

平成24年度 修士論文

ZnO 薄膜を用いた光導波路型波長変換デバイス  
の設計と作製に関する研究

指導教員 花泉 修 教授

群馬大学大学院工学研究科

電気電子工学専攻

田中 良太郎

# 目次

<b>第 1 章 緒言</b> .....	<b>1</b>
1-1 研究背景.....	2
1-2 研究概要.....	2
1-2-1 ストリップ装荷型導波路の作製と評価.....	2
1-2-2 新しい導波路の設計.....	3
1-3 非線形光学効果.....	4
1-4 第 2 高調波発生.....	5
1-5 本論文の構成.....	6
<b>第 2 章 スパッタリング法による ZnO 薄膜の作製と評価</b> .....	<b>7</b>
2-1 はじめに.....	7
2-2 ZnO について.....	7
2-3 高周波スパッタリング法.....	7
2-4 アニール処理.....	9
2-5 透過スペクトルと反射率の測定.....	10
2-6 屈折率の測定.....	11
2-6-1 屈折率の算出.....	11
2-6-2 プリズムカプラとは.....	12
2-6-3 プリズムカプラによる屈折率の測定.....	13
2-7 XRD 測定.....	14
2-7-1 XRD 測定とは.....	14
2-7-2 XRD 測定結果.....	15
2-8 まとめ.....	16
<b>第 3 章 スパッタリング法による酸化ハフニウム薄膜の作製と評価</b> .....	<b>17</b>
3-1 はじめに.....	17
3-2 酸化ハフニウムとは.....	17
3-3 薄膜の作製.....	17
3-4 アニール処理.....	17
3-5 屈折率の測定.....	18

3-6	透過率と反射率の測定	19
3-7	まとめ	20
<b>第4章 ZnO 薄膜を用いた光導波路の設計とシミュレーション</b>		<b>21</b>
4-1	はじめに	21
4-2	導波路の設計	21
4-3	ビーム伝搬法	25
4-4	シミュレーション	25
4-5	まとめ	30
<b>第5章 光導波路の作製と評価</b>		<b>31</b>
5-1	はじめに	31
5-2	ストリップ装荷型導波路の作製	31
5-2-1	ストリップ装荷型導波路の作製工程	31
5-2-2	ストリップ装荷型導波路の端面加工	33
5-2-3	ストリップ装荷型導波路の評価	34
5-3	設計を行った導波路の作製	38
5-4	設計を行った導波路の作製の評価	41
5-5	まとめ	44
<b>第6章 結言</b>		<b>45</b>
	謝辞	46
	参考文献	47
	付録	48
	付録 A	48

## 1-1 背景

近年のインターネットの普及によって、我々は多くのサービスや、情報を得ることが可能となった。なかでも FTTH(Fiber To The Home)による光ファイバ通信の発達、一般家庭へも光ファイバ通信を普及させ光通信を身近なものとするきっかけとなった。光通信技術の発展によって高速・大容量な通信を実現し、これからもさらなる発展が期待される。

光回線によるインターネット通信をさらに高速・大容量化させる技術の 1 つとして、波長分割多重(WDM : Wavelength Division Multiplex)と呼ばれるものがあり、これは一本の光ファイバに複数の波長の光を同時に通すことで、光ファイバ上の情報量を増大させるものである。現在、複数の波長データの処理は光信号をいったん電気信号に変換した後に処理を行い、再び光信号に戻すといった方法をとっている。このような処理を電気信号に変換することなく光信号のまま行うための手段として、波長変換技術が注目されている[1]。

また、光技術の進歩により通信分野が大きく発達してきたが、同時に大容量記憶メディアも発達、普及している。現在大容量記憶メディアの 1 つに Blu-ray Disc があるが、その容量は 25GB であり、これは DVD の 5 倍以上を誇る。このような光ディスクの読み取り用波長は 405nm まで短くなってきており、今後の大容量化にはより波長の短いレーザの開発が望まれる。そこで、短波長レーザの実現として波長変換素子を用いた光波長変換デバイスが期待されている。

本研究では、非線形光学効果をもち、優れた光学特性をもつ酸化亜鉛(ZnO)に注目した。ZnO は資源が豊富で比較的安価であるため、波長変換デバイスの低コスト化につながると考えられる。主として光通信技術の発展への寄与を目指し、低コストな波長変換デバイスを作製することで、WDM のような高速・大容量通信を加入者系への普及が期待できる。

## 1-2 研究概要

酸化亜鉛(ZnO)は優れた光学特性を持ち、また、非線形光学効果を持つことで知られる。ZnO は 2 次の非線形光学効果をもち、本研究では ZnO がもつ 2 次の非線形光学効果のひとつである第 2 高調波発生(SHG:Second Harmonic Generation)を利用した、波長変換デバイスの作製を目指す。SHG 素子を作製することで、他の 2 次の非線形光学効果である和周波発生(SFG)や差周波発生(DFG)につながる。デバイスの構造は光通信への応用を考え、導波路型での作製を行う。ZnO をスパッタリング法によって成膜し、SHG 出力の向上を考えシングルモード導波路で作製する。SHG の観測には、波長 850nm の Ti : Sa レーザ(スペクトラ・フィジクス : Tunami)を使用する。

まず過去の研究から設計されたストリップ装荷型導波路での作製を行った。しかし、設計されたコア径が小さかったため、レーザを導波路させることが困難であった。そこで、レーザの導波を容易にするために、新しくコア径を拡大させる光導波路の設計を行い作製を目指した。

### 1-2-1 ストリップ装荷型導波路の作製と評価

ZnO をコアとして用いた光導波路として、比較的作製が容易であるストリップ装荷型での導波路作製を行った。ストリップ装荷型導波路の構造パラメータは過去の研究から得られたものを使用した[2]。導波路の作製において、SiO<sub>2</sub>基板上に ZnO をスパッタリング法によって成膜を行い、結晶性向上のためアニール処理を行う。その後 ZnO 薄膜を光学特性から評価を行う。

図 1-1 と表 1-1 に本研究で作製を目指したストリップ装荷型導波路の概略図を示す。

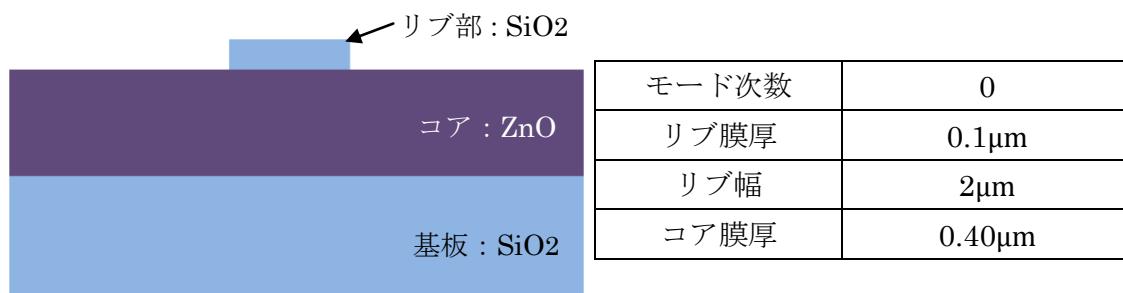


図 1-1 ストリップ装荷型導波路断面

表 1-1 導波路条件

### 1-2-2 新しい導波路の設計

1-2-1 で示したストリップ装荷型導波路の作製を行ったが、設計したコア径が小さく、レーザを導波させることが困難であった。そこで、新しくコア径を拡大させた導波路の設計を行った。今回、**ZnO** に屈折率が近く、酸化ハフニウム(**HfO<sub>2</sub>**)に注目し、新しくクラッドとして用いた。コアとクラッドの屈折率差を小さくすることによって、モードフィールド径を拡大させ、コア径の拡大を目指す。図 1-2 に新しく設計を行った導波路の概略図を示す。



図 1-2 新しく設計した導波路の概略図

### 1-3 非線形光学効果

光の電界を  $E$  とすると、分極  $P$  は  $E$  に比例して

$$P = \epsilon_0 \chi^{(1)} E \quad (1.1)$$

と表せる[3]。このとき、 $\epsilon_0$ は誘電率、 $\chi^{(1)}$ は電気感受率である。これは電界の強さが小さいときには比例するが、電界が強くなる、すなわち強力なレーザを入射させると比例しなくなり、非線形応答が無視できなくなってくる。非線形応答を考慮すると、物質の分極  $P$  は次のようになる。

$$P = \epsilon_0 \chi^{(1)} E + \epsilon_0 \chi^{(2)} E^2 + \epsilon_0 \chi^{(3)} E^3 + \dots \quad (1.2)$$

ここで、 $\chi^{(2)}$ は二次非線形感受率、 $\chi^{(3)}$ は三次非線形感受率と呼ばれる。このように、分極  $P$  の非線形性によって起こる効果を非線形光学効果という。これらの非線形光学効果が起こると、入射光と別の周波数の光を発生や、光の強度によって屈折率が異なってくるような現象が起こる[4]。 $E^2$ の項による効果は2次の非線形光学効果とよばれ、 $E^3$ の項による効果は三次の非線形光学効果とよばれる。2次の非線形光学効果としては、第2高調波発生、和周波発生、差周波発生などがあげられる。

### 1-4 第2高調波発生(SHG:Second Harmonic Generation)

第2高調波発生は2次の非線形感受率 $\chi^{(2)}$ によって生じる非線形光学効果の1つである。非線形光学効果をもつ物質に波長 $\lambda$ (角周波数 $\omega$ )の強い光を入射したとき、電界  $E$  を

$$E = E_0 \cos(\omega t)$$

とすると、分極  $P$  は

$$P = \epsilon_0 \chi^{(1)} E + \epsilon_0 \chi^{(2)} E^2$$

とかけるので、電界  $E$  を代入すると

$$P = \frac{1}{2} \epsilon_0 \chi^{(2)} E_0^2 + \epsilon_0 \chi^{(1)} E_0 \cos(\omega t) + \frac{1}{2} \epsilon_0 \chi^{(2)} E_0^2 \cos(2\omega t)$$

となる。第3項に周波数  $2\omega$  の成分をもつ光が発生している。これにより、入射した光の2倍の周波数の光が発生していることがわかり、この現象を第2高調波発生(SHG:Second Harmonic Generation)とよぶ[4]。図1-3に第2高調波発生と同じ2次の非線形光学効果である和周波発生と差周波発生のイメージ図を示す[5]。

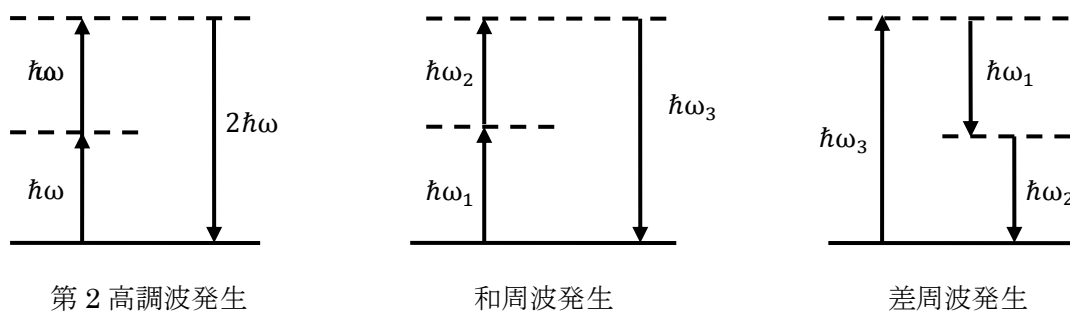


図 1-3 非線形光学効果のイメージ



## 1-5 本論文の構成

第 1 章は緒言である。

第 2 章はスパッタリング法による ZnO 薄膜の作製と評価について述べる。

第 3 章はスパッタリング法による酸化ハフニウム(HfO<sub>2</sub>)薄膜の作製と評価について述べる。

第 4 章は ZnO 薄膜を用いた光導波路の設計とシミュレーションについて述べる。

第 5 章は光導波路の作製と評価について述べる。

第 6 章は結言である。

## 第2章 スパッタリング法による ZnO 薄膜の作製と評価

### 2-1 はじめに

本章ではスパッタリング法による ZnO 薄膜の作製を行い、その評価について述べる。SiO<sub>2</sub> 基板上に作製した ZnO 薄膜に結晶性向上のためのアニール処理を行い、XRD 測定による結晶性評価を行った。その後、ZnO 薄膜の透過スペクトルと反射率の測定を行った。以前の研究では、得られた透過スペクトルから屈折率を算出したが、今回はより正確な屈折率を得る方法としてプリズムカプラによる測定を行った。

### 2-2 ZnO について

ZnO は六方晶系ウルツ鉱型の結晶構造を持つ、直接遷移型の II-IV 族化合物半導体である。最近では、太陽電池などに用いられる透明電極や、白色発光ダイオードなどの材料として注目されているが[6]、ここでは ZnO がもつ性質の 1 つである非線形光学効果に注目した。ZnO は資源が豊富で安定した供給が見込め、比較的安価であり、高い透過率・屈折率を持つことから[7]、本研究では光導波路の材料として用いた。

### 2-3 高周波スパッタリング法

導波路のコアとなる ZnO 薄膜の作製は、SiO<sub>2</sub> 基板上に高周波(RF: Radio Frequency)スパッタリング法を用いて行った。図 2-1 に成膜に用いたスパッタリング装置(ULVAC:SH350-SE)の概略図を示す。

スパッタリング法とは、真空状態にしたチャンバー内にガスを導入し、高電圧印加によるグロー放電によってプラズマを形成する。放電中に生成する正イオンを薄膜材料(ターゲット)に衝突させ、その衝撃でターゲットの原子・分子が飛び出し、基板に付着することで薄膜を形成する方法である。

RF スパッタリング法とは、高周波電源を用いて絶縁物をスパッタリングする方法である。DC(直流)スパッタリングでは絶縁物を成膜することはできないが、RF スパッタリングでは絶縁物の成膜が可能となる[8-9]。RF スパッタリング法による ZnO の成膜条件は以前の研究の条件を参考にし[10]、その条件を表 2-1 に示す。

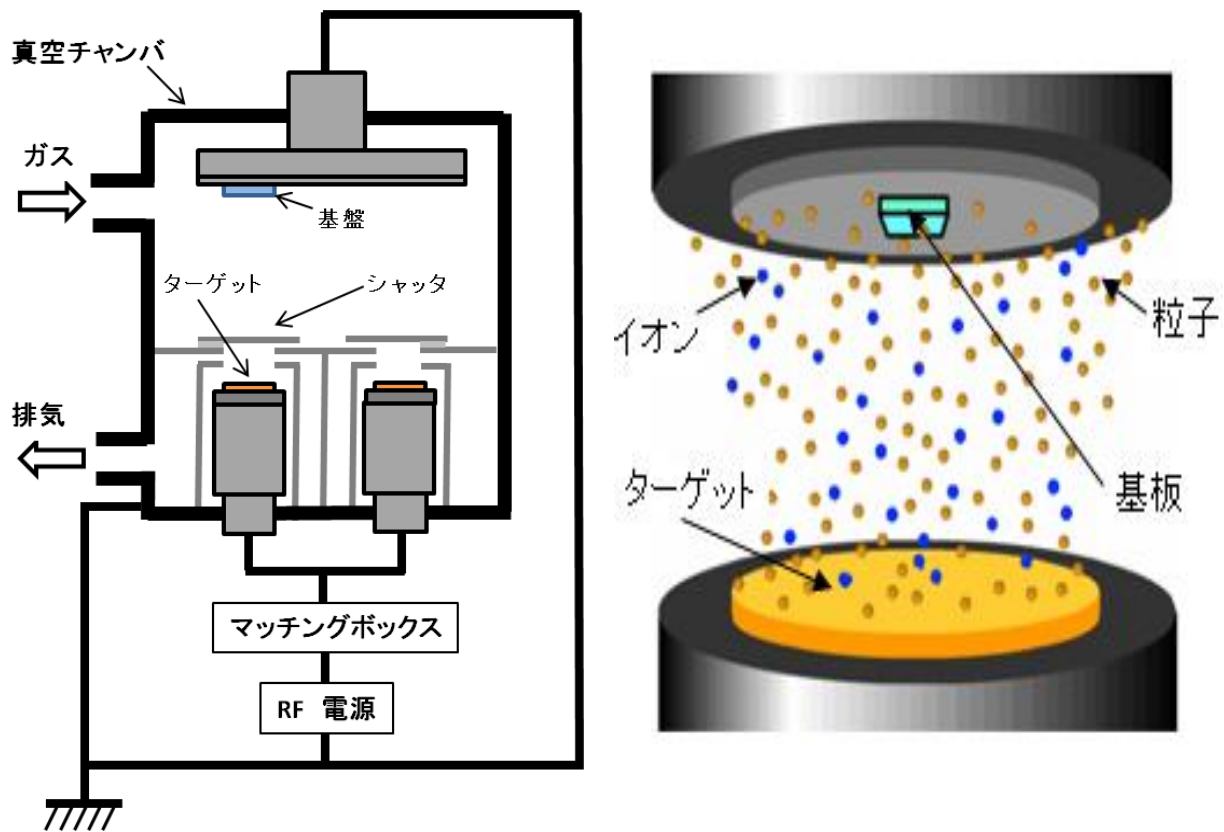


図 2-1 スパッタリング装置の概略図

ターゲット	ZnO
導入ガス	Ar, O <sub>2</sub>
Ar ガス流量[sccm]	20
O <sub>2</sub> ガス流量[sccm]	10
RF 電力[W]	75
成膜時圧力[mTorr]	10
基板加熱温度[°C]	250

表 2-1 スパッタリング条件

## 2-4 アニール処理

アニール処理とは、基板を加熱して高温に保つことで原子の移動を促進させ、結晶欠陥と酸素欠陥の減少など、結晶性を改善させる熱処理である。

アニール装置の概略図を図 2-3 に示す。電気路は、管理ユニットでアニール条件を設定し、シリコニット内の電熱線にプログラム制御器で制御された電流を流すことで発熱して、ガラス管内部を高温にする装置である。アニールを密閉されていない空気が循環できる環境で行うことで、ZnO 薄膜の結晶性の改善が期待できる。

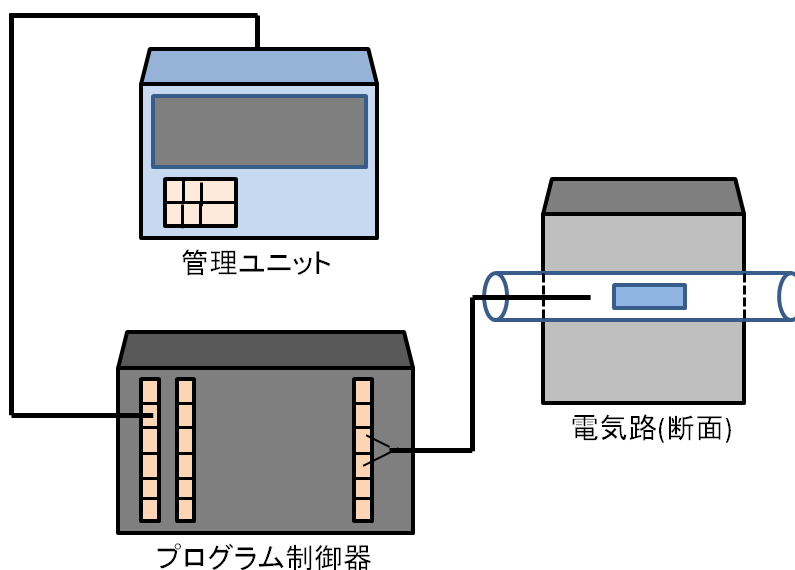


図 2-3 アニール装置図

アニール温度[°C]	800
アニール時間[min]	60

表 2-2 アニール条件

アニール条件を表 2-2 に示す。条件は過去の研究によって求められた 800°Cで行った。

## 2-5 透過スペクトルと反射率の測定

成膜し、アニールを行った ZnO 薄膜の透過率の測定を行った。測定には、分光光度計(島津製作所：UV-3101PC)を使用した。測定によって得られた透過スペクトルを図 2-4 に示す。

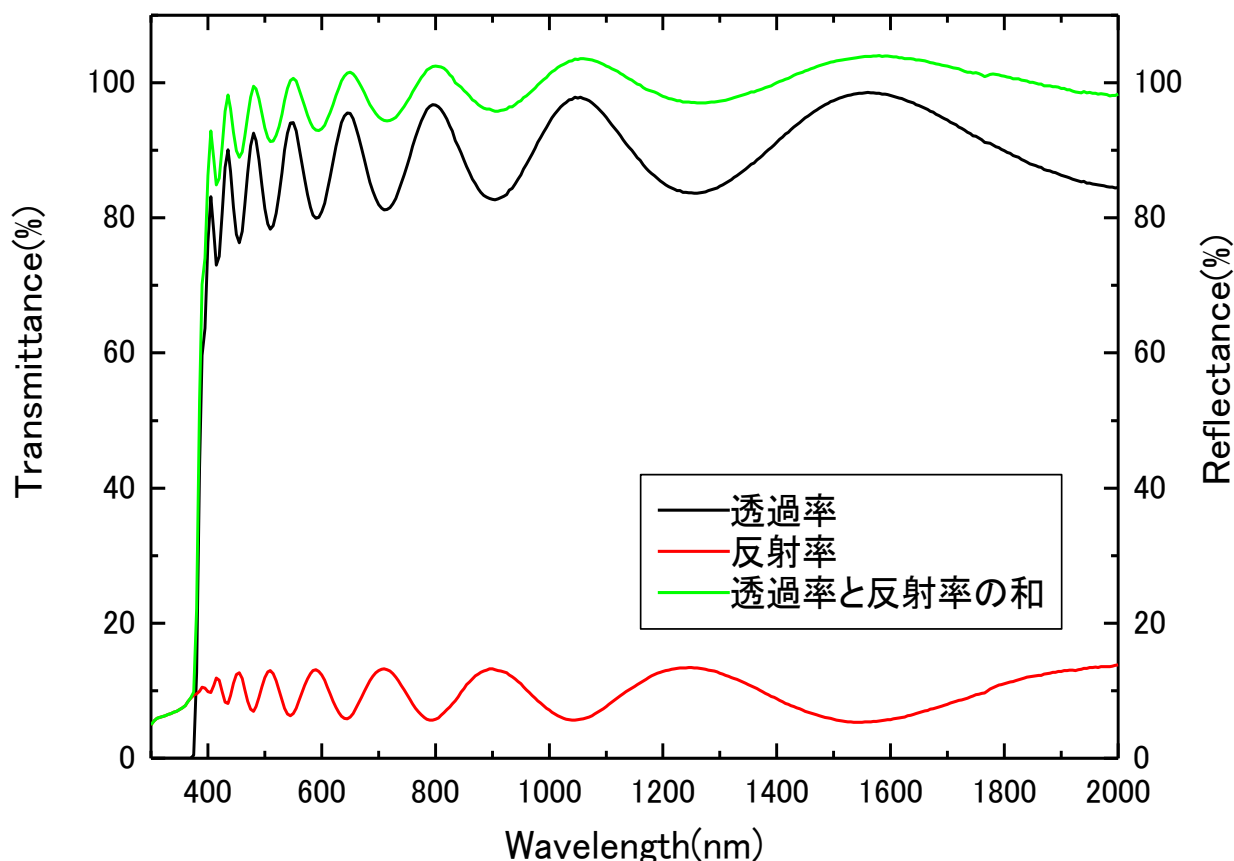


図 2-4 成膜後アニールを行った ZnO 薄膜の透過率と反射率

本研究では、SHG の測定に 850nm の Ti-Sa レーザを用いる。そのため、コアとして用いる ZnO 薄膜は波長 425nm と 850nm で高いことが望ましい。図 2-4 から、波長 400nm から 900nm において 80%以上の高い透過率を得ることができた。また、反射率も 10%前後低い値となった。透過率と反射率を足した値はほぼ 100%になることから、薄膜による光の吸収はほとんどないと思われる。一部 100%以上となっているが、これは基板背面での反射が結果に反映されてしまうことが原因と考えられる。グラフのリップルは成膜された ZnO 層と空気、SiO<sub>2</sub> 基板との境界での光の反射によって干渉が起こることによって発生する。

## 2-6 屈折率の測定

作製した薄膜の屈折率の測定を行う。以前の研究では、薄膜の透過率から屈折率を計算して屈折率を求めた。今回は、より正確な屈折率を求めることができると考え、プリズムカップラを用いて屈折率の測定を行った。

### 2-6-1 屈折率の算出

測定した透過率から屈折率算出を行った。図 2-5 にその結果を示す。実際の算出方法は付録 A に示した。

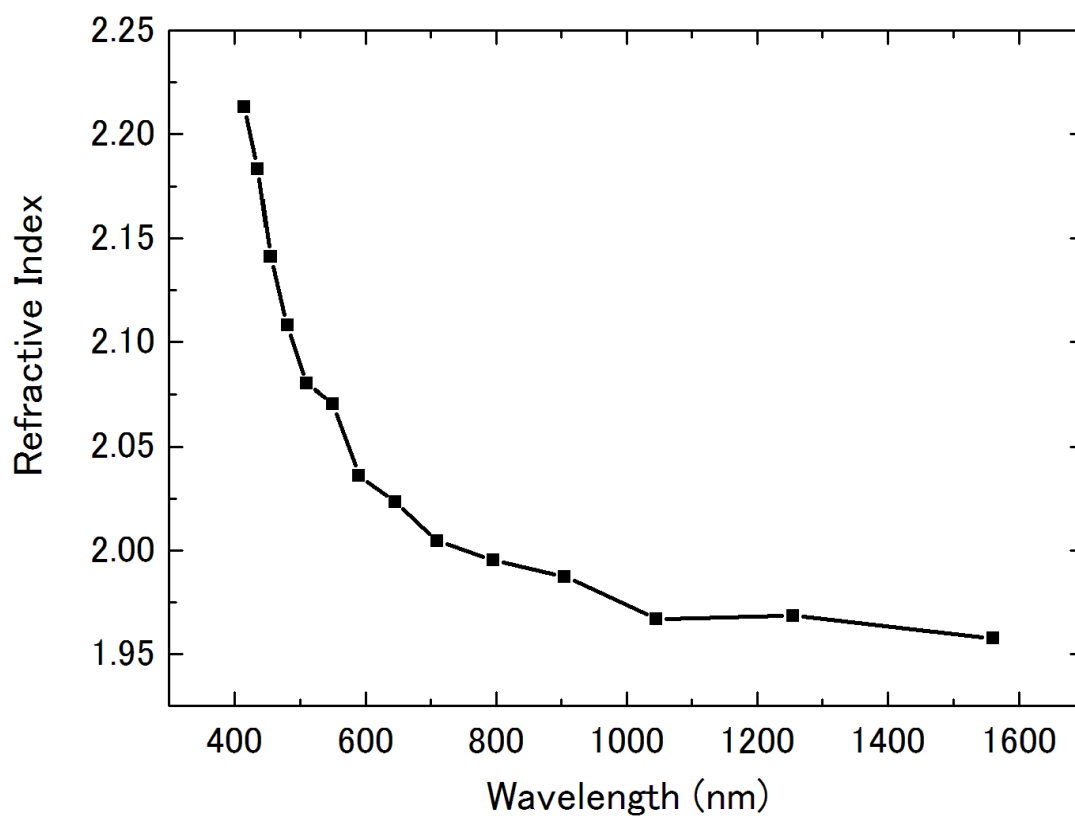


図 2-5 算出した ZnO 薄膜の屈折率

## 2-6-2 プリズムカップラとは

プリズムカップリング法によって、薄膜の屈折率を測定することができる。

厚さが十分ある薄膜の場合、膜厚方向の定在波の節の数に応じて異なる伝搬仕方を示す複数の導波モードが膜中を伝搬できる。これらの導波モードの膜内での伝搬は

$$E(x, z) = E_m(x) \exp(i\beta_m z)$$

と表せ、各導波モードの伝搬定数 $\beta_m$ は

$$\beta_m = \frac{2\pi}{\lambda} n_m^{\text{eff}} = k_0 n_m^{\text{eff}}$$

となる。ここで、 $k_0$ は真空中の光の波数である。 $n_m^{\text{eff}}$ は等価屈折率とよばれ、薄膜の膜厚  $t$  と屈折率  $n$ 、基板の屈折率  $n_{\text{sub}}$  の関数である。プリズムカップラの概要を図 2-6 に示す。屈折率  $n_p > n^{\text{eff}}$  のプリズムを薄膜の表面に近づけると、プリズム内で全反射した光のエバネッセント成分が薄膜に接し、

$$k_0 n_p \cos \theta = \beta_m^{\text{eff}}$$

の条件が満たされると、薄膜中の導波モードが効率よく励起される。入射角を変えながら反射率を測定すると、式を満たす場合に反射率の低下が観測され、その入射角から  $n_m^{\text{eff}}$  が決定できる。得られた  $n_m^{\text{eff}}$  から、薄膜の屈折率  $n$  を求めることができる。

プリズムカップリング法は、高い精度で屈折率を測定可能である。[11]

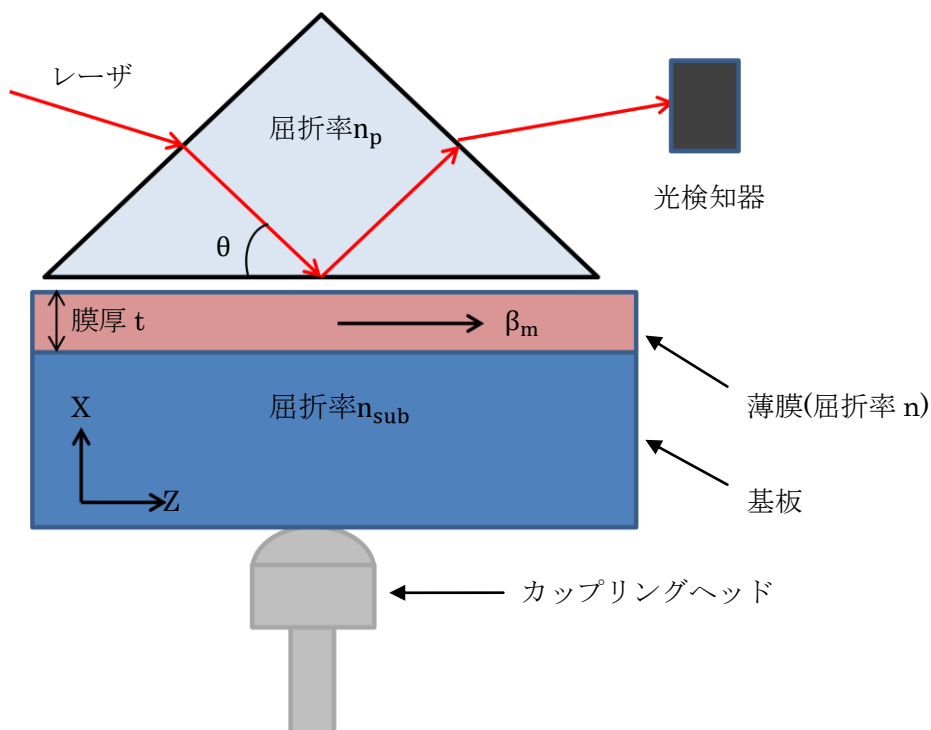


図 2-6 プリズムカップラの概要図

### 2-6-3 プリズムカプラによる屈折率の測定

プリズムカプラを使用し、成膜し、アニールを行った ZnO 薄膜の屈折率測定を行った。今回使用したプリズムカプラでは、404nm、633nm、1533nm の 3 つの波長での測定を行い、その 3 点から得られた値から近似曲線を作製する。その結果を図 2-6 に示す。

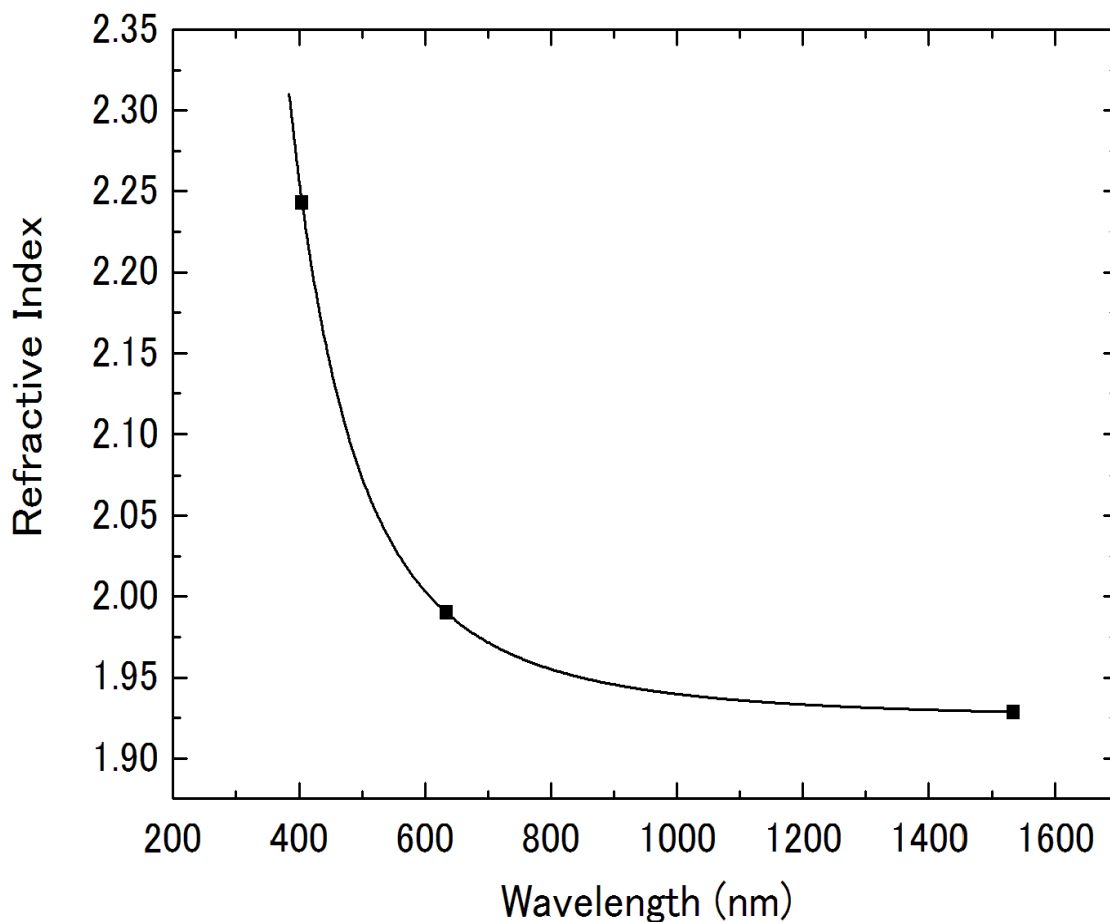


図 2-7 測定した ZnO 薄膜の屈折率

通常、ZnO の屈折率は可視光領域で 1.9-2.0 程度といわれる[7]。図 2-5、図 2-6 から、透過率から算出した値と、プリズムカプラによって得られた値はどちらも可視光領域にて 1.9-2.0 となった。今回はより正確な値が得られるとして、プリズムカプラによって得られた値を用いる。



## 2-7 XRD 測定

### 2-7-1 XRD とは

薄膜の結晶性評価の方法として、XRD(X-ray Diffraction)を用いた。

結晶構造をもつ物質は原子あるいは分子が一定の周期性をもって配列している。その結晶に原子の間隔と同程度の波長をもつ光を入射すると、各原子で散乱された光が特定の方向で干渉し、強い X 線が観察される回折現象を生じる。この回折強度はその原子の種類や配列の仕方によって異なるため、その回折結果を解析することで膜表面の物質の結晶構造を知ることができる。

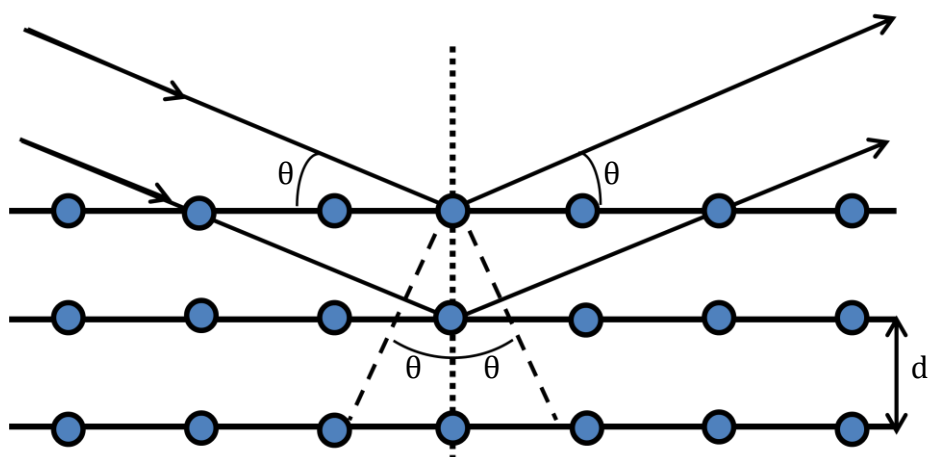


図 2-8 結晶による X 線の回折

物質が結晶構造をもっている場合、規則的に複数の原子が作る面が存在する。図 2-7 のように平行に並んだ結晶面間の距離を  $d$  とし、2つの X 線が角度  $\theta$  で入射する場合、2つの X 線の行路差は  $2d \sin \theta$  となる。この行路差が入射 X 線の波長  $\lambda$  の整数倍、すなわち  $2d \sin \theta = n\lambda$  となるとき、回折がおこる[12]。これを観測することによって結晶間の距離  $d$  をわかる。結晶間距離  $d$  がわかることによって、物質内の結晶構造を調べることができる。測定によって回折ピークの鋭さを見ることで、その物質の結晶構造を判断する。

### 2-7-2 XRD 測定結果

スパッタリング法によって成膜を行った ZnO 薄膜の結晶性が、アニールによって改善されたのか測定によって確認を行った。2 次の非線形効果は結晶状態の材料ではないと得ることができない。スパッタリング法によって成膜された膜はアモルファスとなるため、SHG の材料として用いるためには結晶性の改善が必要となる。

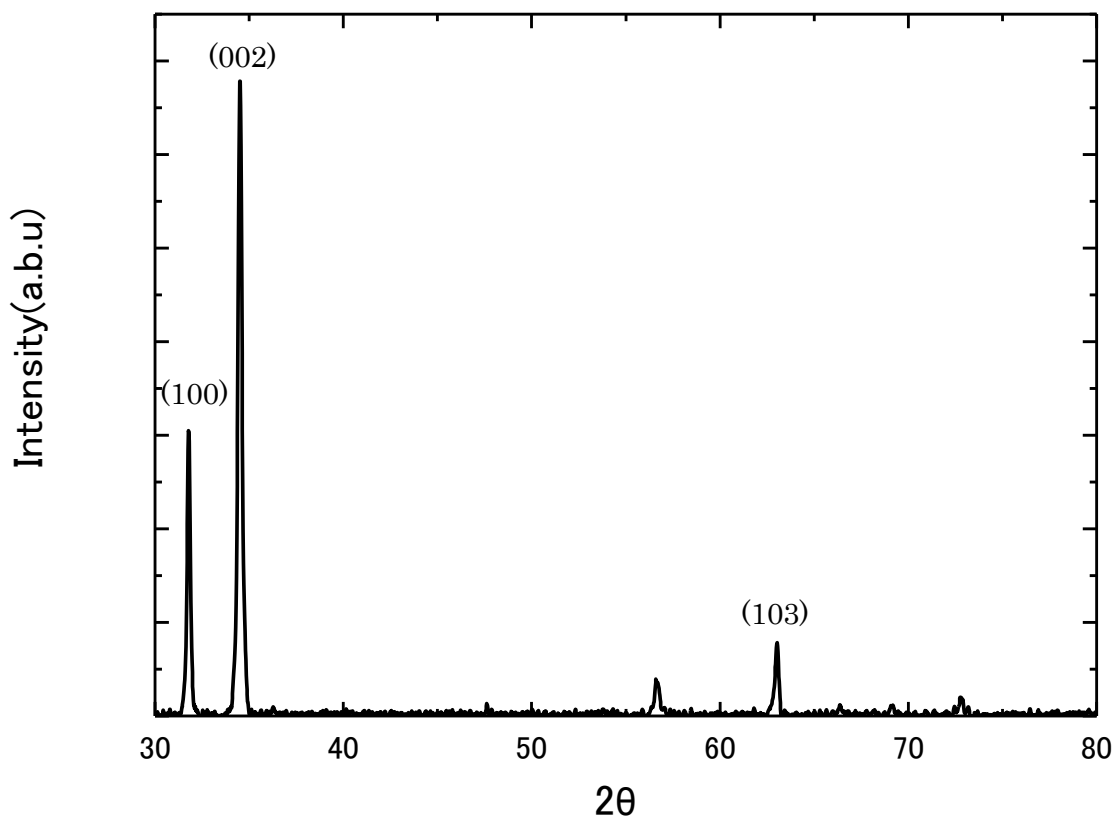


図 2-9 成膜し、アニールを行った ZnO 薄膜の XRD 測定結果

図 2-8 より、鋭いピークが測定できた。結晶質がアモルファスであると、ピークはブロードなものとなるため、測定結果より作製した ZnO 薄膜の結晶性は改善されていると考えられる。

## 2-8 まとめ

スパッタリング法によって ZnO 薄膜の作製を行った。その後、結晶性改善のためアニール処理を行った。ZnO 薄膜の透過率の測定では、使用する波長である 850nm と 425nm での透過率 80%以上となり、高い透過率を得た。また、透過率と反射率の測定結果の和がほぼ 100%となることから、薄膜の吸収も少ないと考えられる。以前の研究では、ZnO 薄膜の屈折率は透過率からの算出によって出していた。今回はプリズムカプラを使用して屈折率の測定を行うことで、より正確な屈折率の測定を行った。本研究で SHG の観測用に用いるレーザが波長 850nm である。今回作製した ZnO 薄膜の波長 850nm での屈折率は 1.94979 であった。スパッタリングによって成膜された ZnO 薄膜はアモルファスであるため、アニールによって結晶性が改善されたことを調べるため、XRD 測定を行った。測定された結果から、ピークはブロードなものではなく、ZnO 由来と思われるピークを測定することができた。よって、アニールによって ZnO の結晶性が改善されたと思われる。これらの結果から、作製した ZnO 薄膜は SHG 導波路のコアとして適していると思われる。

## 第3章 スパッタリング法による HfO<sub>2</sub> 薄膜の作製と評価

### 3-1 はじめに

導波路のコア径を拡大させるため、クラッドとして ZnO に近い屈折率をもつ酸化ハフニウムに注目した。コアの屈折率に近い屈折率をもつ HfO<sub>2</sub> をクラッドとして用いることで、コアとクラッドの屈折率差が小さくなることで光の閉じ込めが弱くなり、導波路のコア径を大きくすることが期待できる。酸化ハフニウムはスパッタリング法によって成膜できることから、ZnO と同様にスパッタリングによって成膜を行った。

### 3-2 酸化ハフニウムとは

酸化ハフニウム(HfO<sub>2</sub>)は高誘電体であり、ゲート絶縁膜などへの利用が注目されている素材である。しかし、本研究では、その屈折率に注目した。屈折率が ZnO に近く、可視光域から近赤外域での透過率が高く、反射率が低い[13]。このことから、導波路の素材として利用できると考えた。また、スパッタリング法によって成膜が行えることから、HfO<sub>2</sub> をクラッドとして用いる。

### 3-3 薄膜の作製

HfO<sub>2</sub> は ZnO と同様にスパッタリング法によって成膜を行った。今回、スパッタリングに導入する Ar ガスと O<sub>2</sub> の比率を変えた条件で試料の作製を行い、プリズムカプラを用いて屈折率の測定を行った。

スパッタリング条件を表 3-1 に示す。

ターゲット	HfO <sub>2</sub>
導入ガス	Ar, O <sub>2</sub>
RF 電力[W]	260
成膜時圧力[mTorr]	10
基板加熱温度[°C]	250

表 3-1 HfO<sub>2</sub> のスパッタリング条件

### 3-4 アニール処理

新たに作製する導波路の構造から、成膜した  $\text{HfO}_2$  上に  $\text{ZnO}$  を成膜し  $800^\circ\text{C}$  でのアニールを行う。そのため、 $\text{ZnO}$  薄膜のアニール温度である  $800^\circ\text{C}$  より高い温度でアニールを行っておくことで、アニールの際の  $\text{HfO}_2$  結晶の変化を防ぐ目的から、成膜を行った試料を  $850^\circ\text{C}$  にてアニールを行い、屈折率の測定を行った。

### 3-5 屈折率の測定

今回、導波路のコア径の拡大を目指すため、 $\text{HfO}_2$  の屈折率を  $\text{ZnO}$  薄膜の屈折率にできるだけ近いものにした。そのため、いくつかガス流量を変えた条件で成膜を行い、成膜後アニールを行った後、プリズムカップラを用いて、 $\text{HfO}_2$  薄膜の屈折率の測定を行った。その結果を図 3-1 に示す。

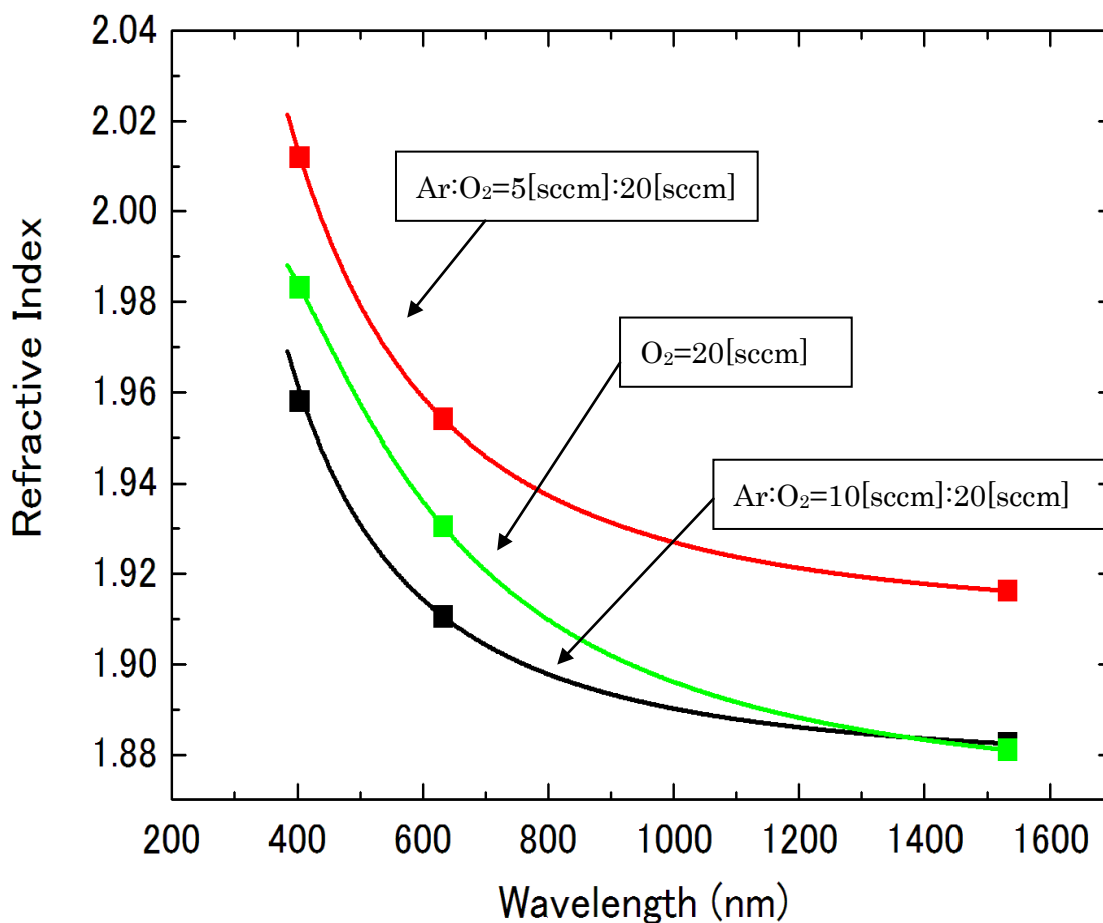


図 3-1 測定を行った屈折率

HfO<sub>2</sub>の可視光域付近の屈折率は2.00–1.85程度であるという[13]。測定を行った3つの条件の試料の屈折率はどれこの値に近くなった。今回その中で、波長850での屈折率がもっともZnOに近いものを使用する。Arが5sccm、O<sub>2</sub>が20sccmの条件で成膜したとき、得られた波長850nmでの屈折率が1.93409となり、ZnO薄膜の屈折率1.94979に近い値となったので、この条件で成膜を行っていく。

### 3-6 透過率と反射率の測定

分光光度計(島津製作所：UV-3101PC)を用いてHfO<sub>2</sub>薄膜の透過スペクトルと反射率の測定を行った。測定の結果を図3-2に示す。

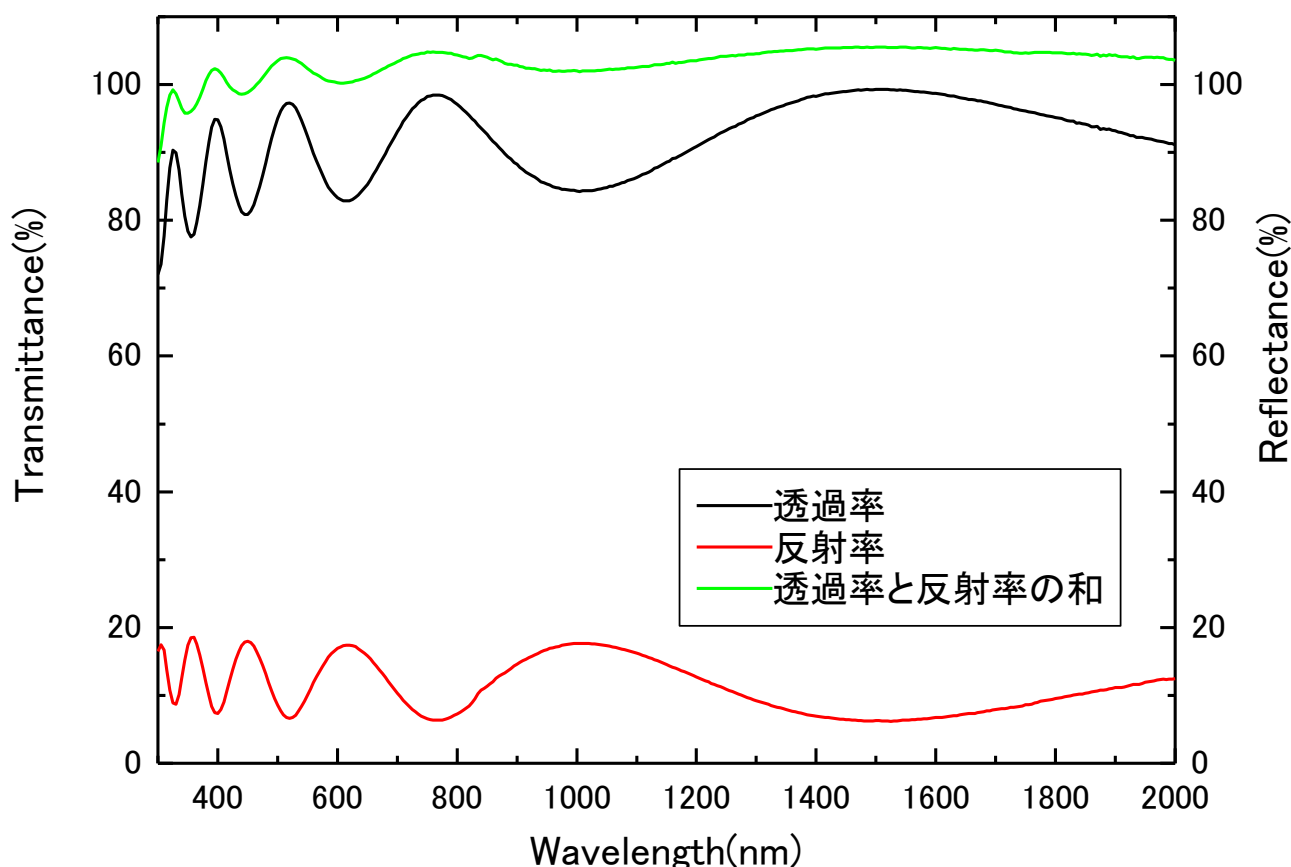


図3-2 測定したHfO<sub>2</sub>の透過率と反射率

図3-2より、成膜を行ったHfO<sub>2</sub>薄膜の透過率は80%以上となり、反射率は15%前後と低い値となった。透過率と反射率の和はほぼ100%となることから、吸収も少ないと考えられる。

### 3-7 まとめ

本章では、 $\text{HfO}_2$  をスパッタリング法によって成膜を行い、薄膜の作製を行った。スパッタリングは、Ar と  $\text{O}_2$  ガスの流量を変えて成膜した。成膜し、アニールを行った  $\text{HfO}_2$  薄膜の屈折率をプリズムカップラによって測定を行った。測定の結果、Ar を 5sccm、 $\text{O}_2$  を 20sccm 導入した条件が最も良く、ZnO 薄膜の屈折率に近い値を得ることができた。また、その条件にて成膜を行った  $\text{HfO}_2$  薄膜の透過率と屈折率の測定を行った。測定の結果から、透過率は波長 425nm と 850nm にて 80%以上と高い数値を得た。透過率と反射率の測定結果の和がほぼ 100%となることから、吸収も少ないと考えられる。この結果より、今回 ZnO をコアとして用いる導波路のクラッドとして利用できると思われる。

## 第4章 ZnO 薄膜を用いた光導波路の設計とシミュレーション

### 4-1 はじめに

本章では、ZnO をコアとして用いる新しい光導波路の解析とビーム伝搬法(BPM : Beam Propagation Method)によるシミュレーションを行った。導波路の解析方法としては等価屈折率法を用い、シミュレーションには OptiBPM(サイバネットシステム株式会社)を用いた。

### 4-2 導波路の設計

導波路を作製する際損失を出来る限り少なくするため、シングルモードによる設計を行う。導波路の解析には、等価屈折率法を用いた。その概略図を図 4-1 に示す。

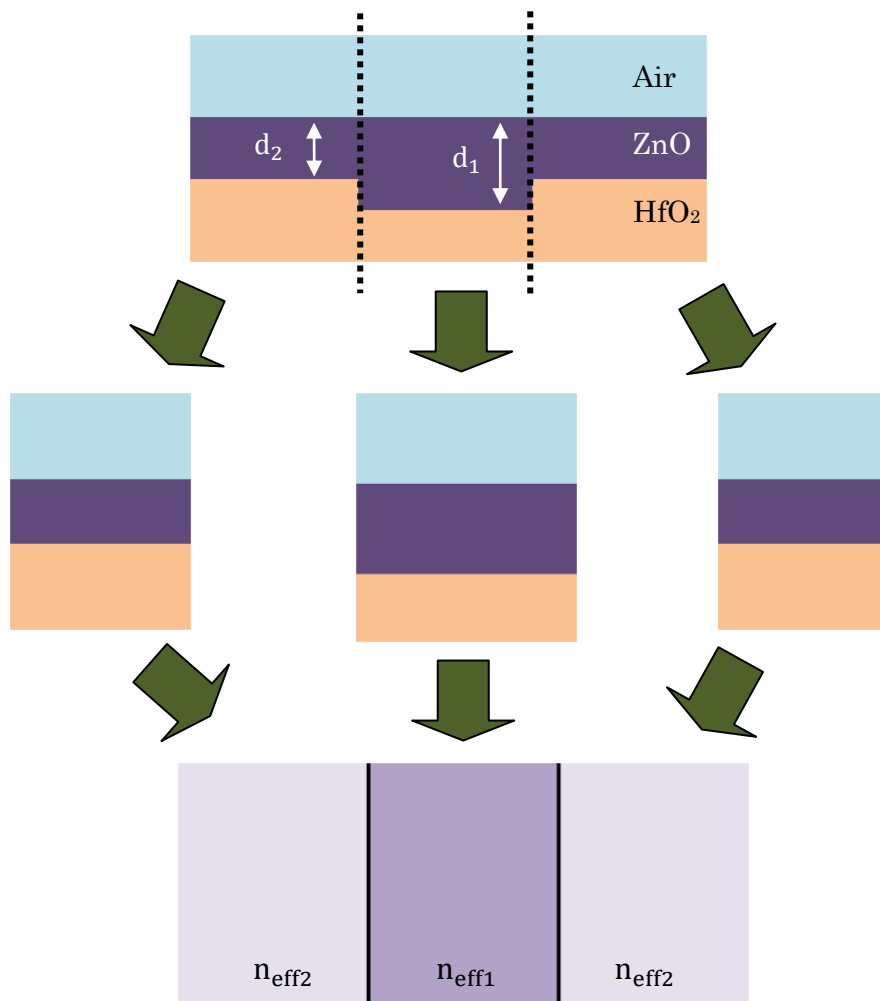


図 4-2 等価屈折率法の概略図



伝搬光は TE 波として、三層スラブ導波路について考える。  
三層スラブ導波路における波動関数を

$$\phi = \begin{cases} A_2 e^{\rho_2 x} & (x < 0) \\ A_1 \cos \rho_1 x + B_1 \sin \rho_1 x & (0 < x < d) \\ A_3 e^{-\rho_3 x} & (d < x) \end{cases} \quad (4.1)$$

と表す。ただし、

$$\begin{cases} \rho_1 = (k_0^2 n_1^2 - \beta^2)^{\frac{1}{2}} \\ \rho_{2,3} = (\beta^2 - k_0^2 n_{2,3}^2)^{\frac{1}{2}} \end{cases} \quad (4.2)$$

である。

$$\frac{d\phi}{dx} = \begin{cases} \rho_2 A_2 e^{\rho_2 x} \\ \rho_1 (-A_1 \sin \rho_1 x + B_1 \cos \rho_1 x) \\ -\rho_3 A_3 e^{-\rho_3 x} \end{cases} \quad (4.3)$$

から、境界条件より

$$\tan \rho_1 d = \frac{\rho_1 (\rho_2 + \rho_3)}{\rho_1^2 - \rho_2 \rho_3} \quad (4.4)$$

と表すことができる。

したがって、N 次モードの特性方程式は

$$\rho_1 d = \tan^{-1} \left( \frac{\rho_2}{\rho_1} \right) + \tan^{-1} \left( \frac{\rho_3}{\rho_1} \right) + N\pi \quad (4.5)$$

となる。

非対称三層スラブ導波路でコアの厚みを  $d$  としたので、V パラメータを

$$V' = k_0 n_1 d \sqrt{2\Delta} \quad (4.6)$$

と表せる。ただし、 $k_0 = \frac{2\pi}{\lambda}$ 。

非対称三層スラブ導波路の V パラメータ  $V'$  と規格化伝搬定数  $b$  の関係式は

$$V' = \frac{1}{\sqrt{1-b}} \left[ \tan^{-1} \chi_2 \sqrt{\left(\frac{b}{1-b}\right)} + \tan^{-1} \chi_3 \sqrt{\left(\frac{b+a'}{1-b}\right)} + N\pi \right] \quad (4.7)$$

である。この式で $a'$ は屈折率分布の非対称性を表すパラメータであり、次の式で定義される。

$$a' = \frac{n_2^2 - n_3^2}{n_1^2 - n_2^2} \quad (4.8)$$

ここで、 $\chi_i$ ( $i = 2$  または  $3$ )は TE モードと TM モードの場合で次のように表される。

$$\chi_i = \begin{cases} 1 & : \text{TE モード} \\ \left(\frac{n_1}{n_i}\right)^2 & : \text{TM モード} \end{cases} \quad (4.9)$$

式において、 $N=0$  および  $N=1$  の場合に  $b=0$  を代入すると 0 次モードと 1 次モードのカットオフ  $V$  値が得られるのでシングルモード条件は

$$\tan^{-1} \chi_3 \sqrt{a'} < V' \leq \tan^{-1} \chi_3 \sqrt{a'} + \pi \quad (4.10)$$

となる。屈折率を固定し厚さ  $d$  を変動させたときのシングルモード条件は式と式より

$$\frac{\tan^{-1} \chi_3 \sqrt{a'}}{k_0 \sqrt{n_1^2 - n_2^2}} < d \leq \frac{\tan^{-1} \chi_3 \sqrt{a'} + \pi}{k_0 \sqrt{n_1^2 - n_2^2}} \quad (4.11)$$

となる[14]。

これらの式から、ZnO 薄膜をコアとして用いた光導波路の設計を行った。設計方法としては、まず中央部分を三層スラブ導波路として ZnO 薄膜の厚さ求めた。その後、左右を三層スラブ導波路として考え、膜厚 $d_2$ を任意に定めて等価屈折率法により導波路コアの幅を求める。実際に計算を行い、中央の部分のシングルモード条件膜厚 $d_1$ は

$$0.779 \times 10^{-7} < d_1 \leq 2.5 \times 10^{-6}$$

となった。この計算結果から、中央部分の膜厚は  $2.5\mu\text{m}$  とした。このとき、中央部分の等価屈折率 $n_{\text{eff}1}$ を求めると  $1.94515$  となった。ここで、左右の ZnO 薄膜の厚さ $d_2$ を変え、等価屈折率法によって三層スラブ導波路としていくつかの条件でシングルモードとなるコア幅を求めた。得られた幅  $w$  はそれぞれ。

条件 1

$$0 < w_1 \leq 2.05 \times 10^{-6}$$

条件 2

$$0 < w_2 \leq 4.02 \times 10^{-6}$$

条件 3

$$0 < w_3 \leq 6.81 \times 10^{-6}$$

となった。そこで、この 3 条件の幅  $w$  を表 4-1 のように定めた。

	幅 $w(\mu\text{m})$
条件 1	2
条件 2	4
条件 3	6

表 4-1 シングルモードとなる幅

設計した値をまとめた結果を図 4-3 と表 4-2 に示す。

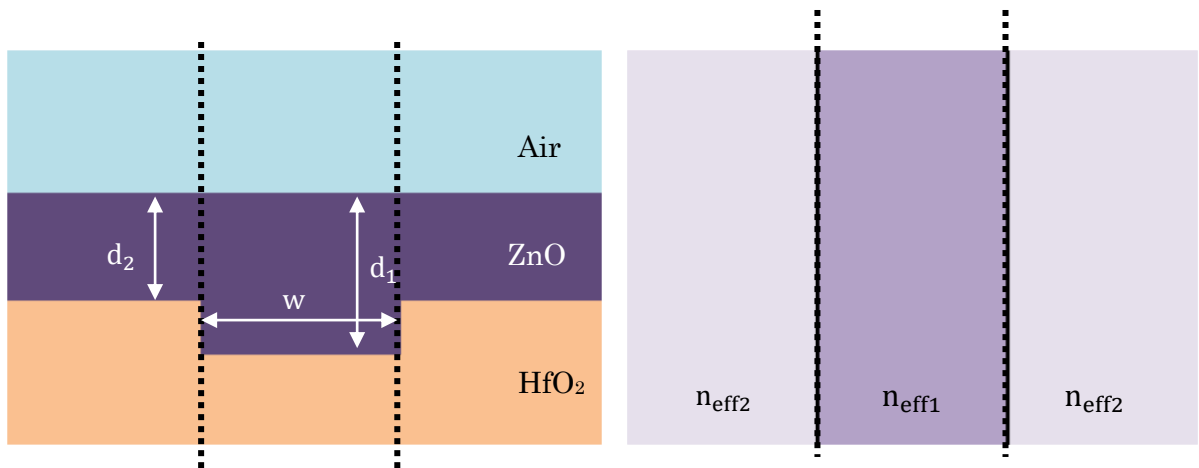


図 4-3 導波路の設計

	条件 1	条件 2	条件 3
厚さ $d_1(\mu\text{m})$	2.5	2.5	2.5
厚さ $d_2(\mu\text{m})$	0.8	1.8	2.2
$n_{\text{eff}1}$	1.94515	1.94515	1.94515
$n_{\text{eff}2}$	1.93412	1.9422	1.94415
幅 $w(\mu\text{m})$	2	4	6

表 4-2 シミュレーション条件

表 4-2 にまとめた 3 つのシミュレーション条件を示した。この条件で、シミュレーションを行った。

### 4-3 ビーム伝搬法(BPM : Beam Propagation Method)

4-2 にて得られた設計値により、導波路の光伝搬解析シミュレーションを行う。シミュレーションには、OptiBPM(サイバネットシステム社)を使用した。OptiBPM は光導波路内の伝搬光もビーム波のように扱って解析するビーム伝搬法を用いている。

### 4-4 シミュレーション

シミュレーション条件は、導波路長 5mm、伝搬波長 850nm、下クラッドとして  $\text{HfO}_2$ ( $n=1.93409$ )、コアとして  $\text{ZnO}$ ( $n=1.94979$ )、上クラッドを Air( $n=1$ )として TE 波を入射した場合の解析を行った。光伝搬のシミュレーション結果を以下に示す。

条件1のシミュレーション結果

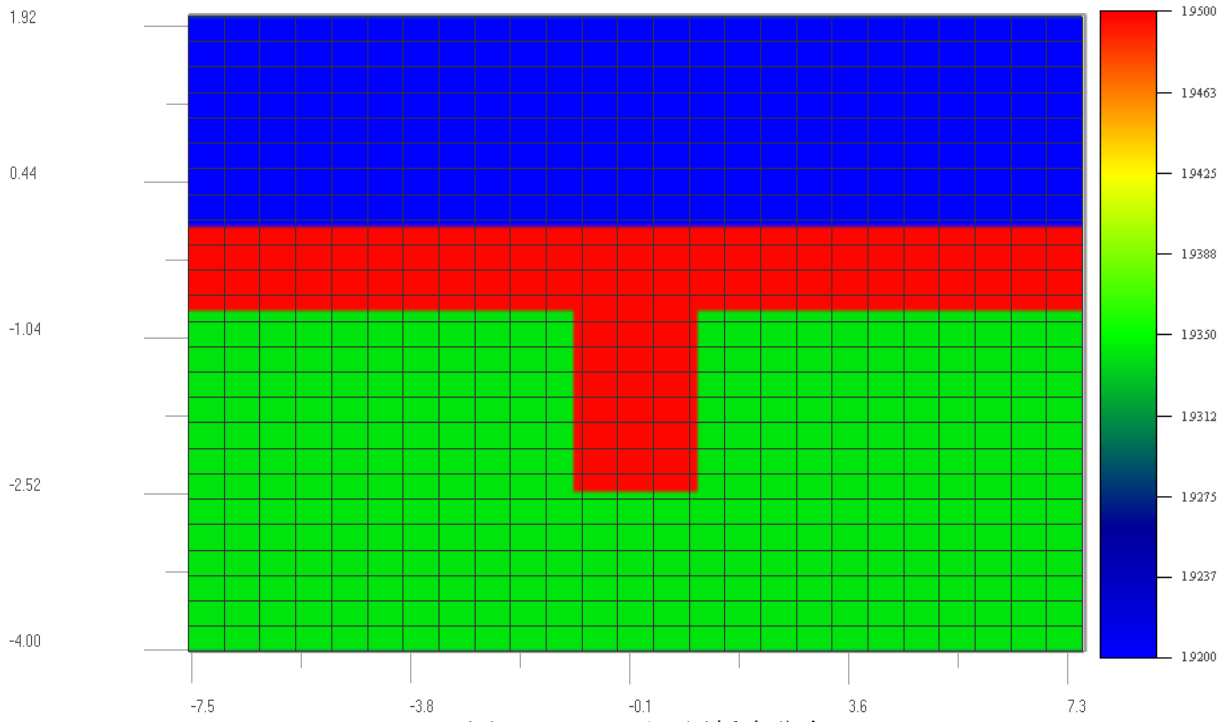


図 4-4 XY面の屈折率分布

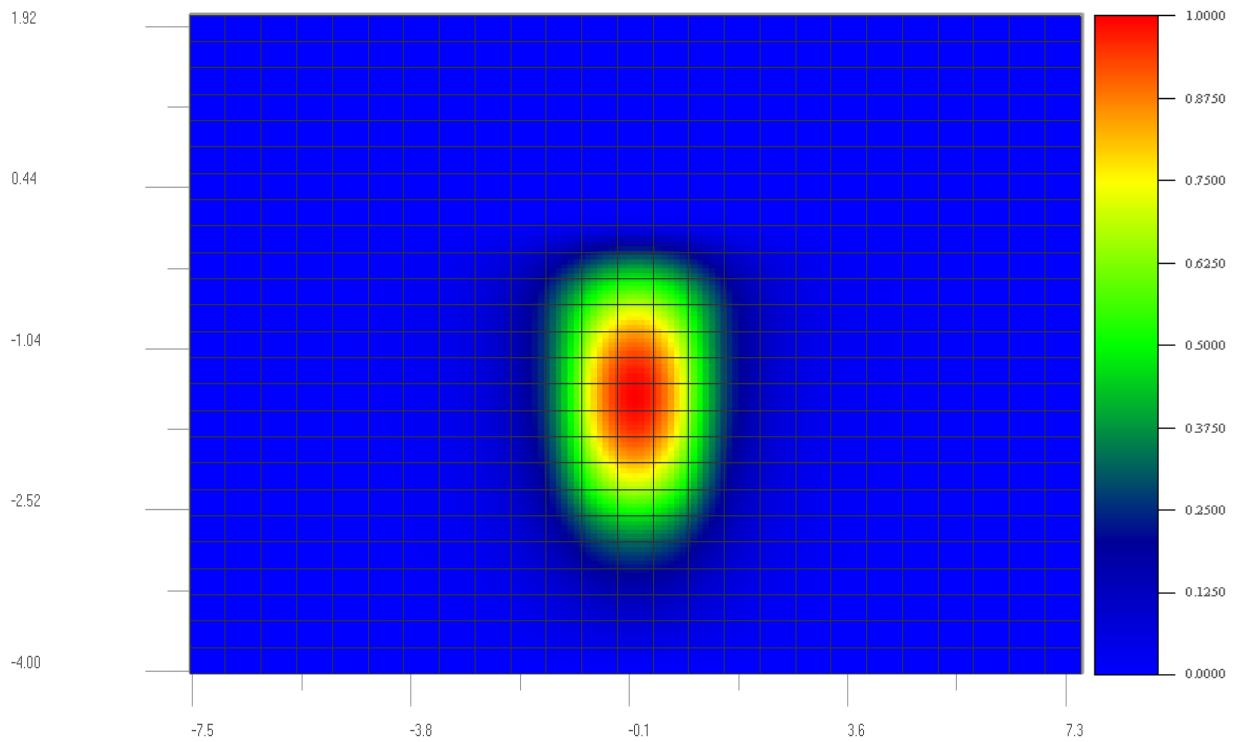


図 4-5 XY面の電界強度

### 条件 2 のシミュレーション結果

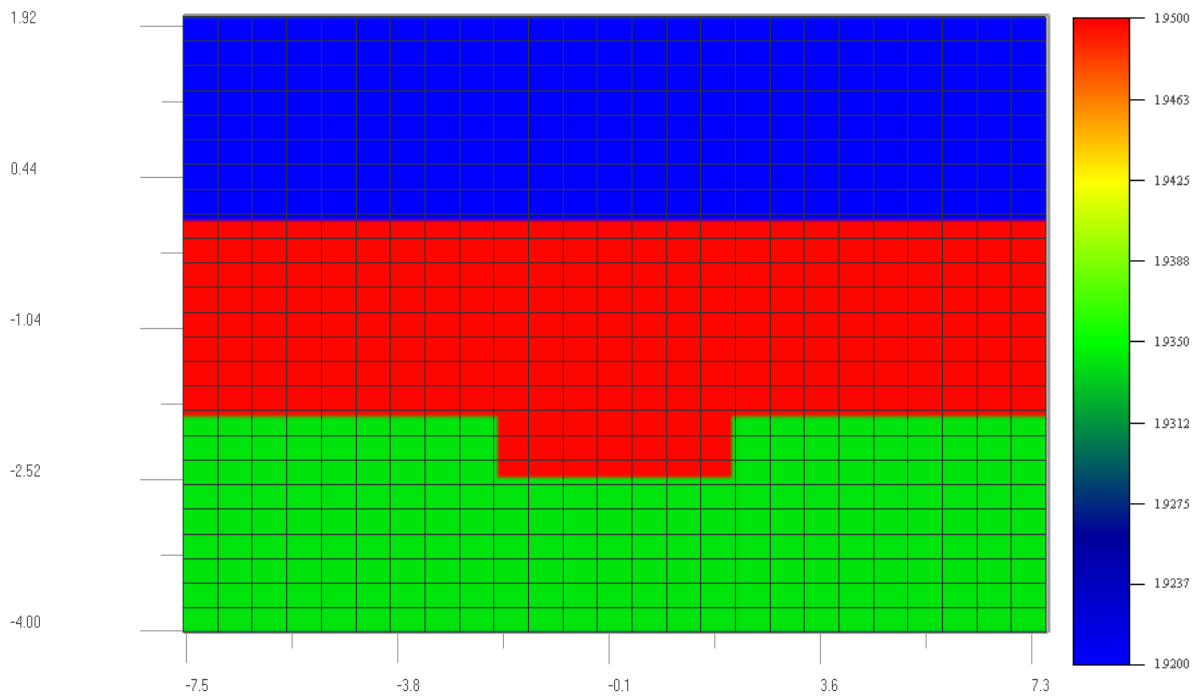


図 4-7 XY 面の屈折率分布

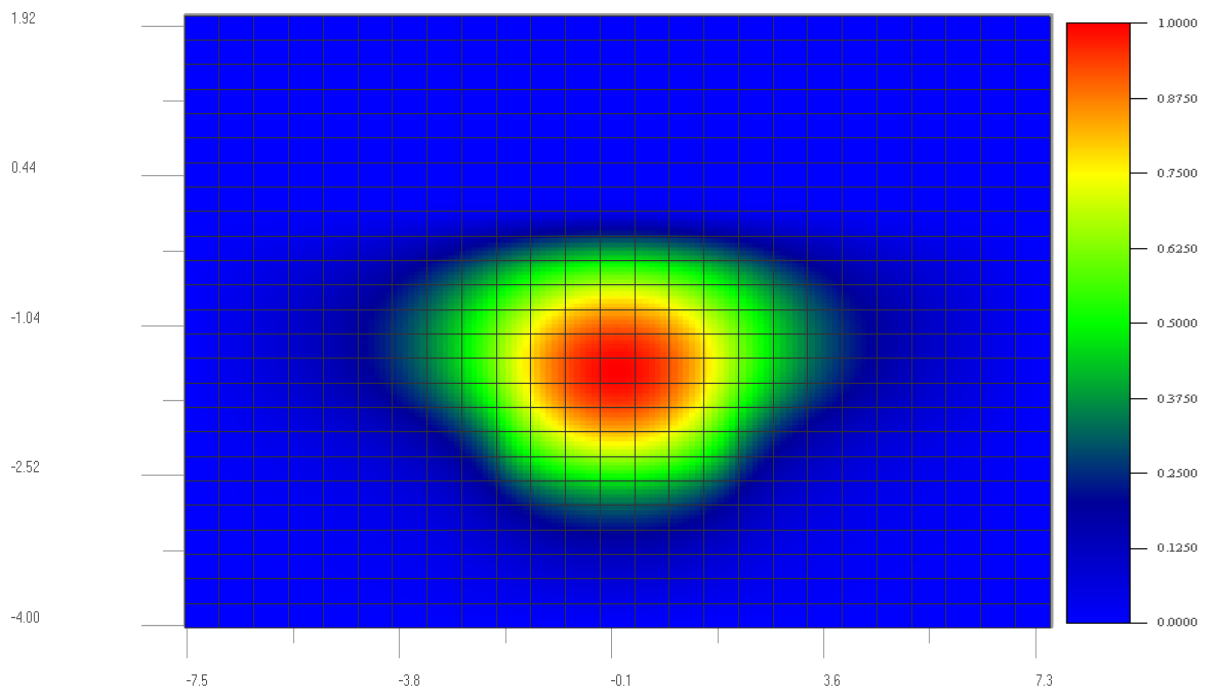


図 4-8 XY 面の電界強度

### 条件3のシミュレーション結果

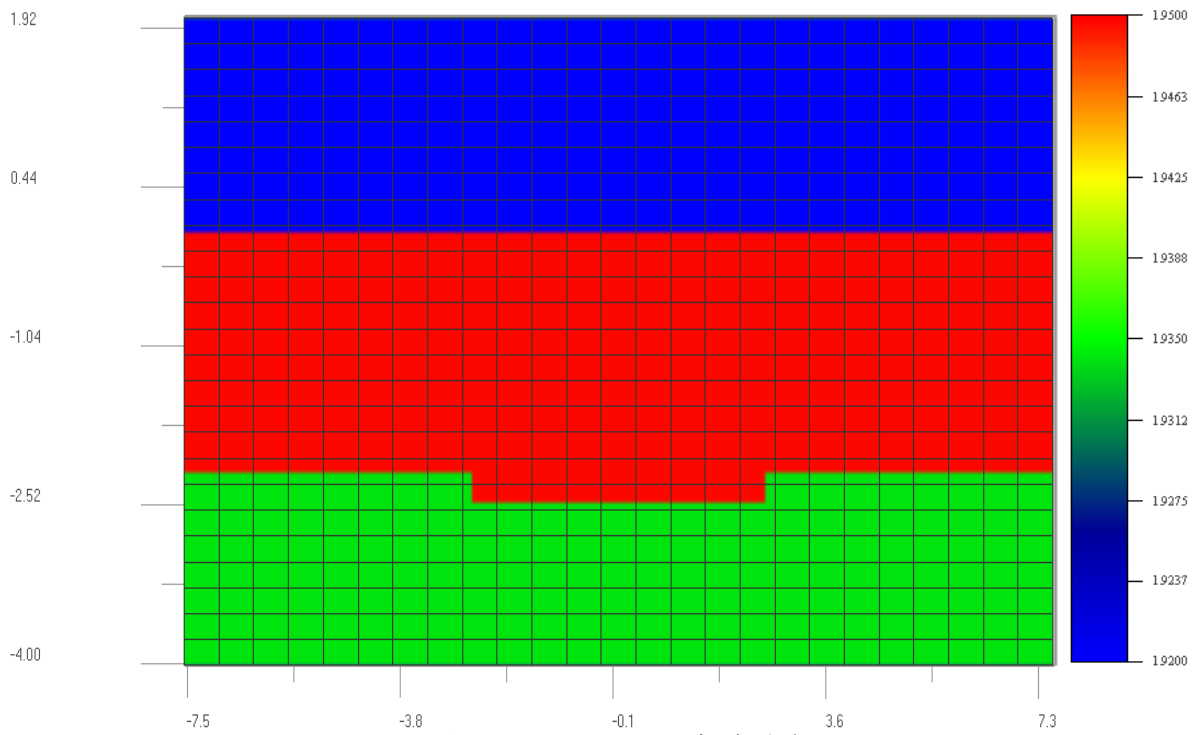


図 4-9 XY 面の屈折率分布

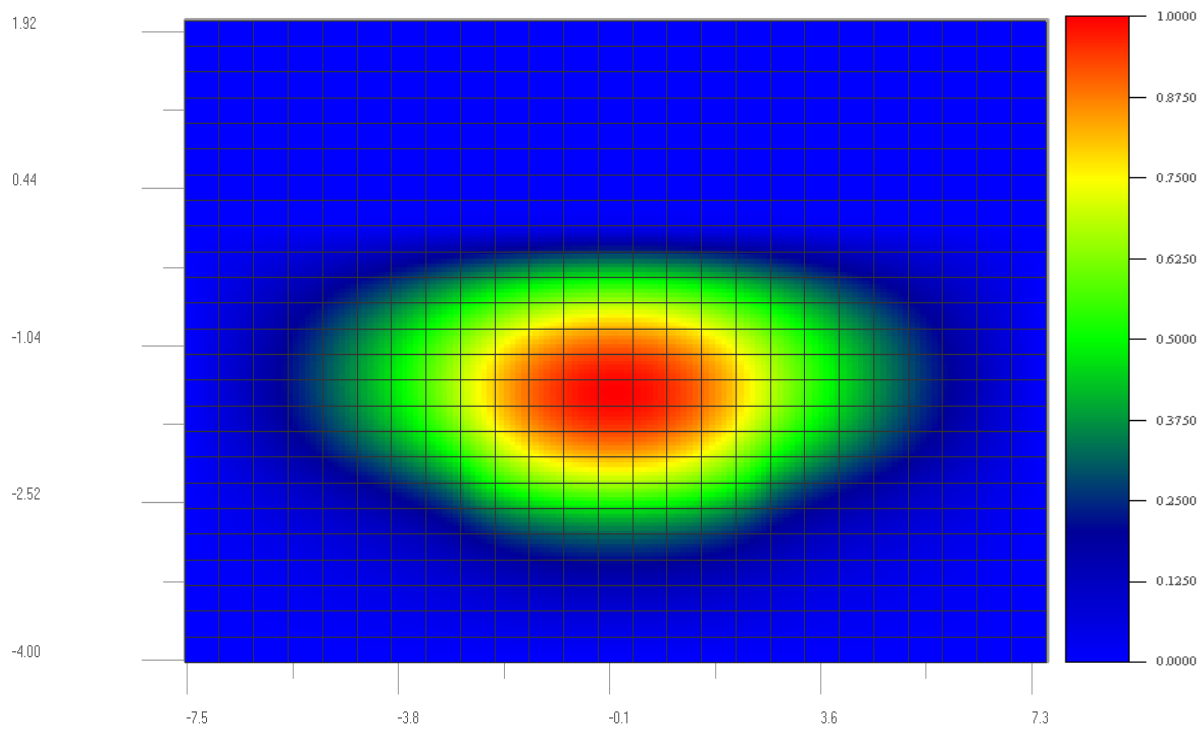


図 4-10 XY 面の電界強度

以上のシミュレーションの結果より、設計を行った 3 条件はどれもコアとなる ZnO 薄膜に閉じ込めができていると思われる。この条件の中で、もっともコア径が大きくなったのは条件 3 であるが、この条件は ZnO の横方向への閉じ込めが弱いように思われる。そのため、本研究では、コア径と閉じ込めの強さを考え、条件 2 で光導波路の作製を行っていく。図 4-11 に求めた設計値を示す。

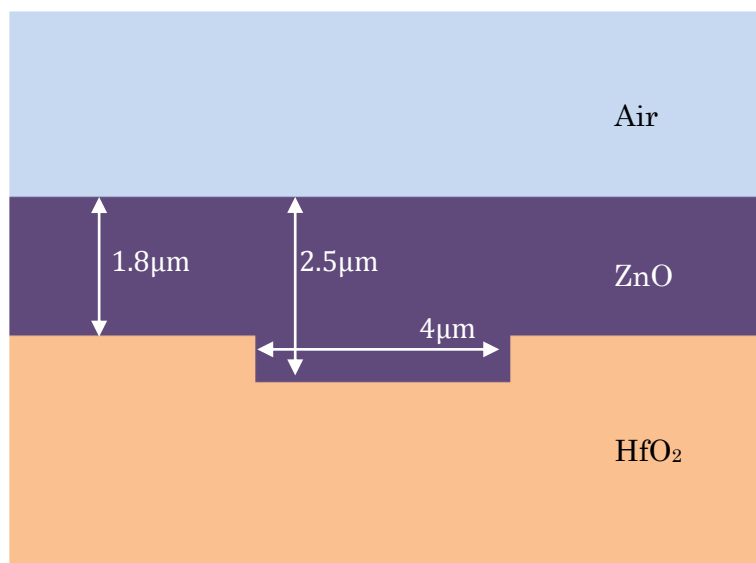


図 4-11 作製を行う光導波路



#### 4-5 まとめ

2章と3章にて得られた、ZnO 薄膜と HfO<sub>2</sub> 薄膜の屈折率の値から、等価屈折率法を用いてシングルモードでの導波路構造の設計を行った。透過屈折率法から、シングルモードとなるコア幅をいくつか求め、シミュレーション条件を定めた。定めた条件から OptiBPM によりシミュレーションを行い、その結果から各条件にて光の閉じ込めができていることを確認した。その中でコア径と光の閉じ込めが良いものを選択し、導波路の構造パラメータを決定した。以後、決定した構造パラメータにて導波路を作製を行って行く。

## 第5章 光導波路の作製と評価

### 5-1 はじめに

本章では、ストリップ装荷型導波路の作製と評価、そして新しく設計を行った導波路の作製について述べる。

### 5-2 ストリップ装荷型導波路の作製

#### 5-2-1 ストリップ装荷型導波路の作製工程

ZnO 薄膜を基板の上に成膜し、その上にリブ部として SiO<sub>2</sub> を作製し、ストリップ装荷型導波路を作製する。ストリップ装荷型導波路は、リブ部を作製することで屈折率差を制御し、光を閉じ込める構造である。

作製工程を以下に示す。

- ① スピンコーター(MIKASA 1H-D7)を用いて、ZnO 薄膜上にポジ型フォトレジスト(東京応化工業株式会社: THMR-ip3500)を試料全体に塗布する。スピコート条件は表に示す。塗布後、ドライオープンにてプリベークを行う。ベーク条件は表 5-1 に示す。

使用溶剤	ポジ型フォトレジスト
スピコート条件	300rpm×3sec+7000rpm×20s
プリベーク条件	90°C×90sec

表 5-1 レジストのスピコートとプリベーク条件

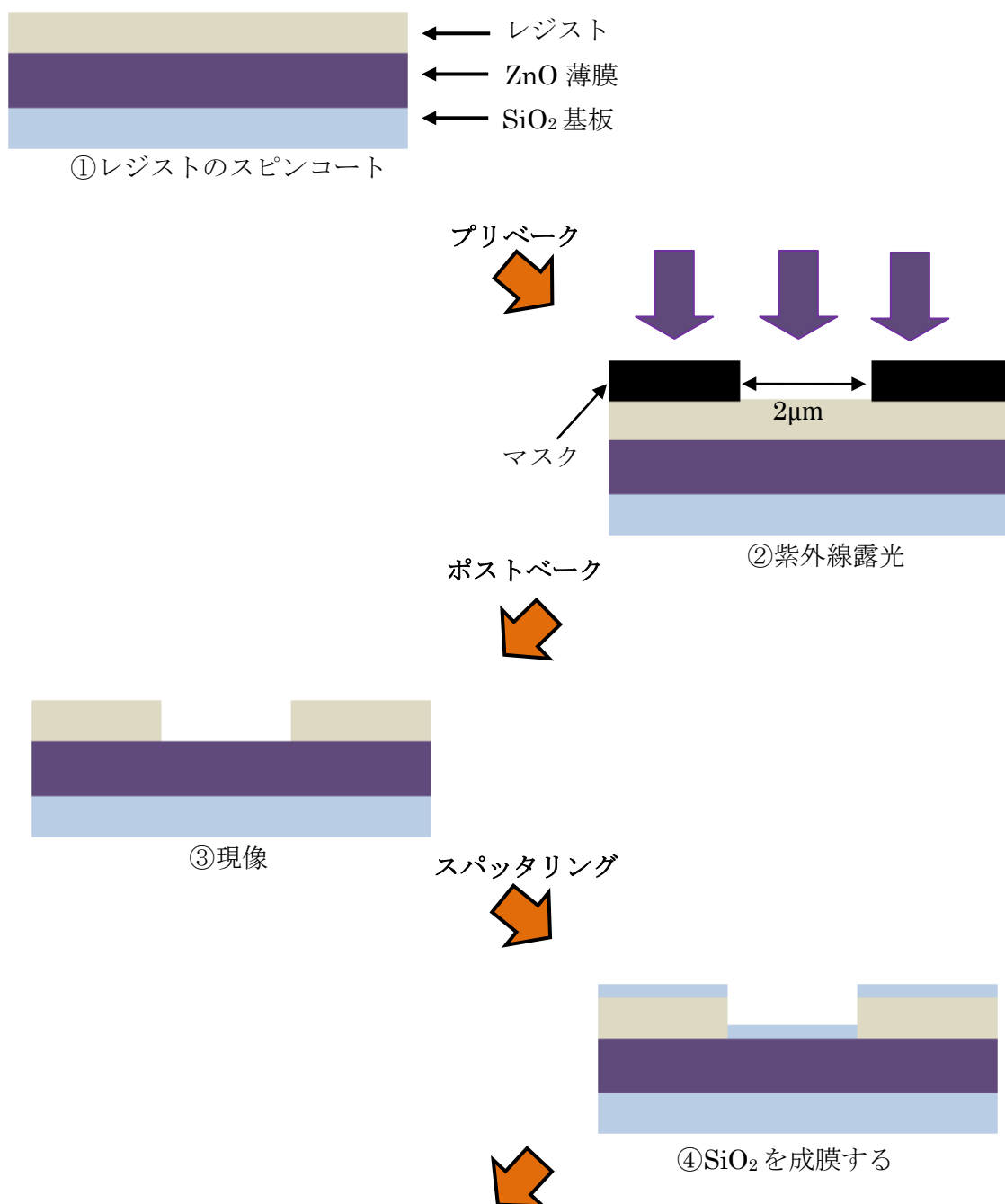
- ② マスクアライナ(株式会社ナノテック: LA310g)を使用し、紫外線露光を行う。線幅 2μm のパターンが描画されたフォトマスクを用いて、レジストにパターンを転写する。
- ③ 露光後、ドライオープンによってポストベークを行う。その条件は表 5-2 に示す。ベーク後、現像を行うため現像液に 65 秒間浸し、さらに純水で注ぐ。

ポストベーク条件	110°C×90sec
----------	-------------

表 5-2 ポストベーク条件

- ④ レジストパターンを作製した試料に、リブ部としてスパッタリング法によって  $\text{SiO}_2$  の成膜を行う。
- ⑤ アセトンによって残ったレジスト膜を剥離させることでレジスト膜上の  $\text{SiO}_2$  を取り除き、 $\text{SiO}_2$  のパターンを残す。

図 5-1 に作製手順を示す。





⑤アセトンによるリフトオフ

図 5-1 ストリップ装荷型導波路の作製手順

### 5-2-2 ストリップ装荷型導波路の端面加工

より光を入射しやすくするため、作製した導波路の端面を整える端面加工を行った。加工手順と概略図を以下に示す。

- ① リブ部を保護するため、試料をガラス板によって用いて挟む。
- ② ワイヤソーを使用し、導波路長を 5mm 程度にカットする。
- ③ 回転研磨機を用いて耐水研磨紙で導波路端面を整える。
- ④ フェルト研磨紙に酸化セリウム(ムサシノ電子株式会社)を含ませて回転研磨機で端面の光学研磨を行う。
- ⑤ 研磨後ガラス板をはがし、可視光レーザにより導波確認を行う。

試料をガラスによって挟んだ様子と、試料のカットの概略図 5-2 を図 5-3 と図に示した。



図 5-2 ガラス板による保護

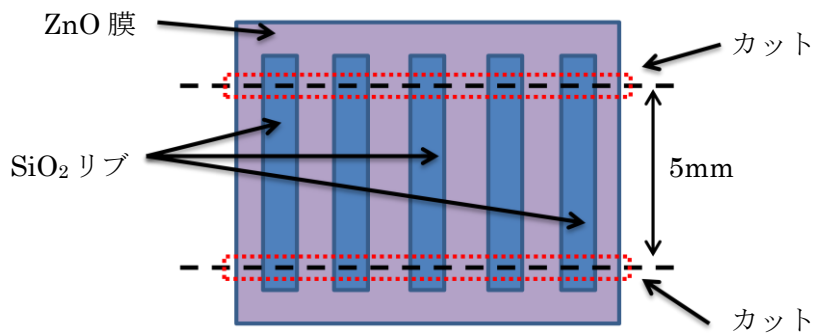


図 5-3 端面加工の概略図(上面図)

### 5-2-3 ストリップ装荷型導波路の評価

作製したストリップ装荷型導波路を、NFP 観察用光学ユニット(駿河精機株式会社：V25-1L)を使用して導波の確認実験を行った。SHG の測定には入射波として赤外光レーザーを利用するため、その前段階として赤色の可視光レーザーを用いて導波確認を行った。その観測系を図 5-4 に示す。

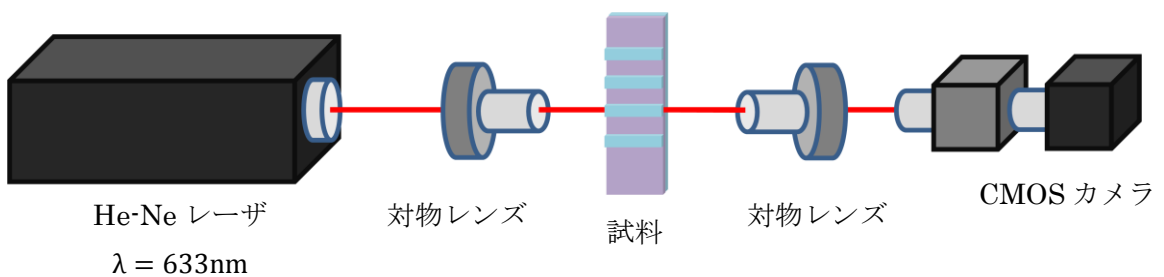


図 5-4 導波路評価系

入射光に波長 633nm の He-Ne レーザ(LASOS : LGK7628)を使用し、集光した基本波を導波路に入射させる。導波光は鏡筒により焦点を合わせ、倍率を調整して CMOS カメラ(株式会社アートレイ : ASTCAM-130MI)で検知した。カメラによる導波光確認画像を図 5-5 に示す。

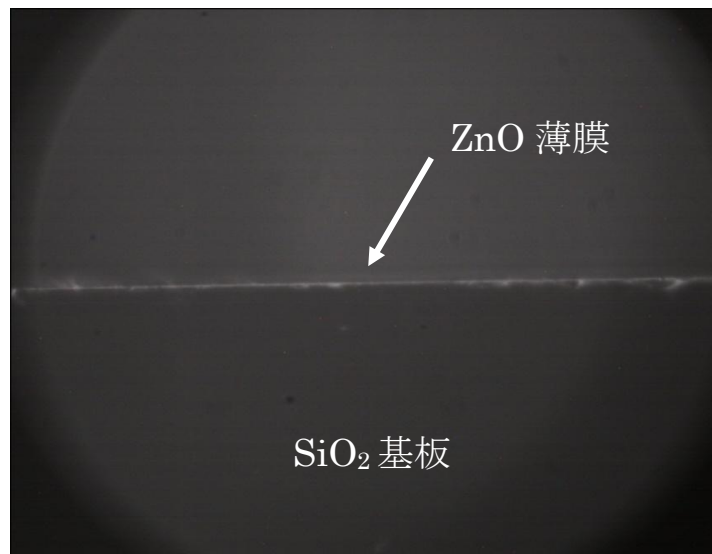


図 5-5 導波光確認画像

図 5-5 より、3 層スラブ導波路としての導波光は確認することができた。しかし、ストリップ装荷型構造による導波光を確認することはできなかった。この原因は、試料を挟み込む際に接着剤として利用するワックスが、酸化セリウムによって他の部分よりも先に削られてしまったことで、結果としてリブ部を傷つけてしまったことが原因と考えられる。

図 5-6 に酸化セリウムによって削られたワックスの様子を示す。

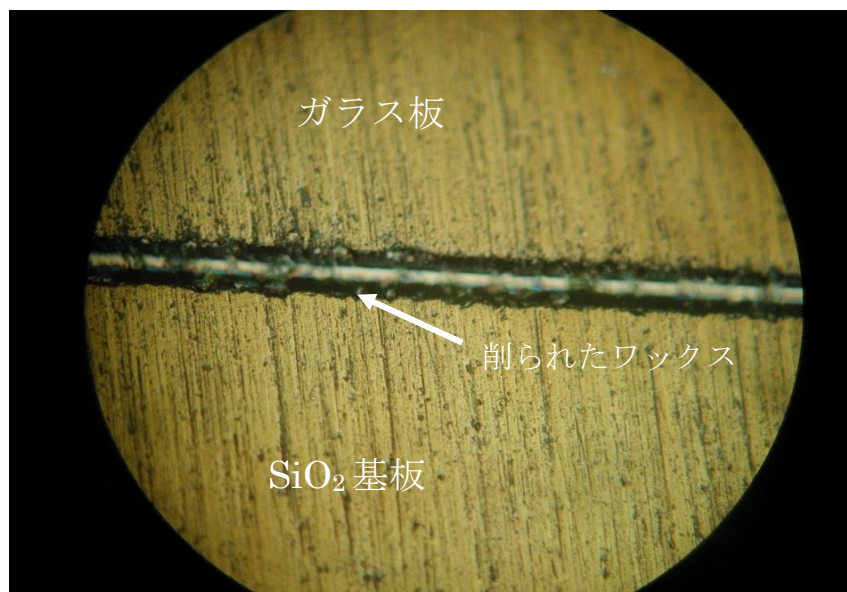


図 5-6 研磨後端面の様子

ストリップ装荷型導波路の研磨による端面出しは困難と考え、研磨から壁かいによる端面出しによって試料の作製を行った。

これまでは SiO<sub>2</sub> 基板によって試料作製を行ってきたが、へき開を行うため Si 基板での試料作製を行う。この作製工程として、アセトン洗浄した Si 基板上に SiO<sub>2</sub> をスパッタリングによって成膜する。成膜条件は表に示す。

使用ターゲット	SiO <sub>2</sub>
RF 出力[W]	200
使用ガス	Ar
ガス圧力[Torr]	約 3.8×10 <sup>-4</sup>
基板加熱温度[°C]	約 250

表 5-3 SiO<sub>2</sub> の成膜条件

表の条件で膜厚が 10μm 程度となるように成膜を行い、SiO<sub>2</sub> 基板の代替とした。試料は ZnO 成膜後にアニールするため、膜が剥がれないよう SiO<sub>2</sub> 成膜後 800°C にて 30 分間アニールを行った。アニール後、SiO<sub>2</sub> 基板での試料作製と同様の手順でリブ作製までを行い、へき開によって導波路の端面出しを行った。試料の上面からの図を図 5-5 に示し、壁かいした断面を図 5-7 に示す。そして、端面出しを行った試料に He-Ne レーザを入射させ、カメラによって確認した画像を図 5-8 に示す。

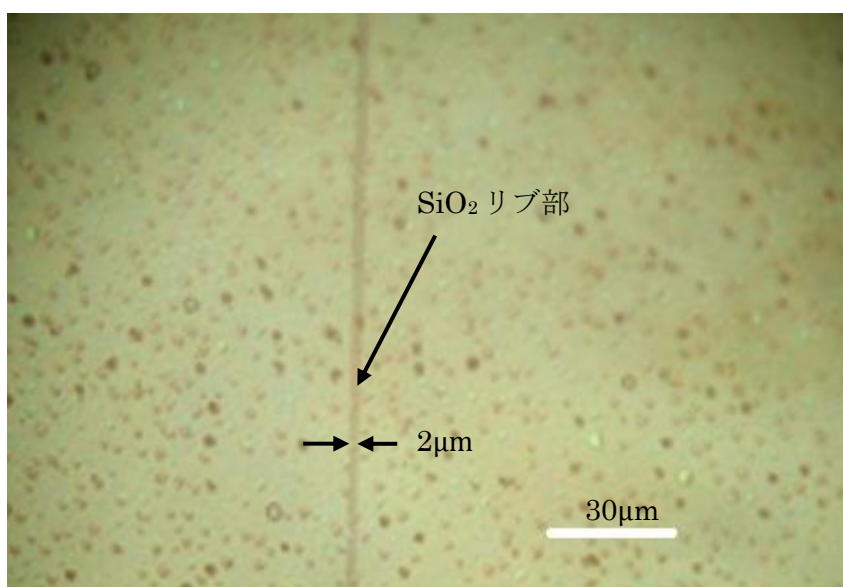


図 5-7 試料の表面の様子

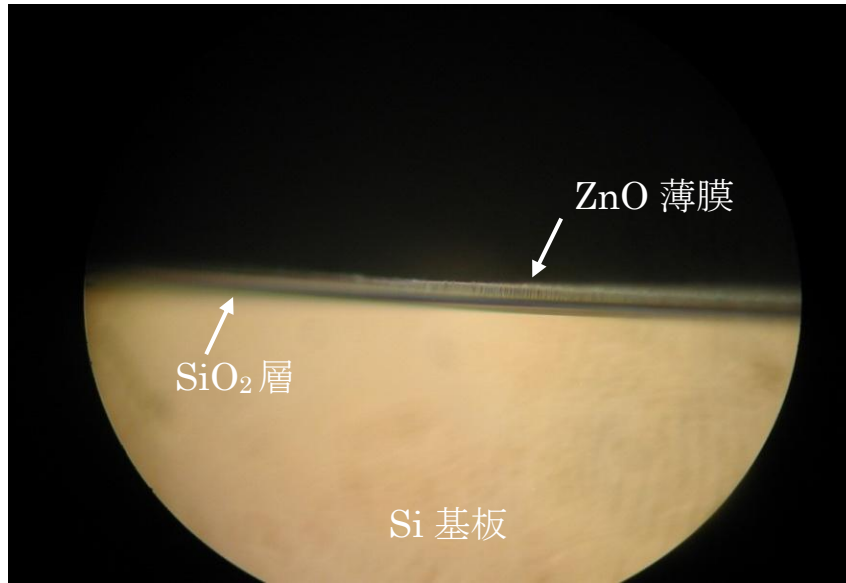


図 5-8 へき開による端面

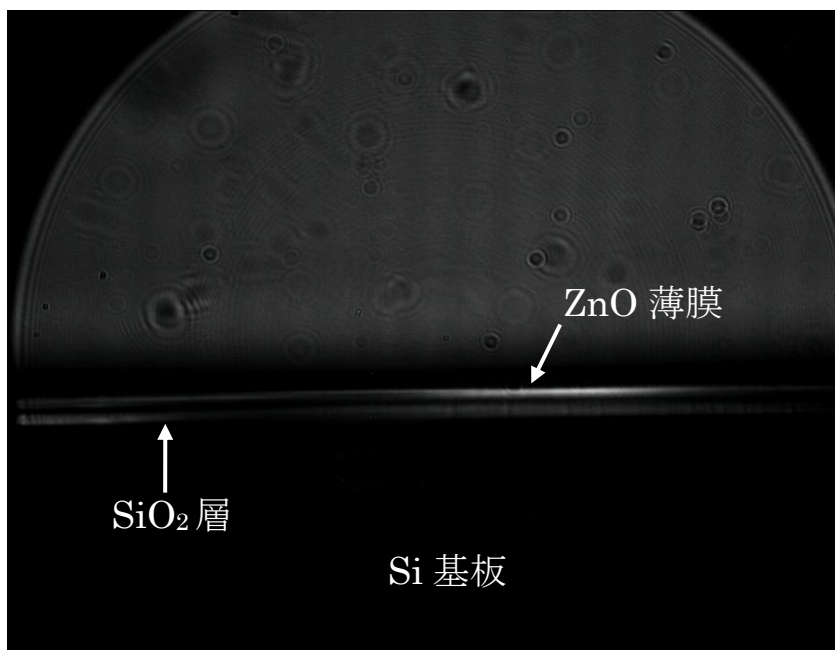


図 5-9 へき開による試料の導波確認



図 5-9 より、導波確認では 3 層スラブ導波路としての導波光は確認できたが、ストリップ装荷型導波路としての導波光を確認することができなかった。これは、アニールの際に成膜した  $\text{SiO}_2$  が張力により微細に荒れてしまい、導波コア部分が平坦にならなかったこと、また、このストリップ装荷型導波路のコア径が小さいことも原因ではないかと考えられる。

### 5-3 設計を行った導波路の作製

#### 5-3-1 設計を行った導波路の作製手順

- ① 成膜した  $\text{HfO}_2$  膜上にポジ型レジスト(東京応化工業株式会社:THMR-ip3500)をスピコートにより塗布する。スピコート後、ドライオープンでプリベークを行う。スピコート条件とベーキング条件は表に示す。

使用溶剤	ポジ型フォトリソレジスト
スピコート条件	300rpm×3sec+2500rpm×20s
ベーキング条件	90°C×90sec

表 5-4 レジストのスピコートとベーキング条件

- ② ベーク後、マスクアライナ(株式会社ナノテック:LA310g)を使用し、紫外線露光を行う。線幅4 $\mu\text{m}$ のパターンが描画されたフォトマスクを用いて、レジストにパターンを転写する。
- ③ 露光後、ドライオープンによってポストベークを行う。その条件は表 5-3 に示す。ベーク後、現像を行うため現像液に 65 秒間浸し、さらに純水で注ぐ

ポストベーク条件	110°C×90sec
----------	-------------

表 5-5 ベーキング条件

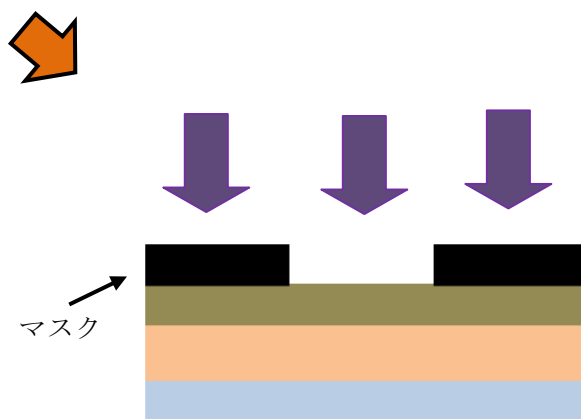
- ④ レジスト膜上に作製されたグレーティングをマスクとして、ECR エッチング装置(ANELVA,RIB-300)を使用し、ドライエッチングによって  $\text{HfO}_2$  薄膜上にパターンを転写する。
- ⑤ エッチング後、アセトンによってレジストを除去する。

⑥ スパッタリング法によって ZnO の成膜を行う。

作製手順を、図 5-10 示し、ECR エッチング装置の概略図を図 5-11 に示し、と今回行ったエッチング条件を表 5-6 に示す。



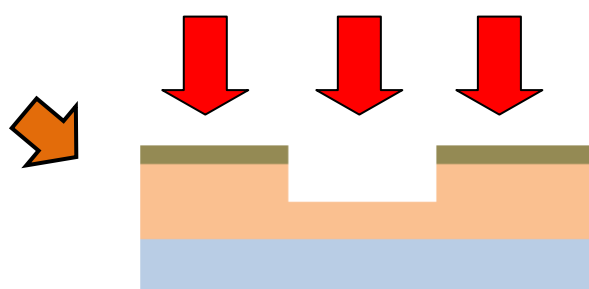
①レジストのスピコート



②紫外線露光を行う



③現像



④エッチング

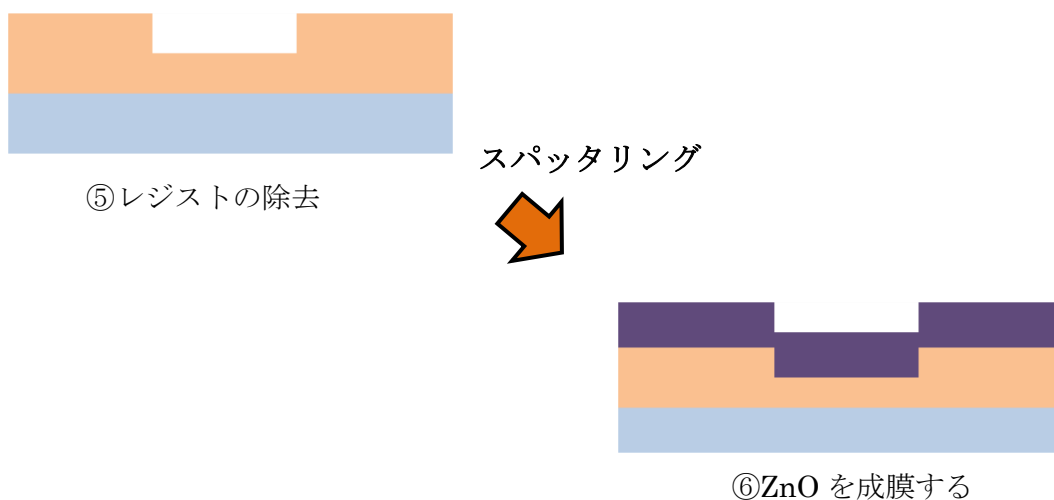


図 5-10 設計した導波路の作製工程

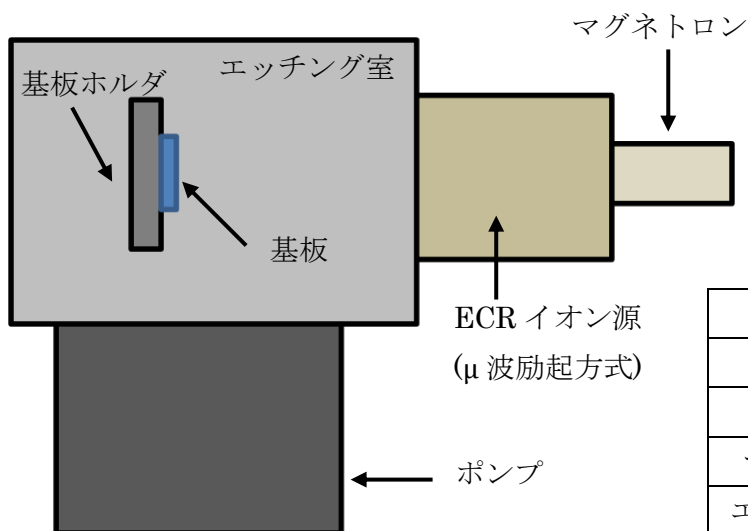


図 5-11 ECR エッチング装置の概略図

使用ガス	CHF <sub>3</sub>
ガス流量[sccm]	5
加速電圧[V]	300
マイクロ波電力[W]	200
エッチング時間[min]	90

表 5-5 エッチング条件

## 5-4 設計を行った導波路の作製の評価

### 5-4-1 HfO<sub>2</sub> 薄膜の荒れの改善

試料を作製するため、まずスパッタリング法によって SiO<sub>2</sub> 基板の上にクラッドとして HfO<sub>2</sub> の成膜を行った後、850°C でアニール処理を行う。これは、HfO<sub>2</sub> をドライエッチングし、HfO<sub>2</sub> 上に ZnO を成膜した後 800°C でのアニールを行うため、その際に HfO<sub>2</sub> が結晶成長しないようにするためである

今回まず SiO<sub>2</sub> 基板の上に HfO<sub>2</sub> を 2μm 程度成膜し、850°C でアニールを行った。しかし、その際 SiO<sub>2</sub> 基板の上の HfO<sub>2</sub> が荒れてしまった。その様子を図 5-12 に示す。

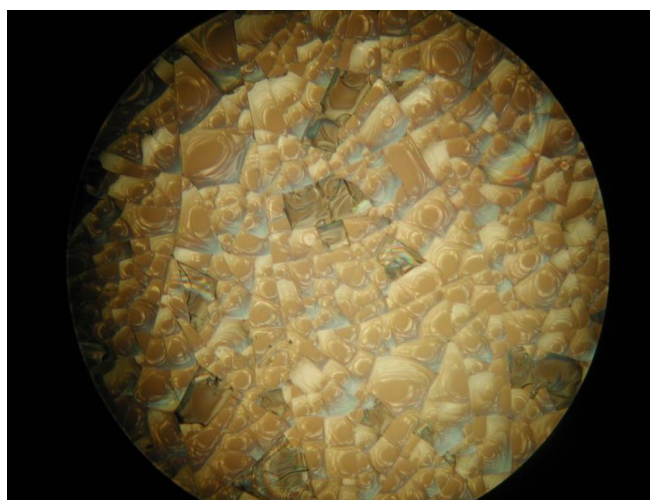


図 5-12 アニールにより荒れた HfO<sub>2</sub> 薄膜

これは、厚く成膜した HfO<sub>2</sub> 薄膜と SiO<sub>2</sub> 基板との熱膨張率の差によって起こったと考えられる。そこで、SiO<sub>2</sub> 基板ではなく、Si 基板を用いて HfO<sub>2</sub> の成膜を行い、850°C でアニールを行った。その様子を図 5-11 に示す。

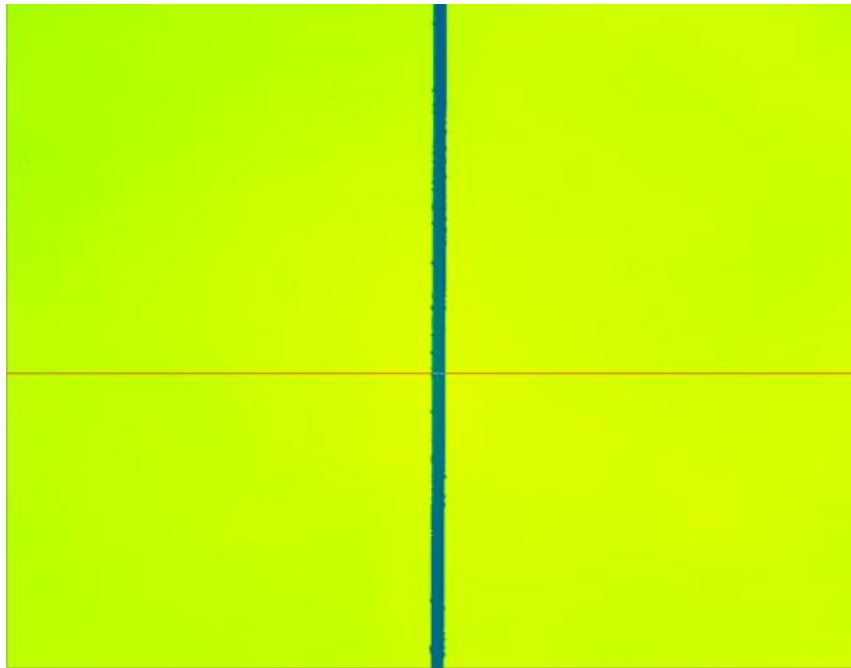


図 5-13 アニール後の Si 基板に成膜した  $\text{HfO}_2$

図 5-13 から、アニール後の荒れを抑えることができたと思われる。このため、今後の試料作製は Si 基板を用いて行っていく。

#### 5-4-1 $\text{HfO}_2$ 薄膜のエッチングによるパターンの作製

まず、ドライエッチングのためフォトリソグラフィによって作製した線幅  $4\mu\text{m}$  のレジストパターンをレーザ顕微鏡によって観察した。その様子を図 5-12 に示す。



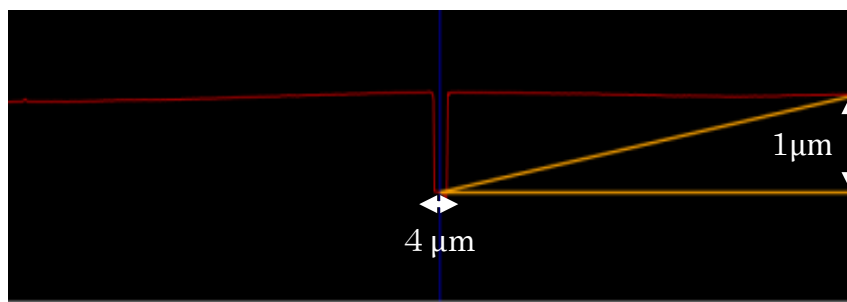


図 5-14 レーザ顕微鏡によるレジストパターンの観察

図 5-14 より、線幅  $4\mu\text{m}$  のレジストパターンの作製は成功したと思われる。また、全体のコントラストが一様であることから、水平にレジストをスピコートできていると考えられる。

次に、エッチングレート算出のため、試料でのエッチングを行った。エッチング後の試料の様子を図 5-13 に示す。

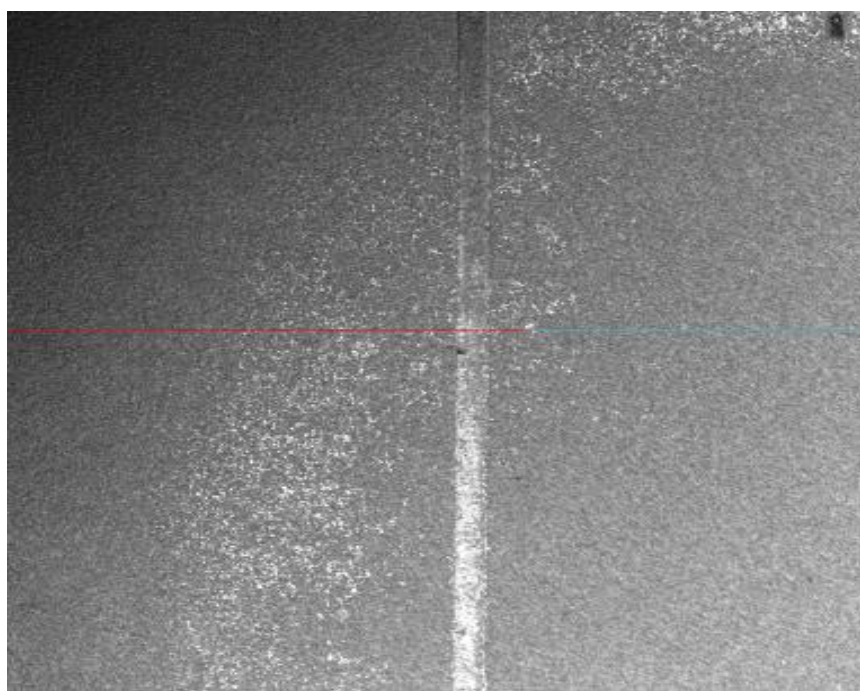


図 5-15 エッチング後の試料表面

図 5-15 より、エッチング後の試料の表面が荒れてしまった。これにより、エッチングのレート求めることができなかった。これは、エッチングを行った条件が試料に合わず、エッチングがうまくいかなかったためと思われる。これを改善するためには加速電圧やエッチング時間を調節する必要があると考えられる。

## 5-5 まとめ

まず、過去の研究から算出されたストリップ装荷型による導波路の作製を行った。端面出しの研磨の後、赤色の可視光レーザによって導波確認を行った。しかし、三層スラブ導波路としての導波光は確認できたが、ストリップ装荷型での導波光は確認できなかった。これは、ガラス板を固定するために用いたワックスが、酸化セリウムよりも先に削られ、その結果リブ部を傷つけてしまったことが原因と考えられる。

研磨による端面出しではリブ部を傷つけてしまうため、Si 基板を用いて壁かいによる端面出しを試みた。結果、三層スラブ導波路としての導波光は確認できたが、ストリップ装荷型としての導波は確認できなかった。この原因は、Si 基板上に成膜した SiO<sub>2</sub> がアニールの際に張力によって微細に荒れてしまい、コアである ZnO が平たんにならなかったことが考えられる。

今回ストリップ装荷型導波路の作製において、いくつかの改善を行ったものの、ストリップ装荷型導波路としての導波光は確認することができなかった。これは、このストリップ装荷型導波路のコアの設計値が非常に小さいため、レーザ導波させることが容易ではないと考えた。そこで、コアの ZnO に屈折率が近い HfO<sub>2</sub> を用いて、コア系を拡大させた導波路を設計し、作製を行った。

作製としてはまず、クラッドとする HfO<sub>2</sub> を SiO<sub>2</sub> 基板に 2~2.5 μm 程度成膜した。その後アニールを行ったが、アニール後 HfO<sub>2</sub> 薄膜が荒れてしまった。これは HfO<sub>2</sub> 薄膜と SiO<sub>2</sub> 基板の張力の差によるものと思われる。薄膜の荒れを抑えるため、SiO<sub>2</sub> 基板ではなく、Si 基板を用いて HfO<sub>2</sub> の成膜を行った。成膜後アニールを行ったが、基板を変更したことにより荒れを防ぐことができた。

成膜した HfO<sub>2</sub> 薄膜にエッチングのための幅 4μm のパターンを作製するため、レジストのスピコートを行った。スピコート後、紫外線露光により 4μm のパターンの作製に成功した。その後、エッチングを行った。エッチングを行ったが、薄膜表面がエッチングによって荒れてしまい、うまくエッチングすることができなかった。これは加速電圧やエッチング時間などの条件が良くなかったためであると思われる。そのため、今後はエッチングによりパターンを作製するため、HfO<sub>2</sub> 薄膜のエッチング条件を探していく必要がある。

## 第 6 章 結言

本研究では、ZnO の光学特性に着目し、非線形光学効果を利用した短波長レーザや、光通信への応用を目的とした光導波路型波長変換デバイスの研究について述べてきた。

第 2 章ではスパッタリング法による ZnO 薄膜の作製と評価について述べた。RF スパッタリング法により ZnO 薄膜の作製を行い、その後結晶性改善のためアニール処理を行った。その後 XRD 測定によって薄膜の結晶性の確認を行った。測定結果から、ZnO 由来のピークが確認できたことから、結晶性の改善を確認した。また、薄膜の透過率測定と反射率測定から、80%以上の高い透過率を得ることができ、透過率と反射率の測定の結果から、光の吸収も少ないと思われる。屈折率の測定では、プリズムカプラを用いた測定により、ZnO として妥当な屈折率が得られた。

第 3 章では、スパッタリング法による HfO<sub>2</sub> 薄膜の作製と評価について述べた。RF スパッタリング法により薄膜の作製を行い、その後アニール処理を行った。その後屈折率の測定を行い、ZnO 薄膜に近い屈折率をもつ HfO<sub>2</sub> 薄膜が得られた。透過率と反射率の測定から、高い透過率と、吸収が少ないということが確認できた。

第 4 章では、新しい光導波路の設計とシミュレーションについて述べた。ZnO 薄膜と HfO<sub>2</sub> 薄膜の屈折率からシングルモードとなる条件での構造パラメータを算出し、BPM を利用したシミュレーションを行った。その結果から光の導波の様子を確認し、新しい光導波路の構造パラメータを決定した。

第 5 章では、ストリップ装荷型導波路と設計を行った導波路の作製と評価を行った。ストリップ装荷型導波路の作製では、フォトリソグラフィとスパッタリングによってリブ部を作製し、端面加工を行った。可視光レーザを用いて導波確認を行ったが、ストリップ装荷型導波路としての導波光の確認はできなかった。次に、新しく設計を行った導波路の作製を行った。SiO<sub>2</sub> 基板上に HfO<sub>2</sub> 薄膜を作製し、アニールを行ったところ膜が荒れてしまったことから、Si 基板での作製を行った。成膜した HfO<sub>2</sub> 上にフォトリソグラフィによってレジストのパターンの作製を行い、エッチングを行った。エッチング後、HfO<sub>2</sub> 膜にうまくパターンが作製できず、荒れてしまった。これはエッチングの条件が HfO<sub>2</sub> に合わなかったと思われる。

今後は HfO<sub>2</sub> 薄膜をエッチングできる条件を探すことが課題である。そして、設計した導波路を作製し SHG の測定を行うことも課題となる。



## 謝辞

本研究を行うにあたり、充実した研究環境と機会を与えてくださり、また、実験に行き詰った際に的確に、丁寧に指導して下さった花泉修教授に心から感謝いたします。

本論文をまとめるにあたり、お忙しい中審査していただいた、高田和正教授に心から感謝いたします。

本研究を行うにあたり、お忙しい中多数のご指導、ご助言をして下さった三浦健太准教授に心から感謝いたします。

本研究を行うにあたり、装置の取り扱いや修理等様々な場面において数多くのご指導、ご助力をいただきました野口克也技術専門職員に心より感謝いたします。

本研究を行うにあたり、マスクアラナイナを貸して下さった桜井櫻井浩教授に心より感謝いたします。

本研究を行うにあたり、研究の基礎から機器の使い方等、終始導いて下さった井上雅人氏に心より感謝いたします。

日々の研究を行うにあたり、実験をサポートしていただいた、修士1年水口弘貴氏、学部4年宇野裕樹氏に心より感謝いたします。

本研究を行うにあたり、共に助け合い、研究生活や日常生活を有意義なものにしてくれた、同期院生をはじめとする、花泉研究室・三浦研究室の皆さんに心より感謝いたします。

本研究は多くの方々のご指導、ご助言のもとに行われたものであり、様々な面でご助言・サポートをして頂いた関係諸氏に改めて感謝し、御礼申し上げます。

## 参考文献

- [1] 井上恭 “ファイバー通信のための非線形光学” 森北出版株式会社 pp.10-11
- [2] 田中雅人 “ZnO 薄膜を用いた導波路型光波長変換デバイスに関する研究”  
群馬大学院修士論文 2010/3
- [3] 黒澤 弘 “入門 まるわかり非線形光学” オプトニクス社 pp.13-20
- [4] 前田譲治 海老澤賢史 “光工学が一番わかる本” pp.64-67
- [5] 黒田和男 “非線形光学” コロナ社 pp.1-4
- [6] 八百隆文 “ZnO 系の最新技術と応用” シーエムシー出版 pp.1, pp.53
- [7] E.M.Bachari, G.Baud, S.Ben Amor, M.Jacquet, “Structural and optical properties of sputtered ZnO films” *The Solid Films* 348(1999) pp.165-172
- [8] 李正中 “光学薄膜と成膜技術” 株式会社アグネス技術センター
- [9] 麻薪立男 “薄膜作製の基礎” 日刊工業新聞社 pp.202-228
- [10] 井上雅人 “ZnO 薄膜を用いた光機能性デバイスに関する研究” 群馬大学院修士論文 2011/3
- [11] 渡辺敏行 魚津吉弘 “光学材料の屈折率制御技術の最前線” pp.52-54
- [12] 早稲田嘉夫 松原英一郎 “X 線構造解析” 内田老鶴圃 pp.69-71
- [13] Jebreel M. Khoshman , Martin E. Kordesch “Optical properties of a-HfO<sub>2</sub> thin films” *Surface and Coatings Technology* 201(2006) pp.3530-3535
- [14] 國分泰雄, “光波工学” 共立出版株式会社

## 付録 A 透過率からの屈折率の算出

本研究における、測定した透過率による屈折率の算出方法を以下に示す。

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

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

次に、透過率の測定結果をグラフにしたものを用意する。図 B-1 に透過率のグラフを示す。

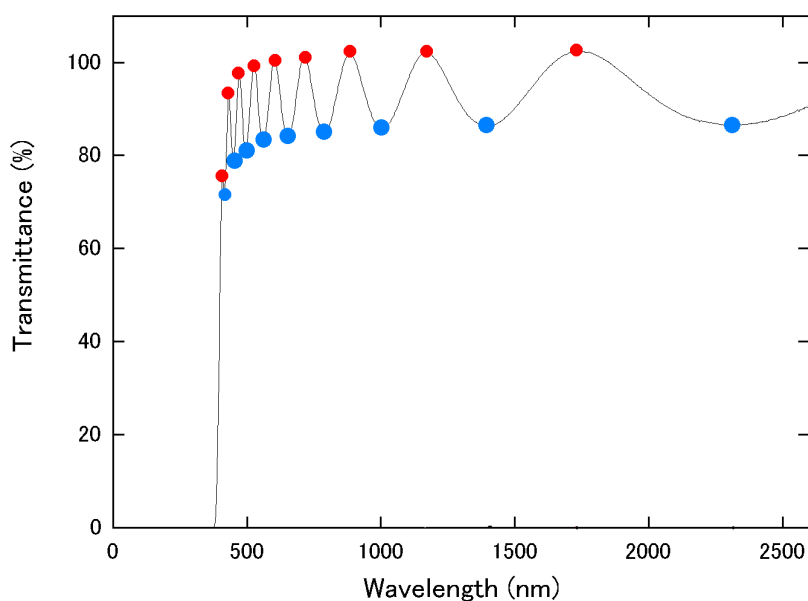


図 A-1 透過率

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

この極大値、極小値を用いて屈折率の計算を行う。

各極大、極小値における波長をとり、その波長の逆数を横軸、極大値を偶数次、極小

値を奇数次として、波長の長い方から順に短い方へとその次数を縦軸のパラメータとして割り振る。図 A-2 にその様子を示す。

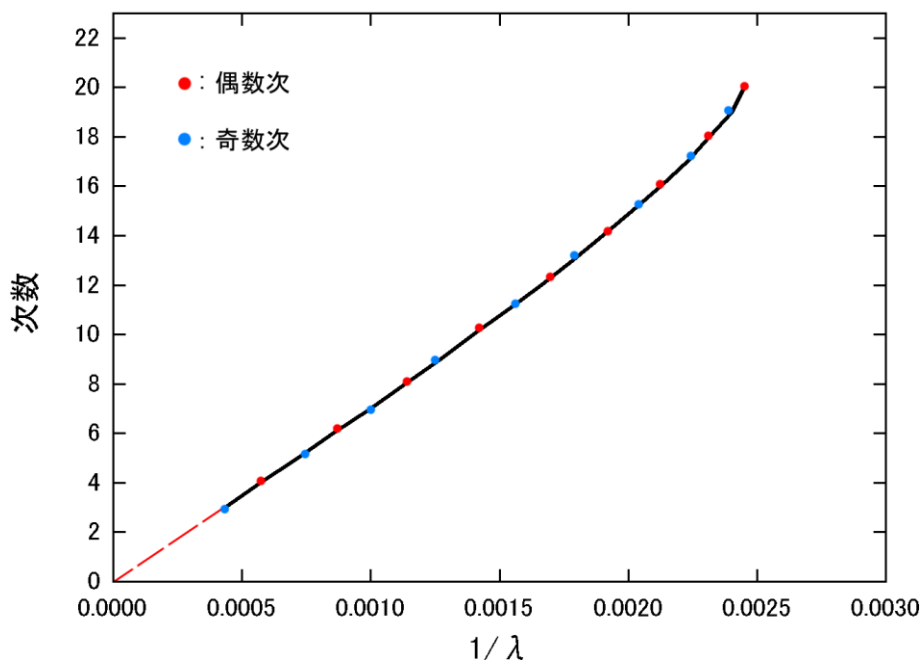


図 A-2 次数決定

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

以下にその式を示す。

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

$d$  は膜厚である。これによって、各波長での屈折率を計算する。

計算を行い、グラフにしたものを図 A-3 に示す。

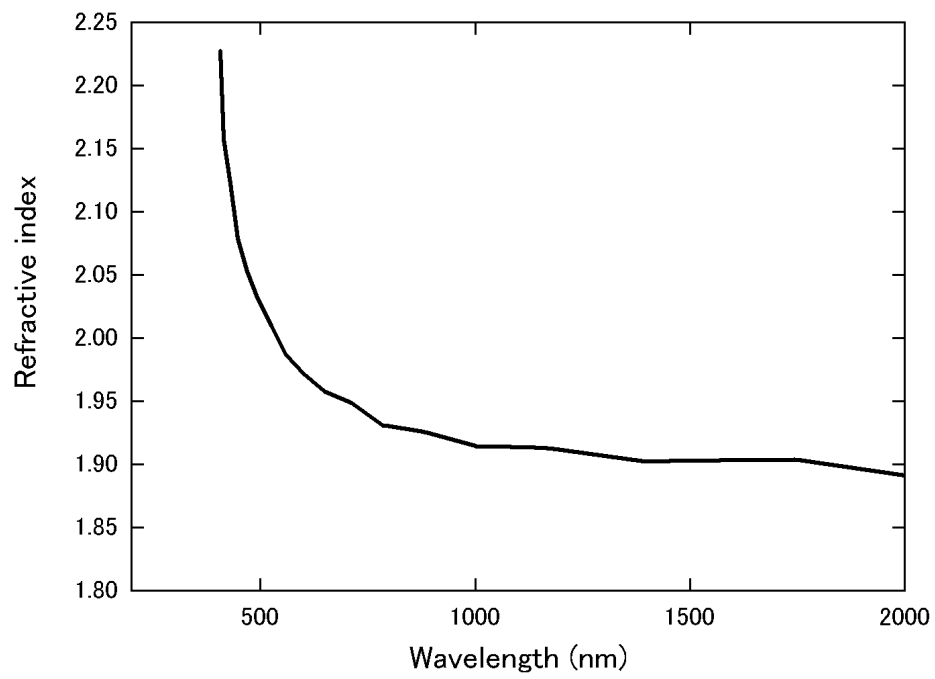


图 A-3 屈折率