

シリコンの選択酸化による細線光導波路の作製に関する研究

著者	飯山 宏一
著者別表示	Iiyama Koichi
雑誌名	平成18(2006)年度 科学研究費補助金 基盤研究(C) 研究成果報告書
巻	2005-2006
ページ	50p.
発行年	2007-03
URL	http://doi.org/10.24517/00053782



シリコンの選択酸化による細線光導波路の作製に関する研究

17560032

平成 17 年度 ~ 平成 18 年度科学研究費補助金
(基盤研究 (C)) 研究成果報告書

平成 19 年 3 月

金沢大学附属図書館



1300-04234-6

表者 飯山 宏 一

大学院自然科学研究科 准教授

EN

06

7

はしがき

近年の情報化社会の発展に伴い、光通信システムはここ 20 年で大きな進展を遂げ、もはや欠かせないものとなっている。現在は更なる大容量化を目指して波長多重 (Wavelength Division Multiplexing : WDM) 通信網が研究されているが、その際、これらの光信号を処理する受動型光デバイスとしての光集積回路の開発が求められている。

光集積回路とは、光源である半導体レーザおよび機能素子であるスイッチ、変調器ならびに光検出器など複数の光デバイスを同一の基板上で有機的に接続して、優れた性能や機能を得ようとするものである。光集積回路は、光学系の小型軽量化、高性能化、安定化、量産化といった様々な利点があると期待されている。このため、光集積回路中のデバイスの相互接続をする光導波路の重要性は大きく、今日まで多くの研究がなされ、様々な手法、材料を用いた作製法が報告されている。

光導波路の基本構造を図 1 に示す。基板 (屈折率 n_s) 上にコア (屈折率 n_f) が形成されており、さらに、コア上部にコアより屈折率が低い透明材料 (クラッド、屈折率 n_c) が形成されている。クラッド層は空気であることが多く、このとき $n_c = 1$ である。光を導波させるためには、 $n_f > n_s, n_c$ で、かつ、コアの厚さ T はある一定値以上である必要がある。

光集積回路では当然、光導波路はより狭いスペースで配線されなければならない。そのため、光導波路は必然的に曲げられて配線されなければならない。しかし、一般的に使われているガラス光導波路は電線とは違い、曲げた部分で光が漏れだしてしまい、集積化することができない。そのため、より曲げに強い光導波路が必要とされている。曲げに強いということは、言い換えると光を導波層内に閉じ込める力が強いということである。そのためには、コアークラッド間の屈折率差を大きくしなければならない。

曲げに強い光導波路として、Si をコアに、 SiO_2 を基板に、 SiO_2 あるいは空気をクラッドとした Si 光導波路が、活発に研究されている。Si コアと SiO_2 (あるいは空気) クラッドによる大きな屈折率差のため、曲げに強い光導波路が可能であり、曲率半径 $5 \mu\text{m}$ の曲がり光導波路が試作されている。しかし、単一モード化のためにはコア幅 W は $0.3 \sim 0.5 \mu\text{m}$ 程度と狭くしなければならず、コアークラッド境界面の荒れにより伝搬損失が非常に大きくなるという欠点がある。そこで、国内外の多くの研究グループで、Si 細線光導波路の低損失化を目指した研究が行われており、その

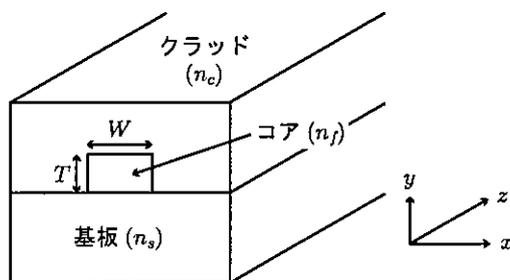


図 1: 光導波路の基本構造

多くはドライエッチングプロセスの最適化(プラズマ発生装置の変更、エッチング条件の最適化など)に関するものである。

本研究は、クラッド部の Si を選択的に酸化することにより Si 細線光導波路を作製するプロセスを提案・実証し、伝搬損失の低減が可能であることを示す。すなわち、コアとなる Si 上部に酸化防止膜を形成して基板全体を酸化する。酸化は等方的プロセスであるので、酸化防止膜の端に荒れがあっても、荒れを埋めるように酸化が進行するので、コアクラッド境界面が酸化防止膜の端の荒れより滑らかになり、伝搬損失の低減化が可能である。また、横方向の酸化のため、作製される Si 細線光導波路のコア幅は、酸化防止膜のパターニング線幅より狭くなる。これはすなわち、酸化防止膜のパターニング線幅 $1\ \mu\text{m}$ 程度と広くて良いことを意味しており、作製プロセスが容易になるとともに、作製の生産性が向上する。得られた成果をまとめると、以下のとおりである。

(1) 酸化防止膜の形成と酸化防止性能の把握

- (a) 使用した SOI 基板の Si (膜厚 $320\ \text{nm}$ あるいは $340\ \text{nm}$) を完全に酸化するためには、温度 1100°C 、酸素流量 $0.5\ \text{l/min}$ の熱酸化条件では、ドライ酸化では 22 時間、 60°C の水蒸気を含んだウェット酸化では 7 時間必要である。
- (b) 酸化防止膜として、LP-CVD 法で堆積した Si_3N_4 を採用した。
- (c) Si_3N_4 膜厚 $120\ \text{nm}$ の SOI 基板をドライ酸化すると、基板表面は SiO_2 に変換されるが、Si 層の酸化はほぼ完全に防止することができた。
- (d) Si_3N_4 膜厚 $40\ \text{nm}$ の SOI 基板をウェット酸化すると、基板表面は SiO_2 に変換され Si 層上部も若干酸化されるが、Si 細線光導波路の作製には十分な酸化防止性能は得られる。

(2) 電磁界解析および光伝搬シミュレーション

- (a) 作製する光導波路のモード特性を、スラブ光導波路理論および有限要素法による電磁界解析ソフトウェア FemSIM を用いて計算した。その結果、使用する基板(コア厚: $340\ \text{nm}$)の光導波路内を波長 $1.55\ \mu\text{m}$ の光を伝搬させる場合、単一モード条件を満たすためには、コア幅は $0.2\sim 0.40\ \mu\text{m}$ の範囲でなければならない。
- (b) 等価屈折率法を併用した FDTD 法による光伝搬シミュレーションより、周囲を SiO_2 で囲まれた Si 細線光導波路は、曲率半径 $5\ \mu\text{m}$ 以上の円弧光導波路であれば、ほぼ無損失で光が伝搬する。

(3) 選択酸化法による Si 細線光導波路の試作と評価

- (a) 選択酸化防止膜である Si_3N_4 に光導波路パターンを転写する際、 Si_3N_4 膜のウェットエッチングではパターニングは困難である。

- (b) Si₃N₄ 膜のエッチングに CF₄ ガスを用いたドライエッチングを利用することにより、光導波路パターンの正確な転写が可能である。
- (c) Si コアを CF₄ ガスでドライエッチングして作製した Si 細線光導波路 (導波路幅 3 μm) の損失は、伝搬損失は 10.3 dB/cm、結合損失は 27.0 dB であった。
- (d) 選択酸化法により作製した Si 細線光導波路 (Si₃N₄ マスク幅 3 μm) の損失は、伝搬損失は 6.3 dB/cm、結合損失は 29.8 dB であった。ドライエッチングで作製した Si 細線光導波路と比べると伝搬損失は 4 dB 改善し、選択酸化法が有効であることが実証された。結合損失は 3 dB 増加したが、これは Si コア層上部が酸化されたことによりコア厚が減少したためと考えられる。

研究組織

研究代表者 : 飯山 宏一 (金沢大学大学院自然科学研究科 准教授)
 研究分担者 : 高宮 三郎 (金沢大学大学院自然科学研究科 教授)
 研究協力者 : 倉田 善博

交付決定額 (配分額)

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
平成 17 年度	2,500,000	0	2,500,000
平成 18 年度	1,000,000	0	1,000,000
総 計	3,500,000	0	3,500,000

研究発表

- (1) 山下善之介、田中謙一、飯山宏一、高宮三郎：“Siの選択酸化によるSi細線光導波路の検討”、応用物理学会北陸・信越支部学術講演会、1C-04、信州大学(2005.12)
- (2) 油野絢一郎、山下善之介、飯山宏一、高宮三郎：“FDTD法によるSi細線光導波路のシミュレーション”、応用物理学会北陸・信越支部学術講演会、1C-05、信州大学(2005.12)
- (3) 浅井覚詞、若島誠寛、飯山宏一：“Si細線光導波路の作製プロセスに関する研究”、第54回応用物理学関係連合講演会、27p-SG-13、青山学院大学(2007.3)
- (4) 飯山宏一、浅井覚詞、若島誠寛：“Siの選択酸化プロセスを用いたSi細線光導波路の作製”、電子情報通信学会レーザ・量子エレクトロニクス研究会、LQE2007-15、金沢大学(2007.5)
- (5) Koichi Iiyama, Satoshi Asai, and Masahiro Wakashima: "Fabrication of Si wire optical waveguides by clad formation by selective oxidation of Si", 12th Optoelectronics and Communications Conference/16th International Conference on Integrated Optics and Optical Fiber Communication (OECC/IOOC 2007), 12E2-4, Yokohama, Japan (June 2007)
- (6) Koichi Iiyama, Satoshi Asai, and Masahiro Wakashima: "Si wire waveguide fabricated by means of selective oxidation of Si", 33rd European Conference and Exhibition on Optical Communication (ECOC 2007), Berlin, Germany (September 2007) (submitted)

研究成果による工業所有権の出願・取得状況

なし

第1章 はじめに

1.1 背景

近年の情報化社会の発展に伴い、光通信システムはここ 20 年で大きな進展を遂げ、もはや欠かせないものとなっている。現在は更なる大容量化を目指して波長多重 (Wavelength Division Multiplexing: WDM) 通信網が研究されているが、その際、これらの光信号を処理する受動型光デバイスとしての光集積回路の開発が求められている。

光集積回路とは、光源である半導体レーザーおよび機能素子であるスイッチ、変調器ならびに光検出器など複数の光デバイスを同一の基板上で有機的に接続して、優れた性能や機能を得ようとするものである。光集積回路は、光学系の小型軽量化、高性能化、安定化、量産化といった様々な利点があると期待されている。このため、光集積回路中のデバイスの相互接続をする光導波路の重要性は大きく、今日まで多くの研究がなされ、様々な手法、材料を用いた作製法が報告されてきた。今後も次々に光導波路の新たな作製技術が報告され続け、様々な光素子の研究開発も進められていくことは容易に想像できる。

1.2 光導波路概説

ガラスに代表されるような透明な誘電体基板の表面に、これよりわずかに屈折率が高く厚みが光波長オーダーの薄膜を形成させることによって、光をこの高屈折率薄膜層に閉じ込め、導波させることができる。光が導波する高屈折率層をコアと呼ぶ。

最も簡単で基本的な光導波路の構造を図 1.1 に示す。基板 (屈折率 n_s) 上にコア (屈折率 n_f) が形成されており、さらに、コア上部にコアより屈折率が低い透明材料 (クラッド、屈折率 n_c) が形

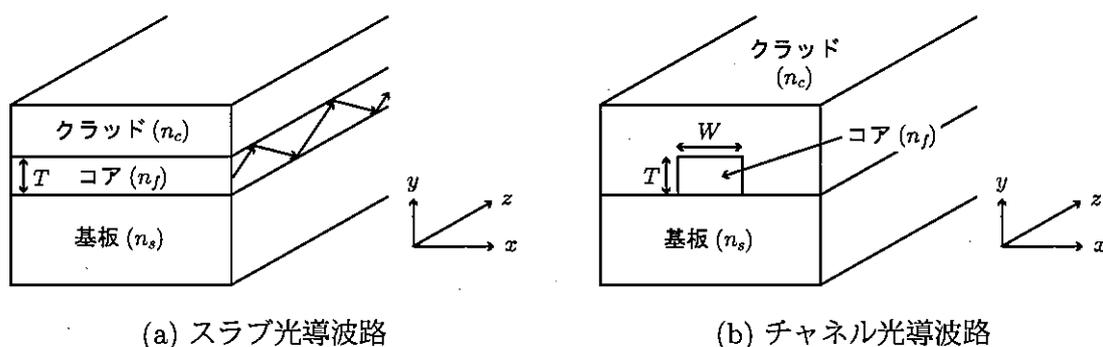


図 1.1: 光導波路の構造

成されている。クラッド層は空気であることが多く、このとき $n_c = 1$ である。光を導波させるためには、 $n_f > n_s, n_c$ で、かつ、コアの厚さ T はある一定値以上である必要がある。同図 (a) の構造では、光は y 方向にのみ閉じ込められるので、これを2次元光導波路あるいはスラブ光導波路と呼ぶ。スラブ光導波路では厚み方向 (y 方向) にのみ光が閉じ込められるので、導波された光は表面 (x 方向) に沿って自由伝搬となり、回折によって拡がってしまう。しかし、実際に光導波路を利用した光変調器やスイッチ (これらを総称して導波形光デバイスという) を構成するときには、 x 方向にも光を閉じ込め、光波の分岐、曲がり、結合などを制御しなければならない。このように、 x 方向と y 方向ともに光を閉じ込めたものを3次元光導波路あるいはチャンネル光導波路という。チャンネル光導波路の構造例を、図 1.1(b) に示す。チャンネル光導波路では、コア厚 T およびコア幅 W により、伝搬可能な電磁界分布の数が異なる。これを、伝搬モードと呼んでいる。伝搬モード数が1つの場合を単一モード、2つ以上の場合を多モードというが、設計どおりに光導波路を動作させるためには、単一モード光導波路が不可欠である。

光集積回路では当然、光導波路はより狭いスペースで配線されなければならない。そのため、光導波路は必然的に曲げられて配線されなければならない。しかし、一般的に使われているガラス光導波路は電線とは違い、曲げた部分で光が漏れだしてしまい、集積化することができない。そのため、より曲げに強い光導波路が必要とされている。曲げに強いということは、言い換えると光を導波層内に閉じ込める力が強いということである。そのためには、コア-クラッド間の屈折率差を大きくしなければならない。

曲げに強い光導波路として、Si をコアに、 SiO_2 を基板に、 SiO_2 あるいは空気をクラッドとした Si 光導波路が、活発に研究されている。Si コアと SiO_2 (あるいは空気) クラッドによる大きな屈折率差のため、曲げに強い光導波路が可能であり、曲率半径 $5 \mu\text{m}$ の曲がり光導波路が試作されている。しかし、単一モード化のためにはコア幅は $0.3 \sim 0.5 \mu\text{m}$ 程度と狭くしなければならず、コア-クラッド境界面の荒れにより伝搬損失が非常に大きくなるという欠点がある。

図 1.2 は、NTT の研究グループにより報告された Si 細線光導波路の電子顕微鏡写真である。Si のドライエッチングによりコアを形成しているが、コア壁面は滑らかのように見えるが、図に記載のように、非常に大きな伝搬損失であり、その低減が不可欠となっている。国内外の多くの研究

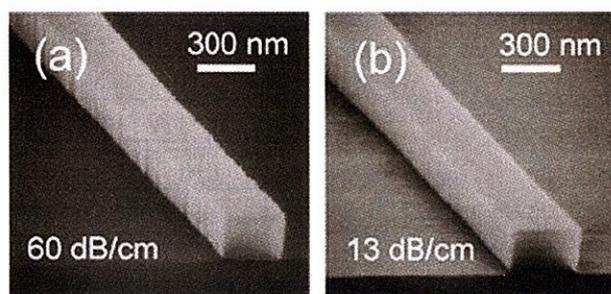


図 1.2: Si 細線光導波路の実現例 (T. Tsuchizawa, et. al., *J. Lightwave Technol.*, vol.11, no.1, 2005)

グループで、Si 細線光導波路の低損失化を目指した研究が行われており、その多くはドライエッチングプロセスの最適化(プラズマ発生装置の変更、エッチング条件の最適化など)に関するものである。

1.3 目的

本研究では、Si 細線光導波路の低損失化を目指した作製プロセスを提案する。上記のとおり、従来、Si 細線光導波路は SOI (Silicon on Insulator) 基板を用い、コアとなる Si 部以外の Si をエッチングすることにより作製されているが、エッチング時のコアークラッド境界の荒れにより、従来のガラス光導波路と比べて伝搬損失が非常に大きくなっている。

そこで本研究では、クラッド部の Si を選択的に酸化することにより Si 細線光導波路を作製するプロセスを提案・実証し、伝搬損失の低減が可能であることを示す。すなわち、コアとなる Si 上部に酸化防止膜を形成して基板全体を酸化する。酸化は等方的プロセスであるので、酸化防止膜の端に荒れがあっても、荒れを埋めるように酸化が進行するので、コアークラッド境界面が酸化防止膜の端の荒れより滑らかになり、伝搬損失の低減化が可能である。

第2章 選択酸化プロセス

2.1 はじめに

本研究では、SOI (Silicon on Insulator) 基板を用いて Si 細線光導波路を作製するが、酸化防止のために、SOI 基板上に酸化防止膜を形成する必要がある。本章では、SOI 基板の酸化特性の実験結果について述べた後、酸化防止膜の酸化防止性能について述べる。なお、酸化防止膜にはシリコン窒化膜 (Si_3N_4) を用いる。

2.2 提案する作製プロセス

本節では、本研究で提案する作製プロセスを、従来の作製プロセスと比較して説明する。

従来用いられている Si 細線光導波路の作製プロセスを図 2.1 に示す。基板には SOI (Silicon on Insulator) 基板を用い、基板上にフォトリソグラフィ技術によりエッチングマスクを形成する (同図 (a))。マスク幅は 300 ~ 500 nm 程度である。また、マスクは金属あるいはレジストを利用する。その後、 CF_4 ガスや SF_6 ガスなどを用いた反応性イオンエッチング (RIE) により、Si のみをドライエッチングする (同図 (b))。その後、エッチングマスクを除去し、Si 細線光導波路が完成する (同図 (c))。コア両側のクラッドは空気である。

低損失の Si 細線光導波路の実現のためには、エッチングマスクの端が滑らかであると同時に、ドライエッチングにおけるエッチング側面が滑らかでなければならない。そこで、滑らかなエッチング側面を得るために、エッチング条件の最適化やエッチング装置の選択・改良などが重要な研究テーマである。

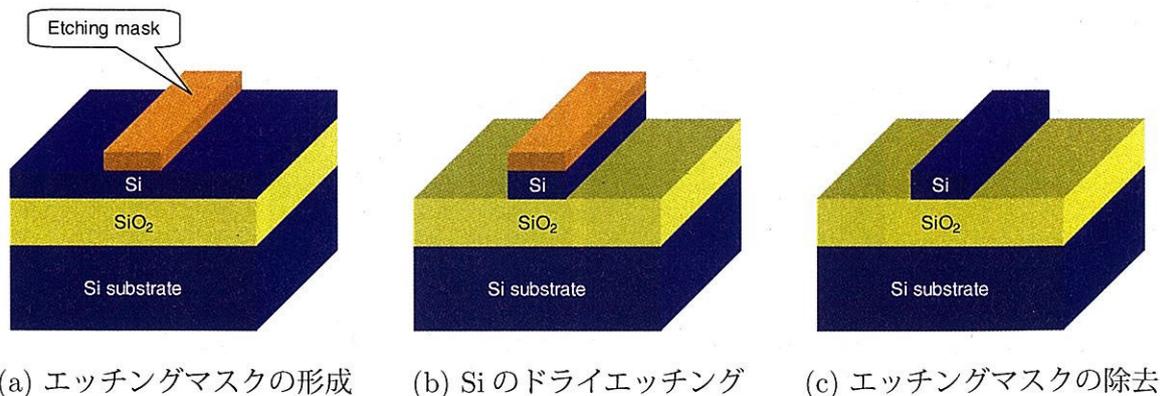


図 2.1: 従来法による作製プロセス

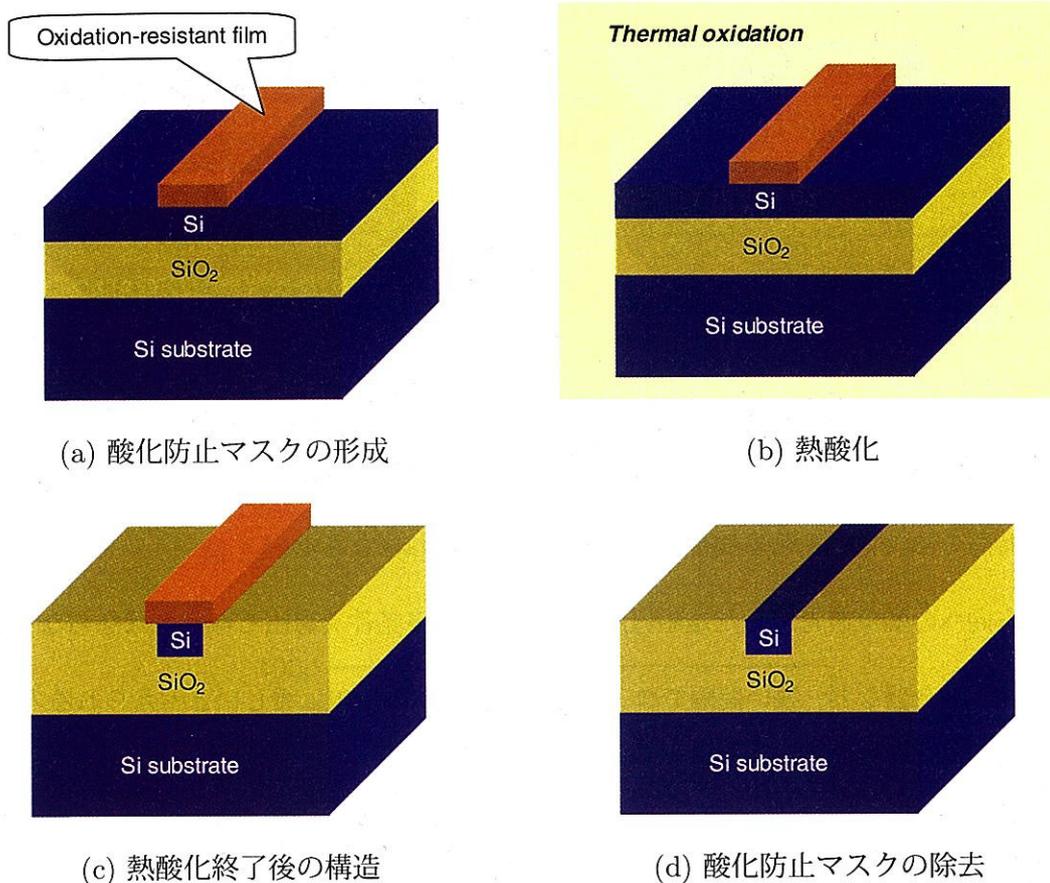


図 2.2: 選択酸化法によるプロセス

図 2.2 に、提案する選択酸化法による Si 細線光導波路のプロセスを示す。基板には SOI 基板を用いる。本方法では、コアとなる部分の Si は酸化させずにクラッドとなる部分の Si のみを酸化する。そのため、酸化防止のための酸化防止マスクを基板上に形成する(同図 (a))。その後、この基板を熱酸化する(同図 (b)) と、同図 (c) に示す基板構造となる。すなわち、酸化防止マスク直下の Si は酸化されないが、それ以外の Si は酸化される。このとき、酸化プロセスは等方的であるので酸化は横方向にも進行し、Si 幅は酸化防止マスク幅より狭くなると予想される。その後、酸化防止マスクを除去することにより、Si 細線光導波路が完成する。コア両側のクラッドは SiO₂ である。

選択酸化法は、以下の利点がある。

- 酸化防止マスク端に荒れがあっても、等方的な酸化のために荒れが緩和され、滑らかなコア-クラッド境界面が得られる。
- 横方向にも酸化は進行するため、酸化防止マスク幅は従来法のエッチングマスク幅より広げることができ、酸化防止マスク形成のためのフォトリソグラフィが容易になる。

また、以下の点が今後解決すべき点と考えられる。

- 横方向への酸化による Si コア幅の減少量を、実験的に明らかにする必要がある。

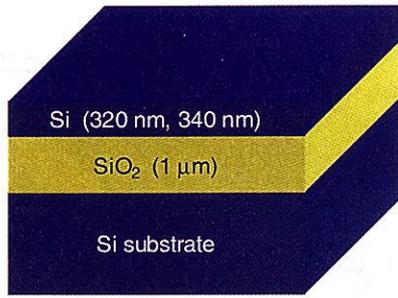


図 2.3: 使用した SOI 基板の構造

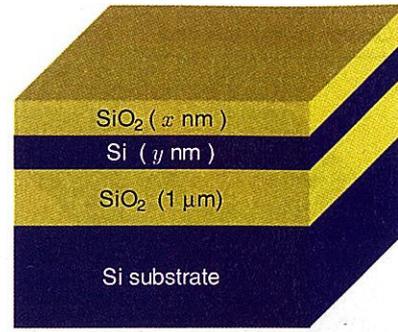


図 2.4: SOI 基板酸化後の構造

- 横方向への酸化を考慮した酸化防止マスクの設計と実現が必要である。
- 長時間の熱酸化に耐える酸化防止膜を実現しなければならない。
- 横方向への酸化を考慮した電磁界解析と単一モード条件を導出しなければならない。
- 方向性結合器など、狭い間隔でコアが並ぶ光波回路の実現は難しいと考えられるので、これらの光波回路の実現方法を開発しなければならない。

2.3 SOI 基板の酸化特性

図 2.3 に、使用した SOI 基板の構造を示す。SiO₂ 層 (厚さ 1 μm) が下部クラッドとなり、上部 Si 層 (厚さ 320 nm あるいは 340 nm) が光導波層となる。

本研究では、クラッドとなる部分の Si を酸化して SiO₂ に変換しなければならない。そこで、SOI 基板を電気炉中で熱酸化し、上部 Si 層が完全に酸化される時間を求めた。酸化条件は、表 2.1 のとおりである。SOI 基板を酸化すると基板上部から酸化されるので、分光エリプソメーターでは図 2.4 に示すモデルを用いて、酸化膜厚 x および上部 Si 膜厚 y を測定した。

表 2.1: SOI 基板の熱酸化条件

項目	条件
酸化炉	チューブ炉
ガス流量	O ₂ ガス、0.5 l/min
温度	1100°C
雰囲気	ドライあるいは ウェット (60°C の水蒸気雰囲気)
評価方法	分光エリプソメーター (J. A. Woollam 社、M-2000)

図 2.5 に、ドライ酸化における酸化膜厚の時間依存性を示す。SiO₂ 膜厚は酸化時間の平方根に比例していることから、酸化は拡散律則に従っていることがわかる。また、図 2.6 は、ドライ酸化における SiO₂ 膜厚 x 、上部 Si 膜厚 y および合計膜厚 $x + y$ の時間依存性を示す。酸化時間とと

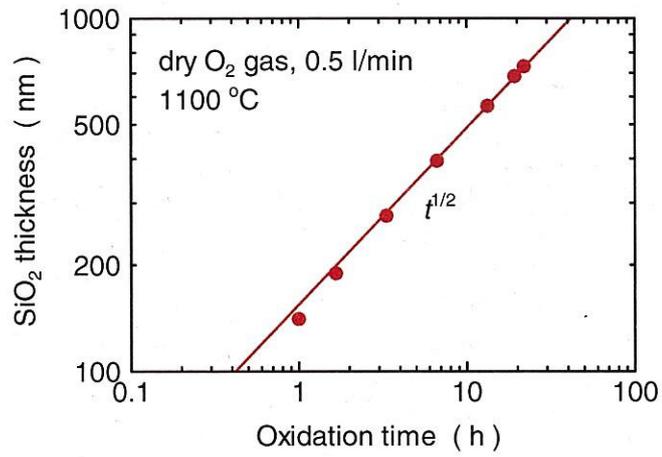


図 2.5: ドライ酸化における SOI 基板の酸化特性 (1)

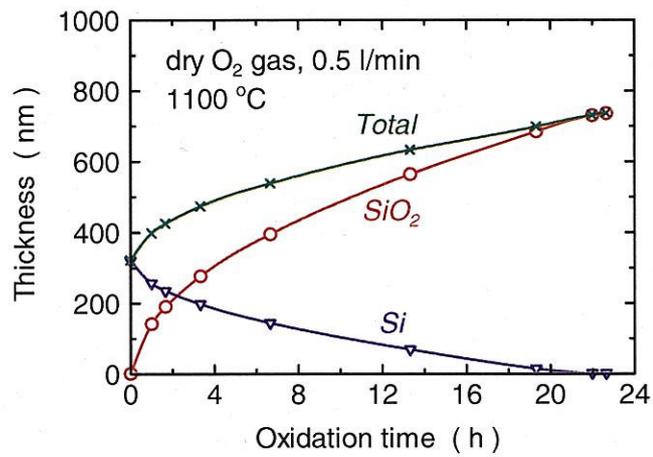


図 2.6: ドライ酸化における SOI 基板の酸化特性 (2)

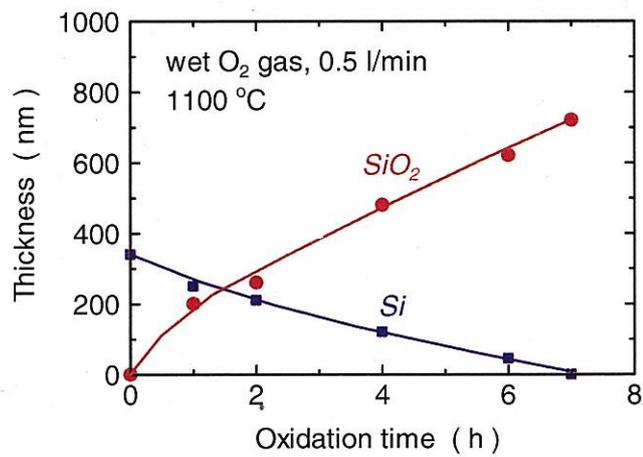


図 2.7: ウェット酸化における SOI 基板の酸化特性

もに、Si 膜厚は減少し SiO₂ 膜厚は増加すること、22 時間の酸化時間で Si はすべて SiO₂ に変換されることがわかる。また、酸化前の Si 膜厚は 320 nm であるが、22 時間酸化後の SiO₂ 膜厚は 730 nm となり、酸化により体積が 2.3 倍に膨張することがわかる。

図 2.7 に、ウェット酸化における SiO₂ 膜厚と上部 Si 膜厚の時間依存性を示す。7 時間で上部 Si 層が完全に SiO₂ に変換され、ドライ酸化の 3 分の 1 の時間で酸化が可能であることがわかる。また、ドライ酸化と同様、酸化により体積が 2.3 倍に膨張することもわかる。なお、酸素流量を 1 ℓ/min とした場合、上部 Si 層が完全に酸化されるのに必要な時間は 6 時間であった。酸化時間は短縮されるが、消費される酸素の量を考えると、0.5 ℓ/min の酸素流量で十分と考えられる。

2.4 酸化防止膜

本研究では、22 時間酸化 (ドライ酸化) あるいは 7 時間酸化 (ウェット酸化) においても、酸化防止機能が失われない酸化防止膜の実現が不可欠である。その候補として、金属あるいはシリコン窒化膜 (Si₃N₄) が考えられる。それぞれの材料には、以下のような利点と欠点がある。

金属の場合

- アルミニウムやクロムなど真空蒸着装置で形成可能な金属の場合、1100°C の酸化中に蒸発するか、酸化中に金属も酸化されてしまい、金属酸化物を通して Si 内に酸素が進入し、Si が酸化される。
- タングステンは酸化物が形成しにくく酸化防止性能は高いと予想されるが、熱酸化中に Si 内に拡散して合金化する可能性がある。また、酸化後に Si に影響を与えずにタングステンを除去することが困難である。

Si₃N₄ の場合

- LSI の素子間分離のためのマスク材料として利用されており、酸化防止性能は高いと予想される。
- 形成方法が難しく、パターニングのためのエッチングも容易ではない。

上記より、本研究では Si₃N₄ を酸化防止マスクとして利用することにした。Si₃N₄ の形成方法には数種類あるが、本研究では LP-CVD (Low Pressure Chemical Vapor Deposition) 法により Si₃N₄ 膜を形成することとし、NTT アドバンステクノロジー社に外注した。

図 2.8 および図 2.9 に、本研究で使用した Si₃N₄ 膜を形成した SOI 基板を示す。図 2.8 は Si₃N₄ 膜厚が 120 nm と厚く、主にドライ酸化プロセスに利用した。図 2.9 は Si₃N₄ 膜厚は 40 nm と薄く、主にウェット酸化プロセスに利用した。

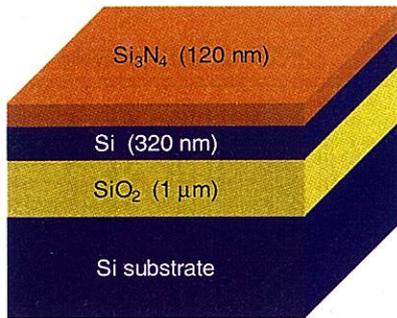


図 2.8: Si₃N₄ 膜を形成した SOI 基板 (1)

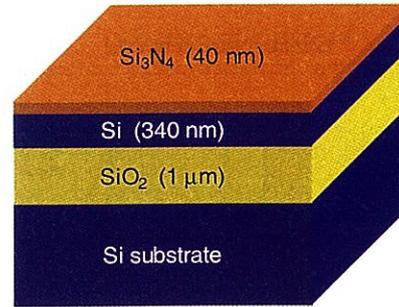


図 2.9: Si₃N₄ 膜を形成した SOI 基板 (2)

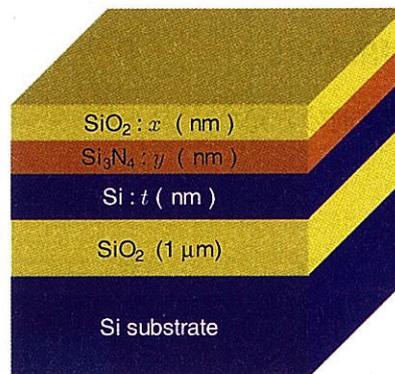


図 2.10: Si₃N₄ 膜を形成した SOI 基板の酸化後のモデル

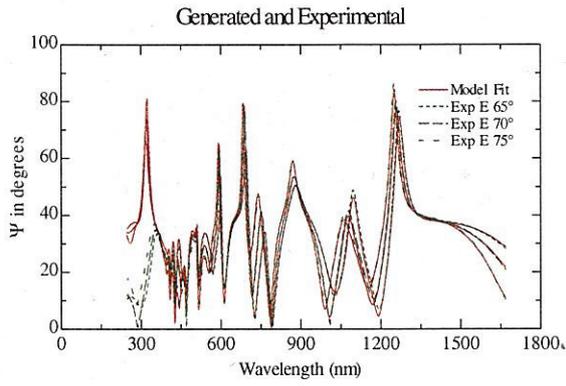
2.4.1 ドライ酸化耐性

まず、図 2.8 の基板をドライ酸化を行い、Si₃N₄ 膜の酸化防止性能の確認を行った。酸化後の膜の評価は、分光エリプソメーターを用いた。図 2.10 に、分光エリプソメーター解析で使用したモデルを示す。同図以外にも数種類のモデルを用いたが、もっとも解析結果が良好なモデルが図 2.10 であり、Si₃N₄ 膜上部から酸化されると仮定している。

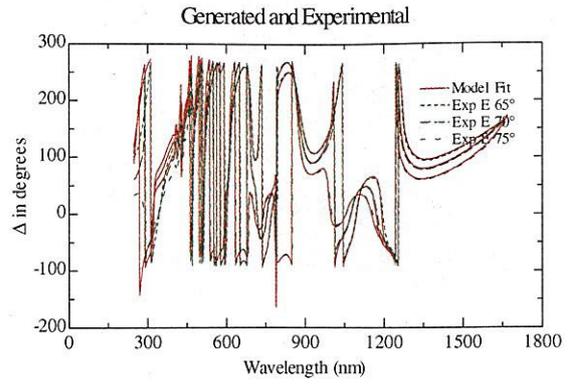
図 2.11 に、酸化前の分光エリプソメーターの測定結果を示す。紫外領域で測定結果とモデルによる計算結果に違いは見られるが、可視領域から赤外領域では測定結果とモデルによる計算結果はよく一致している。

酸化時間 620 分 (10 時間 20 分)、920 分 (15 時間 20 分)、1120 分 (18 時間 40 分) および 1320 分 (22 時間) のときの分光エリプソメーターの測定結果をそれぞれ図 2.12、図 2.13、図 2.14 および図 2.15 に示す。それぞれ、測定結果とモデルによる計算結果が良く一致していることから、図 2.10 のモデルのように、Si₃N₄ 膜が上部から酸化されて SiO₂ に変化していると考えられる。

図 2.16 に、分光エリプソメーターでの測定結果から得られた、上部 Si 層、Si₃N₄ 層および酸化により生じた最上部の SiO₂ 層の膜厚の酸化時間依存性を示す。上部 Si 層の膜厚はほとんど変化していないが、Si₃N₄ 層の膜厚が減少して SiO₂ 層の膜厚が増加していることがわかる。つまり、酸化により Si₃N₄ 層は表面から SiO₂ に変化しているが、Si 層までは酸素は到達せずに酸化されな

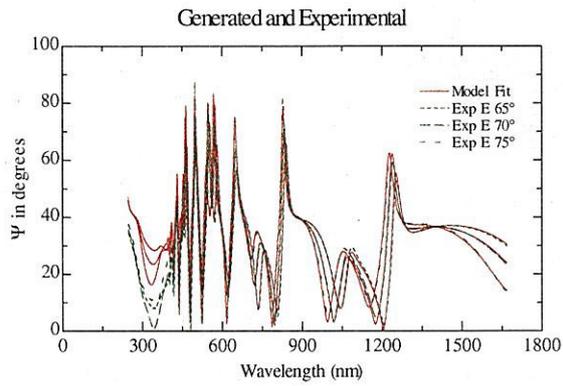


(a) p 偏光と s 偏光の複素反射係数の比

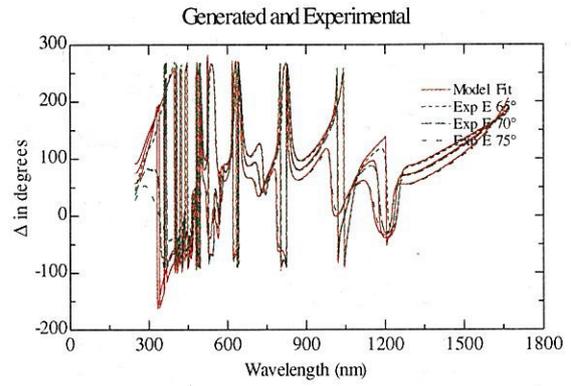


(b) p 偏光と s 偏光の位相差

図 2.11: 酸化前の分光エリプソメーターの測定結果

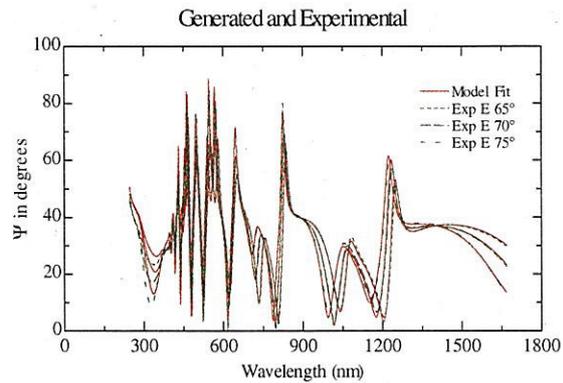


(a) p 偏光と s 偏光の複素反射係数の比

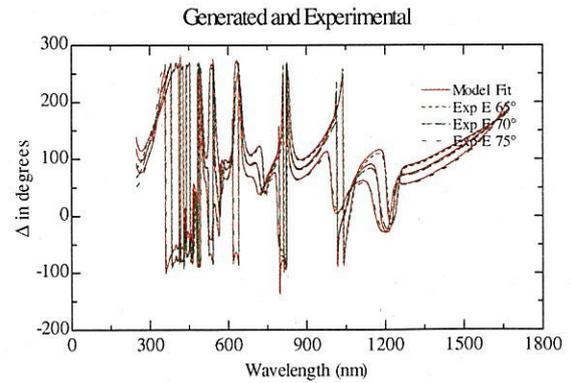


(b) p 偏光と s 偏光の位相差

図 2.12: ドライ酸化後の分光エリプソメーターの測定結果 (620 分酸化)

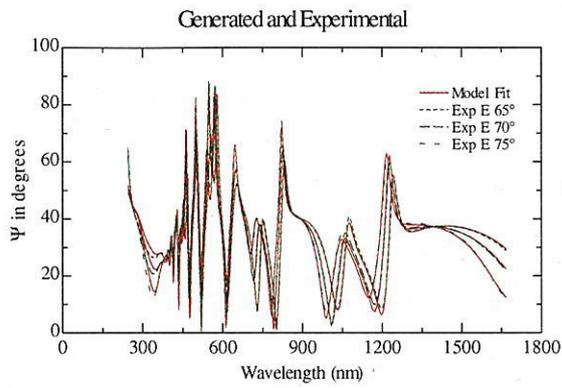


(a) p 偏光と s 偏光の複素反射係数の比

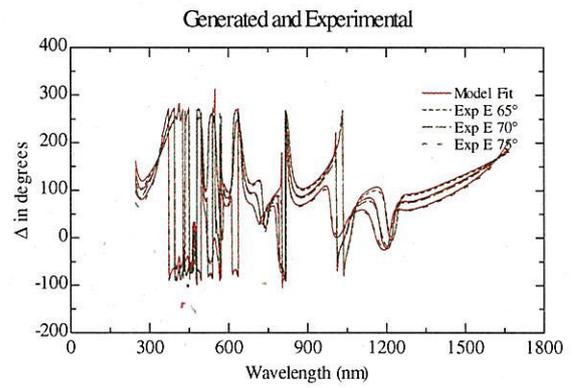


(b) p 偏光と s 偏光の位相差

図 2.13: ドライ酸化後の分光エリプソメーターの測定結果 (920 分酸化)

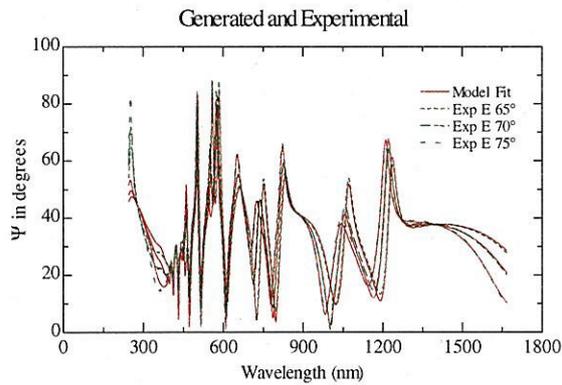


(a) p 偏光と s 偏光の複素反射係数の比

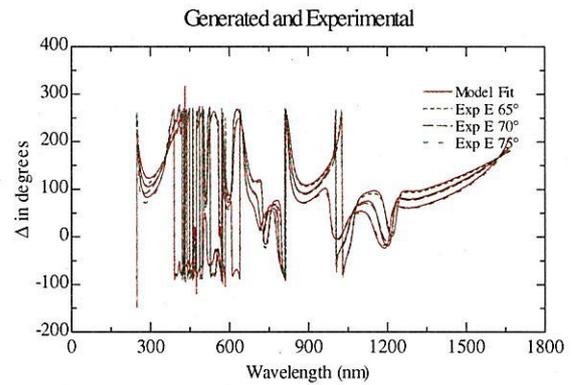


(b) p 偏光と s 偏光の位相差

図 2.14: ドライ酸化後の分光エリプソメーターの測定結果 (1120 分酸化)



(a) p 偏光と s 偏光の複素反射係数の比



(b) p 偏光と s 偏光の位相差

図 2.15: ドライ酸化後の分光エリプソメーターの測定結果 (1320 分酸化)

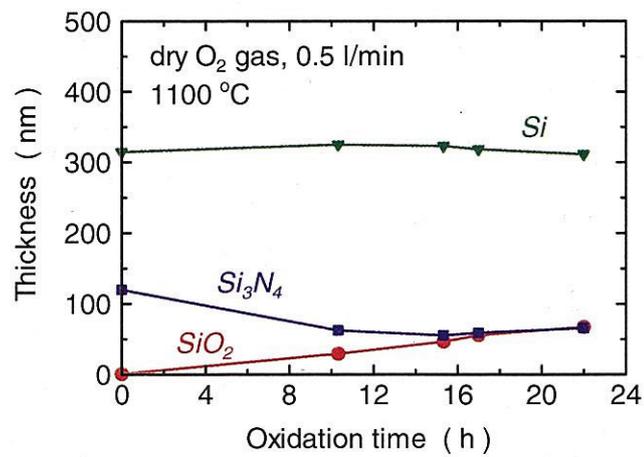


図 2.16: ドライ酸化における各層の膜厚の酸化時間依存性

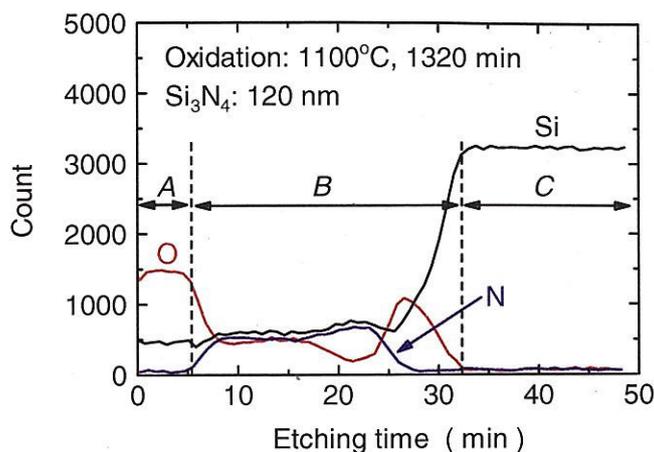


図 2.17: XPS による膜の評価 (Si_3N_4 膜厚 120 nm のとき)

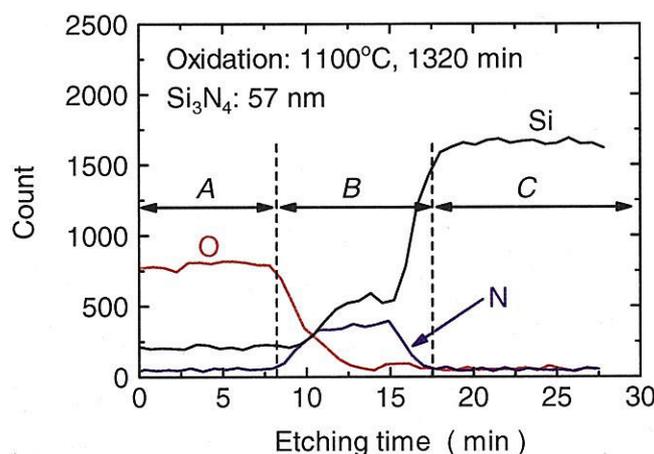


図 2.18: XPS による膜の評価 (Si_3N_4 膜厚 57 nm のとき)

いことがわかる。つまり、120 nm の膜厚の Si_3N_4 膜により Si の酸化が防止でき、酸化防止マスクとして使用可能であることを意味している。

分光エリプソメーターによる測定では各層が均一な組成になっていると仮定しているため、実際の膜構造とは異なる可能性がある。そこで、XPS を用いて深さ方向の組成分布を測定した。図 2.17 に、 Si_3N_4 膜厚が 120 nm の基板を 1320 分酸化したときの XPS 分析結果を示す。XPS ではサンプルをエッチングしながら組成を測定するため図の横軸はエッチング時間となっているが、横軸が 0 の箇所は表面を表し、エッチング時間が長くなるほど表面より内部の情報を表している。

同図に示すように、組成は 3 つの領域 (A、B および C) に分かれている。領域 A は表面近傍の組成比であり、窒素は検出されておらず、酸素と Si のみが検出されている。すなわち、 SiO_2 であるといえる。領域 B では窒素、酸素、Si とも検出されており、 SiON の組成になっていると思われる。領域 C では Si のみが検出されており、上部 Si 層を表している。この結果を分光エリプソメーターによる結果と比較すると、領域 B の組成が分光エリプソメーターでは Si_4N_4 であるのに

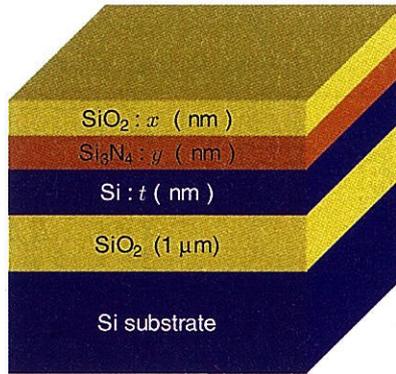
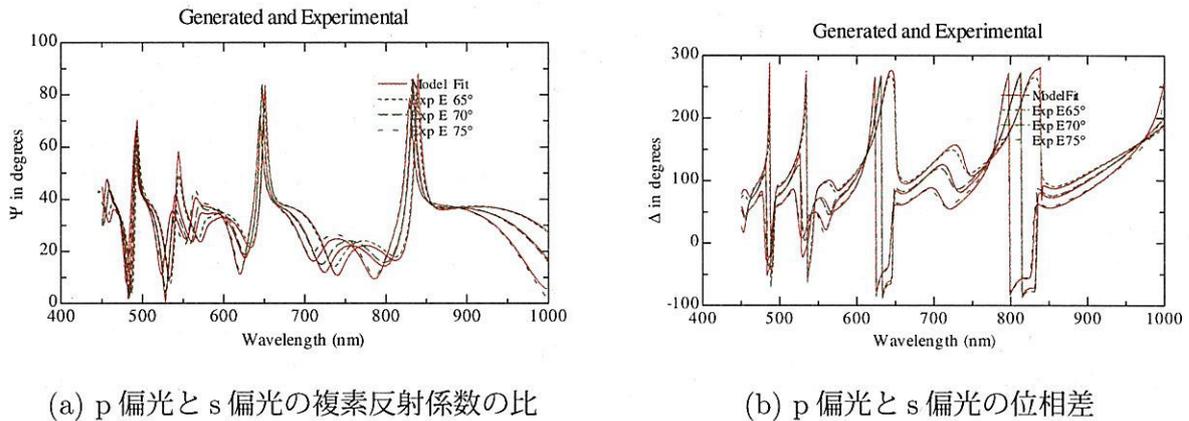


図 2.19: Si_3N_4 膜を形成した SOI 基板の酸化後のモデル



(a) p 偏光と s 偏光の複素反射係数の比

(b) p 偏光と s 偏光の位相差

図 2.20: 酸化前の分光エリプソメーターの測定結果

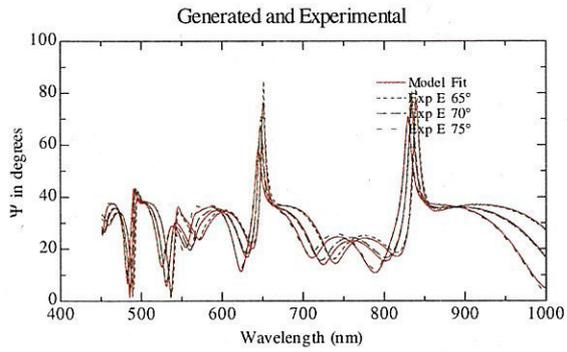
対し、XPS 解析では SiON となっていて、若干異なっている。これは、分光エリプソメーターでは SiON の材料データベースを持たないために Si_3N_4 と近似したためである。組成の違いはあるが、 Si 層がはっきり認められることから、 Si_3N_4 膜が十分な酸化防止性能を持つと考えられる。

図 2.18 は、 Si_3N_4 膜を希フッ酸により 57 nm に薄膜化した後、1320 分間酸化したときの XPS 分析結果である。図 2.17 と同様の結果が得られており、57 nm 厚の Si_3N_4 膜でも十分な酸化防止性能を持つことがわかる。

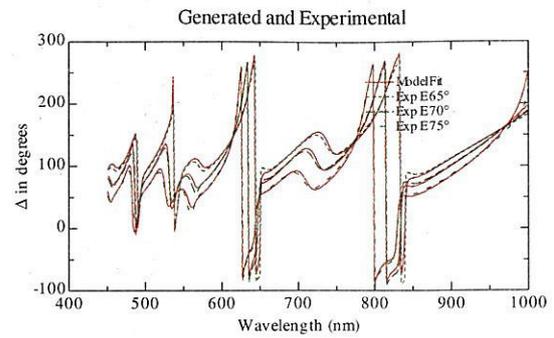
2.4.2 ウェット酸化耐性

次に、図 2.9 の基板をウェット酸化を行い、 Si_3N_4 膜の酸化防止性能の確認を行った。酸化後の膜の評価は、分光エリプソメーターを用いた。分光エリプソメーター解析で使ったモデルは図 2.19 であり、ドライ酸化と同じモデルである。同図以外にも数種類のモデルを用いたが、もっとも解析結果が良好なモデルが図 2.19 であり、 Si_3N_4 膜上部から酸化されると仮定している。

図 2.20 に、酸化前の分光エリプソメーターの測定結果を示す。図 2.9 の基板は裏面が鏡面であるため、基板裏面からの波長 $1 \mu\text{m}$ 以上では反射光が存在する。そこで、450 ~ 1000 nm の波長範囲のデータのみを解析に用いた。測定結果とモデルによる計算結果はよく一致している。

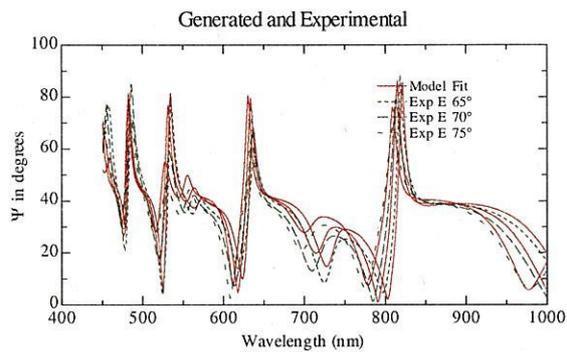


(a) p 偏光と s 偏光の複素反射係数の比

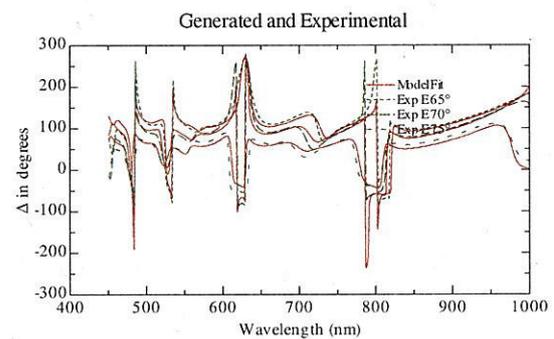


(b) p 偏光と s 偏光の位相差

図 2.21: ウェット酸化後の分光エリプソメーターの測定結果 (2 時間酸化)

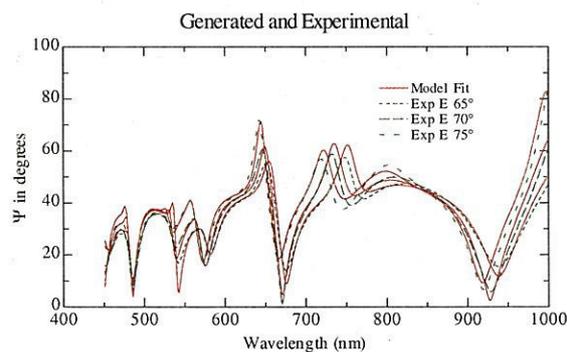


(a) p 偏光と s 偏光の複素反射係数の比

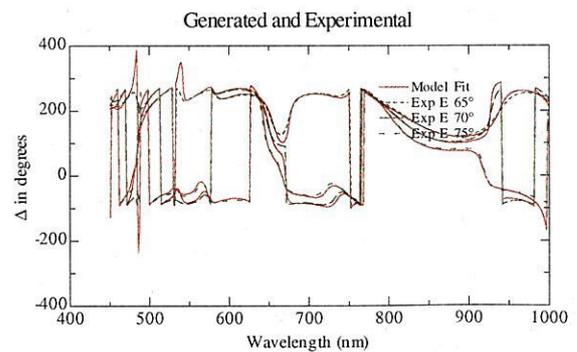


(b) p 偏光と s 偏光の位相差

図 2.22: ウェット酸化後の分光エリプソメーターの測定結果 (4 時間酸化)



(a) p 偏光と s 偏光の複素反射係数の比



(b) p 偏光と s 偏光の位相差

図 2.23: ウェット酸化後の分光エリプソメーターの測定結果 (7 時間酸化)

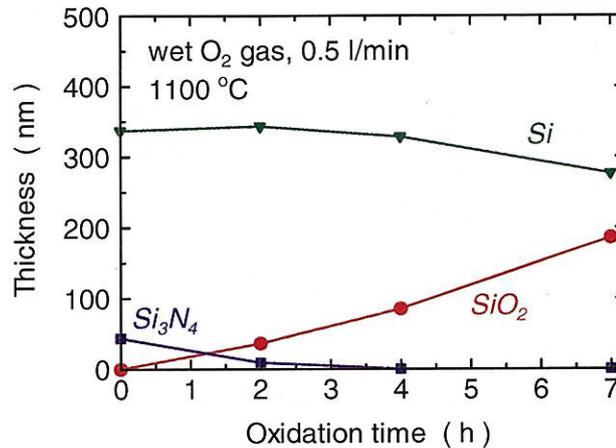


図 2.24: ウェット酸化における各層の膜厚の酸化時間依存性

酸化時間 2 時間、4 時間および 7 時間のときの分光エリプソメーターの測定結果をそれぞれ図 2.21、図 2.22 および図 2.23 に示す。それぞれ、測定結果とモデルによる計算結果に若干の違いが見られるが、ほぼ図 2.19 のモデルのように、 Si_3N_4 膜が上部から酸化されて SiO_2 に変化していると考えられる。

図 2.24 に、分光エリプソメーターでの測定結果から得られた、上部 Si 層、 Si_3N_4 層および酸化により生じた最上部の SiO_2 層の膜厚の酸化時間依存性を示す。酸化により Si_3N_4 層の膜厚が減少して SiO_2 層の膜厚が増加していること、7 時間酸化により Si 膜厚が 277 nm に減少していることがわかる。Si 膜厚が減少した理由はわからないが、LP-CVD 法で堆積した Si_3N_4 膜厚が薄く膜質に若干問題がある (堆積した NTT アドバンステクノロジー社の談) ためか、ウェット酸化のために酸素が Si_3N_4 膜を透過しやすいためだと考えられる。完全な酸化防止性能ではないが、277 nm の Si 膜厚は Si 細線光導波路の作製には十分な厚さである。したがって、40 nm 厚の Si_3N_4 膜を用いても、選択酸化法により Si 細線光導波路の作製は可能と考えられる。

第3章 伝搬モード解析と光伝搬シミュレーション

3.1 はじめに

実際の光導波路は、単一モード伝搬となるように設計・作製される。これは、光導波路内の光波の制御が容易かつ設計どおりに制御できるからである。本章ではまず、光導波路設計のための解析方法を説明する。その後、曲がり光導波路における光伝搬解析が可能なFDTD (Finite Difference Time Domain) 法について説明し、Si 細線光導波路のFDTDシミュレーション結果を述べる。

3.2 スラブ光導波路における波動方程式

等方性で無損失な誘電体媒質内のマクスウェルの方程式は、

$$\text{rot}\mathbf{E} = -\mu_0 \frac{\partial \mathbf{H}}{\partial t} \quad (3.1)$$

$$\text{rot}\mathbf{H} = \epsilon_0 n^2 \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} \quad (3.2)$$

で与えられる。ここで、 ϵ_0 および μ_0 はそれぞれ真空中の誘電率および透磁率、 $n = \sqrt{\epsilon_s}$ は屈折率、 ϵ_s は比誘電率である。直角座標系において、光波の伝搬軸が z 方向で伝搬定数を β として、

$$\mathbf{E} = \mathbf{E}(x, y)e^{j(\omega t - \beta z)} \quad (3.3)$$

$$\mathbf{H} = \mathbf{H}(x, y)e^{j(\omega t - \beta z)} \quad (3.4)$$

で変化するような平面波について考える。ここで、 ω は光の角周波数であり、光速を $c (= 1/\sqrt{\epsilon_0\mu_0})$ として、 $\omega = 2\pi c/\lambda$ で与えられる。

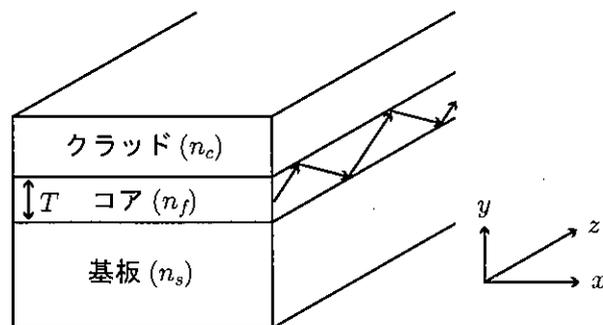


図 3.1: ステップ型スラブ光導波路の屈折率分布

図 3.1 に示すスラブ光導波路の場合、電磁界成分は x 方向に一様であり、 y 成分のみの関数となる。従って、式 (3.1) および式 (3.2) で、 $\partial/\partial t = j\omega$ 、 $\partial/\partial z = -j\beta$ 、 $\partial/\partial x = 0$ とすると、次式が得られる。

$$\frac{\partial E_z}{\partial y} + j\beta E_y = -j\omega\mu_0 H_x \quad (3.5)$$

$$-j\beta E_x = -j\omega\mu_0 H_y \quad (3.6)$$

$$-\frac{\partial E_x}{\partial y} = -j\omega\mu_0 H_z \quad (3.7)$$

$$\frac{\partial H_z}{\partial y} + j\beta H_y = j\omega\epsilon_0 n^2 E_x \quad (3.8)$$

$$-j\beta H_x = j\omega\epsilon_0 n^2 E_y \quad (3.9)$$

$$-\frac{\partial H_x}{\partial y} = j\omega\epsilon_0 n^2 E_z \quad (3.10)$$

上 6 式は 2 つに分類することができる。

(1) H_x 、 E_y および H_z のみを含む TE モード (式 (3.6)、式 (3.7) および式 (3.8))

(2) E_x 、 H_y および E_z のみを含む TM モード (式 (3.5)、式 (3.9) および式 (3.10))

(a) TE モード

式 (3.6)、式 (3.7) および式 (3.8) から、TE モードに対する波動方程式は、次式で与えられる。

$$\frac{\partial^2 E_x}{\partial y^2} + (k_0^2 n^2 - \beta^2) E_x = 0 \quad (3.11)$$

$$H_y = \frac{\beta}{\omega\mu_0} E_x \quad (3.12)$$

$$H_z = \frac{1}{j\omega\mu_0} \frac{\partial E_x}{\partial y} \quad (3.13)$$

(b) TM モード

式 (3.5)、式 (3.9) および式 (3.10) から、 $\partial n^2/\partial y \neq 0$ であるから、TM モードに対する波動方程式は、次式で与えられる。

$$\frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{1}{n^2} \cdot \frac{\partial H_x}{\partial y} \right) + \left(k_0^2 - \frac{\beta^2}{n^2} \right) H_x = 0 \quad (3.14)$$

$$E_y = -\frac{\beta}{\omega\epsilon_0 n^2} H_x \quad (3.15)$$

$$E_z = -\frac{1}{j\omega\epsilon_0 n^2} \frac{\partial H_x}{\partial y} \quad (3.16)$$

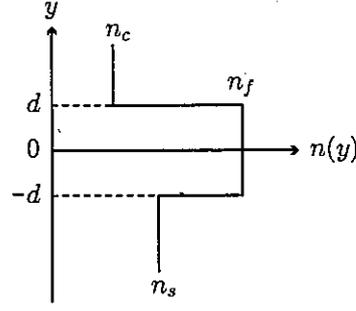


図 3.2: スラブ光導波路の屈折率分布

一方、屈折率が各領域で一定であれば $\partial n^2 / \partial y = 0$ とみなしてよい。この場合の TM モードの波動方程式は

$$\frac{\partial^2 H_x}{\partial y^2} + (k_0^2 n^2 - \beta^2) H_x = 0 \quad (3.17)$$

$$E_y = -\frac{\beta}{\omega \epsilon_0 n^2} H_x \quad (3.18)$$

$$E_z = -\frac{1}{j\omega \epsilon_0 n^2} \frac{\partial H_x}{\partial y} \quad (3.19)$$

となり、TE モードの波動方程式と同形となる。

3.2.1 TE モードの分散方程式

図 3.2 に示す屈折率分布を持つスラブ光導波路を考える。式 (3.11) を境界条件 ($y = \pm d$ で E_x と $H_z \propto \partial E_x / \partial y$ が連続) のもので解くと、TE モードの電界 $E_y(x)$ は次式で与えられる。

$$E_x(y) = \begin{cases} E_f \cos(\kappa d - \phi) e^{-\sigma(y-d)} & (y > d) \\ E_f \cos(\kappa y - \phi) & (-d \leq y \leq d) \\ E_f \cos(\kappa d + \phi) e^{\xi(y+d)} & (y \leq -d) \end{cases} \quad (3.20)$$

ただし、

$$\begin{cases} \kappa = \sqrt{k_0^2 n_f^2 - \beta^2} \\ \sigma = \sqrt{\beta^2 - k_0^2 n_c^2} \\ \xi = \sqrt{\beta^2 - k_0^2 n_s^2} \end{cases} \quad (3.21)$$

である。また、分散方程式 (固有値方程式) は、次式で与えられる。

$$\kappa d = \frac{m\pi}{2} + \frac{1}{2} \tan^{-1} \left(\frac{\xi}{\kappa} \right) + \frac{1}{2} \tan^{-1} \left(\frac{\sigma}{\kappa} \right) \quad (3.22)$$

$$\phi = \frac{m\pi}{2} + \frac{1}{2} \tan^{-1} \left(\frac{\xi}{\kappa} \right) - \frac{1}{2} \tan^{-1} \left(\frac{\sigma}{\kappa} \right) \quad (3.23)$$

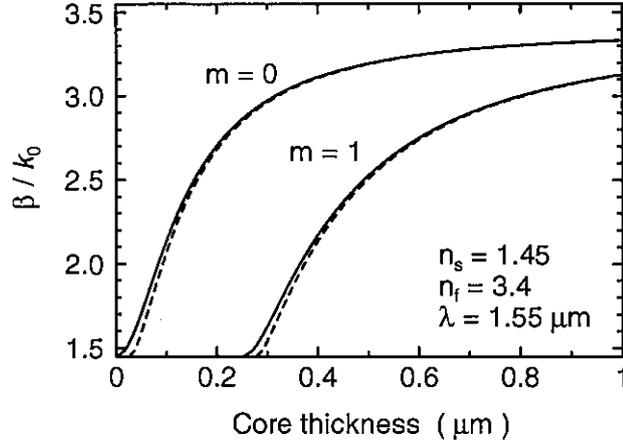


図 3.3: Si 光導波路の分散曲線の計算結果 ($n_f = 3.4$, $n_s = 1.45$ 。実線は $n_c = 1.45$ の場合、破線は $n_c = 1.0$ の場合)

ここで、 $m = 0, 1, 2, \dots$ はモード番号である。

次に、式 (3.22) を規格化表示して、すべてのステップ形スラブ光導波路に適用できる分散曲線を求める。まず TE モードに関して、分散方程式を規格化表示するために、規格化周波数 V 、規格化伝搬定数 b および 光導波路の非対称性の尺度 a をそれぞれ次のように定義する。

$$V = k_0 d \sqrt{n_f^2 - n_s^2} \quad (3.24)$$

$$b = \frac{(\beta/k_0)^2 - n_s^2}{n_f^2 - n_s^2} \quad (3.25)$$

$$a = \frac{n_s^2 - n_c^2}{n_f^2 - n_s^2} \quad (3.26)$$

上 3 式を用いて式 (3.22) を書き直すと、

$$2V\sqrt{1-b} = m\pi + \tan^{-1} \sqrt{\frac{b}{1-b}} + \tan^{-1} \sqrt{\frac{b+a}{1-b}} \quad (3.27)$$

となる。 m と a をパラメータとして、 b と V との関係を図示すると、規格化された導波モードの分散曲線が得られ、実際の光導波路に対する分散曲線に変換することができる。

図 3.3 は、Si 光導波路の分散曲線の計算結果である。ただし、コアは Si で屈折率 $n_f = 3.4$ 、基板は SiO_2 で屈折率 $n_s = 1.45$ とし、実線はクラッドの屈折率 $n_c = 1.45$ (SiO_2) の場合であり、破線はクラッドの屈折率 $n_c = 1.0$ (空気) の場合である。また、波長は $1.55 \mu\text{m}$ である。この図より、Si 光導波路が厚さ方向に単一モードであるためには、コア厚は $0.3 \mu\text{m}$ 未満であることが必要である。

3.2.2 TMモードの分散方程式

式(3.17)をTEモードと同様の手法により解くと、TMモードの磁界 H_x は次式で与えられる。

$$H_x(y) = \begin{cases} H_f \cos(\kappa d - \phi) e^{-\sigma(y-d)} & (y > d) \\ H_f \cos(\kappa y - \phi) & (-d \leq y \leq d) \\ H_f \cos(\kappa d + \phi) e^{\xi(y+d)} & (y \leq -d) \end{cases} \quad (3.28)$$

ただし、

$$\begin{cases} \kappa = \sqrt{k_0^2 n_f^2 - \beta^2} \\ \sigma = \sqrt{\beta^2 - k_0^2 n_c^2} \\ \xi = \sqrt{\beta^2 - k_0^2 n_s^2} \end{cases} \quad (3.29)$$

である。また、TMモードに対する分散方程式(固有値方程式)は次式となる。

$$\kappa d = \frac{m\pi}{2} + \frac{1}{2} \tan^{-1} \left(\frac{\xi n_f^2}{\kappa n_s^2} \right) + \frac{1}{2} \tan^{-1} \left(\frac{\sigma n_f^2}{\kappa n_c^2} \right) \quad (3.30)$$

$$\phi = \frac{m\pi}{2} + \frac{1}{2} \tan^{-1} \left(\frac{\xi n_f^2}{\kappa n_s^2} \right) - \frac{1}{2} \tan^{-1} \left(\frac{\sigma n_f^2}{\kappa n_c^2} \right) \quad (3.31)$$

TEモードのときと同様に

$$V = k_0 d \sqrt{n_f^2 - n_s^2} \quad (3.32)$$

$$b = \frac{N^2 - n_s^2}{n_f^2 - n_s^2} \quad (3.33)$$

$$a = \frac{n_s^2 - n_c^2}{n_f^2 - n_s^2} \quad (3.34)$$

で定義される規格化周波数 V 、規格化伝搬定数 b および光導波路の非対称性の尺度 a を導入して式(3.30)に代入すると、規格化された分散方程式が得られる。

$$2V\sqrt{1-b} = m\pi + \tan^{-1} \left(\frac{n_f^2}{n_s^2} \sqrt{\frac{b}{1-b}} \right) + \tan^{-1} \left(\frac{n_f^2}{n_c^2} \sqrt{\frac{b+a}{1-b}} \right) \quad (3.35)$$

図3.4に、Si光導波路のTEモードおよびTMモードに対する分散曲線を示す。ただし、コアはSiで屈折率 $n_f = 3.4$ 、基板はSiO₂で屈折率 $n_s = 1.45$ 、クラッドはSiO₂で屈折率 $n_c = 1.45$ である。実線はTEモード、破線はTMモードであり、波長は1.55 μm である。この図より、偏波面により伝搬定数は大きく異なることがわかる。また、TEモード、TMモードとも、厚さ方向単一モードであるためには、コア厚は0.3 μm 未満であることが必要である。

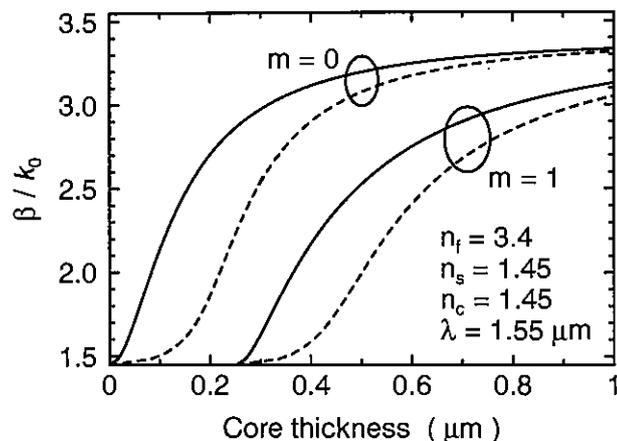


図 3.4: Si 光導波路の TE, TM モードに対する分散曲線 (実線: TE モード、破線: TM モード)

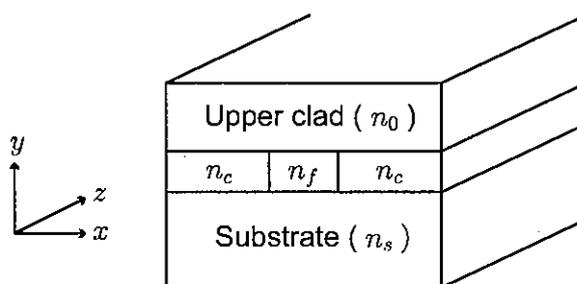


図 3.5: チャンネル光導波路の構造例

3.3 チャンネル光導波路における波動方程式

3.3.1 チャンネル光導波路

図 3.5 に、チャンネル光導波路の解析の構造を示す。基板 (屈折率 n_s) 上に有限の幅と厚さを持つコア (屈折率 n_f)、コアの両側にクラッド (屈折率 n_c) が形成されており、さらに、屈折率 n_0 の上部クラッドで覆われている。チャンネル光導波路の解析は基本的には不可能であり、有限要素法や差分法などの数値的手法が用いられる。しかし、チャンネル光導波路の近似的解法も研究されており、

- (1) マーカッティリ (Marcattili) 法
- (2) 改良マーカッティリ法
- (3) 等価屈折率法

などが知られている。

3.3.2 マクスウェル方程式

スラブ光導波路の解析と同様、等方性で無損失な誘電体媒質内のマクスウェルの方程式

$$\text{rot} \mathbf{E} = -\mu_0 \frac{\partial \mathbf{H}}{\partial t} \quad (3.36)$$

$$\text{rot}\mathbf{H} = \varepsilon_0 n^2 \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} \quad (3.37)$$

において、光波の伝搬軸が z 方向で伝搬定数を β として、

$$\mathbf{E} = \mathbf{E}(x, y) e^{j(\omega t - \beta z)} \quad (3.38)$$

$$\mathbf{H} = \mathbf{H}(x, y) e^{j(\omega t - \beta z)} \quad (3.39)$$

で変化するような平面波を考える。式 (3.36) および式 (3.37) で、 $\partial/\partial t = j\omega$ 、 $\partial/\partial z = -j\beta$ とすると、次式が得られる。

$$\frac{\partial E_z}{\partial y} + j\beta E_y = -j\omega\mu_0 H_x \quad (3.40)$$

$$-j\beta E_x - \frac{\partial E_z}{\partial x} = -j\omega\mu_0 H_y \quad (3.41)$$

$$\frac{\partial E_y}{\partial x} - \frac{\partial E_x}{\partial y} = -j\omega\mu_0 H_z \quad (3.42)$$

$$\frac{\partial H_z}{\partial y} + j\beta H_y = j\omega\varepsilon_0 n^2 E_x \quad (3.43)$$

$$-j\beta H_x - \frac{\partial H_z}{\partial x} = j\omega\varepsilon_0 n^2 E_y \quad (3.44)$$

$$\frac{\partial H_y}{\partial x} - \frac{\partial H_x}{\partial y} = j\omega\varepsilon_0 n^2 E_z \quad (3.45)$$

式 (3.40) ~ 式 (3.45) は電磁界 6 成分すべてを含んでおり、フルベクトル表現といわれる。一方、解析をより簡単化するため、電界の主成分が x 成分であるモード (E^x モード、あるいは、TE モード) と、電界の主成分が y 成分であるモード (E^y モード、あるいは、TM モード) に分けて解析する方法が、よく利用される。これを、セミベクトル表現という。以下、TE モードと TM モードに分けて、セミベクトル表現の基本方程式 (波動方程式) を導出する。

3.3.3 TE モードの波動方程式

TE モードでは電界は x 方向に偏光しているため、 $E_y = 0$ である。このとき、式 (3.40) ~ 式 (3.45) は次式となる。

$$\frac{\partial E_z}{\partial y} = -j\omega\mu_0 H_x \quad (3.46)$$

$$-j\beta E_x - \frac{\partial E_z}{\partial x} = -j\omega\mu_0 H_y \quad (3.47)$$

$$-\frac{\partial E_x}{\partial y} = -j\omega\mu_0 H_z \quad (3.48)$$

$$\frac{\partial H_z}{\partial y} + j\beta H_y = j\omega\varepsilon_0 n^2 E_x \quad (3.49)$$

$$-j\beta H_x - \frac{\partial H_z}{\partial x} = 0 \quad (3.50)$$

$$\frac{\partial H_y}{\partial x} - \frac{\partial H_x}{\partial y} = j\omega\epsilon_0 n^2 E_z \quad (3.51)$$

E_x に対する波動方程式を求めると、次式となる。

$$\frac{\partial^2 E_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 E_x}{\partial y^2} + (k_0^2 n^2 - \beta^2) E_x = 0 \quad (3.52)$$

ここで、 $k_0 = \omega\sqrt{\epsilon_0\mu_0}$ である。式(3.52)が、TEモードにおける E_x に対する波動方程式である。また、その他の成分は、次式で求めることができる。

$$E_y = 0 \quad (3.53)$$

$$E_z = \frac{1}{j\beta} \frac{\partial E_x}{\partial x} \quad (3.54)$$

$$H_x = -\frac{1}{j\omega\mu_0} \frac{\partial E_z}{\partial y} \quad (3.55)$$

$$H_y = \frac{1}{j\omega\mu_0} \left(j\beta E_x + \frac{\partial E_z}{\partial x} \right) \quad (3.56)$$

$$H_z = \frac{1}{j\omega\mu_0} \frac{\partial E_x}{\partial y} \quad (3.57)$$

3.3.4 TMモードの波動方程式

TMモードでは電界は y 方向に偏光しているため、 $E_x = 0$ である。このとき、式(3.40)～式(3.45)は次式となる。

$$\frac{\partial E_z}{\partial y} + j\beta E_y = -j\omega\mu_0 H_x \quad (3.58)$$

$$-\frac{\partial E_z}{\partial x} = -j\omega\mu_0 H_y \quad (3.59)$$

$$\frac{\partial E_y}{\partial x} = -j\omega\mu_0 H_z \quad (3.60)$$

$$\frac{\partial H_z}{\partial y} + j\beta H_y = 0 \quad (3.61)$$

$$-j\beta H_x - \frac{\partial H_z}{\partial x} = j\omega\epsilon_0 n^2 E_y \quad (3.62)$$

$$\frac{\partial H_y}{\partial x} - \frac{\partial H_x}{\partial y} = j\omega\epsilon_0 n^2 E_z \quad (3.63)$$

E_y に対する波動方程式を求めると、次式となる。

$$\frac{\partial^2 E_y}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 E_y}{\partial y^2} + (k_0^2 n^2 - \beta^2) E_y = 0 \quad (3.64)$$

その他の成分は、次式で求めることができる。

$$E_x = 0 \quad (3.65)$$

$$E_z = \frac{1}{j\beta} \frac{\partial E_y}{\partial y} \quad (3.66)$$

$$H_x = -\frac{1}{j\omega\mu_0} \left(j\beta E_y + \frac{\partial E_z}{\partial y} \right) \quad (3.67)$$

$$H_y = \frac{1}{j\omega\mu_0} \frac{\partial E_z}{\partial x} \quad (3.68)$$

$$H_z = \frac{1}{j\omega\mu_0} \frac{\partial E_y}{\partial x} \quad (3.69)$$

3.3.5 等価屈折率法

等価屈折率法は、図 3.5 に示すチャネル光導波路を、 x 方向に一様なスラブ光道路と y 方向に一様なスラブ光導波路に分割して、式 (3.52) あるいは式 (3.64) を満たす伝搬定数 β を求める方法である。

式 (3.52) および式 (3.64) は同じ形をしているので、以下のように統一して表す。

$$\frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial y^2} + (k_0^2 n(x, y)^2 - \beta^2) \phi = 0 \quad (3.70)$$

上式を解くに当たり、変数分離法を用いる。すなわち、波動関数 ϕ を

$$\phi = X(x)Y(y) \quad (3.71)$$

とおく。上式を式 (3.70) に代入すると、次式を得る。

$$\frac{1}{X} \frac{d^2 X}{dx^2} + \frac{1}{Y} \frac{d^2 Y}{dy^2} + k_0^2 \{ n(x, y)^2 - \beta^2 \} = 0 \quad (3.72)$$

上式左辺第 3 項は定数であるので、第 1 項および第 2 項も定数でなければならない。そこで、第 1 項と第 2 項を以下のようにおく。

$$\frac{1}{Y} \frac{d^2 Y}{dy^2} + k_0^2 \{ (n(x, y)^2 - N(x)^2) \} = 0 \quad (3.73)$$

$$\frac{1}{X} \frac{d^2 X}{dx^2} + \{ k_0^2 N(x)^2 - \beta^2 \} = 0 \quad (3.74)$$

ここで、 $N(x)$ は等価屈折率分布と呼ばれる。上 2 式はお互いに独立したスラブ光導波路に対する波動方程式である。そこで、以下の手順により伝搬定数 β を求めることができる。

- (1) 図 3.5 のチャネル光導波路を、図 3.6 に示すように、左側クラッド部 (同図 (a))、コア部 (同図 (b)) および右側クラッド部 (同図 (c)) の 3 つのスラブ光導波路に分割する。

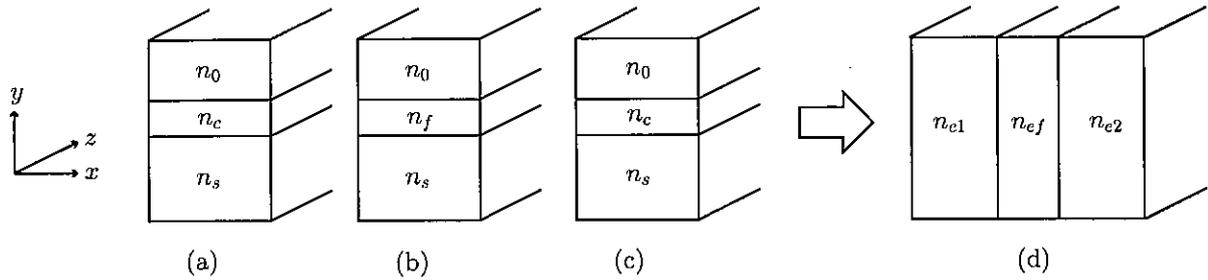


図 3.6: 等価屈折率法の原理

(2) 分割した領域それぞれに対して式 (3.73) に示す波動方程式を解き、それぞれの領域に対して $N(x)$ を求める。求められた $N(x)$ を左から n_{e1} 、 n_{ef} および n_{e2} とする。

(3) 図 3.6(d) に示すように、屈折率 n_{e1} 、 n_{ef} および n_{e2} を持つ x 方向 (基板に平行な方向) に対するスラブ光導波路を仮定し、式 (3.74) に示す波動方程式を解き、 β を求める。

n_{e1} 、 n_{ef} 、 n_{e2} および β を求めるには、スラブ光導波路の分散方程式 (固有値方程式) を解かなければならない。そのため、解くべき分散方程式は TE モード (E^x モード) か TM モード (E^y モード) かに依存する。

(a) TE モード (x モード) のとき

- n_{e1} 、 n_{ef} および n_{e2} を求める場合には、TE モードに対する分散方程式を解く。
- β を求める場合には、TM モードに対する分散方程式を解く。

(b) TM モード (y モード) のとき

- n_{e1} 、 n_{ef} および n_{e2} を求める場合には、TM モードに対する分散方程式を解く。
- β を求める場合には、TE モードに対する分散方程式を解く。

3.4 数値解析による 3 次元モード解析

光導波路の詳細な伝搬モード解析のためには、有限要素法あるいは差分法による数値解析が不可欠である。そこで、市販の有限要素法による電磁界解析ソフトを用いて、チャンネル構造での伝搬モード解析を行った。使用したソフトウェアは Rsoft Design 社の FemSIM である。

図 3.7 に、有限要素解析のための Si 光導波路の断面構造を示す。同図に示すように、2つの構造に対してシミュレーションした。

- 構造 A: 選択酸化によりクラッド部のみが酸化され、選択酸化マスクの Si_3N_4 膜およびコアとなる Si は全く影響を受けない、理想的な選択酸化による構造。

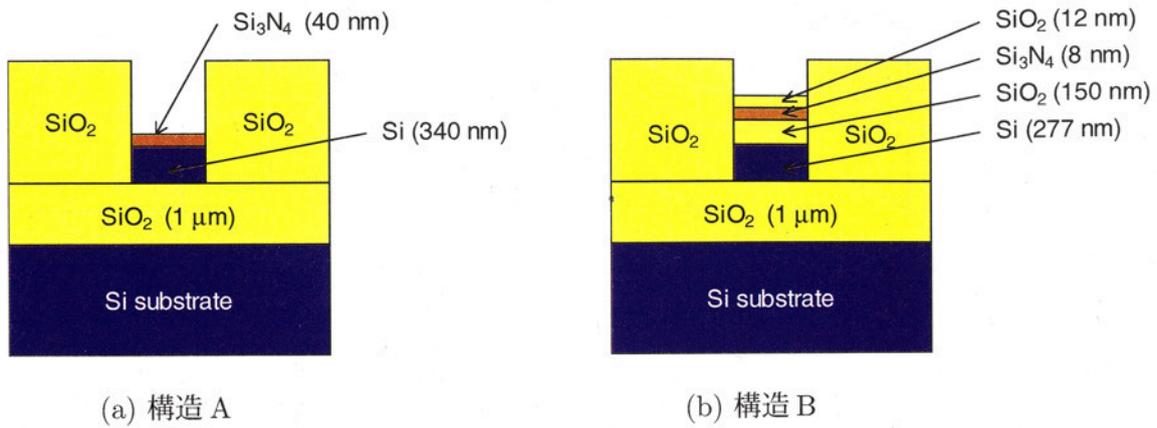


図 3.7: 有限要素解析のための Si 光導波路の断面構造

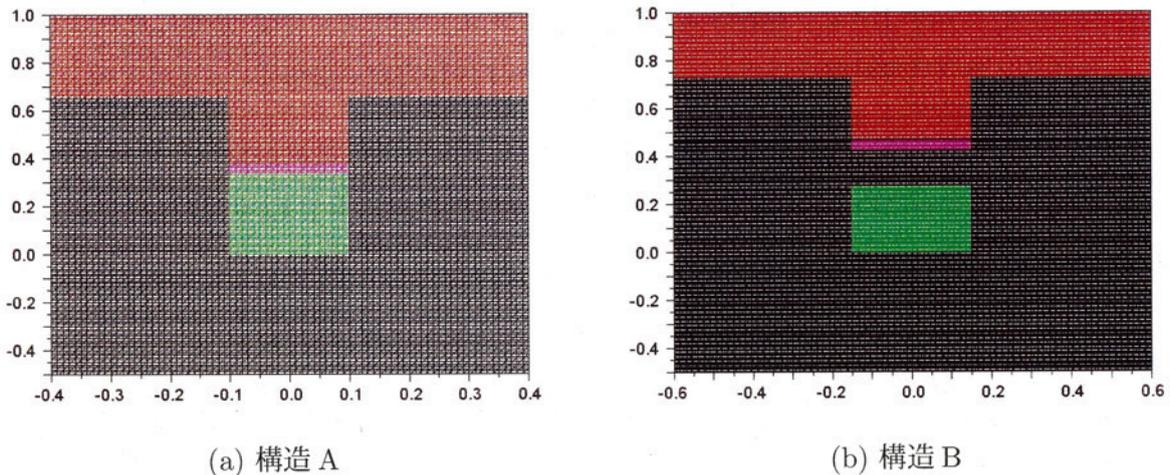


図 3.8: FemSIM における有限要素解析のためのメッシュ図の一例

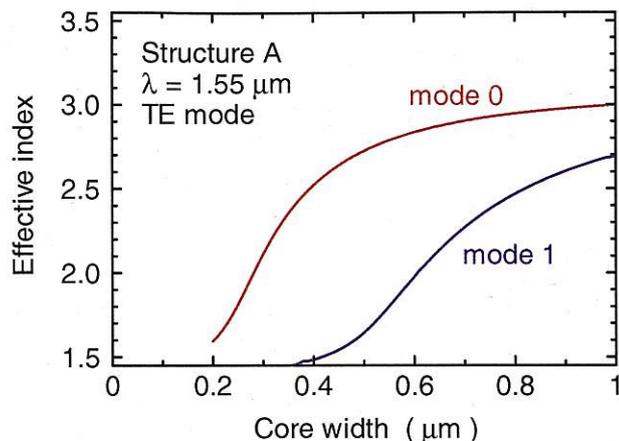
- 構造 B : 2.4 節で詳述したとおり、選択酸化により Si_3N_4 膜が SiO_2 に変化し、Si 上部も酸化されて SiO_2 に変化した構造。

なお、構造 B はエリプソメーターでの測定結果と多少異なるが、解析に用いる波長範囲によっては、図 3.7(b) のモデルでもフィッティングが可能である。しかしながら、上部 2 層の膜厚が極めて薄いので、2.4 節のモデルとほぼ同じと考えてよい。

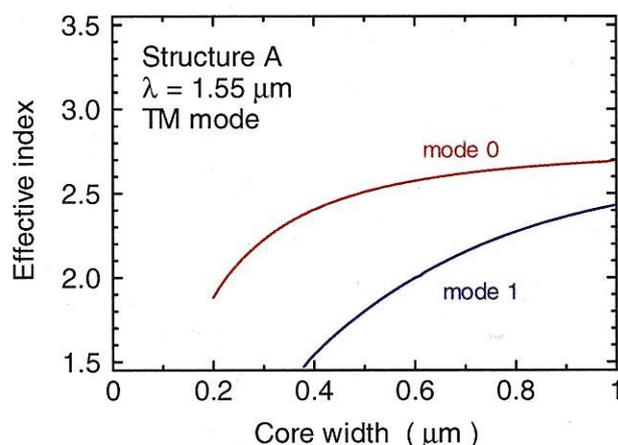
図 3.8 は、FemSIM における有限要素解析のためのメッシュ図の一例であり、コア幅 W を $0.2 \sim 1.0 \mu\text{m}$ まで変化させて、基本モードおよび高次モードの等価屈折率を求めた。メッシュサイズは以下のとおりである。

- 構造 A : 横方向 $W/20$ 、縦方向 10 nm
- 構造 B : 横方向 $W/20$ 、縦方向 2.27 nm

構造 B の縦方向のメッシュサイズが小さいのは、上 2 層の SiO_2 層および Si_3N_4 層の膜厚が非常に薄いためである。また、前章で述べたように、340 nm 厚の Si を熱酸化すると 730 nm 厚の SiO_2



(a) TE モード



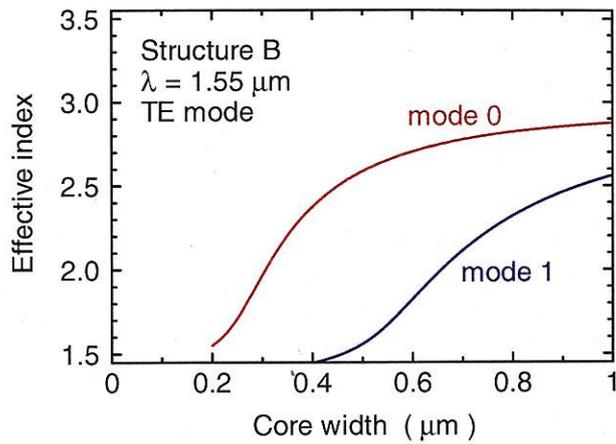
(b) TM モード

図 3.9: 構造 A に対するモード解析結果

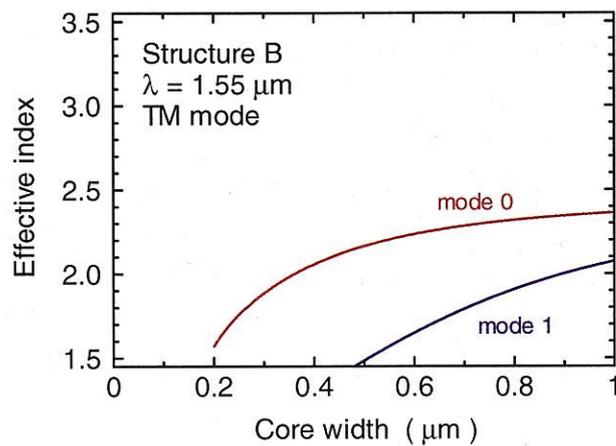
に変換される。すなわち、体積が膨張する。図 3.7 に示す断面構造において、コア両側の SiO_2 が厚くなっているのは、熱酸化による体積膨張を表している。

図 3.9 に、構造 A に対するモード解析結果を示す。単一モード条件を調べることが目的であるので、高次モードについては最低次のモードのみを示してある。TE モードの等価屈折率が TM モードの等価屈折率より大きくなっているが、これはすなわち、TE モードの方が光の閉じ込めが強いことを意味している。また、単一モード伝搬のためには、コア幅は $0.2 \sim 0.4 \mu\text{m}$ でなければならないことがわかる。

図 3.10 に、構造 B に対するモード解析結果を示す。構造 A と同じ特徴であることがわかる。単一モード伝搬のためのコア幅は、構造 A より特に TM モードに関しては若干広いが、 $0.2 \sim 0.4 \mu\text{m}$ のコア幅が単一モード条件と考えればよい。



(a) TE モード



(b) TM モード

図 3.10: 構造 B に対するモード解析結果

3.5 FDTD 法による光伝搬シミュレーション

前節までのシミュレーションは伝搬モード解析であるため定常解であり、曲がり光導波路などの光伝搬をシミュレートすることはできない。光伝搬シミュレーションには、(1) ビーム伝搬法、(2) FDTD 法 (Finite Difference Time Domain 法: 時間領域差分法) がある。ビーム伝搬法は解析速度は速いが、大きな曲げ角度に対してはシミュレートすることができない。そこで、FDTD 法で光伝搬シミュレーションを行うこととし、プログラムを自作した。

FDTD 法は、微分形式で表されるマクスウェル方程式を差分法で時間領域で解く方法である。様々な系に対して解析が可能であるが、膨大なコンピュータのメモリと計算時間が必要である。本研究では、計算時間の短縮のため、チャンネル構造を等価屈折率法を用いてスラブ構造に変化してシミュレーションを行った。

図 3.11 および図 3.12 に、解析対象とする 2 種類の光導波路構造を示す。構造 A (図 3.11) は、コ

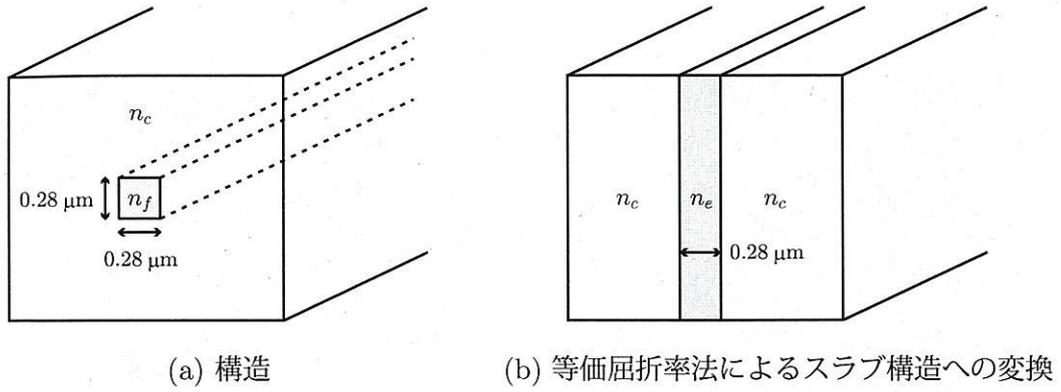


図 3.11: 解析対象の光導波路構造 A

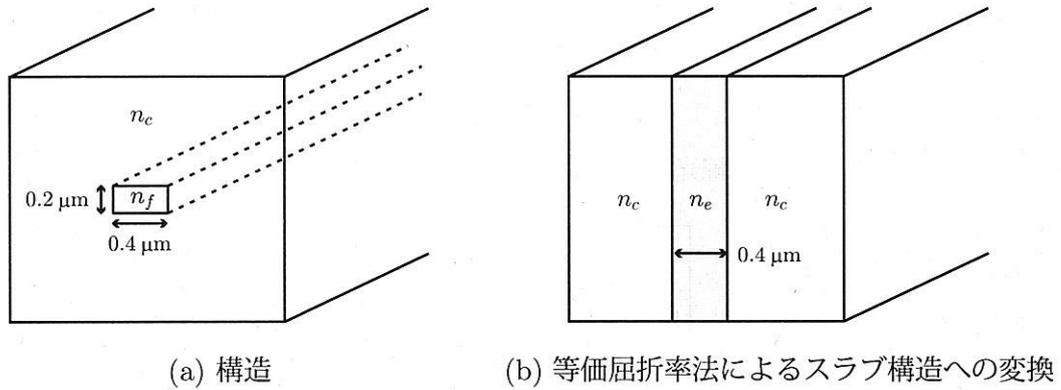


図 3.12: 解析対象の光導波路構造 B

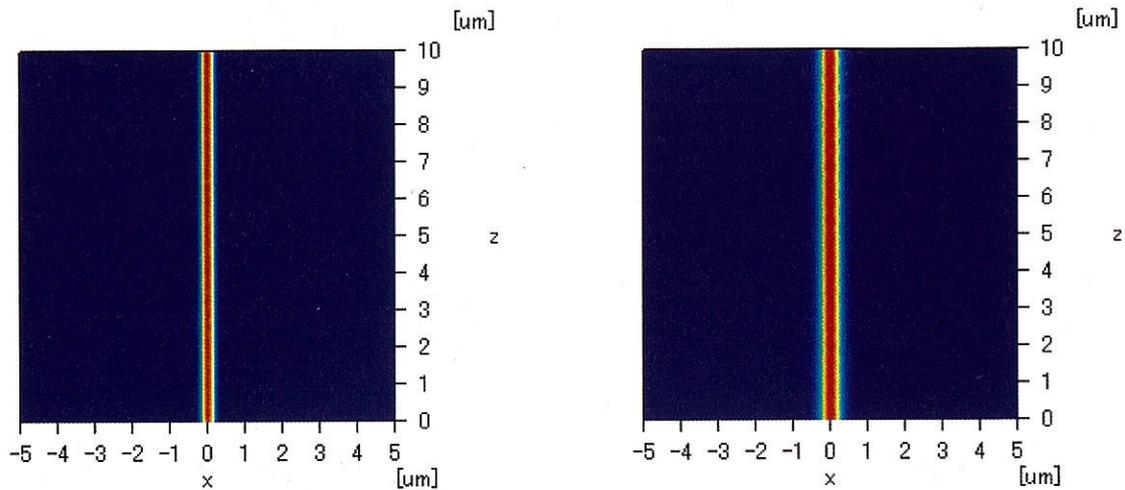
アは幅・厚さとも $0.28 \mu\text{m}$ の正方形であり、コアの周りはすべて SiO_2 である。また、構造 B (図 3.12) は、コアは幅 $0.4 \mu\text{m}$ 、厚さ $0.2 \mu\text{m}$ の長方形であり、コアの周りはすべて SiO_2 である。屈折率は以下のとおりである。

- 構造 A : コア $n_f = 3.4$ 、クラッド $n_c = 1.45$ 、スラブ構造でのコア等価屈折率 $n_e = 2.43$
- 構造 B : コア $n_f = 3.4$ 、クラッド $n_c = 1.45$ 、スラブ構造でのコア等価屈折率 $n_e = 1.86$

FDTD 法では電磁界の 6 成分 (E_x 、 E_y 、 E_z 、 H_x 、 H_y 、 H_z) が求められるが、本研究ではさらにポインティングベクトルを計算し、その時間平均を求めることにより、光エネルギーの分布を求めた。以後の解析結果では、光エネルギー分布を図示する。

直線光導波路

自作したプログラムの動作確認のため、直線光導波路における光伝搬シミュレーションを行った。図 3.13 に、シミュレーション結果を示す。両構造ともコア内に光が閉じ込められて伝搬する様子が確認できる。



(a) 構造 A

(b) 構造 B

図 3.13: 直線光導波路における光伝搬シミュレーション結果

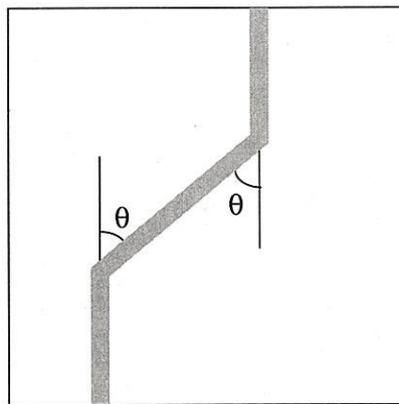


図 3.14: 曲がり光導波路のシミュレーションモデル

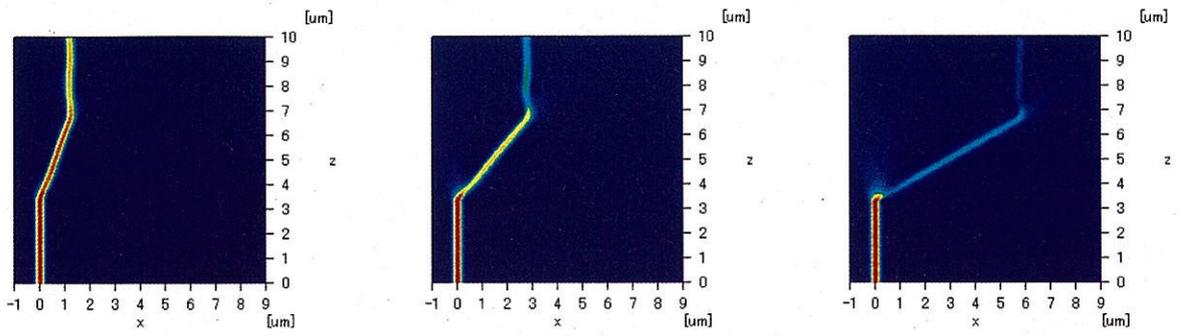
曲がり光導波路

次に、図 3.14 に示す曲がり光導波路のシミュレーションを行った。角度 θ の曲がり部が 2箇所存在する光導波路である。

図 3.15 に、構造 A を持つ曲がり光導波路における光伝搬シミュレーション結果を示す。曲がり角度 $\theta = 20^\circ$ のときにはほとんど損失はないが、曲がり角度 $\theta = 40^\circ$ で曲がり部で若干の光損失が見られ、曲がり角度 $\theta = 60^\circ$ では曲がり部での光損失が大きいことがわかる。

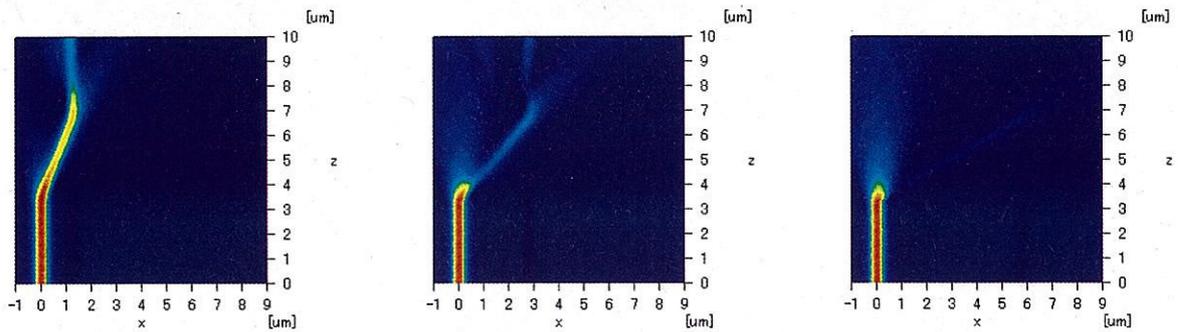
図 3.16 は、構造 B を持つ曲がり光導波路における光伝搬シミュレーション結果である。曲がり角度 $\theta = 20^\circ$ においても曲がり部で大きな損失が確認され、曲がり角度 $\theta = 60^\circ$ では曲がり部でほとんどの光が失われることがわかる。

図 3.17 に、曲がり角度に対する光エネルギー伝達率依存性を示す。構造 A の方が構造 B より光エネルギー伝達率が大きく、曲がりに強い光導波路であることがわかる。



(a) 曲がり角度 $\theta = 20^\circ$ (b) 曲がり角度 $\theta = 40^\circ$ (c) 曲がり角度 $\theta = 60^\circ$

図 3.15: 構造 A の曲がり光導波路における光伝搬シミュレーション結果



(a) 曲がり角度 $\theta = 20^\circ$ (b) 曲がり角度 $\theta = 40^\circ$ (c) 曲がり角度 $\theta = 60^\circ$

図 3.16: 構造 B の曲がり光導波路における光伝搬シミュレーション結果

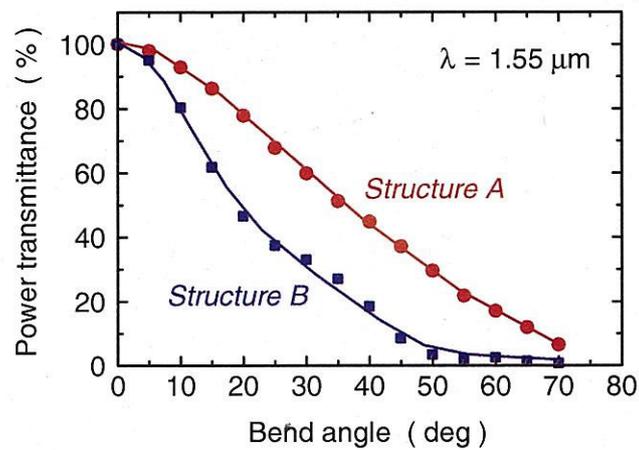


図 3.17: 曲がり光導波路における光エネルギー伝達率の曲がり角度依存性

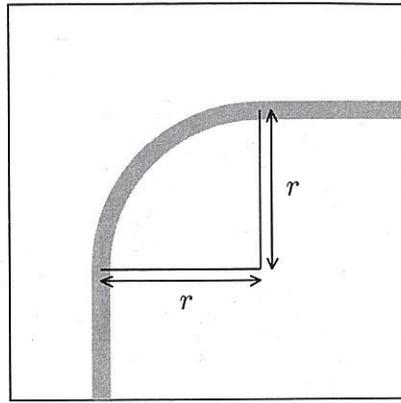


図 3.18: 円弧光導波路のシミュレーションモデル

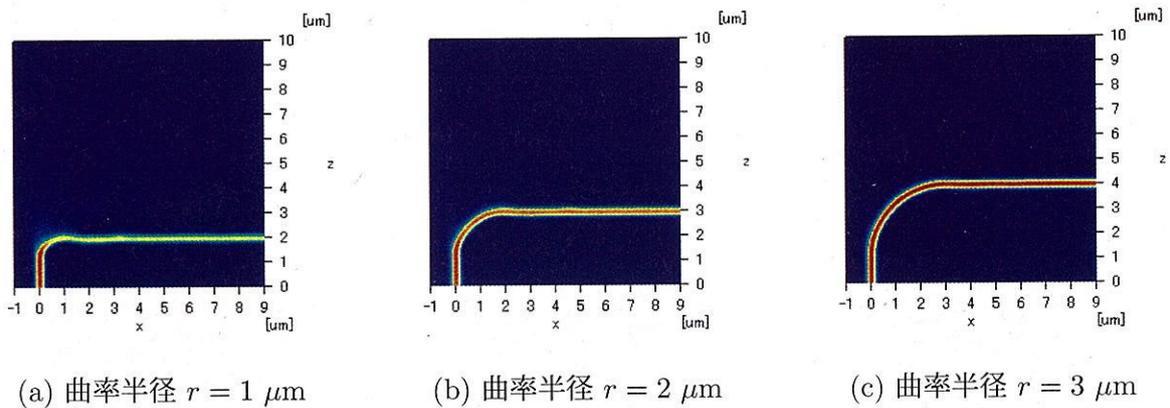


図 3.19: 構造 A の円弧光導波路における光伝搬シミュレーション結果

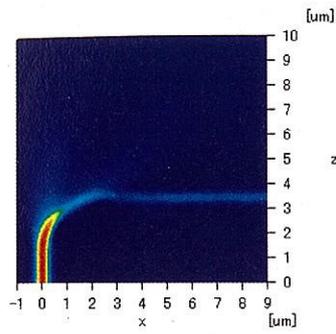
円弧光導波路

最後に、図 3.18 に示す曲がり光導波路のシミュレーションを行った。2本の直線光導波路を曲率半径 r の円弧光導波路で接続した構造である。

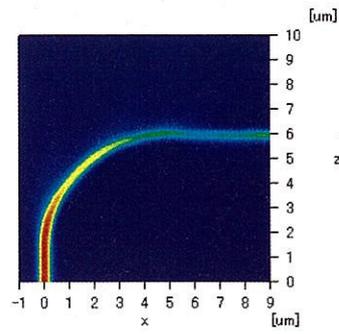
図 3.19 に、構造 A を持つ円弧光導波路における光伝搬シミュレーション結果を示す。円弧半径 $r = 1 \mu\text{m}$ では円弧部で多少の光の漏れが確認されるが、円弧半径 $r = 2 \mu\text{m}$ 以上では光の漏れはほとんどなく、曲げに強い光導波路構造であることがわかる。

図 3.20 は、構造 B を持つ円弧光導波路における光伝搬シミュレーション結果である。円弧半径 $r = 2.5 \mu\text{m}$ では円弧部でほとんどの光が失われていることがわかる。円弧半径 $r = 5 \mu\text{m}$ では円弧部での光の損失は改善されるが、半分程度の光が失われている。円弧半径 $r = 10 \mu\text{m}$ 以上では円弧部での光の損失は非常に少ないことがわかる。

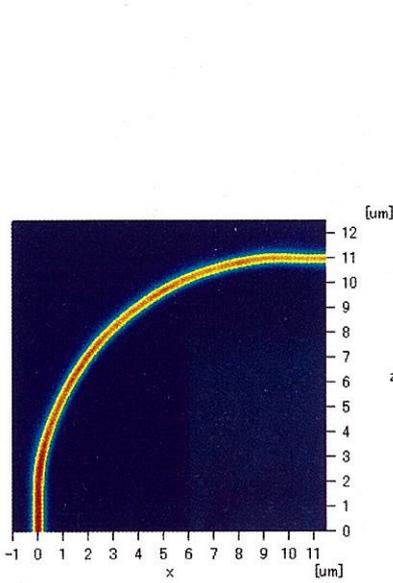
図 3.21 に、円弧半径に対する光エネルギー伝達率依存性を示す。曲がり光導波路と同様、構造 A の方が構造 B より光エネルギー伝達率が大きく、曲げに強い光導波路であることがわかる。特に、構造 A では $5 \mu\text{m}$ 以上の円弧半径では無損失と考えてよい。このことは、 SiO_2 に囲まれた Si 細線光導波路は、非常にコンパクトな光波回路の実現に有望であることを意味している。



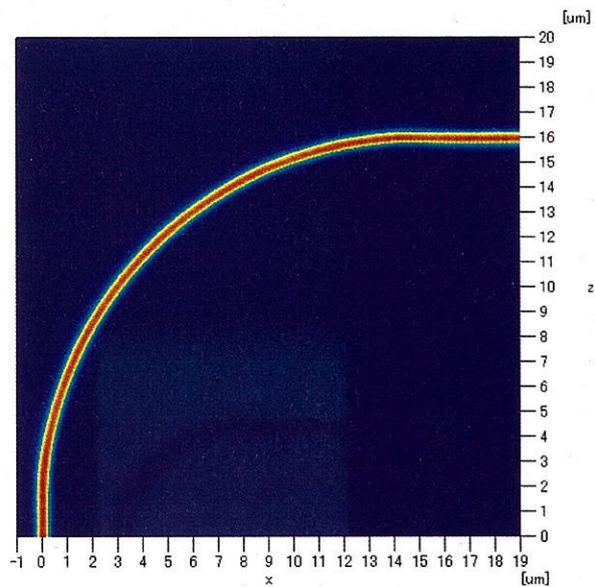
(a) 曲率半径 $r = 2.5 \mu\text{m}$



(b) 曲率半径 $r = 5 \mu\text{m}$



(c) 曲率半径 $r = 10 \mu\text{m}$



(c) 曲率半径 $r = 15 \mu\text{m}$

図 3.20: 構造 B の円弧光導波路における光伝搬シミュレーション結果

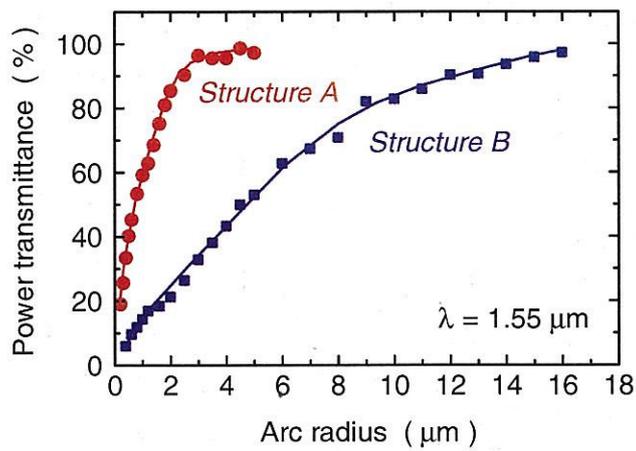


図 3.21: 円弧光導波路における光エネルギー伝達率の曲がり角度依存性

第4章 光導波路の試作と評価

4.1 はじめに

前節までの議論により、選択酸化法により Si 細線光導波路を作製する基礎技術が確立できた。そこで、酸化防止膜である Si_3N_4 膜をパターニングして酸化を行うことにより、実際に Si 細線光導波路を作製し、その伝搬特性の評価を行う。

4.2 Si_3N_4 膜のエッチング

本研究では、フォトマスクに描画された光導波路パターンを Si_3N_4 膜に正確に転写することが最も重要であり、 Si_3N_4 膜のエッチングが重要である。そこで、 Si_3N_4 膜のエッチングについて実験を行った。実験手順は、以下のとおりである。

- (1) Si_3N_4 膜が形成された SOI 基板の上に、ポジ型フォトリソグ (Shipley 社、S-1808) を塗布・プリベークする。
- (2) $5\ \mu\text{m}$ 幅のパターンが描画されたフォトマスクを用いて露光・現像を行う。
- (3) フォトリソグと基板の密着性を高めるため、ポストベークを行う (通常は 120°C 、30分)。
- (4) Si_3N_4 膜のエッチングを行う。
 - ウェットエッチング
 - ドライエッチング

4.2.1 ウェットエッチング

ウェットエッチングは、液体の化学薬品に試料を浸すことで加工層を削る方法である。ウェットエッチングは真空装置を必要とせず、安価で簡単な器具で手軽に行える利点があるが、等方性であるため、サイドエッチングの影響が顕著に現れ、加工精度の面で劣っている。

図 4.1 に、ウェットエッチングの実験に使用した基板を示す。 Si_3N_4 膜のウェットエッチングは 180°C に熱したリン酸 (熱リン酸) を用いるのが一般的であるが、本研究で使用した Si_3N_4 膜は $\text{HF} : \text{H}_2\text{O} = 1 : 50$ の希フッ酸でエッチングが可能であった。

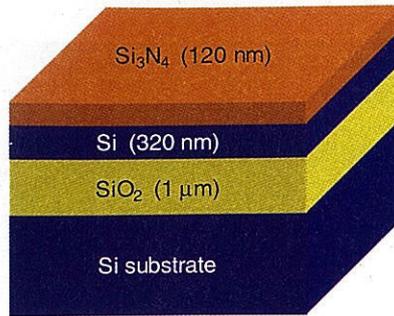


図 4.1: ウェットエッチングの実験に使用した基板

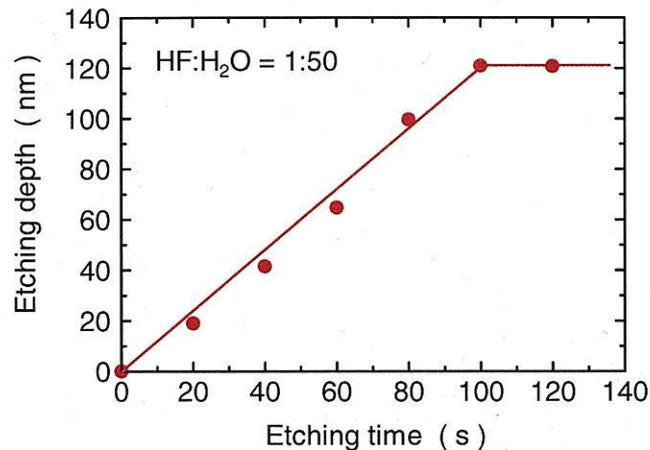


図 4.2: HF : H₂O = 1 : 50 による Si₃N₄ 膜のウェットエッチング特性

図 4.2 に、HF : H₂O = 1 : 50 による Si₃N₄ 膜のウェットエッチング特性を示す。100 秒のエッチング時間で Si₃N₄ 膜を完全にエッチングできることがわかる。

そこで、5 μm の直線パターンを上述のプロセスで転写し、Si₃N₄ 膜のウェットエッチングによるパターニングを行った。パターニング後の光学顕微鏡写真を図 4.3 に示す。なお、エッチング後にフォトレジストは除去してある。パターンが全体的にぼやけていること、パターンが消滅している箇所があることなど、良好なエッチングは得られなかった。これは、サイドエッチングの影響およびエッチング速度が基板上で均一でないためと思われる。

パターニングが失敗する原因として、フォトレジストと基板との密着性が弱い、Si₃N₄ 膜が厚いのでエッチング速度のムラの影響を受けやすい、ことが考えられる。そこで、(1) ポストベーキング温度を高くしてベーキング時間も長くする (150°C、60 分)、(2) Si₃N₄ 膜を希フッ酸により 40 nm にまでエッチングする、ことによるプロセス改善を試みた。

図 4.4 に、ポストベーキング条件を変えたとき (150°C、60 分) のパターニング後の光学顕微鏡写真を、図 4.5 に、Si₃N₄ 膜厚を 40 nm に薄膜化したときのパターニング後の光学顕微鏡写真を示す。両写真とも、パターン切れは確認されないが、図 4.4 では、高温・長時間のポストベーキングのためフォトレジストの剥離が困難になり、基板表面に不要なパターンが残っている。また、

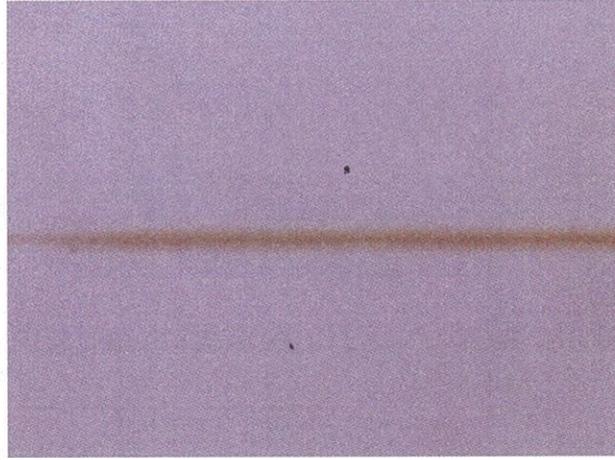


図 4.3: 5 μm の直線パターニング後の光学顕微鏡写真

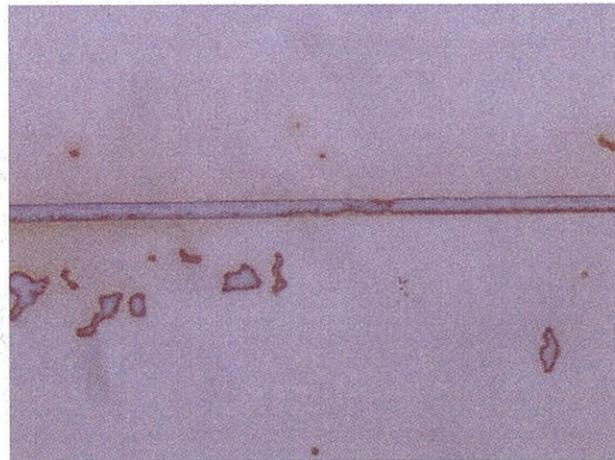


図 4.4: ポストベーキング条件を変えたときのパターニング後の光学顕微鏡写真

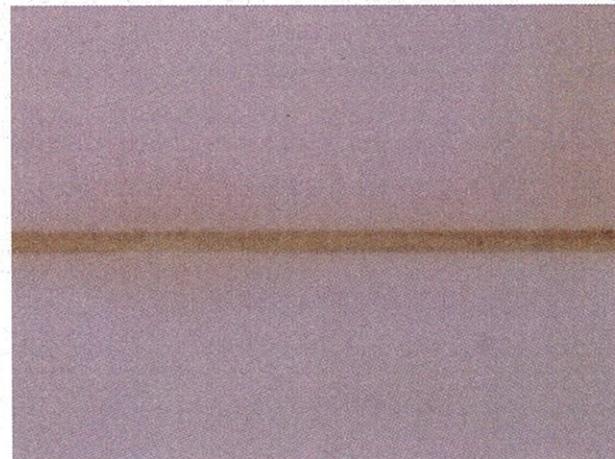


図 4.5: Si_3N_4 膜厚を 40 nm に薄膜化したときのパターニング後の光学顕微鏡写真

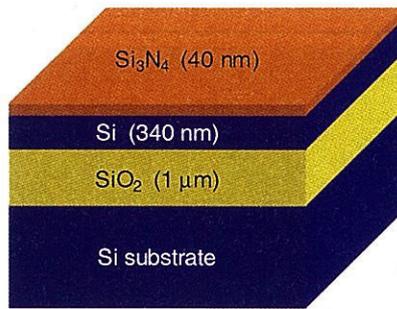


図 4.6: ドライエッチングの実験に使用した基板

図 4.5 では、エッチングのムラは完全に排除することはできていないことがわかる。本プロセスでは、光導波路パターン以外の非常に大面積をエッチングするために、均一なウェットエッチングが困難であると考えられる。光導波路パターン部のみをエッチングする場合にはエッチング面積は狭いため、均一なウェットエッチングは可能と思われる。

以上の結果より、本研究のプロセスではウェットエッチングは困難であることがわかったので、ドライエッチングを検討した。

4.2.2 ドライエッチング

ドライエッチングの種類には、反応ガス中に材料をさらす方法(反応性ガスエッチング)とプラズマによりガスをイオン化・ラジカル化してエッチングする反応性イオンエッチングなどがある。特徴として装置が高価だが、サイドエッチングの影響が少なく、加工精度が高いことがあげられる。ドライエッチング装置は当研究室のヘリコン波プラズマ装置(サンユー電子株式会社、SHR-708)を用いた。本装置は、元々は窒素プラズマを発生させて半導体表面をわずかに窒化する装置であるが、本研究では四フッ化炭素(CF_4)ガスを導入して、 Si_3N_4 をドライエッチングした。

ドライエッチングの実験に使用した基板を図 4.6 に、エッチング時間に対するエッチング深さ特性を図 4.7 に示す。実験条件は、 CF_4 ガス流量 3.6 sccm、入射電力 50 W、反射電力 3 W である。エッチング時間が 5 分の地点でエッチング速度が変化しているが、これは、5 分で Si_3N_4 が完全にエッチングされ、それ以降は Si がエッチングされているからである。また、フォトレジストがドライエッチングにより焦げることはなく、エッチング後にアセトンで容易にフォトレジストを剥離することができた。

図 4.8 は、ドライエッチングによるパターンニング後の光学顕微鏡写真である。なお、フォトレジストは剥離してある。同図より、明らかにサイドエッチングの影響が軽減されていることがわかる。また、エッチングのムラもなくなり、きれいな光導波路パターンが形成されている。

以上の結果より、ドライエッチングを用いて光導波路を作製することにした。

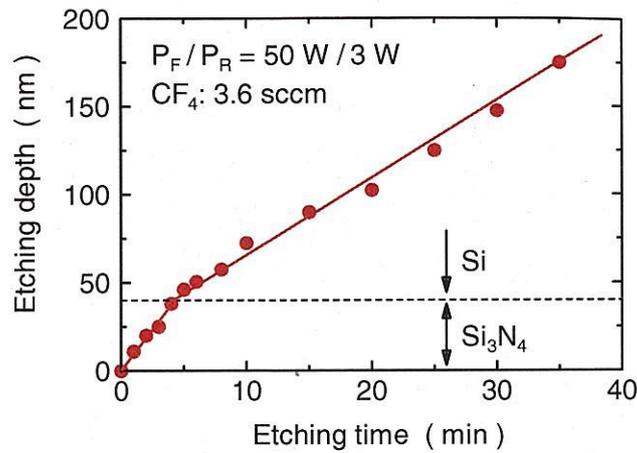


図 4.7: CF_4 ガスによる Si_3N_4 膜のドライエッチング特性

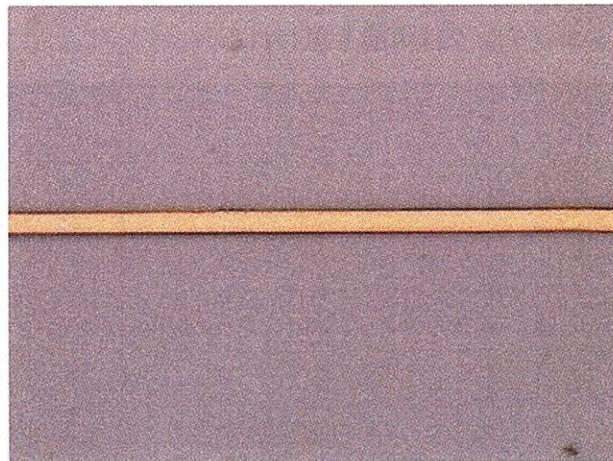
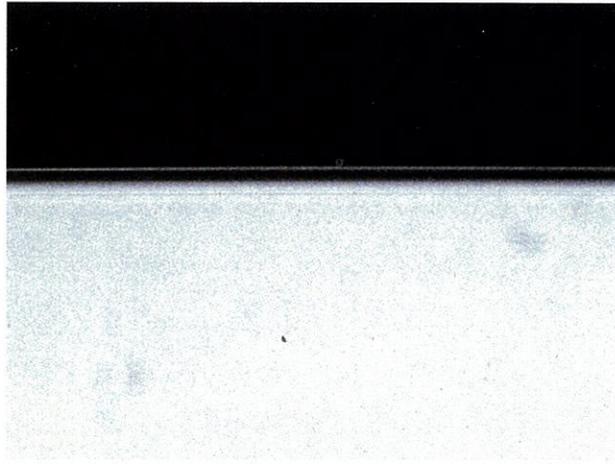


図 4.8: ドライエッチングによるパターンニング後の光学顕微鏡写真

4.3 選択酸化の観察

選択酸化法により Si 細線光導波路を作製する際には、横方向への酸化も考慮して、酸化防止膜である Si_3N_4 膜のパターニング線幅を設計する必要がある。実際の横方向酸化は、基板上部では横方向酸化量は多く、基板下部 (SiO_2 層近く) では横方向酸化量は少ないと考えられる。そのため、 Si_3N_4 膜のパターニング線幅の設計には詳細な実験と伝搬モード解析が必要であるが、単純に横方向酸化量は厚さ方向に均一で、厚さ方向と同程度酸化されると仮定すると、パターンニング線幅は $1 \mu\text{m}$ 程度と考えられる。

本研究では、選択酸化法により Si 細線光導波路が実現可能かどうかの実証が重要であるため、幅 $3 \mu\text{m}$ の直線状に Si_3N_4 をパターンニングして直線光導波路を作製した。作製された光導波路のモード解析は行っていないが、多モード伝搬であると予想される。



(a) 酸化前 (SOI 基板)



(b) 4時間ウェット酸化後



(c) 7時間ウェット酸化後

図 4.9: 選択酸化の進行の様子の光学顕微鏡写真

4.3.1 光学顕微鏡による観察

図 4.9 に、選択酸化の様子を端面の光学顕微鏡写真で示す。写真において、明暗は光の反射により生じている。すなわち、Si 部に光が照射すると空気との大きなフレネル反射係数のために反射光強度が大きく、明るく観測される。一方、SiO₂ 部に光が照射すると空気との小さなフレネル反射係数のために反射光強度は小さく、暗く観測される。したがって、白色の部分は Si、黒色の部分は SiO₂ あるいは空気である。また、Si₃N₄ 膜は膜厚が 40 nm と薄いため見ることはできない。

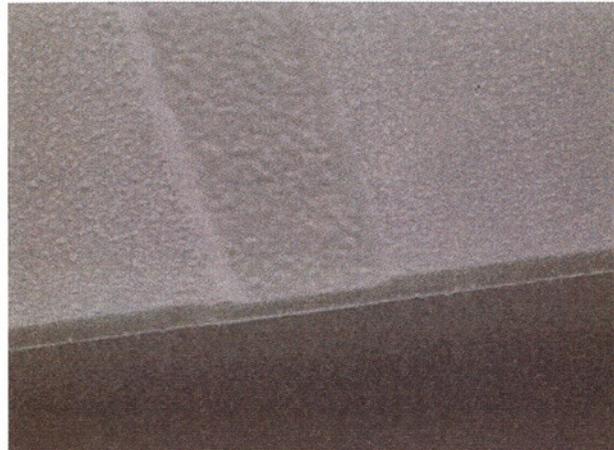
同図 (a) は選択酸化前、つまり、SOI 基板であり、中央の細い横白線は上部 Si 層 (膜厚 340 nm) であり、その下の横黒線は SiO₂ 層 (膜厚 1 μm) である。同図 (b) に示す 4 時間酸化後は、中央部の Si ははっきりしているが、その外側の Si が薄くなっていることがわかる。7 時間酸化後は同図 (c) に示すように、中央部の Si が孤立していることがわかる。これはすなわち、選択酸化により Si₃N₄ 膜が形成されていない部分の Si が基板上部から酸化され、7 時間後には完全に酸化されて SiO₂ になったことを意味しており、選択酸化法により Si コアが形成できたことを示している。

4.3.2 電子顕微鏡による観察

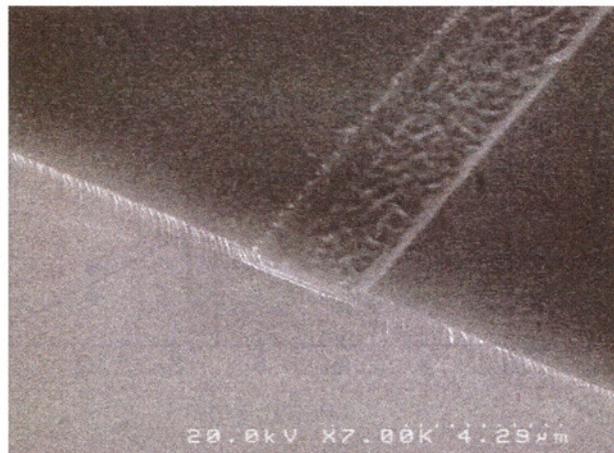
次に、電子顕微鏡 (SEM) による光導波路端面付近の観察を行った。図 4.10 は、4 時間酸化後および 7 時間酸化後の SEM 画像である。中央部の Si コア部に比べ、その両側の部分が盛り上がっていることが確認できるが、これは、酸化により体積が膨張したためである。また、クラッド部とともに、コア部の上面が荒れていることがわかる。酸化中に酸素が通過したためと考えられるが、詳細はわかっていない。

図 4.11 は、7 時間酸化後に希フッ酸に浸して酸化層を除去したサンプルの SEM 画像である。また、図 4.12 は、Si を CF₄ ガスでプラズマエッチングしたサンプルの SEM 画像である。なお、Si エッチング条件は、CF₄ ガス流量 3.6 sccm、RF パワーは進行波 50 W、反射波 3 W、基板加熱は行っていない。また、このエッチング条件は最適化されていない。また、Si 上部の 40 nm 厚の Si₃N₄ 膜はエッチングしていないため、リッジ部の厚さは 380 nm である。図 4.11 と図 4.12 とを比較すると、図 4.11 は図 4.12 に比べ Si コア層が薄くなっていることがわかる。これは、7 時間酸化中に酸素が Si₃N₄ 膜を通り抜けて Si 上部を酸化するためであり、この酸化層が希フッ酸でエッチングされるため、図 4.12 と比べて Si 層が薄くなっている。また、図 4.11 の Si 層の側面の傾きがなだらかになっている。これは、Si の酸化が横方向に進行しているためであり、Si 層上部ほど横方向の酸化量が多く、下部は横方向の酸化量は少ないためである。

また、図 4.11 より、コア部の上面が図 4.10 と同様に荒れていることがわかる。Si₃N₄ 膜を通過した酸素の影響と考えられるが、上面が荒れているということは、均一に酸素が通過していないことを意味していると考えられる。Si₃N₄ 膜質に問題があったのか、長時間の酸化に Si₃N₄ 膜が耐え切れないのか、原因は明らかではない。厚い Si₃N₄ 膜を堆積し、酸化時間を変えて観察する必



(a) 4時間酸化後



(b) 7時間酸化後

図 4.10: 選択酸化法により作製した Si 細線光導波路の SEM 画像



図 4.11: 7時間酸化後、希フッ酸処理により酸化膜を除去したデバイスの SEM 画像



図 4.12: ドライエッチングにより作製したデバイスの SEM 画像

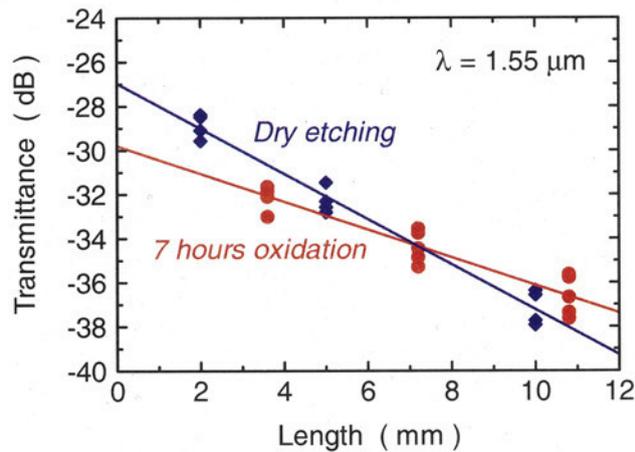


図 4.13: 作製したデバイスの光伝達率の測定結果

要がある。また、ウェット酸化はドライ酸化より表面が荒れる傾向にあるので、ドライ酸化による光導波路試作も行う必要がある。

図 4.9、図 4.10 および図 4.11 より、40 nm 厚の Si_3N_4 膜を用いることにより、完全な酸化防止機能ではないが、Si 細線を SiO_2 で閉じ込めて Si 細線光導波路が形成できることが確認できた。

4.4 伝搬損失の評価

試作した Si 細線光導波路に波長 $1.55 \mu\text{m}$ の半導体レーザ光源からのレーザ光を入射し、入出力の伝達率を測定した。光の入出力は先球テーパ光ファイバを用い、端面から入射した。先球テーパ部の曲率半径やテーパ角度は最適化されておらず、先球テーパ光ファイバ出射光の最小ビーム径は、公称 $2 \mu\text{m}$ 程度である。また、入射光の偏波面は不明である。

カットバック法による光伝達率の導波路長依存性の測定結果を図 4.13 に、図 4.13 から評価した結合損失および伝搬損失を表 4.1 に示す。この結果より、 CF_4 ガスによるドライエッチングで作

表 4.1: 評価された結合損失と伝搬損失

作製プロセス	CF ₄ ドライエッチング	7時間選択酸化
結合損失	27.0 dB	29.8 dB
伝搬損失	10.3 dB/cm	6.3 dB/cm

製した光導波路と比べ、選択酸化法により作製した光導波路は伝搬損失が4 dB程度改善していることがわかる。サンプル数が少ないので更なる試作と評価が必要であるが、選択酸化法により伝搬損失低減の可能性があると見える。一方、結合損失は3 dB劣化している。これは、上述のとおり、Si₃N₄膜が酸化を完全に防止できずにSi層上部が酸化されたことにより、光導波路厚が薄くなったためと考えられる。

第5章 まとめ

本研究では、Si 細線光導波路の低損失化を目的として、 Si_3N_4 を選択酸化マスクとして用いて選択酸化法による作製プロセスを提案・実証した。本方法は、Si の熱酸化が深さ方向だけでなく横方向にも進行することを利用するものであり、横方向の酸化のために選択酸化防止膜のパターニング端の荒れの影響が緩和され、伝搬損失の低減が期待できる。実験と平行して、数値電磁界解析により伝搬モード解析および光伝搬シミュレーションも行った。本研究で得られた成果を以下にまとめる。

- 使用した SOI 基板の Si (膜厚 320 nm あるいは 340 nm) を完全に酸化するためには、温度 1100°C 、酸素流量 0.5 l/min の熱酸化条件では、ドライ酸化では 22 時間、 60°C の水蒸気を含んだウェット酸化では 7 時間必要である。
- Si_3N_4 膜厚 120 nm の SOI 基板をドライ酸化すると、基板表面は SiO_2 に変換されるが、Si 層の酸化はほぼ完全に防止することができた。
- Si_3N_4 膜厚 40 nm の SOI 基板をウェット酸化すると、基板表面は SiO_2 に変換され Si 層上部も若干酸化されるが、Si 細線光導波路の作製には十分な酸化防止性能は得られる。
- 作製する光導波路のモード特性を、スラブ光導波路理論および有限要素法による電磁界解析ソフトウェア FemSIM を用いて計算した。その結果、使用する基板 (コア厚: 340 nm) の光導波路内を波長 $1.55 \mu\text{m}$ の光を伝搬させる場合、単一モード条件を満たすためには、コア幅は $0.2 \sim 0.4 \mu\text{m}$ の範囲でなければならない。
- 等価屈折率法を併用した FDTD 法による光伝搬シミュレーションより、周囲を SiO_2 で囲まれた Si 細線光導波路は、曲率半径 $5 \mu\text{m}$ 以上の円弧光導波路であれば、ほぼ無損失で光が伝搬する。
- 酸化防止膜である Si_3N_4 に光導波路パターンを転写する際、 Si_3N_4 膜のウェットエッチングではパターニングは困難である。
- Si_3N_4 膜のエッチングに CF_4 ガスを用いたドライエッチングを利用することにより、光導波路パターンの正確な転写が可能となった。
- Si コアを CF_4 ガスでドライエッチングして作製した Si 細線光導波路 (導波路幅 $3 \mu\text{m}$) は、伝搬損失 10.3 dB/cm 、結合損失 27.0 dB であった。

- 選択酸化法により作製した Si 細線光導波路 (Si_3N_4 マスク幅 $3\ \mu\text{m}$) は、伝搬損失 $6.3\ \text{dB/cm}$ 、結合損失 $29.8\ \text{dB}$ であった。ドライエッチングで作製した Si 細線光導波路と比べると伝搬損失は $4\ \text{dB}$ 改善し、選択酸化法が有効であることが実証された。結合損失は $3\ \text{dB}$ 増加したが、これは Si コア層上部が酸化されたことによりコア厚が減少したためと考えられる。

以上の結果は、Si 細線光導波路の作製に選択酸化法が有効であることを示している。本研究で作製した Si 細線光導波路は多モード伝搬であるが、単一モード光導波路の作製にも有効であると考えられる。今後、以下の点を明らかにすれば、実用的な Si 細線光導波路の作製方法になると考えられる。

- 横方向の酸化速度を実験的に求め、単一モード伝搬に必要な Si_3N_4 マスク幅を明らかにする。
- 単一モードの Si 細線光導波路を作製し、選択酸化プロセスによる伝搬損失低減を実証する。
- Si コア層が酸化されないために、酸化防止膜の最適化 (材料、形成方法、厚さなど) と酸化プロセスの最適化を行う。
- 横方向の酸化のため、方向性結合器などの狭い間隔でコアが並んだ光導波路の作製は困難と考えられる。多モード干渉カップラ (MMI カップラ) などを利用した光分岐・合流回路の作製プロセスを確立する。
- 光干渉計やリング共振器などを作製し、光波回路を実現する。