

目次

第1章 序論	1
1.1 はじめに	1
1.2 光集積回路	2
1.2.1 シリコンフォトニクス	2
1.2.2 シリコンナイトライドフォトニクス	3
1.2.3 光周波数コム	4
1.3 異種材料接合	6
1.3.1 マルチレイヤー	6
1.3.2 エッジカプラ	8
1.4 本研究の目的	9
第2章 接合実験	10
2.1 実験系のセットアップ	10
2.2 実験方法	10
2.2.1 SiN,Si チップの透過率測定	10
2.2.2 レジンによる接合前の透過率測定	11
2.2.3 レジンによる接合後の透過率測定	12
2.3 レジンの種類	12
2.4 結合効率の計算方法	13
第3章 実験結果	14
3.1 Si/Si の透過率測定	14

3.2	SiN/Si の透過率測定	15
第4章	結論	18
第5章	謝辞	19

第1章 序論

1.1 はじめに

COVID-19の流行によって、世界でのデータトラフィックは爆発的に増大している。これに伴ってWDMなどの光通信技術が発達し、レーザーや増幅器、変調器などの光学素子の重要性が広く認識されつつある。しかし現状の光学素子ではそれぞれの光学素子が大型で別々に製造されている。そのため光学素子の、それも従来のものよりも高性能かつ、消費電力の少ない、小型化可能な技術開発が進められている。

そこでこれらの問題を解決するために、多様な光学素子を一つのチップに集積する「光集積回路」に現在注目が集まっている。これは信号伝達をすべて光によって行うことで、従来よりも高速な通信を可能にしている。さらにこれは消費電力の低減や小型化にも対応可能である。また、光集積回路は電気回路とは異なり抵抗やコンデンサによる熱損失が発生しないため、無駄のない究極の省エネルギーとして注目されている。そこで、その量産性の高さや、扱いやすさからSiが光集積の材料として注目されている。しかしすべての光学素子をSiのみで実現することは難しく、現在の光通信領域ではIII-V族やシリコン化合物をSiチップ上にある光学素子と集積することで一つの光学デバイスを実現することを目指している。

1.2 光集積回路

基板の上に複数の光学素子を集積し1つの基板上である機能を実装した光回路を光集積回路と呼ぶ。これは従来の電気回路と比べ処理速度の速さや消費電力の少なさから現在注目を集めている。Fig.1.1はTbit/sで送信を可能にするであろう送信機のイメージ図である。1番左側にあるのはIII-V族の半導体でできたレーザーである。次にレーザーからの光が非線形シリコンナイトライド微小光共振器に入り、光周波数コムを生成している。すると複数波長の光源ができる。さらにその光がシリコンでできた分波器、アテネーター、変調器、合波器を通して光ファイバーに入って伝送される。これが実現できれば1つのチップ上で様々な光学素子を実装することが可能となる [4]。

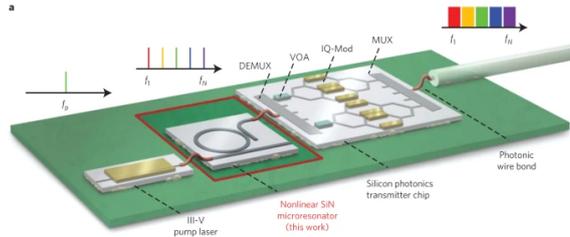


Fig. 1.1: Principles of coherent terabit-per-second communications with Kerr frequency combs. Artist's view of a future chip-scale terabit-per-second transmitter, leveraging a Kerr frequency comb source. The demonstration of coherent data transmission with Kerr combs is the subject of this work. DEMUX, de-multiplexer; VOA, variable optical attenuator; IQMod, IQ-modulator; MUX, multiplexer. [J. Pfeifle, *et al.*, "Coherent terabit communications with microresonator Kerr frequency combs," *Nat. Photonics* **8**, 375-380 (2014)]

1.2.1 シリコンフォトニクス

シリコンフォトニクス製品は主に、シリコンオンインシュレータ (SOI) ウエハ上に構築されている。Fig.1.2 にシリコン導波路の構造について示す。シリコンは屈折率が約 3.48 と大きいため、クラッドとの屈折率差が大きくなり、光を強く内部に閉じ込めることができる。そこでシリコン層をコア層として使用することで、フォトニック結晶や高効率グレーティングカップラといった屈折率差が小さい材料では困難だった導波路ベースのデバイスの作成が可能となっている [5]。この技術の発展によって、スプリッターやフィルター、合波器などのパッシブ素子の実装が可能となっている。さらに電氣的に駆動するマイクロヒーターを加えると、屈折率変化を誘発することができ、それによって低速な変調や光スイッチ機能を実装することができる。しかしシリコンフォトニクス分野の主な働きは電気

的変調であり、電子や正孔の変化による屈折率変調を用いた高速光変調器が主なデバイスである。これは 40Gb/s 以上の速度での振幅変調や位相変調にも有効である [1]。通常のレーザーは電子が伝導体から価電子帯へバンド間遷移することによって、そのエネルギー差が光として発光する。対してシリコンは伝導体の底と価電子帯の頂上における運動量がずれているため、光ではなく熱を放出して電子が遷移することが多いのでレーザーには不適である [10]。そのため III-V 族の半導体が使われている。

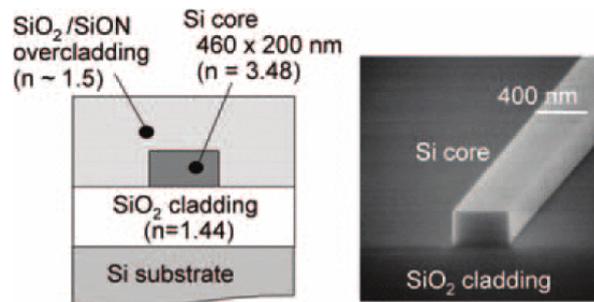


Fig. 1.2: Structure of a silicon photonic wire waveguide [K. Yamada, *et al.*, “Silicon photonics based on photonic wire waveguides”, 2009 14th OptoElectronics and Communications Conference (2009)]

1.2.2 シリコンナイトライドフォトニクス

SOI 以外の代替材料としてはシリコンナイトライド導波路も注目されており、これは CMOS 互換性を保ちながら SOI のコア層をシリコンナイトライドに置き換えることでより広域なスペクトルでの動作が可能となる。シリコンナイトライドの特徴としてここでは主に 4 つ挙げる。1 つ目は可視光領域での透明度である。SOI ベースの導波路は透過波長が $1.1 \mu\text{m} \sim 3.7 \mu\text{m}$ なのに対し、シリコンナイトライドは少なくとも 500nm までの可視光のほとんどを透過することである。このためシリコンナイトライドは、 $1.1 \mu\text{m}$ 以下の波長においてシリコンフォトニクスを実装する有力な候補となっている。2 つ目は屈折率差である。SOI 導波路の屈折率差は非常に高い ($3.5:1.4$) であるのに対し、シリコンナイトライド導波路の屈折率差は中程度に高い ($2:1.4$)。3 つ目は低損失であることである。クラッドの材料である SiO_2 ($n=1.457$) との屈折率差が Si と比較して小さくなり、導波路側面の粗さに鈍感になるため導波路損失が小さくなると考えられる。このようなシリコンナイトライド導波路では 1 dB/m までの損失が報告されている。4 つ目は三次の非線形性である。シリコンの非線形性は非常に大きいですが、二光子吸収をもつため、高出力時に余分な導波路損失を発生させてしまい利用できない。一方シリコンナイトライドの非線形性は比較的小さいものの、バンドギャップが大きいいため二光子吸収が実質的にゼロとみなせる

ため Fig.1.4 のように周波数コムの実証が可能となっている [6]. ここで光周波数コムについて詳しく述べる [1][7].

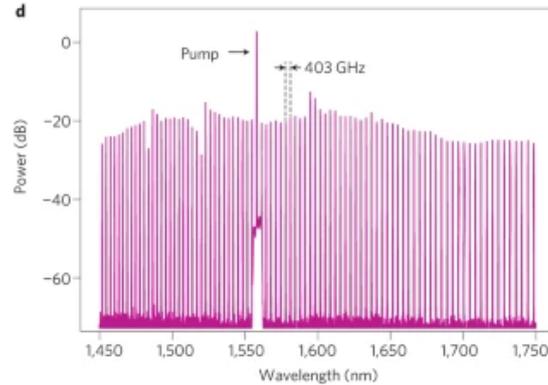


Fig. 1.3: Output spectrum of a 58- μ m-radius SiN ring-resonator optical parametric oscillator with a single pump wavelength tuned to resonance at 1,557.8 nm. It shows numerous narrow linewidths at precisely defined wavelengths. The 87 generated wavelengths were equally spaced in frequency, with a FSR of 3.2 nm. [Moss, David J. *et al.*, "New CMOS-compatible platforms based on silicon nitride and Hydex for nonlinear optics", *Nature Photonics*, **7**, 8, 597-607, 2013]

	Silicon	Silicon Nitride
Transparency: Shortest λ (μ m)	1.1	0.4
Transparency: Longest λ (μ m)	~ 4	~ 4
Guiding layer thickness (μ m)	0.05 to 0.5	0.05 to 0.7
Index Contrast (%)	140	38 (28)
Waveguide Loss (dB/cm)	1 to 1.5	0.001 to 0.5 [71], [39] (4.0) [72]
Kerr Index (m^2/W)	$\sim 4.5 \times 10^{-18}$ [116], [81]	$\sim 0.26 \times 10^{-18}$ [15]
TPA Coefficient (m/W)	$\sim 9 \times 10^{-12}$	0
Distributed Backscatter (dB/mm)	-25	-30 to -40 [67]
n_{eff} sensitivity (strip width) nm^{-1}	$\sim 10^{-3}$	$\sim 10^{-4}$
Temperature Sensitivity K^{-1}	$\sim 1.86 \times 10^{-4}$	$\sim 2.45 \times 10^{-5}$
High speed Modulators Gb/s	>40	Not available
Integrated Photodetector GHz	>60	Not available
Layer Stack Flexibility	Limited	Excellent

Fig. 1.4: Characteristics of silicon photonics using silicon and silicon nitride platforms the transparency range, typical values in the C-band are quoted. [Abdul Rahim, *et al.*, "Expanding the Silicon Photonics Portfolio With Silicon Nitride Photonic Integrated Circuits", *JOURNAL OF LIGHTWAVE TECHNOLOGY*, **35**, 4, 2017]

1.2.3 光周波数コム

光周波数コムとは、Fig.1.6 下図のようにスペクトルが離散的に等間隔に並んだ櫛状のスペクトルを持つ光源である。また、時間領域においては Fig.1.6 上図に示した周期パルスとなる [3]. 光周波数コムはモードロックレーザーや四光波混合によって発生させるこ

とができ、これによって以前よりも容易に高精度で光周波数を測定することが可能になった。現在では光周波数コムは、光周波数測定において必須のものとなっている。2005年、J.L.Hall氏とT.W.Hänsch氏がノーベル賞を受賞した理由の一つが、まさにこの光周波数コムを用いた光周波数の測定であり、これによって光周波数コムは光研究の分野に大きな衝撃を与えた。またマイクロコムが発見によって光周波数の測定はさらに容易になった。マイクロコムはFig.1.7(c)のように非常に小さい微小光共振器から光周波数コムを出せるもので、ここに光を入れるとその波長がFig.1.7(b)のように異なる2つの波長に分かれる。これを繰り返していくことによってFig.1.7(a)のようにスペクトルが等間隔に櫛状に並んだ光周波数コムを獲得することができる。これは2007年に世界で初めて発表された [2]。

	伝搬損失	電気的変調	光周波数コム
SiN	◎	×	○
Si	○	○	×

Fig. 1.5: Comparison between SiN and Si

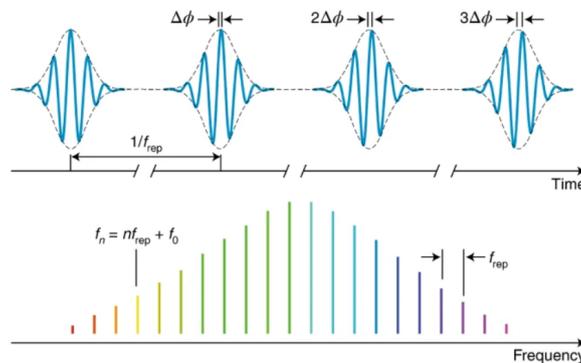


Fig. 1.6: Principle of a frequency comb Time-domain representation of the train of ultrashort pulses of period $1/f_{rep}$ at the output of a mode-locked laser and the corresponding spectrum of narrow lines of a frequency comb. The phase shift $\Delta\phi$ of the carrier of the wave relative to the envelope of the pulses induces a translation $f_0 = f_{rep} \Delta\phi / 2\pi$ of all the lines in the spectrum from their harmonic frequencies nf_{rep} . [N. Picqué and T. W. Hänsch, “Frequency comb spectroscopy”, Nat. photonics **13**, 146-157 (2019)]

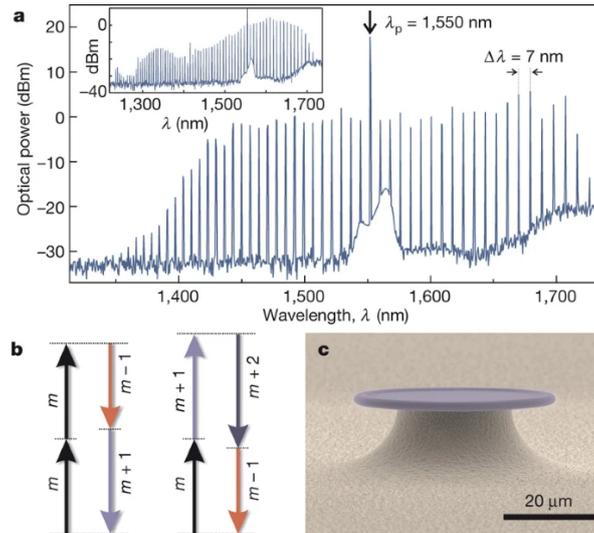


Fig. 1.7: a, Spectrum of the parametric frequency conversion observed in a 75- μ m-diameter monolithic toroid microcavity when pumped with 60-mW continuous-wave laser power at 1,550 nm. b, Schematic of the processes that contribute to the parametric conversion: degenerate (left) and non-degenerate (right) FWM among cavity eigenmodes. c, Scanning electron microscope image of a toroid microcavity on a silicon chip. [P. Del' Haye *et al.*, "Optical frequency comb generation from a monolithic microresonator" *Nature* volume **450**, pages 1214 – 1217 (2007)]

1.3 異種材料接合

このように光集積回路では異なる物性を持つチップを組み合わせることで光学デバイスを作成する必要がある。しかしこれらのチップは互いに導波路の幅や厚み、導波光のモード形状が異なりそれらの屈折率差も大きくなるため良い結合効率で導波路を接合することは難しい。そのため低損失のフォトニック接続を実現するためにはあるチップの光の出力面と別のチップへの光の入力面が非常に高精度でアライメントされる必要がある。ここでは Si と SiN の接合とその方法について説明する。

1.3.1 マルチレイヤー

マルチレイヤーとは Fig. 1.8(a) のように導波路を重ねて導波路同士の接合を行うもので、これはミスアライメントに強く結合効率が高いという利点の一方、作成難易度の高さや作成できる膜厚に制限があるという欠点がある。Fig. 1.8(c)(d)(e) は (a) で示したそれぞれの断面での光のモードを表している [8]。

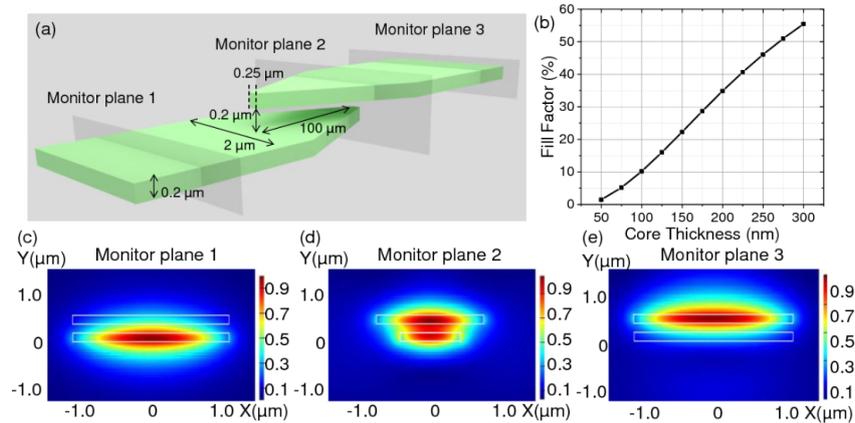


Fig. 1.8: (a) Schematic of multilayer tapered vertical coupler; (b) confinement simulation of $2\ \mu\text{m}$ wide Si_3N_4 waveguide with SiO_2 cladding; (c-e) optical mode distribution simulation at (c) monitor plane 1, (d) monitor plain 2, and (c) monitor plane 3 in (a). [K. Shang, *et al*, "Ultra - Low Loss Vertical Optical Couplers for 3D Photonic Integrated Circuits", OSA Technical Digest (2015)]

Fig.1.9(a) は Si 層と SiN 層の間での遷移と SiN と SiN の遷移を示している。遷移の入力と出力は Si 層は幅 $500\ \text{nm}$ 、SiN 層は $900\ \text{nm}$ のシングルモード導波路である。Si 導波路は $140\ \text{nm}$ 幅まで鋭く先端をテーパしており、SiN 導波路は $300\ \text{nm}$ 幅まで先端がテーパされている。Fig.1.9(b) は 3D-FDTD 法を用いて計算した TE 偏光に対する層間遷移損失のシミュレーションを行ったものである。これによると Si-SiN の遷移損失は $13\ \text{mdB}$ 以下、SiN-SiN の遷移損失は $35\ \text{mdB}$ 以下となった [9]。

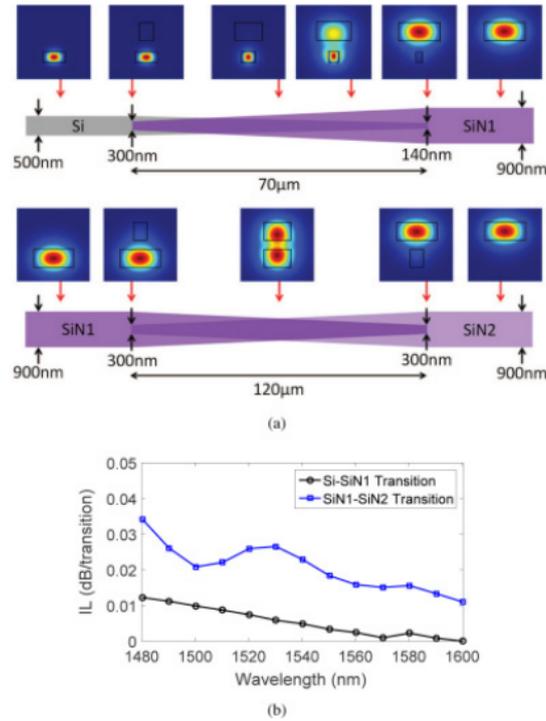


Fig. 1.9: (a) Top-down schematics of the Si-SiN1 and SiN1-SiN2 interlayer transitions. Mode intensity profiles of the fundamental TE mode at a 1550 nm wavelength are shown at multiple points along the transitions. (b) 3D-FDTD simulated insertion loss (IL) of the interlayer transitions for the TE polarization.[W. D. Sacher, *et al*, “Trilayer silicon nitride-on-silicon photonic platform for ultra-low-loss crossings and interlayer transitions” , Opt. Express **25**, 30862-30875 (2017)]

マルチレイヤーはその特性から異種材料接合に非常に適しているが、本実験の場合マルチレイヤーに使用する膜厚では通信波長帯で光周波数コムを発生させることができないため異種材料接合の方法として適していないといえる。

1.3.2 エッジカップラ

エッジカップラとは光導波路の端面と光ファイバの端面を近接させる接合方法である。エッジカップラを用いたバットカップリングでは2つのチップをアライメントする必要があるが、接合するチップそれぞれの屈折率、導波路幅、膜厚が異なっても接合を行えるため本研究ではこの接合方法を用いて実験を行う。また導波路の端面には逆テーパ構造を用いる。これは導波路の幅がチップの端面に向けて広がっていくシンプルな構造であるので、容易に製造することができ製造誤差に対しても強い結合方法である。

1.4 本研究の目的

光集積回路の実現は従来の電気回路では実現できないほどの高性能かつ、消費電力の少ない、小型化可能な技術開発に向けて大きく期待されている。しかし現状の接合方法では光周波数コム光源からの光を十分な効率で導波する構造を実現することは難しい。そこで本研究では高効率での光周波数コムからの光の導波方法として逆テーパ構造を用い、接合時の結合効率を測定、またレジンによる結合実験を行った。これによってどのような接合が最も効率よく光を導波できるのか、またレジンによる結合によって透過率がどのように変化するのかについて比較検討を行った。

本論文の構成は以下のとおりである。

- 1 章: 序論
- 2 章: 実験方法
- 3 章: 実験結果
- 4 章: 結論

第2章 接合実験

2.1 実験系のセットアップ

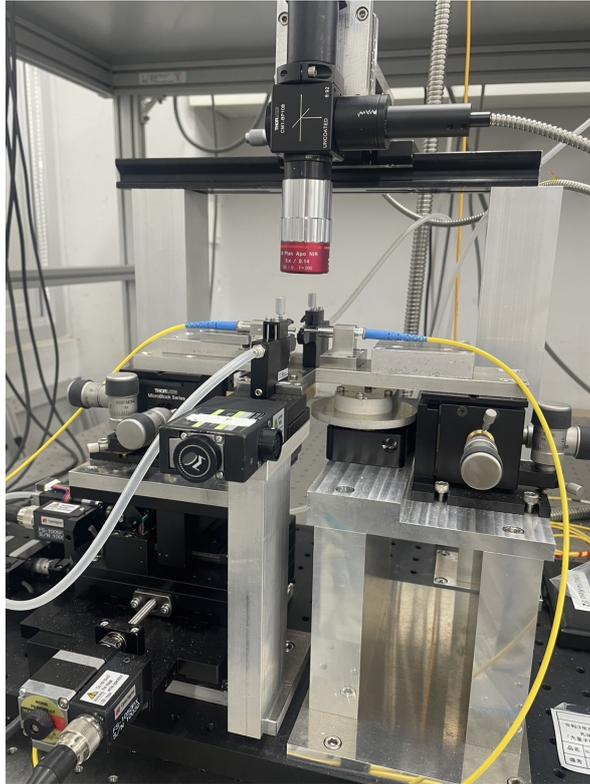


Fig. 2.1: Experimental system used in this experiment

本研究に用いた実験系は Fig.2.1 である。両サイドに集光モジュールがついており、中央のステージの上に透過率を測定したいチップをアライメントした。チップの様子は上の顕微鏡カメラを通して確認した。

2.2 実験方法

2.2.1 SiN,Si チップの透過率測定

まずステージの上に測定したいチップを乗せ、右側の集光モジュールと導波路端面を目視でアライメントした。その後左側の集光モジュールと導波路端面も同様にアライメントしたのち、手動3軸ステージを用いてさらに高精度にアライメントしてそれぞれのチップ

の透過率を測定した。透過率を測定した Si チップは Fig.2.2, SiN チップは Fig.2.3 である。Si チップの導波路はリング共振器のついているものを使用した。

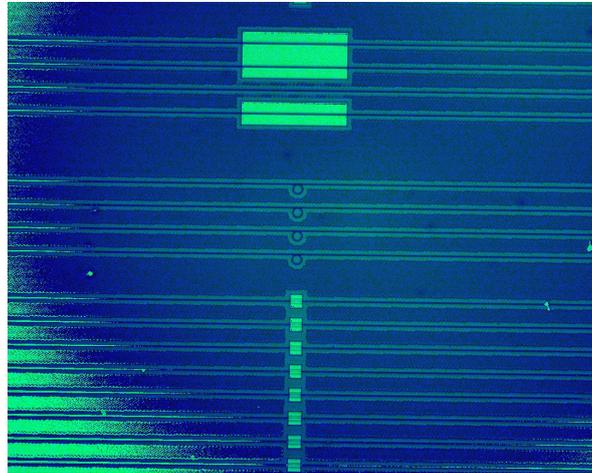


Fig. 2.2: Si Chip

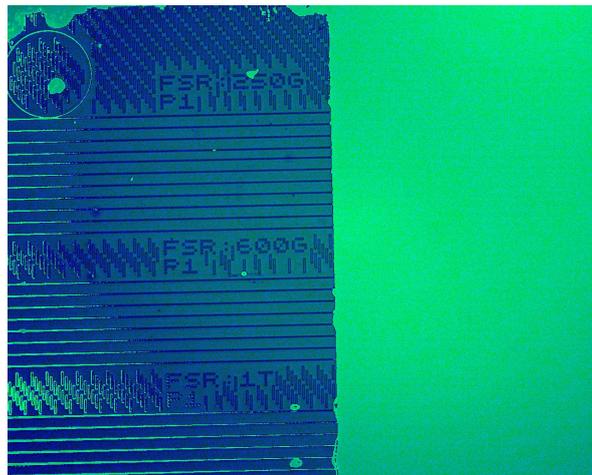


Fig. 2.3: SiN Chip

2.2.2 レジンによる接合前の透過率測定

次に Si/Si, SiN/Si チップの接合時の透過率を測定した。SiN/Si の接合実験の前に Si/Si の接合実験を行ったのは、レジンの強度や特性を確認するためである。実験系は Fig.2.1 を用いた。片方のチップをアライメントした後、右側の集光モジュールをチップから離し、右側の集光モジュールともう一つのチップをアライメントした。2 枚のチップ同士は導波路を自動 3 軸ステージによって近づけて、エッジカプラによって接合を

行った。

2.2.3 レジンによる接合後の透過率測定

次に接合した Si/Si チップ, SiN/Si チップにレジンを垂らし接合した。レジンには UV 硬化剤を用い, 短時間照射してチップがずれた際には再度アライメントを行ってレジンを垂らす前後の透過率の変化を測定した。SiN はチップが薄く, レジンを垂らした後の結合が弱いと判断したため Fig.2.4 のように SiN チップの下にガラス盤を接着してから Si との接合を行った。

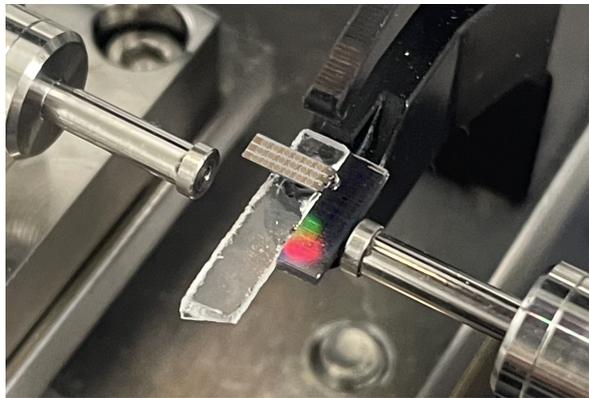


Fig. 2.4: SiN/Si chip after dripping resin

2.3 レジンの種類

本実験のために用意した Thorlabs のレジンを下の表に示す。

Table. 2.1: Resin Properties

型番	屈折率	物理的特性	引張強度	粘度
60	1.56	Tough	2800psi	300CPS
61	1.56	Tough	3000psi	300CPS
63	1.56	Hard,resilient	5000psi	2000CPS
65	1.52	Flexible	1500psi	1200CPS
68	1.54	Frexible	2500psi	5000CPS
81	1.56	Hard,resilient	4000psi	300CPS

本研究では屈折率 1.55 程度のもので, 強度が強い, 収縮率の小さいものが理想的であっ

たため型番” 61”のレジンと型番”81”のレジンを用いた。

2.4 結合効率の計算方法

SiN-Si の結合効率の算出方法の式を (2.4.1) に示す。

$$LOSS_{couple} = LOSS_{SiN-Si} - \frac{LOSS_{Si} + LOSS_{SiN}}{2} \quad (2.4.1)$$

これは Fig.2.5 の一番右の図の Si と SiN の結合を求めるために、全体から Si の挿入損失と SiN の挿入損失の半分を引いたものである。

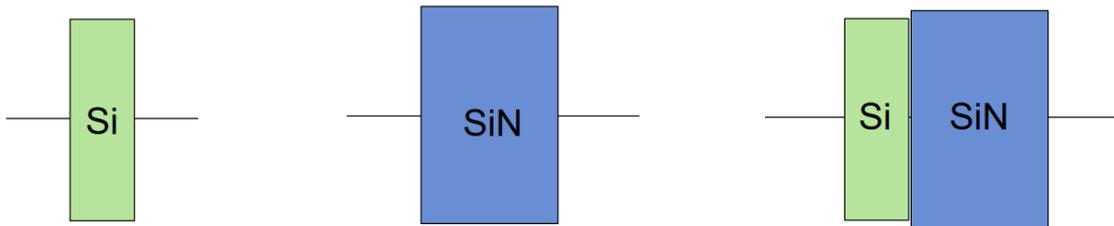


Fig. 2.5: Coupling Efficiency Calculation Method

第3章

実験結果

3.1 Si/Si の透過率測定

Fig.3.1 にレジンで硬化する前後の Si/Si の透過率のグラフを示す．波長 1550nm での硬化前の Si/Si チップの透過率は-39dB, 硬化後の透過率は-37dB となった．ここからレジンによる硬化前後で透過率が 2dB ほど改善し、レジンによる効果を確認することができた．しかし硬化したチップの透過率を 1 週間後に測定した際、チップは外れていないものの光が通っていることは確認できなかった．これはレジンの収縮によってチップが変形したため光が通らなくなったからであると考えられる．チップが外れなかったためレジンの強度には問題がなかったと考える．

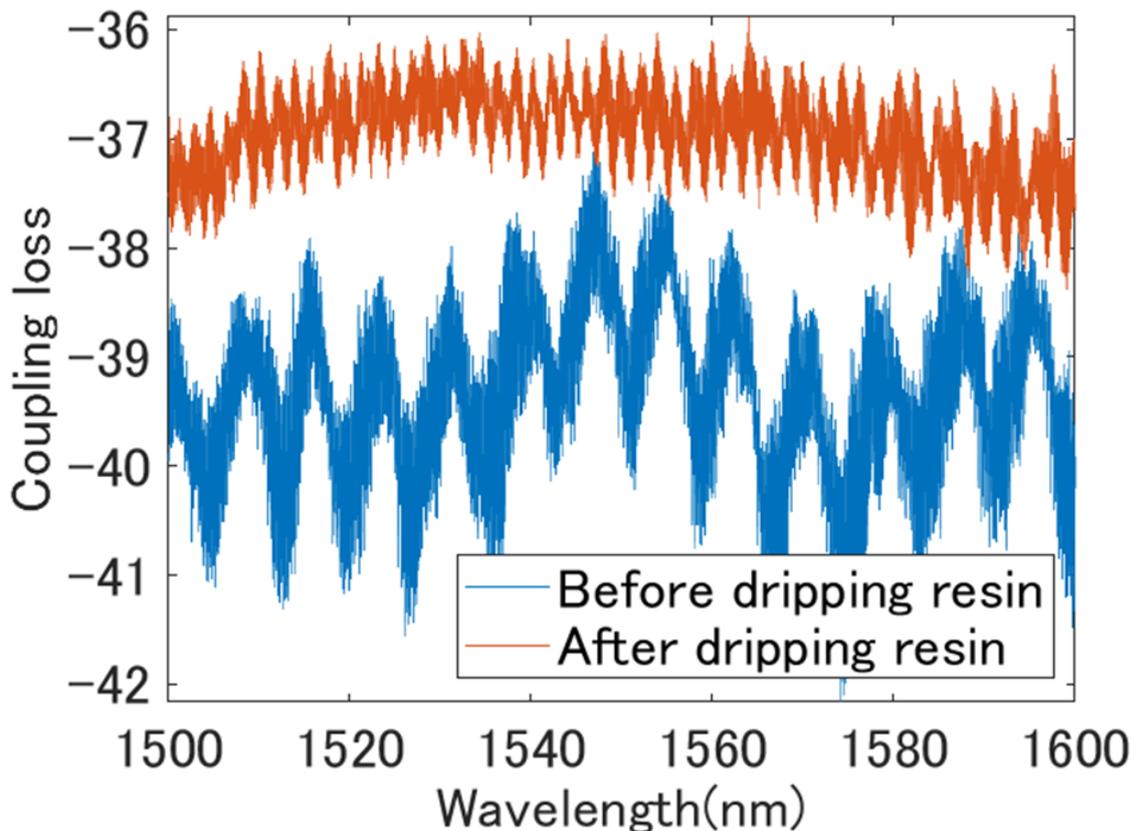


Fig. 3.1: Si/Si transmittance before and after dripping resin

3.2 SiN/Si の透過率測定

次に Fig.3.2 に接合に用いた Si と SiN の透過率のグラフを示す. 波長 1550nm で Si の透過率は-5.5dB, SiN の透過率は-8dB となった.

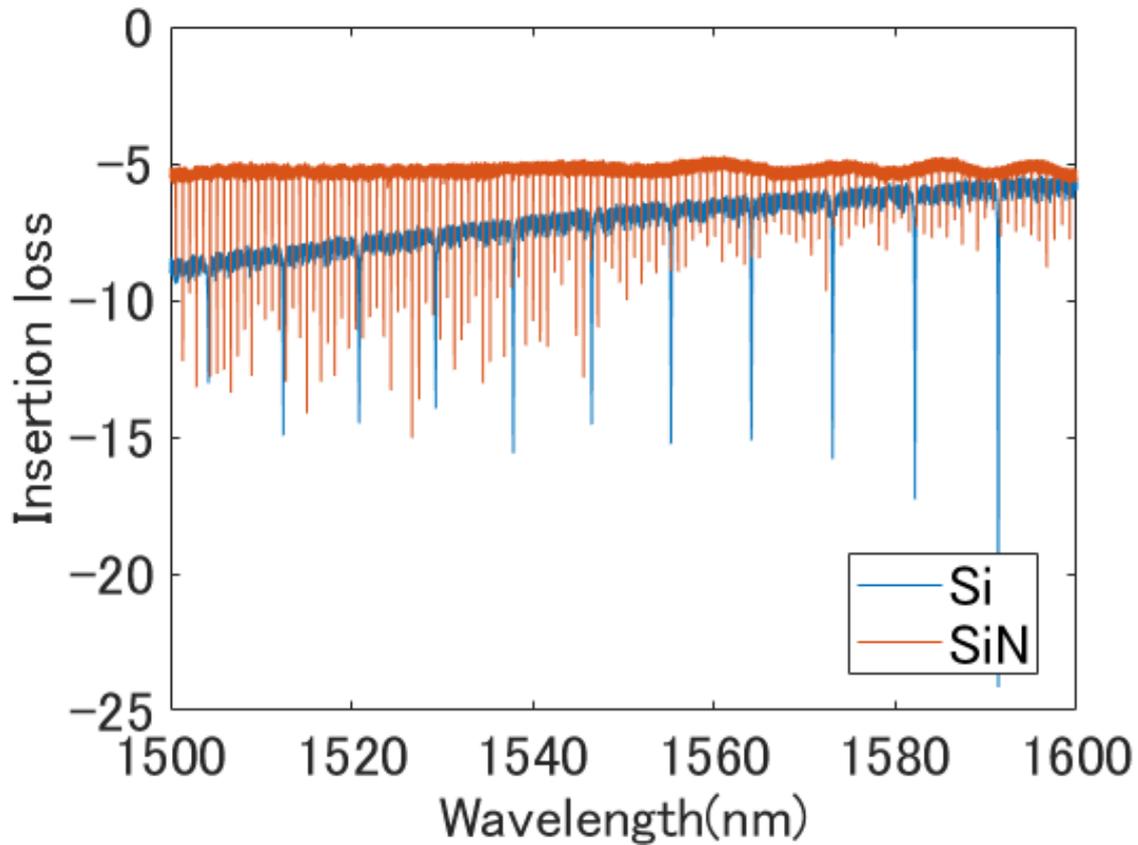


Fig. 3.2: Insertion loss of Si and SiN

次に Fig.3.3 に上の Si と SiN を接合した時の透過率, レジンによって硬化した後の透過率, 4 日後の透過率を示す.

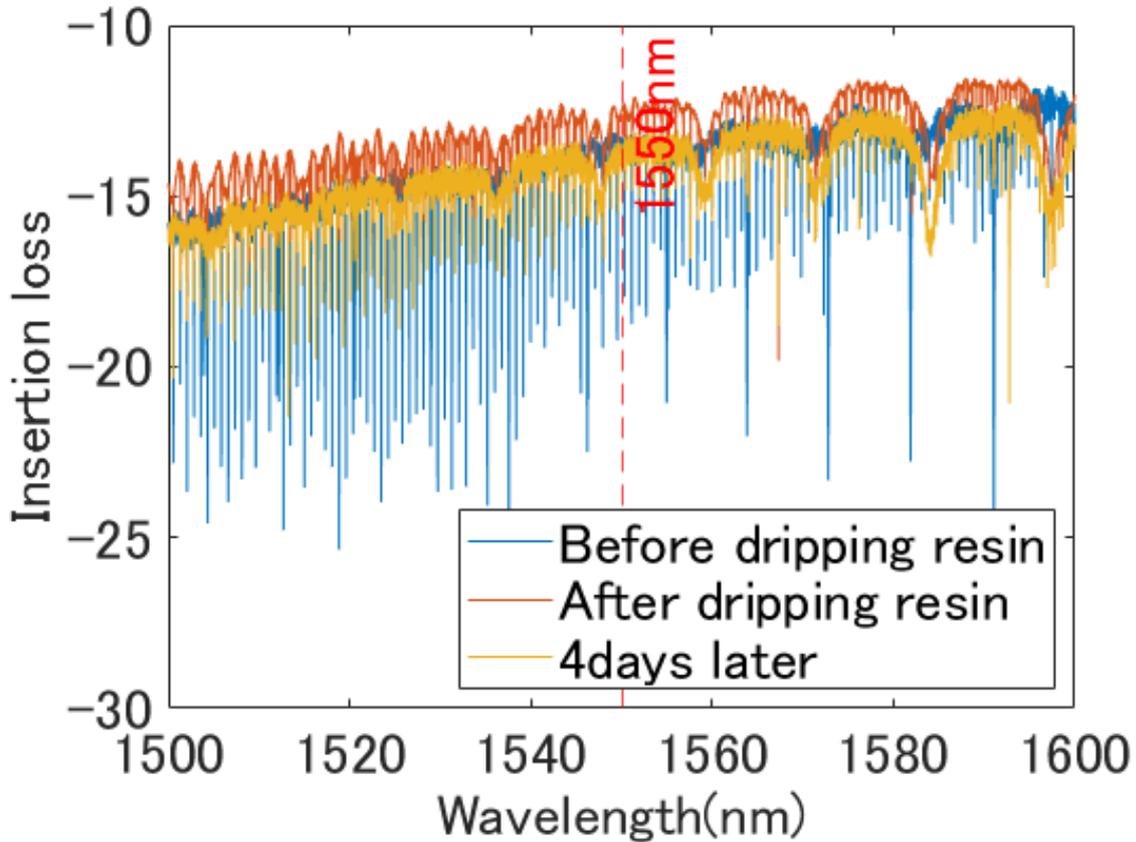


Fig. 3.3: Insertion loss before and after curing with resin and after 4 days

ここから SiN/Si チップも透過率が 2dB ほど改善されたことがわかる。これはチップ間がレジンで埋められたため Si と SiN の屈折率差が緩衝されたためである。また SiN/Si チップの波長 1550nm での透過率が-13dB であることから SiN-Si の結合効率は約-6dB となった。SiN/Si チップをレジンで硬化した際、上から見た写真を Fig.3.4 に示す。これは左側が Si チップ、右側が SiN チップで間はレジンによって接合されている。また 4 日後の計測でもチップに光が通っていることを確認でき、少なくとも 4 日は接合を保つことができることが分かった。

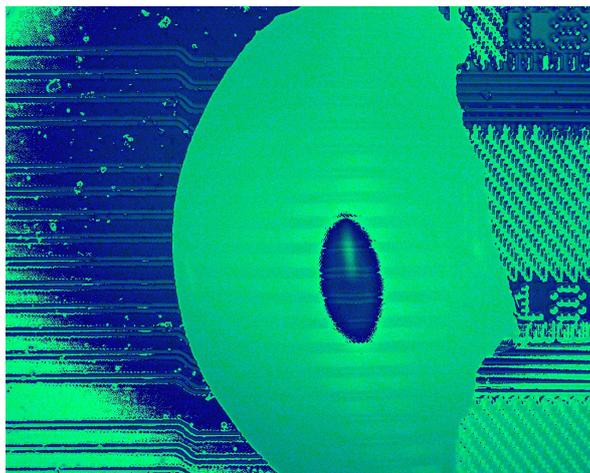


Fig. 3.4: Top view of SiN/Si

第4章

結論

本研究の目的はレジンによる SiN/Si チップの硬化で透過率がどのように変化するのかが検討を行うことである。本実験から SiN-Si の結合効率は-6dB ほどであった。また Si/Si チップ、SiN/Si チップともにレジンによる硬化を行うことで 2dB ほど透過率の改善が見られた。これは導波路間の空気層がレジンによって埋められ、Si と SiN の屈折率の差が緩衝されたためであると考えられる。レジンの強度に関しても、チップの上面と下面にレジンを垂らすことによって容易に外れない接合を実現した。以上から Si と SiN を同一基板上に集積する技術として、エッジカプラを用いた接合とレジンによる硬化が有効であるとわかった。

参考文献

- [1] Roel Baets, *et al.*, "Silicon photonics: Silicon nitride versus silicon-on-insulator", 2016 Optical Fiber Communications Conference and Exhibition (OFC), Anaheim, CA, USA, 1-3,(2016).
- [2] P. Del'Haye *et al.*, "Optical frequency comb generation from a monolithic microresonator", Nature volume **450**, pages1214 – 1217, (2007).
- [3] Nathalie Picqué *et al.*, "Frequency comb spectroscopy", Nature Photonics volume **13**, pages146 – 157 (2019).
- [4] J. Pfeifle *et al.*, "Coherent terabit communications with microresonator Kerr frequency combs", Nat. Photonics **8**, 375-380 (2014).
- [5] K. Yamada *et al.*, "Silicon photonics based on photonic wire waveguides", 2009 14th OptoElectronics and Communications Conference (2009).
- [6] Moss, David J, *et al.*, "New CMOS-compatible platforms based on silicon nitride and Hydex for nonlinear optics", Nature Photonics, **7**, 8 ,597-607, (2013).
- [7] Abdul Rahim, *et al.*, "Expanding the Silicon Photonics Portfolio With Silicon Nitride Photonic Integrated Circuits", JOURNAL OF LIGHTWAVE TECHNOLOGY, **35**, 4, (2017).
- [8] K. Shang, *et al.*, "Ultra - Low Loss Vertical Optical Couplers for 3D Photonic Integrated Circuits", OSA Technical Digest (2015).
- [9] W. D. Sacher *et al.*, "Trilayer silicon nitride-on-silicon photonic platform for ultra-low-loss crossings and interlayer transitions", Opt. Express **25**, 30862-30875 (2017).
- [10] 『共同発表：超小型・超省エネルギーのラマンシリコンレーザを開発 光と電子が融合した理想のシリコンチップに道』
<https://www.jst.go.jp/pr/announce/20130627/index.html>ZU1(2024/01/12
閲覧)