

ポリマー光導波路の Co-Packaged Optics への応用 に関する研究

2024 年度

木下 遼太

学位論文 博士（工学）

ポリマー光導波路の Co-Packaged Optics への応用
に関する研究

2024 年度

慶應義塾大学大学院理工学研究科

木下 遼太

目次

第 1 章 序論	1
1.1. 研究背景.....	1
参考文献	11
 第 2 章 光リンクを構成する光伝送路	 16
2.1. 緒言.....	16
2.2. 光伝送路の分類.....	16
2.2.1. 材料による分類	16
2.2.2. 導波モードによる分類	17
2.2.3. 屈折率分布による分類	19
2.3. 光ファイバの種類.....	21
2.4. 光導波路の種類.....	22
2.5. 光導波路の役割と要求される特性	25
2.6. 結言.....	34
参考文献	34
 第 3 章 シングルモードポリマー光導波路の作製	 41
3.1. 緒言.....	41
3.2. ポリマー光導波路の作製手法	41
3.2.1. SI 型ポリマー光導波路の作製法	41
3.2.2. GI 型ポリマー光導波路の作製法	44
3.3. シングルモードポリマー光導波路の作製	47
3.3.1. 直接露光法による光導波路作製	47
3.3.2. フォトアドレス法による光導波路作製	63
3.4. 結言.....	69
参考文献	70
 第 4 章 SiO_x 光導波路とシングルモード光ファイバ間接続の為の ポリマー光導波路設計	 73
4.1. 緒言.....	73
4.2. ポリマー光導波路挿入による影響の推定.....	73
4.2.1. 光リンク構成	73

4.2.2. シミュレーションモデルの設定	75
4.2.3. SMF と SiO _x 光導波路の直接接続	76
4.2.4. ポリマー光導波路挿入による光リンク損失への影響推定	77
4.3. SMF-ポリマー光導波路 接続損失評価	79
4.3.1. SMF とポリマー光導波路間の接続損失(計算)	79
4.3.2. SMF とポリマー光導波路間の接続損失(実験)	91
4.3.3. SMF とポリマー光導波路間の接続損失トレランス(実験)	97
4.3.4. ポリマー光導波路への入射ミスアライメントの影響推定	100
4.4. SiO _x 光導波路-ポリマー光導波路 接続損失評価	104
4.4.1. SiO _x 光導波路とポリマー光導波路間の接続損失(計算)	104
4.4.2. SiO _x 光導波路とポリマー光導波路間の接続損失(実験)	106
4.5. ポリマー光導波路両端の合計接続損失	108
4.5.1. ポリマー光導波路と SMF, SiO _x 光導波路間の合計接続損失の計算方法	108
4.5.2. ポリマー光導波路と SMF, SiO _x 光導波路間の合計接続損失(SSC 構造無)	109
4.5.3. ポリマー光導波路と SMF, SiO _x 光導波路間の合計接続損失(SSC 構造有)	111
4.6. ポリマー光導波路の最適設計提案	114
4.7. 結言	115
参考文献	116

第 5 章 CPO 応用に向けたポリマー光導波路光学特性の温度特性 119

5.1. 緒言	119
5.2. ポリマーの熱的性質	119
5.3. [端面結合]接続損失温度依存性の評価(シミュレーション)	122
5.3.1. シミュレーションモデルの構築	122
5.3.2. ポリマー光導波路-SMF 間接続損失の温度依存性	123
5.3.3. ポリマー光導波路-SiO _x 光導波路間接続損失の温度依存性	128
5.4. [端面結合]光学特性温度依存性の評価(実験)	130
5.4.1. dn/dt の測定	130
5.4.2. MFD の温度依存性	134
5.5. [端面結合]実環境温度を想定した, ポリマー光導波路最適構造の提案	138
5.5.1. 最適構造の算出方法	138
5.5.2. [端面結合]実環境温度を想定した, ポリマー光導波路の最適構造	147
5.6. [アディアバティック結合]実環境温度を想定した, ポリマー光導波路最適構造の提案	147
5.6.1. アディアバティック結合	148
5.6.2. アディアバティック結合のシミュレーションモデル設定	150

5.6.3. 異なる屈折率分布を有するポリマー光導波路のアディアバティック結合損失	156
5.6.4. アディアバティック結合損失の温度依存性	161
5.7. 結言	164
参考文献	165
第 6 章 結論	169
6.1. 総括	169
6.1.1. シングルモードポリマー光導波路の作製	169
6.1.2. SiO ₂ 光導波路とシングルモード光ファイバ(SMF)間接続の為のポリマー光導波路設計	169
6.1.3. CPO 応用に向けたポリマー光導波路の温度特性	170
6.2. まとめ	172
6.3. 今後の展望	173
Appendix	174
謝辞	

第 1 章

序論

1.1 研究背景

近年のインターネットを中心とした情報社会の進展により，世界中で授受される情報通信量は爆発的に増加している．特にスマートフォンの普及や，動画投稿サイトや SNS(Social Networking Service)をはじめとする個人動画配信の拡大により，個人レベルで使用するデータ量は増加の一途をたどっている．直近では 2020 年より感染拡大が顕著となったコロナウイルスパンデミックという世界的危機に対し，リモートワークが日本社会でも浸透するようになった．リモートワークの浸透に伴い，チャットやクラウドサービス，そして Web 会議システムの活用は仕事を行う上でなくてはならないものになっている．さらには Open AI 社が開発した Chat GPT を代表とする AI(Artificial Intelligence)技術の隆盛は，人々の生活をより豊かにする IoT(Internet of Things)や自動運転技術の開発を活発化することが期待されており，高速/大容量データ処理を可能とする情報通信技術(Information and Communication Technology : ICT)のさらなる発展が必須となっている．

特に近年の AI の進展は目覚ましいものがあり，人々を単純労働から解放するポテンシャルを秘めている．最近では画像生成に代表されるように，これまで不可侵とされていた人類の創造性を脅かすソフトも出現，進化しており[1]，働き方を含めて社会構造が大きく変化していくことが予想される[2, 3]．Open AI 社による Chat GPT-3 の開発は，その卓越した自然言語処理能力により，人間同様に自然な言葉での対話が可能となった点で，一つの大きな節目となった[4]．Chat GPT-3 は誰でも使える形で提供されたサービスであり，AI 活用者の増加により，そのフィードバックの質・量ともに確保されることで今後より急速なペースで AI が進化していくことが予想される．また，様々なバックグラウンドを持つ人々が AI を利用することで，開発者が想定していない利用方法が生み出され，その多様性によって AI の進化が更に促される可能性が有る[5, 6]．このように，Chat GPT-3 の出現は AI の進化を一段階上げるとともに，その進化速度をさらに加速させる可能性を秘めている．これら生成 AI の機能を高精度，高効率で発揮するためには大規模言語モデル(Large Language Model)サイズの拡大が必要となる．Table 1-1 に Chat GPT シリーズのスケールの進化を示す[7]．

Table 1-1 Chat GPT シリーズの比較[7]

	GPT-1	GPT-2	GPT-3	GPT-4
Released date	June 2018	February 2019	May 2020	March 2023
Model parameters	117 million 12 layers 768 dimensions	1.5 billion 48 layers 1600 dimensions	175 billion 96 layers 12 888 dimensions	Unpublished
Context window	512 tokens	1024 tokens	2048 tokens	8195 tokens
Pre-training data size	About 5 GB	40 GB	45 TB	Unpublished
Source of data	BooksCorpus, Wikipedia	WebText	Common Crawl, etc.	Unpublished
Learning target	Unsupervised learning	Multi-task learning	In-context learning	Multimodal learning

©2023 IEEE

さて、AI の一部機能である深層学習(Deep Learning)は多層のニューラルネットワークを用いた手法の総称であり、積和演算が用いられている[8]。演算の為に、大量のメモリを配置したプロセッサが用いられているが、大量の情報を高速に処理するためには、ハードウェアの能力のみならず、ノード間の通信速度の向上が必要となっている。また、同時にインターネットにアクセスする人口は社会発展とともに増加しており、通信容量の増強も急務となっている[9]。2024 年以降のデータセンタ間接続の通信量とインターネットトラフィック予測を Fig. 1-1 に示す[10]。

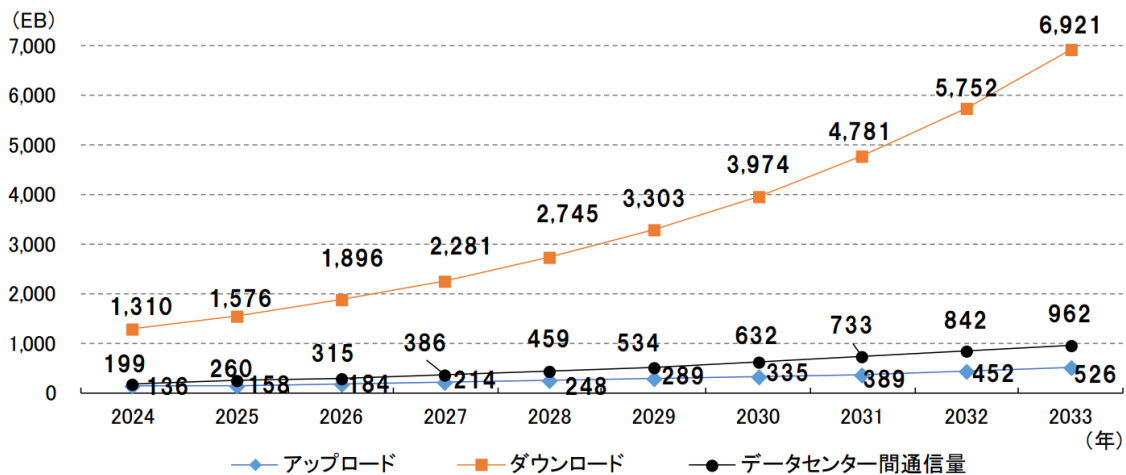


Fig. 1-1 2024 年以降のデータセンタ間接続の通信量とインターネットトラフィック予測[10]

上記のような社会的背景から、情報を集約し一括処理するハイパフォーマンスコンピュータ(High Performance Computer : HPC)の性能は上昇を続けている[11]。富士通と理化学研究所で共同開発された HPC「富岳」は 2022 年 5 月のエクサスケールを実現した「Frontier」登場まで、4 期にわたり計算速度世界一位をキープしていた。今後も継続した性能向上が期待されるが、この傾向を妨げる懸念点もある。主たる懸念点として、設置領域の限界・消費電力の増大が挙げられる。HPC 内ではシステム運用効率の向上や伝送遅延(レイテンシ)影響の抑制といった観点から、通常ネットワークリンクは 100 m 程度で設計される[12]。したがって、今後は単位領域あたりの性能向上が要求されるが、配線密度限界や設計の複雑さといった課題により、現状の技術の延長線上では省スペース化が限界を迎える可能性がある。また、消費電力の増大はより差し迫った課題と考えられている。近年では SDGs(Sustainable Development Goals)に代表されるように、環境問題に対する提言が為されており、当然、電力消費に対する監視の目も強くなっている中、世界の 2%を消費している[13]といわれるデータセンタ内の消費電力量は今後も増大していくとみられている。実際、2050 年度には世界におけるコアネットワークの消費電力量は 489,000 GWh/年[14]と見積もられている。Table 1-2 に今後のコアネットワークの推移予測を示す。

Table 1-2 今後のコアネットワークの推移予測[14]

core network		2018	2030	2050
IP Traffic	EB/Y	2,400	39,000	4,640,000
IP Traffic	Tbit/sec	610	9,900	1,177,000
router power efficiency	W/Gbps	1.6	0.16	0.16
router power consumption	kW	14	40	40
switching capacity	Tbit/sec	9	250	250
No. of Nodes		2,500	2,500	2,500
No. of Loops		50	50	50
IP Traffic per Node	Tbit/sec	12	198	23,540
theoretical No. of routers		27.2	16	1,883
No. of routers per Node		56	32	3,768
power consumption of a router	MWh/Y	90	250	251
power consumption of routers	GWh/Y	12,600	20,000	2,360,000
No. of amplifiers		10,000	10,000	10,000
power consumption of the amplifiers	GWh/Y	90	1,500	173,990
Core Network power consumption	GWh/Y	25,300	42,000	4,890,000

出展：JST/LCS (2021 年)

このような課題に対する解決策の一つとして、光リンク領域の拡大が挙げられる。既にデータセンタ内にはラック間やボード間といった中長距離への光ファイバの導入が進められており、信号周波数及び伝送距離に損失が依存する電気配線に対して、光リンクの優位性が示されている。実際、電気配線で実現できる伝送帯域と距離の積は $100 \text{ Gbps} \cdot \text{m}$ 程度と見込まれており[15]、今後の広帯域化に伴い電気配線に対応可能なリンクはより制限されていくことが予想されている。一方、光配線では電磁ノイズによる相互信号干渉が生じないことから、電気配線では困難な超高密度配線の実現が期待されており、電気配線と光リンクの適用領域がより短距離側にシフトすると予測されている[16]。

上記背景により、データセンタでは筐体内光リンクの導入・拡大が急速に進められている。各社、団体により様々な形態が提案されている[17]が、Fig. 1-2 のように光リンク領域拡大に合わせ、光回路実装形態は3段階のフェーズで大別することができる[18]。

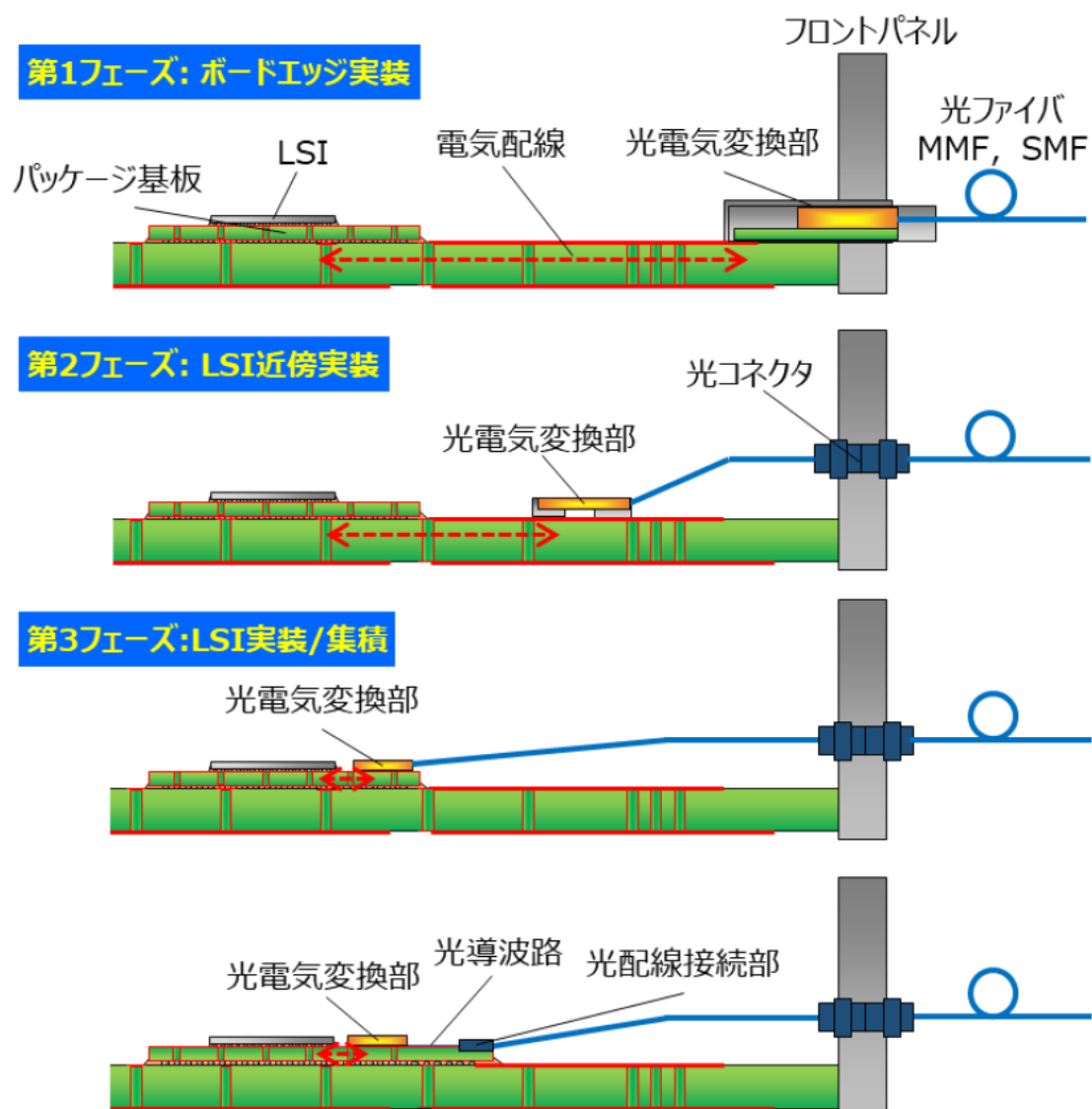


Fig. 1-2 光回路実装形態の変化[18]

([18] 図 2.3-1 より転載)

第一フェーズ：ボードエッジ実装

この形態はプラグブルモジュール形態とも呼ばれ、フロントパネル部までを光リンク，基板上は全て電気配線となっている．光/電変換部を内蔵する Active Optical Cable(AOC)や光トランシーバをフロントパネルに挿入することで，通常光リンク実装の際に課題となる接続部を，電氣的な接続に担わせることで，簡易な光リンクを実現している．プラグブルモジュールは Multi Source Agreement(MSA)が仕様策定を進めている Small Form Factor(SFF)の規格に則っており，今後の高速通信を担うモジュール規格として QSFP-DD(Quad Small Form Factor Pluggable-Double Density)や OSFP(Octal Small Form Factor Pluggable)が注目を集めている

る[18]. 1U ラックあたりの伝送容量を SFF の種類別に Fig. 1-3 に示した. 一方, 本形態ではフロントパネル面積の都合上, 一つのボードに対して挿入可能なモジュール数が制限されるため, 更なる伝送容量増大の為にはレーン当たりの通信速度を向上させる必要がある. また, 基板上は光リンクが存在しないため, 数十 cm 単位での高周波電気伝送対応の基板が要求されるが, 高周波伝送に課題のある電気伝送では, 信号強度を維持したまま基板上を伝送するのは困難と考えられる. 一方, 基板伝送から解放されることで電気伝送の伝送レートを向上させる提案も為されており, Samtec 社の Firefly[®]は, 基板伝送ではなくワイヤによる空間伝送を提案しており, 最大 28 Gbps 伝送を可能としている[19].

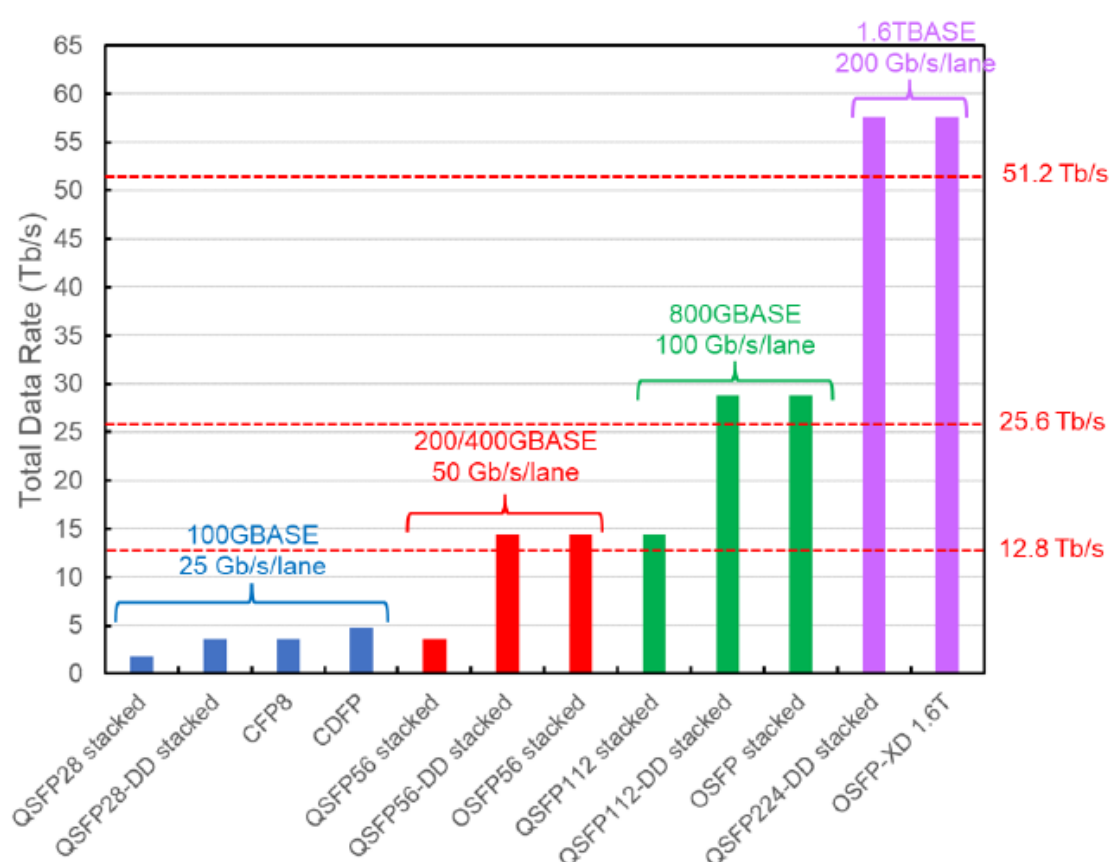


Fig. 1-3 各種 SFF の 1U ラックあたりの伝送容量[18]

([18] 図 3.2.2-1 より転載)

第二フェーズ : LSI 近傍実装

オンボード光リンクとも呼ばれる本形態では, 第一フェーズと比較して光電変換素子が LSI 近傍のボード上に実装されることを特徴としており, 電気配線長を短尺化できることで高速通信化や低消費電力化を可能とする[20]. また, 光電変換素子をフロントパネル部から解放することで, フロントパネル部は高密度配線が可能な光コネクタとすることができ, 第

一フェーズと比較して単位面積当たりのレーン数を増大させることができる。一方で、光リンク構成の主要素子となる光電変換素子がボード上にあることでメンテナンス性の悪化が懸念される。旧来、Microsoft 社が中心となって立ち上げた COBO(Consortium for On-Board Optics)によって推進されている形態[21]だが、近年では第一フェーズや後述する第三フェーズに関する報告が多く、本形態はパスされる可能性も指摘されている[18]。

第三フェーズ：LSI 実装/集積

本形態は Near Packaged Optics (NPO)や Co-Packaged Optics(CPO)と呼ばれ、光電変換素子が LSI と同一パッケージ上に実装された形態である[22]。CPO の模式図を Fig. 1-4 に示す。電気配線長を限界まで短尺化することで、LSI 近傍以外のほとんどの領域を光リンクとし、さらなる高速通信化、および消費電力化が期待される。2020 年には Intel 社より世界初となる CPO を搭載したスイッチモックを展示したことが話題となった[23]。近年では各社より実用的な CPO に関する発表が多数実施されており、注目を集めている[24, 25]。

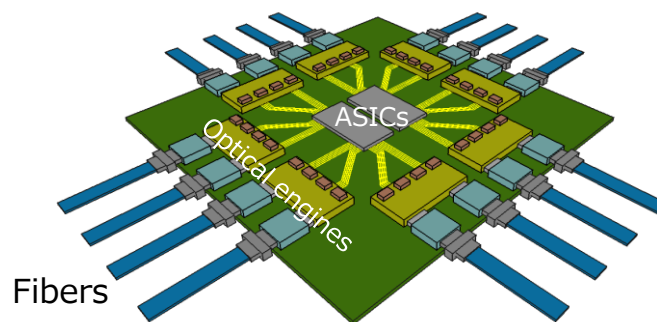


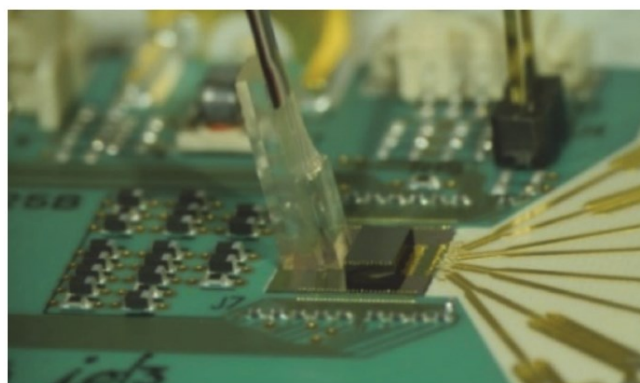
Fig. 1-4 CPO の模式図

上記のように光実装形態のフェーズが進むにつれ、電気配線領域が短尺化され、低消費電力化や高帯域化が可能になると考えられているが、近年では第一フェーズであるプラグابلモジュール形態の一つである Linear-Drive Pluggable Optics(LPO)が、実現性の観点から CPO に先行するとの意見もある[26]。LPO は Digital Signal Processor(DSP)や Clock Data Recovery(CDR)を用いないプラグابلモジュール形態の一つである。高速な信号を送受信する際、伝送に伴う波形劣化を補償するために DSP が、データ復元のために CDR が使われることが多い[27]。しかしながら、これらの電気素子は消費電力が大きく、特に DSP のみでモジュール全体の約半分の電力消費を占有している[28]。LPO ではこれらの素子を使用しないことで、消費電力面で優位性を示すことになる。特にデータセンタのような比較的短距離の信号伝送に限定される場合には、LPO でも十分伝送が可能となる。光電変換素子が ASIC 近傍に実装される CPO ではシステムエラー時の交換性が低いこともあり、従来技術の延長線上かつ低コスト、交換性に優れた LPO が CPO に先行する可能性は否定できない。一方

で、今後のデータセンタへの高速化、大容量化の要求を考慮すると、光伝送路の 1 レーンあたりの帯域はさらに増大することが確実であること、ボードエッジにおけるモジュール実装密度の制限の存在によって、今後 LPO では対応できない領域が迫っている[22]。したがって、LPO が先行する場合であっても、劇的に消費電力を削減する可能性のある CPO への移行は業界全体として避けられないと考えられる。

CPO 実現を見据えた場合、サイズ制約が厳しく、単位面積当たりの高い処理能力が求められるため、いくつかの課題解決が必要となっている。その中でも明確な解が示されていない課題の一つとして、パッケージ上传送路であるシリコン(Si)光導波路と光ファイバ間の接続方式の確立が挙げられる。Si 光導波路は既存の Complementary Metal-Oxide Semiconductor(CMOS)技術を活用した細線加工によってサブミクロンレベルのコアサイズとなるのに対し、汎用シングルモード光ファイバのコアサイズは 10 μm 程度と、両者の直接接続時には大きな接続損失が生じる。光リンク内の損失増大はシステムのリンクロスバジェットを圧迫し、別素子の設計やロスマージンに影響を与えてしまう。したがって、様々な低損失を実現する接続方式の提案が為されており、細かな差異はあるものの、端面結合方式とグレーティングカップラ方式に大別することができる[29, 30, 31]。

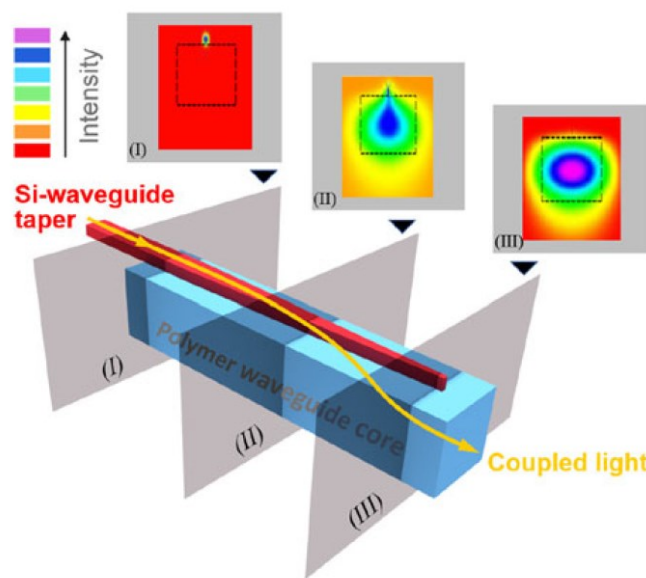
グレーティングカップラは Si 光導波路側に周期的な溝構造を形成することで、回折原理に基づいて光の出射方向を制御する構造であり、基板に対し垂直な角度で光ファイバ等との低損失接続を可能とする結合方式である。PIC(Photonic Integrated Circuit)端面に接続構造を設けた際には、光ファイバのクラッド径が 250 μm 程度であることから、配線密度が制限されてしまうが、グレーティングカップラ方式では 2 次元アレイ的に光ファイバを配列できることで、より高密度配線化が期待される。また、出射スポットサイズもある程度制御可能であり、光ファイバとの低損失な接続を実現している。一方で、剛直な光ファイバを接続の為に曲げる技術の開発や、光ファイバがパッケージ上を覆うように配線されるため、冷却効率の低下に伴う消費電力の増大が懸念される。さらに、光出射角度が伝搬する光の波長に依存することから、レーザの波長シフトの影響を受けやすく、また、波長分割多重(Wavelength Division Multiplexing : WDM)方式で多波長を伝搬させることは難しい。特に今後の高速通信を支えるであろう WDM 方式を適用できないことはグレーティングカップラ採用上のネックとなっている。グレーティングカップラを活用した Si 光導波路と光ファイバの接続例を Fig. 1-5 に示す[32]。



©2016 IEEE

Fig. 1-5 グレーティングカップラによる Si 光導波路と光ファイバの接続例[32]

端面結合方式は光伝搬方向に沿った接続方式であり，複数の形態が提案されている[29]. PIC と光ファイバの直接接続の為には ①光ファイバの配列方式の確立 ②スポットサイズの整合 が必要となる. ①の解決策として，PIC 側端面を一部エッチングすることで，光ファイバ接続構造を設けている例が発表されている[33]. また，②の解決策として，PIC 上にトライデント構造を形成し，端面上でのスポットサイズ変換することで光ファイバとの接続損失を 1 dB 以下に抑える報告がある[34]. スポットサイズ変換方式で最も広く検討されている方式が断熱結合(アディアバティック結合)方式である[35, 36]. ポリマー光導波路を利用したアディアバティック結合の例を Fig. 1-6 に示す.



©2018 IEEE

Fig. 1-6 アディアバティック結合による Si 光導波路とポリマー光導波路の接続例[35]

アディアバティック結合では，結合元となる光伝送路の幅をテーパ状に狭めていくこと

で、伝搬する光のエバネッセント領域を拡大させる。その拡大したエバネッセント領域に接する形で別の伝送路を設けることで、光の遷移を利用して伝送路間での光の受け渡しを行う方式であり、接続先の伝送路のスポット径を調整することで、スポット変換を行うことが可能となっている。アディアバティック結合方式の特徴として、波長依存性のない低損失な接続であることが挙げられる。また、無波長依存性であることで、先述した WDM 方式との併用が可能であり、今後の高速通信を支える技術の一つとして注目を集めている。接続対象となる光導波路材料としては、CMOS 技術が適用容易な SiO_2 や酸化量で屈折率調整した SiO_x 層が提案されている[36]。また、比較的厚膜化が容易なポリマーを活用した例もある。 SiO_2 、 SiO_x 光導波路はプロセス適合性が高いが、通常、厚膜形成には時間がかかり、厚膜形成時にはパッケージ全体の反りへの影響が懸念される。さらに、最大 $3\text{ }\mu\text{m}$ 程度の厚みを有する Box(Buried Oxide)層上に光導波路は形成されるが、Box 層上でスポットサイズ変換を行い、光ファイバと同程度の $9\text{ }\mu\text{m}$ まで広げた場合、スポットサイズが Box 層下の高屈折率な Si 層に到達し、光が遷移してしまう。そのため、 SiO_2 や SiO_x を活用したスポットサイズ変換は $3\text{ }\mu\text{m}\Phi$ 程度が最大であり、光ファイバとの接続損失低減の為には更なるスポットサイズ変換が要求されることが多い。

そこで、安価で加工性の高いポリマーは、プロセス適合性が高く、スポットサイズ変換素子を可能とする光導波路の構成材料として注目を集めている[37]。これまで、ポリマー光導波路は安価な光源である VCSEL(Vertical Cavity Surface Emitting Laser)とのシナジーを前提に、 850 nm 帯マルチモード光リンクでの適用が中心であった。一般的にポリマーは特に近赤外領域で吸収が大きいことが知られており、シリコンフォトニクスで使用される O 帯や C 帯ではその高い吸収がポリマー光導波路適用への懸念点であった。しかしながら、PIC 上でのスポットサイズ変換に限れば、最長でも 10 mm 程度の導波路長と予想され[18]、ポリマーの吸収がリンクロスバジェットに影響するレベルではない。

上記の背景により、ポリマーを光伝送材料とした光導波路によるスポットサイズ変換を利用した光リンク実装に注目が集まっており、当研究室でもオンボード光リンク、および CPO への適用に向けたポリマー光導波路の検討を行ってきた[38, 39, 40]。

一方で、これまでのポリマー光導波路は、ポリマー光導波路単体の光学特性に着目した例が多く、実用上の懸念点となる信頼性や耐熱性について議論した例は少ない。産業技術総合研究所より高出力光強度を入射および伝搬した際のポリマー光導波路の温度変化について報告されており、 $+20\text{ dBm}$ を超える高強度であってもポリマー光導波路自体への影響はほとんどないことが判明している[41]。しかしながら、CPO へ適用する場合、熱源となる ASIC 近傍にポリマー光導波路を実装することとなり、ポリマー光導波路に対して高温下での連続動作保証が要求される可能性が有る。CPO ではシングルモード光リンクで構成されることが想定され、ポリマー光導波路構成材料自身の耐熱性のみならず、光学特性の温度依存性をいかに抑制するかが重要となる。

そこで本研究では、シングルモードポリマー光導波路と CPO 実装時に想定される光学素

子との接続損失の温度依存性に着目し、ポリマー光導波路の CPO 適用可能性を議論する。特に、ポリマー光導波路コアの断面形状や屈折率分布に着目し、異なる接続方式に対してポリマー光導波路コアの最適設計を提案することを目指した。

具体的には、まず、異なる屈折率分布、コアサイズを有するシングルモードポリマー光導波路を実際に作製し、その光学特性を評価した。つづいて、シミュレーションを用いて室温環境でのポリマー光導波路の最適コア設計と、その時のポリマー光導波路両端での接続損失を示し、光リンクへのポリマー光導波路導入が与える優位性を議論した。最後に、PO 適用を見据えてポリマーの温度特性を考慮したポリマー光導波路の最適コア設計と、その時のポリマー光導波路両端での接続損失を示すことで、あらゆる環境において低接続損失を提供するポリマー光導波路の最適設計について議論した。

本論文では研究内容に関して全六章の構成でまとめた。

第 1 章では、本研究の背景を概説した。近年の AI の進展を背景とし、高速・低消費電力を実現する光リンクについて述べ、今後の高密度伝送要求に対する光素子として期待されるポリマー光導波路に着目し、本研究の目的を示した。

第 2 章では、光リンクの伝送路として光ファイバと光導波路に着目し、その種類と特性についてまとめた。

第 3 章では、ポリマー光導波路の製造法について説明し、形成されるコアの形状や屈折率分布をはじめとした特徴を比較する。作製法の内、矩形 SI 型コアを形成可能な直接露光法、水平 GI 型コアを形成可能なフォトアドレス法に着目し、実際に複数のコア幅を有するポリマー光導波路を作製した。実測により、作製したポリマー光導波路がシングルモード動作することを確認すると同時に、得られた MFD (Mode Field Diameter) がシミュレーションと一致していることを確認した。水平 GI 型コアでは狭小コア幅領域で比屈折率差 Δ が低減していることから、過剰拡散の影響により、コア幅(未露光幅)とコア-クラッド間屈折率差に相関があることを確認した。

第 4 章では、ポリマー光導波路をスポットサイズ変換素子として光ファイバと SiO_x 光導波路間に適用した光リンクを想定し、シミュレーションを用いて接続損失に着目して計算した結果を示した。ポリマー光導波路挿入に伴う過剰損失を見積もり、ポリマー光導波路の両端で 3.1 dB 以内に抑制できれば、リンク損失面での優位性が発現できることを示している。また、SMF とポリマー光導波路間の接続損失を計算した結果、コア設計の最適化により約 0 dB にまで低減できることが判明した。さらに、コアサイズと MFD の関係性に着目した結果、比屈折率差によって MFD の極小値が存在すること、さらには屈折率分布の違いによって極小値をとるコアサイズが大きく異なることを示した。また、 SiO_x 光導波路とポリマー光導波路間の接続損失の計算を行い、SMF ならびに SiO_x 光導波路との合計接続損失を最小とする最適なポリマー光導波路設計を導出し、屈折率分布によらず合計接続損失値が 1.0 dB 以下となり、ポリマー光導波路の光リンク挿入が損失面で大きなメリットを生み出す

ことを示した.

第 5 章では, 実装上懸念されるポリマー光導波路の温度依存性に着目し, 主要なポリマーの熱特性を解説したうえで, 線膨張係数と屈折率温度依存性の 2 つのパラメータを計算に導入した. 計算の結果, 今回選定した材料モデルでは, 光学特性に主に影響を与えるのはコアならびにクラッドが持つ屈折率温度依存性の差であることを示した. 一方で, 最適なコア設計を行うことで, 実環境温度と比較し十分高い 150 °C 環境下であっても, ポリマー光導波路は低接続損失を維持することが判明した. また, アディアバティック結合によるポリマー光導波路を介したスポットサイズ変換に関しても温度依存性を考慮した計算を行い, 広い温度範囲にわたって低損失を維持することを示した.

第 6 章では結論を述べ, ポリマー光導波路と光学素子間接続損失の高効率化ならびに温度依存性について総括した.

参考文献

- [1] I. Kapelyukh, V. Vosylius, and E. Johns, “DALL-E-Bot: Introducing Web-Scale Diffusion Models to Robotics,” *IEEE Robotics and Automation Letters*, **8**(7), pp. 3956-3963 (2023).
- [2] A. Milan, R. Sahu, and J. K. Sandhu, “Impact of AI on Social Marketing and its Usage in Social Media: A Review Analysis,” *2023 International Conference on Circuit Power and Computing Technologies (ICCPCT)*, pp. 1749-1754 (2023).
- [3] M. Neumann, M. Rauschenberger and E. -M. Schön, ““We Need To Talk About ChatGPT”: The Future of AI and Higher Education,” *2023 IEEE/ACM 5th International Workshop on Software Engineering Education for the Next Generation (SEENG)*, pp. 29-32 (2023).
- [4] P. Maddigan, and T. Susnjak, “Chat2VIS: Generating Data Visualizations via Natural Language Using ChatGPT, Codex and GPT-3 Large Language Models,” *IEEE Access*, **11**, pp. 45181-45193 (2023).
- [5] M. Kuzlu, Z. Xiao, S. Sarp, F. O. Catak, N. Gurler, and O. Guler, “The Rise of Generative Artificial Intelligence in Healthcare,” *2023 12th Mediterranean Conference on Embedded Computing (MECO)*, pp. 1-4 (2023).
- [6] K. M. Caramancion, “News Verifiers Showdown: A Comparative Performance Evaluation of ChatGPT 3.5, ChatGPT 4.0, Bing AI, and Bard in News Fact-Checking,” *2023 IEEE Future Networks World Forum (FNWF)*, pp. 1-6 (2023).

- [7] T. Wu, S. He, J. Liu, S. Sun, K. Liu, Q. Han, and Y. Tang, “A Brief Overview of ChatGPT: The History, Status Quo and Potential Future Development,” *IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica*, **10**(5), pp. 1122-1136 (2023).
- [8] M. Capra, B. Bussolino, A. Marchisio, G. Masera, M. Martina, and M. Shafique, “Hardware and Software Optimizations for Accelerating Deep Neural Networks: Survey of Current Trends, Challenges, and the Road Ahead,” *IEEE Access*, **8**, pp. 225134-225180 (2020).
- [9] Cisco, “Cisco Annual Internet Report (2018–2023) White Paper,”
<https://www.cisco.com/c/en/us/solutions/collateral/executive-perspectives/annual-internet-report/white-paper-c11-741490.html> (2024 年 8 月閲覧)
- [10] 総務省, “データセンター間等におけるデータ通信量の現状と見通し等に関する調査研究について,” (2024).
Available:https://www.soumu.go.jp/main_content/000942106.pdf (2024 年 8 月閲覧)
- [11] <https://www.top500.org/> (2024 年 8 月閲覧)
- [12] P. Pepeljugoski, J. Kash, F. Doany, D. Kuchta, L. Schares, C. Schow, M. Taubenblatt, B. J. Offrein, and A. Benner, “Towards Exaflop Servers and Supercomputers: The Roadmap for Lower Power and Higher Density Optical Interconnects,” *36th European Conference and Exhibition on Optical Communication*, pp. 5621097 (2010).
- [13] International Energy Agency, “Electricity 2024 Analysis and Forecast to 2026,” (2024).
<https://www.iea.org/reports/electricity-2024> (2024 年 8 月閲覧)
- [14] 国立研究開発法人科学技術振興機構 低炭素社会戦略センター, “情報化社会の進展がエネルギー消費に与える影響 (Vol.3) —ネットワーク関連消費エネルギーの現状と将来予測および技術的課題—” (2021).
<https://www.jst.go.jp/lcs/pdf/fy2020-pp-04.pdf> (2024 年 8 月閲覧)
- [15] 光回路実装技術委員会, “光回路実装技術ロードマップ 2019 年度版「50Tb/s 超データ伝送を支える高密度光トランシーバと光・電気実装技術の展望」,” エレクトロニクス実装学会 (2020).

- [16] N. Bamiedakis, J. Beals, R. V. Pentty, L. H. White, J. V. Degroot, and T. V. Clapp, “Costeffective Multimode Polymer Waveguides for High-Speed On-Board Optical Interconnects,” *IEEE J. Quantum Electron.*, **45**(4), pp. 415-424 (2009).
- [17] K. Zhong, X. Zhou, J. Huo, C. Yu, C. Lu, and A. P. T. Lau, “Digital Signal Processing for Short-Reach Optical Communications: A Review of Current Technologies and Future Trends,” *Journal of Lightwave Technology*, **36**(2), pp. 377-400 (2018).
- [18] 光回路実装技術委員会, “光回路実装技術ロードマップ 2022 年度版「100 Tb/s 超スループットの実現に向けた光回路実装形態の予測と課題」,” エレクトロニクス実装学会 (2023).
- [19] Samtec FireFly Application Design Guide, [online]
<http://suddendocs.samtec.com/-ebrochures/firefly-brochure.pdf>. (2024 年 8 月閲覧)
- [20] M. A. Taubenblatt, “Optical Interconnects for High-Performance Computing,” *Journal of Lightwave Technology*, **30**(4), pp. 448-457 (2012).
- [21] D. M. Kuchta, A. V. Rylyakov, F. E. Doany, C. L. Schow, J. E. Proesel, C. W. Baks, P. Westbergh, J. S. Gustavsson, and A. Larsson, “A 71-Gb/s NRZ Modulated 850-nm VCSEL-Based Optical Link,” *IEEE Photonics Technology Letters*, **27**(6), pp. 577-580 (2015).
- [22] S. Fatholouloumi, K. Nguyen, H. Mahalingam, M. Sakib, Z. Li, C. Seibert, M. Montazeri, J. Chen, J. K. Doyle, H. Jayatilaka, C. Jan, J. Heck, R. Venables, H. Frish, R. A. Defrees, R. S. Appleton, S. Hollingsworth, S. McCargar, R. Jones, D. Zhu, Y. Akulova, and L. Liao, “1.6Tbps Silicon Photonics Integrated Circuit for Co-Packaged Optical-IO Switch Applications,” *Optical Fiber Communication Conference (OFC) 2020, T3H.1* (2020).
- [23] S. Razdan, P. De Dobbelaere, J. Xue, A. Prasad, and V. Patel, “Advanced 2.5D and 3D Packaging Technologies for Next Generation Silicon Photonics in High Performance Networking Applications,” *2022 IEEE 72nd Electronic Components and Technology Conference (ECTC)*, pp. 428-435 (2022).
- [24] K. Muth, V. Raghuraman, S. Kannan, and H. Potluri, “High Density Integration Technologies for SiPh Based Optical I/Os,” *2023 IEEE 73rd Electronic Components and Technology Conference (ECTC)*, pp. 212-215 (2023).
- [25] B. Chou, B. M. Sawyer, G. Lyu, E. Timurdugan, C. Minkenberg, A. J. Zilkie, and D. McCann,

- “Demonstration of Fan-out Silicon Photonics Module for Next Generation Co-Packaged Optics (CPO) Application,” 2022 IEEE 72nd Electronic Components and Technology Conference (ECTC), pp. 394-402 (2022).
- [26] E. S. Chou, Y. Huang, S. Amiralizadeh, J. Rahn, J. K. Doylend, and Q. Wang, “100G and 200G per Lane Linear Drive Optics for Data Center Applications,” Optical Fiber Communications Conference (OFC) 2024, W4H.3 (2024).
- [27] B. Yoo, D. Lim, H. Pang, J. Lee, S. Baek, and N. Kim, “6.4 A 56Gb/s 7.7mW/Gb/s PAM-4 Wireline Transceiver in 10nm FinFET Using MM-CDR-Based ADC Timing Skew Control and Low-Power DSP with Approximate Multiplier,” 2020 IEEE International Solid-State Circuits Conference - (ISSCC), pp. 122-124 (2020).
- [28] R. Nagarajan, A. Martino, D. A. Morero, L. Patra, C. Lutkemeyer, and M. A. Castrillón, “Recent Advances in Low-Power Digital Signal Processing Technologies for Data Center Applications,” *Journal of Lightwave Technology*, **42**(12), pp. 4222-4232 (2024).
- [29] R. Marchetti, Cosimo Lacava, Lee Carroll, Kamil Gradkowski, and Paolo Minzioni, “Coupling strategies for silicon photonics integrated chips,” *Photonics Research*, **7**(2), pp. 201-239 (2019).
- [30] B. B. Bakir, A. V. Gyves, R. Orobtcouk, P. Lyan, C. Porzier, A. Roman, and J. M. Fedeli, “Low-Loss (< 1 dB) and Polarization-Insensitive Edge Fiber Couplers Fabricated on 200-mm Silicon-on-Insulator Wafers,” *IEEE Photonics Technology Letters*, **22**(11), pp. 739-741 (2010).
- [31] A. Mekis, S. Gloeckner, G. Masini, A. Narasimha, T. Pinguet, S. Sahni, and P. D. Dobbelaere, “A Grating-Coupler-Enabled CMOS Photonics Platform,” *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, **17**(3), pp. 597-608, (2011).
- [32] S. Bernabé, K. Rida, G. Parès, O. Castany, D. Fowler, C. Kopp, G. Waltener, J. G. Jimenez, and S. Menezo, “On-Board Silicon Photonics-Based Transceivers With 1-Tb/s Capacity,” *IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology*, **6**(7), pp. 1018-1025 (2016).
- [33] M. Schnarrenberger, L. Zimmermann, T. Mitze, J. Bruns, and K. Petermann, “Facet Preparation of SOI Waveguides by Etching and Cleaving Compared to Dicing and Polishing,” *First IEEE International Conference on Group IV Photonics*, pp. 72-74 (2004).

- [34] N. Hatori, T. Shimizu, M. Okano, M. Ishizaka, T. Yamamoto, Y. Urino, M. Mori, T. Nakamura, and Y. Arakawa, “A Hybrid Integrated Light Source on a Silicon Platform Using a Trident Spot-Size Converter,” *Journal of Lightwave Technology*, **32**(7), pp. 1329-1336 (2014).
- [35] R. Dangel, A. L. Porta, D. Jubin, F. Horst, N. Meier, M. Seifried, and B. J. Offrein, “Polymer Waveguides Enabling Scalable Low-Loss Adiabatic Optical Coupling for Silicon Photonics,” *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, **24**(4), pp. 8200211 (2018).
- [36] H. Nishi, K. Takeda, T. Tsuchizawa, T. Fujii, S. Matsuo, K. Yamada, and T. Yamamoto, “Monolithic Integration of InP Wire and SiO_x Waveguides on Si Platform,” *IEEE Photonics Journal*, **7**(5), pp. 4900308 (2015).
- [37] T. Amano, S. Ukita, Y. Egashira, M. Sasaki, A. Noriki, M. Mori, K. Kurata, and Y. Sakakibara, “Low-Loss Characteristics of a Multimode Polymer Optical Waveguide at 1.3 μ m Wavelength on an Electrical Hybrid LSI Package Substrate,” 2016 IEEE 66th Electronic Components and Technology Conference (ECTC), pp. 477-482 (2016).
- [38] R. Kinoshita, and T. Ishigure, “Optimum Core Structural Design of the Polymer Optical Waveguides as Edge Couplers for Co-Packaging,” *Optics Express*, **32**(14), pp. 24415-24431 (2024).
- [39] K. Soma, and T. Ishigure, “Fabrication of a Graded-Index Circular-Core Polymer Parallel Optical Waveguide Using a Microdispenser for a High-Density Optical Printed Circuit Board,” *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, **19**(2), pp. 3600310 (2012).
- [40] T. Ishigure, S. Yoshida, K. Yasuhara, and D. Suganuma, “Low-Loss Single-Mode Polymer Optical Waveguide at 1550-nm Wavelength Compatible with Silicon Photonics,” 2015 IEEE 65th Electronic Components and Technology Conference (ECTC), pp. 768-774 (2015).
- [41] S. Suda, T. Kurosu, H. Kuwatsuka, A. Noriki, F. Nakamura, and T. Amano, “Demonstration of High-Power Stability of Polymer Optical Waveguides Using External Laser Source (ELS) for Co-Packaged Optics,” 2023 IEEE CPMT Symposium Japan (ICSJ), pp. 164-167 (2023).

第 2 章

光リンクを構成する光伝送路

2.1. 緒言

本章では、はじめに光ファイバ、光導波路について種類別に分類し、それぞれの特徴を述べる。その後、CPO 適用に向けて、ポリマー光導波路に求められる役割、要求特性について述べる。

2.2 光伝送路の分類

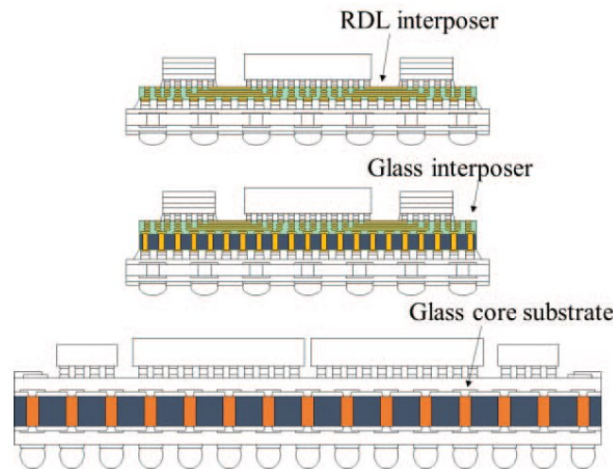
光伝送路は、主に長距離に用いられるケーブル状の光ファイバと、短距離に用いられるフィルムや基板状の光導波路に大別されるが、コア内に光を閉じ込め伝搬する動作原理は同一であり、本章では総称して光伝送路と呼ぶ。

2.2.1. 材料による分類

光伝送路として最も重要な機能は、コア内を伝搬する光信号強度の維持であり、その光吸収率は材料に大きく依存する。したがって、材料の選択は光伝送路の光学特性を決定づけることになるため、歴史的にも古くより検討されており、以下の 3 種類に大別される。

- ・石英ガラス

石英ガラスは通信波長帯で極めて低い吸収率を示す材料として、長距離用の光ファイバに主に用いられることが多い。一方で、高い耐熱性をはじめとする高環境耐性を特徴とした、ガラス光インターポーザ用材料として用いられる例もある。また、光導波路には、その性質安定性を活かし、AWG(Arrayed Waveguide)形態による合分波器[1]として適用されることが多い。近年では、Intel 社が主導して進めるオープン規格(Universal Chiplet Interconnect Express: UCIe[2])にて、Fig. 2-1 に示したようなガラスインターポーザが提案されており、プロセス適合性の高いガラス製の光伝送路実装についても期待が高まっている[3, 4]。



©2024 IEEE

Fig. 2-1 石英ガラスインターポーザの適用例[2]

- ・ポリマー(プラスチック)

ポリマーは材料自身の柔軟性を活かし、狭小領域用光配線材料として古くより検討されてきた。材料選択性の広さから、各社より化学構造に起因する特性を活かした光学用ポリマーが提案されている[5, 6, 7, 8]。一方で、ポリマーはC-H間の分子振動吸収に起因する吸収ピークが通信波長帯近傍に存在するため、石英ガラスと比較して大きな損失を示す。また、比較的安価で入手および加工可能である点で優位性を示しており、石英光ファイバとの棲み分けにより、短距離通信用部材として用いられることが多い。

- ・シリコン(Si)

Si 光導波路は、従来の CMOS(Complementary Metal-Oxide-Semiconductor)用量産プロセスの流用が可能なことから、安価で大量に製造可能なことを特徴としている[9, 10, 11]。通常、コアにはピュアなシリコンを用い、クラッドとして酸化シリコン(SiO_2)を用いることが多い。また、リング共振器やグレーティングカプラを中心とした多数の機能を同一プロセスで盛り込むことが可能であることから、Si 光導波路はシリコンフォトリソの隆盛を支える重要な素子として、近年存在感を高めている。

2.2.2. 導波モードによる分類

伝送路内の光は、コアとクラッドの屈折率差によって形成される定在波を通じて伝搬していく[12]。この定在波を形成するためには、光の波長・コア形状・コア-クラッド間の屈折率差等が一定の条件を満たす必要がある。したがって、伝送路に入射された光はあらゆる入射角に対して連続的に定在波を形成、伝搬していくことはなく、ある特定の定在波を形成する条件を満たした光の伝搬のみが許容される。この定在波を形成する光、あるいは電磁界分布のことを導波モードと呼び、光伝送路内に複数の導波モードが存在する場合をマルチモ

ード，単一の導波モードしか存在しない場合をシングルモードとして区別する．なお，光伝送路内に数モードのみ存在する場合をフューモードとして呼称する場合があるが，本論文ではフューモードもマルチモードの一部とみなす．

光は電磁波の一種であり，その振動方向によって TE 偏光，TM 偏光が存在する．したがって，導波モードにおいてもその偏光状態によって，TE モード，TM モードと呼称することがある．したがって，シングルモード領域では 0 次モードである TE_0 モード， TM_0 モードのみが存在することになり，これらを基本モードと呼ぶ．コア内光伝送路内に存在し得る導波モード数は，先述した各条件によって決定されるため，導波モードごとの周波数と伝搬定数を規格化した，規格化周波数 V と規格化伝搬定数 b は，式(2-1)および式(2.2)のように示される．なお， k_0 は真空中の波数， d はコア径， n_1 はコアの屈折率， n_2 はクラッドの屈折率， β は伝搬定数を示す．また， N は 0 以上の整数であり， $N = n$ の時に規格化伝搬定数が存在する(=導波モードが存在する)とき，その導波モードを n 次モードと呼ぶ．

$$b = \frac{\left(\frac{\beta}{k_0}\right)^2 - n_2^2}{n_1^2 - n_2^2} = \frac{n_{eff}^2 - n_2^2}{n_1^2 - n_2^2} \quad (2-1)$$

$$V = \frac{1}{\sqrt{1-b}} \left(\tan^{-1} \sqrt{\frac{b}{a-b}} + \frac{N}{2} \pi + \frac{\pi}{4} \right) \quad (2-2)$$

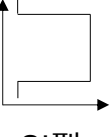
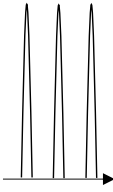
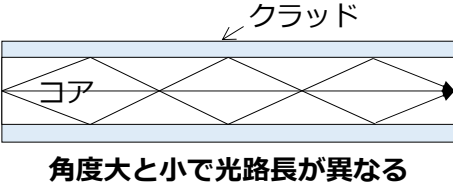
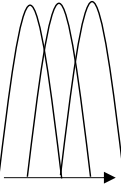
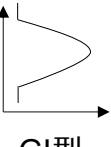
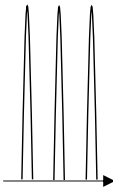
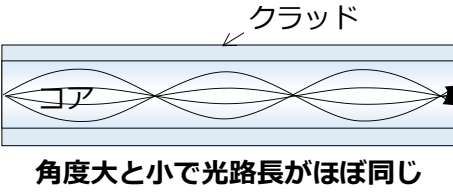
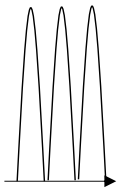
式(2-2)より，規格化周波数 V とモード次数 N によって規格化伝搬定数 b は決定されることがわかる． V の値によっては， b の解が存在せず，伝送路内に導波モードが存在しない．また， b の解が TE および TM でそれぞれ単一の解を有する条件をシングルモード条件と呼び，コアが真円かつ屈折率分布が均一であるときの厳密解では $V < 2.405$ であることが示されている[13]．この境界条件は光伝送路のコア形状や屈折率分布などで異なるが，導波モード数を減らすためには「コアの狭小化」「コア-クラッド間の屈折率差低減」「伝搬する光の長波長化」等の手法が考えられる．したがって比較的大きなコアサイズ，もしくはコア-クラッド間に大きな屈折率差を有する光伝送路はマルチモードであることが多く，より多くの光強度を，低接続精度で伝搬させる際に適しており，安価に光リンクを構成する部材として広く使用されている．しかしながら，1 レーンあたりの伝送容量が増加するにつれ，導波モード間の光信号到達時間差に起因するモード分散の影響が大きくなってきた．マルチモードであっても，後述する屈折率分布の工夫によってモード分散を抑制することは可能ではあるものの，波長分割多重方式(WDM)を考慮した際の複数波長に対する屈折率分布の最適化が不可であるなど，モード分散影響をゼロにすることは難しい．一方，シングルモードでは導波モードが基本モードのみであることから，モード分散の影響を受けない．ファイバのコア形状が真円でないことや，外圧起因により，コア内を伝搬する偏波モード間の分散が存在するものの，モード分散と比較すると無視できるレベルに影響は小さい．そのため，大

陸間など、長距離を伝搬する光伝送路としては、信号の質を確保するためにシングルモード光ファイバが適用されている。また、複数の導波モードを有するマルチモードと比較して、高い位相安定性を示すことから、干渉を用いる機能素子の適用や、近年変調方式の一つとして注目を集めているデジタルコヒーレント技術の適用が可能である。従来の強度変調直接検波(Intensity Modulation-Direct Detection : IM-DD)方式では長距離伝送によって高速信号伝送時の信号品質劣化が生じるのに対し、デジタルコヒーレント方式では光の波動性を活用し、異なる位相に対して信号を持たせることで効率的な長距離伝送を可能にしており、実際、QPSK(Quadrature Phase Shift Keying)方式が適用されている[14]。より長距離・高帯域の伝送が必要となる場合では、直交する信号光の振幅および位相に異なる情報をのせる直交振幅変調(Quadrature Amplitude Modulation : QAM)方式が適用されることがある[15]。今後はより短距離であっても、さらなる高帯域化を見据え、シングルモード適用領域が拡大していくことが予想される。

2.2.3. 屈折率分布による分類

光伝送路、特にマルチモード光導波路では、コア内の屈折率分布によって SI(Step-Index)型と GI(Graded-Index)型の2種類に大別される[16]。歴史的には構造がより単純な SI 型が先に誕生し、伝送容量増大に伴うモード分散低減の必要性によって、GI 型が開発された。SI 型と GI 型の違いを Table 2-1 にまとめた。

Table 2-1 ポリマー光導波路の屈折率分布による違い

屈折率構造	入力信号	光伝搬の概念図	出力信号	モード分散
 SI型		 クラッド コア 角度大と小で光路長が異なる		大
 GI型		 クラッド コア 角度大と小で光路長がほぼ同じ		小

SI 型は階段屈折率型とも呼ばれるように、コアとクラッドがそれぞれ一定の屈折率を有した構造であり、コアに入射された光は屈折率の異なるコアとクラッドの界面で全反射を繰り返すことで伝搬していく。したがって、コアとクラッドの2つの材料のみで構成される

ため、導波構造の形成が容易であり、プロセス面や材料選択性という点で GI 型に対して優位性を有する。しかし、光ファイバは伝送容量の観点からモード分散影響の小さい GI 型マルチモード光ファイバや、本質的にモード分散が存在しないシングルモード光ファイバが主流であり、SI 型の製品は一部の評価用やファイバレーザ等の高出力光伝搬用などに限定される。一方で、比較的短距離に用いられる光導波路は分散影響が限定的であることから、いまだに SI 型が主流となっている。SI 型は全反射を利用した伝搬原理であり、コア-クラッド界面の粗さが散乱損失要因となるため、界面の平滑さが要求される。特に Si 光導波路では、近赤外領域で低材料吸収を示すシリコンをコア材料としているにもかかわらず、サブミクロンオーダーの極めて小さいコアサイズのために伝搬損失は一般的に 1 dB/cm 以上まで増大してしまう[17]。この原因として、光の直進性と波動性の観点から考える。光の直進性の観点では、小コアサイズ内を伝搬する光の散乱によって導波路の放射モードが励振され、漏洩光となっていると考えられる。一方、光の波動性に着目すると、導波モードが形成する電磁界強度分布が界面荒れによって伝搬に伴い揺らぐことになり、コアの伝搬とともに波の強度が低下していき、高い伝搬損失を示すと考えられる。近年では、プロセス改良によって 0.21 dB/cm の報告[18]が為されているが、それでも材料ポテンシャルには達しておらず、この高損失が Si 光導波路の伝搬長制限の一因となっている。また、導波モードによって出射端に光信号が到達するまでの時間が異なるため、上述のモード分散影響が大きい。このモード分散が SI 型伝送路の伝送帯域を大きく制限する要因となっている。

GI 型はコア内にコア中心部を最大とした屈折率勾配を形成した構造であり、入射された光はコア内を屈折しながら伝搬していく。そのため、SI 型では散乱損失要因となるコア-クラッド界面荒れの影響を受けづらく、光伝送路の製造トレランスの面で優位性を示す。また、低次モードは高屈折率部を優先に伝搬し、高次モードは屈曲しながら低屈折率部も伝搬していくため、導波モード間の伝搬経路差を補償する形で働き、モード分散を低減することが可能である。そのため、一般的に GI 型伝送路は SI 型と比較して広伝送帯域を示す。

モード分散低減の為には屈折率分布の最適化が必要であり、式(2-3)に示す、べき乗則近似式が最も一般的な屈折率分布として知られている。なお、 n_1 はコア中心部の屈折率、 a はコア半径、 Δ は比屈折率差、 r は中心軸からの距離を表す変数であり、半径方向の屈折率分布係数 g によって屈折率分布が決定される。

$$n(r) = n_1 \sqrt{1 - 2\Delta \left(\frac{r}{a}\right)^g} \quad (2-3)$$

$g = \infty$ のとき、式(2-3)の右辺は n_1 となり、SI 型の屈折率分布を示す。一般的に真円コアを有する光伝送路では $g = 2$ 近傍でモード分散を最小化できることが知られている[19]。また、式(2-4)で表される Δ は比屈折率差と呼称される導波構造を決定する重要なパラメータであり、広く用いられる開口数(Numerical Aperture : NA)との関係も併せて表した。なお、 n_1 は

コアの屈折率、 n_2 はクラッドの屈折率を示す。開口数はマルチモードの議論で用いられる一方で、比屈折率差 Δ はシングルモードの議論によく用いられる。

$$\Delta = \frac{n_1^2 - n_2^2}{2n_1^2} = \frac{NA^2}{2n_1^2} \quad (2-4)$$

このように GI 型は光学特性面では SI 型に対して優位性を示すが、理想的な屈折率分布を実現する必要があり、屈折率調整剤の存在や、製造プロセス上の工夫によって一般的に製造コストが高い。プリフォームを延伸して作製される光ファイバでは、単位長さあたりのコスト面への影響は小さいが、短距離用光導波路では製造、販売上の課題となり得るため、より簡便で安価な製造プロセスの開発が期待される。

2.3. 光ファイバの種類

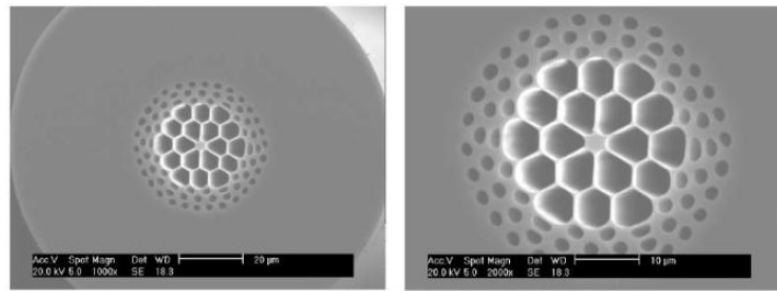
ここでは長距離光通信用伝送路として開発されてきた光ファイバの種類を述べる。

・ガラス光ファイバ(Glass Optical Fiber : GOF)

現在の光通信を支える光伝送路であり、長距離用では低分散なシングルモード光ファイバ(Single-mode Fiber : SMF)、短距離用では接続性に優れたマルチモード光ファイバ(Multimode Fiber : MMF)が用いられる。MMFは伝送特性に合わせて規格化されており[20]、コア径が 62.5 μm である OM1 を除いた、OM2~OM5 が広く用いられている。OM3 以降は、VCSEL(Vertical Cavity Surface Emitting Laser)光源を用いたマルチモード光リンクの主波長帯である 850 nm 帯にフォーカスして伝送帯域を最適化している。近年はマルチモード光リンクでも広帯域化に向けた WDM に関する議論が為されており[21]、OM5 では 953 nm 帯での伝送帯域も定義されている。

・フォトニック結晶光ファイバ(Photonic Crystal Fiber : PCF)

PCFは、Fig. 2-2 に示したように、光ファイバの中心部に空孔や、異なる屈折率成分を周期的に配列した構造を持つ光ファイバである。特に空孔部を光が伝搬するホーリーファイバはコアが屈折率 $n \simeq 1$ の大気であるとみなせるため、低損失かつ低遅延な光リンクを実現できる素子やセンサ用光ファイバとして注目されている[22, 23, 24, 25]。実際、非共鳴型ファイバの1種である DNANF(Double Nested Antiresonant Nodeless Fiber)の伝搬損失は C 帯で 0.174 dB/km と極めて低い値が報告[26]されており、今後の長距離伝送を担う光伝送路として大きな期待を集めている。



©2012 Optical Society of America

Fig. 2-2 フォトニック結晶光ファイバの断面図[24]

・プラスチック光ファイバ(Plastic Optical Fiber : POF)

POF は高い柔軟性、大口径化が可能、安価であることを活かし、照明用や伝送帯域を必要としない領域への適用が為されてきた。代表的な適用例は車載用であり、省スペースかつ軽量の光通信用伝送路として既に標準化されている[27]。また、慶應義塾大学の小池教授が中心となり、高速通信用の POF として GI 型 POF の開発が進められており、日東電工社との共同研究成果として広帯域対応 POF の発表がなされている[28]。

・マルチコア光ファイバ(Multi Core Fiber : MCF)

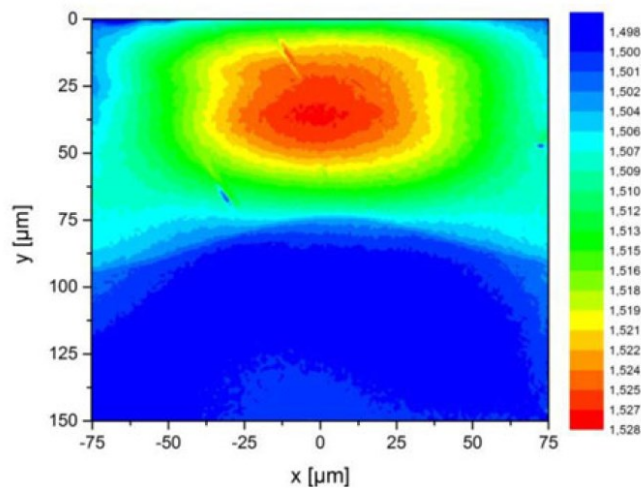
近年の急速なデータ伝送量増大の要求に対し、これまで WDM や多値変調方式(Pulse-amplitude modulation : PAM)を用いてレーンあたりの伝送容量を増大させてきた。しかしながら、シングルモード光ファイバの小コア径内に光強度が集中することで、ファイバヒューズの発生が懸念されるようになってきた。そこで空間的に光を多重化する SDM(Space Division Multiplexing)が注目され、その一種として同一クラッド径内に複数のコアを配線した MCF が提案されており、主要な光ファイバメーカーが存在する日本がとくに注力している[29, 30, 31]。MCF によって空間当たりの伝送容量増大が見込める一方で、コア間の距離(ピッチ)が狭小化することで光信号が混信するクロストークの影響が懸念される。また、ピッチ確保のためにファイバ断面に対してコアが2次元的に配列されることが多く、1次元的に配列される他の光素子との結合方式の確立が課題となっている。

2.4. 光導波路の種類

・ガラス光導波路

ガラス光導波路は、その材料固有の低吸収性、高い環境耐性を活かし、厳密な屈折率制御が必要、かつ温度による屈折率変動が許容されない合分波デバイス(Arrayed Waveguide Grating : AWG)への適用例[32, 33]がある。ガラス光導波路の主要な導波構造形成手法としてはスパッタ法や CVD(Chemical Vapor Deposition)法が挙げられるが、古くより検討されているイオン交換法では、ガラス内のナトリウムイオンを銀イオンに置換することで屈折率を変調させている。イオン交換率がガラス表面では高くなることを活用して、コアに屈折率勾

配を形成する手法が開発されており、実際にイオン交換法によって作製されたコア内の屈折率プロファイルの測定結果を Fig. 2-3 に示す[34]. 近年では、フェムト秒レーザを用いることで局所的な屈折率変調を引き起こして導波構造を構成する手法が開発されており、レーザ焦点の精密調整によって3次元光配線を実現した例が報告されている[35]. 一方で、後述するポリマー光導波路と比較してプロセスが複雑かつ高コストであることが懸念されている.



©2016

Fig. 2-3 イオンエッチング法で形成されたガラス導波路コア内の屈折率プロファイル[34]

・ポリマー光導波路

優れた損失特性、耐環境性を示すガラス光導波路に対し、ポリマー光導波路はその柔軟性や易加工性を活かした低コスト性を強みにして、狭小領域での光リンク構成素子として開発されてきた。古くは2000年代初頭に、折り畳み型携帯への光配線版として複数社によって開発されていた[36]. 従来、ポリマー光導波路は安価な光リンク構成素子として注目を集めていたため、こちらも比較的安価な光源である VCSEL を用いた光リンクへの適用が想定されており、多少の実装ズレを許容することができる大口径なマルチモード光導波路が主流であった。VCSEL の発振波長は 850 nm 近傍であることから、各社によって波長 850 nm で優れた吸収特性を示すポリマー光導波路が開発されてきた。マルチモードのポリマー光導波路の特性比較を Table 2-2 に示す[37]. 表内のポリマー光導波路作製法のうち、代表的な作製法については第3章で詳細に記述する.

Table 2-2 各種ポリマー光導波路製法と代表的機関[37]

材料系	工 法	導波損失 (dB/cm)			耐熱性	屈曲性	特 徴	国内開発機関
		850 nm	1300 nm	1550 nm				
アクリル	UV 硬化	<0.1	—	—	○	◎	低損失	日立化成, 関西ペイント
	モールド	0.2	0.3	0.5	×	◎	SM, MM 両対応	オムロン
	自己形成	1.0	1.0	4.0	×	—	大口径導波路作製	豊田中研
エポキシ	UV 硬化	<0.1	—	—	○	○	低損失	NTT, 日東電工, 日立電線, 松下電工ほか
	モールド	<0.1	—	—	○	○		富士ゼロックス, 東北大学
シロキサン	UV 硬化	—	0.2	0.3	◎	×	長波長低損失	NTT, JSR ほか
シリコーン	UV 硬化	<0.1	—	—	◎	◎	機械物性良好	東レダウコーニング, アデカ
ポリイミド	UV 硬化	0.1	—	—	◎	—	省工程	日東電工
	モールド	0.3~0.8	0.2~0.4	0.2~0.5	◎	◎	耐熱性良好	三井化学
	RIE				◎	◎		NTT, 日立化成, セントラル硝子, 日本触媒
ポリシラン	UV 変性	0.1	0.2	0.7	◎	○	省工程, 多層化容易	日本ペイント, 千歳科学技術大学
	モールド				◎	—	インプリント適性良好	理研
ポリノルボネン	UV 変性	<0.1	—	—	○	○	省工程, 多層化容易	住友ベークライト
フッ素樹脂	RIE	0.1	0.1	0.1	×	—	全波長低損失	旭硝子

©2008 応用物理学会

近年では、レーン当たりの伝送レート高速化や、高密度化に伴う電磁ノイズの影響、消費電力への厳しい要求によって光リンク領域の拡大が期待されており、光ファイバでは実現できないサーバ筐体内といった狭小領域への光リンク導入に向け、ポリマー光導波路の開発が活性化している[38, 39, 40]. 広帯域化に伴い、シングルモード光ファイバの適用が進んでいることから、ポリマー光導波路もシングルモード化、ならびに 1310 nm 帯での低損失性が求められている. 既に述べた通り、ポリマーは長波長帯では C-H 振動吸収に起因する吸収ピークが顕著になることから、各社によって上記波長帯で低損失性を示すポリマーが開発されている. 代表的なものとしては 有機-無機ハイブリッド樹脂、フッ素系樹脂、シロキサン系樹脂 などが挙げられる[41].

有機-無機ハイブリッド樹脂は、Fraunhofer ISC 社が開発した ORMOCER®がベースとなっており、ドイツの Micro resist technology 社から市販されている[42]. また、日産化学社は ORMOCER®を含む光導波路材料 SUNCONNECT®の開発を行っており、各種発表が為されている[43]. 有機-無機ハイブリッド樹脂は、無機性を一部示すことから、波長 1310 nm および 1550 nm で高い透明性を示し、また良好な耐熱性を有することで、OE エンジンに搭載する光導波路材料として検討が行われている.

フッ素系樹脂は、AGC 社や Chemoptics 社が通信波長帯で透明な材料を開発している[44]. フッ素系樹脂は熱分解温度が高く、また シングルモード光導波路での光伝搬損失が 0.2~0.3 dB/cm@1550 nm と低い. AGC のフッ素系樹脂で作製した光導波路は IBM 社のパッケージに採用されており、良好なはんだリフロー耐性やモジュールに実装した形での長期信頼性も評価されている[45]. 一方で、フッ素系樹脂については、近年の世界的な PFAS 規制[46]によって、樹脂設計に制限が設けられてきている.

シロキサン系樹脂は、Dow Corning 社の OE-4140UV(および系列会社の Rohm and Haas 社の LIGHTLINK®)などの製品がさまざまな研究機関に使用されている[47]. 樹脂の骨格がポ

リシロキサンで構成されるため耐熱性が高く、また波長 1310 nm における光伝搬損失も 0.3 dB/cm と小さいが、1550 nm では >0.6 dB/cm と上記 2 種類の樹脂と比べて高い値が報告されている。

2.5. 光導波路の役割と要求される特性

光導波路は比較的短距離な光リンクを構成する光素子として開発されてきた。今後の光リンク向け構成素子として想定される潜在的要求項目としては以下のようなものが挙げられる。

- ・高密度配線化が容易
- ・プロセス適合性の高さ
- ・機能付与が容易
- ・素子実装時の耐久性
- ・安価な製造コスト

これらは既に広く普及した光ファイバと差別化可能な特徴であり、光導波路、特にポリマー製の光導波路が長年にわたり注目を集めてきた理由といえる。

特に CPO ではスペースあたりの伝送密度が求められること、また、長距離伝送用光ファイバと短距離伝送用 Si 光導波路間の接続方式に課題があることから光導波路の重要性が高まっている。

ここで、CPO の実現に向けて大きな課題の一つである光ファイバ-Si 光導波路間接続方式の確立について解説する。

代表的な Si 光導波路と汎用シングルモード光ファイバである G.652 ファイバ[48]のパラメータを Fig. 2-4 で比較した。Fig. 2-4 より、コアサイズ、比屈折率差 Δ が大きく異なっていることがわかる。

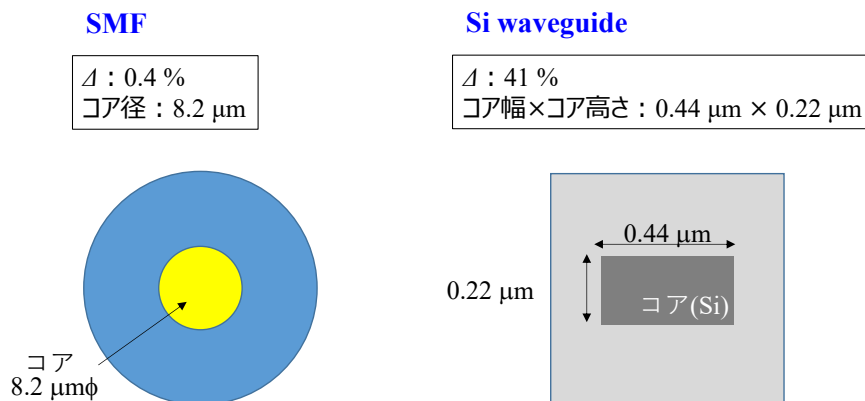


Fig. 2-4 シングルモード光ファイバと Si 光導波路のパラメータ比較

Figure 2-4 で設定したパラメータを用いて、コアから出射される光強度分布を計算するべ

く、計算方法として次の3手法を比較検討した。

- ・ビーム伝搬法(Beam Propagation Method : BPM)[12]
- ・有限差分時間領域法(Finite Difference Time Domain Method : FDTD)[49]
- ・固有モード展開法(EigenMode Expansion Method : EME)[50]

このうち、ビーム伝搬法は光伝搬の様子が視覚的にわかりやすく、また計算時間が比較的短いことから様々な光素子の光学特性評価に用いられている一方で、本論文で着目する光素子間の接続損失算出には適していない。また、計算に近似を用いていることから、Si 光導波路のような高い Δ を有する光導波路の光伝搬を計算するには精度が不十分であり、候補から除外した。

有限差分時間領域法はマクスウェル方程式の厳密解を求める手法であり、計算に近似を用いないことから高精度な計算結果を得ることができる。時間領域にまで拡張した計算が可能である一方で、計算量が膨大であり計算に要する時間が比較的長い。本研究では、ポリマー光導波路の複数パラメータを変化させながら接続特性を比較検討するため、計算量が多くなることが想定される。特に、大コアサイズの計算時には、計算領域の拡張に伴い、さらなる計算時間の延長が予測される。

固有モード展開法では光導波路断面の境界条件から、数値解析によって Maxwell 方程式が満たす条件を求めており、近似を用いておらず高い計算精度を有している。また、有限差分時間領域法とは異なり一つの周波数に対してモードや偏波を網羅的に計算するため、周波数特性の検証が不要な場合には、比較的高速に計算可能である。

本研究では、シリコンフォトニクスで使用される O 帯の 1310 nm に波長を固定し議論を進めることから、固有モード展開法を計算方法として採用した。以後、本研究で示す計算結果はすべて固有モード展開法による結果となる。

固有モード展開法では光導波路の持つ固有モードを扱う。固有モードとは光導波路を伝搬する導波モードと放射モードの総称である。光導波路に入射される光は任意の電磁界分布を有しており、光導波路の持つ固有モードに必ずしも一致しない。そのため、入射された光は、光導波路の持つ固有モードの電磁界分布によって展開され、それぞれの固有モードに分かれて伝搬することになり、これを固有モード展開と呼ぶ[12]。ある光導波路に入射した光が、光導波路の固有モードに展開されるイメージを Fig. 2-5 に示す。

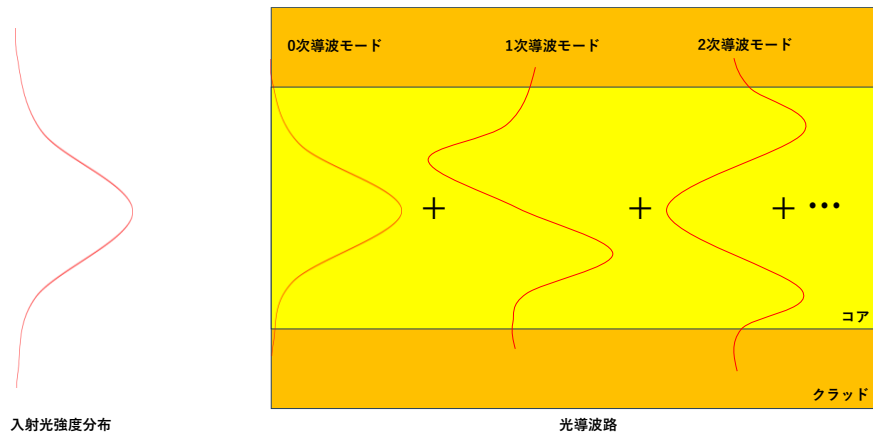


Fig. 2-5 光導波路に入射した光の固有モード展開イメージ

異なる光導波路間についても固有モード展開は成り立ち，結合元となる光導波路内を伝搬する各固有モードが，結合先となる光導波路が持つ固有モードそれぞれに分配される光強度について計算できる．したがって，光導波路間の接続損失を検討する際，各光導波路の断面にてそれぞれの固有モードを予め計算しておくことで，光導波路パラメータが変化した際の接続損失に関して，高速計算が可能となる．この光導波路断面パラメータの計算ソフトとして，Photon Design 社製の FIMMWAVE(ver. 8.4.0)を用いた．FIMMWAVE では複数の固有モード算出方式を有している．各固有モード算出方式の性能比較を Table 2-3 に示す[51]．

Table 2-3 FIMMWAVE の固有モード算出方式の比較[51]

Feature	FMM Solver	FDM Solver	FEM Solver	Effective Index Solver	FDM Fibre Solver	General Fibre Solver
Rectangular Geometry Waveguides	+++	+++	+++	++		
Cylindrical Geometry Waveguides – arbitrary Ne(r)	+	+	++		+++	+++
Mixed Geometry Waveguides (ellipses and polygons)	+	++	+++	+		
Graded index waveguides including diffused waveguides	+	+++	+++	++	++	++
Metals, gainy or absorbing waveguides (with Complex Engine option)	++	+++	+++	++	+++	
Anisotropic refractive index (diagonal permittivity tensor)	+	+++	+++		+++	
Full arbitrary permittivity and permeability tensors: - biaxially birefringent materials - optically active materials - ferromagnetic, ferroelectric, and magneto-optic materials			+++			
Bend modes	+++	++	++			
Compatibility with PMLs (with Complex Engine option)	++	+++	++	++	++	
Transparent boundary conditions (with Complex Engine option)	++	++				++
Periodic boundary conditions	+++	+++		+++		
Compatibility with FIMMPROP	+++	+++	+++	+++	+++	+++
Very thin layers	+++	++	++	+++	+++	+++

Table 2-3 のうち、GI 型光導波路の計算に適していること、さらには比較的高速な計算が可能な固有モード算出方式として、有限差分方式(Finite Difference Method : FDM)を選択した。ここで、固有モードについて考察する[52]。光伝搬方向を z 方向と定義し、また時間項については $\exp(i\omega t)$ として分離されているとする。このとき、ある単一波長に対してのマクスウェル方程式の解は次の式(2-5)で得られる。 $\varepsilon_m(x, y)$ は解の固有関数であり、 β_m は固有値である。

$$E(x, y, z) = \varepsilon_m(x, y) \cdot \exp(i\beta_m z) \quad (2-5)$$

式(2-5)より、固有モードは光伝搬方向に対して単調な依存性を有していることがわかる。この特性により、FIMMPROP を用いて固有モードを展開した際に、高速な計算が実現できることになる。一般的に光導波路はコア内に閉じ込められる導波モードとクラッドへ放射される放射モードを有しており、導波モードは離散的で有限であるのに対し、放射モードは無限である。シミュレーション上は、無限に存在する放射モードを考慮せず、計算領域を設定することで放射モードも離散的な扱いとしている。このとき、導波モードと放射モードは正規直交基底をなすことから、光導波路内のマクスウェル方程式の任意の解は z 方向に対して正の方向と負の方向に進むモードの和で表現され、電場に関しては次の式(2-6)で得られる。

$$E(x, y, z) = \sum_m \varepsilon_m(x, y) (c_m^+ e^{i\beta_m z} + c_m^- e^{-i\beta_m z}) \quad (2-6)$$

式(2-6)にて、 $\varepsilon_m(x, y)$ は m 次モードの電界分布、 β_m は m 次モードの伝搬定数、 c_m^+ 、 c_m^- はそれぞれ $+z$ 、 $-z$ 方向に進行する電場の振幅を示す。

上記のようにして FIMMWAVE で求めた固有モードを光伝搬方向に展開するソフトとして同社製の FIMMPROP(ver. 8.4.0)を用いている。FIMMPROP は FIMMWAVE と互換性を有しており、互いの計算結果を受け渡すことで効率的な光学シミュレーションを実現している。 z 方向に対して構造が変化する、つまり異なる光導波路間での接続の場合、異なる導波モード間の結合は散乱行列であらわされることになる。このとき、導波モード間の結合効率は結合元と結合先になるそれぞれのモードが示す電磁界強度分布の重なり積分によって得られる。散乱行列の適用により、光導波路のパラメータ(例えばコア幅)変更といった、一部の要素を変更して計算を行う際には、効率的に再計算することで計算時間が短縮できる。本研究では、第4章、第5章で複数の光導波路パラメータを変更した際の接続損失検討を行っており、上記特性を有する固有モード展開法が最適であると考えられる。

FIMMWAVE を用いて、Fig. 2-4 に示した二つの光伝送路の、伝搬光の光強度分布を計算した結果をモードフィールド径(Mode Field Diameter : MFD)の計算結果とともに Fig. 2-6 に

示す。MFD は光強度分布の広がりを示す指標であり、コア内の最大光強度を I_0 と定めた際の I_0 / e^2 の光強度を示す直径で定義される。

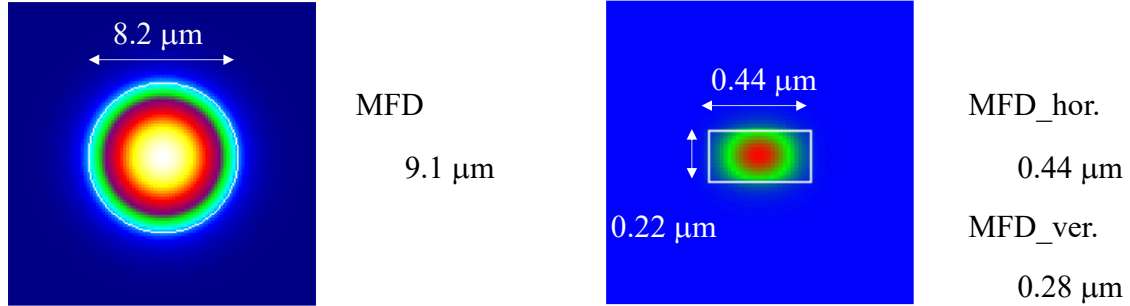


Fig. 2-6 シングルモード光ファイバと Si 光導波路の光強度分布と MFD 計算結果

なお、Fig. 2-6 に示した Si 光導波路の出射光強度分布はコア内に一つのピークが存在するように見えるが、実際にはコア幅方向に複数のピークが生じている。Si 光導波路コアからの出射光強度プロファイル計算結果を Fig. 2-7 に示す。ここで、視覚的に分かりやすくする為に、Fig. 2-7 に示したプロファイルは、0.04 μm 毎に計算した相対光強度を Excel 上で繋いでおり、実際の計算結果とは異なる。Fig. 2-7 より、水平方向では Si 光導波路のコア側面付近に強度ピークが生じており、また、垂直方向についてもガウス分布とは異なる強度プロファイルを示していることから、Si 光導波路については厳密には MFD を定義できない。したがって Fig. 2-6 では、コア内光強度の最大値に対して強度比 $1/e^2$ の値をとる幅、もしくは高さを MFD として便宜上設定している。

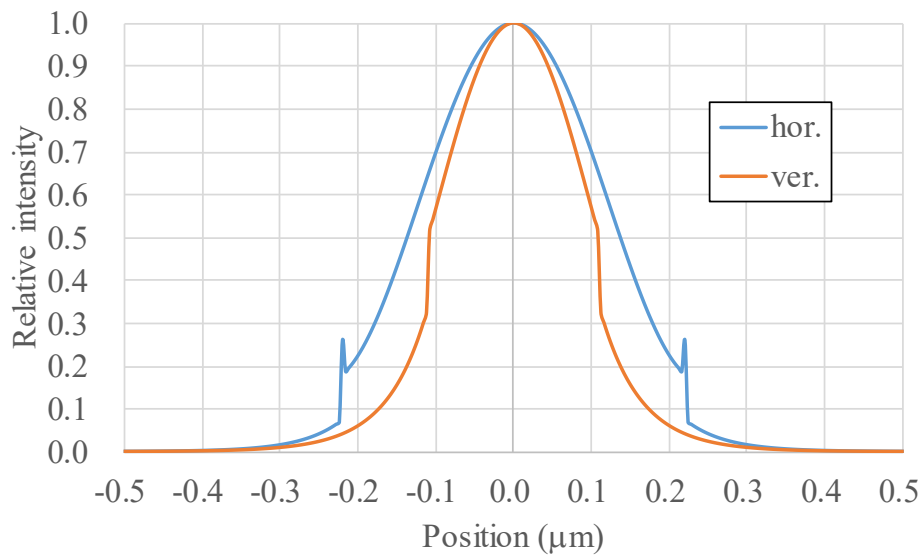


Fig. 2-7 Si 光導波路コアからの出射光強度プロファイル

ここで、光伝送路間の結合効率について理論的に考える。光伝送路に結合し、伝搬が許される光は、伝送路条件によって決定される導波モードで表される特定の形の電磁界分布を有する。そのため、ある伝送路を伝搬してきた光は、電磁界分布の異なる別の伝送路に結合する際、すべての光強度が結合することなく、結合先の伝送路内を伝搬可能な導波モード成分のみが結合することになる。このとき、結合効率 η は結合元伝送路の電場分布を $E_1(x,y)$ 、結合先伝送路の電場分布を $E_2(x,y)$ としたとき、式(2-7)の重なり積分で与えられる[12]。なお、式(2-7)にて「*」は複素共役を表し、伝送路間の屈折率の違いによるフレネル反射は考慮していない。

$$\eta = \frac{|\int dx \int dy E_1^*(x,y) E_2(x,y)|}{\int dx \int dy |E_1(x,y)|^2 \int dx \int dy |E_2(x,y)|^2} \quad (2-7)$$

2つの伝送路間の導波モードが一致するとき、つまり $E_1 = E_2$ の関係が成り立つとき、結合効率 η は1となりすべての光強度が結合することになる。光伝送路がマルチモードの場合は、各導波モード同士の結合効率に沿って、入射した光強度が分配されて伝搬することになる。一方、導波モードに結合できなかった成分は放射モードとしてコア内を伝搬することなく、やがて損失となり消失する。これを伝送路間の結合損失と呼び、 $1 - \eta$ で与えられる。したがって、結合損失を低減するには結合効率 η を高めることと同義であり、そのためには伝送路間の導波モードのプロファイルの一致率を高める必要があることがわかる。

ここで、Fig. 2-6 より、SMF と Si 光導波路は大きく導波構造が異なっており、両者を直接接続した際には大きな接続損失が生じることが想定される。実際に FIMMPROP を用いて、SMF と Si 光導波路間の直接接続モデルを Fig. 2-8 のように構築し、接続損失を計算した。

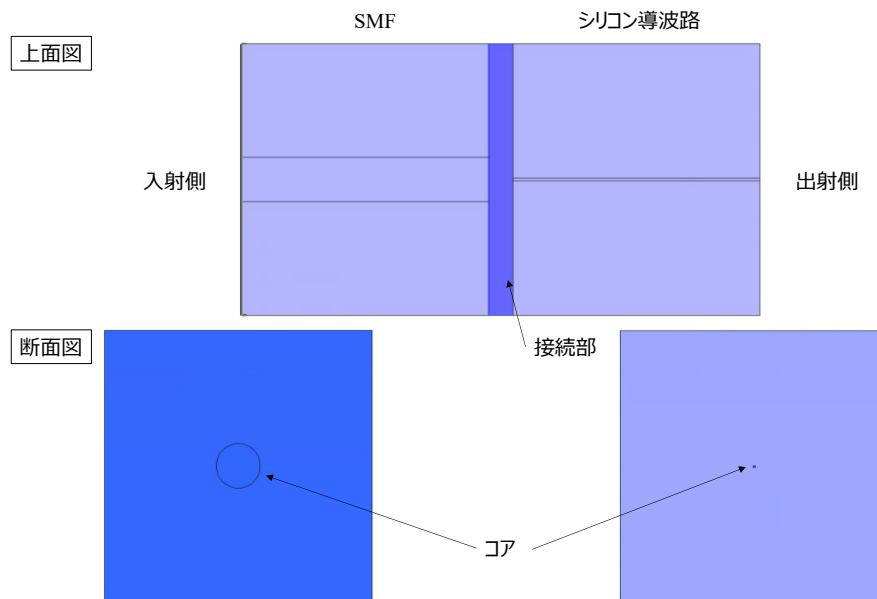


Fig. 2-8 SMF と Si 光導波路間の直接接続損失評価用シミュレーションモデル

この際、SMF の TE_{00} モードへの入射光強度を P_{in} 、Si 光導波路の基底モード(TE_{00}, TM_{00})からの合計出射光強度を P_{out} としたとき、接続損失 $L_{coupling}$ は式(2-8)で示される。

$$L_{coupling} = -10 \times \log_{10}(P_{out} / P_{in}) \quad (2-8)$$

Figure 2-8 のモデルに従い接続損失を計算した。計算した光伝搬の様子を Fig. 2-9 に示す。

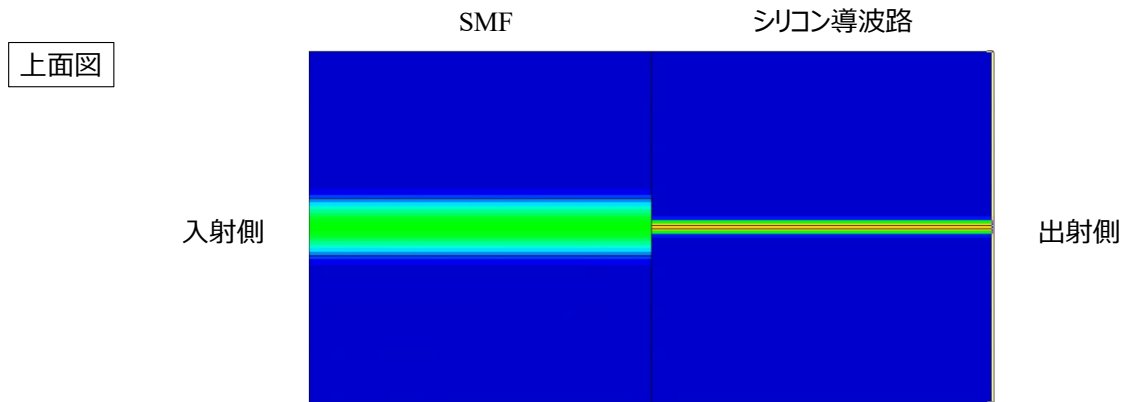
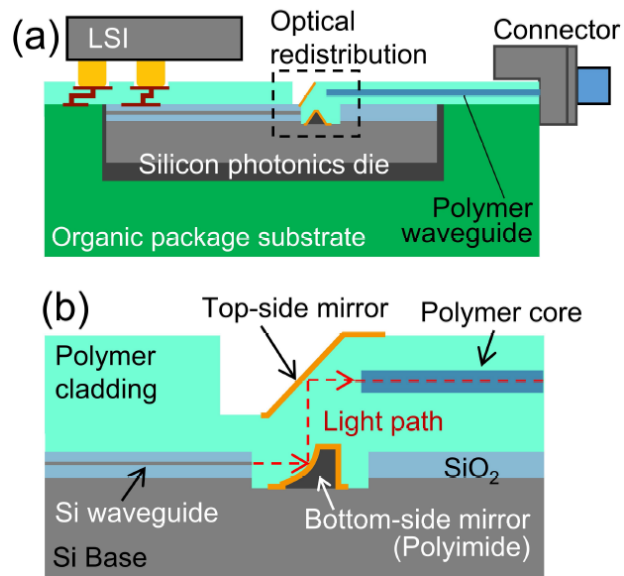


Fig. 2-9 SMF から Si 光導波路への光伝搬の様子

Figure 2-9 より、素子間の接続部で伝搬する光スポットが大きく異なっており、接続損失が生じていることが確認できた。実際、素子間の接続損失は 20 dB となっており、この損失は、20 dB 強[41]と見積もられているシステムで確保可能なロスバジェットと比較しても十分大きい。したがって第 1 章で述べたような両素子間の接続方式が複数提案されているものの、特に、CPO への適用を見据えた場合、インターポーザ上やパッケージ基板上といった狭小領域での接続が要求されることもあり、本論文執筆時点では接続方式の確立はなされていない。そこでポリマー光導波路の優れた加工性を活かし、省スペースかつプロセス適合性に優れた接続方式を提供可能であることが期待されている。

第 1 章で既に紹介した通り、ポリマー光導波路を活用した接続方式として、アディアバティック結合方式が広く検討されている[5]。ここではアディアバティック結合方式以外の、ポリマー光導波路を用いた光ファイバと Si 光導波路間の接続方式の代表例を紹介する。産業総合研究所では Si 光導波路から出射された光を、二つのミラー構造を介すことで、ポリマー光導波路に接続する構造を提案している[38]。ポリマー光導波路による光接続のイメージを Fig. 2-10 に示す。ミラー構造を最適化することにより、スポットサイズ変換および光路変換を行っており、広帯域な光に対して低接続損失を実現できる。

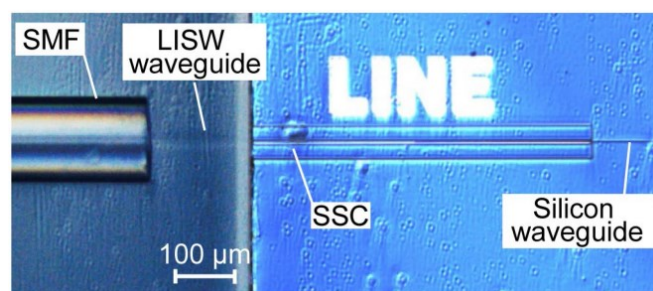


©2023 IEEE

Fig. 2-10 ポリマー光導波路を用いた光接続方式のイメージ

(a)断面図 (b)ミラー構造周辺の拡大図

宇都宮大学では、自己形成法によって作製されたポリマー光導波路を用いて、チップ-光ファイバ間接続に関する報告(Fig. 2-11)がなされている[53]. 自己形成光導波路では、光硬化性樹脂が連鎖的に重合を引き起こして硬化が進行する特性を利用し、入射した光の光軸に沿ってコアが形成される. 接続元と接続対象それぞれから光硬化性樹脂に対して光を入射させることで、軸ずれを補正しながら両者を効率的に接続することができ、光接続上で最大の課題となるアライメントを必要としない.



©2021 IEEE

Fig. 2-11 自己形成光導波路による光ファイバとチップ間接続の様子[53]

慶應義塾大学では、三次元配線性を有し、かつ円形コアを形成可能なモスキート法を開発している[54]. モスキート法を用いて作製された、ポリマー光導波路によるスポットサイズ変換の例を Fig. 2-12 に示す[55]. モスキート法によるポリマー光導波路作製プロセスは第3章で紹介するが、プロセス条件の最適化のみで三次元的なテーパ構造を形成可能なため、スポットサイズ変換を容易に実現できる光導波路作製法として注目を集めている.

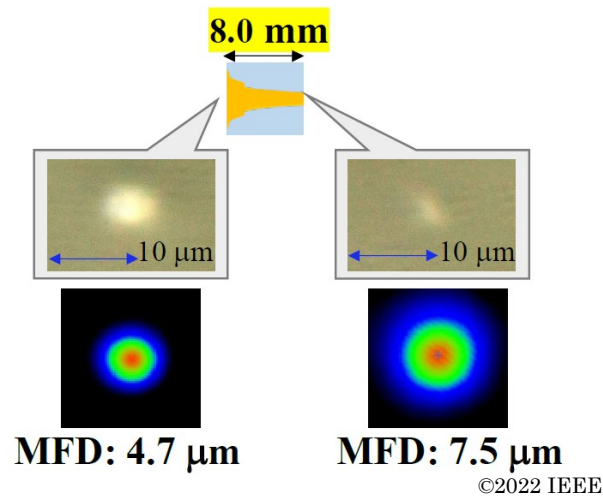


Fig. 2-12 Mosquito 法によって作製されたポリマー光導波路スポットサイズ変換器[55]

近年では、光ワイヤボンディング法による三次元光配線に関する研究も進み、高密度配線用素子として注目を集めている MCF との接続を可能にした報告もある[56]。ポリマー光導波路を用いた Si 光導波路と MCF 間接続の様子を Fig. 2-13 に示す。

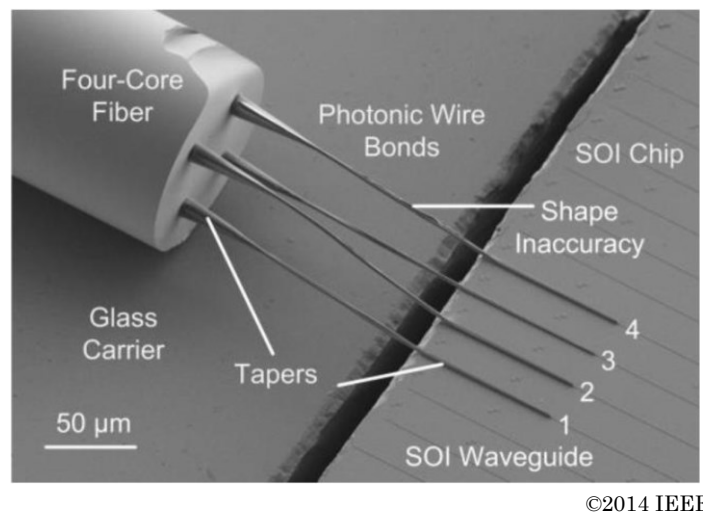


Fig. 2-13 ポリマー光導波路による Si 光導波路-MCF 間接続の様子[56]

これまでポリマー光導波路は安価で柔軟性を有する光伝送路として、比較的高い伝送帯域を必要としない領域での適用が検討されてきたが、近年では上記のようにハイエンド領域での適用が期待されている。ハイエンド領域にポリマー光導波路を適用する場合、省スペース性が期待されるチップ近傍への搭載が予想されるが、チップはデータ処理により発熱が生じ、最大でも 90 °C 程度[57]となることが知られている。一般的に光学用ポリマーは熱可塑性樹脂であることが多く、高温環境下での動作が懸念されるものの、これまでポリマー

光導波路は室温環境での光学特性に関する報告が主であり、高温環境下での動作に関して検討した例はほとんどない。特に、シングルモード動作が要求される CPO 用途では、ミクロンもしくはサブミクロンオーダーでのコア間位置合わせ精度が要求されるため、材料自身の耐熱性のみならず、光学特性、寸法の温度依存性を低減できるかが重要となる。

そこで本研究では、シングルモードポリマー光導波路と SMF との接続損失の温度依存特性を検討し、ポリマー光導波路の CPO 適用可能性を検討する。特に、ポリマー光導波路コアの断面形状や屈折率分布が、接続損失の温度依存性に与える影響を分析する。

2.6. 結言

本章では、光リンクを構成する光伝送路について、種類別に分類し、その構造と特性を示した。特に、CPO 実現に向けてポリマー光導波路が果たすべき役割を明確にし、シングルモードポリマー光導波路の温度依存性検討の意義を確認した。

参考文献

- [1] Y. Tachikawa, Y. Inoue, M. Ishii, and T. Nozawa, “Arrayed-waveguide grating multiplexer with loop-back optical paths and its applications,” *Journal of Lightwave Technology*, **14**(6), pp. 977-984 (1996).
- [2] M. Tanaka, N. Moriwaki, and S. Kuramochi, “Experimental Study of Transmission Signal Performance of Sub-2 Micron Fine-Wiring with Novel Structure,” 2024 IEEE 74th Electronic Components and Technology Conference (ECTC), pp. 1763-1767 (2024).
- [3] R. C. A. Pitwon, L. Brusberg, H. Schröder, S. Whalley, K. Wang, A. Miller, P. Stevens, A. Worrall, and A. Messina, “Pluggable Electro-Optical Circuit Board Interconnect Based on Embedded Graded-Index Planar Glass Waveguides,” *Journal of Lightwave Technology*, **33**(4), pp. 741-754 (2015).
- [4] L. Brusberg, H. Schröder, M. Töpfer, and H. Reichl, “Photonic System-in-Package Technologies Using Thin Glass Substrates,” 2009 11th Electronics Packaging Technology Conference, pp. 930-935 (2009).
- [5] R. Dangel, C. Berger, R. Beyeler, L. Dellmann, M. Gmur, R. Hamelin, F. Horst, T. Lamprecht, T. Morf, S. Oggioni, M. Spreafico, and B. J. Offrein, “Polymer-Waveguide-Based Board-Level Optical Interconnect Technology for Datacom Applications,” *IEEE Transactions on Advanced Packaging*, **31**(4), pp. 759-767 (2008).
- [6] N. Bamiedakis, J. Beals, R. V. Penty, L. H. White, J. V. Degroot, and T. V. Clapp, “Costeffective

multimode polymer waveguides for high-speed on-board optical interconnects,” *IEEE Journal of Quantum Electron.*, **45**(4), pp. 415-424 (2009).

[7] M. Iida, T. Yoshimura, and H. Nawata, “Self-Organization of Waveguides Toward Luminescent Targets in Novel Organic/Inorganic Hybrid Materials,” 2014 Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO) - Laser Science to Photonic Applications, SF1J.1 (2014).

[8] T. Mori, K. Moriya, K. Kitazoe, S. Takayama, S. Terada, M. Fujiwara, K. Takahama, and K. Choki, “Polymer Optical Waveguide Having Unique Refractive Index Profiles for Ultra High-Density Interconnection,” Optical Fiber Communication Conference (OFC) 2012, OTu11.6 (2012).

[9] R. Soref, “The Past, Present, and Future of Silicon Photonics,” *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, **12**(6), pp. 1678-1687 (2006).

[10] T. Tsuchizawa, K. Yamada, H. Fukuda, T. Watanabe, J. Takahashi, M. Takahashi, T. Shoji, E. Tamechika, S. Itabashi, and H. Morita, “Microphotonic Devices Based on Silicon Microfabrication Technology,” *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, **11**(1), pp. 232-240 (2005).

[11] W. Bogaerts, R. Baets, P. Dumon, V. Wiaux, S. Beckx, D. Taillaert, B. Luyssaert, J. V. Campenhout, P. Bienstman, and D. V. Thourhout, “Nanophotonic waveguides in silicon-on-insulator fabricated with CMOS technology,” *Journal of Lightwave Technology*, **23**(1), pp. 401-412 (2005).

[12] 国分泰雄, 伊賀健一, 池上徹彦, 荒川泰彦, 「光波工学」, 共立出版 (1999).

[13] 末松安晴, 伊賀健一, 「光ファイバ通信入門 改訂5版」, オーム社 (2017).

[14] K. Kikuchi, “Fundamentals of Coherent Optical Fiber Communications,” *Journal of Lightwave Technology*, **34**(1), pp. 157-179 (2016).

[15] F. Buchali, F. Steiner, G. Böcherer, L. Schmalen, P. Schulte, and W. Idler, “Rate Adaptation and Reach Increase by Probabilistically Shaped 64-QAM: an Experimental Demonstration,” *Journal of Lightwave Technology*, **34**(7), pp. 1599-1609 (2016).

[16] K. Makino, T. Ishigure, and Y. Koike, “Waveguide parameter design of graded-index plastic optical fibers for bending-loss reduction,” *Journal of Lightwave Technology*, **24**(5), pp. 2108-2114 (2006).

- [17] S. Y. Siew, B. Li, F. Gao, H. Y. Zheng, W. Zhang, P. Guo, S. W. Xie, A. Song, B. Dong, L. W. Luo, C. Li, X. Luo, and G. Q. Lo, “Review of Silicon Photonics Technology and Platform Development,” *Journal of Lightwave Technology*, **39**(13), pp. 4374-4389 (2021).
- [18] H. Hsia, S. P. Tai, C. S. Liu, C. W. Tseng, S.W. Lu, Y. Wu, C. C. Chang, Jason Wu, K. C. Yee, C. Y. Wu, C. H. Tung, and D. C. H. Yu, “Integrated Optical Interconnect Systems (iOIS) for Silicon Photonics Applications in HPC,” 2023 IEEE 73rd Electronic Components and Technology Conference (ECTC), pp. 612-616 (2023).
- [19] T. Ishigure, M. Satoh, O. Takanashi, E. Nihei, T. Nyu, S. Yamazaki, and Y. Koike., “Formation of the Refractive Index Profile in the Graded Index Polymer Optical Fiber for Gigabit Data Transmission,” *Journal of Lightwave Technology*, **15**(11), pp. 2095-2100 (1997).
- [20] 光回路実装技術委員会, “光回路実装技術ロードマップ 2019 年度版「50Tb/s 超データ伝送を支える高密度光エンジンと光・電気実装技術の展望」,” エレクトロニクス実装学会, (2020).
- [21] M. J. Li, “New Development Trends in Optical Fibers for Data Centers,” 2018 European Conference on Optical Communication (ECOC), pp. 1-3 (2018).
- [22] P. S. J. Russell, “Photonic-Crystal Fibers,” *Journal of Lightwave Technology*, **24**(12), pp. 4729-4749 (2006).
- [23] V. S. Chaudhary, D. Kumar, B. P. Pandey, and S. Kumar, “Advances in Photonic Crystal Fiber-Based Sensor for Detection of Physical and Biochemical Parameters—A Review,” *IEEE Sensors Journal*, **23**(2), pp. 1012-1023 (2023).
- [24] K. Mileńko, D. J. J. Hu, P. P. Shum, T. Zhang, J. L. Lim, Y. Wang, T. R. Woliński, H. Wei, and W. Tong, “Photonic Crystal Fiber Tip Interferometer for Refractive Index Sensing,” *Optics Letters*, **37**(8), pp. 1373–1375 (2012).
- [25] N. Yamanaka, T. Ishiyama, S. Okamoto, H. Tsuda, and K. Mukasa, “Disaggregated Computing Access Network using Newly Structured Hollow-Core fiber for AIoT Platform (Invited Talk),” 2024 IEEE Annual Congress on Artificial Intelligence of Things (AIoT), pp. 105-109 (2024).
- [26] T. Jasion, H. Sakr, J. Hayes, S. R. Sandoghchi, L. Hooper, and E. N. Fokoua, “0.174 dB/km

Hollow Core Double Nested Antiresonant Nodeless Fiber (DNANF),” Optical Fiber Communications Conference and Exhibition (OFC) 2022, Th4C.7 (2022).

[27] <https://www.mostcooperation.com/specifications/> (2024 年 8 月閲覧)

[28] T. Akashi, A. Inoue, and Y. Koike, “Low-Noise Graded-Index Plastic Optical Fiber Achieved by Specific Copolymerization Process,” *Journal of Lightwave Technology*, **39**(11), pp. 3553-3559 (2021).

[29] B. J. Puttnam, G. Rademacher, R. S. Luís, T. A. Eriksson, W. Klaus, Y. Awaji, N. Wada, K. Maeda, S. Takasaka, and R. Sugizaki, “High Data-Rate and Long Distance MCF Transmission with 19-Core C+L band Cladding-Pumped EDFA,” *Journal of Lightwave Technology*, **38**(1), pp. 123-130 (2020).

[30] G. Rademacher, B. J. Puttnam, R. S. Luís, J. Sakaguchi, W. Klaus, T. A. Eriksson, Y. Awaji, T. Hayashi, T. Nagashima, T. Nakanishi, T. Taru, T. Takahata, T. Kobayashi, H. Furukawa, and N. Wada, “Highly Spectral Efficient C + L-Band Transmission Over a 38-Core-3-Mode Fiber,” *Journal of Lightwave Technology*, **39**(4), pp. 1048-1055 (2021).

[31] S. Matsuo, K. Takenaga, Y. Sasaki, Y. Amma, S. Saito, K. Saitoh, T. Matsui, K. Nakajima, T. Mizuno, H. Takara, Y. Miyamoto, and T. Morioka, “High-Spatial-Multiplicity Multicore Fibers for Future Dense Space-Division-Multiplexing Systems,” *Journal of Lightwave Technology*, **34**(6), pp. 1464-1475 (2016).

[32] T. Saida, M. Abe, Y. Nasu, T. Shibata, and H. Takahashi, “Center wavelength adjustment of silica-based arrayed waveguide gratings by glass densification,” *IEEE Photonics Technology Letters*, **18**(9), pp. 1085-1087 (2006).

[33] A. Kaneko, T. Goh, H. Yamada, T. Tanaka, and L. Ogawa, “Design and Applications of Silica-Based Planar Lightwave Circuits,” *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, **5**(5), pp. 1227-1236 (1999).

[34] L. Brusberg, S. Whalley, R. C. A. Pitwon, F. R. Faridi, and H. Schröder, “Large Optical Backplane with Embedded Graded-Index Glass Waveguides and Fiber-Flex Termination,” *Journal of Lightwave Technology*, **34**(10), pp. 2540-2551 (2016).

[35] G. Djogo, J. Li, S. Ho, M. Haque, E. Ertorer, J. Liu, X. Song, J. Suo, and P. R. Herman, “Femtosecond Laser Additive and Subtractive Micro-Processing: Enabling a High-Channel-Density Silica Interposer for

Multicore Fibre to Silicon-Photonic Packaging,” *International Journal of Extreme Manufacturing*, **1**(4) (2019).

[36] Y. Tatara, and H. Hosokawa, “Fabrication of Replicated Polymer Optical Waveguide,” 2007 Digest of the IEEE/LEOS Summer Topical Meetings, TuB3.2 (2007).

[37] 小林壮一, 「ポリマー光導波路への期待とそれを支える材料技術」 応用物理学会 フォトニクス分科会 光学 37 巻 2 号 (2008).

[38] F. Nakamura, S. Suda, T. Kurosu, Y. Ibusuki, A. Noriki, A. Ukita, K. Takemura, T. Aoki, and T. Amano, “Thermal Characteristics of Mirror-Based Optical Redistribution for Co-Packaged Optics,” *Journal of Lightwave Technology*, **41**(19), pp. 6333-6340 (2023).

[39] N. Flöry, M. Halter, V. Strässle, F. Betschon, T. Alexoudi, Z. Charalampos, and T. Lamprecht, “Highly Reliable Polymer Waveguide Platform for Multi-Port Photonic Chip-Packaging,” 2021 IEEE 71st Electronic Components and Technology Conference (ECTC), pp. 1689-1694 (2021).

[40] N. Kohmu, M. Ishii, and T. Ishigure, “High-Density Electrical and Optical Assembly for Subminiature VCSEL-Based Optical Engine,” *IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology*, **12**(1), pp. 27-36 (2022).

[41] 光回路実装技術委員会, “光回路実装技術ロードマップ 2022 年度版「100 Tb/s 超スループットの実現に向けた光回路実装形態の予測と課題」,” エレクトロニクス実装学会 (2023).

[42] <https://www.microresist.de/en/produkt/ormocore-and-ormoclad/> (2024 年 8 月閲覧)

[43] H. Nawata, and K. Ohmori, “Organic-Inorganic Hybrid Material for Optical Interconnects and Application to Optical Coupling Method,” 2014 International Conference on Electronics Packaging (ICEP), pp. 707-711 (2014).

[44] S. Takenobu, T. Okada, S. Ohara, T. Barwicz, Y. Taira, T. Sayama, N. Imajyo, “Flexible Polymer Optical Waveguide for Si Photonics Interface,” 2015 Optical Fiber Communications Conference and Exhibition (OFC), Th3F.4 (2015).

[45] R. Dangel, A. L. Porta, D. Jubin, F. Horst, N. Meier, M. Seifried, and B. J. Offrein, “Polymer Waveguides Enabling Scalable Low-Loss Adiabatic Optical Coupling for Silicon Photonics,” *IEEE*

Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, **24**(4), pp. 8200211 (2018).

[46] 総務省「PFAS に関する今後の対応の方向性」

<https://www.env.go.jp/content/000150418.pdf> (2024 年 8 月閲覧)

[47] T. Lamprecht, M. Halter, D. Meier, S. Beyer, F. Betschon, R. John, C. Amb, B. Swatowski, and K. Weidner, “Highly reliable silicone based optical waveguides embedded in PCBs,” 2014 Optical Fiber Communications Conference and Exhibition (OFC), Th4J.5 (2014).

[48] <https://www.itu.int/rec/T-REC-G.652/> (2024 年 8 月閲覧).

[49] 河野健治, 鬼頭勤, 「光導波路解析の基礎」, 現代工学社 (1998).

[50] J. Petráček, and J. Luksch, “Bidirectional Eigenmode Propagation Algorithm for 3D Waveguide Structures,” 2011 13th International Conference on Transparent Optical Networks, We.A2.3 (2011).

[51] Photon Design, “FIMMWAVE A powerful waveguide mode solver,”

http://www.photond.com/products/fimmwave/fimmwave_features_200.htm (2024 年 11 月閲覧)

[52] Photon Design, “FIMMPROP A bi-directional optical propagation tool,”

https://www.photond.com/products/fimmprop/fimmprop_introduction_20.htm (2024 年 11 月閲覧)

[53] H. Terasawa, and O. Sugihara, “Near-Infrared Self-Written Optical Waveguides for Fiber-to-Chip Self-Coupling,” Journal of Lightwave Technology, **39**(23), pp. 7472-7478 (2021).

[54] K. Soma, and T. Ishigure, “Fabrication of a Graded-Index Circular-Core Polymer Parallel Optical Waveguide Using a Microdispenser for a High-Density Optical Printed Circuit Board,” in IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, **19**(2), pp. 3600310 (2012).

[55] T. Ishigure, “GI-core Multimode and Single-mode Polymer Waveguides for High-density Co-packaging,” 2022 Optical Fiber Communications Conference and Exhibition (OFC), W1E.3 (2022).

[56] N. Lindenmann, S. Dottermusch, M. L. Goedecke, T. Hoose, M. R. Billah, T. P. Onanuga, A. Hofmann, W. Freude, and C. Koos, “Connecting Silicon Photonic Circuits to Multi-Core Fibers by Photonic Wire Bonding,” Journal of Lightwave Technology, **33**(4), pp. 755-760 (2014).

- [57] T. Chen, and B. Huang, “Thermal characterization of 2.5D FCBGA for GPU application,” 2020 IEEE 22nd Electronics Packaging Technology Conference (EPTC), pp. 479-482 (2020).

第 3 章

シングルモードポリマー光導波路の作製

3.1. 緒言

本研究では、CPO へのポリマー光導波路適用を見据え、ポリマー光導波路の光学特性の温度依存性に着目する。前章にて、CPO 向け接続素子として、ポリマー光導波路が着目されている背景を説明し、ポリマー光導波路にもシングルモード動作が求められていることを示した。そこで本章では、ポリマー光導波路の作製法として知られる複数手法について概説したのち、本研究の新規性でもある SI 型と GI 型の比較の為、2 種の作製法を選定し、詳細な作製手法を解説する。最後に、それぞれの手法にて複数のコア幅を有するポリマー光導波路を実際に作製し、光学特性を実測する。作製したポリマー光導波路がシングルモード動作することを確認すると同時に、得られた MFD がシミュレーションと一致していることを示す。

3.2. ポリマー光導波路の作製手法

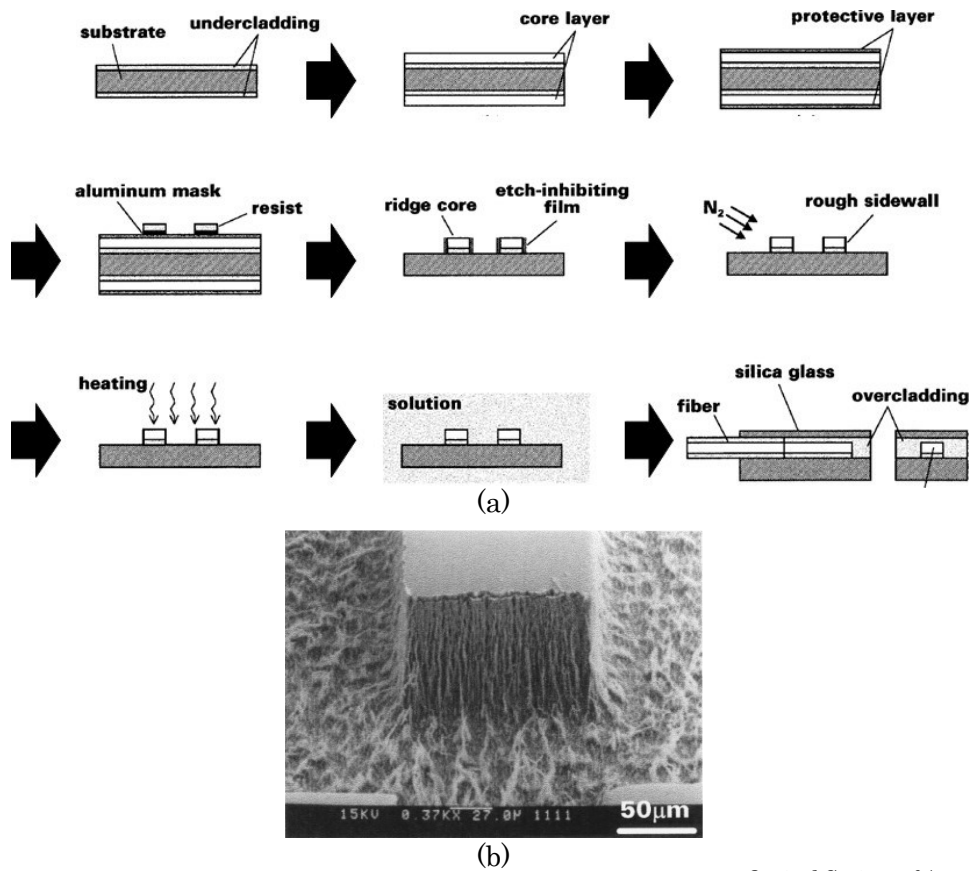
はじめに、これまで各社、研究機関より報告されているポリマー光導波路作製法から主なものを抽出し、概説する。特に、ポリマー光導波路コア内の屈折率分布は作製法に大きく依存しており、作製法の選択は本研究を進めるうえで非常に重要な要因となる。今回、CPO へのシングルモードポリマー光導波路適用を検討するべく、SI 型と GI 型のコア間の光学特性の違いに着目して評価する。したがって、両屈折率分布間の光学特性差異を評価する上で、再現性の高い作製法を選択することとした。

3.2.1. SI 型ポリマー光導波路の作製法

最も主要なポリマー光導波路の作製法として広く知られるフォトリソグラフィ法では、マスクを介した露光による、ポジ/ネガパターンによる光導波路形成を行っており、コア内屈折率が一定の SI 型のコアが形成される。フォトリソグラフィ法の中でも、フォトレジスト使用の有無によってさらに細分化され、レジストを使用するプロセスを反応性イオンエッチング(Reactive Ion Etching : RIE)法、使用しないプロセスを直接露光法と呼ぶ。

◆ RIE (Reactive Ion Etching) 法

既存 CMOS プロセス及び装置の流用が可能な RIE 法は、最も広く適用されているポリマー光導波路作製法の一つである[1]。高精度な加工が可能という特徴から、Si 光導波路等の超細線光導波路の作製への適用例がある。RIE 法によるポリマー光導波路作製プロセスを Fig. 3-1 に示す。



©1997 Optical Society of America

Fig. 3-1 RIE 法によって作製された光導波路[1]

(a)光導波路作製プロセス (b)作製されたリッジ導波路

◆ 直接露光法

直接露光法では上述の RIE 法と異なり、フォトレジストを使用せず、コア材として感光性樹脂を使用する。フォトレジストを使用しないことで、低コストかつ低環境負荷でポリマー光導波路を作製することができる。また、プロセスの簡略化により、大型製造設備を有さずとも、光導波路の作製が可能となっていることから、特に研究機関等で広く用いられることが多い。導波路材料の塗布・硬化を繰り返すプロセスの為、積層化も容易である[2]。

一方で、直接露光法では溶媒によるウェットエッチングプロセスを必要とし、RIE 法でのドライエッチングのような、アスペクト比の高い高精度なコア形成は得意としていない。また、積層化は容易であるものの、層間のチャネル接続は困難であり、平面内での導波構造形成に限られる。

直接露光法によるポリマー光導波路作製プロセスを Fig. 3-2 に示す。

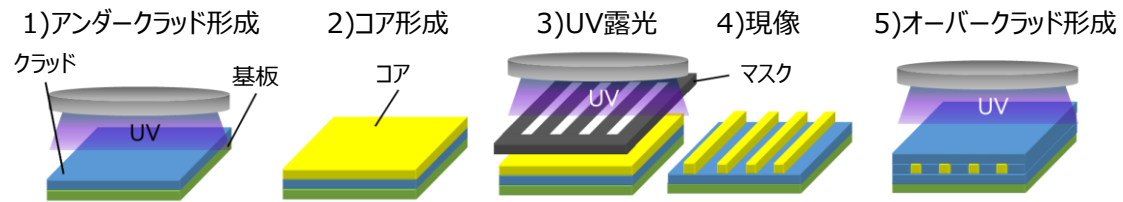


Fig. 3-2 直接露光法によるポリマー光導波路作製プロセス

上記2手法はSI型ポリマー光導波路の作製手法として広く用いられており, 既存のCMOSプロセスとの適合性が高いことから安価で大量に製造することが可能である. 一方で, ポリマー光導波路のコアがSI型であるが故の課題も有しており, その一つがコア/クラッドの界面荒れである. SI型コアでは, コア/クラッド界面の屈折率差による全反射を利用して光が伝搬するため, 界面荒れが伝搬損失に直結してしまう. また, 前章で述べたようにSI型光導波路はモード分散の影響を受けやすく, 今後広帯域化が進むであろう光リンク内素子として, 帯域確保のためのボトルネックとなることが懸念されている.

今回, 後述するGI型ポリマー光導波路との比較の為, 材料選択性が広く, マスク露光で再現性高くポリマー光導波路を作製可能な直接露光法をSI型ポリマー光導波路用作製法として選択した.

◆ 光ワイヤボンディング法

Vanguard 社によって発表された, 3次元配線を可能とするポリマー光導波路作製法である[3]. クラッド溶液内で露光焦点を走査させることで硬化・屈折率変化を起こすことでコアを形成する. 接続対象を自由に選択できるため, 同一パッケージ上に形成されていない異なる素子間を接続可能であり, また, Fig. 3-3 に示すようにガラス-Si 光導波路間の直接接続例も報告されている[4]. 焦点走査によるコア形成手法由来の量産性への懸念や材料選択性の狭さ等, 課題を有しているものの, 他手法では困難な接続を解決可能なポリマー光導波路製法として近年注目を集めている.

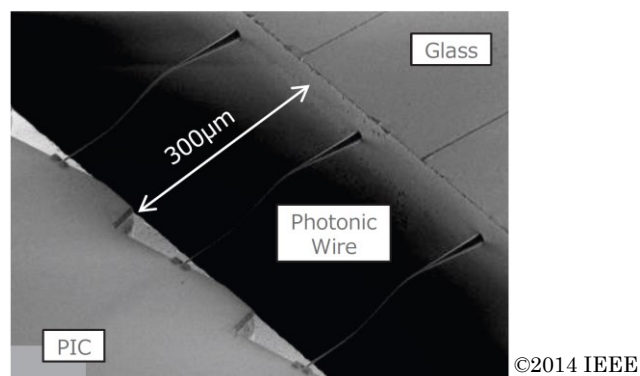


Fig. 3-3 光ボンディング法によって作製されたポリマー光導波路[4]

3.2.2. GI 型ポリマー光導波路の作製法

GI 型はコア内で屈折率が形成されていることを特徴とし、光がコア内を屈曲しながら伝搬していくことから、マルチモードでは低伝搬損失や低モード分散が期待できる構造である。GI 型はその特殊性から安定して作製可能な手法は限られており、代表的な 3 作製法を紹介する。

◆ インプリント法(ソフトリソグラフィ法)

インプリント法は、GI 型のコアを有するポリマー光導波路を作製する手法として、古くより知られてきた簡便な作製手法である[5, 6]。インプリント法による作製手順を Fig. 3-4 に示す。

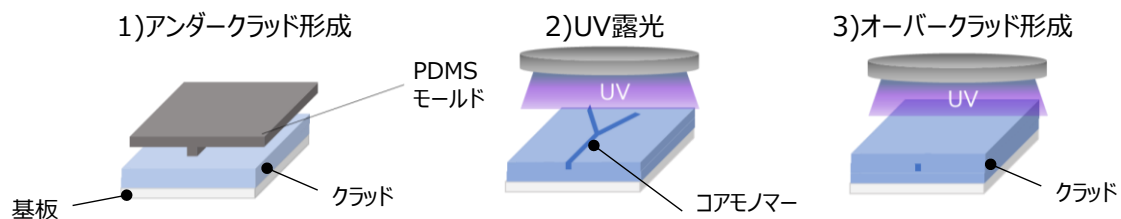


Fig. 3-4 インプリント法によるポリマー光導波路の作製プロセス

はじめに、基板上にアンダークラッドとなるクラッドモノマーを塗布したのち、上部からモールドを押し当てる。この際、PDMS(ポリジメチルシロキサン)製のモールドにはあらかじめ凸状パターンが形成されており、押し当てた状態で紫外線露光することでクラッドモノマーを硬化させることで、凹状にパターンが転写されたアンダークラッドを得ることができる。つづいて、アンダークラッド上の溝にコアモノマーを充填・余分なコアモノマーを除去することで、モールドに形成された凸状パターンと同じパターンを有するコアパターンを得ることができる。紫外線露光でコアを形成したのち、最後にオーバークラッドとなるクラッドモノマーを再度塗布して硬化させることで、導波路構造が完成する。作製プロセスの内、紫外線硬化時の露光強度や時間を調整することで、モノマーの硬化度合いを制御することができる。モノマーを完全に硬化した際には、SI 型のコアを得ることができる一方で、半硬化に留めることで、モノマーが拡散する余地を残すことができる。この時、アンダークラッド-コア、及びコア-オーバークラッド間で屈折率の異なるモノマー同士の相互拡散が生じ、コア・クラッドの界面付近にモノマーの濃度分布に起因する、屈折率の分布を形成することができる。これらモノマー半硬化の状態は、最終プロセスである露光及びポストバークによって完全硬化し、屈折率分布状態も固定され、矩形 GI 型コアを有するポリマー光導波路を得ることができる。したがって、インプリント法は、プロセス条件の最適化により矩形 SI 型と矩形 GI 型を作り分けることが可能なユニークな作製法であるといえる。実際にインプリント法のプロセス条件を変化させることで屈折率分布を変化させた、ポリマー光導波

路の作製例を Fig. 3-5 に示す。

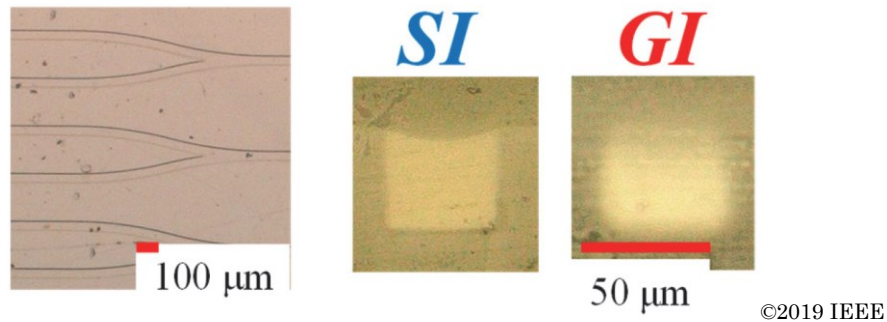


Fig. 3-5 インプリント法で作製されたポリマー光導波路の上面図と断面図[6]

一方で、導波構造はモールドの形状によって決定され、3次元光配線の作製は困難であること、また、コアモノマー除去工程で十分な除去がなされていない場合、隣接コア同士でチャネルが発生し、クロストーク発生要因となりうる等、実用上障壁となる課題がある。

◆ モスキート法

モスキート法は、慶應義塾大学の石樽研究室によって開発されたポリマー光導波路の作製法である[7]。モスキート法によるポリマー光導波路の作製手順を Fig. 3-6 に示す。はじめに、基板上にシリコンゴム製の枠を設置し、その枠内に液状のクラッドモノマーを充填する。つづいて、シリンジ内に充填されたコアモノマーを、クラッドモノマー内に直接挿入されたニードルを通して吐出させながらニードルを走査させることで、クラッド内にコアパターンを形成する。最後に紫外線照射・ポストバークを行い、モノマーを完全硬化させることでポリマー光導波路が完成する。

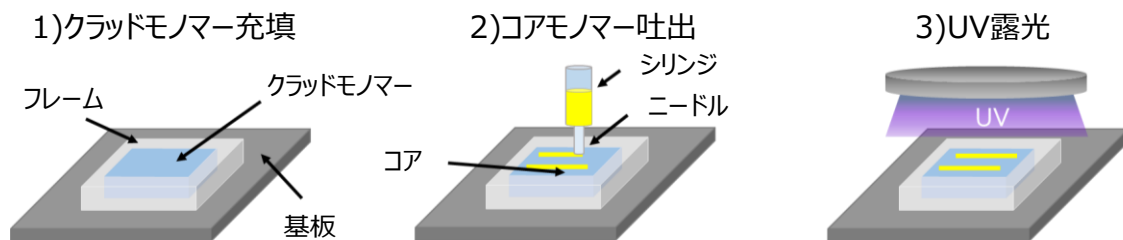
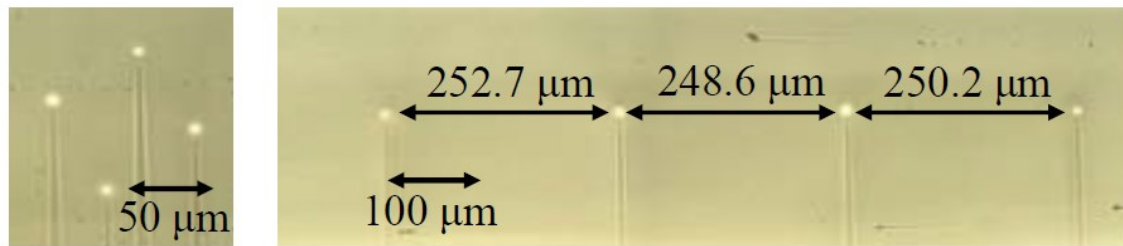


Fig. 3-6 モスキート法によるポリマー光導波路の作製プロセス

本手法で作製されるコアは表面張力により最も表面積を小さくできる円形状を有していることから、円形コアを有する汎用光ファイバとの良好な接続特性が期待できる。また、液状クラッド内への液状コア吐出という、非常にユニークな手法で作製されるため、両材料間での相互拡散が生じやすく、GI型のコアを容易に形成可能である[8]。その他本手法の特徴

として、ニードル走査経路をプログラムで制御することができることから、極めて高いパターン自由度を有しており、他プロセスでは作製が困難な三次元的なパターン形成が可能である点が挙げられる。近年では配線密度向上の為、MCFの導入も議論されており、モスキート法によって作製される三次元コア配列を有するポリマー光導波路は、端面における二次元コア配列を有するMCFとの接続素子としても注目を集めている。実際に、モスキート法を用いて作製された、MCFとの接続を想定した3次元光導波路の断面図をFig. 3-7に示す[9]。



©2022 IEEE

Fig. 3-7 モスキート法によって作製されたMCF接続用ポリマー光導波路の断面図[9]

◆ フォトアドレス法

フォトアドレス法は、住友ベークライト株式会社によって報告されているポリマー光導波路の作製法である[10]。フォトアドレス法によるポリマー光導波路の作製手順をFig. 3-8に示す。

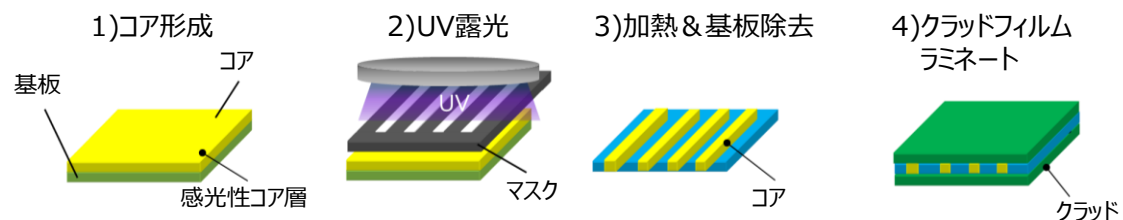


Fig. 3-8 フォトアドレス法によるポリマー光導波路の作製プロセス

はじめに、基板上にコアワニス塗布し、プリベーク後にフォトマスクを介して紫外線露光を行う。露光後にベーキングすることで硬化反応が進行し、紫外線照射された露光部の屈折率が低下し、未露光部との屈折率差が生じることで幅方向の導波構造が形成される。最後に、パターンニングされたドライフィルムをクラッドフィルムでラミネートすることで、厚み方向の導波構造を形成して光導波路が完成する。

本手法で作製されるコアは、露光部の-未露光部間界面に屈折率分布が形成されることで、幅方向のみに屈折率分布を有する(以降、水平GIと称する)非常に特徴的なコアを有する。また、屈折率調整剤の添加及び拡散によってコア厚み方向への屈折率分布形成も実現して

いる[11]. 住友ベークライト社ではこれら GI 型コアの特徴を活かし、チャンネル間交差やシヤッフリング機能を有するポリマー光導波路特性に関する報告も為されている[12]. フォトアドレス法を用いて作製された全周 GI 型ポリマー光導波路の屈折率分布と断面図を Fig. 3-9 に示す. また, フォトアドレス法はノルボルネンをベースとした材料を適用しており, 材料起因の高い耐熱性と, 側鎖部への機能付与による機能性との両立を可能としている.

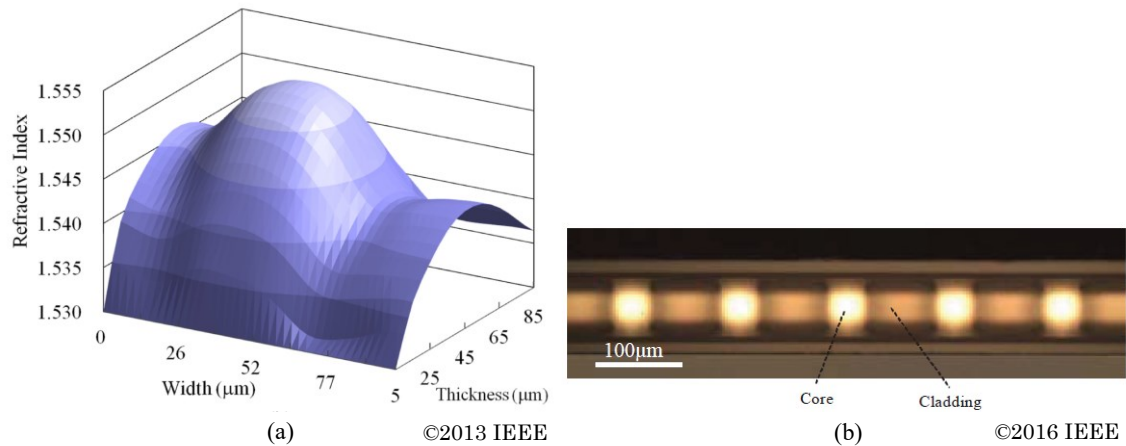


Fig. 3-9 フォトアドレス法で作製された全周 GI 型ポリマー光導波路

(a)屈折率分布[11] (b)断面図[12]

フォトアドレス法はパターン設計の高い自由度を有しており, また量産性の高さから, ポリマー光導波路の製品を展開する上で適した手法であると考えられているが, これまでその検討はマルチモード光導波路を中心に検討されており, シングルモード光導波路の検討や光学特性に関する報告はほとんどなされていない. そこで本研究では, GI 型の屈折率分布を再現性の高いマスク露光で形成可能なフォトアドレス法に着目することとした.

3.3. シングルモードポリマー光導波路の作製

つづいて 3.2 章で選定した 2 手法を用いて, シングルモードポリマー光導波路の作製を行うこととした.

3.3.1. 直接露光法による光導波路作製

・光導波路材料の選定

直接露光法に適用する光導波路材料として必要な特性は, ①光反応性材料 ②使用波長帯での高い透過率 の 2 つが挙げられる. Micro resist technology 社により開発・販売されている OrmoCore, OrmoClad(以降, まとめて ORMOCER®樹脂と呼称する)は上記特性を満たす光導波路材料として期待されている. Micro resist technology 社により公開されている, OrmoCore, OrmoClad の特性を Table 3-1 に示す[13].

Table 3-1 OrmoCore, OrmoClad の物性表

	OrmoCore	OrmoClad
Viscosity [Pa·s]	2.9 ± 0.4	2.5 ± 1.0
Film thickness upon spin coating [μm]		
3000 rpm	30	30
6000 – 1000 rpm	20 – 90	20 – 90
Spectral sensitivity photo-curing [nm]	300 – 390	300 – 390
Recommended exposure dose [mJ/cm ²]	1000 – 3000	1000 – 3000
Volume shrinkage [%]	2 - 5	2 - 5
Refractive index (cured, 589 nm)	1.555	1.537
Abbe number	34	33
CTE (20-150 °C) [ppm/K]	150	180
dn/dT [10 ⁻⁴ /K]	-2.2	-2.7
Young's modulus [GPa]	~1	~0.5
Hardness by indentation [MPa]Shore D	~53 75	~24 80
Thermal stability	Up to 270 °C (short term)	Up to 270 °C (short term)
Replication with PDMS molds (no oxygen sensitivity)	No	No
Resolution	Down to 100 nm feature sizes	Down to 100 nm feature sizes
Shelf-life	6 months	6 months
Solvent-free	Yes, ready-to-use solutions	Yes, ready-to-use solutions

ORMOCER®樹脂は通信波長帯である 1310 nm 帯で低損失を示しており[14,15], また, 短時間ながらも 270 °C までの耐熱性を有していることから, プロセス適合面で重要なはんだリフロー耐性を示す. ORMOCER®樹脂特性の詳細は明らかにはされておらず, また光導波路化した状態での環境試験結果等の報告は未だないものの, ポストキュア温度が 150 °C であることや, 上述のリフロー耐性から, 耐環境性に優れた材料であると類推できる, したがって, ORMOCER®樹脂は CPO 向けポリマー光導波路用材料として有望であるといえる. 以上の理由より, 本研究では, 直接露光法で作製するポリマー光導波路用材料として ORMOCER®樹脂を選定した.

・光導波路設計値の設定

直接露光法でシングルモード光導波路を得るべく, 光導波路の設計値をシミュレーションで設定することとした. シミュレーションソフトは Photon Design 社製のモードソルバーである FIMMWAVE を使用した.

はじめに, シミュレーションに使用したパラメータを Fig. 3-10 に示す.

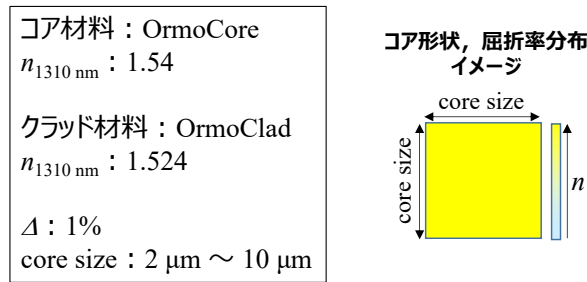


Fig. 3-10 シミュレーション条件

このとき，ORMOCER®樹脂の 1310 nm 帯の屈折率情報として[15]を参照した．ここで，コア断面形状はコア幅とコア厚が同一の正方形，また，オーバークラッドおよびアンダークラッドの屈折率は同一とした．FIMMWAVE で Core size を変化させたときの，ポリマー光導波路コアが持つ伝搬モードの実効屈折率を計算した結果を Fig. 3-11 に示す．

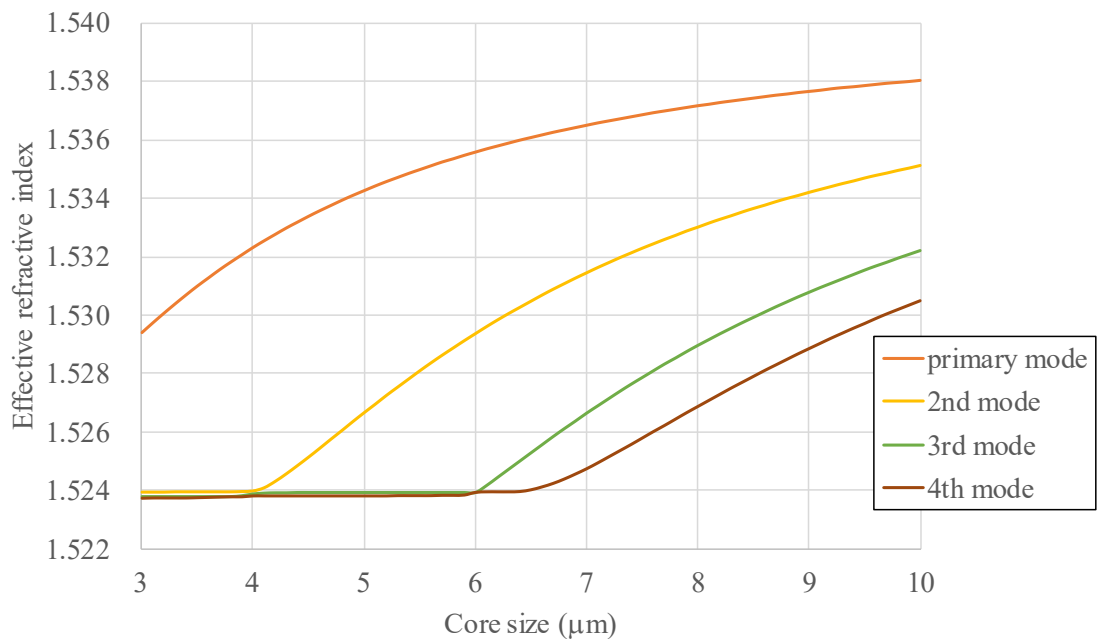


Fig. 3-11 Core size と実効屈折率の関係性

Figure 3-11 より，Core size の増大とともに，高次モードが発生し，マルチモード化していくことが確認できる．また，Fig. 3-11 より，Core size = 4.0 μm の時に高次の伝搬モードが立ちあがることが判明した．そこで，直接露光法で作製するコアサイズ的设计値を 4.0 μm 以下とした．

・光導波路の作製

直接露光法によるポリマー導波路作製工程の概略図と作製条件を Fig. 3-12 に示す．作製条件は Micro resist technology 社が示す推奨条件をもとに設定した．なお，シリコン基板とポリマー間の密着性向上の為，信越化学工業社製のシランカップリング剤 KBM-503(3-メタクリロキシプロピルトリメトキシシラン)を用いた表面処理を，アンダークラッド塗布前に施した．また，現像液として，推奨現像液の Ormodev の代わりに，入手が容易かつ，Ormodev の構成材料である 2-Propanol と 4-Methyl-2-Pentanone の 1:1 混合液を使用した．

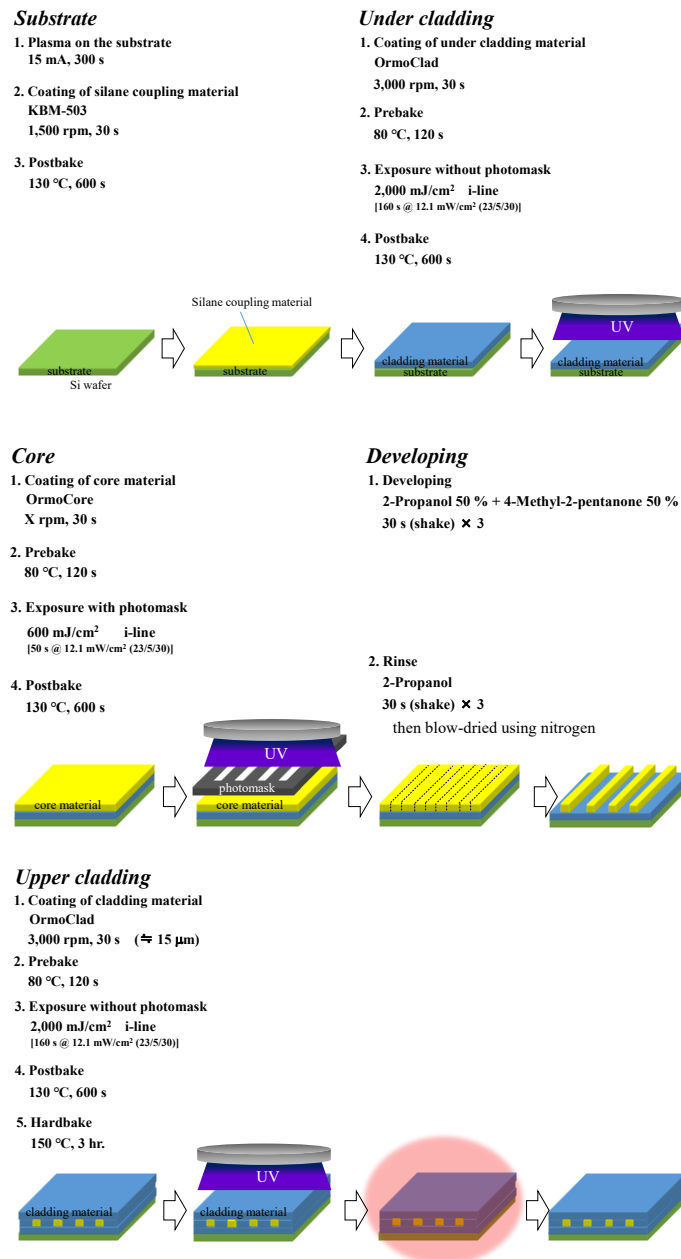


Fig. 3-12 直接露光法による ORMOCER®樹脂を用いたポリマー光導波路作製プロセス

Figure 3-12 に示したプロセスのうち、露光はマスクパターンをコアに転写するプロセスであり、解像度高く転写することが求められる。UV 露光には平行度の高い光を照射しているが、解像度を最大化するためにはフォトマスクと露光対象を完全に接着させる(コンタクト露光)必要がある。しかしながら直接露光法では、露光対象のコア/クラッド材料は硬化前の液状であり、フォトマスクと接着させると厚み制御が困難となる。そこで、本研究では Fig. 3-13 に示すように、スペーサを用いてフォトマスクと露光対象間に微小な空隙を設定することとした。この手法をプロキシミティ露光法という。プロキシミティ露光法では、フォトマスクを透過した光が露光対象に達するまでに、回折による拡がりが生じ、露光強度分布が変化する。フォトマスクと露光対象間のギャップが大きいと、露光強度分布が山状になだらかになる。したがって、シングルモードのような狭小領域のみをマスクしているフォトマスクでは、材料硬化の為に必要な露光強度が得られず、コアが形成されない懸念がある。

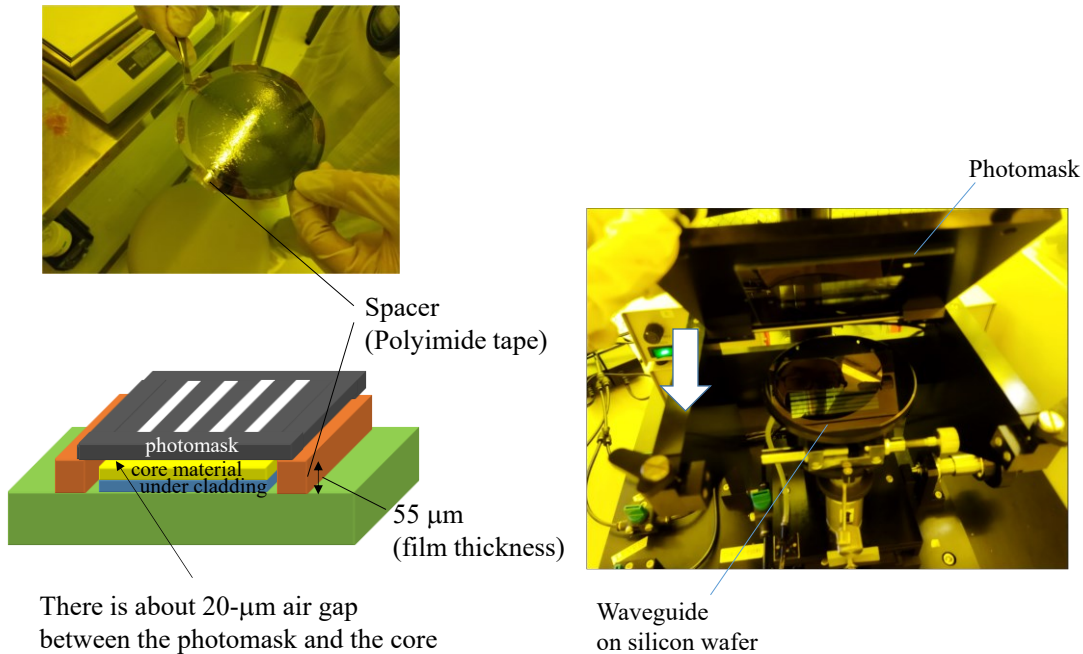


Fig. 3-13 プロキシミティ露光のセットアップ

はじめに、直接露光法によるコア形成を確認すべく、5,000 rpm でコアをスピコートし、現像工程後、オーバークラッドを塗布する前にハードベークした光導波路断面図を Fig. 3-14 に示す。

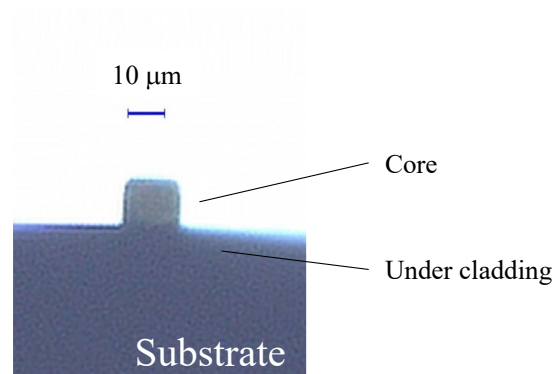


Fig. 3-14 コア現像後の光導波路断面画像

Figure 3-14 より，コアが凸形状で形成されており，推奨現像液である Ormodev の代替現像液を使用した場合であっても，パターンが形成できていることを確認した．つづいて，コア厚み条件出しの為，コア塗布工程時のスピncコート回転速度を変更し，4 水準のコア厚みを有するポリマー光導波路を作製した．作製時のスピncコート回転速度と，作製されたポリマー光導波路断面図，顕微鏡による光導波路コア厚みの測定結果($N = 4$)を Fig. 3-15 にまとめた．

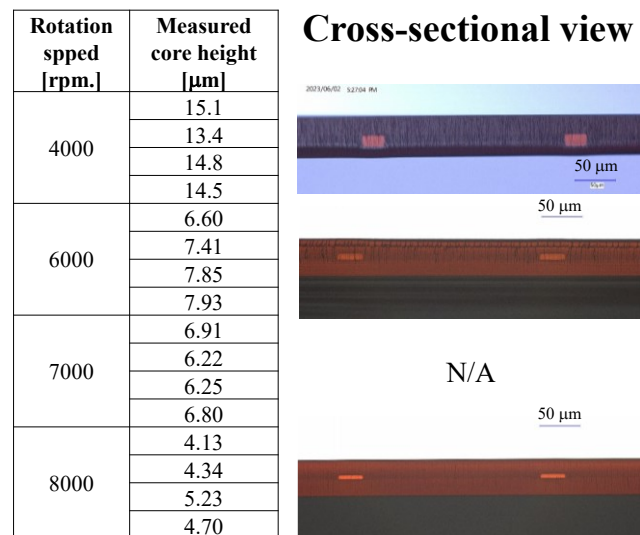


Fig. 3-15 スピncコート回転速度と作製されたポリマー光導波路コアの厚さ測定値

Figure 3-15 より，回転速度とコア厚みには相関があることが確認できる．上記結果に Fig. 3-14 で示した回転速度 5,000 rpm のコア厚み結果を加え，回転速度とコア厚みの関係性を Fig. 3-16 にまとめた．

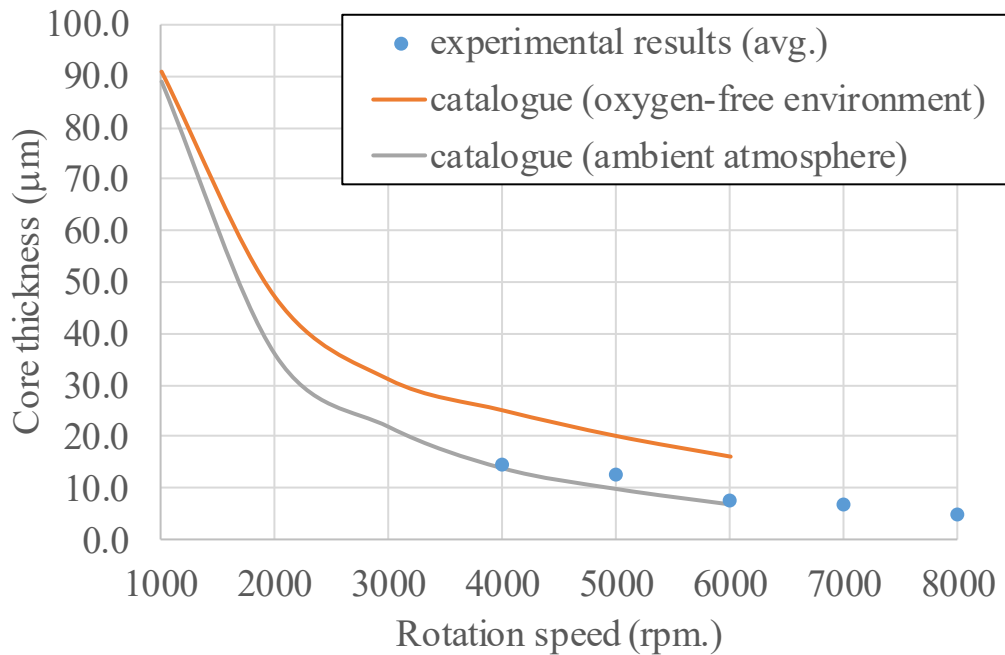


Fig. 3-16 スピンコート回転速度とコア厚みの関係性

比較の為、Micro resist technology 社提供のデータを Fig. 3-16 にカタログ値として追加している。Fig. 3-16 より、ORMOCER®樹脂は酸素による硬化阻害の影響で、大気中プロセスでは不活性ガス中プロセスで作製した導波路厚みと比べ薄膜化する傾向が見られている。本研究で作製した光導波路のコア厚みは、大気中プロセスの提供データ傾向と一致している。これは本研究での露光法が、先述の通りプロキシミティ露光であり、マスクとコア材料間に空隙が存在する為である。以上より、光導波路のコア厚みはスピンコート時の回転速度によって制御でき、また、Micro resist technology 社提供の大気下データと一致していることが確認できた。

しかしながら、Fig. 3-15 より、回転速度 8,000 rpm であっても平均膜厚 $4.35\ \mu\text{m}$ であり、3.2 で設定した設計値コアサイズ $4.0\ \mu\text{m}$ を上回っている。今回スピンコートに使用した装置の回転速度上限は 8,000 rpm であるため、これ以上の薄膜化は困難であり、現処方ではシングルモード光導波路を作製できないことが判明した。

そこで ORMOCER®樹脂を使用してシングルモード光導波路を作製するための方策をまとめなおした。

・比屈折率差の調整

Figure 3-10 のパラメータで作製したポリマー光導波路では、コア/クラッドともにピュアな OrmoCore および OrmoClad を使用していたため、比屈折率差 Δ が 1.0% とシングルモード条件としては比較的大きい。そのため、光導波路のシングルモード化のためにはコアサイズ

を $4.0\ \mu\text{m}$ 以下と小さくする必要があった。比屈折率差 Δ が大きい場合、コア内への光の閉じ込め効果が強くなり、曲げ損失の低減効果が期待できる。一方で、比屈折率差 Δ が小さい場合、シングルモード条件が緩和され、比較的大きいコアサイズであってもシングルモード動作を可能とする。この比屈折率差 Δ は導入する光リンクによって最適化が必要な為、都度設計する必要があるが、本研究では一般化の為、汎用シングルモード光ファイバである G.652 ファイバをモデルとし、比屈折率差 Δ もシングルモード光ファイバと同等の 0.4% を設計値とすることとした。

あらためてクラッドの屈折率を調整し、比屈折率差 $\Delta = 0.4\%$ としたときのパラメータを Fig. 3-17 に、実効屈折率とコアサイズの関係性を計算した結果を Fig. 3-18 に示す。

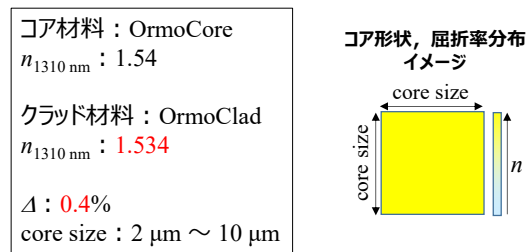


Fig. 3-17 比屈折率差調整後のシミュレーション条件

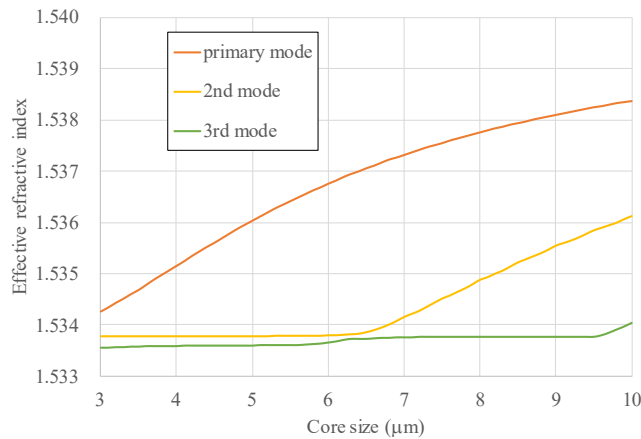


Fig. 3-18 SI 型ポリマー光導波路コアが示す分散曲線

Figure 3-18 より、比屈折率差 $\Delta = 0.4\%$ のとき、ポリマー光導波路のシングルモード境界となるコアサイズは $6.5\ \mu\text{m}$ であり、Fig. 3-11 で示した比屈折率差 $\Delta = 1\%$ の結果と比較して、シングルモード動作するコアサイズの領域が拡大したことがわかった。これは第 2 章すでに述べた通り、 Δ が小さくなることで V パラメータに影響を及ぼしたためである。以上より、比屈折率差を低減させることでシングルモードポリマー光導波路を作製するための条件が大きく緩和されることが判明した。そこで、比屈折率差を低減させるための手法につい

て考察する。

Figure 3-17 では比屈折率差 $\Delta = 0.4\%$ 達成のために便宜的にクラッドの屈折率を上げたが、屈折率差調整の為には次の3手法がある。

- ①コアの屈折率を下げる
- ②クラッドの屈折率を上げる
- ③コアとクラッドの屈折率を調整する

3手法の内、①、③はコアの屈折率を変化させる必要があり、コアを構成する材料が混合物になることを示している。光導波路内を伝搬する光強度のうち、コア内を伝搬する光強度が占める割合は当然大きく、コア材料透過率の影響が支配的であると考えられる。そこで、Ormocer 樹脂自体も多種材料の混合材であると推定されるものの、さらなる透過率低下リスクを考慮して、今回は②の手法を採用し、コア材料はピュアな OrmoCore を維持することとした。

ここで、Micro resist technology 社が公開している、OrmoCore と OrmoClad 混合割合と屈折率の関係性を Fig. 3-19 に示す。

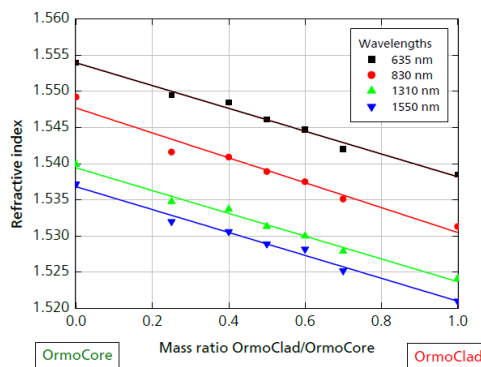


Fig. 3-19 OrmoCore と OrmoClad 混合割合と屈折率の関係[13]

Figure 3-19 より、OrmoCore と OrmoClad の混合割合と屈折率は線形の関係であり、所望の屈折率を得るための混合割合は計算によっておおむね推定できることがわかった。コアを OrmoCore($n_{1310\text{ nm}} : 1.540$)としたとき、比屈折率差 $\Delta = 0.4\%$ とするためのクラッドの屈折率は $n_{1310\text{ nm}} : 1.534$ であり、その屈折率を得るための混合割合は、Fig. 3-19 より OrmoCore : OrmoClad = 5 : 3 と推定した。そこで、OrmoCore と OrmoClad を重量比 5 : 3 でマグネティックスターラーを使用して混合した。

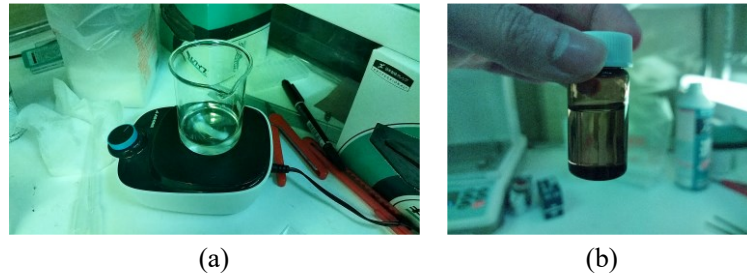


Fig. 3-20 OrmoCore と OrmoClad の混合
(a)混合の様子 (b)混合後の溶液

Figure 3-20(b)より，OrmoCore と OrmoClad の分離界面が見られず，1日放置後であってもその状態が維持されていることから，溶液が完全に混合されていることを確認した．以後，上記混合比の混合液を便宜上 OrmoMix と呼称する．

つづいて，混合液が所望の屈折率となっているかを確認すべく，屈折率の測定を行うこととした．屈折率測定用装置として，Metritcon 社製のプリズムカプラ(型番：Metritcon Model 2010/M Prism Coupler)を用いた．プリズムカプラによる屈折率測定の原理を Fig. 3-21 を用いて説明する[16]．Fig. 3-21 にて，TE および TM は入射するレーザー光の偏波方向， n_p はプリズムの屈折率， n は測定サンプルの屈折率， θ は測定サンプルへの入射角を示す．プリズムカプラでは装置内にセットしたフィルムやバルクへの入射光角度 θ をステージを回転させることで変化させ，ディテクタでのプリズムからの反射光量をモニタリングすることで，サンプルとプリズム界面での臨界角からサンプルの屈折率を実験的に求めることができる．

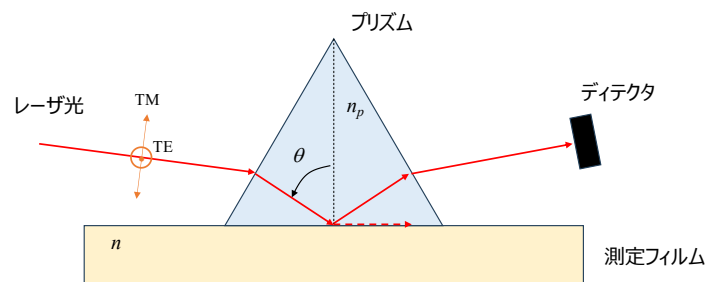


Fig. 3-21 プリズムカプラの測定原理

また，プリズムカプラでは，搭載しているレーザーの3波長（404 nm, 632.8 nm, 831.5 nm）の屈折率を測定できるが，プリズムカプラ内のソフトウェアにて，得られた3波長における屈折率から，コーシーの分散式を用いて，所望の波長における屈折率を算出することができる．コーシーの分散式は，屈折率の波長依存性を示すセルマイヤーの分散式の近似式として与えられ，式(3-1)で示される．なお，式中の A, B, C は実験的に得られる定数である．

$$n(\lambda) = A + B/\lambda^2 + C/\lambda^4 \quad (3-1)$$

本研究では 1310 nm 帯光リンクへのポリマー光導波路の適用を想定しているため、測定可能な 3 波長に加え、コーシーの分散式から算出された 1310 nm における屈折率を求めることとした。

なお、プリズムカプラではサンプル表面の屈折率を測定するが、評価に用いるポリマー光導波路はコアがクラッドに包埋されており、コアの屈折率を測定することができない。そこで屈折率評価用に、コアならびにクラッドのみをシリコンウエハ上に形成したサンプルを作製し、屈折率を測定することとした。

異なるシリコン基板上に OrmoCore, OrmoClad, OrmoMix をそれぞれ塗布し、5,000 rpm の回転数でスピコートした。その後、光導波路作製時と同様の露光条件、およびキュア条件を適用して、屈折率測定用サンプルを得た。ただし、現像プロセスは除外している。作製したサンプルの画像を Fig. 3-22 に示す。

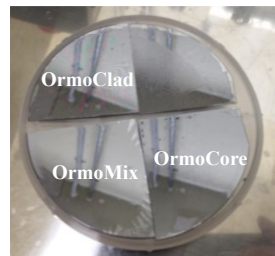


Fig. 3-22 屈折率測定用サンプル写真

Figure 3-22 に示した作製サンプルを用いて測定した、各波長における屈折率の測定・算出結果を Table 3-2 に示す。このとき、屈折率想定時のサンプル温度は 30 °C(室温)であった。

Table 3-2 OrmoCore, OrmoClad, OrmoMix の各波長での屈折率測定結果および算出結果

Refractive index	Material	OrmoCore		OrmoClad		OrmoMix	
	wavelength(nm)	TE	TM	TE	TM	TE	TM
Measured value	404	1.582	1.583	1.564	1.565	1.576	1.576
	632.8	1.552	1.551	1.535	1.535	1.545	1.545
	831.5	1.543	1.543	1.527	1.527	1.537	1.537
Culculated value	1310	1.536	1.537	1.520	1.521	1.531	1.532

Table 3-2 より、633 nm における OrmoCore と OrmoClad の TE の屈折率はそれぞれ 1.552, 1.535 であることがわかる。Fig. 3-19 より、カタログ値は 635 nm で OrmoCore, OrmoClad それぞれ 1.554, 1.538 であり、おおむね一致していることが確認できた。また、OrmoMix の 633 nm における屈折率は 1.545 と、OrmoCore と OrmoClad の間の値を取っていることがわかる。ここで、OrmoMix は OrmoCore と OrmoClad の混合液であり、混合に際して反応が生

じないとすると、OrmoMix の屈折率 n_{OrmoMix} は混合比から、OrmoCore の屈折率 n_{OrmoCore} 、OrmoClad の屈折率 n_{OrmoClad} を用いて式(3-2)から予測することができる。

$$n_{\text{OrmoMix}} = \frac{5}{5+3}n_{\text{OrmoCore}} + \frac{3}{5+3}n_{\text{OrmoClad}} \quad (3-2)$$

式(3-2)より、633 nm における OrmoMix の屈折率は 1.545 と推測され、Table 3-2 に示した実測値と一致していることが判明した。したがって、所望の屈折率を得るためには、式(3-2)より求められる OrmoCore と OrmoClad の比で混合するだけでよいことがわかる。また、OrmoCore と OrmoMix の比屈折率差は Table 3-2 で得られた屈折率を用いると、 $\Delta = 0.4\%$ であった。以上より、比屈折率差 $\Delta = 0.4\%$ をポリマー光導波路で形成するためのクラッドとして、OrmoCore と OrmoClad の混合液である OrmoMix を採用する目処が立った。

・コアの薄膜化

OrmoCore を無調整で塗布すると、装置上限の 8,000 rpm でスピncコートした場合であっても $4 \mu\text{m}$ を上回っていたことから、ここでは OrmoCore に溶媒を加えることで RC(Resin Contents)を調整し、薄膜化を狙うこととした。Micro resist technology 社推奨の PGMEA(プロピレングリコールメチルエーテルアセタート)を RC 調整用液として選定し、重量比で OrmoCore : PGMEA = 10 : 1 となるように、マグネティックスターラーを使用して調製した。RC 調整後のコア溶液を使用して、スピncコートした際の厚み結果を、コアに希薄していない OrmoCore を用いた場合の結果と比較して、Fig. 3-22 に示す。

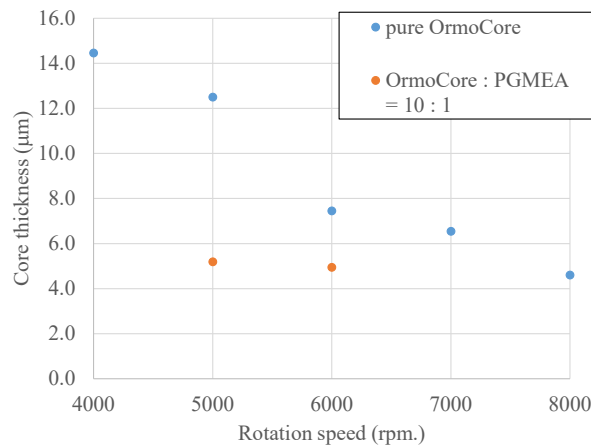


Fig. 3-22 スピncコート時の回転速度とコア厚みの関係

Figure 3-22 より、PGMEA の追加により RC が低下し、希薄していない純粋な OrmoCore と比較して、同じ回転速度でより薄膜化できる傾向が確認できた。

上記 2 つのシングルモード化手段を適用し、改めてシングルモード動作するポリマー光

導波路の作製検討結果を示す．具体的には，Fig. 3-12 で示した作製プロセスの内，クラッド材料を OrmoMix に，コア材料として OrmoCore を PGMEA で希釈した液(OrmoCore : PGMEA = 10 : 1)に変更した．直接露光法を用いて形成したポリマー光導波路コアの断面写真を Fig. 3-23 に示す．Fig. 3-23 内にはマスク幅別に光導波路画像と光学顕微鏡で測定したコア幅，ならびにコア高さを併記した．なお，フォトマスク開口幅 $4\text{ }\mu\text{m}$ 以下といったフォトマスク開口幅の狭い領域では，硬化の為に十分な紫外光強度が得られず，コアが形成されなかった．また，形成が確認されたコアでは，側面に傾斜がついていることがわかる．これは，フォトマスクパターン透過後の紫外光は回折により入射角が変化し，その紫外光の傾きに沿ってモノマーの硬化が進んだためと考えられる．この傾斜は光学顕微鏡を用いて測定した結果，約 10° であることが判明した．この側面傾斜がポリマー光導波路コアの光強度分布に与える影響は後述する．

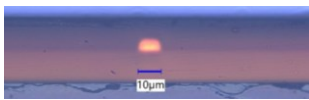
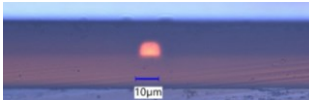
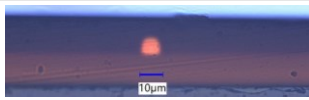
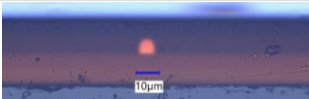
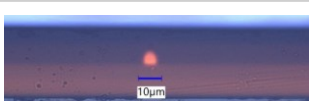
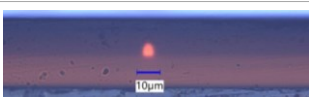
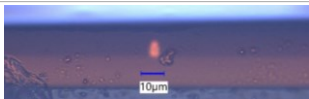
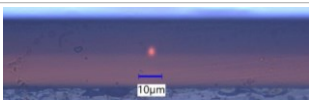
Mask width (μm)	Cross sectional view	Measured results	
		Core width (μm)	Core height (μm)
100 (alignment)			
12		7.6	5.1
11		7.1	5.3
10		6.0	5.1
9		4.8	4.6
8		4.1	5.2
7		3.3	4.8
6		2.9	5.2
5		1.3	4.2

Fig. 3-23 直接露光法を用いて形成したコアの断面写真とコアサイズ測定結果

Figure 3-23 より、適用したフォトマスク開口幅の違いによって、異なるコア幅を有するポリマー光導波路が作製できたことが確認できる。また、異なるコア幅を持つ必ずしもフォトマスク開口幅とコア幅が一致しておらず、実際のコア幅がフォトマスク開口幅に対して3～4 μm 程度狭くなっていることがわかる。これはプロキシミティ露光の採用により、マスク透過時に光が回折し、コア層に到達した際の露光強度分布の存在によって、マスク部も一部露光されてしまったためと考えられる。

つづいて、作製したポリマー光導波路のモード状態を確認すべく、光導波路からの出射光強度分布(Near Field Pattern : NFP)を測定した。評価系を Fig. 3-24 に示す。

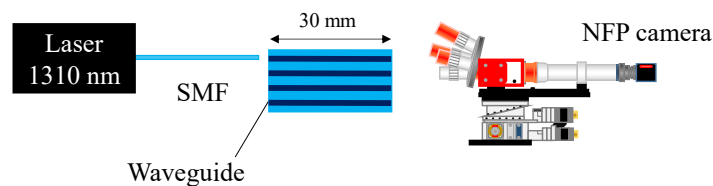


Fig. 3-24 NFP 評価系の概略図

Figure 3-24 に示したように、1310 nm 帯光源からの出射光を、入射プローブである SMF を介し、作製したポリマー光導波路のコアに入射、光導波路コアを伝搬して端面から出射された出射光強度分布をシナジーオプトシステムズ社製の光ビーム NFP 計測装置によって観測した。異なる幅を有するポリマー光導波路コアからの出射 NFP を評価した結果を、光導波路作製時のマスク開口幅とともに Fig. 3-25 に示す。

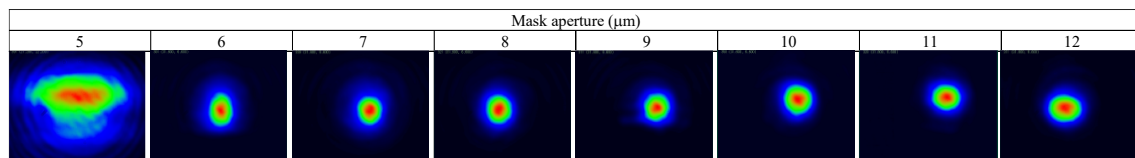


Fig. 3-25 直接露光法で作製したポリマー光導波路の出射 NFP

ここで、ポリマー光導波路内の導波モード数の確認方法として、以下の手法を取った。

- ①入射側ファイバ調芯を行い、出射光強度が最大となるようにピーク調芯を行う
- ②入射側にオフセットを加えることでポリマー光導波路内コアに対して限定モード励振させる。
- ③[シングルモードの時] 励振状態にかかわらず、単一モードしか存在しないため、 TE_{11} 、 TM_{11} のプロファイルのみが常に観測される。(出射光強度は変化する)

[マルチモード(フューモード)の時] 限定モード励振時、高次モードが励振され、コア内に複数の強度ピークが観測される。(Fig. 3-26 (b)参照)

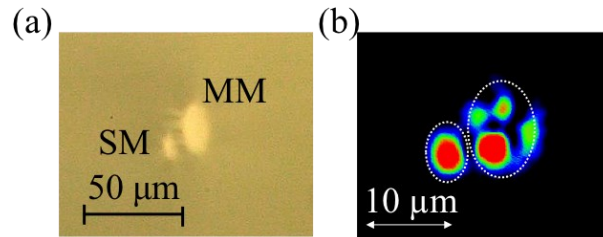


Fig. 3-26 光導波路の端面写真とその NFP

(a)光導波路出射端面写真 (b)NFP 評価結果[17]

上記の手法を用いて、作製したポリマー光導波路内の導波モードを確認したところ、Fig. 3-25 に示したすべてのコアでシングルモードであることを確認した。一方で、Fig. 3-25 では光導波路のコア幅によって出射される光強度分布が大きく異なっていることがわかる。そこで、Fig. 3-25 で得られた NFP を解析し、コア幅方向(水平方向)の MFD を算出することで、ポリマー光導波路の実際のコア幅と水平方向 MFD の関係を Fig. 3-27 にまとめた。

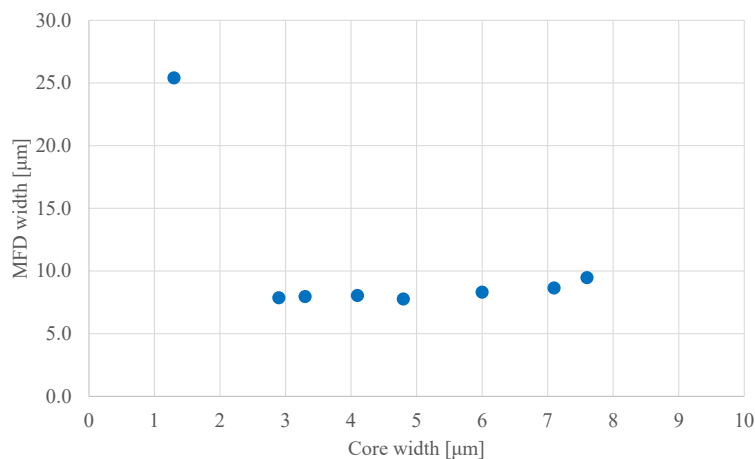


Fig. 3-27 ポリマー光導波路のコア幅と水平方向の MFD との関係

Figure 3-27 より、コア幅 3 μm 以上では、コア幅の増大とともに MFD も微増する傾向が確認できる一方で、コア幅 1 μm 近傍ではコア幅が縮小することで急速に MFD が増大している。これはコア幅の狭小化に伴い、伝搬光を光導波路のコア内部にとどめておくことができず、エバネッセント領域が拡大し、クラッド領域にまで染み出してしまいうためである。

上記実験結果を確かめるべく、シミュレーション条件を Fig. 3-28 のように設定し、計算を行った。ここで、屈折率は Table 3-2 で測定した実測値を適用し、コア厚みには Fig. 3-23 で測定した各コアの厚みの平均値である 4.9 μm を適用した。シミュレーションで得られた結果を Fig. 3-29 に示す。なお、比較の為、Fig. 3-27 の実験結果を Fig. 3-29 にあわせて示す。



Fig. 3-28 実測値を適用したシミュレーション条件

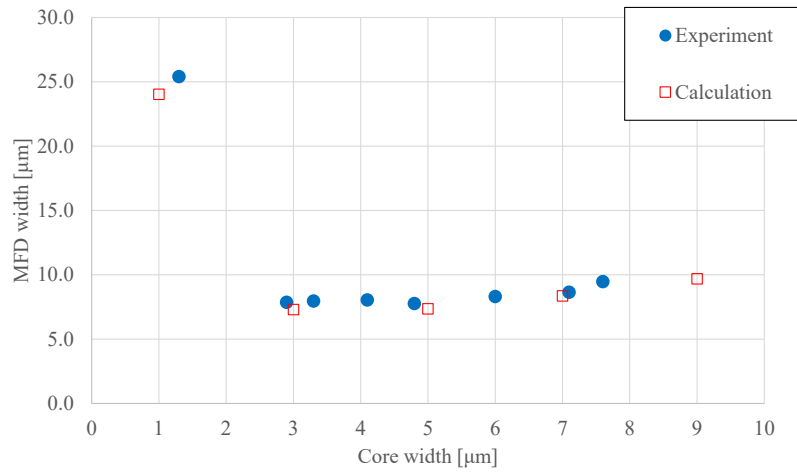


Fig. 3-29 ポリマー光導波路のコア幅と水平方向の MFD との関係比較

Figure 3-29 より, 実験結果とシミュレーション結果はおおむね一致していることが確認できた. 一方で, Fig. 3-29 の結果は, Fig. 3-28 で示すように, 前提条件として光導波路のコア形状を長方形とした場合に得られた結果である. しかしながら, 実際の光導波路コア形状は Fig. 3-23 のように台形形状になっている. したがって, Fig. 3-29 はポリマー光導波路コア形状の面で, 実験とシミュレーションの純粋な比較となっていない. そこで, 実際のポリマー光導波路コア形状を考慮したシミュレーションを再度行うこととした. 顕微鏡画像より作製したポリマー光導波路コアの側面傾斜角度を測定したところ, 10° であったため, 改めてシミュレーション条件を Fig. 3-30 のように再設定した. ここで, Fig. 3-30 で設定した台形コアの面積は Fig. 3-28 の長方形コアと同じ面積となるように設定した.

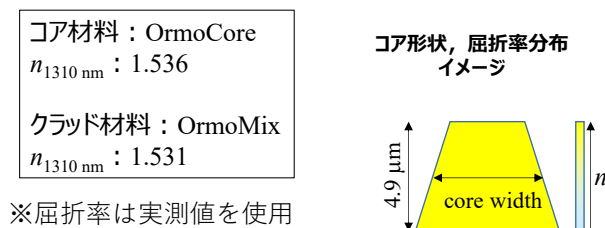


Fig. 3-30 台形コアを想定したシミュレーション条件

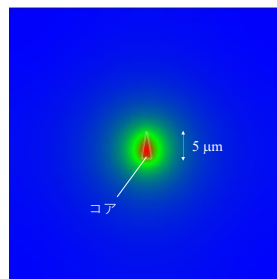
上記条件のもと、シミュレーションを行い、コア幅と水平方向の MFD を比較した結果を Table 3-3 に示す。

Table 3-3 コア形状の違いによるポリマー光導波路 MFD の計算結果比較

core width (μm)	1	3	5	7	9
rectangle	24.05	7.303	7.362	8.376	9.692
trapezium (10° tilt)	33.50	7.309	7.371	8.399	9.695

(μm)

Table 3-3 より、コア幅 $1\ \mu\text{m}$ の場合を除き、コア形状の違いによる MFD の差はほとんど生じないことが判明した。この結果は、ポリマー光導波路コアから出射される MFD のコア形状依存度は比較的小さく、コア面積への依存性が大きいことを示している。一方、ポリマー光導波路コア幅が $1\ \mu\text{m}$ では、台形コアが長方形コアと比較して大きな MFD を示している。検証のため、コア幅 $1\ \mu\text{m}$ の台形コアから出射される光強度分布の計算結果を Fig. 3-31 に示す。この時、コアの上辺は $0.14\ \mu\text{m}$ と極めて小さく、結果としてエバネッセント領域のコア外への染み出しが大きくなっている様子が確認できる。このエバネッセント領域の染み出しはコア形状や Δ の変化による影響を強く受けるため、Table 3-3 のような狭小コア幅領域でのシミュレーション結果に、コア形状間での差が生じたものと考えられる。

Fig. 3-31 core width = $1\ \mu\text{m}$ の台形コアからの出射光強度分布

以上の検討より、直接露光法で作製したポリマー光導波路がシングルモード動作することを光学的に確認し、以降の章で SI 型矩形コアを有するポリマー光導波路として使用することとした。

3.3.2. フォトアドレス法による光導波路作製

・光導波路材料の選定

フォトアドレス法は住友ベークライト社製のノルボルネン樹脂をベースとした光導波路作製法である[18]。したがって本研究においても住友ベークライト社提供のノルボルネン樹脂を使用することとした。なお、詳細な化学構造等は公開されていない。

本研究でコア材に用いるノルボルネン樹脂(コア)と、クラッド材に用いるノルボルネン樹脂(クラッド)の屈折率を、3.3.1.と同様にプリズムカップラ装置で評価した結果を Table 3-4 に示す。Table 3-4 より、1310 nm 帯での Δ を計算したところ、 $\Delta = 0.6\%$ と算出された。

Table 3-4 コア・クラッド材の各波長での屈折率測定結果および算出結果

Refractive index	Material	Core		Cladding	
	wavelength(nm)	TE	TM	TE	TM
Measured value	404	1.512	1.510	1.503	1.500
	632.8	1.488	1.487	1.481	1.481
	831.5	1.484	1.482	1.476	1.474
Culculated value	1310	1.481	1.479	1.472	1.468

・光導波路設計値の設定

まずはフォアドレス法で光導波路を作製する上での目標値を設定する。Fig. 3-32 のパラメータを用い、水平 GI 型ポリマー光導波路の分散曲線をシミュレーションで算出した結果を Fig. 3-33 に示す。なお、GI 型の屈折率分布は Fig. 3-32 内に記載した定義を用いた。

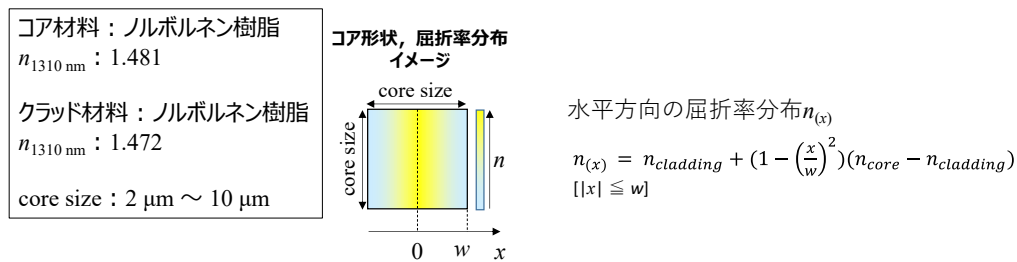


Fig. 3-32 水平 GI 型ポリマー光導波路のシミュレーション条件

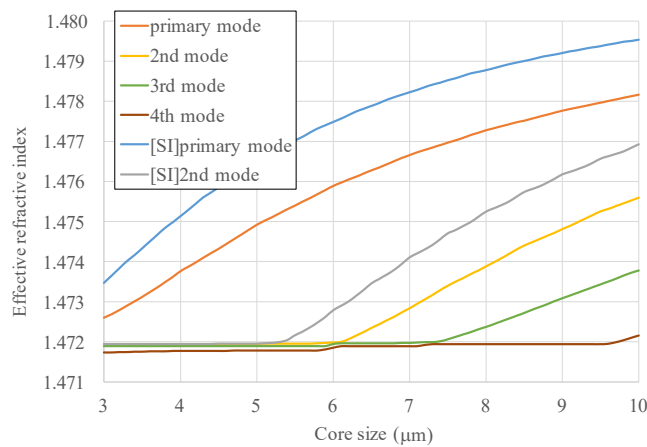


Fig. 3-33 水平 GI 型ポリマー光導波路コアが示す分散曲線

なお、比較の為に Fig. 3-33 に同じ屈折率を有する SI 型コアが示す分散曲線も同時に計算して示している。Fig. 3-33 にて、水平 GI 型と SI 型コアの分散曲線の高次モードの立ち上がりを比較すると、水平 GI 型コアの方がより大きなコアサイズで立ち上がっていることがわかる。つまり、水平 GI 型コアは SI 型と比較して、より大きなコアサイズであってもシングルモードを維持しているといえる。これは GI 型コア内の屈折率分布の存在により、コアが示す実効屈折率が SI 型と比較して小さくなり、式(2-2)で示した V パラメータの実効的な値がコア屈折率 n_{core} から算出される値よりも小さくなるためである[19]。

また、Fig. 3-33 より、水平 GI 型光導波路のシングルモード条件を満たすためには、コアサイズが $6.1 \mu\text{m}$ 以下である必要があることがわかる。そこで、フォトアドレス法でポリマー光導波路を作製するにあたり、コアサイズの設計値を $6.1 \mu\text{m}$ 以下とした。

・光導波路の作製

フォトアドレス法によるシングルモードポリマー光導波路作製手順を Fig. 3-34 に示す。

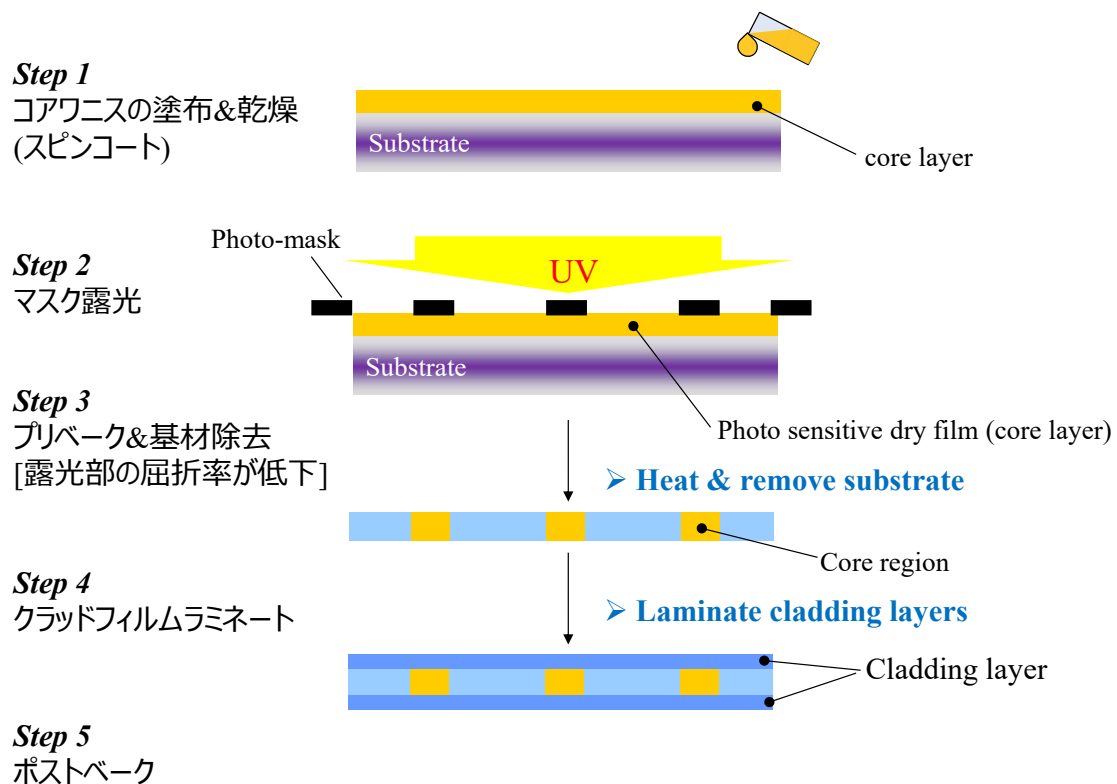


Fig. 3-34 フォトアドレス法によるポリマー光導波路作製プロセス

今回、コア塗布時のスピンコートの回転数を変えることで、厚み水準の異なるポリマー光導波路(a), (b)を作製した。また、同一マスク内に複数のマスク開口幅を配置することで、一つのポリマー光導波路内に複数のコア幅水準を形成した。実際にフォトアドレス法で作

製したシングルモードポリマー光導波路(a), (b)の断面写真を Fig. 3-35, Fig. 3-36 にそれぞれ示す. Fig. 3-35 には断面図から作製したポリマー光導波路のコア拡大図も併せて示している.

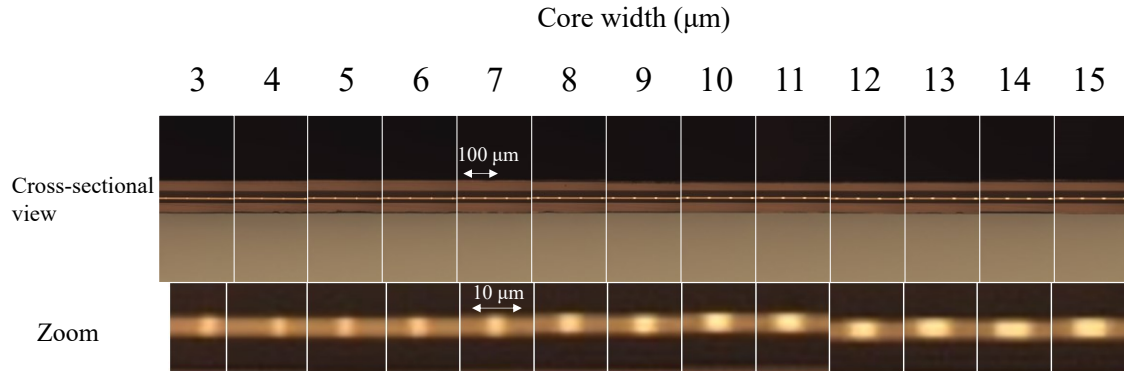


Fig. 3-35 フォトアドレス法で作製したポリマー光導波路(a)の断面図

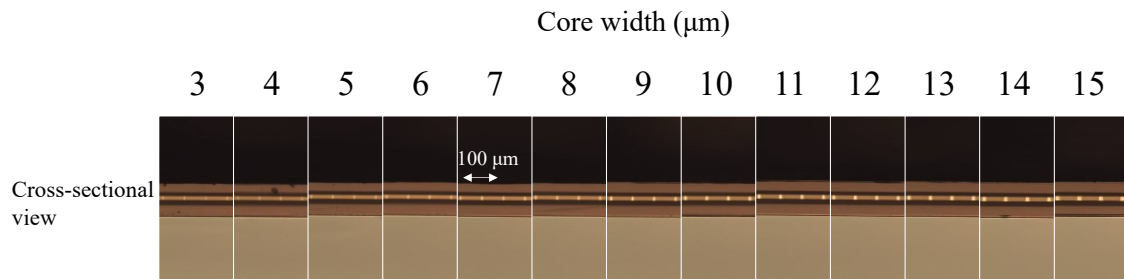


Fig. 3-36 フォトアドレス法で作製したポリマー光導波路(b)の断面図

Figure 3-35 に示したコア拡大図より, コア幅方向に光強度のグラデーションが確認できる. この光強度分布は屈折率分布の存在を示している一方で, 厚み方向には光強度分布が存在せず, 屈折率が一定であることが示唆される. これはフォトアドレス法特有の水平方向の身への屈折率分布形成が発現しているためである. つづいて, 作製したポリマー光導波路のコア厚みを測定した結果, ポリマー光導波路(a)は $5.5 \mu\text{m}$, ポリマー光導波路(b)は $11.7 \mu\text{m}$ であった. なお, コア幅方向のコア/クラッド界面のコントラストが屈折率分布の存在により曖昧になっていることで, コア幅を光学顕微鏡から測定することが困難であり, 作製した水平 GI 型ポリマー光導波路のコア幅として, 便宜上露光に使用したフォトマスクの開口幅を表記している.

つづいて, 作製したポリマー光導波路のモード状態を確認すべく, 各コアから出射された光強度分布を Fig. 3-24 に示した評価系で測定した. 測定結果を, NFP から算出した MFD とともに Fig. 3-37, Fig. 3-38 に示す.

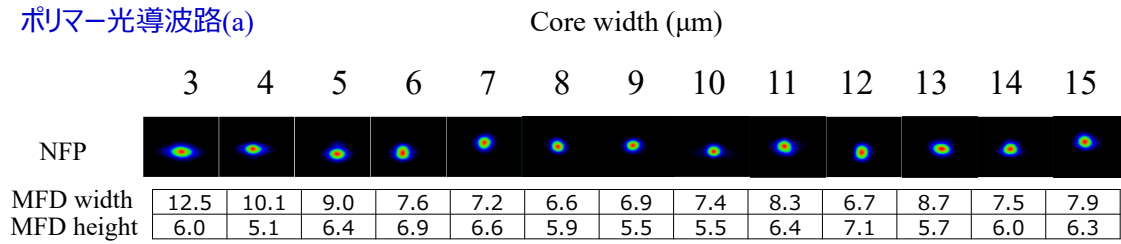


Fig. 3-37 ポリマー光導波路(a)の出力 NFP と MFD

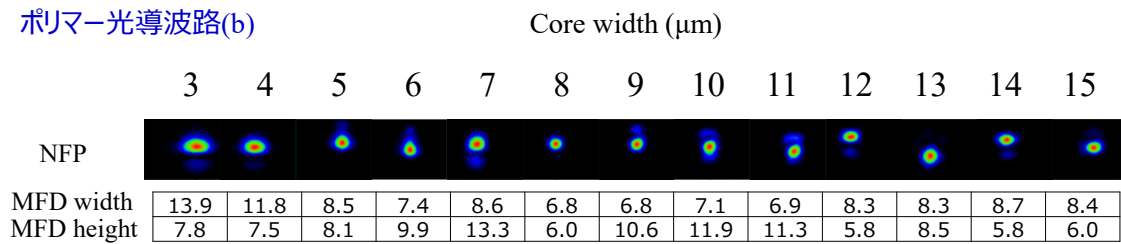
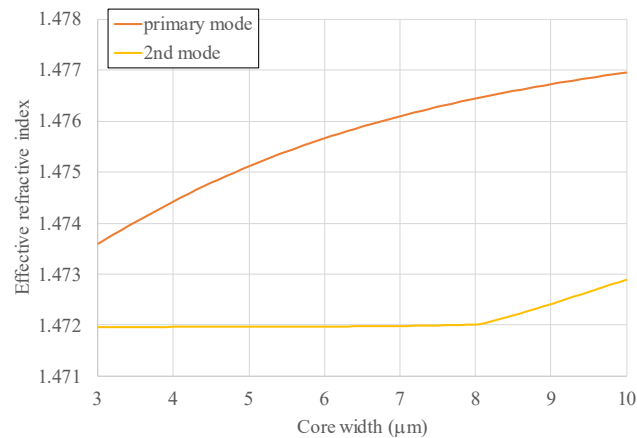


Fig. 3-38 ポリマー光導波路(b)の出力 NFP と MFD

Figure 3-38 より、コア厚みが $11.7 \mu\text{m}$ のポリマー光導波路(b)では、NFP が厚み方向に分割されていることが確認される。これは高次モードである TE_{12} (or TM_{12})モードが光導波路内に存在しており、その出力プロファイルが観測されているためである。したがって、コア厚み $11.7 \mu\text{m}$ は厚み方向でシングルモード動作していないことが確認できた。これは Fig. 3-33 の結果から推定されるシングルモード条件を考慮すると、妥当な結果であるといえる。

一方、Fig. 3-37 より、コア厚み $5.5 \mu\text{m}$ のポリマー光導波路(a)では厚み方向に高次モードが存在していないことから、シミュレーション結果からの想定通り、ポリマー光導波路(a)はシングルモード動作しているように見える。しかしながら、3.1.で示したポリマー光導波路コア内の導波モード確認手法を実施したところ、コア幅 $8 \mu\text{m}$ 以上では幅方向に複数のピークが観測され、マルチモードであることが確認された。実際、Fig. 3-32 のシミュレーション条件にて、コア厚みをポリマー光導波路(a)の実測値 $5.5 \mu\text{m}$ に固定した時、コア幅を変化させたときに計算されるポリマー光導波路コアの分散曲線(Fig. 3-39)より、シングルモード境界 $8.1 \mu\text{m}$ が得られており、実測と近い結果であることがわかった。


 Fig. 3-39 コア厚み 5.5 μm の水平 GI 型ポリマー光導波路コアが示す分散曲線

さて、Fig. 3-37 では、いずれのコア幅からの出射光もシングルモード動作しているように見えるが、これはアクティブアライメントによって、マルチモードのコアであっても基底モードのみを限定モード励振しており、結果として TE_{11} および TM_{11} モードのみの出射プロファイルが観測されたものと考えられる。そのため、Fig. 3-37 に示した NFP および MFD はいずれも基底モードのふるまいを捉えており、コア幅間での純粋な比較が可能といえる。ここで、水平方向の MFD に着目すると、コア幅依存が明確に存在していることが確認できる。

そこで、Fig. 3-37 から得られたポリマー光導波路(a)のコア幅と水平方向の MFD の関係を、シミュレーション結果とともに Fig. 3-40 に示す。Fig. 3-40 の実験結果より、コア幅 9 μm で MFD は極小を取り、9 μm からコア幅が増大することで MFD が増大していることがわかる。これはコア幅の増大によって、光導波路内の基本モードが示す光強度分布も拡大するためである。一方で、9 μm からコア幅が縮小することでも MFD の増大傾向がみられるが、これは一定以上のコア幅縮小により、伝搬光がコア内にとどまることができず、エバネッセント領域がクラッド領域にまで拡大したためと考えられる。

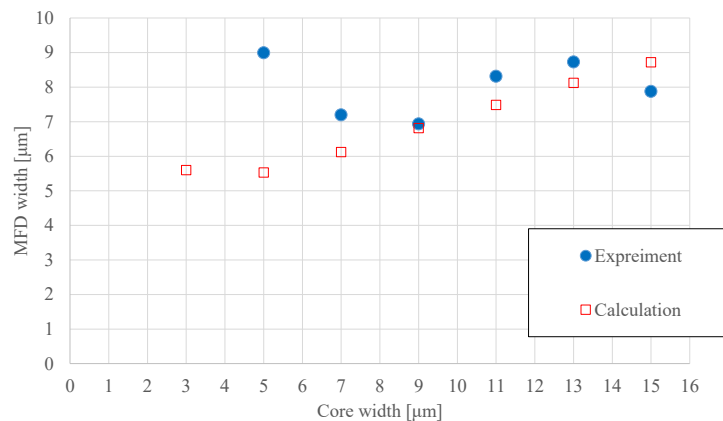


Fig. 3-40 水平 GI 型ポリマー光導波路のコア幅と MFD 幅の関係比較

また、コア幅 $9\ \mu\text{m}$ 以上では実験結果とシミュレーション結果間の傾向が一致している一方で、コア幅 $9\ \mu\text{m}$ 未満で異なる傾向が見られる。具体的には、実験的に得られた MFD がコア幅 $9\ \mu\text{m}$ を極小として、MFD 増加に転じているのに対し、シミュレーション結果ではコア幅約 $5\ \mu\text{m}$ で極小を取っている。実験で得られた MFD の極小値をとるコア幅が大きいということは、光導波路の Δ が想定よりも小さいということが示唆される。そこで、 $\Delta=0.2$, 0.3 , 0.4% としたときの計算結果を実験結果と比較した。結果を Fig. 3-41 に示す。Fig. 3-41 より、実験で得られた MFD は狭コア幅領域で $\Delta=0.3\%$ に近い傾向を示すことがわかる。つまり、水平 GI 型ポリマー光導波路では Δ がコア(未露光)幅に依存しており、狭いコア幅では屈折率差が低減するということになる。これはフォトアドレス法では屈折率調整材の拡散によってコア-クラッド間の屈折率分布を形成しているが、コア幅領域の狭小化に従い、コア-クラッド間の拡散が過剰に進行した結果、コア中心部の屈折率が低下し、コア-クラッド間の屈折率差が低減したものと考えられる。このような現象は拡散を利用して屈折率分布を形成するモスキート法でも見られている[20]。

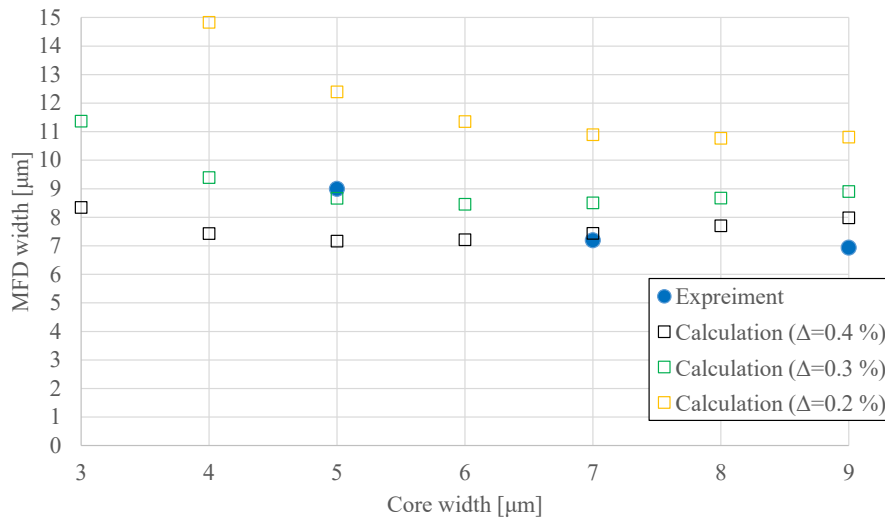


Fig. 3-41 水平 GI 型ポリマー光導波路のコア幅と MFD 幅の関係比較(コア幅 $9\ \mu\text{m}$ 以下)

以上の検討より、フォトアドレス法で作製したポリマー光導波路がシングルモード動作することを光学的に確認し、以降の章で水平 GI 型矩形コアを有するポリマー光導波路として使用することとした。

3.4. 結言

本章では、ポリマー光導波路の作製法をまとめ、ユニークな特性を有し、高い量産性が期待できる手法として、水平 GI 型ポリマー光導波路を作製可能なフォトアドレス法を選択し、汎用的な直接露光法で作製された SI 型ポリマー光導波路との比較を行うことで、コア内屈

折率分布が光学特性に与える影響を検証した。実際に、2つの手法を用いて、異なるコア幅を有するシングルモード光導波路の作製に成功し、基礎的な光学特性の評価を行った。特に実験的に得られたポリマー光導波路コアが示す MFD は、シミュレーション結果と高い一致を示していることが判明した。

本章で得られた SI 型、水平 GI 型ポリマー光導波路を用いて、次章以降に実施する光学特性の温度依存性評価、ならびに比較が可能となった。

参考文献

- [1] M. Kagami, K. Hasegawa, and H. Ito, “Simultaneous Fabrication of Optical Channel Waveguides and Out-of-Plane Branching Mirrors from a Polymeric Slab Structure,” *Applied Optics*, **36**(30), pp. 7700-7707 (1997).
- [2] Y. Morimoto, H. Matsui, M. Hikita, and T. Ishigure, “Polarization Dependence of Optical Properties of Single-Mode Polymer Optical Waveguides Fabricated Under Different Processes at 1310/1550 nm,” *Journal of Lightwave Technology*, **38**(14), pp. 3670-3676 (2020).
- [3] N. Lindenmann, S. Dottermusch, M. L. Goedecke, T. Hoose, M. R. Billah, T. P. Onanuga, A. Hofmann, W. Freude, and C. Koos, “Connecting Silicon Photonic Circuits to Multi-Core Fibers by Photonic Wire Bonding,” *Journal of Lightwave Technology*, **33**(4), pp. 755-760 (2014).
- [4] H. Uemura, T. Misawa, Y. Mizuno, N. Itabashi, H. Arao, T. Nakanishi, K. Tanaka, T. Sano, K. Uesaka, M. Miyairi, Y. Ishizuki, T. Sakai, and Y. Kurita, “A Surface-Mount Photonic Package with a Photonic-Wire-Bonded Glass Interposer as a Hybrid Integration Platform for Co-Packaged Optics,” 2024 IEEE 74th Electronic Components and Technology Conference (ECTC), pp. 90-95 (2024).
- [5] G. Jiang, S. Baig, and M. R. Wang, “Flexible Polymer Waveguides with Integrated Mirrors Fabricated by Soft Lithography for Optical Interconnection,” *Journal of Lightwave Technology*, **31**(11), pp. 1835-1841 (2013).
- [6] T. Ishigure, T. Nakayama, F. Nakazaki, and H. Hama, “Y-Branched Multimode/Single-Mode Polymer Optical Waveguides for Low-Loss WDM MUX Device: Fabrication and Characterization,” 2019 IEEE 69th Electronic Components and Technology Conference (ECTC), pp. 550-555 (2019).
- [7] K. Soma, and T. Ishigure, “Fabrication of a Graded-Index Circular-Core Polymer Parallel Optical Waveguide Using a Microdispenser for a High-Density Optical Printed Circuit Board,” in IEEE

Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, **19**(2), pp. 3600310 (2012).

[8] A. Yamauchi, Y. Morimoto, T. Enomoto, K. Suzuki, H. Masuda, and T. Ishigure, “Graded-Index Multimode Polymer Optical Waveguide Enabling Low Loss and High Density 3D On-Board Integration,” 2016 IEEE 66th Electronic Components and Technology Conference (ECTC), pp. 490-496 (2016).

[9] Y. Yamaguchi, S. Yakabe, and T. Ishigure, “Design and Fabrication of Three-dimensional Polymer Optical Waveguide-based Fan-in/out Device for Multicore Fibers,” 2022 European Conference on Optical Communication (ECOC), pp. 1-3 (2022).

[10] T. Mori, K. Moriya, K. Kitazoe, S. Takayama, S. Terada, M. Fujiwara, K. Takahama, and K. Choki, “Polymer Optical Waveguide Having Unique Refractive Index Profiles for Ultra High-Density Interconnection,” Optical Fiber Communication Conference (OFC) 2012, OTu11.6 (2012).

[11] R. Kinoshita, K. Moriya, K. Choki, and T. Ishigure, “Polymer Optical Waveguides with GI and W-Shaped Cores for High-Bandwidth-Density On-Board Interconnects,” Journal of Lightwave Technology, **31**(24), pp. 4004-4015 (2013).

[12] R. Kinoshita, K. Kitazoe, and A. Horimoto, “Graded Index Polymer Waveguide for High-Bandwidth Optical Circuit,” 2016 IEEE CPMT Symposium Japan (ICSJ), pp. 111-114 (2016).

[13] <https://www.microresist.de/en/produkt/ormocore-and-ormoclad/> (2024 年 8 月閲覧)

[14] 酒井聖哉, “Mosquito 法によるシングルモード Y 分岐ポリマー導波路の低損失化検討,” 慶應義塾大学理工学部卒業論文, (2023)(未公刊).

[15] https://www.microresist.de/wp-content/uploads/2020/02/PI_waveguides_materials_2015 (2024 年 8 月閲覧)

[16] Metricon Corp., “Metricon Model-2010, Thin Film Thickness/Refractive Index Measurement System Operation and Maintenance Guide rev. 2/1/03,” (2003).

[17] 一之瀬凌斗, “ポリマー光導波路型モード分割多重伝送用 3 次元 MUX デバイス,” 慶應義塾大学大学院理工学研究科修士論文, (2024)(未公刊)

[18] T. Mori, K. Takahama, M. Fujiwara, K. Watanabe, H. Owari, Y. Shirato, S. Terada, M. Sakamoto, and K. Choki, “Optical and Electrical Hybrid Flexible' Printed Circuit Boards with Unique Photo-Defined Polymer Waveguide Layers,” *Proceeding of the International Society for Optical Engineering (SPIE)*, **7607**, 76070S (2010).

[19] 幡井亮介, “大容量光信号伝送に向けたポリマー導波路型光結合デバイスの設計と作製,” 慶應義塾大学大学院理工学研究科博士論文, (2022).

[20] 東昂生, “Mosquito 法によるマルチモード Y 分岐導波路の信号分岐比検討および多分岐化検討” 慶應義塾大学大学院理工学研究科修士論文, (2023)(未公刊).

第 4 章

SiO_x 光導波路とシングルモード光ファイバ間接続の 為のポリマー光導波路設計

4.1. 緒言

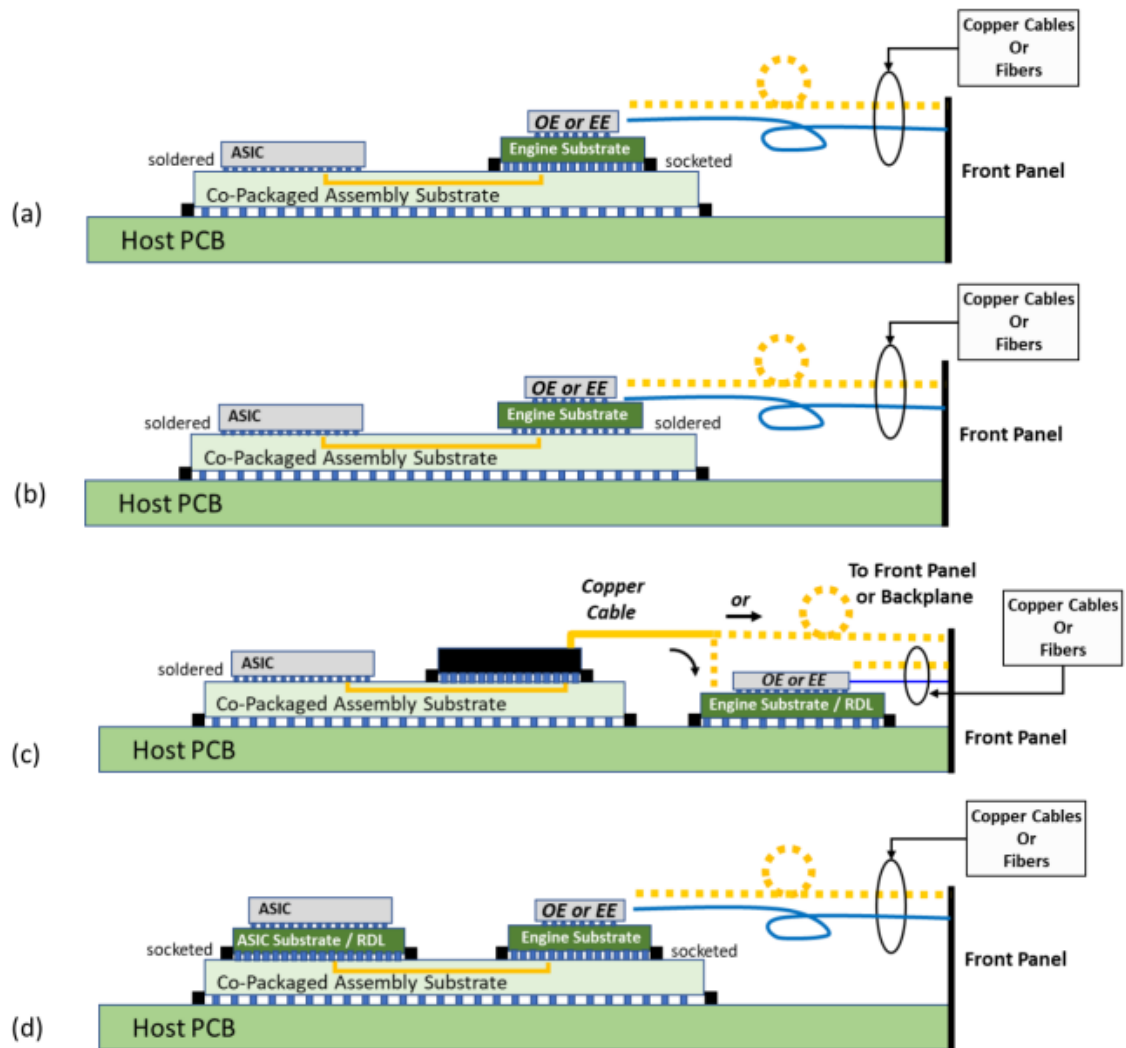
CPO は、ASIC と PIC とを同一のパッケージ基板上に実装し、光配線領域を拡大することで低消費電力・高速高密度伝送を可能にすることを目的としており、そのためには PIC とオフパッケージの光ファイバリンクとの接続が必要になる。しかしながら、PIC 内に形成される Si 光導波路は、コアサイズがサブミクロンオーダーと極めて小さく、約 10 μm のコアサイズを有するシングルモード光ファイバとの直接接続は接続損失面で困難であり、これまで様々な接続手法が提案されてきた。特に端面接続方式はグレーティングカップラによる垂直接続方式では困難な、波長無依存性や空間効率の向上といった特徴が見込める一方で、両素子間の接続損失を低減させるためには光素子間の伝搬モードの MFD を整合させる必要がある。そこで、オンボードで接続損失低減の為の MFD 変換を完結させるべく、SiO₂ と比較して高屈折率を有する SiO_x をコア層とした、スポットサイズ変換(Spot Size Converter : SSC)機能を有する構造の導入に関する報告がなされている[1]。一方で、SiO_x 層を活用した場合でも最大で 3 μm 程度のスポットサイズ拡大にとどまっており[2]、より高効率な接続の為には更なるスポットサイズの変換が必要となる。そこで本章ではポリマー光導波路を SiO_x 光導波路とシングルモード光ファイバ間に挿入した光リンクの接続損失面での導入優位性を明らかにするべく、ポリマー光導波路のコア形状や屈折率分布が光リンク損失に及ぼす影響をシミュレーションで検証し、最適な光導波路設計を提案する。

4.2. ポリマー光導波路挿入による影響の推定

4.2.1. 光リンク構成

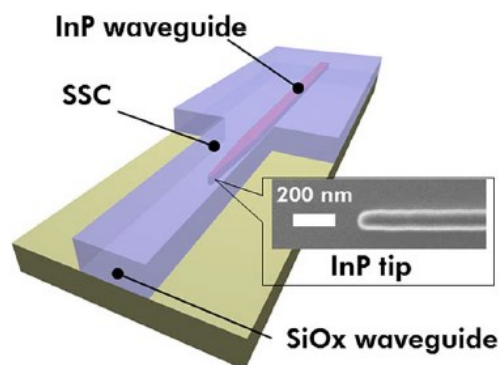
本章ではポリマー光導波路の CPO 適用を見据え、まずはターゲットとなる具体的な光リンクを設定する。

光業界団体 OIF(Optical Internetworking Forum)が公開している CPO 構成例を Fig. 4-1 に示す[3]。いずれの構成でも、フロントパネルから OE(光電変換)エンジンを SMF で接続していることがわかる。OE エンジンと SMF の接続には高効率かつ、冷却効率を確保できる低背な接続方式が要求されており、端面接続方式のスポットサイズ変換素子が注目されている。Fig. 4-2 に示した SiO_x 層を活用した例[2]では、隣接した InP 光導波路に逆テーパ形状加工を施すことで、アディバティック接続[4]による光遷移を用いて高効率でスポットサイズ変換を実施している。



© 2021 Optical Internetworking

Fig. 4-1 CPO 構成例[3]



©2015 IEEE

Fig. 4-2 SiO_x 光導波路を活用したスポットサイズ変換の例[2]

一方で、SiO_x 光導波路は基板となる SiO₂(BOX)層への光遷移が懸念されるため出射光強度分布の拡大に対する制限があり、最大でも 3 μm 程度のスポットサイズまでしか形成することができない。これまで、接続対象となるシングルモード光ファイバをよりスポットサイズの小さい高 NA シングルモード光ファイバに置き換えることで、MFD を調整し、高効率接続した例が報告されている[5]が、高 NA ファイバは汎用品ではなく、調達性やコスト面の懸念があること、さらにはオフボード光リンクの主流である汎用シングルモード光ファイバとの接続損失といった観点から実用化は困難であると考えられる。

そこで本研究では Fig. 4-3 のような光リンクモデルを提案する。光源に結合した Si 光導波路からの光を、アディアバティック結合による光遷移によって SiO_x 光導波路に接続したスポットサイズ 3 μm 程度の光を、ポリマー光導波路を介してさらにスポットサイズ変換することで汎用 SMF との高効率接続を目指す。プロセス適合性に優れたポリマー光導波路の挿入のみで光リンク全体の損失を低減することで、システムのロスバジェットを確保し、安定した光通信の実現が見込める。

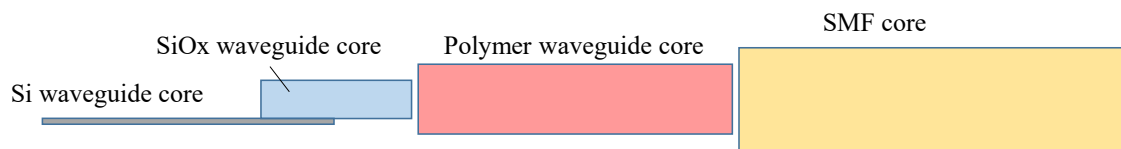


Fig. 4-3 本研究で検討する光リンクのモデル

4.2.2. シミュレーションモデルの設定

本研究では、光学モデリングツールに Photon Design 社より販売されている FIMMWAVE および FIMMPROP を用いた。Fig. 4-4 にシミュレーションに使用したパラメータを示す。

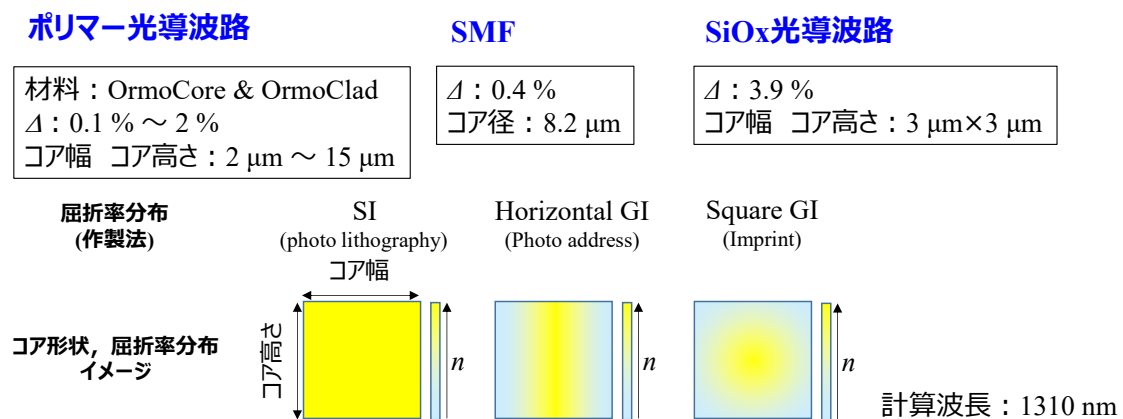


Fig. 4-4 シミュレーションモデル

Figure 4-4 にて、シリコンフォトリソグラフィの通信波長として主流となっている 1310 nm を計

算波長に設定している．また，SMF の構造として，汎用シングルモード光ファイバである G.652 ファイバ[6]を，SiO_x光導波路の構造として[2]を参考に設定した．以降，本章では G.652 ファイバを SMF と呼称する．ポリマー光導波路は製造方法によってさまざまな形状，屈折率分布を取り得るが，今回計算対象とするモデルとして，プロセス適合性ならびに量産性に優れた，矩形 SI 型(フォトリソグラフィ法)，水平 GI 型(フォトアドレス法)，矩形 GI 型(インプリント法)の3種を抽出し，モデル化している．また，ポリマー光導波路用材料として，商業的に入手可能かつ，各種パラメータが公開されている OrmoCore と OrmoClad をモデルとして採用した．なお，特に水平 GI 型ポリマー光導波路はフォトアドレス法で作製された光導波路をモデルとしており，本来であれば住友ベークライト社のノルボルネン樹脂を考慮すべきであるが，本研究では純粋な屈折率分布間の光学特性比較に着目すべく，樹脂特性を統一することとした．

光導波路コア断面における屈折率分布は水平 GI 型，矩形 GI 型に対して，コア幅 $2w$ ，コア高さ $2h$ としたとき，以下の式(4-1)～(4-6)で定義した．なお，式中の n_{core} は光導波路コアの屈折率， n_{cladding} は光導波路クラッドの屈折率として定義し， Δn はコアとクラッド間の屈折率差($n_{\text{core}} - n_{\text{cladding}}$)と定義した．

$$\text{水平 GI : } n_x = n_{\text{cladding}} + \left\{1 - \left(\frac{x}{w}\right)^2\right\} \Delta n \quad [|x| \leq w] \quad (4-1)$$

$$n_x = n_{\text{cladding}} \quad [|x| > w] \quad (4-2)$$

$$n_y = n_{\text{core}} \quad [|y| \leq h] \quad (4-3)$$

$$n_y = n_{\text{cladding}} \quad [|y| > h] \quad (4-4)$$

$$\text{矩形 GI : } n_{(x,y)} = n_{\text{cladding}} + \left\{1 - \left(\frac{x}{w}\right)^2\right\} \left\{1 - \left(\frac{y}{h}\right)^2\right\} \Delta n \quad [|x| \leq w, |y| \leq h] \quad (4-5)$$

$$n_{(x,y)} = n_{\text{cladding}} \quad [|x| > w \text{ or } |y| > h] \quad (4-6)$$

Figure 4-4 に示した範囲内で比屈折率差 Δ ，コア幅，コア高さ，屈折率分布を変化させることで，SMF ならびに SiO_x光導波路との接続損失への影響を検証した．なお，比屈折率差 Δ は式(2-4)で表され，コアならびにクラッドの屈折率に依存する．ここでは，コア材料(OrmoCore)の屈折率を固定し，異なる屈折率を有するクラッド材料を想定し，比屈折率差 Δ を変化させて計算を行った．

4.2.3. SMF と SiO_x光導波路の直接接続

はじめに，ポリマー光導波路を光リンクに挿入しない状態，つまり SMF と SiO_x光導波路を直接接続した際の接続損失を検討した．Table 4-1 に SMF および SiO_x光導波路からの出射光強度分布を計算した結果を算出した MFD とともに示す．

Table 4-1 SMF, SiO_x 光導波路からの出射 NFP と MFD 計算結果

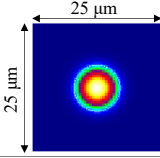
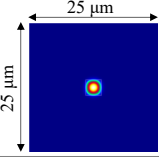
光素子	SMF	SiO _x 光導波路
出力 光強度分布		
MFD	9.1 μm	3.1 μm

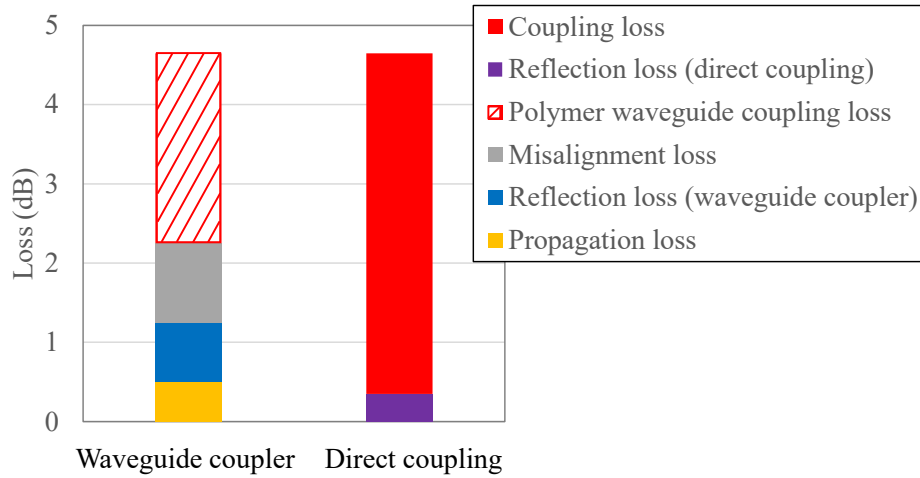
Table 4-1 より、両者の Δ およびコアサイズの違いによって、伝搬モードの光強度分布に大きな差があることがわかる。実際、SMF と SiO_x 光導波路を直接接続した際の接続損失を計算したところ 4.3 dB であり、リンクロスバジェットに大きな影響を与えてしまう。また、この損失値には光路間の屈折率差に起因するフレネル反射損失を含んでおらず、反射損失を考慮するとさらに影響は拡大する。これがポリマー光導波路が接続効率を向上させる部品として期待される理由の一つである。したがって、ポリマー光導波路の光リンクへの挿入により、上記直接接続時に生じる接続損失をどれだけ改善できるかが重要となる。

4.2.4. ポリマー光導波路挿入による光リンク損失への影響推定

続いて、ポリマー光導波路を SMF と SiO_x 光導波路間に挿入した際の接続損失について検討する。なお、本来であれば Fig. 4-3 に示した光リンクに対して、合計の損失を計算すべきであるが、すべての素子はシングルモード動作を前提としており、またそれぞれ短距離の伝搬距離であると想定していることからモード遷移への影響もないと想定される。そこで本論文ではポリマー光導波路の両端での接続損失を個別に計算し、接続損失の合計を最も小さくするポリマー光導波路の最適構造について考える。

今回、ポリマー光導波路の適用で光リンク損失の低減を目指すのが、一方で、ポリマー光導波路という新たな素子を光リンクに挿入することで過剰損失が当然生じる。そこで、まずはポリマー光導波路挿入に伴う過剰損失について考察し、4.2.3.で求めた SMF-SiO_x 光導波路間の直接接続損失 4.3 dB に対してどれだけの接続損失がポリマー光導波路に許容されるかを検討する。

ポリマー光導波路挿入時に生じる過剰損失の要因を、Fig. 4-5 に示すように、伝搬損失、接続損失、フレネル反射損失の 3 種類に分類した。



©2024 Optica

Fig. 4-5 ポリマー光導波路挿入に伴う過剰損失と直接接続時の損失内訳の比較

波長 1310 nm や 1550 nm といった通信帯では、通常ポリマーは C-H の分子振動吸収に起因する高い吸収損失を示す。一方で、各社の材料開発により長波長帯でも低損失を示す材料が開発・報告されており、波長 1310 nm で約 0.2~0.34 dB/cm の伝搬損失を示すポリマー光導波路材料の報告がある[7]。このような材料開発の背景、ならびにモデルとして採用した ORMOCER®樹脂の低損失性を考慮し、今回ポリマー光導波路の伝搬損失として最大 0.5 dB を見積もった。なお、今回想定した光リンクに適用されるポリマー光導波路長は、長くとも 1 cm 程度と短いことが予想される[8]ため、ポリマー光導波路長は 1 cm と想定している。この値は Fig. 4-5 内の黄色のバーに相当する。

Figure 4-3 に示した本研究で想定している端面接続方式では、接続点における反射損失が重要となる。特に光源への戻り光は、光源出力を不安定化させ、信号伝送上のノイズとなる可能性があり、最悪の場合、光源自体の破壊をもたらす[9]。JIS 規格 C5965-1 では、シングルモードの 1310 nm および 1550 nm における反射減衰量等級が、60 dB 以上を等級 1、45 dB 以上 60 dB 未満を等級 2、35 dB 以上 45 dB 未満を等級 3、26 dB 以上 35 dB 未満を等級 4 として定義されている[10]。反射減衰量は光伝送路間の屈折率のミスマッチに伴うフレネル反射損失であり、特に伝送路間に空隙が存在する際には、影響が大きくなる。

フレネル反射損失は波長や偏波、入射角に依存する[11]が、ここでは簡易的に式(4-7)で表される垂直入射時のフレネル反射損失 L_F の算出式を参照した。なお、 I_0 は入射光強度を、 n_1 、 n_2 はそれぞれ物質 1、2 の屈折率を表す。

$$L_F = I_0 \left(\frac{n_1 - n_2}{n_1 + n_2} \right)^2 \quad (4-7)$$

ポリマー光導波路の屈折率を 1.5、空気の屈折率を 1 としたとき、式(4-7)より、フレネル

反射損失はポリマー光導波路の両端で 0.7 dB と見積もられる．この値は Fig. 4-5 内の青色のバーに相当する．

さて，Fig. 4-5 内の青色と黄色のバーの合計より，ポリマー光導波路挿入によって生じる過剰損失は，接続損失を除いて合計 1.2 dB となる．ただし，実際にポリマー光導波路を光リンクに実装する際には，搭載や接着精度に起因した光軸のズレが想定される．このミスアライメントによって生じる過剰損失は，ポリマー光導波路を搭載する方法や装置に依存しているが，搭載時の損失マージンを確保することはポリマー光導波路適用障壁を下げることにつながるため，本研究でも考慮することとした．さて，JIS C 5965-1 (IEC61755-1)では，測定波長 1310 nm でのシングルモード光ファイバ間接続損失を規定しており，この接続損失は光ファイバ端面間隙，光ファイバ軸ずれ及び光ファイバ角度ずれに主に起因する[10]．光ネットワークでは光ファイバ間の接続が多くなり，JIS 規格では統計的に要求される性能別に等級を設けている．挿入損失等級 D では平均挿入損失が 0.50 dB 以下であることと定義されている．また，シングルモード伝送路同士の接続損失を検討する場合，光軸ずれがない状態から 0.5 dB 損失が低下する軸ずれ量を 0.5 dB-misalignment と定義して議論することが多い[12]．そこで本研究では，ミスアライメントによる過剰損失を 0.5 dB/接続箇所と仮定し，両端で 1 dB と見積もった．この値は Fig. 4-5 内の灰色のバーに相当する．この値は許容限界に近い値であり，搭載精度の向上により，さらなる損失改善が見込める．いずれにせよ，ポリマー光導波路搭載に伴うミスアライメントを許容するためには，ミスアライメントがない(光軸が完全に一致している)状態での接続損失を可能な限り低くする必要がある．

一方，SMF と SiO_x 光導波路を直接接続した場合の損失については，既に 4.3 dB と求めた接続損失に加え，素子間に存在する空隙によるフレネル反射損失を考慮する必要がある．式 (4-7)を用いた計算により，0.3 dB として見積もった．この値は Fig. 4-5 内の紫色のバーに相当する．

以上より，ポリマー光導波路に許容される両端での接続損失合計値は，Fig. 4-5 内の赤色斜線バーで示される，2.4 dB であることが明らかとなった．なお，ポリマー光導波路挿入によって生じる過剰損失に含まれているフレネル反射損失 0.7 dB(青色のバー)は，空隙が生じないように突き当て接続をすること，または屈折率整合剤[13]や屈折率整合フィルム[14]等の適用により，屈折率差を低減することで，接続損失を約 0 dB にまで改善することが可能となる．そのような反射損失低減処置を施した場合，ポリマー光導波路に許容される両端での接続損失合計値は，3.1 dB まで拡大することになる．

4.3. SMF-ポリマー光導波路 接続損失評価

4.3.1. SMF とポリマー光導波路間の接続損失(計算)

まず，ポリマー光導波路のパラメータを Fig. 4-4 に示した範囲で変化させて，ポリマー光導波路と SMF 間の接続損失を計算した．計算の様子を Fig. 4-6 に示す．

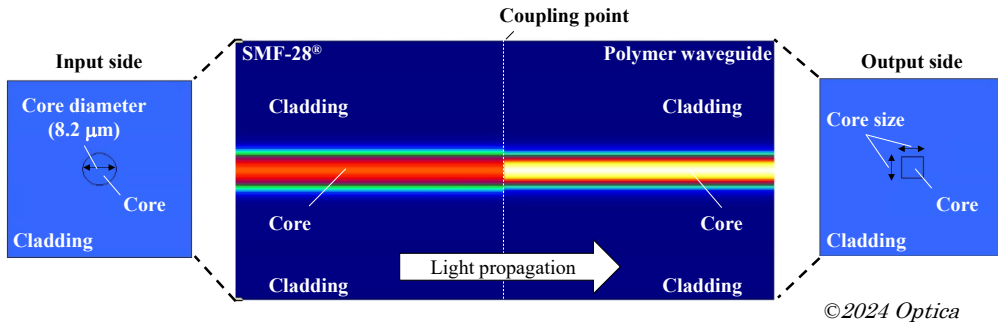


Fig. 4-6 シミュレーションモデルと光伝搬の様子

SMF の最低次の導波モード(TE_{11})に光強度 P_{in} を入射し、伝搬光がそのポリマー光導波路に接続した後、ポリマー光導波路の最低次モードから出射された光強度 P_{out} の和を求める。このとき、接続損失 $L_{con.}$ は次の式(4-8)で表される。

$$L_{con.} = \log_{10} \frac{P_{out}}{P_{in}} \quad (4-8)$$

ここで、 Δ やコア幅、コア高さの組み合わせによってはポリマー光導波路がシングルモードではなく、フューモードやマルチモード動作することがある。例として、 $\Delta = 0.4\%$ かつコア幅、およびコア高さが $15 \mu m$ の SI 型ポリマー光導波路コアの導波モードを計算した結果を Fig. 4-7 に示す。なお、SMF と接続した際にポリマー光導波路に結合した光量のうち、各導波モードへの結合率をそれぞれの導波モード下に併記した。

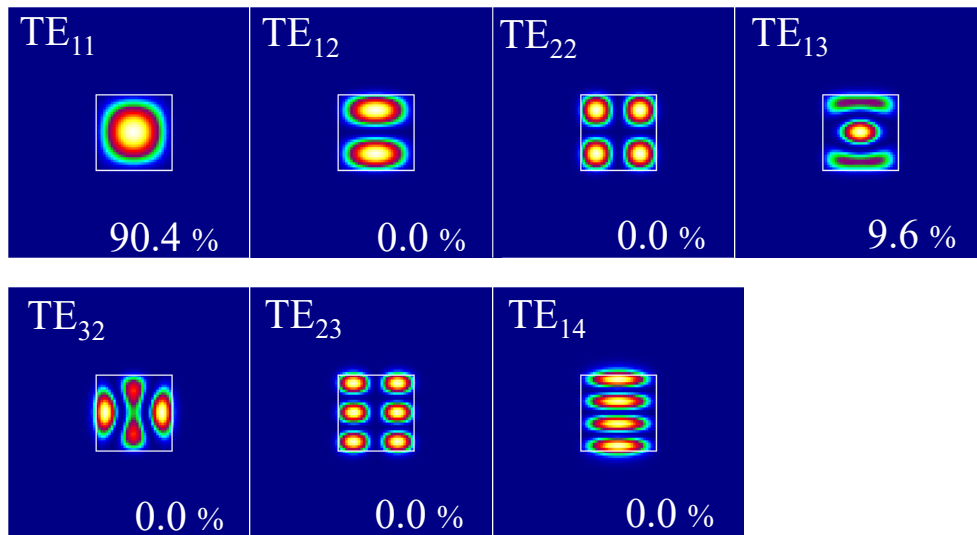


Fig. 4-7 $\Delta = 0.4\%$, $15 \mu m \times 15 \mu m$ SI 型ポリマー光導波路コアの導波モード計算結果

第 4 章 SiO_x 光導波路とシングルモード光ファイバ間接続の為のポリマー光導波路設計

Figure 4-7 より, SMF からの励振光はポリマー光導波路の TE₁₁ モードへの結合が支配的であることが確認できる. 一方で, 9.6%の光強度が高次モードである TE₃₁ モードに結合している. これは TE₃₁ モードがコア中心に強度ピークを有する TE₁₁ モードに近いプロファイルを有しており, TE₁₁ モードに結合できなかった光が TE₃₁ モードに優先的に結合したためと考えられる. ポリマー光導波路の TE₃₁ モードへの結合効率 9.6%は単体では無視できないレベルであるが, 本研究のポリマー光導波路想定用途は部材間の接続素子であり, ポリマー光導波路伝搬後は再び別のシングルモードデバイスへと結合することが想定される. 例えば, SMF 間にポリマー光導波路を挿入した系では, ポリマー光導波路の入射端と出射端での接続損失は等価であり, SMF→ポリマー光導波路 TE₃₁ モード→SMF と結合した場合には, 最終的に SMF の導波モードに結合する光量割合は 9.6%×9.6%の約 0.92%となり, 十分に小さく無視できる. そこで, 本論文ではポリマー光導波路がフューモード, もしくはマルチモードの場合であっても, ポリマー光導波路の最低次モードに結合した光強度のみを抽出し, それ以外の高次モードに結合した光については損失とみなした.

ここで, 計算対象となるポリマー光導波路のパラメータは Δ , コア幅, コア高さの 3 種類であり, 一度に最適設計を求めるのは難しい. そこで, まずポリマー光導波路の Δ を固定し, コア幅とコア高さを変化させて, SMF との接続損失を計算する. 接続損失の計算結果をその損失を示すポリマー光導波路のコア幅・コア高さとともに表にまとめた. 例として $\Delta = 0.4\%$ 時に求めた結果を Table 4-2 に示す.

Table 4-2 矩形 SI 型ポリマー光導波路のコア幅・コア高さ と SMF との接続損失計算結果

@ $\Delta = 0.4\%$

$\Delta = 0.4\%$		Core width (μm)														
Core height (μm)		2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	
	2	8.05	5.46	2.98	1.54	0.93	0.65	0.52	0.46	0.37	0.47	0.50	0.55	0.48	0.68	
	3	5.50	1.86	0.63	0.30	0.19	0.15	0.14	0.16	0.19	0.24	0.29	0.36	0.43	0.51	
	4	3.07	0.64	0.21	0.11	0.09	0.08	0.09	0.11	0.15	0.19	0.25	0.31	0.38	0.46	
	5	1.62	0.31	0.12	0.08	0.07	0.06	0.07	0.09	0.12	0.16	0.21	0.27	0.34	0.42	
	6	0.97	0.19	0.09	0.07	0.06	0.05	0.04	0.06	0.08	0.12	0.17	0.22	0.29	0.37	
	7	0.68	0.15	0.08	0.07	0.05	0.03	0.02	0.03	0.05	0.08	0.13	0.19	0.25	0.33	
	8	0.54	0.14	0.09	0.07	0.04	0.02	0.01	0.01	0.03	0.06	0.11	0.16	0.23	0.30	
	9	0.48	0.16	0.11	0.09	0.06	0.03	0.01	0.01	0.03	0.06	0.10	0.15	0.22	0.29	
	10	0.46	0.19	0.15	0.12	0.08	0.05	0.03	0.03	0.04	0.07	0.11	0.16	0.23	0.30	
	11	0.48	0.24	0.19	0.16	0.12	0.08	0.06	0.06	0.07	0.10	0.13	0.19	0.25	0.32	
	12	0.51	0.29	0.25	0.21	0.17	0.13	0.11	0.10	0.11	0.14	0.17	0.22	0.29	0.36	
	13	0.56	0.36	0.31	0.27	0.22	0.19	0.16	0.15	0.16	0.19	0.22	0.27	0.33	0.40	
	14	0.62	0.43	0.38	0.34	0.29	0.25	0.23	0.22	0.23	0.25	0.28	0.33	0.39	0.46	
	15	0.69	0.51	0.46	0.41	0.37	0.33	0.30	0.29	0.30	0.32	0.35	0.40	0.46	0.53	

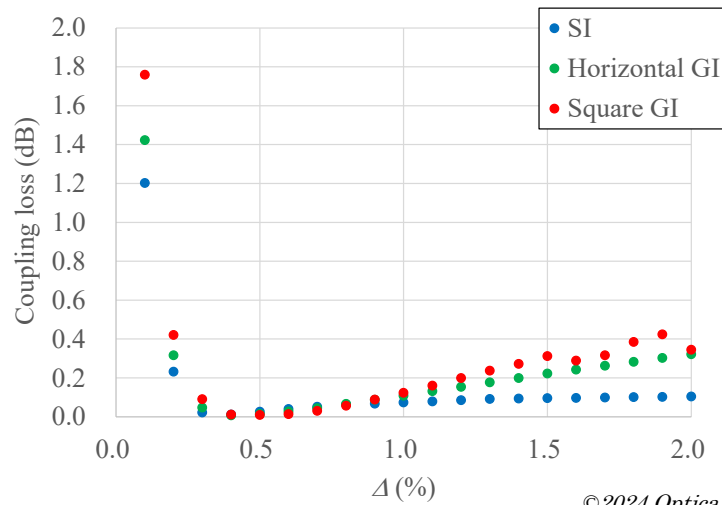
©2024 Optica

Table 4-2 の内, 接続損失が最低となる損失を黄色でハイライトし, その損失を示すコア幅・コア高さを抽出する. このような処理をすべての $\Delta(0.1 \sim 2\%)$ に対して実行することで, 異なる屈折率分布, Δ に対して最適なコア設計とその時の最低接続損失を Table 4-3 にまとめた. また, 最適コア設計時の Δ と最低接続損失の関係を Fig. 4-8 に示した.

Table 4-3 各屈折率分布, Δ の時に得られる SMF との最低接続損失,
ならびにその損失を示すポリマー光導波路コア幅・コア高さ

Δ (%)	Refractive index profile					
	SI		Horizontal GI		Square GI	
	Lowest loss (dB)	core width (μm) × core height (μm)	Lowest loss (dB)	core width (μm) × core height (μm)	Lowest loss (dB)	core width (μm) × core height (μm)
0.1	1.2	11×11	1.4	15×12	1.8	15×15
0.2	0.23	9×8	0.32	13×9	0.42	13×13
0.3	0.02	8×8	0.05	11×8	0.09	12×12
0.4	0.01	8×8	0.01	12×8	0.01	11×11
0.5	0.03	9×9	0.01	14×9	0.01	14×14
0.6	0.04	10×10	0.03	15×10	0.01	15×15
0.7	0.05	10×10	0.04	15×10	0.03	15×15
0.8	0.06	11×11	0.07	15×10	0.06	15×15
0.9	0.07	11×11	0.09	15×11	0.09	15×15
1.0	0.07	11×11	0.11	15×11	0.12	15×15
1.1	0.08	11×11	0.13	15×11	0.16	15×15
1.2	0.09	11×11	0.15	15×11	0.20	15×15
1.3	0.09	11×11	0.18	15×11	0.24	15×15
1.4	0.09	12×12	0.20	15×11	0.27	2×4
1.5	0.10	12×12	0.22	15×11	0.31	3×2
1.6	0.10	12×12	0.24	15×12	0.29	2×3
1.7	0.10	12×12	0.26	15×12	0.32	2×3
1.8	0.10	12×12	0.28	15×12	0.38	2×3
1.9	0.10	12×12	0.30	15×12	0.42	2×2
2.0	0.10	12×12	0.32	15×12	0.34	2×2

©2024 Optica



©2024 Optica

Fig. 4-8 ポリマー光導波路最適コア設計時の Δ と最低接続損失の関係

Table 4-3, Fig. 4-8 より, 屈折率分布によらず, ポリマー光導波路のコア設計を最適化することで $\Delta = 2\%$ のような比較的高い Δ であっても, SMF との接続損失が 0.5 dB を下回るような低損失性を示すことが分かった. この接続損失値は 4.2.4. で設定した目標値 3.1 dB を大きく下回っており, ポリマー光導波路と SMF の接続が光リンクロスバジェットに与える影響がそれほど大きくないことが確認できた. また, ポリマー光導波路にスポットサイズ変換以外の機能, 例えばファンイン/ファンアウト機能, などを付与する場合, 省スペースでの配線取り回しの為に曲げ半径を小さくする必要性が出てくる. Δ と曲げ半径には逆の相関があり, 小曲げ半径実現のためには高い Δ が求められる場合がある. Table 4-3, Fig. 4-8 で示した広い Δ 領域での低接続損失は, ポリマー光導波路に高い設計自由度をもたらし, そのような小曲げ半径要求に対して優れた特性を示すといえる.

また, Table 4-3, Fig. 4-8 より, ポリマー光導波路の Δ が 0.4~0.6% の時に, SMF との接続損失は約 0 dB にまで低減可能であることがわかる. これはポリマー光導波路の Δ が接続対象となる SMF の $\Delta = 0.4\%$ に近い値であり, ポリマー光導波路コアの断面形状や屈折率分布が異なっていたとしても, 伝搬光間のモードフィールド類似性が高くなるためと考えられる. 実際, Table 4-2 より, $\Delta = 0.4\%$ の時の SI 型ポリマー光導波路の最適コアサイズは $8\mu\text{m} \times 8\mu\text{m}$ であり, SMF の設定コア直径 $8.2\mu\text{m}$ に近いことがわかる.

一方, Table 4-3 より, 屈折率分布によって最適コアサイズが大きく異なり, GI 型ポリマー光導波路の最適コアサイズは SI 型と比較して大きいことが確認できる. この結果の詳細な検討をすべく, SMF との最低接続損失を示すときのポリマー光導波路コア設計(コア幅, コア高さ, 比屈折率差 Δ)と, その設計で計算される出射光強度分布を合わせて Fig. 4-9 に示す.

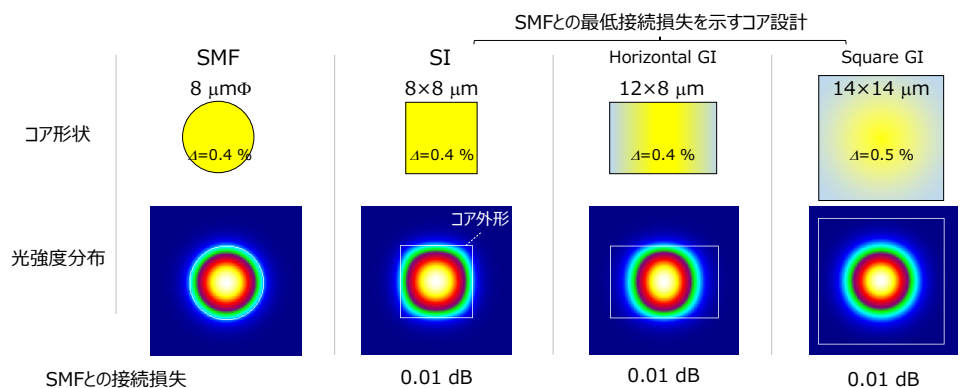


Fig. 4-9 最適コア設計, 出射光強度分布, SMF との接続損失の比較

Figure 4-9 内の光強度分布結果より, SI 型コアの SMF ならびに SI 型ポリマー光導波路はコアとクラッド境界にまで光強度が存在していることがわかる. 一方で, これは GI 型コア内に形成された屈折率勾配により, モードフィールドがよりコア中心に強く閉じ込められ

ためである。したがって、水平方向のみに GI 型の分布を持つ水平 GI 型ポリマー光導波路では、最適コアの幅のみが SI 型と比較して大きく、高さ方向では SI 型のふるまいをしていることがわかる。また、矩形 GI 型ポリマー光導波路では全周に屈折率勾配を有するためにコア幅・高さともに大きな値で最低接続損失を示しているが、 $\Delta=1.4\%$ 以降で最適なコアサイズが急激に小さくなっていることが確認できる。 Δ が大きくなるにつれて、特に屈折率勾配によって GI 型ポリマー光導波路コアでは光閉じ込め効果がさらに強くなる傾向があり、SMF の持つモードフィールドとマッチングさせるためにはコアサイズを大きくする必要があることがわかった。

しかしながら、本研究で設定したコアサイズの上限は $15\ \mu\text{m}$ であり、 $15\ \mu\text{m}$ 以上のコアサイズで最低損失を示す場合、むしろ極めて小さいコアサイズのポリマー光導波路が示す接続損失が $15\ \mu\text{m}$ コアサイズ時の損失を下回ることがある。実際、 $\Delta=1.4\%$ 時に最低接続損失を示す矩形 GI 型ポリマー光導波路のコア設計は $2\times 4\ \mu\text{m}$ であり、そのときの MFD は水平方向で $3.9\ \mu\text{m}$ 、高さ方向で $4.7\ \mu\text{m}$ という大きな値を示している。この検証の為、 $\Delta=2.0\%$ 、かつコア形状を正方形(Core size = コア幅 = コア高さ)としたとき、矩形 GI 型ポリマー光導波路と SMF の接続損失の計算結果を Fig. 4-10 に、ポリマー光導波路コアから出射される基底モードの光強度分布を Fig. 4-11 に示す。Fig. 4-10 より、Core size = $5\ \mu\text{m}$ で SMF との接続損失が最大となり、その前後で損失が低減する傾向が確認できる。Fig. 4-11 にて光強度分布を確認すると、Core size = $5\ \mu\text{m}$ (緑)では相対強度 10%以下となる領域で光強度分布の拡がりが抑制されており、MFD の大きい SMF との接続損失が他のコアサイズと比較して小さくなったものと考えられる。一方、Core size = $2\ \mu\text{m}$ (青)では相対強度 10%以下の領域では、コアサイズの大きい $5\ \mu\text{m}$ より広い光強度分布を示しており、エバネッセント領域がコア外形から染み出して拡がっていることが確認できる。このクラッド領域へのエバネッセント領域の染み出しにより物理的なコアサイズ以上に光強度分布が広がった結果、SMF との良好な接続特性を示したと考えられる。

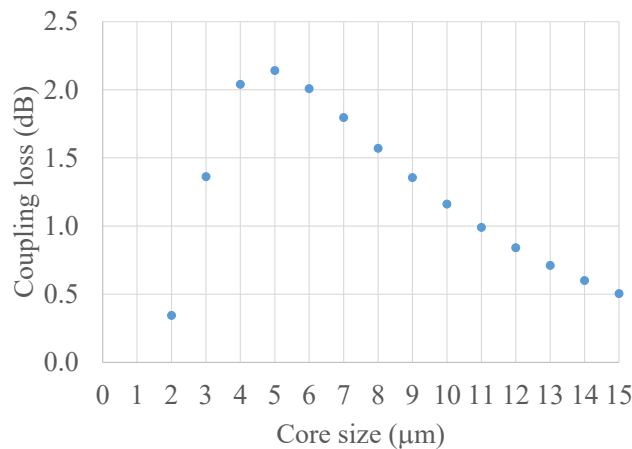
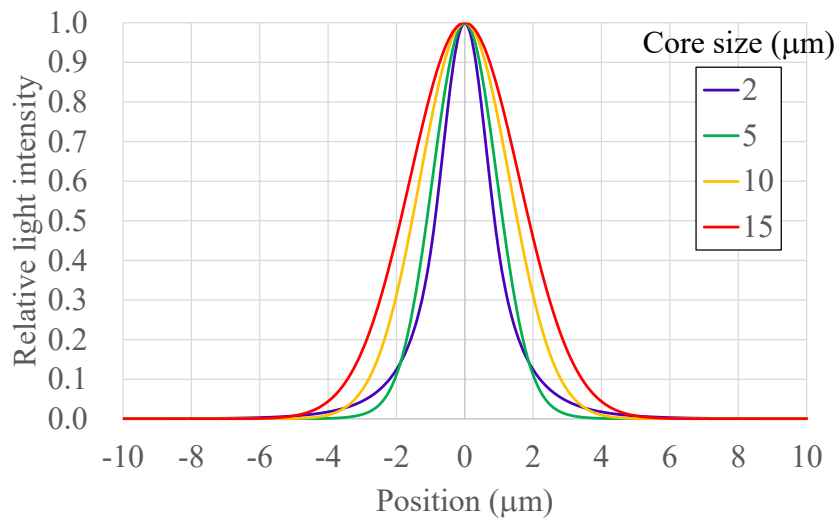


Fig. 4-10 $\Delta=2.0\%$, 矩形 GI 型ポリマー光導波路コアサイズと SMF の接続損失の関係

Fig. 4-11 $\Delta = 2.0\%$, 矩形 GI 型ポリマー光導波路の出射光強度プロファイル比較

以上の結果より、高い Δ を持つ領域では計算領域設定に起因する特異な挙動を示すものの、GI 型ポリマー光導波路は SI 型ポリマー光導波路と比較し、より大きなコアサイズで SMF と低接続損失を示すことがわかった。一般に、コアサイズが大きいほどプロセスや製造条件の選択性は広がり、また、界面荒れなどの影響も相対的に小さくすることができるため、GI 型ポリマー光導波路の製造公差は SI 型と比較して大きくなる可能性が有る。

つづいて、ポリマー光導波路の屈折率分布の違いによるモードプロファイルへの影響を確認すべく、 Δ の異なる屈折率分布についてコアサイズと MFD の関係性を計算した。代表値として $\Delta = 0.4\%$ の結果を Fig. 4-12、 $\Delta = 1\%$ の結果を Fig. 4-13、 $\Delta = 2\%$ の結果を Fig. 4-14 に示す。なお、傾向把握と簡略化の為図中ではコア外形は正方形とし、図中の横軸に用いたパラメータ Core size は正方形コアの一辺の長さを示している、また、水平 GI 型ポリマー光導波路に関しては、水平方向と垂直方向で挙動が大きく異なっているため、2 軸のデータを示した。

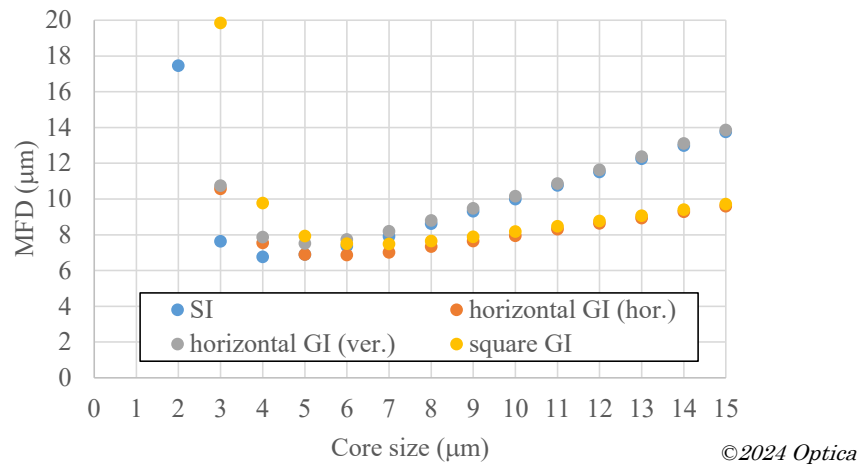


Fig. 4-12 ポリマー光導波路コアサイズと MFD の関係@ $\Delta = 0.4\%$

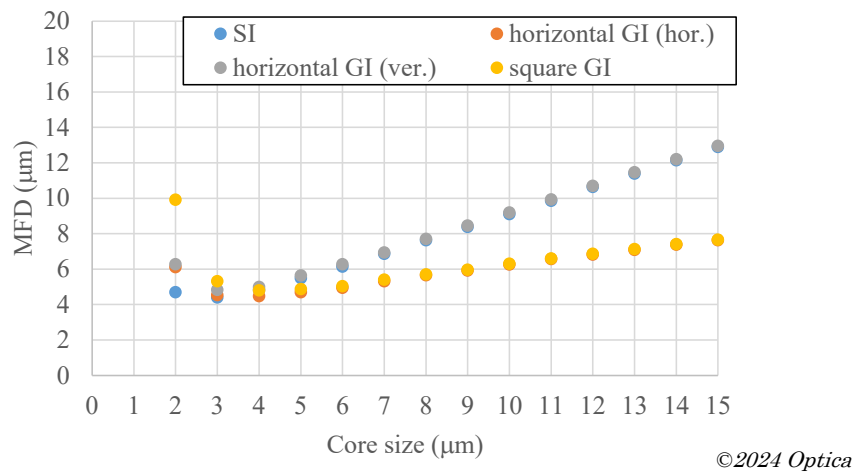


Fig. 4-13 ポリマー光導波路コアサイズと MFD の関係@ $\Delta = 1\%$

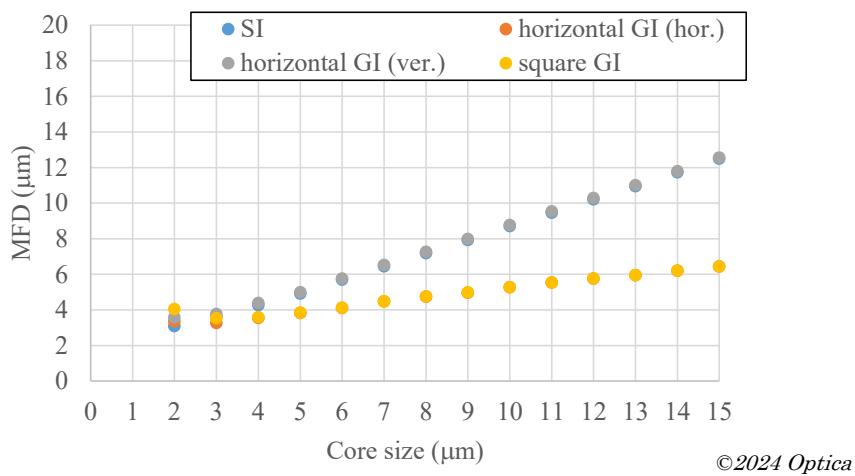


Fig. 4-14 ポリマー光導波路コアサイズと MFD の関係@ $\Delta = 2\%$

Figure 4-12 より、 $\Delta=0.4\%$ では、屈折率分布に関わらず、Core size = 4~6 μm の領域で MFD が最小値をとっていることがわかる。本論文ではこのように MFD が極小となるコアサイズのことを、「臨界コアサイズ」と定義する。臨界コアサイズからコアサイズが増大すること、当然 MFD も増大することになる。一方で、臨界コアサイズからコアサイズが減少することでも MFD が増大しているが、これは光の閉じ込めが最大となっている臨界コアサイズからさらにコアサイズが狭小化することで、エバネッセントのクラッドへの染み出しが大きくなることを示している。また、GI 型コアでは、SI 型と比較して臨界コアサイズからコアサイズが減少した際の MFD 変化量が大きく、急峻な増加が見られている。これは Fig. 4-15 で示すような実効屈折率の考え方で説明できる。GI 型の屈折率勾配を持つコアは同等の Δ を有する SI 型のコアと比較して実効屈折率が低くなっており、コア内部への光閉じ込めが弱まった結果、よりコアの外へとエバネッセント領域が拡大したためと考えられる。

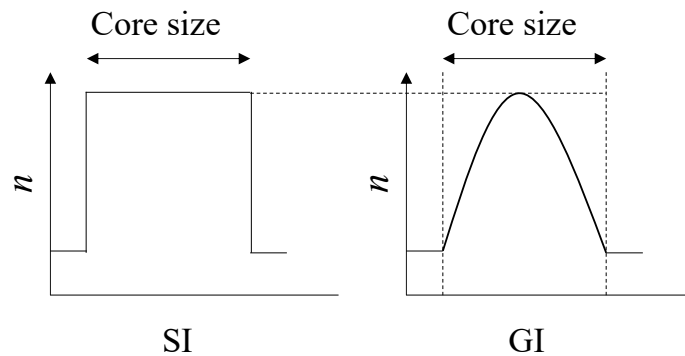


Fig. 4-15 SI 型と GI 型の屈折率構造比較

一方、Fig. 4-12 より、臨界コアサイズより大きいコアサイズでの傾向に着目すると、GI 型ポリマー光導波路は SI 型と比較してコアサイズ変動時の MFD 変化量が小さいことがわかる。これは十分な光閉じ込めが見込める Δ 条件下での屈折率勾配によるコア中心部への光閉じ込め効果によるものである。接続損失低減の為にはモードフィールド整合が必要であるが、製造ばらつきや周囲環境変動によりコアサイズが変動することは μm , nm オーダーレベルでは容易に考え得る。GI 型ポリマー光導波路は SI 型と比較して、コアサイズ変動時の MFD 変化が小さいことから、GI 型ポリマー光導波路は製造トレランスや周囲環境変動耐性という点で優位性を示すといえる。

Figure 4-13, Fig. 4-14 より、ポリマー光導波路の Δ が大きくなるにつれ、臨界コアサイズ、ならびに臨界コアサイズで示す MFD が小さくなっていく傾向が見られる。これは Δ の増大によりポリマー光導波路コアの光閉じ込め効果が強まり、小さいコアサイズでも十分な光閉じ込めを発揮できるためである。

この臨界コアサイズの存在は、ポリマー光導波路特性に大きな影響を与えることが予想されるため、より詳細に検証すべく、ここまで仮定していたポリマー光導波路の屈折率分布

である，矩形 SI 型，水平 GI 型，矩形 GI 型に加えて円形 SI 型と，円形 GI 型を比較用として計算を行った．

はじめに，異なる屈折率分布，コアサイズを有するポリマー光導波路が $\Delta = 0.1 \sim 2.0\%$ の範囲内で示す MFD を計算した．例として $\Delta = 0.4\%$ の時の各屈折率分布，コアサイズを持つポリマー光導波路が示す MFD の計算結果を Fig. 4-16 に示す．

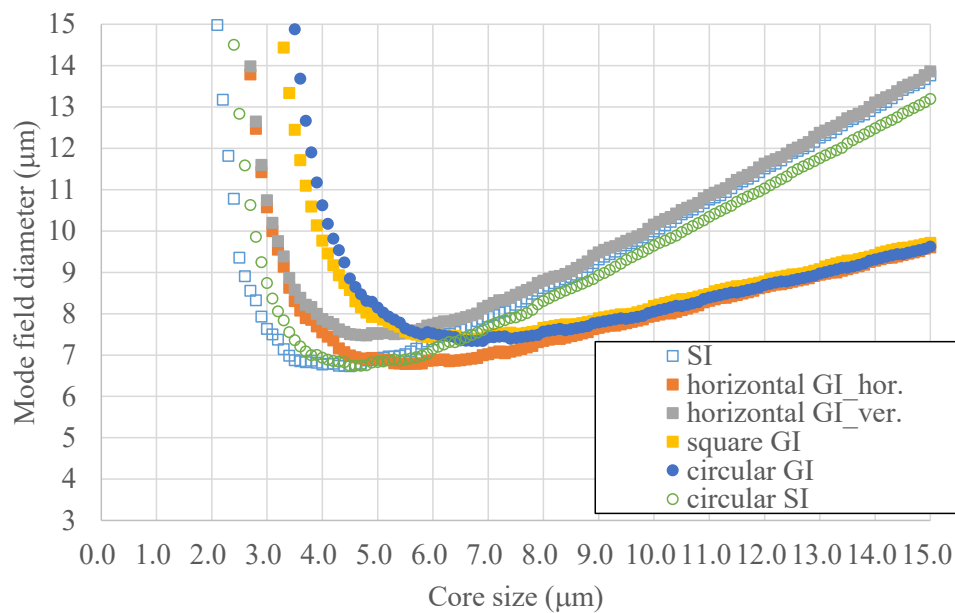


Fig. 4-16 臨界コアサイズ時の Δ と MFD の関係性

Figure 4-16 より，MFD がコアサイズに依存しており，また，その関係性が屈折率分布によって異なることがわかる．つづいて，Fig. 4-16 内で MFD が最小となるコアサイズを抽出し，臨界コアサイズとして定義した．この処理を $\Delta = 0.1 \sim 2.0\%$ に対して実行し，各 Δ における臨界コアサイズ時にコアから出射される MFD を算出し，Fig. 4-17 にまとめた．

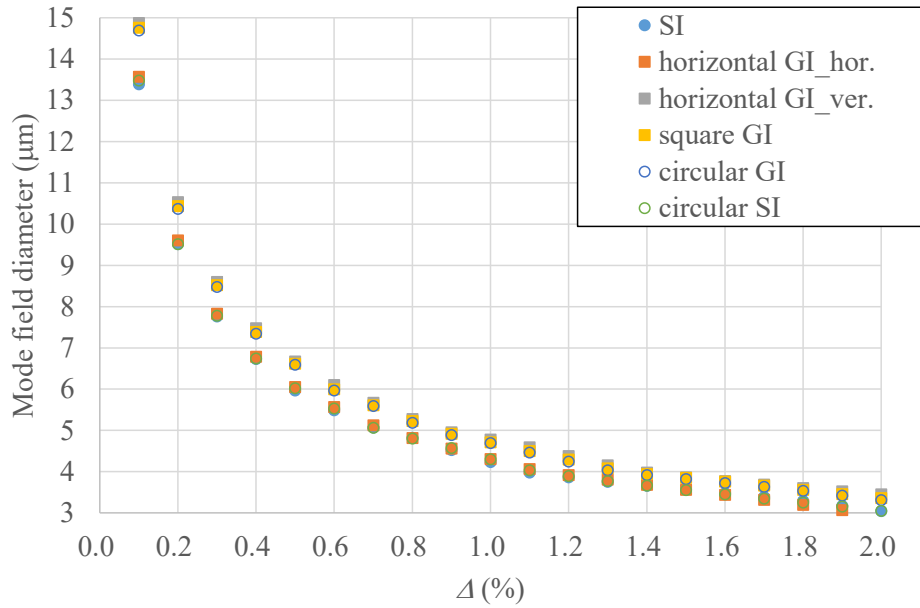
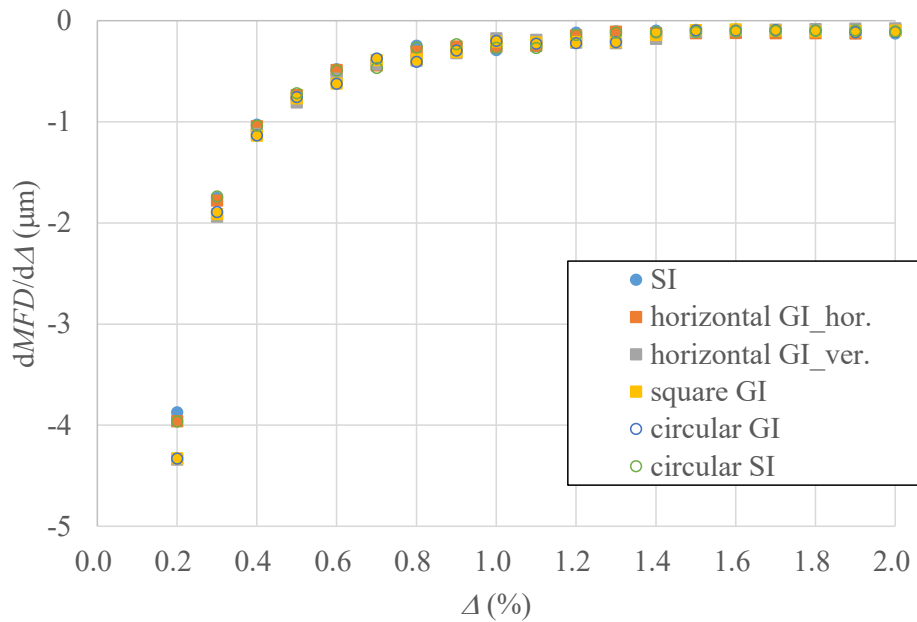

 Fig. 4-17 臨界コアサイズ時の Δ と MFD の関係性

Figure 4-17 より，高 Δ 領域では MFD の Δ 依存性が小さくなっていることが確認できた．ここで，屈折率分布間の Δ と MFD の関係性を比較すべく，縦軸：MFD の Δ に対する変化量 横軸： Δ の結果を Fig. 4-18 に示す．ここで Core size = $x \mu\text{m}$ における MFD の変化量 $dMFD/d\Delta(x)$ は以下の式(4-9)で定義した．

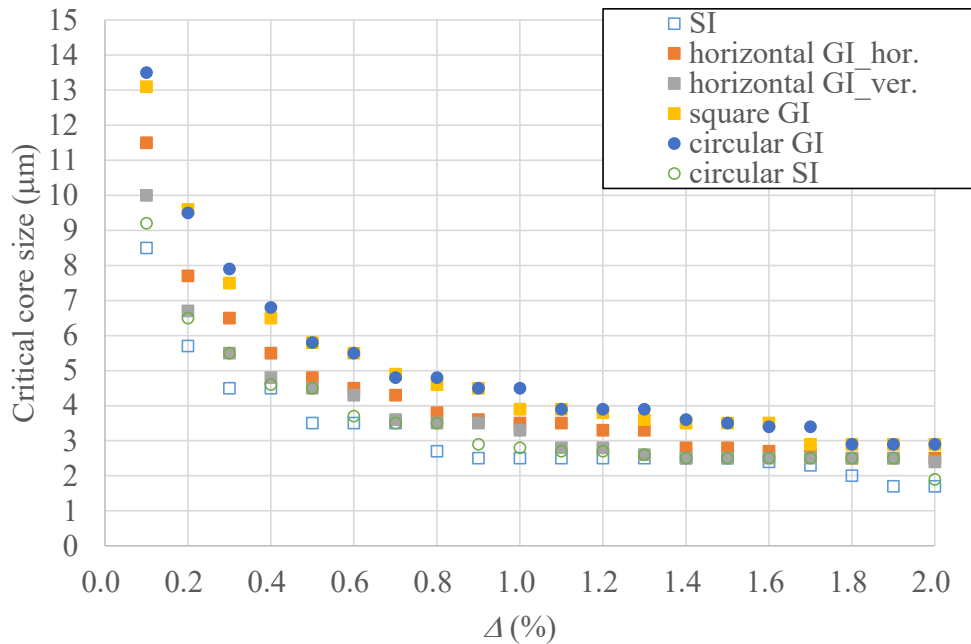
$$dMFD/d\Delta(x) = MFD(x) - MFD(x-1) \quad (4-9)$$

Figure 4-18 より，ほとんど屈折率分布間での傾向差が確認できないことから，臨界コアサイズ条件下での MFD の Δ 依存性はほぼ同一であることがわかった．これは屈折率分布そのものが MFD の Δ 依存性に影響を与えているのではなく，光閉じ込め効果の違いによる影響が大きいことを示唆している．


 Fig. 4-18 臨界コアサイズ時の Δ と MFD 変化量の関係性

つづいて Δ と臨界コアサイズの関係性を抽出し、Fig. 4-19 にまとめた。Fig. 4-19 より、ポリマー光導波路の屈折率分布によらず、 Δ が増大することで臨界コアサイズが小さくなるのがわかる。これは Δ の増大により、コアサイズが小さくなったとしても十分な光の閉じ込め力を確保できたためであると考えられる。また、コア形状が同じ条件下での屈折率分布毎のふるまいに着目すると、矩形コアおよび円形コアにかかわらず常に GI 型が SI 型よりも大きな臨界コアサイズを示していることがわかる。これは GI 型屈折率分布が SI 型と比較して実効屈折率が小さい値を示すためである。

また、臨界コアサイズの存在により、十分な Δ が光導波路構造に無い場合、MFD の縮小には限界があり、接続対象によってはモードフィールドのマッチングが取れないことが考えられる。このようにポリマー光導波路は接続対象に合わせて最適なコアサイズのみならず、 Δ の設計も必須となることが判明した。特に、マスク設計や塗布条件等で容易に変更可能なコアサイズとは異なり、 Δ はコア、ならびにクラッドの樹脂依存であり、ポリマー光導波路設計のファーストステップであると言え、アプリケーションに適合した樹脂設計の重要性が本検討により明らかとなった。


 Fig. 4-19 Δ と臨界コアサイズの関係性

4.3.2. SMF とポリマー光導波路間の接続損失(実験)

4.3.1.でのシミュレーション結果を検証すべく、3 章で作製したポリマー光導波路と SMF 間の接続損失評価を行った。本研究では SMF との接続損失を正確に評価するために、以下の手法で接続損失を算出した。なお、厳密にはプローブに用いた光ファイバの伝搬損失も考慮すべきではあるが、石英光ファイバの伝搬損失は dB/km のオーダー[15]と十分に低く、今回用いた 2 m 長の光ファイバでは無視できるものとした。

SMF との接続損失算出方法

①-1 リファレンス光量測定 (測定系 Fig. 4-20 (a))

ポリマー光導波路を挿入しない状態で、励振プローブを調芯し、ピーク強度(透過光量)を測定。

励振プローブ : SMF

受光プローブ : 105 $\mu\text{m}\Phi$ SI-MMF NA:0.22 (すべての光を受光可能な大口径かつ高 NA な光ファイバ)

[透過光量に影響する要素] フレネル損失(SMF-空隙), フレネル損失(空隙-105 $\mu\text{m}\Phi$ SI-MMF), 接続損失(SMF-105 $\mu\text{m}\Phi$ SI-MMF)

①-2 ポリマー光導波路挿入光量(SI-MMF 受光)測定 (測定系 Fig. 4-20 (b))

ポリマー光導波路をプローブ間に挿入, 各光導波路コアを調芯し, ピーク強度(透過光量)を測定。

励振プローブ：SMF

受光プローブ：105 $\mu\text{m}\Phi$ SI-MMF NA:0.22 (すべての光を受光可能な大口径かつ高 NA な光ファイバ)

[透過光量に影響する要素] フレネル損失(SMF-空隙), フレネル損失(空隙-ポリマー光導波路), 接続損失(SMF-ポリマー光導波路), 伝搬損失(ポリマー光導波路), フレネル損失(ポリマー光導波路-空隙), フレネル損失(空隙-105 $\mu\text{m}\Phi$ SI-MMF), 接続損失(ポリマー光導波路-105 $\mu\text{m}\Phi$ SI-MMF)

①-3 ポリマー光導波路挿入損失(SI-MMF 受光)算出

①-1 で得たリファレンス光量と①-2 で得たポリマー光導波路挿入光量(SI-MMF 受光)の差分を計算することで、一部の損失要素を相殺することができる。この差分をポリマー光導波路挿入損失として定義し、8 ch.分の挿入損失データから平均挿入損失を算出した。

[挿入損失に影響する要素] 接続損失(SMF-105 $\mu\text{m}\Phi$ SI-MMF), フレネル損失(空隙-ポリマー光導波路), 接続損失(SMF-ポリマー光導波路), 伝搬損失(ポリマー光導波路), フレネル損失(ポリマー光導波路-空隙), 接続損失(ポリマー光導波路-105 $\mu\text{m}\Phi$ SI-MMF)

②-1 リファレンス測定 (測定系 Fig. 4-20 (c))

ポリマー光導波路を挿入しない状態で、励振プローブを調芯し、ピーク強度(透過光量)を測定。

励振プローブ：SMF

受光プローブ：SMF

[透過光量に影響する要素] フレネル損失(SM-空隙), フレネル損失(空隙-SMF), 接続損失(SMF-SMF)

②-2 ポリマー光導波路挿入光量(SMF)測定 (測定系 Fig. 4-20 (d))

ポリマー光導波路をプローブ間に挿入、各光導波路コアを調芯し、ピーク強度(透過光量)を測定。

励振プローブ：SMF

受光プローブ：SMF

[透過光量に影響する要素] フレネル損失(SMF-空隙), フレネル損失(空隙-ポリマー光導波路), 接続損失(SMF ポリマー光導波路), 伝搬損失(ポリマー光導波路), フレネル損失(ポリマー光導波路-空隙), フレネル損失(空隙-SMF), 接続損失(ポリマー光導波路- SMF)

②-3 ポリマー光導波路挿入損失(SMF 受光)算出

②-1 で得たリファレンス光量と②-2 で得たポリマー光導波路挿入光量(SMF 受光)の差分を計算することで、一部の損失要素を相殺することができる。この差分をポリマー光導波

路挿入損失(SMF 受光)として定義し, 8 ch.分の挿入損失データから平均挿入損失を算出した.

[挿入損失に影響する要素] 接続損失(SMF-SMF), フレネル損失(空隙-ポリマー光導波路), 接続損失(SMF-ポリマー光導波路), 伝搬損失(ポリマー光導波路), フレネル損失(ポリマー光導波路-空隙), 接続損失(ポリマー光導波路- SMF)

③ ポリマー光導波路- SMF 接続損失算出

①-3, ②-3 で算出した平均挿入損失の差分を求めることで, ポリマー光導波路の伝搬損失やフレネル損失といったほとんどの不確定要素を相殺することができる. この差分をポリマー光導波路-SMF の接続損失として定義した. なお, この時, 求めたいポリマー光導波路-SMF 接続損失以外にも, 下記要素が相殺されずに含まれているものの, いずれも損失はほとんど生じないと想定されるため無視できるものとした.

[相殺されずに残る要素] 接続損失(SMF-105 μ m Φ SI-MMF), 接続損失(SMF-SMF)

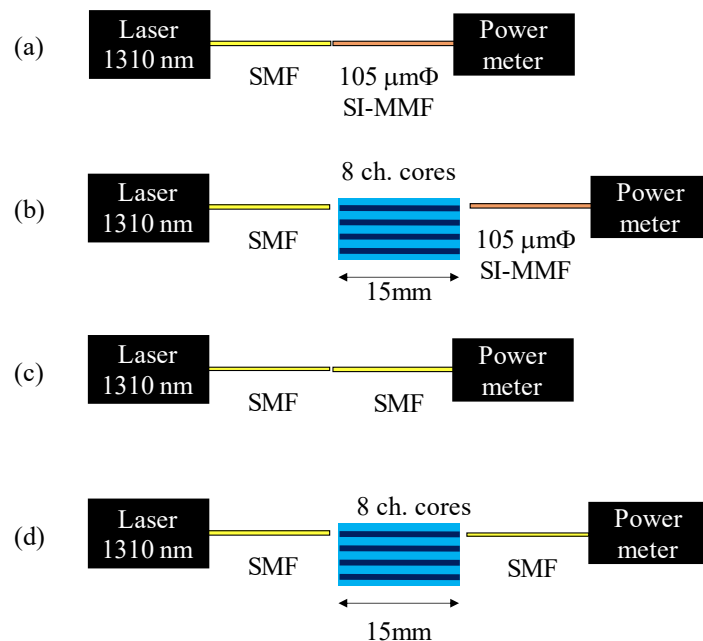


Fig. 4-20 SMF との接続損失評価系

直接露光法, およびフォトアドレス法で作製した 2 種のポリマー光導波路の異なるコア幅を有するコアに対し, 上記光学評価を行った. なお, 作製の都合上, 直接露光法で作製した矩形 SI 型ポリマー光導波路の導波路長は 30 mm, フォトアドレス法で作製した水平 GI 型ポリマー光導波路の導波路長は 15 mm となっている.

直接露光法で作製した矩形 SI 型ポリマー光導波路のポリマー光導波路平均挿入損失(SI-MMF 受光), ポリマー光導波路平均挿入損失(SMF 受光) の結果をもとに算出した ポリマ

一光導波路-SMF 平均接続損失 を Fig. 4-21 に示す. なお, Fig. 4-21 に含まれていないコア幅水準については, 光損失が極めて大きく ch. 間のばらつきの影響を除去しきれないため評価対象外とした. また, ポリマー光導波路平均挿入損失(SI-MMF 受光), ポリマー光導波路平均挿入損失(SMF 受光) 結果については, Appendix に掲載した.

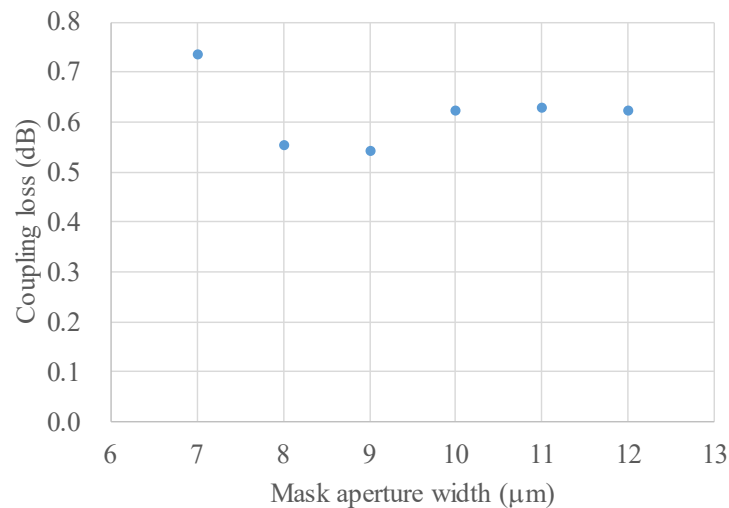


Fig. 4-21 直接露光法で作製した矩形 SI 型ポリマー光導波路と SMF 間の接続損失

Figure 4-21 より, SMF との平均接続損失はマスク開口幅 9 μm で 0.54 dB であった. 前章で示した Fig. 3-23 の測定結果より, 該当するコアはコア幅 : 4.8 μm コア厚み : 4.6 μm であることがわかっている. したがって, Table 4-2 で既に表示した結果より, シミュレーション上では 0.1~0.2 dB の接続損失が想定されるが, 今回の実測ではそれを 0.4 dB 程度上回っていることがわかる. この要因としては測定精度が十分でなかったことが考えられる. 特に SMF で受光する測定系ではコア中心位置の不一致により, 挿入損失の測定結果は悪化し, 差分で得られる接続損失を上昇させてしまう. 一方で, Fig. 4-21 より, マスク開口幅 9 μm で SMF との接続損失は極小を取り, 幅が 9 μm から大きくなる, もしくは小さくなることで接続損失は悪化していることがわかる. この考察の為, Fig. 4-22 に Fig. 4-21 と対応する形で出射 NFP から求められる MFD を示す. Fig. 4-22 より, SMF との高い接続効率を示したコア設計では, MFD が接続対象である SMF の 9.1 μm と類似しており, 光強度分布の重なり積分で算出される両者の接続効率も高くなったと考えられる. また, この MFD の類似性に加え, MFD が水平方向と垂直方向で近い値を示していることから, 出射 NFP が高い対称性を有しており, 円形コアを有する SMF との優れた接続特性が発現したと考えられる.

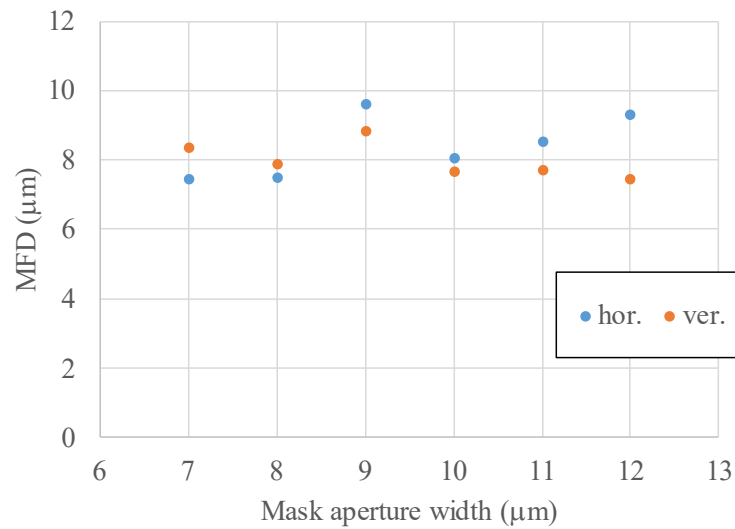


Fig. 4-22 直接露光法で作製した矩形 SI 型ポリマー光導波路の MFD 測定結果

続いて、フォトアドレス法で作製した水平 GI 型ポリマー光導波路の損失結果に関しても、SI 型と同様の手法で接続損失を算出した。算出した水平 GI 型ポリマー光導波路と SMF 間の接続損失を Fig. 4-23 に、水平 GI 型ポリマー光導波路の MFD 測定結果を Fig. 4-24 に示す。また、接続損失算出に用いた挿入損失の測定結果については、Appendix に掲載した。

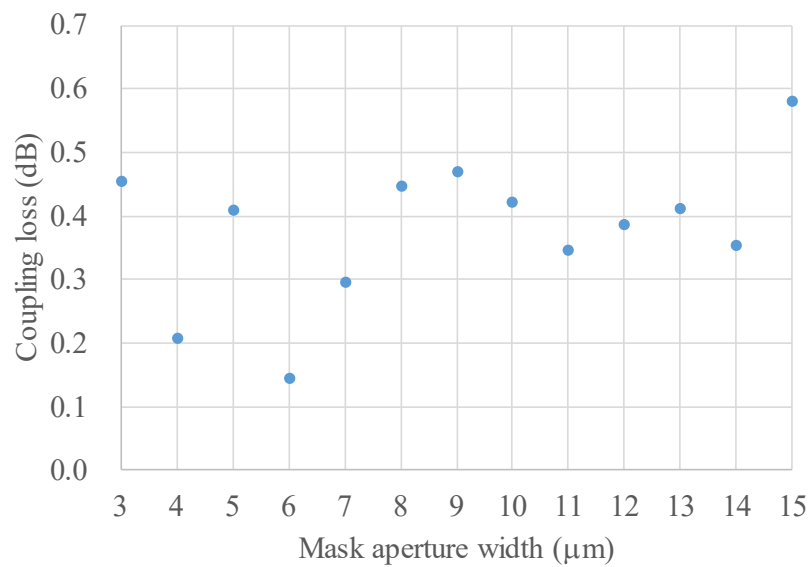


Fig. 4-23 フォトアドレス法で作製した水平 GI 型ポリマー光導波路と SMF 間の接続損失

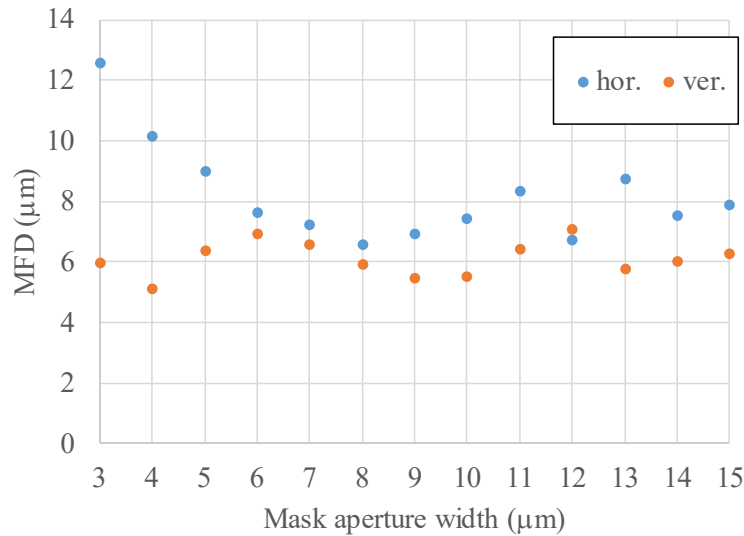


Fig. 4-24 フォトアドレス法で作製した水平 GI 型ポリマー光導波路の MFD 測定結果

Figure 4-23 より、マスク開口幅 6 μm の時に接続損失 0.14 dB と極めて低い損失を示している。これは、IEC 規格である 0.35 dB 以下の水準[16]を満たしており、十分低損失であるといえる。この低損失は、Appendix に掲載した表に示したように、挿入損失測定時の標準偏差が小さく、安定して光導波路が形成できていること、さらには安定した測定ができたことが大きい。シミュレーション結果と比較すべく、 $\Delta = 0.6\%$ 水平 GI 型ポリマー光導波路のコア設計と SMF との接続損失の計算結果を Table 4-4 に示す。なお、Table 4-2 と同様に、Table 4-4 内の最低接続損失を示すセルを黄色でハイライトしている。

Table 4-4 水平 GI 型ポリマー光導波路のコア幅・コア高さ と SMF との接続損失計算結果
@ $\Delta = 0.6\%$

$\Delta = 0.6\%$		Core width (μm)													
		2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Core height (μm)	2	7.8	4.9	2.2	1.0	0.5	0.3	0.2	0.2	0.5	0.2	0.2	0.2	0.3	0.2
	3	5.0	1.4	0.4	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.3
	4	2.5	0.4	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.3	0.3
	5	1.3	0.2	0.1	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2
	6	0.7	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2
	7	0.5	0.1	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
	8	0.4	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
	9	0.4	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.1	0.1	0.1	0.1	0.0	0.0	0.0
	10	0.4	0.2	0.2	0.3	0.2	0.2	0.2	0.1	0.1	0.1	0.1	0.0	0.0	0.0
	11	0.4	0.3	0.3	0.3	0.3	0.2	0.2	0.2	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.0
	12	0.5	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.2	0.2	0.2	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
	13	0.5	0.4	0.4	0.4	0.4	0.3	0.3	0.3	0.2	0.2	0.2	0.1	0.1	0.1
	14	0.6	0.5	0.5	0.5	0.4	0.4	0.4	0.3	0.3	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2
	15	0.6	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.4	0.4	0.3	0.3	0.3	0.3	0.2

Table 4-4 より、コア幅 6 μm 、コア厚み 5.5 μm の時の接続損失計算結果は 0.2 dB であり、実験結果が計算結果を下回る結果となった。通常、シミュレーション結果を実測が上回ることとは考えられないが、第3章でも述べた通り、水平 GI 型ポリマー光導波路ではコア幅狭小化に伴い、 Δ が低下する傾向にあり、Table 4-4 との比較が必ずしも正しくないことが今回の

結果に繋がったと考えられる．実際， $\Delta=0.4\%$ の時には接続損失の計算結果は 0.1 dB 以下であり，今回得られた実測値を下回っていることが分かった．

4.3.3. SMF とポリマー光導波路間の接続損失トレランス(実験)

ポリマー光導波路を実装する際，実装ズレによる損失増大が懸念される．そこで本章では，MFD とミスアライメントトレランスの関係を確認した．

一般的に，2つの光素子が接続される際，MFD のミスマッチ以外にも軸ズレや角度ズレ，素子間の空隙により過剰損失が生じる．これらを考慮した光ファイバ同士の結合効率 η は式(4-10)で表される[17]．また，接続点に異物が付着することでも損失は生じるが，異物の材質や大きさ，形状によって生じる損失が異なるため，本章では考慮にいていない．式(4-10)はガウスビーム同士の結合式であり，ガウスビーム近似可能な光ビームにのみ成り立つ． λ は波長， x_0 は光軸ズレ(ミスアライメント)， θ は角度ズレ， z は光ファイバ間の空隙間隔， ω_1 は出射側光ファイバ MFD の 1/2 の値， ω_2 は受光側光ファイバ MFD の 1/2 の値をそれぞれ示している．

$$\eta = k \exp \left[-k \left\{ \frac{x_0^2}{2} \left(\frac{1}{\omega_1^2} + \frac{1}{\omega_2^2} \right) \right\} + \frac{\pi^2 \theta^2}{2\lambda^2} (\omega_1^2(z) + \omega_2^2) - x_0 \theta \frac{z}{\omega_1^2} \right] \quad (4-10)$$

$$k = \frac{4}{\left(\frac{\omega_1 + \omega_2}{\omega_2 + \omega_1} \right)^2 + \left(\frac{\lambda z}{\pi \omega_1 \omega_2} \right)^2} \quad (4-11)$$

$$\omega_1(z) = \omega_1 \sqrt{1 + \left(\frac{\lambda z}{\pi \omega_1^2} \right)^2} \quad (4-12)$$

ここで，角度ズレおよび光ファイバ間の空隙が無いと仮定すると，式(4-10)は以下の式(4-13)に変形できる．

$$\eta = k \exp \left[- \frac{\left\{ 2x_0^2 \left(\frac{1}{\omega_1^2} + \frac{1}{\omega_2^2} \right) \right\}}{\left(\frac{\omega_1 + \omega_2}{\omega_2 + \omega_1} \right)^2} \right] \quad (4-13)$$

SMF(MFD:8.2 μm)からの出射光をガウスビームとみなし，SMF 同士を接続した際のミスアライメントと接続損失について，式(4-13)を用いて作成した関係性を Fig. 4-25 に示す．

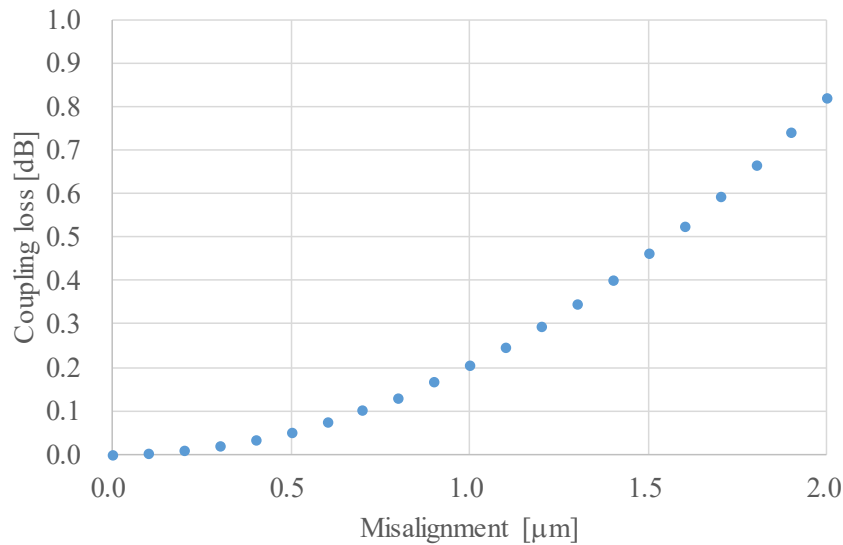


Fig. 4-25 SMF 同士を接続した際のミスアライメントと接続損失の関係

Figure 4-25 より，SMF 同士の接続では 0.5 dB トレランスが約 1.5 μm であることがわかる．

つづいて，作製したポリマー光導波路のミスアライメントトレランスを実験的に求めた．測定系を Fig. 4-26 に示す．



Fig. 4-26 ポリマー光導波路のミスアライメントトレランス測定系

励振および受光ファイバには SMF を用いた．初めにピーク調芯を行った後，受光ファイバをピーク位置基準で 0.5 μm ずつ，ポリマー光導波路のコア幅方向にステップモータを用いてスキャンすることで挿入損失の変化を測定し，ピーク強度からの差をミスアライメント損失と定義した．ポリマー光導波路と SMF 間でのミスアライメントトレランスを各コア幅で測定した結果を，屈折率分布別に Fig. 4-27, Fig. 4-28 に示す．なお，Fig. 4-27, Fig. 4-28 は代表結果として，光導波路それぞれの最大および最小コア幅におけるミスアライメントトレランスの測定結果を示しており，それ以外の結果については Appendix に掲載した．

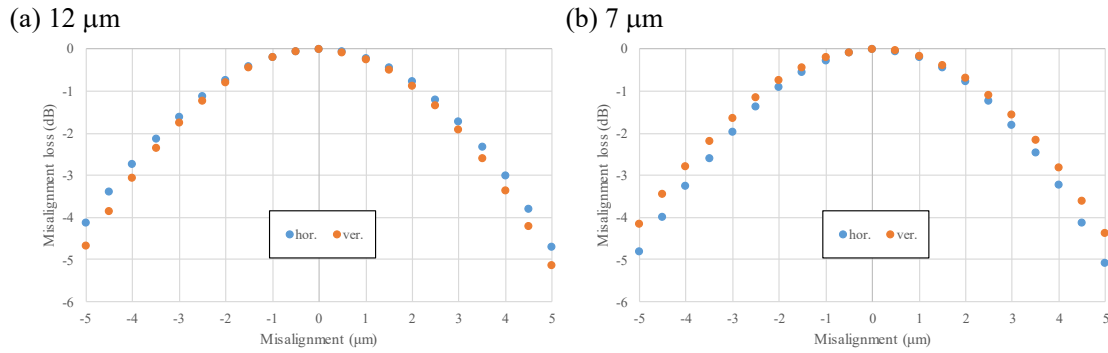


Fig. 4-27 SI 型ポリマー光導波路のミスアライメントトレランス

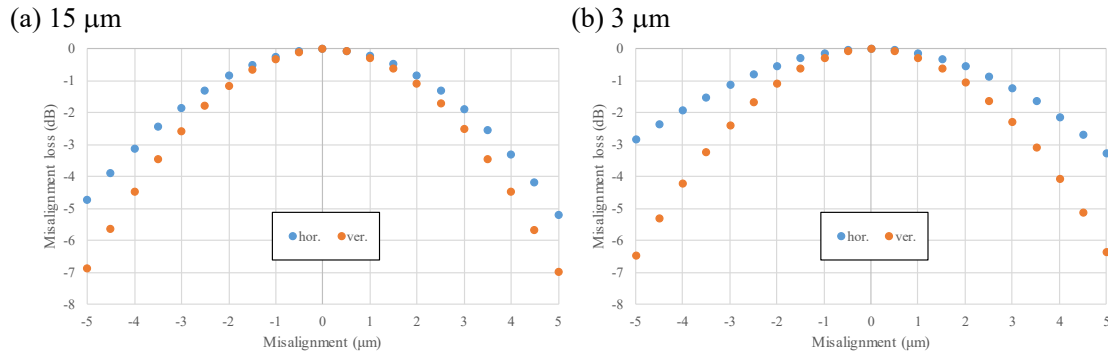


Fig. 4-28 水平 GI 型ポリマー光導波路のミスアライメントトレランス

Figure 4-27, Fig. 4-28 より、特に水平 GI 型ポリマー光導波路のコア幅 3 μm では広いミスアライメントトレランスを示していることがわかる。実際にコア幅方向の 0.5 dB トレランスを比較すると、3 μm 幅水平 GI 型ポリマー光導波路は $\pm 2 \mu\text{m}$ となっており、Fig. 4-23, Fig. 4-24 に示したその他の光導波路が示す $\pm 1.5 \mu\text{m}$ より大きい。この理由として、Fig. 4-16 で示した通り、このコア幅領域は臨界コアサイズを下回っており、エバネッセント領域がクラッドにまで染み出しており MFD が拡大していることが挙げられる。式(4-13)で示している通り、接続対象の MFD が大きい際に、ミスアライメントが生じた場合であっても結合効率を維持できることから、広いミスアライメントトレランスが得られたものと考えられる。一方で、コア高さ方向ではいずれも 0.5 dB トレランスが $\pm 1.5 \mu\text{m}$ となっており、コア幅による違いが見られていない。これはコア幅の変化に伴う光強度分布の変動がコア高さ方向に与える影響は小さいためと考えられる。

ここで、代表例としてマスク開口幅 12 μm の SI 型ポリマー光導波路の水平方向のミスアライメントトレランスについて、実験で得られた結果と計算で得られた結果の比較を行う。Fig. 4-22 より、コアが示す MFD は水平方向で 9.3 μm であるから、式(4-13)に代入することで理論的な水平方向のミスアライメントトレランスが得られる。なお、既に述べた通り式(4-13)は、本来円形コアに対して成り立つ式であるが、ここでは水平方向のみの検討であるこ

とから、コア幅方向には近似的に成り立つものとした。このようにして得られた計算結果と、実験的に得られたミスアライメントトレランスを Fig. 4-29 に同時に示す。

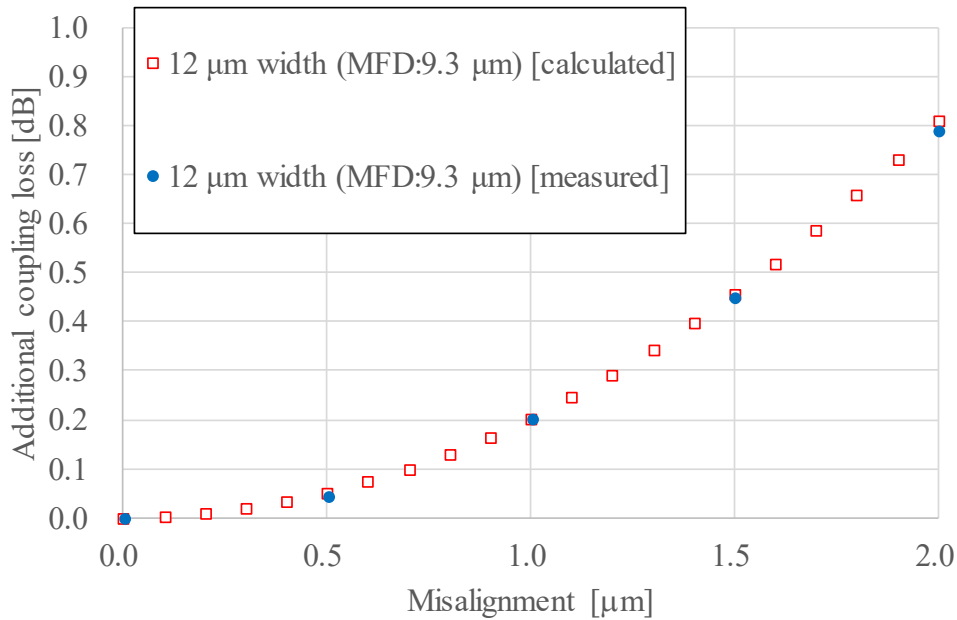


Fig. 4-29 SI 型ポリマー光導波路と SMF 間のミスアライメントトレランス比較

Figure 4-29 より、実験結果と計算結果がおおむね一致していることがわかった。したがって、円形コアを持たないポリマー光導波路についても、実験的に得られた MFD からミスアライメントトレランスを推測できることが示唆された。つまり、Fig. 4-26 のようなステップングモータを要する測定系を構築せずとも、光導波路コアからの出射光強度分布を解析することで、ある程度の精度でミスアライメントトレランスを推測できることが分かった。

4.3.4. ポリマー光導波路への入射ミスアライメントの影響推定

4.3.3.にて、ポリマー光導波路のミスアライメントトレランスに関する考察を行ったが、ポリマー光導波路がシングルモードでない場合、入射光ファイバとのミスアライメントはポリマー光導波路の高次モードが励振される可能性がある。特に、本研究で想定する CPO 適用を見据えると、ポリマー光導波路の導波路長は短く、入射時に結合した導波モードを維持する可能性が高い。入射端でミスアライメントが生じた際の、入射光強度分布が光導波路の異なる導波モードに結合するイメージを Fig. 4-30 に示す。

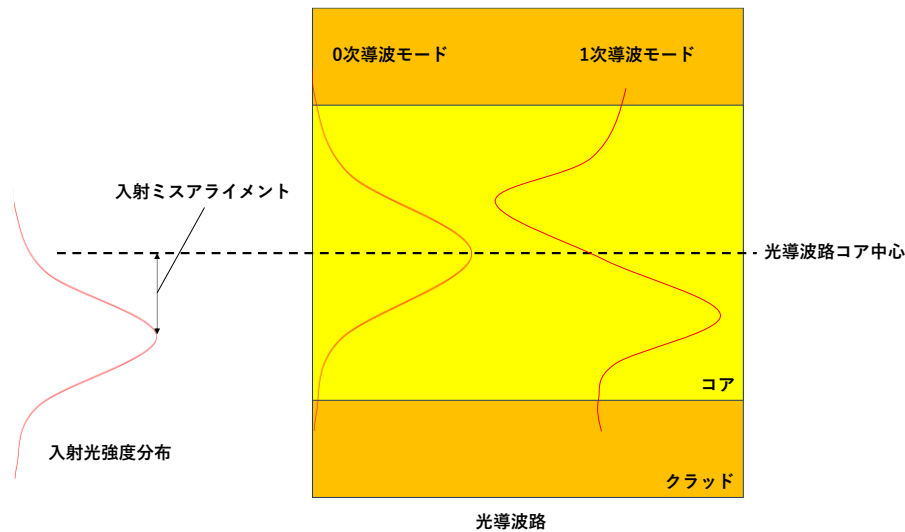


Fig. 4-30 入射光強度分布が光導波路の導波モードに結合するイメージ

Figure 4-30 では、光導波路に入射した光強度が、光導波路の各導波モードに分かれて伝搬する様子を示しており、各導波モードへの結合効率は、第 2 章で述べたように重なり積分で得られる。光導波路の 0 次(最低次)モードはコアの中心に強度ピークを持つのに対し、1 次モードではコア-クラッド境界付近に 2 つのピークを持っている。したがって、入射光ファイバである SMF と光導波路間にミスアライメントが生じた場合、コア中心に強度ピークを持つ最低次モードと比較し、高次モードに優先的に結合する可能性が高まる。ポリマー光導波路の高次モードへの結合は、4.3.1.で既に議論した通り、別のシングルモードデバイスとの結合の際に接続損失が増大する一因となりうる。そこで本節では、ポリマー光導波路への入射ミスアライメントが、高次モード励振に与える影響を推定し、ミスアライメントが生じた際の接続損失を議論する。

高次モードを有するポリマー光導波路のモデルとして、Table 4-3 にて、 $\Delta = 1\%$ で SMF との接続損失を最低にする、コアサイズ $11 \times 11 \mu\text{m}$ の SI 型ポリマー光導波路を選定した。FIMMWAVE で計算した $\Delta = 1\%$ 、コアサイズ $11 \times 11 \mu\text{m}$ の SI 型ポリマー光導波路の導波モードを Fig. 4-31 に示す。Fig. 4-31 では各モードが示す実効屈折率が高い順に導波モードの次数を定義し、また、縮退した導波モードについては同じ次数の導波モードとして扱った。なお、実際には $\Delta = 1\%$ 、コアサイズ $11 \times 11 \mu\text{m}$ の SI 型ポリマー光導波路は 3 次以降の導波モードも有しているが、後に検討する SMF との結合において、3 次以降の導波モードは光強度の分配が見られなかったため、ここでは割愛した。

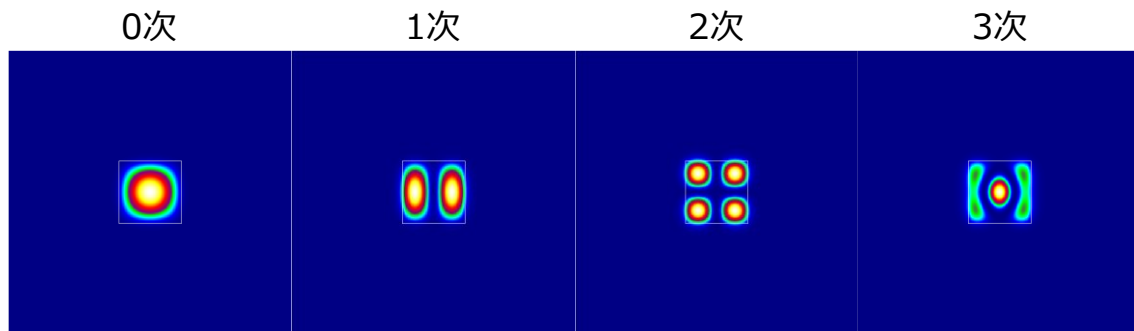
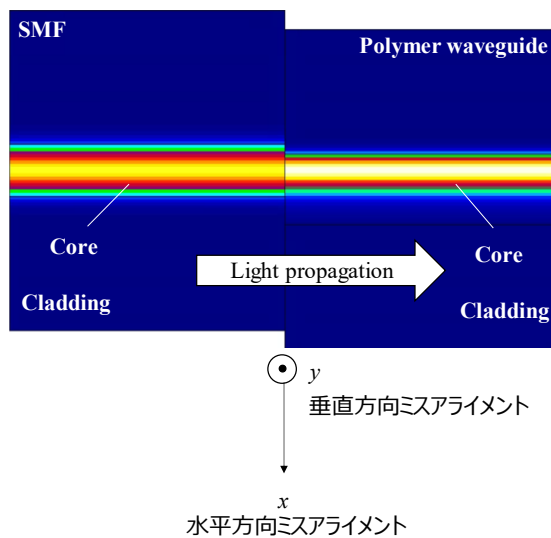


Fig. 4-31 $\Delta = 1\%$, コアサイズ $11 \times 11 \mu\text{m}$ の SI 型ポリマー光導波路の導波モード

続いて, Fig.4-32 に示したシミュレーションモデルを構築し, 入射光ファイバである SMF とのミスアライメントを変化させたときに, ポリマー光導波路の最低次(0 次)モードに分配される光強度の割合を検討した. 本節では, Fig.4-32 内の水平(x)方向のみに SMF をミスアライメントさせた際にポリマー光導波路の最低次モードに分配される光強度の割合を Fig. 4-33 として示すが, 垂直(y)方向成分も考慮した 2 次元的にミスアライメントを加えた際のふるまいについては Appendix に掲載した.

シミュレーションの上面イメージ



断面イメージ

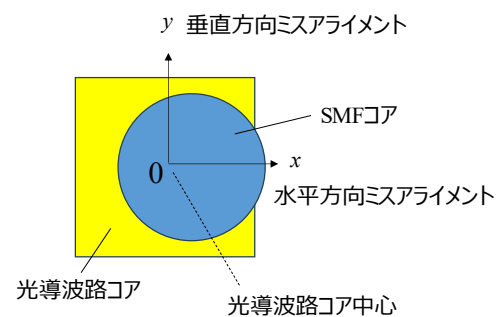


Fig. 4-32 シミュレーションモデル

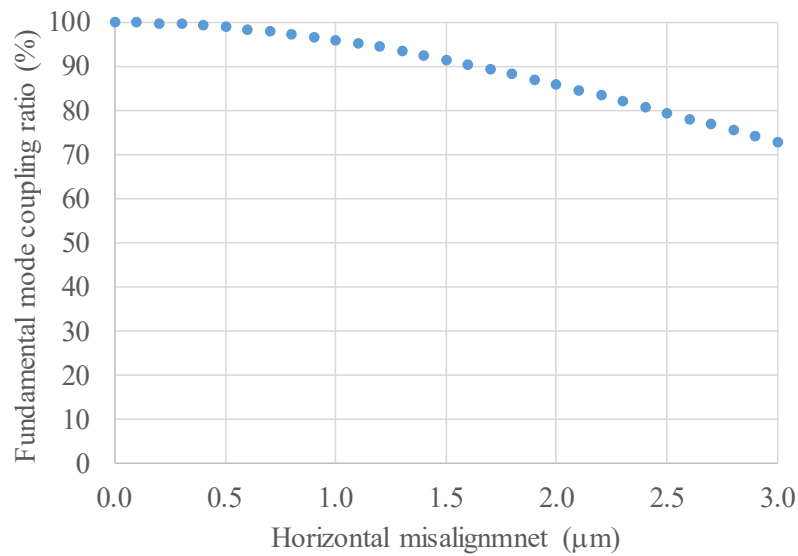


Fig. 4-33 入射ミスアライメントとポリマー光導波路の最低次モードへの強度分配割合の関係

Figure 4-33 より、入射ミスアライメントが小さい時にはポリマー光導波路の最低次モードへの結合が支配的であるのに対し、ミスアライメントが大きくなるにつれて、最低次モードへの結合効率が低下し、高次モードへの結合割合が増加していく様子が確認できた。つづいて、入射ミスアライメントが生じた場合の、SMF からポリマー光導波路最低次モードへの接続損失を Fig. 4-34 にまとめた。

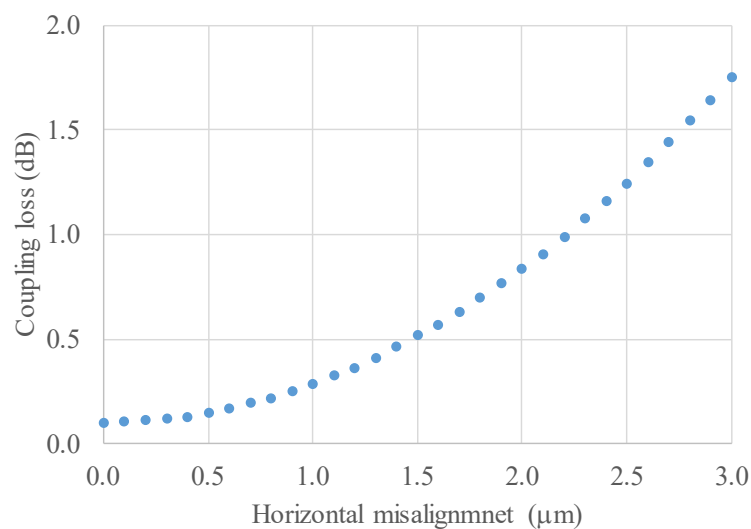


Fig. 4-34 入射ミスアライメントとポリマー光導波路最低次モードへの接続損失の関係

さて、4.3.3.でも述べたように、ミスアライメントによる過剰損失は0.5 dBが基準となる。Fig. 4-34より、ミスアライメントが1.5 μmとなる近傍で過剰損失が約0.5 dBとなっていることがわかる。そこで、ミスアライメントが1.5 μm以下の範囲に限定してFig. 4-33を改めて検討すると、最も最低次モードへの結合効率が低いミスアライメント($x = 1.5 \mu\text{m}$)時でも結合効率は91%と十分高いことがわかる。つまり、ミスアライメント過剰損失を0.5 dB以下に抑えた際には、ポリマー光導波路の高次モードへの結合影響は限定的であることが判明した。

以上の検討より、ミスアライメント過剰損失が0.5 dB以下となる条件下では、ポリマー光導波路への入射ミスアライメントが高次モード励振に与える影響は小さく、最低次モードへの結合が支配的であることを示した。一方で、今回の計算ではポリマー光導波路の導波構造乱れ(コア-クラッド界面荒れ等)によるモード遷移の影響は考慮されていない。また、入射角度のずれ(チルト)もポリマー光導波路のモード励振に影響を与える。したがって、ポリマー光導波路実装時には、高次モード励振を抑制するためにも、高精度な実装が求められることが改めて明らかとなった。

4.4. SiO_x光導波路-ポリマー光導波路 接続損失評価

4.4.1. SiO_x光導波路とポリマー光導波路間の接続損失(計算)

SMFとの接続損失評価に続き、SiO_x光導波路とポリマー光導波路間の接続損失を検討すべく、まずはシミュレーションによる評価を行った。計算に際しての前提条件は4.3.1.と共通とし、シミュレーションモデルはFig. 4-6に示したモデルの内、入射側のSMFをSiO_x光導波路としたものとした。また、接続損失 $L_{\text{con.}}$ は式(4-8)で定義し、引き続きポリマー光導波路最低次モードへの結合のみを考慮した。

4.3で用いた手法と同様に、まずポリマー光導波路の Δ を固定し、コア幅とコア高さを変化させて、SiO_x光導波路との接続損失を計算した。その後、すべての Δ (0.1~2%)に対して計算を実行し、異なる屈折率分布、 Δ に対して最適なコア設計を適用した時の最低接続損失をFig. 4-35にまとめた。なお、SiO_x光導波路との最低接続損失を示すポリマー光導波路の最適コア設計についてはAppendixに掲載した。

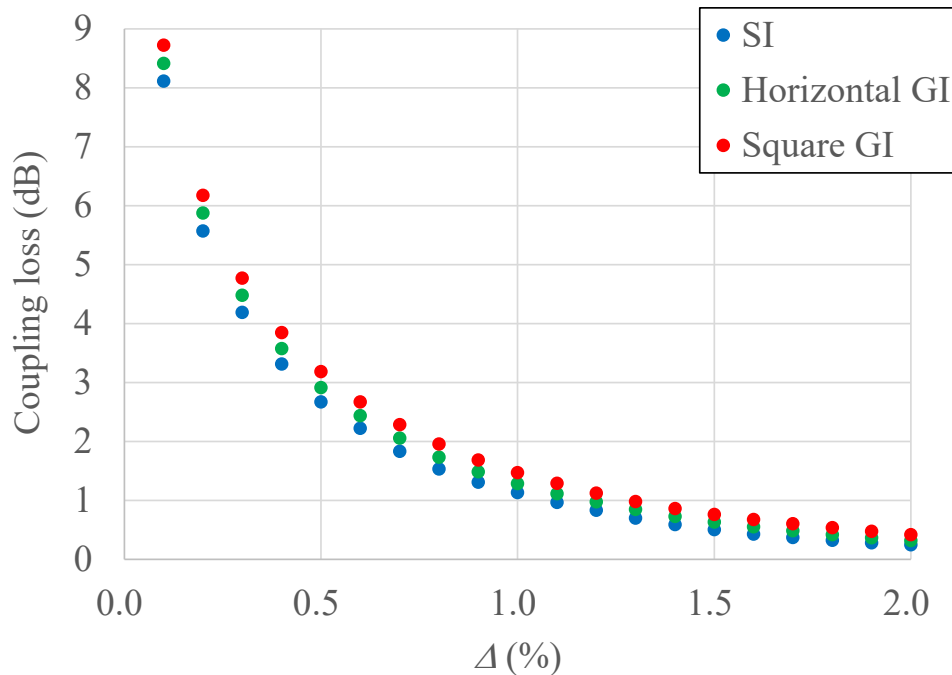


Fig. 4-35 ポリマー光導波路最適コア設計時の Δ と最低接続損失の関係

Figure 4-35 より、ポリマー光導波路-SiO_x 光導波路の間の接続損失は、Fig. 4-8 に示した SMF との結合損失と比較して全体的に高いことが確認された。この高い接続損失はポリマー光導波路と SiO_x 光導波路間のモードフィールドミスマッチに起因している。今回設定した SiO_x 光導波路は、Fig. 4-4 に示した通り、 Δ が 3.9%と高く、コアサイズが 3 μm 角であってもコア内に光が十分に閉じ込められている(Table 4-1 参照)。そのため、接続対象となるポリマー光導波路も同程度の光閉じ込めが求められるが、ポリマー光導波路側の Δ は設定範囲の最大値でも 2.0%であり、両者のモードフィールドミスマッチを解消するには至らない。特に光の閉じ込めは Δ が小さくなるにつれて弱くなるため、Fig. 4-12, Fig. 4-13, Fig. 4-14 ですでに示したように、小コアサイズではエバネッセント波がクラッド領域まで広がってしまう。したがって、Fig. 4-35 に示されているように、1.0%以下の低 Δ 条件下では SiO_x 光導波路との MFD の整合に限界があり、最低接続損失は 1 dB 以上と比較的大きくなる。一方、ポリマー光導波路の Δ が増加することで、SiO_x 光導波路の $\Delta = 3.9\%$ に近付くため、最低接続損失も減少していく傾向にある。そこで SiO_x 光導波路との最低接続損失を示すときの、ポリマー光導波路コア設計(コア幅、コア高さ、比屈折率差 Δ)と、その設計で計算される出射光強度分布を合わせて Fig. 4-36 にまとめた。

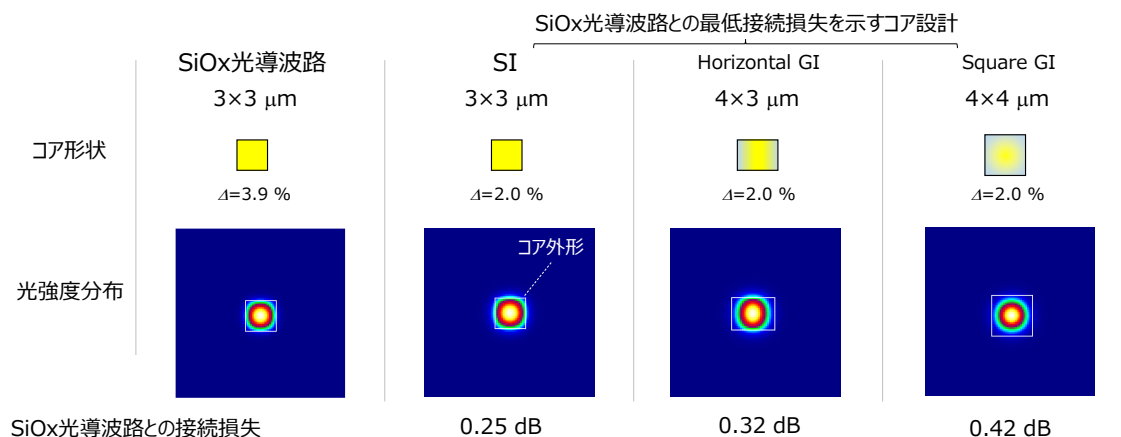


Fig. 4-36 最適コア設計，出射光強度分布，SiO_x 光導波路との接続損失の比較

Figure 4-36 より， $\Delta=2.0\%$ でも最低接続損失は 0.25 dB 以上と，SMF との損失と比較して高い損失を示していることがわかる．以上より，光リンク内にポリマー光導波路を挿入した際には，SMF との接続損失よりも SiO_x 光導波路との接続損失が，ロスバジェットという観点では影響が大きいことが示唆された．

4.4.2. SiO_x 光導波路とポリマー光導波路間の接続損失(実験)

ポリマー光導波路と SiO_x 光導波路の接続損失評価は，SiO_x 光導波路の入手が困難であるため実験面でのアプローチは困難であった．そこで本研究では SiO_x 光導波路と近い性質を有する光ファイバを選定し，その光ファイバとの接続損失を代替で評価することで，SiO_x 光導波路との接続損失評価を再現することとした．

高いコア-クラッド間の屈折率差を有するシングルモード光ファイバとして市販されている UHNA (Ultra-High NA) シリーズ[18]の光学特性を，Table 4-5 に SiO_x 光導波路パラメータを併記してまとめた．

Table 4-5 SiO_x 光導波路と近い性質を持つシングルモード光ファイバのパラメータ比較

Component	SiO _x Waveguide	UHNA1
Cross-sectional image	3 μm 	2.5 μmΦ 
Δ	3.9 %	1.8 %
MFD @1310 nm	3.1 μm	4.0 μm

Table 4-5 より, UHNA1 光ファイバ(以降, UHNA1 と省略する)はコア形状が円形と矩形という違いはあるものの, Δ および MFD の観点で SiO_x 光導波路に近い構造を有していることがわかる. そこで本章では, SiO_x 光導波路の代替として UHNA1 を選択し, 接続損失の評価を行うこととした.

UHNA1 との接続損失を評価するために, SMF との接続損失と同様に接続損失を算出した. 4.3.2.で紹介した SMF 接続損失算出方法と重複する部分が多いため, UHNA1 との接続損失算出方法の詳細については Appendix に掲載した.

直接露光法で作製した矩形 SI 型ポリマー光導波路の挿入損失測定結果をもとに算出した, ポリマー光導波路- UHNA1 平均接続損失 を Fig. 4-37 に示す. また, 接続損失算出に用いた挿入損失の測定結果については, Appendix に掲載した.

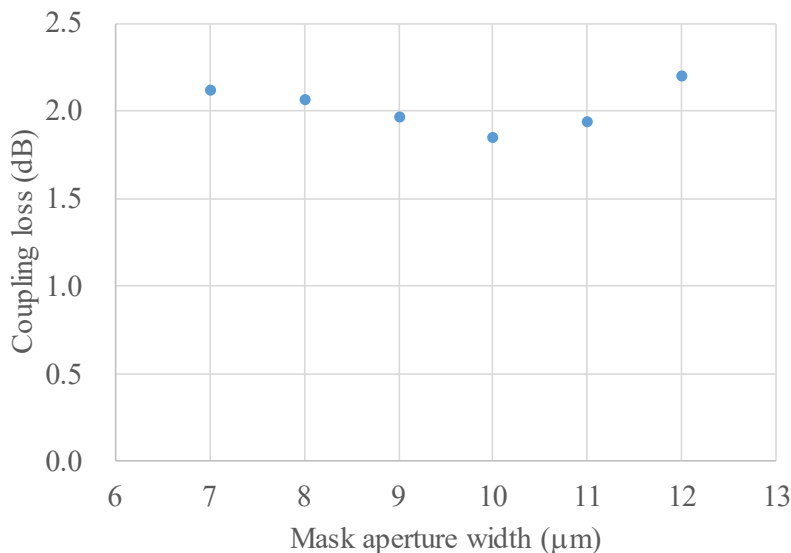


Fig. 4-37 直接露光法で作製した矩形 SI 型ポリマー光導波路と UHNA1 間の接続損失

Figure 4-37 より, Fig. 4-21 で測定した SMF との結合損失と比較し, かなり大きな接続損失を UHNA1 に対して示していることがわかる. これは先述の通り, MFD の大きなミスマッチが原因であると考えられる. また, マスク開口幅 10 μm の時に接続損失が最低を取り, その値は 1.84 dB であることがわかる. Fig. 3-23 の測定結果より, 該当するコアはコア幅: 6.0 μm コア厚み: 5.1 μm であった. そこで, 光導波路ならびに UHNA1 のパラメータを適用してシミュレーションで両者の接続損失を求めたところ, 1.55 dB であり, おおむね実験値と一致した値が得られていることが確認できた.

続いて, フォトアドレス法で作製した水平 GI 型ポリマー光導波路の損失結果に関しても, SI 型と同様の手法で算出した接続損失を Fig. 4-38 に示し, 算出に用いた挿入損失測定結果については Appendix に掲載した.

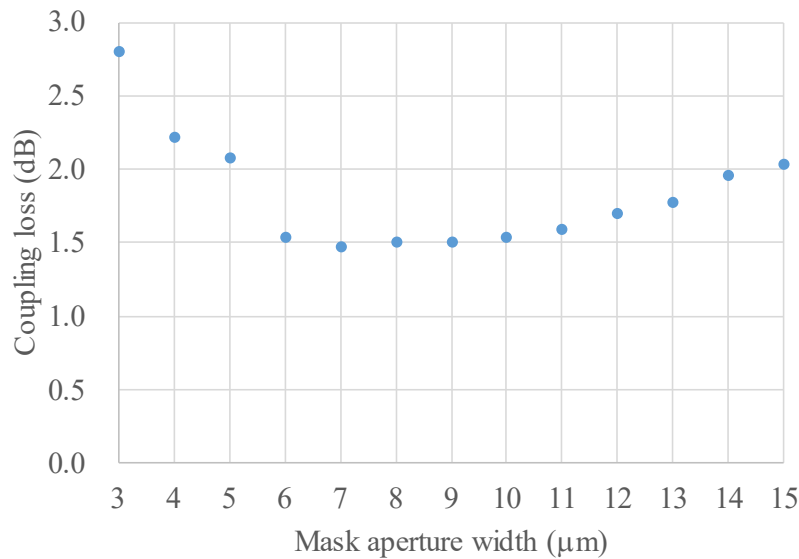


Fig. 4-38 フォトアドレス法で作製した水平 GI 型ポリマー光導波路と UHNA1 間の接続損失

水平 GI 型ポリマー光導波路ではマスク開口幅 7 μm の時に接続損失が最低を取り、その値は 1.47 dB である一方で、材料設計値である $\Delta = 0.6\%$ の時、シミュレーションで得られた接続損失の結果は 1.09 dB であった。先述の通り、水平 GI 型ポリマー光導波路の狭小コア幅領域での Δ 低下を考慮し、 $\Delta = 0.4\%$ として再計算すると 1.65 dB となり、より実測に近い値が得られた。このように SiO_x 光導波路を再現した UHNA1 との接続損失の測定結果はシミュレーション結果とおおむね一致していることが判明した。また、SMF と比較して UHNA1 との接続損失が大きいことから、実際の光リンクにおいても SiO_x 光導波路との接続損失がリンクロスバジェットに与える影響が大きくなることが示された。

4.5. ポリマー光導波路両端の合計接続損失

4.5.1. ポリマー光導波路と SMF, SiO_x 光導波路間の合計接続損失の計算方法

これまでの計算結果をもとに、当初想定していた SMF と SiO_x 光導波路の間にポリマー光導波路を挿入した際に生じる合計接続損失を計算した。合計接続損失算出には、4.3., 4.4. で SMF, ならびに SiO_x 光導波路に対して個別に計算した接続損失を用いる。なお、個別に計算した接続損失は接続元、接続相手ともに基底モード同士の結合のみを考慮しており、モード結合理論では接続元と相手を入れ替えても接続損失は同一である。したがって、ポリマー光導波路両端での合計接続損失は伝搬方向に関わらず、個別に計算した片端の接続損失の合計として扱うことができる。この前提をもとに、以後の議論を進める。

Figure 4-8, Fig. 4-35 より、最低接続損失を示すポリマー光導波路のコア設計(コア幅、コア厚み)は、ポリマー光導波路自身の Δ や屈折率分布はもちろん、接続する対象によって異なる。

第4章 SiO_x光導波路とシングルモード光ファイバ間接続の為のポリマー光導波路設計

ことが判明している。そのため、ポリマー光導波路両端の合計接続損失を最適化するためにはポリマー光導波路を伝搬する途中でコアサイズが変化する、SSC 構造の適用有無によって合計接続損失は大きく変化するようになる。本研究で想定したポリマー光導波路の作製法であるフォトリソグラフィ法、フォトアドレス法はいずれもフォトマスクの設計で、また、インプリント法ではモールドの設計によってコア幅方向は容易に変更可能であることから、接続損失最適化に適したプロセスであると言える。一方で、これらの作製プロセスでは、コア厚みはスピコート等の製膜条件で決定されるため、コアを高さ方向に連続的に変化させることは困難である。また、比屈折率差 Δ はポリマー光導波路の構成材料により一義的に決まる値であり、伝搬方向で均一の値をとる。そこで本研究では、ポリマー光導波路の Δ およびコア高さを固定し、コア幅を自由に变化させることで、ポリマー光導波路両端の接続損失を最適化できるコア設計を探索することとした。

4.5.2. ポリマー光導波路と SMF, SiO_x光導波路間の合計接続損失(SSC 構造無)

まずはより単純な構造である、SSC 構造を適用しない、導光方向で均一なコア幅を有するポリマー光導波路に対して SMF ならびに SiO_x 光導波路との接続損失を検討する。

ポリマー光導波路と SMF および SiO_x 光導波路間の接続損失の合計値を最低とする最適設計を以下の手法で検討する。

- ① ポリマー光導波路の Δ 、コア高さを固定し、SMF および SiO_x 光導波路との合計接続損失を算出し、合計損失が最低となる値とその損失を示すコア設計を抽出
- ② Δ 、コア高さを変化させて異なる設計における合計接続損失を計算し、合計接続損失が最低となる接続損失とその損失を示すコア設計を最適設計として抽出

例として、 $\Delta = 0.7\%$ 、コア高さ $5\ \mu\text{m}$ のポリマー光導波路と、各接続対象との接続損失計算結果を Table 4-6 に示す。

Table 4-6 $\Delta = 0.7\%$ 、コア高さ $5\ \mu\text{m}$ のポリマー光導波路と SMF, SiO_x 光導波路との接続損失

条件	$\Delta = 0.7\%$	コア幅(μm)													
	コア高さ = $5\ \mu\text{m}$	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
接続対象	SMF	0.18	0.37	0.48	0.49	0.45	0.41	0.37	0.35	0.35	0.37	0.40	0.44	0.50	0.57
	SiO _x 光導波路	2.78	2.00	1.88	1.97	2.15	2.38	2.64	2.89	3.14	3.39	3.64	3.88	4.10	4.32
合計接続損失		2.96	2.38	2.36	2.46	2.60	2.79	3.01	3.24	3.49	3.76	4.04	4.32	4.60	4.89

(dB)

Table 4-6 より、コア幅 $4\ \mu\text{m}$ で合計接続損失が最低値をとり、 $2.36\ \text{dB}$ であることがわかる。この処理をすべての Δ 、ならびにコア高さに対して実行することで、ポリマー光導波路が取り得る最低接続損失を、 Δ 、コア高さに対してまとめることができる。このようにしてまとめた、ポリマー光導波路と SMF, SiO_x 光導波路との合計接続損失を、屈折率分布別に Table 4-7~4-9 にまとめた。なお、以降に示す合計接続損失をまとめた Table では、十分な低

第4章 SiO_x 光導波路とシングルモード光ファイバ間接続の為のポリマー光導波路設計

損失を示す設計として合計接続損失 1.5 dB 未満を示すコア設計を青色, 1.5 dB 以上かつ 4.2.4. で設定した光リンクでポリマー光導波路に許容される損失 2.4 dB 未満を示すコア設計を黄色, 2.4 dB 以上かつフレネル反射改善を考慮した際に許容される損失 3.1 dB 未満を示すコア設計を橙色, 3.1 dB 以上を示すコア設計を赤色で表している. また, Table 4-7~4-9 で示した最低合計接続損失を示す, ポリマー光導波路のコア設計情報については Appendix に掲載した.

Table 4-7. SI 型ポリマー光導波路の最低合計接続損失

Lowest coupling loss (dB)	Δ (%)																			
	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1	1.1	1.2	1.3	1.4	1.5	1.6	1.7	1.8	1.9	2
Core height (μm)	2	10.0	7.6	6.8	5.8	4.5	3.6	3.0	2.6	2.4	2.2	2.1	2.0	2.0	2.0	1.9	2.0	2.0	2.1	2.2
	3	15.9	8.7	5.7	4.1	3.3	2.7	2.4	2.2	2.1	2.0	2.0	1.9	1.9	2.0	2.1	2.2	2.3	2.5	2.6
	4	13.2	7.1	4.7	3.5	2.9	2.5	2.3	2.1	2.1	2.0	2.0	2.1	2.1	2.2	2.3	2.4	2.5	2.6	2.7
	5	11.5	6.3	4.4	3.4	2.8	2.5	2.4	2.2	2.2	2.2	2.2	2.2	2.3	2.4	2.5	2.6	2.7	2.7	2.7
	6	10.6	6.0	4.3	3.4	2.9	2.7	2.5	2.4	2.4	2.4	2.4	2.4	2.5	2.6	2.6	2.7	2.7	2.7	2.7
	7	10.0	5.9	4.3	3.5	3.1	2.8	2.7	2.6	2.6	2.6	2.6	2.6	2.7	2.7	2.7	2.7	2.7	2.8	2.8
	8	9.6	5.9	4.4	3.7	3.3	3.0	2.9	2.8	2.8	2.8	2.8	2.8	2.8	2.9	2.9	2.9	2.9	2.9	2.9
	9	9.5	5.9	4.6	3.9	3.5	3.3	3.2	3.1	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.1	3.1	3.1	3.1
	10	9.4	6.1	4.8	4.1	3.8	3.5	3.4	3.3	3.3	3.3	3.3	3.3	3.3	3.3	3.3	3.3	3.3	3.3	3.3
	11	9.4	6.2	5.0	4.4	4.0	3.8	3.7	3.6	3.6	3.5	3.5	3.5	3.5	3.5	3.5	3.5	3.5	3.5	3.5
	12	9.4	6.4	5.3	4.7	4.3	4.1	4.0	3.9	3.9	3.8	3.8	3.8	3.8	3.8	3.8	3.8	3.8	3.8	3.8
	13	9.5	6.7	5.5	4.9	4.6	4.4	4.3	4.2	4.1	4.1	4.1	4.1	4.1	4.1	4.1	4.1	4.1	4.1	4.1
	14	9.7	6.9	5.8	5.2	4.9	4.7	4.5	4.5	4.4	4.4	4.4	4.4	4.4	4.4	4.4	4.4	4.4	4.4	4.4
	15	9.8	7.1	6.0	5.5	5.1	4.9	4.8	4.8	4.7	4.7	4.7	4.7	4.7	4.7	4.7	4.7	4.7	4.7	4.7

©2024 Optica

Table 4-8. 水平 GI 型ポリマー光導波路の最低合計接続損失

Lowest coupling loss (dB)	Δ (%)																			
	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1	1.1	1.2	1.3	1.4	1.5	1.6	1.7	1.8	1.9	2
Core height (μm)	2	10.4	7.7	6.5	6.0	4.9	4.0	3.3	2.9	2.6	2.4	2.2	2.1	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.1	2.0
	3	18.2	9.7	6.2	4.5	3.6	2.9	2.6	2.3	2.2	2.1	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.1
	4	15.5	7.7	5.1	3.9	3.1	2.7	2.4	2.2	2.1	2.1	2.0	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	2.2	2.3
	5	13.3	6.8	4.7	3.6	3.0	2.7	2.4	2.3	2.3	2.2	2.2	2.2	2.2	2.2	2.2	2.3	2.3	2.4	2.5
	6	11.8	6.4	4.6	3.6	3.1	2.8	2.6	2.5	2.4	2.4	2.4	2.4	2.4	2.4	2.4	2.5	2.5	2.6	2.6
	7	10.9	6.3	4.6	3.7	3.2	2.9	2.8	2.7	2.6	2.6	2.6	2.6	2.6	2.6	2.6	2.6	2.6	2.6	2.6
	8	10.4	6.2	4.7	3.9	3.4	3.2	3.0	2.9	2.8	2.8	2.8	2.8	2.8	2.8	2.8	2.8	2.8	2.8	2.8
	9	10.1	6.3	4.8	4.1	3.7	3.4	3.2	3.1	3.1	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	2.9	2.9	2.9	2.9
	10	9.9	6.4	5.0	4.3	3.9	3.6	3.5	3.4	3.3	3.3	3.2	3.2	3.2	3.2	3.2	3.2	3.2	3.2	3.1
	11	9.9	6.6	5.3	4.6	4.2	3.9	3.7	3.6	3.6	3.5	3.5	3.5	3.5	3.5	3.5	3.4	3.4	3.4	3.4
	12	9.9	6.8	5.5	4.8	4.4	4.2	4.0	3.9	3.9	3.8	3.8	3.8	3.8	3.7	3.7	3.7	3.7	3.7	3.7
	13	10.0	7.0	5.7	5.1	4.7	4.5	4.3	4.2	4.2	4.1	4.1	4.1	4.0	4.0	4.0	4.0	4.0	3.9	3.9
	14	10.1	7.2	6.0	5.4	5.0	4.7	4.6	4.5	4.4	4.4	4.4	4.4	4.3	4.3	4.3	4.3	4.3	4.2	4.2
	15	10.2	7.4	6.3	5.6	5.3	5.0	4.9	4.8	4.7	4.7	4.7	4.6	4.6	4.6	4.6	4.6	4.6	4.5	4.5

©2024 Optica

Table 4-9. 全周 GI 型ポリマー光導波路の最低合計接続損失

Lowest coupling loss (dB)	Δ (%)																			
	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1	1.1	1.2	1.3	1.4	1.5	1.6	1.7	1.8	1.9	2
Core height (μm)	2	10.6	6.8	5.3	4.5	4.0	3.7	3.4	3.3	3.1	3.0	2.8	2.6	2.4	2.3	2.2	2.1	2.1	2.0	2.0
	3	282.9	14.3	9.0	6.4	5.0	4.0	3.4	2.9	2.6	2.4	2.2	2.1	2.1	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0
	4	19.2	11.0	7.0	5.1	4.0	3.3	2.8	2.5	2.3	2.2	2.1	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0
	5	17.4	9.1	6.0	4.5	3.6	3.0	2.6	2.4	2.2	2.1	2.1	2.0	2.0	2.0	2.1	2.0	2.0	2.0	2.1
	6	15.7	8.0	5.5	4.1	3.4	2.9	2.6	2.4	2.2	2.2	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	2.2
	7	14.3	7.4	5.2	4.0	3.3	2.8	2.6	2.4	2.3	2.2	2.2	2.2	2.2	2.2	2.2	2.2	2.2	2.2	2.3
	8	13.2	7.1	5.0	3.9	3.3	2.9	2.6	2.4	2.3	2.3	2.2	2.2	2.2	2.2	2.2	2.3	2.3	2.3	2.4
	9	12.4	6.8	4.9	3.9	3.3	2.9	2.7	2.5	2.4	2.4	2.3	2.3	2.3	2.3	2.4	2.3	2.3	2.4	2.4
	10	11.7	6.7	4.9	3.9	3.3	3.0	2.7	2.6	2.5	2.4	2.4	2.4	2.4	2.4	2.4	2.4	2.4	2.4	2.4
	11	11.3	6.6	4.9	4.0	3.4	3.1	2.8	2.7	2.6	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.4	2.4	2.4	2.4	2.4
	12	11.0	6.6	5.0	4.1	3.5	3.2	2.9	2.8	2.7	2.6	2.6	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5
	13	10.7	6.6	5.0	4.1	3.6	3.3	3.0	2.9	2.8	2.7	2.6	2.6	2.6	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5
	14	10.6	6.7	5.1	4.2	3.7	3.4	3.1	3.0	2.9	2.8	2.7	2.7	2.7	2.6	2.6	2.6	2.6	2.5	2.5
	15	10.5	6.7	5.2	4.3	3.8	3.5	3.2	3.1	3.0	2.9	2.8	2.8	2.7	2.7	2.7	2.6	2.6	2.6	2.6

©2024 Optica

Table 4-7, Table 4-8, Table 4-9 の比較により, ポリマー光導波路の屈折率分布によって, 最低合計接続損失が示す各損失範囲(青, 黄, 橙, 赤)が大きく異なっていることがわかる.

実際、最低合計接続損失が 2.4 dB を下回るセル(青, 黄)数を数えると, SI 型は 46, 水平 GI 型は 53, 全周 GI 型では 92 であり, GI 型コアは SI 型と比較して大きいことが判明した. これはポリマー光導波路両端での合計接続損失が, ポリマー光導波路のコアサイズ, ならびに Δ の変動に対して広いトレランスを示すことを意味している. また, 水平 GI 型よりもさらに大きなトレランスを全周 GI 型コアが示していることから, GI 型は製造トレランスの面で SI 型に有利であることが分かった. これは上述の通り, GI 型コアの MFD が SI 型と比較して, コアサイズ, Δ の変動に鈍感であるためと考えられる.

一方で, 合計接続損失 1.5 dB を下回る領域(青)は, いずれの屈折率分布でも存在しておらず, SSC 構造を適用しないポリマー光導波路では低損失化に限界があることが明らかとなった.

4.5.3. ポリマー光導波路と SMF, SiO_x 光導波路間の合計接続損失(SSC 構造有)

つづいて, SSC 構造を適用した, 両端で異なるコア幅を有するポリマー光導波路について検討を行った. 具体的には, ポリマー光導波路の Δ , コア高さを固定した状態で, SMF ならびに SiO_x 光導波路との接続損失が最低となるコア幅をそれぞれ選択し, その設計での両端の接続損失の合計値を検討した. このとき, ポリマー光導波路作製プロセスの利点であるコア幅設計の自由度を活かし, コア幅が両端で異なってもよいとする. 上記手法で求めた接続損失の合計値と, Fig. 4-5 で考察したポリマー光導波路に許容される接続損失を比較することで, ポリマー光導波路の光リンク挿入が与える接続損失面でのメリットについて議論する.

なお, SSC は連続的にコア幅を変化するテーパ構造で実現するが, テーパ角が急峻な場合, 伝搬モードが急激に変化し, 断熱的な光伝搬が得られず, 損失が生じる可能性がある. 今回, このモード遷移に伴う損失は考慮に入れていない. ポリマー光導波路のテーパ角を抑制するためには, 「テーパ構造の長尺化」と「入射-出射幅差の低減」が挙げられるが, テーパ構造の長尺化はデバイスサイズへの影響が懸念されるため, 入射幅-出射幅差は構造最適化の要素の一つと考えられる.

上記前提のもと, ポリマー光導波路と SMF および SiO_x 光導波路間の接続損失の合計値を最低とする最適設計を以下の手法で検討する.

- ① ポリマー光導波路の Δ , コア高さを固定し, SMF および SiO_x 光導波路との接続損失が最低となるコア幅を選択
 - ② ①で選択したコア幅でのポリマー光導波路両端の接続損失の合計値を算出
 - ③ Δ , コア高さを変化させて異なる設計における合計接続損失を計算し, 合計接続損失が最低となる接続損失とその損失を示すコア設計を最適設計として抽出
- それぞれの検討ステップを詳細に検討する.

- ① ポリマー光導波路の Δ , コア高さを固定し, SMF および SiO_x 光導波路との接続損失が最

第4章 SiO_x光導波路とシングルモード光ファイバ間接続の為のポリマー光導波路設計

低となるコア幅を選択

はじめに、ポリマー光導波路の Δ 、コア高さをある値で固定し、コア幅を自由に変化させたときの SMF との接続損失、ならびに SiO_x 光導波路との接続損失をそれぞれ算出する。例として、 $\Delta = 0.7\%$ 、コア高さ $5\ \mu\text{m}$ のポリマー光導波路と、各接続対象との接続損失計算結果を Table 4-10 に示す。

Table 4-10 $\Delta = 0.7\%$ 、コア高さ $5\ \mu\text{m}$ のポリマー光導波路と SMF、SiO_x 光導波路との接続損失

条件	$\Delta = 0.7\%$	コア幅(μm)													
	コア高さ = $5\ \mu\text{m}$	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
接続対象	SMF	0.18	0.37	0.48	0.49	0.45	0.41	0.37	0.35	0.35	0.37	0.40	0.44	0.50	0.57
	SiO _x 光導波路	2.78	2.00	1.88	1.97	2.15	2.38	2.64	2.89	3.14	3.39	3.64	3.88	4.10	4.32

(dB)

② ①で選択したコア幅での、ポリマー光導波路両端の接続損失の合計値を算出

Table 4-10 より、SMF との接続損失を最低とするコア幅は $2\ \mu\text{m}$ であり、その時の接続損失は $0.18\ \text{dB}$ であることがわかる。同様に、SiO_x 光導波路との接続損失を最低とするコア幅は $4\ \mu\text{m}$ であり、その時の接続損失は $1.88\ \text{dB}$ である。したがって、 $\Delta = 0.7\%$ のポリマー光導波路の両端で、コア幅を最適化した際の最低接続損失は $0.18\ \text{dB} + 1.88\ \text{dB}$ の $2.06\ \text{dB}$ と算出することができる。

③ Δ 、コア高さを変化させて異なる設計における合計接続損失を計算し、合計接続損失

①、②の処理をすべての Δ 、ならびにコア高さに対して実行することで、ポリマー光導波路が取り得る最低接続損失を、 Δ 、コア高さに対してまとめることができる。横軸に Δ 、縦軸にコア高さとし、ポリマー光導波路両端で最適なコア幅を設定した際に計算される合計接続損失の結果を Table 4-11 に示す。また、同様の処理を水平 GI 型、矩形 GI 型ポリマー光導波路に対しても実行することで得られた結果を Table 4-12、Table 4-13 にそれぞれ示した。なお、Table 4-11～4-13 で示した最低合計接続損失と対応するポリマー光導波路のコア幅については Appendix にまとめた。

Table 4-11. SI 型ポリマー光導波路の最低合計接続損失

Lowest coupling loss (dB)	Δ (%)																			
	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1	1.1	1.2	1.3	1.4	1.5	1.6	1.7	1.8	1.9	2
Core height (μm)	2	10.0	7.6	6.8	5.7	4.5	3.6	3.0	2.6	2.2	2.0	1.7	1.5	1.3	1.1	1.0	0.9	0.8	0.7	0.6
	3	15.9	8.6	5.7	4.1	3.3	2.7	2.3	1.9	1.6	1.5	1.5	1.6	1.7	1.8	1.8	1.8	1.8	1.8	1.9
	4	13.2	7.1	4.7	3.5	2.9	2.4	2.0	1.8	1.6	1.6	1.7	1.7	1.7	1.7	1.7	1.7	1.7	1.7	1.7
	5	11.5	6.3	4.4	3.4	2.8	2.4	2.1	1.9	1.9	1.8	1.8	1.7	1.7	1.6	1.6	1.6	1.6	1.6	1.6
	6	10.5	6.0	4.2	3.4	2.9	2.5	2.2	2.1	2.0	1.9	1.8	1.7	1.7	1.6	1.6	1.6	1.6	1.6	1.6
	7	9.9	5.8	4.3	3.5	3.0	2.7	2.4	2.3	2.1	2.0	1.9	1.8	1.7	1.7	1.7	1.7	1.7	1.6	1.6
	8	9.6	5.8	4.4	3.6	3.2	2.8	2.6	2.4	2.3	2.2	2.1	2.0	1.9	1.9	1.8	1.8	1.8	1.7	1.7
	9	9.4	5.9	4.5	3.8	3.4	3.0	2.8	2.6	2.5	2.4	2.3	2.2	2.1	2.1	2.0	2.0	2.0	1.9	1.9
	10	9.3	6.0	4.7	4.0	3.6	3.3	3.0	2.9	2.7	2.6	2.5	2.4	2.3	2.3	2.2	2.2	2.2	2.1	2.1
	11	9.3	6.2	5.0	4.3	3.8	3.5	3.3	3.1	2.9	2.8	2.7	2.6	2.5	2.5	2.5	2.4	2.4	2.4	2.3
	12	9.4	6.4	5.2	4.5	4.1	3.8	3.6	3.4	3.2	3.1	3.0	2.9	2.9	2.8	2.8	2.7	2.7	2.7	2.6
	13	9.5	6.6	5.4	4.8	4.4	4.1	3.8	3.6	3.5	3.4	3.3	3.2	3.1	3.1	3.0	3.0	3.0	2.9	2.9
	14	9.6	6.8	5.7	5.1	4.6	4.3	4.1	3.9	3.8	3.6	3.6	3.5	3.4	3.4	3.3	3.3	3.2	3.2	3.2
	15	9.8	7.1	6.0	5.3	4.9	4.6	4.4	4.2	4.0	3.9	3.8	3.8	3.7	3.7	3.6	3.6	3.5	3.5	3.5

©2024 Optica

Table 4-12. 水平 GI 型ポリマー光導波路の最低合計接続損失

Lowest coupling loss (dB)	Δ (%)																			
	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1	1.1	1.2	1.3	1.4	1.5	1.6	1.7	1.8	1.9	2
Core height (μm)	2	10.4	7.6	6.5	5.9	4.9	4.0	3.3	2.8	2.5	2.1	1.9	1.7	1.5	1.4	1.2	1.1	1.0	1.0	1.1
	3	18.2	9.7	6.2	4.5	3.6	2.9	2.5	2.1	1.8	1.6	1.5	1.2	1.1	1.1	1.1	1.2	1.3	1.4	1.5
	4	15.5	7.7	5.1	3.9	3.1	2.6	2.3	1.9	1.8	1.5	1.4	1.3	1.3	1.4	1.4	1.5	1.6	1.7	1.9
	5	13.3	6.8	4.7	3.6	3.0	2.6	2.2	2.0	1.8	1.6	1.6	1.5	1.6	1.6	1.7	1.8	1.8	1.8	1.8
	6	11.8	6.4	4.6	3.6	3.1	2.7	2.4	2.2	2.0	1.8	1.8	1.8	1.9	1.8	1.8	1.8	1.8	1.8	1.8
	7	10.9	6.2	4.6	3.7	3.2	2.8	2.6	2.4	2.2	2.1	2.1	2.0	2.0	1.9	1.9	1.9	1.9	1.9	1.9
	8	10.4	6.2	4.7	3.8	3.4	3.0	2.8	2.6	2.4	2.3	2.2	2.1	2.1	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0
	9	10.1	6.3	4.8	4.0	3.5	3.2	3.0	2.8	2.6	2.5	2.4	2.3	2.3	2.2	2.2	2.2	2.2	2.2	2.2
	10	9.9	6.4	5.0	4.2	3.8	3.4	3.2	3.0	2.8	2.7	2.7	2.6	2.5	2.5	2.4	2.4	2.4	2.4	2.4
	11	9.9	6.5	5.2	4.5	4.0	3.7	3.4	3.2	3.1	3.0	2.9	2.8	2.8	2.7	2.7	2.7	2.6	2.6	2.6
	12	9.9	6.7	5.4	4.7	4.3	3.9	3.7	3.5	3.4	3.3	3.2	3.1	3.0	3.0	3.0	2.9	2.9	2.9	2.9
	13	10.0	6.9	5.7	5.0	4.5	4.2	4.0	3.8	3.6	3.5	3.4	3.4	3.3	3.3	3.2	3.2	3.2	3.2	3.2
	14	10.1	7.1	5.9	5.3	4.8	4.5	4.2	4.1	3.9	3.8	3.7	3.7	3.6	3.6	3.5	3.5	3.5	3.4	3.4
	15	10.2	7.4	6.2	5.5	5.1	4.8	4.5	4.3	4.2	4.1	4.0	3.9	3.9	3.8	3.8	3.8	3.7	3.7	3.7

©2024 Optica

Table 4-13. 全周 GI 型ポリマー光導波路の最低合計接続損失

Lowest coupling loss (dB)	Δ (%)																			
	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1	1.1	1.2	1.3	1.4	1.5	1.6	1.7	1.8	1.9	2
Core height (μm)	2	10.6	6.8	5.3	4.4	3.9	3.6	3.3	3.1	3.0	2.8	2.7	2.5	2.2	2.0	1.8	1.7	1.5	1.5	1.4
	3	282.7	14.3	9.0	6.4	5.0	4.0	3.4	2.9	2.5	2.2	2.0	1.7	1.6	1.5	1.3	1.1	1.1	1.0	1.1
	4	19.2	11.0	7.6	5.1	4.0	3.3	2.8	2.4	2.1	1.9	1.7	1.5	1.3	1.2	1.1	1.1	1.2	1.3	1.4
	5	17.4	9.1	6.0	4.5	3.6	3.0	2.6	2.2	1.9	1.8	1.6	1.4	1.3	1.2	1.2	1.3	1.4	1.4	1.5
	6	15.7	8.0	5.5	4.1	3.4	2.8	2.5	2.1	1.9	1.7	1.5	1.4	1.3	1.3	1.4	1.4	1.5	1.6	1.7
	7	14.3	7.4	5.1	4.0	3.3	2.8	2.5	2.1	2.0	1.7	1.6	1.5	1.5	1.5	1.6	1.7	1.7	1.8	1.8
	8	13.2	7.1	5.0	3.9	3.2	2.8	2.5	2.2	2.0	1.8	1.7	1.6	1.6	1.6	1.7	1.7	1.7	1.7	1.7
	9	12.4	6.8	4.9	3.9	3.3	2.9	2.5	2.3	2.1	1.9	1.8	1.7	1.7	1.7	1.8	1.7	1.7	1.7	1.7
	10	11.7	6.7	4.9	3.9	3.3	2.9	2.6	2.4	2.2	2.0	1.9	1.8	1.8	1.8	1.8	1.7	1.7	1.7	1.7
	11	11.3	6.6	4.9	3.9	3.4	3.0	2.7	2.4	2.3	2.1	2.0	2.0	1.9	1.8	1.8	1.8	1.8	1.7	1.7
	12	11.0	6.6	4.9	4.0	3.4	3.0	2.7	2.5	2.3	2.2	2.1	2.0	1.9	1.9	1.8	1.8	1.8	1.8	1.7
	13	10.7	6.6	5.0	4.1	3.5	3.1	2.8	2.6	2.4	2.3	2.2	2.1	2.0	1.9	1.9	1.9	1.8	1.8	1.8
	14	10.6	6.6	5.1	4.2	3.6	3.2	2.9	2.7	2.5	2.3	2.2	2.1	2.1	2.0	1.9	1.9	1.9	1.8	1.8
	15	10.5	6.7	5.2	4.3	3.7	3.3	3.0	2.8	2.6	2.4	2.3	2.2	2.1	2.1	2.0	2.0	1.9	1.9	1.9

©2024 Optica

Table 4-11, Table 4-12, Table 4-13 より、前節で示した SSC 構造無条件下と比較して、ポリマー光導波路両端で合計接続損失の値が大きく改善されていることがわかる。これは SSC 構造の適用により、接続対象に合わせたモードフィールドをポリマー光導波路両端で形成することができるため、接続効率を最大化できたためである。特に、Table 4-11 に示した SI 型のポリマー光導波路では、複数の設計で合計接続損失 1.0 dB 以下を示している。この損失値は、4.2.4. で設定した損失目標値 2.4 dB と比較して十分に小さく、ポリマー光導波路を光リンクに挿入する価値が十分にあることが示された。

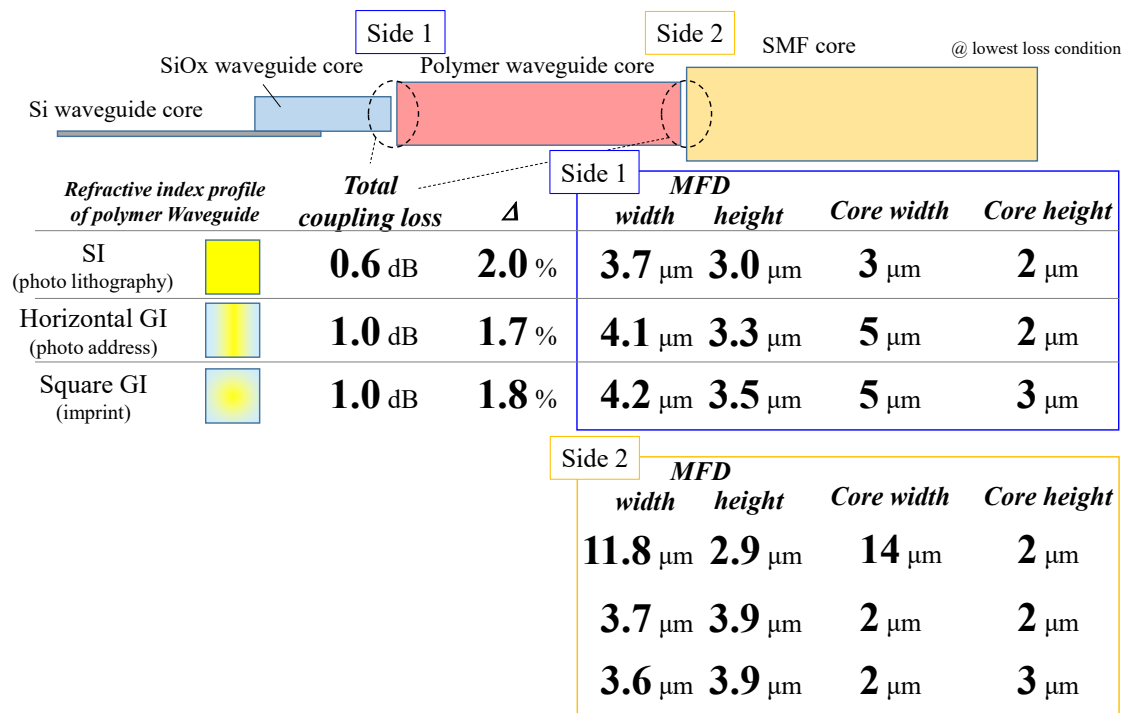
しかしながら、Table 4-11 では 1.5 dB 以内の損失を示す領域(青)は限定的であり、特にコア高さ方向は 1 μm の変動で 1 dB 近くの合計接続損失増大が確認されることから、低接続損失を実現するためには厳しい製造トレランスが要求されることが分かった。

一方で、Table 4-12, Table 4-13 より、ポリマー光導波路の GI 型化によって低損失領域(青)が拡大している様子が確認できる。この傾向は全周 GI 型ポリマー光導波路で、特に高さ方向で顕著となっている。この低損失領域の拡大は、GI 型ポリマー光導波路のコアサイズや Δ が変化した際の光強度分布の変化が、SI 型と比較して緩やかであるために、パラメータ変化時の接続損失への影響が抑制されたためである。したがって、実用を想定した場合、製造トレランスの面で、GI 型ポリマー光導波路が SI 型に比べて優位性を示すことが明らかとなった。

4.6. ポリマー光導波路の最適設計提案

これまでの結果をもとに、SMF と SiO_x 光導波路の間に異なる屈折率分布を有するポリマー光導波路を挿入した際に、両端で生じる合計最低接続損失をまとめ、最適設計を提案する。

4.5.2.および 4.5.3.の検討より、ポリマー光導波路への SSC 構造適用は接続損失低減の為には必須であることが判明している。本章で得られた結果をもとに、ポリマー光導波路両端の最低合計接続損失、ならびにその損失を示す最適設計を屈折率分布別に Fig. 4-39 にまとめた。



©2024 Optica

Fig. 4-39 屈折率分布別の最低接続損失と最適コア設計

Figure 4-39 より、最低接続損失を得るためには、コア高さが 2 μm 、3 μm かつ高い Δ が必要であることがわかる。これまで議論してきたように、合計接続損失のうち、コアサイズ 3 μm 角、 $\Delta = 3.9\%$ の SiO_x 光導波路との接続損失の占める割合が比較的大きい。したがって、接続損失低減の為には、ポリマー光導波路のコア構造も SiO_x 光導波路に近い形を必要としたためと考えられる。最小合計接続損失を示す最適コア高さが 2、3 μm と、屈折率分布依存性がほとんど見られていないのに対し、最適コア幅は SMF 側で SI 型のコア幅は 14 μm となり、他の屈折率分布と比較してかなり大きいことがわかる。これは、 $\Delta = 2.0\%$ と高い場合、SI 型コアが実効屈折率の観点から強いコア内への光閉じ込め力を有しており、基底モードのエバネッセント領域が小さいことに起因している。つまり、SI 型コアではコア幅を狭小化しても SMF との接続損失を改善させるレベルで MFD を拡大させることは難しく、代わりにコア幅を広げる必要があることが判明した。この結果、SI 型ポリマー光導波路の最適

コア設計では、両端でのコア幅が $3\ \mu\text{m}$ と $14\ \mu\text{m}$ と大きな差が存在しており、結果的に急峻なテーパ角が必要となることを示唆している。一方で、GI 型ポリマー光導波路は両端でのコア幅差が $3\ \mu\text{m}$ であり、緩やかなテーパ角で十分高い結合効率を示している。以上の結果より、本シミュレーションでは考慮しなかった、モード遷移に伴い生じる過剰損失のリスクの面から、SI 型と比較して GI 型ポリマー光導波路が優位性を示すことがわかった。

さて、Si 光導波路は高い Δ によって、極めて狭ピッチな配線が可能なのに対し、SMF はクラッド径の制限により通常、 $250\ \mu\text{m}$ といった比較的広いピッチでしか配線ができない[19]。そこで、Fig. 4-39 のようにポリマー光導波路を両者の間にスポットサイズ変換素子として挿入する際に、同時にピッチ変換を実現することができればさらにポリマー光導波路の光リンク挿入の優位性が増すことになる。ピッチ変換のためには、ポリマー光導波路内で曲げ構造を導入する必要がある[20]が、 Δ が高い光導波路、つまりコア内への光閉じ込め効果大きい導波路では曲げ損失が低減されることが知られている[21]。Fig. 4-39 より、屈折率分布によらず、設定した範囲の中で比較的高い Δ (1.7%~2.0%) で最適なコア設計を示すことがわかる。したがって、Fig. 4-39 で得られたスポットサイズ変換素子としての最適構造は、配線ピッチ変換素子としてのポリマー光導波路優位性も示すことになる。

最後に、4.2.4. で設定した、光リンク挿入時にポリマー光導波路に許容される接続損失 2.4 dB (フレネル反射込みで 3.1 dB) との比較を行う。Fig. 4-39 より、最適構造時の最低合計接続損失は、SI 型ポリマー光導波路で 0.6 dB、水平 GI 型および矩形 GI 型ポリマー光導波路で 1.0 dB となっており、許容損失 2.4 dB を大きく下回っている。この十分な損失改善効果によって、許容損失設定の際に想定した、ポリマー光導波路実装時のオフセットによる過剰損失を上回るさらなる実装ズレを許容することも可能となる。さらに、伝搬損失への要求も緩和することができるため、より広い材料選択性を得ることができることが判明した。

以上より、ポリマー光導波路の挿入によって光リンク全体の損失改善に寄与することができることを示し、光リンクの設計自由度を高める素子としてポリマー光導波路が期待されることを示した。

4.7. 結言

本章では、ポリマー光導波路の CPO 適用を見据え、シングルモード光ファイバと SiO_x 光導波路の間に挿入する光リンクを提案し、接続損失面でのポリマー光導波路挿入メリットを検討した。はじめに、ポリマー光導波路挿入に伴う過剰損失を見積もり、両端の接続損失に許容される損失値を 2.4 dB (フレネル反射込 : 3.1 dB) と算出した。つづいて、異なる屈折率分布を有するポリマー光導波路の接続損失を理論的に計算し、シングルモード光ファイバとの接続損失を最小とする設計では、いずれの屈折率分布でも 0 dB とほとんど接続損失が生じないことが判明した。一方で、SiO_x 光導波路との最低接続損失は SI 型 : 0.25 dB 水平 GI 型 : 0.32 dB 全周 GI 型 : 0.42 dB となり、SMF との接続損失と比較して大きいことを示した。

つづいて、第3章で作製したポリマー光導波路を用いて、SMFならびにSiO_x光導波路を想定したUHNA1との接続損失を実測し、シミュレーションで予測される傾向と類似した傾向をとることを、SI型コアと水平GI型コアの両方で確認した。

最後に、SMFおよびSiO_x光導波路との接続損失の観点から、ポリマー光導波路の最適コア設計を提案した。ポリマー光導波路の特性を活かしたSSC構造を適用することで、屈折率分布によらず最適コア設計時の両端合計接続損失は1.0 dB以下となり、設定した許容値を大きく下回ることが判明した。したがって、ポリマー光導波路の挿入は損失面でのメリットが非常に大きく、光デバイス設計の自由度を向上させることでCPO実現に貢献できることを明らかにした。SI型ポリマー光導波路は最低損失が他の屈折率分布と比較して小さいが、低損失を示すコア設計が限定的であること、さらには最適コア設計時のテーパ角度が急峻であることから実用上のマージンは小さい。対してGI型ポリマー光導波路は、屈折率勾配の存在によってコア高さや Δ の変動に対するマージンが大きく、製造トレランスの拡大に寄与できることが判明した。

参考文献

- [1] H. Nishi, K. Takeda, T. Tsuchizawa, T. Fujii, S. Matsuo, K. Yamada, and T. Yamamoto, “Monolithic Integration of InP Wire and SiO_x Waveguides on Si Platform,” *IEEE Photonics Journal*, **7**(5), pp. 4900308 (2015).
- [2] T. Tsuchizawa, K. Yamada, T. Watanabe, S. Park, H. Nishi, R. Kou, H. Shinojima, and S. Itabashi, “Monolithic Integration of Silicon-, Germanium-, and Silica-Based Optical Devices for Telecommunications Applications,” *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, **17**(3), pp. 516-525 (2011).
- [3] OIF, “Co-Packaging Framework Document,”
<https://www.oiforum.com/wp-content/uploads/OIF-Co-Packaging-FD-01.0.pdf> (2024年8月閲覧)
- [4] M. Lamponi, S. Keyvaninia, C. Jany, F. Poingt, F. Lelarge, G. de Valicourt, G. Roelkens, D. Van Thourhout, S. Messaoudene, J. M. Fedeli, and G. H. Duan, “Low-Threshold Heterogeneously Integrated InP/SOI Lasers With a Double Adiabatic Taper Coupler,” *IEEE Photonics Technology Letters*, **24**(1), pp. 76-78 (2012).
- [5] M. Teng, Hao, Wu, C. Li, F. Wang, Y. Du, and X. Zhen, “O-Band Fiber-to-Chip Edge Coupler for High NA Fiber Based on a CMOS Compatible SOI Platform,” 2021 Optical Fiber Communications Conference and Exhibition (OFC), Th2A.5 (2021).

- [6] <https://www.itu.int/rec/T-REC-G.652/> (2024 年 8 月閲覧).
- [7] X. Xu, L. Ma, M. Immonen, X. Shi, B. Swatowski, J. DeGroot, and Z. He, “Practical Evaluation of Polymer Waveguides for High-Speed and Meter-Scale On-Board Optical Interconnects,” *Journal of Lightwave Technology*, **36**(16), pp. 3486-3493 (2018).
- [8] 光回路実装技術委員会, “光回路実装技術ロードマップ 2022 年度版「100 Tb/s 超スループットの実現に向けた光回路実装形態の予測と課題」,” エレクトロニクス実装学会 (2023).
- [9] R. Lang, and K. Kobayashi, “External Optical Feedback Effects on Semiconductor Injection Laser Properties,” *IEEE Journal of Quantum Electronics*, **16**(3), pp. 347-355 (1980).
- [10] 日本規格協会「JIS ハンドブック 22-1 電子 II-1 (オプトエレクトロニクス),」 (2011)
- [11] 岡本勝就, 「光導波路の基礎,」 コロナ社 (1992).
- [12] A. Noriki, T. Amano, M. Tsunoda, and T. Michihiro, “Low-Cost MT-Ferrule-Compatible Optical Connector for Co-packaged Optics Using Single-Mode Polymer Waveguide,” 2019 IEEE 69th Electronic Components and Technology Conference (ECTC), pp. 2042-2047 (2019).
- [13] https://keytech.ntt-at.co.jp/adhesive/prd_10011.html (2024 年 8 月閲覧)
- [14] <https://www.tomoegawa.co.jp/product/optical/fit.html> (2024 年 11 月閲覧)
- [15] T. Hoshida, V. Curri, L. Galdino, D. T. Neilson, W. Forysiak, J. K. Fischer, T. Kato, and P. Poggiolini, “Ultrawideband Systems and Networks: Beyond C + L-Band,” *Proceedings of the IEEE*, **110**(11), pp. 1725-1741 (2022).
- [16] IEC61755-1 Fibre optic connector optical interfaces - Part 1: Optical interfaces for single mode non-dispersion shifted fibres - General and guidance.
- [17] 河野健治, 「光デバイスのための光結合系の基礎と応用,」 現代工学社 (1990).
- [18] <https://www.thorlabs.co.jp/thorproduct.cfm?partnumber=UHNA1> (2024 年 6 月閲覧)

- [19] K. Takemura, D. Ohshima, A. Noriki, D. Okamoto, A. Ukita, and J. Ushida, “Silicon-Photonics-Embedded Interposers and Their Applications,” 2021 International Conference on Electronics Packaging (ICEP), pp. 35-36 (2021).
- [20] S. Yakabe, Y. Kobayashi, H. Matsui, Y. Saito, K. Manabe, and Takaaki Ishigure, “Low Loss Single-mode Polymer Optical Waveguide with Circular Cores,” OSA Continuum, **4**(3), pp. 1070-1085 (2021).
- [21] Kiminori Sato, Ryo Maruyama, Nobuo Kuwaki, Shoichiro Matsuo, and Masaharu Ohashi, “Optimized Graded Index Two-Mode Optical Fiber with Low DMD, Large Aeff and Low Bending Loss,” Optics Express, **21**(14), pp. 16231-16238 (2013).

第 5 章

CPO 応用に向けたポリマー光導波路

光学特性の温度特性

5.1. 緒言

CPO への適用を考えるうえで、ポリマー光導波路にはいくつか懸念点が存在する。前章までに議論した光リンクを想定すると、ポリマー光導波路は ASIC 周辺に実装されることから、高温環境下での安定動作が要求される可能性が高い。ポリマーは柔軟性や優れた加工性を示す一方で、信頼性や耐熱性が懸念されることが多い。そこで本章では、CPO 適用を想定し、シングルモードポリマー光導波路と SMF、 SiO_x 光導波路との端面結合方式、ならびに Si 光導波路からのアディバティブ結合方式での接続損失を計算し、温度依存パラメータを導入することで、その接続損失の温度依存性を理論予測する。特にポリマー光導波路コアの断面形状や屈折率分布が、接続損失の温度依存性に与える影響を分析する。

5.2. ポリマーの熱的性質

ポリマー光導波路は加工性に優れた光伝送路であるが、その性質は光導波路を構成しているポリマーに大きく依存している。ポリマーは熱可塑性樹脂と熱硬化性樹脂に大別される[1]。

熱可塑性樹脂は、熱を加えることで塑性になり、熱で溶ける性質を持つポリマーを指す。熱可塑性樹脂は成型後も加熱することで元の原料樹脂に戻すことができるため、リサイクルが可能である。また、加熱により熔融させることで融着も可能となる。一方、熱硬化性樹脂は熱可塑性樹脂と逆の性質を持ち、加熱することで重合反応が進み、分子間で架橋した三次元架橋構造を形成する。そのため、強固な構造を有し、高温での熔融や、溶剤への溶解耐性が高く、硬化後に原料樹脂に戻すことはできない。

光導波路にポリマーを適用する場合、導波路構造形成後の特性変化は望ましくないため、熱可塑性樹脂の適用は好まれない。他方、熱硬化性樹脂は成型に時間とエネルギーを必要とし、量産性に難がある。そこでポリマー光導波路用の樹脂としては、広く光硬化性樹脂[2]が用いられることが多い。光硬化性樹脂では、紫外線等の照射によってラジカル重合 or カチオン重合を引き起こし、樹脂を硬化させる[3]。光硬化性樹脂の特徴として、硬化時間が極めて短く、大量生産向けであること、また、低温での硬化が可能のため、設備導入コストや基材へのダメージが少ないなどの利点がある。一方で、熱硬化性樹脂と比較して、光硬化性樹脂は長期信頼性に対する懸念があり、ポリマー光導波路の導入にあたっては、耐環境性の検討が必須となっている。特に光通信分野では JPCA 規格[4]や Telcordia 規格[5]に代表されるように、高温条件下での長期信頼性が求められており、ポリマー光導波路製品化に向けて避け

ては通れない課題である。

そこで本章では、ポリマー光導波路の CPO 適用を見据え、ポリマー光導波路光学特性の温度依存性を検証することとした。

まず、代表的なポリマーの熱的性質とその概説を列挙する[6].

・融点(T_m)

固体(結晶)状態から液体状態に変化する温度のこと。

・ガラス転移温度(T_g)

ガラス状態からゴム状態に変化する温度のこと。ポリマーの特徴的な性質の一つである。ガラス転移温度前後では線膨張係数、弾性率や硬度などが大きく変化するため、使用環境やアプリケーションに合わせて材料を選定することが必要となる。なお、ゴム状態での変形は塑性変形となり、応力を除いた後も形状を維持することから、成型などに使用されることが多い。融点が高いポリマーはガラス転移温度も高い傾向にある。

・熱分解温度[7]

分子間力の大きいポリマーでは、ポリマーの鎖を解離させるためのエネルギーが、気化させるためのエネルギーと比較して小さいため熱分解を起こす。

・熱膨張率

体積膨張係数(α)、線膨張係数(β)で議論されることが多い。膨張が等方性を有する場合、体積膨張係数と線膨張係数には $\alpha=3\beta$ の関係性がある[8]。ポリマーの線膨張率は他材料と比較して一般的に大きいため、環境温度変化に伴いコアサイズが変動し、光学特性に悪影響を及ぼす懸念がポリマー光導波路適用時の課題としてよく挙げられる。また、CPO 適用を見据えた時、ポリマー光導波路はリジッドな基板上に実装される可能性が高く、ポリマーと基板間の線膨張率差が、線膨張率の大きいポリマーへの応力やひずみを生み、最悪の場合基板からの剥離を引き起こす。

・屈折率温度依存性

屈折率は真空中を伝搬する光と媒質中を伝搬する光の速度の比として定義され、以下の式(5-1)で表される。なお、式内の n を屈折率、 c を真空中の光速、 v を媒質中の位相速度とした。

$$n = c / v \quad (5-1)$$

媒質中の位相速度は媒質を構成する物質の分極率によって支配されるため、屈折率は分

極率に依存する。両者の関係性を示す式として、Lorentz-Lorenz の式がよく知られており、最も一般的な形は式(5-2)で表される[9]。なお式(5-2)は特定の結晶構造でのみ有効であり、屈折率を n 、平均分極率を α で表している。

$$\frac{(n^2 - 1)}{(n^2 + 2)} = \frac{4\pi}{3} \alpha \quad (5-2)$$

ここで、温度変化に伴う媒質の状態変化によって、分極率も影響を受け、結果的に屈折率も変動することになる。Lorentz-Lorenz の式を温度 t で微分することで式(5-3)を得る。ここで、 α_e は電子分極率、 α_t は体積熱膨張率を表す。

$$\frac{\partial n}{\partial t} = \frac{(n^2 + 2)(n^2 - 1)}{6n} \left[\frac{1}{\alpha_e} \frac{\partial \alpha_e}{\partial t} - \alpha_t \right] \quad (5-3)$$

式(5-3)より、屈折率の温度依存性は電子分極率と体積熱膨張率に依存することがわかる。一般的にポリマーでは式(5-3)の第二項である体積膨張による効果が支配的であり、温度上昇に伴う密度低下によって屈折率が低下する。代表的な光学用ポリマーである PMMA(ポリメタクリル酸メチル)は $dn/dt = -1.2 \times 10^{-4} / K$ を示す[10]。ポリマーの屈折率温度依存性は化学構造に起因しており、材料によってさまざまな値を取り得るが、おおむね $10^{-4} / K$ オーダーの値を示す。

上記熱的性質の内、融点、ガラス転移温度、熱分解温度は化学構造に大きく依存し、各温度よりも高温の環境下ではポリマーが塑性変形し、ポリマー光導波路の導波構造が維持できない。したがって、ポリマー光導波路を安定的に使用するためには、これらポリマーの示す温度特性は環境温度よりも高い温度を示すことが必須であり、議論の余地はない。一方で、ポリマー光導波路が示す熱膨張率ならびに屈折率温度依存性は、温度変化によって特性が変動することが避けられない。具体的には熱膨張率はポリマー光導波路のコアサイズに、屈折率の温度依存性はコア、クラッドの屈折率、つまりは導波構造への影響が大きい比屈折率差 Δ を変動させる。

そこで本章ではポリマーの熱的性質の内、避けることのできない熱膨張率、屈折率温度依存性を抽出し、特に物理量として線膨張係数(Coefficient of Thermal Expansion : CTE)、屈折率の温度依存性 dn/dt を用いて議論を進める。

5.3. [端面結合]接続損失温度依存性の評価(シミュレーション)

5.3.1. シミュレーションモデルの構築

5.2.で抽出したポリマーの熱的特性，線膨張係数と屈折率の温度依存性の 2 つのパラメータも，当然ポリマーの化学構造に依存している．したがって，これらのパラメータ値より推定される事象もあることから，機密保持の観点より，特に各社，各研究機関にて開発段階にあるポリマー光導波路向けポリマー材料に関して，それらのパラメータが公開されることは少ない．そこで本章でも第 4 章と同様に，すでに市販され，さらに上記パラメータが公開されている OrmoCore ならびに OrmoClad をポリマーのモデルとして採用し，ポリマーの持つ温度依存性がポリマー光導波路の光学特性にどのように影響を与えるのか，特に異なる屈折率分布を持つ光導波路の挙動に着目して検討を行った．

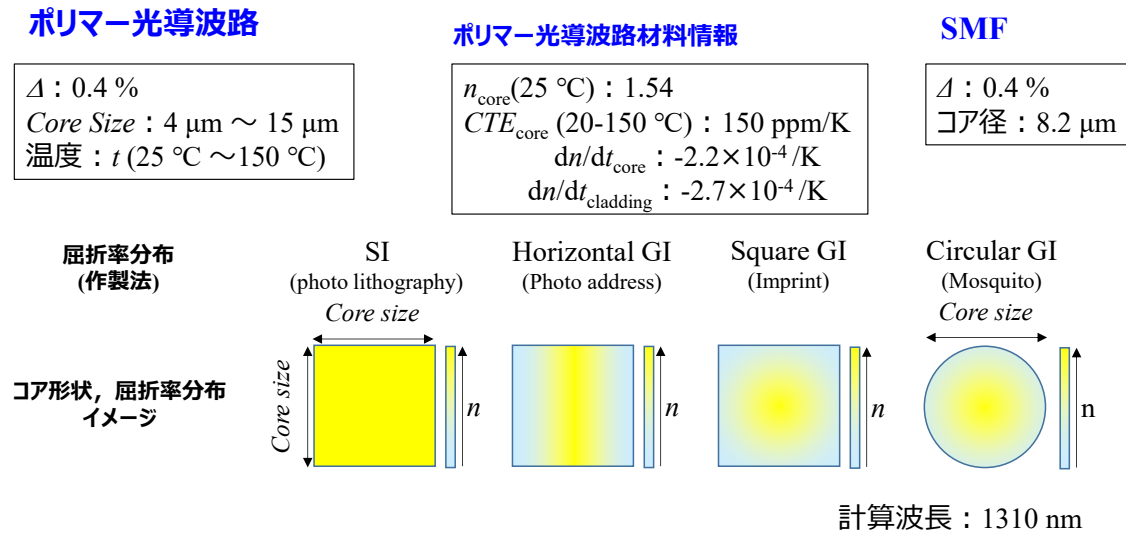


Fig. 5-1 温度依存性を考慮したシミュレーションモデル

Figure 5-1 に本研究の計算で使用したパラメータならびにコアの屈折率分布モデル，その構造を形成するための作製法を示す．計算波長帯として 1310 nm を設定している．ここで，ASIC 近傍の環境温度は最大 95 °C[11]であり，今回，Fig. 5-1 で設定した環境温度の最大値 150 °C は過剰と考えられるが，このような高温環境下での動作が確保できた場合，設計マージンを確保できるといった理由から，シミュレーションの最大温度として 150 °C を設定した．

今回，4 章で採用したフォトリソグラフィ法，フォトアドレス法，インプリント法によって形成される矩形 SI 型，水平 GI 型，矩形 GI 型コアに加え，円形コアの温度依存性を検証すべく，モスキート法によって形成される円形 GI 型コアをモデルとして追加した．

SMF との接続損失を計算する上で，ポリマー光導波路で変化させるべきパラメータとしてコア幅，コア高さ， Δ ，環境温度がある．本章では，線膨張係数と dn/dt が与える影響を検

証すべく、 Δ を SMF と同じ 0.4%に、さらに矩形コアはコア幅=コア高さとなる正方形とし、円形コアの直径とともに *Core size* ($2h, 2w$)として規定した。なお、光導波路コア断面での屈折率分布については前章の式(4-1)～(4-6)で定義し、本章で新たに追加した円形 GI 型コアに対しては、半径方向の変数 r を用いて以下の式(5-4)、式(5-5)で定義した。

$$\text{円形 GI : } n(r) = n_{cladding} + \left\{ 1 - \left(\frac{r}{w} \right)^2 \right\} \Delta n \quad [|r| \leq w] \quad (5-4)$$

$$n(r) = n_{cladding} \quad [|r| > w] \quad (5-5)$$

入射条件は 4 章と同様に設定した。SMF の最低次の導波モードに光強度 P_{in} を入射し、伝搬光がそのポリマー光導波路に結合した後、ポリマー光導波路の最低次モードから出射された光強度 P_{out} を求めることで接続損失 L_{con} を式(4-8)で得る。また、ポリマー光導波路がフューモード、マルチモード動作する場合であっても、ポリマー光導波路の最低次モードに結合した光強度のみを抽出し、それ以外の高次モードに結合した光については損失光として計算した。

ポリマー光導波路と他素子との接続を考える場合、接続箇所での光軸ずれが考慮されなければならないが、以降の検討では単芯同士のポリマー光導波路と SMF との接続を想定し、温度変化が生じても光軸ずれは生じないものとした。実際の CPO 適用を見据えると、ポリマー光導波路の特徴の一つである高密度配線を活かした多芯接続が想定され、ポリマーの示す大きな線膨張率はチャンネル毎の軸ずれを増大させる懸念がある。しかしながら本章では微小なコアサイズの CTE による変動が SMF との結合損失に与える影響について詳細に検証すべく、温度変化に寄らず光軸は完全なアライメントが為されている状態を想定した。

また、SMF を構成している石英ガラスの CTE が 10^{-1} ppm/K、 dn/dt が -1 ppm/K オーダー [12, 13]といずれもポリマー光導波路を構成しているポリマーが示す特性より 1 桁以上小さく、接続特性に与える影響はほとんどない。また、本研究ではポリマー光導波路の光学特性温度依存性への着目から、ポリマー光導波路の最適設計の提案を行うことを主目的としている。そのためには、光導波路を構成するポリマーの温度特性が、光学特性に与える影響を検証することが重要となる。そこで、本研究ではポリマー光導波路と接続する SMF の温度依存性(線膨張係数、屈折率温度依存性)については無視している。

5.3.2. ポリマー光導波路-SMF 間接続損失の温度依存性

はじめに、室温(=25 °C)下での、ポリマー光導波路と SMF 間の接続損失を、異なるコアサイズ、屈折率分布に対して計算した結果を Table 5-1 に示す。なお、0.35 dB [14]未満を青色、0.35 dB 以上 0.5 dB 未満を黄色、0.5 dB 以上 1.0 dB 未満を橙色、1.0 dB 以上を赤色として示し、損失を視覚的にわかりやすくしている。Table 5-1 より、広いコアサイズ領域で SMF との低結合損失(青)を示しており、ポリマー光導波路が屈折率分布によらず広い製造トレランスを有するといえる。

Table 5-1 ポリマー光導波路と SMF の結合損失@25 °C

Core size (μm)	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
SI	0.12	0.094	0.053	0.017	0.012	0.046	0.12	0.23	0.36	0.52	0.70	0.89
horizontal GI	0.33	0.11	0.068	0.050	0.044	0.055	0.086	0.14	0.21	0.29	0.39	0.50
square GI	1.5	0.35	0.12	0.062	0.036	0.021	0.012	0.012	0.019	0.034	0.056	0.084
circular GI	2.2	0.49	0.16	0.078	0.047	0.028	0.015	0.009	0.010	0.020	0.037	0.060

< 0.35 dB

< 0.50 dB

< 1.0 dB

> 1.0 dB

©2025 Optica

一方、ポリマー光導波路が 4 μm の小コアサイズ領域で、特に GI 型のポリマー光導波路との接続損失が高い(赤)傾向がある。これは屈折率分布の存在により、最低次伝搬モードの実効屈折率が低下しているためであると考えられる。実際、円形 GI 型ポリマー光導波路のコアサイズと MFD の関係性を Fig. 5-2 に示すが、小コアサイズ領域で急激に MFD が増大している様子が確認できる。特に大きな接続損失を示しているコアサイズ 4 μm の円形 GI 型ポリマー光導波路からの出射光強度分布を示した Fig. 5-3 より、伝搬光をコア内に閉じ込めきれていないことが確認できる。このようにエバネッセント波の領域が増えることで、光導波路伝搬モードの光強度分布が SMF と比較して過剰に拡大したため大きな接続損失を示したと考えられる。

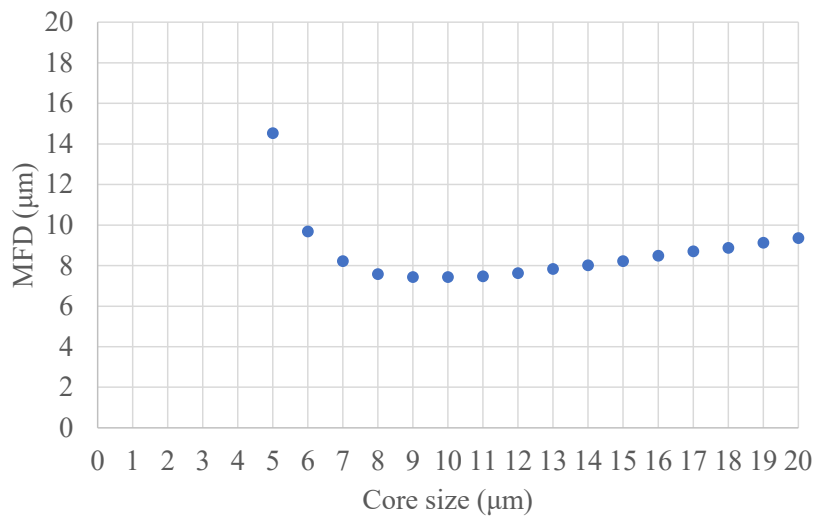


Fig. 5-2. 円形 GI 型ポリマー光導波路のコアサイズと MFD の関係性

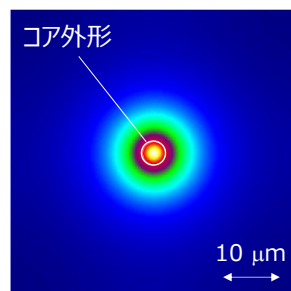


Fig. 5-3. コアサイズ 4 μm の円形 GI 型ポリマー光導波路の出射光強度分布

つづいて、接続損失の温度依存性を検討すべく、室温である 25 °C～150 °C の範囲内での、コアサイズと比屈折率差 Δ の関係を検討する．ここで、温度変化に伴いコアサイズはコア材料の CTE，屈折率はコアとクラッド材料それぞれの dn/dt の影響を受けるとする．なお、温度変化に伴いポリマー光導波路コアが示す膨張，ならびに収縮は全て等方的であると仮定した．このとき、コアサイズ，コア・クラッドの屈折率，および Δ の温度依存性は、環境温度 t ，ならびに室温 $t_0 = 25$ °C を用いて式(5-6)～(5-9)で定義できる．

$$\text{Core size}(t) = \text{Core size}(t_0) \times (1 + \text{CTE} \times (t - t_0)) \quad (5-6)$$

$$n_{\text{core}}(t) = n_{\text{core}}(t_0) + \left\{ \frac{dn_{\text{core}}}{dt} \times (t - t_0) \right\} \quad (5-7)$$

$$n_{\text{cladding}}(t) = n_{\text{cladding}}(t_0) + \left\{ \frac{dn_{\text{cladding}}}{dt} \times (t - t_0) \right\} \quad (5-8)$$

$$\Delta(t) = \frac{n_{\text{core}}^2(t) - n_{\text{cladding}}^2(t)}{2n_{\text{core}}^2(t)} \quad (5-9)$$

なお、既に述べたようにポリマー光導波路はリジッド基板上への実装が想定されるため、上記式(5-6)で示される任意の温度でのコアサイズは、実際の環境下でのコアサイズとは異なる可能性が有る．リジッド基板は一般にポリマー光導波路よりも小さい CTE を示すことから、ポリマー光導波路の温度変化に伴う膨張を抑制する方向に働くと想定される．したがって、上記式(5-6)で想定したコアサイズは抑制要素を考慮しない状態でのワーストケースであるといえ、上記想定のもとで計算を行い、高温下でもポリマー光導波路の光学特性が維持されるという結果が得られた場合、実際の環境下でも問題なく動作すると期待できる．

式(5-7)，(5-8)より、コアとクラッドそれぞれの屈折率は各材料の示す dn/dt によって変化するが、Fig. 5-1 に示したように、今回材料モデルに用いた OrmoCore，ならびに OrmoClad は異なる dn/dt を示している．今回モデル化した ORMOCER®樹脂に限らず、導波構造を形成するためにはコアとクラッドで屈折率差を形成する必要がある．そのために両材料の分子構造や含有物質は異なることが多い．その材料組成の違いによってコアとクラッドが示す屈折率の温度依存性は異なることが想定される．このコアとクラッド間の屈折率の温度依存性の差は、温度変化に伴う Δ の変動につながり、導波特性に影響を与えることが想定される．

上記式を用いて、ポリマー光導波路コアのパラメータの温度依存性を検証する．まずは代表例として、ポリマー光導波路のコアサイズが 8 μm 時の温度とコアサイズ， Δ の関係性を Fig. 5-4 に示す．

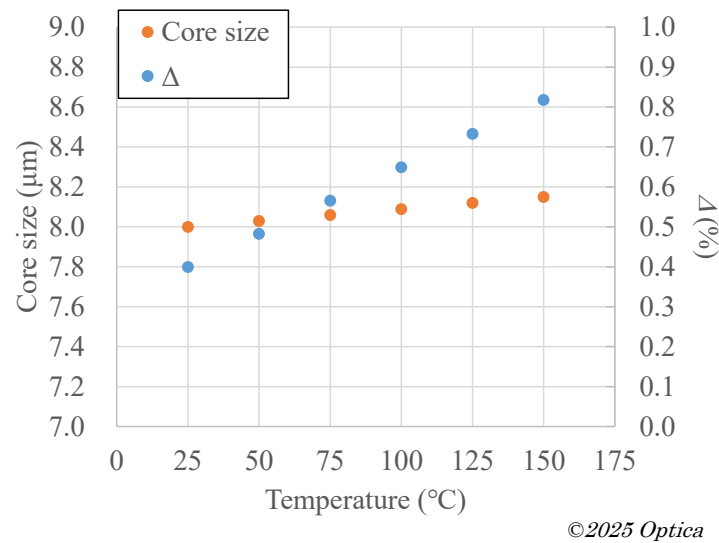


Fig. 5-4. ポリマー光導波路のコアサイズと Δ の温度依存性

Figure 5-4 より、環境温度が 25 °C から 150 °C に上昇する際、コアサイズは+2%の増加にとどまるのに対し、 Δ は+104%の増大が見られていることがわかる。この Δ の増大は、コアとクラッド材料間の dn/dt の差に起因している。両者の差は Fig. 5-1 より $0.5 \times 10^{-4} / K$ であり、今回 125 °C の温度上昇に伴い屈折率差が 0.006 程度拡大し、これが Δ の増大に繋がっている。以上より、今回のモデルでは、ポリマー光導波路が示す光学特性の温度依存性として、コアサイズと比較して Δ の変動が大きいことが明らかとなった。ここで、光導波路コアが示す MFD はコアサイズのみならず、 Δ にも影響を受ける。したがって、温度変化に対する MFD の変化を解析する必要がある。そこで、室温下でコアサイズ 8 μm かつ $\Delta=0.4\%$ のポリマー光導波路の温度依存性を結果した結果を Fig. 5-5 に示す。Fig. 5-5 では、異なる屈折率分布を有するポリマー光導波路を比較している。

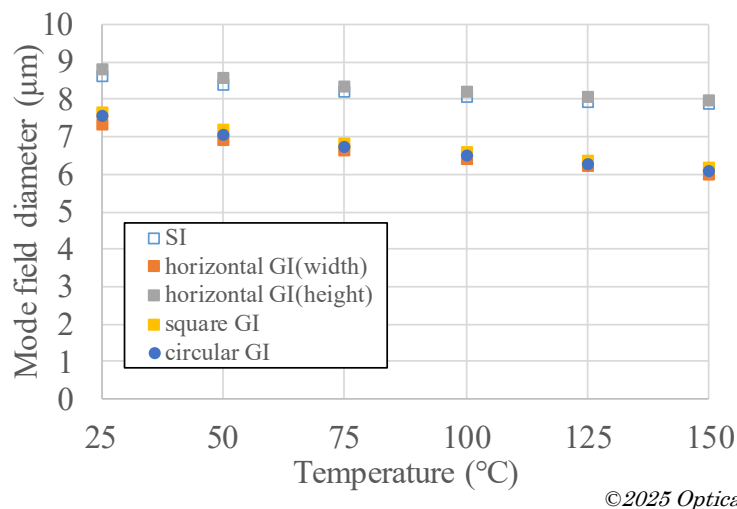


Fig. 5-5. ポリマー光導波路コアサイズ 8 μm 時の MFD の温度依存性

GI 型コアに関しては、コア内の屈折率はコア、ならびにクラッドの 2 種ポリマー混合によって形成されており、任意のコア内屈折率に対して dn/dt を定義することは難しい。そこで本研究では、任意の温度条件下での GI 型コアが示す屈折率分布は、その温度下でコアならびにクラッドの屈折率を用いて形成した放物線で定義した。Fig. 5-5 より、室温からの温度上昇に伴い、屈折率分布によらず MFD は減少する傾向を示している。また、GI 型コアは SI 型コアに比べて傾きが大きいですが、これは温度上昇により導波構造の Δ が増大し、コア内への光の閉じ込め効果が強まったことに伴い、屈折率勾配によるコア中心部への光閉じ込め効果が GI 型コアで発現したことを示している。

以上の傾向をもとに、ポリマー光導波路と SMF 間の結合損失を、異なるコアサイズ、屈折率分布に対して異なる温度条件下で計算した結果を Table 5-2 に示す。Table 5-2 より、50 °C 以上の高温下でも、広いコアサイズ領域で SMF との良好な接続損失が維持されていることがわかる。これは Fig. 5-4, 5-5 で示した通り環境温度上昇時にコアサイズや Δ は変化するものの、それによる MFD 変化によって生じる接続損失への影響は大きくないことを示している。一方で、150 °C では接続損失 0.35 dB 以上の領域(黄・赤)が拡大しており、上記 MFD の影響が無視できないレベルで大きくなっていることがわかる。150 °C という環境温度は既に記述した通り過剰な設定ではあるものの、更に高い環境温度下での動作が求められる場合、また、ポリマーが示す屈折率の温度依存性が今回モデルとした材料よりも大きい場合には、影響が大きくなると考えられる。

Table 5-2 異なる温度環境下でのポリマー光導波路と SMF の結合損失

50 °C

Core size (μm)	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
SI	0.20	0.19	0.11	0.048	0.018	0.035	0.10	0.19	0.32	0.48	0.65	0.84
horizontal GI	0.16	0.13	0.12	0.10	0.1	0.1	0.1	0.13	0.19	0.26	0.35	0.46
square GI	0.62	0.16	0.10	0.086	0.067	0.045	0.026	0.013	0.008	0.011	0.022	0.040
circular GI	0.92	0.21	0.12	0.10	0.085	0.062	0.039	0.021	0.010	0.007	0.013	0.026

75 °C

Core size (μm)	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
SI	0.33	0.29	0.18	0.086	0.033	0.033	0.082	0.17	0.30	0.45	0.62	0.80
horizontal GI	0.18	0.23	0.21	0.16	0.12	0.10	0.10	0.13	0.18	0.25	0.33	0.43
square GI	0.29	0.15	0.16	0.16	0.13	0.094	0.061	0.035	0.018	0.010	0.010	0.019
circular GI	0.42	0.16	0.18	0.18	0.16	0.12	0.084	0.051	0.028	0.014	0.009	0.012

100 °C

Core size (μm)	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
SI	0.48	0.40	0.25	0.12	0.051	0.036	0.075	0.16	0.28	0.42	0.59	0.78
horizontal GI	0.28	0.34	0.31	0.23	0.17	0.13	0.12	0.14	0.18	0.24	0.32	0.41
square GI	0.20	0.22	0.26	0.25	0.21	0.15	0.11	0.066	0.038	0.020	0.011	0.011
circular GI	0.24	0.22	0.28	0.28	0.24	0.19	0.14	0.091	0.055	0.030	0.016	0.010

125 °C

Core size (μm)	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
SI	0.63	0.50	0.32	0.16	0.07	0.04	0.07	0.15	0.26	0.41	0.57	0.76
horizontal GI	0.42	0.47	0.40	0.30	0.22	0.17	0.14	0.15	0.19	0.24	0.32	0.41
square GI	0.22	0.34	0.38	0.35	0.28	0.22	0.15	0.10	0.064	0.036	0.019	0.012
circular GI	0.22	0.33	0.40	0.39	0.33	0.26	0.19	0.13	0.087	0.052	0.029	0.016

150 °C

Core size (μm)	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
SI	0.77	0.59	0.37	0.20	0.09	0.05	0.07	0.14	0.25	0.39	0.56	0.74
horizontal GI	0.56	0.59	0.49	0.37	0.27	0.20	0.17	0.17	0.20	0.25	0.32	0.40
square GI	0.31	0.46	0.49	0.44	0.36	0.28	0.20	0.14	0.093	0.057	0.032	0.018
circular GI	0.29	0.47	0.53	0.49	0.42	0.33	0.25	0.18	0.12	0.077	0.046	0.026

©2025 Optica

5.3.3. ポリマー光導波路-SiO_x 光導波路間接続損失の温度依存性

SMF との接続損失に続き、ポリマー光導波路と SiO_x 光導波路間接続損失を検証する。

はじめに、SiO_x 光導波路自身が示す光学特性の温度依存性について検証する。SiO_x 光導波路を構成する 2 種材料の屈折率温度依存性は、コア材料：SiO_x $dn_{\text{core}}/dt = 9.5 \times 10^{-6}/K$ 、クラッド材料：SiO₂ $dn_{\text{cladding}}/dt = 1.4 \times 10^{-5}/K$ とした[15]。なお、ポリマーと異なりこれら酸化シリコン系の材料は dn/dt が正の値を示しているが、これは式(5-3)で示した屈折率の温度依存性を示す Lorentz-Lorenz 式〔 〕内の、第 1 項の電子分極率の温度依存性効果が支配的であるためである。実際、SiO₂ の CTE は 1.1 ppm/K であり極めて小さく、Lorentz-Lorenz 式第二項の影響が十分に小さいことがわかる。さて、このように SiO_x 光導波路の構成材料が示す dn/dt の値はポリマー光導波路の dn/dt と比較すると 1 桁以上小さく、コア-クラッド間の dn/dt 差も $5.5 \times 10^{-6}/K$ とかなり小さい。これらの温度依存性パラメータを反映し、異なる温度条件

下で SiO_x 光導波路が示す各種パラメータと, コアから出射される光強度分布を計算し, Table 5-3 にまとめた.

Table 5-3 異なる温度条件下での SiO_x 光導波路のパラメータと光学特性の計算結果

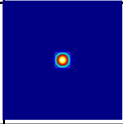
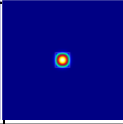
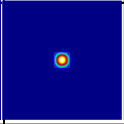
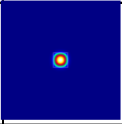
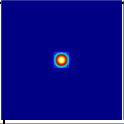
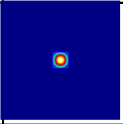
Temperature (°C)	25	50	75	100	125	150
n_{core}	1.506	1.507	1.507	1.507	1.507	1.507
$n_{cladding}$	1.447	1.447	1.448	1.448	1.448	1.449
Δ (%)	3.872	3.864	3.855	3.847	3.838	3.830
Core size	3.000	3.000	3.000	3.000	3.000	3.000
MFD _x	3.108	3.109	3.110	3.111	3.112	3.114
MFD _y	3.139	3.140	3.141	3.142	3.143	3.144
NFP						

Table 5-3 より, 上述した dn/dt の小ささにより, コアとクラッドともに屈折率の変動は小さく, 結果として Δ の温度依存性もほとんど見られていないことがわかる. また, 低 CTE のために Core size の変化もなく, Δ の温度無依存性もあわせて, コアから出力される光強度分布にも変化はない. 実際, 算出した MFD も 25 °C から 150 °C への温度変化であっても最大 0.006 μm 程度の変動しかなく, これまで検討してきたポリマー光導波路が示す光学特性の温度依存性と比較しても無視できるほど小さい. そこで, 既に温度依存性を無視して求めた SMF との接続損失結果との純粋な比較のため, さらにはポリマー光導波路自体の温度依存性にも着目するべく, 以後の SiO_x 光導波路との接続損失計算過程で, SiO_x 光導波路自身の温度依存性は無視することとした.

上記前提のもと, 異なるコアサイズ, 屈折率分布を有するポリマー光導波路に対して, SiO_x 光導波路との接続損失を検討した. 本論文では代表例として, 異なる温度に対してコアサイズ 4 μm のポリマー光導波路と SiO_x 光導波路との接続損失を計算した結果を Fig. 5-6 に示す. なお, すべてのコアサイズに対する計算結果については, Appendix に掲載した.

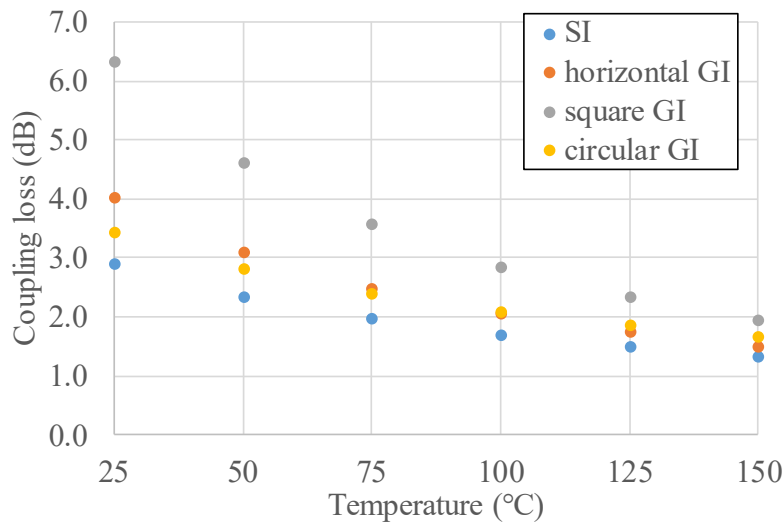


Fig. 5-6 異なる温度環境下での SiO_x 光導波路とコアサイズ $4\ \mu\text{m}$ ポリマー光導波路の接続損失

Figure 5-6 より、25 °C では SiO_x 光導波路との高い接続損失を示していることがわかる。これは 4 章でも記述した通り、ポリマー光導波路と SiO_x 光導波路間の Δ の不一致に起因している。一方で、温度の上昇に伴い全領域で接続損失の低下が見られ、150 °C では SI 型ポリマー光導波路にて、1.3 dB までの損失低減が確認できる。これは温度上昇に伴いポリマー光導波路の Δ が増大することで、 SiO_x 光導波路との Δ のミスマッチが解消する方向に働いたためである。

5.4. [端面結合]光学特性温度依存性の評価(実験)

5.4.1. dn/dt の測定

本章での温度特性評価にも、第 2 章で作製しポリマー光導波路を使用する。つまり、フォトリソグラフィ法で作製した矩形 SI 型ポリマー光導波路、およびフォトアドレス法で作製した水平 GI 型ポリマー光導波路の 2 種の評価を行った。このとき、ポリマー光導波路材料として、フォトリソグラフィ法には ORMOCER®樹脂、フォトアドレス法には住友ベークライト社独自のノルボルネン樹脂を用いている。5.3.にてポリマー光導波路光学特性の温度依存性には、導波路を構成するポリマーの屈折率温度依存性が大きな影響力を有していることがわかった。そこでまずはそれぞれのポリマーが示す dn/dt を実験的に測定した。

dn/dt の測定には第 3 章と同様にメトリコン社のプリズムカプラを使用した。装置内には温調装置が内蔵されており、サンプルを温度変化させながら屈折率を測定することができる。測定装置の模式図と実際の写真を Fig. 5-7 に示す。

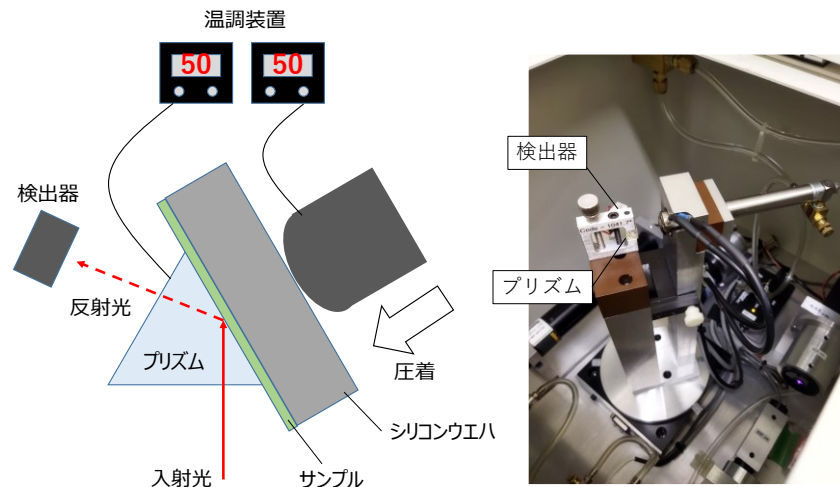


Fig. 5-7. 屈折率温度依存性の測定模式図と写真

上記装置を用いて、異なる温度に対してポリマーの屈折率を評価することで、ポリマーの屈折率温度依存性 dn/dt を評価する。まず、フォトリソグラフィ法で用いた ORMOCER®樹脂 3 種(OrmoCore, OrmoClad, OrmoMix)の屈折率を異なる温度に対して評価した結果を Table 5-4, Table 5-5, Table 5-6 に示す。また、Fig. 5-8 に波長 1310 nm での材料毎の屈折率算出結果をまとめた。

Table 5-4 OcmoCore の屈折率温度依存性の測定結果

Refractive index	Sample temperature(°C)		30		40		50		60		70		80		90		100	
	wavelength(nm)		TE	TM	TE	TM	TE	TM	TE	TM	TE	TM	TE	TM	TE	TM	TE	TM
Measured value	404		1.58235	1.58271	1.58091	1.5819	1.5801	1.5801	1.5801	1.57874	1.57694	1.57739	1.57532	1.57567	1.57396	1.57423	1.57233	1.57233
	632.8		1.55157	1.55148	1.55059	1.55013	1.54951	1.54924	1.54826	1.54762	1.547	1.54664	1.54583	1.54493	1.54421	1.54385	1.54268	1.54268
	831.5		1.54312	1.5432	1.5424	1.5424	N/A	N/A	1.53989	1.54007	1.53846	1.53837	1.53712	1.53729	1.53577	1.53568	1.53424	1.53442
Calculated value	1310		1.53633	1.53665	1.53587	1.53654	N/A	N/A	1.5333	1.53436	1.53149	1.53179	1.5299	1.53144	1.52889	1.52918	1.52735	1.52774
	1550		1.53504	1.53542	1.53463	1.53546	N/A	N/A	1.53206	1.53331	1.53015	1.53054	1.52851	1.53035	1.52757	1.52794	1.52603	1.52647

Table 5-5 OcmoClad の屈折率温度依存性の測定結果

Refractive index	Sample temperature(°C)		30		40		50		60		70		80		90		100	
	wavelength(nm)		TE	TM	TE	TM	TE	TM	TE	TM	TE	TM	TE	TM	TE	TM	TE	TM
Measured value	404		1.56445	1.56491	1.56255	1.56291	1.56091	1.561	1.55955	1.55964	1.55746	1.55728	1.55592	1.55582	1.55383	1.55419	1.55264	1.55273
	632.8		1.53503	1.53493	1.53322	1.53295	1.53177	1.53141	1.53006	1.52978	1.52816	1.52797	1.52644	1.52625	1.5249	1.52444	1.52308	1.52299
	831.5		1.52678	1.52704	1.52507	1.52524	1.52371	1.52398	1.52218	1.52226	1.52055	1.52064	1.51865	1.51874	1.51703	1.51748	1.51513	1.51548
Calculated value	1310		1.52009	1.52082	1.51849	1.51923	1.51721	1.51826	1.51593	1.51646	1.51459	1.51501	1.5125	1.51292	1.51073	1.51232	1.5088	1.50968
	1550		1.51881	1.51965	1.51723	1.5181	1.51597	1.51719	1.51474	1.51538	1.51347	1.51396	1.51134	1.51184	1.50954	1.51138	1.5076	1.5086

Table 5-6 OrmoMix の屈折率温度依存性の測定結果

Refractive index	Sample temperature(°C)		30		40		50		60		70		80		90		100	
	wavelength(nm)		TE	TM	TE	TM	TE	TM	TE	TM	TE	TM	TE	TM	TE	TM	TE	TM
Measured value	404		1.57631	1.57603	1.57504	1.57486	1.57315	1.57332	1.57152	1.57161	1.56989	1.56998	1.56835	1.56844	1.56663	1.56644	1.56527	1.56499
	632.8		1.5452	1.54493	1.54412	1.54385	1.54259	1.54232	1.54115	1.54079	1.53962	1.53935	1.538	1.53782	1.53674	1.5362	1.53521	1.53484
	831.5		1.5373	1.53738	1.53631	1.5363	1.53487	1.53496	1.53308	1.53325	1.53146	1.53172	1.53031	1.53043	1.52867	1.52867	1.52714	1.52731
Calculated value	1310		1.53118	1.53166	1.53028	1.53058	1.52891	1.52945	1.52669	1.52752	1.52496	1.52587	1.52436	1.52485	1.52223	1.52289	1.52072	1.52153
	1550		1.53004	1.53061	1.52915	1.52952	1.52779	1.52845	1.52549	1.52646	1.52372	1.52478	1.52325	1.52383	1.52101	1.52182	1.51951	1.52045

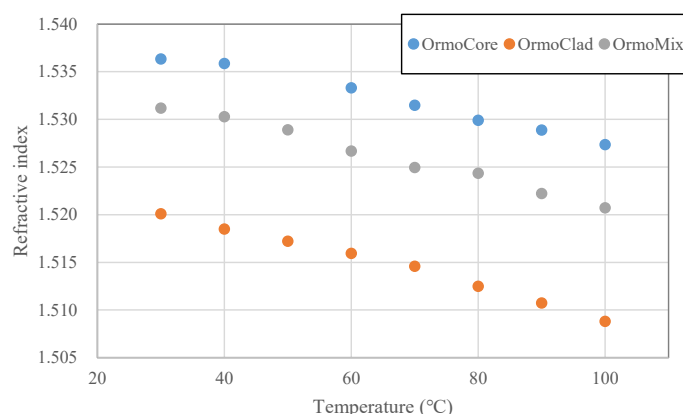


Fig. 5-8 1310 nm 帯の ORMOCER®樹脂の屈折率算出結果

Table 5-4, Table 5-5, Table 5-6 より，サンプルの温度上昇に伴い，材料・波長に関わらず屈折率が低下していることがわかる．これは 5.2 で述べた通り，ポリマーでは式(5-3)〔 〕内第二項の影響が大きいいため，温度上昇に対して屈折率は負の方向に変化をするためである．また，OrmoCore と OrmoClad の混合材料である OrmoMix の屈折率は，すべての波長，温度環境下で OrmoCore と OrmoClad の中間の値をとっていることが確認できる．代表値として，波長 633 nm，TE 方向の屈折率 n_{TE} の屈折率を Table 5-7 にまとめた．また，Table 5-7 の最下段に OrmoMix の混合比からの単純計算で予測される OrmoMix の屈折率を併記している．

Table 5-7 各 ORMOCER®樹脂の屈折率@632.8 nm と OrmoMix の屈折率予測値

Sample temperature(°C)	30	40	50	60	70	80	90	100
OrmoCore	1.552	1.551	1.550	1.548	1.547	1.546	1.544	1.543
OrmoClad	1.535	1.533	1.532	1.530	1.528	1.526	1.525	1.523
OrmoMix	1.545	1.544	1.543	1.541	1.540	1.538	1.537	1.535
Calculated OrmoMix	1.545	1.544	1.543	1.541	1.540	1.539	1.537	1.535

Table 5-7 の実測値と計算値比較より，両者がほとんど一致していることが確認できる．したがって，混合剤 OrmoMix の屈折率は，温度条件に関わらず OrmoCore と OrmoClad の混合比から単純に計算できることがわかった．

つづいて，TE 方向の屈折率 n_{TE} の温度に対する傾きを dn_{TE}/dt として定義し，異なる材料，波長に対して算出した結果を Table 5-8 にまとめた．

Table 5-8 ORMOCER®樹脂の dn/dt の測定結果

$dn_{TE}/dt(\times 10^{-4})$	OrmoCore	OrmoClad	OrmoMix
404 nm	-1.5	-1.7	-1.6
632.8 nm	-1.3	-1.7	-1.5
831.5 nm	-1.3	-1.6	-1.5
1310 nm(calculated)	-1.3	-1.6	-1.5

Table 5-8 で注目すべきは、OrmoCore と OrmoClad の混合材料である OrmoMix の dn_{TE}/dt が波長帯によらず常に中間の値かつ、混合比から予測される値に近い値をとっていることである。つまり、Table 5-7 の結果と合わせて、混合剤 OrmoMix の屈折率ならびに屈折率の温度依存性は、OrmoCore と OrmoClad の混合比に強く依存することが明らかとなった。一方で、実験的に得られたポリマーの屈折率温度依存性 dn/dt は Table 3-1 で示したメーカ公称値[16]と比較して小さい。これは測定方法の違いや、プリズムカプラによる測定時に用いた屈折率測定用のサンプルが比較的大きく、基板としたシリコンウエハが放熱板として機能し、指定温度に到達しなかった可能性が考えられる。

つづいて、フォトアドレス法で用いたポリマー光導波路の構成材料であるノルボルネン樹脂についても同様の評価を行った結果を Table 5-9, Table 5-10 に示す。なお、ORMOCER®樹脂の結果より、温度に対して屈折率の変化は線形であることが確認できたため、ノルボルネン樹脂に対しては 20 °C 刻みで屈折率を評価した。

Table 5-9 ノルボルネン樹脂の屈折率温度依存性の測定結果

Refractive index	Sample temperature(°C)	30		50		70		90		110	
	wavelength(nm)	TE	TM	TE	TM	TE	TM	TE	TM	TE	TM
Measured value	404	1.51211	1.50981	1.51027	1.50797	1.50742	1.50714	1.50475	1.50254	1.50199	1.49977
	632.8	1.48759	1.48686	1.48594	1.48566	1.48337	1.48309	1.48079	1.48061	1.47794	1.47776
	831.5	1.48361	1.48205	1.482224	1.48031	1.47967	1.47783	1.47719	1.47526	1.47435	1.47242
Calculated value	1310	1.48139	1.47871	1.47859	1.47629	1.47773	1.47408	1.47536	1.4712	1.47253	1.46838
	1550	1.48107	1.47813	1.47794	1.47555	1.47747	1.47342	1.47512	1.47045	1.4723	1.46764

Table 5-10 ノルボルネン樹脂(クラッド)の屈折率温度依存性の測定結果

Refractive index	Sample temperature(°C)	30		50		70		90		110	
	wavelength(nm)	TE	TM	TE	TM	TE	TM	TE	TM	TE	TM
Measured value	404	1.50474	1.50213	1.50259	1.50013	1.49995	1.4984	1.49738	1.49511	1.49462	1.49234
	632.8	1.48181	1.48145	1.4799	1.47962	1.47759	1.47742	1.47517	1.47488	1.47263	1.47239
	831.5	1.4769	1.47507	1.47489	1.47301	1.47264	1.47064	1.47031	1.46822	1.46757	1.46574
Calculated value	1310	1.47345	1.4697	1.47056	1.46736	1.46908	1.46483	1.46685	1.46248	1.46385	1.45997
	1550	1.47284	1.46866	1.46976	1.46625	1.46845	1.46368	1.46623	1.46134	1.46318	1.45883

Table 5-11 ノルボルネン樹脂の dn/dt の測定結果

$dn_{TE}/dt (\times 10^{-4})$	core	cladding
404 nm	-1.4	-1.5
632.8 nm	-1.3	-1.4
831.5 nm	-1.3	-1.3
1310 nm(calculated)	-1.3	-1.3

ORMOCER®樹脂と同様に TE 方向の屈折率 n_{TE} の温度に対する傾きを dn/dt として定義し、異なる材料、波長に対して算出した結果を Table 5-11 にまとめた。Table 5-11 より、コア-クラッド間の屈折率温度依存性に差はほとんどないことがわかる。実際、波長 1310 nm にお

けるコアとクラッドの dn/dt 差は 0.3×10^{-5} であり, Table 5-8 から求められる OrmoCore と OrmoMix 間の dn/dt 差と比較して $1/10$ 以下と十分小さい. これは, フォトアドレス法によって形成するコア-クラッド間の屈折率差は, UV 露光の有無によるものであり, ベースのポリマー構造に大きな違いがないためと推測される. したがって, フォトアドレス法で作製されたポリマー光導波路は温度変化に伴う屈折率差の変動影響を最小化させ, 高温環境下での安定動作が期待できることがわかった.

5.4.2. MFD の温度依存性

つづいて, ポリマー光導波路の光学特性の温度依存性を検証すべく, 光導波路からの出射 NFP を測定し, その挙動を検証することとした. 測定に用いた評価系を Fig. 5-9 に示す. 電圧印加によって温度変化可能なペルチェ素子をステージ上に設置し, ペルチェ素子上にポリマー光導波路を固定した. また, ポリマー光導波路表面に温度センサを取り付け, 測定時のポリマー光導波路温度をモニターしている.

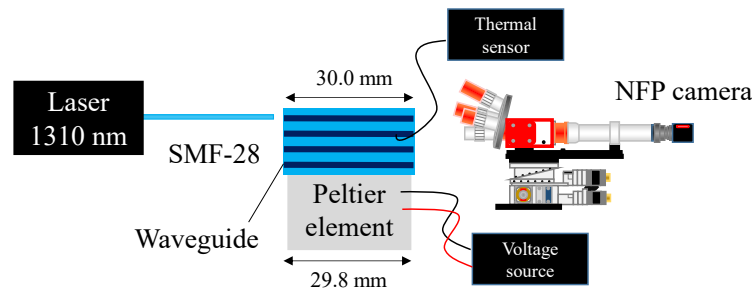


Fig. 5-9 ポリマー光導波路の NFP 温度依存性評価系

まず, 入射プローブである SMF に光源からの光を入射し, 入射プローブを固定しているステージを動かすことで調芯した後, 出射光強度が最大となる位置で固定する. その後, ペルチェ素子に電圧を加えることでポリマー光導波路の温度を変化させることで, ポリマー光導波路コアから出射される NFP の温度依存性を評価した.

直接露光法で作製された矩形 SI 型ポリマー光導波路の NFP 温度依存性を, 異なる幅を持つコアに対して評価した結果を Table 5-12 に示す. なお, 表内の縦軸にはモニターした光導波路の表面温度, 横軸には実測のコア幅を記載した. また, Table 5-12 の NFP 結果から水平方向ならびに垂直方向の MFD を算出し, Table 5-13, Table 5-14 にそれぞれまとめた.

Table 5-12 NFP のコア幅依存性と温度依存性の測定結果

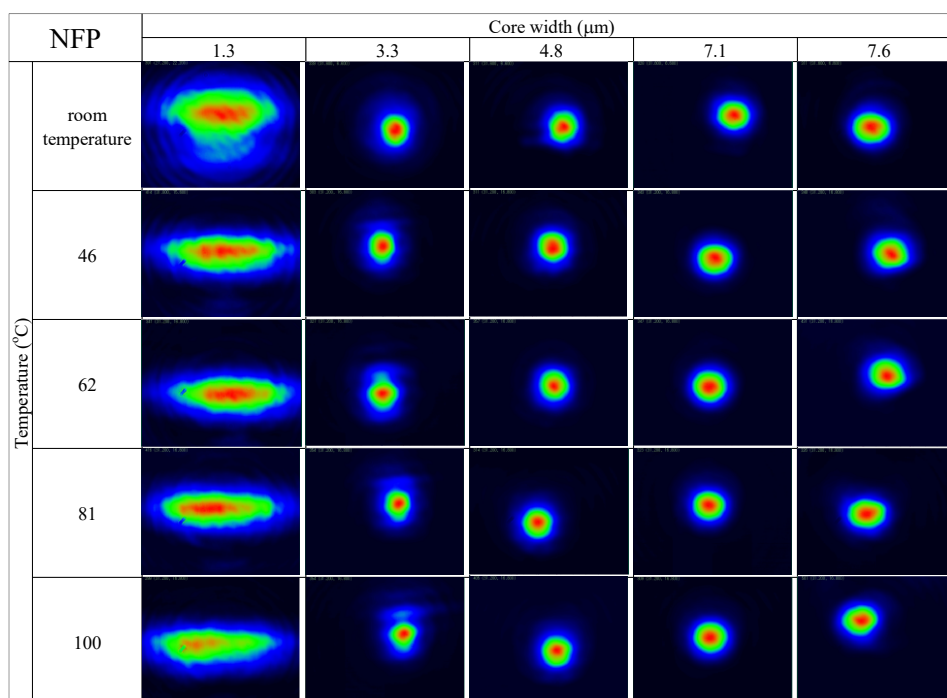


Table 5-13 水平方向 MFD とコア幅，温度の関係

Core width (μm)		1.3	3.3	4.8	7.1	7.6
Temperature ($^{\circ}\text{C}$)	22	25.4	7.97	7.77	8.65	9.47
	46	27.7	7.16	8.07	8.87	9.40
	62	27.8	8.48	7.98	8.85	9.62
	81	28.4	7.18	8.15	8.37	9.75
	100	28.0	7.74	8.00	8.72	9.04

(μm)

Table 5-14 垂直方向 MFD とコア幅，温度の関係

Core width (μm)		1.3	3.3	4.8	7.1	7.6
Temperature ($^{\circ}\text{C}$)	22	17.4	9.23	8.45	7.72	8.55
	46	10.0	9.60	8.57	7.99	7.85
	62	9.70	10.9	8.44	8.38	7.85
	81	9.36	9.9	8.06	7.74	7.72
	100	10.5	10.3	8.10	8.07	8.02

(μm)

Table 5-13 より、室温での MFD のコア幅依存性に着目すると、水平方向 MFD の極小値を取るコア幅は $4.8\ \mu\text{m}$ であることがわかる。この室温における MFD の実測結果を検証すべく、実験と同じ条件でシミュレーションを行い比較した。実験結果と計算結果の比較を Fig. 5-10 に示す。

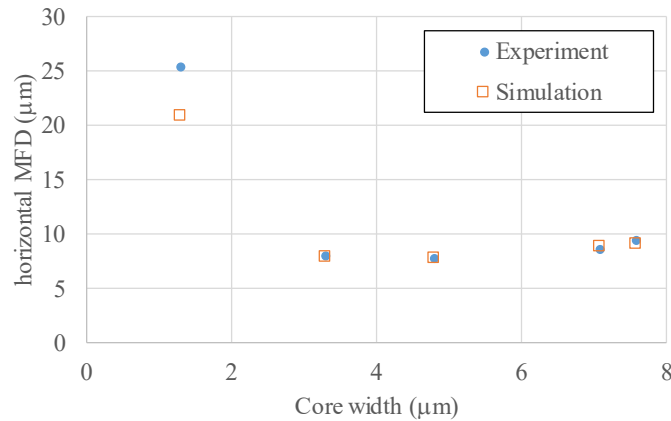


Fig. 5-10 室温における実験と計算で得られたコア幅と水平方向 MFD の関係比較

Figure 5-10 より、シミュレーション上もコア幅 $4.8\ \mu\text{m}$ で MFD は極小を取っていることが判明した。また、その他の MFD についても、おおむね実験値と一致していることがわかる。

一方で、Table 5-14 では、垂直方向の MFD についてはコア幅 $7.1\ \mu\text{m}$ 時に極小を示している。こちらについてもシミュレーションを行い、コア幅と垂直方向の MFD について Fig. 5-11 にプロットした。Fig. 5-11 より、シミュレーション上では MFD は極小値を示しておらず、実験値と異なる傾向を示していることがわかる。これは Table 5-14 からわかるように、コア幅 $7.1\ \mu\text{m}$ 付近は垂直方向 MFD のコア幅依存性が小さい領域であり、実際の MFD にはほとんど差がなく、測定誤差によって極小値として観測されたものと考えられる。

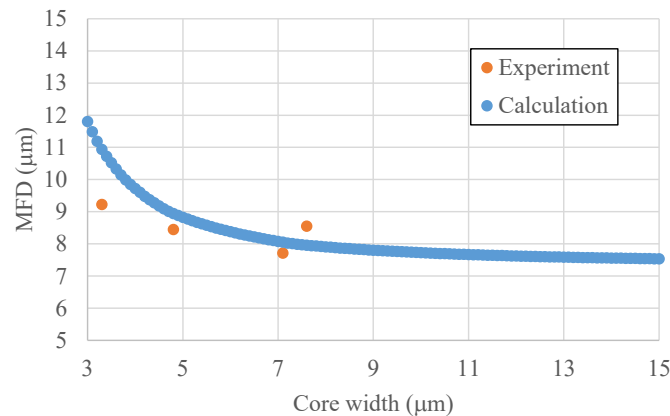


Fig. 5-11 室温における実験と計算で得られたコア幅と垂直方向 MFD の関係比較

つづいて、Table 5-13, Table 5-14 にて、設計が幅方向では各温度での NFP ならびに MFD の挙動に着目したところ、温度上昇に伴う MFD の変化が見られており、ポリマー光導波路の光学特性が温度依存性を示すことが確認できる。MFD の変化をコア幅、コア高さで包括的に評価すべく、便宜的に水平方向、垂直方向の MFD の平均値を MFD_{ave} とし、Table 5-15 にまとめなおした。

Table 5-15 MFD_{ave} とコア幅、温度の関係

Core width (μm)		1.3	3.3	4.8	7.1	7.6
Temperature ($^{\circ}\text{C}$)	22	21.4	8.60	8.11	8.18	9.01
	46	18.8	8.38	8.32	8.43	8.62
	62	18.7	9.67	8.21	8.61	8.74
	81	18.9	8.55	8.10	8.06	8.73
	100	19.2	9.04	8.05	8.40	8.53

(μm)

Table 5-15 より、コア幅 1.3 μm および 7.6 μm では温度上昇とともに MFD の縮小傾向が確認できる。これは温度上昇に伴い Δ が増大し、コア内部への光閉じ込め効果が増大したためである。一方で、その他のコアでは MFD の縮小傾向は見られなかった。これはコアサイズ測定が顕微鏡を用いた不確実性の高いものであり、シミュレーションに代入した値と整合が取れなかったことや、クラッドに 2 種の混合材料である OrmoMix を用いたことで、局所的な屈折率および屈折率温度依存性のゆらぎが生じたこと、さらにはサンプル加温時の温度分布の存在が考えられる。

さて、Table 5-15 ではコア幅 1.3 μm の MFD が温度変化に大きく影響される様子も確認できる。これはコア幅 1.3 μm が極小コアサイズを下回るコアサイズであることから、コア内を伝搬する光強度分布がコアから大きく漏れだし、クラッドにまで拡がったエバネッセント成分が温度変化の影響、つまりは Δ の変化の影響を大きく受けることを示唆している。この結果は、コアサイズを意図的に小さくしてスポットサイズを拡大する逆テーパ形状による SSC 構造が、大きな温度依存性を持ってしまう可能性を示唆している。したがって、スポットサイズ整合のための逆テーパ形状の SSC 構造は、実環境における温度変化影響を受けやすいことを考慮して、慎重に設計する必要があることが判明した。

5.5. [端面結合]実環境温度を想定した、ポリマー光導波路最適構造の提案

5.5.1. 最適構造の算出方法

ここまでの検討結果をふまえ、SMF と SiO_x 光導波路間にポリマー光導波路を挿入した光リンクを検討する。なお、既に4章で上記光リンクでのポリマー光導波路コアの最適設計を検証しているが、Fig. 4-39 で示した最適設計は室温(25℃)での設計であり、温度変化で生じる接続損失への影響を考慮していない。そこで本章では、SMF と SiO_x 光導波路間にポリマー光導波路を挿入した光リンクでのポリマー光導波路コアの最適設計について、温度依存性を考慮して検討する。

既に4章で説明した通り、ポリマー光導波路両端の接続損失は、それぞれの端面で生じる接続損失の総和として考えることができ、また、環境温度の変化もすべての素子に対して同等に影響を与えると考えられることから、接続損失の温度依存性についても両端の総和として算出することができる。

さて、ここまで5.3.2., 5.3.3.でSMF, ならびに SiO_x 光導波路とポリマー光導波路の接続損失の温度依存性について計算を行ってきた。得られた計算結果の内、最も着目すべき傾向は、SMF とポリマー光導波路の接続損失は温度上昇に伴い全体的に損失が上昇するのに対し、 SiO_x 光導波路との接続損失では温度上昇に伴い損失が低減する傾向を示すことである。これは温度上昇に伴いポリマー光導波路の Δ が増大するため、 Δ の低いSMF との光強度分布のミスマッチが広がる一方で、 Δ の高い SiO_x 光導波路とのミスマッチが解消する方向に働くためである。したがって、SMF と SiO_x 光導波路の間にポリマー光導波路を挿入した系では、温度変化によって両者の接続損失は多くのコアサイズ、 Δ 領域でトレードオフの関係にあるといえる。ただし両者の接続損失は完全に補償し合うわけではなく、ポリマー光導波路の構造によってそのふるまいは異なる。そのため、通常の検討対象となる、室温環境下のみを想定したポリマー光導波路の最適構造といった議論では、上記損失変動を考慮に入れることができず、温度変化によって大きく接続損失が変動し、リンクロスバジェットを大きく圧迫しうる一因となってしまう。そこで、室温である25℃, ならびに環境温度として最大と想定される150℃の2つの温度環境を抽出し、両環境下での接続損失を計算、最適化することで、実用上想定される環境下であっても、接続損失面で安定動作が期待できるポリマー光導波路コアの構造を提案することを目指した。

本章では、ポリマー光導波路のコア設計として、Core size (コア幅=コア高さ)を定義し、議論してきた。しかしながら、Core size の定義下ではポリマー光導波路のコアは正方形に制限されてしまう。ポリマー光導波路のコアは通常コア幅、コア高さを広い自由度で設計可能であることから、温度依存性を考慮したコア最適構造を提案する上では上記制限は不適と考え、ここではポリマー光導波路のコアが長方形(コア幅 $\neq$ コア高さ)となる組み合わせについても検討することとした。

はじめに、25℃, 150℃ 温度条件下での、SMF-ポリマー光導波路間接続損失を計算した。なお、本章では接続損失を最低にするポリマー光導波路の最適構造を見据えての検討であ

り，4.3.1.で用いた最低接続損失の算出を本章でも適用した．25 °C ， 150 °C における SMF-ポリマー光導波路間接続損失の計算結果を Fig. 5-12 に示す．なお，25 °C 条件下の SMF とポリマー光導波路の最低接続損失については Table 4-3 の結果を参照している．

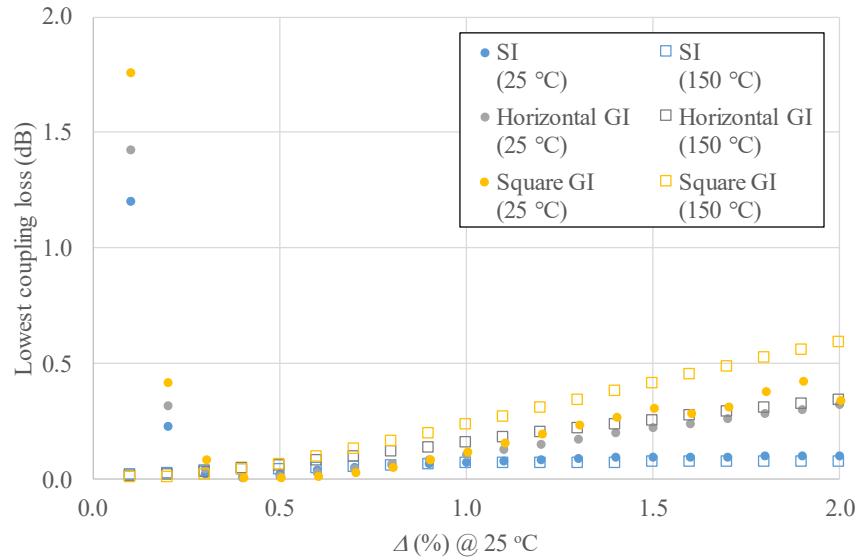


Fig. 5-12 最適コア設計を適用したポリマー光導波路と SMF 間の接続損失

ここで，Fig. 5-12 に示した異なる温度条件下での最低接続損失は，各温度条件，かつ各 Δ におけるポリマー光導波路の最適設計を適用した場合の損失であり，同一コア構造での比較ではないこと，また横軸に示した Δ は 25 °C での Δ であること(150 °C では実質的にコア-クラッド間の dn/dt 差に起因して Δ が上昇している)に留意する必要がある．150 °C での異なる屈折率分布， Δ のポリマー光導波路が示す SMF との最低接続損失と，その損失を示すコア幅・コア高さについては Appendix に掲載した．Fig. 5-12 より，一部の設計を除き，多くの Δ 領域で SMF との低接続損失(0.5 dB 以下)を示していることがわかる．したがって，たとえ 150 °C のような高温状況下であっても，最適なポリマー光導波路のコア設計下では，SMF との結合損失がほとんど生じないことが判明した．

つづいて，150 °C 条件下でのポリマー光導波路と SiO_x 光導波路間の接続損失を計算し，同様の手法を用いて Fig. 5-13 にまとめた．なお，25 °C 条件下のポリマー光導波路- SiO_x 光導波路の最低接続損失については Fig. 4-35 の結果を参照している．また，150 °C での異なる屈折率分布， Δ のポリマー光導波路が示す SiO_x 光導波路との最低接続損失と，その損失を示すコア幅・コア高さについては Appendix に掲載した．

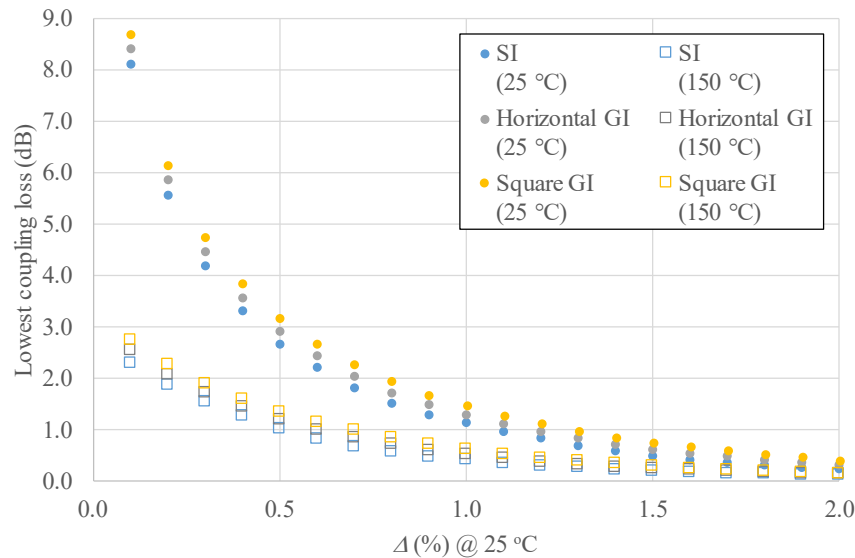

 Fig. 5-13 最適コア設計を適用したポリマー光導波路と SiO_x 光導波路間の接続損失

Figure 5-13 より、 SiO_x 光導波路との接続損失は最低接続損失が温度上昇に伴い改善している様子が見られており、SMF との接続損失で見られた挙動とは異なる。これは温度上昇によってポリマー光導波路の Δ が増大した為、 SiO_x 光導波路とのモードプロファイルがマッチングする方向に働いたためである。

最後に、ここまでの計算結果を用いて、温度依存性を考慮したポリマー光導波路の最適設計について議論する。改めて、ポリマー光導波路挿入先として想定する光リンクを Fig. 5-14 に示す。また、製造プロセスによって制限される前提条件として、ポリマー光導波路の Δ 、ならびにコア高さは一定であることとする。一方で、マスク設計によって容易に調整可能なポリマー光導波路のコア幅は、接続対象に合わせて自由に変更可能とした。

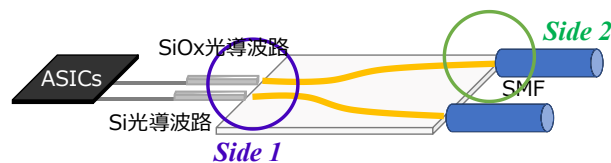


Fig. 5-14 ポリマー光導波路の適用光リンク模式図

室温 25 °C での最適コア設計については、既に第 4 章の Fig. 4-39 で示しており、最適コア設計時に生じるポリマー光導波路両端での接続損失の合計は、SI 型ポリマー光導波路で 0.6 dB、水平 GI 型、矩形 GI 型ポリマー光導波路で 1.0 dB であった。このような室温 25 °C での最適コア設計時、それぞれのポリマー光導波路が 150 °C 環境下で示す接続損失の計算結果を、室温 25 °C での最適コア設計、ならびにその時に 25 °C で示す合計接続損失とあわせて Fig. 5-15 にまとめた。Fig. 5-15 より、室温 25 °C では屈折率分布によらず 1.0 dB 以下の

極めて低い損失を示していた設計であっても、高温環境下では接続損失が大きく増大してしまうことが判明した。したがって、通常議論される室温環境下での接続損失を含む光学特性は、特に屈折率の温度依存性が高いポリマー光導波路では、高温環境下でその特性を維持できないことが示唆された。

ポリマー光導波路 屈折率分布		合計接続損失		Δ	コア高さ	Side 1	Side 2
		25 °C	150 °C			コア幅	コア幅
SI (photo lithography)		0.6 dB	2.6 dB	2.0 %	2 μm	3 μm	14 μm
Horizontal GI (photo address)		1.0 dB	2.3 dB	1.7 %	2 μm	5 μm	2 μm
Square GI (Imprint)		1.0 dB	2.2 dB	1.8 %	3 μm	5 μm	2 μm

Fig. 5-15 室温 25 °C での最適コア設計とポリマー光導波路両端の合計接続損失

また、Fig. 5-15 では、150 °C での合計接続損失はいずれの屈折率分布を有するポリマー光導波路でも、第 4 章で設定した目標値 3.1 dB を下回っているが、このような温度変化に伴う損失変動はリンクロスバジェットを圧迫し、システム運用の安定性を脅かしかねない。そこで、25 °C ならびに 150 °C で平均的な振る舞いをする、つまり、実用上想定される温度範囲で安定した接続損失を示すポリマー光導波路の設計を検討する。

検討の手順を示す。

- ① ポリマー光導波路の Δ を固定し、25 °C、150 °C 条件下で異なるコア幅、コア高さを有するポリマー光導波路と SMF の接続損失の計算を行う。

例として $\Delta=0.4\%$ の時の SI 型ポリマー光導波路と SMF の接続損失計算結果を Table 5-16、Table 5-17 に示す。

Table 5-16 SI 型ポリマー光導波路($\Delta=0.4\%$)と SMF の接続損失計算結果@25 °C

$\Delta = 0.4\%$		Core width (μm)														
		2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	
Core height (μm)	2	8.1	5.5	3.0	1.5	0.9	0.7	0.5	0.5	0.4	0.5	0.5	0.6	0.5	0.7	
	3	5.5	1.9	0.6	0.3	0.2	0.1	0.1	0.2	0.2	0.2	0.3	0.4	0.4	0.5	
	4	3.1	0.6	0.2	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.2	0.2	0.3	0.4	0.5	
	5	1.6	0.3	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.2	0.2	0.3	0.3	0.4	
	6	1.0	0.2	0.1	0.1	0.1	0.0	0.0	0.1	0.1	0.1	0.2	0.2	0.3	0.4	
	7	0.7	0.1	0.1	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.1	0.1	0.2	0.3	0.3	
	8	0.5	0.1	0.1	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.1	0.2	0.2	0.3	
	9	0.5	0.2	0.1	0.1	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.1	0.2	0.2	0.3	
	10	0.5	0.2	0.1	0.1	0.1	0.1	0.0	0.0	0.0	0.1	0.1	0.2	0.2	0.3	
	11	0.5	0.2	0.2	0.2	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.2	0.2	0.3	
	12	0.5	0.3	0.2	0.2	0.2	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.2	0.2	0.3	0.4	
	13	0.6	0.4	0.3	0.3	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.3	0.3	0.4	
	14	0.6	0.4	0.4	0.3	0.3	0.3	0.2	0.2	0.2	0.2	0.3	0.3	0.4	0.5	
	15	0.7	0.5	0.5	0.4	0.4	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.4	0.4	0.5	0.5	

Table 5-17 SI 型ポリマー光導波路($\Delta = 0.4\%$)と SMF の接続損失計算結果@150 °C

$\Delta = 0.4\%$		Core width (μm)													
Core height (μm)		2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
	2	0.3	0.5	0.6	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.8	0.9	1.0	1.1
	3	0.5	0.8	0.9	0.9	0.8	0.8	0.7	0.7	0.7	0.8	0.8	0.9	1.0	1.1
	4	0.6	0.9	0.9	0.9	0.8	0.7	0.6	0.6	0.6	0.6	0.7	0.8	0.8	0.9
	5	0.7	0.9	0.9	0.7	0.6	0.5	0.5	0.4	0.4	0.5	0.5	0.6	0.7	0.7
	6	0.7	0.8	0.8	0.6	0.5	0.4	0.3	0.3	0.3	0.3	0.4	0.4	0.5	0.6
	7	0.6	0.8	0.7	0.5	0.4	0.3	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.3	0.4	0.5
	8	0.6	0.7	0.6	0.5	0.3	0.2	0.1	0.1	0.1	0.1	0.2	0.2	0.3	0.4
	9	0.6	0.7	0.6	0.4	0.3	0.2	0.1	0.1	0.0	0.1	0.1	0.2	0.3	0.3
	10	0.7	0.7	0.6	0.4	0.3	0.2	0.1	0.0	0.0	0.1	0.1	0.2	0.2	0.3
	11	0.7	0.8	0.6	0.5	0.3	0.2	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.2	0.3	0.4
	12	0.8	0.8	0.7	0.5	0.4	0.2	0.2	0.1	0.1	0.1	0.2	0.2	0.3	0.4
	13	0.9	0.9	0.8	0.6	0.4	0.3	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.3	0.4	0.5
	14	1.0	1.0	0.8	0.7	0.5	0.4	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.4	0.4	0.5
	15	1.1	1.1	0.9	0.8	0.6	0.5	0.4	0.3	0.3	0.4	0.4	0.5	0.5	0.6

② ①で計算した 25 °C と 150 °C での接続損失を合計する。

例として Table 5-18 に、25 °C と 150 °C の $\Delta = 0.4\%$ の時の SI 型ポリマー光導波路と SMF の接続損失を合計した結果を示す。

Table 5-18 SI 型ポリマー光導波路($\Delta = 0.4\%$)と SMF の接続損失
(25 °C, 150 °C での合計値)

$\Delta = 0.4\%$		Core width (μm)													
Core height (μm)		2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
	2	8.4	5.9	3.6	2.2	1.6	1.3	1.2	1.1	1.1	1.2	1.3	1.4	1.5	1.8
	3	6.0	2.7	1.6	1.2	1.0	0.9	0.9	0.9	0.9	1.0	1.1	1.3	1.4	1.6
	4	3.7	1.6	1.2	1.0	0.9	0.8	0.7	0.7	0.8	0.8	0.9	1.1	1.2	1.4
	5	2.3	1.2	1.0	0.8	0.7	0.6	0.5	0.5	0.6	0.6	0.7	0.8	1.0	1.2
	6	1.6	1.0	0.8	0.7	0.6	0.4	0.4	0.3	0.4	0.4	0.5	0.6	0.8	1.0
	7	1.3	0.9	0.8	0.6	0.4	0.3	0.2	0.2	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.8
	8	1.2	0.9	0.7	0.5	0.4	0.2	0.1	0.1	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.7
	9	1.1	0.9	0.7	0.5	0.3	0.2	0.1	0.1	0.1	0.1	0.2	0.3	0.5	0.6
	10	1.1	0.9	0.7	0.6	0.4	0.2	0.1	0.1	0.1	0.1	0.2	0.3	0.5	0.6
	11	1.2	1.0	0.8	0.6	0.4	0.3	0.2	0.1	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.7
	12	1.3	1.1	0.9	0.7	0.5	0.4	0.3	0.2	0.2	0.3	0.3	0.5	0.6	0.8
	13	1.4	1.2	1.1	0.8	0.6	0.5	0.4	0.3	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.9
	14	1.6	1.4	1.2	1.0	0.8	0.6	0.5	0.5	0.5	0.5	0.6	0.7	0.8	1.0
	15	1.8	1.6	1.4	1.2	1.0	0.8	0.7	0.6	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0	1.2

③ ポリマー光導波路の Δ を 0.1 ~ 2.0% で変化させ、①、②の処理を繰り返し行う。

④ ポリマー光導波路の異なる屈折率分布に対して①~③の処理を行う。

⑤ SiO_x 光導波路とポリマー光導波路の接続損失に対して、①~④の処理を行う。

例として、Table 5-19 に、25 °C と 150 °C の $\Delta = 0.4\%$ の時の SI 型ポリマー光導波路と SiO_x 光導波路の接続損失を合計した結果を示す。

Table 5-19 SI 型ポリマー光導波路($\Delta = 0.4\%$)と SiO_x 光導波路の接続損失
(25 °C, 150 °C での合計値)

$\Delta = 0.4\%$		Core width (μm)													
		2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Core height (μm)	2	277.9	10.9	9.1	8.2	7.8	7.7	7.9	8.2	9.1	8.8	9.2	9.6	11.0	10.3
	3	10.9	7.6	6.2	5.8	5.8	6.0	6.4	6.8	7.3	7.7	8.2	8.6	9.0	9.4
	4	9.0	6.2	5.2	5.1	5.3	5.7	6.1	6.6	7.1	7.6	8.1	8.5	9.0	9.4
	5	8.1	5.7	5.1	5.1	5.4	5.8	6.3	6.8	7.3	7.8	8.3	8.8	9.2	9.7
	6	7.7	5.8	5.3	5.4	5.8	6.2	6.7	7.2	7.7	8.3	8.7	9.2	9.7	10.1
	7	7.7	6.0	5.7	5.9	6.2	6.7	7.2	7.7	8.2	8.7	9.2	9.7	10.2	10.6
	8	7.8	6.4	6.1	6.3	6.7	7.2	7.7	8.2	8.8	9.3	9.8	10.2	10.7	11.1
	9	8.1	6.8	6.6	6.8	7.2	7.7	8.2	8.8	9.3	9.8	10.3	10.8	11.2	11.7
	10	8.4	7.3	7.1	7.3	7.7	8.2	8.8	9.3	9.8	10.3	10.8	11.3	11.8	12.2
	11	8.8	7.7	7.6	7.8	8.2	8.7	9.3	9.8	10.3	10.8	11.3	11.8	12.3	12.7
	12	9.2	8.1	8.1	8.3	8.7	9.2	9.8	10.3	10.8	11.3	11.8	12.3	12.8	13.2
	13	9.5	8.6	8.5	8.8	9.2	9.7	10.2	10.8	11.3	11.8	12.3	12.8	13.3	13.7
	14	9.9	9.0	9.0	9.2	9.7	10.2	10.7	11.2	11.8	12.3	12.8	13.3	13.7	14.2
	15	10.3	9.4	9.4	9.7	10.1	10.6	11.1	11.7	12.2	12.7	13.2	13.7	14.2	14.6

ここまでで得られた Table 5-18, ならびに Table 5-19 のうち, 25 °C, 150 °C での合計接続損失を最小とするコア設計(コア幅, コア厚み)が, 室温および高温環境下で損失を最も抑制可能な SI 型ポリマー光導波路の設計であると考えられる.

つづいて, Table 5-18, Table 5-19 ではコア高さおよびコア幅を自由に変化させて合計接続損失を示している一方で, 前提条件で定めた通り, ポリマー光導波路は接続対象に合わせてコア幅を自由に変更できるが, コア高さは一義的に決定される. そこで Table 5-18, Table 5-19 の各行に着目し, あるコア高さに対して最低合計接続損失を示すコア幅と, その時の損失を抽出した. 例として $\Delta=0.4\%$ の時の SI 型ポリマー光導波路の, SMF ならびに SiO_x 光導波路との 25 °C, 150 °C における接続損失の合計値が, ポリマー光導波路の各コア高さに対して最小となる結果を, その時のポリマー光導波路コア幅とともに Table 5-20 にまとめた.

Table 5-20 SI 型ポリマー光導波路($\Delta = 0.4\%$)と SMF, SiO_x 光導波路の最低合計接続損失
(25 °C, 150 °C の合計)とその時のポリマー光導波路コア幅

$\Delta = 0.4\%$		SMF		SiO_x waveguide	
		Total loss (dB)	Core width (μm)	Total loss (dB)	Core width (μm)
Core height (μm)	2	1.1	10	7.7	7
	3	0.88	8	5.8	5
	4	0.71	9	5.1	5
	5	0.52	9	5.1	4
	6	0.34	9	5.3	4
	7	0.20	9	5.7	4
	8	0.10	9	6.1	4
	9	0.06	9	6.6	4
	10	0.08	9	7.1	4
	11	0.13	9	7.6	4
	12	0.22	9	8.1	4
	13	0.33	9	8.5	4
	14	0.48	10	9.0	4
	15	0.63	10	9.4	4

Table 5-20 にて、ポリマー光導波路と SMF 間の 25 °C, 150 °C 合計接続損失に着目すると、ポリマー光導波路のコア高さ 9 μm 時に最低合計接続損失を取っていることがわかる。これは接続対象である SMF の構造と類似しているためであると考えられ、実際に SMF の Δ は 0.4%かつコア径は 8.2 μm である(Fig. 5-1 参照)。一方で、SiO_x 光導波路との合計接続損失ではコア高さ 5 μm の時に最低合計接続損失 5.1 dB を示している。これは既に Fig. 4-16 で示している通り、コアサイズ 5 μm 近傍でポリマー光導波路が示す MFD は極小となり、接続対象である SiO_x 光導波路の小さいスポットサイズとのマッチングが高いためである。また、SMF ならびに SiO_x 光導波路との合計接続損失が最低を示すポリマー光導波路のコア設計は、Table 5-20 より[SMF : コア幅 9 μm コア高さ 9 μm SiO_x 光導波路 : コア幅 4 μm コア高さ 5 μm]であり、コア幅がコア高さとおおむね一致していることがわかる。つまり低接続損失を示す際のポリマー光導波路のコアが正方形に近い形状であることを示しているが、これは接続対象である SMF および SiO_x 光導波路がいずれも対称の光強度分布を有していることに起因する。

さて、前提条件でポリマー光導波路のコア高さは導光方向に対して一定という制限を設けている。したがって、Table 5-20 内の SMF ならびに SiO_x 光導波路との合計接続損失を最低とするコア設計同士[SMF : コア幅 9 μm コア高さ 9 μm SiO_x 光導波路 : コア幅 4 μm コア高さ 5 μm]を両立させることはできない。そこで、ポリマー光導波路のコア高さを一つの値に決定したうえで、SMF および SiO_x 光導波路との合計接続損失を算出した結果を Fig. 5-16 にまとめた。

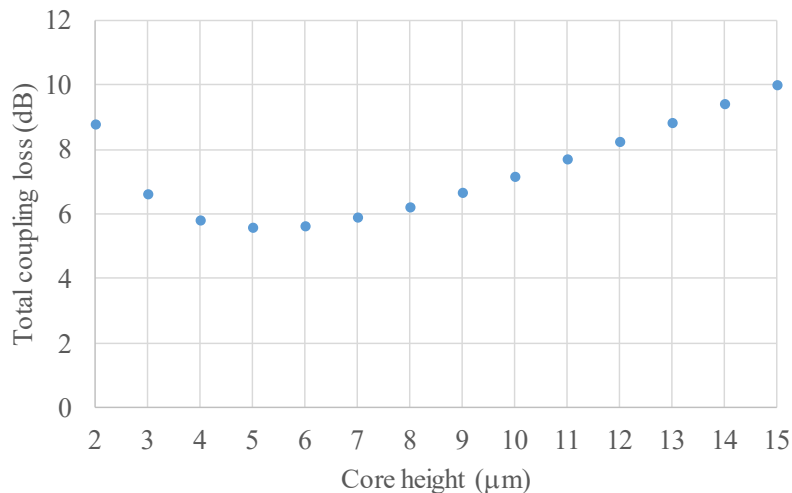


Fig. 5-16 SI 型ポリマー光導波路($\Delta = 0.4\%$)両端での最低合計接続損失
(25 °C, 150 °C の合計)

Figure 5-16 より、温度変化を考慮した SMF と SiO_x 光導波路間に挿入したポリマー光導波路両端の接続損失が最低となる値は、 $\Delta = 0.4\%$ の SI 型ポリマー光導波路では 5.6 dB である

ことが判明した. この 5.6 dB という値は実際に生じる接続損失ではなく, 25 °C と 150 °C 環境下でそれぞれ生じる接続損失の合計値であり, あくまでもある温度帯で接続損失が平均的なふるまいをするコア設計を抽出するための値にすぎない. Fig. 5-16 では, コア高さ 5 μm のときに最低合計接続損失を示していることから, $\Delta = 0.4\%$ の時の SI 型ポリマー光導波路に対しては, このコア高さ 5 μm が温度依存性を考慮した最適コア設計であるといえる.

このようにして異なる Δ , ならびに屈折率分布に対して, 温度依存性を考慮した最適なコア幅, コア高さを抽出した結果を Table 5-21 にまとめた.

Table 5-21 より, 光閉じ込め力が十分でない $\Delta = 0.1, 0.2\%$ を除き, 25 °C と 150 °C の合計接続損失を最小にするポリマー光導波路のコア高さは 5~6 μm 程度となっており, SMF と SiO_x 光導波路のコアサイズの中間の値を取っていることが分かった. つまり, 光リンクへのポリマー光導波路を挿入した場合, 温度依存性を考慮した光導波路両端での接続損失を最低にするためには, いずれかの接続対象に対して最適化するのではなく, 各接続損失を平均化するようなコア高さが必要ということが判明した. 一方で, ポリマー光導波路のコア幅については, ポリマー光導波路の各端面で接続対象である SMF, あるいは SiO_x 光導波路に近い値を示しており, 光強度分布の調整をポリマー光導波路のコア幅で行うことで, 接続対象とのマッチングを確保していることがわかる.

Table 5-21 SI 型ポリマー光導波路と SMF および SiO_x 光導波路の最低合計接続損失 (25 °C, 150 °C の合計) とその時のコア設計

Δ (%)	Total coupling loss (dB)		Polymer waveguide core design		
	SMF	SiO _x waveguide	Core width (μm) [SMF]	Core width (μm) [SiO _x waveguide]	Core height (μm)
0.10	1.4	12.6	11	7	9
0.20	0.4	8.7	9	6	7
0.30	0.3	6.5	9	5	6
0.40	0.5	5.1	9	4	5
0.50	0.7	4.2	9	4	5
0.60	0.8	3.5	10	4	5
0.70	0.7	3.1	10	3	5
0.80	1.1	2.7	10	3	5
0.90	1.2	2.3	10	3	5
1.0	1.3	2.1	11	3	5
1.1	1.4	1.9	11	3	5
1.2	1.5	1.8	11	3	5
1.3	1.6	1.6	11	3	5
1.4	1.7	1.5	11	3	5
1.5	1.7	1.4	11	3	5
1.6	1.8	1.3	11	3	5
1.7	1.9	1.3	11	3	5
1.8	1.9	1.2	11	3	5
1.9	1.4	1.7	11	3	6
2.0	1.4	1.7	11	3	6

また, Table 5-21 より, SMF と SiO_x 光導波路の 25 °C と 150 °C の合計接続損失をさらに合計した値, つまり Table 5-21 の 2 列目と 3 列目の和(以後, 本論文にてこの和を X と定義

する), を最小にする設計は $\Delta = 2.0\%$, SMF 側のコア幅 $11\ \mu\text{m}$, SiO_x 光導波路側のコア幅 $3\ \mu\text{m}$, コア高さ $6\ \mu\text{m}$ の時であることがわかる. このようにして得られたポリマー光導波路のコア設計は, 温度依存性を考慮したポリマー光導波路両端での接続損失を最小にする, SI 型ポリマー光導波路での最適コア設計といえる. この最適コア設計では, ポリマー光導波路は $\Delta = 2.0\%$ と大きい値を示しており, これは Δ の高い SiO_x 光導波路に近い値であるといえる. このことから, 温度依存性を考慮した場合であっても, 第 4 章で既に議論した通り, SMF との接続損失と比較して SiO_x 光導波路との接続損失が大きく, 接続損失最適化のためには SiO_x 光導波路との接続損失低減が重視されることが判明した.

つづいて水平 GI 型ポリマー光導波路, ならびに矩形 GI 型ポリマー光導波路についても同様の処理を実行することで, ポリマー光導波路と SMF および SiO_x 光導波路の最低合計接続損失(25°C , 150°C の合計)を求めた. SI 型ポリマー光導波路の結果と合わせ, 異なる Δ に対するポリマー光導波路と SMF および SiO_x 光導波路の最低合計接続損失(25°C , 150°C の合計)結果から得られる指標 X を Fig. 5-17 にまとめた. なお, 水平 GI 型ポリマー光導波路, ならびに矩形 GI 型ポリマー光導波路のコア設計詳細については Appendix に掲載した.

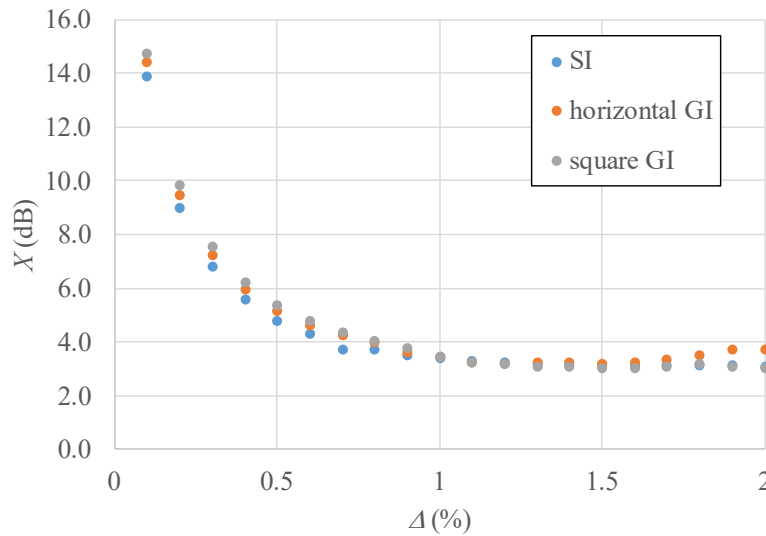


Fig. 5-17 異なる屈折率分布のポリマー光導波路の Δ と X の関係

Figure 5-17 より, 屈折率分布によらず, 高 Δ 領域で X が低い値をとっていることがわかる. これはすでに述べた通り, SiO_x 光導波路との接続損失低減による損失改善効果が大きいためである. 一方, 水平 GI 型ポリマー光導波路は $\Delta = 1.2\%$, 矩形 GI 型ポリマー光導波路では $\Delta = 1.6\%$ で Δ が最小となっている. このように, 屈折率分布の違いによって, ポリマー温度依存性を考慮した際の最適なコア設計は大きく異なることが判明した.

5.5.2. [端面結合]実環境温度を想定した、ポリマー光導波路の最適構造

Figure 5-17 より, X が最も小さい設計が, 想定した光リンクにポリマー光導波路を適用した際の最適構造であるといえる. このようにして抽出した, 異なる屈折率分布のポリマー光導波路の最適構造とその時の室温および 150 °C 環境下で生じる接続損失を Fig. 5-18 にまとめた.

ポリマー光導波路 屈折率分布	合計接続損失		Δ	コア高さ	Side 1	Side 2
	25 °C	150 °C			コア幅	コア幅
SI (photo lithography)		1.6 dB 1.5 dB	2.0 %	6 μm	3 μm	11 μm
Horizontal GI (photo address)		1.2 dB 1.9 dB	1.2 %	3 μm	5 μm	2 μm
Square GI (Imprint)		1.1 dB 1.9 dB	1.6 %	3 μm	5 μm	2 μm

Fig. 5-18 温度依存性を考慮して得られた最適コア設計とポリマー光導波路両端の合計接続損失

Figure 5-18 は 25 °C ならびに 150 °C で, ポリマー光導波路と SMF および SiO_x 光導波路間の接続損失が平均的な振る舞いを示すコア設計を算出しており, 25 °C で最適化している Fig. 5-15 と比較すると, 25 °C での接続損失はむしろ増大していることがわかる. 一方で, 150 °C への温度増大に伴う接続損失変動は, Fig. 5-18 では抑制できており, いずれの屈折率分布であっても, ポリマー光導波路両端での合計接続損失は 150 °C で 2.0 dB 以下と小さい. この値は第 4 章で設定した目標接続損失値である 3.1 dB に対しても十分なマージンを示していることがわかる.

以上の結果より, 適切なコア設計を行うことで, ポリマー光導波路を光リンクに挿入することでの接続損失面での優位性は, 温度依存性を考慮しても十分存在するといえる.

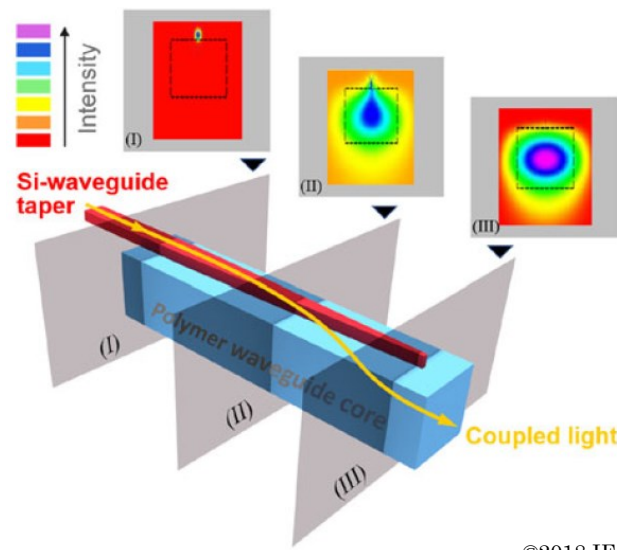
5.6. [アディアバティック結合]実環境温度を想定した、ポリマー光導波路最適構造の提案

無波長依存性[17]かつ広い接続トレランス[18]性を示しつつ, スポットサイズ変換を行いながら端面結合可能なアディアバティック結合は, CPO を実現する接続構造として多くの優位性を有しており, 期待を集めている. アディアバティック結合には Si 光導波路コアと結合先の導波路コア間の距離を近接させる必要があることから, Si 光導波路上に直接形成可能なポリマー光導波路が注目を集めており, 実際, ポリマー光導波路の光リンク適用例として, Si 光導波路とのアディアバティック結合用素子としての活用が数多く報告されている[17, 19]. 一方で, 結合特性に影響を及ぼし得るポリマー光導波路の温度特性を考慮に入れた報告は少なく, アディアバティック結合素子としてのポリマー光導波路の実環境温度での光学特性変動が懸念される.

そこで、CPO へのポリマー光導波路適用を想定し、まずはシングルモードポリマー光導波路の Si 光導波路からのアディアバティック結合方式での接続損失を計算し、その後ポリマー光導波路の温度依存性を考慮することで、接続損失の温度依存性を理論予測した。

5.6.1. アディアバティック結合

アディアバティック結合は異なる導波特性を持つ 2 つの導波路間を、断熱的に光遷移させることで光結合を実現する方式である。アディアバティック結合による Si 光導波路とポリマー光導波路間の光遷移の様子を Fig. 5-19 に示す[20]。



©2018 IEEE

Fig. 5-19 アディアバティック結合による光遷移の様子[20]

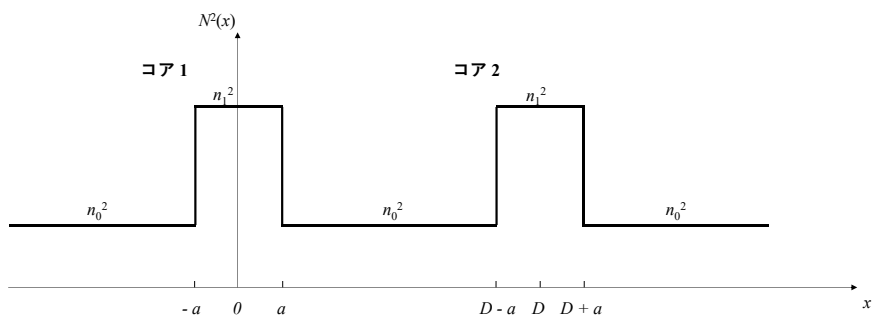


Fig. 5-20 スラブ光導波路の方向性結合器モデル[21]

アディアバティック結合はモード結合理論に則り生じることから、ここでは簡単なモデルを用いてモード結合による光遷移の挙動を表すモード結合方程式を示し、それをもとにモード結合の一般的な性質を説明する[21]。Fig. 5-20 のように隣接した 2 つのスラブ型光導波路のコア間で生じる光結合について考える。なお、この 2 つのコアはいずれもシングルモ

ード条件を満たすステップ型の屈折率分布であると仮定する．2つの光導波路コア間の距離が十分に離れている場合，両者が形成する導波モードは互いに干渉せず，それぞれ固有のモードを形成する．一方，コア間の距離が近接した場合，2つのコアが形成する電磁界分布によって，1つの結合した電磁界分布が形成されているとみなせる．このようなモードをスーパーモードと呼ぶ[22]．このとき，このスーパーモードが示す電磁界強度分布も当然マクスウェルの方程式を満たす必要があり，境界条件を導入することで，対称スラブ導波路であるコア1からコア2へのモード結合定数 η は式(5-10)で求めることができる．なお， $(p, q) = (1, 2)$ あるいは $(2, 1)$ である．

$$\eta = \frac{\omega \epsilon_0 \int_{-\infty}^{\infty} (N^2 - N_2^2) \mathbf{E}_1^* \times \mathbf{E}_2 dx}{\int_{-\infty}^{\infty} \mathbf{u}_z (\mathbf{E}_1^* \times \mathbf{H}_1 + \mathbf{E}_1 \times \mathbf{H}_1^*) dx} \quad (5-10)$$

なお， N は結合した光導波路コア全体での屈折率分布， N_p はコア p の屈折率分布， $\mathbf{u}_z$ は単位法線ベクトル， ω は角周波数， ϵ_0 は真空中の誘電率， $\mathbf{E}_p$ ， $\mathbf{H}_p$ はコア p の結合前の固有モード， $*$ は複素共役を示す．ここで，TEモードについて着目して計算すると，Fig. 5-20のような座標系において，式(5-11)が得られる．なお， D はコアピッチ(コア中心間距離)を， u ， w は固有方程式を満たす解を示す．

$$\eta = \frac{k^2}{\beta} (n_1^2 - n_0^2) \frac{u^2 w^2}{(1+w)v^4} \exp \left[-\frac{w}{a} (D - 2a) \right] \quad (5-11)$$

ここで， $\beta \doteq kn_1$ とし， $(n_1^2 - n_0^2) = 2n_1^2 \Delta$ を用いると，結合定数は以下の式(5-12)で表すことができる．

$$\eta = \frac{\sqrt{2\Delta}}{a} \frac{u^2 w^2}{(1+w)v^3} \exp \left[-\frac{w}{a} (D - 2a) \right] \quad (5-12)$$

式(5-12)より，光導波路コア間の結合定数は比屈折率差，コアサイズ，波長，さらにはコア間ピッチに依存することがわかる．

異なる光導波路コア間での光遷移は，本質的には両者の持つ伝搬定数の類似性から生じる．しかしながら，本章で議論するSi光導波路コアとポリマー光導波路コア間では両者の持つ伝搬定数が大きく異なっており，コア間距離が十分に近接した場合であっても光の遷移はほとんど生じない．そこで，Si光導波路コアにテーパ構造を適用することで，導光方向に対して連続的に伝搬定数を変化させ，また，同時に伝搬光のエバネッセント領域を拡大することで，光遷移を実現させる手法がとられている．アディアバティック結合の為の導波路

構造模式図を Fig. 5-21 に示す.

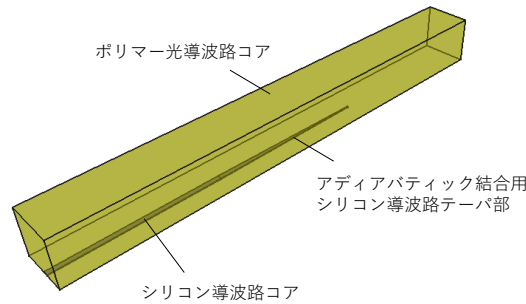


Fig. 5-21 アディアバティック結合用導波路構造

Figure 5-21 のようなテーパ構造の導入によって Si 光導波路とポリマー光導波路間での伝搬定数を一致させ, アディアバティック結合による高効率な光遷移を実現しているが, 式(5-12)で示したように, モード結合理論によって支配されるアディアバティック結合では, 結合効率に影響を与えるパラメータはこれまで議論してきた端面結合と比較して多く, すべてのパラメータを網羅的に評価することは難しい. そこで本章では, Si 光導波路の構造を固定したうえで, ポリマー光導波路の屈折率分布, コアサイズ, Δ を変化させることで最適構造を探索しつつ, 温度依存性の評価を行うこととした.

5.6.2. アディアバティック結合のシミュレーションモデル設定

アディアバティック結合に用いる Si 光導波路の構造として, 屈折率, コア厚み, コア幅, テーパ長を決定する必要がある. このうち, コア厚み, コア幅については, 文献[23, 24]を参考に決定し, Fig. 5-22 に示した. また, 屈折率はコア(Si, $n_{1310}=3.503$), クラッド(SiO_2 , $n_{1310}=1.447$)とした.

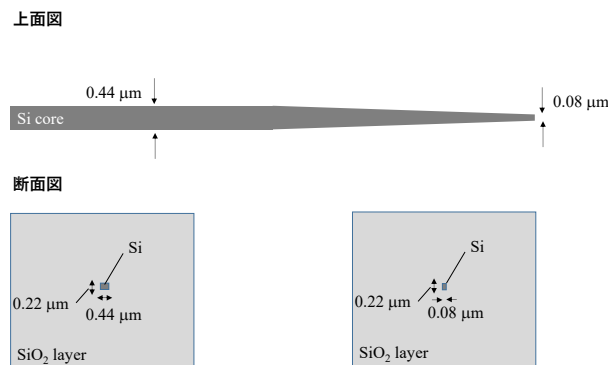


Fig. 5-22 シミュレーション用 Si 光導波路模式図

上記パラメータを適用して, シミュレーションソフト FIMMWAVE で Si 光導波路の伝搬定数の計算を行う. Si 光導波路のコア幅を $0.08 \mu\text{m} \sim 0.44 \mu\text{m}$ の間で連続的に変化させたと

きの伝搬定数計算結果を Fig. 5-23 に、コア幅 0.44 μm 、0.08 μm における基底モード TE 成分の光強度分布を MFD とともに Fig. 5-24 に示す。なお、第 2 章で既に述べた通り、Si 光導波路からの出射光強度分布については MFD を単純に定義することができないが、ここでは便宜上コア内最大強度の $1/e^2$ の値をとるコア幅、コア高さを MFD_hor., MFD_ver. として定義した。

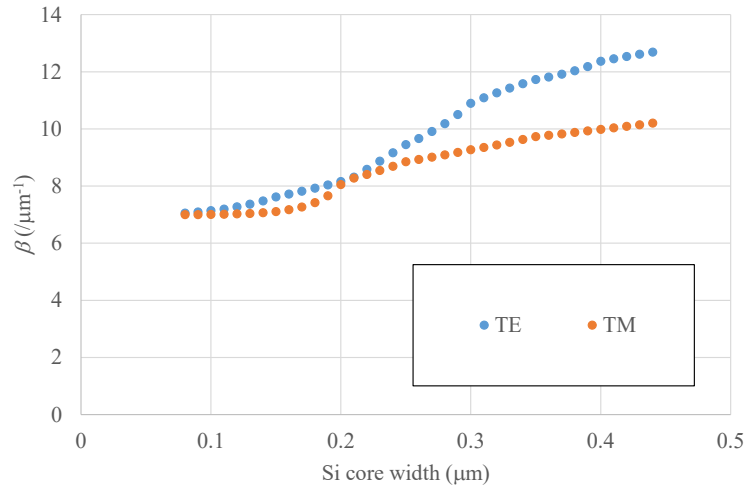


Fig. 5-23 Si 光導波路コア幅と伝搬定数の関係

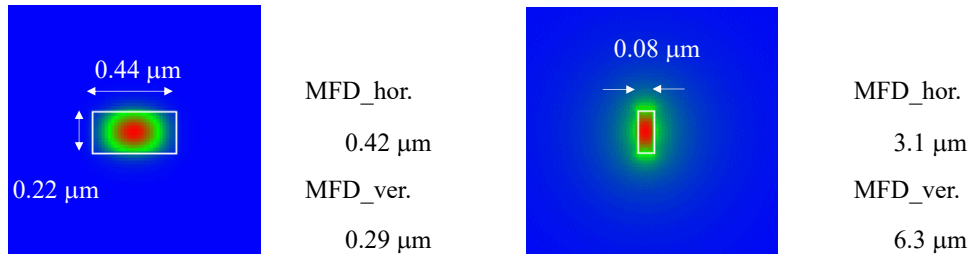


Fig. 5-24 テーパー前後での Si 光導波路光強度分布と MFD

Figure 5-24 の光強度分布結果より、コア幅狭小化に伴い、光強度分布が拡大している様子が見られており、0.08 μm といった極めて狭いコア幅領域では、Si 光導波路のような高い Δ を有する導波構造であってもエバネッセント領域の拡大が生じることが確認できた。また、Fig. 5-23 の伝搬定数計算結果より、コア幅を変化させることで、伝搬定数が TE : 7.3 μm^{-1} ~ 13 μm^{-1} TM : 7.3 μm^{-1} ~ 10 μm^{-1} の範囲で制御可能なことが判明した。既に述べたように、アディバティブ結合を発現させるためには、Si 光導波路とポリマー光導波路の伝搬定数を整合させる必要がある。そこで、ポリマー光導波路のモデルとして Fig. 5-25 に示した構造を定義し、ポリマー光導波路の最低次モードが示す伝搬定数を異なるコアサイズに対して計算した結果を Fig. 5-26 に示す。

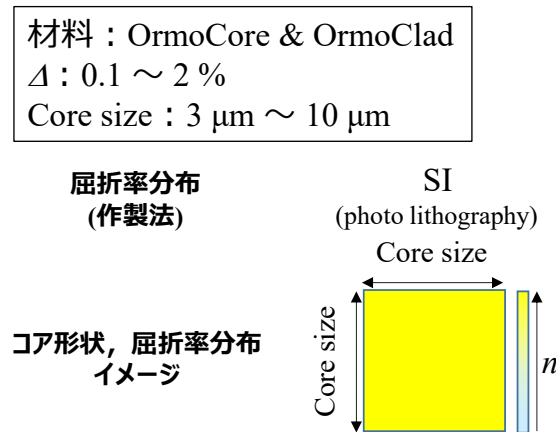


Fig. 5-25 アディアバティック結合用ポリマー光導波路モデル

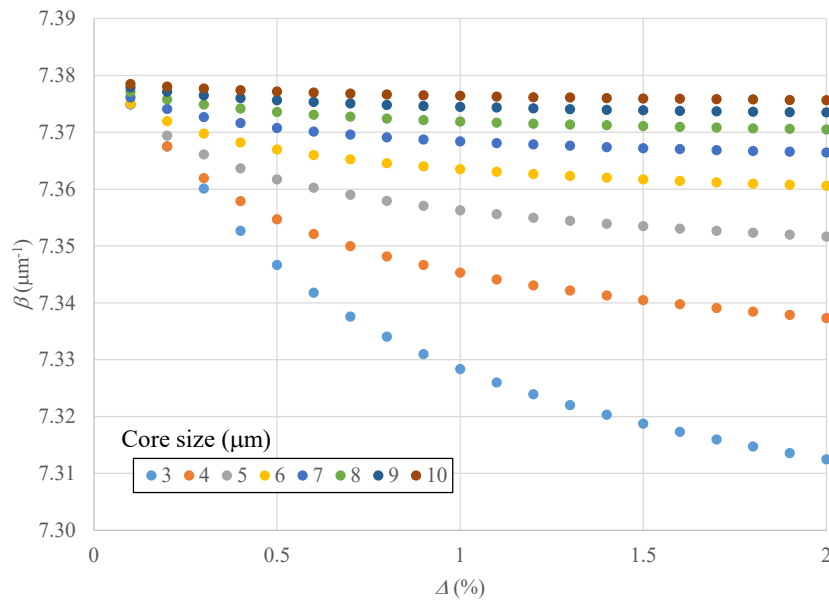


Fig. 5-26 ポリマー光導波路のコアサイズ, Δ と伝搬定数の関係

Figure 5-26 より, コアサイズを変化させることで, ポリマー光導波路の最低次モードが示す伝搬定数は $7.31 \mu\text{m}^{-1}$ ~ $7.38 \mu\text{m}^{-1}$ であることが判明した. Fig. 5-23 で計算した Si 光導波路の伝搬定数範囲と重なる部分が存在することから, Si 光導波路とポリマー光導波路を近接させることで, 両者の間でアディアバティック結合が生じることがわかる. そこで, Si 光導波路のコア幅とその時に Si 光導波路コアが示す伝搬定数を, ポリマー光導波路のコアがある場合とない場合で比較する. シミュレーションに用いた断面イメージを Fig. 5-27 に, 得られた伝搬定数の計算結果を Fig. 5-28 に示す. Fig. 5-27 では, Si 光導波路コア上のクラッドとして SiO_2 層を $0.2 \mu\text{m}$ としているが, 埋め込み型の Si 光導波路では, 通常, コア上に $1.5 \sim 2.0 \mu\text{m}$ の上部クラッドが存在する[25]. 本章で議論する Fig. 5-27 に示した計算モデル

では，アディアバティック結合効率の確保を目的とし，上部クラッドをエッチングして $0.2\ \mu\text{m}$ まで薄くした系として仮定した．なお，この時のポリマー光導波路コアは $\Delta=1\%$ ，コア幅，コア高さはともに $3\ \mu\text{m}$ とし，最低次モードの伝搬定数は $7.3\ \mu\text{m}^{-1}$ である．

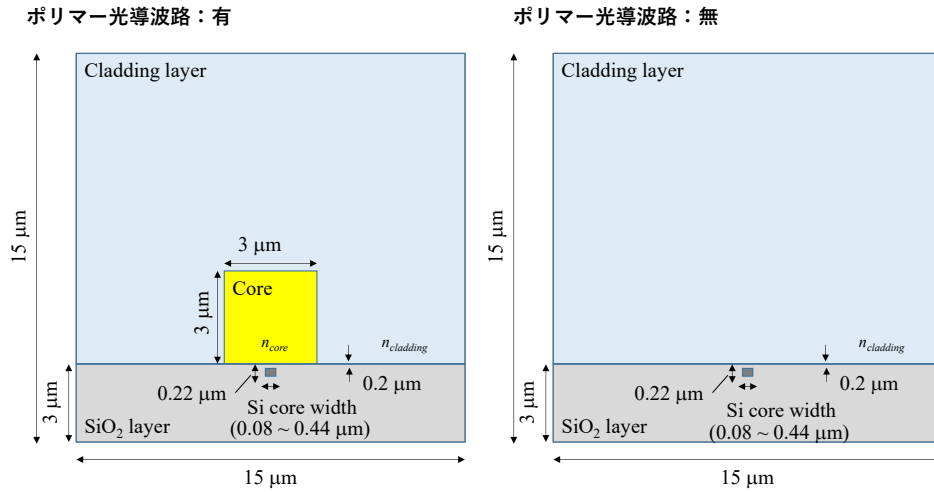


Fig. 5-27 伝搬定数計算用断面イメージ

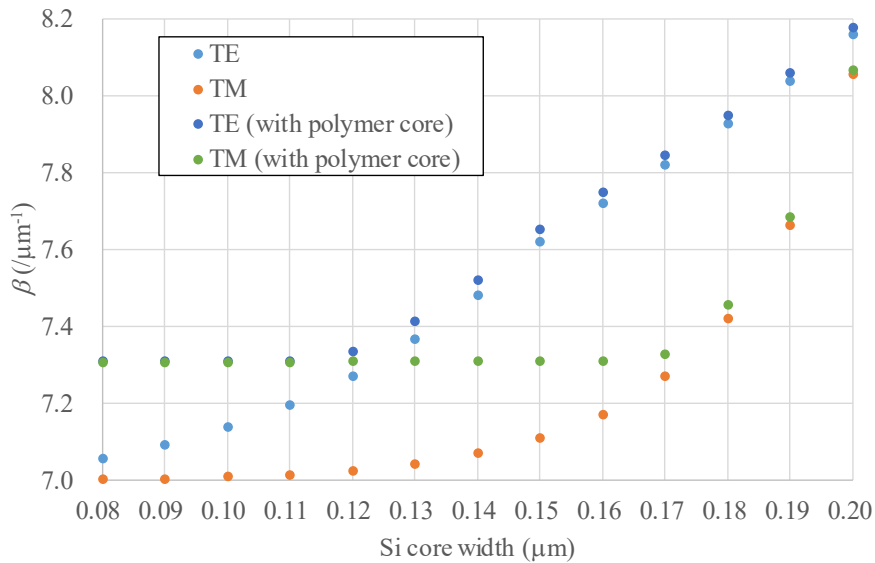


Fig. 5-28 Si 光導波路コア幅と伝搬定数の関係

Figure 5-28 より，コア幅 $0.12\ \mu\text{m}$ 付近で Si 光導波路コアが示す伝搬定数が $7.3\ \mu\text{m}^{-1}$ となり，近接したポリマー光導波路のコアと一致しており，アディアバティック結合が発現する条件を満たしていることがわかる．つづいて，Fig. 5-29 に示した構造に対し，Si 光導波路側から光を入射した際の光伝搬の様子を計算した．

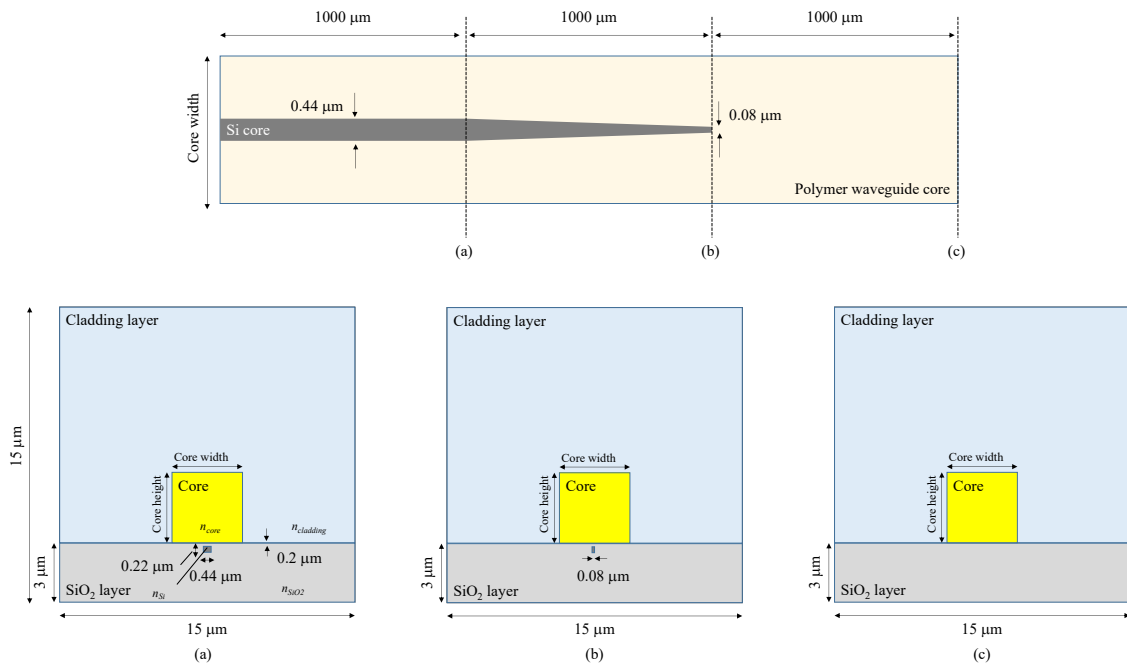


Fig. 5-29 アディアバティック結合モデルの上面模式図及び各座標での導波構造の断面模式図

Figure 5-29 に示した計算モデルに対し、Si 光導波路コア側から光を入射した時に、テーパ部(アディアバティック結合部)を側面から観測した際の光伝搬の様子を Fig. 5-30 に示す。なお、このときのポリマー光導波路設計は Fig. 5-27 と同様に $\Delta = 1\%$ 、コア幅、コア高さはともに $3\ \mu\text{m}$ とした。

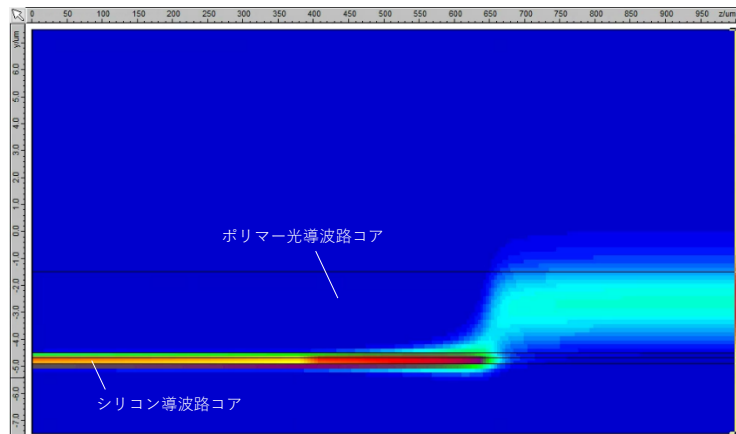


Fig. 5-30 Si 光導波路コアからポリマー光導波路へのアディアバティック結合による光遷移の様子

Figure 5-30 より、Si 光導波路からポリマー光導波路の間でアディアバティック結合によ

る光の遷移が見られていることが確認できた．ここで，アディアバティック結合効率を E_{adi} とすると， E_{adi} は Si 光導波路への入射光強度 P_{in} とポリマー光導波路からの出射光強度 P_{out} を用いて，式(5-13)のように定義できる．

$$E_{\text{adi}} = -10 \log_{10}(P_{\text{out}}/P_{\text{in}}) \quad (5-13)$$

テーパ開始位置からの距離 x に対して，アディアバティック結合効率 E_{adi} をプロットした結果を Fig. 5-31 に示す．

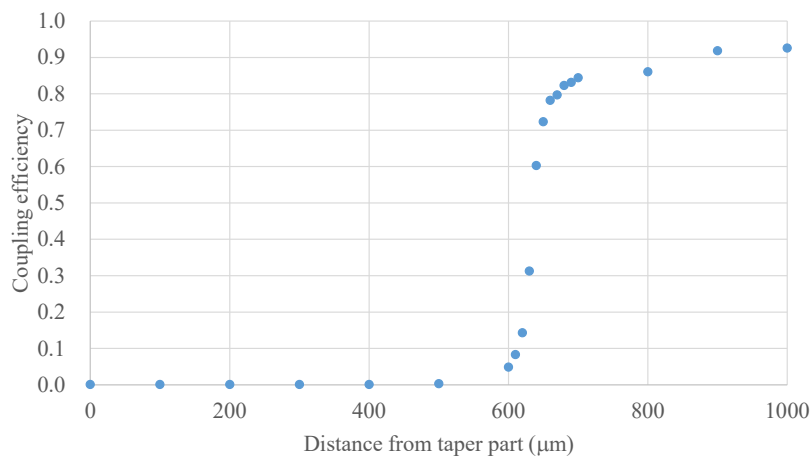


Fig. 5-31 テーパ開始位置からの距離とポリマー光導波路への結合効率の関係

Figure 5-31 より，アディアバティック結合による光遷移は，テーパ開始位置から 600 μm ～650 μm の間で急速に進行しており，その後は結合効率が安定していることがわかる．本来，伝搬定数が一致した近接した導波路間での結合では，方向性結合器[26]で見られるような光遷移の振動が見られる．しかし本章で議論するアディアバティック結合では，Si 光導波路コアの持つ伝搬定数が，テーパ形状によって連続的に変化しており，ポリマー光導波路の持つ伝搬定数と一致するポイントが一点であることから，光遷移の振動は生じず，一方向のみの結合となる．Si 光導波路のテーパ形状が緩やかであれば，両導波路間での結合長が確保できることになり，アディアバティック結合効率は安定し，かつ向上する．

ポリマー光導波路のコア構造最適化を検討する上で，Si 光導波路のテーパ形状については一義的に決定する必要がある．そこで，本論文では先行研究[17, 27, 28, 29]を参考に，十分かつ安定的な結合効率を得られる設計としてテーパ長を 1000 μm で固定し，以降の検討を行うこととした．

以上の検討より，Si 光導波路の伝搬定数が取りうる範囲内で，ポリマー光導波路の伝搬定数が一致するようにコア構造を設定することで，両導波路間でアディアバティック結合が生じることが判明した．

5.6.3. 異なる屈折率分布を有するポリマー光導波路のアディアバティック結合損失

ここでは，異なる屈折率分布を有するポリマー光導波路のコアサイズ，および Δ を変化させたとき，Si 光導波路との間で生じるアディアバティック結合効率にどのような影響を及ぼすかを検討する．計算に用いるポリマー光導波路のパラメータを Fig. 5-32 に示した．

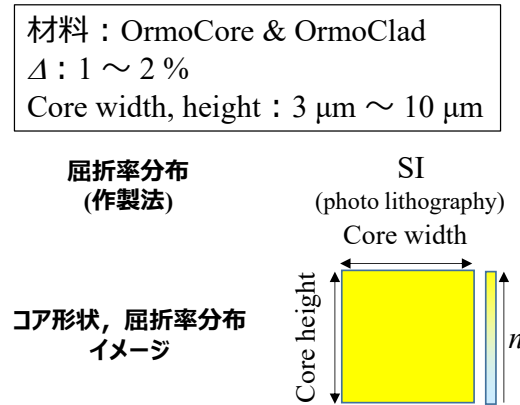


Fig. 5-32 アディアバティック結合用ポリマー光導波路パラメータ

まず，ポリマー光導波路の屈折率分布，および Δ を固定し，コア幅，コア高さを変更した時のアディアバティック結合損失効率を計算した．ここで，Si 光導波路コアの最低次 TE モードである TE_{11} モードに光を入射した．また，パラメータ設定によってはポリマー光導波路がマルチモードとなるが，その場合であってもポリマー光導波路の最低次モード(TE_{11} , TM_{11})への結合成分のみをアディアバティック結合として定義した．つまり，アディアバティック結合損失 L_{adi} は，Si 光導波路への入射光強度 P_{in} とポリマー光導波路からの出射光強度(TE_{11} : $P_{\text{out TE}}$ TM_{11} : $P_{\text{out TM}}$)，を用いて，式(5-14)で定義できる．

$$L_{\text{adi}} = -10 \log_{10} \left\{ \frac{(P_{\text{out TE}} + P_{\text{out TM}})}{P_{\text{in}}} \right\} \quad (5-14)$$

例として， $\Delta = 1\%$ の SI 型ポリマー光導波路と Si 光導波路間のアディアバティック結合損失を，異なるポリマー光導波路コア幅，コア高さに対して計算した結果を Table 5-22 にまとめた．

Table 5-22 異なるコア幅，コア高さを有する矩形 SI 型ポリマー光導波路と Si 光導波路間
のアディアバティック結合損失($\Delta = 1\%$)

$\Delta = 1.0 \%$		Core width (μm)							
Core height (μm)	3	3	4	5	6	7	8	9	10
	3	1.0	1.3	1.5	2.0	2.2	2.4	2.5	2.7
	4	2.1	2.5	3.1	3.7	4.0	4.3	4.7	5.1
	5	2.7	1.4	4.7	4.8	5.4	5.6	6.1	6.4
	6	0.7	0.5	0.8	7.1	7.5	7.5	7.6	7.8
	7	1.5	1.6	2.1	2.6	9.1	9.3	9.2	9.1
	8	2.4	2.7	3.1	3.6	3.4	10.3	10.4	9.9
	9	3.2	3.2	3.7	4.1	4.5	3.2	11.5	11.5
	10	3.9	4.1	4.3	4.7	5.1	5.0	4.1	9.5

(dB)

Table 5-22 の結果は，ポリマー光導波路コア内の TE_{11} および TM_{11} に結合した光量の和を結合光と定義しているが，実際の光リンクではいずれかの偏波に結合した光で光リンクを構成し，それ以外の光については損失として扱うことが多い[30]．近年では偏波ダイバーシティ技術の進展によって偏波変換を行う例[31]もあるが，新たな回路の導入や消費電力の増大に繋がる懸念がある．したがって偏波保持ファイバ等を利用して，光リンク全体で偏波を維持することが求められる[32]．そこで，本研究では偏波維持成分，つまり今回のシミュレーション系では，ポリマー光導波路の TE_{11} モードに結合した光成分のみを偏波維持成分としてみなし，それ以外を損失としてみなした．そこで，Table 5-22 のうち，ポリマー光導波路の TE_{11} モードに結合した損失を式(5-15)で定義し，Table 5-23 にまとめた．

$$L_{\text{adi}} = -10 \log_{10} \left(\frac{P_{\text{out TE}}}{P_{\text{in}}} \right) \quad (5-15)$$

Table 5-23 異なるコア幅，コア高さを有する矩形 SI 型ポリマー光導波路と Si 光導波路間
のアディアバティック結合損失 TE 成分 ($\Delta = 1\%$)

$\Delta = 1.0 \%$		Core width (μm)							
Core height (μm)	3	3	4	5	6	7	8	9	10
	3	1.1	1.4	1.7	2.0	2.2	2.4	2.5	2.7
	4	2.3	2.8	3.1	3.7	4.0	4.3	4.7	5.1
	5	3.8	4.4	4.7	5.0	5.4	5.6	6.1	6.4
	6	5.1	5.7	6.3	7.1	7.5	7.5	7.6	7.8
	7	6.7	7.5	8.1	8.5	9.1	9.3	9.2	9.1
	8	8.1	8.6	9.1	9.7	10.5	10.3	10.4	9.9
	9	9.2	9.2	9.8	10.4	11.2	11.1	11.5	11.5
	10	10.0	10.3	10.8	11.3	11.7	12.4	12.2	11.2

(dB)

Table 5-23 より，コア幅，コア高さ共に $3\ \mu\text{m}$ の時に，ポリマー光導波路 TE_{11} モードへのアディアバティック結合損失は最小となり，コアサイズが増大していくにつれて損失が大きくなることがわかる．これは式(5-12)により説明できる．また，コア幅と比較して，コア高さが変動した際の結合効率変化が大きい，これは Fig. 5-33 で示すように，コア高さの増大によって結合先のポリマー光導波路伝搬モード中心部と Si 光導波路コア間の距離が拡がり，光強度分布の重なり度合いが低下するためである．これは式(5-12)内の $(D-2a)$ 項が増大していることに相当し，結果としてアディアバティック結合損失が増大することになる．

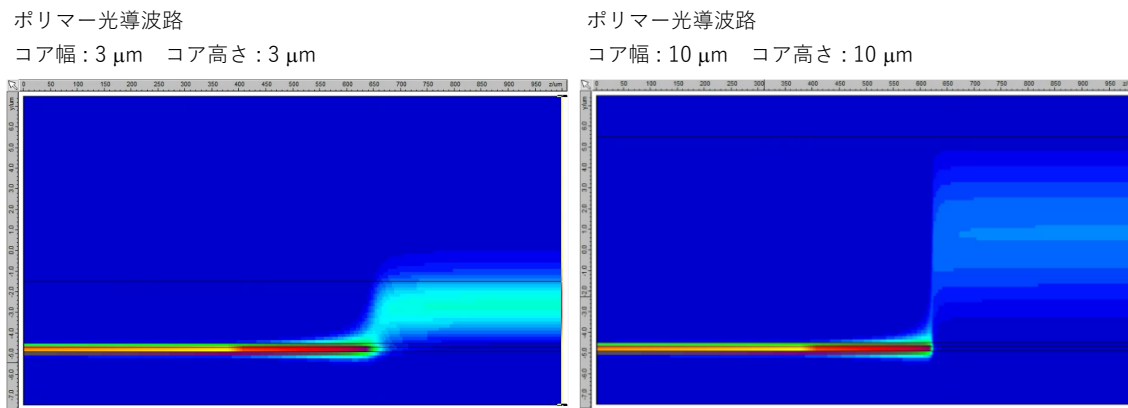


Fig. 5-33 ポリマー光導波路コアサイズの違いによるアディアバティック結合の様子比較

つづいて， $1\sim 2\%$ の Δ に対してコア幅，コア高さを変化させたときのポリマー光導波路の TE_{11} モードへのアディアバティック結合損失 $L_{\text{adi TE}}$ を計算し，各 Δ で結合損失が最小となる時の損失値とコア設計を抽出して Table 5-24 にまとめた．つまり，Table 5-24 は，各 Δ に対して，最適なコア設計を適用した時のアディアバティック結合損失を示している．

Table 5-24 SI 型ポリマー光導波路と Si 光導波路間のアディアバティック結合損失の最低値とその時のポリマー光導波路コア設計

Δ (%)	lowest loss (dB)	core width $\times$ core height (μm)
1.0	1.06	3×3
1.1	0.98	3×3
1.2	0.90	3×3
1.3	0.84	3×3
1.4	0.78	3×3
1.5	0.70	3×3
1.6	0.61	3×3
1.7	0.55	3×3
1.8	0.48	3×3
1.9	0.45	3×3
2.0	0.41	3×3

Table 5-24 より，ポリマー光導波路の Δ が増大するにつれ，アディアバティック結合損失が低減することがわかる．これは式(5-12)よりもわかるように， Δ の増大により遷移先のポリマー光導波路での伝搬モードの光閉じ込め効果が増大したためである．

つづいて，水平 GI 型ポリマー光導波路，ならびに矩形 GI 型ポリマー光導波路に対しても，Table 5-24 と同様に，1~2%の Δ に対してコア幅，コア高さを変化させたときのポリマー光導波路の TE₁₁ モードへのアディアバティック結合損失 $L_{\text{adi TE}}$ を計算し，各 Δ で結合損失が最小となる時の損失値を抽出し，SI 型ポリマー光導波路の結果とあわせて Fig. 5-34 にまとめた．なお，矩形 GI 型ポリマー光導波路では，コア内の屈折率勾配による実効屈折率低下に伴い， $\Delta=1.0\%$ ， 1.1% 時に小コアサイズ時に十分な光閉じ込めが得られずに計算結果が出力されないコア設計が存在した為，計算結果を除外した．また，水平 GI 型ポリマー光導波路，矩形 GI 型ポリマー光導波路の最適コア設計については Appendix に掲載した．

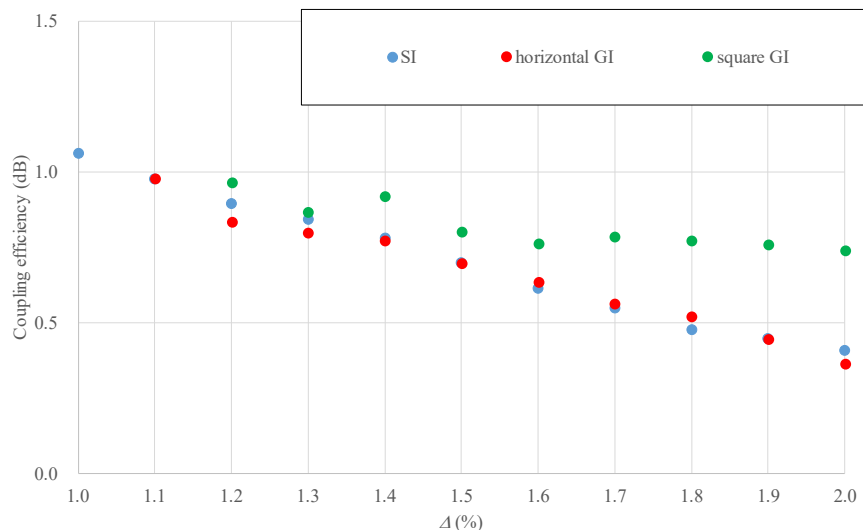


Fig. 5-34 ポリマー光導波路屈折率分布の違いによるアディアバティック結合損失の比較

Figure 5-34 より，SI 型ポリマー光導波路と水平 GI 型ポリマー光導波路は，最適コア設計時におおむね同じアディアバティック結合損失を示していることがわかる．これはアディアバティック結合損失に影響を及ぼす垂直方向の屈折率分布が，SI 型と水平 GI 型ともに同様であるためと考えられる．また，水平 GI 型のコアでは水平方向に屈折率勾配が形成されているが，アディアバティック結合に影響を与える Si 光導波路上では，コア内屈折率が最大付近であることも一因である．

一方で，矩形 GI 型ポリマー光導波路は他の屈折率分布と比較して，わずかながらも大きな結合損失を示していることがわかる．これは垂直方向に屈折率分布が形成されていることで，導波モードが形成する電磁界強度分布がコア中心付近に閉じ込められており，Si 光導波路コアとの光学的な距離が他の屈折率分布と比較して広がってしまったためと考えら

れる．上記推論を裏付けるべく，コア幅，コア厚みともに $3\ \mu\text{m}$ かつ $\Delta=2\%$ の異なる屈折率分布を持つポリマー光導波路に対して，出射光強度分布を計算した結果を Fig. 5-35 に示す．なお，Fig. 5-35 では Si 光導波路コアを計算対象に含めていない．

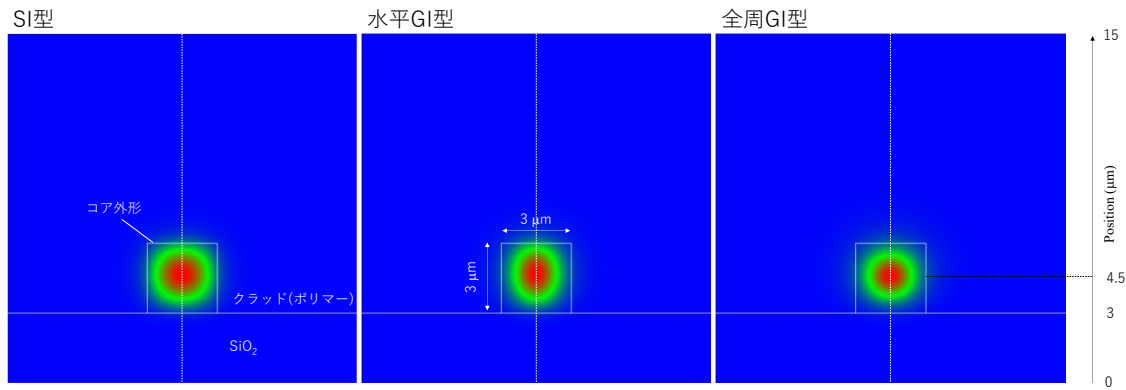


Fig. 5-35 異なる屈折率分布を有するポリマー光導波路コアが示す光強度分布の比較

Figure 5-35 より，屈折率勾配の存在によって光強度分布がポリマー光導波路のコア中心に閉じ込められており，特に矩形 GI 型ポリマー光導波路ではコア厚み方向に対しても集光されている結果，下部に存在する Si 光導波路コアとの光学的距離が離れていることがわかる．ここで，Fig. 5-35 内に示したように垂直方向に座標を取り，光導波路中心(画像内垂直白点線部)の光強度をプロットした結果を Fig. 5-36 に示す．光遷移効率に影響を与える，光導波路間の光強度分布の重なりを比較すべく，コア幅 $0.08\ \mu\text{m}$ 時の Si 光導波路コアの光強度分布も併せて示した．なお，Fig. 5-36 に示した Si 光導波路ならびにポリマー光導波路コアの光強度分布は，それぞれ他方のコアが存在しない状況での，独立したコアが示す光強度分布である．また，Si 光導波路コアが示す光強度分布は極めて小さく，プロットでは評価が難しいため，便宜上計算で得られたプロットを Excel 上で繋いだ線で描画している．

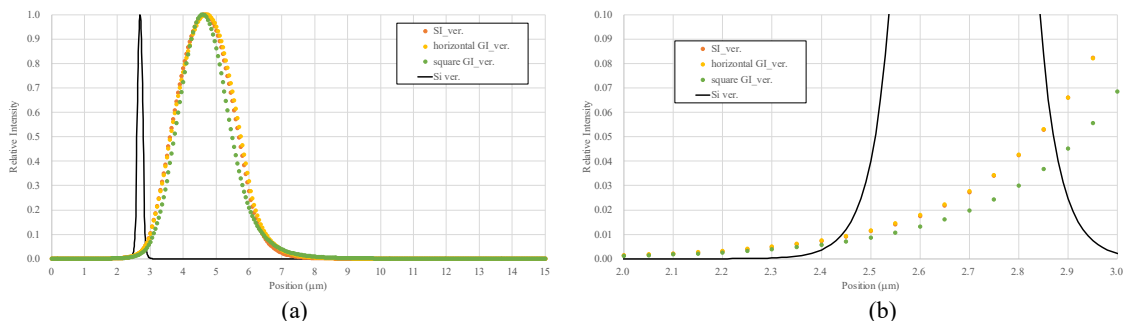


Fig. 5-36 (a)ポリマー光導波路及び Si 光導波路コアが示す光強度分布の比較
(b)光強度分布重なり部の拡大(position $2\sim 3\ \mu\text{m}$)

Figure 5-36 より，矩形 GI 型ポリマー光導波路では垂直方向の光閉じ込め効果によって Si 光導波路コアとの光強度分布の重なりが，他の屈折率分布と比較して減少していることがわかる．

以上より，アディアバティック結合の高効率化の為には，Si 光導波路コアとポリマー光導波路コア間での光強度分布の重なりが重要であり，矩形 GI 型ポリマー光導波路は他の屈折率分布と比較してその重なりが小さいことから，比較的大きな結合損失を示すことが判明した．一方で，Fig. 5-35 に示したように，最適コア設計時にはいずれの屈折率分布においてもおおむね 1 dB 以下の低結合損失を示すことから，アディアバティック結合を使用した光リンク損失低減に，ポリマー光導波路が貢献できることが明らかとなった．

5.6.4. アディアバティック結合損失の温度依存性

本章では，アディアバティック結合を適用したポリマー光導波路の光リンク導入の際に懸念される，高温環境下でのアディアバティック結合への影響度合いを見積もる．

はじめに，Fig. 5-29 で設定したアディアバティック結合モデルに対し，温度依存性を有するパラメータを抽出した．今回，新たに Si 光導波路も温度依存性の影響を受ける．そこで，まずは Si 光導波路単体での温度依存性を検証すべく，Fig. 5-37 に示したモデルで Si 光導波路コアからの出射光強度分布を計算した．なお，Si の dn/dt は $1.93 \times 10^{-4}/K$ ， SiO_2 の dn/dt は $1.44 \times 10^{-5}/K$ ，Si の CTE_{Si} は $2.6 \times 10^{-6}/K$ とした[31,33]．このとき，Si 光導波路のコア幅 w_{Si_core} ，コア高さ h_{Si_core} ポリマー光導波路コアの屈折率 $n_{Si_core}(t)$ ，クラッドの屈折率 $n_{SiO_2_cladding}(t)$ ，および Δ の温度依存性は，環境温度 t ，ならびに室温 $t_0 = 25^\circ C$ を用いて式(5-16)～(5-20)で表すことができる．代表温度として室温 $25^\circ C$ と高温 $150^\circ C$ で Si 光導波路の光学特性を計算した結果を Table 5-25 にまとめた．

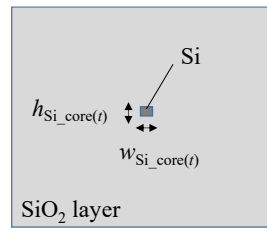


Fig. 5-37 Si 光導波路の温度依存性計算用モデル

$$w_{Si_core}(t) = w_{Si_core}(t_0) \times (1 + CTE_{Si} \times (t - t_0)) \quad (5-16)$$

$$h_{Si_core}(t) = h_{Si_core}(t_0) \times (1 + CTE_{Si} \times (t - t_0)) \quad (5-17)$$

$$n_{Si_core}(t) = n_{Si_core}(t_0) + \left\{ \frac{dn_{Si_core}}{dt} \times (t - t_0) \right\} \quad (5-18)$$

$$n_{SiO_2_core}(t) = n_{SiO_2_core}(t_0) + \left\{ \frac{dn_{SiO_2_core}}{dt} \times (t - t_0) \right\} \quad (5-19)$$

$$\Delta(t) = \frac{n_{Si\ core}^2(t) - n_{Si\ cladding}^2(t)}{2n_{Si\ core}^2(t)} \quad (5-20)$$

Table 5-25 25 °C, 150 °C環境下での Si 光導波路の光学特性比較

Temperature (°C)	25		150	
$n_{Si\ core}$	3.503		3.527	
$n_{SiO_2\ cladding}$	1.447		1.449	
Δ (%)	41.468		42.138	
Core width (μm)	0.44	0.08	0.44	0.08
MFD_x	0.421	3.08	0.420	2.96
MFD_y	0.287	6.28	0.286	6.23

Table 5-25 より, コア幅 0.44 μm では温度の違いによる MFD への影響は 0.001 μm 程度と, 無視できるレベルであることが判明した. 一方, コア幅 0.08 μm では, 25 °C から 150 °C への温度上昇に伴い, 0.05~0.12 μm 程度の MFD の低減が見られた. これは極めて小さい Si の CTE により, コアの膨張によるコア径の拡大がほとんどないこと, さらには dn/dt の違いによって温度上昇に伴い Δ が微増したことで, エバネッセント領域が支配的な狭小コア幅での MFD 変動に繋がったものと考えられる. しかしながら MFD 変動は限定的であることから, Si 光導波路側の光学特性の温度依存性は十分小さいといえる.

つづいて, Fig. 5-29 で設定したアディアバティック結合モデルに対し, 温度依存性を考慮して再設定を行った. 再設定したアディアバティック結合モデルの断面図を Fig. 5-38 に示す. Fig. 5-38 内にて温度依存性を考慮するパラメータについては赤字で t として表記した.

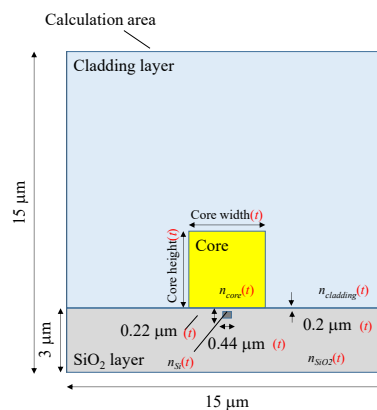


Fig. 5-38 温度依存性を考慮したアディアバティック結合計算用の断面図

このとき, Si 光導波路側の温度依存性については既に定義した式(5-16)~(5-20)を用いた. その他の, ポリマー光導波路コアの屈折率 $n_{core}(t)$, クラッドの屈折率 $n_{cladding}(t)$ は環境温度 t ,

ならびに室温 $t_0 = 25$ °C を用いて式(5-21)～(5-23)で定義した.

$$\text{Core size}(t) = \text{Core size}(t_0) \times (1 + \text{CTE} \times (t - t_0)) \quad (5-21)$$

$$n_{\text{core}}(t) = n_{\text{core}}(t_0) + \left\{ \frac{dn_{\text{core}}}{dt} \times (t - t_0) \right\} \quad (5-22)$$

$$n_{\text{cladding}}(t) = n_{\text{cladding}}(t_0) + \left\{ \frac{dn_{\text{cladding}}}{dt} \times (t - t_0) \right\} \quad (5-23)$$

また, Si 光導波路コアとポリマー光導波路コア間の距離 d は室温下で $0.2 \mu\text{m}$ $\{=d(t_0)\}$ だが, 温度変化に伴い変動し, 光強度分布の重なりに影響を与え得る. 距離 d は SiO_2 の CTE に依存し変動するため, 温度依存性を考慮した $d(t)$ は式(5-24)で定義できる.

$$d(t) = d(t_0) \times (1 + \text{CTE}_{\text{SiO}_2} \times (t - t_0)) \quad (5-24)$$

$\text{CTE}_{\text{SiO}_2}$ を $1.14 \times 10^{-6} / \text{K}$ [34] とすると, 150 °C での Si 光導波路コアとポリマー光導波路コア間の距離 $d_{(150 \text{ °C})}$ は $0.20003 \mu\text{m}$ となり, ほとんど変化がない.

以上より, アディアバティック結合の温度依存性を検討する上で, Si 光導波路ならびに Si 光導波路コア-ポリマー光導波路コア間距離の温度依存性を与える影響は無視できるレベルであり, ポリマー光導波路の光学特性温度依存性の影響が支配的であることが示唆された.

Figure 5-38 のモデルを用いて, 5.6.2 で行った計算と同様の処理を行い, 150 °C におけるポリマー光導波路の TE_{11} モードに結合した光遷移に伴うアディアバティック結合損失を計算した. 各 Δ のポリマー光導波路と Si 光導波路間のアディアバティック結合損失が最低となる値を, 温度毎, さらには屈折率分布毎にまとめた結果を Fig. 5-39 に示す. なお, SI 型, 水平 GI 型, 矩形 GI 型ポリマー光導波路に対して, Si 光導波路とのアディアバティック結合損失の最低値とその時のポリマー光導波路コア設計を抽出した結果は Appendix に掲載した.

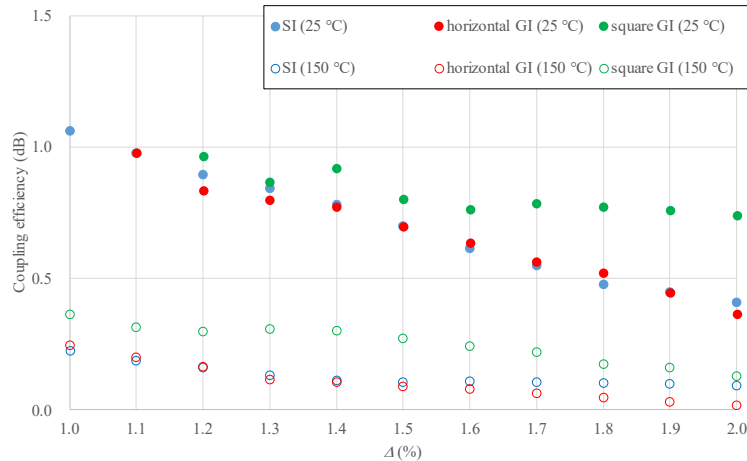


Fig. 5-39 ポリマー光導波路屈折率分布，環境温度の違いによるアディアバティック結合損失の比較

Figure 5-39 より，いずれの屈折率分布， Δ であっても，最低アディアバティック結合損失は 25 °C での結果と比較して小さくなっていることがわかる．これは温度上昇に伴い，コアクラッド間 dn/dt の差に起因してポリマー光導波路の Δ が大きくなり，式(5-12)で示した通り，モード結合理論上のエネルギー移行率が高まったためと考えられる．

したがって，OrmoCore および OrmoClad によって形成されたポリマー光導波路では，温度上昇に伴うアディアバティック結合損失は低減する方向に変動することが判明した．半面，コア及びクラッドの dn/dt は各々の材料に依存し，材料組み合わせによっては温度上昇に伴い光導波路の Δ が低減し，アディアバティック結合損失を増大させる可能性が有ることが示唆された．

5.7. 結言

本章では，ポリマー光導波路の CPO 適用時に懸念される高温環境下での動作特性に対し，ポリマー自身の示す熱的性質を紹介し，光学特性に影響を及ぼし得るパラメータとして CTE，屈折率温度依存性の 2 つに着目した．上記ポリマーの熱的性質を考慮したシミュレーションモデルを構築し，ポリマー光導波路の光学特性温度依存性を計算することで，本論文の材料モデルでは屈折率温度依存性の影響が支配的であることを明らかにした．つづいて，構築したシミュレーションモデルをもとに SMF ならびに SiO_x 光導波路との結合損失温度依存性を計算し，温度上昇に伴って， Δ の低い SMF との結合損失は増加傾向を示すのに対し， Δ の高い SiO_x 光導波路との結合損失は低減傾向を示すことを明らかにした．

また，ポリマー光導波路の光学特性温度依存性を測定する測定系を構築し，作製したポリマー光導波路を用いて，MFD の温度依存性を測定した．MFD の温度依存性は極小コアサイズの前後で挙動が異なり，極小コアサイズよりも大きい領域では， Δ の増大に伴う MFD 縮小が見られた．

つづいて、実環境温度を想定したポリマー光導波路の最適コア設計を検討し、室温(25℃)、高温(150℃)のいずれでも、ポリマー光導波路両端での合計接続損失が 2.0 dB を下回るコア設計を提案した。温度依存性を考慮した場合であっても、SI 型ポリマー光導波路の最適コア設計は急峻なテーパ角を必要とする一方で、GI 型ポリマー光導波路は緩やかなテーパ角で低接続損失を実現可能なことが判明した。

最後にアディアバティック結合を利用して Si 光導波路から直接ポリマー光導波路に光遷移させる方式について計算を行い、ポリマー光導波路との間で高効率な光遷移が実現できることを示した。また、垂直方向の屈折率分布が Si 光導波路-ポリマー光導波路コア間の光学的距離を引き離す方向に作用し、結合効率を悪化させることが判明した。一方で、適切なコア設計を行うことでいずれの屈折率分布であっても 1 dB を下回る低損失性を示すことから、光リンクへのポリマー光導波路の適用が期待されることを示した。

また、端面結合、アディアバティック結合ともに温度上昇によって接続損失の変動は見られるものの、適切なコア設計を行うことで、ポリマー光導波路の挿入があらゆる温度環境でリンク損失低減に貢献できることが判明した。

参考文献

- [1] L. Eldada, and L. W. Shacklette, “Advances in Polymer Integrated Optics,” IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, **6**(1), pp. 54-68 (2000).
- [2] S. Maruo, K. Ikuta, and T. Ninagawa, “Multi-Polymer Microstereolithography for Hybrid Opto-MEMS,” Technical Digest. MEMS 2001. 14th IEEE International Conference on Micro Electro Mechanical Systems, pp. 151-154 (2001).
- [3] 市村國宏, 「UV 硬化の基礎と実践」, 米田出版 (2010).
- [4] 社団法人 日本電子回路工業会, 「高分子光導波路の試験方法」, JPCA-PE02-05-01S-2008, (2008).
- [5] Telcordia Technologies Generic Requirements “Generic Requirements for Passive Optical Components,” GR-1209-CORE Issue 4, (2010).
- [6] 松重和美, 船津和守, 「高分子の熱物性」, 共立出版 (1995).
- [7] 大石不二夫, 成沢郁夫, 「プラスチック材料の寿命-耐久性と破壊」, 日刊工業新聞社 (1987).

- [8] 金城徳幸, 尾形正次, 沼田俊一, 「高分子の熱膨張係数を支配する因子」, 熱硬化性樹脂 **8**(4), pp. 208-221 (1987).
- [9] G. Pelosi, and S. Selleri, “Historical Corner Column: The Clausius-Mossotti and Lorentz-Lorenz Relations,” *URSI Radio Science Bulletin*, **2019**(371), pp. 79-86 (2019).
- [10] 桐木俊彦, 「プラスチックレンズの屈折率」, 光学 第 12 巻 6 号 (1983).
- [11] T. Chen, and B. Huang, “Thermal Characterization of 2.5D FCBGA for GPU Application,” 2020 IEEE 22nd Electronics Packaging Technology Conference (EPTC), pp. 479-482 (2020).
- [12] 若月正通, 小森田 藤夫, 「光学ガラスの屈折率の温度依存性」, 光学ニュース 1968, pp. 12-15 (1968).
- [13] G. Ghosh, “Temperature Dispersion of Refractive Indexes in Some Silicate Fiber Glasses,” *IEEE Photonics Technology Letters*, **6**(3), pp. 431-433 (1994).
- [14] IEC61755-1, “Fibre Optic Connector Optical Interfaces - Part 1: Optical Interfaces for Single Mode Non-Dispersion Shifted Fibres - General and Guidance,”
- [15] A. Arbabi, and L. L. Goddard, “Measurements of the Refractive Indices and Thermo-Optic Coefficients of Si₃N₄ and SiO_x Using Microring Resonances,” *Optics Letters*, **38**(19), pp. 3878-3881 (2013).
- [16] <https://www.microresist.de/en/produkt/ormocore-and-ormoclad/> (2024 年 8 月閲覧)
- [17] R. Dangel, A. L. Porta, D. Jubin, F. Horst, N. Meier, M. Seifried, and B. J. Offrein, “Polymer Waveguides Enabling Scalable Low-Loss Adiabatic Optical Coupling for Silicon Photonics,” *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, **24**(4), pp. 8200211 (2018).
- [18] C. W. Liao, Y. T. Yang, S. W. Huang, and M. C. M. Lee, “Fiber-Core-Matched Three-Dimensional Adiabatic Tapered Couplers for Integrated Photonic Devices,” *Journal of Lightwave Technology*, **29**(5), pp. 770-774 (2011).
- [19] T. Ishigure, K. Katori, H. Toda, and K. Yasuhara, “Axially Tapered Circular Core Polymer Optical

Waveguides Enabling Highly Efficient Light Coupling,” 2017 IEEE 67th Electronic Components and Technology Conference (ECTC), pp. 1600-1605 (2017).

[20] R. Dangel, A. L. Porta, D. Jubin, F. Horst, N. Meier, M. Seifried, and B. J. Offrein, “Polymer Waveguides Enabling Scalable Low-Loss Adiabatic Optical Coupling for Silicon Photonics,” IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, **24**(4), pp. 8200211 (2018).

[21] 岡本勝就, 「光導波路の基礎」, コロナ社 (1992).

[22] A. Hardy, and W. Streifer, “Coupled Modes of Multiwaveguide Systems and Phased Arrays,” Journal of Lightwave Technology, **4**(1), pp. 90-99 (1986).

[23] D. Gostimirovic, and W. N. Ye, “Compact Silicon-Photonic Mode-Division (de)Multiplexer Using Waveguide-Wapped Microdisk Resonators,” Optics Letters. **46**(2), pp. 388-391 (2021).

[24] F. Kondo, Y. Furuta, H. Kaneda, T. Fujii, and T. Ishigure, “Low Loss Design and Fabrication for Tapered Waveguide Based Spot Size Converter,” 2023 IEEE CPMT Symposium Japan (ICSJ), pp. 168-171 (2023).

[25] N. Hatori, T. Shimizu, M. Okano, M. Ishizaka, T. Yamamoto, and Y. Urino, “A Hybrid Integrated Light Source on a Silicon Platform Using a Trident Spot-Size Converter,” Journal of Lightwave Technology, **32**(7), pp. 1329-1336, (2014).

[26] L. B. Soldano, and E. C. M. Pennings, “Optical Multi-Mode Interference Devices Based on Self-Imaging: Principles and Applications,” Journal of Lightwave Technology, **13**(4), pp. 615-627, (1995).

[27] Y. Fu, T. Ye, W. Tang, and T. Chu, “Efficient Adiabatic Silicon-on-Insulator Waveguide Taper,” Photonics Research, **2**(3), pp. A41-A44 (2014).

[28] K. Kasaya, O. Mitomi, M. Naganuma, Y. Kondo, and Y. Noguchi, “A Simple Laterally Tapered Waveguide for Low-Loss Coupling to Singlemode Fibers,” IEEE Photonics Technology Letters, **5**(3), pp. 345-347 (1993).

[29] 近藤史将, “Co-Packaging 応用へむけたポリマー光導波路型アディアバティックカップラ
の設計と作製,” 慶應義塾大学大学院理工学研究科修士論文 (2024).

- [30] 光回路実装技術委員会, “光回路実装技術ロードマップ 2022 年度版「100 Tb/s 超スループットの実現に向けた光回路実装形態の予測と課題」,” エレクトロニクス実装学会 (2023).
- [31] H. Fukuda, K. Yamada, T. Tsuchizawa, T. Watanabe, H. Shinojima, and S. Itabashi, “Silicon Photonic Circuit with Polarization Diversity,” *Optics Express*, **16**(7), pp. 4872-4880 (2008).
- [32] Y. Jung, G. Brambilla, and D. J. Richardson, “Polarization-Maintaining Optical Microfiber,” *Optics Letters*, **35**(12), pp. 2034-2036 (2010).
- [33] C. Selvanayagam, P. L. T. Duong, B. Wilkerson, and N. Raghavan, “Inverse Design for Low Warpage Ultra-Thin Packages Using Constrained Particle Swarm Optimization,” *IEEE Access*, **9**, pp. 64043-64053 (2021).
- [34] T. Yang, and S. Liu, “Li₂O–Al₂O₃–SiO₂ Glass–Ceramic Coating on a Porous Silica Ceramic Substrate,” *Journal of Alloys and Compounds*, **600**, pp. 51-54 (2014).

第 6 章

結論

6.1. 総括

近年の AI 技術の隆盛によって、人々の生活はより豊かになっていくことが期待されており、今後も社会構造が大きく変化していくことが予想され、世界的に取り扱う情報量も爆発的に増えていくと考えられる。情報を集約するデータセンタでは低消費電力・高密度・高速通信が要求され、筐体内といった比較的短距離な領域でも光リンクの導入が進められている。既に導入されているアクティブ光ケーブルを用いたボードエッジまでの光信号伝送に対し、ここ数年、パッケージ基板上に光電変換素子を搭載し、電気通信領域を最小化する構想である Co-Packaged Optics(CPO)が注目を集めている。CPO の実現のためにはシリコン導波路と光ファイバ間の高効率な接続方式の確立が必要となるが、提案されている端面結合方式やグレーティングカップラ方式はデメリットもあり、採用にはいたっていない。そこで本研究では、ポリマー光導波路をスポットサイズ変換素子として光リンクに導入する、高効率な光結合を提案した。また、CPO へのポリマー光導波路適用の上で懸念となる、温度依存性に関して検討を行った。本章では、本研究を通じて得られたポリマー光導波路の最適設計時の接続特性、ならびに温度依存性について、特に屈折率分布間の違いに着目してまとめる。

6.1.1. シングルモードポリマー光導波路の作製

屈折率分布の異なるポリマー光導波路作製法として、矩形 SI 型の直接露光法、水平 GI 型のフォトアドレス法を選定した。各種作製条件を最適化することで、異なる屈折率分布ならびにコア幅を有するシングルモードポリマー光導波路の作製に成功した。作製したポリマー光導波路の光学特性、特にシングルモード条件と MFD に着目し、実験的に得られた値とシミュレーションで推定される値が近いことを確認した。

6.1.2. SiO_x光導波路とシングルモード光ファイバ(SMF)間接続の為のポリマー光導波路設計

はじめにポリマー光導波路の光リンク挿入にあたり、想定される過剰損失を推定し、ポリマー光導波路両端で 2.4 dB(フレネル損失込で 3.1 dB)以内であれば、損失面でポリマー光導波路の優位性が生じることを明らかにした。

ポリマー光導波路作製法として、直接露光法、フォトアドレス法、インプリント法を抽出し、それぞれの手法で得られる SI 型、水平 GI 型、矩形 GI 型ポリマー光導波路をモデル化しシミュレーションを行った。

SMF とポリマー光導波路間の接続損失をシミュレーションで検討した結果、コア設計の最適化により約 0 dB にまで接続損失を低減できることを示した。特に屈折率分布を有する

GI 型コアでは, SI 型と比較して大きなコアサイズで最低損失を示すことが明らかとなった. 一方で, GI 型コアは実効屈折率が低下するため, 低 Δ 領域では十分な光閉じ込めが得られず, エバネッセント領域がコア外にまで染み出し, 結果として SMF との接続損失を増大させることを明らかにした. また, ポリマー光導波路のコアサイズと MFD 間の関係性を検証し, MFD の極小値を取るコアサイズ, いわゆる極小コアサイズが存在することを明らかにし, この極小コアサイズがシングルモードポリマー光導波路に影響を与えることを示した. さらにこの極小コアサイズはポリマー光導波路の Δ , ならびに屈折率分布の影響を強く受けることを示し, アプリケーションに適合した樹脂や作製法選択の重要性を示した.

作製したポリマー光導波路を用いて, SMF との接続損失を実験的に検証し, SI 型ポリマー光導波路と SMF 間の接続損失が最小となるコア幅で 0.5 dB, 水平 GI 型ポリマー光導波路では 0.1 dB であった. また, これらの実験的に得られた接続損失ならびにトレランスが, シミュレーションと一致していることを確認した.

つづいて SiO_x 光導波路とポリマー光導波路間の接続損失をシミュレーションで検討し, 最適なコア設計時, SI 型ポリマー光導波路では 0.25 dB, 水平 GI 型ポリマー光導波路では 0.32 dB, 矩形 GI 型ポリマー光導波路では 0.42 dB となった. これらの接続損失はいずれも, SMF との接続損失と比較して大きく, 光リンクにポリマー光導波路を挿入した際に, SiO_x 光導波路との接続損失が支配的となることを明らかにした.

実験的に SiO_x 光導波路とポリマー光導波路間の接続損失を検討すべく, 入手困難な SiO_x 光導波路の代替として UHNA1 光ファイバを選択し評価を行ったところ, SI 型ポリマー光導波路と SiO_x 光導波路間の接続損失が最小となるコア幅で 1.8 dB, 水平 GI 型ポリマー光導波路では 1.5 dB であり, シミュレーションで想定される損失値とおおむね一致した.

最後にポリマー光導波路を SMF と SiO_x 光導波路間に挿入した光リンクを想定し, 両端での接続損失を最小化するポリマー光導波路のコア設計を提案した. ポリマー光導波路最適設計時には, 屈折率分布に限らず合計接続損失 1.0 dB 以下に抑制可能であることを示し, ポリマー光導波路がスポットサイズ変換素子として有用なことを明らかにした. また, GI 型ポリマー光導波路では SI 型と比較して広い製造トレランスを有していること, さらに急峻なテーパ角が必要なく, 実用上の優位性を示すことが判明した.

6.1.3. CPO 応用に向けたポリマー光導波路の温度特性

CPO 応用に際し, ポリマー光導波路は ASIC 近傍に配置することが想定され, 最大 100°C 程度の高温環境下での動作が求められる可能性が有る. そこで本章ではポリマー光導波路光学特性の温度依存性に検討を行った. ポリマーの熱的特性の内, 環境温度が光学特性に影響を及ぼす特性として熱膨張率(線膨張係数)と屈折率の温度依存性に着目した.

ポリマー光導波路構成材料として, OrmoCore および OrmoClad を想定し, 上記温度依存性を考慮したシミュレーション用ポリマー光導波路のモデルを設定した. ポリマー光導波路の, 前章でモデル化したものに加え, Mosquito 法で作製される円形 GI 型コアを加え, 全

4 種の屈折率分布に対して計算した。

はじめに、線膨張係数と屈折率の温度依存性がポリマー光導波路の光学特性に与える影響について検証し、25 °C～150 °C の温度上昇に伴い、コアサイズ変動に対して Δ の変化がより支配的であることを明らかにした。 Δ の温度依存性はコアとクラッド材料がそれぞれ持つ屈折率の温度依存性の差に起因しており、ポリマー光導波路実用化に向けて材料選定の重要性が判明した。特に極小コアサイズを下回るようなコアサイズを持つポリマー光導波路では、大きな温度依存性を示す結果が得られ、スポットサイズ変換素子として適用される逆テーパ構造の温度依存性に関して言及した。また、温度依存性が光学特性、特に MFD に及ぼす影響について計算を行い、温度上昇に伴い MFD が縮小する結果が得られた。実験的にも MFD の温度依存性を検証すべく、測定系を構築して評価を行い、計算結果と同様の傾向が得られることを確認した。得られた実験結果をシミュレーション結果とこのポリマー光導波路の MFD 縮小によって、SMF ならびに SiO_x 光導波路との接続損失も温度依存性を示す結果が得られ、温度上昇に伴い SMF との接続損失が増大する一方で、SiO_x 光導波路との接続損失が低減する傾向が得られた。このトレードオフの関係により、SMF、SiO_x 光導波路間にポリマー光導波路を挿入する際、最適構造が存在することが示唆され、代表温度 25 °C、150 °C で平均的な接続損失のふるまいを示すポリマー光導波路設計を提案し、いずれの温度帯でも合計接続損失が 2.0 dB 以下であることを明らかにした。この合計接続損失は 4 章で求めた目標損失 3.1 dB に対して十分なマージンを得られており、適切なコア設計によりポリマー光導波路を光リンクに挿入する優位性が十分に存在することを示した。

最後に、アディアバティック結合を用いたシリコン導波路とポリマー光導波路間の光遷移の計算を行った。異なるコア幅、コア高さ、 Δ をもつポリマー光導波路との結合損失を計算し、 Δ が大きいほど結合損失低下することが判明した。屈折率分布に着目したところ、コア高さ方向の屈折率勾配の存在によって、矩形 GI 型ポリマー光導波路が比較的の高い損失を示すことを明らかにした。また、温度依存性パラメータを導入し、シリコン導波路の光学特性への温度依存性影響がほとんどないことを確認した。一方、Ormo 材料系では温度上昇に伴い Δ が増大することで、ポリマー光導波路の屈折率分布によらずアディアバティック結合効率が向上する傾向が見られ、代表温度 25 °C、150 °C いずれの温度帯であっても、最適設計を適用することでポリマー光導波路とシリコン導波路間の結合損失が 1 dB 以下に抑制できることが判明した。

以上の結果より、ポリマー光導波路は適切な導波路構造を適用することで、端面結合、アディアバティック結合いずれの場合であっても、使用環境温度で低損失性を示すことが明らかとなり、ポリマー光導波路を介した接続構造が CPO 実現に向けて損失面で貢献できることを示した。

6.2. まとめ

本研究で得られた，端面結合方式におけるポリマー光導波路の光リンク挿入によって貢献可能な接続損失低減効果をまとめる．Fig. 6-1 に以下の結果をグラフでまとめた．

- ・3章で議論した，ポリマー光導波路挿入時の接続損失目標値(Fig. 4-5 を引用)
- ・4章の検討を通じて得られた，室温でのポリマー光導波路最適設計時の，ポリマー光導波路両端の合計接続損失(25 °C, 150 °C)
- ・5章の検討を通じて得られた，あらゆる温度環境で平均的なふるまいを示すポリマー光導波路最適設計時の，ポリマー光導波路両端の合計接続損失(25 °C, 150 °C)

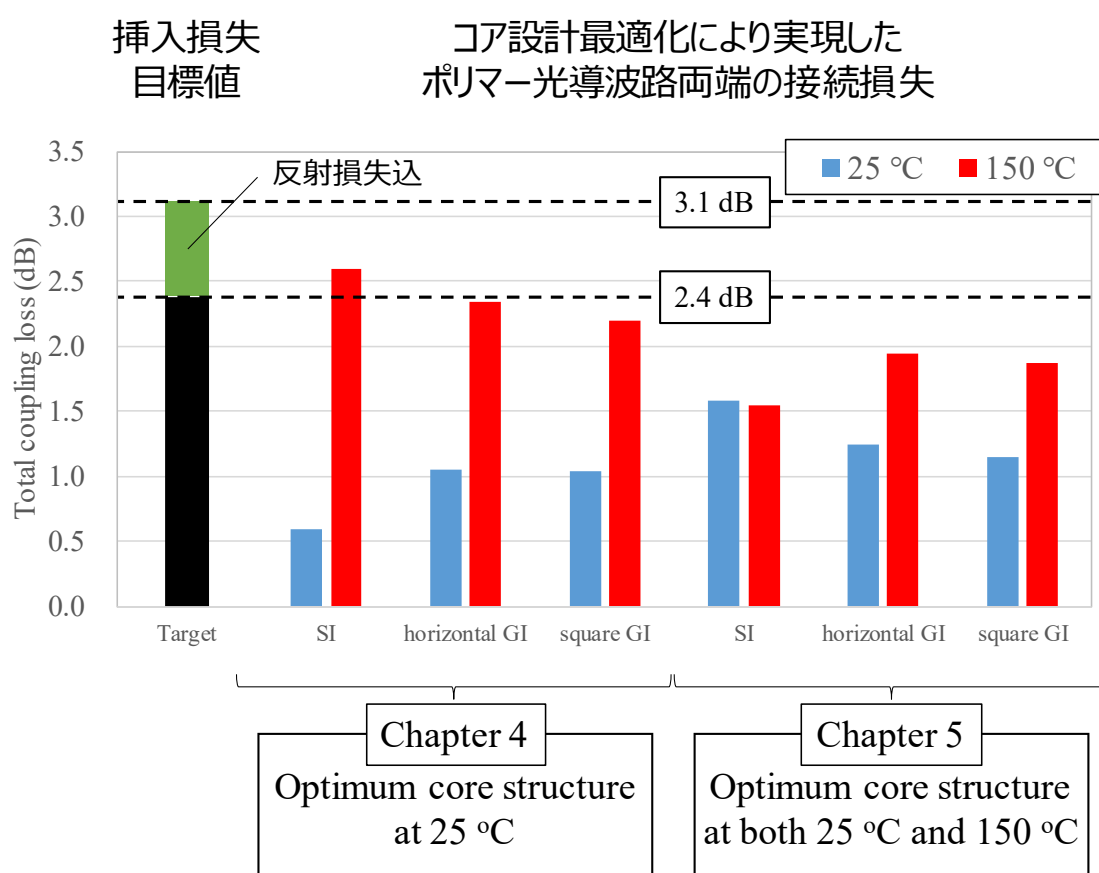


Fig. 6-1 最適コア設計適用時のポリマー光導波路両端での合計接続損失比較

Figure 6-1 より，ポリマー光導波路を適用する環境温度に合わせて最適なコア設計を施すことで，ポリマー光導波路の光リンク挿入によって，光リンク損失の低減に貢献できることが判明した．

6.3. 今後の展望

本研究で得られた結果より、CPO 実現に向けてリンク損失低減に貢献できる光素子として、ポリマー光導波路が有用であることを示した。特に、ポリマー光導波路適用の上で最大の懸念事項である高環境温度条件下での安定動作への懸念に対し、計算面および実験面の両面から光学特性面で影響がないことを示した。また、GI 型ポリマー光導波路は SI 型と比較して、製造トレランスが広いこと、さらには低接続損失を実現するためのテーパ構造への要求が緩和されることを明らかにした。ポリマー光導波路の実装プロセスは既に電気回路が構成されたパッケージ上に実装されることが想定されることから、上記優位性の内、特に製造トレランスが広いことは実装面で重要となってくる。現在、GI 型ポリマー光導波路の作製法として様々提案されているが、量産性に対応した作製法としては住友ベークライト社のフォトアドレス法が有力であり、現像プロセスフリーといった特徴も併せて、CPO 向けシングルモードポリマー光導波路として、フォトアドレス法によって作製される水平 GI 型ポリマー光導波路が期待される。一方で、全周 GI 型ポリマー光導波路の作製法として近年注目を集めているモスキート法では、ニードル走査によるコアパターン形成といったユニークな作製法によって、他手法では困難な 3 次元光配線を、パッケージ基板上で直接形成可能である。したがって、現時点でモスキート法の課題である量産性や、作製精度といった特性が向上することで、ポリマー光導波路の導入障壁を打ち破ることができると期待される。

Appendix

本研究で用いた手法，得られた成果のうち，補足的な内容について本付録に掲載する．

A. 挿入損失測定結果[関連節：4.3.2.SMF とポリマー光導波路間の接続損失(実験)]

直接露光法で作製した矩形 SI 型ポリマー光導波路のポリマー光導波路平均挿入損失(SI-MMF 受光)，ポリマー光導波路平均挿入損失(SMF 受光) の結果を Table A-1 に示す．なお，コア幅 12 μm については ch. 1 以外のチャネルおよびコア幅 10 μm の ch. 1, 2, 3, 4 については異物により光導波路コアが正常に形成されなかったため，平均挿入損失の算出からは除外している．

Table A-1 直接露光法で作製した矩形 SI 型ポリマー光導波路の挿入損失測定結果

Insertion loss [dB]		Received fiber	
		SI-MMF	SMF
Core width [μm] (Mask aperture)	12	2.19	2.82
	11	1.87	2.50
	10	1.89	2.51
	9	1.87	2.42
	8	1.80	2.36
	7	2.02	2.75

Insertion loss σ [dB]		Received fiber	
		SI-MMF	SMF
Core width [μm] (Mask aperture)	12	-	-
	11	0.10	0.14
	10	0.08	0.32
	9	0.23	0.26
	8	0.13	0.15
	7	0.13	0.26

つづいて，フォトアドレス法で作製した矩形 SI 型ポリマー光導波路のポリマー光導波路平均挿入損失(SI-MMF 受光)，ポリマー光導波路平均挿入損失(SMF 受光) の結果を Table A-2 に示す．

Table A-2 フォトアドレス法で作製した水平 GI 型ポリマー光導波路の挿入損失測定結果

Insertion loss ave. [dB]		Received fiber	
		SI-MMF	SMF
Core width [μm] (Mask aperture)	15	0.88	1.46
	14	0.89	1.24
	13	0.94	1.35
	12	0.95	1.34
	11	1.01	1.35
	10	1.06	1.48
	9	1.15	1.62
	8	1.18	1.62
	7	1.20	1.50
	6	1.24	1.38
	5	1.39	1.79
	4	1.54	1.74
	3	1.63	2.09

Insertion loss σ [dB]		Received fiber	
		SI-MMF	SMF
Core width [μm] (Mask aperture)	15	0.03	0.09
	14	0.03	0.06
	13	0.04	0.15
	12	0.03	0.14
	11	0.03	0.09
	10	0.02	0.11
	9	0.04	0.09
	8	0.05	0.17
	7	0.11	0.17
	6	0.03	0.08
	5	0.09	0.20
	4	0.09	0.11
	3	0.05	0.05

B. 挿入損失測定結果[関連節：4.3.3. SMF とポリマー光導波路間の接続損失トレランス(実験)]

ポリマー光導波路と SMF 間でのミスアライメントトレランスを各コア幅で測定した結果を，屈折率分布別に Fig. B-1, Fig. B-2 に示す．

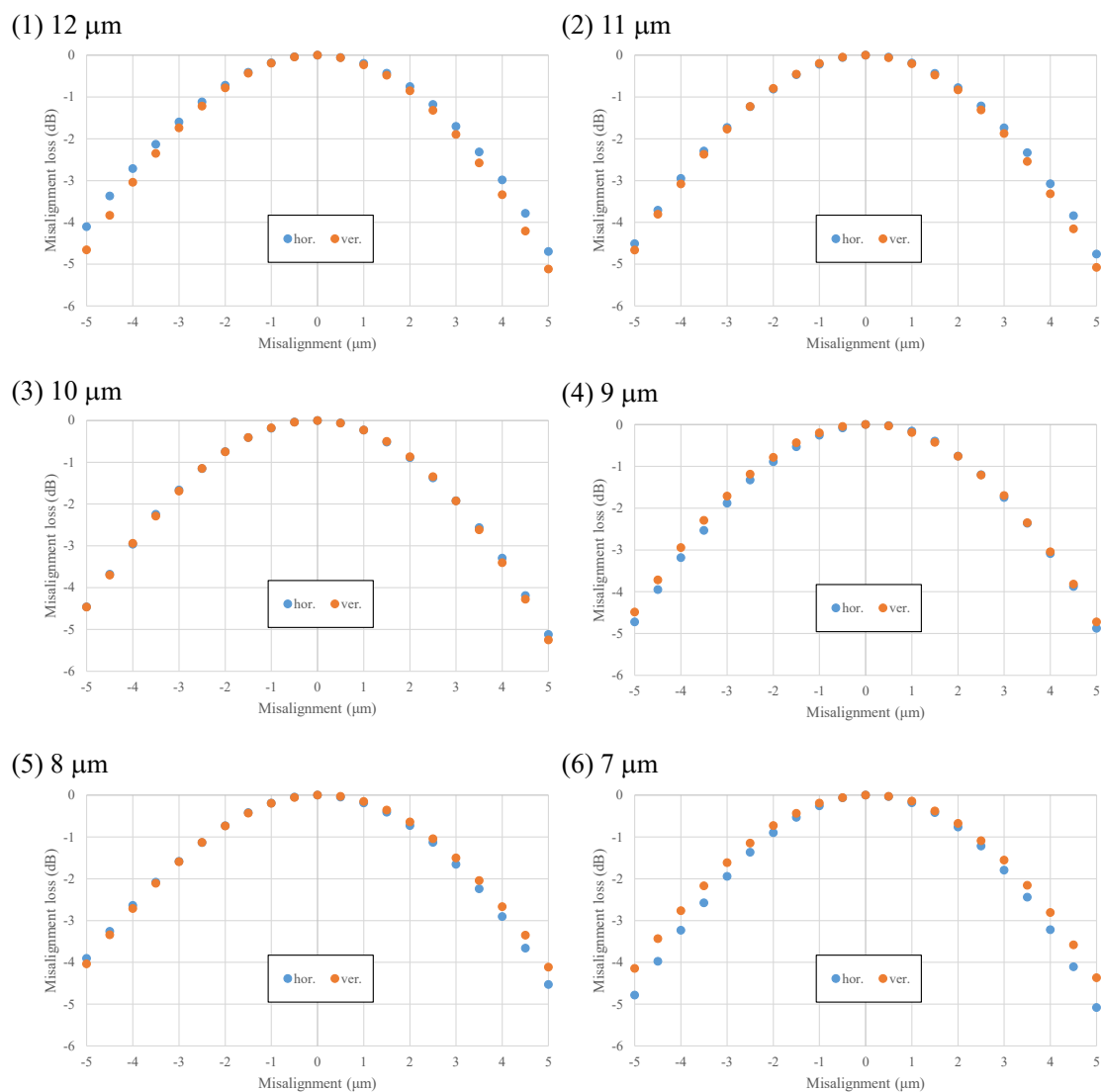


Fig. B-1 SI 型ポリマー光導波路のミスアライメントトレランス

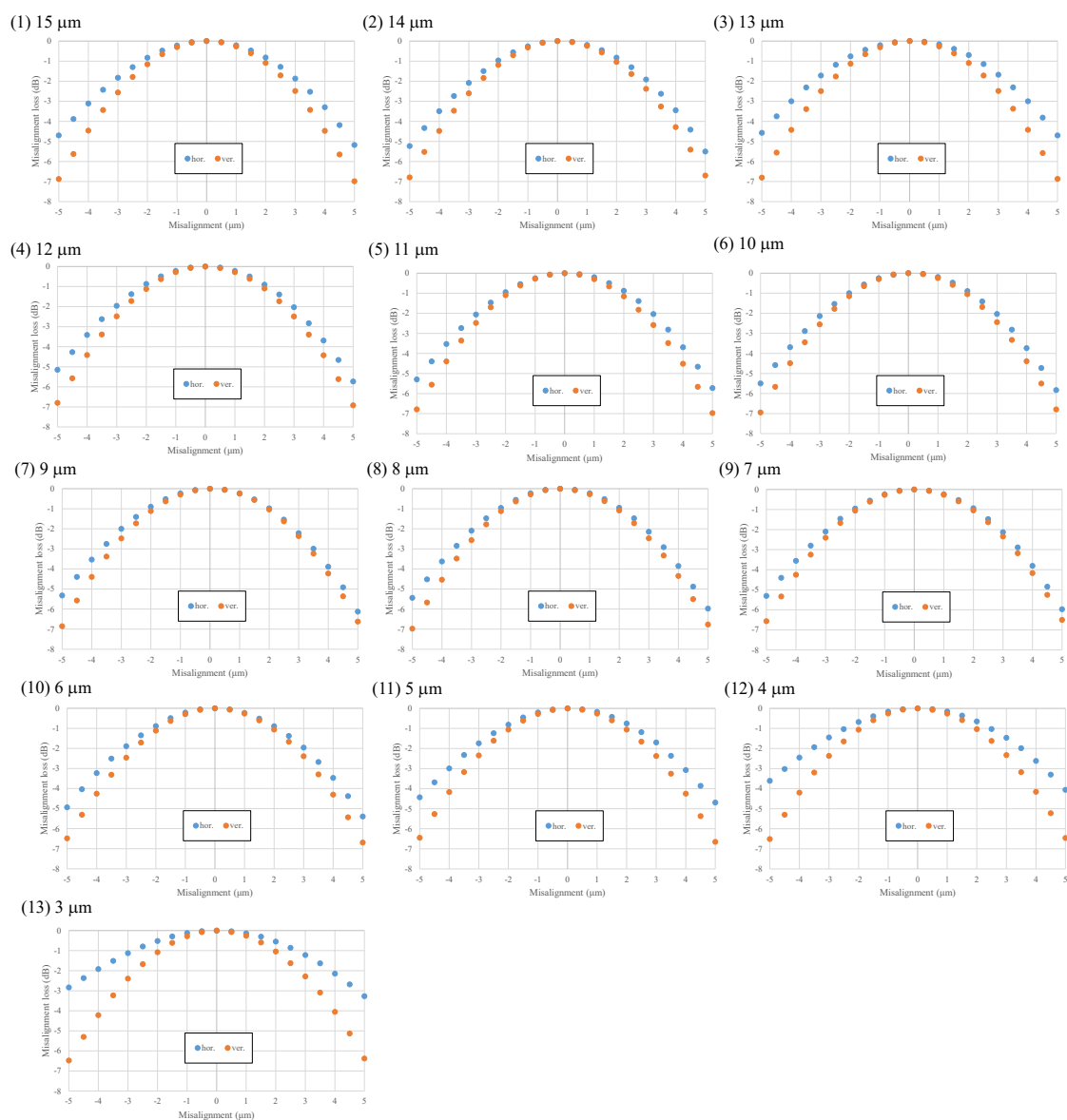


Fig. B-2 水平 GI 型ポリマー光導波路のミスアライメントトレランス

C. 挿入損失測定結果[関連節：4.4.1. SiO_x 光導波路とポリマー光導波路間の接続損失(計算)]

SiO_x 光導波路との最低接続損失を示す、ポリマー光導波路の最適コア設計とその時の接続損失を Table C-1 にまとめた。

Table C-1 各屈折率分布, Δ の時に得られる SiO_x 光導波路との最低接続損失,
ならびにその損失を示すポリマー光導波路コア幅・コア高さ

Δ (%)	Refractive index profile					
	SI		Horizontal GI		Square GI	
	Lowest loss (dB)	core width (μm) × core height (μm)	Lowest loss (dB)	core width (μm) × core height (μm)	Lowest loss (dB)	core width (μm) × core height (μm)
0.1	8.1	10×10	8.4	15×10	8.7	15×15
0.2	5.6	7×7	5.9	12×7	6.2	11×12
0.3	4.2	6×6	4.5	9×6	4.8	9×10
0.4	3.3	5×5	3.6	8×5	3.8	8×9
0.5	2.7	5×5	2.9	7×5	3.2	8×8
0.6	2.2	4×5	2.4	7×5	2.7	7×7
0.7	1.8	4×4	2.1	7×4	2.3	7×7
0.8	1.5	4×4	1.7	6×4	2.0	6×6
0.9	1.3	4×4	1.5	6×4	1.7	6×6
1.0	1.1	4×4	1.3	5×4	1.5	6×6
1.1	1.0	3×4	1.1	5×4	1.3	5×6
1.2	0.83	3×4	1.0	5×4	1.1	5×5
1.3	0.70	3×3	0.84	5×3	1.0	5×5
1.4	0.59	3×3	0.73	5×3	0.86	5×5
1.5	0.50	3×3	0.63	5×3	0.76	5×5
1.6	0.43	3×3	0.55	5×3	0.67	5×5
1.7	0.37	3×3	0.48	4×3	0.60	5×5
1.8	0.32	3×3	0.42	4×3	0.54	4×5
1.9	0.28	3×3	0.37	4×3	0.48	4×5
2.0	0.25	3×3	0.32	4×3	0.42	4×4

©2024 Optica

D. 入射ミスアライメントとポリマー光導波路光学特性の関係[関連節：4.3.4. ポリマー光導波路への入射ミスアライメントの影響推定]

Figure 4-32 に示したシミュレーションモデルにて、入射光ファイバである SMF とのミスアライメントを水平(x)方向, 垂直(y)方向 2 次元的に変化させたときに、ポリマー光導波路の最低次(0 次)モードに分配される光強度の割合を検討した結果を Table D-1 に示す。なお、SMF およびポリマー光導波路は水平(x)方向ならびに垂直(y)方向に対して対称であるから、ミスアライメント方向については x , y 方向いずれも + 方向にのみ変化させている。また、Table D-1 にて、光強度の分配割合が 85%以上のセルを赤色、75%以上 85%未満のセルを黄色、75%未満のセルを青色で示した。また、Table D-1 と同様の入射ミスアライメントが生じた場合の、SMF とポリマー光導波路最低次モードとの接続損失を Table D-2 にまとめた。Table D-2 にて、SMF との接続損失が 0.5 dB 以内となるセルについては水色で示し、0.5 dB を超える損失を示すセルについては橙色で示した。

Table D-1 入射ミスアライメントとポリマー光導波路の最低次モードへの強度分配割合の関係

Fundamental mode ratio (%)		Horizontal misalignment (μm)																																
		0.0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0	1.1	1.2	1.3	1.4	1.5	1.6	1.7	1.8	1.9	2.0	2.1	2.2	2.3	2.4	2.5	2.6	2.7	2.8	2.9	3.0		
Vertical misalignment (μm)	0.0	100	100	100	100	99	99	98	98	97	95	93	90	87	83	79	75	70	65	60	55	50	45	40	35	30	25	20	15	10	5	0	0	
	0.1	100	100	100	99	99	98	98	97	97	96	95	94	93	92	91	90	89	88	87	86	85	84	83	82	81	80	79	78	77	76	75	74	73
	0.2	100	100	100	99	99	98	98	97	96	96	95	94	93	92	91	90	89	88	87	86	85	84	83	82	81	80	79	78	77	76	75	74	73
	0.3	99	99	99	99	99	98	98	97	96	96	95	94	93	92	91	90	89	88	87	86	85	84	83	82	81	80	79	78	77	76	75	74	73
	0.4	98	98	98	98	98	97	97	96	95	95	94	93	92	91	90	89	88	87	86	85	84	83	82	81	80	79	78	77	76	75	74	73	72
	0.5	96	96	96	96	96	95	95	94	93	93	92	91	90	89	88	87	86	85	84	83	82	81	80	79	78	77	76	75	74	73	72	71	70
	0.6	94	94	94	94	94	93	93	92	91	90	89	88	87	86	85	84	83	82	81	80	79	78	77	76	75	74	73	72	71	70	69	68	
	0.7	92	92	92	92	92	91	90	89	88	87	86	85	84	83	82	81	80	79	78	77	76	75	74	73	72	71	70	69	68	67	66	65	
	0.8	87	87	87	87	87	86	85	84	83	82	81	80	79	78	77	76	75	74	73	72	71	70	69	68	67	66	65	64	63	62	61	60	
	0.9	83	83	83	83	83	82	81	80	79	78	77	76	75	74	73	72	71	70	69	68	67	66	65	64	63	62	61	60	59	58	57	56	
	1.0	80	80	80	80	80	79	78	77	76	75	74	73	72	71	70	69	68	67	66	65	64	63	62	61	60	59	58	57	56	55	54	53	
	1.1	78	78	78	78	78	77	76	75	74	73	72	71	70	69	68	67	66	65	64	63	62	61	60	59	58	57	56	55	54	53	52	51	
	1.2	76	76	76	76	76	75	74	73	72	71	70	69	68	67	66	65	64	63	62	61	60	59	58	57	56	55	54	53	52	51	50	49	
	1.3	74	74	74	74	74	73	72	71	70	69	68	67	66	65	64	63	62	61	60	59	58	57	56	55	54	53	52	51	50	49	48	47	
	1.4	72	72	72	72	72	71	70	69	68	67	66	65	64	63	62	61	60	59	58	57	56	55	54	53	52	51	50	49	48	47	46	45	
	1.5	70	70	70	70	70	69	68	67	66	65	64	63	62	61	60	59	58	57	56	55	54	53	52	51	50	49	48	47	46	45	44	43	
	1.6	68	68	68	68	68	67	66	65	64	63	62	61	60	59	58	57	56	55	54	53	52	51	50	49	48	47	46	45	44	43	42	41	
	1.7	66	66	66	66	66	65	64	63	62	61	60	59	58	57	56	55	54	53	52	51	50	49	48	47	46	45	44	43	42	41	40	39	
	1.8	64	64	64	64	64	63	62	61	60	59	58	57	56	55	54	53	52	51	50	49	48	47	46	45	44	43	42	41	40	39	38	37	
	1.9	62	62	62	62	62	61	60	59	58	57	56	55	54	53	52	51	50	49	48	47	46	45	44	43	42	41	40	39	38	37	36	35	
	2.0	60	60	60	60	60	59	58	57	56	55	54	53	52	51	50	49	48	47	46	45	44	43	42	41	40	39	38	37	36	35	34	33	
	2.1	58	58	58	58	58	57	56	55	54	53	52	51	50	49	48	47	46	45	44	43	42	41	40	39	38	37	36	35	34	33	32	31	
	2.2	56	56	56	56	56	55	54	53	52	51	50	49	48	47	46	45	44	43	42	41	40	39	38	37	36	35	34	33	32	31	30	29	
	2.3	54	54	54	54	54	53	52	51	50	49	48	47	46	45	44	43	42	41	40	39	38	37	36	35	34	33	32	31	30	29	28	27	
	2.4	52	52	52	52	52	51	50	49	48	47	46	45	44	43	42	41	40	39	38	37	36	35	34	33	32	31	30	29	28	27	26	25	
	2.5	50	50	50	50	50	49	48	47	46	45	44	43	42	41	40	39	38	37	36	35	34	33	32	31	30	29	28	27	26	25	24	23	
	2.6	48	48	48	48	48	47	46	45	44	43	42	41	40	39	38	37	36	35	34	33	32	31	30	29	28	27	26	25	24	23	22	21	
	2.7	46	46	46	46	46	45	44	43	42	41	40	39	38	37	36	35	34	33	32	31	30	29	28	27	26	25	24	23	22	21	20	19	
	2.8	44	44	44	44	44	43	42	41	40	39	38	37	36	35	34	33	32	31	30	29	28	27	26	25	24	23	22	21	20	19	18	17	
	2.9	42	42	42	42	42	41	40	39	38	37	36	35	34	33	32	31	30	29	28	27	26	25	24	23	22	21	20	19	18	17	16	15	
	3.0	40	40	40	40	40	39	38	37	36	35	34	33	32	31	30	29	28	27	26	25	24	23	22	21	20	19	18	17	16	15	14	13	

Table D-2 入射ミスアライメントとポリマー光導波路最低次モードへの接続損失の関係

Coupling loss (dB)		Horizontal misalignment (μm)																																
		0.0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0	1.1	1.2	1.3	1.4	1.5	1.6	1.7	1.8	1.9	2.0	2.1	2.2	2.3	2.4	2.5	2.6	2.7	2.8	2.9	3.0		
Vertical misalignment (μm)	0.0	0.0	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.2	0.2	0.2	0.2	0.3	0.3	0.4	0.4	0.5	0.5	0.6	0.6	0.7	0.8	0.8	0.9	1.0	1.1	1.2	1.2	1.3	1.4	1.5	1.6	1.7	1.8	
	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.2	0.2	0.2	0.2	0.3	0.3	0.3	0.4	0.4	0.5	0.5	0.6	0.6	0.7	0.8	0.8	0.9	1.0	1.1	1.2	1.3	1.4	1.5	1.6	1.7	1.8	1.9	
	0.2	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.2	0.2	0.2	0.2	0.3	0.3	0.3	0.4	0.4	0.5	0.5	0.6	0.6	0.7	0.8	0.8	0.9	0.9	1.0	1.1	1.2	1.3	1.4	1.5	1.6	1.7	1.8	
	0.3	0.1	0.1	0.1	0.1	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.3	0.3	0.3	0.4	0.4	0.4	0.5	0.5	0.6	0.7	0.7	0.8	0.8	0.9	1.0	1.1	1.2	1.3	1.4	1.5	1.6	1.7	1.8	
	0.4	0.1	0.1	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.3	0.3	0.3	0.4	0.4	0.4	0.5	0.5	0.6	0.6	0.7	0.7	0.8	0.8	0.9	0.9	1.0	1.1	1.2	1.3	1.4	1.5	1.6	1.7	1.8
	0.5	0.1	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.3	0.3	0.3	0.4	0.4	0.5	0.5	0.6	0.6	0.7	0.7	0.8	0.8	0.9	1.0	1.0	1.1	1.2	1.3	1.4	1.5	1.6	1.7	1.8	
	0.6	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.3	0.3	0.3	0.4	0.4	0.4	0.5	0.5	0.6	0.6	0.7	0.8	0.8	0.8	0.9	1.0	1.1	1.1	1.2	1.3	1.4	1.5	1.6	1.7	1.8	
	0.7	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.3	0.3	0.3	0.3	0.4	0.4	0.5	0.5	0.6	0.6	0.7	0.7	0.8	0.8	0.9	0.9	1.0	1.1	1.2	1.3	1.3	1.4	1.5	1.6	1.7	1.8		
	0.8	0.2	0.2	0.2	0.2	0.3	0.3	0.3	0.3	0.4	0.4	0.4	0.5	0.5	0.5	0.6	0.6	0.7	0.8	0.8	0.8	0.9	1.0	1.0	1.1	1.2	1.3	1.4	1.5	1.6	1.7	1.8		
	0.9	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.4	0.4	0.4	0.4	0.5	0.5	0.5	0.6	0.6	0.7	0.7	0.8	0.8	0.9	0.9	1.0	1.1	1.1	1.2	1.3	1.4	1.5	1.6	1.7	1.8		
	1.0	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.5	0.5	0.5	0.6	0.6	0.7	0.7	0.8	0.8	0.8	0.9	1.0	1.0	1.1	1.2	1.3	1.4	1.5	1.6	1.7	1.8		
	1.1	0.3	0.3	0.3	0.3	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.5	0.5	0.5	0.6	0.6	0.7	0.7	0.8	0.8	0.8	0.9	1.0	1.1	1.1	1.2	1.3	1.4	1.5	1.6	1.7	1.8	1.9	2.0	
	1.2	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.5	0.5	0.5	0.6	0.6	0.6	0.7	0.7	0.8	0.8	0.8	0.9	1.0	1.0	1.1	1.1	1.2	1.3	1.3	1.4	1.5	1.6	1.7	1.8	1.9	2.0	
	1.3	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.5	0.5	0.5	0.6	0.6	0.6	0.7	0.7	0.8	0.8	0.8	0.9	0.9	1.0	1.1	1.1	1.2	1.2	1.3	1.4	1.5	1.6	1.7	1.8	1.9	2.0	2.1	
	1.4	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.6	0.6	0.6	0.7	0.7	0.7	0.8	0.8	0.8	0.9	0.9	1.0	1.1	1.1	1.2	1.3	1.4	1.4	1.5	1.6	1.7	1.8	1.9	2.0	2.1	
	1.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.6	0.6	0.6	0.6	0.7	0.7	0.7	0.8	0.8	0.8	0.9	0.9	1.0	1.1	1.1	1.2	1.3	1.3	1.4	1.5	1.6	1.7	1.8	1.9	2.0	2.1	2.2	2.3	
1.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.7	0.7	0.7	0.8	0.8	0.8	0.9	0.9	1.0	1.0	1.1	1.2	1.2	1.3	1.4	1.5	1.5	1.6	1.7	1.8	1.9	2.0	2.1	2.2	2.3		
1.7	0.6	0.6	0.6	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.8	0.8	0.8	0.9	0.9	1.0	1.0	1.1	1.2	1.2	1.3	1.4	1.4	1.5	1.6	1.7	1.8	1.9	2.0	2.1	2.2	2.3			
1.8	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.9	0.9	0.9	1.0	1.0	1.1	1.1	1.2	1.2	1.3	1.4	1.5	1.6	1.7	1.8	1.9	2.0	2.1	2.2	2.3	2.4	2.5		
1.9	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.9	0.9	0.9	0.9	1.0	1.0	1.1	1.1	1.2	1.2	1.3	1.4	1.4	1.5	1.6	1.7	1.7	1.8	1.9	2.0	2.1	2.2	2.3	2.4	2.5	2.6		
2.0	0.8	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	1.0	1.0	1.0	1.1	1.1	1.2	1.2	1.3	1.3	1.4	1.5	1.6	1.6	1.7	1.8	1.9	2.0	2.1	2.2	2.3	2.4	2.5	2.6	2.7		
2.1	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	1.0	1.0	1.0	1.1	1.1	1.1	1.1	1.2	1.2	1.3	1.3	1.4	1.4	1.5	1.6	1.6	1.7	1.8	1.9	2.0	2.1	2.2	2.3	2.4	2.5	2.6	2.7	2.8	
2.2	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.1	1.1	1.1	1.1	1.2	1.2	1.2	1.3	1.3	1.4	1.4	1.5	1.5	1.6	1.7	1.7	1.8	1.9	2.0	2.1	2.2	2.3	2.4	2.5	2.6	2.7	2.8	2.9	
2.3	1.1	1.1	1.1	1.1	1.1	1.1	1.2	1.2	1.2	1.3	1.3	1.3	1.4	1.4	1.5	1.5	1.6	1.7	1.7	1.8	1.9	2.0	2.1	2.2	2.3	2.4	2.5	2.6	2.7	2.8	2.9	3.0		
2.4	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.3	1.3	1.3	1.4	1.4	1.4	1.5	1.5	1.6	1.6	1.7	1.8	1.8	1.9	2.0	2.1	2.2	2.3	2.4	2.5	2.6	2.7	2.8	2.9	3.0		
2.5	1.3	1.3	1.3	1.3	1.3	1.3	1.3	1.4	1.4	1.4	1.4	1.4	1.5	1.5	1.6	1.6	1.7	1.7	1.8	1.9	1.9	2.0	2.1	2.1	2.2	2.3	2.4	2.5	2.6	2.7	2.8	2.9	3.0	
2.6	1.4	1.4	1.4	1.4	1.4	1.4	1.4	1.5	1.5	1.5	1.5	1.6	1.6	1.7	1.7	1.8	1.8	1.9	1.9	2.0	2.1	2.2	2.2	2.3	2.4	2.5	2.6	2.7	2.8	2.9	3.0	3.1		
2.7	1.4	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.6	1.6	1.6	1.7	1.7	1.8	1.8	1.9	1.9	2.0	2.0	2.1	2.2	2.2	2.3	2.4	2.5	2.6	2.7	2.8	2.9	3.0	3.1	3.2	3.3		
2.8	1.5	1.6	1.6	1.6	1.6	1.6	1.6	1.6	1.7	1.7	1.7	1.8	1.8	1.9	1.9	2.0	2.0	2.1	2.1	2.2	2.3	2.3	2.4	2.5	2.6	2.7	2.8	2.9	3.0	3.1	3.2	3.3		
2.9	1.7	1.7	1.7	1.7	1.7	1.7	1.8	1.8	1.8	1.8	1.9	1.9	2.0	2.0	2.1	2.1	2.2	2.2	2.3	2.4	2.4	2.5	2.6	2.7	2.8	2.9	3.0	3.1	3.2	3.3	3.4	3.5		
3.0	1.8	1.8	1.8	1.8	1.8	1.8	1.9	1.9	1.9	2.0	2.0	2.0	2.1	2.1	2.2	2.2	2.3	2.4	2.4	2.5	2.6	2.6	2.7	2.8	2.9	3.0	3.1	3.2	3.3	3.4	3.5	3.6		

E. 挿入損失測定方法ならびに測定結果[関連節：4.4.2. SiO_x 光導波路とポリマー光導波路間の接続損失(実験)]

UHNA1 との接続損失算出方法

①-1 リファレンス光量測定 (測定系 Fig. E-1 (a))

ポリマー光導波路を挿入しない状態で、励振プローブを調芯し、ピーク強度(透過光量)を測定.

励振プローブ：SMF

受光プローブ：105 $\mu\text{m}\Phi$ SI-MMF NA:0.22 (すべての光を受光可能な大口径かつ高 NA な光ファイバ)

[透過光量に影響する要素] フレネル損失(SMF-空隙), フレネル損失(空隙-105 $\mu\text{m}\Phi$ SI-MMF), 接続損失(SMF-105 $\mu\text{m}\Phi$ SI-MMF)

①-2 ポリマー光導波路挿入光量(SI-MMF 受光)測定 (測定系 Fig. E-1 (b))

ポリマー光導波路をプローブ間に挿入, 各光導波路コアを調芯し, ピーク強度(透過光量)を測定.

励振プローブ：SMF

受光プローブ：105 $\mu\text{m}\Phi$ SI-MMF NA:0.22 (すべての光を受光可能な大口径かつ高 NA な光ファイバ)

[透過光量に影響する要素] フレネル損失(SMF-空隙), フレネル損失(空隙-ポリマー光導波路), 接続損失(SMF-ポリマー光導波路), 伝搬損失(ポリマー光導波路), フレネル損失(ポリマー光導波路-空隙), フレネル損失(空隙-105 $\mu\text{m}\Phi$ SI-MMF), 接続損失(ポリマー光導波路-105 $\mu\text{m}\Phi$ SI-MMF)

①-3 ポリマー光導波路挿入損失(SI-MMF 受光)算出

①-1 で得たリファレンス光量と①-2 で得たポリマー光導波路挿入光量(SI-MMF 受光)の差分を計算することで, 一部の損失要素を相殺することができる. この差分をポリマー光導波路挿入損失として定義し, 8 ch.分の挿入損失データから平均挿入損失を算出した.

[挿入損失に影響する要素] 接続損失(SMF-105 $\mu\text{m}\Phi$ SI-MMF), フレネル損失(空隙-ポリマー光導波路), 接続損失(SMF-ポリマー光導波路), 伝搬損失(ポリマー光導波路), フレネル損失(ポリマー光導波路-空隙), 接続損失(ポリマー光導波路-105 $\mu\text{m}\Phi$ SI-MMF)

②-1 リファレンス測定 (測定系 Fig. E-1 (c))

ポリマー光導波路を挿入しない状態で, 励振プローブを調芯し, ピーク強度(透過光量)を測定.

励振プローブ：SMF

受光プローブ：UHNA1

[透過光量に影響する要素] フレネル損失(SMF-空隙), フレネル損失(空隙-UHNA1), 接続

損失(SMF-UHNA1)

②-2 ポリマー光導波路挿入光量(UHNA1)測定 (測定系 Fig. E-1 (d))

ポリマー光導波路をプローブ間に挿入，各光導波路コアを調芯し，ピーク強度(透過光量)を測定.

励振プローブ：SMF

受光プローブ：UHNA1

[透過光量に影響する要素] フレネル損失(SMF-空隙)，フレネル損失(空隙-ポリマー光導波路)，接続損失(SMF-ポリマー光導波路)，伝搬損失(ポリマー光導波路)，フレネル損失(ポリマー光導波路-空隙)，フレネル損失(空隙-UHNA1)，接続損失(ポリマー光導波路-UHNA1)

②-3 ポリマー光導波路挿入損失(UHNA1 受光)算出

②-1 で得たリファレンス光量と②-2 で得たポリマー光導波路挿入光量(SMF 受光)の差分を計算することで，一部の損失要素を相殺することができる．この差分をポリマー光導波路挿入損失(UHNA1 受光)として定義し，8 ch.分の挿入損失データから平均挿入損失を算出した．

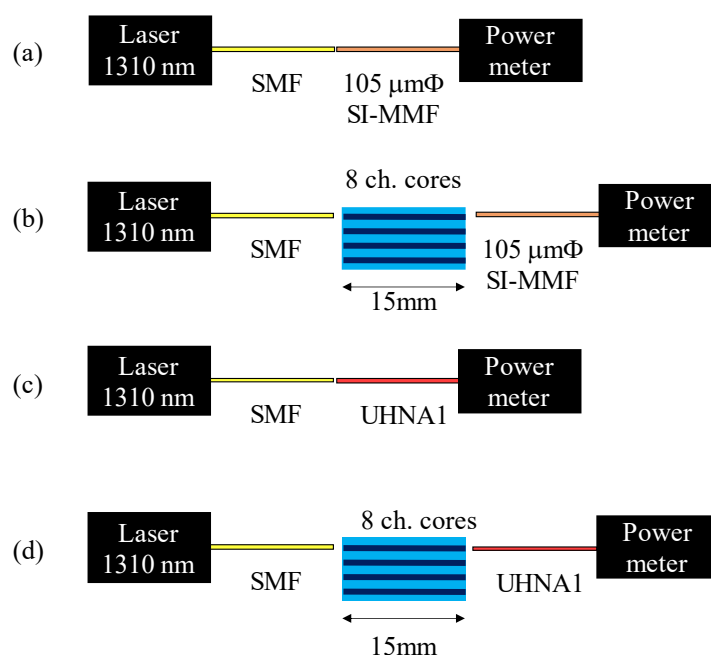
[挿入損失に影響する要素] 接続損失(SMF-UHNA1)，フレネル損失(空隙-ポリマー光導波路)，接続損失(SMF-ポリマー光導波路)，伝搬損失(ポリマー光導波路)，フレネル損失(ポリマー光導波路-空隙)，接続損失(ポリマー光導波路- UHNA1)

③ ポリマー光導波路- SMF 接続損失算出

①-3，②-3 で算出した平均挿入損失の差分を求めることで，ポリマー光導波路の伝搬損失やフレネル損失といったほとんどの不確定要素を相殺することができる．

このとき，相殺されずに残る要素として，接続損失(SMF-105 $\mu\text{m}\Phi$ SI-MMF)，接続損失(SMF-UHNA1)の2つがあるが，前者はほとんど損失が生じないと想定されるため無視できる．一方，後者については導波構造の違いによって接続損失が生じる．この接続損失はアダプターを用いてファイバ同士を接続させることで測定し，1.63 dB と求めた．

したがって，①-3，②-3 で算出した平均挿入損失の差分 に 1.63 dB を加えた値を，ポリマー光導波路と UHNA1 間の接続損失として定義した．

Fig. E-1 SiO_x 光導波路を想定した UHNA1 との接続損失評価系

上記挿入損失測定法を用いて、直接露光法で作製した矩形 SI 型ポリマー光導波路、ならびにフォトリソ法で作製した水平 GI 型ポリマー光導波路のポリマー光導波路平均挿入損失(SI-MMF 受光)、ポリマー光導波路平均挿入損失(SMF 受光) を測定した結果を、それぞれ Table E-1, Table E-2 に示す。

Table E-1 直接露光法で作製した矩形 SI 型ポリマー光導波路の挿入損失測定結果

Insertion loss ave. [dB]		Received fiber	
		SI-MMF	UHNA1
Core width [μm] (Mask aperture)	12	2.19	2.77
	11	1.87	2.18
	10	1.89	2.10
	9	1.87	2.21
	8	1.80	2.23
	7	2.02	2.51

Insertion loss σ [dB]		Received fiber	
		SI-MMF	UHNA1
Core width [μm] (Mask aperture)	12	-	-
	11	0.10	0.09
	10	0.08	0.12
	9	0.23	0.27
	8	0.13	0.11
	7	0.13	0.08

Table E-2 フォトアドレス法で作製した水平 GI 型ポリマー光導波路の挿入損失測定結果

Insertion loss ave. [dB]		Received fiber	
		SI-MMF	UHNA1
Core width [μm] (Mask aperture)	15	0.88	1.28
	14	0.89	1.22
	13	0.94	1.08
	12	0.95	1.02
	11	1.01	0.97
	10	1.06	0.96
	9	1.15	1.03
	8	1.18	1.05
	7	1.20	1.05
	6	1.24	1.15
	5	1.39	1.84
	4	1.54	2.12
	3	1.63	2.80

Insertion loss σ [dB]		Received fiber	
		SI-MMF	UHNA1
Core width [μm] (Mask aperture)	15	0.03	0.24
	14	0.03	0.43
	13	0.04	0.25
	12	0.03	0.08
	11	0.03	0.11
	10	0.02	0.06
	9	0.04	0.15
	8	0.05	0.15
	7	0.11	0.18
	6	0.03	0.05
	5	0.09	0.25
	4	0.09	0.10
	3	0.05	0.08

F. 合計最低接続損失を示すコア設計情報[関連節：4.5.2. ポリマー光導波路と SMF, SiO_x 光導波路間の合計接続損失(SSC 構造無)]

SSC 構造を適用しない、導光方向で均一なコア幅を有するポリマー光導波路に対して SMF ならびに SiO_x 光導波路との接続損失を検討した際に得られた、ポリマー光導波路と SMF, SiO_x 光導波路との合計接続損失を最低にするポリマー光導波路のコア幅を屈折率分布別に Table F-1, Table F-2, Table F-3 に示す。

Table F-1. 最低合計接続損失を示す SI 型ポリマー光導波路のコア幅

Core width @lowest loss (μm)	Δ (%)																			
	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1	1.1	1.2	1.3	1.4	1.5	1.6	1.7	1.8	1.9	2
Core height (μm)	2	10	10	10	9	8	6	6	5	4	4	3	3	3	2	2	2	2	2	2
	3	15	12	9	7	6	5	4	4	3	3	3	2	2	2	2	2	2	2	2
	4	15	10	7	6	5	4	4	3	3	3	2	2	2	2	2	2	2	2	2
	5	15	9	7	6	5	4	4	3	3	2	2	2	2	2	2	2	5	5	5
	6	13	8	6	5	4	4	4	3	3	2	2	2	2	2	5	5	5	5	5
	7	12	8	6	5	4	4	4	3	3	3	2	2	2	5	5	5	5	5	6
	8	12	7	6	5	4	4	4	3	3	3	2	2	5	5	5	5	5	5	6
	9	11	7	6	5	4	4	4	3	3	3	4	4	5	5	5	5	5	6	6
	10	11	7	6	5	4	4	4	3	3	3	4	4	5	5	5	5	5	6	6
	11	10	7	5	5	4	4	4	3	3	4	4	4	5	5	5	5	5	6	6
	12	10	7	5	5	4	4	4	3	3	4	4	5	5	5	5	5	5	6	6
	13	10	7	5	5	4	4	4	3	4	4	4	5	5	5	5	5	5	6	6
	14	10	7	5	5	4	4	4	4	4	4	4	5	5	5	5	5	5	6	6
	15	9	6	5	5	4	4	4	4	4	4	4	5	5	5	5	5	6	6	6

Table F-2. 最低合計接続損失を示す水平 GI 型ポリマー光導波路のコア幅

core width (@lowest loss (μm))	Δ (%)																			
	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1	1.1	1.2	1.3	1.4	1.5	1.6	1.7	1.8	1.9	2
Core height (μm)	2	14	10	10	10	12	11	9	8	7	6	6	5	5	4	4	3	3	3	2
	3	15	15	14	11	9	8	7	6	5	5	4	4	3	3	3	2	2	2	2
	4	15	15	12	10	8	7	6	5	5	4	4	3	3	3	2	2	2	2	2
	5	15	14	11	9	7	6	6	5	5	4	3	3	3	2	2	2	2	2	2
	6	15	13	10	8	7	6	6	5	5	4	3	3	3	2	2	2	2	10	10
	7	15	12	9	8	7	6	6	5	5	4	4	3	7	8	2	9	9	10	10
	8	15	12	9	8	7	6	6	5	5	5	6	7	7	8	8	9	9	10	10
	9	15	11	9	7	7	6	6	5	5	6	6	7	8	8	9	9	9	10	10
	10	15	11	9	7	7	6	6	6	6	6	7	8	8	9	9	10	10	10	11
	11	15	11	8	7	7	6	6	6	6	7	7	8	8	9	9	10	10	10	11
	12	15	10	8	7	6	6	6	6	6	7	7	8	8	9	9	10	10	10	11
	13	15	10	8	7	6	6	6	6	6	7	7	8	8	9	9	10	10	10	11
	14	15	10	8	7	6	6	6	6	6	7	7	8	8	9	9	10	10	10	11
	15	15	10	8	7	6	6	6	6	6	7	7	8	8	9	9	10	10	10	11

©2024 Optica

Table F-3. 最低合計接続損失を示す全周 GI 型ポリマー光導波路のコア幅

core width (@lowest loss (μm))	Δ (%)																			
	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1	1.1	1.2	1.3	1.4	1.5	1.6	1.7	1.8	1.9	2
Core height (μm)	2	14	14	10	10	10	10	10	10	10	8	7	7	6	6	5	5	4	4	4
	3	14	15	15	15	12	11	9	8	7	7	6	5	5	4	4	3	3	3	2
	4	15	15	15	12	10	9	8	7	6	5	5	4	4	3	3	3	2	2	2
	5	15	15	14	11	9	8	7	6	6	5	4	4	3	3	3	2	2	2	2
	6	15	15	12	10	8	7	7	6	5	5	4	4	3	3	3	2	2	2	2
	7	15	15	11	9	8	7	6	6	5	5	4	4	3	3	2	2	2	2	2
	8	15	14	11	9	8	7	6	6	5	5	4	4	3	3	2	2	2	2	2
	9	15	14	10	9	7	7	6	6	5	5	4	4	3	3	2	2	2	2	9
	10	15	13	10	8	7	7	6	6	5	5	5	6	7	7	8	8	9	9	10
	11	15	12	10	8	7	7	6	6	5	5	5	6	7	7	8	8	9	9	10
	12	15	12	9	8	7	7	6	6	6	6	6	7	7	8	8	9	9	10	10
	13	15	12	9	8	7	7	6	6	6	6	7	7	8	8	9	9	9	10	10
	14	15	12	9	8	7	7	6	6	6	6	7	7	8	8	9	9	10	10	10
	15	15	11	9	8	7	7	6	6	6	7	7	8	8	8	9	9	10	10	10

©2024 Optica

G. 合計最低接続損失を示すコア設計情報[関連節：4.5.3. ポリマー光導波路と SMF, SiO_x 光導波路間の合計接続損失(SSC 構造有)]

SSC 構造を適用した際に、ポリマー光導波路と SMF ならびに SiO_x 光導波路の接続損失を検討した際に得られた、ポリマー光導波路と SMF, SiO_x 光導波路との合計接続損失を最低にするポリマー光導波路のコア幅を、接続対象および屈折率分布別に Table G-1～F-6 に示す。

Table G-1. 最低合計接続損失を示す SI 型ポリマー光導波路のコア幅(SMF 側)

core width (@lowest loss (μm))	Δ (%)																			
	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1	1.1	1.2	1.3	1.4	1.5	1.6	1.7	1.8	1.9	2
Core height (μm)	2	10	10	10	10	8	7	5	4	3	14	2	14	14	14	14	14	14	14	14
	3	15	13	10	8	6	4	3	2	2	2	2	2	2	11	11	11	11	12	12
	4	15	11	8	7	4	3	2	2	2	2	2	11	11	11	11	11	12	12	12
	5	15	10	8	7	3	3	2	2	2	11	11	11	11	11	11	12	12	12	12
	6	15	9	8	8	9	2	2	2	11	11	11	11	11	11	12	12	12	12	12
	7	14	9	8	8	9	10	10	10	11	11	11	11	11	11	12	12	12	12	12
	8	13	9	8	8	9	10	10	10	11	11	11	11	11	11	12	12	12	12	12
	9	12	8	8	9	9	10	10	11	11	11	11	11	11	12	12	12	12	12	12
	10	12	8	8	9	9	10	10	11	11	11	11	11	11	12	12	12	12	12	12
	11	11	8	8	9	9	10	10	11	11	11	11	11	11	12	12	12	12	12	12
	12	11	8	8	9	10	10	10	11	11	11	11	11	12	12	12	12	12	12	12
	13	11	8	8	9	10	10	10	11	11	11	11	11	12	12	12	12	12	12	12
	14	11	8	8	9	10	10	10	11	11	11	11	11	12	12	12	12	12	12	12
	15	11	8	8	9	10	10	11	11	11	11	11	11	12	12	12	12	12	12	12

Table G-2. 最低合計接続損失を示す SI 型ポリマー光導波路のコア幅(SiO_x 光導波路側)

core width (@lowest loss (μm))	Δ (%)																			
	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1	1.1	1.2	1.3	1.4	1.5	1.6	1.7	1.8	1.9	2
Core height (μm)	2	10	10	10	9	7	6	6	5	5	5	4	4	4	4	3	3	3	3	3
	3	15	11	8	7	6	5	5	4	4	4	3	3	3	3	3	3	3	3	3
	4	14	9	7	6	5	5	4	4	4	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
	5	13	8	6	5	5	4	4	4	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
	6	12	8	6	5	5	4	4	4	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
	7	11	7	6	5	4	4	4	4	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
	8	11	7	6	5	4	4	4	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
	9	10	7	5	5	4	4	4	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
	10	10	7	5	5	4	4	4	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
	11	9	6	5	4	4	4	4	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
	12	9	6	5	4	4	4	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
	13	9	6	5	4	4	4	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
	14	9	6	5	4	4	4	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
	15	9	6	5	4	4	4	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3

Table G-3. 最低合計接続損失を示す水平 GI 型ポリマー光導波路のコア幅(SMF 側)

core width (@lowest loss (μm))	Δ (%)																			
	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1	1.1	1.2	1.3	1.4	1.5	1.6	1.7	1.8	1.9	2
Core height (μm)	2	14	14	14	14	13	11	8	6	5	4	3	3	2	2	2	2	2	14	14
	3	15	15	15	12	10	6	5	4	3	3	2	2	2	2	2	2	2	2	2
	4	15	15	13	10	7	5	4	3	3	2	2	2	2	2	2	2	2	2	15
	5	15	15	12	10	6	4	3	3	2	2	2	2	2	2	15	15	15	15	15
	6	15	14	11	10	12	4	3	2	2	2	2	2	15	15	15	15	15	15	15
	7	15	14	11	11	13	15	15	2	2	2	15	15	15	15	15	15	15	15	15
	8	15	13	11	12	14	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15
	9	15	13	11	12	14	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15
	10	15	13	12	13	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15
	11	15	13	12	13	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15
	12	15	12	12	13	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15
	13	15	12	12	14	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15
	14	15	12	12	14	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15
	15	15	12	12	14	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15

Table G-4. 最低合計接続損失を示す水平 GI 型ポリマー光導波路のコア幅(SiO_x 光導波路側)

core width (@lowest loss (μm))	Δ (%)																			
	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1	1.1	1.2	1.3	1.4	1.5	1.6	1.7	1.8	1.9	2
Core height (μm)	2	14	10	10	10	12	11	9	8	8	7	6	6	6	5	5	5	5	5	5
	3	15	15	14	11	9	8	7	7	6	6	6	5	5	5	5	4	4	4	4
	4	15	15	12	9	8	7	7	6	6	5	5	5	5	5	4	4	4	4	4
	5	15	14	10	8	7	7	6	6	5	5	5	5	4	4	4	4	4	4	4
	6	15	12	9	8	7	6	6	5	5	5	5	5	4	4	4	4	4	4	4
	7	15	12	9	8	7	6	6	5	5	5	5	4	4	4	4	4	4	4	4
	8	15	11	9	7	6	6	6	5	5	5	5	4	4	4	4	4	4	4	4
	9	15	10	8	7	6	6	5	5	5	5	4	4	4	4	4	4	4	4	4
	10	15	10	8	7	6	6	5	5	5	5	4	4	4	4	4	4	4	4	4
	11	15	10	8	7	6	6	5	5	5	5	4	4	4	4	4	4	4	4	4
	12	14	10	8	7	6	6	5	5	5	5	4	4	4	4	4	4	4	4	4
	13	14	9	8	7	6	5	5	5	5	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
	14	13	9	7	7	6	5	5	5	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
	15	13	9	7	6	6	5	5	5	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4

Table G-5. 最低合計接続損失を示す全周 GI 型ポリマー光導波路のコア幅(SMF 側)

core width (@lowest loss (μm))	Δ (%)																			
	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1	1.1	1.2	1.3	1.4	1.5	1.6	1.7	1.8	1.9	2
Core height (μm)	2	14	14	14	14	14	14	14	14	14	14	5	4	4	3	3	3	3	2	2
	3	15	15	15	15	13	11	9	6	5	4	4	3	3	2	2	2	2	2	2
	4	15	15	15	13	11	8	6	4	4	3	3	2	2	2	2	2	2	2	2
	5	15	15	15	12	10	6	5	4	3	3	2	2	2	2	2	2	2	2	2
	6	15	15	13	11	9	5	4	3	3	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
	7	15	15	13	10	9	5	4	3	2	2	2	2	2	2	2	2	2	15	15
	8	15	15	12	10	11	4	3	3	2	2	2	2	2	2	2	15	15	15	15
	9	15	15	12	11	12	13	3	3	2	2	2	2	2	15	15	15	15	15	15
	10	15	14	12	11	12	14	15	15	2	2	2	2	15	15	15	15	15	15	15
	11	15	14	12	11	13	14	15	15	2	2	15	15	15	15	15	15	15	15	15
	12	15	14	12	12	13	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15
	13	15	13	12	12	13	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15
	14	15	13	12	12	14	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15
	15	15	13	12	12	14	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15

Table G-6. 最低合計接続損失を示す全周 GI 型ポリマー光導波路のコア幅(SiO_x 光導波路側)

core width (μm) (lowest loss)	Δ (%)																			
	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1	1.1	1.2	1.3	1.4	1.5	1.6	1.7	1.8	1.9	2
Core height (μm)	2	14	10	10	10	10	10	10	10	10	10	8	7	7	7	6	6	6	6	5
	3	14	15	15	14	12	11	9	8	8	7	7	6	6	6	6	5	5	5	5
	4	15	15	15	12	10	9	8	7	7	6	6	6	5	5	5	5	5	4	4
	5	15	15	13	11	9	8	7	7	6	6	6	5	5	5	5	5	5	4	4
	6	15	15	12	10	8	7	7	6	6	6	5	5	5	5	5	5	4	4	4
	7	15	14	11	9	8	7	7	6	6	5	5	5	5	5	5	5	4	4	4
	8	15	13	10	9	8	7	6	6	6	5	5	5	5	5	5	5	4	4	4
	9	15	13	10	8	7	7	6	6	5	5	5	5	5	5	5	5	4	4	4
	10	15	12	9	8	7	7	6	6	5	5	5	5	5	5	5	5	4	4	4
	11	15	12	9	8	7	6	6	6	5	5	5	5	5	5	5	5	4	4	4
	12	15	11	9	8	7	6	6	6	5	5	5	5	5	5	5	5	5	4	4
	13	15	11	9	8	7	6	6	6	5	5	5	5	5	5	5	5	5	4	4
	14	15	11	9	7	7	6	6	6	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
	15	15	11	9	7	7	6	6	6	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5

H. ポリマー光導波路-SiO_x 光導波路間接続損失の温度依存性[関連節：5.3.3. ポリマー光導波路-SiO_x 光導波路間接続損失の温度依存性]

異なるコアサイズ, 屈折率分布を有するポリマー光導波路に対して, SiO_x 光導波路との接続損失を検討した結果を Table H-1 に示す。

Table H-1 異なる温度環境下での SiO_x 光導波路とポリマー光導波路の接続損失

25 °C

Core size (μm)	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
SI	2.9	2.9	3.3	3.7	4.3	4.8	5.3	5.8	6.3	6.8	7.3	7.7
horizontal GI	4.0	3.3	3.3	3.5	3.8	4.1	4.5	4.9	5.2	5.6	5.9	6.2
square GI	6.3	4.2	3.6	3.4	3.4	3.6	3.8	4.0	4.2	4.4	4.6	4.8
circular GI	3.4	3.5	3.6	3.7	3.7	3.7	3.7	3.7	3.7	3.7	3.7	3.7

50 °C

Core size (μm)	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
SI	2.3	2.5	3.0	3.5	4.0	4.6	5.2	5.7	6.2	6.7	7.2	7.6
horizontal GI	3.1	2.7	2.8	3.1	3.5	3.8	4.2	4.6	5.0	5.3	5.7	6.0
square GI	4.6	3.3	2.9	2.9	3.0	3.2	3.4	3.6	3.9	4.1	4.3	4.5
circular GI	2.8	3.0	3.1	3.2	3.2	3.2	3.2	3.2	3.2	3.2	3.2	3.2

75 °C

Core size (μm)	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
SI	2.0	2.3	2.7	3.3	3.9	4.5	5.0	5.6	6.1	6.6	7.1	7.5
horizontal GI	2.5	2.3	2.5	2.8	3.2	3.6	4.0	4.4	4.8	5.2	5.5	5.9
square GI	3.6	2.7	2.5	2.5	2.7	2.9	3.1	3.4	3.6	3.8	4.0	4.3
circular GI	2.4	2.6	2.7	2.8	2.8	2.8	2.8	2.8	2.8	2.8	2.8	2.8

100 °C

Core size (μm)	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
SI	1.7	2.1	2.6	3.2	3.8	4.4	4.9	5.5	6.0	6.5	7.0	7.5
horizontal GI	2.1	2.0	2.3	2.7	3.1	3.5	3.9	4.3	4.7	5.0	5.4	5.7
square GI	2.8	2.2	2.1	2.2	2.4	2.6	2.9	3.1	3.4	3.6	3.8	4.0
circular GI	2.1	2.3	2.4	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5

125 °C

Core size (μm)	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
SI	1.5	1.9	2.5	3.1	3.7	4.3	4.9	5.4	6.0	6.5	7.0	7.4
horizontal GI	1.7	1.8	2.1	2.5	2.9	3.3	3.7	4.2	4.5	4.9	5.3	5.6
square GI	2.3	1.9	1.9	2.0	2.2	2.5	2.7	2.9	3.2	3.4	3.6	3.8
circular GI	1.9	2.1	2.2	2.2	2.2	2.3	2.3	2.3	2.3	2.3	2.3	2.3

150 °C

Core size (μm)	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
SI	1.3	1.8	2.4	3.0	3.6	4.2	4.8	5.4	5.9	6.4	6.9	7.4
horizontal GI	1.5	1.6	2.0	2.4	2.8	3.2	3.6	4.0	4.4	4.8	5.2	5.5
square GI	1.9	1.6	1.7	1.8	2.1	2.3	2.5	2.8	3.0	3.2	3.5	3.7
circular GI	1.7	1.9	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0

I. 150 °C での SMF-ポリマー光導波路間の最低接続損失[関連節：5.5.1. 最適構造の算出方法]

150 °C での異なる屈折率分布， Δ のポリマー光導波路が示す SMF との最低接続損失と，その損失を示すコア幅・コア高さを Table I-1 に示す。

Table I-1 各屈折率分布， Δ の時に得られる SMF との最低接続損失，ならびにその損失を示すポリマー光導波路コア幅・コア高さ(150 °C)

Δ (%)	Refractive index profile					
	SI		Horizontal GI		Square GI	
	Lowest loss (dB)	core width (μm) × core height (μm)	Lowest loss (dB)	core width (μm) × core height (μm)	Lowest loss (dB)	core width (μm) × core height (μm)
0.1	2.3	4×4	2.5	6×4	2.8	6×6
0.2	1.9	4×4	2.1	6×4	2.3	6×6
0.3	1.5	3×4	1.7	5×4	1.9	6×5
0.4	1.3	3×4	1.5	5×3	1.6	5×5
0.5	1.0	3×3	1.2	5×3	1.3	5×5
0.6	0.8	3×3	1.0	5×3	1.1	5×5
0.7	0.7	3×3	0.8	5×3	1.0	5×5
0.8	0.6	3×3	0.7	4×3	0.9	5×4
0.9	0.5	3×3	0.6	4×3	0.7	4×4
1.0	0.4	3×3	0.5	4×3	0.6	4×4
1.1	0.3	3×3	0.4	4×3	0.5	4×4
1.2	0.3	3×3	0.4	4×3	0.5	4×4
1.3	0.3	3×3	0.3	4×3	0.4	4×4
1.4	0.2	3×3	0.3	4×3	0.3	4×4
1.5	0.2	3×3	0.2	4×3	0.3	4×4
1.6	0.2	3×3	0.2	4×3	0.3	4×4
1.7	0.2	3×3	0.2	4×3	0.2	4×4
1.8	0.1	3×3	0.2	4×3	0.2	4×4
1.9	0.1	3×3	0.1	4×3	0.2	4×4
2.0	0.1	3×3	0.1	4×3	0.2	4×4

Table I-1 と Table 4-3 の比較より，温度変化の影響によって最低接続損失とその時の最適コア設計が異なっていることがわかる。これは，温度上昇によりポリマー光導波路の Δ が増大することで，ポリマー光導波路コアが示す光強度分布が変化したため，SMF との接続損失が最低となるコア設計が変化した為である。

つづいて，150 °C での異なる屈折率分布， Δ のポリマー光導波路が示す SiO_x 光導波路との最低接続損失と，その損失を示すコア幅・コア高さを Table I-2 に示す。

Table I-2 各屈折率分布, Δ の時に得られる SiO_x 光導波路との最低接続損失, ならびにその損失を示すポリマー光導波路コア幅・コア高さ(150 °C)

	Refractive index profile					
	SI		Horizontal GI		Square GI	
Δ (%)	Lowest loss (dB)	core width (μm) × core height (μm)	Lowest loss (dB)	core width (μm) × core height (μm)	Lowest loss (dB)	core width (μm) × core height (μm)
0.1	2.3	4×4	2.5	6×4	2.8	6×6
0.2	1.9	4×4	2.1	6×4	2.3	6×6
0.3	1.5	3×4	1.7	5×4	1.9	6×5
0.4	1.3	3×4	1.5	5×3	1.6	5×5
0.5	1.0	3×3	1.2	5×3	1.3	5×5
0.6	0.8	3×3	1.0	5×3	1.1	5×5
0.7	0.7	3×3	0.8	5×3	1.0	5×5
0.8	0.6	3×3	0.7	4×3	0.9	5×4
0.9	0.5	3×3	0.6	4×3	0.7	4×4
1.0	0.4	3×3	0.5	4×3	0.6	4×4
1.1	0.3	3×3	0.4	4×3	0.5	4×4
1.2	0.3	3×3	0.4	4×3	0.5	4×4
1.3	0.3	3×3	0.3	4×3	0.4	4×4
1.4	0.2	3×3	0.3	4×3	0.3	4×4
1.5	0.2	3×3	0.2	4×3	0.3	4×4
1.6	0.2	3×3	0.2	4×3	0.3	4×4
1.7	0.2	3×3	0.2	4×3	0.2	4×4
1.8	0.1	3×3	0.2	4×3	0.2	4×4
1.9	0.1	3×3	0.1	4×3	0.2	4×4
2.0	0.1	3×3	0.1	4×3	0.2	4×4

Table I-2 より, SiO_x 光導波路との接続損失は最低接続損失が温度上昇に伴い改善している様子が見られており, SMF との接続損失で見られた挙動とは異なる. これは温度上昇によってポリマー光導波路の Δ が増大した為, SiO_x 光導波路とのモードプロファイルがマッチングする方向に働いたためである.

J. SMF および SiO_x 光導波路の最低合計接続損失(25 °C, 150 °C の合計) とその時のコア設計[関連節: 5.5.1. 最適構造の算出方法]

Table 5-20 と同じ手法を用いて, SMF および SiO_x 光導波路の最低合計接続損失(25 °C, 150 °C の合計) とその時のコア設計について, 水平 GI 型, ならびに矩形 GI 型ポリマー光導波路に対して計算した結果を Table J-1, J-2 に示す.

Table J-1 水平 GI 型ポリマー光導波路と SMF および SiO_x 光導波路の最低合計接続損失(25 °C, 150 °C の合計) とその時のコア設計

Δ (%)	Total coupling loss (dB)		Polymer waveguide core design		
	SMF	SiO _x waveguide	Core width (μm) [SMF]	Core width (μm) [SiO _x waveguide]	Core height (μm)
0.10	1.6	12.8	15	11	9
0.20	0.4	9.0	14	9	7
0.30	0.3	6.9	13	8	6
0.40	0.5	5.5	14	7	5
0.50	0.6	4.5	15	6	5
0.60	0.8	3.9	15	6	5
0.70	0.9	3.3	15	5	5
0.80	1.1	2.9	15	5	5
0.90	1.4	2.3	2	5	4
1.0	1.5	2.0	2	5	4
1.1	1.6	1.6	2	5	3
1.2	1.8	1.4	2	5	3
1.3	2.0	1.2	2	5	3
1.4	1.8	1.4	2	5	2
1.5	2.0	1.2	2	5	2
1.6	2.2	1.1	2	5	2
1.7	2.4	0.9	2	5	2
1.8	2.7	0.8	2	4	2
1.9	3.0	0.7	14	4	2
2.0	3.1	0.6	14	4	2

Table J-2 矩形 GI 型ポリマー光導波路と SMF および SiO_x 光導波路の最低合計接続損失(25 °C, 150 °C の合計) とその時のコア設計

Δ (%)	Total coupling loss (dB)		Polymer waveguide core design		
	SMF	SiO _x waveguide	Core width (μm) [SMF]	Core width (μm) [SiO _x waveguide]	Core height (μm)
0.10	1.8	13.0	15	11	15
0.20	0.5	9.3	14	9	11
0.30	0.3	7.2	13	8	9
0.40	0.4	5.9	13	7	8
0.50	0.5	4.9	15	6	6
0.60	0.6	4.2	15	6	8
0.70	0.9	3.5	15	6	7
0.80	0.9	3.2	15	5	8
0.90	1.2	2.6	2	5	6
1.0	1.3	2.2	2	5	6
1.1	1.4	1.9	2	5	5
1.2	1.5	1.7	2	5	4
1.3	1.6	1.5	2	5	4
1.4	1.8	1.3	2	5	4
1.5	1.7	1.4	2	5	3
1.6	1.8	1.2	2	5	3
1.7	2.1	1.0	2	5	3
1.8	2.3	0.9	2	4	3
1.9	1.7	1.4	2	5	2
2.0	1.8	1.2	2	5	2

Table J-1, Table J-2 より, GI 型ポリマー光導波路では Δ の増大とともに, 最適なコア高さは小さくなっていき, 特に $\Delta=2.0\%$ では $2\mu\text{m}$ と, SI 型ポリマー光導波路の値と比較して小さい. GI 型ポリマー光導波路は, コア内の屈折率分布の存在によって特に Δ が大きい領域で光強度分布がコア中心に集まっているため, コアサイズ拡大では特に SMF の大きい MFD とのマッチングが難しい. そのため, コアサイズ縮小に伴う光強度分布の急速な拡大によって, SMF との光強度分布のマッチングを確保し, 接続損失を低下させている. 実際, Table J-1, J-2 では, SMF との合計接続損失を最小にするコア幅は小さくなっており, コア幅方向についてもコア幅縮小に伴う急速な光強度分布の拡大を活用する必要があることが判明した.

K. アディアバティック損失を最小にするポリマー光導波路の最適コア設計[関連節：5.6.3. 異なる屈折率分布を有するポリマー光導波路のアディアバティック結合損失]

1~2%の Δ に対してコア幅, コア高さを変化させたときのポリマー光導波路の TE₁₁ モードへのアディアバティック結合損失 $L_{\text{adi TE}}$ を計算し, 各 Δ で結合損失が最小となる時の損失値

とコア設計を抽出してまとめた．水平 GI 型ポリマー光導波路，矩形 GI 型ポリマー光導波路の結果をそれぞれ Table K-1, Table K-2 に示す．なお，矩形 GI 型ポリマー光導波路では，コア内の屈折率勾配の存在に伴う実効屈折率の低下に伴い， $\Delta=1.0\%$ ， 1.1% 時に小コアサイズ時に十分な光閉じ込めが得られずに計算結果が出力されないコア設計が存在した為，計算結果を除外した．

Table K-1 水平 GI 型ポリマー光導波路と Si 光導波路間のアディバティック結合損失の最低値とその時のポリマー光導波路コア設計

Δ (%)	lowest loss (dB)	core width $\times$ core height (μm)
1.0	2.29	5×4
1.1	0.98	3×3
1.2	0.84	3×3
1.3	0.80	3×3
1.4	0.77	3×3
1.5	0.70	3×3
1.6	0.64	3×3
1.7	0.57	3×3
1.8	0.52	3×3
1.9	0.45	3×3
2.0	0.37	3×3

Table K-2 矩形 GI 型ポリマー光導波路と Si 光導波路間のアディバティック結合損失の最低値とその時のポリマー光導波路コア設計

Δ (%)	lowest loss (dB)	core width $\times$ core height (μm)
1.0	N/A	N/A
1.1	N/A	N/A
1.2	0.97	7×3
1.3	0.87	6×3
1.4	0.92	3×3
1.5	0.80	3×3
1.6	0.76	3×3
1.7	0.79	3×3
1.8	0.77	3×3
1.9	0.76	3×3
2.0	0.74	3×3

L. 150 °C におけるアディアバティック損失を最小にするポリマー光導波路の最適コア設計 [関連節：5.6.4. アディアバティック結合損失の温度依存性]

SI 型，水平 GI 型，矩形 GI 型ポリマー光導波路に対して，150 °C における Si 光導波路間のアディアバティック結合損失の最低値とその時のポリマー光導波路コア設計を抽出した結果を，Table L-1，Table L-2，Table L-3 にそれぞれ示す．

Table L-1 SI 型ポリマー光導波路と Si 光導波路間のアディアバティック結合損失の最低値とその時のポリマー光導波路コア設計(150 °C)

Δ (%)	lowest loss (dB)	core width × core height (μm)
1.0	0.23	3 × 3
1.1	0.19	3 × 3
1.2	0.16	3 × 3
1.3	0.13	3 × 3
1.4	0.11	3 × 3
1.5	0.10	3 × 3
1.6	0.11	3 × 3
1.7	0.10	3 × 3
1.8	0.10	3 × 3
1.9	0.10	3 × 3
2.0	0.09	3 × 3

Table L-2 水平 GI 型ポリマー光導波路と Si 光導波路間のアディアバティック結合損失の最低値とその時のポリマー光導波路コア設計(150 °C)

Δ (%)	lowest loss (dB)	core width × core height (μm)
1.0	0.25	4 × 3
1.1	0.20	4 × 3
1.2	0.16	3 × 3
1.3	0.12	3 × 3
1.4	0.11	3 × 3
1.5	0.09	3 × 3
1.6	0.08	3 × 3
1.7	0.06	3 × 3
1.8	0.05	3 × 3
1.9	0.03	3 × 3
2.0	0.02	3 × 3

Table L-3 矩形 GI 型ポリマー光導波路と Si 光導波路間のアディアバティック結合損失の最低値とその時のポリマー光導波路コア設計(150 °C)

Δ (%)	lowest loss (dB)	core width $\times$ core height (μm)
1.0	0.37	3×3
1.1	0.31	3×3
1.2	0.30	3×3
1.3	0.31	3×3
1.4	0.30	3×3
1.5	0.27	3×3
1.6	0.24	3×3
1.7	0.22	3×3
1.8	0.18	3×3
1.9	0.16	3×3
2.0	0.13	3×3

謝辞

本論文は、著者が慶應義塾大学大学院理工学研究科後期博士課程在学中に、同大学理工学部物理情報工学科の石樽崇明教授の指導の下で行われた研究の成果をまとめたものです。また本研究の一部は、2022 年度及び 2023 年度「慶應義塾先端科学研究センター(KLL)後期博士課程研究助成金」の支援のもとで行われています。

本論文の主査であり、本研究の直接的なご指導を賜りました石樽崇明教授に深く感謝を申し上げます。著者が在学中にも石樽先生にお世話になっておりましたが、社会人になった後も温かく研究室に受け入れていただき、厚く御礼を申し上げます。学部時代から 15 年以上の付き合いとなっておりますが、常にポジティブかつ的確なアドバイスをいただけており、本当に人生の師匠と呼べる存在です。また、国内外の学会に数多く参加させていただいたことは、私にとって非常に貴重な体験であり、成長の機会となりました。特に、日本の北端および南端で参加した学会では、半分旅行のような形となり、最高の思い出となっています。博士課程最終年度には講演の依頼を頂けるようになったのも、先生の指導のおかげです。今後も、石樽先生から教わったことを大切にしつつ、プロフェッショナルとなれるように努力していきます。また委員会活動含めてお世話になる機会があると思いますが、どうぞよろしくお願いいたします。

本論文の副査である慶應義塾大学理工学部電気情報工学科の津田裕之教授、同大学同学部物理学科の渡邊紳一教授、および同大学同学部物理情報工学科の二瓶栄輔准教授には、本論文の草稿をご精読いただき、また、公聴会や最終審査会を通して重要なお指摘やご助言をいただきました。お忙しい中、副査を引き受けていただいたことにこの場を借りて厚く御礼申し上げます。

住友ベークライト株式会社入社以来、会社での研究開発の進め方についてご指導ご鞭撻をいただきました皆様にこの場を借りて厚く御礼申し上げます。特に後期博士課程への進学、修了を後押し頂きました中西久雄氏、河口竜巳氏、金田研一氏、そして直属の上長として常日頃温かく見守っていただき、研究内容について議論いただきました兼田幹也氏に御礼申し上げます。

本研究に関連して、背景技術および周辺技術の専門家として深く議論させていただきました、エレクトロニクス実装学会光回路実装技術委員会ならびにロードマップ委員会の皆様に感謝申し上げます。委員会への参加を通じて、光業界への理解がいっそう深まりました。深く感謝申し上げます。

著者は石樽研究室に学部、修士時代を含めて合計 6 年間所属しておりましたが、その期間に石樽研究室に在籍していた学生の皆様には大変お世話になりました。

後期博士課程の社会人学生として入学したときから、親身に接していただけた林联宇氏、金野裕介氏、高橋諄向氏、長谷龍二氏、上原花織氏、小野真之介氏、末森大幹氏、関谷健太郎氏、中村友氏、山口優斗氏、尹源甜氏、Wasiela Clément 氏、東昂生氏、至風氏、一之瀬凌

斗氏，小野皓平氏，近藤史将氏，野中洸佑氏，Ruben Paulet 氏，市塚智大氏，伊藤杏氏，酒井聖哉氏，土信田隼丞氏，中村達哉氏，若林拓未氏，厚味恒毅氏，金井拓海氏，橘田勇人氏，久保山健氏，谷本歩友氏，中尾愛梨氏，内田昂佑氏，中島陽香氏，松本零央氏，三浦永遠氏，山岸泰輝氏，横山魁氏に感謝いたします。学生生活を通じ，研究内容に関してディスカッションや，雑談等，数多くのコミュニケーションを取っていただき，皆さんの活力ある研究への姿勢に，著者自身も大変刺激を受けました。

また，石樽研究室の博士課程学生であった，矢加部祥氏，高武直弘氏，森本祥江氏，幡井亮介氏，および社会人博士課程学生として著者と同時期に所属していた唐川成弘氏には，研究内容や博士論文執筆に際し数多くの助言をいただきました。深く謝意を表します。

最後に，研究生生活を送るにあたり，すべての面で私を支えていただいた家族に感謝いたします。修士時代より後期博士課程進学を推薦いただいた父の教えや，食事をはじめとして生活をサポートしていただいた母の支えは，本研究を遂行する上でとても大きいものでした。そして，大学と会社への移動を含め，あまり家にいることができなかった著者を辛抱強く支えていただき，時には励ましていただいた妻，そして義両親に心より感謝申し上げます。これから学生生活で培った経験を糧にして，徐々に恩返ししていきたいと思います。

2025 年 1 月 木下 遼太