

卒業研究報告

Si 光導波路の作製

指導教員

神戸 宏 教授

報告者

難波 康典

平成 17 年 2 月 22 日

高知工科大学 電子・光システム工学科

目次

第 1 章 序論.....	4
1.1 背景と目的	4
1.2 論文構成	4
第 2 章 光導波路	5
2.1 光導波路の基本構造 ^{[1][2]}	5
2.2 平面型光導波路の形状 ^[3]	6
2.3 リッジ型光導波路の構造	7
第 3 章 光導波路の作製 ^{[4]-[7]}	8
3.1 基板準備	8
3.1.1 基板切断	8
3.1.2 基板研磨	8
3.2 基板洗浄	9
3.2.1 基板洗浄工程	9
3.2.2 基板洗浄工程における問題点と解決法	9
3.3 自然酸化膜除去	11
3.3.1 自然酸化膜除去工程	11
3.4 フォトリソグラフィ	12
3.4.1 フォトリソグラフィ工程	12
(a) フォトレジスト塗布	13
(b) 露光・現像	14

(c) ウェットエッチング	14
(d) フォトレジスト除去	15
3.4.2 フォトリソグラフィ工程における問題点と解決法	15
(a) フォトレジスト塗布	16
(b) 露光・現像	16
(c) ウェットエッチング	17
3.5 まとめ	21
第 4 章 作製した光導波路の測定	23
4.1 作製した Si 光導波路の測定	23
4.2 測定結果	25
第 5 章 まとめ	27
5.1 結果	27
5.2 今後の課題	27
参考文献	29
謝辞	30

第 1 章 序論

1.1 背景と目的

近年インターネットの普及に伴い、光ネットワークの高速かつ大容量の光通信システムの 1 つとして光ファイバ通信システムの発展が著しいものとなった。現在この光ファイバを各家庭まで敷設し、大容量通信を可能とする FTTH(Fiber To The Home)が普及しつつある。この光ファイバ通信システムを構成する上で重要な光部品の 1 つとして平面型光導波路を用いた WDM(Wavelength Division Multiplexing：波長多重化方式)用光合分波器がある。

光導波路には半導体やガラスなどの材料が用いられ、様々な機能の実現を目的とした研究が現在行われている。

本研究では基板に半導体の 1 つである Si(シリコン)を用いた平面光導波路の作製、特にリッジ型光導波路の作製を行った。Si を用いた光導波路の作製には一般的にドライエッチングが適用されている。これに対して本研究ではウェットエッチングを適用する。ウェットエッチングは安価な方法であるがサイドエッチングやレジストの耐久性により微細加工が困難であったが、これまでリッジ部が先細りや丸みを帯びた形状ではあるが導波路構造を実現している。本研究ではエッチング条件をより詳細に検討することにより、良好な Si 光導波路の作製を目的とする。さらに作製した光導波路に波長 $1.55\ \mu\text{m}$ 帯の光を入射し、光導波路特性の評価を試みる。

1.2 論文構成

以降、第 2 章では光導波路に関する基礎を述べるとともに、本研究で作製するリッジ型光導波路について簡単に説明する。第 3 章では Si 光導波路の製作工程を中心に述べ、研究中に起きた問題点を示しその解決案について説明する。第 4 章では製作した Si 光導波路に光を通して光導波路特性の評価を行い、第 5 章で本研究の成果をまとめ、今後の課題点を述べる。

第2章 光導波路

光導波路はコアとクラッドで構造され、コアで光を導波している。本章では、基板上にコアとクラッドの構造を形成する光導波路の基礎的な構造と導波特性について簡単に述べる。また、一般的な平面型光導波路の形状を示すとともに、本研究で作製するリッジ型光導波路について説明する。なお光導波路には光ファイバも含まれる。

2.1 光導波路の基本構造^{[1][2]}

光導波路の基本構造は図 2.1 に示すように屈折率の異なる部分から出来ている。コアと呼ばれる光を閉じ込め導波する部分とクラッドと呼ばれる屈折率がコアよりも低い部分とで構成されている。通常コアの屈折率 n_1 はクラッドの屈折率 n_2 よりも約 1% 前後大きくなっている。端面から入射された光は、コアとクラッドの境界で全反射され、コア内に閉じ込められ伝搬する。

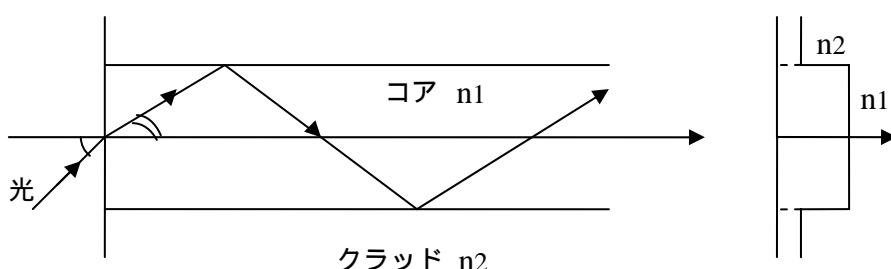


図 2.1 光導波路の構造

図 2.1 に示すように、端面に入射角 θ で入射した光が屈折角 θ_c でコア内に入るものとする。入射した光がコアとクラッドの境界で全反射する条件は、 $n_1 \sin \theta_c = n_2$ で表される。角度 θ でコア端面に入射された光がコアとクラッドの境界で全反射するには、 $\sin \theta_c = n_2/n_1 = \sin \theta$ ($n_1^2 - n_2^2$)^{1/2} となる。すなわち、

$$\theta \leq \sin^{-1} \sqrt{n_1^2 - n_2^2} \equiv \theta_{\max} \quad (2.2)$$

を満たしていなければならない。コアとクラッドの屈折率差は通常 $n_1 - n_2 = 0.01$ 程度と小さいので式(2.1)の θ_{\max} は

$$\theta_{\max} \cong \sqrt{n_1^2 - n_2^2} \quad (2.2)$$

と近似できる。このときの θ_{\max} は光導波路が受け入れることのできる最大受光角を表す。この角度を開口数(NA: Numerical Aperture)と呼ぶ。NAは屈折率差 $(n_1 - n_2)$ とコアの屈折率 n_1 との比で表すことができる。この量を比屈折率差と呼ぶ。比屈折率差 Δ は

$$\Delta = \frac{n_1^2 - n_2^2}{2n_1^2} \cong \frac{n_1 - n_2}{n_1} \quad (2.3)$$

で表されこの比屈折率差 Δ を用いると NA は、

$$NA = \theta_{\max} \cong n_1 \sqrt{2\Delta} \quad (2.4)$$

で表すことができる。

光導波路には 1 つのモードのみを伝搬する単一モード(シングルモード)導波路と 2 つ以上のモードを伝搬する多モード(マルチモード)導波路がある。これらモードは光の波長、屈折率差、およびコアの大きさによって決まる。一般的に単一モード導波路の屈折率差は 0.3%、コアは約 $10 \mu\text{m}$ である。それに対して多モード導波路の屈折率差は 1%、コアは約 $50 \mu\text{m}$ である。

2.2 平面型光導波路の形状^[3]

平面型光導波路には図 2.2 に示すようにいろいろな形状がある。ここでは代表的な平面型光導波路の形状について述べる。

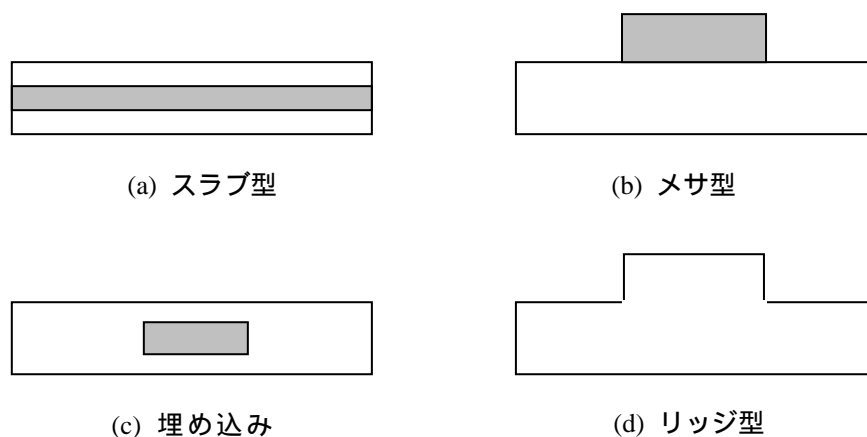


図 2.2 平面型光導波路の形状

図 2.2 (a) はスラブ型光導波路と呼ばれ、屈折率の高いコア層を屈折率の低

いクラッドで挟んで光を閉じ込める構造をしている。LD (Laser Diode : レーザダイオード) はこの構造である。

図 2.2 (b) はメサ型光導波路と呼ばれ、クラッドとなる基板の上にコアとなる材料を薄膜製作し、フォトエッチング法等で導波路部分を形成する。

図 2.2 (c) は埋め込み型光導波路と呼ばれ、図 2.2 (b) のメサ型光導波路の上に基板と同じクラッド層を設けた構造をしている。コアを埋め込むことにより表面の凹凸による散乱損失が減少する。

図 2.2 (d) はリッジ型光導波路と呼ばれる。本研究では作製する導波路である。2.3 のリッジ型光導波路の構造で詳しく述べる。

2.3 リッジ型光導波路の構造

リッジ型光導波路は図 2.3 に示すように材料の表面にリッジ部分を設けることによってその部分が他の部分に比べて等価屈折率が大きくなるのを利用し横方向の光を閉じ込め導波させる構造をしている。このとき、リッジ(コア)となる材料の屈折率(Si では $n=3.478$)に対して、クラッドは空気であり式(2.3)の屈折率差 $\Delta n=0.7$ と通常の導波路に比べて大きい。また、縦方向(図 2.3 の x 方向)の閉じ込めは弱いが、将来図 2.2(b)に示すメサ型光導波路の作製を考えている。

本研究では Si 光導波路のウェットエッチングでの作製の限界を明らかにするため、最も簡単な構造のリッジ型を取り上げている。ここでは、導波路のリッジ部分の幅を $10\mu\text{m}$ 、高さ $10\mu\text{m}$ の実現を目標とした。

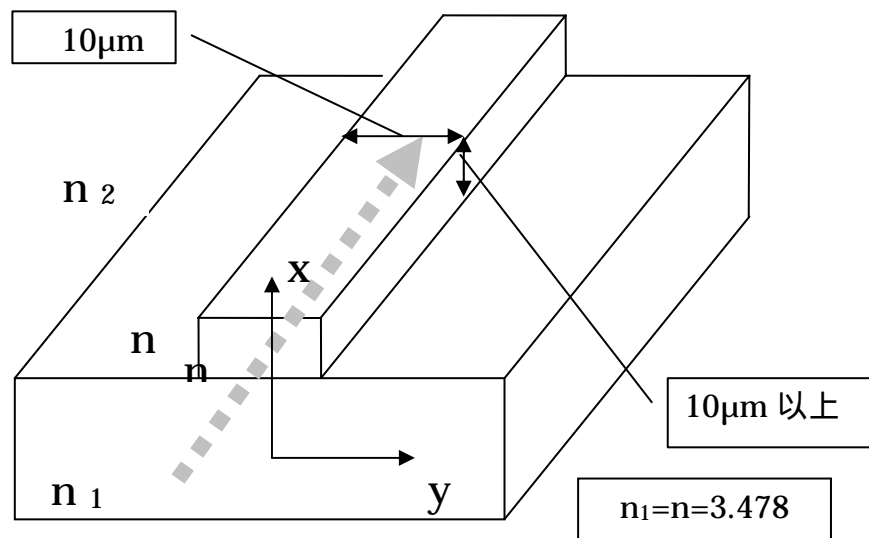


図 2.3 リッジ型光導波路

第3章 光導波路の作製^{[4]-[7]}

本章では、本研究で検討したウェットエッチング法による Si 光導波路の作製工程について述べる。

3.1 基板準備

基板準備は、Si ウェハから光導波路に必要な大きさの Si に切断し、基板を必要な厚さまで研磨を行う工程である。

3.1.1 基板切断

基板の切断にはスクライバー(図 3.1)を使用した。スクライバーは台上に載せたウェハにダイヤモンドの刃で切断したい場所に傷を付ける装置である。本研究で用いた Si 基板は Si ウェハにスクライバーで傷を付けへき開を利用して所定の大きさに切断したものである。



図 3.1 スクライバー

3.1.2 基板研磨

光導波路作製時に基板の切断面が欠け凹凸が生じることがある。この結果ファイバとの結合損失が大きくなってしまう。このため光導波路を作製した後にへき開を利用して割ることにしたが、Si 基板が厚過ぎるときれいにへき開面が出ないことがある。予め研磨をして基板を薄くしておくことによってへき開面を出し、割れやすくした。これにより光の入射を容易にし、高い結合効率を

得られるようにした。

3.2 基板洗浄

基板洗浄は、基板表面のパーティクル(微細な埃)や有機物・無機物を基板上から除去する工程である。光導波路を作製するにあたって最初に行う作業であり最も重要である。

3.2.1 基板洗浄工程

基板表面上のパーティクルが除去しきれずに残ると後の作業においてパターン欠陥に結びつき、良質な光導波路を作製することができない。

洗浄には一般的に用いられるウェット洗浄を行った。ウェット洗浄ではまずアセトン(CH_3COH_3 : 99.5%)で有機物の除去を行い、メタノール(CH_3OH : 99.8%)で基板に付着したアセトンを除去する。最後に残ったパーティクルや薬品を純水洗浄で除去する。いずれも超音波洗浄を用いた。洗浄後に基板表面の水分を飛ばすためにバーク(乾燥)を行う。基板洗浄工程の流れとそれぞれの時間を図 3.2 に示す。

基板洗浄(超音波洗浄)		
アセトン		5min
メタノール		5min
純水		5min
バーク	90	5min

図 3.2 基板洗浄工程

3.2.2 基板洗浄工程における問題点と解決法

この工程において図 3.3(a)に示すように従来の基板洗浄では基板上の汚染物が完全に取りきれれていないことがある。

基板上に故意に指紋や油性マジック等をつけ、前述と同じ条件下で洗浄手順・時間を変化させ基板表面の観察を行った。洗浄方法と表面の状態との関係を表 3.1 に示す。

表 3.1 洗浄方法と表面状態

	アセトン	純水 (流水)	メタノール	純水 (流水)	純水 (超音波)	洗浄回数	表面状態
1	5min		5min		5min	1回	
2	5min		5min		5min	1回	
3	10min		10min		10min	1回	×
4	10min		10min		10min	1回	×
5	5min		5min		5min	2回	
6	5min		5min		10min	1回	

この結果、従来の洗浄工程を 2 回繰り返したところ基板の表面は以前に比べ汚染物を除去することが出来た。これと同じ結果が従来の洗浄方法の純水の時間を 10min にしただけで得ることが出来た。また表 3.1-3 や 3.1-4 のように洗浄時間を増やしただけでは表面の汚染物を除去することが出来ないことが明らかになった。

表 3.1-6 の洗浄後の基板表面の写真を図 3.3(b)に示す。



(a) 従来の基板洗浄



(b) 改正後の基板洗浄

図 3.3 基板洗浄後の基板表面

これらの結果より、基板洗浄工程を純水の洗浄時間を 5min から 10min にし、それぞれの洗浄後に流水(純水)洗浄をすることにする。基板洗浄工程の流れと最適な時間を図 3.4 に示す。

基板洗浄(超音波洗浄)		
アセトン		5min
	純水(流水)	
メタノール		5min
	純水(流水)	
純水(超音波)		10min
	純水(流水)	
ベーク	100	3min

図 3.4 洗浄工程の改正図

3.3 自然酸化膜除去

Si は空気中に放置しておくとも表面に自然酸化膜を形成する。この工程は表面に形成された自然酸化膜を除去する工程である。

3.3.1 自然酸化膜除去工程

自然酸化膜(SiO_2)が存在する場所ではとエッチングレート(エッチング速度)が遅くなり均一なエッチングが行われず良質な光導波路が作製できない。そのため、緩衝フッ酸(B-H:フッ化水素酸とフッ化アンモニウムの混合液)とフッ化水素酸(HF:46.0% ~ 48.0%)を用いて基板表面に生成されている酸化膜の除去を行った。これら酸化膜除去を行った基板表面は水をはじく疎水性表面となる。酸化膜除去の工程の流れとそれぞれの時間を図 3.5 に示す。

自然酸化膜除去	
B-HF	5min
HF:H ₂ O=1:1	5min
プリベーク	30sec

図 3.5 自然酸化膜除去工程

3.4 フトリソグラフィ

この工程は光導波路の形状を Si 基板の上に形成するために重要な工程である。光感光性のフォトレジストを塗布し、設計されたパターンを有するマスクを通して露光することにより、所定のパターンをフォトレジストに転写する工程である。この工程ではスピナー(塗布機)の回転数でフォトレジストの膜厚を決め、露光に引き続き現像を行う。フォトレジストの厚さは露光時間や現像時間でも変化する。このためそれぞれの工程での条件の最適化を図った。

3.4.1 フトリソグラフィ工程

フトリソグラフィ工程のプロセスを図 3.6 に示す。以降、(a)でフォトレジスト塗布について、(b)で露光と現像について、(c)でウェットエッチングについて、(d)でフォトレジスト除去についてそれぞれ説明する。最後(e)にフトリソグラフィ工程の流れと作業時間をまとめる。

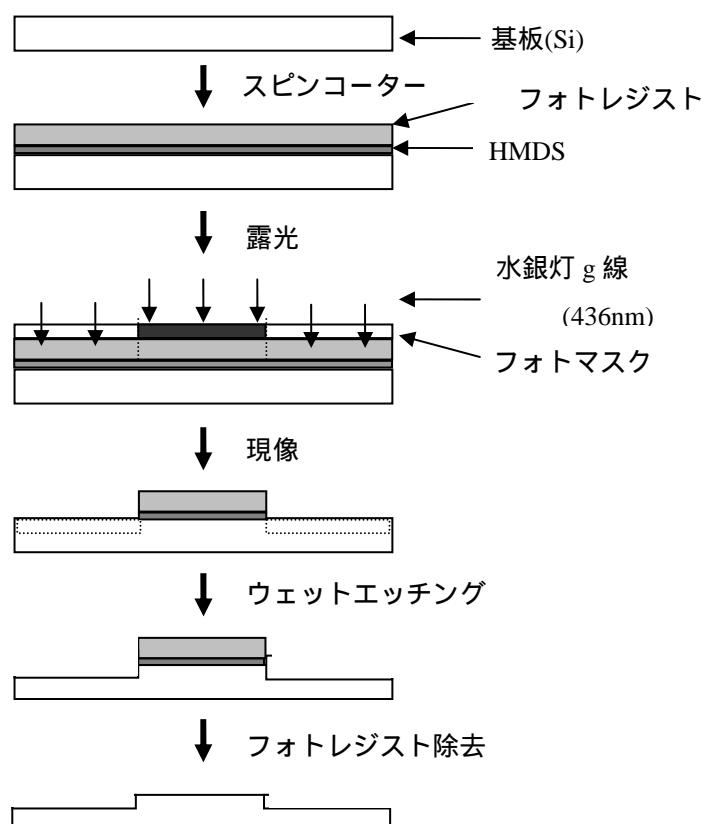


図 3.6 フトリソグラフィ

(a) フォトレジスト塗布

基板にフォトレジストを塗布し、スピナー(図 3.7)で均一な膜厚を形成する工程である。フォトレジストには露光部分がパターンとして残るネガ型レジストと逆に非露光部分がパターンとして残るポジ型レジストの 2 種類がある。本研究で用いたフォトレジストは厚膜を可能とした長瀬産業株式会社製のポジ型レジスト(NPR9810 : 420cp)である。フォトレジストのみを基板にコーティングしただけではエッチング時にフォトレジストが基板から剥がれる現象が起こる。この現象をおさえるために HMDS(ヘキサメチルジシラザン)を基板に塗布し、フォトレジストと同じ回転数でスピナーコーティングし基板とフォトレジストの密着度を向上させた。表 3.2 にスピナーコーティングの回転数とその時のフォトレジストの膜厚を示した。初速は基板に塗布したフォトレジストをある程度広げるための回転数、本速は必要としている膜厚にするための回転数、終速は基板の端に残っているフォトレジストを飛ばすための回転数である。これらの回転数、特に本速の回転数が変化するとフォトレジストの膜厚も変化する。



図 3.7 スピナー

表 3.2 スピナーの回転数と膜厚

回転数(rpm)	時間(sec)	膜厚(μm)
初速 300	3	14
本速 5000	20	
終速 6000	0.5	

(b) 露光・現像

露光は基板にマスクパターンを転写する工程である。転写には露光機(図 3.8)を用いた。露光には水銀灯の g 線(波長: 436nm)を用いた密着露光を採用した。密着露光はフォトレジストと基板を密着させ露光する方法である。本研究で用いるマスクパターンを図 3.9(a)に示す。

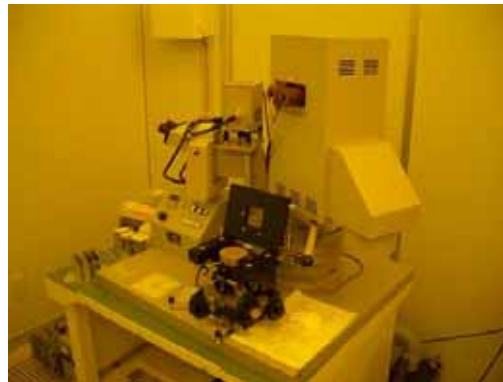
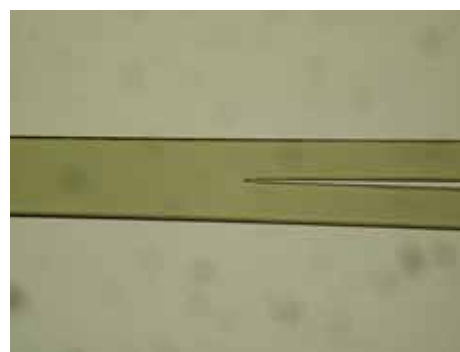


図 3.8 露光機



(a)



(b)

図 3.9 (a)使用するマスクパターンと(b)レジストに転写されたパターン

現像は露光された基板を東京応化工業株式会社製の現像液に浸けることによって、ポジ型レジストでは露光部分の腐食したフォトレジストを溶かしマスクパターンと同じ形状にする工程である。現像後の基板表面を図 3.9(b)に示す。

(c) ウェットエッチング

ウェットエッチングはSi基板をフッ化水素酸と硝酸(HNO_3 : 60~61%)と酢酸(CH_3COOH : 99.7%)のエッチャントに浸すことによってSiを腐食さ

せ、フォトリソレジストの部分が腐食されず凹凸のパターンとして残す工程である。硝酸でSiを酸化させ表面をSiO₂にする。このSiO₂がフッ化水素酸と反応し溶解する。酢酸はこれらの反応速度を調整する役割を果たしている。

(d) フォトリソレジスト除去

基板に残っているフォトリソレジストを除去する工程である。東京応化工業株式会社製の剥離液を使用したか、代用としてアセトンを用いることもある。

(e) まとめ

フォトリソグラフィ工程の流れと時間を図 3.10 に示す。

フォトリソグラフィ		
スピンドクター	HMDS (NP-100)	
スピンドクター	フォトリソレジスト (NPR9810)	
プリベーク	100	2min
露光		10sec
現像		3min
ポストベーク	110	1min
ウェットエッチング		
HF : HNO ₃ : CH ₃ COOH = 3 : 15 : 5		
1.5 ~ 2min		
フォトリソレジスト除去	剥離液(アセトン)	

図 3.10 フォトリソグラフィ工程

3.4.2 フォトリソグラフィ工程における問題点と解決法

フォトリソグラフィ工程において発生した問題点や改善点についてプロセスに沿って述べる。

(a) フォトレジスト塗布

エッチング時にフォトレジストが剥がれやすいので基板とフォトレジストの密着度をあげなければならない。また、作製する光導波路のリッジ部分の幅に対応するレジスト膜が必要である。

基板とフォトレジストの密着度を向上するために HMDS をスピニングする前後にベークを行う。HMDS の塗布前後にベークを行う事によって基板と HMDS の密着度と向上させることができた。

(b) 露光・現像

露光と現像はフォトレジストの形を整えるのに重要である。フォトレジストの膜厚によって異なるが露光時間や現像時間が長過ぎるとリッジ部分が丸みを帯びてしまう。また、現像しきれていないとエッチングの時の表面の荒れにつながってしまう。

露光はフォトレジストの膜厚によって露光時間を変化させることで解決した。また現像は、現像液を一定の温度にすることによって安定した現像が行われた。現像液の温度は高すぎると非露光部まで現像してしまった。この結果、現像液の温度を 20 で現像をすることにした。このとき 30sec おきくらいにかかるく攪拌することが重要である。結果、丸みを帯びないレジストを形成することが出来た。走査型電子顕微鏡 (Scanning Electron Microscope : SEM) で観察したレジストの端面を図 3.11 に示す。

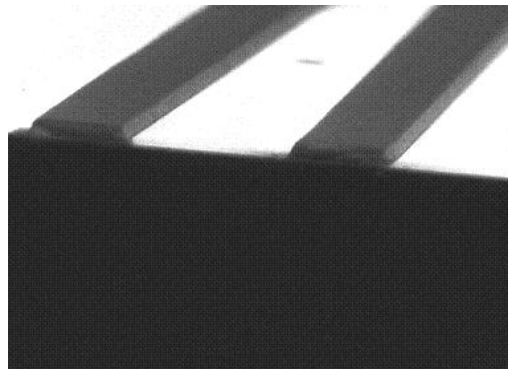


図 3.11 SEM で見た現像後のレジスト

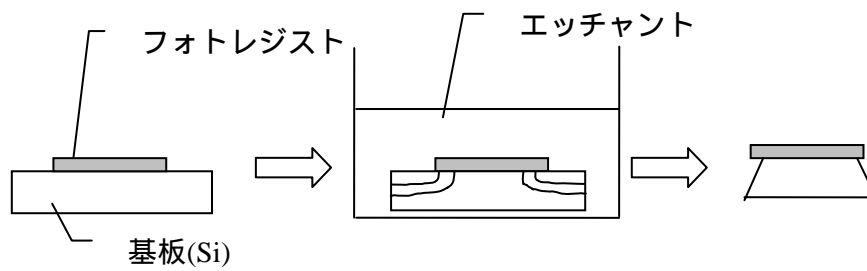
ここまでのスピナーの回転数と露光時間・現像時間と現像前後のフォトリソ膜厚の関係を表 3.3 に示す。現像前と現像後でフォトリソの膜厚が $1\mu\text{m}$ 以下で変化している。これは現像時にフォトリソが非露光部であっても現像液に溶け出していると考えられる。

表 3.3 スピナーとフォトリソの関係

マスク幅 (μm)	スピナー			露光時間 (sec)	現像時間 (min)	レジスト膜厚 (μm)	
	回転数 (rpm)		時間 (sec)			現像前	現像後
	初速	本速					
5	初速	1000	3	5	1.5	7	6
	本速	6500	20				
	終速	7000	0.5				
10	初速	1000	3	5	2	7	7
	本速	6000	20				
	終速	7000	0.5				
20	初速	1000	3	7	2	10	9
	本速	5000	20				
	終速	6000	0.5				
50	初速	500	3	10	3	15	14
	本速	5000	20				
	終速	6000	0.5				
100	初速	500	3	10	3	18	18
	本速	4000	20				
	終速	6000	0.5				

(c) ウェットエッチング

エッチングはレジストのない部分の Si を腐食させリッジ部分を形成する工程である。エッチングの時間やエッチャント、またエッチャントの温度によってフォトリソ部分の Si まで腐食させ平坦にしてしまう現象が生ずる。また、基板表面に自然酸化膜が残っていると均一なエッチングが行われぬ。そのうえ、ウェットエッチングではエッチャントへの浸水時間が長い程サイドエッチング(図 3.12)が行われてしまう。



3.12 サイドエッチング

エッチャント(HF : HNO₃ : CH₃COOH = 3 : 15 : 5)の温度を変化させ最適な条件を見出した。温度とエッチングの深さとの関係を図 3.13 に示す。

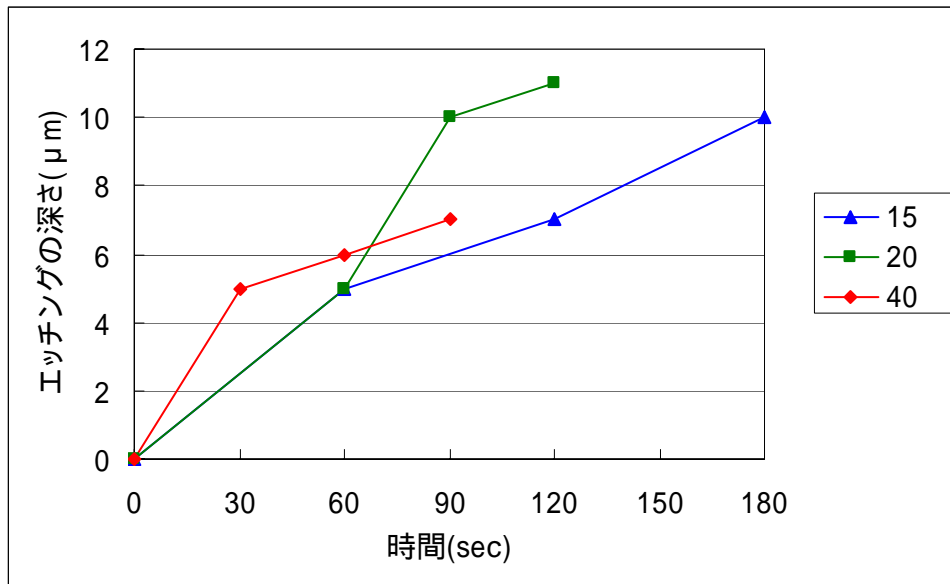


図 3.13 エッチャントの温度変化とエッチングの深さの関係

エッチャントの温度を変化させた時、温度が高くなるほどエッチングレートは速くなるが、基板の表面が荒れる傾向がある。また、エッチャント温度が 40 のとき 30sec 付近で傾きが緩やかになったのはフォトレジストが基板から剥がれたためだと考えられる。この結果、エッチングレートが直線的に変化する 20 以下がエッチャント温度として適していると考えられる。

次にエッチャントの各成分比率とエッチングレートの関係調べた。その結果を表 3.4 に示す。このときのエッチャントの温度は 20 としてエッチングを行った関係を示している。

表 3.4 エッチャント比率とエッチングレートの関係

エッチャント比率 HF : HNO ₃ : CH ₃ COOH	エッチングレート
1 : 4 : 3	1.1 (μ m/min)
3 : 10 : 2	4 (μ m/min)
3 : 15 : 5	5 (μ m/min)
5 : 10 : 5	6 (μ m/min)
4 : 15 : 5	8 (μ m/min)
5 : 10 : 2	36 (μ m/min)
3 : 1 : 1	60 (μ m/min)
1 : 5 : 4	62 (μ m/min)
3 : 3 : 1	100 (μ m/min)
5 : 4 : 1	120 (μ m/min)

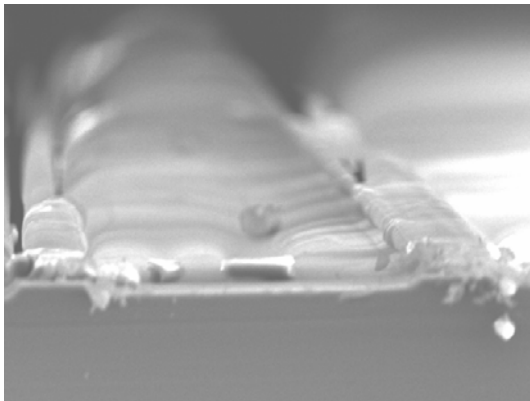
このときエッチングレートが速いものやHNO₃の割合が多い場合、エッチャントとSi基板との反応で基板表面からの気体の発生量が他のエッチャントに比べて増えるため基板自体を攪拌することが重要であることがわかった。攪拌することによって攪拌しない場合に比べて基板表面の凹凸を防ぐことができることがあった。また、ウェットエッチングにおいて問題とされているサイドエッチングはエッチング時間と共に行われるため、エッチャントの浸水時間の短縮かつ、基板の表面の荒れを防ぐことの出来るエッチングレート 36(μ m/min)、60(μ m/min)、62(μ m/min)が適していると考えられる。

表 3.5 にリッジ幅とエッチング時間・エッチングの深さの関係を示した。このときのフォトレジストの膜厚は表 3.3 示した値を使用している。また、エッチャント比率はHF : HNO₃ : CH₃COOH = 3 : 1 : 1 を使用し、エッチャント温度は 20 にしてエッチングを行ったものである。表 3.5 に示した時間以上エッチングをしてしまうとフォトレジストが剥がれたり、リッジ部が丸みを帯びたりした。これはフォトレジストの膜厚が関係していると考えられる。これらの結果により表 3.5 に示しているエッチング時間が各リッジ幅においての最適時間だと考えられる。

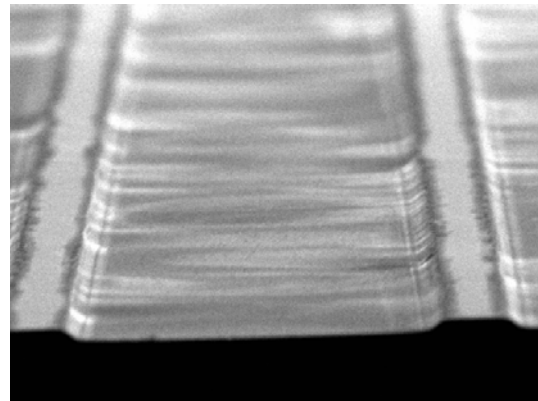
表 3.5 リッジ幅とエッチング深さの関係

リッジ幅 (μm)	エッチング時間 (sec)	エッチング深さ (μm)
5	1	2
10	3	4
25	5	8
50	10	14
100	15	16

図 3.14 に SEM で観察した光導波路の端面を示す。この導波路は表 3.3 と表 3.4 のリッジ幅 $50\mu\text{m}$ の条件より作製したものである。図 3.14 の(a) はエッチングを行った後のフォトレジストを除去する前であり、(b)はフォトレジストを除去した後である。



(a) フォトレジスト除去前



(b) フォトレジスト除去後

図 3.14 SEM で観察した光導波路の端面

また、エッチングを行う前に HF に 10~20sec 付けることで均一なエッチングを行うことが出来た。

これらの結果より、光導波路を作製する時のフォトリソグラフィ工程の流れと最適な温度や時間の条件を図 3.15 に示す。

フォトリソグラフィー		
スピンコーター		HMDS (NP-100)
プリベーク	100	30sec
スピンコーター		フォトレジスト (NPR9810)
プリベーク	100	2min
露光		5 ~ 10sec
現像	20	2 ~ 3min
ポストベーク	110	1min
自然酸化膜除去		
HF : H ₂ O = 1 : 1		10 ~ 20sec
ウェットエッチング		
HF : HNO ₃ : CH ₃ COOH = 3 : 1 : 1		
	20	1 ~ 15sec
フォトレジスト除去		剥離液(アセトン)

図 3.15 フォトリソグラフィー工程

3.5 まとめ

本章ではウェットエッチングを中心に光導波路の作製工程の検討を行った。

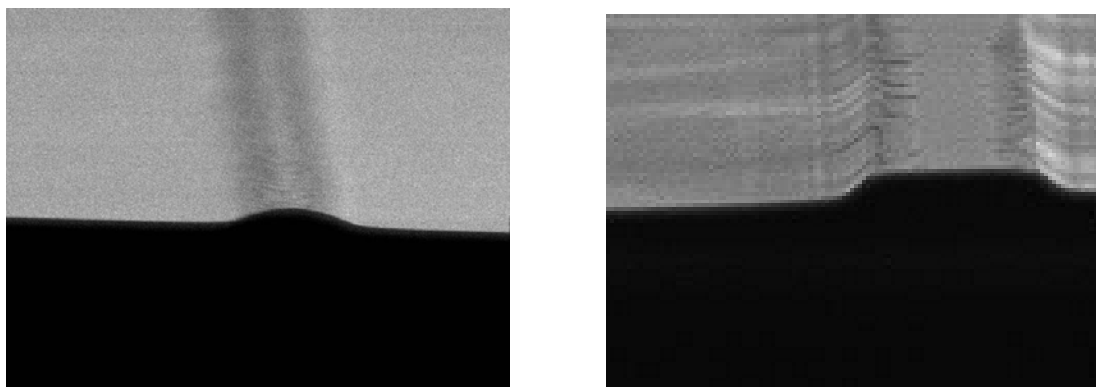
基板洗浄においては従来の洗浄方法の純水による超音波洗浄の洗浄時間を 5min から 10min にし、各洗浄後に流水(純水)洗浄を行うことによって解決した。

フォトリソグラフィーにおいては、スピンコーター(HMDS 塗布)の前後に

プリベークを行うことによって基板と HMDS の密着度を向上することが出来た。このことによりウェットエッチングを行っている際のフォトリジストが剥がれにくくなり、深いエッチングが可能になった。また、ポストベークの後に HF を用いた自然酸化膜除去を行うことにより均一なエッチングをすることが出来た。しかし、HF の浸水時間が長すぎるとフォトリジストが剥がれてしまうので注意が必要である。エッチャントの温度の検討を行いエッチャントの温度を 20 以下に設定することにより安定したエッチングを得ることが可能になった。エッチャントを変えエッチング時間を短縮することによってサイドエッチングを多少抑えることが出来、リッジ部分の丸みや先細りを解消することが出来た。

第4章 作製した光導波路の測定

第3章で述べた最適な工程条件により幅 $10\ \mu\text{m}$ 、高さ $4\ \mu\text{m}$ のリッジ型光導波路形状(図 4.1(a))を実現した。本章では製作した Si 光導波路(図 4.1(b))に波長 $1.55\ \mu\text{m}$ に光を入射し光導波路特性の評価を行う。



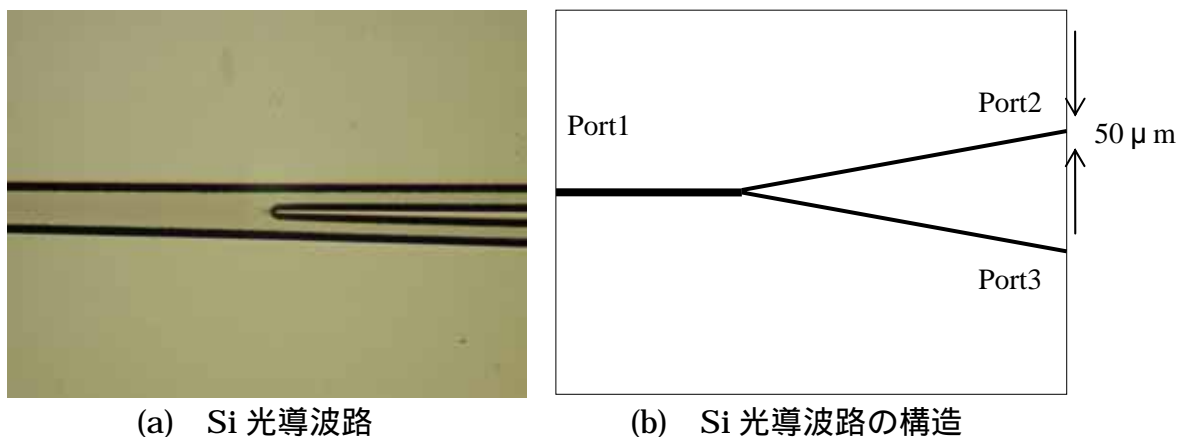
(a) 幅 $10\ \mu\text{m}$ 、高さ $4\ \mu\text{m}$

(b) 幅 $50\ \mu\text{m}$ 、高さ $14\ \mu\text{m}$

図 4.1 作製した光導波路

4.1 作製した Si 光導波路の測定

本研究で作製した Si 光導波路(図 4.2(a))に光を入射して伝送損失を調べた。測定には幅 $10\ \mu\text{m}$ の導波路よりリッジの高さが高い幅 $50\ \mu\text{m}$ 、高さ $14\ \mu\text{m}$ の Y 分岐光導波路を使用した。Si は波長 $1.1\ \mu\text{m}$ 以上の波長しか透過しないため光源にはその禁制帯幅により半導体レーザ波長 $1.55\ \mu\text{m}$ 帯の光を使用した。測定は図 4.3 において導波路は固定台に設置し、光ファイバを設置した微動台と光導波路の結合を顕微鏡を使いながら測定した。実際の実験装置を図 4.4 に示す。



(a) Si 光導波路

(b) Si 光導波路の構造

図 4.3 Si 光導波路と構造

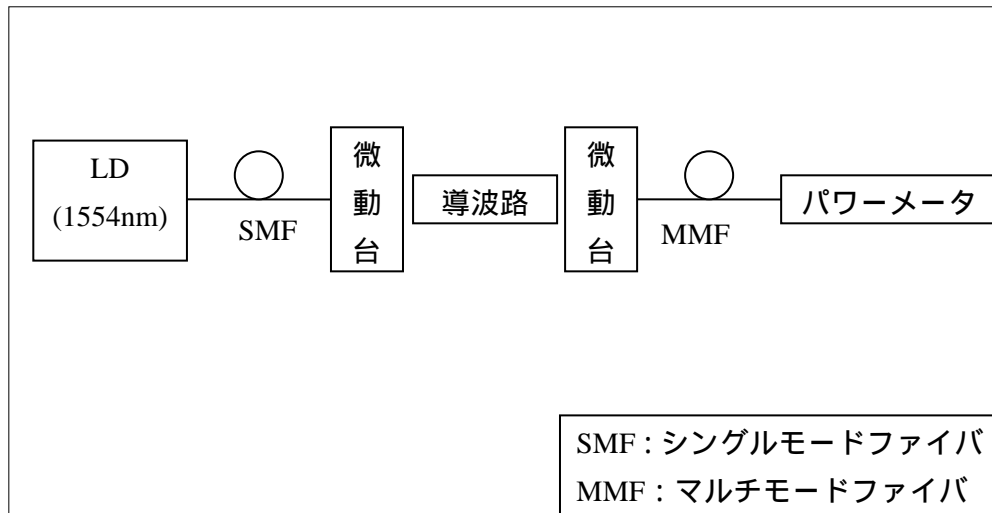


図 4.2 実験系

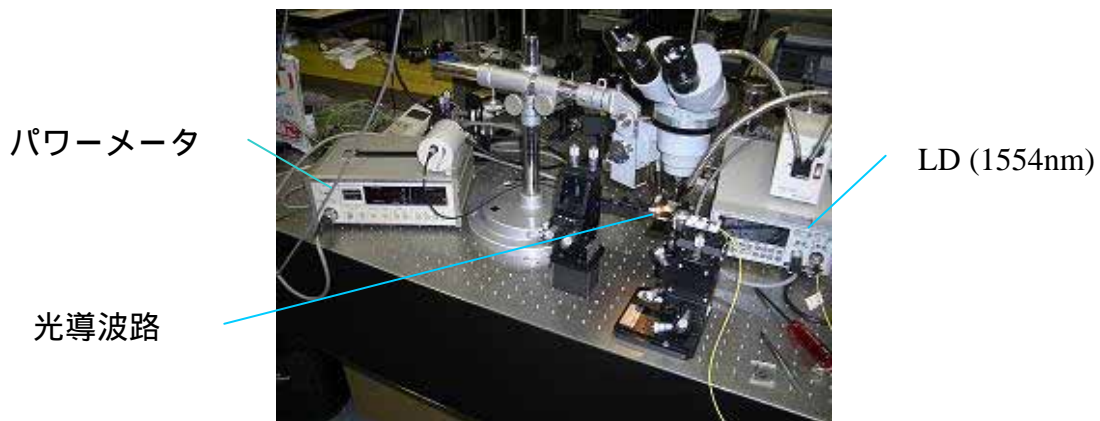


図 4.3 実験装置

導波路に光を入射する前に LD (波長 : 1554nm) からシングルモードファイバ (コア径 $10\ \mu\text{m}$) を導波させ出力した光をマルチモードファイバ (コア径 $50\ \mu\text{m}$) で受け、 -1.52dBm の値を得た。次にシングルモードファイバの先端を作製した Si 光導波路の port1 (図 4.1(b)) と結合した。port1 から入射された光を出力側の port2 と port3 でマルチモードファイバを用いて測定を行った。port2 と port3 の出力比率は 1 : 1 が理想である。これらを基に入射光と出力光を比較することによって作製した光導波路の伝送損失を調べることにした。また、実際に光が導波路を導波しているのを確認するために出力側で図 4.4 に示すように導波路に対して平行方向()と垂直方向()で測定を行った。その際に光の空中伝搬を防ぐために導波路上に障害物を置いて測定を進めた。

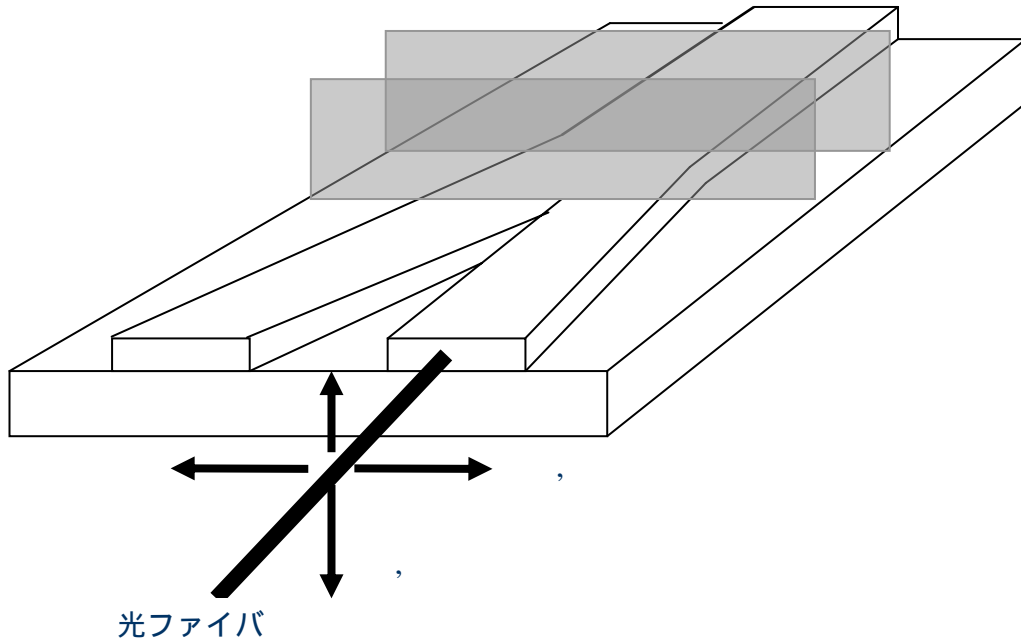


図 4.4 測定方法

4.2 測定結果

測定の結果を図 4.5 に示す。図 4.5 は測定用ファイバを図 4.4 の平行方向()に動かして測定したものである。縦軸を dBm(a)および μW (b)で示した。図 4.5 の結果からピーク出力は port2 で-33.79dBm、port3 で-33.98dBm であった。これらの測定値より本研究で作製した光導波路の伝送損失は port2 で 32.27dB、port3 で 32.46dB であることがわかる。

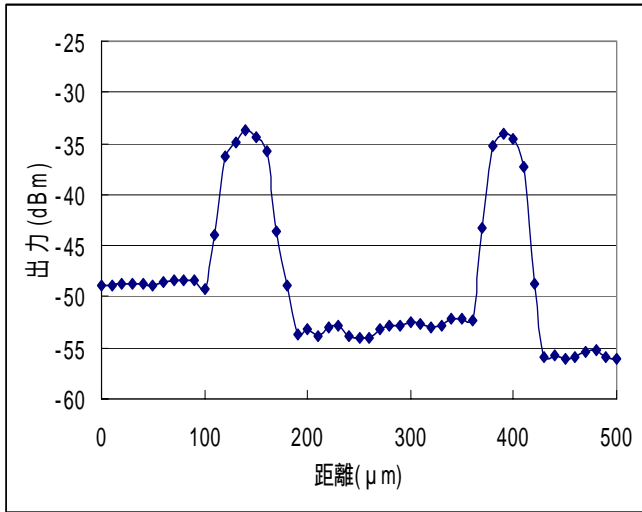
$$33.79[\text{dBm}] - 1.52[\text{dBm}] = 32.27[\text{dB}]$$

$$33.98[\text{dBm}] - 1.52[\text{dBm}] = 32.46[\text{dB}]$$

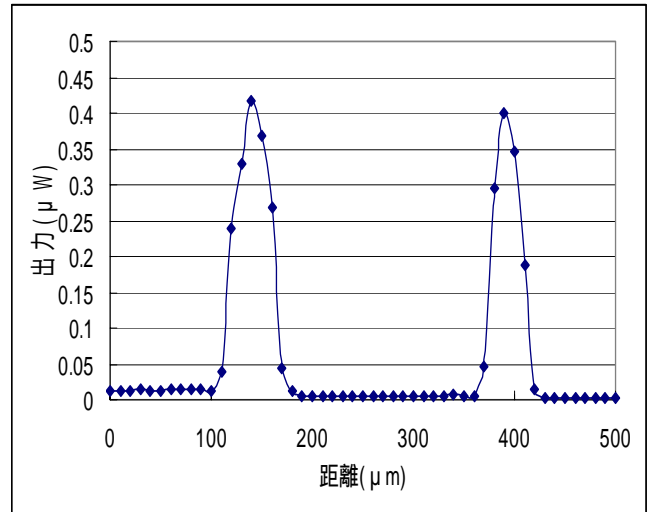
これらの結果から、光はリッジ部で導波され、分岐の理想である 1:1 で出力されていることを確認できた。ただし、光結合が不十分であるため入出力の比は非常に大きく、入出力端面の処理により改善しなければならない。その上で、導波路の伝送損失を改めて測定すべきである。

図 4.6 は垂直方向()に測定用ファイバを動かして測定したものである。縦軸を dBm(a)および μW (b)で示した。この結果より基板の厚さ(600 μm)に比べ狭い範囲でピークがあることわかる。このことより、縦方向の光も閉じ込め

ていることが確認できた。図 4.6 の(a)においてピークの左側で一定の値を確認できるが、これは空中伝搬された光ではないかと考えられる。

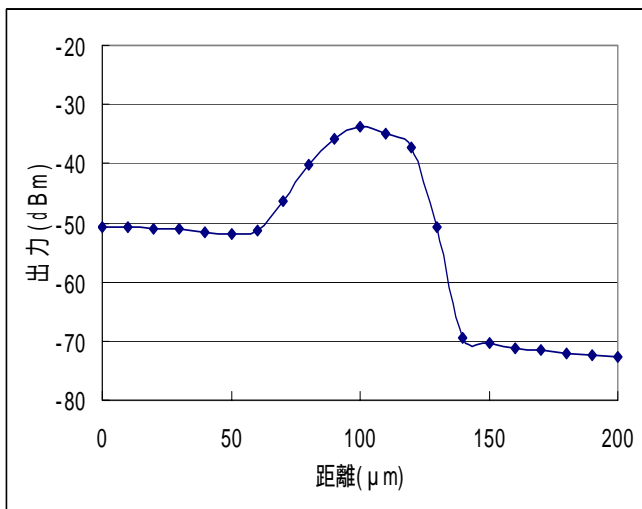


(a)

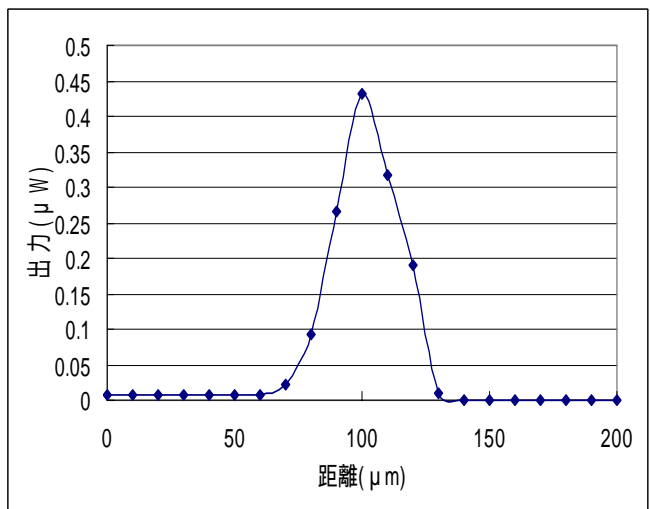


(b)

図 4.5 平行方向()



(a)



(b)

図 4.6 垂直方向()

第5章 まとめ

本章は本研究で行ったリッジ型 Si 光導波路の作製工程における最適条件と今度の課題についてまとめる。

5.1 結果

本研究で明らかにしたエッチング工程を含む全工程の流れと最適な温度や時間の条件を図 5.1 に示す。これにより、次のような結論を得た。

- 1)洗浄工程の純水洗浄を 10min にすることによりパーティクル除去率を向上した。
- 2)フォトリソグラフィ工程においてスピンコータ(HMDS 塗布)の前後にベークを行うことによりフォトレジストの耐久性の向上に成功し、深いエッチングを可能にした。
- 3)ウェットエッチング前の酸化膜除去とエッチャントの温度を 20 に設定しエッチングを行うことにより安定したエッチングを得た。
- 4)ウェットエッチングでの問題であったサイドエッチングはエッチャントへの浸水時間の短縮化することにより抑えることが出来た。

これらの光導波路作製工程の最適化により、幅 10 μm 、高さ 4 μm のリッジ型 Si 光導波路を実現した。本研究で作製した Y 分岐のリッジ型 Si 光導波路(幅 50 μm 、高さ 14 μm)に波長 1.55 μm の光を入射し、全損失 30.9dB と大きいながらも 1 : 1 に分岐しリッジ部分で導波されているのを確認した。損失が大きいのは入出力端の不完全性による結合損失だと考えられる。

5.2 今後の課題

本研究で基板に Si を用いたリッジ型光導波路の作製を行ったが、今後は縦方向の光を閉じ込めることが出来るメサ型光導波路の作製を行い、より強い光を閉じ込めにより導波路損失の低減を図る。また、導波路材料として p-Si を用いたが、pn-Si などを用いた光導波路を作製を行う。このように pn 接合を利用することにより光導波路に機能を付与し、スイッチなど Si デバイス作製を可能にする。

基板 洗 浄	アセトン		5min
		純水(流水)	
	メタノール		5min
		純水(流水)	
	純水(超音波)		10min
		純水(流水)	
	ベーク	100	3min
酸 化 膜 除 去	B-HF		5min
	HF : H ₂ O=1 : 1		5min
	ベーク	100	1min
フ ォ ト リ ソ グ ラ フ ィ ー	スピコーター	HMDS (NP-100)	
	プリベーク	100	30sec
	スピコーター	フォトレジスト(NPR9810)	
	プリベーク	100	2min
	露光		7 ~ 10sec
	現像	20	2 ~ 3min
	ポストベーク	110	1min
	HF : H ₂ O=1 : 1		10 ~ 20sec
	ウェットエッチング		
	HF : HNO ₃ : CH ₃ COOH = 3 : 1 : 1	20	1 ~ 15sec
フォトレジスト除去	剥離液(アセトン)		

図 5.1 光導波路作製工程

参考文献

- (1) 光導波路の基礎 岡本勝就著 コロナ社 1992
- (2) 光ファイバ通信のしくみがわかる本 山下真司著 技術評価論社
2002
- (3) 光ファイバ通信入門 末松安晴、伊賀健一共著 オーム社 1989
- (4) はじめての半導体洗淨技術 小川洋輝・堀池靖浩著 工業調査会
2002
- (5) 平面型光導波路の作製 山田和弘 高知工科大学卒業論文 2003
- (6) 光導波路製作技術の検討 久武正和 高知工科大学卒業論文
2004
- (7) 薄膜ハンドブック 日本学術振興会薄膜第 131 委員会 オーム社
1983

謝辞

本研究にあたって、常に親身の御指導、御教授を賜りました神戸宏教授をはじめ、日頃からお世話になりました岩下克教授をはじめ、電子・光システム工学科の教職員の皆様には心から感謝いたします。また、本研究に必要な実験器具を提供してくださった西田謙助手、SEM を使用するにあたり装置の御指導していただきました赤木敏和氏に感謝いたします。

また、本研究を進めていくにあたり様々な助言をいただきました川西正氏、伊藤公人氏、小松幹宏氏、豊島許喜氏、渡邊利成氏、中村永志氏、中島公亮氏、松岡亮次氏に深く感謝いたします。

本研究を進めるにあたり、昨年度光導波路を作製した久武正和氏のデータを参考にしました。あらためてお礼申し上げます。