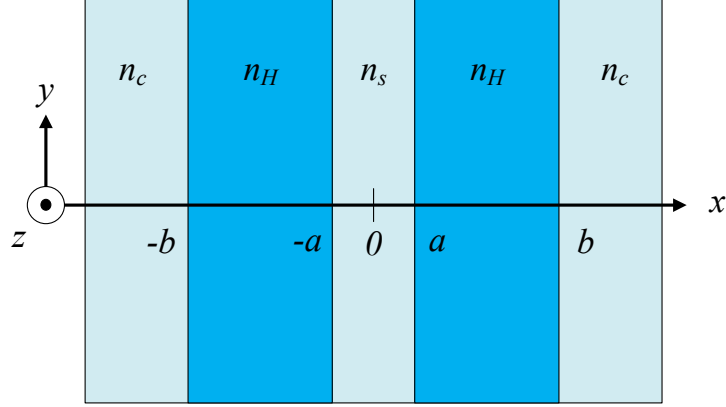


図 2.7. 二次元スロット導波路

図 2.7 において、低屈折率媒質  $n_s$  のスロットは 2 つの高屈折率媒質  $n_H$  に挟まれた構造をしている。スロット導波路の固有モードは、個々のスラブ導波路の基本固有モードの相互作用によって形成されるものとみなすことができる。スラブベースのスロット導波路の TM 基本固有モードの電界分布( $E_x$  成分)は次式で与えられる。

$$E_x(x) = \begin{cases} \frac{1}{n_s^2} \cosh(\gamma_s x), & (|x| < a) \\ \frac{1}{n_H^2} \cosh(\gamma_s a) \cos[\kappa_H(|x| - a)] + \frac{\gamma_s}{n_s^2 \kappa_H} \sinh[\kappa(|x| - a)], & (a < |x| < b) \\ \frac{1}{n_c^2} \left\{ \cosh(\gamma_s a) \cos[\kappa_H(b - a)] + \frac{n_H^2 \gamma_s}{n_s^2 \kappa_H} \sinh(\gamma_s a) \sin[\kappa_H(b - a)] \right\} \exp[-\gamma_c(|x| - b)], & (|x| > b) \end{cases} \quad \dots (2.1)$$

ここで、 $\kappa_H$  は高屈折率スラブでの波数、 $\gamma_c$  はクラッドの減衰係数、 $\gamma_s$  はスロットの減衰係数、 $A$  は次式で与えられる。

$$A = A_0 \frac{\sqrt{k_0^2 n_H^2 - \kappa_H^2}}{k_0} \quad \dots (2.2)$$

ここで  $A_0$  は任意定数、 $k_0 = 2\pi/\lambda_0$  は真空中の波数である。横方向のパラメータ  $\kappa_H$ 、 $\gamma_c$ 、 $\gamma_s$  は  $k_0^2 n_H^2 - \kappa_H^2 = k_0^2 n_c^2 + \gamma_c^2 = k_0^2 n_s^2 + \gamma_s^2 = \beta^2$  に従う。また、 $\beta$  は伝搬定数であり、次式で計算できる。

$$\tan[\kappa_H(b - a) - \tan^{-1}\left(\frac{\gamma_c n_H^2}{\kappa_H n_c^2}\right)] = \frac{\gamma_s n_H^2}{\kappa_H n_s^2} \tanh(\gamma_s a) \quad \dots (2.3)$$

式(2.1)より、スロットと高屈折率媒質の境界面のすぐ内側( $|x| = a^-$ )では電界が境界面のすぐ外側( $|x| = a^+$ )よりも  $n_H^2/n_s^2$  倍高くなる。スロット幅が  $a \ll 1/\gamma_s$  のとき、電界はスロット全体で高いままとする。

同様に、図 2.8 に示す三次元構造の縦スロット導波路の場合、quasi-TE モー

ドの電界成分( $E_x$ 成分)が  $x$  方向となり、二次元のスラブベースのスロット導波路 TM モードに類似する。つまり、縦スロット導波路は **quasi-TE** モードに対し、動作する。

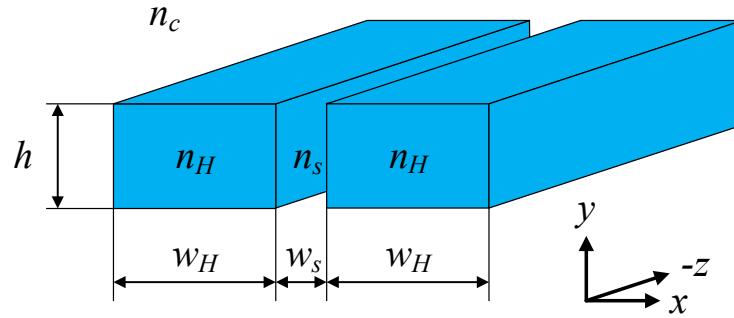


図 2.8. 縦スロット導波路

### 2.2.2. 水平スロット導波路の導波原理

水平スロット導波路は狭いスロット領域を厚さ方向に形成するため、スロット領域を幅方向に形成する縦スロット導波路よりも製作トレランスが優れるという [48]。また薄膜堆積によるラフネスの少ない境界面を得ることができる。

図 2.9 に示す、水平スロット導波路は縦スロット導波路を  $90^\circ$  回転させた構造を持つ。水平スロット導波路の動作原理は縦スロット導波路と同様に電界  $E$  の不連続により、スロットに光を閉じ込めるが、電界の不連続は  $y$  方向に生じる。したがって、水平スロット導波路は **quasi-TM** モードの  $E_y$  成分に対し、動作する。

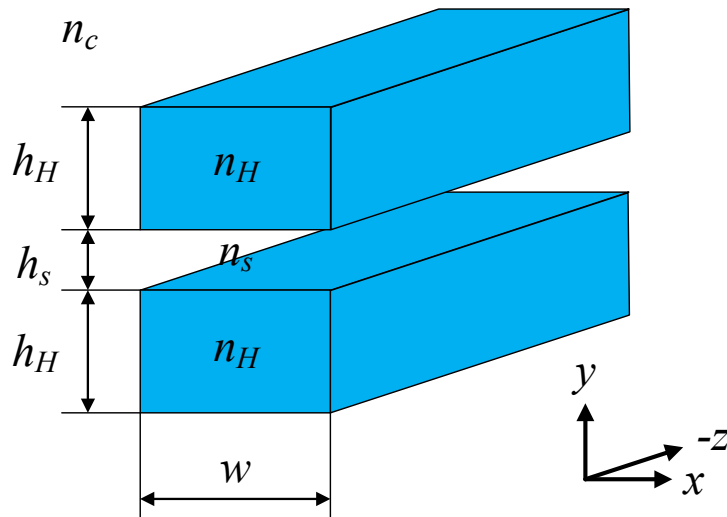


図 2.9. 水平スロット導波路

### 2.3. Grating 導波路

スロット導波路は、それ単体では波長特性を持たず、導波路の周囲やスロット内の付着物や雰囲気による屈折率変化をとらえることができない。センサとしての応用を考えた場合、これをとらえる仕組みが必要である。他機関では、リング共振器やMZIをスロット導波路と組み合わせた素子が報告されている[19,35]。本研究ではSiコア層やNb<sub>2</sub>O<sub>5</sub>コア層の本研究室のこれまでの研究において実績のあるGrating構造を選択した。

#### 2.3.1. Grating 導波路の基本構造

図 2.10 に Grating 導波路の構造図を示す。Grating 構造とは導波路に設けられた光波長程度の微細な周期構造を示す[90]。代表的な Grating 構造は表面に周期的な凹凸をつけたレリーフ形と、導波路の側壁に周期的な凹凸をつけた縦形(VG: Vertical Grating)がある。導波路に入射された光は、凹凸による伝搬定数の違いから少しずつ反射される。凹凸の周期が $\Lambda$ であるとき、ある点で反射された光の位相と $\Lambda$ 分先の点で反射された光の位相が等しければ反射波となる。この位相が等しくならない場合、反射された光が干渉しあって消光してしまい結果として反射されない。反射された光の位相が同相になるための条件は導波路の伝搬定数を $\beta$ とすると次式となる。

$$2\beta\Lambda = 2m\pi \ (m = 1,2,3,\dots) \cdots (2.4)$$

ここで、 $m$  は回折次数を示す。導波路の等価屈折率  $N_{\text{eff}}$  を用いて波長についての式に書き直すと次式のように表すことができる。

$$\lambda_B = \frac{2N_{\text{eff}}\Lambda}{m} \ (m = 1,2,3,\dots) \cdots (2.5)$$

この波長 $\lambda_B$ を Bragg 波長といい、Grating 構造によって反射される波長を示す。Bragg 波長は導波路の等価屈折率  $N_{\text{eff}}$  と Grating 周期 $\Lambda$ によって決定される。Grating 導波路の透過パワーは、図 2.10 のように Bragg 波長を中心に鋭い stop-band が得られる。Grating 構造で反射された光は入射側へ伝搬する。したがって、入射側からは、Bragg 波長でピークを持つ反射光が得られる。

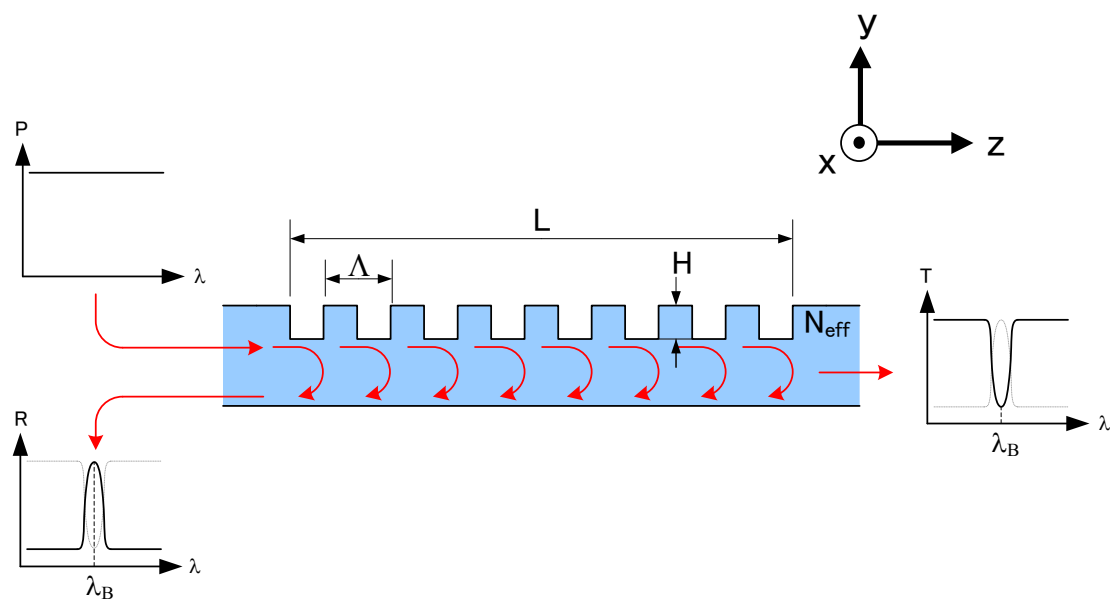


図 2.10. Grating 構造

### 2.3.2. Vertical Grating

Vertical Grating(VG)は図 2.11、図 2.12 に示すように、導波路の側壁に Grating 構造の凹凸を有している。動作原理としては 2.3.1 項のレリーフ形と同様に、凹凸の導波路幅の変化によって生じる等価屈折率の違い(伝搬定数の違い)から反射が生じる。VG の Bragg 波長はレリーフ形と同様に式 2.5 により見積もることができる。一方、製作プロセスはレリーフ形と異なる。レリーフ形は導波路を形成した後、表面に Grating 構造を形成するが、VG は導波路と同時にパターンニングを行う。このため、VG のパターンニングには導波路パターンと Grating 構造を一度にパターンニングするのに必要な分解能を有する電子線描画装置やステップ露光装置が用いられる。本研究では製作プロセスを短縮することができる VG をセンサ、水平スロット導波路の中空構造の動作実証のための波長依存性を持つ導波路構造として選択した。

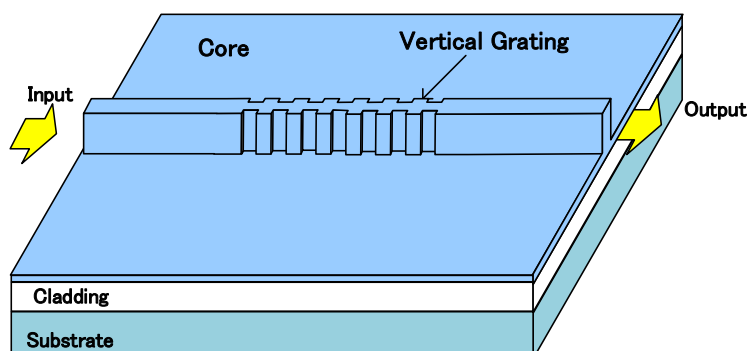


図 2.11. Vertical Grating 導波路



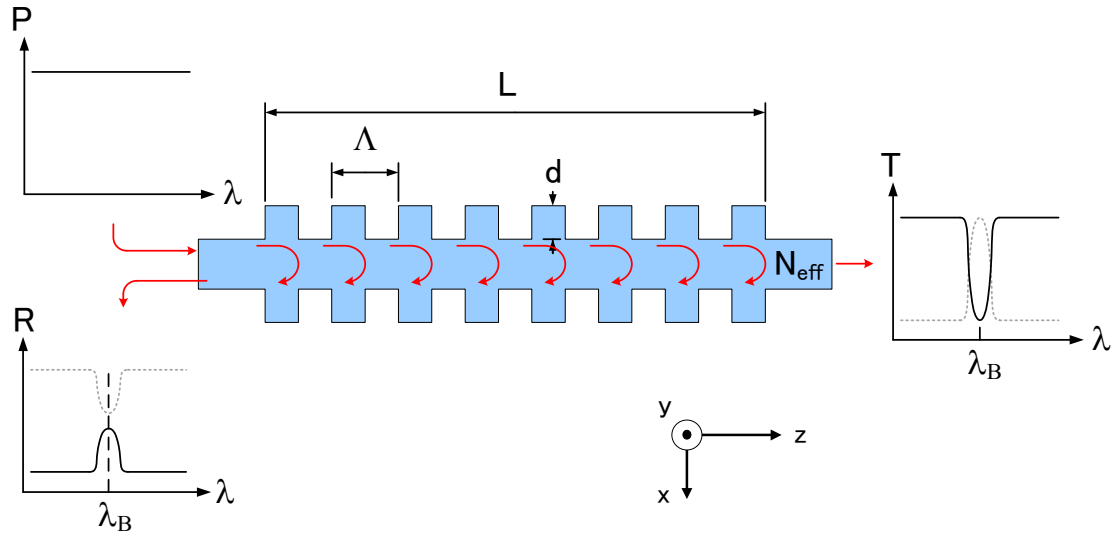


図 2.12. Vertical Grating 構造

### 2.3.3. 理論解析手法

光導波路の解析手法は一般的にビーム伝搬法(BPM: Beam Propagation Method)がよく用いられるが、Grating 構造のように反射を伴う場合、単なる BPM では解析が行えず伝搬行列とビーム伝搬法を組み合わせた方法[91]や時間領域ビーム伝搬法(TD-BPM)、時間領域差分(FDTD)、モード結合方程式[92]といった方法がある[93]。このうち FDTD 法を用いることが一般的であるが、要求される計算機のスペックが高く、計算に長い時間がかかり、素子設計を行うことは難しい。そこで、本研究ではモード結合理論から導かれる F-matrix を計算することでフィルタ特性を解析する。

Grating 構造の F-matrix は、モード結合方程式から求めることができる。図 2.13 に Grating 導波路のモデルを示す。導波路に Grating 周期 $\Lambda$ 、Grating 長 $L$ 、Grating 深さ $H_G$ を考える。

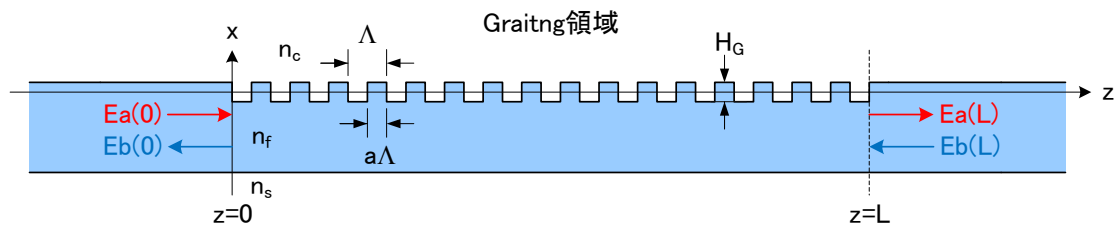


図 2.13. Grating 導波路の計算モデル

Grating 構造は矩形状の周期的な屈折率分布が伝搬方向に沿って生じる。Grating 深さの平均レベルをコア層厚とした Grating 構造のない導波路の屈折

率は  $n_f$  とし、上部クラッドの屈折率  $n_c$  とする。矩形形状の **Grating** 周期構造はフーリエ級数展開すると誘電率の変化は次式で示すことができる。

$$\Delta\epsilon_m(x) = (n_f^2 - n_c^2) \left\{ \frac{\sin(am\pi)}{m\pi} \right\} \cdot \cdot \cdot (2.6)$$

導波路内には進行波と反射されて戻ってくる後退波が存在するので、導波路内を伝搬する電界  $\mathbf{E}$  は両者電界の和となる。

$$\begin{aligned} \mathbf{E}(x, z) &= E_A(z) + E_B(z) \\ &= A(z)\exp(-j\beta z) + B(z)\exp(j\beta z) \\ &= A(z)\exp\{-j(\delta + \beta - \delta)z\} + B(z)\exp\{j(\delta + \beta - \delta)z\} \\ &= R(z)\exp(-j\beta_B z) + S(z)\exp(j\beta_B z) \cdot \cdot \cdot (2.7) \end{aligned}$$

ここで、 $\delta$  は次式のようにあらわされ、式 2.4 で定義される **Bragg** 条件からの位相ずれを示している。

$$\delta = \beta - \beta_B \cdot \cdot \cdot (2.8)$$

式 2.7 と式 2.8 から次式が成り立つ。

$$R(z) = A(z)e^{-j\delta z} \cdot \cdot \cdot (2.9)$$

$$S(z) = B(z)e^{j\delta z} \cdot \cdot \cdot (2.10)$$

ここで、モード結合方程式は次式で表される[]。

$$-\frac{\partial R(z)}{\partial z} + (-\alpha - j\delta)R = j\kappa S \cdot \cdot \cdot (2.11)$$

$$\frac{\partial S(z)}{\partial z} - (-\alpha - j\delta)S = j\kappa R \cdot \cdot \cdot (2.12)$$

ここで、 $\kappa$  は **Grating** の結合係数を表す。この微分方程式を解くと次式が与えられる。

$$\begin{bmatrix} R(z) \\ S(z) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cosh(\gamma z) - \frac{\alpha + j\beta}{\gamma} \sinh(\gamma z) & -\frac{k}{\gamma} \sinh(\gamma z) \\ j\frac{k}{\gamma} \sinh(\gamma z) & \cosh(\gamma z) + \frac{\alpha + j\beta}{\gamma} \sinh(\gamma z) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R(0) \\ S(0) \end{bmatrix} \cdot \cdot \cdot (2.13)$$

ここで、 $\gamma = \sqrt{(j\delta + \alpha)^2 + \kappa^2}$  である。式 2.7 から以下の関係がわかる。

$$\begin{bmatrix} E_A(0) \\ E_B(0) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R(0) \\ S(0) \end{bmatrix} \cdot \cdot \cdot (2.14)$$

$$\begin{bmatrix} E_A(L) \\ E_B(L) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R(L)\exp(-j\beta_B L) \\ S(L)\exp(j\beta_B L) \end{bmatrix} \cdot \cdot \cdot (2.15)$$

式 2.15 に式 2.13 を代入すると次式になる。

$$\begin{aligned}
& \begin{bmatrix} E_A(L) \\ E_B(L) \end{bmatrix} \\
&= \begin{bmatrix} \left( \cosh(\gamma L) - \frac{\alpha + j\delta}{\gamma} \sinh(\gamma L) \right) \exp(-j\beta_B L) & -j \frac{k}{\gamma} \sinh(\gamma L) \exp(-j\beta_B L) \\ j \frac{k}{\gamma} \sinh(\gamma L) \exp(j\beta_B L) & \left( \cosh(\gamma L) + \frac{\alpha + j\delta}{\gamma} \sinh(\gamma L) \right) \exp(j\beta_B L) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_A(0) \\ E_B(0) \end{bmatrix} \\
&= [\bar{F}] \begin{bmatrix} E_A(0) \\ E_B(0) \end{bmatrix} \cdot \cdot \cdot (2.16)
\end{aligned}$$

ここで、 $|\bar{F}| = \overline{F_{11}F_{22}} - \overline{F_{12}F_{21}} = 1$ である。このため  $F$  マトリクスを逆行列にして、入射端と出射端を入れ替えると次式のように表すことができる。

$$\begin{aligned}
& \begin{bmatrix} E_A(0) \\ E_B(0) \end{bmatrix} \\
&= \begin{bmatrix} \left( \cosh(\gamma L) - \frac{\alpha + j\delta}{\gamma} \sinh(\gamma L) \right) \exp(-j\beta_B L) & j \frac{k}{\gamma} \sinh(\gamma L) \exp(-j\beta_B L) \\ -j \frac{k}{\gamma} \sinh(\gamma L) \exp(j\beta_B L) & \left( \cosh(\gamma L) + \frac{\alpha + j\delta}{\gamma} \sinh(\gamma L) \right) \exp(j\beta_B L) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_A(L) \\ E_B(L) \end{bmatrix} \\
&= [F] \begin{bmatrix} E_A(L) \\ E_B(L) \end{bmatrix} \cdot \cdot \cdot (2.17)
\end{aligned}$$

次に、**Grating** 構造から波長特性を解析するために、結合係数 $\kappa$ を計算によって求める必要がある。結合係数 $\kappa$ は、同一の **TE** モードでの結合を考えると次式で求めることができる[94]。

$$\kappa = \frac{\omega \epsilon_0}{4} \int E_y^*(x) \Delta \epsilon_m(x) E_y(x) dx \cdot \cdot \cdot (2.18)$$

ここで、 $\Delta \epsilon_m(x)$ は式 2.6 を代入する。 $\Delta \epsilon_m(x)$ は、**Grating** 深さ  $H_G$  の範囲でのみ値を持つため、 $-H_G/2 \leq x \leq H_G/2$  以外では式 2.18 における積分値は 0 である。したがって、**Grating** 深さ  $H_G$  は結合係数 $\kappa$ に大きく影響する。 $E_y(x)$ は次式に示す、非対称 3 層スラブ導波路から **TE** モードでの電界分布を用いる。

$$E_y = E_c e^{-\gamma_c x}, x > 0 \cdot \cdot \cdot (2.19)$$

$$E_y = E_f \cos(\kappa_x x + \Phi_c), -T < x < 0 \cdot \cdot \cdot (2.20)$$

$$E_y = E_s e^{\gamma_s(x+T)}, x < -T \cdot \cdot \cdot (2.21)$$

ここで、式 2.18 に用いられる  $E_y$  は規格化されていなければならないので、次式を用いて伝送パワーを計算する。

$$P = \frac{\beta}{2\omega\mu_0} \int_{-\infty}^{\infty} |E_y|^2 dx \cdot \cdot \cdot (2.22)$$

#### 2.3.4. 屈折率変化の検出原理

本研究では検知対象による屈折率変化をとらえる、RI 形センサの実現を目指している。検知対象の屈折率変化による、導波路の等価屈折率変化は導波路側壁に形成した VG によりとらえる。

Grating 構造の Bragg 波長は式 2.5 で表されているように導波路の等価屈折率に依存する。したがって、導波路の周囲、あるいはスロット内の検知対象物質の濃度が変化した場合、Grating 導波路の等価屈折率が変化し、Bragg 波長が変化する。Grating 導波路の等価屈折率の変化量を  $\Delta N_{eff}$  とすると式 2.5 は次式のように書き換えることができる。

$$\lambda_B = \frac{2\Lambda(N_{eff} + \Delta N_{eff})}{m} \quad (m = 1, 2, 3, \dots) \quad \dots (2.23)$$

また  $\Delta N_{eff}$  によって変化する Bragg 波長の変化量は次式で表すことができる。

$$\Delta\lambda_B = \frac{2\Lambda\Delta N_{eff}}{m} \quad (m = 1, 2, 3, \dots) \quad \dots (2.24)$$

したがって、中空の水平スロット導波路に Grating 構造を形成することで、検知対象による等価屈折率の変化を Grating の stop-band のシフトとしてとらえ、シフト量と検知対象の濃度の関係性を予め把握しておくことで、検知対象の濃度を測定することができる。図 2.14 は VG を有する水平スロット導波路センサの構造図である。また図 2.15 に検知動作の概要を示す。図 2.15 では Grating 構造を通過する光が鋭い stop-band を伴ったスペクトルが表れる。この stop-band は検知対象の濃度変化に対応した屈折率変化に応じて波長特性がシフトする。

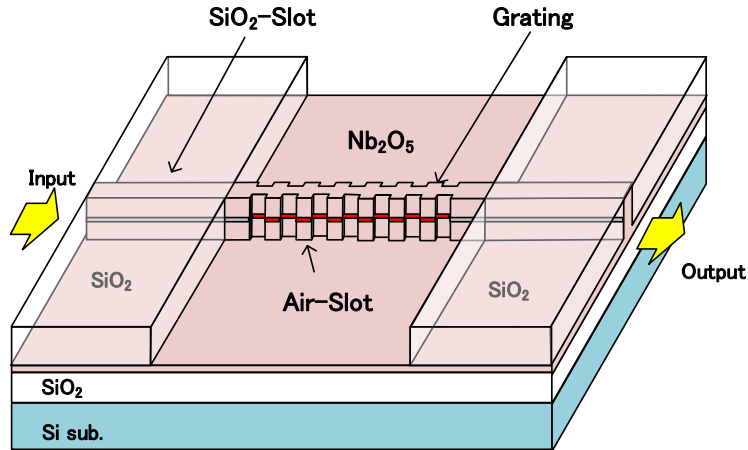


図 2.14. Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 水平スロット導波路センサの構造

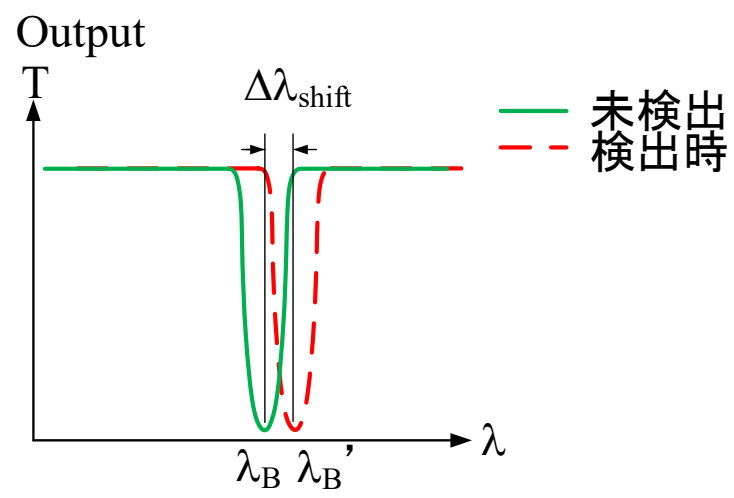


図 2.15. 出力光スペクトルの変化

### 第3章 理論解析

第 3 章では Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 材料を用いた水平スロット導波路の基本特性の解析手法と、解析により得られた、基本特性について述べる。

#### 3.1. 解析手法

スロット導波路は特有の電界分布を有するため、通常のリブ形導波路やチャンネル導波路のように 3 層スラブ導波路への近似と固有値方程式による見積もりを行うことができない。このため、スロット導波路を解析するには電磁界解析を行う。本研究では導波路断面の二次元電磁界分布の解析と等価屈折率の見積もりに有限要素法を、スロット導波路と他種の導波路との接続損失や、曲がり導波路の伝搬損失の解析に時間領域差分法を用いて解析を行った。解析には米国 Synopsys 社の商用光シミュレータ群の RSoft Photonic Component Design Suite から FemSIM(有限要素法ソルバ)と FullWAVE(時間領域差分法ソルバ)を用いた。計算機は市販されている部品を組み合わせ、HEDT(High End Desktop)を構成した。計算機の構成を表 3.1 に示す。

表 3.1. 計算機の構成

CPU	AMD Ryzen Threadripper 2950X (3.5GHz, 16C32T)
RAM	DDR4-2666 4-channel 96GB (16GB×6 DIMM)
Chipset	AMD X399
GPU	AMD Radeon RX560
SSD	NVMe SSD 256GB
HDD	SATA HDD 4TB
OS	Microsoft Windows 10 Education x64

##### 3.1.1. 有限要素法

光波の電磁界解析は連続光(CW 光)を対象とした研究が一般的で、解析は周波数領域で実施されることが多い。有限要素法(FEM: Finite Element Method)は、対象となる系に関する微分方程式を直接解く代わりに、対象となる領域を要素と呼ばれる小部分に分割して、その一つ一つに対して離散化モデルを作り、これらから系全体に対する離散化方程式を組み立てる。光導波路解析における FEM においては、非物理的なスプリアス解を除去するために辺要素が用いられる[95-96]。

原理として、FEM は境界値の問題を直接解くのではなく、式 3.1 の波動方程式から構築される変分法に基づく汎関数を解く。

$$\nabla \times \left( \frac{1}{\epsilon} \cdot (\nabla \times \mathbf{E}) \right) - k_0^2 \epsilon_r \mathbf{E} = 0 \cdots (3.1)$$

この関数は領域 A 上の二次元空間では式 3.2 から与えられる。

$$F(\mathbf{E}) = \iint_A \left[ (\nabla \times \mathbf{E})^* \cdot \frac{1}{\bar{\epsilon}} \cdot (\nabla \times \mathbf{E}) - k_0^2 \mathbf{E}^* \cdot \bar{\epsilon} \cdot \mathbf{E} \right] dA \cdots (3.2)$$

伝搬モードとリークモード( $E(x, y, z) = E(x, y) \exp(-j\beta z)$ )のために、解析空間全体の試験関数を見つける代わりに、FEM は解析領域を要素に分割し、単純な離散化方程式を立てる。この離散化方程式は要素の外側で消えるので、最終的な解はすべての要素の解の合計となる。Hybrid Node/Edge FEM の場合、横方向成分はベクトル(エッジ要素)で展開される。

$$\mathbf{E}_T(x, y) e^{-i\beta z} = \sum_{i=1}^n \mathbf{N}_i E_{Ti} = \sum_{i=1}^n \{U\hat{x} + V\hat{y}\} E_{Ti} \cdots (3.3)$$

ここで、 $E_{Ti}$  は各エッジに沿ったフィールドの値である。縦方向の成分(要素の平面に垂直)は、スカラ(ノード要素)で表される。

$$E_z(x, y) e^{-i\beta z} = \sum_{i=1}^n N_i E_{zi} \cdots (3.4)$$

ここで、 $E_{zi}$  は各ノードのフィールドの値である。汎関数は式 3.5 によって最小化され、固有値として  $\beta^2$  を持ち、固有ベクトルとしてノードとエッジのフィールド成分を持つ行列固有値方程式が与えられる[97]。

$$\frac{\partial F}{\partial E_i} = 0 \cdots (3.5)$$

### 3.1.2. 時間領域差分法

時間領域差分(FDTD: Finite-Difference Time-Domain)法はマクスウェル方程式を基本式として、直接時間領域解析を行う方法である[95]。光導波路の解析によく用いられる BPM 法では対応できない、導波路の不連続などによる反射波を考慮して解析を行うことができる。Yee によって提案された FDTD 法は陰解法に基づくアルゴリズムの簡便さから、広い範囲で利用されている[96]。しかしながら、大きなデバイスの解析や、安定条件により空間刻み幅を小さく選ばざるを得ない解析では時間刻み幅も極めて小さくなり、長時間の計算が必要になる[96]。

原理として、FDTD 法はマクスウェル方程式の回転方程式(式 3.6、3.7)に含まれるすべての微分を差分、要するに変数  $s$  の関数  $f$  について式 3.8 と置き換えたものである[98]。

$$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J}_0 + \sigma \mathbf{E} + \epsilon \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} \cdots (3.6)$$

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\mu \frac{\partial \mathbf{H}}{\partial t} \cdots (3.7)$$

$$\frac{\partial f}{\partial s} \rightarrow \frac{f(s + \Delta s/2) - f(s - \Delta s/2)}{\Delta s} \dots (3.8)$$

### 3.2. Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 水平スロット導波路の基本特性

#### 3.2.1. 解析構造

図 3.1 は提案する Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 水平スロット導波路の構造図である。センサ応用の観点からは中空の Air-Slot 構造が適していると考えられるが、Air-Slot 構造は、それ単体で構造を維持できないため、中空領域を支える構造が必要である。本研究では、組み合わせる支持構造として、図 3.1(a)のようにリブ形導波路で支える構造と、図 3.1(b)のように SiO<sub>2</sub>-Slot 導波路で支える 2 種類の構造を考えた。

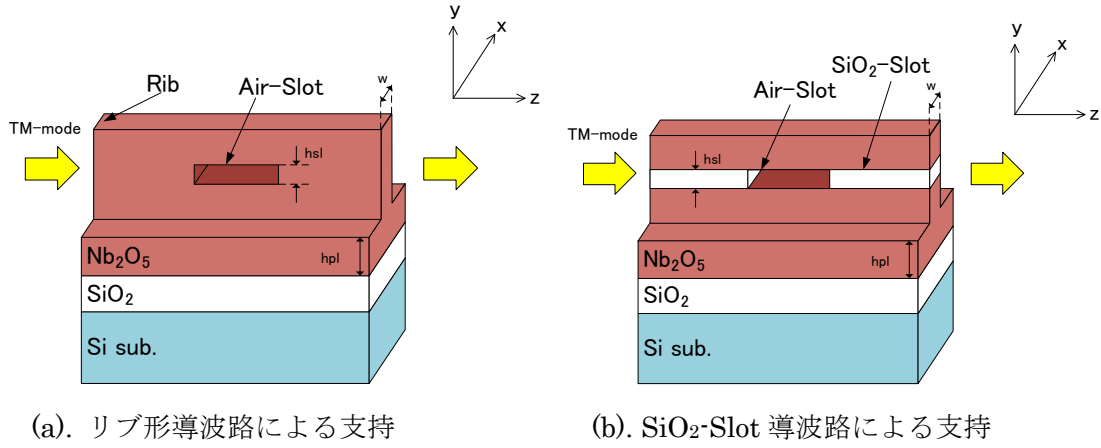


図 3.1. Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 水平スロット導波路の構造

図 3.1 の 2 つの構造には Air-Slot 導波路と SiO<sub>2</sub>-Slot 導波路、リブ形導波路の 3 種類が存在する。それぞれの構造の FEM 解析を行うための導波路断面の解析モデルを図 3.2 に示す。水平スロット構造の断面は Air や SiO<sub>2</sub> の低屈折率媒質の薄膜が上部の長方形の高屈折率媒質層とリブ形の下部の高屈折率媒質層に挟まれた構造をしている。下部クラッドは SiO<sub>2</sub>、上部クラッドは Air として解析を行う。本研究の水平スロット導波路は製作プロセス上、Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 層に挟まれた SiO<sub>2</sub> 層を導波路形成後に選択性ウェットエッチングによって取り除き、中空のスロット領域を得る。このため、下部の Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 層のプレーナ層は下部クラッドの SiO<sub>2</sub> 層を保護するために設けている。計算に用いた各材料の屈折率を表 3.2 に示す。ここで Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub> の屈折率の値は素子製作で使用する反応性 DC スパッタ (SPS-208CW) を用いて成膜した Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 薄膜を、分光光度計を用いて評価した値を用いている。



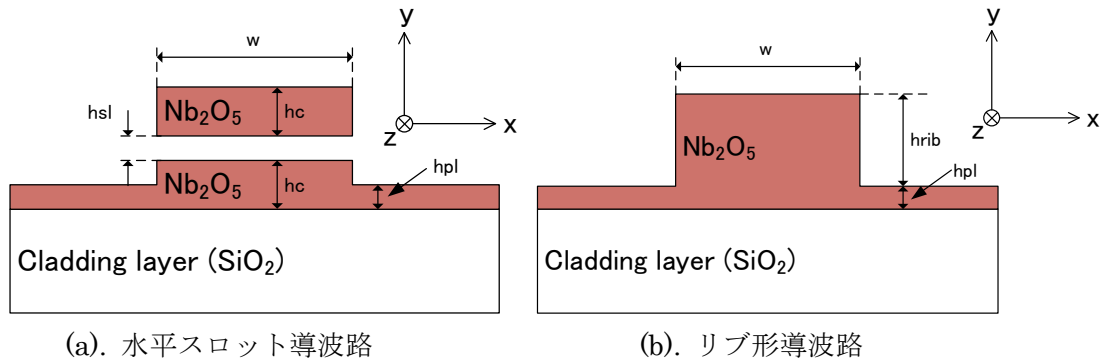


図 3.2. 導波路断面の解析モデル

表 3.2. 材料の屈折率

材料名	屈折率
Air	1.00
SiO <sub>2</sub>	1.44
Nb <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	2.23

FEM の導波路断面の解析にはメッシュの設定を行う。メッシュのサイズは任意の値を設定できるが、物理的な構造に対して大きすぎる場合は、正しい計算結果が得られず、小さすぎる場合は計算量が多くなり、解析に多くの時間を要してしまう。このため、多くの解析では、メッシュを均一サイズとせず、構造的な変化が大きい、導波路のエッジ部分や微小構造部分ではメッシュを細かくし、変化の少ないエッジ以外の部分ではメッシュを荒くすることで、トータルのメッシュの個数を削減して、解析時間を短縮している。水平スロット導波路断面で最も小さな構造はスロット層厚である。本研究ではスロット層厚の最小値を  $5\text{ nm}$  とするため、メッシュのサイズはその  $1/2$  の  $2.5\text{ nm} \times 2.5\text{ nm}$  の均一メッシュとした。解析領域は  $x$  方向に  $2\text{ }\mu\text{m}$ 、 $y$  方向に  $3\text{ }\mu\text{m}$  とし、メッシュの合計数は  $960,000\text{ mesh}$  とした。表 3.3 に FEM の解析条件を示す。図 3.3、3.4 にメッシュの詳細を示す。

表 3.3. 解析条件

	x 方向	y 方向
メッシュサイズ	$2.5\text{ nm}$	$2.5\text{ nm}$
解析領域	$2\text{ }\mu\text{m}$	$3\text{ }\mu\text{m}$
メッシュ数	$960,000\text{ mesh}$	
計算波長	$1550\text{ nm}$	

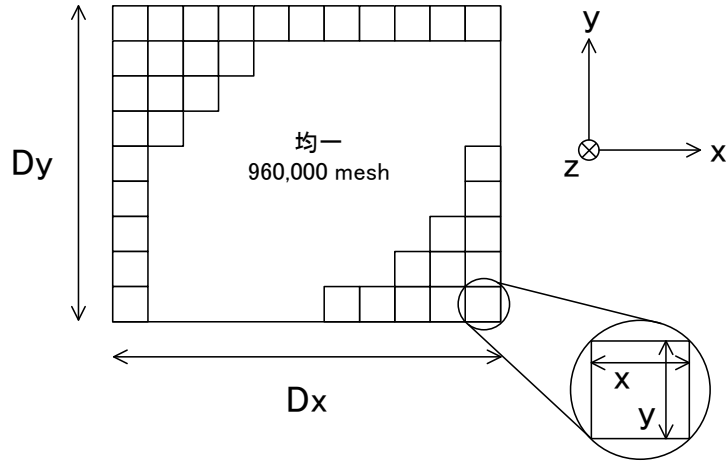


図 3.3. メッシュ構成

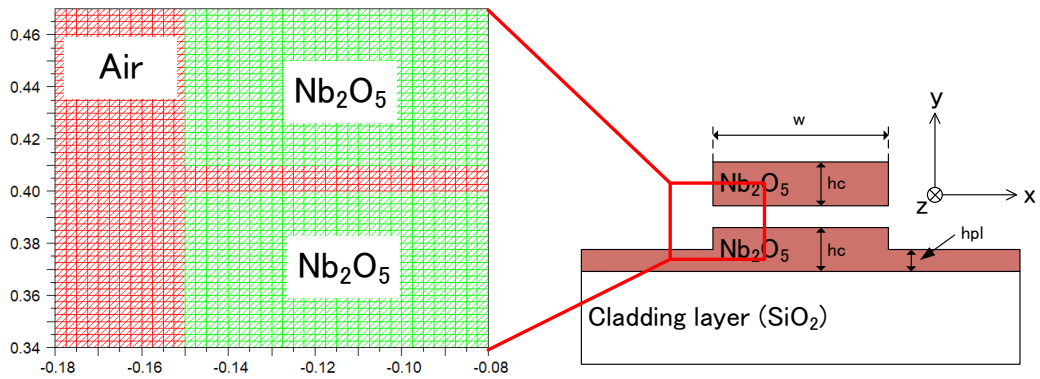


図 3.4. メッシュ詳細

### 3.2.2. 正規化処理

FemSIM の出力は最も光強度が高い頂点を 1.0 として出力される。このため分布の異なるモード同士の比較を直接行うことはできない。比較を行うためには式 3.9 に示されるようにモード分布の面積を合わせる必要があり、これを正規化という。

$$\text{Normalized intensity: } \iint_{-\infty}^{\infty} E y^2 dx dy = 1 \cdot \cdot \cdot (3.9)$$

本研究では FemSIM の解析結果の出力ファイル.mXX ファイルをいったん Excel で展開して、別途、光強度の積算値が 1.0 となるように計算を行ってから、別データとの比較を行う。正規化処理の前後のデータの変化イメージを図 3.5 に示す。

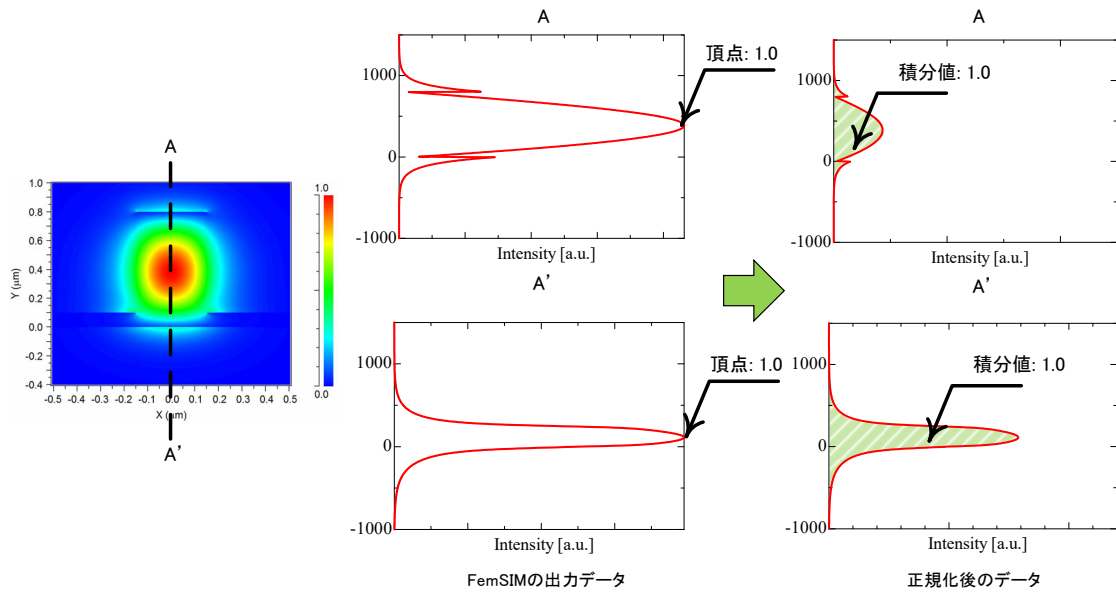
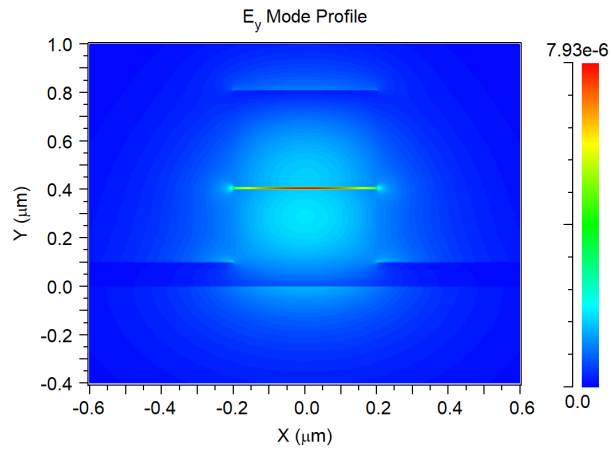


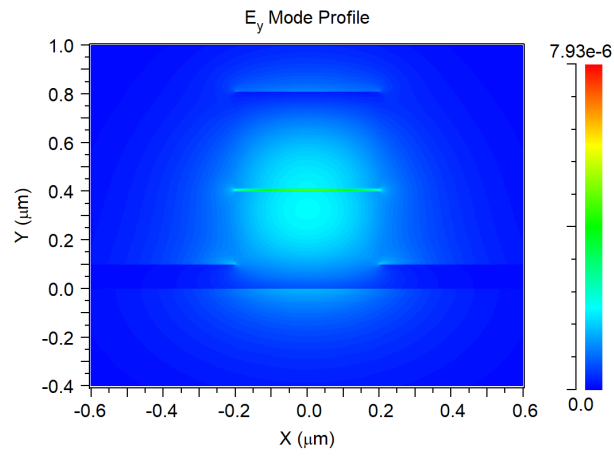
図 3.5. 正規化処理

### 3.2.3. 光強度分布

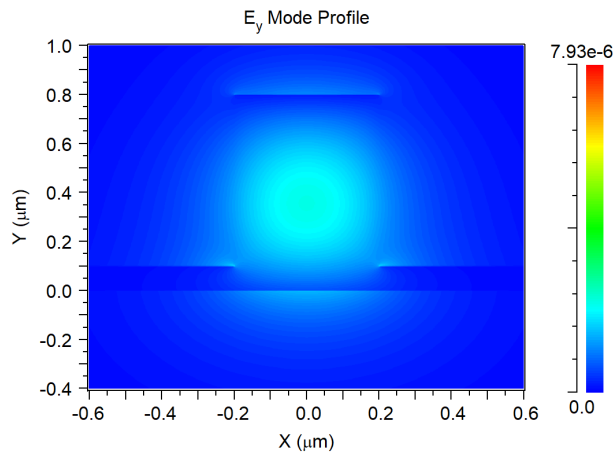
図 3.6 は  $\text{Nb}_2\text{O}_5$  水平スロット導波路とリブ形導波路の TM モードの  $E_y$  成分の正規化光強度分布である。水平スロット導波路の構造パラメータとしては、導波路幅  $w$  を 400 nm、スロット層厚  $h_{\text{sl}}$  を 10 nm、高屈折率媒質層厚  $h_c$  は上下共通で 400 nm、プレーナ層厚  $h_{\text{pl}}$  を 100 nm とした。またリブ形導波路のパラメータは導波路幅  $w$  を 400 nm、リブ高さ  $h_{\text{rib}}$  を 700 nm、プレーナ層厚  $h_{\text{pl}}$  を 100 nm とした。図 3.6(a)、(b)の水平スロット導波路ではスロット層の光強度分布が高くなっている。Air-Slot と  $\text{SiO}_2$ -Slot を比較した場合、Air-Slot がより高いピーク強度を得られる。また、 $\text{SiO}_2$ -Slot の光強度分布は Air-Slot とよく似ており、Air-Slot と他の導波路との接続時の結合損失を考えた場合、リブ形導波路よりも  $\text{SiO}_2$ -Slot 導波路の方が、低損失に接続できると考えられる。



(a). Air-Slot



(b).  $\text{SiO}_2$ -Slot



(c). リブ形

図 3.6. 正規化光強度分布( $E_y$ 成分)

図 3.7 に y 軸断面の正規化光強度分布を示す。Air-Slot 構造の 10 nm 層厚のスロットの場合、リブ形と比較して約 3.7 倍高いピーク強度が得られる。ピーク強度はスロット層厚に依存し、スロット層厚が厚くなるほど、ピークが低くなる。一方、縦スロット導波路の動作実証[38]でよく用いられる 100 nm 以上のスロット層厚の場合、Air-Slot 構造のピーク強度はリブ形よりも低くなる。SiO<sub>2</sub>-Slot 構造の場合は、スロット層厚 10 から 50 nm では Air-Slot 構造よりも低いピーク強度となる。またスロット層厚 100 nm においても、リブ形よりも高いピーク強度を得ることができる。

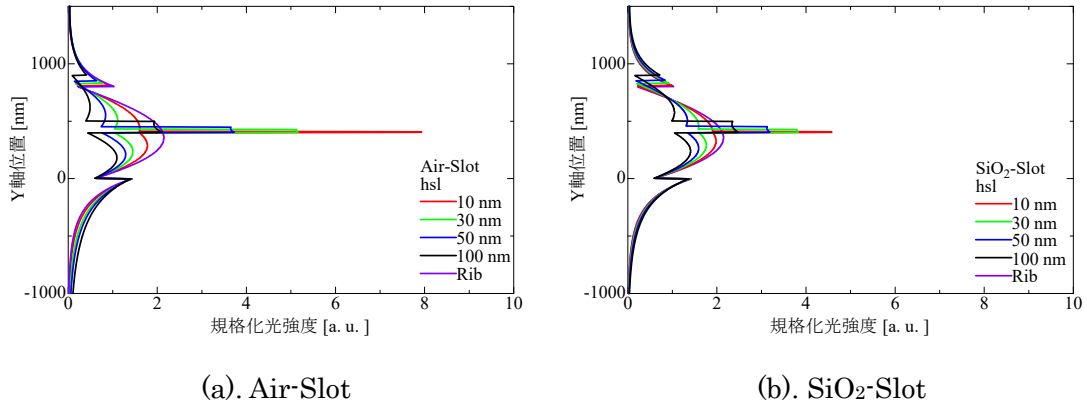


図 3.7. y 軸断面正規化光強度分布(X=0)

#### 3.2.4. 等価屈折率

図 3.8 は等価屈折率とスロット層厚の依存性を示している。水平スロット導波路の等価屈折率はスロット層厚が厚くなるにしたがって、低くなる傾向にある。これはモードが局在する低屈折率媒質のスロット領域の割合が増加するためである。また、等価屈折率はリブ形やチャネル導波路と同様に導波路幅にも依存し、導波路幅が大きくなりに従い、等価屈折率も高くなる傾向にある。また  $w = 400$  nm の Air-Slot ではスロット層厚 5 nm と 45 nm の差が 0.13 ほどになる。Air-Slot と SiO<sub>2</sub>-Slot を比較した場合、SiO<sub>2</sub>-Slot の等価屈折率変化が Air-Slot よりも緩やかである。これはスロット内の低屈折率媒質の屈折率が Air よりも SiO<sub>2</sub> の方が高いためである。

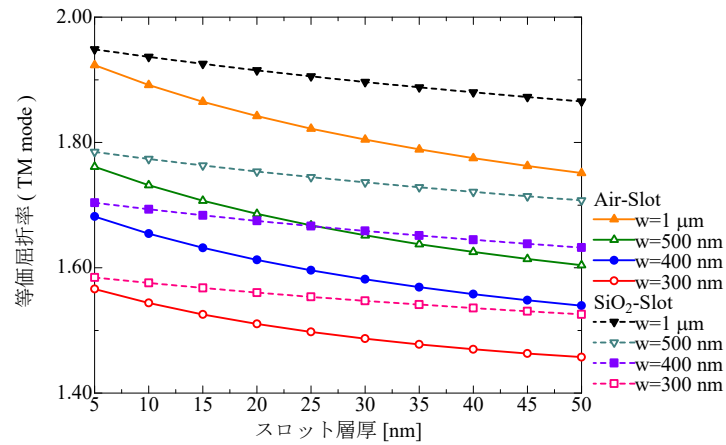
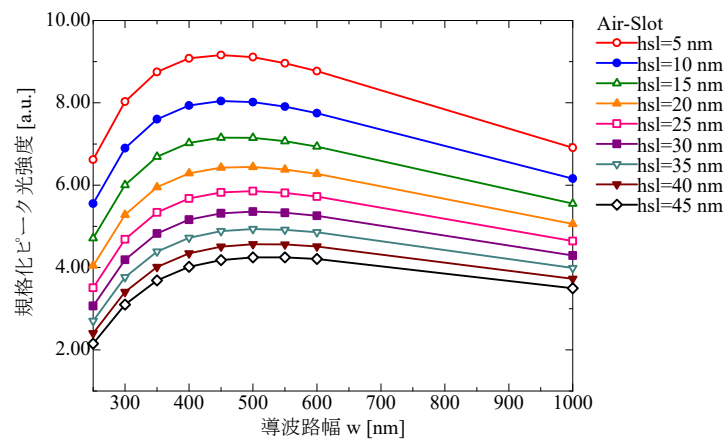


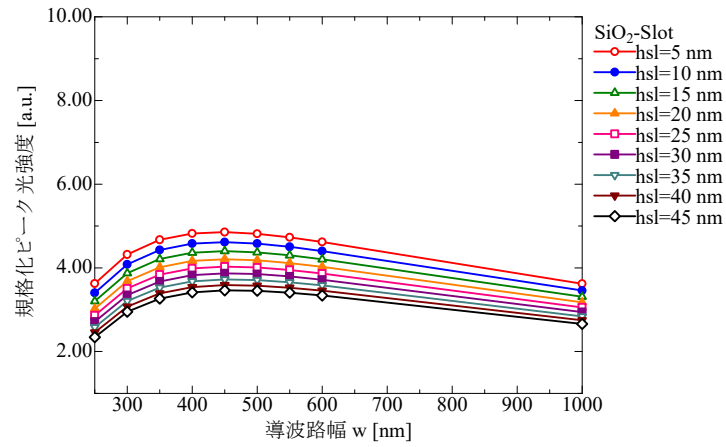
図 3.8. 等価屈折率のスロット層厚依存性

### 3.2.5. ピーク強度の構造依存性

図 3.9 はスロット内の光ピーク強度の導波路幅への依存性を示している。スロット層厚  $h_{sl} = 10 \text{ nm}$  の時、ピーク強度が最大となる、導波路幅  $w = 400$  から  $500 \text{ nm}$  である。また、ピーク強度は Air-Slot、SiO<sub>2</sub>-Slot 両者とも、スロット層厚が薄い方が高いピーク強度を得られる傾向にある。つまり、同じ導波路幅の場合は薄いスロット層の方が高いピーク強度が得られ、スロット層厚が薄い場合 ( $\sim 400 \text{ nm}$  程度) では、同じスロットの場合、導波路が太い方が、高いピーク強度が得られる。液体の濃度やバイオセンサへの応用を考えた場合、検知対象の屈折率は水の屈折率 ( $n = 1.3$ ) 付近となるため、スロット内の屈折率に近い、図 3.9b の SiO<sub>2</sub>-Slot ( $n = 1.44$ ) の解析結果から、 $w = 400 \text{ nm}$  を選択すると最も高いピーク強度が得られるといえる。



(a). Air-Slot



(b). SiO<sub>2</sub>-Slot

図 3.9. ピーク強度の導波路幅依存性

図 3.10 は導波路幅  $w = 400 \text{ nm}$  の時のピーク強度とプレーナ層厚の依存性を示している。ピーク強度はプレーナ層厚が厚くなるのに従い、減少する。スロット層厚  $h_{sl} = 10 \text{ nm}$  の時のプレーナ層厚が  $400 \text{ nm}$  の場合、ピーク強度はプレーナ層厚が  $0 \text{ nm}$  の場合の  $0.72$  倍となる。また、プレーナ層厚に対するピーク強度の変化量はスロット層厚ごとに異なり、その変化量はスロット層厚が厚い場合、少なくなる傾向である。

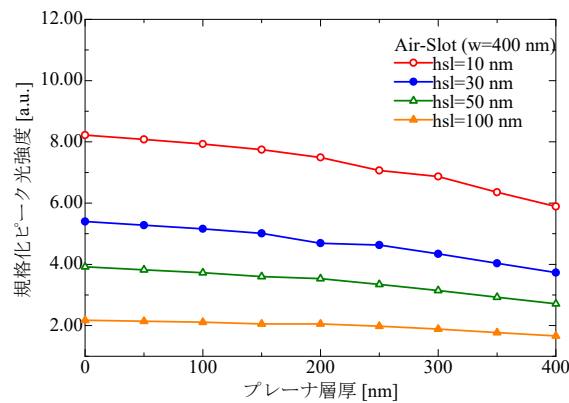


図 3.10. ピーク強度のプレーナ層厚依存性

### 3.2.6. スロット導波路と他種導波路との接続

中空構造の水平スロット導波路は、それ単体では構造を維持することができないため、リブ形導波路や SiO<sub>2</sub>-Slot 構造などの他の種類の導波路を支えとして接続する必要がある。また集積デバイスへの応用では、他の構造の導波路との接続

が行われる。しかしながら、水平スロット導波路は従来の導波路と異なり、独特なモード・プロファイルを有しているため、接続部の解析は重要である。

本研究では反射波と光の伝搬を時間的に解析ができる FDTD 法のソルバである FullWAVE を用いて解析を行った。FDTD 解析では FEM 解析と同様に導波路構造をメッシュによって分割し、個々のメッシュの頂点の計算を行う。解析条件は表 3.4 に示す。水平スロット導波路の構造は  $w = 400 \text{ nm}$ 、 $h_{sl} = 10 \text{ nm}$ 、 $h_c = 400 \text{ nm}$ 、 $h_{pl} = 100 \text{ nm}$  とし、リブ形導波路の構造は  $w = 400 \text{ nm}$ 、 $h_{rib} = 700 \text{ nm}$ 、 $h_{pl} = 100 \text{ nm}$  とした。図 3.11 は解析モデルの上面図である。

表 3.4. 解析条件

	x 方向	y 方向	z 方向
メッシュサイズ	5.0 nm	2.5 nm	150 nm
解析領域	2 $\mu\text{m}$	3 $\mu\text{m}$	2.5 $\mu\text{m}$
解析偏波	TM-mode		
入射光	CW		
収束条件	Convergence/No Limit		
解析時間 cT	21.7 $\mu\text{m}$		

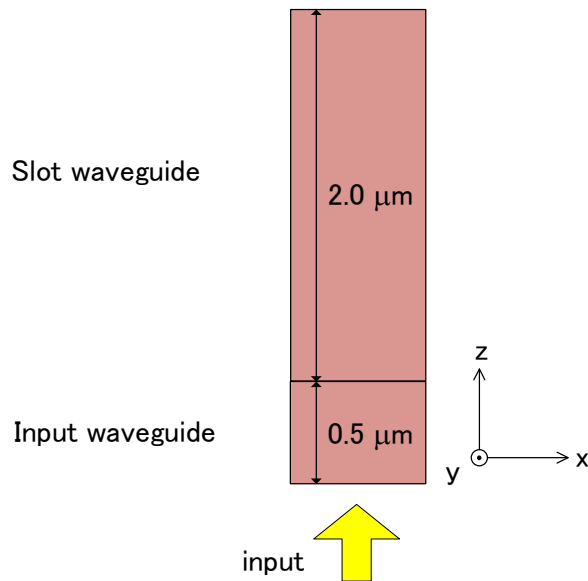


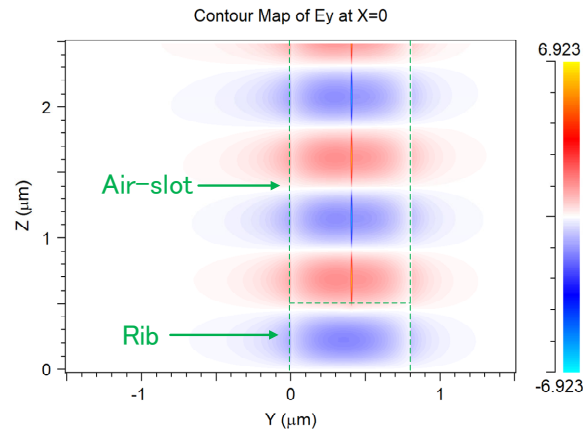
図 3.11. 接続損失の解析モデル(上面図)

接続損失の FDTD 解析は光が入力された定常状態の解析により求められる。したがって、解析条件の入射光は連続光(CW)、偏波は水平スロット導波路の動作モードである TM-mode とした。解析時間 cT は定常状態へ収束した際の時間であり、光速 c と CW 光が入射してから定常状態までの経過時間の積である。

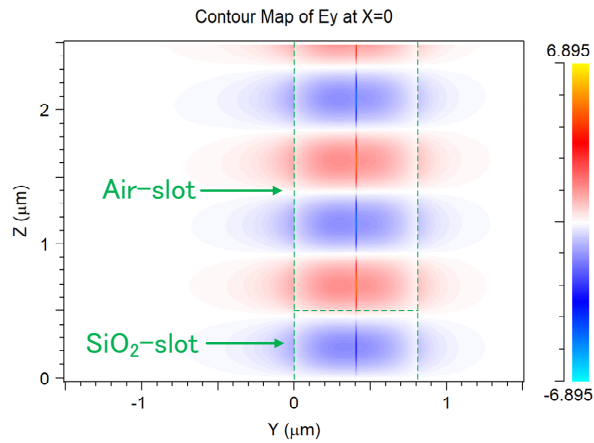


図 3.12 は定常状態のモード伝搬状態を示している。Air-Slot 構造はリブ形、SiO<sub>2</sub>-Slot のいずれでもスロット領域にモードが励起されていることから、接続することができると考えられる。

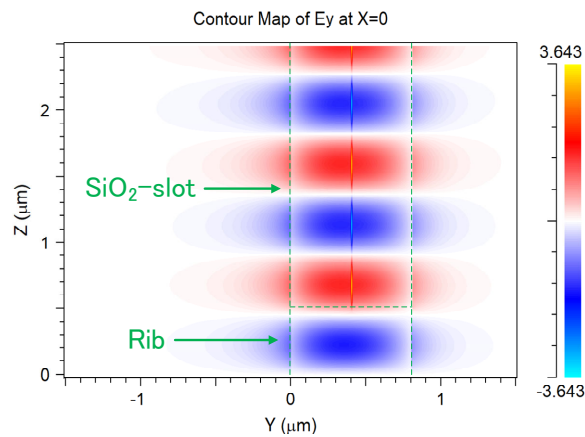
FullWAVE は任意の位置に monitor を配置し、その位置での電磁界強度やパワーを計算することができる。Monitor 位置を入力導波路とスロット導波路の境界面から $\pm 0.25 \mu\text{m}$  の位置にした際のパワーから求めた接続損失を表 3.5 に示す。結果として、リブ-Air Slot の接続では損失が 0.106 dB、SiO<sub>2</sub> Slot-Air Slot の接続では 0.0623 dB であった。3.2.1 項での予想通り、リブ-Air Slot の接続よりも SiO<sub>2</sub> Slot-Air Slot の方が、損失が小さい結果であり、SiO<sub>2</sub> Slot 構造が Air-Slot の支持構造に向いていることがわかる。



(a). リブ-Air Slot 間



(b). SiO<sub>2</sub>-Slot-Air Slot 間



(c). リブ-SiO<sub>2</sub> Slot 間

図 3.12. 各導波路構造の接続

表 3.5. 各導波路構造の結合損失

	結合損失 [dB]
リブ-Air Slot 間	0.106
SiO <sub>2</sub> -Slot-Air Slot 間	0.0623
リブ-SiO <sub>2</sub> Slot 間	0.0462

### 3.2.7. 曲げ損失の見積もり

様々な集積デバイスの配線には曲線導波路が必要となる。曲げ損失については FDTD 法による解析可能で、本研究では FullWAVE を用いて解析を行った。FullWAVE を用いた解析はほかの解析手法のように Pathway Monitor による伝搬パワーのトラッキングが使用できない。伝搬パワー(電界、磁界なども)を値として読み取るためには図 3.13 のように Monitor を任意の測定個所に配置する必要がある。

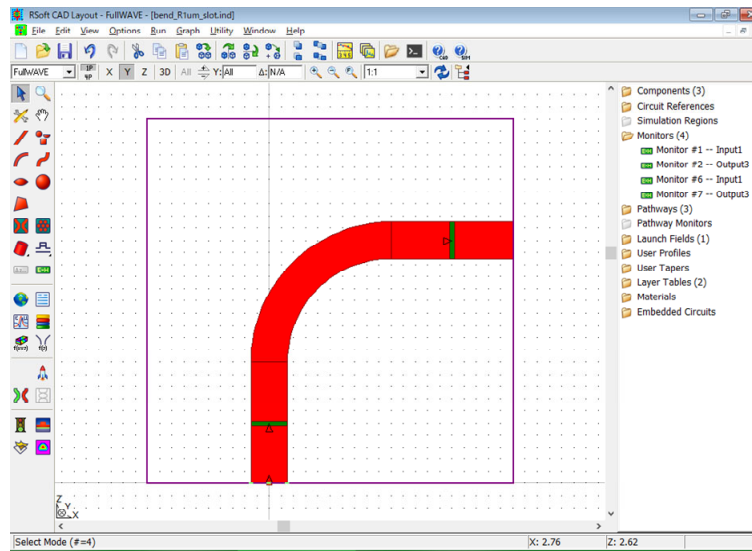


図 3.13. RSoft CAD 画面( $R = 1.0 \mu\text{m}$ )

解析は曲線部分の曲率半径  $R$  を  $0.5 \mu\text{m}$ 、 $1.0 \mu\text{m}$ 、 $2.0 \mu\text{m}$ 、 $2.5 \mu\text{m}$ 、 $3.0 \mu\text{m}$  と変化させて Air-Slot、 $\text{SiO}_2$ -Slot、リブ形導波路のそれぞれの入力、出力での伝搬パワーを計算した。解析モデルは図 3.14 のように各曲率半径の曲線導波路に  $1 \mu\text{m}$  の入出力直線導波路を設け、その直線の間地点に Monitor を配置した。ここで導波路幅  $w$  は 3.2.6 項で FDTD 解析を行ってきた  $400 \text{ nm}$  とし、スロット層厚  $h_{\text{sl}}$  を  $10 \text{ nm}$ 、スロット上下の  $\text{Nb}_2\text{O}_5$  層厚  $h_c$  を  $400 \text{ nm}$ 、プレーナ層厚  $h_{\text{pl}}$  を  $100 \text{ nm}$  で固定とした(リブ形はリブ高さ  $h_{\text{rib}}$  を  $700 \text{ nm}$ )。メッシュサイズは断面の X 方向を  $5.0 \text{ nm}$ 、Y 方向を  $2.5 \text{ nm}$ 、伝搬方向には  $150 \text{ nm}$  とし、解析領域は導波路から  $+1 \mu\text{m}$  広げた範囲とした。FDTD の時間軸条件は定常解までの解析とした。図 3.15 に曲率半径に対する損失の変化、図 3.16 に定常状態の電界分布を示す。

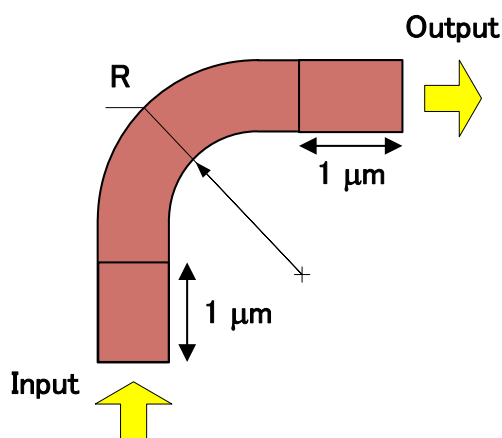


図 3.14. 曲線導波路の解析モデル

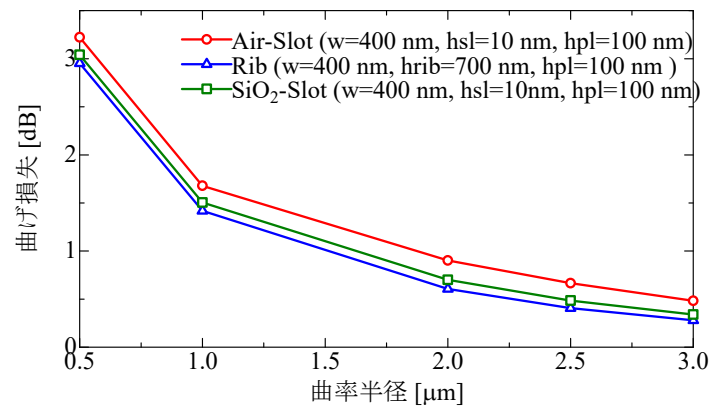
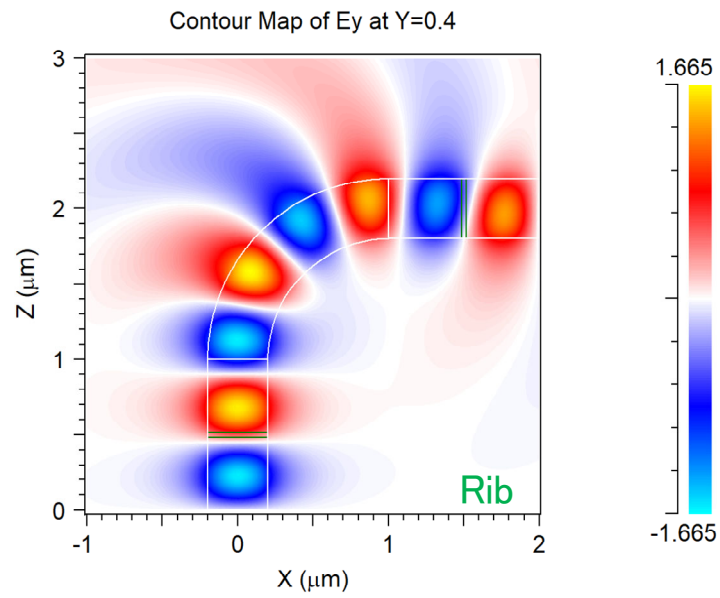
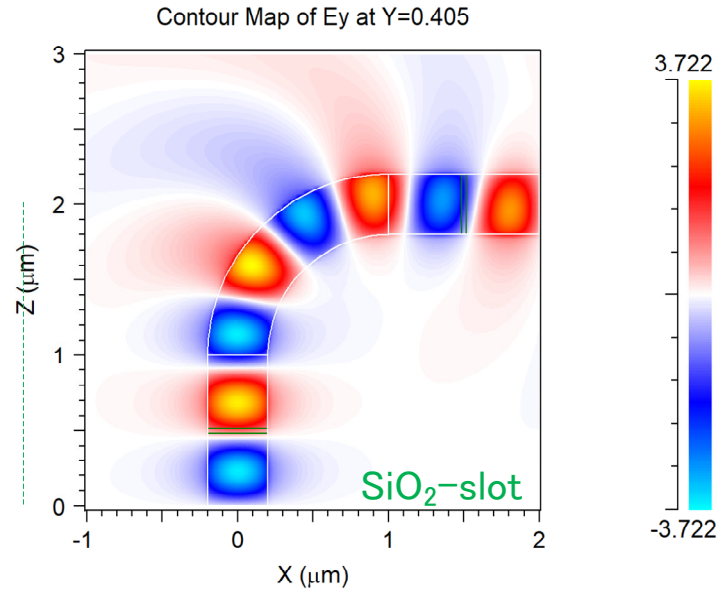


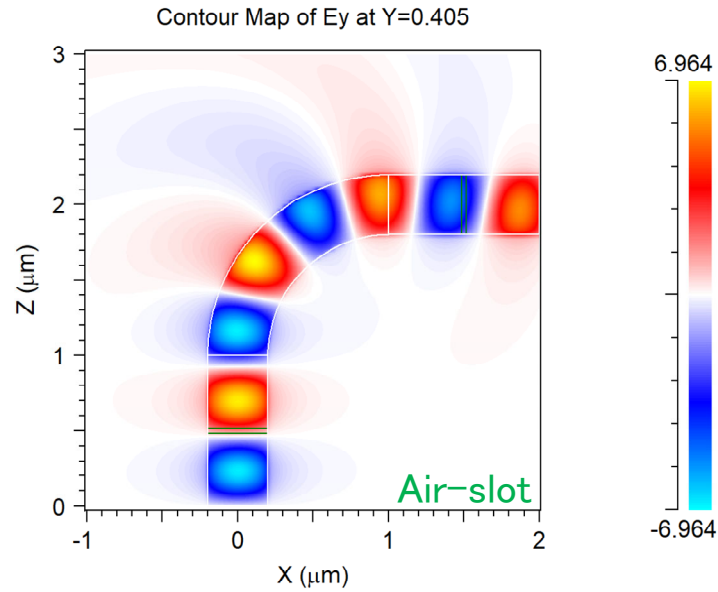
図 3.15. 曲げ損失



(a). リブ形



(b). SiO<sub>2</sub>-Slot



(c). Air-Slot

図 3.16. 定常状態の  $E_y$  電界分布

Air-Slot 構造、SiO<sub>2</sub>-Slot 構造で  $R = 3 \mu\text{m}$  の時、曲げ損失はそれぞれ 0.482 dB、0.339 dB であった。一方、リブ形の  $R = 3 \mu\text{m}$  は 0.280 dB であり、水平スロット導波路の方が曲げ損失が大きい。これは水平スロット導波路のスロット領域が上下方向に強い閉じ込めを有する構造であるが、横方向には高屈折率媒質が存在しないことから上下方向よりも閉じ込めが弱く、曲線部では放射が大きくなるためであると考えられる。リブ形を曲線部で用いることで最も低い曲げ損失を

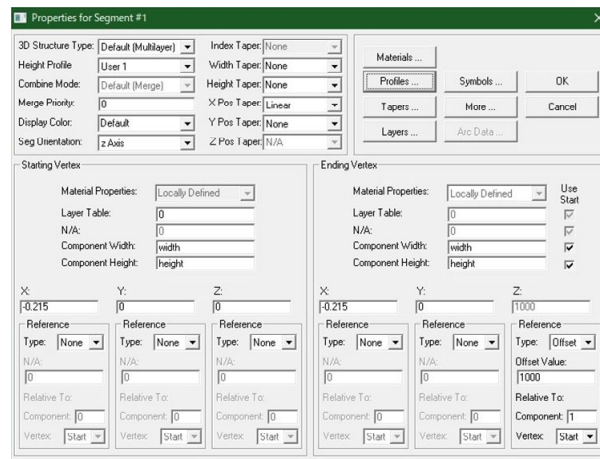
実現できるが、本研究のセンサとしては  $\text{SiO}_2\text{-Slot}$  が適していると考えられる。理由としては、 $\text{SiO}_2\text{-Slot}$  とリブ形を比較すると曲げ損失の差は小さく、3.2.6 項で解析した結合損失がリブ形と比較して低くできるからである。また 4 章で述べる、製作プロセス上も工程の短縮ができるからである。

一方、放射が大きいことを利用して、短い距離で所望の結合率を得られる方向性結合器を実現できると考えられ、水平スロット導波路の曲線導波路は用途によっては有効な手段である。

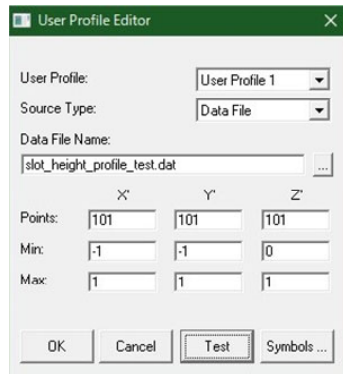
### 3.2.8. 導波路側壁角度の影響

本研究の水平スロット導波路は  $1\text{ }\mu\text{m}$  近くの高さのディープブリッジ構造である。このため素子製作時のドライエッチングによって、非垂直な導波路側壁が形成されやすい。ここでは FemSIM を用いて、導波路側壁が垂直でない条件下でのシミュレーション方法の検討と解析を行った。

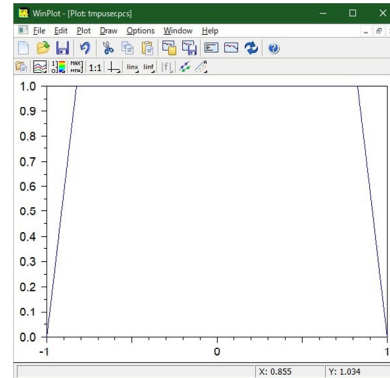
方法としては RsoftCAD 上の Properties for Segment #XX(図 3.17a)から Height Profile を Default(Step)から任意の形状に設定する。形状の指定は Profiles...ボタンから設定可能で、任意の関数またはデータファイルを選択することができる(図 3.17b)。データファイルは図 3.17c のように X:  $\pm 1.0$ 、Y:  $0\text{-}1.0$  の範囲で指定するようになっており、実際の形状は別で与えた導波路形状にフィッティングされる。



(a). Properties for Segment #XX



(b). User Profile Editor



(c). Height Profile

図 3.17. RsoftCAD 設定

図 3.18 に解析モデルを示す。データファイルの記述は X:  $\pm 1.0$ 、Y:  $0-1.0$  の範囲で行うため実際の導波路形状に拡大・縮小されることを考慮して記述する必要がある。任意の角度を指定するために、図 3.18 のように導波路側壁を斜辺とする直角三角形を考える。

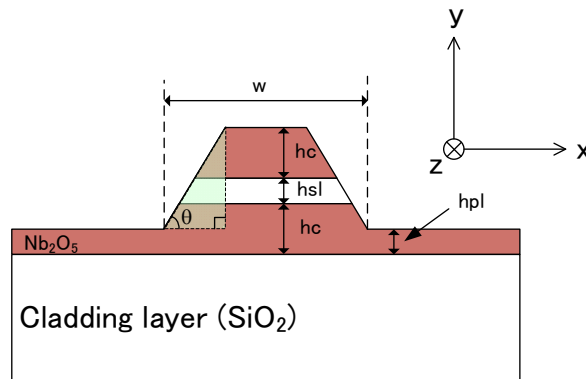


図 3.18. 導波路側壁角度の解析モデル

まず実際の導波路とデータファイルの比率は式 3.10、3.11 で与えられる。

$$x \text{ 方向: } gx = \frac{w}{2.0} \cdot \cdot \cdot (3.10)$$

$$y \text{ 方向: } gy = \frac{2hc + hsl - hsp}{1.0} \cdot \cdot \cdot (3.11)$$

実際の導波路モデルの三角形の x、y の長さはそれぞれ式 3.12、3.13 で与えられる。

$$x \text{ 方向: } x = \frac{y}{\tan \theta} \cdot \cdot \cdot (3.12)$$

$$y \text{ 方向: } y = 2hc + hsl - hsp \cdot \cdot \cdot (3.13)$$

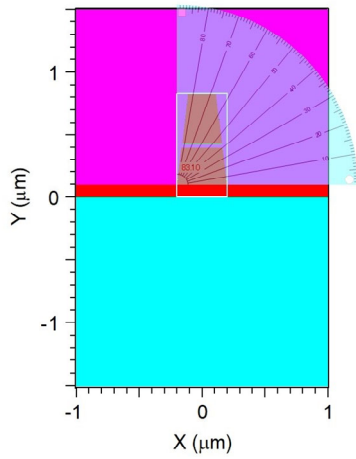
データファイルへ記述する際に必要な三角形の X,Y の長さはそれぞれ式 3.14、3.15 で与えられる。

$$x \text{ 方向: } X = 1 - \left( x \times \frac{1}{gx} \right) \cdot \cdot \cdot (3.14)$$

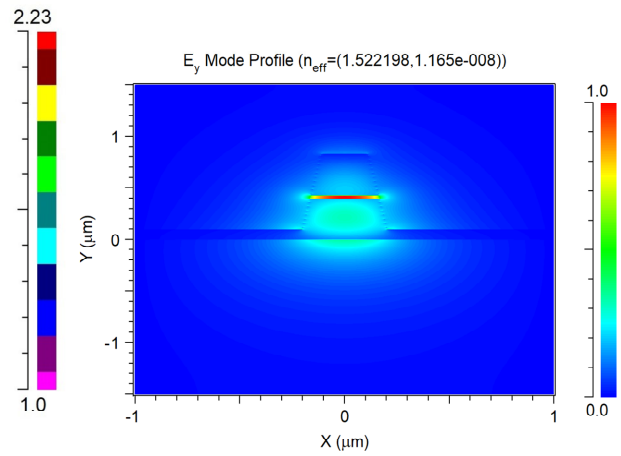
$$y \text{ 方向: } Y = y \times \frac{1}{gy} \cdot \cdot \cdot (3.15)$$

例として  $w = 400 \text{ nm}$ 、 $h_c = 400 \text{ nm}$ 、 $h_{sl} = 30 \text{ nm}$ 、 $\theta = 83 \text{ deg.}$  とした場合、 $X = 0.551836353$ 、 $Y = 1.00$  となり、図 3.19a のような解析モデルとなる。またこの時の FemSIM の解析結果は図 3.19b のようになる。

Contour Map of Transverse Index Profile at Z=0



(a). 解析モデル



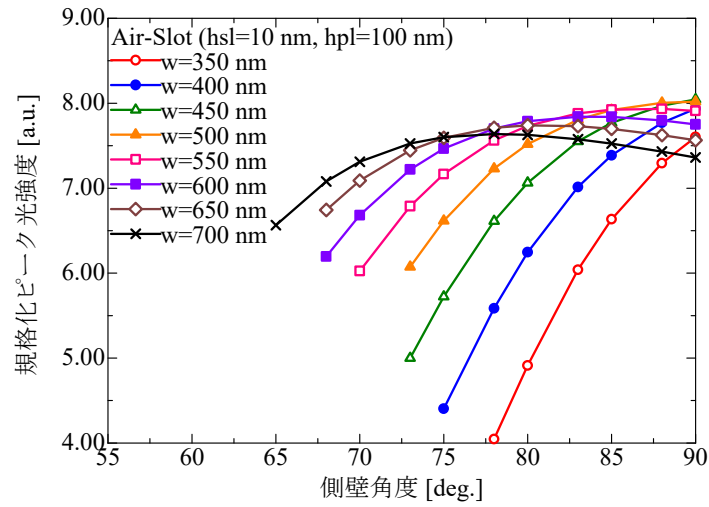
(b). FemSIM 解析結果

図 3.19. 非垂直側壁導波路の解析例

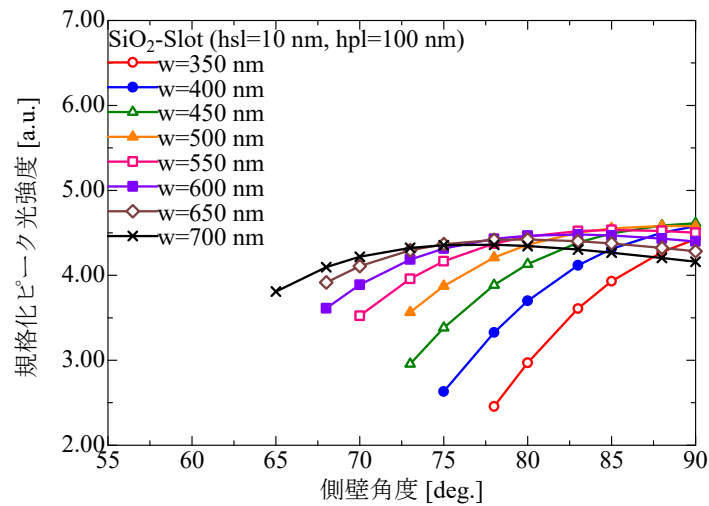
ここで  $h_{sl}$  を  $10 \text{ nm}$ 、 $h_{pl}$  を  $100 \text{ nm}$  に固定し側壁の角度を変化させながらピーク強度の解析を行った。図 3.20 に解析結果を示す。導波路形状は  $\text{CF}_4 : \text{O}_2$  ガスでエッチングした場合を想定して導波路下部で設計線幅となるように CAD 図を描いている(2 倍の X 値を CAD 上の導波路幅に加えれば導波路上部で設計線幅になる場合も解析できると考えられる)。ピーク強度の算出は xy 軸の正規化を行ったうえで、ピーク座標を探し、その値をプロットしてある。 $w = 350\text{-}500 \text{ nm}$  の区間において、Air-Slot、 $\text{SiO}_2$ -Slot とともに側壁角度が低くなるのに従ってピーク強度は低下している。ピーク強度の変化量は  $\text{SiO}_2$  Slot の方が緩やかである。一方、 $w = 550\text{-}700 \text{ nm}$  の線幅は Air Slot、 $\text{SiO}_2$  Slot のどちらも、側壁角度  $90 \text{ deg.}$  でピーク強度が最大とならず、最大値となる角度が低い角度に変化している。これは太い導波路幅と細い導波路幅でのモード分布の違いによるもので、同じ導波路側壁角度の場合でも導波路幅によって下部  $\text{Nb}_2\text{O}_5$  層の線幅と上部の  $\text{Nb}_2\text{O}_5$  層の線幅の比率が異なるため、スロットへの光の閉じ込めが変化したため



であると考えられる。



(a). Air-Slot



(b). SiO<sub>2</sub>-Slot

図 3.20. ピーク強度の側壁角度依存性

### 3.2.9. スロット位置依存性

水平スロット導波路構造はスロット上下の高屈折率媒質層の厚さを変化させることで導波路断面のスロットの位置を任意に設定できる。スロットの位置による光強度分布の変化の解析を行った。水平スロット導波路の構造パラメータは導波路幅  $w$  を 400 nm、プレーナ層厚  $h_{pl}$  を 100 nm、スロット層厚を 30 nm、2つの高屈折率媒質の層厚は合計が 800 nm となるようにし、下部クラッドとの界面からスロットの中央位置  $h_{sp}$  を可変とした。図 3.21 に  $h_{sp} = 315$  nm の TM-mode

の光強度分布( $E_y$  成分)を示す。また図 3.22 に  $X = 0$  位置の規格化断面光強度分布を示す。

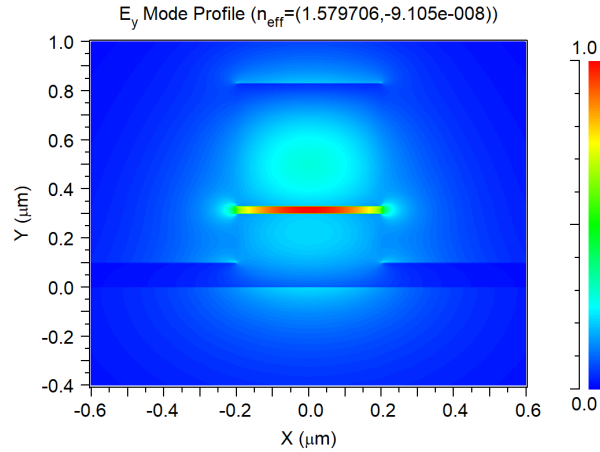


図 3.21.  $hsp = 315$  nm の光強度分布

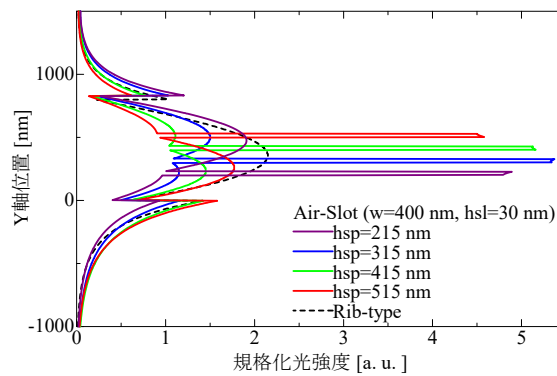


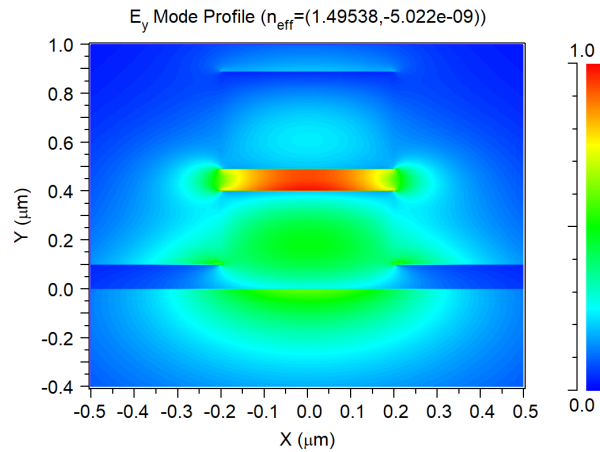
図 3.22. 断面規格化光強度分布

図 3.22 に示した導波路断面内の光パワーで規格化した解析結果よりスロット位置によってスロット内に局在する光強度が変化していることがわかる。各スロット位置による光強度が最大となる位置は、スロットのないリブ形導波路の光強度が最大となる位置とほぼ一致している。

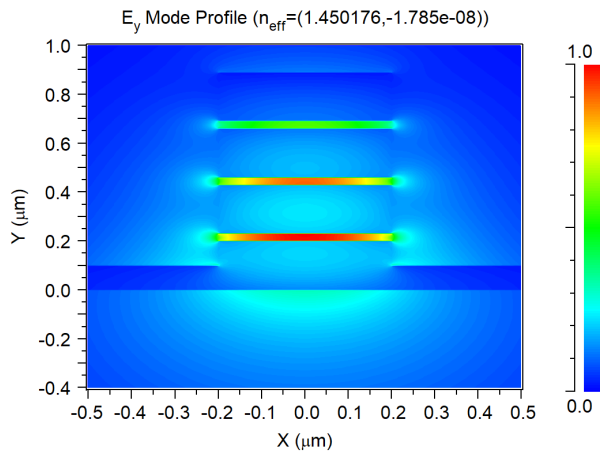
### 3.2.10. 多層スロット

3.2.4 項で述べた、スロット層厚と等価屈折率の関係性はスロット層厚が厚くなるに従い、等価屈折率の値は低くなる傾向にあるという結果であった。これは、スロット層厚が厚くなるのに従い、光が局在する低屈折率媒質の領域の割合が多くなるためである。水平スロット導波路は 1 つの導波路断面に 1 つのスロット層を有する構造の他に、1 つの導波路断面に複数のスロット層を有する構造が提案されている[48]。ここでは 1 つの厚いスロット層を有する構造と合計の厚さが

等しい、3 つの薄いスロット層を有する多層スロットの等価屈折率を比較した。FEM 法によって計算した、それぞれの構造の光強度分布を図 3.23 に示す。ここで構造パラメータは単一スロットの場合、 $w = 400 \text{ nm}$ 、 $h_{sl} = 90 \text{ nm}$ 、 $h_{pl} = 100 \text{ nm}$ 、3 スロットの場合は  $h_{sl} = 30 \text{ nm}$  を 3 層としている。またスロット内及び、上部クラッドは Air である。



(a). 単一スロット



(b). 3 スロット

図 3.23. 光強度分布

計算によって見積もられた等価屈折率はそれぞれ、単一スロットでは 1.495、3 スロットでは 1.450 であった。2 つの値はほぼ一致していることが分かる。また等価屈折率が完全に一致しないのは、3 スロット構造のスロット位置により、電界強度の積分値が異なるためであると考えられる。

### 3.2.11. 縦スロット導波路との比較

ここでは、水平スロット導波路との比較のため、縦スロット導波路の特性つい

て、解析を行った。図 3.24 は縦スロット導波路の断面解析モデルである。また比較は Air-Slot 構造について行った。

図 3.25 は  $w = 400 \text{ nm}$ 、 $h_{sl}(w_{sl}) = 30 \text{ nm}$  の場合のピーク強度のプレーナ層厚依存性を示している。水平スロット導波路は同一のスロット層厚、プレーナ層厚において、縦スロット導波路よりも高いピーク強度が得られることがわかる。ピーク強度に関しては水平スロット導波路の場合、大きく変化しておらず、影響度は少ない。一方、縦スロット導波路ではピーク強度の変化に関しては水平スロット導波路よりも影響が大きい。

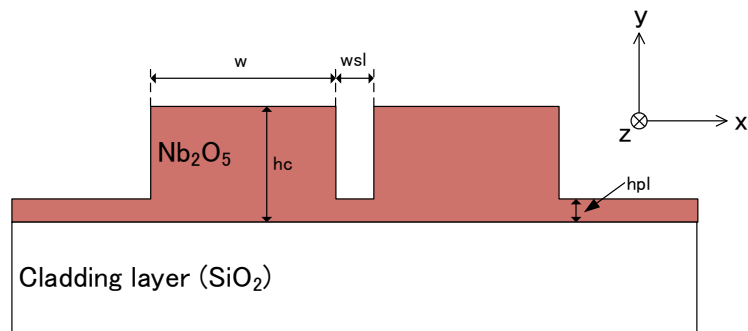


図 3.24. 縦スロット導波路の断面解析モデル

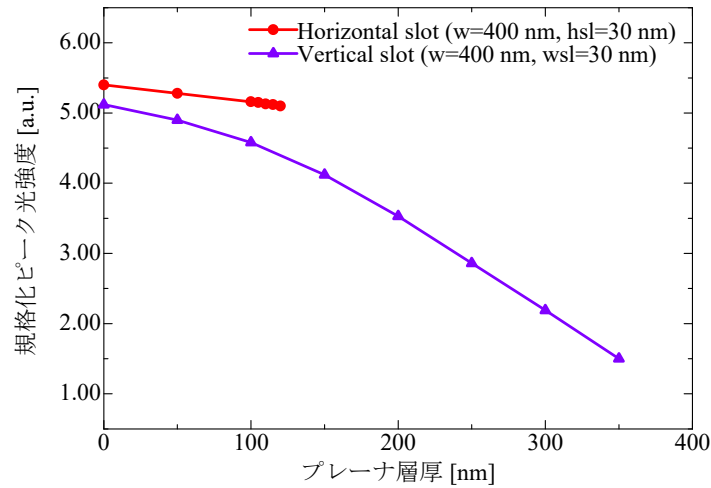


図 3.25. ピーク強度のプレーナ層厚依存性

図 3.26 はスロット層厚(スロット幅)とピーク強度の依存性を示している。解析したパラメータ範囲においては水平スロット導波路と縦スロット導波路の傾向は同じで、広いスロットとなるほど、ピーク強度が小さくなる。またピークの値自体は、水平スロット導波路の方が若干高い。

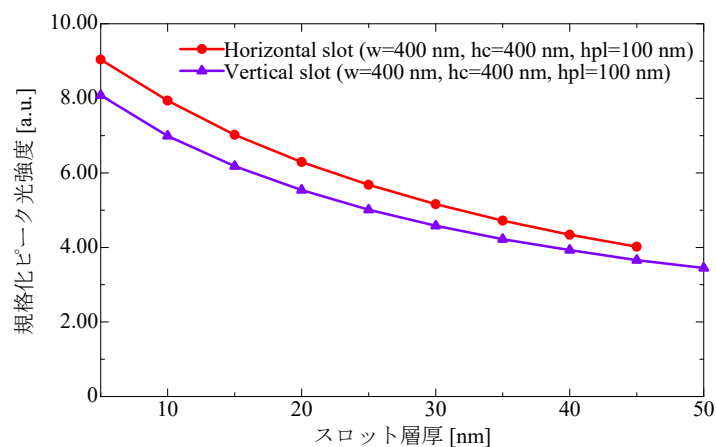
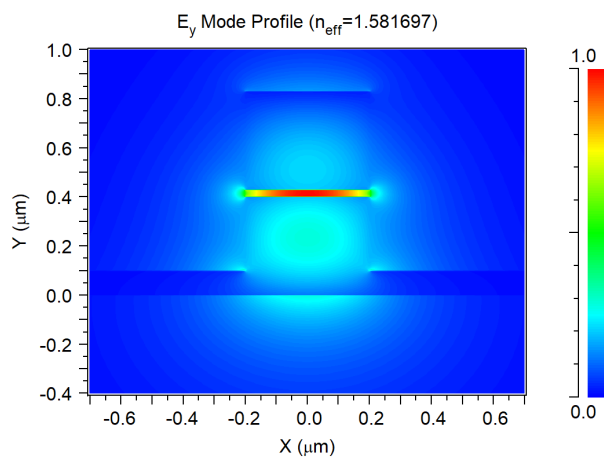
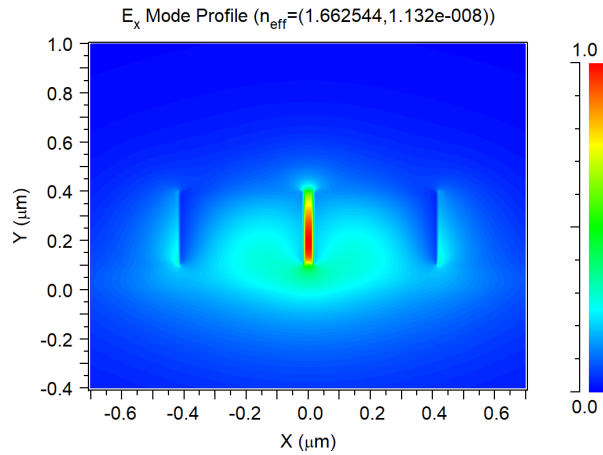


図 3.26. ピーク強度のスロット層厚(スロット幅)依存性

水平スロット導波路と縦スロット導波路では動作する偏波が異なる。図 3.27a は水平スロット導波路の TM-mode、 $E_y$  成分の光強度分布である。また図 3.27b は縦スロット導波路の TE-mode、 $E_x$  成分の光強度分布である。光強度が最も高くなる位置は水平スロット導波路ではスロットの左右が同一の媒質であるため、スロットの中央に位置する。一方、縦スロット導波路はスロットの下部が  $\text{Nb}_2\text{O}_5$  のプレーナ層であるため、スロットの中央部よりも下方に寄っていることがわかる。



(a). 水平スロット導波路



(b). 縦スロット導波路

図 3.27. 光強度分布の比較

縦スロット導波路の導波路側壁角度とピーク強度の依存性について解析を行った。縦スロット導波路の解析モデルを図 3.28、側壁角度が  $83^\circ$  の時の光強度分布を図 3.29、ピーク強度と側壁角度の依存性を図 3.30 に示す。解析した範囲においては水平スロット導波路のピーク強度が縦スロット導波路のピーク強度よりも大きいことがわかる。縦スロット導波路の光強度分布は下部に集中している。これは側壁角度が低くなるにつれて、導波路の上部の等価屈折率が低くなるためである。縦スロット導波路は非垂直な導波路側壁により、スロット領域の下部に電界分布が集中することから、水平スロットよりもスロットの底面や側壁のラフネスの影響を受けやすいと考えられる。

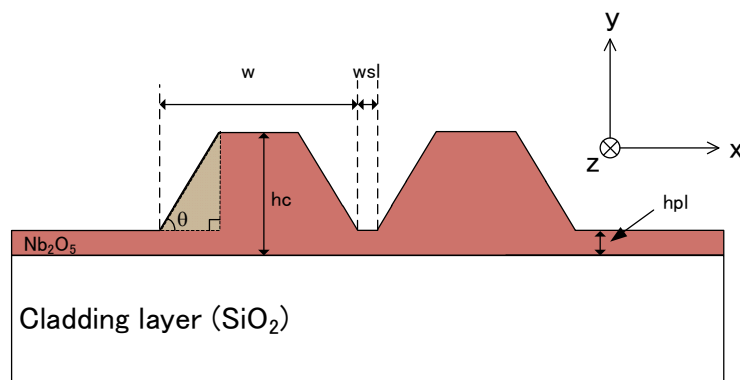


図 3.28. 縦スロット導波路の非垂直側壁解析モデル

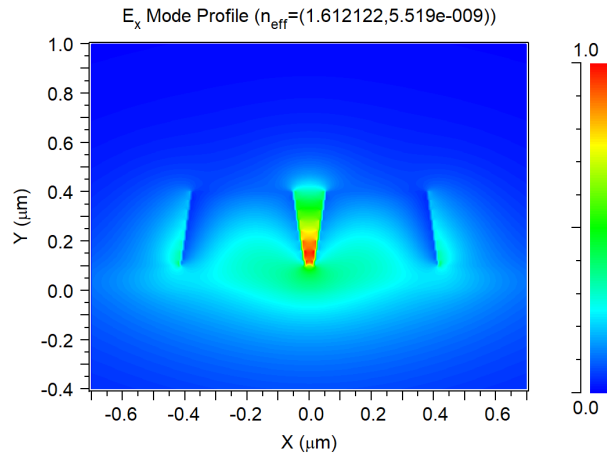


図 3.29. 側壁角度 83deg. の縦スロット導波路の光強度分布

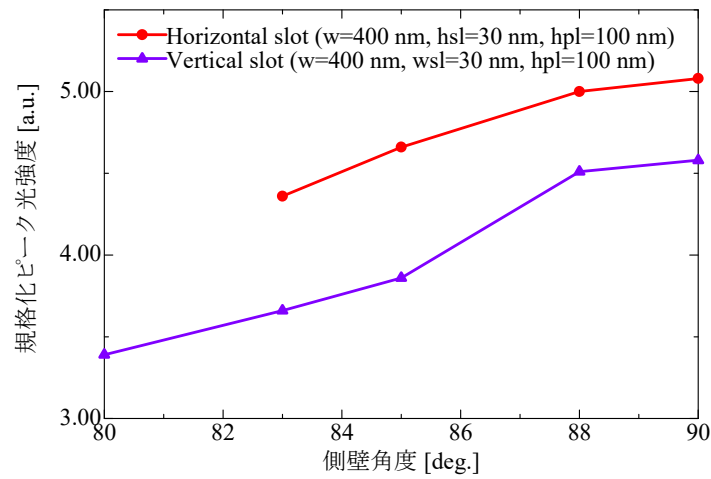


図 3.30. ピーク強度の側壁角度依存性

### 3.2.12. まとめ

ここまでの、基本特性の解析において分かったことを、以下にまとめる。後に述べる、素子製作では以下の観点を考慮して、表 3.6 にまとめる構造パラメータを用いて、Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 水平スロット導波路の製作・評価を行う。

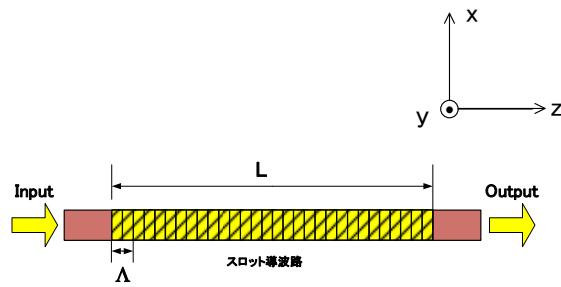
- ◆ 光ピーク強度: リブ形導波路に対し 3.7 倍高い(Air-Slot の場合)
- ◆ スロット層厚: 薄いほど高いピーク強度が得られる
- ◆ 導波路幅:  $w = 400 \sim 500$  nm 程度で高いピーク強度が得られる
- ◆ 導波路側壁角度: 垂直性が高いほど高いピーク強度が得られる
- ◆ Air-Slot の支持構造: 結合損失、曲げ損失の少ない SiO<sub>2</sub>-Slot が適する

表 3.6. Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 水平スロット導波路の構造パラメータ

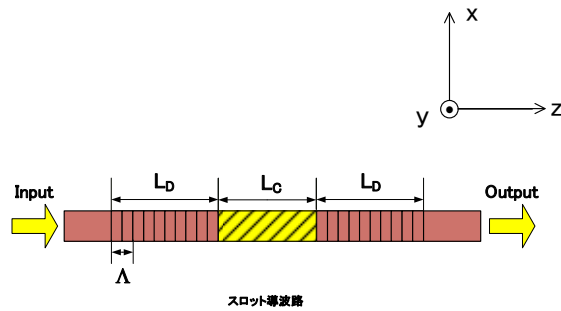
	構造パラメータ [nm]
導波路幅 $w$	400~500
高屈折率媒質層厚 $h_c$	400
スロット層厚 $h_{sl}$	20~30
プレーナ層厚 $h_{pl}$	100

### 3.3. 屈折率センサのための導波路構造

Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 水平スロット導波路を用いたセンサとしてスロット導波路と組み合わせる導波路構造の検討を行う。まず手がかりとして Grating 導波路、DBR 共振器(DBR: Distributed Bragg Reflector)、MRR(Micro Ring Resonator)、非対称 MZI(A-MZI: Asymmetric Mach-Zhender Interferometer)の 4 種類を検討した。図 3.31 にそれぞれの構造の構造図と表 3.7 に設計パラメータを示す。

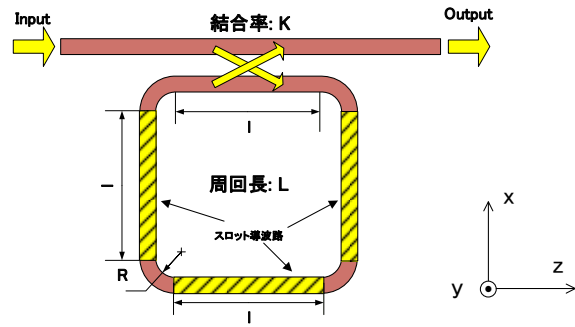


(a). Grating

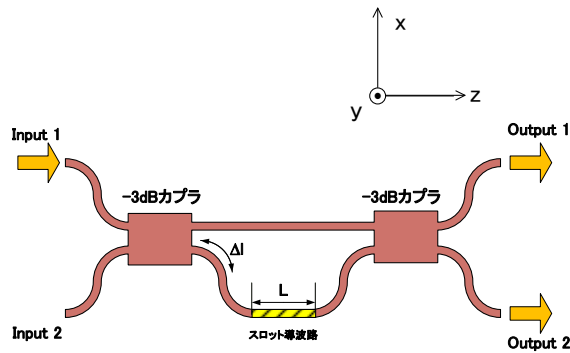


(b). DBR 共振器





(c). MRR



(d). A-MZI

図 3.31. 構造図

表 3.7. 構造パラメータ

Grating		DBR		MRR		A-MZI	
L [ $\mu\text{m}$ ]	150	L <sub>C</sub> [ $\mu\text{m}$ ]	150	l [ $\mu\text{m}$ ]	50	L [ $\mu\text{m}$ ]	150
$\Lambda$ [nm]	461	L <sub>D</sub> [ $\mu\text{m}$ ]	175	R [ $\mu\text{m}$ ]	6	$\Delta L$ [ $\mu\text{m}$ ]	268
H <sub>D</sub> [nm]	50	$\Lambda$ [nm]	434	L [ $\mu\text{m}$ ]	238		
$\kappa$ [ $\text{cm}^{-1}$ ]	146.65	$\lambda_B$ [nm]	1550	K (電界)	0.15		
		H <sub>D</sub> [nm]	50				
		$\kappa$ [ $\text{cm}^{-1}$ ]	146.65				

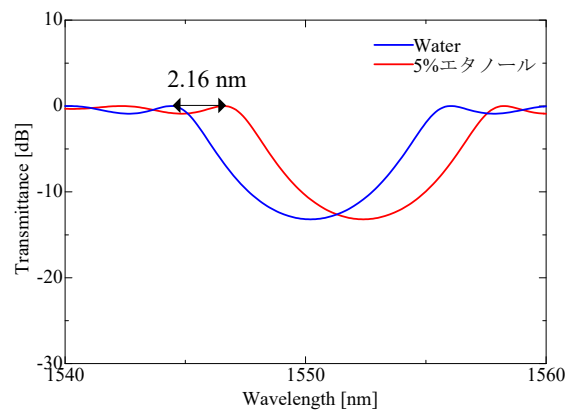
共通項としてセンサ部となる水平スロット導波路(Air-Slot)長が合計で  $150 \mu\text{m}$  とし、そのほかの部分のリブ形導波路となるように設計を行った。これらのパラメータをもとに、理論波長特性の計算を行った。理論解析は液体濃度センサを想定して、スロット内部が水( $n = 1.33$ )で充填された状態からエタノールが滴下され、濃度変化が起こった場合とし、それぞれの等価屈折率における波長特性を計算している。ここでエタノールの濃度に対する屈折率の変化は  $\Delta n = 1.34 \times 10^{-3} [RIU/wt \%]$  [99] として与えられている。導波路の構造パラメータは次の表 3.8 に示す。TM-mode の等価屈折率は FEM 法より、スロット内及び上部クラッドが水(エタノール 0 %)で満た

されている場合で 1.69999、スロット内および上部クラッドが 5%のエタノール水溶液で満たされた場合で 1.702392( $\Delta n = 0.002402$ )と見積もられた。一方、リブ形では上部クラッドが水の場合では 1.766214、5 %エタノールの場合では 1.767518( $\Delta n = 0.001304$ )と見積もられた。Grating 導波路はスロット導波路上に Grating 構造を設けるため、センサ部分の等価屈折率が異なり、スロット内及び上部クラッドが水(エタノール 0 %)で満たされている場合で 1.681319、スロット内および上部クラッドが 5%のエタノール水溶液で満たされた場合で 1.683679 ( $\Delta n = 0.00236$ )である。

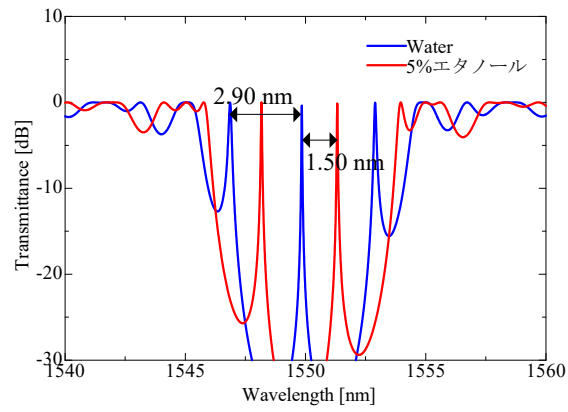
計算によりもとめた理論波長特性を図 3.32 に、それぞれの計算結果を表 3.9 に示す。エタノールの濃度変化に対する波長特性のシフト量は Grating で 2.18 nm、DBR 共振器で 1.50 nm、MRR で 1.79 nm、A-MZI で 1.12 nm と見積もられた。シフト量は Grating が最も大きく得られることがわかる。また FSR に対するシフト量の割合を計算すると DBR 共振器で 51.7 %、MRR で 30.8 %、A-MZI で 22.4 %であった。もっとも割合が大きく、変化が分かりやすいのは DBR 共振器である。また波長シフト量が最も大きいのは Grating であるが、共振器構造の工夫などで、感度を高められる、MRR もセンサのための導波路構造として適していると言える。

表 3.8. 導波路構造パラメータ

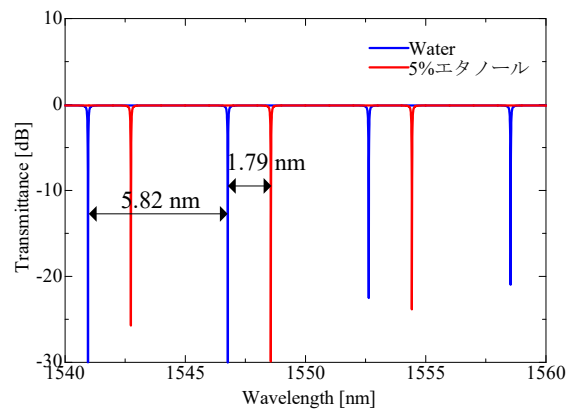
w [nm]	400
hrib [nm]	700
hsl [nm]	30
hc [nm]	400
hpl [nm]	100



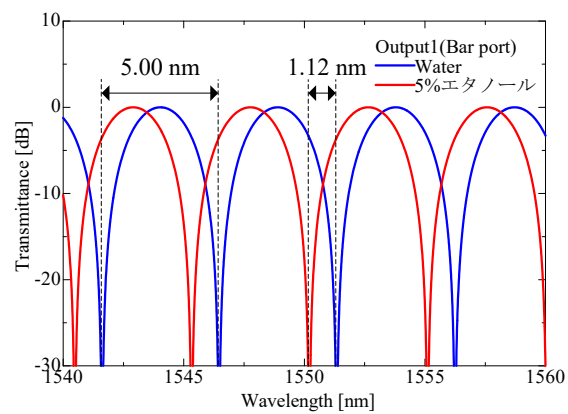
(a). Grating



(b). DBR 共振器



(c). MRR



(d). A-MZI

図 3.32. 理論波長特性

表 3.9. 計算結果

	Grating	DBR	MRR	A-MZI
FSR [nm]	-	2.90	5.82	5.00
Q-factor	-	15499	34374	644
波長シフト量 [nm]	2.18	1.50	1.79	1.12
FSR に対する割合 [%]	-	51.7	30.8	22.4
エタノール濃度に対する波長シフト [pm/wt%]	435	300	358	224

### 3.4. ガスセンサとしての理論動作

本項では水平スロット導波路センサをガスセンサとして応用した場合の理論特性を検討した。検知対象ガスとしては水素を想定している。光学式センサは検知対象物質の屈折率変化をセンシングするが、気体の屈折率変化は 3.3 項のエタノールの屈折率変化と比較して、非常に小さく、純水素の場合、1.000139[100]である。したがって、真空の屈折率 1.000000 からの変化量はわずか 0.000139 である。

はじめに、単純な Grating 導波路の波長特性を計算した。Grating 導波路の構造図と構造パラメータを図 3.33 と表 3.10～3.11 に示す。

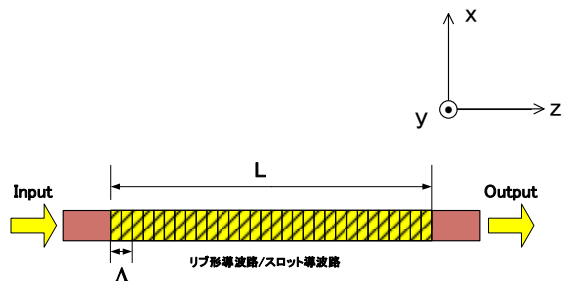


図 3.33. Grating 導波路の構造(上面図)

表 3.10. 構造パラメータ(リブ)

Grating 構造		導波路断面構造	
L [ $\mu\text{m}$ ]	150	w [nm]	400
$\Lambda$ [nm]	459	hrrib [nm]	700
$H_D$ [nm]	50	hpl [nm]	100
$\kappa$ [ $\text{cm}^{-1}$ ]	146.65		

表 3.11. 構造パラメータ(水平スロット)

Grating 構造		導波路断面構造	
L [ $\mu\text{m}$ ]	150	w [nm]	400
$\Lambda$ [nm]	497	hsl [nm]	30
H <sub>D</sub> [nm]	50	hc [nm]	400
$\kappa$ [ $\text{cm}^{-1}$ ]	146.65	hpl [nm]	100

導波路断面構造は比較のため、リブ形、水平スロットの 2 種類とした。また、Grating 周期 $\Lambda$ は真空の時に Bragg 波長が 1550 nm となるように設定した。FEM 法を用いて求めた等価屈折率はリブ形の真空と 100% $\text{H}_2$ でそれぞれ、1.689239264、1.689281344、水平スロットの真空と 100% $\text{H}_2$ でそれぞれ、1.560303092、1.560349822 であった。計算により求めた理論波長特性を図 3.34～3.35 に示す。

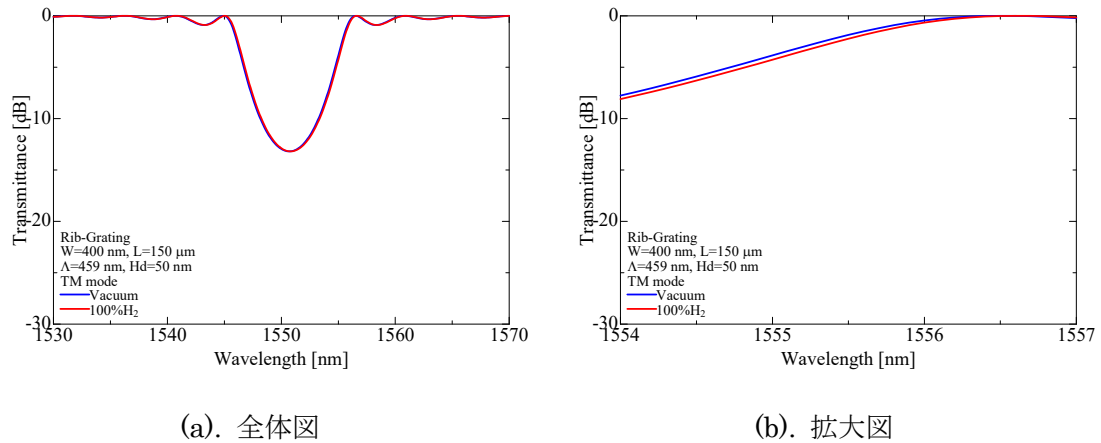


図 3.34. 理論波長特性(リブ)

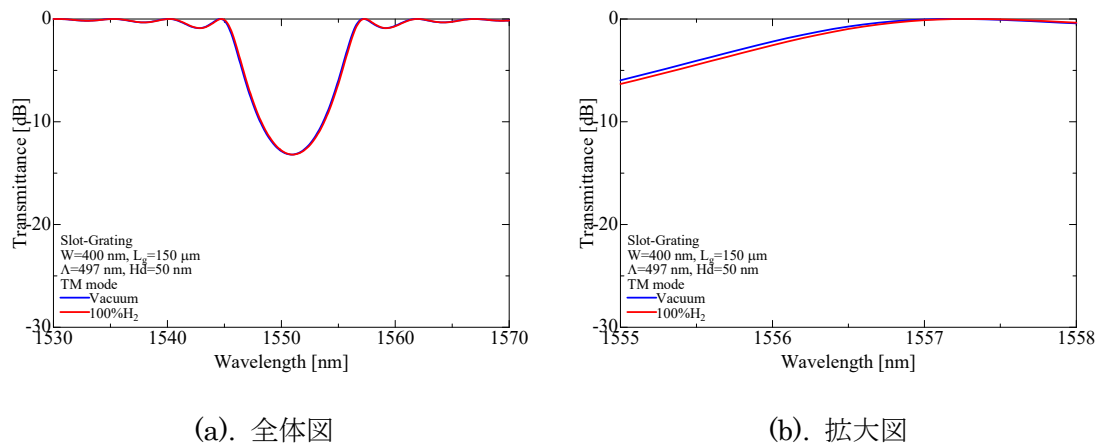


図 3.35. 理論波長特性(水平スロット)

計算により求めた、Bragg 波長のシフト量はリブ形で 38.6 pm、水平スロットで

46.4 pm であった。リブ形から水平スロットにすることにより、シフト量が 20%程度増大したが、シフト量は小さく、現実的ではない。

次に、波長シフト量を共振器長で稼げる DBR 共振器を用いて、同様の検討を行った。図 3.36 に示す導波路構造の Grating 部分はリブ形、共振器部分は水平スロットとし、 $L_c$  を  $150\text{ }\mu\text{m}$  と  $1500\text{ }\mu\text{m}$  に変化させ、波長特性を求めた。理論波長特性を図 3.37～3.38 に示す。

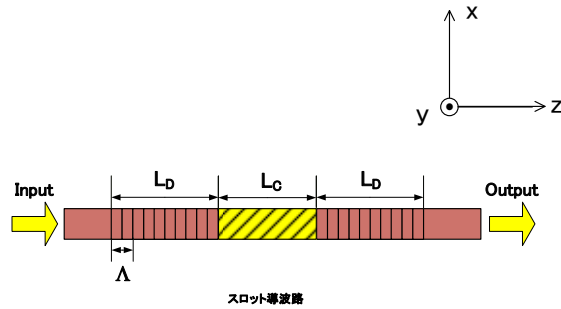


図 3.36. DBR 共振器の構造(上面図)

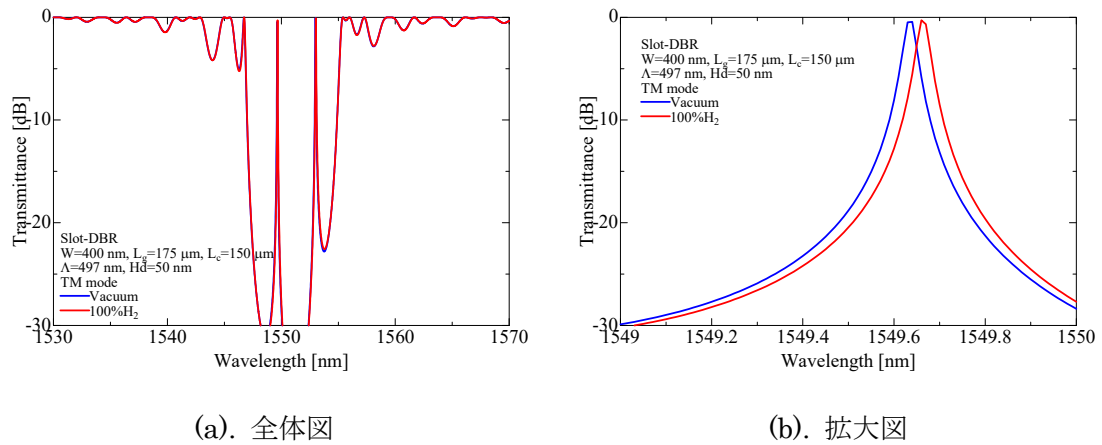


図 3.37. 理論波長特性( $L_c = 150\text{ }\mu\text{m}$ )

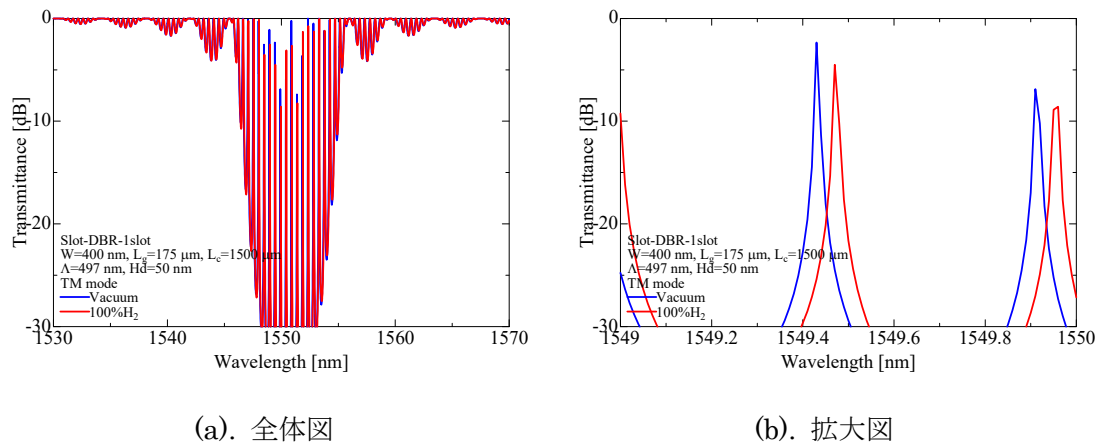


図 3.38. 理論波長特性( $L_c = 1500\text{ }\mu\text{m}$ )

阻止帯域内の透過帯域のシフト量は  $L_c = 150 \mu\text{m}$  の時  $25 \text{ pm}$ 、 $L_c = 1500 \mu\text{m}$  の時  $50 \text{ pm}$  であった。また  $L_c$  が長くなることにより、透過帯域の間隔が狭くなっている。DBR 共振器の共振器長を長くすることで、波長シフト量を増大させることができる。一方、共振器長が長くなると、透過帯域の間隔が狭くなるため、複合共振器などによる波長特性の工夫が必要である。また、 $1500 \mu\text{m}$  の共振器長の場合にも波長シフト量は  $50 \text{ pm}$  程度であるため、3.3 項で述べたエタノールの場合のような数  $\text{nm}$  の波長シフト量を得るには、さらに長い共振器長が必要である。

### 3.5. Grating 導波路の設計

本研究の水平スロット導波路をセンサとして応用する場合や、 $\text{SiO}_2\text{-Slot}$  構造から  $\text{Air-Slot}$  構造を製作した場合に、その屈折率変化を波長特性の変化として検出する導波路構造を設ける。ここでは、単純な均一の **Grating** の計算を行った。本研究の **Grating** は導波路の側壁に周期的な凹凸を有する **Vertical Grating(VG)** である。VG は導波路形成と同時に **Grating** を形成することができ、プロセスを短縮できる。一方、導波路と同時に周期構造をパターンニングするため、導波路のパターンニングに EB 描画が必要である。**Grating** の設計は凹凸による屈折率変化によって阻止帯域が決定するため、レリーフ形と同様に **Bragg** の式により周期が決定する。一方、**Grating** の結合係数  $\kappa$  の見積もりは 1 次元スラブ構造をベースとした摂動法[101-102]で見込んでいるため、モード・プロファイルに偏りのあるスロット導波路では、そのモード・プロファイルを考慮できないが目安となる。実際の構造を解析するには **FDTD** の **Pulse** 解析を行う必要がある。

設計に用いる等価屈折率は **FEM** 法を用いて計算した。 $w = 400 \text{ nm}$  の  $\text{SiO}_2\text{-Slot}$  と  $\text{Air-Slot}$  の **Grating** 部の等価屈折率はそれぞれ、 $1.644768476$ 、 $1.569048047$  と見積もられた。結合係数  $\kappa$  は摂動法を用いて見積もり、**Grating** 深さ  $d$  が  $20 \text{ nm}$ 、 $40 \text{ nm}$  の時にそれぞれ  $103.32$ 、 $207.3 \text{ cm}^{-1}$  であった。**Grating** の周期は電子線描画装置(**EBX: Electron Beam Exposure**)の分解能の制限を受ける。本学の **EBX** は CAD 図面上に指定した領域をフィールドサイズ変調[103-104]により、本来の分解能以上の周期制御が可能であるが、描画できるはレリーフ形であるので、用いることができず、またフィールドサイズに手動で補正值を与える方法も、フィールドサイズより大きな図形を描画する際に描画フィールド同士がつながらなくなるため、用いることができない。導波路を描画するのに用いる条件の  $20000 \text{ dot}$  での分解能は  $25 \text{ nm}$  であるので、**Grating** を描画する領域のみ分解能を  $60000 \text{ dot}$  にすることにした。 $60000 \text{ dot}$  の最小分解能は  $8.33 \text{ nm}$  なので、この整数倍となるように周期を  $475 \text{ nm}$  とした。**Duty** 比は分解能の都合上、最も **Grating** の効果を得られる  $1:1$  にすることはできないので  $29 \text{ dot}:28 \text{ dot}$  とした。波長特性は 1 次元のモード結合理論の **F-Matrix** を用いて計算した。VG の上面図を図 3.39 に、理論波長特性を図 3.40

に示す。Bragg 波長は SiO<sub>2</sub>-Slot、Air-Slot、リブ形でそれぞれ 1562、1490、1614 nm と見積もられた。

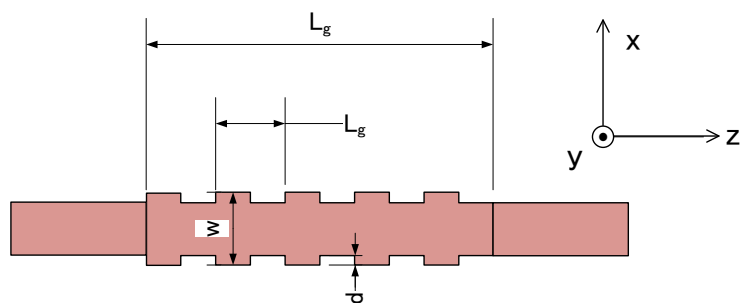
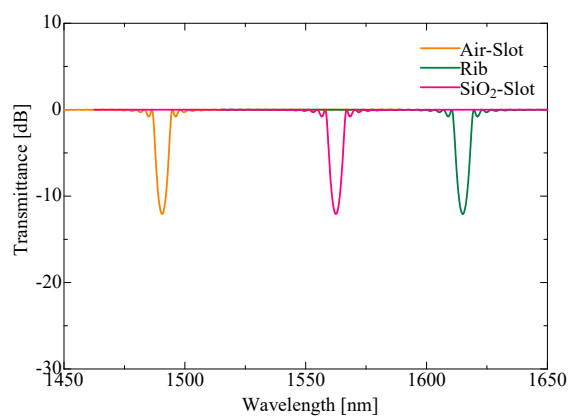
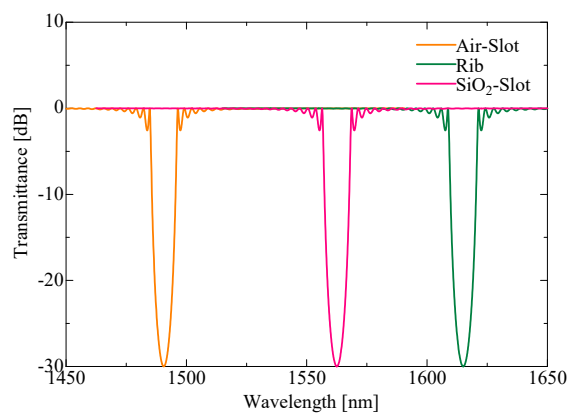


図 3.39. Grating 構造図



(a). Grating 深さ: 20 nm



(b). Grating 深さ: 40 nm

図 3.40. 理論波長特性



## 第4章 水平スロット導波路の製作

第4章では水平スロット導波路を製作するための技術的課題とその解決へ向けた条件検討、製作プロセスと試作素子の評価について述べる。

### 4.1. 製作条件の検討

#### 4.1.1. ドライエッチング

3.2.8 項では導波路側壁の側壁角度とピーク強度の依存性を解析し、導波路側壁の垂直性がよいほど、高いピーク強度が得られる解析結果を示した。一方、本研究の水平スロット導波路は約  $1\text{ }\mu\text{m}$  の比較的深いエッチングが必要である。図 4.1 は本研究の  $\text{Nb}_2\text{O}_5$  リブ形導波路で用いられてきたドライエッチング条件 ( $\text{CF}_4:\text{Ar} = 5:5\text{ sccm}$ 、 $5\text{ Pa}$ 、 $100\text{ W}$ )を用いて本研究の水平スロット導波路を試作した際の導波路断面の SEM(Scanning Electron Microscope)写真である。パターンニングした線幅の  $300\text{ nm}$  から下部に向かって導波路が大きく広がっており、その側壁角度は  $65\text{ deg.}$  以下である。

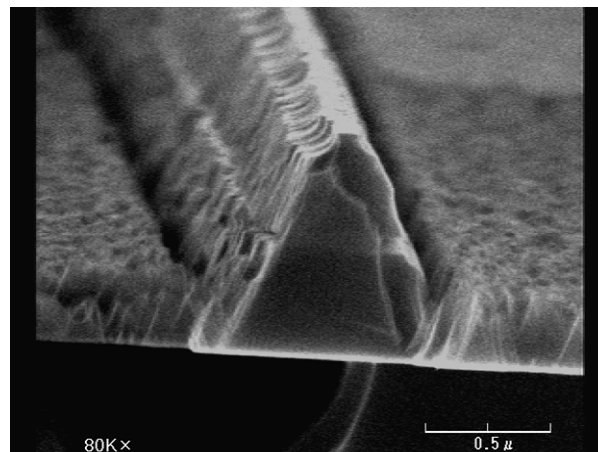


図 4.1. 従来ドライエッチング条件

そこで、この課題に対し、RIE(Reactive Ion Etching)によるドライエッチングの条件検討を行った。本学のドライエッチング装置(Anelva 製 DEM-451)の可変のパラメータとしてはガス種、ガス流量比、ガス圧、RF(Radio Frequency)パワーなどがある。これらのパラメータを変更し、導波路形状の変化を観察しながら、導波路側壁の垂直性が改善する条件を探索する。

まずドライエッチングの過程を Si のドライエッチングの過程[99-100]を例に説明すると、Si に対してはエッチングガスとしてフッ素系のガス( $\text{SF}_6$ ,  $\text{CF}_4$ ...)を用いており、これらのガスはプラズマ中で F ラジカルを生成する。生成された F ラジカルは Si と  $\text{SiFx}$  の形で反応する。これらの生成物は揮発性が高くガスフローにより排気され、エッチングが行われる。F ラジカルは化学的に反応するた

め、マスクの下にも回り込み、結果的に等方エッチングとなる。したがって、長時間のエッチング時にはマスクの線幅よりもエッチング後の線幅が細くなってしまう。ここで一般に MEMS の製作プロセスにおける Si の深堀ドライエッチングとして Bosch プロセス[106]が有名である。これはエッチングガスとして  $\text{SF}_6$  と  $\text{C}_4\text{F}_8$  ガスを用い時間的に切り替えてエッチングを行うものである。 $\text{SF}_6$  はプラズマ中で F ラジカルを生成し、 $\text{SiFx}$  の形で反応が進み Si がエッチングされる。一方  $\text{C}_4\text{F}_8$  ガスはフルオロカーボン系重合膜を生成し、Si の側壁を保護する。Bosh プロセスではこれらの反応の違いを用いて側壁の保護とエッチングを時間的に切り替えてアスペクト比の高いエッチングを実現している。Bosch プロセスの改良として  $\text{O}_2$  を時間的に切り替えて導入し、保護膜として  $\text{SiO}_2$  を生成する方法もある[106]。またこれらとは別の方法として、衝突イオンの方向性の改善できる低ガス圧エッチングや高密度プラズマを実現できる ICP-RIE(Inductive Coupled Plasma-RIE)や ECR-RIE(Electron Cyclotron Resonance-RIE)が用いられている[107]。

$\text{Nb}_2\text{O}_5$  についてはドライエッチング方法に関する文献が見つけれなかったため、エッチング過程は不明であるため、パラメータを大きく振って傾向を見ることとする。実験では Si ダミー基板を用いて、 $\text{Nb}_2\text{O}_5$  を約 800 nm 程度成膜し、その後、フォトリソにて直線導波路をパターンニング、リフトオフにて Cr マスクを得た後 25×15 mm で製作したテストピースを半分のサイズに切り出して各条件のドライエッチングを行った。図 4.2 に触針段差計の段差測定箇所、表 4.1 に RIE の条件、表 4.2 に  $\text{Nb}_2\text{O}_5$  および Cr のエッチング量、表 4.3 にエッチング後 (Cr 除去前)の導波路断面の SEM 写真を示す。今回の実験では時間短縮のため Cr の蒸着量は基板一枚ずつの測定は行わず、代表として 1 枚のみ測定した値を用いているため、Cr のエッチング量、エッチングレートについては正確な値ではなく参考値である。

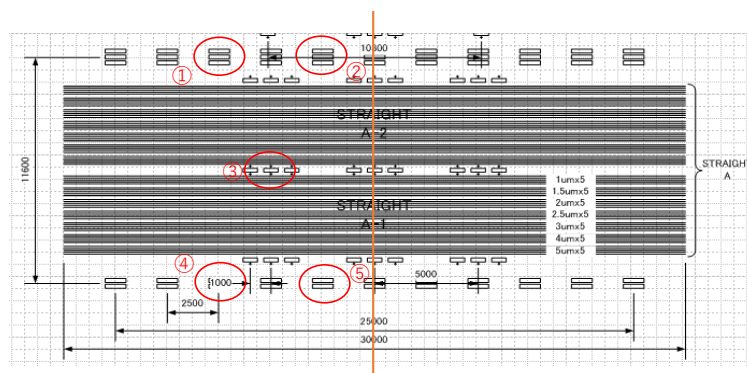


図 4.2. 触針段差計測定箇所

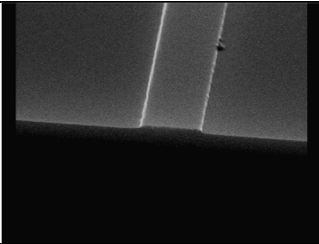
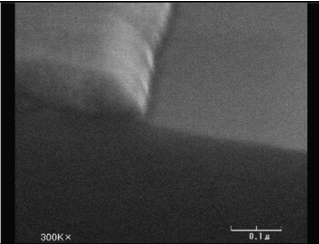
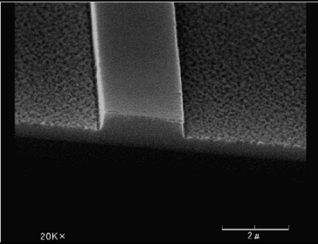
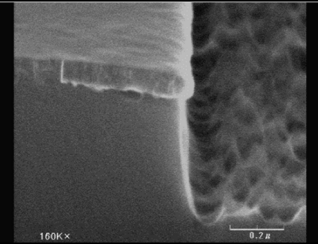
表 4.1. エッチング条件

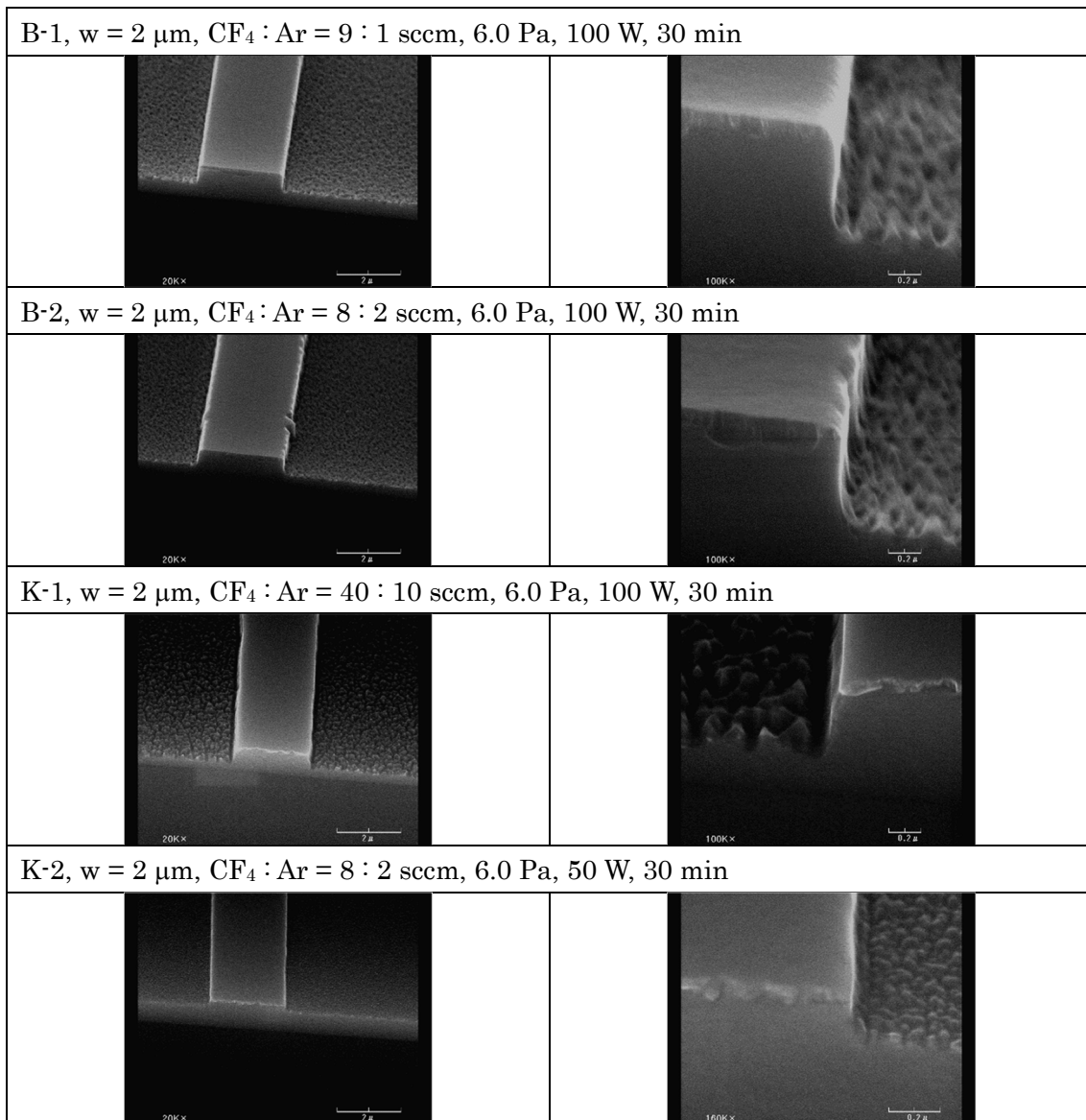
基板名	エッチング 実施日	時間 [min]	ガス圧 [Pa]	RF 電力 [W]	雰囲気 [sccm]		
					CF <sub>4</sub>	Ar	O <sub>2</sub>
A-1	2018/8/22	30	6	100	0.0	10.0	0
A-2	2018/8/22	30	6	100	10.0	0.0	0
B-1	2018/9/3	30	6	100	9.0	1.0	0
B-2	2018/9/3	30	6	100	8.0	2.0	0
K-1	2018/9/18	30	6	100	40.0	10.0	0
K-2	2018/9/18	30	6	50	8.0	2.0	0

表 4.2. エッチングレート

基板名	Cr 膜厚 [nm]	Nb <sub>2</sub> O <sub>5</sub> 最大 [nm]	Nb <sub>2</sub> O <sub>5</sub> 最小 [nm]	Nb <sub>2</sub> O <sub>5</sub> 平均 [nm]	Nb <sub>2</sub> O <sub>5</sub> Etch. レート [nm/min]	Nb <sub>2</sub> O <sub>5</sub> 誤差 レート [nm/min]	Cr 平均[nm]	Cr Etch. レート [nm/min]
A-1	80	62.30	59.70	60.87	2.03	0.09	12.19	0.41
A-2	80	335.90	318.40	329.86	11.00	0.58	-1.00	-0.03
B-1	80	329.50	306.25	319.88	10.66	0.78	13.79	0.46
B-2	80	328.20	301.40	318.98	10.63	0.89	2.39	0.08
K-1	80	368.75	339.95	360.71	12.02	0.96	-1.28	-0.04
K-2	80	112.55	108.05	111.10	3.70	0.15	9.78	0.33

表 4.3. 導波路断面 SEM 写真

A-1, w = 2 $\mu$ m, Ar = 10 sccm, 6.0 Pa, 100 W, 30 min					
					
A-2, w = 2 $\mu$ m, CF <sub>4</sub> = 10 sccm, 6.0 Pa, 100 W, 30 min					
					



まず、A-1、A-2 基板を比較すると Ar 単体よりも  $\text{CF}_4$  単体の方がエッチングレートが大きく、Si と同様に F ラジカルとの反応性エッチングが起こっていると考えられる。導波路の側壁の垂直性は  $\text{CF}_4$  単体に近い方がよく  $\text{CF}_4 : \text{Ar}$  混合比が従来条件の 5 : 5 に近づくにつれて垂直性が悪くなる傾向である。 $\text{CF}_4$  単体では Cr マスクの直下にエッチングが進んでおり、また導波路の側壁下部には溝ができています。 $\text{CF}_4 : \text{Ar}$  の混合比を一定にして全体のガス流量を増やした場合 (K-1, 40 : 10 sccm) では同じ混合比の B-2 基板と垂直性は大きな変化がないが、エッチング面の表面荒れ形状が変化しています。RF パワーを変化させた場合はエッチングレートが通常の 100 W の約 1/3 程度と低下した。エッチング面の表面状態は 100 W の K-1 基板よりも荒れが少ないが、同じエッチング量を得ようとして長時間エッチングを行った場合は同程度になると予想される。垂直性の観点

からは  $\text{CF}_4$  : Ar の混合比 9 : 1 or 8 : 2 程度が良いことが分かったが、エッチング面の表面荒れを抑える条件またはプロセスが必要である。一方エッチング量の面内分布の観点からは今回試したすべての条件において従来条件の誤差レート  $1.29 \text{ nm/min}$  を下回る結果となった。特に単ガスや RF パワーを抑えた場合に良く、条件を調整することでさらに改善できる可能性がある。

ここまでの条件検討を踏まえ、F 系の反応性エッチングガスと、Ar や  $\text{O}_2$  などのガスを時間的に切り替える手法を検討した。エッチング条件を表 4.4 に示す。この条件では比較的垂直性が良いが  $\text{Nb}_2\text{O}_5$  表面荒れが生じる  $\text{CF}_4$  : Ar = 8 : 2 sccm, 6 Pa, 100 W の条件をベースに時間的に導入ガスを切り替えて、エッチングを進める。 $\text{Nb}_2\text{O}_5$  表面に荒れが発生する原因としては、エッチング時の副生成物が基板表面に再付着し、マスクとなるためであると考えられるため、 $\text{CF}_4$  : Ar = 8 : 2 sccm のエッチングの間に副生成物を除去することで、表面荒れの軽減を狙っている。エッチングのタイムフローは図 4.3 に示すように、 $\text{CF}_4$  : Ar = 8 : 2 sccm のエッチングを 5 min × 6 回として合計 30 min 行い、エッチング間に 1 min の副生成物除去を挟んで実施した。副生成物を除去するためのガスとして Ar、 $\text{O}_2$  の単ガスを用いた。これらの単ガスでのエッチングはそれぞれ  $\text{Nb}_2\text{O}_5$  のエッチングには低レートであることがわかっている。エッチング後のエッチング量および、SEM 写真を表 4.5、表 4.6 に示す。

表 4.4. エッチング条件

基板名	エッチング 実施日	時間 [min]	ガス圧 [Pa]	RF 電力 [W]	雰囲気 [sccm]		
					$\text{CF}_4$	Ar	$\text{O}_2$
D-1	2018/11/12	30	6.0/6.0	100/100	8/0	2/10	0/0
D-2	2018/11/12	30	6.0/6.0	100/100	8/0	2/0	0/10

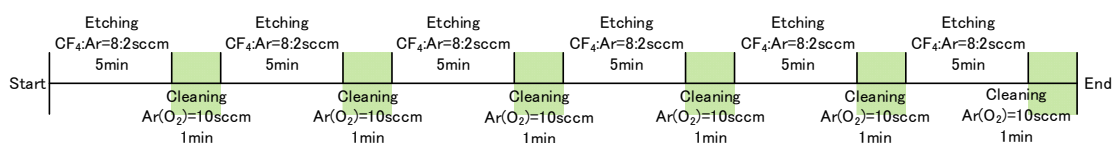
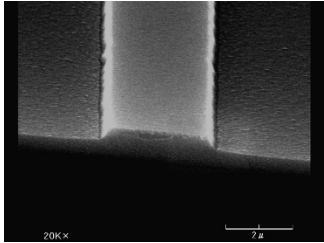
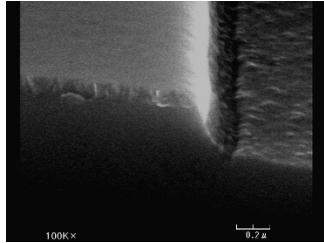
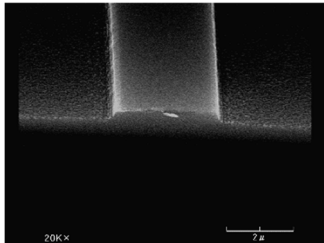
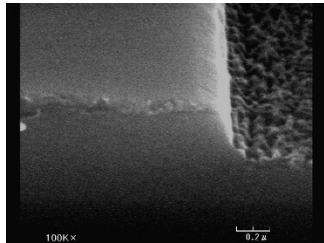


図 4.3. エッチングタイムフロー

表 4.5. エッチングレート

基板名	Cr 膜厚 [nm]	$\text{Nb}_2\text{O}_5$ 最大 [nm]	$\text{Nb}_2\text{O}_5$ 最小 [nm]	$\text{Nb}_2\text{O}_5$ 平均 [nm]	$\text{Nb}_2\text{O}_5$ Etch. レート [nm/min]	$\text{Nb}_2\text{O}_5$ 誤差 レート [nm/min]	Cr 平均[nm]	Cr Etch. レート [nm/min]
D-1	92	336.80	295.50	326.55	10.89	1.38	10.99	0.37
D-2	92	299.10	251.70	285.88	9.53	1.58	12.61	0.42

表 4.6. 導波路断面 SEM 写真

D-1, $w = 2 \mu\text{m}$ , $\text{CF}_4 : \text{Ar} = 8 : 2 \text{sccm} + \text{Ar} = 10 \text{sccm}$ , 6.0 Pa, 100 W, 5 min $\times$ 6+1 min $\times$ 6	
	
D-2, $w = 2 \mu\text{m}$ , $\text{CF}_4 : \text{Ar} = 8 : 2 \text{sccm} + \text{O}_2 = 10 \text{sccm}$ , 6.0 Pa, 100 W, 5 min $\times$ 6+1 min $\times$ 6	
	

まず表面荒れに関して表 4.6 の SEM 写真より、Ar による副生成物除去を行った D-1 基板では表面荒れがベース条件の  $\text{CF}_4 : \text{Ar} = 8 : 2 \text{sccm}$  よりも改善していることがわかる。一方  $\text{O}_2$  による副生成物除去を行った D-2 基板では  $\text{CF}_4 : \text{Ar} = 8 : 2 \text{sccm}$  と大きな変化は見られなかった。導波路の垂直性に関してはこれら 2 条件の両方で  $\text{CF}_4 : \text{Ar} = 8 : 2 \text{sccm}$  よりも悪く、D-1 と D-2 を比較すると Ar の D-1 の方がより垂直性が悪い結果であった。また両条件とも  $\text{CF}_4 : \text{O}_2$  ガスによるエッチング時のような Cr マスク下部へのアンダーカットは見られなかった。次にエッチング面内分布に関しては表 4.5 より、D-1、D-2 それぞれ誤差レート 1.38 nm/min、1.58 nm/min とベース条件  $\text{CF}_4 : \text{Ar} = 8 : 2 \text{sccm}$  の誤差レート 0.89 nm/min と比較し 1.7 倍程度、面内分布が悪くなる結果であった。従来条件の  $\text{CF}_4 : \text{Ar} = 5 : 5 \text{sccm}$  との比較では  $\text{CF}_4 : \text{Ar} = 5 : 5 \text{sccm}$  の誤差レートが 1.29 nm/min であるため、通常条件よりも 1.2 倍程度面内分布が大きかった。

次に、 $\text{O}_2$  と  $\text{CF}_4$  の組み合わせについても検討した。エッチング条件はこれまでに、従来条件( $\text{CF}_4 : \text{Ar} = 5 : 5 \text{sccm}$ )に対し面内分布の改善が得られた  $\text{CF}_4 : \text{O}_2 = 8 : 2 \text{sccm}$  から  $\text{O}_2$  の割合を減らすことで、Cr マスク直下のアンダーカットの軽減と導波路側面の垂直性と表面荒れ度合いの両立を狙い設定した。エッチング後のエッチング量および、SEM 写真を表 4.8、表 4.9 に示す。

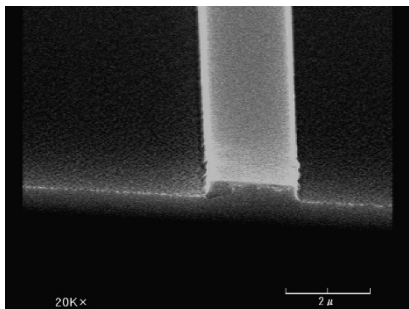
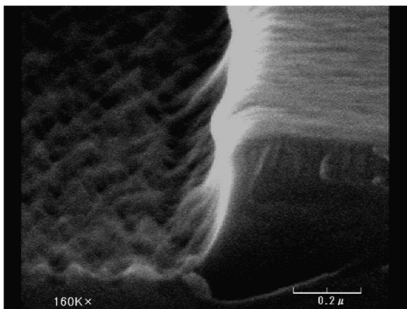
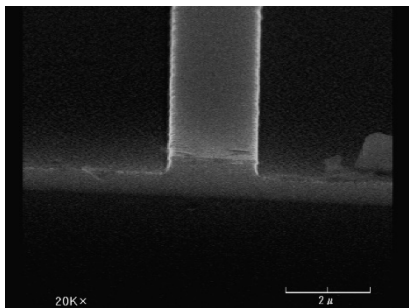
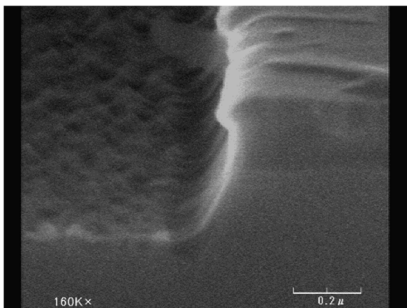
表 4.7. エッチング条件

基板名	エッチング 実施日	時間 [min]	ガス圧 [Pa]	RF 電力 [W]	雰囲気 [sccm]		
					CF <sub>4</sub>	Ar	O <sub>2</sub>
S-1	2019/2/18	15	4.8	100	40	0	1
S-2	2019/2/18	15	6.0	100	9	0	1

表 4.8. エッチングレート

基板名	Cr 膜厚 [nm] [参考値]	Nb <sub>2</sub> O <sub>5</sub> 最大 [nm]	Nb <sub>2</sub> O <sub>5</sub> 最小 [nm]	Nb <sub>2</sub> O <sub>5</sub> 平均 [nm]	Nb <sub>2</sub> O <sub>5</sub> Etch. レート [nm/min]	Nb <sub>2</sub> O <sub>5</sub> 誤差 レート [nm/min]	Cr 平均[nm]	Cr Etch. レート [nm/min]
S-1	93	210.25	199.35	206.63	13.78	0.73	- (-0.09)	- (-0.01)
S-2	93	284.20	278.25	282.25	18.82	0.40	15.30	1.02

表 4.9. 導波路断面 SEM 写真

S-1, w = 1.5 $\mu$ m, CF <sub>4</sub> : O <sub>2</sub> = 40 : 1 sccm, 4.8 Pa(EV 全開), 100 W, 15 min	
	
S-2, w = 1.5 $\mu$ m, CF <sub>4</sub> : O <sub>2</sub> = 9 : 1 sccm, 6.0 Pa, 100 W, 15 min	
	

まず表 4.8 より Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub> の Etch. レートは S-1 基板で 13.78 nm/min, S-2 基板で 18.82 nm/min であった。S-1 は O<sub>2</sub> の割合がかなり少ないので CF<sub>4</sub> 単ガスの Etch. レートと同程度、S-2 は CF<sub>4</sub> : O<sub>2</sub> = 8 : 2 sccm、6 Pa の条件の Etch. レート 36.4nm/min の半分程度であった。Cr の Etch. レートに関しては O<sub>2</sub> の割合が多

い S-2 で 1 nm/min 前後であるのに対し、S-1 は Cr の Etch.レートはほぼ 0 nm/min であった。面内分布の観点からは誤差レートが S-1 で 0.73 nm/min, S-2 で 0.40 nm/min であった。これは従来条件の  $\text{CF}_4:\text{Ar} = 5:5$  sccm の誤差レート 1.29 nm/min よりも良好であるが、 $\text{CF}_4:\text{O}_2 = 8:2$  sccm、4 Pa の条件の誤差レート 0.34 nm/min と比較して S-1 では約 2 倍大きく、S-2 では同程度という結果であった。

表 4.9 の SEM 写真より、側面の垂直性に関しては側壁角度が S-1 で 77.5deg.、S-2 で 80deg. 程度であった。エッチング時間やガス圧が異なるため単純な比較はできないが、 $\text{CF}_4:\text{O}_2 = 8:2$  sccm、4 Pa の条件と同程度あるいは若干悪い程度であった。表面荒れに関しては、この 2 条件では S-2 の方が良好で、 $\text{CF}_4:\text{O}_2 = 8:2$  sccm、4 Pa の条件と同程度であると考えられる。また S-2 では Cr マスク下部へのアンダーカットが 50nm 程度生じているのに対し、S-1 では  $\text{O}_2$  の比率が少ないためかアンダーカットは生じていなかった。

水平スロット導波路のドライエッチング条件としては、導波路側壁の垂直性が求められるため、これらの条件の中で最も良好な垂直性が得られた、 $\text{CF}_4:\text{Ar} = 8:2$  sccm、6 Pa、100 W の条件が適していると考えられる。

TM-mode で動作する水平スロット導波路は電界の振動方向が垂直であるため、エッチング面のラフネスの影響は受けにくいと考えられる。しかしながら、基板表面の突起部分はプレーナ層として作用することや、Air-Slot 構造形成時にフッ酸処理を行う際のカバー性の観点からラフネスの少ない、エッチング面が望まれる。表面荒れの生じる原因と考えている副生成物はエッチングの過程でラジカルや Ar などによって除去されるが、この除去効果にはラジカルに与えるエネルギーが影響すると考えられる。ここまでの検討を踏まえ、良好な垂直性が得られる  $\text{CF}_4:\text{Ar} = 8:2$  sccm、6 Pa、100 W の条件をベースとし、プラズマを生成するエネルギーである RF 電力についても検討を行った。エッチング条件を表 4.10 に、エッチング後のエッチング量および、SEM 写真を表 4.11、表 4.12 に示す。エッチング時間はエッチング量が約 500 nm となるように、RF 電力が 100 W の条件から見積もり、設定した。また RF 電力が 12 W の場合はエッチングレートが非常に低くなると予想され、エッチング量を 500 nm とした場合のエッチング時間が現実的でないため、120 min としている。



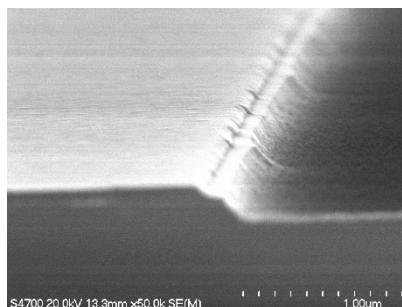
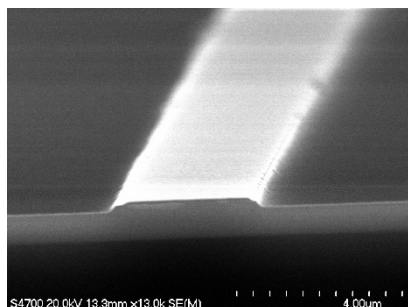
表 4.10. エッチング条件

基板名	エッチング 実施日	時間 [min]	ガス圧 [Pa]	RF 電力 [W]	雰囲気 [sccm]		
					CF <sub>4</sub>	Ar	O <sub>2</sub>
TT8	2020/10/20	120	3.3	12	8	2	0
TT5	2020/11/10	16	6	200	8	2	0
TT14	2021/1/19	8	6	300	8	2	0
TT13	2021/1/20	5	6	415	8	2	0
TT3	2020/12/8	4	6	500	8	2	0

表 4.11. エッチングレート

基板名	Cr 膜厚 [nm] [参考値]	Nb <sub>2</sub> O <sub>5</sub> 最大 [nm]	Nb <sub>2</sub> O <sub>5</sub> 最小 [nm]	Nb <sub>2</sub> O <sub>5</sub> 平均 [nm]	Nb <sub>2</sub> O <sub>5</sub> Etch. レート [nm/min]	Nb <sub>2</sub> O <sub>5</sub> 誤差 レート [nm/min]	Cr 平均[nm]	Cr Etch. レート [nm/min]
TT8	97	214.30	211.10	212.67	1.77	0.03	179.70	1.50
TT5	94.4	578.15	510.60	554.57	34.66	4.22	36.43	2.28
TT14	98.2	466.05	429.10	453.63	56.70	4.62	21.06	2.63
TT13	98.4	398.10	358.10	383.09	76.62	8.00	18.36	3.67
TT3	98.3	361.45	335.35	354.72	88.68	6.52	19.33	4.83

表 4.12. 導波路断面 SEM 写真

TT8, w = 2  $\mu$ m, CF<sub>4</sub> : Ar = 8 : 2 sccm, 3.3 Pa, 12 W, 120 min

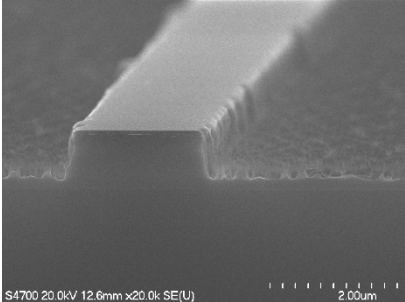
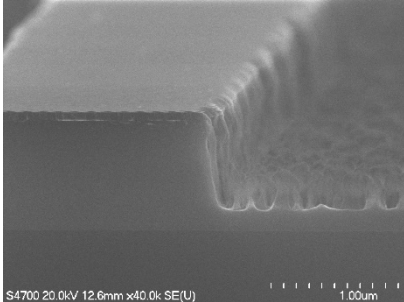
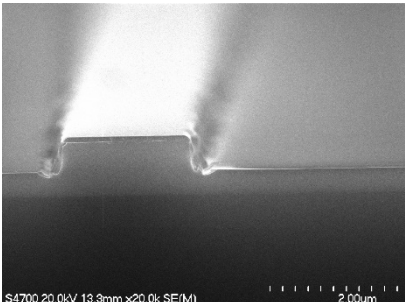
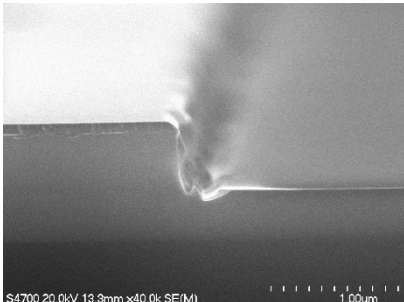
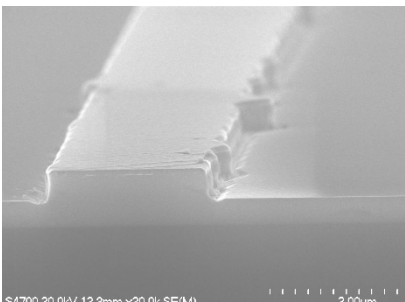
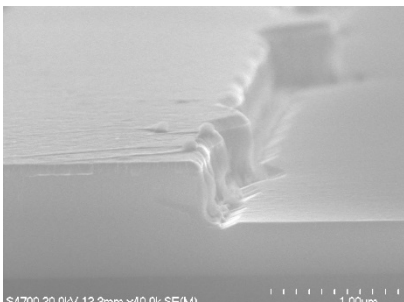
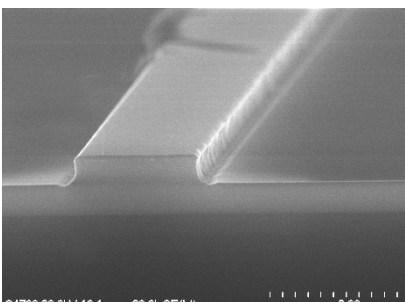
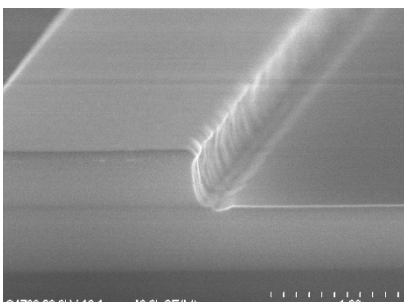
TT5, $w = 2\ \mu\text{m}$ , $\text{CF}_4 : \text{Ar} = 8 : 2\ \text{sccm}$ , 6.0 Pa, 200 W, 16 min	
	
TT14, $w = 1\ \mu\text{m}$ , $\text{CF}_4 : \text{Ar} = 8 : 2\ \text{sccm}$ , 6.0 Pa, 300 W, 8 min	
	
TT13, $w = 2\ \mu\text{m}$ , $\text{CF}_4 : \text{Ar} = 8 : 2\ \text{sccm}$ , 6.0 Pa, 415 W, 5 min	
	
TT3, $w = 2\ \mu\text{m}$ , $\text{CF}_4 : \text{Ar} = 8 : 2\ \text{sccm}$ , 6.0 Pa, 500 W, 4 min	
	

表 4.12 の SEM 写真から RF 電力の違いによって、エッチング面の状態が変化していることが分かる。はじめに RF 電力をベースの条件の 100 W から低く設定した場合、RF 電力が 12 W ではエッチング面の表面全体が黒くなっており、

膜がついたように見える。これは  $\text{CF}_4$  ガスが分解された際に生じる炭素 C や反応副生成物が堆積したものであると考えられる。一方、RF 電力を高く設定した場合、RF 電力が 200 W では 100 W と同程度のエッチング面が形成されたが、300 W 以上の RF 電力の場合、エッチング面に存在したラフネスが、SEM では確認できない程度まで抑止された。また導波路側壁の垂直性とエッチング量の面内分布はベース条件の  $\text{CF}_4:\text{Ar} = 8:2$  sccm、6 Pa、100 W とほぼ同じ特性を示しており、側壁角度は RF 電力 500 W の場合、87 deg. 程度と良好であり、誤差レートのエッチングレートに対する割合は 7 %程度とベースの条件の 8 %と比較して同程度である。したがって、RF 電力は高パワーとすることで、エッチング面の状態を改善する一方で、垂直性や面内分布には影響せず、ガス流量比やガス圧力といった他のパラメータに依存することといえる。

#### 4.1.2.2 層レジスト

一般的に EB 描画によるレジストパターンは電子ビームの前方散乱によりレジスト内でパターンが広がるため、自然にリフトオフプロセスに適したオーバーハング構造が形成されるとされている[108]。しかしながら、近接効果によるパターンの広がりを嫌う描画条件では 130 kV といった高加速電圧が用いられることから高加速電圧の描画条件ではオーバーハング構造は形成されにくいと考えられる。一方、EB 描画の分解能とリフトオフの容易さを両立するため、2 層レジストを用いたレジストプロセスが提案されている[109]。本研究の VG 付細線導波路を形成するのに適したレジストプロセスの検討を行った。

実験は 3 種類のレジスト塗布条件にてパターンを形成し、Cr を 50 nm 程度、真空蒸着で成膜した。成膜後の Cr-レジスト層の断面を SEM で観察した。表 4.13 ~4.15 にレジスト塗布条件を示す。レジスト塗布条件は粘度が比較的高く、比較的厚膜が得られる OEBR1000(conc.)の単層 400 nm 層厚膜、微細パターンのパターンニングに適した ZEP520A-7 の単層 250 nm 層厚膜、ZEP520A-7 と LOL2000 の 2 層膜の 3 種類とした。2 層レジストの下層リフトオフ層は上層の EB レジストと混ざり合わないことが必要である。文献[109]では ZEP520A と PMGI の組み合わせで 2 層レジスト実現していることから本研究では PMGI 系レジスト (Lift-off layer) の LOL2000 を用いることにした。塗布条件は 300 nm 程度の膜厚とし、上層の EB レジスト層は ZEP520A-7 を 250 nm 程度の層厚となるように塗布した。LOL2000 はプリベークをした後に UV 全面露光を 2 sec 行った。2 層レジストの現像時は先に EB レジストの現像を行ったうえで、LOL2000 をフォトリソスト用アルカリ系現像液 NMD-3 で溶解させる。

表 4.13. レジスト塗布条件①

レジスト塗布	使用機器	スピンコータ	
		回転数	時間
	OAP	1 <sup>st</sup> :500[rpm]	5[sec]
		2 <sup>nd</sup> :4000[rpm]	10[sec]
		3 <sup>rd</sup> :SLOPE	3[sec]
	OEBR1000 (conc.)	1 <sup>st</sup> :500[rpm]	5[sec]
		2 <sup>nd</sup> :4000[rpm]	40[sec]
		3 <sup>rd</sup> :SLOPE	3[sec]
プリベーク (ホットプレート)		条件	時間
	OAP	110[°C]	5[min]
	OEBR1000	190[°C]	10[min]

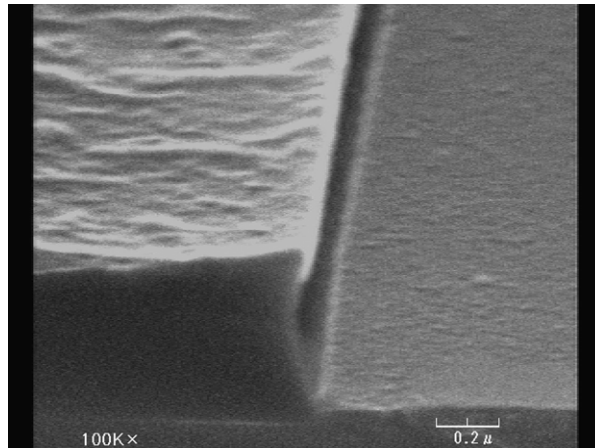
表 4.14. レジスト塗布条件②

レジスト塗布	使用機器	スピンコータ	
		回転数	時間
	OAP	1 <sup>st</sup> :500[rpm]	5[sec]
		2 <sup>nd</sup> :4000[rpm]	10[sec]
		3 <sup>rd</sup> :SLOPE	3[sec]
	ZEP520A-7 (conc.)	1 <sup>st</sup> :500[rpm]	5[sec]
		2 <sup>nd</sup> :4000[rpm]	40[sec]
		3 <sup>rd</sup> :SLOPE	3[sec]
プリベーク (ホットプレート)		条件	時間
	OAP	110[°C]	5[min]
	ZEP520A-7	190[°C]	5[min]

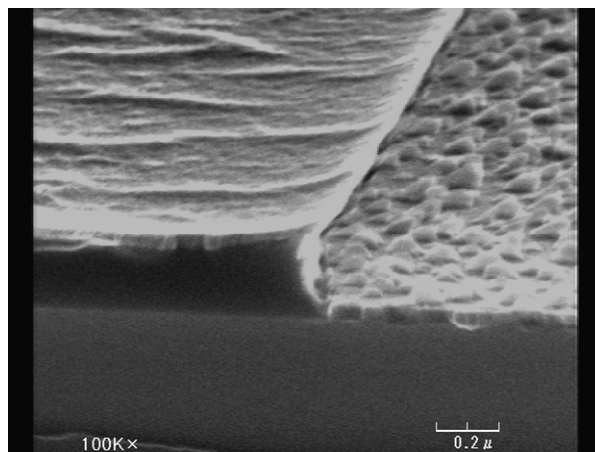
表 4.15. レジスト塗布条件③

レジスト塗布	使用機器	スピンのコート	
		回転数	時間
	OAP	1st:500[rpm]	5[sec]
		2nd:4000[rpm]	10[sec]
		3rd:SLOPE	3[sec]
	LOL2000 (conc.)	1st:500[rpm]	5[sec]
		2nd:4000[rpm]	30[sec]
		3rd:SLOPE	3[sec]
	ZEP520A-7 (conc.)	1st:500[rpm]	5[sec]
		2nd:4000[rpm]	40[sec]
		3rd:SLOPE	3[sec]
プリベーク (ホットプレート)		条件	時間
	OAP	110[°C]	5[min]
	LOL2000	190[°C]	5[min]+UV 露光 2[sec]
	ZEP520A-7	190[°C]	5[min]

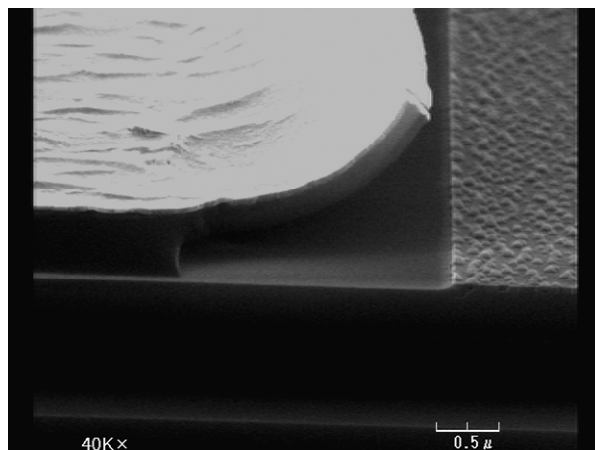
図 4.4 に Cr 成膜後の SEM 写真を示す。レジストは電子ビームが当たると変形するため観察には注意が必要だが、図 4.4a、4.4b の単層膜はオーバーハング構造が形成されていないことがわかる。しかしながら、レジスト層厚が EB レジストとしては厚いためにレジスト上の Cr 膜と基板上的 Cr 膜はつながることなくパターン形成ができていない。またレジストと基板上的 Cr は直接接触しているため、レジスト下部の一部のレジスト残膜により面方向へのラフネスを生じる可能性がある。図 4.4c の 2 層レジストは下層の LOL2000 が溶け出したことによりオーバーハング構造が形成されている。オーバーハング構造は NMD-3 の浸け込み 40 sec で導波路パターンから 2.2  $\mu\text{m}$  程度となった。また特徴として Cr パターンの若干の広がりが見られる。これは Cr 蒸着時の平均自由工程と上層 ZEP 層が厚いことによる反り、Cr 膜の応力によるものであると考えられる。2 層レジストは EB 描画によるパターニングとリフトオフを行う際にオーバーハング構造を形成できることが分かった。実験結果から LOL、ZEP ともに薄膜化するとともに、NMD-3 の浸け込み時間を短くすることが望ましいと考えられる。



(a). レジスト塗布条件①



(b). レジスト塗布条件②



(c). レジスト塗布条件③

図 4.4. Cr 蒸着後の SEM 写真

#### 4.1.3. パターニング

##### 4.1.3.1. 電子線描画装置

本研究の  $\text{Nb}_2\text{O}_5$  水平スロット導波路は 400～500 nm 程度の線幅、微細な Grating 構造をパターニングする必要がある。サブ $\mu\text{m}$  オーダの微細パターンのパターニング技術にはステッパや電子線描画装置 (EBX: Electron Beam Exposure) が用いられる。本研究では CRESTEC 製電子線描画装置 CABL-9200TFTN を用いて、パターニングを行う。図 4.5 に EBX の装置構成を示す。

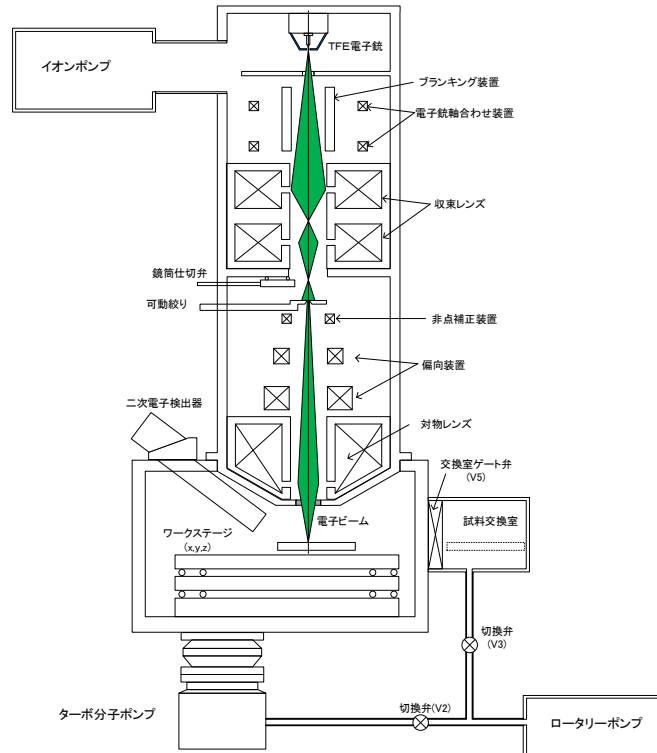


図 4.5. CABL-9200TFTN の構造

本機はステップ&リピート、ポイントビーム形の EBX であり、FE-SEM にブランキング電極を取り付けた構成をしている。電子ビームの偏向により描画される面積(フィールドサイズ)の描画とレーザ干渉計などで高精度に制御された X-Y ステージを移動させながら試料全体にパターンを描画することができる。図 4.6 に CABL-9200TFTN のフィールド構成を示す。

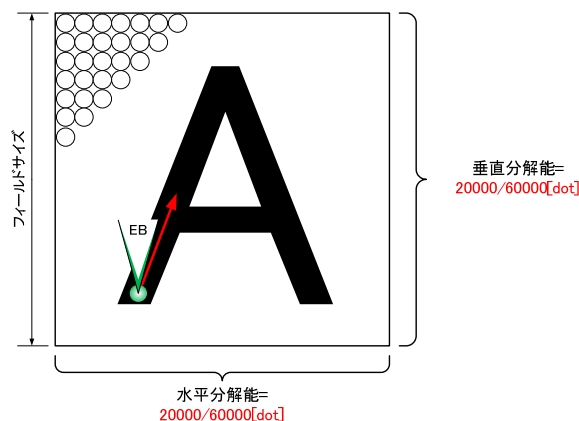


図 4.6. フィールド構成

描画パターンは図 4.6 のフィールド単位で描画される。1 フィールドのサイズは任意に設定が可能であるが、フィールドサイズが大きくなるとフィールドの端で歪が生じるため、実用上の最大値は  $500\ \mu\text{m}$ □である。また描画パターンはフィールドのアドレス分解能による図形の丸めが生じる。CABL-9200TFTN のアドレス分解能は実用上の最大で  $60000\ \text{dot} \times 60000\ \text{dot}$  である。つまり、 $500\ \mu\text{m}$ □フィールドサイズの場合、アドレス分解能を  $60000\ \text{dot}$  に設定すると最小のパターン幅は  $8.3\ \text{nm}$  となり、 $20000\ \text{dot}$  を設定した場合は  $25\ \text{nm}$  となる。

#### 4.1.3.2. Dose 量

EBX を用いてパターンニングを行うにあたり、電子ビームの露光量を示す Dose 量を見込む必要がある。本研究では描画パターンの細かさに合わせて、東京応化製 OEBR1000 と日本ゼオン製 ZEP520A-7 を使い分けている。ここでは各レジストに対する必要な Dose 量の条件だしを行った。

ZEP520A-7 を用い、 $500\ \text{nm}$  程度の線幅の細線導波路をパターンニングした場合の EB レジストの塗布条件並びに、描画条件を表 4.16～4.17 に示す。また現像後の SEM 写真を図 4.7 に示す。



表 4.16. レジスト塗布条件(ZEP520A-7)

EB レジスト塗布	使用機器	スピナー MS-A100	
		回転数	時間
	OAP	1 <sup>st</sup> :500[rpm]	5[sec]
		2 <sup>nd</sup> :4000[rpm]	10[sec]
		3 <sup>rd</sup> :SLOPE	3[sec]
	ZEP520A-7 (conc.)	1 <sup>st</sup> :500[rpm]	5[sec]
		2 <sup>nd</sup> :5000[rpm]	60[sec]
		3 <sup>rd</sup> :SLOPE	3[sec]
レジスト焼成	使用機器	ホットプレート CHP-170DN	
		条件	時間
	OAP	110[°C]	5[min]
	ZEP520A-7	190[°C]	5[min]

表 4.17. EB 描画条件・現像条件

使用機器	EB 描画装置 CABL-9200TFTN	
	条件	
加速電圧	50kV	
吸収電流	400pA	
ドーズ量	50～150 $\mu$ C/cm <sup>2</sup>	
ドーズ時間	0.09～0.26 $\mu$ s	
フィールドサイズ	500 $\mu$ m	
分解能	60000dot×60000dot	
偏向制御方式	Vector Analog	
振り幅補正值	ATTX	29250
	ATTY	28508
	SRT[mrad]	-3.04
	RANG[mrad]	-0.06
使用溶液	条件	時間
ZED-N50	現像	3[min]
ZMD-B	リンス	10[sec]
IPA	洗浄	1[min]

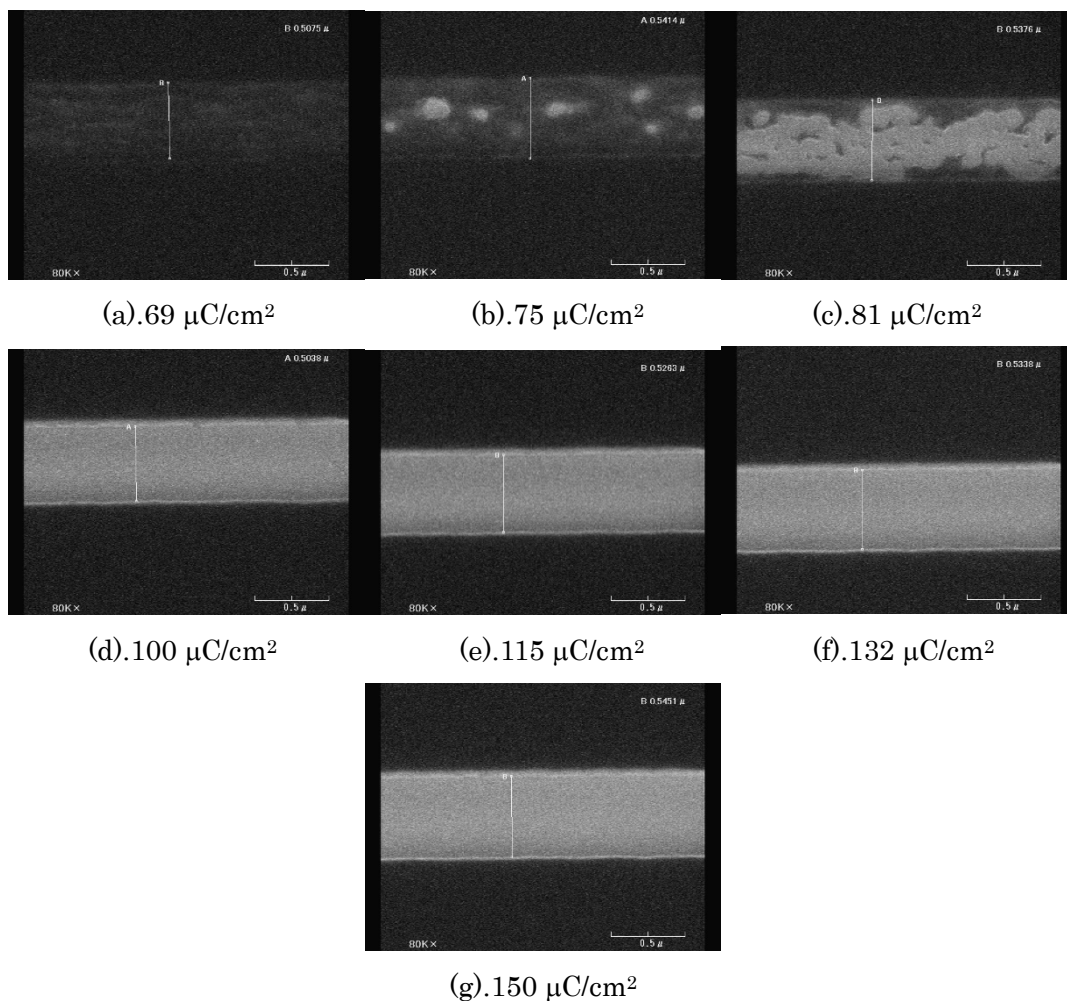


図 4.7. SEM 写真(500 nm 直線, x80k 倍)

図 4.7 は 500 nm の細線導波路を想定したパターンである。100  $\mu\text{C}/\text{cm}^2$  で残膜がなくなりパターン幅も実測 503.8 nm と良好なパターンニングが出来ている。

次に、OEBR1000 を用いた場合の EB レジストの塗布条件並びに、描画条件を表 4.18～4.19 に示す。また現像後の SEM 写真を図 4.8 に示す。

表 4.18. レジスト塗布条件

EB レジスト塗布	使用機器	スピンのコート	
		回転数	時間
	OAP	1 <sup>st</sup> :500[rpm]	5[sec]
		2 <sup>nd</sup> :4000[rpm]	10[sec]
	OEBR1000 (conc.)	1 <sup>st</sup> :500[rpm]	5[sec]
		2 <sup>nd</sup> :4000[rpm]	40[sec]
EB レジスト焼成	使用機器	オープン	
		条件	時間
	OAP	90[°C]	90[sec]
	OEBR1000	180[°C]	30[min]

表 4.19. EB 描画条件・現像条件

使用機器	EB 描画装置 CABL-9200TFTN	
	条件	
加速電圧	50kV	
吸収電流	100pA	
ドーズ量	85～501 $\mu\text{C}/\text{cm}^2$	
ドーズ時間	0.59～3.48 $\mu\text{s}$	
フィールドサイズ	500 $\mu\text{m}$	
分解能	60000dot $\times$ 60000dot	
偏向制御方式	Vector Digital	
振り幅補正值	ATTX	29197
	ATTY	28086
	SRT[mrad]	-1.13
	RANG[mrad]	-0.52
使用溶液	条件	時間
現像液 1000	現像	3[min]
IPA	リンス	1[min]

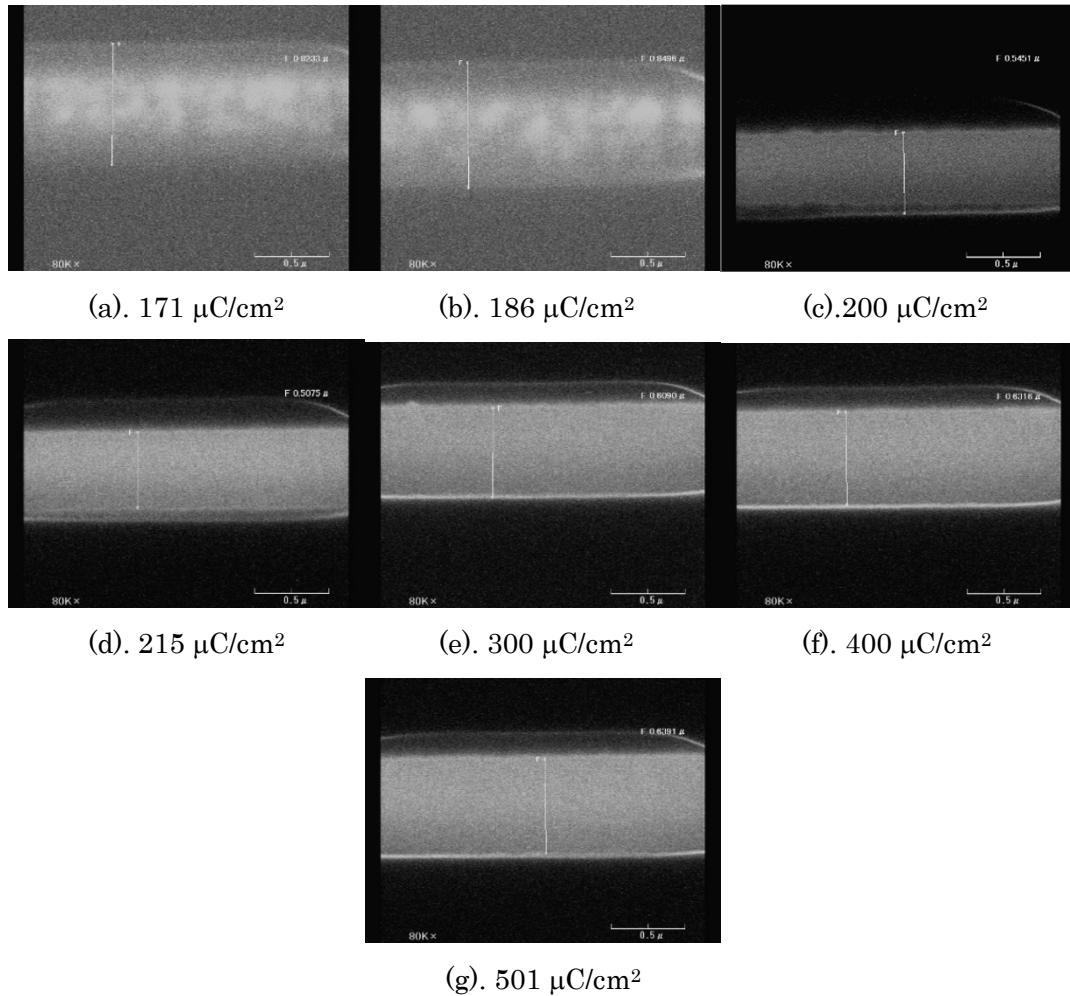


図 4.8. SEM 写真(500 nm 直線, x80k 倍, 写真なし箇所はパターン確認できず)

図 4.8 の 500 nm 線幅の細線導波路を想定したパターンでは、200  $\mu\text{C}/\text{cm}^2$  で残膜がなくなり、215  $\mu\text{C}/\text{cm}^2$  パターン幅も実測 507.5 nm と良好なパターンニングが出来ている。

以上をまとめると、OEBR1000\_0.5 $\mu\text{m}$  厚での描画は、実用的には 300 nm 程度以上の大きなパターンを描画する場合に有効である。0.5  $\mu\text{m}$  の膜厚のため、ZEP 系よりも長い時間エッチングを行う用途やリフトオフを行う用途で用いると良いと考えられる。また OEBR を微細パターン(90nmL&S 等)の描画に用いるにはシンナーで希釈する必要があると考えられる。

Vertical Grating のパターンニングには EBX の分解能の都合上、描画速度と分解能を両立するために、Grating 部分を 60000dot とし、導波路部分を 20000dot としている。60000dot 部分での適切な Dose 量が 20000dot 部と異なることや、Grating の周期構造を大量に並べて描画するために、近接効果の影響が導波路部分と異なる。このため、Grating 部の Dose 量は導波路部分と異なる値を設定す

る必要がある。そこで、Grating 部分の Dose 量の条件だしを行った。表 4.20 にレジスト塗布条件を示す。

表 4.20. レジスト塗布条件

レジスト塗布	使用機器	スピナー	
		回転数	時間
	OAP	1 <sup>st</sup> :500[rpm]	5[sec]
		2 <sup>nd</sup> :4000[rpm]	10[sec]
		3 <sup>rd</sup> :SLOPE	3[sec]
	ZEP520A-7 (conc.)	1 <sup>st</sup> :500[rpm]	5[sec]
		2 <sup>nd</sup> :4000[rpm]	40[sec]
		3 <sup>rd</sup> :SLOPE	3[sec]
		条件	時間
プリベーク (ホットプレート)	OAP	110[°C]	5[min]
	ZEP520A-7	190[°C]	5[min]

EB 描画は加速電圧 50 kV、ビーム電流 400 pA の条件で Dose 時間を 0.13  $\mu$ s から 0.53  $\mu$ s まで 0.04  $\mu$ s 刻みで 11 条件描画した(Dose 量: 75  $\mu$ C/cm<sup>2</sup> から 305  $\mu$ C/cm<sup>2</sup>)。図 4.9 に現像後の Grating 部分の SEM 写真を示す。

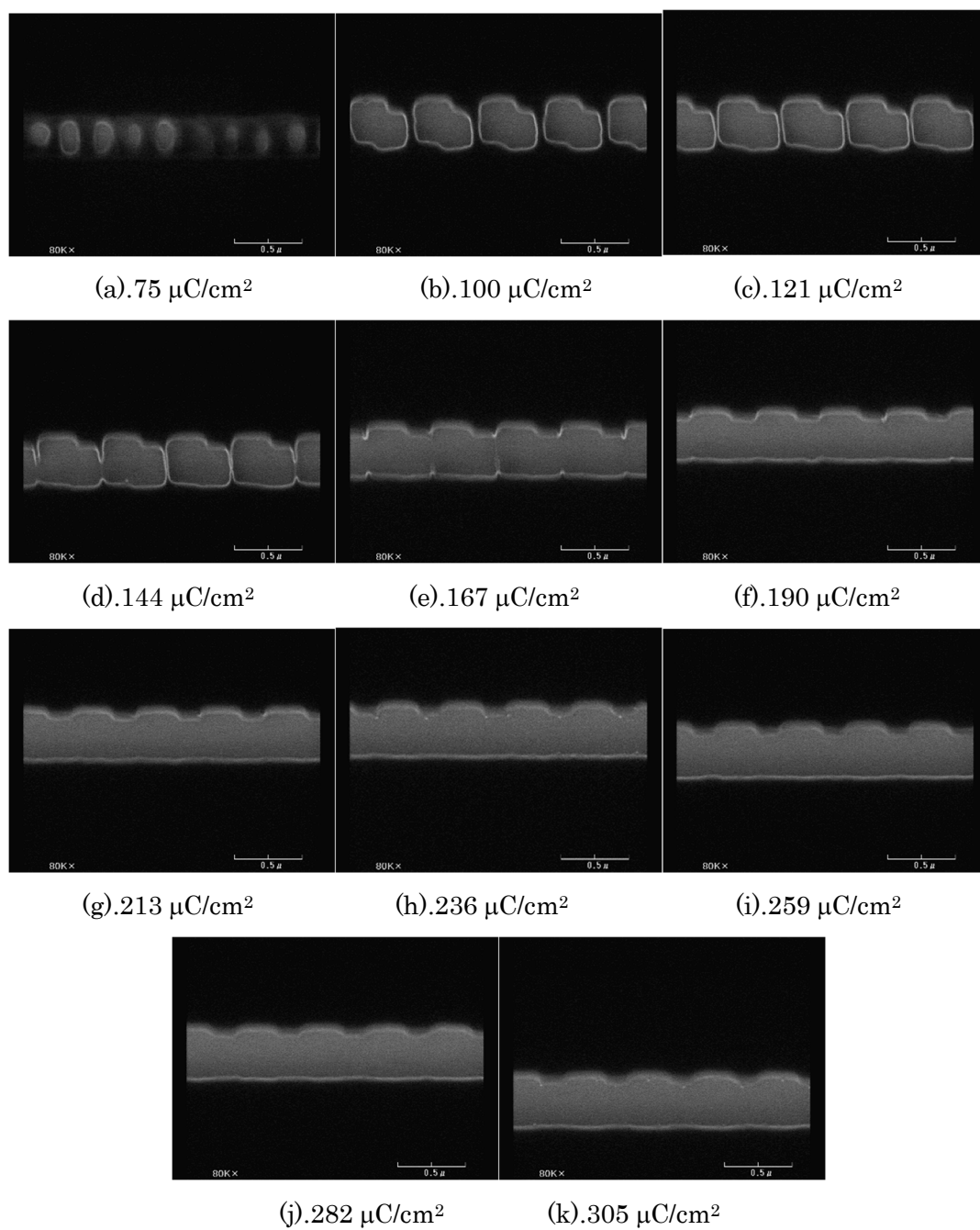


図 4.9. Grating 部分の SEM 写真

図 4.9 を見ると Grating 部分ではレジスト残膜をなくすためには 190  $\mu\text{C}/\text{cm}^2$  以上の Dose 量が必要であることがわかる。305  $\mu\text{C}/\text{cm}^2$  など過剰な Dose 量の場合にも Grating の周期構造は形成されているが、チャージアップや、パターンの広がり観点から 200  $\mu\text{C}/\text{cm}^2$  前後の Dose 量が適切であると考えられる。

#### 4.1.3.3. フィールドつなぎ

ステップ&リピートの EBX は図 4.10 のようにフィールドサイズ以上の図形を描画する場合や、フィールドをまたがる描画の場合、ステージ移動が生じる。本研究では導波路を  $15 \times 25 \text{ mm}$  の基板上に形成するため、測定時の入出力用導波路を基板の全長分引き回しておく必要がある。

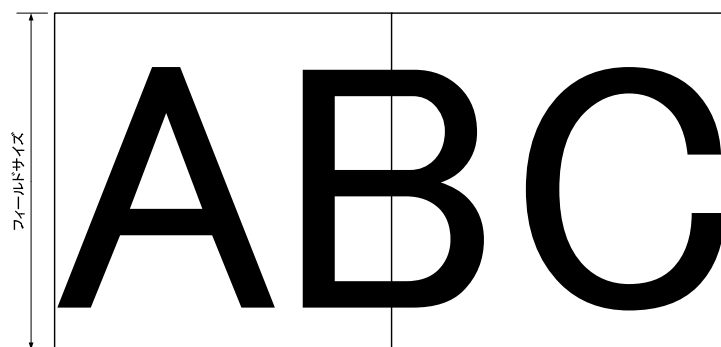


図 4.10. フィールドつなぎ

一方、本学の EBX はメーカー推奨の使用方法では図 4.11 のように描画パターンのフィールドつなぎ部分に  $1.6 \mu\text{m}$  程度のズレが生じてしまう。したがって、この手順では導波路をパターンニングすることはできない。

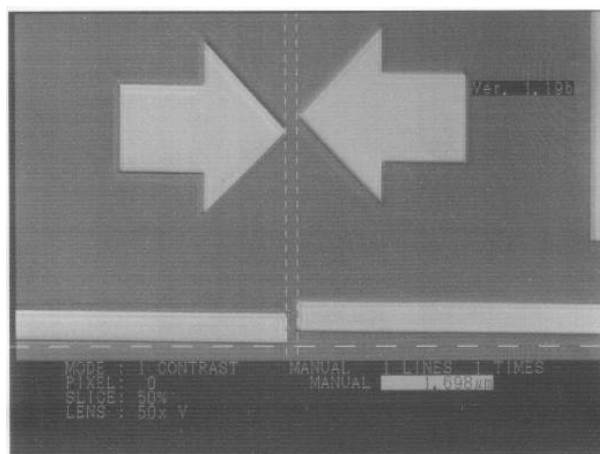


図 4.11. メーカー推奨手順の描画結果

ズレの生じる要因としては、物理的な部分ではステージの位置精度、振動による影響であり、電気的な要因としては、非点補正や電子レンズによる電子ビームの回転と電子ビームの偏向量とステージの移動量を一致させる振幅補正值のミスマッチが考えられる。図 4.11 から描画パターンは X 方向、Y 方向のほかに、フィールドが回転しているとみられる。したがって、ズレの主要因は電気的要因

であると考えられる。電氣的要因の補正は電子ビームの偏向量に補正值をかけることで行われており、これを振り幅補正と呼んでいる。CABL-9200TFTN は振り幅補正をファラデーカップを目印に自動的に行っている。そこで、この振り幅補正の手順を検討した。

メーカー推奨手順の振り幅補正(Acquisition)はファラデーカップへ移動後コントラストとブライトネスの調整のみを行い実行していた。振り幅補正の精度が悪い原因として、基板表面の高さと振り幅補正を行うファラデーカップの高さが異なることがあげられる。図 4.12 のように、CABL-9200TFTN では試料面に対して、ファラデーカップが低く設置されておりフォーカスズレを起こす。このフォーカスズレによるファラデーカップの拡大と電子光学系に起因する電子ビームの回転により X-Y 方向のゲイン(ATTX、ATTY)と回転補正值(SRT)がずれると考えられる。そこで、図 4.13b のように Acquisition の直前に描画ステージの Z 軸のみ操作し、ファラデーカップにフォーカス合わせを行うことで、試料面の高さにファラデーカップを上げることができると考えられる。Z 軸をデフォルトの 2.5 mm で実行した場合と、フォーカス合わせを行った場合に取得された補正值を表 4.21 に示す。

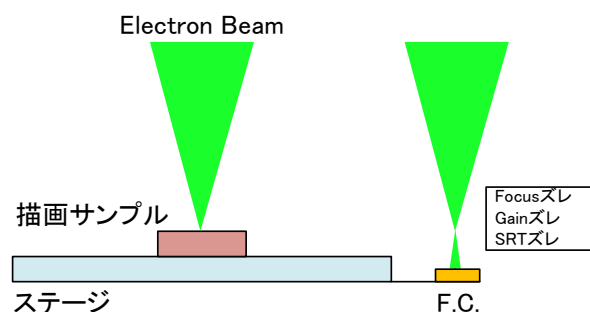


図 4.12. ファラデーカップと試料の位置関係

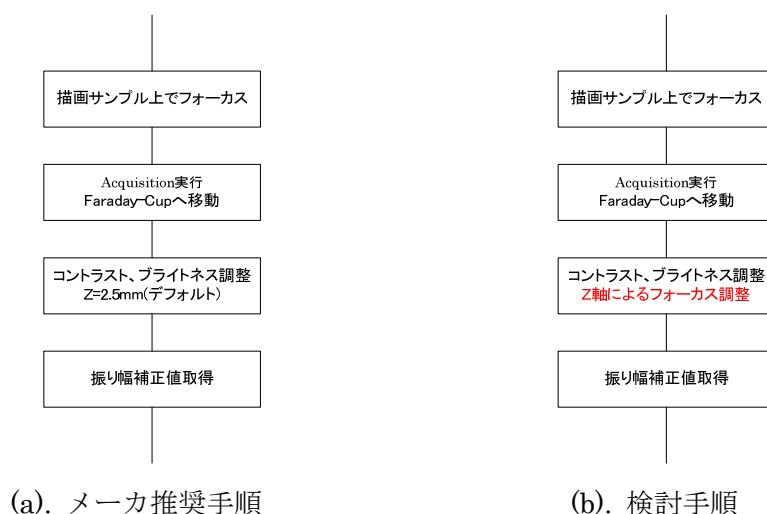


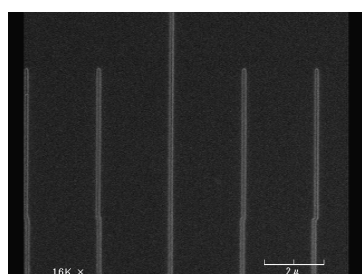
図 4.13. 振り幅補正手順



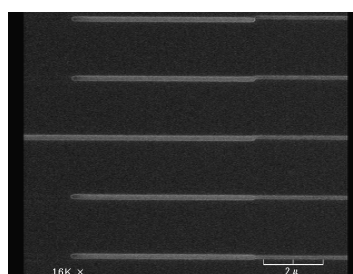
表 4.21. Z position による補正值の変化

メーカー推奨手順			検討手順		
Z position [mm]		2.50000	Z position [mm]		2.61689
振り幅補正值	ATTX	29296	振り幅補正值	ATTX	30471
	ATTY	28153		ATTY	29179
	SRT[mrad]	-2.33		SRT[mrad]	-3.64
	RANG[mrad]	0.24		RANG[mrad]	1.28

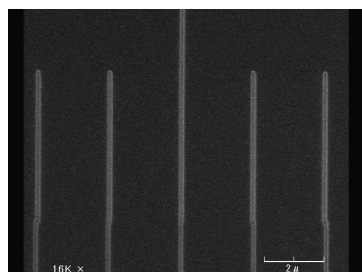
Z 軸高さを上げることにより、振り幅補正值が変化した。ここで、ズレ幅測定用バーニヤ目盛パターンを描画して本手順の効果の評価を行った。描画された目盛パターンを図 4.14 に示す。



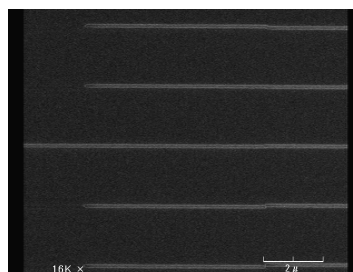
(a). X 方向



(b). Y 方向



(c). 回転



(d). 直行

図 4.14. 検討手順による描画

図 4.14 よりズレ幅は X 方向で 0 nm、Y 方向で 50 nm、回転は 0 mrad、直行は 0.1 mrad であり、フィールドつなぎ精度を大幅に改善することができた。

#### 4.1.4. 選択性エッチング

水平スロット導波路のスロット層厚は薄いほど高いピーク強度が得られることから、本研究ではスロット層厚が 30 nm 以下の水平スロット導波路の製作を目標としている。一方、導波路形成後スロット領域を選択的にエッチングする際に、薄いスロットほどスロットの断面積が小さいことからエッチング速度が、極端に低下する可能性がある。ここではスロットのエッチング速度を太い導波路の

スロット形成具合から見込む。図 4.15 に示す  $4\text{ }\mu\text{m}$  のスロットは導波路の側壁から  $1.237\text{ }\mu\text{m}$  の位置でエッチングが停止しており、 $1:6\text{ BHF}$  によるエッチング時間が  $5\text{ min}$  なので Etch. Rate は  $247.4\text{ nm/min}$  と見積もられる。厚さ方向への Etch. Rate が  $158\text{ nm/min}$  程度なのでそれよりも大きい値が見積もられた。

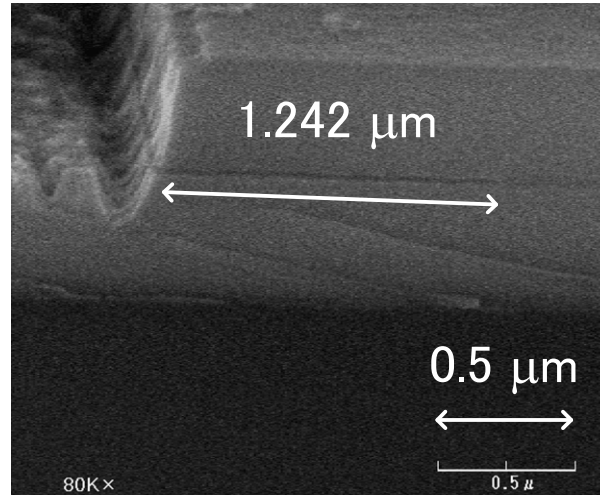


図 4.15. スロットのエッチング速度

#### 4.2. Air-Slot 構造の製作

ここまでの製作条件の検討を踏まえ、薄膜堆積と選択性エッチングによる Air-Slot 構造の製作プロセスの有効性の評価を行った。製作する Air-Slot 構造の構造パラメータは 3 章の解析結果をもとに定めてある。スロット層厚は断面を SEM 観察するために  $20\text{ nm}$  程度となるように設定した。図 4.16 に構造パラメータを示す。

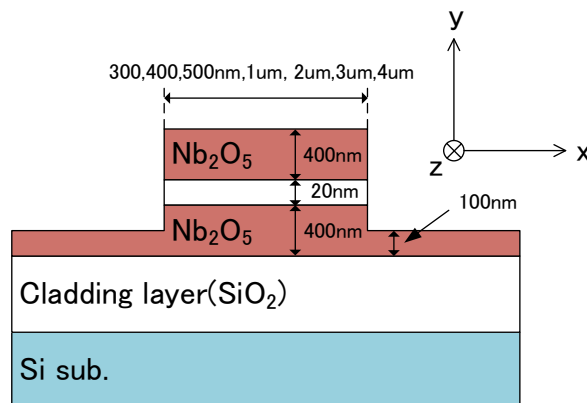


図 4.16. 構造パラメータ

##### 4.2.1. 製作プロセス

Air-Slot 構造は図 4.17 の製作プロセスによって製作する。導波路断面の SEM 観察のために Air-Slot 構造とリブ構造を組み合わせている。製作プロセスは大

きく分けて、Air-Slot 構造を得るための SiO<sub>2</sub> 層の埋め込みと導波路パターン形成、選択性エッチングから構成されている。

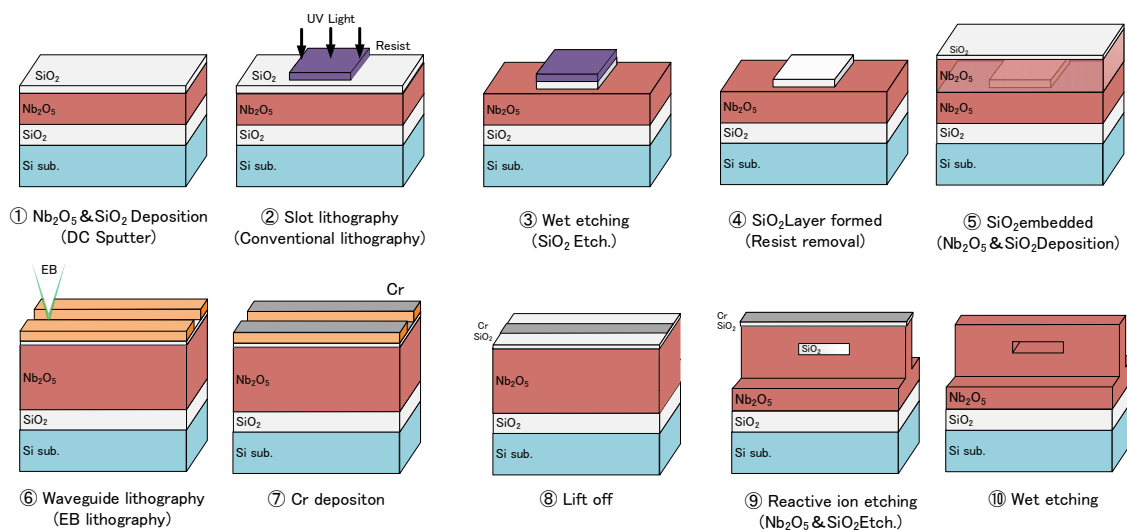


図 4.17. Air-Slot 構造の製作プロセス

#### 4.2.2. 素子製作

試料となる熱酸化膜付き Si 基板を洗浄後、反応性 DC スパッタ装置を用いて、下部 Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 層とスロット層 SiO<sub>2</sub> を成膜する。表 4.22 と 4.23 に条件をそれぞれ示す。成膜後のそれぞれの層厚は下部 Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 層が 362.3 nm(0.52 nm/s)、SiO<sub>2</sub> 層が 27.7 nm(0.79 nm/s)であった。

表 4.22. 基板洗浄

基板洗浄	使用溶液	使用条件	洗浄時間
	純水	流水	60 sec
	過硫酸	H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> :H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> =1:1	10 min
	純水	リンス	60 sec
基板乾燥	純水	流水	60 sec
	使用機器	乾燥条件	乾燥時間
	90℃オーブン	90℃	5 min
		常温	10 min

表 4.23. 成膜条件

(a). Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub>

使用装置	SPS-208CW
ターゲット	NbO
導入ガス	Ar:O <sub>2</sub> =25.5:4.5[sccm]
DC 電力	1000[W]/100kHz Pulse
ソレノイド電流	+0.2[A]
空デポ	500[nm]
ガス圧	$8.86 \times 10^{-2}$ [Pa]
到達真空度	$6.88 \times 10^{-4}$ [Pa]
成膜レート(参考)	0.57[nm/sec]
成膜時間	666.7[sec]

(b). SiO<sub>2</sub>

使用装置	SPS-208CW
ターゲット	SiC
導入ガス	Ar:O <sub>2</sub> =30:18[sccm]
DC 電力	1000[W]/75kHz Pulse
ソレノイド電流	+1.2[A]
空デポ	500[nm]
ガス圧	$1.23 \times 10^{-1}$ [Pa]
到達真空度	$6.38 \times 10^{-4}$ [Pa]
成膜レート(参考)	0.57[nm/sec]
成膜時間	35.1[sec]

スロット層となる埋め込み SiO<sub>2</sub> 層のパターニングを行う。基板は最終的に劈開し、導波路断面を観察するため、5  $\mu$ m-5  $\mu$ m Line & Space のフォトマスクを用いて 5  $\mu$ m 幅の SiO<sub>2</sub> 層が並ぶパターンをコンタクト露光と 1 : 6 BHF によるウェットエッチングにより形成した。エッチング時間は SPS-208CW で成膜した SiO<sub>2</sub> 膜の Etch. Rate が約 152 nm/min であるので、マージンをとり 15 sec とした。

表 4.24. コンタクト露光・Wet. Etch.条件

レジスト塗布	使用レジスト	回転数	回転時間
	OAP	1 <sup>st</sup> : 500[rpm]	5[sec]
		2 <sup>nd</sup> : 4000[rpm]	10[sec]
		3 <sup>rd</sup> : SLOPE	3[sec]
	OFPR800 23cp (conc.)	1 <sup>st</sup> : 500[rpm]	5[sec]
		2 <sup>nd</sup> : 4000[rpm]	20[sec]
		3 <sup>rd</sup> : SLOPE	3[sec]
レジストベーク	ホットプレート	温度	ベーク時間
		120[°C]	5[min]
パターンニング	マスクパターン	露光量	露光時間
	5 $\mu$ m Line&Space	80[mJ/cm <sup>2</sup> ]	6.0[sec]
ウェットエッチング	使用溶液	条件	時間
	フッ化水素酸水溶液 (調合済)	HF:NH <sub>4</sub> F=1:6	15[sec]
レジスト除去	アセトン		10[min]

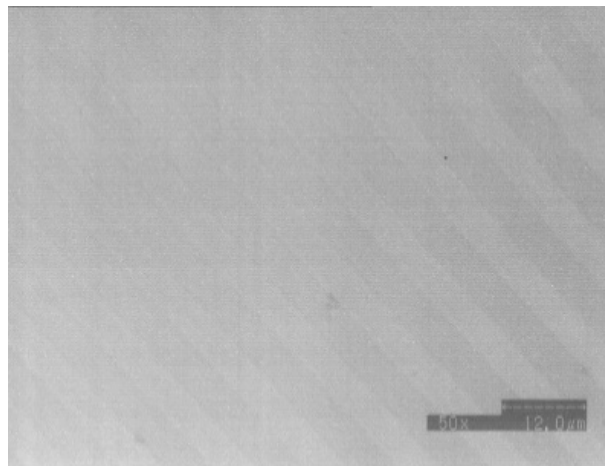


図 4.18. Wet. Etch. 後の埋め込みパターン

埋め込み SiO<sub>2</sub> 層を形成後上部の Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 層を形成する。成膜には下部 Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 層と同様に反応性 DC スパッタを用いる。条件、成膜時間は上部 Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 層と同じく表 4.23a の条件で行った。成膜された Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 層の膜厚は 396.6 nm であった。

3 章の解析結果から導波路幅は 300 nm、400 nm と 500 nm とした、またスロット形成具合の検証を目的に 1  $\mu$ m、2  $\mu$ m、3  $\mu$ m、4  $\mu$ m の太い導波路も EB 描画のパターンに加えた。使用する EB レジストは東京応化製 OEBR1000 を用いた。EB レジストの塗布条件並びに EB 描画条件を表 4.25、4.26 に示す。

表 4.25. EB レジスト塗布条件

レジスト 塗布	使用機器	スピナーコータ	
		回転数	時間
	OAP	1 <sup>st</sup> :500[rpm]	5[sec]
		2 <sup>nd</sup> :4000[rpm]	10[sec]
		3 <sup>rd</sup> :SLOPE	3[sec]
	OEBR1000 (conc.)	1 <sup>st</sup> :500[rpm]	5[sec]
		2 <sup>nd</sup> :4000[rpm]	40[sec]
		3 <sup>rd</sup> :SLOPE	3[sec]
レジスト 焼成	使用機器	OAP:ホットプレート OEBR:オーブン	
		条件	時間
	OAP	110℃	90sec
	OEBR1000	180℃	30min

表 4.26. EB 描画条件

使用機器	EB 描画装置 CABL-9200TFTN	
	条件	
加速電圧	50kV	
吸収電流	100pA	
ドーズ量	215μC/cm <sup>2</sup>	
ドーズ時間	0.54μs	
フィールドサイズ	500μm	
分解能	20000dot×20000dot	
偏向制御方式	Vector Digital	
振り幅補正值	ATTX	29302
	ATTY	28139
	SRT[mrad]	-1.72
	RANG[mrad]	-0.16
使用溶液	条件	時間
現像液 1000	現像	3min
IPA	リンス	1min

EBX によるパターンニング後のレジストマスク上に Cr を蒸着し、リフトオフを行って次のドライエッチングのためのメタルマスクを得る。ドライエッチング

による Cr の Etch. Rate は 0.57～1.12 nm/min と見積もられていることから次工程の約 1h のドライエッチングでは約 70nm 程度エッチングされてしまうと見積もられる。Cr 層厚は 100nm 程度となるように蒸着を行った。リフトオフはアセトンに 1 晩漬け置きし、エタノールでリンスし Cr マスクを得た。リフトオフ後の Cr 膜厚は 95.9 nm であった。

表 4.27. Cr 蒸着・リフトオフ条件

Cr 蒸着	使用機器	抵抗加熱真空蒸着装置 2	
		条件	
	到達真空度	$8.3 \times 10^{-6}[\text{Torr}]$	
	蒸着源	Cr	
	バイアス電流	30[A]	
	膜厚計読み	0.519[kÅ]	
リフトオフ	使用溶液	条件	時間
	アセトン	浸け置き	1 晩
	エタノール	浸け置き	1min

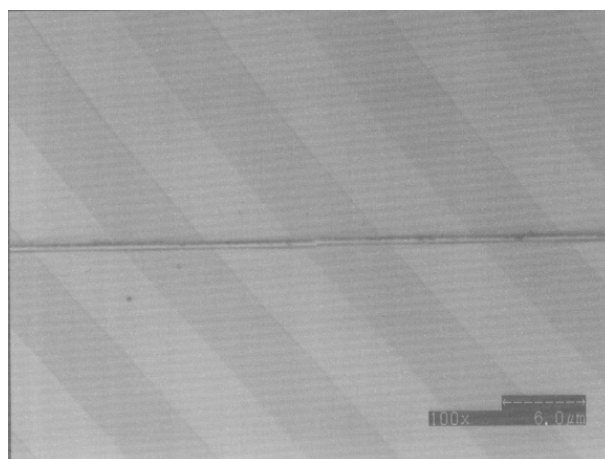


図 4.19. リフトオフ後の導波路パターン

導波路形成のためのドライエッチングは 4.1.1 項で述べた条件出しの結果をもとに実験した条件の中で最も垂直性がよいとみられる  $\text{CF}_4 : \text{Ar} = 8 : 2$  sccm, 6 Pa の条件を用いてエッチングを行った。図 4.20 はドライエッチング後の導波路断面(Cr あり)SEM 写真である。Cr マスクの直下では条件出し時の  $2 \mu\text{m}$  の線幅では観察されなかったマスク下へのアンダーカットが発生しているが、導波路上部は線幅の 300 nm 下部でも 400 から 500 nm 程度と比較的よい垂直性が得られた。一方で、この条件では  $\text{Nb}_2\text{O}_5$  表面のラフネスが発生する。

表 4.28. ドライエッチング条件

エッチング	使用機器	RIE 装置 DEM-451
	到達真空度	$3.8 \times 10^{-4}[\text{Pa}]$
	雰囲気	$\text{Ar}:\text{CF}_4=2:8[\text{sccm}]$
	ガス圧	$6.0[\text{Pa}]$
	RF 電力	$100[\text{W}]$
	エッチング時間	$45[\text{min}]$
	ダミー基板	無

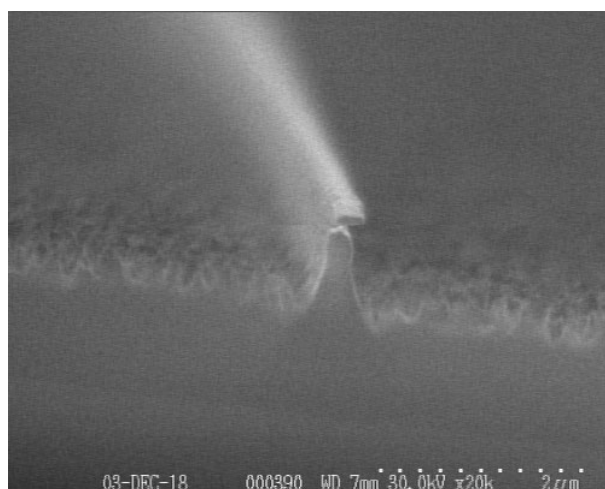


図 4.20. ドライエッチング後の SEM 写真(Cr あり)

最後にスロット部分となる埋め込み  $\text{SiO}_2$  膜を 1:6BHF によりエッチングして、中空の Air-Slot 構造を得る。エッチングは導波路の側壁からの BHF の染み込みによって進む。Etch. Rate は 4.1.3 項で示した通り、 $247.4 \text{ nm/min}$  と見積もられており、実際には導波路の両側の側壁からエッチングが進むため、 $500 \text{ nm}$  の線幅であれば、約  $2 \text{ min}$  でエッチングが完了する。エッチング条件を表 4.29 に示す。

表 4.29. ウェットエッチング条件

ウェットエッチング	使用溶液	条件	時間
	フッ化水素酸水溶液 (調合液)	$\text{HF}:\text{NH}_4\text{F}=1:6$	$5[\text{min}]$

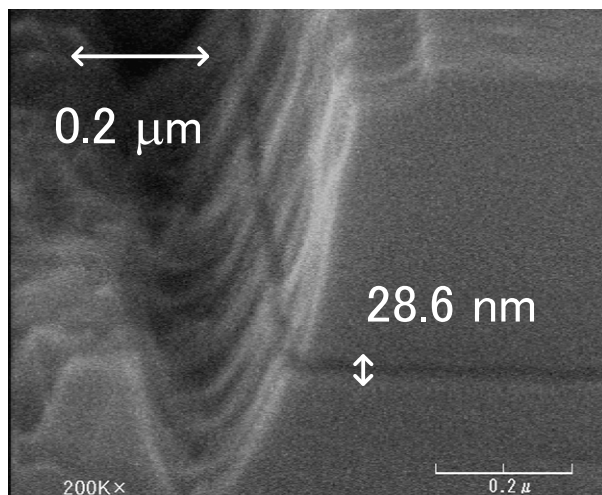
#### 4.2.3. 評価

##### 4.2.3.1. SEM 観察

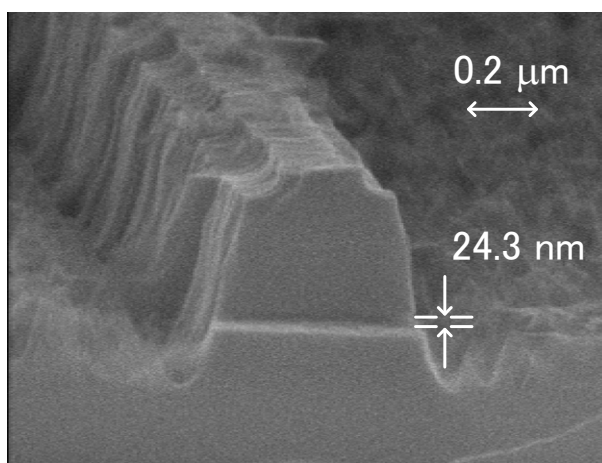
ウェットエッチング後、導波路を劈開により切り出し断面の SEM 観察を行った。スロット形成後の SEM 写真を図 4.21 に示す。導波路断面と導波路側壁の



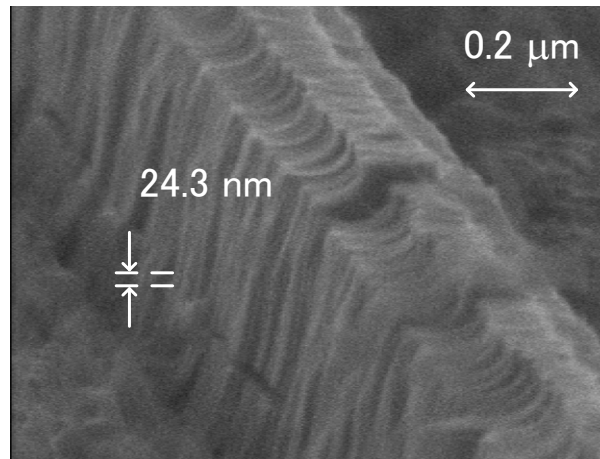
両側面から中空の 20~30 nm 程度のスロットが形成されている様子が観察できた。また薄膜堆積と選択性エッチングを用いた本製作プロセスは Air-Slot 構造を製作するのに有効である。



(a).  $w = 4 \mu\text{m}$  断面



(b).  $w = 500 \text{ nm}$  断面



(c).  $w = 500 \text{ nm}$  側壁

図 4.21. Air-Slot 形成後の SEM 写真

#### 4.3. SiO<sub>2</sub>-Slot 導波路の製作

4.2 項では Air-Slot 構造が製作できることを示した。本項では、SiO<sub>2</sub>-Slot 構造の水平スロット導波路を製作し、導波特性を示す。

##### 4.3.1. 製作プロセス

3 章では Air-Slot 構造の支持構造として、モード・プロファイルが類似しており、リブ形導波路よりも低損失に接続ができる SiO<sub>2</sub>-Slot 導波路が適していることを示した。したがって、製作プロセスは、SiO<sub>2</sub>-Slot 導波路を製作した後、必要部分を選択性エッチングによりエッチングして、Air-Slot 構造を得るようにした。図 4.22 に製作プロセスを示す。また、比較として、スロット層のみを成膜せずにリブ形導波路も製作する。

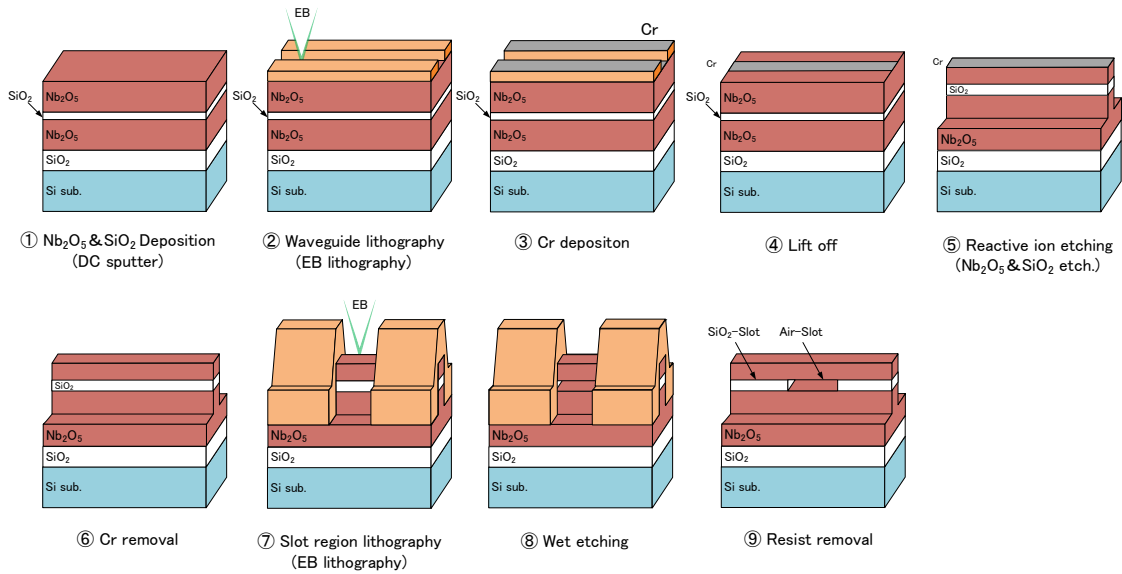


図 4.22. Air-Slot 構造を有する  $\text{SiO}_2$ -Slot 導波路の製作プロセス

#### 4.3.2. 素子製作

4.1.1 項で述べた導波路側壁の垂直性を優先したドライエッチング条件は、 $\text{Nb}_2\text{O}_5$  のエッチング面や導波路側壁にラフネスを生じるため、伝搬損失が大きくなってしまいます。したがって、 $1\ \mu\text{m}$  以下の線幅の導波路を最終的な基板の全長の  $20\ \text{mm}$  程度の長さで光を伝搬させると、損失により、導波特性の測定が難しくなる。そこで、図 4.23 のように細線導波路の入出力端にテーパ構造を設けた。これは比較的低損失な  $2\ \mu\text{m}$  の導波路で引き回しを行い、必要な領域のみ細線とし、 $2\ \mu\text{m}$  の導波路との接続には境界面での反射を低減するためにテーパ構造とするものである。細線領域長は 3.3 項で示した Slot-DBR のスロット領域長に合わせて  $150\ \mu\text{m}$  とし、細線部分とテーパ部分が EB 描画の  $500\ \mu\text{m}$  の 1 フィールドで描画できるようにテーパ部分は片側  $175\ \mu\text{m}$  とした。

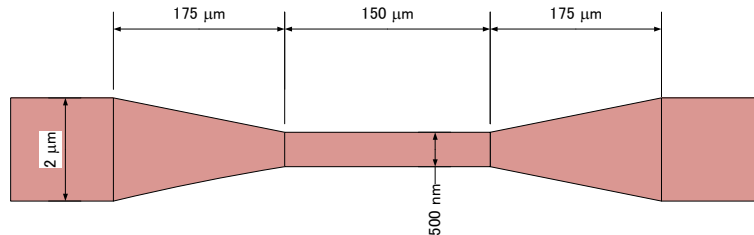


図 4.23. テーパ付き細線導波路の構造

製作には  $2\ \mu\text{m}$  の熱酸化膜付き Si ウェハを  $15 \times 25\ \text{mm}$  のサイズにカットした基板を用いる。 $\text{SiO}_2$ -Slot 導波路を基板の全長分製作するため、水平スロット導波路を構成する  $\text{Nb}_2\text{O}_5$  層と  $\text{SiO}_2$  層は 3 層を一度に成膜する。表 4.30 に基板の洗浄条件、表 4.31 に成膜条件を示す。

表 4.30. 基板洗浄

基板洗浄	使用溶液	使用条件	洗浄時間
	純水	流水	60 sec
	過硫酸	$\text{H}_2\text{SO}_4\text{:H}_2\text{O}_2 = 1\text{:}1$	10 min
	純水	リンス	60 sec
	純水	流水	60 sec
基板乾燥	使用機器	乾燥条件	乾燥時間
	90℃オーブン	90℃	5 min
		常温	10 min

表 4.31. 成膜条件

(a).  $\text{Nb}_2\text{O}_5$ 

使用装置	SPS-208CW
ターゲット	NbO
導入ガス	$\text{Ar}:\text{O}_2=25.5\text{:}4.5[\text{sccm}]$
DC 電力	1000[W]/100kHz Pulse
ソレノイド電流	+0.2[A]
空デポ	500[nm]
ガス圧	$2.01 \times 10^{-1}[\text{Pa}]$
到達真空度	$1.37 \times 10^{-3}[\text{Pa}]$
成膜レート(参考)	0.65[nm/sec]
成膜時間	615.4[sec]

(b).  $\text{SiO}_2$ 

使用装置	SPS-208CW
ターゲット	SiC
導入ガス	$\text{Ar}:\text{O}_2=30\text{:}18[\text{sccm}]$
DC 電力	1000[W]/75kHz Pulse
ソレノイド電流	+1.2[A]
空デポ	500[nm]
ガス圧	$1.23 \times 10^{-1}[\text{Pa}]$
到達真空度	$6.38 \times 10^{-4}[\text{Pa}]$
成膜レート(参考)	0.57[nm/sec]
成膜時間	35.1[sec]

導波路パターンのパターニングは EBX のフィールドつなぎ精度により損失が変化するため、4.1.3.3 項で検討した手法を用いて、EB 描画を行う。表 4.32 に

レジスト塗布条件、表 4.33 に EB 描画条件を示す。また EB レジストの現像条件は表 4.34 に示す。

表 4.32. EB レジスト塗布条件

レジスト塗布	使用機器	スピンコータ	
		回転数	時間
	OAP	1 <sup>st</sup> :500[rpm]	5[sec]
		2 <sup>nd</sup> :4000[rpm]	10[sec]
		3 <sup>rd</sup> :SLOPE	3[sec]
	OEBR1000 (conc.)	1 <sup>st</sup> :500[rpm]	5[sec]
		2 <sup>nd</sup> :4000[rpm]	40[sec]
		3 <sup>rd</sup> :SLOPE	3[sec]
プリバーク	使用機器	OAP:ホットプレート OEBR:ホットプレート	
		条件	時間
	OAP	110℃	5min
	OEBR1000	190℃	10min

表 4.33. EB 描画条件

使用機器	CABL-9200TFTN			
	条件			
加速電圧	50kV	振り幅補正時 Z position	2.66249mm	
ビーム電流	400pA			
ドーズ量	250μC/cm <sup>2</sup>	Z=0 時高さ	0.95060mm	
ドーズ時間	3.91μs	描画パターン 名	20190830_Nanowire _line_taper.sch	
フィールドサイズ	500μm	OFFSET 値	X	0.2um
分解能	20000dot×20000dot		Y	0um
偏向制御方式	Vector Digital		SRT	0mrad
振り幅補正值	ATTX	30984	RANG	0mrad
	ATTY	29861	描画待ち時間	
	SRT[mrad]	-3.97	6h	
	RANG[mrad]	-0.96		

表 4.34. 現像条件

使用溶液	条件	時間
現像液 1000	現像	3min
IPA	リンス	1min
純水	流水	1min

Cr 蒸着とリフトオフは表 4.35 の条件で行った。図 4.24 はリフトオフ後のメタルマスクの SEM 写真である。EBX のフィールドつなぎ精度は概ね 50 nm 程度以内であった。

表 4.35. Cr 蒸着・リフトオフ条件

Cr 蒸着	使用機器	抵抗加熱真空蒸着装置 2	
		条件	
	到達真空度	$9.5 \times 10^{-6} [Torr]$	
	蒸着源	Cr	
	バイアス電流	30[A]	
	膜厚計読み	0.247[kÅ]	
リフトオフ	使用溶液	条件	時間
	アセトン	立て掛け	30min
	アセトン	浸け置き	1min

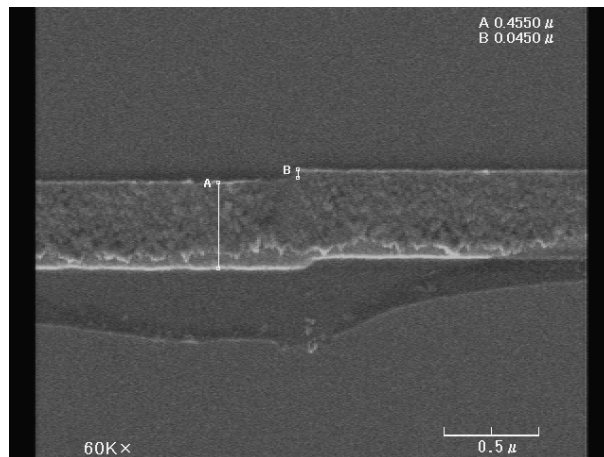


図 4.24. リフトオフ後の導波路パターン

使用するドライエッチングの条件はエッチング面にラフネスを生じさせる。このため、触針段差計では正確なエッチング量の測定は行えず、SEM による断面観察により、エッチング量を再度見積もった。SEM による測定値から 700 nm 程度のエッチングの所要時間は 49 min 程度と見込まれる。

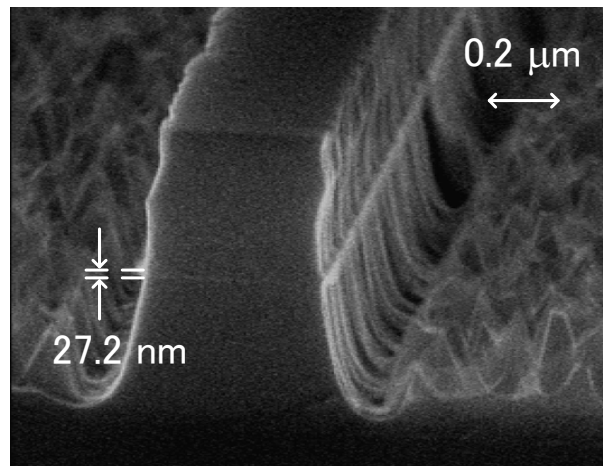
表 4.36. ドライエッチング条件

エッチング	使用機器	RIE 装置
	到達真空度	$2.5 \times 10^{-4} [Pa]$
	雰囲気	Ar:CF <sub>4</sub> =2:8[sccm]
	ガス圧	6.0[Pa]
	RF 電力	100[W]
	エッチング時間	49[min]

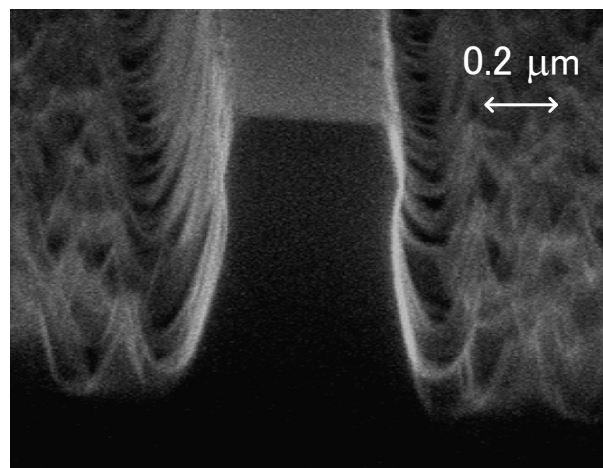
### 4.3.3. 評価

#### 4.3.3.1. SEM 観察

図 4.25 に Cr 除去後の導波路断面 SEM 写真を示す。SEM より劈開した基板外周部でのリブ高さは 780 nm(Etch. Rate: 15.92 nm/min)であった。またスロット付近の側壁角度は 87 deg. 以上と推定される。エッチング面のラフネスの高さは～200 nm 程度と推定される。図 4.25a より 27.2 nm のスロット層厚の水平スロット導波路が得られた。



(a). SiO<sub>2</sub>-Slot 導波路



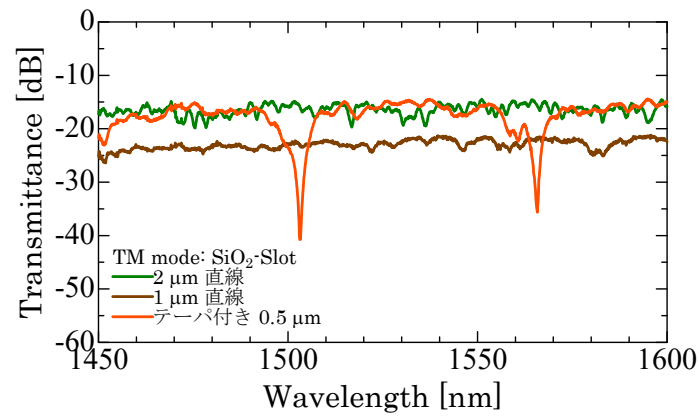
(b). リブ形導波路

図 4.25. 導波路断面 SEM 写真

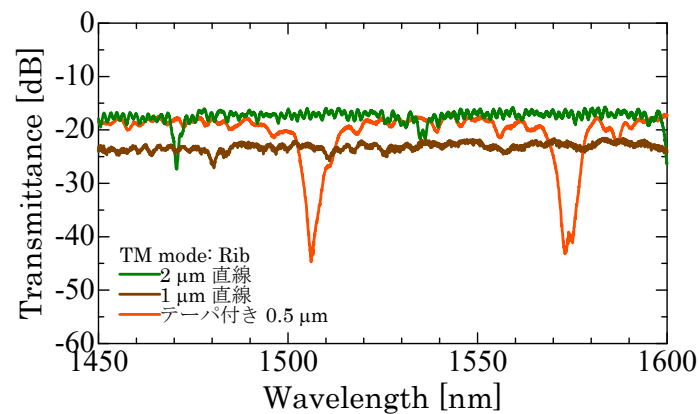
#### 4.3.3.2. 波長特性

基板の端面出しを行った後に端面結合法による波長特性の測定を行った。図 4.26 に TM-mode、図 4.27 に TE-mode の波長特性を示す。測定時の素子長は SiO<sub>2</sub>-Slot 導波路が 7.1 mm、リブ形導波路は 7.3 mm であった。TM-mode の測定結果の直線導波路の透過率はスロット層の有無で大きな変化はなく、2 μm の

SiO<sub>2</sub>-Slot 導波路で-16 dB、リブ形導波路で-17 dB であった。1  $\mu\text{m}$  で SiO<sub>2</sub>-Slot 導波路で-25dB、リブ形導波路で-26dB で比較的フラットな特性が得られた。テーパ付き 500 nm 幅の直線は透過率が-20 dB 程度であり、すべての区間を直線とした 2  $\mu\text{m}$ 、1  $\mu\text{m}$  には見られない周期的な透過率の落ち込みが見られた。その落ち込みの波長間隔は SiO<sub>2</sub>-Slot 導波路で 62 nm、リブ形導波路で 68 nm であった。TE-mode の測定結果では、2  $\mu\text{m}$  の SiO<sub>2</sub>-Slot 導波路で-16 dB、リブ形導波路で-17 dB であった。1  $\mu\text{m}$  で SiO<sub>2</sub>-Slot 導波路で-28dB、リブ形導波路で-26dB であった。テーパ付き 500 nm 幅の直線は TM-mode と同様に周期的な透過率の落ち込みが見られ、その間隔は SiO<sub>2</sub>-Slot 導波路で 46 nm、リブ形導波路で 55 nm であった。



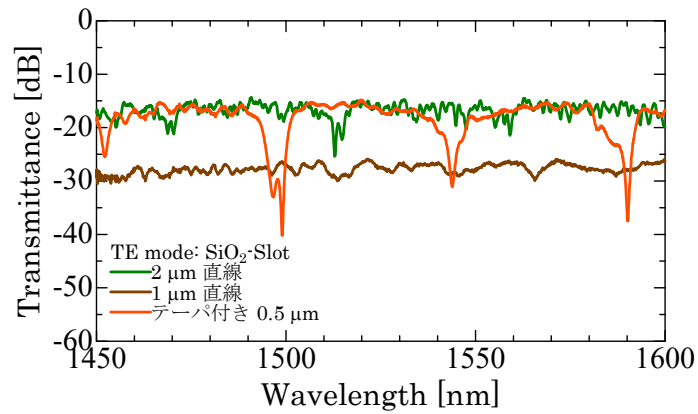
(a). SiO<sub>2</sub>-Slot 導波路



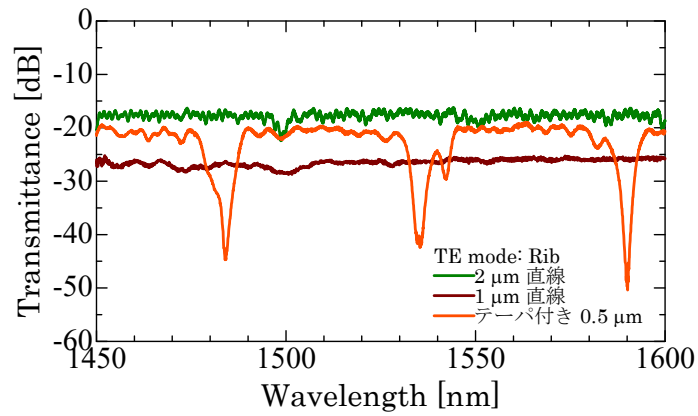
(b). リブ形導波路

図 4.26. TM-mode の波長特性





(a). SiO<sub>2</sub>-Slot 導波路



(b). リブ形導波路

図 4.27. TE-mode の波長特性

#### 4.3.3.3. 検証

波長特性の周期的な落ち込みの原因は細線と  $2\ \mu\text{m}$  の導波路の不連続な導波路構造であると考えられる。そこで図 4.28 に示す構造の導波路を製作し測定を行った。構造的要因の場合、細線部分の長さ、テーパの長さ、基板の長さで影響があると考えられる。ここでは細線部の長さのみをパラメータとしている。検証に用いた導波路はリブ形導波路である。図 4.29 に細線長  $L_n = 50 \sim 500\ \mu\text{m}$  の波長特性を示す。この試料の素子長は  $8.6\ \text{mm}$  である。

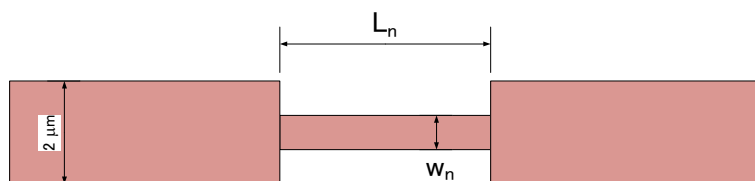
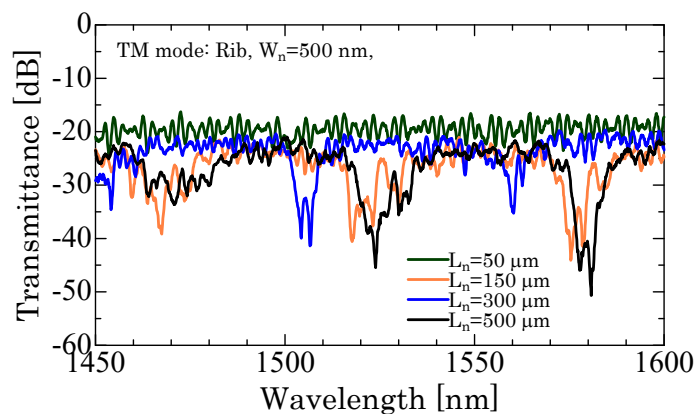
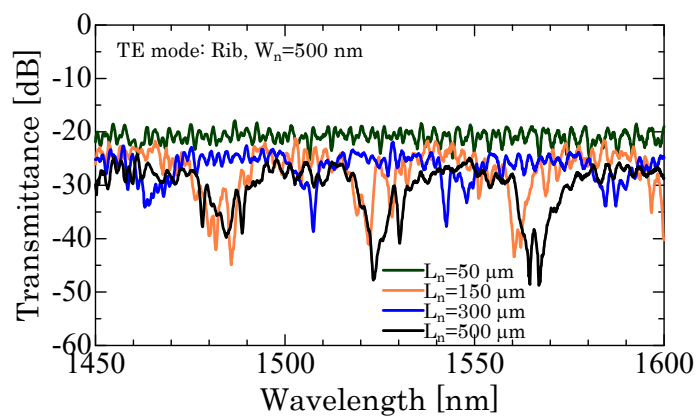


図 4.28. テーパーなし細線導波路の構造



(a). TM-mode



(b). TE-mode

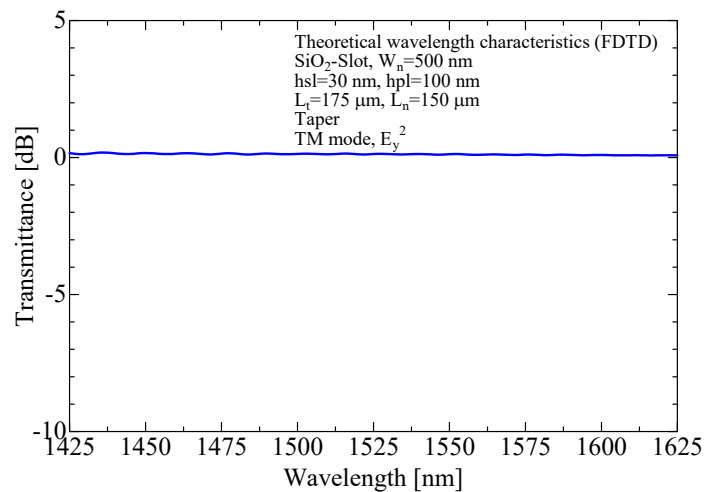
図 4.29. 検証用リブ形導波路の波長特性

測定波長特性には TE/TM mode の両方で  $L_n = 150 \sim 500\text{ }\mu\text{m}$  の範囲で比較的大きな落ち込みが生じている。一方  $L_n = 50\text{ }\mu\text{m}$  では大きな落ち込みがみられないが、図 4.27 と比較し、リップルが大きくなっている。また落ち込みが生じる波長は  $L_n = 150\text{ }\mu\text{m}$  と  $500\text{ }\mu\text{m}$  でほぼ一致しているが  $L_n = 300\text{ }\mu\text{m}$  は異なる波長に生じている。 $L_n$  の長さにより落ち込みが生じる波長が異なることから、 $2\text{ }\mu\text{m}$

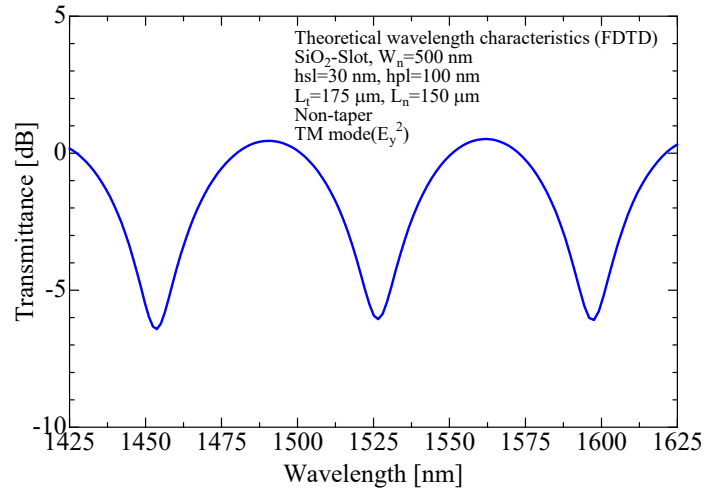
と細線部分の構造的な不連続により周期的な落ち込みが生じていると言える。しかしながら、 $L_n = 50 \mu\text{m}$  でリプルが大きくなったことや、図 4.27 の不連続のないはずの  $2 \mu\text{m}$  直線でも小さい波長特性の落ち込みがみられることから、EBX のフィールドつなぎによる構造の不連続など複合的な要因であるとみられる。

さらに、図 4.23 のテーパ付き細線導波路と図 4.28 の意図的に構造的な不連続点を持たせた導波路の波長特性の理論解析を行った。解析には FDTD 法を用い、パルス解析による、それぞれの構造の出力端での TM-mode の光パワー( $E_y^2$ )の時間応答を高速フーリエ変換し、波長特性を求めた。構造パラメータはテーパ付き細線を図 4.23 と同じとし、図 4.28 のテーパなし細線構造は  $w_n = 500 \text{ nm}$ 、 $L_n = 150 \mu\text{m}$  とした。導波路の断面構造は実測データとの比較のため、スロット層厚  $h_{sl} = 30 \text{ nm}$ 、プレーナ層厚  $h_{pl} = 100 \text{ nm}$ 、 $\text{Nb}_2\text{O}_5$  層厚  $h_c = 400 \text{ nm}$  の  $\text{SiO}_2$ -Slot 構造とした。解析により得られた波長特性を図 4.30 に示す。

図 4.30 より、測定帯域近辺での波長特性はテーパ付き細線ではフラットであるのに対し、構造的に不連続なテーパなし細線では  $-5 \text{ dB}$  程度の周期的な落ち込みが表れている。また、その波長間隔は  $70 \text{ nm}$  である。この値は図 4.26a に示した  $\text{SiO}_2$ -Slot 構造のテーパ付き細線導波路の TM-mode の波長特性の落ち込みの波長間隔  $62 \text{ nm}$  とほぼ一致する。この結果からも、波長特性の落ち込みは導波路の構造の不連続によって生じると考えられる。しかしながら、実際に製作した導波路はテーパ付き細線構造のため、理論上波長特性の落ち込みは発生しないため、製作時に生じるパターン荒さや導波路側壁のラフネスなどにより、テーパ構造が狙い通りの動作をしていないと考えられる。今後は製作トレランスの大きなテーパ構造の設計や、滑らかなパターンが得られる製作プロセスなどの工夫により、フラットな波長特性が得られると考えられる。



(a). テーパ付き細線導波路



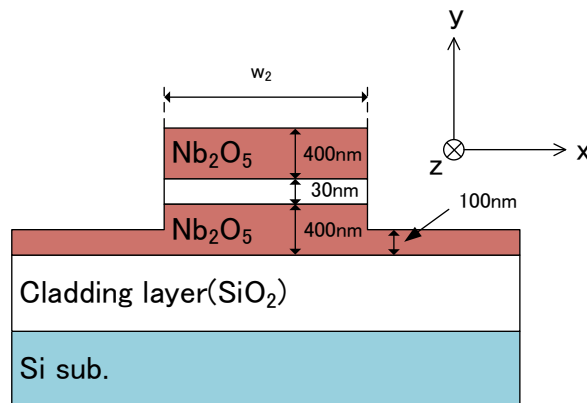
(b). テーパーなし細線導波路

図 4.30. FDTD 法による理論波長特性

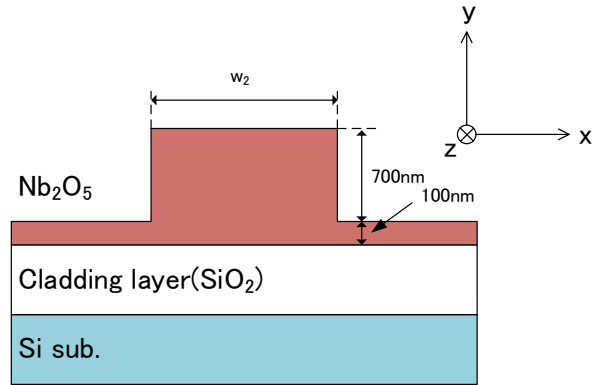
#### 4.4. SiO<sub>2</sub>-Slot Grating 導波路の製作

本項では SiO<sub>2</sub>-Slot 導波路に VG を組み合わせた素子について述べる。この素子に Air-Slot 構造を設けることで、屈折率センサを実現できる。

VG の設計は 3 章で述べた Bragg の式により行うことができる。Grating の阻止帯域が得られる Bragg 波長は測定設備の都合上、光源と光スペクトルアナライザの測定範囲の 1450-1600 nm に入るように設定する必要がある。Grating の周期  $\Lambda_g$  は EBX の描画パターンの揺らぎや導波路形成のドライエッチング量の誤差による等価屈折率の変動があるため、475、481、516、525 nm の 4 種類とした。また導波路幅  $w_2$  は 300、400、500 nm の 3 種類である。各 Grating 周期における Bragg 波長の計算値を表 4.37 に示す。製作は図 4.31 に示す SiO<sub>2</sub>-Slot 導波路とリブ形導波路の 2 種類で行い、両者の Bragg 波長の変化を評価する。



(a). SiO<sub>2</sub>-Slot 導波路



(b). リブ形導波路

図 4.31. 導波路断面構造パラメータ

表 4.37. Grating 周期に対する Bragg 波長の計算値

Bragg 波長 $\lambda_B$ [nm]	TM-mode				TE-mode			
	475nm	516nm	525nm	481nm	475nm	516nm	525nm	481nm
Rib $w_2=500$ nm	1679.7	1824.6	1856.5	1700.9	1549.6	1683.4	1712.7	1569.2
Rib $w_2=400$ nm	1588.7	1725.9	1756.0	1608.8	1449.1	1574.2	1601.6	1467.4
Rib $w_2=300$ nm	1455.7	1581.3	1608.9	1474.1	1403.4	1524.5	1551.1	1421.1
SiO <sub>2</sub> -Slot $w_2=500$ nm	1623.3	1763.4	1794.1	1643.8	1535.0	1667.5	1696.6	1554.4
SiO <sub>2</sub> -Slot $w_2=400$ nm	1537.9	1670.6	1699.7	1557.3	1444.9	1569.6	1597.0	1463.1
SiO <sub>2</sub> -Slot $w_2=300$ nm	1417.7	1540.1	1566.9	1435.6	1402.8	1523.9	1550.5	1420.5
Air-Slot $w_2=500$ nm	1545.1	1678.5	1707.8	1564.7	1529.5	1661.5	1690.5	1548.8
Air-Slot $w_2=400$ nm	1469.4	1596.2	1624.0	1487.9	1443.3	1567.8	1595.2	1461.5
Air-Slot $w_2=300$ nm	1372.9	1491.4	1517.5	1390.3	1402.5	1523.6	1550.2	1420.3

図 4.32 に VG の構造図(上面図)を示す。Grating 長  $L_g$  は  $200\ \mu\text{m}$  とし、テーパ長  $L_t$  を片側  $150\ \mu\text{m}$  として、 $2\ \mu\text{m}$  の線幅の導波路に接続する。Grating とテーパは EBX のフィールドサイズを等しくなるように合計  $500\ \mu\text{m}$  の全長とした。

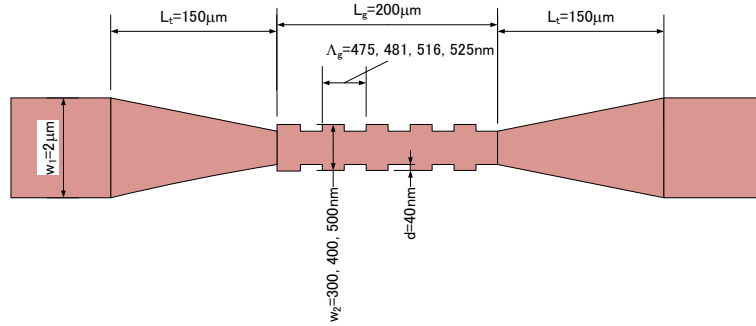
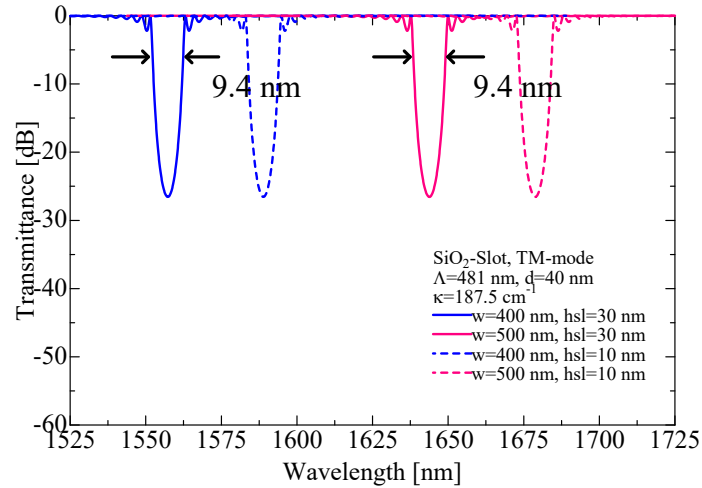
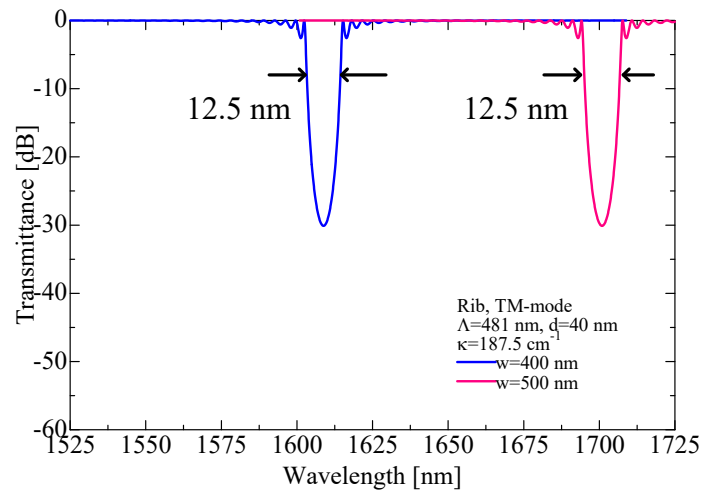


図 4.32. VG の構造図

図 4.33 にモード結合理論から計算した、 $w_2 = 400 \text{ nm}$ 、 $\Lambda_g = 481 \text{ nm}$ 、 $d = 40 \text{ nm}$  と  $w_2 = 500 \text{ nm}$ 、 $\Lambda_g = 481 \text{ nm}$ 、 $d = 40 \text{ nm}$  TM-mode の理論波長特性を示す。このときの  $\text{SiO}_2$ -Slot の Bragg 波長は表 4.37 より、 $w_2 = 400 \text{ nm}$  で  $1557.3 \text{ nm}$ 、 $w_2 = 500 \text{ nm}$  で  $1643.8 \text{ nm}$  である。またリブ形では  $w_2 = 400 \text{ nm}$  で  $1608.8 \text{ nm}$ 、 $w_2 = 500 \text{ nm}$  で  $1700.9 \text{ nm}$  である。阻止帯域幅は  $\text{SiO}_2$ -Slot 導波路の場合、 $w_2 = 400 \text{ nm}$  と  $500 \text{ nm}$  で等しく  $9.4 \text{ nm}$  と見積もられた。また、リブ形導波路の場合は  $w_2 = 400 \text{ nm}$  と  $500 \text{ nm}$  で等しく  $12.5 \text{ nm}$  であった。ここで、グレーティングの結合係数  $\kappa$  は  $187.5 \text{ cm}^{-1}$  と仮定し、スロット層厚  $h_{sl}$  は製作誤差による変動を考え、 $10 \text{ nm}$  と  $30 \text{ nm}$  の 2 種類計算した。スロット層厚が薄くなる場合、等価屈折率が高くなる傾向にあるため、VG の Bragg 波長は長波長側にシフトする。



(a).  $\text{SiO}_2$ -Slot 導波路



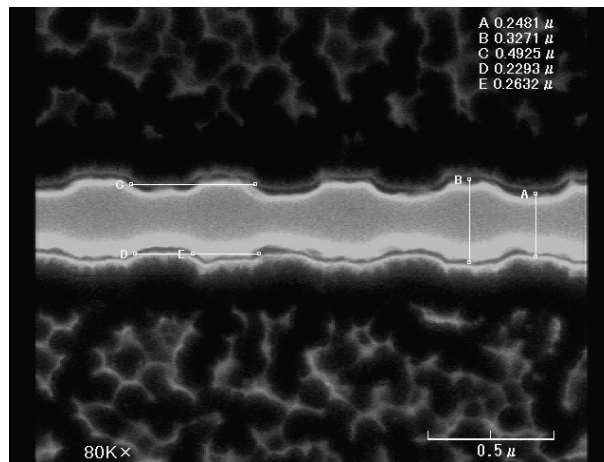
(b). リブ形導波路

図 4.33.  $w_2 = 400 \text{ nm}$ ,  $500 \text{ nm}$  時の理論波長特性

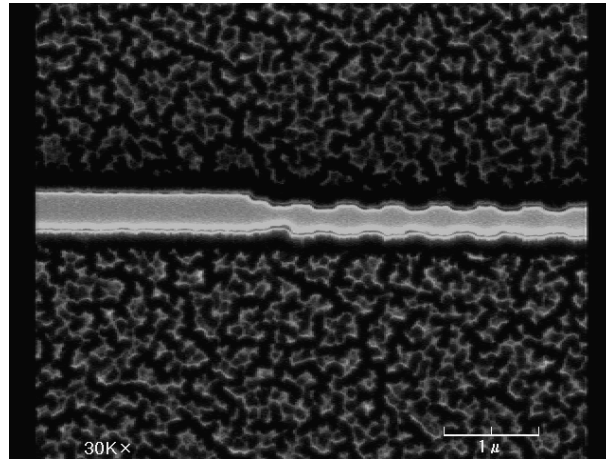
#### 4.4.1. 評価

##### 4.4.1.1. SEM 観察

図 4.34 に  $w_2 = 400 \text{ nm}$ 、 $\Lambda_g = 481 \text{ nm}$ 、 $d = 40 \text{ nm}$  で製作した素子の SEM 写真を示す。各 EB 図面のパラメータに対し、SEM により測定した、実測値は  $w_2 = 327.1 \text{ nm}$ 、 $\Lambda_g = 492.5 \text{ nm}$ 、 $d = 39.5 \text{ nm}$  であった。VG 部の導波路幅  $w_2$  は設計値に対し、 $100 \text{ nm}$  程度細くなっていた。他パラメータは比較的設計値に近い値が得られた。



(a). VG 部

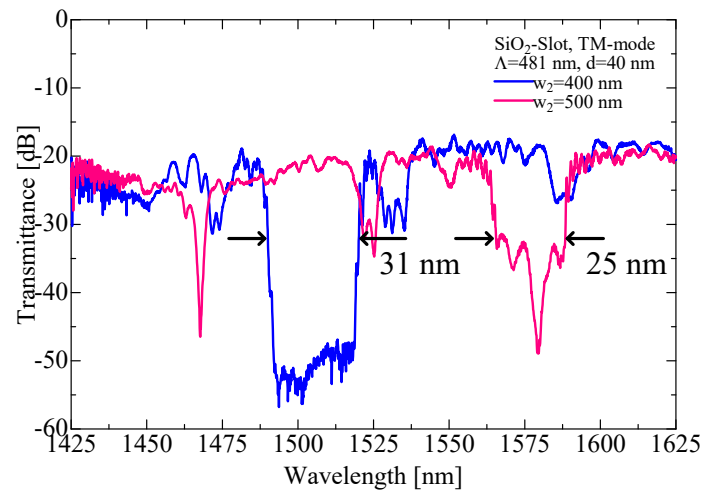


(b). VG-テーパ接続部

図 4.34. 試作 VG の SEM 写真

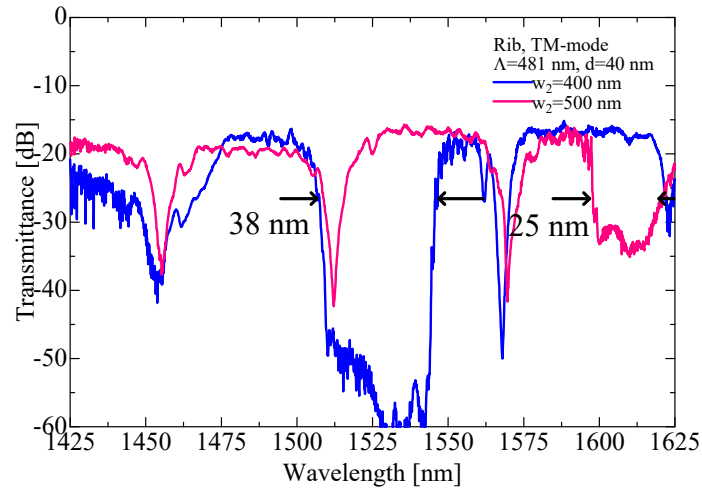
#### 4.4.1.2. 波長特性

図 4.35 に製作した、 $w_2 = 400 \text{ nm}$ 、 $\Lambda_g = 481 \text{ nm}$ 、 $d = 40 \text{ nm}$  と  $w_2 = 500 \text{ nm}$ 、 $\Lambda_g = 481 \text{ nm}$ 、 $d = 40 \text{ nm}$  TM-mode の波長特性を示す。測定時の試作素子の素子長は  $7.2 \text{ mm}$  である。



(a). SiO<sub>2</sub>-Slot 導波路





(b). リブ形導波路

図 4.35. VG の波長特性

試作した素子の波長特性において VG による阻止帯域を有する波長特性を得ることができた。測定された阻止帯域の Bragg 波長は SiO<sub>2</sub>-Slot 導波路の  $w_2=400$  nm では 1505.3 nm、 $w_2=500$  nm では 1577.0 nm であった。またリブ形導波路の  $w_2=400$  nm では 1526.2 nm、 $w_2=500$  nm では 1611.3 nm であった。どちらも理論波長特性の Bragg 波長よりも短波長側にシフトしている。これは試作素子と理論計算で差異が生じたことが主要因であると考えられる。図 4.34a に示した SEM 写真では EBX の図面の線幅を 400 nm としたのに対し、実測値は 327.1 nm であったことから、導波路幅が設計値よりも細くなったため、VG 部分の等価屈折率が低くなり、結果として Bragg 波長が短波長側にシフトしたと考えられる。また、阻止帯域幅の測定値は SiO<sub>2</sub>-Slot 導波路の  $w_2=400$  nm では 31 nm、 $w_2=500$  nm では 25 nm であった。またリブ形導波路の  $w_2=400$  nm では 38 nm、 $w_2=500$  nm では 25 nm であった。この値は理論値のおよそ 3 倍である。これは製作時の EBX の揺らぎにより、Grating 周期に揺らぎが生じ、位相誤差のために、理論値よりも広がったこと、Grating の結合係数が見込みよりも大きかったことが考えられる。実測の波長特性の阻止帯域幅から結合係数を見込むと  $749.9 \text{ cm}^{-1}$  程度であった。これは理論計算に用いた値である  $187.5 \text{ cm}^{-1}$  の 4 倍である。図 4.36 は SiO<sub>2</sub>-Slot 導波路の  $w_2=400$  nm の構造で結合係数  $749.9 \text{ cm}^{-1}$  とした場合の理論波長特性である。阻止帯域幅は 36 nm である。SiO<sub>2</sub>-Slot 導波路とリブ形導波路のそれぞれの Bragg 波長の違いから、SiO<sub>2</sub>-Slot 導波路において、スロットモードが励起されたと考えられる。

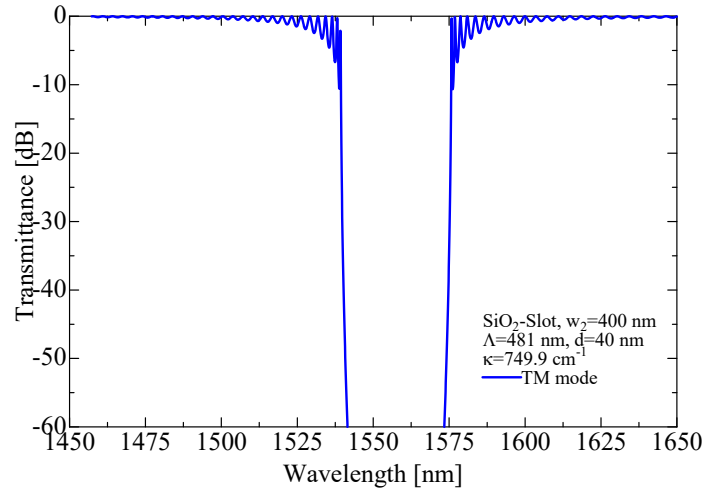


図 4.36.  $\kappa = 749.9 \text{ cm}^{-1}$  の理論波長特性

#### 4.5. Air-Slot Grating 導波路の製作

本項では 4.4 項で示した SiO<sub>2</sub>-Slot Grating 導波路に 4.3.1 項で示した、製作プロセスを用いて、VG の一部区間に Air-Slot 区間を形成した。Air-Slot 区間は区間長を長くする場合、構造的強度が強くないため、Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 材料や基板応力、製作プロセスにおいて構造が破損すると考えられる。しかしながら、区間長が短い場合においても、Grating の一部区間の等価屈折率が変化することで、位相シフトが生じ、DBR 共振器として動作させることが期待できる。ここでは図 4.37 に示す Grating 領域長 200  $\mu\text{m}$  の VG の中央部 5  $\mu\text{m}$  の領域を Air-Slot 構造とし、共振器を構成する。

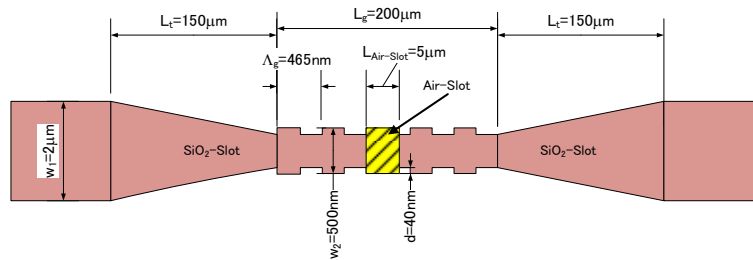


図 4.37. Air-Slot Grating 導波路の構造(上面図)

図 4.38 に Air-Slot 区間の形成前後の理論波長特性を示す。ここで、VG の構造パラメータは Grating 長  $L_g = 200 \mu\text{m}$ 、Grating 周期  $\Lambda_g = 465 \text{ nm}$ 、Grating 深さ  $d = 40 \text{ nm}$  とし、Grating の結合係数  $\kappa$  は 4.4 項の実験結果をもとに  $749.9 \text{ cm}^{-1}$  と仮定した。

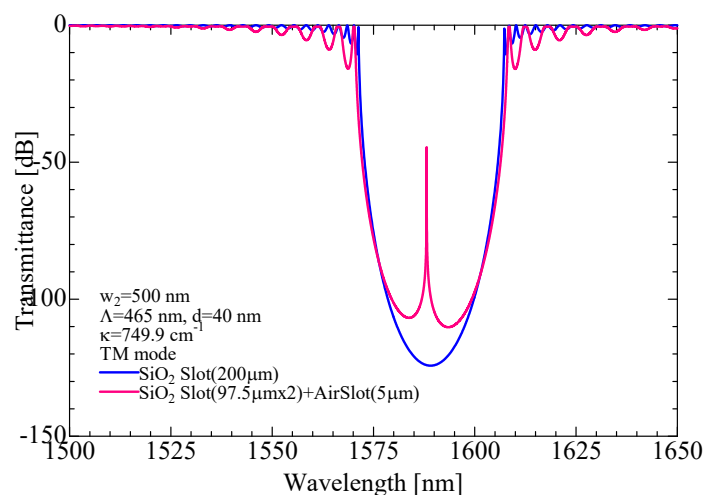


図 4.38. Air-Slot 形成前後の理論波長特性

理論計算より VG の Bragg 波長は 1589.1 nm、阻止帯域幅は 36 nm と見積もられた。また、5  $\mu\text{m}$  の Air-Slot 区間形成後には阻止帯域内に透過帯域が生じている。これにより、Air-Slot 導波路の形成の有無を判断することができる。

#### 4.5.1. 評価

##### 4.5.1.1. SEM 観察

4.3.1 項の製作プロセスを用いて、SiO<sub>2</sub>-Slot Grating 導波路を製作し、Air-Slot 区間の形成前の波長特性の測定後に、Air-Slot 区間を EBX によりパターンニング、1:6BHF によるエッチングにより Air-Slot 区間を形成した。図 4.39 は 5  $\mu\text{m}$  の Air-Slot 区間を有する Grating 導波路の SEM 写真である。また図 4.40 に SiO<sub>2</sub>-Slot 区間、Air-Slot 区間それぞれを拡大した SEM 写真を示す。現在の製作プロセス上、1:6BHF による SiO<sub>2</sub> のエッチングが横方向にも等方的に進むため区間長の厳密な制御は難しいが、SEM のスケールで 5.26  $\mu\text{m}$  の区間長の Air-Slot 区間を有する SiO<sub>2</sub>-Slot Grating 導波路を形成することに成功した。

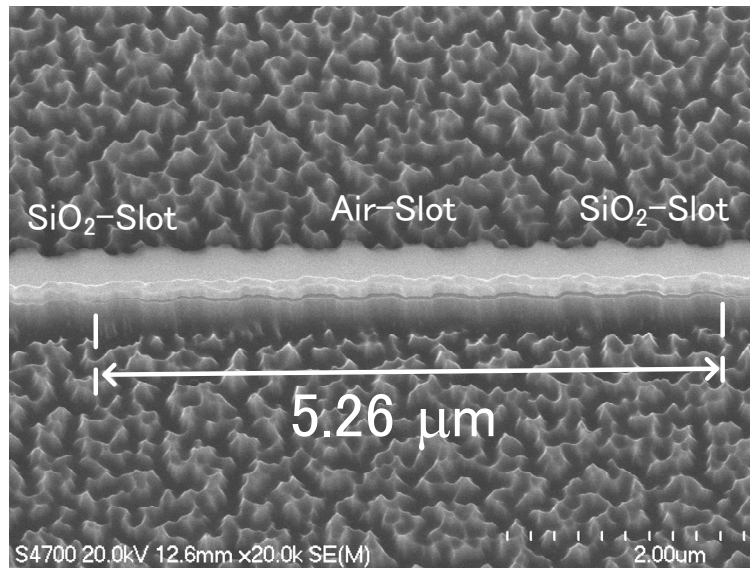
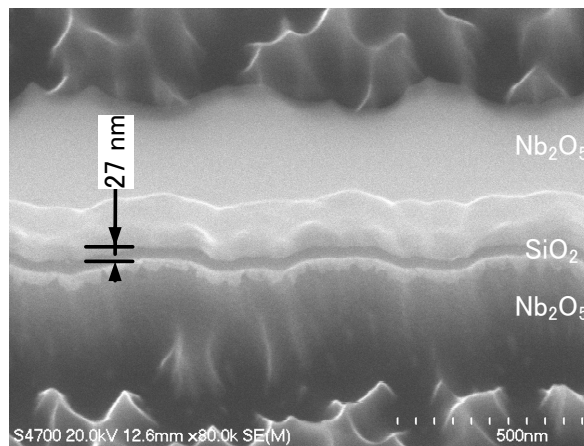
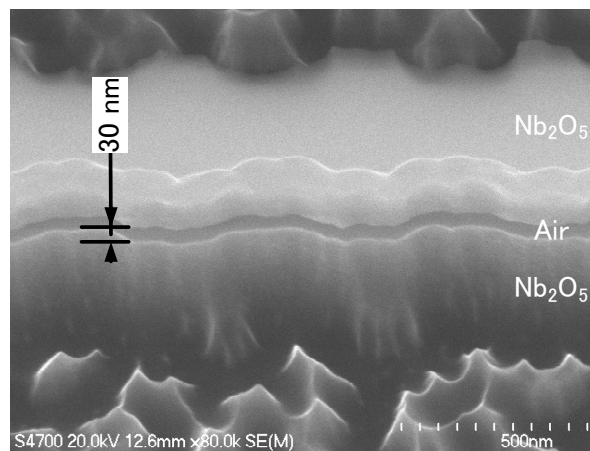


図 4.39. 5  $\mu\text{m}$  の Air-Slot 領域を有する  $\text{SiO}_2$ -Slot Grating 導波路



(a).  $\text{SiO}_2$ -Slot 区間

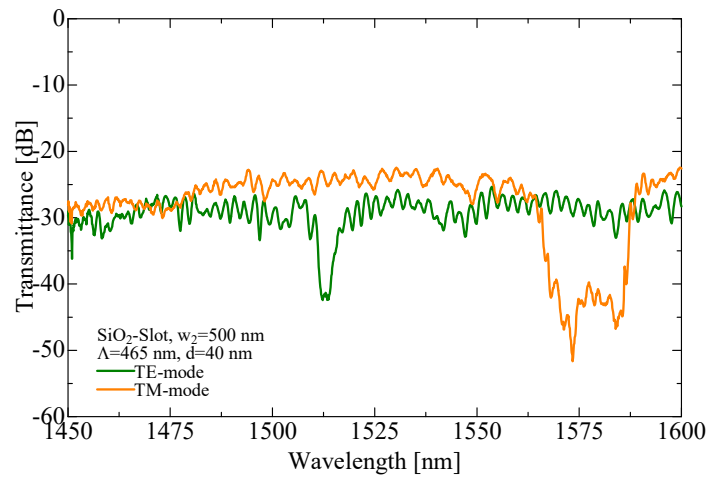


(b). Air-Slot 区間

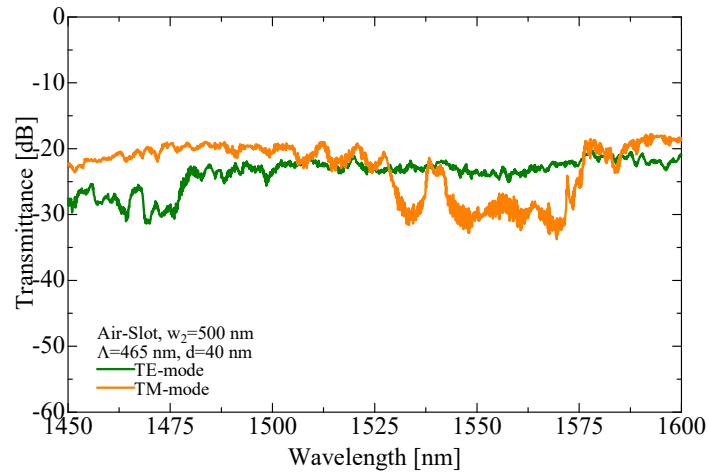
図 4.40.  $\text{SiO}_2$ -Slot 区間、Air-Slot 区間の拡大図

#### 4.5.1.2. 波長特性

製作した素子の波長特性は Air-Slot 区間形成前の全区間 SiO<sub>2</sub>-Slot 導波路の状態と 5  $\mu\text{m}$  の Air-Slot 導波路を形成した後の 2 つの段階で測定を行った。測定により得られた波長特性を図 4.41 に示す。測定した波長特性は Air-Slot 形成の前後で変化しており、Air-Slot 形成後の VG による阻止帯域全体が短波長側にシフトしている。また TM-mode の阻止帯域幅 25 nm から 49 nm に広がっていることがわかる。そして、Air-Slot 形成後には阻止帯域内に透過帯域が生じていることがわかる。これは SiO<sub>2</sub>-Slot 区間と Air-Slot 区間の等価屈折率差によって位相シフトが生じたためである。これらの波長特性の変化により、Air-Slot 導波路が形成されたと判断できる。したがって、Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 水平スロット導波路において、初めて Air-Slot 導波路の動作を実証した。また、30 nm 以下の中空スロット層を有する水平スロット導波路としては筆者の知る限り、初めての実験結果であると考えられる。



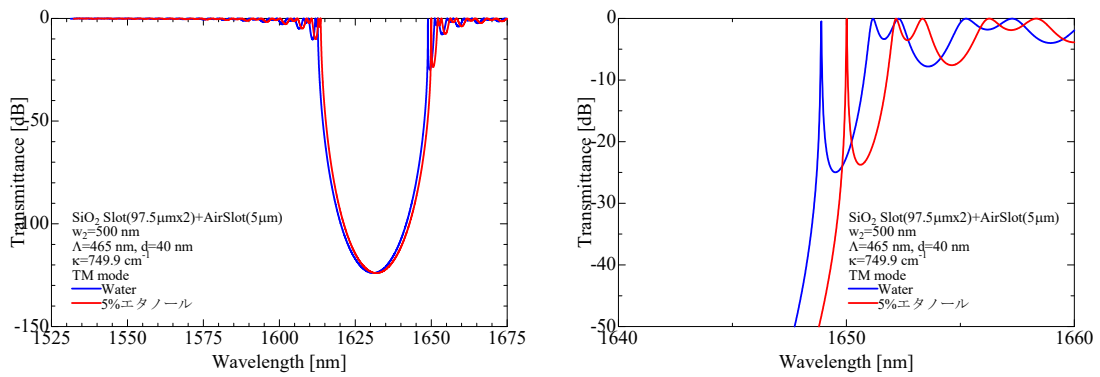
(a). Air-Slot 形成前



(b). Air-Slot 形成後

図 4.41. 試作素子の波長特性

ここで、製作した素子を用いてエタノールの濃度をセンシングした場合の波長特性の変化を見積もった。図 4.42 は水と水にエタノールを滴下し、5%となった場合の理論波長特性である。VG 全体の等価屈折率が変化するため、**Grating** の **Bragg** 波長と透過帯域の両方がシフトし、そのシフト量は 1.1 nm と見積もられた。また水と 5%エタノールの場合の **Bragg** 波長はそれぞれ、1631.26 nm と 1632.30 nm と見積もられた。



(a). 全体図

(b). 拡大図

図 4.42. エタノール濃度センシングの理論波長特性

## 第5章 結論

第 5 章では、 $\text{Nb}_2\text{O}_5$  を用いた水平スロット導波路の研究によって得られた成果をまとめる。

### 5.1. 本研究の成果

本研究で提案した  $\text{Nb}_2\text{O}_5$  を用いた水平スロット導波路は従来の導波路構造と比較して、高い光ピーク強度を得ながら、中空のスロット領域に光を局在させられることを理論解析により示した。またセンサ素子への応用に適した、中空のスロット構造を考案した薄膜堆積と選択性エッチングを組み合わせた製作プロセスを用いて、約 30 nm 程度の層厚のスロット構造を実現できている。以下に  $\text{Nb}_2\text{O}_5$  を用いた水平スロット導波路の研究によって得られた成果を示す。

- 一般的なセンサ素子に対し防爆設計や経年劣化の心配がなく、小型で集積性に優れた導波路形センサ素子を提案した。
- FEM 法と FDTD 法を用いて、理論解析により  $\text{Nb}_2\text{O}_5$  材料を用いた水平スロット導波路の特性を明らかにした。
- RI センサとして、スロット導波路に組み合わせる、波長特性を有する導波路構造を検討し、Grating 導波路の設計を行った。
- ガスセンサとしての応用を検討し、今後の検討課題を明らかにした。
- 薄膜堆積と選択性エッチングを用いた中空の水平スロット導波路の製作プロセスの確立を行った。
- 導波路幅 1  $\mu\text{m}$  以下の細線導波路を形成するための、微細加工技術のプロセス確立を行った。
- 特性の良いスロット導波路を得るために、高い垂直性を得るためのドライエッチング条件を検討した。
- $\text{Nb}_2\text{O}_5$  のエッチング面のラフネスを抑止するドライエッチング条件を確立した。
- センサ実現のための導波路構造として VG の製作プロセスの確立を行った。
- 試作した Air-Slot 構造において、30 nm 以下の微小なスロット領域を得ることに成功した。
- 試作した  $\text{SiO}_2$ -Slot 導波路において、比較的低損失な導波特性が得られた。
- VG 構造を有する  $\text{SiO}_2$ -Slot 導波路を製作し、波長特性において、Grating の阻止帯域が得られた。
- $\text{SiO}_2$ -Slot 導波路とリブ形導波路の VG の Bragg 波長の違いから、スロットモードでの光の伝搬を実証した。
- VG 構造を有する  $\text{SiO}_2$ -Slot 導波路の一部区間に Air-Slot 区間を形成し、波長特性の変化から、Air-Slot 導波路の動作を実証した。

## 5.2. 今後の課題

本項では本研究によって得られた、成果に対する今後の課題を述べる。

始めに、図 5.1 は  $\text{SiO}_2\text{-Slot}$  導波路形成後、ウェットエッチングを行い、一部区間を  $\text{Air-Slot}$  構造にした時の SEM 写真(上面図)である。 $\text{Air-Slot}$  とした区間はそれぞれ、 $50\text{ }\mu\text{m}$ 、 $100\text{ }\mu\text{m}$  であるが、両者とも上部の  $\text{Nb}_2\text{O}_5$  層が応力により歪んでしまっている。これに対する対策としては  $\text{Nb}_2\text{O}_5$  の成膜条件の検討を行い、成膜時の応力を軽減する方法か、 $\text{Air-Slot}$  区間の長さを短くして多数配置し、 $\text{SiO}_2\text{-Slot}$  区間で固定することなどを検討する必要がある。

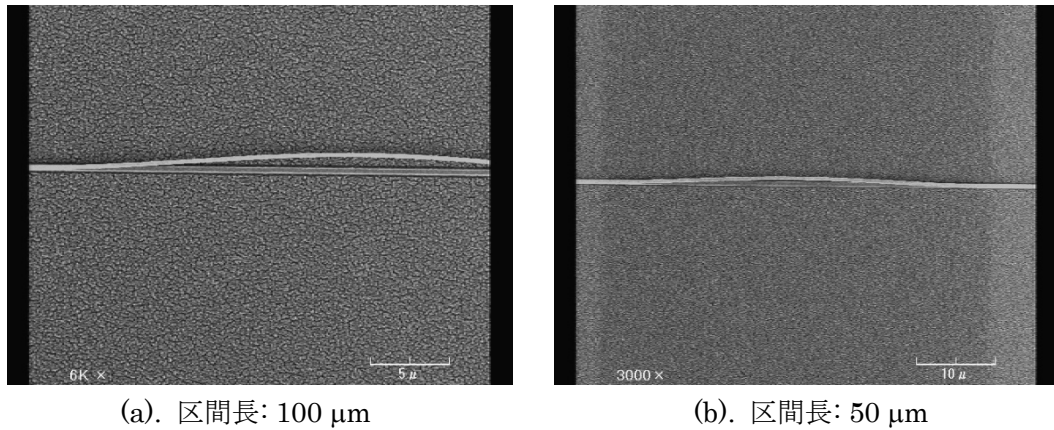


図 5.1.  $\text{Air-Slot}$  形成後の SEM 写真(上面図)

次に、製作した  $\text{SiO}_2\text{-Slot}$  導波路の波長特性には周期的な波長特性の落ち込みが存在する。これは検証により、滑らかなテーパ構造が実現できていないため、入出力の導波路と細線部分で構造的に不連続となり生じていると考えられる。 $\text{Grating}$  構造などのフィルタ特性を用いて、センシングを行う場合には、導波路としてはフラットな特性が望ましいため、今後、テーパ構造の検討などが必要である。

次に、本研究では試作素子においてセンサ素子としての動作実証は行えていない。このため、今後エタノール水溶液の濃度を用いての動作実証を行うことである。

次に、単純な等価屈折率の変化だけでは検知対象物質の種類を選択してセンシングすることができないため、既存の触媒技術などと組み合わせ、特定の検知対象物質を選択的にセンシングする工夫が必要である。

次に、ガスセンサとしての応用を考えた場合、検知対象ガスによる屈折率変化が非常に小さいため、水平スロット導波路を用いた場合でも、その波長特性の変化が小さく、難しい。今後は、水平スロット導波路と組み合わせる共振器構造の検討や、触媒技術との組み合わせを検討する必要がある。また、水平スロット導波路の特長である高い光ピーク強度を利用して、2光子吸収といった、非線形効果を用いたセンシング手法も今後の検討事項である。



### 5.3. 今後の展望

センサ素子としての動作実証はこれからであるが、その要素となる水平スロット導波路と VG 構造は実現できている。水平スロット導波路はセンサ以外の用途にも応用が可能であるため、小型のカプラやフォトディテクタ、光源素子といった光通信分野での応用も期待できる。また  $\text{Nb}_2\text{O}_5$  材料は反応性 DC スパッタにより容易に低損失な薄膜が得られることから、既存の Si フォトニクスプラットフォームと組み合わせることで、光通信デバイスとの親和性を高めることや、その自由度を高めることができると考えられる。

## 謝辞

本研究を進めるにあたり、デバイス設計から論文投稿に至るまでの研究全般にわたって熱心なご指導、ご助言をいただいた中津原 克己 教授に深く感謝申し上げます。中津原研究室には学部 3 年時から修士課程の 4 年間と、博士課程の 3 年間在席させて頂き、研究はもちろん、それ以外の部分でも大学院生としての知見を磨く良い経験となりました。学部 3 年時に受け入れてくださったこと、一度は企業に勤めた筆者を再び研究の舞台に導いてくださったことに感謝いたします。

武田 正行 研究補助員、西澤 武志 研究補助員、両氏には日ごろのクリーンルーム内の装置のメンテナンスから学生の指導など様々な場面で筆者の研究をサポートしていただきました。武田氏、西澤氏は長年企業にて半導体デバイスの研究に従事されており、クリーンルームの取り扱いや作業環境の改善など企業出身者ならではの視点でご助言下さりました。深く感謝申し上げます。

中神 隆清 名誉教授には、本学をご退職後も本研究室にご足労いただき、研究者や博士課程の大学院生としての心構えや研究に対する的確なご助言をいただきました。特に国際会議の発表練習の場面では、豊富なご経験と広い視点からご指導いただき、筆者自身初めての海外経験を無事にさせていただくことができました。深く感謝申し上げます。

株式会社 昭和真空の伊藤 利展 様には反応性 DC スパッタ SPS-208CW によって得られる  $\text{Nb}_2\text{O}_5$  膜や  $\text{SiO}_2$  膜の分光光度計による屈折率評価でご協力いただきました。また、成膜温度の制御や膜応力の制御など、真空装置メーカーならではの視点でご助言をいただきました。深く感謝申し上げます。

そして、論文審査員をお引き受けくださいました横浜国立大学の荒川 太郎 教授、本学の黄 啓新 教授、小室 貴紀 教授、三栖 貴行 教授には、様々な専門分野からの視点で、ご助言と本論文をまとめあげる上で非常に的確なご指導をいただきましたことに深く感謝申し上げます。

最後に、本研究を進めるにあたり、クリーンルーム維持のための作業から学部生の指導、実験の分担でご協力いただいた、本学を卒業された稲森 翔 氏、飯島 夏来 氏、内堀 慎太 氏、桐井 優 氏、中津原研究室の修士課程に在籍されている勝俣 直也 氏、中田 竜輔 氏、そして、今年度、本学を卒業される山中 直貴 氏、当真 祐 氏に感謝申し上げます。

また、その他、協力いただきました研究室の学生をはじめ、すべての方々に感謝申し上げます。

以上、協力していただいた皆様へ心から感謝の気持ちと御礼を、謝辞とかえさせていただきます。

参考文献

- [1] 上田 剛, “各種ガスセンサの原理と構造と特長”, 化学工学, 第 81 巻, 第 8 号, pp. 410-413, 2017
- [2] 岡崎 慎司, 横山 隆, 中川 英元, 朝倉 祝治, “光ファイバを用いた水素センサの開発動向”, 表面技術, Vol. 57, No. 4, pp. 250-256, 2006
- [3] オーシャンフォトンクス株式会社, “酸素センサの動作原理”, <https://oceanphotonics.com/product/pdf/酸素センサの動作原理.pdf>
- [4] M. K. Krihak and M. R. Shahriari, “Highly sensitive, all solid state fiber optic oxygen sensor based on the sol-gel coating technique”, Electron. Lett., Vol. 32, No. 3, pp. 240-242, 1996
- [5] 京セラ株式会社, “「光学式流量計測用モジュール」を開発”, ニュースリリース, 2020.9.25, [https://www.kyocera.co.jp/news/2020/0903\\_skap.html](https://www.kyocera.co.jp/news/2020/0903_skap.html)
- [6] 愛知時計電機株式会社, “血液の流量を光で測る”, <https://www.aichitokei.co.jp/technicalinfo/techlist/bloodmeasurement/>
- [7] 京都電子工業株式会社, “KEM 製屈折率計の測定原理”, <https://www.kyotokem.com/ja/learn/refract/>
- [8] 理研計器株式会社, “理研センサ技術概論”, <http://www.rikenkeiki.co.jp/sensa/pdf/0001.pdf>
- [9] 郷, 金子, “平面光波回路(PLC)技術を用いた ROADM スイッチ”, 2007 年電子情報通信学会総合大会, BCS-1-2, pp. S3-S4, 2007
- [10] M.P. Earnshaw, J.B.D. Soole, “Integrated reconfigurable optical wavelength add-drop multiplexer”, Electron. Lett., Vol. 38, No. 22, pp. 1351-1352, 2002
- [11] M.P. Earnshaw, M. Cappuzzo; E. Chen, L. Gomez; A. Griffin, A. Wong-Foy, J.B.D. Soole, “Progress on PLC-based wavelength switching for reconfigurable optical networks”, LEOS 2004. Vol. 2, pp. 788-789, 2004
- [12] C.R. Doerr, “Proposed WDM Cross Connect Using A Planar Arrangement of Waveguide Grating Routers and Phase Shifters”, Photonics Technology Letters, Vol. 10, No. 4, pp. 528-530, 1998
- [13] NTT フォトニクス研究所, “PLC 型 32×32 光マトリクススイッチ”, 研究成果の紹介, PLC 技術-1, 2007
- [14] 荒川 泰彦, “シリコン・フォトニクスの展望～光電子融合システムの実現に向けて～”, O plus E, Vol. 36, No. 9, 特集: シリコン・フォトニクスの展望, pp. 997-1001, September, 2014
- [15] 賣野 豊, “高密度光配線技術”, O plus E, Vol. 36, No. 9, 特集: シリコン・フォトニクスの展望, pp. 1025-1029, September, 2014
- [16] 山田 博仁, “基礎講座/ シリコンフォトニクスって何?”, 応用物理, Vol. 80, No. 12,

応用物理学会, 2011

- [17] 賣野 豊, “基本講座/ シリコンフォトニクス—何に使うの?”, 応用物理, Vol. 80, No.12, 応用物理学会, 2011
- [18] 松浦 壮佑 山作 直貴 國分 泰雄 西島 喜明 岡崎慎二 荒川太郎, "シリコンマイクロリング共振器水素ガスセンサの提案と特性評価", 信学技報, R2017-29, EMD2017-23, CPM2017-44, OPE2017-53, LQE2017-26(2017-08), pp.27-30, 2017
- [19] Soichiro Yoshida, Shintaro Ishihara, Taro Arakawa, and Yasuo Kokubun, "Highly sensitive biosensor based on silicon-microring-resonator-loaded Mach-Zehnder interferometer", Japanese Journal of Applied Physics, 56, 04CH08, 2017
- [20] 石坂 雄平, “有限要素法による金属アシスト型光導波路の解析”, 信学技報, EMT2017-17, MW2017-42, OPE2016-22, EST2017-19, MWP2017-19, pp.61-64, 2017
- [21] Minghui Liu, Lin Ma, Ciyuan Qiu, and Zuyuan He, “Refractive Index Sensor Based on Few-mode Silicon-Nitride Micro-Ring Resonator”, Proc. OECC/PSC2019, no. ME1-4, 2019.
- [22] 馬場 俊彦, 北 翔太, 羽中田 祥司, 大塚 翔太, 阿部 紘士, 成松 道正, “フォトニック結晶ナノレーザを用いたバイオセンシング”, 2011 年電子情報通信学会総合大会, CI-1-10, pp. SS18-SS19, 2011
- [23] 馬場 俊彦, 羽中田 祥司, 渡邊 敬介, 磯野 俊成, 大塚 翔太, 北 翔太, “フォトニック結晶ナノレーザによる高感度バイオセンシング”, 2013 年電子情報通信学会総合大会, C-4-22, pp. 267, 2013
- [24] 渡部 工, 羽中田 祥司, 古田 祐樹, 岸 洋次, 西島 喜明, 馬場 俊彦, "フォトニック結晶ナノレーザバイオセンサにおけるセンサ界面の考察", 第 62 回応用物理学会春季学術講演会, 13p-D5-2, 2013
- [25] 羽中田 祥司, 渡部 工, 馬場 俊彦, "フォトニック結晶ナノレーザによる不純物を含む試料からの前立腺癌マーカーの高感度検出(II)", 第 62 回応用物理学会春季学術講演会, 13a-D6-9, 2013
- [26] V.R. Almeida, Q. Xu, C.A. Barrios, and M. Lipson, “Guiding and confining light in void nanostructure,” Opt. Lett., vol.29, no.11, pp.1209–1211, 2004.
- [27] C. A. Barrios, B. Sánchez, K. B. Gylfason, A. Griol, H. Sohlström, M. Holgado and R. Casquel, “Demonstration of slot-waveguide structures on silicon nitride / silicon oxide platform”, Opt. Express, vol. 15, no. 11, pp. 6846–6856, 2007.
- [28] Q. Xu, V. R. Almeida, R. R. Panepicci, and M. Lipson, “Experimental demonstration of guiding and confining light in nanometer-size low-refractive-index material”, Opt. Lett., vol. 29, no. 11, pp. 1626–1628, 2004.
- [29] C. A. Barrios, K. B. Gylfason, B. Sánchez, A. Griol, H. Sohlström, M. Holgado, and

- R. Casquel, "Slot-waveguide biochemical sensor", *Opt. Lett.*, vol. 32, no. 21, pp. 3080–3082, 2007.
- [30] X. Tu, J. Song, T. -Y. Liow, M. K. Park, J. Q. Yiying, J. S. Kee, M. Yu, and G. -Q. Lo, "Thermal independent Silicon-Nitride slot waveguide biosensor with high sensitivity", *Opt. Express*, vol. 20, no. 3, pp. 2640–2648, 2012.
- [31] F. Dell'Olio and V. M. N. Passaro, "Optical sensing by optimized silicon slot waveguides", *Opt. Express*, vol. 15, no. 8, pp. 4977–4993, 2007.
- [32] J. T. Robinson, L. Chen, and M. Lipson, "On-chip gas detection in silicon optical microcavities", *Opt. Express*, vol. 16, no. 6, pp. 4296–4301, 2008.
- [33] C. A. Barrios, M. J. Bañuls, V. González-Pedro, K. B. Gylfason, B. Sánchez, A. Griol, A. Maquieira, H. Sohlström, M. Holgado, and R. Casquel, "Label-free optical biosensing with slot-waveguides", *Opt. Lett.*, vol. 33, no. 7, pp. 708–710, 2008.
- [34] T. Claes, J. G. Molera, K. D. Vos, E. Schacht, R. Baets, and P. Bienstman, "Label-Free Biosensing With a Slot-Waveguide-Based Ring Resonator in Silicon on Insulator", *IEEE Photonics J.*, vol. 1, no. 3, pp. 197–204, 2009.
- [35] K. B. Gylfason, C. F. Carlborg, A. Kaźmierczak, F. Dortu, H. Sohlström, L. Vivien, C. A. Barrios, W. van der Wijngaart, and G. Stemme, "On-chip temperature compensation in an integrated slot-waveguide ring resonator refractive index sensor array", *Opt. Express*, vol. 18, no. 4, pp. 3226–3237, 2010.
- [36] Q. Liu, J. S. Kee, and M. K. Park, "A refractive index sensor design based on grating-assisted coupling between a strip waveguide and a slot waveguide", *Opt. Express*, vol. 21, no. 5, pp. 5897–5909, 2013.
- [37] X. Wang and C. K. Madsen, "Highly sensitive compact refractive index sensor based on phase-shifted sidewall Bragg gratings in slot waveguide", *Appl. Opt.*, vol. 53, no. 1, pp. 96–103, 2014.
- [38] 友野裕貴, 貝原輝則, 清水大雅, "Si スロット導波路におけるセンサ感度の最適化に関する研究", 第 64 回応用物理学会春季学術講演会, 15p-P2-9, 2015
- [39] Q. Liu, Z. Gu, M. K. Park, and J. Chung, "Experimental demonstration of highly sensitive optical sensor based on grating-assisted light coupling between strip and slot waveguides", *Opt. Express*, vol. 24, no. 12, pp. 12549–12556, 2016.
- [40] Y. Tomono and H. Shimizu, "High Q Si Slot Waveguide Ring Resonators for Gas Sensing Application", *Proc. CLEO 2018*, no. JTh2A60, 2018.
- [41] T. Fujisawa and M. Koshiba, "Guided modes of nonlinear slot waveguides", *Photonics Technol. Lett.*, vol. 18, no. 14, pp. 1530–1532, 2006.
- [42] C. Koos, P. Vorreau, T. Vallaitis, P. Dumon, W. Bogaerts, R. Baets, B. Esembeson, I. Biaggio, T. Michinobu, F. Diederich, W. Freude and J. Leuthold, "All-optical high-

- speed signal processing with silicon–organic hybrid slot waveguides”, *Nat. Photonics*, vol. 3, pp. 216–219, 2009.
- [43] C. Koos, L. Jacome, C. Poulton, J. Leuthold and W. Freude, “Nonlinear silicon-on-insulator waveguides for all-optical signal processing”, *Opt. Express*, vol. 18, no. 4, pp. 3226–3237, 2010.
- [44] C. A. Barrios and M. Lipson, “Electrically driven silicon resonant light emitting device based on slot-waveguide”, *Opt. Express*, vol. 13, no. 25, pp. 10092–10101, 2005.
- [45] M. Komatsu, K. Saitoh, and M. Koshiba, “Design of miniaturized silicon wire and slot waveguide polarization splitter based on a resonant tunneling”, *Opt. Express*, vol. 17, no. 21, pp. 19225–19234, 2009.
- [46] J. Wang, Z. Cheng, Z. Chen, X. Wan, B. Zhu, H. K. Tsang, C. Shu, and J. Xu, “High-responsivity graphene-on-silicon slot waveguide photodetectors”, *Nanoscale*, vol. 8, no. 27, pp. 13206–13211, 2016.
- [47] 渥裕樹, 小田学, 西山伸彦, 荒井滋久, "BCB 埋め込み Si 細線スロット導波路を用いた温度無依存波長フィルタ", 信学技報, OPE-Vol.110No.352-POPE2010-139, 2010
- [48] N.-N. Feng, J. Michel, and L. C. Kimerling, “Optical field concentration in low-index waveguides”, *IEEE J. Quantum Electron.*, vol. 42, no. 9, pp. 885–890, 2006.
- [49] P. Müllner and R. Hainberger, *IEEE Photonics Technol. Lett.*, “Structural Optimization of Silicon-On-Insulator Slot Waveguides”, vol. 18, no. 24, pp. 2557–2559, 2006.
- [50] R. Sun, P. Dong, N. N. Feng, C. Y. Hong, J. Michel, M. Lipson, and L. Kimerling, “Horizontal single and multiple slot waveguides: optical transmission at  $\lambda=1550$  nm”, *Opt. Express*, vol. 15, no. 26, pp. 17967–17972, 2007.
- [51] 牧野 俊太郎, 石坂 雄平, 齊藤 晋聖, "横スロット導波路に基づく 1-D PC-CROW の提案", 2014 年電子情報通信学会総合大会, C-3-39, 2014
- [52] C. A. Barrios, “Ultrasensitive Nanomechanical Photonic Sensor Based on Horizontal Slot-Waveguide Resonator”, *IEEE Photonics Technol. Lett.*, vol. 18, no. 22, pp. 2419–2421, 2006.
- [53] S. Lee, S. C. Eom, J. S. Chang, C. Huh, G. Y. Sung, and J. H. Shin, “A silicon nitride microdisk resonator with a 40-nm-thin horizontal air slot”, *Opt. Express*, vol. 18, no. 11, pp. 11209–11215, 2010.
- [54] S. Lee, S. C. Eom, J. S. Chang, C. Huh, G. Y. Sung, and J. H. Shin, “Label-free optical biosensing using a horizontal air-slot SiNx microdisk resonator”, *Opt. Express*, vol. 18, no. 20, pp. 20638–20644, 2010.
- [55] C. Viphavakit, M. Komodromos, C. Themistos, W. S. Mohammed, K. Kalli, and B. M.

- A. Rahman, "Optimization of a horizontal slot waveguide biosensor to detect DNA hybridization", *Applied Optics*, vol. 54, no. 15, pp. 4881–4888, 2015.
- [56] P. Müllner, M. Wellenzohn, and R. Hainberger, "Nonlinearity of optimized silicon photonic slot waveguides", *Opt. Express*, vol. 17, no. 11, pp. 9282–9287, 2009.
- [57] H. Zhang, Y. Huang, S. Das, C. Li, M. Yu, P. G. –Q. Lo, M. Hong, and J. Thong, "Polarization splitter using horizontal slot waveguide", *Opt. Express*, vol. 21, no. 3, pp. 3363–3369, 2013.
- [58] J. Xiao, X. Liu, and X. Sun, "Design of an ultracompact MMI wavelength demultiplexer in slot waveguide structures", *Opt. Express*, vol. 15, no. 13, pp. 8300–8308, 2007.
- [59] R. Guider, N. Daldosso, A. Pitanti, E. Jordana, J. –M. Fedeli, and L. Pavesi, "NanoSi low loss horizontal slot waveguides coupled to high Q ring resonators", *Opt. Express*, vol. 17, no. 23, pp. 20762–20770, 2009.
- [60] C. A. Barrios, Q. Xu, J. Shakya, C. Manolatu, and M. Lipson, "Compact silicon slot-waveguide disk resonator", *Proc. 2006 CLEO/QELS: 2006 Conference on Lasers and Electro-Optics and 2006 Quantum Electronics and Laser Science Conference (Long Beach, CA)*, no. CTuCC3, 2006.
- [61] C. Xiong, W. H. P. Pernice, M. Li1 and H. X. Tang, "High performance nanophotonic circuits based on partially buried horizontal slot waveguides", *Opt. Express*, vol. 18, no. 20, pp. 20690–20698, 2010.
- [62] X. Xu, T. Inaba, T. Tawara, H. Omi, and H. Gotoh, "Horizontal Slot Waveguides with Strong Optical Confinement in Low Refractive Index Oxide Films", *Proc. OECC/PSC 2019*, no. ME2-3, 2019.
- [63] 西原 浩, 春名 正光, 栖原 敏明, "光集積回路(改訂増補版)", pp.153-157,1993
- [64] soitec, "Smart Cut Technology", <https://www.soitec.com/en/products/smart-cut>
- [65] D. T. H. Tan, D. K. T. Ng, K. J. A. Ooi, E. Sahin, J. W. Choi, P. Xing, G. F. R. Chen, B. U. Sohn, H. Gao, "Nonlinear optical signal processing in CMOS-compatible ultra-silicon-rich nitride devices", *Proc. OECC/PSC2019*, no. ME1-1, 2019.
- [66] Ph. Helin, A. Firrincieli, A. Ray Chaudhuri, N. Pham, S. Lenci, M. Mannarino, H. Osman, "A Versatile LPCVD Silicon Nitride Platform For Heterogenous Photonic Circuits: Ultra Tight Thickness Control And Low Propagation Loss", *Proc. OECC/PSC2019*, no. ME1-2, 2019.
- [67] Zhihua Tu, Taoce Yin, Lars H. Frandsen, Daru Chen, Shiming Gao and Xiaowei Guan, "Optical Properties of A Silicon-Rich Nitride Ridge Waveguide at 2  $\mu\text{m}$  Wavelengths", *Proc. OECC/PSC2019*, no. ME1-3, 2019.
- [68] R. Kou, N. Yamamoto, G. Fujii, T. Aihara, T. Tsuchizawa, A. Ishizawa, K. Hitachi, H.

- Gotoh, M. Ukibe, and K. Yamada, “100 °C deposited transparent silicon nitride film for O-band photonic applications”, Proc. MOC2019, no. B-4, 2019.
- [69] R. L. Aagard, “Optical waveguide characteristics of reactive dc - sputtered niobium pentoxide films”, Appl. Phys. Lett., vol. 27, no. 11, pp. 605–607, 1975.
- [70] S. J. Ingley, W. D. Westwood, Y. C. Cheng and J. Wei, “Variable refractive-index and birefringent waveguides by sputtering tantalum in O<sub>2</sub>-N<sub>2</sub> mixtures”, Appl. Opt., 14, pp.2194, 1975
- [71] S. J. Ingley, W. D. Westwood, “Birefringent waveguides prepared by reactive sputtering of niobium in O<sub>2</sub>-N<sub>2</sub> mixtures”, Appl. Opt., 15, 3, pp.607, Mar. 1976
- [72] R. L. Aagard, L. T. Shepherd, and R. P. Ulmer, “Electron - beam and photolithographic fabrication of guided - wave optical components”, J. Appl. Phys., vol. 48, no. 10, pp. 4149–4151, 1977.
- [73] K. Lodewijks, S. Jayachandran, T. D. Kongnyuy, S. Lenci, S. Das, P. Van Dorpe, A. Humbert, R. Jansen, S. Severi, and X. Rottenberg, “Low loss high refractive index niobium oxide waveguide platform for visible light applications”, Proc. Integrated Photonics Research, Silicon and Nanophotonics, 2018 no. ITh2B.3, 2018.
- [74] 株式会社昭和真空, “小型 AR 用スパッタリング装置 SPS-208CW”, <https://www.showashinku.co.jp/product/SPS-208CW.html>
- [75] 榑原健太郎, 稲森翔, 武田正行, 中津原克己, “可変波長フィルタのための強誘電性液晶装荷 Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 導波路の検討”, 第 64 回応用物理学会春季学術講演会, 16a-316-6, 2017.
- [76] 内堀慎太, 武田正行, 西澤武志, 中津原克己, “Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 導波路を用いた液晶装荷 MZI 型光スイッチの理論特性と製作プロセスの検討”, 信学技報, vol.117, no.339, pp.63-68, 2017.
- [77] 友野 裕貴, 清水 大雅, “ガスセンサへの応用に向けた Si スロット導波路リング共振器の作製と共振特性の評価”, 第 2 回集積光デバイスと応用技術研究会, IPDA2017-P26, 2017.
- [78] 小柴 正則, “光導波路解析”, pp.1-3, 朝倉書店
- [79] 小柴 正則, “光導波路解析”, pp.25-26, 朝倉書店
- [80] 小柴 正則, “光導波路解析”, pp.27-28, 朝倉書店
- [81] 西原 浩, 春名 正光, 栖原 敏明, “光集積回路”, pp.18-19, オーム社
- [82] 小柴 正則, “光導波路解析”, pp.3-7, 朝倉書店
- [83] 八重樫 浩樹, “シリコン細線光導波路プラットフォーム”, O plus E, vol. 36, no. 9, pp.1002-1006, 2014
- [84] K. Nakatsuhara, A. Kato, and Y. Hayama, “Latching operation in a tunable wavelength filter using Si sampled grating waveguide with ferroelectric liquid crystal cladding”, Opt. Express, vol. 22 no. 8, pp.9597–9603, 2014.



- [85] K. Nakatsuhara, A. Kato, and Y. Hayama, “Bragg reflector waveguide array with ferroelectric liquid crystal cladding for optical tunable wavelength filters”, *Jpn. J. Appl. Phys.*, vol. 53, no. 8S2, pp. 08MB08-1–08MB08-4, 2014.
- [86] A. Kato, K. Nakatsuhara, and Y. Hayama, “Switching Operation in Tunable Add-Drop Multiplexer with Si-Grating Waveguides Featuring Ferroelectric Liquid Crystal Cladding”, *J. Light. Technol.*, vol. 32, no. 22, pp.4464–4470, 2014.
- [87] 小柴 正則, “光導波路解析”, pp.76-77, 朝倉書店
- [88] 西原 浩, 春名 正光, 栖原 敏明, “光集積回路”, pp.34-36, オーム社
- [89] S. G. Johnson, M. Ibanescu, M. Skorobogatiy, O. Weisberg, T. D. Engeness, M. Soljacic, S. A. Jacobs, J. D. Joannopoulos, and Y. Fink, “Low-loss asymptotically single-mode propagation in large-core OmniGuide fibers”, *Opt. Express*, vol. 9, no. 13, pp. 748–779, 2001.
- [90] 西原 浩, 春名 正光, 栖原 敏明, “光集積回路”, pp.71-73, オーム社
- [91] 辻 寧英, 小柴 正則, “グレーティング光導波路の非反復ビーム伝搬法”, *電子情報通信学会論文誌, C-I*, vol. J81-C-I, no. 2, pp. 89-93, 1998.
- [92] 西原 浩, 春名 正光, 栖原 敏明, “光集積回路”, pp.55-69, オーム社
- [93] 山内 潤治, 藪 哲郎, “光導波路解析入門”, pp.207-208 森北出版株式会社
- [94] H. Kogelnik, and C. V. Shank, “Coupled-Wave Theory of Distributed Feedback Lasers”, *J. Appl. Phys.*, vol. 43, no. 5, pp.2327-2335, 1972
- [95] 小柴 正則, “光波の電磁界解析法”, *日本光学会会誌*, 27 巻, 11 号, pp. 622-625, 1998
- [96] 柴山 純, 齊藤 普聖, “光分野におけるシミュレーション技術とデバイス解析への応用”, *電子情報通信学会会誌*, vol. 96, no. 6, pp. 406-410, 2013
- [97] synopsys, “RSoft FemSIM v2018.12 User Guide”, pp. 13-15.
- [98] 市川 裕之, “時間領域差分法”, *日本光学会会誌*, 35 巻, 7 号, pp. 340-347, 2006
- [99] H. Perry and W. Green, *Perry’s Chemical Engineers Handbook* (McGraw-Hill, New York, 1997) 6th ed., pp. 3.
- [100] 佐藤勇志, 緒方優紀, 松田豊稔, 小田川裕之, “表面プラズモンセンサによる水素検出”, 第 26 回熊本県産学官技術交流会, 124, 2011
- [101] W. Streifer, D. R. Scifres, R. D. Bumham, “Coupling Coefficients for Distributed Feedback Single- and Double-Heterostructure Diode Lasers”, *IEEE J. Quantum Electron.*, vol. QE-11, no. 11, pp. 867–873, 1975.
- [102] W. Streifer, D. R. Scifres, R. D. Bumham, “TM-Mode Coupling Coefficients in Guided-Wave Distributed Feedback Lasers”, *IEEE J. Quantum Electron.*, vol. QE-12, no. 2, pp. 74–78, 1976.
- [103] 田島, 林, メイワール, アサワメーターバン, 中野, “重み付け電子線露光によるチャープトグレーティングの試作と DFB レーザへの応用”, *信学技報, OPE2000-8*, pp. 43-

48, 2000

- [104] 田島, ウイーラチャイ, アサワメーターバン, 林, メイワ, 中野, “重み付け電子線露光を用いた線形チャープトグレーティング DFB レーザ増幅器の作製”, 電子情報通信学会エレクトロニクスソサイエティ大会, C-4-14, pp. 285, 2000
- [105] 田中 敦, 岡野 慎司, 辻 正治, 西村 幸雄, “Ar/CF<sub>4</sub>混合ガスの放電フロー中でのシリコンのケミカルドライエッチング-エッチャント生成に関する Ar 活性種の同定-”, 九州大学大学院総合理工学報告, vol. 22, no. 3, pp. 267-271, 2000.
- [106] 大原 淳士, 加納 一彦, 竹内 幸祐, “深堀ドライエッチングによる微細部品形成”, 表面技術協会会誌, vol. 59, no. 2, pp. 16-21, 2008.
- [107] 関根 誠, “プラズマエッチング装置技術開発の経緯, 課題と展望”, J. Plasma Fusion Res., vol.83, no.4, pp. 319-324, 2007.
- [108] CRESTEC, “CABL-9200TFTN オペレーショントレーニング資料”, 2018.12.17.
- [109] 長岡 史郎, 水澤 崇, 田中 友樹, 赦 金平, 大野 泰, “2 層電子線レジストによる極微細加工用レジストプロセス”, 詫間電波工業高等専門学校研究紀要, 37 号, pp. 87-92, 2009.