

学位論文 博士（工学）

ポリマー光導波路・光学素子間光結合の高効率化に関する研究

*Study on Efficient Optical Coupling of Polymer Optical Waveguides
with Other Optical Components*



2020年2月

慶應義塾大学大学院理工学研究科

森本 祥江

目次

第1章 序論.....	1
第2章 高速光インターコネクションのためのポリマー光導波路リンク	15
2.1 緒言	15
2.2 ポリマー光導波路の構造と特性.....	15
2.2.1 伝搬モード数による分類.....	15
2.2.2 コア内屈折率分布による分類	17
2.2.3 ポリマー光導波路の伝搬損失	20
2.2.4 ポリマー光導波路の結合損失	21
2.3 ポリマー光導波路により構成される光リンク	22
2.3.1 マルチモード光リンク	23
2.3.2 シングルモード光リンク.....	29
2.3.3 リンクバジェット	33
2.4 結言	35
第3章 ポリマー光導波路の作製法	38
3.1 緒言	38
3.2 ポリマー光導波路作製のための樹脂材料.....	38
3.3 直接露光法	40
3.3.1 直接露光法による導波路作製工程概略.....	40
3.3.2 導波路作製条件の策定	41
3.3.3 実測及びシミュレーションによる屈折率推定.....	53
3.4 Mosquito 法.....	57
3.4.1 Mosquito 法による導波路作製工程概略.....	57
3.4.2 作製パラメータ	58
3.4.3 マルチモード光導波路作製条件.....	60
3.4.4 シングルモード光導波路作製条件	62
3.5 インプリント法	64

3.5.1	インプリント法による導波路作製工程概略	64
3.5.2	インプリント法によるマルチモード・シングルモード光導波路作製	65
3.6	結言	68
第4章 マルチモードポリマー光導波路の光結合特性		70
4.1	緒言	70
4.2	直線パターンマルチモードポリマー光導波路の光結合特性	70
4.2.1	評価導波路及び評価系	71
4.2.1.1	評価導波路	71
4.2.1.2	結合損失の評価系	74
4.2.2	光リンク内で生じる結合損失の内訳	76
4.3	矩形コア光導波路の45°ミラーを介した光結合特性	78
4.3.1	評価系及び評価導波路	79
4.3.1.1	45°ミラーを含む評価系	79
4.3.1.2	評価導波路	80
4.3.2	Near Field Pattern 評価	81
4.3.3	損失特性評価	81
4.3.4	ミスアライメントトレランス評価	83
4.3.5	シミュレーションとの比較	85
4.4	45°ミラーを介した高効率光結合のための最適導波路構造設計	89
4.4.1	シミュレーション設定	89
4.4.1.1	シミュレーションモデル	89
4.4.1.2	導波路構造パラメータ	91
4.4.2	直角光路変換型光リンクで生じるリンク損失の解析	91
4.4.3	導波路構造パラメータ検討による最適構造設計	96
4.4.3.1	クラッド厚の検討	96
4.4.3.2	コアサイズの検討	97
4.4.3.3	屈折率の検討	99
4.4.3.4	ミラー角度の検討	105

4.4.3.5	屈折率分布の検討.....	110
4.4.3.6	円形 GI 型光導波路の最適構造パラメータ	114
4.5	45° ミラーを有する円形コアマルチモードポリマー光導波路の光学特性.....	115
4.5.1	Mosquito 法による 45° ミラーを介した高効率光結合の実現.....	115
4.5.1.1	光導波路作製及びミラー形成	115
4.5.1.2	ミラー形成後の光学特性評価	119
4.5.1.3	最適構造設計による高効率化の実現.....	124
4.5.2	Mosquito 法による円形 GI 型光導波路の 45° ミラーを介した高速光伝送 ...	126
4.5.2.1	並列マルチチャネル導波路作製及び光学特性評価.....	126
4.5.2.2	マルチチャネル同時信号伝送実験	130
4.6	結言	133
第 5 章	シングルモードポリマー光導波路の光結合特性.....	135
5.1	緒言	135
5.2	シングルモードポリマー光導波路のバットカップリング時の光結合特性.....	135
5.2.1	評価系及び評価導波路	136
5.2.2	Near Field Pattern とモードフィールド径の測定	138
5.2.2.1	矩形 SI 型シングルモード光導波路(直接露光法)の NFP 特性.....	138
5.2.2.2	円形 GI 型シングルモード光導波路(Mosquito 法)の NFP 特性	140
5.2.3	光損失の測定.....	142
5.2.3.1	挿入損失測定による結合損失推定	142
5.2.3.2	重なり積分による光結合損失の検証.....	146
5.2.4	ミスアライメントトレランスの測定	148
5.2.5	シミュレーションによるシングルモード光導波路の光学特性の検証	150
5.2.5.1	コア形状及びコア内屈折率分布と MFD の関係.....	151
5.2.5.2	結合損失を決定づける導波路構造	155
5.2.5.3	ミスアライメントトレランス	165
5.3	シングルモードポリマー光導波路-シリコン細線導波路間のアディアバティックカ ップリングシミュレーション.....	168
5.3.1	シミュレーション設定	169

5.3.2	アディアバティックカップリング時の結合効率	172
5.4	シングルモードポリマー光導波路の偏波依存光学特性	176
5.4.1	偏波依存光学特性評価対象	177
5.4.1.1	評価する偏波依存光学特性	177
5.4.1.2	評価方法	177
5.4.1.3	評価導波路.....	179
5.4.2	偏波保持特性(偏波消光比)の評価	182
5.4.2.1	矩形 SI 型光導波路(直接露光法)の偏波保持特性	182
5.4.2.2	円形 GI 型光導波路(Mosquito 法)の偏波保持特性.....	183
5.4.2.3	矩形 GI 型光導波路(インプリント法)の偏波保持特性.....	187
5.4.3	偏波依存損失の評価.....	188
5.4.3.1	矩形 SI 型光導波路(直接露光法)の偏波依存損失特性.....	188
5.4.3.2	円形 GI 型光導波路(Mosquito 法)の偏波依存損失特性	192
5.4.3.3	矩形 GI 型光導波路(インプリント法)の偏波依存損失特性.....	194
5.4.3.4	偏波依存損失比較.....	196
5.4.4	偏波依存光学特性のシミュレーション.....	197
5.4.4.1	コア形状の非対称性の偏波依存光学特性への影響.....	197
5.4.4.2	クラッド内屈折率分布の偏波依存光学特性への影響.....	200
5.5	結言	203
第 6 章	結論.....	207
	謝辞.....	210

第1章

序論

情報通信技術(Information Communication Technology : ICT)の発展とともに、我々の社会も発展を遂げてきた。FTTH(Fiber To The Home)が爆発的に普及し、光ファイバ通信が 21 世紀の基幹的通信インフラとなって以来、インターネットを介して授受される情報通信量は飛躍的に増加し、我々の生活にとって不可欠な存在となった。さらにスマートフォンやタブレット端末などのスマートデバイスが広く普及したことにより、SNS(Social Networking Service)や音楽・動画配信サービスといった情報コンテンツを手軽に利用できるようになってきている。高音質、高画質データをより多く、より高速に提供するサービスやアプリケーションの開発が活発化し、利用される情報通信量は著しい増加傾向にある。また、昨今ではこのようなサービスによりユーザから収集した大量の情報(ビッグデータ)の処理・活用や、人工知能(Artificial Intelligence : AI)を介した自動運転やモノのインターネット(Internet of Things : IoT)の普及など、高速情報処理や通信技術を基盤とする ICT 技術が脚光を浴びている。

このような背景から、大規模なシステムで高速演算処理を行うハイパフォーマンスコンピュータ(High Performance Computer : HPC)の様々な分野への応用が進んでいる。これまで注目を集めていた科学技術計算用途にとどまらず、ビジネスにおけるビッグデータ処理など、今後の IoT 時代の到来へ向けて、HPC への要求がより一層高まっていくことが予想される。実際に、近年の HPC の演算性能向上は目覚ましく、2019 年に実行演算性能 1 位のスーパーコンピュータは 148.6 ペタフロップスの処理能力を達成している[1-1]。HPC の演算性能は、10～15 年ごとに 3 桁ずつの成長を遂げていることから、2020～2023 年にはエクサフロップス、2033～2038 年にはゼタフロップススケールに到達すると予想されている。

また、大量のデータの送受信、保存管理は産業活動において非常に重要であり、それを担うデータセンタシステムへの要求は高まるばかりである。特に、近年のクラウドコンピューティングの急速な発展に伴い、データセンタ内での情報の取扱量(IP トラフィック量)の増大が著しく、2019 年度末には 10.4 ZB に達すると予想されている。過去 5 年間にかけての年平均増加率は約 25%に及ぶと予想され[1-2]、今後のデータセンタ市場の持続的な成長が見込まれる。

これらコンピューティング・システムを担う通信技術の発展を支えるのが、光インターコネクタ技術である。従来、コンピューティング・システムに用いられてきた電気配線では、表皮効果により高周波の信号損失が生じるため、高速通信を行う際には伝送距離に制限がかかる。また、伝送容量拡大のために並列伝送を行う際には、クロストークの増大が懸念さ

れるため、配線の高密度化にも制限がある。Fig. 1-1 に、伝送距離及びデータレートごとの、電気リンク及び光リンクの市場導入実績を示す。伝送帯域距離積によって電気リンクと光リンクの棲み分けがなされており、電気リンクが実現できる伝送帯域距離積の限界は 100 Gbps・m であるとされる[1-3]。また、電気配線の場合、配線から発生する熱を処理するための冷却装置の導入が不可欠となる。データセンタ内で消費される電力のうち、装置の冷却にかかる電力が全体の 45% 近くを占めており、低消費電力化に支障をきたしている[1-4]。また、Fig. 1-2 に示した電気・光インターフェースの消費電力動向からわかるように、電気リンクではインターフェースレベルでの省電力化にも制限がある。

以上のように、従来の電気リンクでは、限られた電力にて、現在のスケールアウト・コンピュータの性能を十分に発揮するに足るデータ伝送速度を達成することは困難である。そこで、コンピュータ筐体内部の電気配線を光配線へと置き換える、光インターコネクタ技術に注目が集まることとなった。光インターコネクタ技術の導入により低消費電力を実現しながらも高密度配線化、広帯域通信化を実現できる。

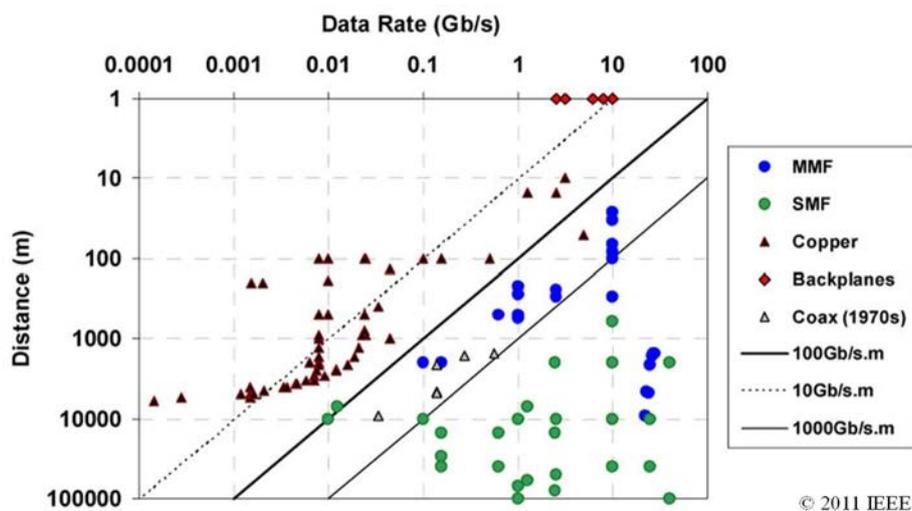


Fig. 1-1 電気・光リンクの市場導入実績[1-3]

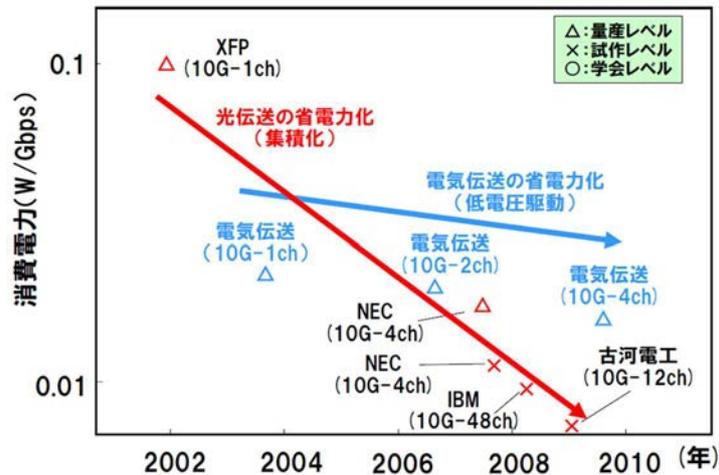


Fig. 1-2 電気・光インターフェースの消費電力動向[1-4]

光インターコネクタ技術の導入が進む HPC 及びデータセンタシステムにおける技術進展について紹介する。

Fig. 1-1 からわかる通り、電気リンクと光リンクは距離に応じて棲み分けがなされるため、光インターコネクタ技術の導入は、比較的長距離のリンクに対して進められていく。長距離リンクに用いられる光配線化技術は光ファイバケーブルである。光ファイバは、主に基幹通信網及び海底ケーブルなど 2 km を超える長距離伝送に用いられているシングル光モードファイバ(SMF)と、300 ~ 500 m 程度の短距離伝送に用いられるマルチモード光ファイバ(MMF)に分類される。SMF には伝送帯域距離積に優れるという利点があるのに対し、MMF を用いた場合には、コア径が SMF に比べ大きいことから、アライメントが簡素化され、さらに低コストな光源(垂直面発光レーザ(Vertical Cavity Surface Emitting Laser : VCSEL)など)の使用が可能であるというコスト面の優位性がある。

HPC では、ラック間(~100 m)及びボード間(~10 m)[1-5]への光インターコネクタ技術導入が進められている。いくつかのスーパーコンピュータでは、アライメントコストの低い MMF による光伝送の実現例があり、低コストで生産性に優れる VCSEL 光源を用いた 850 nm 波長帯によるマルチモード光リンクが導入されつつある。

一方、データセンタに関しても、ボード間以上の距離のリンクに対して MMF の導入が進められてきた。しかし昨今では、データセンタを大規模化し、データを包括的に管理・運用する要求が高まってきたことから、データセンタのアーキテクチャは従来のファットツリー構造から、必要とされる処理能力に応じてスケールアウトが可能なファブリック型へと変遷した[1-6]。これにより、伝送信号の高速化、伝送距離の増大が進み、データセンタ内部であっても、km オーダーの長距離伝送が求められるようになってきた。そのため、100 Gbps を超える伝送容量が必要とされる大規模なデータセンタでは、長距離伝送用のケーブルとして、伝送帯域距離積に優れ、かつケーブル自体が低コストである SMF を採用する傾向にある[1-7]。今後の光インターコネクタ技術導入の際にも、SMF をベースとしたシング

ルモード光リンクが採用される見込みである。

光インターコネクタ技術の実装形態の変遷について述べる。ICT 機器において数 Gbps を超える高速信号伝送を行うためには、各種の信号波形整形回路群が送信側と受信側の回路に搭載される。これら回路による消費電力は信号の高速化に伴い増大する。省電力化のためには、信号劣化を引き起こす電気リンクの配線長をできるだけ短くすることが必要であり、光配線に光信号を入出力するための光電変換部(OE 変換部)を、可能な限り LSI の近くへと配置するよう開発が進められている。光インターコネクタ技術の実装形態は、光インターフェース(IF)の種類や OE 変換部の位置によって、三段階に分けて考えることができる[1-8]。光インターコネクタ技術の各実装形態を Fig. 1-3 に示す。

第1フェーズでは、LSI が実装された配線板(ボード)のエッジ部に OE 変換部を配置しており、ラック間やボード間など比較的長距離(1 m \sim)の通信の光配線化を実現している。第1フェーズについては HPC、データセンタ内ともにすでに導入が進められており、光 IF としてはアクティブ光ケーブル(Active Optical Cable : AOC)が用いられている[1-9]。AOC は、標準化された電気 IF を有する光モジュールと光ファイバケーブル(MMF あるいは SMF)が一体となった素子であり、ボードエッジに配置された電気コネクタに接続する形で実装されている。第2フェーズでは、LSI 近傍に光 IF であるオンボード光エンジンモジュールを配置し、LSI から入出力される電気信号を高密度に OE 変換し、LSI のより近傍まで光配線化を実現する。第3フェーズでは、LSI の極近傍にチップスケールで OE 変換部及び光配線を集積し、光電子集積パッケージとして光回路を実装する形態となっている。LSI と OE 変換部が極近距離に配置されるため、ほぼすべての領域で光伝送を実現でき、電気伝送による信号損失がほとんど生じない設計となる。オンチップ領域の光インターコネクタ技術としては、nm スケールの細線導波路にて光伝送を実現する、シリコンフォトニクス技術の研究開発が盛んである。

すでに実用化がなされている第1フェーズに対し、今後は第2フェーズ、第3フェーズの光インターコネクタ技術実装が技術課題となっている。

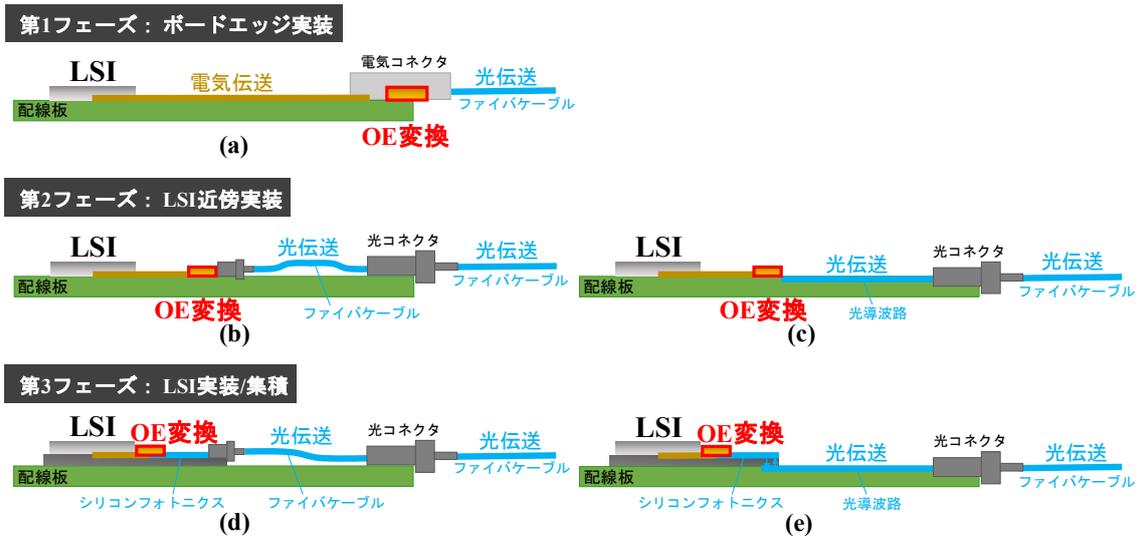


Fig. 1-3 光インターコネクト技術の実装形態

第2フェーズでは、ボードエッジからボード上 OE 変換部までの光配線化技術である、オンボード光インターコネクト技術が必要となる。オンボード光インターコネクト技術としては、Fig. 1-3(b)に示した光ファイバケーブルによるものと、Fig. 1-3(c)に示したボード一体型の光伝送媒体である光導波路によるものが考えられる。

光ファイバによるオンボード光インターコネクトの実現は、従来の光ファイバ技術を応用することで比較的容易に実現できる。しかし、配線余長の処理の問題や、高密度化や配線形態に制限があるといった問題から、より高速化を目指した際には必ずしも最適解であるとはいえない。

光導波路としては、光ファイバと同種の材料を用いた石英ガラス導波路の開発例がある一方で、オンボード光インターコネクト技術としては、加工性やプリント配線板との親和性に優れるポリマー光導波路が主力である。ポリマー光導波路は、ポリマーの特性を活かしたフレキシブル配線により、ボード上の狭所領域・高密度実装領域への配置が可能である点や、プリント配線板への直接整形や後からの複合化が可能という電気基板との複合親和性に特長をもつ[1-8]。さらに、Fig. 1-4のように、ポリマー光導波路は光ファイバでは達成しがたい配線自由度を持ち、電気配線でしか成し得なかった領域をも補完することが期待される。

第3フェーズでもオンボード光インターコネクト技術が必要となるが、ここでの配線は、単なる伝送媒体にとどまらず、オンチップ領域の光配線化技術であるシリコンフォトニクスチップと、オフボード領域の光ファイバケーブルをつなぐインターフェースとしての意味合いを持つ。シリコンフォトニクスチップと光ファイバを直接接続した場合には、両者のスポットサイズの大きな違いにより甚大な結合損失が生じる。そこで、ポリマー光導波路によるスポットサイズ変換器を介在させることで結合効率向上が可能となる。この結合方式

については第2章及び第5章にて詳しく述べる。

以上のことから、オンボード光インターコネクタ技術として、ポリマー光導波路が注目を集めることとなった。マルチモード光リンクが想定される HPC、シングルモード光リンクが想定されるデータセンタ双方に対応するために、マルチモードポリマー光導波路、シングルモードポリマー光導波路双方の実現に期待が寄せられる。ポリマー光導波路の配線長は、マルチチップモジュール(MCM)上の配線(数 cm)、LSI 近傍-ボードエッジの配線(~20 cm)、ボード内全域の配線(~50 cm)、バックプレーン適用想定時(~1 m)などと、実装形態ごとに様々であるが、最長で 1 m 程度をカバーできれば十分とされる。

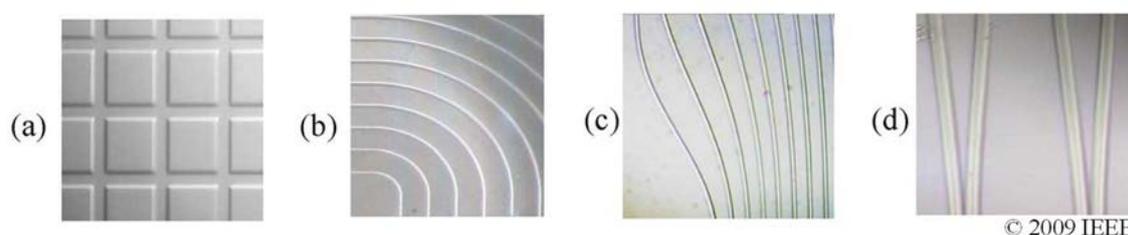


Fig. 1-4 ポリマー光導波路による配線例[1-10]

ポリマー光導波路の開発についても、マルチモードポリマー光導波路を主流として研究開発が盛んとなった。半導体製造プロセスと同様の積層工程により導波路を作製する方法が主流となり、 μm オーダーでのパターン制御を実現し、プリント配線板上にポリマー光導波路を直接形成した例が報告されている[1-11][1-12][1-13]。Fig. 1-5 にポリマー光導波路のプリント配線板への実装例を、Fig. 1-6 にマルチモードポリマー光導波路の研究例をそれぞれ示す。30~70 μm 程度の矩形のコアを有するポリマー光導波路の作製例が報告されている。これらの方法では、コア内屈折率分布が均一である階段屈折率(Step-index : SI)型ポリマー光導波路が作製される。

また、 μm オーダーでの加工精度を活かし、5~10 μm 程度のコアサイズを有するシングルモードポリマー光導波路の開発例も存在する[1-14]。ただし、シングルモードポリマー光導波路の応用にあたっては、シングルモード光リンクでの使用波長帯におけるポリマー材料由来の伝搬損失が懸念事項となっていた。シングルモード光リンクでは、シリコン細線導波路の低損失性が得られやすく、かつ石英光ファイバにて低損失、低分散を実現する C バンド(1.55 μm 帯)あるいは O バンド(1.31 μm 帯)の光を出力する半導体レーザを用いることが想定されている。しかしながら、アクリル樹脂やエポキシ樹脂などに代表される有機材料は、C-H 基由来の分子振動吸収により、波長 1 μm を超える近赤外領域にて高い吸収損失を示す。耐熱性に優位性のあるシリコン樹脂も、長波長帯での吸収損失の十分な低減が得られない例がほとんどであった。

これに対して、日産化学(株)製 有機-無機ハイブリッド樹脂である SUNCONNECT® シリーズは、1550 nm 帯での伝搬損失を他の有機樹脂材料に比べ 1/3 程度にまで低減させることに

成功した[1-15]. 実際には, SUNCONNECT®シリーズを用いて作製されたシングルモードポリマー光導波路が O バンド及び C バンドにて低損失を実現できることがわかり[1-16], ポリマー光導波路の有用性にさらなる期待が高まることとなった. 当材料の特性については第3章にて詳しく述べる.

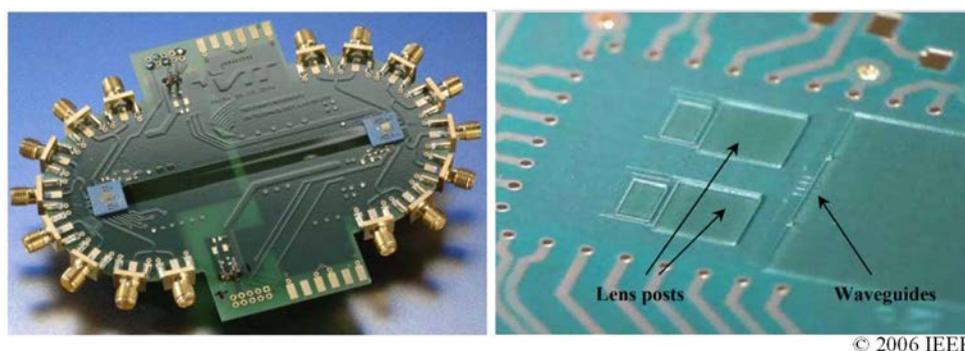


Fig. 1-5 マルチモードポリマー光導波路のプリント配線板への実装例[1-11]

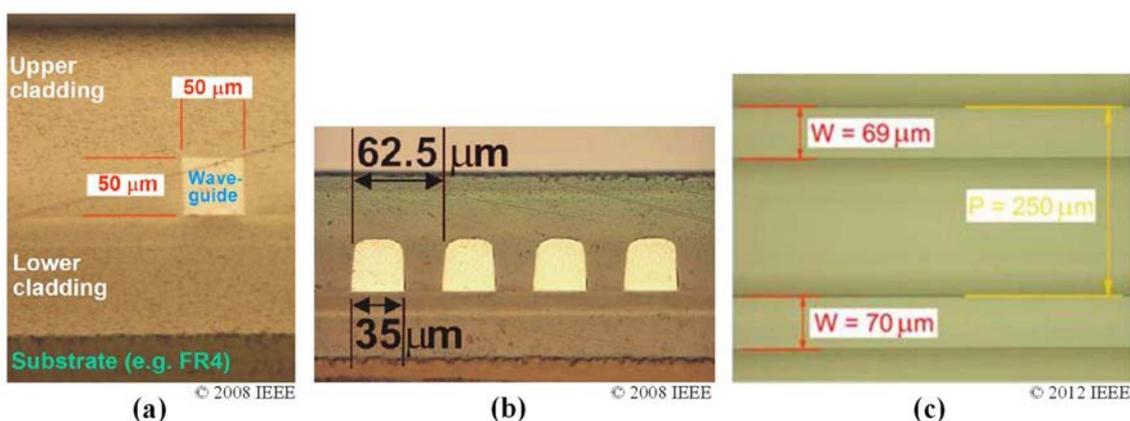


Fig. 1-6 マルチモードポリマー光導波路研究例

(a)50 μm コア端面図[1-12] (b)35 μm コア端面図[1-12] (c)70 μm コア上面図[1-13]

マルチモードポリマー光導波路として, 従来の研究開発主対象であった SI 型ポリマー光導波路に対し, 昨今では, コア内に屈折率分布を形成した分布屈折率(Graded-index : GI)型ポリマー光導波路への注目が集まる. GI 型導波路は作製方法が十分に確立していなかったことから, 従来は研究対象から外れる場合が多かった. ところが, 交差パターン構造などの複雑配線化を念頭に置いた場合には, コア中心への光閉じ込め効果を発揮する GI 型コアの価値が高まる. このように, 当研究室を含む国内研究機関の提言がされてきたことにより, 国外の研究機関においても GI 型ポリマー光導波路の開発例が報告されるようになった.

Fig. 1-7 に, 当研究室以外の GI 型マルチモードポリマー光導波路の研究例を示す. いずれの導波路も, 積層工程による作製方法由来の矩形状のコアを有している. Fig. 1-7(a)(b)

に示した例は、どちらも国外研究機関による GI 型ポリマー光導波路の作製例である。端面写真及び出射光強度分布から、コア内の屈折率分布が均一ではないこと、すなわちコア内に GI 型屈折率分布が形成できていることがうかがえる。しかしながら、同様にコア底面付近には屈折率分布が形成されていないことも読み取ることができ、非対称な屈折率分布を有するコアであると想定される。これに対し、Fig. 1-7(c)(d)に示した例は、住友ベークライト株式会社による開発例である。同社では、ポリノルボルネン系樹脂を用いたフォトアドレス法 [1-20]によりポリマー光導波路を作製している。同方法では、水平方向に対して GI 型屈折率分布が容易に形成可能であるのに加え、垂直方向については、ポリノルボルネン樹脂に対して特殊な屈折率調整剤を含有させることで GI 型屈折率分布の形成を試みており、Fig. 1-7(d)の出射強度分布に示すように対称的な GI 型屈折率分布が形成されていることがうかがえる。

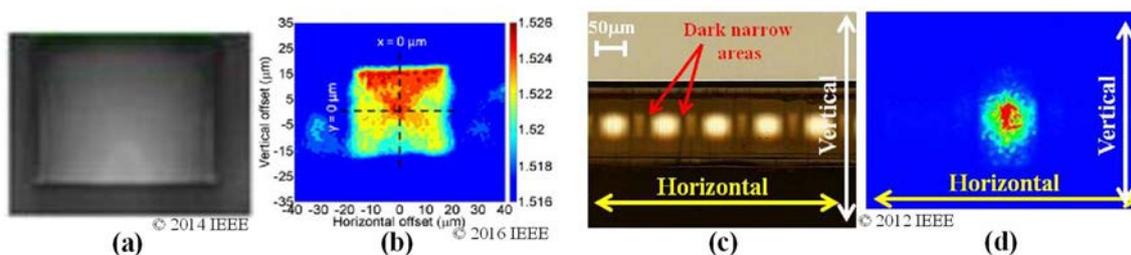


Fig. 1-7 矩形 GI 型マルチモードポリマー光導波路研究例

(a)端面写真[1-17] (b)出射光強度分布[1-18] (c)端面写真[1-19] (d)出射光強度分布[1-19]

当研究室ではかねてより GI 型ポリマー光導波路に着目しており、光損失、クロストーク、マルチモードファイバとの接続性に関して優れた特性を持つことを先行研究にて実証してきた。このような導波特性の利点を活かし、オンボード光インターコネクションの実現に向け、光配線板への GI 型ポリマー導波路の導入を提案している。

当研究室でも、インプリント法と呼ばれる作製手法を用いて、矩形コア内に対称性のある GI 型屈折率分布を形成することに成功した[1-21]。Fig. 1-8 に、インプリント法にて作製された矩形 GI 型導波路の端面写真及び屈折率分布を示す。同手法にて、狭ピッチ交差パターン導波路や、シャッフリングパターン導波路を作製し、平面内の複雑パターンが形成された場合にも、GI 型導波路が SI 型に比べ低損失性を維持できることを実証した[1-22]。

さらに当研究室では、円形コアの GI 型ポリマー光導波路の作製方法である Mosquito 法を独自考案した[1-23]。クラッドモノマー中にコアを直接形成するという新たな手法により、従来の積層工程による作製方法では実現し得なかった円形コアの形成を可能とした。さらに、モノマー材料どうしの相互拡散によって、完全対称な GI 型屈折率分布を容易に形成できる。Fig. 1-9 に、Mosquito 法による円形 GI 型マルチモードポリマー光導波路の作製例を示す。Mosquito 法にて作製された円形 GI 型コアは、クロストーク特性や汎用 MMF との接

続性に関して優れた特性を示すことが実証されている[1-24]. Mosquito 法では, 円形 GI 型コアを形成可能であるという利点に加え, 従来の導波路作製手法では実現し得ない, 3次元配線などの複雑な導波路構造を実現可能であるという利点も有する[1-25]. また, Mosquito 法では作製パラメータの適切な選定によって導波路のコア径を自在に制御可能であり, 近年ではシングルモードスケールの導波路の作製にも成功している[1-26].

このように, 当研究室では, ポリマー光導波路の光学特性向上及び多様な導波路構造実現による高付加価値化について検討を進めてきた.

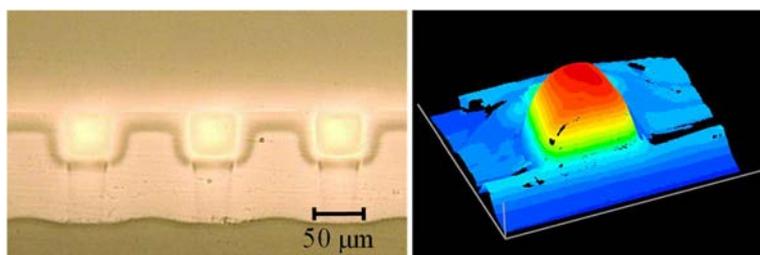


Fig. 1-8 当研究室での矩形 GI 型マルチモードポリマー光導波路の研究例

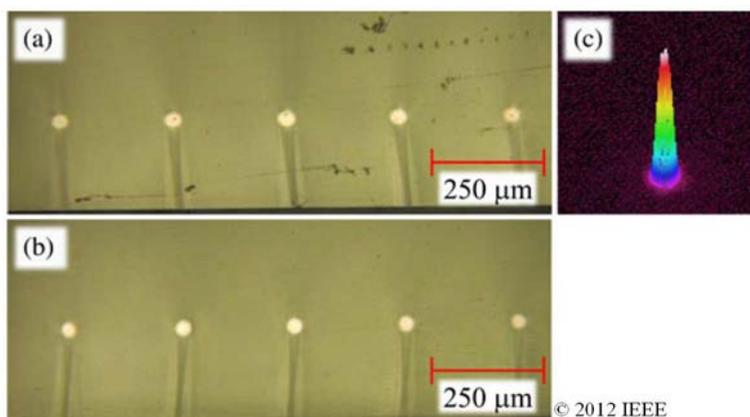


Fig. 1-9 当研究室での円形 GI 型マルチモードポリマー光導波路の研究例[1-23]

しかし, オンボード光インターコネクタの実現にあたっては, ポリマー光導波路と接続すべき光学素子が定められるため, ポリマー光導波路自体の性能向上に加えて, ポリマー光導波路と光ファイバや光源, 受光器等の他の光学素子との結合の高効率化が必要となる.

たとえば, マルチモード光リンクでは波長 850 nm の VCSEL 光源とポリマー光導波路を直接結合することが想定されるため, その結合部には, Fig. 1-10 に示すように 45° ミラーによる直角光路変換が必要となる[1-27]. その場合, ミラーを介したことによる結合効率の悪化が懸念される.

また, シングルモード光リンクでは, オンチップ領域の光配線化技術であるシリコンフォトニクスチップと, オフボード領域の光ファイバケーブルをつなぐインターフェースとし

でのシングルモードポリマー光導波路の応用が考えられる。シリコン細線導波路との結合の際は、Fig. 1-11 のようにコアどうしを接触させることで光を断熱的に遷移させるアディアバティックカップリングの利用が想定される[1-28]。これにより、スポットサイズの大きく異なるシリコン細線導波路との高結合効率化が実現できると目される。また、単純に SMF とのバットカップリングを想定した場合にも、シングルモードコアどうしの接続には数 μm オーダー位置精度が要求され、許容される位置ずれ量が厳しいため、より一層の高効率化検討が要されることとなる。

これら光リンクにおける高結合効率化については未だ十分に検討がなされていない。特に、他素子と GI 型コア導波路との結合効率に関する検討はなされておらず、GI 型導波路の実用化に対する懸念点の一つとなっていた。

また、これまでに GI 型ポリマー光導波路の優れた光学特性を実証しながらも、従来の SI 型との比較については、異なる材料間の比較にとどまっていた。対等に比較検討するためには、同種ポリマー材料を用いて異なるコア形状やコア内屈折率分布を実現する作製技術の確立が不可欠である。

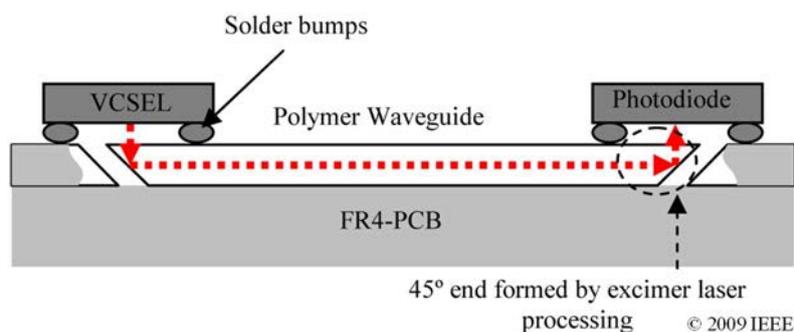


Fig. 1-10 マルチモード光リンクにて想定される 45° ミラーを介した光結合[1-27]

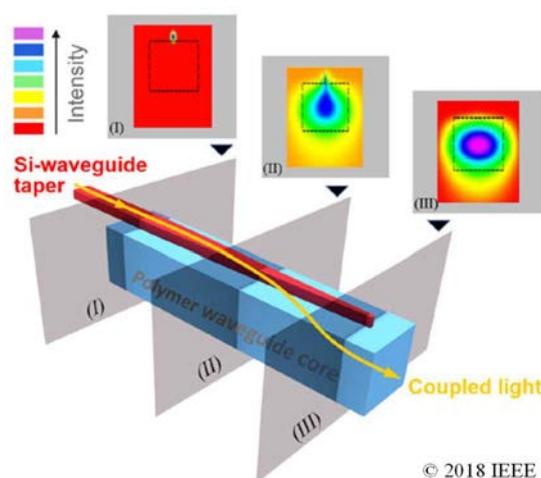


Fig. 1-11 シングルモード光リンクにて想定されるアディアバティックカップリング [1-28]

そこで本研究では、オンボード光インターコネクタ応用に向け、光導波路・光学素子間の光結合特性に着目した。高効率光結合を可能にするポリマー光導波路の仕様を策定、実際にポリマー光導波路を作製し、設計通りの高効率光結合を実証することを目指した。特に、ポリマー光導波路のコア形状やコア内屈折率分布による光結合特性の相違を詳細に解明するべく、複数の作製手法を選択し、ポリマー光導波路間の比較を行うことを重視した。本論文ではその過程を全六章にまとめる。

第1章は本章であり、本研究の背景を概説し、本研究の目的を示した。

第2章では、ポリマー光導波路の構造と光学特性並びに、ポリマー光導波路と他の光学素子によって構成される光リンクについて概説する。

第3章では、ポリマー光導波路について、コア形状(矩形と円形)、コア内屈折率分布(SI型とGI型)、作製プロセス間の対等な比較を可能とするために、本研究にて採用したポリマー光導波路の作製方法について説明する。従来のSI型コア導波路作製法の一つである直接露光法について詳しく述べ、GI型コアを形成可能であるMosquito法、インプリント法についてまとめる。

ポリマー光導波路の光結合特性に関する研究は、第4、5章にまとめる。マルチモード光リンクについては第4章にて、シングルモード光リンクについては第5章にてそれぞれ述べる。

マルチモードポリマー光導波路の光結合特性について述べる第4章では、まず、直線パターンを有するマルチモードポリマー光導波路について、オンボード・ボード間光リンクを想定した評価系にて光結合特性を実測評価し、矩形SI型、円形GI型導波路の特性を比較した結果について述べる。次に、45°ミラーを介した光結合を含む光リンクに注目し、矩形コアのポリマー光導波路について、SI型とGI型の光結合特性を評価・比較する。SI型とGI型の45°ミラーを介した光結合特性が明らかとなったところで、本研究にて最も注目している円形GI型導波路が高効率光結合を実現するための最適導波路構造を策定するべく、光線追跡シミュレーションを用いて、最適な導波路構造パラメータを設計する。最後に、最適構造を有する円形GI型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結果について論ずる。

シングルモードポリマー光導波路の光結合特性について述べる第5章では、まず、シングルモードポリマー光導波路をSMFとバットカップリングした際の光結合特性を、同種ポリマー材料にて作製した矩形SI型、円形GI型シングルモード光導波路を用いて評価・比較する。次に、シングルモードポリマー光導波路とシリコン細線導波路をアディアバティックカップリングした場合を想定し、その光結合効率を導波路モードソルバによるシミュレーションにて検討する。このシミュレーションにより、シリコン細線導波路との結合の際には、シングルモードポリマー光導波路の偏波依存光学特性が重要であることが明らかになったことを受け、矩形SI型、円形GI型シングルモードポリマー光導波路の偏波依存光学特性を実測評価し、比較する。

第6章では結論を述べ、光導波路・光学素子間結合の高効率化について総括する。

Reference

- [1-1] TOP 500, “Performance Development,” <https://www.top500.org/statistics/perfdevel/> (2019年11月閲覧).
- [1-2] CISCO, “Cisco Global Cloud Index : 予測と方法論、2014~2019年”, https://www.cisco.com/c/dam/global/ja_jp/solutions/isp/ipngn/literature/pdf/cloud-index-white-paper.pdf (2019年11月閲覧).
- [1-3] A. V. Krishnamoorthy, K. W. Goossen, W. Jan, X. Zheng, R. Ho, G. Li, R. Rozier, D. Feng, M. Asghari, T. Pinguet, and J. E. Cunningham, “Progress in low-power switched optical interconnects,” *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, Vol. 17, No. 2, pp. 357-376 (2011).
- [1-4] 光回路実装技術委員会, “光回路実装技術ロードマップ 2010年度版「光インターコネクションの期待と展望」”, エレクトロニクス実装学会 (2011).
- [1-5] P. Pepeljugoski, J. Kash, F. Doany, D. Kuchta, L. Schares, C. Schow, M. Taubenblatt, B. J. Offrein, and A. Benner, “Towards exaflops servers and supercomputers: the roadmap for lower power and higher density optical interconnects,” *Proc. of 2010 European Conference and Exhibition on Optical Communication (ECOC)*, 5621097 (2010).
- [1-6] N. Farrington and A. Andreyev, “Facebook’s Data Center Network Architecture,” *Proc. of 2013 Optical Interconnects Conference(OIC)*, pp. 49-50 (2013).
- [1-7] Facebook Engineering, “Designing 100G optical connections,” <https://engineering.fb.com/data-center-engineering/designing-100g-optical-connections/> (2020年1月閲覧).
- [1-8] 光回路実装技術委員会, “光回路実装技術ロードマップ 2016年度版「光インターコネクションの第二普及世代に向けた課題と予測」”, エレクトロニクス実装学会 (2017).
- [1-9] 那須秀行, 瀬尾浩司, “AOCによるボード間光接続”, *エレクトロニクス実装学会誌*, Vol. 14, No. 7, pp. 537-541 (2011).
- [1-10] N. Bamiedakis, J. Beals, R. V. Penty, L. H. White, J. V. Degroot, and T. V. Clapp, “Cost-effective multimode polymer waveguides for high-speed on-board optical interconnects,” *IEEE J. Quantum Electron.*, Vol. 45, No. 4, pp. 415-424 (2009).
- [1-11] M. Karppinen, T. Alajoki, A. Tanskanen, K. Kataja, J.-T. Makinen, K. Kautio, P. Karioja, M. Immonen, and J. Kivilahti, “Parallel optical interconnect between ceramic BGA packages on FR4 board using embedded waveguides and passive optical alignments,” *Proc. of 2006 IEEE Electronic Components and Technology Conference(ECTC)*, pp. 799-805 (2006).
- [1-12] R. Dangel, C. Berger, R. Beyeler, L. Dellmann, M. Gmür, R. Hamelin, F. Horst, T. Lamprecht, T. Morf, S. Ogginori, M. Spreafico, and B. J. Offrein, “Polymer-waveguide-based board-level optical

interconnect technology for Datacom application,” *IEEE Trans. Adv. Pac.*, Vol. 31, No. 4, pp. 759-767 (2008).

[1-13] R. C. A. Pitwon, K. Wang, J. Graham-Jones, I. Papakonstantinou, H. Baghsiahi, B. J. Offrein, R. Dangel, D. Milward, and D. R. Selviah, “FirstLight: Pluggable optical interconnect technologies for polymeric electro-optical printed circuit boards in data centers,” *IEEE J. Lightw. Technol.*, Vol. 30, No. 21, pp. 3316-3329 (2012).

[1-14] M. Hikita, S. Tomaru, K. Enbutsu, N. Ooba, R. Yoshida, M. Usai, T. Yoshida, and S. Imamura, “Polymeric optical waveguide films for short-distance optical interconnects,” *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, Vol. 5, No. 5, pp. 1237-1242 (1999).

[1-15] H. Nawata, “Organic-inorganic hybrid material for on-board optical interconnects and its application in optical coupling,” *Proc. of 2013 IEEE CPMT Symposium Japan (ICSJ)*, pp. 126-129 (2013).

[1-16] K. Yasuhara, F. Yu, and T. Ishigure, “Circular core single-mode polymer optical waveguide fabricated using the Mosquito method with low loss at 1310/1550 nm,” *Opt. Express*, Vol. 25, No. 8, pp. 8524-8533 (2017).

[1-17] B. W. Swatowski, C. M. Amb, M. G. Hyer, R. S. John, and W. K. Weidner, “Graded index silicone waveguides for high performance computing,” *Proc. of 2014 IEEE Optical Interconnects Conference (OIC)*, pp. 133-134 (2014).

[1-18] J. Chen, N. Bamiedakis, P. P. Vasil’ev, T. J. Edwards, C. T. A. Brown, R. V. Penty, and I. H. White, “High-bandwidth and large coupling tolerance graded-index multimode polymer waveguides for on-board high-speed optical interconnects,” *IEEE J. Lightw. Technol.*, Vol. 34, No. 12, pp. 2934-2940 (2016).

[1-19] S. Takayama, K. Moriya, and K. Choki, “Significant reduction of crossing loss using polynorborene based GI-core optical waveguide,” *Proc. of IEEE Electronic System-Integration Technology Conference* (2012).

[1-20] 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,” *Proc. of SPIE 2010*, Vol. 7607, 76060S (2010).

[1-21] K. Abe and T. Ishigure, “Fabrication for low loss graded-index polymer crossed optical waveguide using the soft-lithography method,” *Proc. of 2016 IEEE Photonics Conference (IPC)*, pp. 753-754 (2016).

[1-22] K. Abe, Y. Oizumi, and T. Ishigure, “Low-loss graded-index polymer crossed optical waveguide with high thermal resistance,” *Opt. Express*, Vol. 26, No. 4, pp. 4512-4521 (2018).

[1-23] 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 J. Sel. Top. Quantum Electron.*, Vol. 19, No. 2, 3600310 (2012).

- [1-24] R. Kinoshita, D. Sukanuma, and T. Ishigure, “Accurate interchannel pitch control in graded-index circular-core polymer parallel optical waveguide using the Mosquito method,” *Opt. Express*, Vol. 22, No. 7, pp. 8426-8437 (2014).
- [1-25] 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 3-D on-board integration,” *Proc. of 2016 IEEE Electronic Components and Technology Conference (ECTC)*, pp. 490-496 (2016).
- [1-26] H. Matsui, S. Yakabe, and T. Ishigure, “Applicability of the Mosquito method to fabricate fan-in/out device for single-mode multicore fiber,” *Proc. of 2019 IEEE CPMT Symposium Japan (ICSJ)*, pp. 63-66 (2019).
- [1-27] T. G. Lim, P. V. Ramana, B. S. P. Lee, T. Shioda, H. Kuruveetil, J. Li, K. Suzuki, K. Fujita, K. Yamada, D. Pinjala, and J. L. H. Shing, “Demonstration of direct coupled optical/electrical circuit boards,” *IEEE Trans. Adv. Packag.*, Vol. 32, No. 2, pp. 509-516 (2009).
- [1-28] 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 J. Sel. Top. Quantum Electron.*, Vol. 24, No. 4, 8200211 (2018).

第2章

高速光インターコネクションのための ポリマー光導波路リンク

2.1 緒言

前章にて述べたように、ハイパフォーマンスコンピュータ(HPC)やデータセンタなどのコンピューティングシステムのさらなる発展のために、光インターコネクト技術の導入が盛んに進められている。次の実装形態であるオンボード光インターコネクト技術としてポリマー光導波路が注目されており、本研究では、ポリマー光導波路-他の光学素子間の光結合の高効率化により、ポリマー光導波路の実用化を図ることを目的としている。

本章では、ポリマー光導波路の構造や基本的な特性について述べ、HPC、データセンタへの導入が想定される、ポリマー光導波路を含む光リンクについて紹介する。光リンク内でポリマー光導波路との結合が想定される他の光学素子についても紹介し、リンクバジェットの観点から光結合の高効率化の重要性について再確認する。

2.2 ポリマー光導波路の構造と特性

2.2.1 伝搬モード数による分類

ポリマー光導波路は、高屈折率であるコアと、コアの外側を覆う低屈折率のクラッドによる二重構造を有する。コアとクラッドの屈折率差により、コア内に光を閉じ込め、伝搬させる。ポリマー光導波路は、コア内に存在する伝搬モードの観点から2種類に分類できる。光導波路内に複数のモードが存在する光導波路をマルチモード光導波路といい、最低次の基底モードのみが存在する光導波路をシングルモード光導波路という。導波路コア内に存在する伝搬モードはそれぞれ異なる伝搬定数を有し、光導波路内を伝搬する実質的な速度を意味する群速度が異なる。

光導波路コアが真円形状であり対称性がある場合、複数の伝搬モードの伝搬定数が互いにほぼ等しい値をとるため、それらをひとつのモード群として扱うことができる。これをモードの縮退という。縮退したモード群はLPモードと呼ばれ、「 LP_{lm} (l は非負整数($0, 1, 2, \dots$), m は自然数($1, 2, 3, \dots$))」と表記される。さらに、複数のLPモードの中でも、伝搬定数が近いものどうしを同一と扱う主モード番号 $N(N=2m+l-2)$ を導入することで、解析を簡素化

できて便利である[2-1].

光導波路コア内に存在し得る伝搬モードの数は、光導波路の構造及び伝搬する光の波長によって一意に定まる。光導波路ごとに固有の V パラメータ及び伝搬モードごとに固有の規格化伝搬定数によって、光導波路がシングルモードであるための条件(シングルモード条件)を導出することができる。ここで、 V パラメータ及び規格化伝搬定数 b はそれぞれ(2-1)式及び(2-2)式のように表される。

$$V = k_0 \frac{d}{2} \sqrt{n_{core}^2 - n_{clad}^2} = \frac{\pi d}{\lambda} \sqrt{n_{core}^2 - n_{clad}^2} \quad (2-1)$$

$$b = \frac{\left(\frac{\beta}{k_0}\right)^2 - n_{clad}^2}{n_{core}^2 - n_{clad}^2} = \frac{n_{core}^2 \cos^2 \theta - n_{clad}^2}{n_{core}^2 - n_{clad}^2} \quad (2-2)$$

ここで、 k_0 は波数、 d はコア径、 n_{core} はコアの屈折率、 n_{clad} はクラッドの屈折率、 λ は波長、 β は伝搬定数、 θ は受光角度である。円形コア SI 型導波路(SI 型については次項にて紹介)に対して、主モード数 N によるモードの縮退を考慮した場合、 V パラメータと規格化伝搬定数 b の関係は(2-3)式のように表される。

$$V = \frac{1}{\sqrt{1-b}} \left(\tan^{-1} \sqrt{\frac{b}{1-b}} + \frac{N\pi}{2} + \frac{\pi}{4} \right) \quad (2-3)$$

(2-3)式をもとに、 V パラメータと規格化伝搬定数 b の関係を Fig. 2-1 に示す。光導波路構造に固有の V パラメータが決定した場合、その導波路コア内を伝搬する各モードの規格化伝搬定数 b も一意に定まることとなる。Fig. 2-1 より、 V パラメータが 2.356 よりも小さい範囲では、最低次モード以外の伝搬モードは規格化伝搬定数が 0 を下回り、導波路コア内に存在し得なくなることがわかる。なお、ベッセル関数近似による厳密解では $V < 2.405$ の範囲がシングルモード条件を満たす要件となる[2-1]。(2-1)式より、コア径が小さいほど、コア・クラッドの屈折率差が小さいほど、また伝搬する光の波長が長いほど、 V パラメータは小さい値をとるので、シングルモード条件を満たしやすくなるといえる。

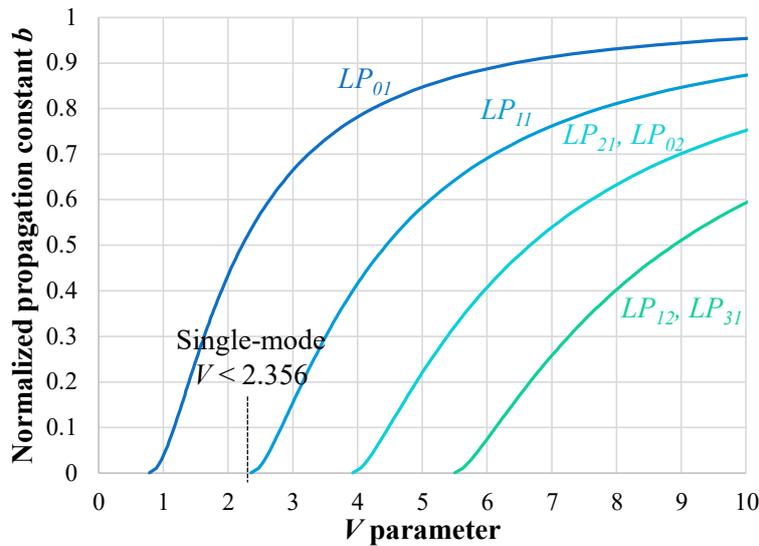


Fig. 2-1 円形 SI 型導波路の場合の規格化伝搬定数と V パラメータの関係

2.2.2 コア内屈折率分布による分類

ポリマー光導波路はコア内の屈折率分布によって大きく 2 種類に分類できる。一つは、コア内の屈折率が完全に均一であり、クラッドの境界面にて屈折率が急激に変化する階段屈折率(Step-index : 以下 SI)型である。SI 型導波路では、入射した光線は Fig. 2-2 に示されるように、コアとクラッドの境界面にて全反射を繰り返しながら伝搬する。もう一つは、屈折率がコア中心にて最大値をとり、中心から遠ざかるにつれて徐々に減少する分布を有する、分布屈折率(Graded-Index : 以下 GI)型である。GI 型導波路ではコア内屈折率分布に応じて光線が屈折を繰り返し、Fig. 2-2 に示されるようにサインカーブを描いて伝搬する。ここでは、コアサイズの大きなマルチモード光導波路を前提として、SI 型と GI 型の違いについて述べる。

短距離での利用を考えた場合、これらの構造の違いは光電界の閉じ込め効果として顕在化する。SI 型導波路では、多くの光がコア-クラッド界面で全反射されるために界面の構造不正の影響を受け、散乱損失が増大しやすく、界面の平滑性が導波路の性能を左右してしまう。また、界面で散乱した光の一部はコア外部へ漏れだし、隣接コアへのクロストークの要因となる。

一方、GI 型導波路では、屈折率分布により光電界がコア中心付近に閉じ込められるので、SI 型導波路に比べてコア-クラッド界面の平滑性の影響を受けにくく、低損失、低クロストークが期待される構造である[2-2]。

長距離利用の観点から、構造の違いがもたらす効果を考える。SI 型導波路では、導波路の中心軸に平行に入射し、全反射を全くせずに伝搬する光線と、ある角度を持って入射し、全反射を繰り返しながら伝搬する光線が混在する。よって、光線によってコア内を伝搬する距

離が異なるために、出射端に到達するまでに大きな時間差を生じる。その結果、一つの情報として入射されたパルスは、伝送後には波形が時間的に大きく広がり、崩れてしまう。従って、高周波パルス信号を入射した場合、出射端にて広がったパルス同士が重なり合い、情報が正しく伝送されないおそれがある。これをモード分散という。SI型導波路ではこのモード分散が伝送帯域を大きく制限する要因となる。

GI型導波路では、入射角度によって光の物理的な伝搬距離は異なる一方で、低屈折率であるコア周辺部を多く伝搬する光は速度が速くなり、高屈折率であるコア中心部を伝搬する光は速度が遅くなるため、光路長は互いに等しくなる。このように、コアの屈折率分布形状を適切に制御することによって、SI型では顕著に見られるモード分散を低減することができる。このことから、出射波形が入射波形に比べ、時間軸に対してほとんど広がらず、広い伝送帯域特性を有することになる[2-2]。

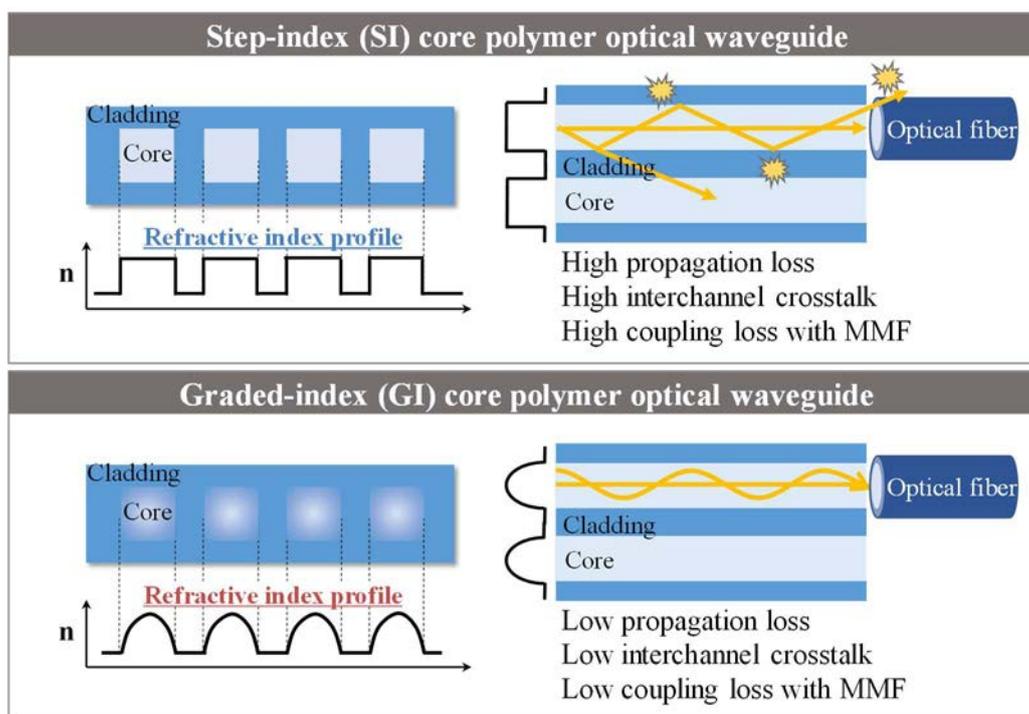


Fig. 2-2 屈折率分布によるポリマー光導波路の分類

コア内屈折率分布として最も一般的であるのは、(2-4)式に示すべき乗則近似式である。これは、光ファイバに代表される円形コアを前提とした屈折率分布式であり、半径 r 方向の関数として屈折率分布が定義される。

$$n(r) = n_{core} \sqrt{1 - 2\Delta \left(\frac{r}{a}\right)^g} \quad (2-4)$$

ここで、 n_{core} はコア中心の屈折率、 a はコア半径、 Δ は比屈折率差 ($\Delta = (n_{core}^2 - n_{clad}^2) / 2n_{core}^2$)

である(n_{clad} はクラッドの屈折率). 半径方向の屈折率分布係数を表す g パラメータによって分布形状を決定する. Fig. 2-3 に, (2-4)式で表される屈折率分布形状を示す. $g = \infty$ のとき, (2-4)式は階段状のSI型屈折率分布を表す. 円形コアを有する光ファイバでは, $g=2$ のとき, モード分散を最小化した広伝送帯域を実現できる. そのため, 汎用GI型マルチモードファイバはこの屈折率分布係数を理想として設計がなされている.

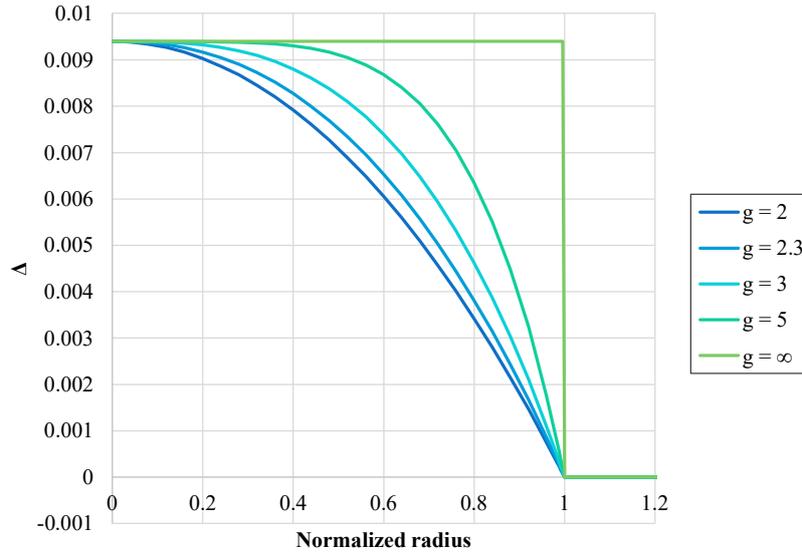


Fig. 2-3 べき乗則近似式による屈折率分布

一方, 矩形コア内屈折率分布については, コア中心からの幅方向座標 x , 高さ方向座標 y によって次式で定義できる[2-3].

$$n(x, y) = n_{core} \sqrt{1 - 2\Delta \left(\left| \frac{x}{a} \right|^p + \left| \frac{y}{a} \right|^q \right)} \quad (2-5)$$

同様に, n_{core} はコア中心の屈折率, a はコア半幅, Δ は比屈折率差である. 幅方向, 高さ方向の分布形状をそれぞれ決定づける屈折率分布係数として p, q を用いている.

また, 矩形コア内屈折率分布は次式でも定義できる[2-4].

$$n(x, y) = n_{core} \sqrt{1 - 2\Delta \left(\left| \frac{x}{a} \right|^g + \left| \frac{y}{a} \right|^g - \left| \frac{xy}{a} \right|^g \right)} \quad (2-6)$$

この式を用いることで, コアの最外周部の屈折率がすべてクラッド屈折率と一致する屈折率分布を表現することができる.

光インターコネクションのためのポリマー光導波路は, 一般的に半導体プロセスに基づく積層工程によって作製される. そのため, 大量生産が可能, 基板への直接形成が可能, 実

装時の高度な位置決めが不要といった点から、製造コストを安くすることが期待できる。これらの方法では通常、SI型屈折率分布を有する矩形状のコアが形成される。半導体プロセスによって作製された光導波路の研究例を Fig. 2-4 に示す。本研究でも、矩形 SI 型コアの作製手法の一つとして直接露光法に注目し、その作製条件確立について検討を進めてきた。その結果については第3章にて詳しく論ずる。

また、当研究室では、導波路コア内への GI 型屈折率分布の形成についても深く検討を進めてきた。当研究室内にて GI 型ポリマー光導波路作製法として検討を進めている Mosquito 法及びインプリント法については、第3章にて詳しく論ずる。

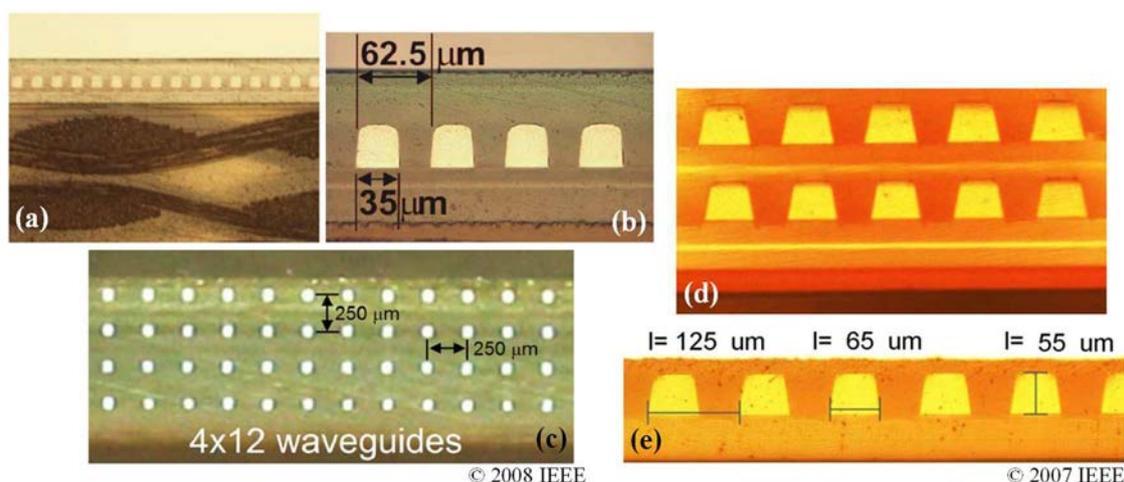


Fig. 2-4 ポリマー光導波路研究例((a)-(c)[2-5], (d)-(e)[2-6])

2.2.3 ポリマー光導波路の伝搬損失

ポリマー光導波路中を光が伝搬するにつれて、様々な要因で光強度が次第に減衰していく。ポリマー光導波路に入射した光の強度と、伝搬後に射出された光強度の値から、ポリマー光導波路の伝搬損失(Propagation loss)を次式にて求めることができる。

$$\text{Propagation loss} = -\frac{10}{L} \log \frac{P_{out}}{P_{in}} \quad (2-7)$$

ここで、 P_{in} は入射パワー、 P_{out} は射出パワー、 L は伝送距離である。

伝搬損失の要因は、伝送媒体材料に固有の要因と、材料に依存しない要因に分類されるが、ここでは、材料固有の伝搬損失要因について注目する。

散乱損失

伝送媒体の材料中に、屈折率の異なる微小な散乱体が不均一に存在する場合、伝搬光に対して散乱現象が観測され、導波路からの射出光強度は減衰する。Einstein の遥動説理論に基づく散乱強度 V は、次式にて表される[2-7].

$$V = \frac{\pi^2}{9\lambda^4} (n^2 - 1)^2 (n^2 + 2)^2 kT\beta \quad (2-8)$$

ここで、 λ は真空中の光の波長、 n は伝送媒体材料の屈折率、 k はボルツマン定数、 T は絶対温度、 β は材料の等温圧縮係数である。(2-8)式より、散乱損失は光の波長の4乗に逆比例するため、散乱損失は長波長であるほど減少することがわかる。

吸収損失

光強度の減衰要因のうち、散乱損失のみを考えた際、光通信に用いる信号光が長波長であるほど低損失となる。しかしながら、赤外領域では、伝送媒体の材料を構成する分子構造に起因する分子振動吸収が見られるようになる。石英系ファイバの場合には、Si-O結合による基本振動吸収が波長9 μm 付近に存在し、この倍音振動吸収が近赤外域にまで現れることがわかっている。プラスチックファイバやポリマー光導波路などでは、有機材料に含まれる炭素、水素、酸素の各結合により、赤外領域での吸収が見られる。この中でもC-C、C=O、C-O結合はその基本振動吸収が長波長側に現れるのに対し、C-H結合の基本振動吸収はSi-O結合と比較して短波長帯である3.4 μm 付近に存在する。そのため、C-H結合の倍音吸収は近赤外にて大きな損失となる。

材料固有の散乱損失及び吸収損失により、伝送媒体の全伝搬損失が決定される。典型的な石英系ガラスファイバでは、散乱損失は長波長になるに従い減少する一方で、波長1.6 μm を超えるあたりから分子振動吸収の影響を受けるようになるため、波長1.55 μm 付近にて最低損失を示すこととなる。2017年に、住友電気工業(株)が0.1419 dB/km(波長1560 nm)の伝送損失を示す光ファイバを開発し、世界記録を更新した[2-8]。

これに対し、PMMAをコア材料とするプラスチック光ファイバでは、分子振動吸収損失の影響が近赤外域のみならず可視光域にまで顕在し、最低伝搬損失を示す波長は0.5~0.65 μm 付近となる。

2.2.4 ポリマー光導波路の結合損失

ポリマー光導波路を用いる際には、他の光学素子との結合が不可欠である。ポリマー光導波路-光学素子間の結合の際に生じる結合損失の要因について述べる。

ポリマー光導波路や光ファイバ(以下、光導波路に統一)内を伝搬する任意の電界分布は、光導波路内に存在する各々のモードの電界分布の和(一次結合)として展開することができる[2-9]。光導波路どうしを突き合わせ結合(バッドカップリング)した際の結合効率は、一方の光導波路に存在する各々のモードの、他方の光導波路に存在し得る各々のモードへの変換効率の総和で求まる。よって、シングルモード光導波路どうしの結合は最も単純であり、光導波路それぞれの最低次モードプロファイルの重ね合わせ積分で表される。マルチモード光導波路どうしの結合は複雑であるが、ここではより単純化した観点でその結合損失を

理解することとする。

マルチモード光導波路と他の光学素子との結合損失は、コアサイズ及び開口数のミスマッチによって理解できる。コアサイズのミスマッチは単純であり、光導波路に対して入射する光強度分布が、光導波路コアが受容できる範囲外にまで及んでいる場合、コアサイズのミスマッチにより結合損失が生じる。光導波路における開口数(Numerical Aperture : NA)とは、光導波路が受容できる光の最大角度を表す指標であり、SI型光導波路のNAは次式で求められる。

$$NA = n_{core} \sin \theta_c = \sqrt{n_{core}^2 - n_{clad}^2} \quad (2-9)$$

ここで、 n_{core} , n_{clad} はコア、クラッドの屈折率、 θ_c は最大受光角であり、入射角 θ がこの角度を越えたときには、光はコア内に閉じ込めきれずクラッドへと漏出する。SI型コアの光導波路の場合には、コア内のどの位置においても屈折率は一定であり、すなわちNAも一定である。そのため、コアに対する入射位置に依存して最大受容角が変化することはない。これに対しGI型コアの光導波路の場合には、コア内に屈折率分布が形成されていることにより、(2-9)式により計算されるNAもコア中心部から遠ざかるほど徐々に低下していくという、ローカルNAが存在する。

コアサイズ及びNAのミスマッチ以外に、光導波路端面にて生じる、端面粗さによる散乱損失や、フレネル反射損失が結合損失要因として挙げられる。特に、フレネル反射損失は、屈折率の異なる媒質の界面にて必ず生じる光学反射現象である。屈折率 n_1 の媒質から屈折率 n_2 の媒質へと光が入射するときの、p偏光、s偏光のフレネル反射係数は、次式で求められる。

$$r_p = \frac{n_1 \cos \theta_2 - n_2 \cos \theta_1}{n_1 \cos \theta_2 + n_2 \cos \theta_1} \quad (2-10)$$

$$r_s = \frac{n_1 \cos \theta_1 - n_2 \cos \theta_2}{n_1 \cos \theta_1 + n_2 \cos \theta_2} \quad (2-11)$$

ここで、 θ_1 は入射角(=反射角)、 θ_2 は屈折角である。(2-10)式、(2-11)式より、媒質間の屈折率の違いが大きいかほどフレネル反射損失は大きくなるため、ポリマー光導波路と他の光学素子との間に空隙($n=1$)が存在する場合に、特に無視できない値となる。そのため、光ファイバどうしの接続では、光ファイバどうしを一定の圧力にて押し当て、空隙をなくすフィジカルコンタクト(PC)接続方式を採用することがほとんどである。また、ポリマー光導波路と他の光学素子との結合の際にも、結合部に屈折率整合材であるマッチングオイルを使用することによって屈折率の相違を緩和させ、フレネル反射損失を低減させる工夫が施される。

2.3 ポリマー光導波路により構成される光リンク

本節では、本研究にて想定しているポリマー光導波路を含む光リンク、及びそのリンク内

にてポリマー光導波路との結合が想定される他の結合素子について紹介する。

2.3.1 マルチモード光リンク

主にハイパフォーマンスコンピュータ(HPC)内の光インターコネクションリンクとして想定されるマルチモード光リンクについて紹介する。本研究では、Fig. 2-5 に示すような、マルチモードポリマー光導波路を実装した二つのボードの間を、マルチモード光ファイバにて接続した、オンボード・ボード間マルチモード光リンクを想定している。この光リンク内での使用が想定される、光源、受光器、マルチモード光ファイバ、光コネクタについて、それぞれ説明する。

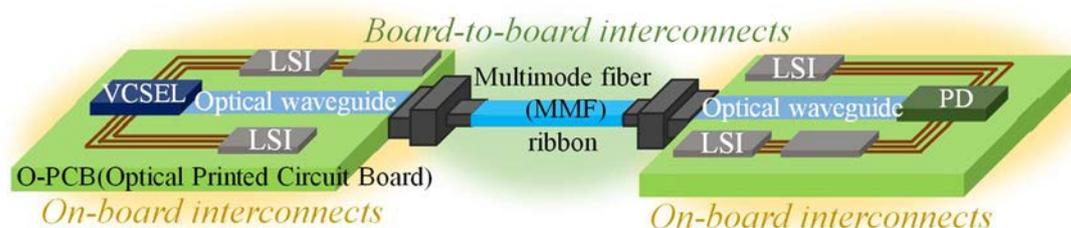


Fig. 2-5 オンボード・ボード間マルチモード光リンク

垂直面発光レーザ(VCSEL)

ネットワークなどに用いられるレーザダイオード(LD)に対し、筐体内インターコネクション用の光源としては、垂直面発光レーザ(Vertical Cavity Surface Emitting LASER : 以下 VCSEL)が注目されている。LD はファブリ・ペロー共振器を有するエッジエミッシング型であり共振器中の活性層と平行方向に誘導放出光が出力される一方で、VCSEL は半導体の積層方向に対して垂直に光が出力される。Fig. 2-6 に VCSEL の概念図を示す。

VCSEL の主な特長について述べる。VCSEL は積層面に発光面を持つため、へき開無しに素子検査が可能である。そのため、歩留まり率が高く、作製コストも安価である。また、閾値電流が小さく(数 mA)、低消費電力化が期待される。活性層の酸化狭窄によりスポットが円形(スポット径 : 10 μm 程度)であり、広がり角が小さいため他の光学素子との結合に優れる。なお、発振波長帯としては、GaAs 系材料による 850 nm の研究開発が最も主流である一方で、InGaAsP 系材料を用いた、1060 nm 帯の VCSEL 開発も進められている[2-10]。変調速度は販売されているもので 10 Gbps、研究段階のものでは 28 Gbps までの高速変調が可能である[8]。

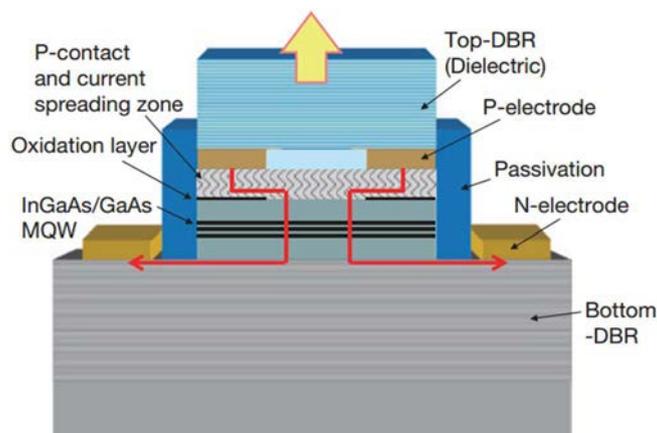


Fig. 2-6 VCSEL の構造[2-10]

このように VCSEL は、オンボードインターコネクション用の光源として使用されるに足る特性を有している。しかし、VCSEL は実装上、大きな問題を抱えている。高速光インターコネクションに向け、VCSEL は高密度に並列化・集積化されることが必要だが、集積化が進むほどに単体素子への信頼性要求は厳しくなる。直近の課題として、VCSEL の頓死問題が挙げられる。頓死とは動作中に突如として故障してしまう現象であり、この頓死のメカニズムは未だ完全には解明されていない。VCSEL の頓死は信頼性に直結する問題であるため、早期解決が望まれる。

フォトダイオード(PD)

高速光インターコネクションでは、全体のスループットを可能な限り上げるために、高速変調可能な VCSEL 光源の使用が想定されることはすでに述べた。したがって、受光器側もその高速変調に対応可能でなくてはならない。高速変調に対応できるフォトダイオード(Photodiode : PD)として、主に Avalanche Photodiode(APD)と p-intrinsic-n Photodiode(p-i-n PD)が挙げられる。APD は動作電流が非常に大きく高消費電力である点、さらに動作特性が非常に敏感であり高価となる点から、実装システムの中での使用は敬遠されている。よって、高速光インターコネクションでは、主に p-i-n PD を用いることが想定される。

p-i-n PD は真性半導体の層を p 型と n 型の半導体の層の間に挟んだ構造を有し、pn-PD に比べ広い空乏層領域を持つ。この構造により、暗電流が小さくなりノイズの影響を抑えることができる他、バイアス電流及び光吸収を i 領域に集中させることで、感度及び応答速度を高めることができる。

p-i-n PD アレイの特長について述べる。p-i-n PD の対応可能変調速度は数 10 Gbps である。10 Gbps 対応の p-i-n PD(InGaAs/InP)の受光面は直径 50 μm であるが、データレートの高速化に伴い、応答速度をより高めるために受光面は縮小化の傾向にあり、昨今では 28 Gbps レベルの変調速度に対応する 35 μm 径の PD が主力となる見込みである。Fig. 2-7 に、二次元

アレイ化された VCSEL と PD の研究例を示す。面発光及び面受光ができるという特徴から、高密度に集積化された 2 次元アレイを実現可能である。

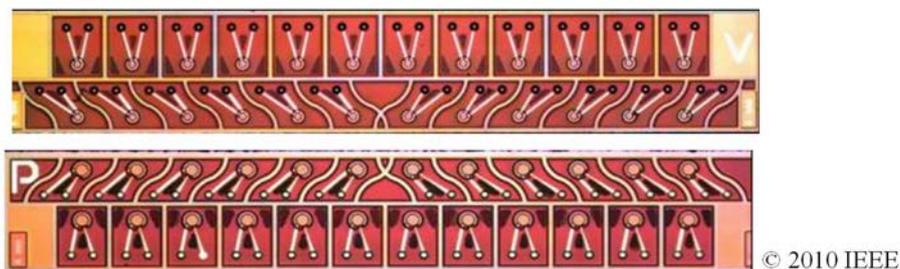


Fig. 2-7 VCSEL, PD アレイ集積例(250 μm ピッチ, 12 \times 2 チャンネル)[2-11]

マルチモードファイバ(MMF)

ボード間光インターコネクト技術として用いられるマルチモードファイバ(MMF)は、シングルモードファイバ(SMF)に比べてコア径が大きいことから、アライメントの簡素化が可能であることが最大の利点である。当初は、発光ダイオード(LED)光源を使用できるというコスト面の優位性により普及し、LED 光源に対応するべくコア径は 62.5 μm にて規格化された。その後、100 Mbps を超えるデータレートに対応する必要性が生じてからは、光源は、低コストかつ高速変調可能な、波長 850 nm の VCSEL 光源へと移行し、MMF はコア径 50 μm のものが規格化され、主流となった。

イーサネットにて使用される MMF ケーブルのカテゴリを Table 2-1 に示す[2-12]。それぞれのカテゴリにて、有効モード帯域幅が規定される。VCSEL 光源への対応を前提とした OM3 以降のケーブルでは、全モード励振帯域に加え、限定モード励振帯域も規定されることとなった。帯域は伝搬光の波長にも依存し、VCSEL 光源の主要波長である 850 nm に加え、1300 nm 波長の規定も存在する。CWDM への応用が見込まれる OM5 では 953 nm 波長での帯域も規定されている。

Table 2-1 に規定される伝送帯域により、各ファイバケーブルを用いた場合の最大伝送距離が IEEE802.3 によって規格化されている。たとえば、40GBASE-SR4 では、最大伝送距離は OM3 使用下にて 100 m、OM4 使用下にて 150 m と規定される[2-13]。100GBASE-SR4 では、OM3 使用下にて 70 m、OM4 使用下にて 100 m となり[2-13]、伝送容量及び使用ファイバカテゴリに応じて許されるリンク長が異なることとなる。

Table 2-1 マルチモードファイバのカテゴリ分け

カテゴリ	コア径	最小モード帯域				
		全モード励振(OFL)			限定モード励振(RML)	
		波長850 nm	波長953 nm	波長1300 nm	波長850 nm	波長953 nm
OM1	62.5 μm	200 MHz·m	-	500 MHz·m	-	-
OM2	50 μm	500 MHz·m	-	500 MHz·m	-	-
OM3	50 μm	1500 MHz·m	-	500 MHz·m	2000 MHz·m	-
OM4	50 μm	3500 MHz·m	-	500 MHz·m	4700 MHz·m	-
OM5	50 μm	3500 MHz·m	1850 MHz·m	500 MHz·m	4700 MHz·m	2470 MHz·m

MT コネクタ

ボード間光インターコネクションとしては、50 μm 径の GI 型 MMF(50GI-MMF)が用いる例が主流である。第1章で述べたように、光インターコネクト技術実装の第1フェーズであるボードエッジ実装では、アクティブオプティカルケーブル(AOC)がボード光インターコネクト技術として用いられている。このフェーズでは、電気信号-光信号の変換はすべて AOC 端のコネクタ内トランシーバにて行われるため、ボードエッジでの接続は電気コネクタを介してなされる。これに対し第2フェーズ以降では、ボードエッジでは光コネクタによる光ファイバ-光導波路間の光結合が想定される。

多芯用光コネクタの代表的なものに MT コネクタがある。Fig. 2-8 に MT コネクタの設計例を示す。MT コネクタでは、MT フェルール内に多芯光ファイバが精密に整列し、コネクタ断面の端に配置されたガイドホールをピン接続することで、MT コネクタどうしの非常に高精度なパッシブアライメントを可能とするコネクタ規格である。Fig. 2-8 に示した構造は、250 μm ピッチ 12 チャンネル×1 段の最も標準的な MT コネクタ規格であるが、昨今では、125 μm の狭ピッチコア配列や、多段配列構造など、さらなる高密度化、多芯化への動きが盛んである。

ポリマー光導波路を、MT コネクタを有する光ファイバリボンと多芯コア接続するべく、MT コネクタと同じ外観を有するポリマー光導波路用光コネクタである PMT コネクタ (Polymer waveguides connected with MT connector)の開発がなされている。Fig. 2-9 に PMT コネクタの構造を示す。50GI-MMF に対し、位置ずれによる損失を 0.5 dB 以下に抑えるコネクタ加工精度(<0.0025 mm)をすでに実現しており[2-15]、ポリマー光導波路作製の際もこの PMT コネクタの仕様に合わせて加工を行うことで、光ファイバリボンとの高精度なパッシブアライメントが可能となる。

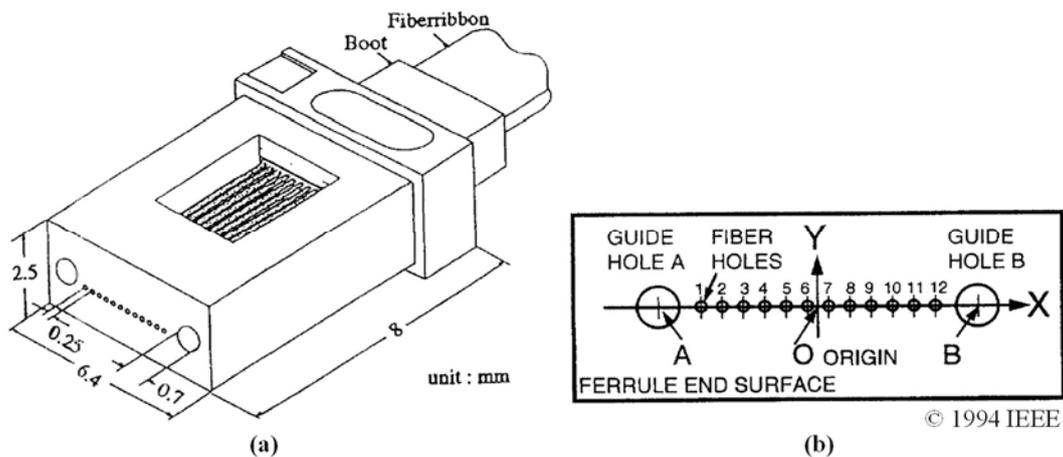


Fig. 2-8 MT コネクタの開発例 (a)全体設計 (b)断面設計[2-14]

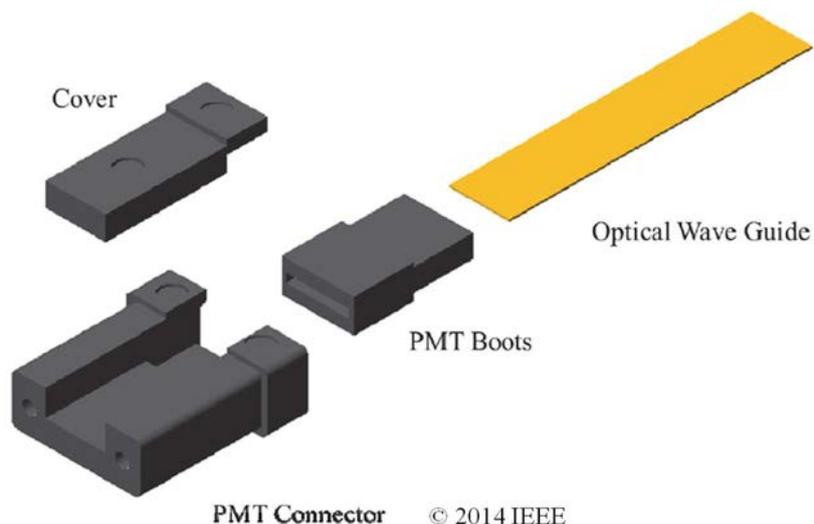


Fig. 2-9 PMT コネクタの構造[2-15]

以上のように、光配線板上光リンクでは、様々な光学素子との結合が想定される。先述の通り、光配線板では光源として VCSEL を用いることが想定されている。この VCSEL を用いる場合、その出力光が基板に対して垂直方向に発せられるという特徴から、基板に直接実装されている光導波路との光結合の際に、その光路を直角に変換させる必要が生じる。直角光路変換の方法として代表的なものが二つ挙げられる。一つ目は三次元曲げ導波路による光路変換、二つ目は 45° ミラーによる光路変換である。さらに発展的な方法として、三次元導波路に対して 45° ミラーを形成する光路変換方法を考えることもできる。これらの直角光路変換方法を模式的に Fig. 2-10 に示す。

三次元光導波路による光路変換では、Fig. 2-10(a)に示すように、コアを所望の方向に曲げて作製することで、任意の方向への導波を可能とし、鉛直方向伝搬時にも光の閉じ込めを実現できる利点がある。しかし、実際にこのようなコア構造を持つ導波路の作製は困難であ

り、未だ系統立った方法は確立していない。さらに、この方法の懸念事項として、光路変換部にて生じる光の曲げ損失が挙げられる。その曲げ損失を小さく抑えるために曲げ半径を緩くすると、導波路が大型化し、実装面で問題が生じるといった欠点がある。

45° ミラーによる光路変換は、導波路端に形成した 45° の角度を持つ反射面によって光を反射させ、その光路を直角に変換する方法である(Fig. 2-10(b)参照)。すでにダイシングやレーザアブレーションなどによるミラー形成方法が確立しており、比較的容易に作製が行える[2-16]。また、複雑な導波路構造を必要としないため、小型化も可能であり、実装に適した方法といえる。

Fig. 2-10(c)に示した方法では、垂直曲げ構造を有する三次元導波路に対して 45° ミラーを形成することで、両者の利点を併せ持つ導波路構造を実現している。これにより、曲げ半径を小さくして小型化を図った場合にも、45° ミラーによる反射により曲げ損失を補償できると考えている。三次元導波路と同様に、現時点で作製方法は確立していないが、第3章にて紹介する Mosquito 法では、3次元曲げ構造を有する導波路作製の可能性がある。将来的にはこのような構造を持つ導波路を組み込んだ光モジュール化を狙う。

本研究では、光配線板への実装を想定した直角光路変換法として最も単純かつ明快な方法である、45° ミラーを形成した導波路を用いることを想定する。

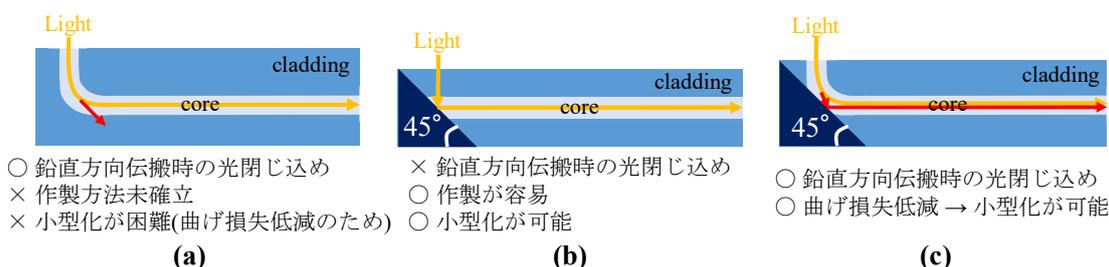


Fig. 2-10 直角光路変換方法

(a)三次元導波路 (b)45° ミラー (c)三次元導波路+45° ミラー

45° ミラーによる直角光路変換を含む、オンボード・ボード間光リンクの概念図を Fig. 2-11 に示す。VCSEL から基板に対して垂直方向に発せられた信号光は、光導波路端に施された 45° ミラーによってその光路を直角に変換された後、導波路に結合する。導波路の出射端は、ボード間光インターコネクト技術としての実現例がある光ファイバに接続されている。一般的に HPC 筐体内ボード間光通信に用いられているのは 50GI-MMF である。50GI-MMF を伝搬した信号光は、次のボード上に実装された光導波路に結合し、導波路端に形成されたミラーによって再度光路変換を受け、PD へと受光される。このように、45° ミラーによる光路変換を介して成立するオンボード・ボード間光リンクのことを、本研究では直角光路変換型光リンクと呼び、この光リンクを想定した検討を行っていく。



Fig. 2-11 45° ミラーによる直角光路変換型光リンク

2.3.2 シングルモード光リンク

データセンタ内の光インターコネクションリンクとして想定されている，シングルモード光リンクを紹介する．先述の通り，データセンタ内にはシングルモードファイバ(SMF)をベースとした光リンクがすでに導入されつつある．さらに，オンチップ領域の光配線化技術である，シリコン(Si)細線導波路によるシリコンフォトニクス技術に関して，研究が盛んに進められている．

シリコンフォトニクス技術は，従来半導体プロセスに用いられてきた CMOS コンパチブルプロセスを用いて，シリコン半導体チップに微細加工を施し，Fig. 2-12 に示すような，300～500 nm 程度の剥き出しコアを有する Si 細線導波路回路を作製する技術である．

Si 細線導波路は，Si コアと SiO₂ クラッド層から構成される．高屈折率($n=3.5$)を有する Si をコアに使用することで，高い屈折率差による強い光の閉じ込め効果を実現し，nm オーダーの細線導波路の中にも光を強く閉じ込め，伝搬させることができる．高屈折率差のため，急峻な曲げ構造に対しても強い耐性を有し，様々なパターンングを可能とする．これらの特徴により，微細なオンチップ領域において，広帯域伝送の可能なシングルモード光リンクを実現する．

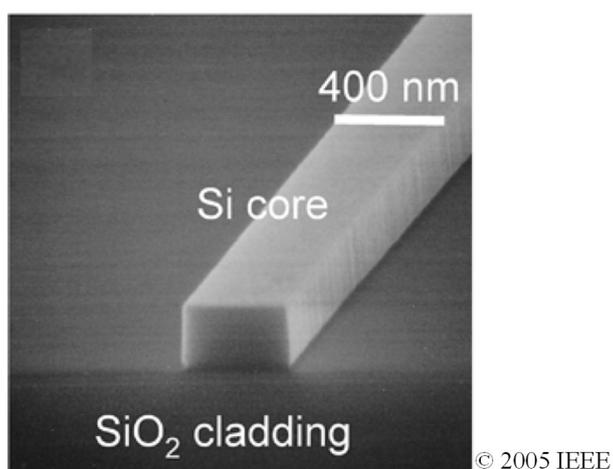


Fig. 2-12 Si 細線導波路作製例[2-17]

Si 細線導波路が一般的に 300～500 nm 程度のコアサイズを有するのに対し，汎用 SMF の

コアサイズは6~8 μm 程度である。シングルモードコアどうしの結合効率は、両者の電磁界分布の重なり積分により定まる[2-9]ため、コアサイズが著しく異なる Si 細線導波路と SMF を直接バットカップリングした場合、モードフィールド径(Mode Field Diameter : MFD) のミスマッチにより非常に高い結合損失を生じることとなる。

Si 細線導波路-SMF 間の結合損失改善のため、両者のインターフェースとしてポリマー光導波路によるスポットサイズコンバータを用いる手法が注目を集めている。スポットサイズコンバータは、波長依存性が低いため波長分割多重(WDM)技術にも対応可能であり、同時に SMF とのエッジ接続を可能とするため省スペース化にも対応できるという利点を有する。

Fig. 2-13 に、IBM Zurich 研究所によるスポットサイズコンバータ[2-18][2-19]の検討例を示す(Fig. 1-11 を再掲)。Fig. 2-13 では、Si 細線導波路コアとポリマー光導波路コアを互いに接触させ、アディアバティックカップリングによるスポットサイズ変換を実現している。Si 細線導波路の終端部をテーパ構造にすることで、Si 細線導波路内の最低次モードの実行屈折率が徐々に低下し、エバネッセント光としてクラッドに漏れ出して伝搬するようになる。Si 細線導波路の伝搬定数が、近接したポリマー光導波路コアの最低次モードの伝搬定数と一致したとき、モード結合によりポリマー光導波路へと光が遷移する。最終的に、すべての光エネルギーが断熱的(Adiabatic)に遷移し、エネルギー損失を伴うことなくポリマー光導波路へ完全に結合する設計となっている。このとき、Si 細線導波路コア内ではもともと nm オーダーの MFD として閉じ込められていた光は、エバネッセント光として 4 μm 程度に拡大した状態でポリマー光導波路へと結合するため、スポットサイズ変換が実現している。

さらに、ポリマー光導波路のコア形状にもテーパ構造を設け、SMF の MFD である 7~10 μm 程度までスポットサイズを拡大することで、SMF との結合に関してもさらなる高効率化を目指す研究も存在する[2-20]。以上より、ポリマー光導波路型スポットサイズコンバータは、シリコンフォトニクス技術と WDM 技術双方に適合性を有する高効率光結合素子として、非常に有用であるといえる。

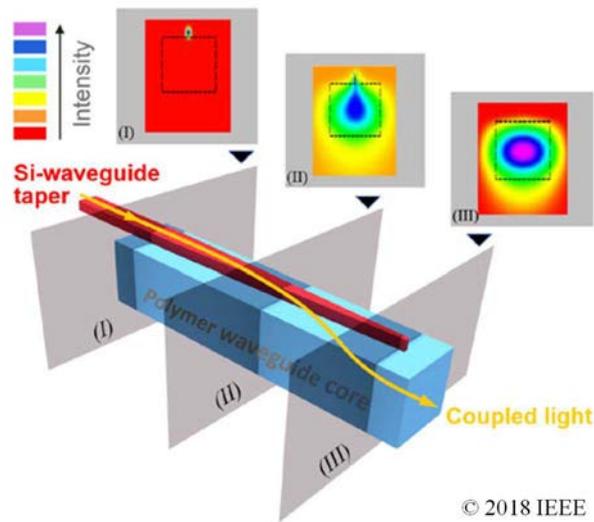


Fig. 2-13 ポリマー光導波路によるスポットサイズコンバータ検討例[2-19]

シリコン細線導波路-ポリマー光導波路間のアディアバティックカップリング実現のためには、両者のコアを互いに限りなく近接させるための集積化を要する。

IBM Zurich 研究所による集積化例を Fig. 2-14 に示す。この例では、剥き出しのシリコン細線コアを有するシリコンフォトニクスチップを、ポリマー光導波路が実装されたインターポーザ上にフリップチップ実装し、同じく剥き出しとなったポリマー光導波路コアに物理的に接触させている[2-19]。

IBM Watson 研究所では、Fig. 2-15 のように、シリコン細線導波路コアを有するチップに対して、ポリマー光導波路を上から載せる形で集積している[2-21]。剥き出しとなったコアどうしが互いに接触していることが、Fig. 2-15 に示した断面写真よりうかがえる。ポリマー光導波路のもう一方の端面は PMT コネクタ加工を施しており、SMF とのパッシブアライメントを目論んでいる。

この他にも、シリコン細線導波路コアを内包するようにポリマー光導波路コアを形成することで結合効率を向上させる集積化例[2-22]もあり、多様な集積化方法を念頭に置いた検討が必要であることがうかがえる。

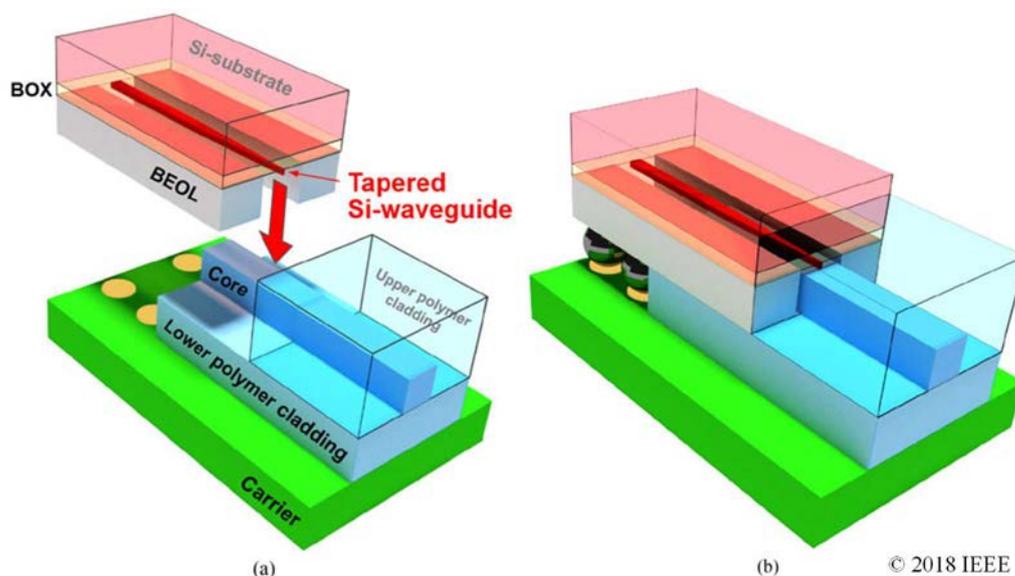


Fig. 2-14 IBM Zurich 研究所によるシリコン細線導波路とポリマー光導波路の集積化例 [2-19]

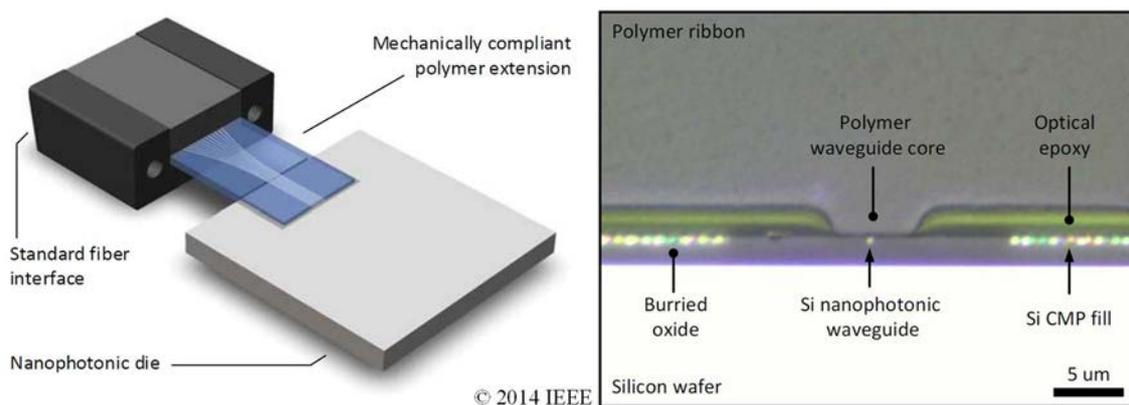


Fig. 2-15 IBM Watson 研究所によるシリコン細線導波路とポリマー光導波路の集積化例 [2-21]

以上を踏まえ、本研究で想定するシングルモード光リンクを Fig. 2-16 に示す。シリコンフォトニクスチップに実装された Si 細線導波路からの光はスポットサイズコンバータであるポリマー光導波路へとアディアバティックカップリングする。ポリマー光導波路と SMF はボードエッジにてバットカップリングし、省スペースな光結合を実現する。

SMF とのバットカップリング部には、マルチモード光リンクと同様に MT コネクタ-PMT コネクタによるパッシブアライメントを適用するという研究開発動向がある。ただし、PMT コネクタの加工精度及びポリマー光導波路自体の切り出し精度の観点から、数 μm オーダーの位置ずれが発生してしまうのが現状である。この位置ずれにより、シングルモード光リンクが許容する位置ずれ精度を現状では満たしていないため、実用化は未だ難しく、研究段階

にとどまる。

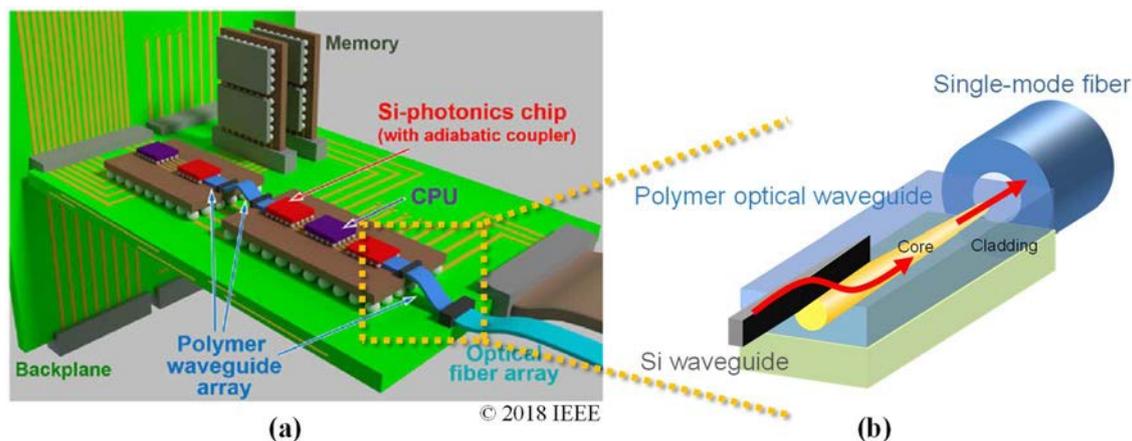


Fig. 2-16 (a)シングルモード光リンク [2-19] (b)Si 細線導波路-ポリマー光導波路-SMF の結合

2.3.3 リンクバジェット

光リンク内で生じる損失を議論する際に重要な概念となるのがリンクバジェット [2-23] である。ここでは、Fig. 2-5 に示したオンボード・ボード間マルチモード光リンクを例にとり、リンクバジェットの重要性について説明する。

光源から発せられた光信号が光リンク内を伝搬するにつれて、あらゆる要因で生じる光損失により、その光強度が減衰していく。その概念図を Fig. 2-17 に示す。光損失によって強度が減衰した光信号は、最終的にリンク終端である PD に受光され、信号処理を受ける。光源出力から PD による受光までに生じた光損失の総和をリンク損失と呼ぶ。光配線板で用いられる光源の出力光は、eye safety 強度、消費電力等の観点から、強度の上限が規定される。また、光信号を受光する PD にも、使用波長や信号伝送速度、PD の性能等によって最小受光感度が存在する。光源出力光強度と PD 最小受光感度の差によって、許容されるリンク損失の上限値が決定づけられる。リンク内最大損失許容量のことをリンクバジェットと呼ぶ。通信の成立のためには、リンク損失はリンクバジェットを下回らなければならない。現状、25 Gbps の信号伝送を行う場合のリンクバジェットは 12 dB 程度である。

ここで、オンボード・ボード間マルチモード光リンクでのリンクバジェットの内訳を Fig. 2-18 に示す。リンク損失はリンクバジェット以下に収まる必要があり、リンクバジェットからリンク損失を差し引いた値をデザインマージンと呼ぶ。このデザインマージンが広く取れるほど、通信が安定する。リンク損失は、伝搬損失、結合損失、パワーペナルティに大きく分類される。

伝搬損失は、導波路やファイバの材料由来の吸収損失、散乱損失等、光が伝送媒体中を伝

搬することによって生じる損失であり、伝送距離に比例する。ボード間光インターコネクト技術として用いられる光ファイバ内で生じる伝搬損失は、数メートル程度の長さではほとんど無視できる。マルチモードポリマー光導波路の伝搬損失は概算として 0.04 dB/cm ほどであり、ボードレベルの短距離通信下(導波路長はおよそ 5 cm)では、リンク内伝搬損失はおよそ $0.4 \text{ dB} (= 0.04 \text{ dB/cm} \times (5 \text{ cm} \times 2 \text{ pieces}))$ 程度と見積もられる。より複雑な光配線が実装され、 50 cm 長ほどの導波路が用いられる場合には、同様の計算により伝搬損失はおよそ 4 dB となる。

パワーペナルティとは、光信号が伝送路を伝搬することによって発生する信号劣化(パルス拡がり)の補償のためのパワー増加分のことであり、リンク損失の一因として換算できる。パワーペナルティも伝送距離に比例して増加するため、オンボード・ボード間光リンクのような短距離通信下では、現状の通信速度においてはほぼ問題視されない。

一方、結合損失に関しては、距離に依存せずに各接続点にて絶対的に発生する。ひとつの接続点で生じる結合損失は、結合に与る光素子にももちろん依存するが、概算で 1 dB 弱ほど生じてしまうのが現状である。特にミラーによる直角光路変換を含む場合には結合損失の増加が懸念される。

ここで、デザインマージンを最低限確保(2 dB 以上)した場合のリンクバジェットの内訳例が Fig. 2-18(a)に示されている。リンクバジェットを 12 dB と仮定すると、 2 dB のデザインマージンを確保するためには、リンク全体で生じる結合損失は 6.0 dB 以下に抑えなくてはならない。すると、一つの結合点にて許される結合損失の目標値は 1.5 dB と設定される。

これに対し、一つの結合点にて生じる結合損失を 1.0 dB に抑えられた場合、リンクバジェットの内訳は Fig. 2-18(b)のように変化する。リンク全体で生じる結合損失は 4.0 dB となるので、デザインマージンを 4.0 dB にまで向上できる。距離に依存する伝搬損失とは異なり、結合損失はいかなる導波路長の場合にも絶対的に生じるため、その影響は大きい。結合損失の低減により、デザインマージンの劇的な改善が可能であるともいえる。

よって、ボードレベルの短距離光通信では、リンク損失の大部分を結合損失が占めており、リンク損失低減のためには結合損失の低減が不可欠であることがわかる。

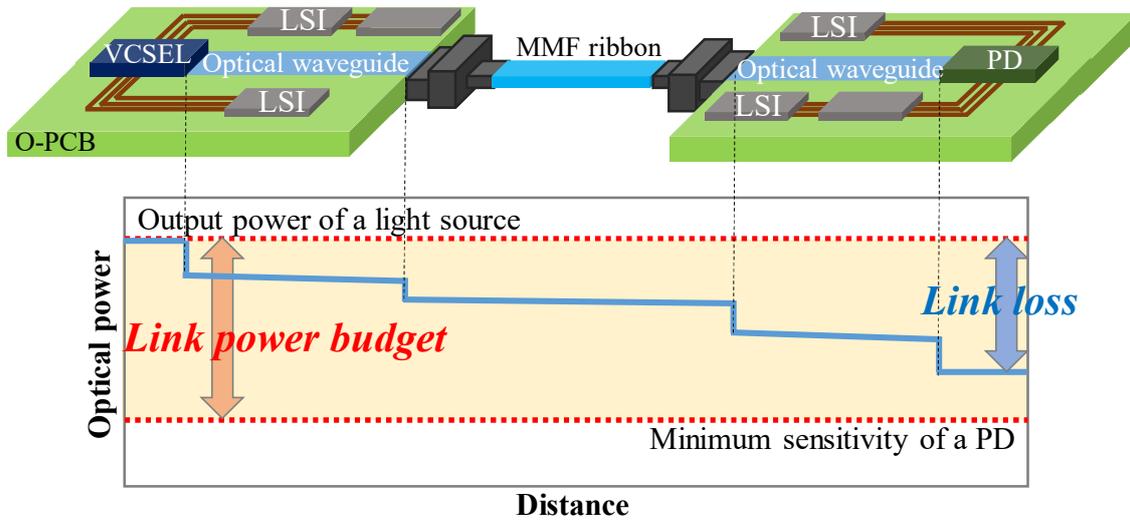


Fig. 2-17 オンボード・ボード間マルチモード光リンクでのリンクバジェット

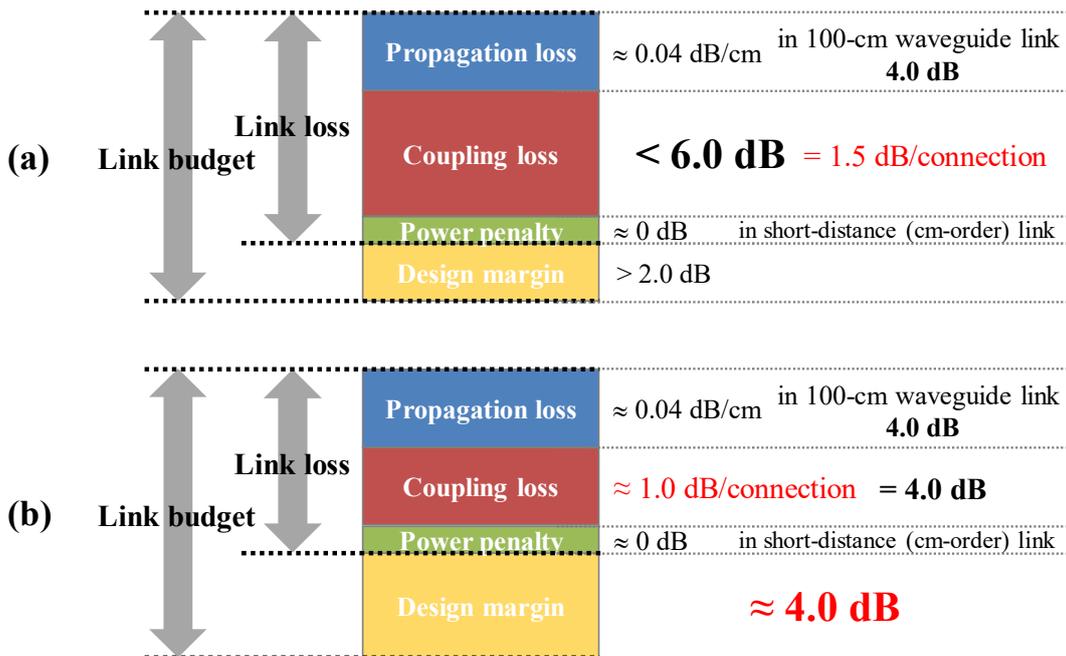


Fig. 2-18 リンクバジェットの内訳 (a)最低デザインマージン確保時 (b)結合損失低減時

2.4 結言

本章では、オンボード光インターコネクタ技術として期待されるポリマー光導波路について、その構造と特性を示した。特に、コア内に屈折率分布を有する GI 型光導波路の光学特性を、屈折率が一樣である SI 型光導波路と比較し、コア内に屈折率分布を形成すること

の重要性を示した。また、ポリマー光導波路と他の光学素子によって構成されるマルチモード光リンク及びシングルモード光リンクを紹介し、ポリマー光導波路を取り巻く光結合系について整理した。最後に、光リンク内で生じる光損失を評価するために重要なリンクバジェットの概念を紹介し、結合損失低減の重要性を再確認した。

Reference

- [2-1] 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).
- [2-2] Y. Koike, Y. Takezawa, Y. Ohtsuka, “New interfacial-gel copolymerization technique for steric GRIN polymer optical waveguides and lens arrays,” *Appl. Opt.*, Vol. 27, No. 3, pp. 486-491 (1998).
- [2-3] T. Ishigure, K. Shitanda, and Y. Oizumi, “Index-profile design for low-loss crossed multimode waveguide for optical printed circuit board,” *Opt. Express*, Vol. 23, No. 17, pp. 22262-22273 (2015).
- [2-4] T. Kudo and T. Ishigure, “Analysis of interchannel crosstalk in multimode parallel optical waveguides using the beam propagation method,” *Opt. Express*, Vol. 22, No. 8, pp. 9675-9686 (2014).
- [2-5] R. Dangel, C. Berger, R. Beyeler, L. Dellmann, M. Gmür, R. Hamelin, F. Horst, T. Lamprecht, T. Morf, S. Oggioni, M. Spreafico, and B. J. Offrien, “Polymer-waveguide-based board-level optical interconnect technology for Datacom application,” *IEEE Trans. Adv. Packag.*, Vol. 31, No. 4, pp. 759-767 (2008).
- [2-6] N. Hendrickx, J. V. Erps, G. V. Steenberge, H. Thienpont, P. V. Daele, “Tolerance analysis for multilayer optical interconnections integrated on a printed circuit board”, *IEEE J. Lightw. Technol.*, Vol. 25, No. 9, pp. 2395-2401 (2007).
- [2-7] Y. Koike, S. Matsuoka, and H. E. Bair, “Origin of excess light scattering in poly(methyl methacrylate) glasses,” *Macromolecules*, 24, pp. 4807-4815 (1992).
- [2-8] 住友電気工業, “プレスリリース 光ファイバ伝送損失の世界記録を更新”, <https://sei.co.jp/company/press/2017/03/prs029.html> (2020年1月閲覧).
- [2-9] 山内潤治, 藪哲郎, 「光導波路解析入門」, 森北出版株式会社 (2007).
- [2-10] 喜瀬智文, 鈴木理仁, 舟橋政樹, 長島和哉, 那須秀行, “28 Gb/s 1060 nm VCSEL の開発とマルチモード光ファイバリンクの特性”, 古河電工時報 134号 (2015).
- [2-11] F. E. Doany, C. L. Schow, B. G. Lee, A. V. Rylyakov, C. Jahnes, Y. Kwark, C. Baks, D. M. Kuchta, and J. A. Kash, “Dense 24 TX + 24 RX fiber-coupled optical module based on a holey CMOS transceiver IC,” *Proc. of 2010 IEEE Electronic Components and Technology Conference (ECTC)*, pp. 247-255 (2010).
- [2-12] 光回路実装技術委員会, “光回路実装技術ロードマップ 2016年度版「光インターコネクションの第二普及世代に向けた課題と予測」”, エレクトロニクス実装学会 (2017).
- [2-13] IEEE Standard for Ethernet, IEEE Standard 802.3 TM-2015 (2015).
- [2-14] T. Satake, T. Arikawa, P.W. Blubaugh, C. Parsons, and T. K. Uchida, “MT multifiber connectors

and new applications,” Proc. of 1994 IEEE Electronic Components and Technology Conference (ECTC), pp. 994-999 (1994).

[2-15] M. Takezaki and R. Nagase, “Design for PMT connector (Polymer waveguides connected with MT connector),” Proc. of 2014 IEEE CPMT Symposium Japan (ICSJ), pp. 169-172 (2014).

[2-16] Woo-Jin. Lee, S. H. Hwang, M. J. Kim, E. J. Jung, J. B. An, G. W. Kim, M. Y. Jeong, and B. S. Rho, “Multilayerd 3-D optical circuit with mirror-embedded waveguide films,” IEEE Photon. Technol. Lett., Vol. 24, No. 14, pp. 1179-1181 (2012).

[2-17] T. Tsuchizawa, K. Yamada, H. Fukuda, T. Watanabe, J. Takahashi, M. Takahashi, T. Shoji, E. Tamechika, S. Itabashi, and H. Morita, “Microphotonics Devices Based on Silicon Microfabrication Technology,” IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron., Vol. 11, No. 1, pp. 232-240 (2005).

[2-18] R. Dangel, J. Hofrichter, F. Horst, D. Jubin, A. L. Porta, N. Meier, I. M. Soganci, J. Weiss, and B. J. Offrein, “Polymer waveguides for electro-optical integration in data centers and high-performance computers,” Opt. Express, Vol. 23, No. 4, pp. 4736-4750 (2015).

[2-19] 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 J. Sel. Top. Quantum Electron., Vol. 24, No. 4, 8200211 (2018).

[2-20] K. Yasuhara, F. Yu, and T. Ishigure, “Polymer waveguide based spot-size converter for low-loss coupling between Si photonics chips and single-mode fibers,” Proc. of 2017 Optical Fiber Communications Conference and Exhibition (OFC), 16929675 (2016).

[2-21] T. Barwicz, Y. Taira, H. Numata, N. Boyer, S. Harel, S. Kamlapurkar, S. Takenobu, S. Laflamme, S. Engelmann, Y. Vlasov, and P. Fortier, “Assembly of mechanically compliant interfaces between optical fibers and nanophotonic chips,” Proc. of 2014 IEEE Electronic Components and Technology Conference (ECTC), pp. 179-185 (2014).

[2-22] A. L. Porta, R. Dangel, D. Jubin, F. Horst, N. Meier, D. Chelladurai, B. W. Swatowski, A. C. Tomasik, K. Su, W. K. Weidner, and B. J. Offrein, “Optical coupling between polymer waveguides and a silicon photonics chip in the O-band,” Proc. of 2016 Optical Fiber Communications Conference and Exhibition (OFC), M2I.2 (2016).

[2-23] 光回路実装技術委員会, “光回路実装技術ロードマップ 2010 年度版「光インターコネクションへの期待と展望」”, エレクトロニクス実装学会 (2011).

第3章

ポリマー光導波路の作製法

3.1 緒言

本研究では、ポリマー光導波路の光結合特性について詳細に解明するべく、ポリマー光導波路のコア形状、コア内屈折率分布による比較を行っていく。そのためには、同種ポリマー材料を用いて、異なるコア形状やコア内屈折率分布を形成する作製技術の確立が不可欠である。

本章では、日産化学(株)製 有機-無機ハイブリッド樹脂を用いたポリマー光導波路の作製法についてまとめる。リソグラフィ工程による矩形 SI 型コア光導波路の作製手法として有用な直接露光法、当研究室にて独自考案された円形 GI 型コア光導波路を作製可能な Mosquito 法、SI 型・GI 型の作り分けが可能な矩形コア光導波路作製手法であるインプリント法について紹介する。直接露光法によるポリマー光導波路作製を当研究室にて確立するのは本研究が初の試みであり、その作製手法については特に詳細に述べる。

3.2 ポリマー光導波路作製のための樹脂材料

本研究では、ポリマー光導波路の異なる作製手法に対し、同一のポリマー材料を用いることで、その光学特性を対等に比較することを試みた。そのポリマー材料として、本研究では、日産化学(株)製 有機-無機ハイブリッド樹脂である SUNCONNECT®シリーズに着目している。

一般的な有機材料が炭素-水素間の分子振動吸収の影響により近赤外波長帯にて高損失を示すのに対し、本材料は、マルチモード光リンクの使用波長帯である 850 nm のみならず、1310 nm, 1550 nm といったシングルモード光リンクを見据えた近赤外波長帯においても低損失を示すと期待される[3-1]。Fig. 3-1 に、SUNCONNECT®シリーズ及びシロキサン系樹脂を使用して作製したマルチモードポリマー光導波路の挿入損失波長スペクトル測定結果を示す。Fig. 3-1 より、SUNCONNECT®シリーズベース光導波路は、シロキサン系樹脂ベース光導波路に比べ、いかなる波長においても低損失を示しており、とくに 1300 nm を超える長波長帯にてその差が顕著であることがわかる。伝搬損失としては、シロキサン系樹脂ベース光導波路は波長 1310 nm, 1550 nm にてそれぞれ 0.34 dB/cm, 1.25 dB/cm と測定されているのに対し、SUNCONNECT®シリーズベース光導波路は 0.35 dB/cm, 0.58 dB/cm の低伝搬損失を実現している[3-2]。日産化学(株)が提示する材料損失(波長 1310 nm, 1550 nm にてそれぞれ 0.28 dB/cm, 0.44 dB/cm[3-1])に対し、光導波路構造由来の損失上昇は幾分見られるも

の、シロキサン系樹脂と比較して、特に 1550 nm において非常に低損失であるといえる。

さらに、SUNCONNECT®シリーズを用いて作製されたポリマー光導波路は高い耐熱性を示し、はんだリフロー工程試験を経ても光学特性に大きな変化を及ぼさないことが確認されている[3-3]。

以上のことから、SUNCONNECT®シリーズは、マルチモード光リンク、シングルモード光リンク双方に適用し得るポリマー光導波路材料として有用であるといえ、本章では、この材料を用いたポリマー光導波路作製について論ずる。なお、SUNCONNECT®シリーズに含まれる材料は、多様な作製法に適用するべく粘度を調整しているため各々に異なる名称が与えられるが、材料母材はすべて同一である。

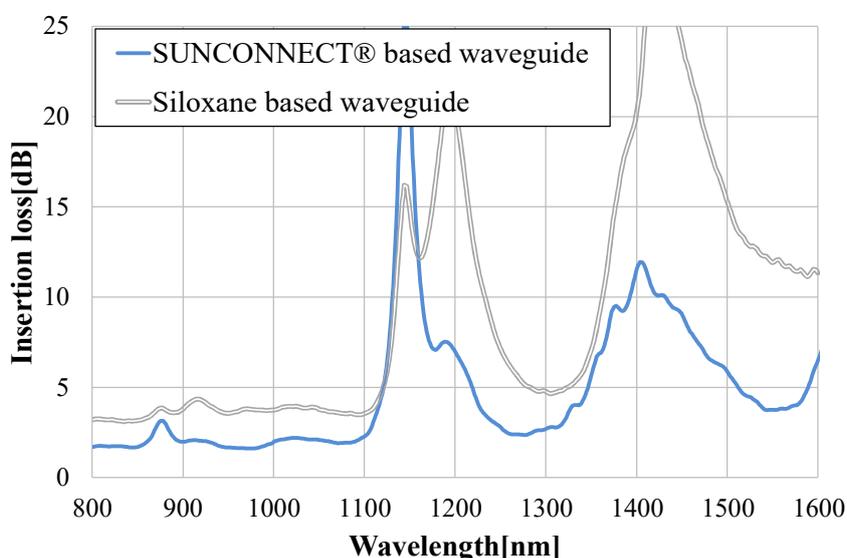


Fig. 3-1 SUNCONNECT®シリーズ及びシロキサン系樹脂を用いて作製されたマルチモードポリマー光導波路の挿入損失波長スペクトル

数多くのポリマー光導波路用材料と同様に、SUNCONNECT®シリーズも紫外線硬化型のモノマー材料であり、作製工程中に紫外線照射を含む。この紫外線照射がモノマーの硬化に寄与し、得られるポリマーの硬化度合を決定づけるため、紫外線露光量を制御することは極めて重要である。

しかし、使用する紫外線露光機やランプによって照度が異なるため、露光時間を固定したとしても、材料に実際に照射される露光量は当然異なる。さらに、紫外線ランプとして主に用いられる高圧水銀ランプは、g線(波長 465 nm)、h線(波長 405 nm)、i線(波長 365 nm)の三種の光を含み、波長フィルタを使用しない場合、これら波長のすべてがモノマーの硬化に寄与する可能性がある。現に、SUNCONNECT®シリーズは、g線には吸収感度を持たない一方で、h線とi線には異なる吸収感度を持ち、波長ごとにモノマー硬化に与える影響が異なることがわかっている。吸収感度の波長依存性は、シリーズに含まれるそれぞれの材料によっ

て、電子遷移吸収が見られる波長 350 nm 以下ではわずかな相違が見られるものの、硬化に与る波長においては大きな差異はなく、同一とみなせることを確認している。

よって、使用する露光装置によらず作製条件を統一するため、導波路材料に実際に吸収され、硬化に寄与する露光量を表す指標を、「材料吸収量(M.A. : Material Absorption amount)」として定め、(3-1)式のように定義することとした。

$$\text{材料吸収量(M.A.)} = (P_i \times 1 + P_h \times a_h) \times t \quad (3-1)$$

ここで、 t は露光時間[s]、 P_i 、 P_h は使用ランプの*i*線照度[mW/cm²]、*h*線照度[mW/cm²]をそれぞれ表し、 a_h は使用する導波路材料の*i*線に対する吸収係数を1とした場合の、*h*線に対する規格化吸収係数を表している。 a_h は、材料メーカーである日産化学㈱によって測定・評価された値を用いており、ここでは明記しない。この式により、材料吸収量[J/cm²]は、「照射される紫外光がすべて*i*線であったと仮定したとき、モノマーの硬化に与る正味の露光量」として定義される。本研究では、いかなる露光機を用いた場合にも、この材料吸収量(M.A.)を計算、明記し、この値により紫外線露光量を評価することとする。

3.3 直接露光法

3.3.1 直接露光法による導波路作製工程概略

直接露光法による導波路作製工程の概略図を Fig. 3-2 に示す。適切な表面処理を施したシリコン(Si)基板上に導波路サンプルを形成していく。まず、スピコートにより、正確に膜厚を制御して、クラッドモノマーを Si 基板上に塗布した後、紫外線露光により硬化する。次に、硬化したクラッド上に、同様のスピコート工程によりコアモノマーを塗布した後、フォトマスクを介して紫外線露光をすることで、マスクパターンを転写する。マスクパターン上の遮蔽部に位置する未硬化モノマーを現像工程にて完全に除去することで、リッジ上の導波路コアパターンを得る。その後、コアパターン上にクラッドモノマーをスピコートし紫外線硬化をすることで導波路構造を得る。最後に、ポストベークを行うことで、ポリマー材料が完全硬化し、導波路が完成する。この工程により、コア内屈折率が均一な、矩形 SI 型コアを形成することができる。

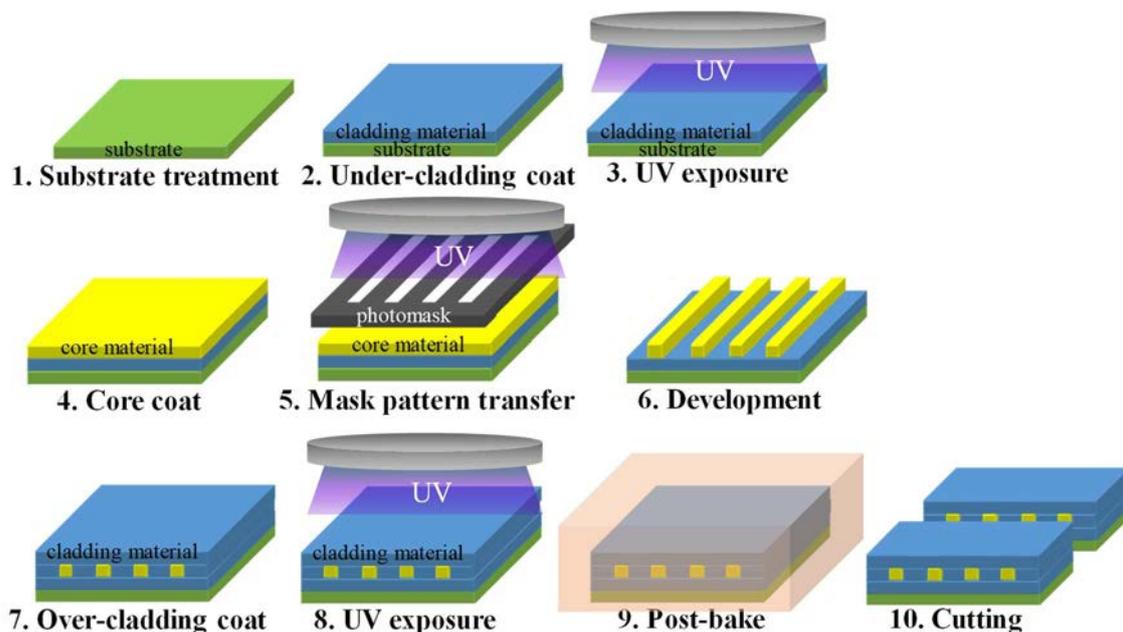


Fig. 3-2 直接露光法による導波路作製工程

3.3.2 導波路作製条件の策定

基板処理

直接露光法では、数十~数百 μm 程度の厚さを有する薄膜型ポリマー光導波路サンプルを積層工程により形成していくため、土台となる基板を選定し、その上に導波路を作製していく。基板表面は十分に平滑である必要があり、導波路材料が均一に製膜される必要がある。さらに、作製工程中にポリマー光導波路サンプルが基板から剥離することがあってはならない。特に、作製工程に必ず含まれる現像時には導波路サンプルが基板から剥離しやすくなるため、ポリマー光導波路を基板に十分に密着させるための適切な基板処理を施しておく必要がある。本項目では、適切な基板の選出及び基板処理について検討する。

まず、基板の濡れ性について検討した。検討サンプルの作製条件を Table 3-1 にまとめる。のちに紹介する、シングルモード導波路用のクラッド材料である NP-216 を基板上にスピスコートした後、 90°C に温めたホットプレート上にて 30 秒間ベークする。ベーク後に紫外線照射により材料を硬化させ、サンプルを得る。基板としては、Si ウエハと酸化膜付き Si ウエハ(以下、 SiO_2 ウエハと表記)を用いた。 SiO_2 ウエハのサンプルについては、材料スピスコート前にプラズマクリーニングによる基板処理を施すサンプルと施さないサンプルの 2 パターンを検討した。以上、計 3 サンプルの写真を Fig. 3-3 に示す。

Fig. 3-3(a), (b)より、サンプル 1, 2 は、材料が基板全体に塗布されておらず、スピスコート後のベーク処理により材料が収縮した様子が見られる。これらに対しサンプル 3 では、熱処理を施してもなお、導波路材料が基板全面に塗布されており、基板の濡れ性が改善され

ていることが Fig. 3-3(c)よりわかる. よって, 濡れ性を考えるうえでは, サンプル3の基板条件が最適であると判断できる.

Table 3-1 基板濡れ性検討用サンプル作製条件

	Sample 1	Sample 2	Sample 3
Substrate	Si	SiO ₂	
Plasma cleaning	-		15 mA – 5 min
Material coating	NP-216, 1000 rpm – 240 s		
Pre-bake	90°C – 30 s		
UV curing	19.6 mW/cm ² – 51 s		

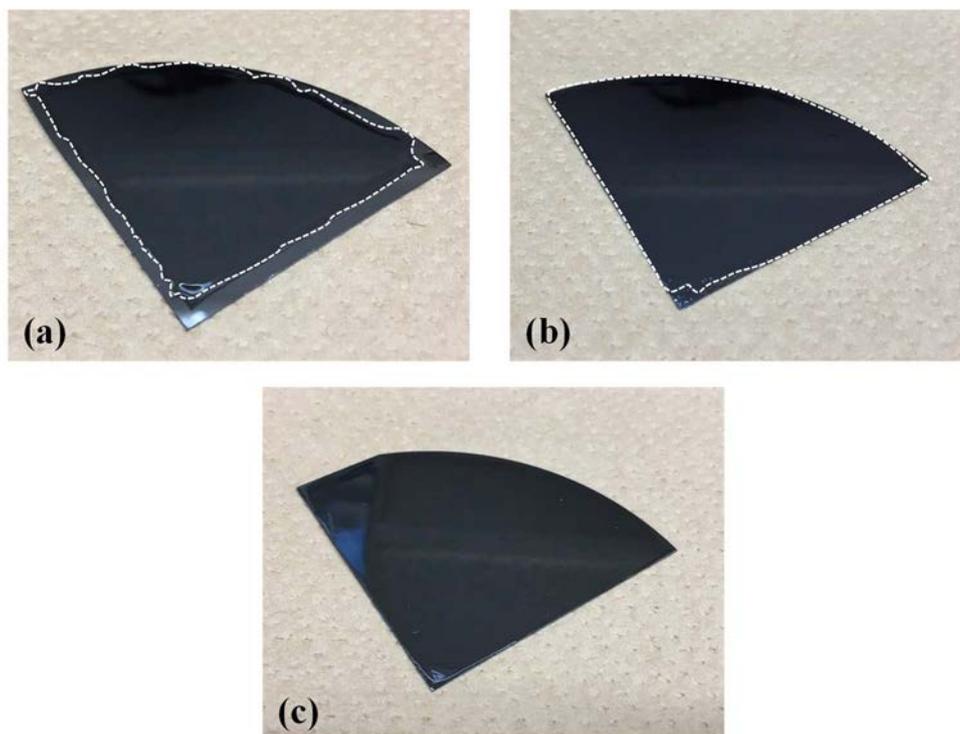


Fig. 3-3 基板濡れ性検討用サンプル写真 (a)Sample 1 (b)Sample 2 (c)Sample 3

次に, 紫外線照射による硬化後の密着性について検討する. 検討サンプルの作製条件を Table 3-2 にまとめる.

無機基材の密着性を向上させるための基板処理法として, シランカップリング処理が知られる[3-4]. シランカップリング剤は, 有機材料及び無機材料と結合する官能基を併せ持ち, 両物質間の機械的強度向上や接着性改良に利用されることから, 導波路材料と Si 基板との密着性向上にも応用できる. 本研究では, シランカップリング処理剤として, 信越化学

工業株製の 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。

SiO₂ ウェハにプラズマクリーニング処理を施した後、サンプル 5 のみに KBM-503 によるシランカップリング処理を施した。基板上に KBM-503 をスピコートした後、150℃の高温にて 10 分間バークし、基板上に残存した KBM-503 を完全に揮発させることで処理が完了する。その後、導波路クラッド材料である NP-216 をスピコートした後に紫外線照射により硬化させる。硬化させたのち、サンプルを現像液(PGMEA:IPA = 1:1 溶液)に 30 秒間浸し、導波路サンプルが基板から剥離しないかを判断する。

作製したサンプルの写真を Fig. 3-4 に示す。Fig. 3-4(a)より、サンプル 4 では、現像処理により導波路材料が基板から剥離している様子が確認できるのに対し、サンプル 5 では現像処理後にも導波路サンプルが基板全面に剥離なく密着していることが Fig. 3-4(b)よりわかる。KBM-503 により SiO₂ ウェハの導波路材料に対する密着性が向上したためと考えられ、以後は、この条件を基板処理条件として統一して検討を行っていく。

Table 3-2 基板密着性検討用サンプル作製条件

	Sample 4	Sample 5
Substrate	SiO ₂	
Plasma cleaning	15 mA – 5min	
Silane-coupling treatment	-	KBM-503 (1500 rpm – 30 s, 150°C – 10 min)
Material coating	NP-216, 1500 rpm – 60 s	
UV curing	19.6 mW/cm ² – 204 s	
Development	PGMEA:IPA = 1:1 – 30 s	
Bake	100°C – 60 s	

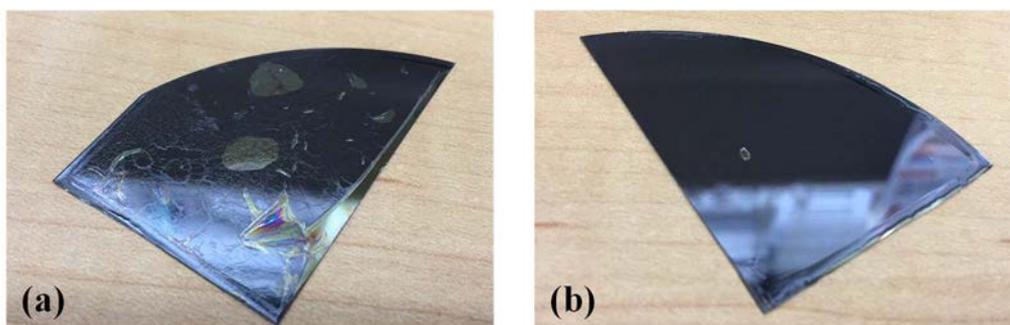


Fig. 3-4 基板密着性検討用サンプル写真 (a)Sample 4 (b)Sample 5

クラッド層形成

クラッド層形成時に重要となるのが、層の膜厚制御及び層表面の酸素阻害防止である。

【スピナーによる膜厚制御】

液体材料の精密な製膜技術として、スピナーコーティング技術が知られている。スピナーコーティングによって生成された紫外線硬化型ポリマー膜の表面粗さは、5 nm 程度まで低減できることがわかっており[3-5]、平滑な膜表面の生成技術として有用であるといえる。また、溶媒を含むポリマーの場合、液体がニュートン粘性流体として振る舞う範囲では、溶媒の種類や濃度に依存せず、膜厚が回転数の二乗根に反比例することが経験則として知られている[3-6]。さらに、紫外線硬化型のエポキシ樹脂のような無溶媒系のポリマーでは、スピナーコーティングで得られる膜厚 h は、(3-2)式で表されることがわかっている[3-7]。

$$h(f, t) = \frac{1}{4\pi f} \sqrt{\frac{3\eta}{\rho t}} \quad (3-2)$$

ここで、 η は液体の粘度、 ρ は液体の密度、 f はスピナーコーティングの回転速度、 t は回転時間を表す。この式は、回転時間が十分に長い($t \gg 3\eta/16\pi^2 f^2 \rho$)場合を想定している。(3-2)式より、無溶媒系のポリマーの場合には、回転時間 t を固定した場合、膜厚は回転速度 f に反比例することがわかる。よって、スピナーコーティングで得られる膜厚は、両対数グラフ上では、溶媒系材料の場合には-1/2、無溶媒系材料の場合には-1の傾きを持つ直線関係で表される。

本研究で主に使用するポリマー光導波路材料である、日産化学(株)製 有機-無機ハイブリット樹脂 SUNCONNECT®シリーズについて、スピナーコーティングで得られる膜厚と回転速度の関係を示すグラフ(以下、スピナーカーブと呼ぶ)を実測した。マルチモードスケールの光導波路とシングルモードスケールの光導波路とで、求められる膜厚に大きく差があるため、それぞれの膜厚を得るのに適した材料を選択することとした。直接露光法にて用いた材料をTable 3-3にまとめる。マルチモードスケール導波路のクラッド材料である NP-213 は無溶媒系であるが、シングルモードスケール導波路のクラッド材料である NP-216 は、薄膜生成に向け材料粘度を低減することを目的として、PGMEA によって希釈することで得られる材料であるため、溶媒系である。NP-213, NP-216 のスピナーカーブを測定した結果を、Fig. 3-5, Fig. 3-6 に示す。なお、回転時間は 60 秒に固定しており、紫外線硬化時の露光時間、材料吸収量はそれぞれ、206 秒、10.7 J/cm² である。この露光条件を選定した理由については後述する。

Fig. 3-5, Fig. 3-6 より、どちらのスピナーカーブも直線形状を示していることがわかる。また、Fig. 3-5 に示される NP-213 の膜厚は回転速度に反比例しており、(3-2)式から予想される結果と一致している。また、Fig. 3-6 に示される、溶媒系の NP-216 の両対数スピナーカーブの傾きは-0.707 となり、膜厚が回転速度の二乗根に反比例するという予想とは異なる結果となった。これは、NP-216 材料内に溶剤として含まれる PGMEA が回転とともに揮発し、スピナーコート中の材料粘度 ρ が一定ではないためであると考えられる。よって、無溶媒系・溶媒系いずれの材料の場合にも、両対数グラフが直線形状となるスピナーカーブを得るこ

とにより、精密な膜厚制御が可能になったといえ、以後は、これらのスピニングカーブを用いてクラッド層の膜厚制御を行っていく。

Table 3-3 直接露光法で用いる材料

	Multimode scale		Single-mode scale	
	Core	Cladding	Core	Cladding
Material	NP-001	NP-213	NP-001L2	NP-216
Viscosity	4700 cP	3400 cP	200 cP	320 cP
Refractive index	1.585@850 nm	1.557@850 nm	1.573@1550 nm	1.560@1550 nm

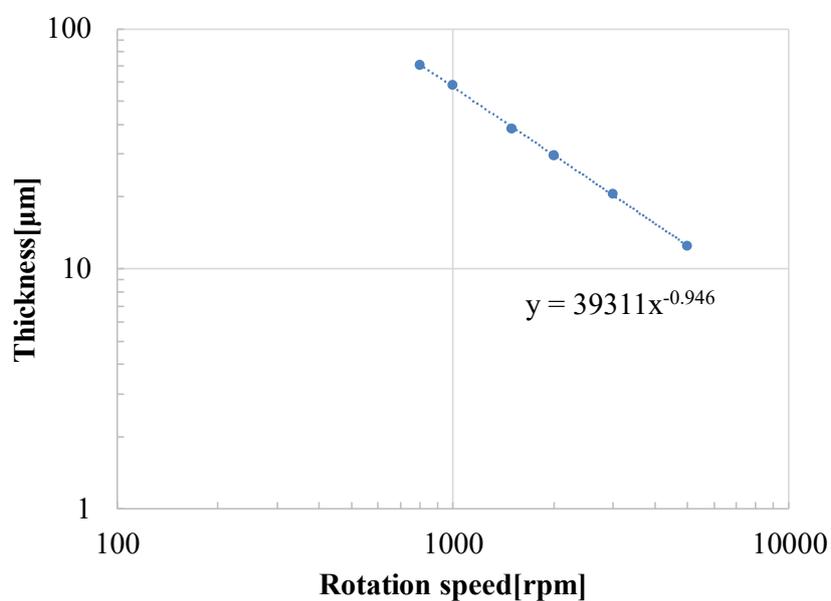


Fig. 3-5 マルチモードスケールクラッド材料 NP-213 のスピニングカーブ

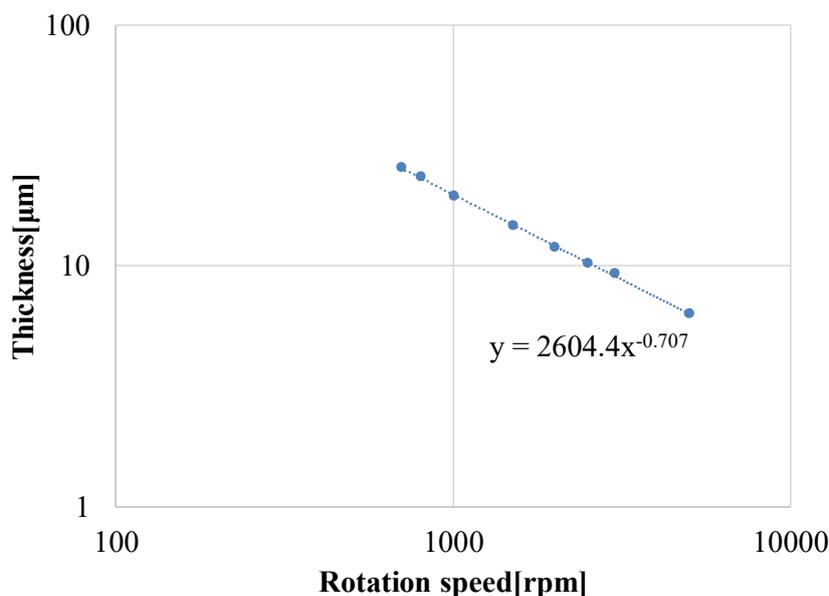


Fig. 3-6 シングルモードスケールクラッド材料 NP-216 のスピンのカーブ

【酸素阻害防止のための露光条件】

本研究にて直接露光法による導波路作製に使用した材料は日産化学(株)製 有機-無機ハイブリット樹脂 SUNCONNECT®シリーズであり、大気中にて紫外線露光をし、硬化反応を進めた場合、大気中に存在する酸素分子により酸素阻害反応が生じる。酸素阻害反応は硬化開始剤の脱活性反応及びポリマー鎖の重合停止反応により構成され、この反応により酸素に触れていた材料表面付近は硬化が進まず、未硬化モノマー層として残る。直接露光法は積層工程を踏むため、下層の表面状態は上層形成時の条件に影響するおそれがある。そのため、各層の形成時、特にコア層の土台となるアンダークラッド形成時には、酸素阻害による未硬化モノマー層の低減が必要とされる。

そこで、酸素阻害を防止するための露光条件の策定を行った。クラッドモノマー硬化時に、窒素やアルゴンなどの不活性ガス環境下にサンプルを置くことで、酸素阻害の防止を試みた。サンプルを透明密閉容器内に入れた後、容器内に窒素ガスまたはアルゴンガスを流し込み、継続的なガスのフロー状態を形成したうえで紫外線露光を行う。このとき、紫外線露光量を変化させた場合の酸素阻害層厚さを測定した。なお、酸素阻害層の厚さは、作製したサンプルを PGMEA:IPA=1:1 溶液にて 30 秒間現像し、酸素阻害層を完全に除去した場合に、現像前後の膜厚の差を得ることで測定した。各紫外線露光時間(材料吸収量)における、酸素阻害層厚さの測定結果を Fig. 3-7 に示す。なお、材料には NP-216 を使用した。

酸素阻害下である大気中にて露光を行った場合には、どの露光時間においても酸素阻害層を生じており、露光時間を 206 秒と十分長く取った場合にも 3 μm 弱ほどの酸素阻害層が残存してしまうのに対し、窒素ガス及びアルゴンガスフロー下にて露光した場合には、露光時間 51.6 秒でも酸素阻害層厚さは 1 μm を下回り、露光時間 206 秒にて酸素阻害層厚さはほ

ば無視できる程度にまで低減できていることが Fig. 3-7 よりわかる。よって、不活性ガス環境下にて十分な時間露光を行うことで酸素阻害を防止できるといえ、以後、クラッド層の露光条件を、アルゴンガス使用下にて露光時間 206 秒(材料吸収量 10.7 J/cm²)に統一して作製を行っていくこととする。

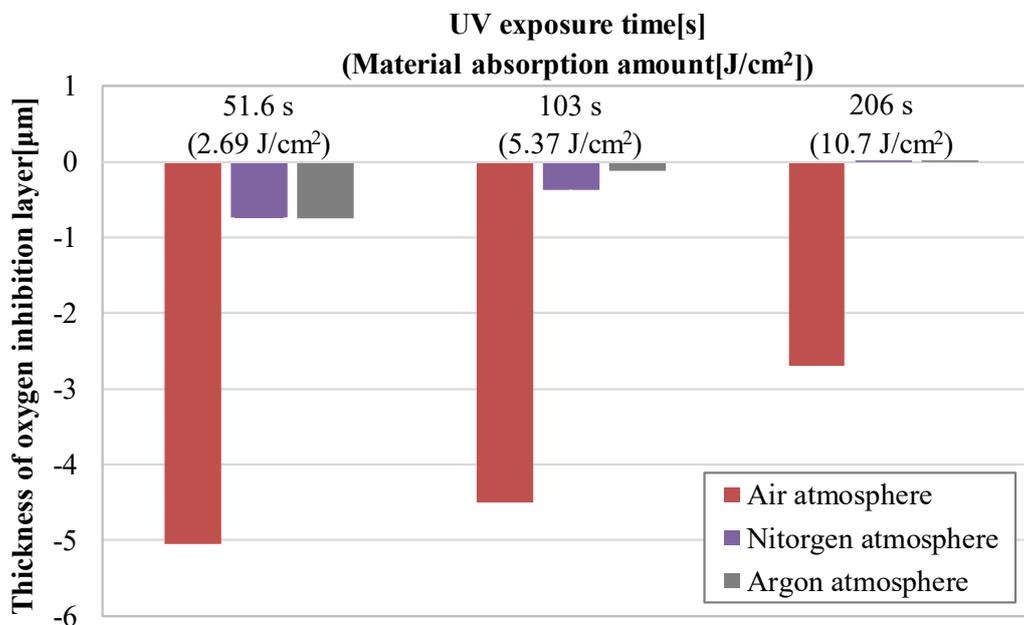


Fig. 3-7 酸素阻害層厚さと紫外線露光時間(材料吸収量)の関係

コア層形成

【露光時間に対する酸素阻害層厚さ】

コア層形成時には、フォトマスクを介して紫外線露光を行う関係で、不活性ガス環境下にサンプルを設置することが、装置の都合上困難である。そのため、大気中で露光を行うことが避けられず、表面への酸素阻害層の形成が懸念される。ただし、コア層形成工程には、コアパターン転写後に必ず現像処理が含まれるため、表面に形成された酸素阻害層は工程中にすべて除去される。よって、上層に影響を与えることはないと判断し、コア層形成時には大気中にて紫外線露光を行うこととする。

Fig. 3-7 の結果から、酸素阻害層の厚さは紫外線露光時間に依存することがわかっている。そして、現像工程後には酸素阻害層の厚さ分だけ膜厚が減少することとなるため、最終的に形成されるコア層の厚みは、露光時間に依存して変化することとなる。クラッド層形成の際には、酸素阻害を完全に防止する露光条件を選定することができたのに対し、コア層形成時には、紫外線露光によりフォトマスクパターンを転写するため、酸素阻害防止の観点のみで露光時間を決定することができない。そこで、大気中での露光時間に対する酸素阻害層の厚さを実測した。シングルモードスケールのコア材料である NP-001L2 についての結果を Fig. 3-8 に示す。

露光時間 206 秒(材料吸収量 10.7 J/cm^2)の場合には $2 \mu\text{m}$ ほどの厚さであった酸素阻害層は、露光時間の減少と共に急激に増加し、露光時間 6.5 秒(材料吸収量 0.339 J/cm^2)の場合には $3.66 \mu\text{m}$ もの酸素阻害層が生ずる。この厚みは、シングルモードスケールコア形成の際には全体の膜厚に与える影響が大きく、この値を考慮してコア層の厚さを設計する必要がある。

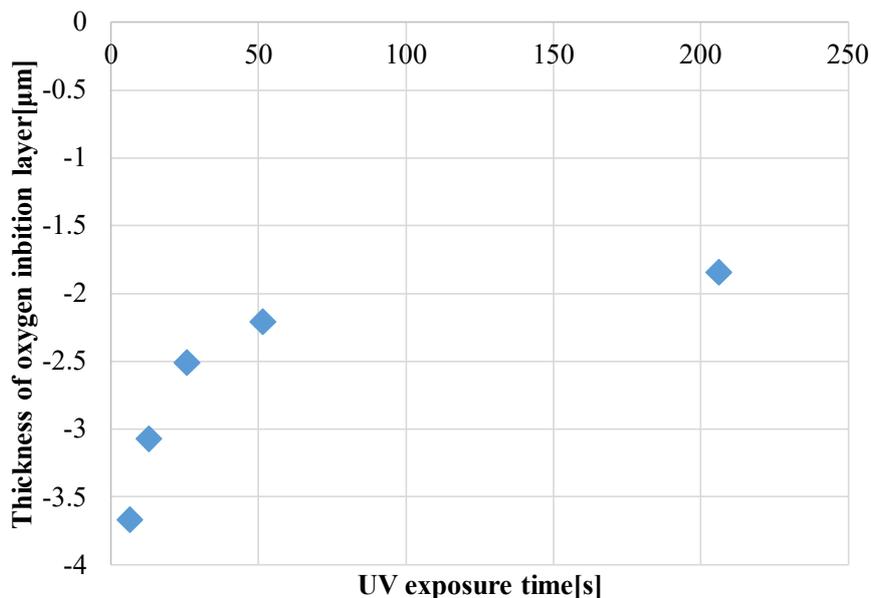


Fig. 3-8 シングルモードスケールコア材料 NP-001L2 の酸素阻害層厚さと紫外線露光時間の関係

【スピナーブによる膜厚制御】

コア層形成時の膜厚制御のため、コア材料のスピナーブを測定した結果を示す。コア層形成時には必ず現像工程を踏み、表面の酸素阻害層が除去されることにより膜厚が変化する。そのため、スピナーブ測定の際にも、紫外線硬化後に現像を行うことにより、最終的に得られる膜厚を測定した。この場合、クラッド層の場合とは異なり、コア層のスピナーブは(3-2)式に示した関係に則らないことが想定されたため、グラフには両対数グラフを用いていない。

マルチモードスケールのコア材料である NP-001(無溶媒系)のスピナーブを Fig. 3-9 に示す。ここで、露光時間は 103 秒に固定している。また、シングルモードスケールのコア材料である NP-001L2(溶媒系)のスピナーブを Fig. 3-10 に示す。シングルモードスケールのコア層形成の場合には、膜厚が $5 \sim 10 \mu\text{m}$ 程度と非常に薄いため、酸素阻害層厚さの露光時間に対する変化量が、全体の膜厚に与える影響が大きくなる。そのため、複数の露光時間に対するスピナーブを得る必要があると判断した。Fig. 3-10 には、4 種類の露光時間に対するスピナーブが示されているが、露光時間 12.9 秒の結果のみが実測であり、その他の結果は、Fig. 3-8 で得られた、各露光時間に対する酸素阻害層厚さを考慮して、露光時

間 12.9 秒の場合のスピンカーブに足し合わせる(あるいは差し引く)ことによって得た計算値である。

このように、マルチモードスケール、シングルモードスケールの両材料に対して、現像工程後に最終的に得られる膜厚を制御するためのスピンカーブを得ることができた。この膜厚が、リッジ状コアパターンの高さに相当する。

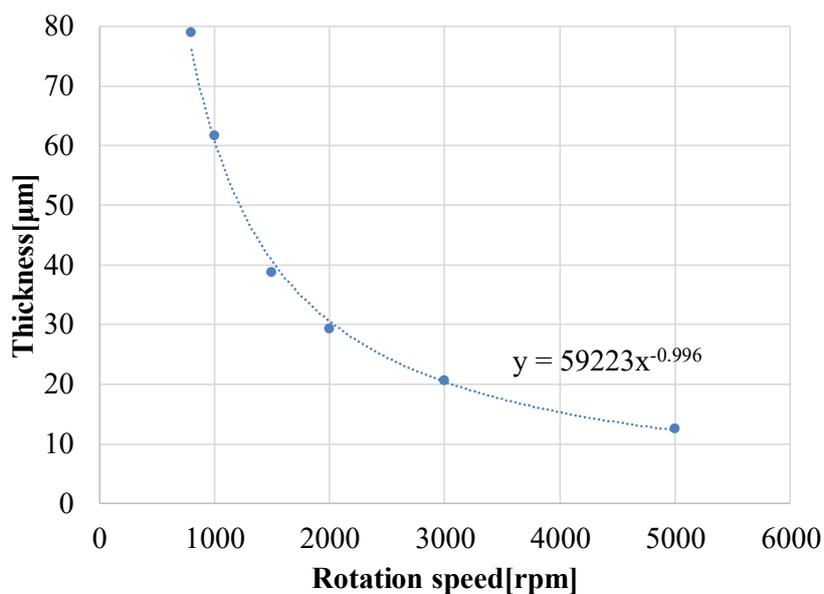


Fig. 3-9 マルチモードスケールコア材料 NP-001 のスピンカーブ

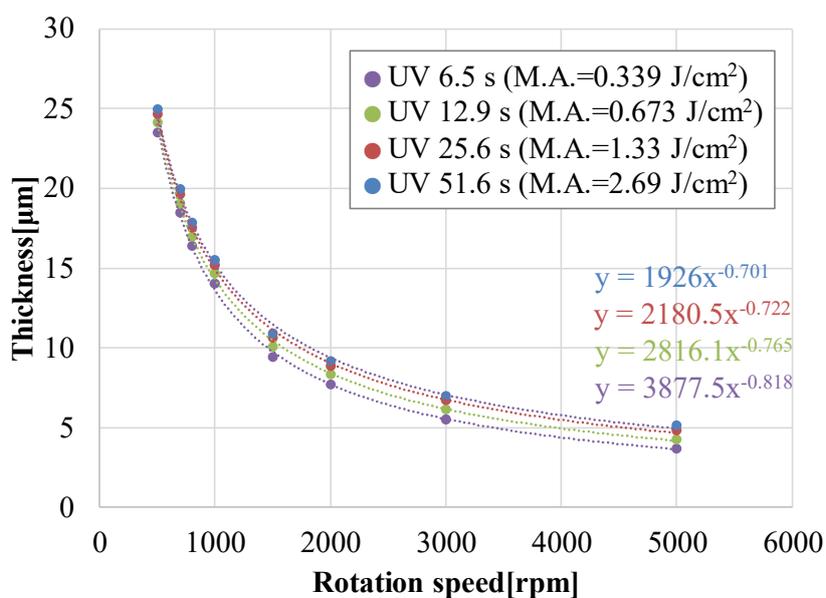


Fig. 3-10 シングルモードスケールコア材料 NP-001L2 のスピンカーブ

【コア形状を制御する露光条件】

コアパターンを転写する際、転写パターンの解像度を最大にするためには、フォトマスクとサンプルを完全に接着させた状態で露光を行うのが理想である。これをコンタクト露光法という。しかし、本研究にてサンプル表面に塗布された材料は未硬化状態のモノマーであるため、フォトマスクとサンプルを接着させることはできない。そこで、フォトマスクとサンプルの間に微小な空隙を設け、可能な限り近づけた状態で露光をする、プロキシミティ露光法を採用した。マスクパターンの開口部を透過した紫外光はフレネル回折の影響を受け、マスクから遠ざかるにつれて、強度分布が矩形状から中心にピークを持つ山状の分布へと変化していく。開口幅領域に光強度が十分に残っていないと、フォトマスクパターンをサンプルへ転写することは不可能となる。転写可能なパターン幅とプロキシミティギャップとの関係は(3-3)式のように表される[3-8]。

$$gap \leq \frac{0.35w^2}{\lambda} \quad (3-3)$$

ここで、 gap はプロキシミティギャップ、 w はフォトマスクのパターン幅、 λ は紫外光の波長である。(3-3)式で表される条件はあくまでも、フォトマスクパターンを転写可能である“限界の”プロキシミティギャップ量を定めたものであり、この式を満たせばパターン形状を正確に転写できるということではないということに注意されたい。

(3-3)式より、マルチモードスケールのコアパターンを転写する場合と、シングルモードスケールのコアパターンを転写する場合とで、必要とされるプロキシミティギャップの大きさが異なることがわかる。50 μm 幅程度のマルチモードスケールパターンの場合には、数10 μm 程度のプロキシミティギャップであれば、紫外光の回折によるパターン拡がりの影響をほぼ無視できるといえる。これに対し、数 μm 幅という極小スケールのパターンを転写する場合には、回折による影響を最小限に抑えるためにプロキシミティギャップを数 μm 程度にまで低減する必要がある、より高精度な制御が求められる。

フォトマスクパターンの転写精度は、形成されたパターンの幅のみで評価することはできず、パターンの断面形状も重要である。ここでは、マスクパターン転写時の露光時間及び材料吸収量が、形成されるコアの幅及び外形状に与える影響について検討した。

まず、マルチモードスケールの検討結果について論ずる。フォトマスクパターン転写時の露光時間を12.9秒、25.8秒とした場合について、直接露光法により導波路を作製した。材料にはTable 3-3に示したマルチモードスケール用の材料を用いており、Fig. 3-9に示したスピナーを用いてコア層の膜厚が約40 μm となるように制御している。Fig. 3-11に、各露光時間にて形成されたコアの端面写真を示す。フォトマスクパターン幅の変化に対応するように、形成されるコアの幅も変化していることがわかる。ただし、露光時間に対しては、コア幅やコア外形状に大きな変化はなく、いずれの露光時間を選定しても大きな違いはないと判断できる。よって、マルチモードスケールコア形成の際には、十分な硬化度が得ら

れると予想される 25.8 秒(材料吸収量 1.35 J/cm²)に露光条件を統一して作製を行うこととした。

次に、シングルモードスケールの検討結果について論ずる。4 種類の露光時間に対して、それぞれ直接露光法を用いて形成したコアの端面写真を Fig. 3-12 に示す。導波路作製には、Table 3-3 に示したシングルモードスケール用の材料を用い、コア材料のスピンコート条件は 3000 rpm, 60 秒に固定している。

マルチモードスケールの場合とは異なり、露光時間に依存して、形成されるコアの幅や外形状が大きく異なることが Fig. 3-12 よりわかる。同じフォトマスクパターン幅を用いた場合でも、露光時間が長くなるほど形成されるコア幅が広がる傾向にある。これは、フォトマスクパターン透過後の紫外光の回折により、長時間露光をすることで遮蔽部のモノマーの硬化が進行していくためだと考えられる。コアの下底の長さをコア幅と便宜上定義した場合、形成コア幅とフォトマスクパターン幅の関係を示すグラフを Fig. 3-13 に示す。どの露光時間でもフォトマスクパターン幅の増加に伴い、形成コア幅も線形的に増加しているが、露光時間が長いほど、転写倍率が增大しており、転写率が 1:1 となる露光時間は 12.9 秒であった。本研究では原則として、シングルモードスケールコア形成時には、転写率が最も良い 12.9 秒(材料吸収量 0.673 J/cm²)を最適露光時間として扱う。

さらに、露光時間が長くなるほど、コアの上底部の角の丸みが目立つ。これについても、フォトマスク透過後に回折した紫外光による遮蔽部のモノマーの硬化が、コアの高さ方向に対して直線的には進まないため、硬化を進行させる時間が長くなるほど、コアのエッジに丸みを形成させる結果となったと考えられる。

マルチモードスケール、シングルモードスケール双方に共通して、コア-クラッドの境界が明瞭であり、コア内屈折率が均一な SI 型プロファイルが形成できているといえる。

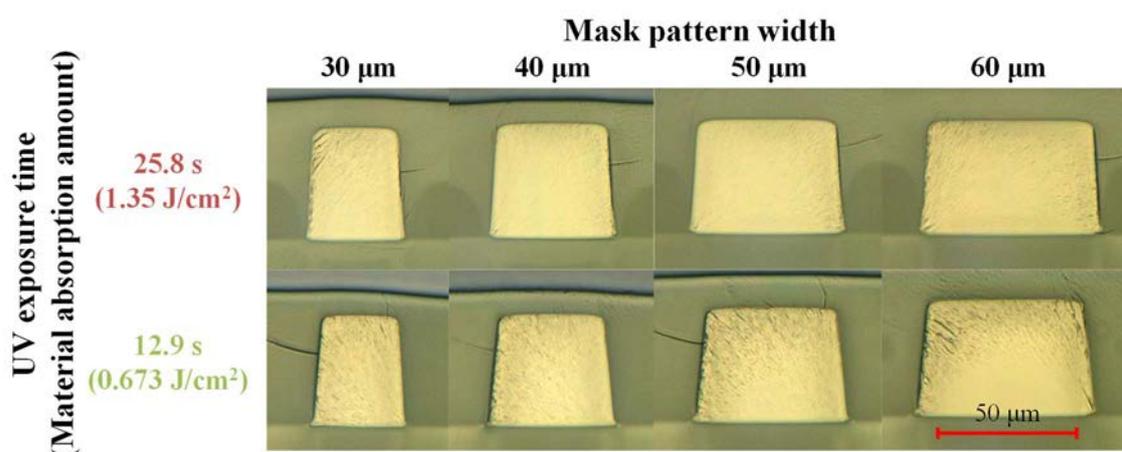


Fig. 3-11 直接露光法によって作製されたマルチモードスケール導波路コア

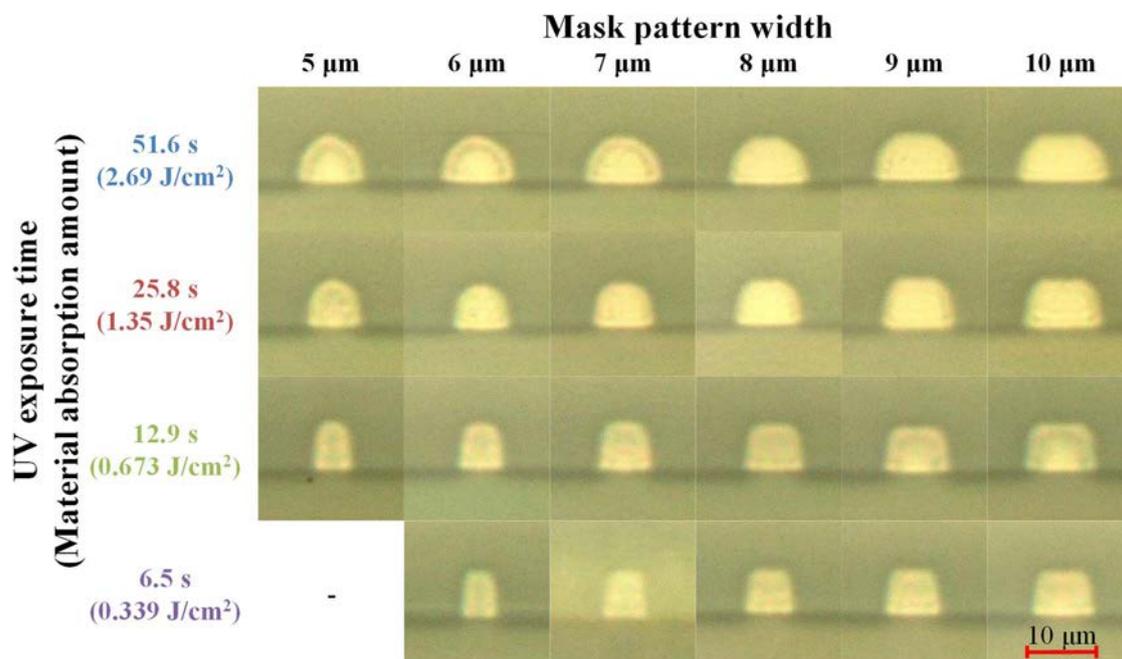


Fig. 3-12 直接露光法によって作製されたシングルモードスケール導波路コア

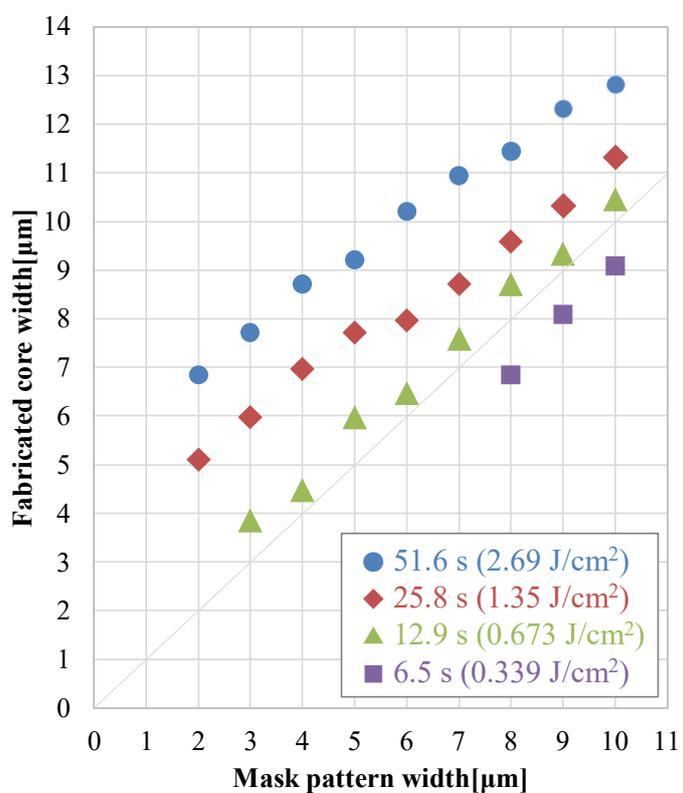


Fig. 3-13 フォトマスクパターンから予想されるコア設計幅と実際のコア形成幅の関係

3.3.3 実測及びシミュレーションによる屈折率推定

直接露光法にて作製されるポリマー光導波路の光学特性を適切に評価するためには、作製した光導波路のクラッドやコアの実際の屈折率を知ることが重要である。Table 3-3 に各材料の屈折率の値を示しているが、これは各材料が完全硬化に必要な規定の露光量にて硬化した場合に測定された屈折率であり、実際の光導波路の作製の際には、層によって露光量及び露光回数が異なるため、屈折率も微小に異なる可能性がある。

導波路コアの屈折率分布の測定方法として、干渉顕微鏡を用いた測定が挙げられるが、わずか数 μm ~ 10 μm 程度の微小なシングルモードコアの屈折率変化を測定することは非常に困難である。そのため、別の方法にて屈折率を測定する必要がある。ここでは、直接露光法にて作製されたシングルモードポリマー光導波路のコア、クラッドの屈折率を正確に推定するべく、実測及びシミュレーション双方からアプローチした結果を示していく。

プリズムカプラによる屈折率推定

ポリマー材料の屈折率測定の代表例にプリズムカプラを用いた測定がある。この方法を用いて、導波路のコア、クラッド材料の屈折率を測定した検討について報告する。

プリズムカプラによる屈折率測定のためには、基板上に材料を平滑に製膜したサンプルが必要である。屈折率測定用サンプルの作製条件を Table 3-4 にまとめる。クラッド材料である NP-216 は、実際の導波路作製時の条件と同一のスピンコート条件、紫外線露光条件を用いており、現像は行っていない。これに対し、コア材料については、実際の導波路作製時の条件を採用した場合、露光量不足によりサンプル表面荒れが生じ、正確な屈折率測定に足るサンプルを得ることができなかった。また、実際の導波路作製工程に含まれる現像処理によっても、サンプル表面荒れが生じることが懸念された。そのため、紫外線露光量を十分設けたうえで、露光後に現像処理を行う場合と行わない場合、両者についてサンプルを作製した。この条件で作製したサンプルに対する屈折率の測定値は、実験的考察の観点では小数点第3位までの正確性が保証されている。なお、測定波長は 1551 nm である。

Table 3-4 プリズムカプラによる屈折率測定用サンプル作製条件

Sample No.	材料	スピコート条件	材料吸収量(M.A.) [J/cm ²]	現像	ポストバーク
①	NP-216	1500 rpm – 60 s	10.74	なし	150°C – 20 min
②	NP-001L2	3000 rpm – 60 s	2.69	なし	
③				あり	
④			5.37	なし	
⑤				あり	
⑥			10.74	なし	
⑦				あり	

以上のサンプルに対する、プリズムカプラによる屈折率測定結果を Fig. 3-14 に示す。コア材料である NP-001L2 の測定結果に注目すると、現像なしサンプル(②, ④, ⑥)の屈折率は材料吸収量によらずほぼ一定であるのに対し、現像ありサンプル(③, ⑤, ⑦)は、現像前と比較して屈折率が低下しており、その減少量が材料吸収量に依存している傾向が見て取れる。そこで、現像に伴う屈折率低下量を、材料吸収量に対してまとめたグラフを Fig. 3-15 に示す。Fig. 3-15 より、材料吸収量が減少するにつれて、屈折率も現像に伴って大きく低下することがわかる。これは、材料吸収量が小さい場合に、硬化後のポリマー材料内にわずかに残存する未硬化モノマーが、現像により取り除かれ、実質的なポリマーの密度が減少するためだと考えられる。

材料吸収量に対する屈折率低下量を示すグラフから、任意の材料吸収量での屈折率を推定することを試みる。例として、Fig. 3-13 示した結果にて、最も良いパターン転写率を実現した露光時間 12.9 秒(材料吸収量 0.690 J/cm²)の場合のコア屈折率を推定する。Fig. 3-15 のグラフが二次の多項式で近似できると仮定したとき、その近似式を用いて、材料吸収量 0.690 J/cm² の場合の屈折率低下量は 0.00023 と計算される。現像前の屈折率をサンプル②, ④, ⑥(現像なし)の測定結果の平均値としたとき、材料吸収量 0.690 J/cm² の場合の屈折率は、1.569 と推定できる。

このように、実測結果から屈折率を推定することは可能だが、その正確性には疑問が残る。Fig. 3-14 より、クラッド材料である NP-216 の屈折率は 1.570 であると測定されており、これはコア材料の屈折率推定値である 1.569 を上回っている。つまり、光導波路として光を閉じ込めることができない材料組み合わせであるという結果を示しているが、実際に作製された導波路では Fig. 3-12 から既知の通り、導波が確認されている。

このように、実際の導波路が有する屈折率を正確に予測することは困難である。これは、屈折率測定用サンプルの作製条件が導波路作製条件と異なるためである。特にコア材料については、紫外線露光条件の相違が大きいため、クラッド材料に比べ屈折率測定値のずれは大きいと懸念される。

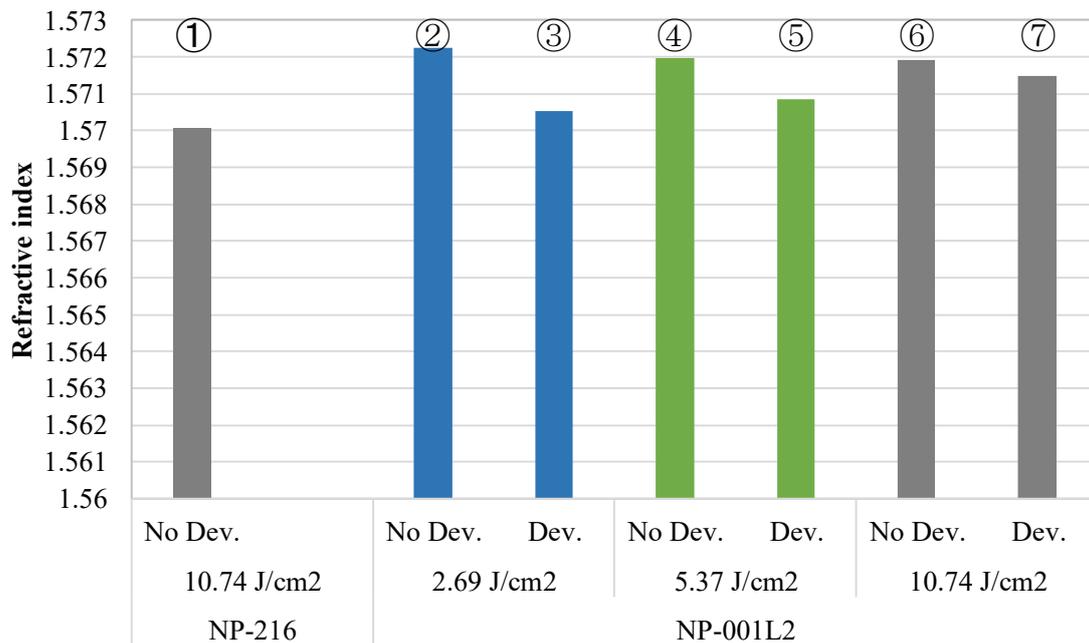


Fig. 3-14 プリズムカップラによる屈折率測定結果

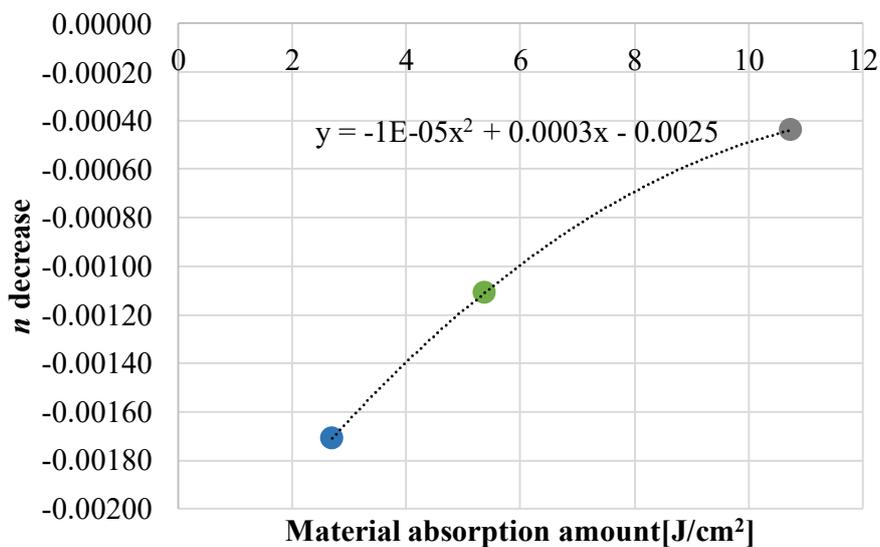


Fig. 3-15 現像による屈折率低下量と材料吸収量の関係

シミュレーションによる屈折率推定

シミュレーションを用いて屈折率を推定した結果について述べる。ここでは、コア、クラッドの屈折率をそれぞれ推定するのではなく、コア、クラッドの屈折率の二乗差の平方根である、導波路 NA を推定することを目的とする。

導波路コアを純粋な矩形 SI 型のシングルモードコアであると仮定する。その場合、導波路 NA を一つに固定すると、導波路コアを伝搬する最低次モードの伝搬状態を表す規格化

伝搬定数が一意に定まる。さらに、規格化伝搬定数によって定まるモードプロファイルから解析されるモードフィールド径(Mode Field Diameter : MFD)も一意に定まる。MFDとは、モードプロファイルにて最大強度の $1/e^2$ となる強度が得られる径のことである。この特性を利用し、導波路の MFD を評価することで、導波路 NA を逆算する試みである。

導波路 NA の推定方法は以下のとおりである。なお、測定波長及び計算波長はすべて 1550 nm である。

- ・実際に作製した導波路の MFD を測定し、コア幅と MFD の関係を得る。(この測定についての詳細は第5章にて報告する)
- ・シミュレーションにて、複数の導波路 NA に対する、コア幅と MFD の関係を算出する。
- ・実測とシミュレーションの結果を比較し、最も傾向が一致するときのシミュレーション上の導波路 NA 設定値を、実際の導波路 NA と推定する。

ここでは代表例として、Fig. 3-12 に示した作製導波路の中で、露光時間 12.9 秒(材料吸収量 0.690 J/cm^2)の導波路の導波路 NA を推定する。この導波路サンプルは、コア高さは一定である一方、コア幅が異なるコアを複数有する。これらのコアについてそれぞれ MFD を測定し、コア幅と MFD の関係を示すグラフを得た。なお、この測定方法や測定結果に対する詳しい考察については、第5章にて詳細に報告する。

シミュレーションでは、クラッドの屈折率は 1.560 に固定し、導波路 NA が 0.112, 0.148, 0.177, 0.202 となるようにコアの屈折率をそれぞれ設定した。コア高さを $6 \mu\text{m}$ に固定したうえで、コア幅を変化させたときの MFD を算出した。シミュレーションには導波路モードソルバ FIMMWAVE を用いた。

実測及びシミュレーションによって得られた、コア幅と MFD の関係を示すグラフを、Fig. 3-16 に示す。シミュレーション結果に注目すると、導波路 NA が低くなるほど、同じコア幅でも MFD が大きくなることがわかる。これは、導波路 NA の低下により、規格化伝搬定数が減少し、コアへの光閉じ込めが弱まる様子を示している。また、実測結果と比較すると、導波路 NA の設定が 0.148 のときに、水平方向、垂直方向ともに、MFD の傾向がよく一致することが、Fig. 3-16(a)(b)よりわかる。この結果より、本研究にて直接露光法を用いて作製されたシングルモード光導波路の導波路 NA は、0.148 付近であったと推定できる。

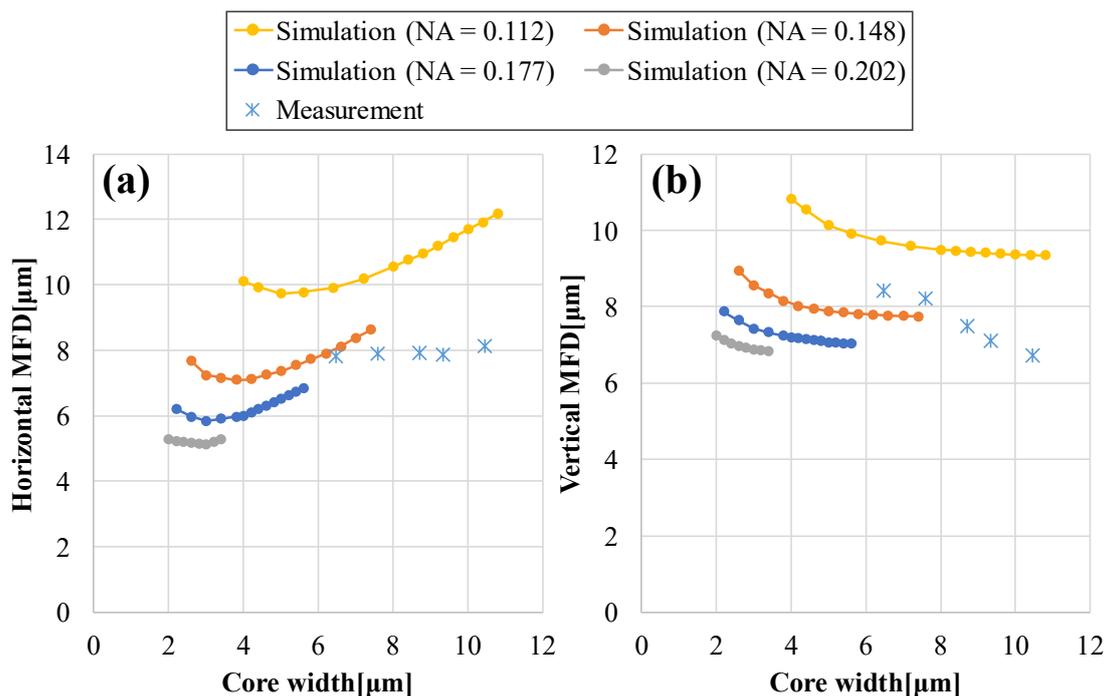


Fig. 3-16 シミュレーション及び実測により得られたコア幅と MFD の関係
(a)水平方向の MFD (b)垂直方向の MFD

3.4 Mosquito 法

3.4.1 Mosquito 法による導波路作製工程概略

Mosquito 法による導波路作製工程の概略図を Fig. 3-17 に示す。まず、基板上にクラッドモノマーを製膜する。このとき、膜厚は後にニードル挿入、走査を行うのに十分な厚さである必要があり、数百 μm 程度の厚さが必要である。次に、コアモノマーを充填したシリンジ端に接続したニードルをクラッドモノマー中に直接挿入し、ディスペンサにより高圧力をかけながらニードルを水平走査させ、コアモノマーを吐出する。最後に紫外線照射をし、全体を一括硬化させた後に、ポストベークをすることで導波路が完成する。

コアモノマーを吐出してから、紫外線露光による硬化までの間に、液体状であるクラッドモノマーと、同じく液体状であるコアモノマーが相互に拡散し、両物質による濃度分布が形成される。この濃度分布が紫外線硬化により固定され、屈折率分布が形成されることとなる。このようにして、GI 型屈折率分布をコア内に形成することを可能としている。

さらに Mosquito 法は、従来の積層工程では不可能であった、円形コアの作製法としても有用である。また、最低でも三度の紫外線照射を必要とする直接露光法に対し、わずか一度のみの紫外線照射で導波路を得る、フォトマスクフリーの簡便な手法である点も大きな特

徴である。

さらに重要な特徴として、ニードルの走査プログラムを選択することで、自由な配線パターンを形成可能である点が挙げられる。曲げ導波路[3-9]やピッチ変換導波路[3-10]などの平面内配線パターンに加え、最近では、垂直曲げ導波路[3-11]やシャッフリング導波路[3-12]などの三次元自由配線を有する光導波路の実現例を報告している。

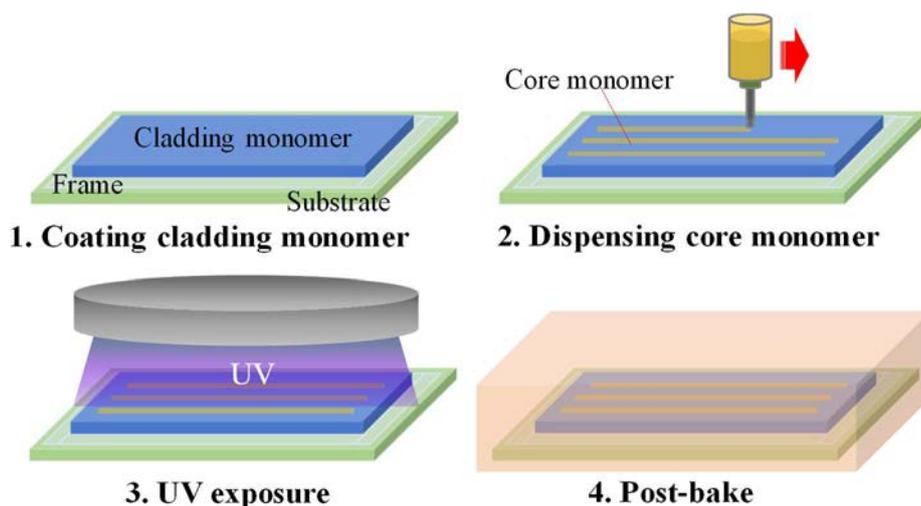


Fig. 3-17 Mosquito 法による導波路作製工程

3.4.2 作製パラメータ

Mosquito 法には様々な作製パラメータが存在し、形成されるコアの径や断面形状、構造を決定づける。代表的な作製パラメータを Table 3-5 にまとめる。これらのパラメータの中で、特にコア径を決定づけるパラメータは、コアモノマー粘度、吐出圧力、ニードル走査速度、ニードル内径、ニードル長の5つである。ニードル長は使用するニードルによって固定されることを考慮すれば、コア径を制御するためのパラメータは Fig. 3-18 に示した4つとなる。これら4つのパラメータを適切に制御することで、シングルモードスケールからマルチモードスケールまでの様々なコア径を有する導波路を作製可能である。

Fig. 3-19 に、作製パラメータの適切な選定によりコア径を制御して作製したマルチモード光導波路とシングルモード光導波路の端面写真を示す。コア径 50 μm 程度のマルチモードコアと、コア径 10 μm 程度のシングルモードコアを作り分けることができている。

Table 3-5 Mosquito 法の作製パラメータの代表例

コアモノマー粘度
クラッドモノマー粘度
吐出圧力
ニードル走査速度
ニードル内径
ニードル外径
ニードル長
ニードル先端高さ
露光待機時間

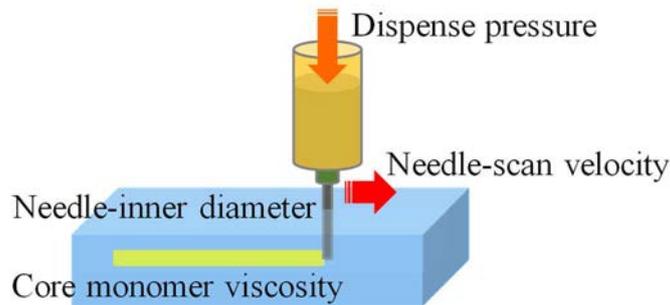


Fig. 3-18 Mosquito 法にてコア径を制御する作製パラメータ

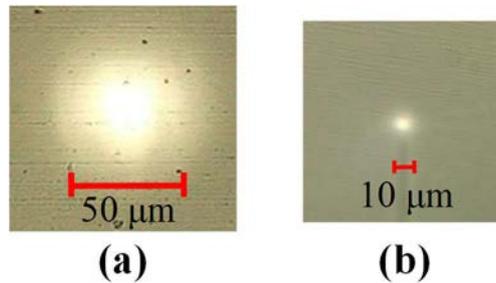


Fig. 3-19 Mosquito 法によって作製した(a)マルチモード光導波路 (b)シングルモード光導波路

先行研究では、Mosquito 法の各作製パラメータと吐出されるコアモノマーの流量の関係を理論的に導き、形成されるコア径の理論値を次式のように導出している[3-13].

$$D = \sqrt{\frac{pa^4}{32L\eta U}} \quad (3-4)$$

ここで、 p は吐出圧力、 a はニードル内径、 L はニードル長、 η はコアモノマー粘度、 U はニードル走査速度である。

また、Mosquito 法にて重要な作製パラメータとして、露光待機時間がある。露光待機時間は、コアモノマー吐出終了時から紫外線露光開始までの時間と定義される。Mosquito 法にて複数チャンネルを形成する場合、1チャンネルずつ順番に吐出を行っていくため、チャンネルごとに異なる露光待機時間が与えられることになる。

(3-4)式で計算されるコア径 D は、ニードルから吐出された直後のコア径を表している。露光待機時間中にコア、クラッドモノマー間にて材料拡散が生じ、紫外線硬化後に最終的に得られるコア径は D に比べ拡大する。そこで、これらのコア径を区別するために、(3-4)式にて得られる吐出直後のコア径 D を「初期コア径」と呼ぶこととする。

3.4.3 マルチモード光導波路作製条件

Mosquito 法では、紫外線硬化性の樹脂であれば、特に制限なく自由に材料の選択ができる。本研究では、シングルモードポリマー光導波路の作製を見据え、1310 nm, 1550 nm などの長波長帯でも低損失性を示す、日産化学(株)製 有機-無機ハイブリッド樹脂である SUNCONNECT®シリーズを用いることとした。

Table 3-6 に示した作製条件にて初期コア径 45 μm となる導波路を作製した。露光待機時間の異なる 8 チャンネルを同一導波路サンプル内に形成した。端面写真を Fig. 3-20 に示す。

Fig. 3-20 より、マルチモードスケールの並列円形コアが形成されていることがわかる。いずれのチャンネルも初期コア径は 45 μm であるものの、実際に形成されたコアの径は、チャンネルによって異なる様子が見て取れる。これは、チャンネルによって異なる露光待機時間が与えられ、モノマー間の相互拡散量が異なるためである。しかしながら、Mosquito 法にて形成されるコアは、濃度分布形成によりコア-クラッド界面が不明瞭となるため、端面写真から正確なコア径を判断することが困難である。そこで、Mosquito 法で作製した導波路のコア径を、オプティカルフィールド径(Optical Field Diameter : OFD)を用いて定義することとした。オプティカルフィールド径とは、導波路コアを全モード励振した際の出射光強度分布にて、最大強度の $1/e^2$ となる強度が得られる径のことを指す。

Table 3-6 初期コア径 45 μm の導波路作製条件

Core material	NP-003 ($n_{850} = 1.585, 51300 \text{ cP}$)
Cladding material	NP-208 ($n_{850} = 1.557, 3800 \text{ cP}$)
Dispense pressure	490 kPa
Needle-scan velocity	8 mm/s
Needle-inner diameter	168.2 μm
Cladding temperature	25.7°C

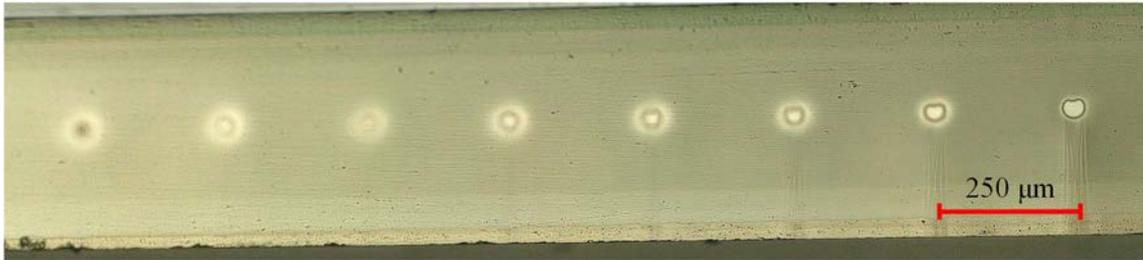


Fig. 3-20 初期コア径 45 μm のマルチモードポリマー光導波路の端面写真

露光待機時間中のモノマー相互拡散によって、コア径の拡大のみならず、屈折率差の減少も生じる。先行研究では、導波路コアの OFD と NA の露光待機時間依存性を、異なる初期コア径の導波路に対して検討した。初期コア径 20, 25, 30, 35, 40, 45 μm の導波路に対し、露光待機時間に対する OFD, NA の関係を検討した結果を Fig. 3-21, Fig. 3-22 に示す。測定波長はいずれも 850 nm である。

いずれの初期コア径においても、露光待機時間の経過により、OFD は徐々に拡大し、NA は徐々に低下していくことが Fig. 3-21, Fig. 3-22 よりわかる。この結果により、所望の OFD 及び NA を得るための初期コア径及び露光待機時間が明らかとなり、Mosquito 法によるマルチモードポリマー光導波路作製の指針が確立した。

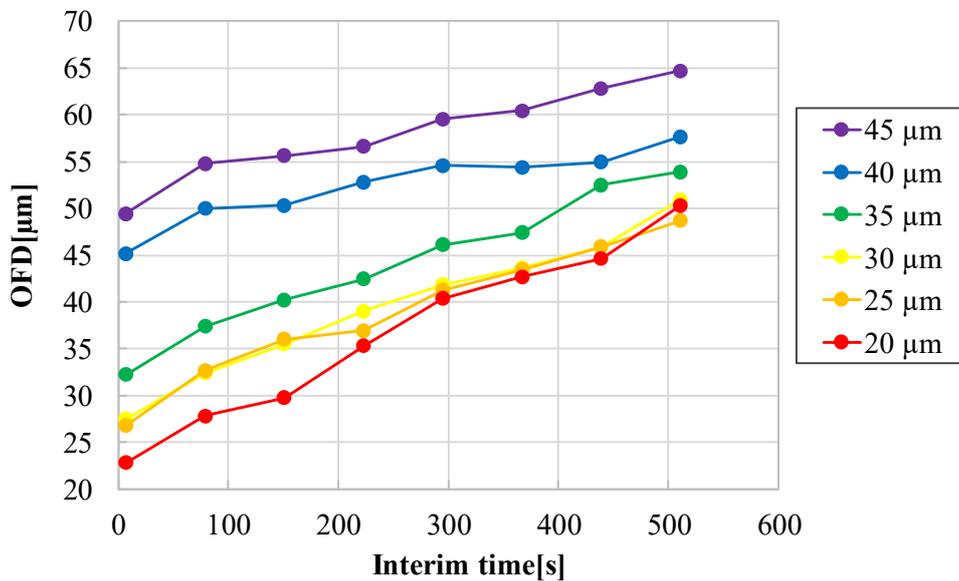


Fig. 3-21 各初期コア径導波路の OFD と露光待機時間の関係

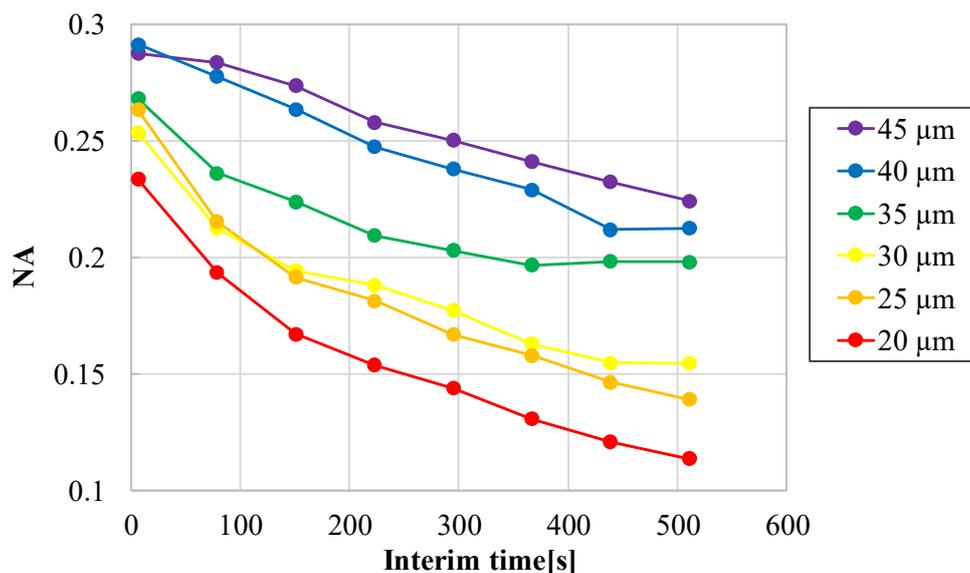


Fig. 3-22 各初期コア径導波路の NA と露光待機時間の関係

3.4.4 シングルモード光導波路作製条件

(3-4)式より, 導波路コアの細径化のためには, 高粘度コア材料及び細径ニードルを用い, 高速, 低圧下にてコアモノマーを吐出する必要があることがわかる. Table 3-7 に示した条件にて作製したシングルモード並列光導波路の端面写真を Fig. 3-23 に示す. Table 3-7 の作製条件より計算される初期コア径は $3.77 \mu\text{m}$ であるのに対し, 実際に形成された導波路コアは $10 \mu\text{m}$ 程度のコア径を示している. シングルモードスケールのコアの場合, 初期コア径が数 μm 程度と非常に小さいため, マルチモードスケールの場合と比べ, モノマー相互拡散の影響を大きく受ける. そのため, SUNCONNECT®シリーズのような拡散性の高い材料を使用した場合には, 露光待機時間の短いチャンネルでも著しいコア径の拡大及び屈折率差の減少を生ずるおそれがある.

Table 3-7 シングルモードスケール光導波路の作製条件

Core material	NP-005 ($n_{1550} = 1.575, 76000 \text{ cP}$)
Cladding material	NP-213 ($n_{1550} = 1.549, 3800 \text{ cP}$)
Dispense pressure	170 kPa
Needle-scan velocity	80 mm/s
Needle-inner diameter	125 μm
Cladding temperature	25.0°C

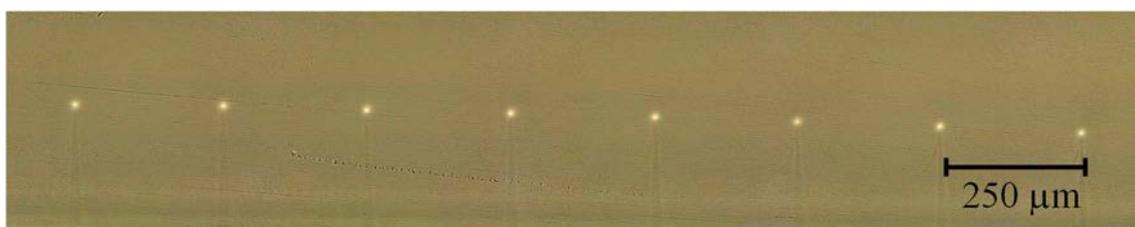


Fig. 3-23 Mosquito 法により作製したシングルモードポリマー光導波路の端面写真

シングルモード導波路コアの場合、コア径や屈折率差によって光学特性が大きく異なる。そのため、露光待機時間によって著しいコア径の拡大及び屈折率差の減少が生ずると、マルチチャンネルを形成する場合、チャンネル間の光学特性の不均一性へとつながり、問題となる場合がある。

そのため、先行研究では、モノマー拡散速度を制御するため、クラッドモノマー温度を調整し、チャンネル間の光学特性差を抑制する検討を行った[3-14]。異なるクラッドモノマー温度下にてマルチチャンネルを有するシングルモード導波路を複数作製し、モードフィールド径(MFD)を評価した。Fig. 3-24 に、露光待機時間に対する MFD の評価結果を示す。評価波長は 1550 nm である。

クラッドモノマー温度が低いほど、露光待機時間に対する MFD の増大が抑制されていることが Fig. 3-24 よりわかる。単位露光待機時間あたりの MFD 増大量を表す「MFD スロープ」(Fig. 3-24 のグラフの近似直線の傾きに相当)[3-14]は、クラッドモノマー温度 25°C の場合には 0.1073 μm/s であったのに対し、13°C の場合には 0.0172 μm/s となり、約 10 分の 1 の値になっている。このように、シングルモードポリマー導波路作製の際には、クラッドモノマー温度も重要な作製パラメータとなり、この適切な制御により、形成されるシングルモードコアの光学特性を決定づけることができる。

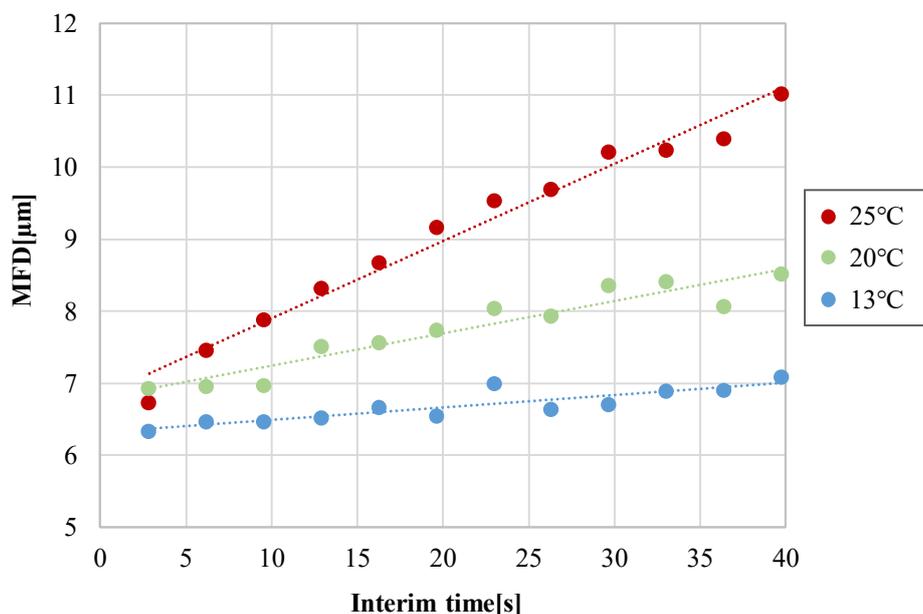


Fig. 3-24 各クラッドモノマー温度にて作製された導波路の MFD と露光待機時間の関係

3.5 インプリント法

3.5.1 インプリント法による導波路作製工程概略

インプリント法による導波路作製工程の概略図を Fig. 3-25 に示す. はじめに, 基板の上に塗布した液体状クラッドモノマーの上部に, シリコーン樹脂(PDMS)製モールドの凸状パターン部を押し当てた状態で両面から紫外線露光をすることでモノマーを硬化し, 凹状にパターンが転写されたアンダークラッドを得る. 形成された溝部に液体状コアモノマーを充填し, 片面から紫外線露光をし, コアモノマーを硬化させる. その後, 最上層にクラッドモノマーを塗布し, 片面から紫外線硬化することで光導波路を得る. 最後にポストベークをすることで導波路が完成する.

ここで, アンダークラッド及びコアへの紫外線照射の際に, 露光時間を調節し, 完全に硬化する前の半硬化状態とすることで, 液体状態のコア-クラッドモノマー間の相互拡散をうながし, 濃度分布を形成することができる. このモノマー拡散は, 屈折率分布を制御する重要な工程である. 十分な拡散時間を得るためには, コアモノマー充填後から露光開始まで, 及びオーバークラッド塗布後から露光開始までに露光待機時間を与える必要があり, これによりアンダークラッド-コアモノマー間, 及びコア-オーバークラッドモノマー間の拡散をさらに進行させる. 最後のオーバークラッド露光及びポストベークにより完全硬化させることで, 屈折率分布が固定される.

このように、インプリント法では、露光時間及び露光待機時間の適切な制御により、矩形コア内の屈折率分布を SI 型から GI 型まで変化させることができる。矩形 SI 型、矩形 GI 型導波路の作り分けが可能である点が利点の一つといえる。

また、インプリント法では、PDMS モールドの配線パターンにより転写される平面内コアパターンを制御できるため、これまでに狭ピッチ交差パターン[3-15]やシャフリング構造[3-16]などの複雑な平面内配線パターンの実現例がある。

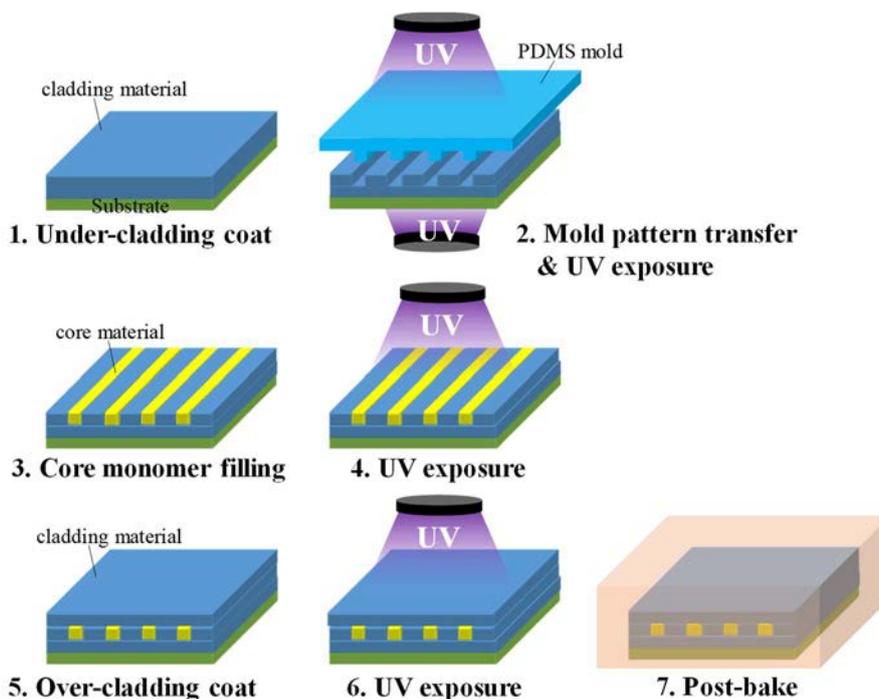


Fig. 3-25 インプリント法による導波路作製工程

3.5.2 インプリント法によるマルチモード・シングルモード光導波路作製

インプリント法を用いたポリマー光導波路の作製例を紹介する。インプリント法による導波路作製についても、日産化学(株)製 有機-無機ハイブリッド樹脂 SUNCONNECT®シリーズを用いた。

先行研究にて確立[3-17]された、インプリント法によるマルチモードポリマー光導波路の作製条件を Table 3-8 に示す。インプリント法の工程に含まれる、四度の紫外線露光及び二度の露光待機時間について、それぞれ条件を示している。SI 型導波路の作製条件では、紫外線露光時間を比較的長めに設定することで材料の完全硬化をうながし、露光待機時間は設けていない。これに対し、GI 型導波路では、SI 型に比べ紫外線露光時間を短く設定したうえで適切な露光待機時間を与えることで、材料拡散による GI 型屈折率分布形成を試みている。

この条件にて作製された導波路の端面写真を Fig. 3-26 に示す。コア-クラッド界面状態の相違から、SI 型コア及び GI 型コアの作り分けができていることがわかる。

Table 3-8 インプリント法によるマルチモードポリマー光導波路作製条件

	SI waveguide	GI waveguide
Core material	NP-001 ($n_{850} = 1.585, 4700 \text{ cP}$)	
Cladding material	NP-208 ($n_{850} = 1.557, 3800 \text{ cP}$)	
Under cladding UV exposure time (UV①+UV②)	10 s + 5 s	1 s + 0.5 s
Interim time①	-	15 min
Core UV exposure time (UV③)	5 s	0.5 s
Interim time②	-	20 min
Over cladding UV exposure time (UV④)	20 s	20 s

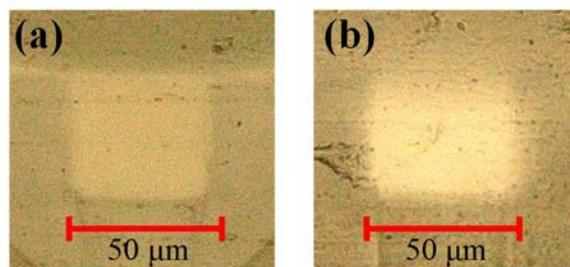


Fig. 3-26 インプリント法によって作製されたマルチモードポリマー光導波路
(a)SI 型導波路 (b)GI 型導波路

次に、インプリント法によるシングルモードポリマー光導波路の作製例を紹介する。シングルモードスケールの小コアサイズの場合には、コアサイズごとに最適な作製条件が大きく異なる。ここでは、 $6 \times 6 \mu\text{m}$ のコア形成に注目し、その作製条件を Table 3-9 に示す[3-18]。

シングルモード条件を満たすべく、マルチモード導波路の場合からクラッド材料を変更して、屈折率差を減少させている。ただし、GI 型導波路の場合には SI 型に比べシングルモード条件が緩和される[3-19]ため、材料を変更していない。

シングルモードコアのように小さなコアを形成する場合には、わずかなモノマー拡散が生じた場合にも光学特性に影響を及ぼすおそれがある。そのため、SI 型の作製条件では、マルチモードスケールの場合と比べ、アンダークラッドへの紫外線露光時間を増加させ、確実

な完全硬化を図っている。ただし、PDMS モールド剥離時の界面荒れを防止するため、モールド側からの露光(UV②)の際には、モールド剥離前、剥離後の二度に分けて露光を行うことで、界面荒れを防ぎつつ露光時間を増やす工夫をしている。GI型導波路については、6 μm程度のシングルモードコアでは、十分な屈折率分布形成のために必要な拡散距離が、マルチモードコアに比べ非常に短くなる。拡散距離を抑えるため、露光待機時間の短縮化が必要であるが、作製工程上、短縮化にも限界がある。そこで、アンダークラッド、コアへの紫外線露光時間を増加させることで、時間あたりの拡散距離を短縮させている。また、アンダークラッドへシングルモードスケールの凹状パターンを正確に転写するためには、従来の露光時間では硬化が不十分であることが確認されたため、モールド側からの露光時間(UV②)を増加させている。以上の点を考慮して紫外線露光時間及び露光待機時間を決定している。

この条件にて作製された導波路の端面写真を Fig. 3-27 に示す。シングルモードスケール導波路に対しても、コア-クラッド界面の状態が互いに異なる、SI型及びGI型のコアがそれぞれ形成できていることがうかがえる。

Table 3-9 インプリント法によるシングルモードポリマー光導波路作製条件

	SI waveguide	GI waveguide
Core material	NP-001 ($n_{1550} = 1.574, 4700 \text{ cP}$)	
Cladding material	NP-211 ($n_{1550} = 1.567, 3900 \text{ cP}$)	NP-208 ($n_{1550} = 1.549, 3800 \text{ cP}$)
Under cladding UV exposure time (UV①+UV②)	10 s + (8 s + 17 s)	4.8 s + 1.2 s
Interim time①	-	10 min
Core UV exposure time (UV③)	5 s	0.6 s
Interim time②	-	4 min
Over cladding UV exposure time (UV④)	25 s	20 s

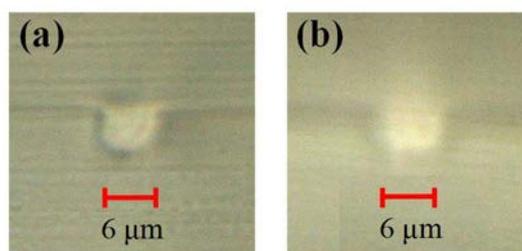


Fig. 3-27 インプリント法によって作製されたシングルモードポリマー光導波路
(a)SI型導波路 (b)GI型導波路

3.6 結言

本章では、矩形 SI 型導波路作製手法である直接露光法，円形 GI 型導波路作製手法である Mosquito 法，矩形 SI・GI 型導波路作製手法であるインプリント法について，有機-無機ハイブリッド樹脂を用いたポリマー光導波路作製検討について述べた。

直接露光法については，クラッド層の膜厚制御や紫外線露光条件，コアの寸法制御やマスクパターン転写条件等，マルチモードコア，シングルモードコアそれぞれの形成に最適な作製条件を確立した。Mosquito 法については，露光待機時間やクラッドモノマー温度等の作製パラメータの適切な選定によるマルチモード，シングルモード光導波路の作製検討例を紹介した。インプリント法については，マルチモード，シングルモード光導波路それぞれについて，紫外線露光時間等の作製条件の適切な制御による SI 型，GI 型コアの作製例を紹介した。

これにより，同種ポリマー材料を用いて作製したポリマー光導波路による，コア形状，コア内屈折率分布ごとの光結合特性の評価・比較が可能となった。

Reference

- [3-1] H. Nawata, “Organic-inorganic hybrid material for on-board optical interconnects and its application in optical coupling,” Proc. of 2013 IEEE CPMT Symposium Japan (ICSJ), pp. 126-129 (2013).
- [3-2] K. Yasuhara, F. Yu, and T. Ishigure, “Circular core single-mode polymer optical waveguide fabricated using the Mosquito method with low loss at 1310/1550 nm,” Opt. Express, Vol. 25, No. 8, pp. 8524-8533 (2017).
- [3-3] 丸島千波, 2018 年度慶應義塾大学修士論文 (2019).
- [3-4] 信越シリコーン, “シランカップリング剤”,
https://www.silicone.jp/catalog/pdf/SilaneCouplingAgents_J.pdf (2019 年 11 月閲覧).
- [3-5] M. Hikita, R. Yoshimura, M. Usui, S. Tomaru, and S. Imamura, “Polymeic optical waveguides for optical interconnections,” Thin Solid Films, Vol. 331, Issues 1-2, pp. 303-308 (1998).
- [3-6] D. Meyerhofer, “Characteristics of resist films produced by spinning,” J. Appl. Phys., Vol. 49, pp. 3993-3997 (1978).
- [3-7] T. Watanabe, M. Hikita, M. Amano, Y. Shuto, and S. Tomaru, “Vertically stacked coupler and serially grafted waveguide: Hybrid waveguide structures formed using an electro-optic polymer,” J. Appl. Phys., Vol. 83, No. 2, pp.639-649 (1998).
- [3-8] 佐々木 実, “レジストプロセスの基本”, 電気学会論文誌 E(センサ・マイクロマシン部門誌), 131 巻, 1 号, pp. 2-7 (2011).
- [3-9] A. Takahashi and T. Ishigure, “Bend insensitive graded index multimode polymer optical

- waveguides fabricated using the Mosquito method,” Proc. of SPIE 2015, Vol. 9366, 93660L (2015).
- [3-10] H. Masuda, N. Chujo, and T. Ishigure, “Formation of pitch conversion structure in multimode polymer optical waveguide with high coupling efficiency,” Proc. of 2016 IEEE CPMT Symposium Japan (ICSJ), pp. 151-152 (2016).
- [3-11] 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 3-D on-board integration,” Proc. of 2016 IEEE Electronic Components and Technology Conference (ECTC), pp. 490-496 (2016).
- [3-12] O. F. Rasel, A. Yamauchi, and T. Ishigure, “Low-loss 3-dimensional shuffling graded-index polymer optical waveguides for optical printed circuit boards,” IEICE Trans. Electron., Vol. E101-C, No. 7, pp. 509-517 (2018).
- [3-13] 相賀建人, 2016年度慶應義塾大学修士論文 (2017).
- [3-14] H. Matsui, S. Yakabe, and T. Ishigure, “Applicability of the Mosquito method to fabricate fan-in/out device for single-mode multicore fiber,” Proc. of 2019 IEEE CPMT Symposium Japan (ICSJ), pp. 63-66 (2019).
- [3-15] K. Abe, Y. Oizumi, and T. Ishigure, “Low-loss graded-index polymer crossed optical waveguide with high thermal resistance,” Opt. Express, Vol. 26, No. 4, pp. 4512-4521 (2018).
- [3-16] K. Abe, Y. Oizumi, Y. Taira, and T. Ishigure, “Low loss channel-shuffling polymer waveguides: design and fabrication,” Proc. of 2017 IEEE Electronic Components and Technology Conference (ECTC), pp. 526-531 (2017).
- [3-17] 中崎蒔乃, 2018年度慶應義塾大学修士論文 (2019).
- [3-18] 藤原悠人, 2018年度慶應義塾大学修士論文 (2019).
- [3-19] Y. Fujihara and T. Ishigure, “Fabrication for organic-inorganic hybrid resin based single-mode polymer optical waveguides using the imprint method for high density optical circuit,” Proc. of 2018 IEEE CPMT Symposium Japan (ICSJ), pp. 125-126 (2018).

第4章

マルチモードポリマー光導波路の光結合特性

4.1 緒言

第2章でも述べたように、ハイパフォーマンスコンピュータでの導入が想定されるマルチモード光リンクでは、VCSEL 光源-ポリマー光導波路間、ポリマー光導波路-受光器間の結合部にて45°ミラーによる直角光路変換を介する光結合系が必要となる。

一方、当研究室では、ポリマー光導波路としてGI型コア光導波路に着目し、その優れた光学特性を実証してきた。特に、独自の作製法であるMosquito法によって作製した円形コアGI型ポリマー光導波路のオンボード光インターコネクタ応用を目指している。しかしながら、GI型光導波路に関して、45°ミラーを介する光結合系についての十分な検討はなされていない。

本章ではまず、45°ミラーによる直角光路変換を含まない光リンクについて、直線パターンを有するマルチモードポリマー光導波路を用いて、矩形SI型導波路と円形GI型導波路の光結合特性を評価・比較する。

次に、45°ミラーを介した光結合特性についてSI型とGI型を比較するため、ミラー加工を施した矩形コアのSI型、GI型ポリマー光導波路に対して実測評価を行い、光路変換を介するリンクでの光導波路の光学特性をまとめる。

円形GI型導波路による45°ミラーを介した高効率光結合の実現に向け、光線追跡シミュレーションを用いて、45°ミラーを介する光結合系での円形GI型導波路の光学特性を理論的に検討し、SI型導波路との比較を行う。また、45°ミラーを介した高効率光結合を実現するために最適な導波路構造を設計する。

最後に、シミュレーション設計に基づき、Mosquito法を用いて実際に円形GI型ポリマー光導波路を作製し、その光学特性を評価した結果についてまとめる。

4.2 直線パターンマルチモードポリマー光導波路の光結合特性

先行研究では、導波路端にミラー加工等を施していない標準的な直線パターンを有するポリマー光導波路に対し、特にMosquito法にて作製した円形GI型マルチモードポリマー光導波路の光学特性を明らかにしてきた[4-1]。ただし、各接続点での光結合特性を詳細に検討した例はなかった。本節では、Fig. 2-5に示したオンボード・ボード間マルチモード光リンクに注目し、このリンク内での光結合特性を評価していく。

4.2.1 評価導波路及び評価系

4.2.1.1 評価導波路

本節では、Mosquito 法にて作製した円形 GI 型マルチモードポリマー光導波路に加え、直接露光法にて作製した矩形 SI 型マルチモードポリマー光導波路を用い、両者の光結合特性を比較した。Fig. 4-1 に、評価したポリマー光導波路の端面写真を示す。矩形 SI 型、円形 GI 型導波路ともに、コアサイズの異なる二種類の導波路コアを評価対象とすることで、コアサイズが光結合特性に与える影響についても検討することとした。

Fig. 4-1(a)(b)に示した矩形 SI 型導波路は、3.3.2 項にて確立した作製条件をもとに、 $30\times 30\ \mu\text{m}$ 、 $50\times 50\ \mu\text{m}$ のコアサイズを有するよう設計されている。Table 3-3 に示したマルチモードスケール用材料を用いており、導波路 NA は 0.29 程度である。

円形 GI 型導波路には、3.4.3 項にて紹介した導波路のうち、初期コア径が大きく異なる二つの導波路($20\ \mu\text{m}$ と $45\ \mu\text{m}$)に注目している。Mosquito 法では、露光待機時間の変化とともにコアサイズのみならず導波路 NA も変化するため、コアサイズによる影響のみを検討するべく、導波路 NA を統一したコアを比較することとした。Fig. 3-22 に示した導波路 NA と露光待機時間の関係を示すグラフより、初期コア径 $20\ \mu\text{m}$ の導波路は、露光待機時間 7 秒のとき導波路 NA が 0.234、初期コア径 $45\ \mu\text{m}$ の導波路は、露光待機時間 511 秒のとき導波路 NA が 0.224 となり、両者がほぼ等しい値となることがわかる。本節ではこれら二つのチャネルについて評価を行う。

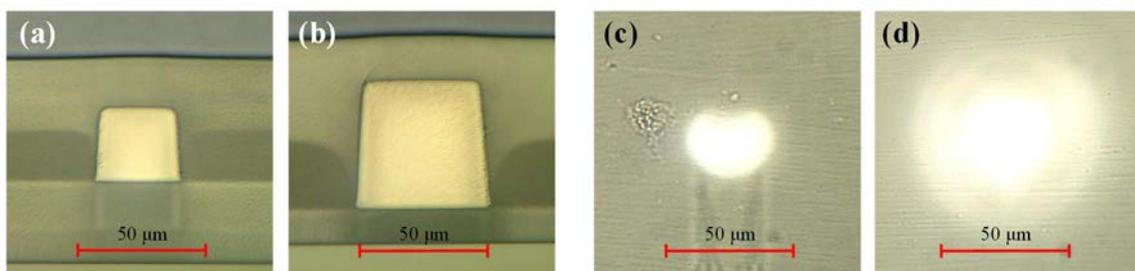


Fig. 4-1 評価したマルチモードポリマー光導波路
(a) $30\times 30\ \mu\text{m}$ 設計矩形 SI 型 (b) $50\times 50\ \mu\text{m}$ 設計矩形 SI 型
(c)初期コア径 $20\ \mu\text{m}$ 円形 GI 型 (d)初期コア径 $45\ \mu\text{m}$ 円形 GI 型

これらの導波路コアがそれぞれ異なるコアサイズを有しているのは Fig. 4-1 に示した光学顕微鏡写真より明らかであるが、厳密なコアサイズを光学顕微鏡写真から評価するのは困難である。そこで、導波路のオプティカルフィールド径(Optical Field Diameter: OFD)を評価し、導波路のコアサイズとして便宜上扱うこととした。OFD は導波路を全モード励振した場合の出射強度プロファイルから解析することができる。出射強度プロファイルには導

波路伝搬中のモード変換やモード依存性損失の影響も含まれるため、導波路のコアサイズを厳密に示すものではないが、数 cm の導波路長ではその影響は無視できるものとして、評価を行う。

評価導波路をそれぞれ全モード励振(105- μm 径 SI 型マルチモードファイバにて励振)した場合の導波路出射 Near Field Pattern (NFP)を Fig. 4-2 に示す。出射 NFP より得られる、矩形 SI 型, 円形 GI 型導波路の出射強度プロファイルを図. 4-3, Fig. 4-4 にそれぞれ示す。

Fig. 4-2(a)(b), Fig. 4-3 より、矩形 SI 型導波路の出射光強度は、矩形コア全体に均一に広がって分布しているのに対し、Fig. 4-2(c)(d), Fig. 4-4 より、円形 GI 型導波路の出射強度は、コア中心で最大強度を示し、コアエッジに向かうにつれてなだらかに変化するプロファイルとなっていることがわかる。ポリマー内のマイクロな不均一構造によるモード変換の影響[4-2]により、ポリマー光導波路の出射 NFP は必ずしも屈折率分布を反映しているとは限らないが、両者にはある程度の相関関係があることを考えると、矩形 SI 型導波路には階段状の屈折率分布の、円形 GI 型導波路にはガウシアン分布に近い屈折率分布の特徴がそれぞれ現れているといえる。

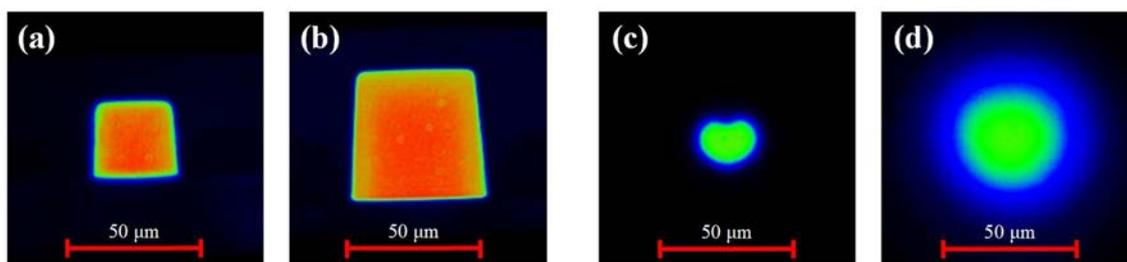


Fig. 4-2 マルチモードポリマー光導波路の出射 NFP
 (a)30×30 μm 設計矩形 SI 型 (b)50×50 μm 設計矩形 SI 型
 (c)初期コア径 20 μm 円形 GI 型 (d)初期コア径 45 μm 円形 GI 型

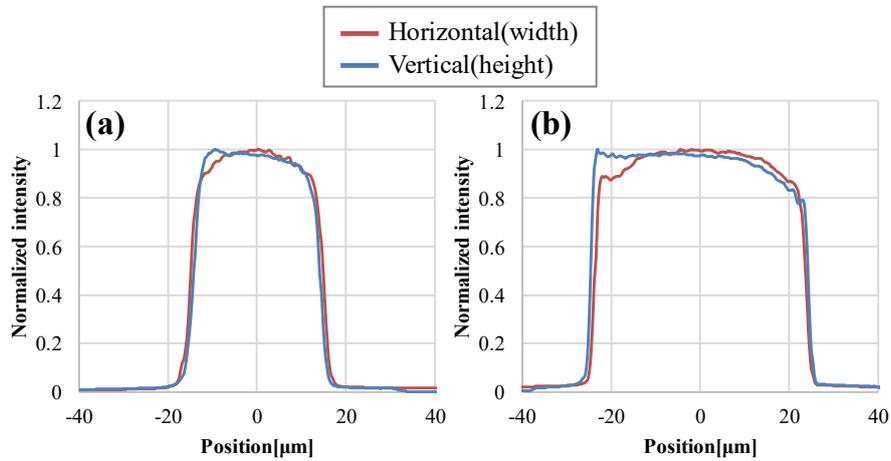


Fig. 4-3 矩形 SI 型導波路の出射強度プロファイル (a)30×30 μm 設計 (b)50×50 μm 設計

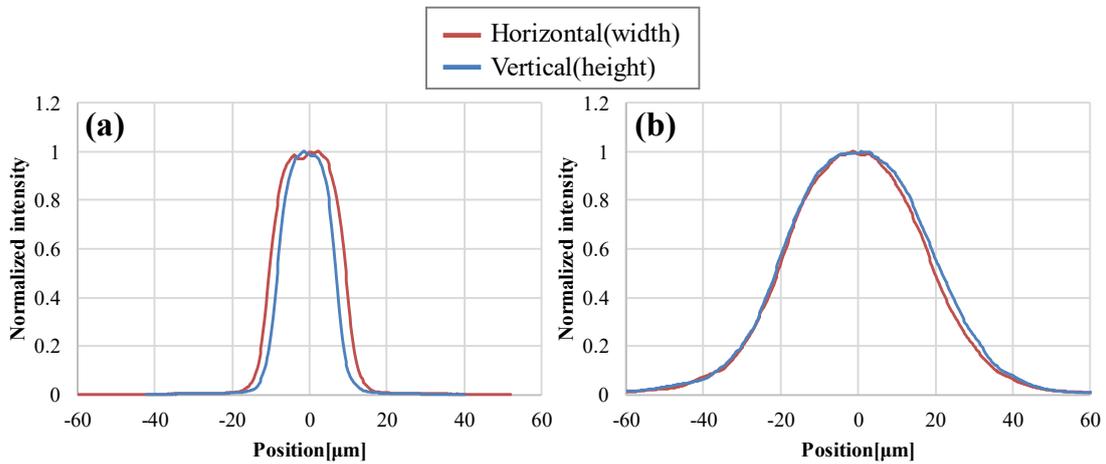


Fig. 4-4 円形 GI 型導波路の出射強度プロファイル
(a)初期コア径 20 μm (b)初期コア径 45 μm

出射強度プロファイルにて最大強度の $1/e^2$ となる強度が得られる径である OFD を解析した結果を Table 4-1 に示す. $30 \times 30 \mu\text{m}$, $50 \times 50 \mu\text{m}$ 設計コアを有する矩形 SI 型導波路の OFD 平均値はそれぞれ $32 \mu\text{m}$, $50 \mu\text{m}$ であり, 設計コアサイズ通りの OFD を実現していることがわかる. 円形 GI 型導波路の OFD 平均値は $23 \mu\text{m}$, $65 \mu\text{m}$ であり, 互いに導波路 NA が等しいながらも, OFD が大きく異なる導波路の比較を可能としている. 以下では, Table 4-1 に示した OFD の平均値を導波路のコアサイズとみなし, 検討を行っていく.

Table 4-1 マルチモードポリマー光導波路の OFD

	Square SI		Circular GI	
	Small core	Large core	Small core	Large core
Horizontal	32.64 μm	49.42 μm	25.24 μm	65.97 μm
Vertical	31.38 μm	50.71 μm	20.47 μm	63.38 μm
Ave.	32 μm	50 μm	23 μm	65 μm

4.2.1.2 結合損失の評価系

本節では、オンボード・ボード間光リンクにて生じる光損失を検討する。Fig. 2-5 に示したような、ポリマー光導波路を実装した二つのボードを光ファイバによって接続した光リンクを想定し、評価系を構築する。

オンボード光インターコネクタでは、光源として、波長 850 nm のマルチモード VCSEL チップの使用が想定される。ただし、VCSEL チップを高温下にて駆動した場合、室温駆動と比較して光強度や波長などの光学特性が変化する[4-3]ため、温度上昇が伴うと予想される長時間の評価には適さない。そこで、評価中の安定性や取扱性を考慮し、実際の VCSEL チップやフォトダイオード(PD)チップを用いず、ファイバプローブによってポリマー光導波路の励振・受光を置き換えることとした。Fig. 4-5 に、汎用 VCSEL チップの、バイアス電流に対する出力光強度及び NA の関係を示す I-L-NA 曲線の評価例を示す。この結果より、VCSEL からの出力光は、閾値電流を超える発振下では、0.20 ~ 0.28 程度の NA を示すことがわかり、このような特性をプローブによる励振の際にも再現する必要がある。

オンボード・ボード間光リンクを想定した評価系を Fig. 4-6 に示す。Fig. 4-6 の評価系によって、光源より発せられた信号光が、光ファイバ及び二つのポリマー光導波路を通し、最終的に受光器にて検出されるまでの光リンク内にて生じる光損失を測定することができる。波長 850 nm の VCSEL 光源に接続した UHNA1 ファイバ(スポットサイズ数 μm , NA=0.27 のシングルモード光ファイバ(SMF))によって導波路を励振することで、VCSEL チップとの接続を想定した。二つの導波路は、50- μm 径 GI 型マルチモードファイバ(50GI-MMF)にて互いに接続することで、ボード間光インターコネクタを実現するファイバリボンを想定している。50GI-MMF によって励振された導波路の出射光は、高 NA(NA=0.33)の 50- μm 径 SI 型 MMF(50SI-MMF)によって受光することで、受光面の径が 50 μm である PD による受光を想定した。最後に 50SI-MMF からの出力光強度をパワーメータにて検出する。光導波路-光ファイバ間の接続は、すべてバットカップリングさせており、マッチングオイル等の屈折率製合材は一切用いていない。

ただし本研究では、評価系に含まれる二つの導波路として全く同一の導波路を用いるために、実際の評価では Fig. 4-7 に示すように評価系を分割し、一つの導波路を二つの評価

系それぞれに用いることとした。評価系に含まれる4つの結合部をそれぞれ Connection 1, 2, 3, 4 と呼ぶ。

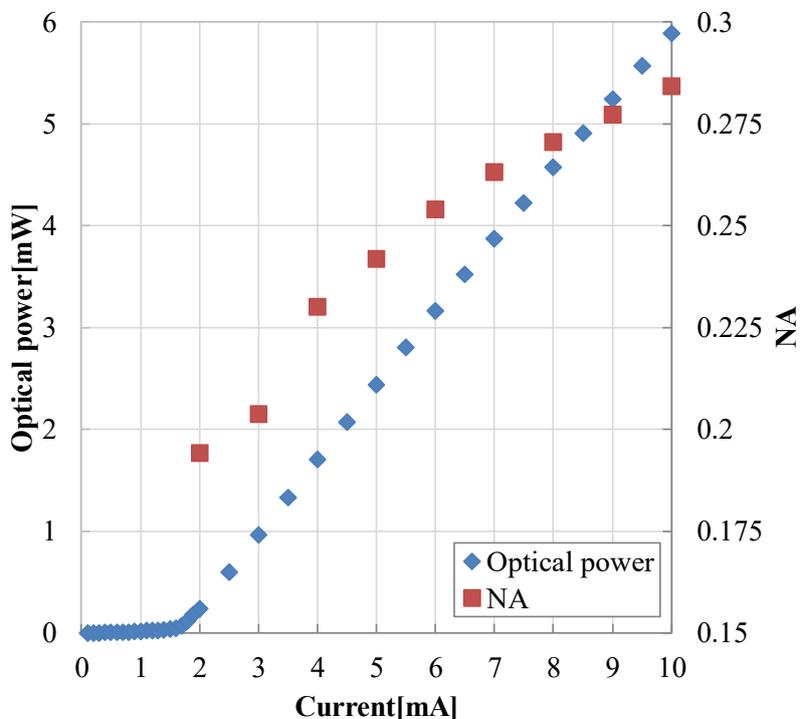


Fig. 4-5 汎用 VCSEL チップの I-L-NA 曲線



Fig. 4-6 オンボード・ボード間光リンクを想定した評価系

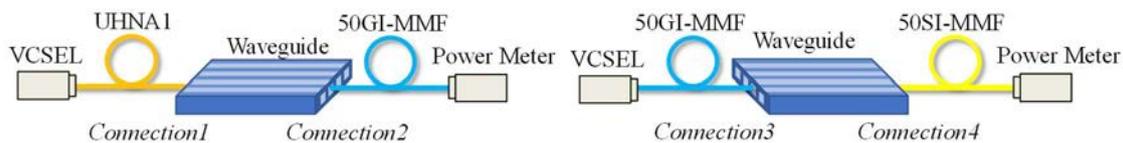


Fig. 4-7 マルチモードポリマー光導波路の実際的评价系

この評価系に対し、各結合部(Connection 1~4)にて生じる結合損失を評価するため、励振プローブあるいは受光プローブを変更した評価系を別途構築した。

評価系にて測定される挿入損失は、入射時の結合損失、導波路伝搬損失、出射時の結合損失に内訳され、これらに当てはまらない損失を「その他の損失」として扱う(Fig. 4-8(i)). その他の損失には各結合部にて生じるフレネル反射損失や、導波路端面荒れによる界面散

乱損失等が含まれる。このとき、受光プローブを高 NA、大コアサイズのファイバに置き換えた場合、導波路からの出射光をすべて受光できると仮定すると、この評価系にて測定される挿入損失からは出射時の結合損失を無視することができる(Fig. 4-8(ii)). さらにこの評価系に対し、励振プローブを低 NA、小スポットサイズのファイバに置き換えることで、入射時の結合損失が生じないとみなせる評価系を構築できる(Fig. 4-8(iii)). Fig. 4-8 に示した (i) ~ (iii) のすべての評価系にて、導波路伝搬損失とその他の損失が、評価系によらず等しいと仮定できる場合、入射時の結合損失、出射時の結合損失はそれぞれ、評価系(ii) と (iii) の挿入損失差、評価系(i)と(ii)の挿入損失差を計算することで見積もることができる。

本節では、以上の方法を用いて、各結合部にて生じる結合損失を評価した。

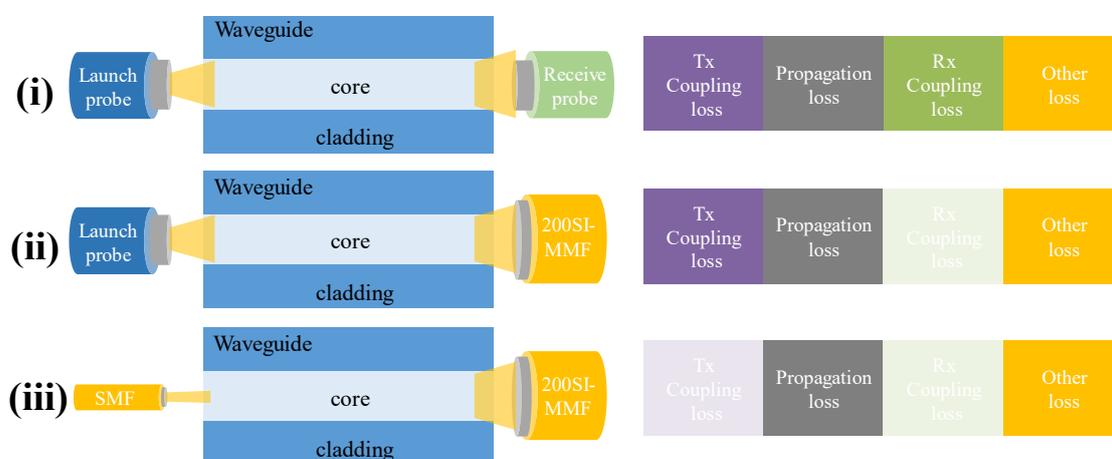


Fig. 4-8 結合損失内訳測定のための評価系

4.2.2 光リンク内で生じる結合損失の内訳

Fig. 4-7 に示した評価系を用いて測定した導波路の挿入損失を Fig. 4-9 に示す。挿入損失は、Connection 1, 2, 3, 4 にて生じる結合損失と、その他の損失に内訳されている。ここでは、その他の損失には伝搬損失も含まれることに注意する。

まず、矩形 SI 型、円形 GI 型導波路の測定結果ともに、Connection 4 の結合損失の見積もり値が負の値となる場合があることが Fig. 4-9(a)(b) よりわかる。これは、出射時の結合損失見積もりのために構築した評価系(ii)にて、受光プローブとして用いた 200- μ m SI-MMF の NA が比較的低い値(NA=0.22)であったことが起因していると考えられる。本来、出射時の結合損失が生じないはずの評価系(ii)にて、実際には NA ミスマッチによる結合損失がわずかながら発生していたと予想される。この影響により、評価系(ii)での挿入損失が評価系(i)での挿入損失を上回り、出射側の結合損失が負の値として計算されたのだと判断できる。このように結合損失が負の値として計算された場合には、本来の結合損失が限りなくゼロに等しいためであったと判断し、結合損失は生じていないとみなすこととする。

矩形 SI 型導波路の結合損失に注目する。コアサイズ 32 μm の場合には、導波路入射時 (Connection 1, 3) の結合損失は 1.50 dB, 1.02 dB と大きな値を示しているのに対し、導波路出射時 (Connection 2, 4) の結合損失は 0.127 dB, ほぼ 0 dB と、小さく抑えている。これに対し、コアサイズ 50 μm の場合には、導波路入射時 (Connection 1, 3) の結合損失は低減できている一方で、導波路出射時 (Connection 2, 4) の結合損失がともに増大してしまっていることがわかる。

これは、矩形 SI 型導波路では、導波路のコアサイズが結合損失に直接的に影響を及ぼすためである。導波路入射時の結合効率向上のためにはコアサイズを大きくする必要があるが、SI 型導波路の場合には、導波路出射時に光強度がコア全体に拡がって分布するために、コアサイズ増大は導波路出射時の結合効率を悪化させることとなる。逆も同様であり、導波路出射時の結合効率確保のためコアサイズを小さくすると、導波路入射時に結合損失が増大してしまう。このように、SI 型導波路の場合には、導波路入出射時の結合損失がコアサイズに対してトレードオフの関係にあり、コアサイズ調整による結合損失低減は困難であることが示唆される。

円形 GI 型導波路の結合損失に注目すると、コアサイズが 23 μm と小さい場合には、導波路入射時 (Connection 1, 3) の結合損失が大きく、特に 50GI-MMF からの光が結合する Connection 3 では、1.31 dB もの高結合損失を示していることが Fig. 4-9(b) よりわかる。これに対し、コアサイズが 65 μm にまで増大したとき、導波路入射時の結合損失は当然低減できている一方で、導波路出射時 (Connection 2, 4) の結合損失までも、それぞれ 0.50 dB, ほぼ 0 dB と、大きく増大させることなく小さく抑えられていることがわかる。

これは、GI 型導波路の場合には、特有の光の閉じ込め効果により、出射スポットサイズを小さく抑えられるためであると考えられる。導波路入射時の結合損失を低減させるためにコアサイズを大きくした場合にも、コア中心へと光を強く閉じ込め、導波路出射時にもスポットを小さく抑えることができるため、受光素子との結合効率を高く維持できる。よって、コアサイズをある程度大きくすることで、導波路入出射時双方にて結合損失を低減できる可能性があるといえる。

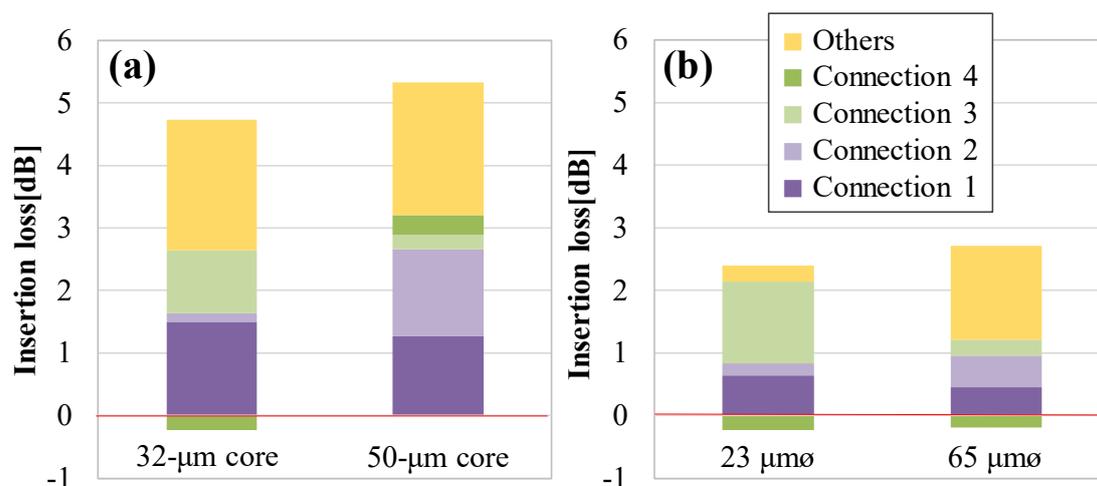


Fig. 4-9 マルチモードポリマー光導波路の挿入損失内訳測定結果
(a)矩形 SI 型導波路 (b)円形 GI 型導波路

最後に、Fig. 4-9 の結果より得られる、各導波路の結合損失の総和を Table 4-2 にまとめる。ここでの結合損失の総和は、挿入損失からその他の損失を差し引いた値となっており、結合損失内訳見積りの際、負の値として算出された結合損失値のみ、0 dB とみなして計上している。

矩形 SI 型導波路の場合には、コアサイズが 32 μm , 50 μm の場合双方にて、2.5 dB を超える結合損失値を示しており、コアサイズ変更による結合損失の大きな変化は見られない。これに対し、円形 GI 型導波路の場合には、コアサイズ 23 μm の場合には 2.14 dB の結合損失を生じていたのに対し、コアサイズを 65 μm に増大させることで、結合損失を 1.21 dB にまで低減できていることがわかる。よって、GI 型導波路では、コアサイズの適切な調整により、他の光学素子とのバットカップリング時の高効率化が可能であるといえる。

Table 4-2 マルチモードポリマー光導波路の結合損失測定結果

	SI square		GI circular	
Core size	32 μm	50 μm	23 μm	65 μm
Coupling loss	2.65 dB	3.20 dB	2.14 dB	1.21 dB

4.3 矩形コア光導波路の 45° ミラーを介した光結合特性

前節では、直線パターンのマルチモードポリマー光導波路に対し、他の光学素子をバットカップリングさせた場合を想定し、その光結合特性を評価した。本節からは、ポリマー光導

波路端に形成された 45° ミラーによる光結合を含む光リンクに注目した検討を行っていく。

本節では、45° ミラーを介した光結合特性について、SI 型導波路と GI 型導波路の対等な比較を行うことを目指した。そのために、他機関によって作製された矩形コアの SI 型、GI 型ポリマー光導波路について、45° ミラーを介した光結合特性について実測評価を行う。

4.3.1 評価系及び評価導波路

4.3.1.1 45° ミラーを含む評価系

45° ミラーを介した光結合を含む光リンクに対する検討を進めるにあたり、本研究では Fig. 4-10 に示すような評価系を設定した。この評価系は、Fig. 2-11 に示した直角光路変換型光リンクを表現したものである。評価系を構成する二つの導波路を、それぞれ光源側導波路、受光器側導波路と呼ぶ。

LED 光源(波長 850 nm)からの出射光を、Single Mode Fiber(SMF)を励振プローブとして導波路に結合することで、スポットサイズが 10 μm 程度である VCSEL 光源を想定できる。あるいは、VCSEL 光源(波長 850 nm)に接続した 50- μm 径 GI 型マルチモードファイバ(50GI-MMF)を励振プローブとした場合には、NA が 0.20 程度の光源による励振を想定できる。導波路の励振条件には、上記のいずれかを用いることとする。

励振プローブからの出力光は、導波路端に形成された 45° ミラーにて反射を受け、光源側導波路に結合する。光源側導波路-受光器側導波路間は 50GI-MMF を介して結合させることによって、ボード間光インターコネクトを実現するファイバリボンを反映している。受光器側導波路伝搬後、出射端に形成された 45° ミラーによって反射された光を、高開口数(NA = 0.33)の 50- μm 径 SI 型マルチモードファイバ(50SI-MMF)で受光することによって、PD による受光を想定した。50SI-MMF からの出力光強度をパワーメータによって測定した。

評価系内にある 4 つの接続点を、Fig. 4-10 に示すようにそれぞれ Connection 1, 2, 3, 4 と呼ぶこととする。ポリマー光導波路と他の光学素子を限りなく近づけて実装した場合を想定し、Connection 2, 3 では、光導波路-光ファイバ間をバットカップリングしており、Connection 1, 4 では、光ファイバ端を光導波路のクラッド上面に接触させている。マッチングオイルは使用しなかったため、若干のフレネル反射損失が生じる。以後、この評価系を直角光路変換型光結合系と呼ぶこととする。

ただし本研究では、特にミラー部にて生じる損失特性を詳細に検討するため、光源側導波路及び受光器側導波路には完全に同一のミラーを用いる必要があると判断した。導波路が異なる場合、同一のミラー構造(ミラー角度・ミラー表面粗さ等)を再現することは困難であるため、実際の評価では評価系を分割し、一つの導波路を光源側導波路・受光器側導波路それぞれとして用いることとした。

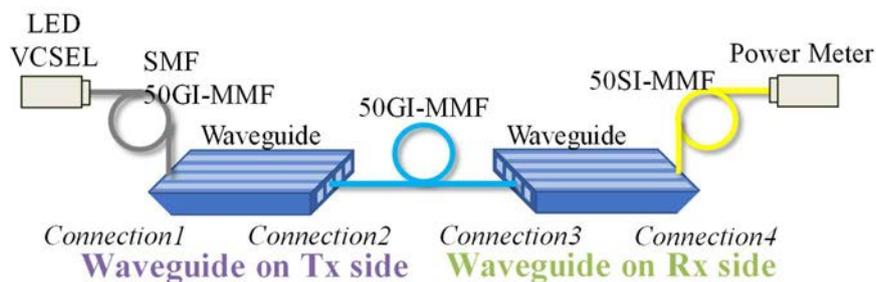


Fig. 4-10 直角光路変換型光結合系

4.3.1.2 評価導波路

本検討では、住友ベークライト㈱製の矩形 GI 型導波路を評価に用い、同じコアサイズを有するよう設計された矩形 SI 型導波路の評価も行うことで両者を比較した。同様の導波路構造を持つ SI 型と GI 型の比較を行うことで、屈折率分布の違いによる導波路特性の相違を検討する。クラッド厚(クラッド上面からコア上部までの距離と定義)は約 $40\ \mu\text{m}$ 、コアサイズの設計値は $40\times 40\ \mu\text{m}$ 、コア/クラッドの屈折率は $1.553/1.536$ 、導波路長は $10\ \text{cm}$ である。

Fig. 4-11 に矩形 GI 型導波路の端面写真を示す。

矩形 GI 型導波路の作製方法はフォトアドレス法[4-4]によるもので、紫外線照射により屈折率が変化するノルボルネン系樹脂を用いることで、GI 型屈折率分布を有するコアの形成が可能な方法である。すでに、フォトアドレス法で作製された直線パターンの矩形 GI 型導波路が、低損失性、低クロストーク性等の優れた光学特性を有することが実証されている [4-1]。作製した導波路に対し、エキシマレーザによる加工を施すことで、ミラー構造を形成している。Fig. 4-12 に形成されたミラー部の上面写真を示す。



Fig. 4-11 矩形 GI 型導波路端面写真

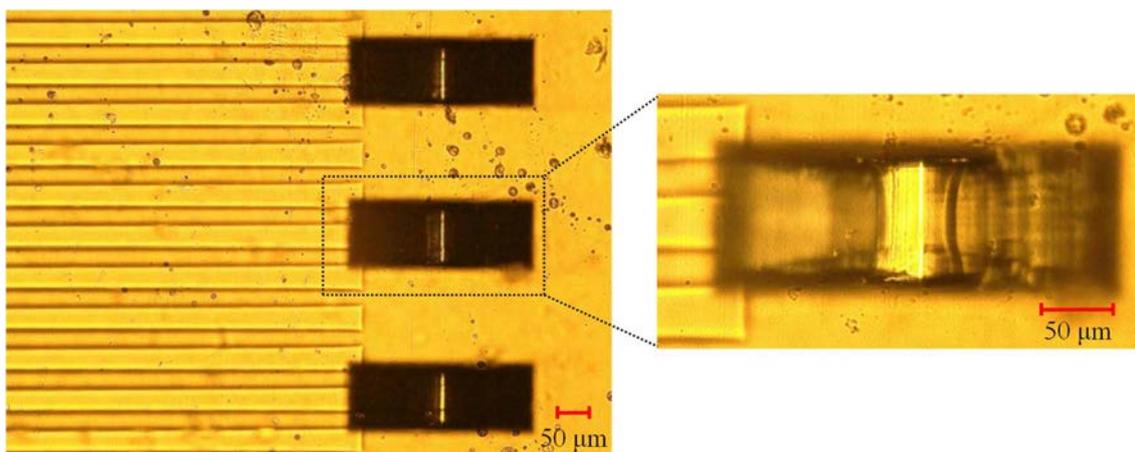


Fig. 4-12 矩形 GI 型導波路のミラー部上面写真

4.3.2 Near Field Pattern 評価

矩形 SI 型，矩形 GI 型導波路について，光源側出射端(Connection 2)での NFP(Near Field Pattern)の測定結果を Table 4-3 に示す．ここでは，励振プローブとして SMF と 50GI-MMF を用いた場合の結果を示している．

Table 4-3 より，SI 型導波路は励振条件に関わらずスポットが一定の大きさまで広がっているのに対し，GI 型導波路は励振条件に依存してスポットサイズが変化していることがわかる．SMF を用いて励振した場合にスポットが小さくなっていることから，GI 型特有のコア中心部への光の閉じ込め効果により，極小スポットで励振した場合にはそのスポットを維持して光を伝搬させていると考えられる．このことから，矩形 GI 型導波路はミラーによる光路変換を介した後も，その特徴である光の閉じ込め効果を発現しているといえる．

Table 4-3 矩形 SI 型，矩形 GI 型導波路の光源側導波路出射 NFP

Launch probe	SI square-core waveguide		GI square-core waveguide	
	SMF	50GI-MMF	SMF	50GI-MMF
NFP				

4.3.3 損失特性評価

Fig. 4-13 に示す評価系にて挿入損失を測定した結果を Table 4-4 に示す．GI 型導波路は

光源側・受光器側ともに、SI型に比べ低損失を示しており、リンク全体では1.05 dBもの優位性を発揮していることがわかる。これは、Table 4-3 に示したNFPの結果を受けて述べたように、GI型導波路は特有の光の閉じ込め効果をミラーによる反射を介した後も維持しており、受光プローブとの高い結合効率を得られたためだと考えられる。特に受光器側導波路にてSI型とGI型の差が顕著である。

受光器側導波路では、導波路伝搬後の光がミラーによる反射を受け、さらにクラッドを伝搬した後に受光プローブへと結合するため、結合効率が悪化するおそれがある。SI型は、導波路伝搬中にコア-クラッド界面にて光反射が繰り返されることによりスポットが拡大してしまうという特徴を持つ。この特徴が、導波路出射時にミラーによる反射を介した場合により顕著となり、受光プローブとの結合の際に大きな光損失を生じさせてしまう。これに対し、GI型は特有の光の閉じ込め効果により、導波路伝搬中にスポットの拡がりを抑えることができるため、ミラーによる反射及びクラッド伝搬を介した後も小スポットサイズを維持し、受光プローブとの高い結合効率を維持したのだと考えられる[4-5]。

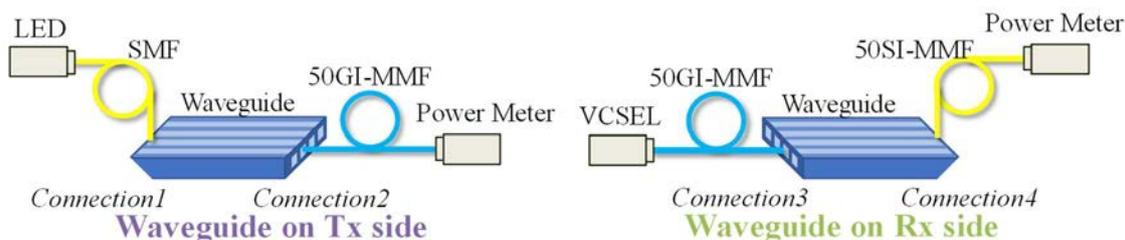


Fig. 4-13 矩形コア導波路の挿入損失評価系

Table 4-4 矩形コア導波路の挿入損失測定結果

	SI waveguide	GI waveguide
Tx side	2.12 dB	1.99 dB
Rx side	3.11 dB	2.19 dB
Total	5.23 dB	4.18 dB
Difference between SI and GI	1.05 dB	

矩形GI型導波路がSI型に比べ低損失性を発揮しているものの、リンク全体での損失値は4.18 dBにも及ぶ。これに対し、先行研究にて、住友ベークライト㈱によって同様の方法を用いて作製された直線パターン矩形GI型導波路(導波路長7 cm)に対し、リンク全体での挿入損失を評価した結果は2.61 dB[4-1]であり、本研究にて評価した45°ミラー形成導波路が高損失を示している。これは、導波路長が長い点に加え、導波路構造パラメータ(4.4節にて定義)が最適化されていなかったゆえに、45°ミラー構造に起因する損失上昇が生じた

ためであると考えられる。4.4 節では、これらの導波路構造パラメータの最適化について詳しく論ずる。

4.3.4 ミスアライメントトレランス評価

Fig. 4-14 に示した評価系のように、各接続点(Connection 1, 2, 3, 4)にて、プローブに水平方向(導波路ピッチ方向)のオフセットを加えたときの結合効率を測定することで、光導波路のミスアライメントトレランスを評価した。測定したミスアライメントトレランスカーブを Fig. 4-15 に示す。また、ミスアライメントトレランス測定結果から計算される-0.5 dB トレランス幅(軸ずれによる過剰損失を 0.5 dB 以下に抑えるための許容軸ずれ範囲)の値を Table 4-5 にまとめる。

Fig. 4-15, Table 4-5 より、GI 型導波路はいずれの接続点でも、SI 型に比べ広いミスアライメントトレランスを有していることがわかる。この理由について考察する。

4.3.1.2 節にて、評価に用いた矩形 SI 型導波路及び矩形 GI 型導波路は、コアサイズの設計値はともに $40 \times 40 \mu\text{m}$ であると述べた。しかし実際には、GI 型導波路の実質コア幅が SI 型に比べ広く形成されていたと考えられる。これは Table 4-3 に示した NFP の測定結果からも推測できる。50GI-MMF 励振の場合、 $40 \times 40 \mu\text{m}$ 程度の導波路コアサイズに対して十分なスポットサイズにて励振を行っているため、導波路内の全モードが励振されていると考えられ、その条件下で測定された NFP からは導波路コアの外形が確認できる。Table 4-3 より、50GI-MMF 励振の際の GI 型導波路の NFP は SI 型に比べ、大きなスポットを示している。よって、GI 型導波路は SI 型に比べて大きなコア幅を有していたといえる。

導波路入射部の接続点(Connection 1, 3)に着目すると、コアサイズが大きいほど励振プローブの出力光との結合効率は向上する。そのため、コアサイズがわずかに大きい GI 型導波路が広いミスアライメントトレランスを示したのだと考えられる。

導波路出射部の接続点(Connection 2, 4)について考える。SI 型は本来ならば導波路伝搬時に光のスポットが拡がりやすく、導波路出射時の受光器との結合効率が確保しにくいという特徴を持つ。しかし、本検討では GI 型に比べ小さなコアサイズを持つことによって出射時のスポットが抑えられ、結合効率の向上へとつながっていたと考えられる。それでもなお、本研究では GI 型導波路にて SI 型に対し優位な結合特性が得られていたことから、GI 型は特有の光閉じ込め効果により、コアサイズの大小に関わらず導波路出射時のスポットを小さく抑え、一定の結合効率を維持していたといえる。

よって、SI 型導波路では導波路入射部の結合効率が、そのコアサイズに強く依存し、コアサイズの大小に対するトレードオフの関係があるのに対し、GI 型導波路はミラーによる光路変換を介した後も特有の光閉じ込め効果を維持することによって、コアサイズに依存せずに安定した結合効率を確保できることが実験的に示された[4-5]。

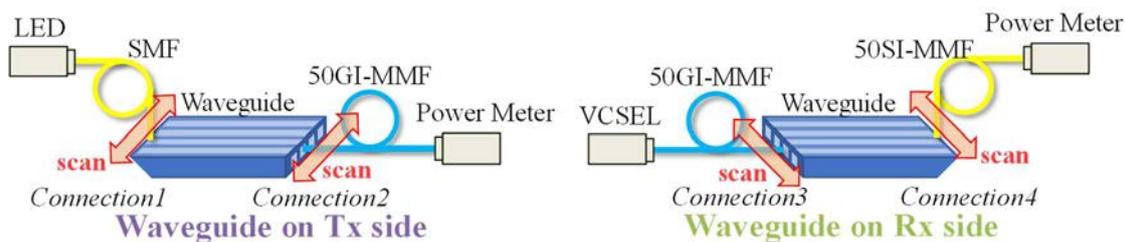


Fig. 4-14 矩形コア導波路のミスアライメントトレランス評価系

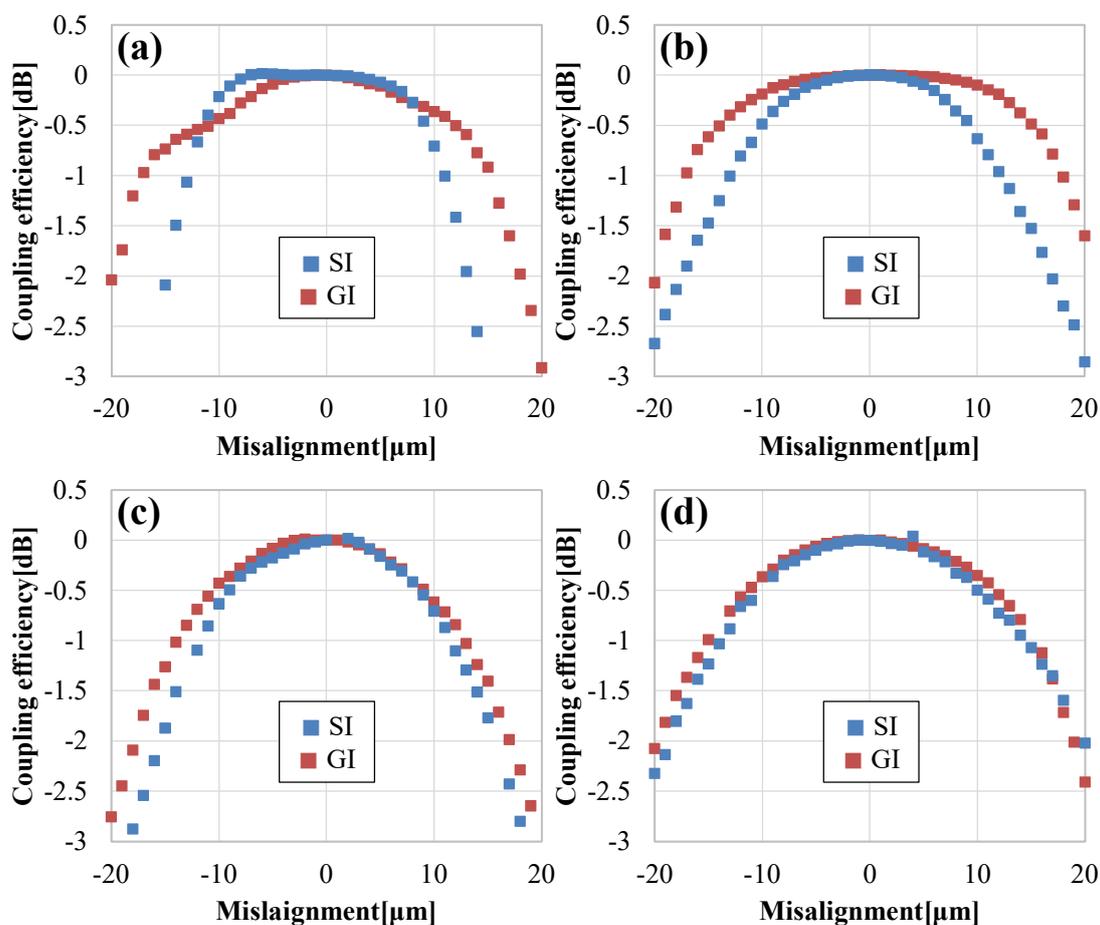


Fig. 4-15 ミスアライメントトレランス測定結果
(a)Connection 1 (b)Connection 2 (c)Connection 3 (d)Connection 4

Table 4-5 -0.5 dB トレランス幅

	Connection 1	Connection 2	Connection 3	Connection 4
SI waveguide	20.6 μm	19.3 μm	17.7 μm	20.2 μm
GI waveguide	22.8 μm	29.1 μm	19.6 μm	23.0 μm

以上の実測結果をふまえて、損失特性及び光結合特性に注目し、ミラーを介する接続点の位置ずれと挿入損失の関係について論ずる。光源側導波路と受光器側導波路の挿入損失を足し合わせることによって、光リンク全体で生じる損失量を見積もる。その全リンク損失と、Connection 1 及び Connection 4 にて加えたオフセットの絶対値との関係を示すグラフを Fig. 4-16 に示す。

Fig. 4-16 より、GI 型導波路はミラー形成をした接続点で位置ずれがある場合にも、SI 型に比べ低損失性を常に維持していることがわかる。特に、位置ずれが大きくなるにつれてその差が顕著となる。オフセットが $0\ \mu\text{m}$ のとき(最適位置合わせ時)の、GI 型の SI 型に対する優位性は Table 4-4 より $1.05\ \text{dB}$ であったが、 $1\ \mu\text{m}$ 程度の小さな位置ずれがある場合には、SI 型に比べて $1.13\ \text{dB}$ の損失低減を実現している。さらに、オフセットが $10\ \mu\text{m}$ の場合には SI 型との差は $1.32\ \text{dB}$ となり、さらなる GI 型の優位性が確認できる。

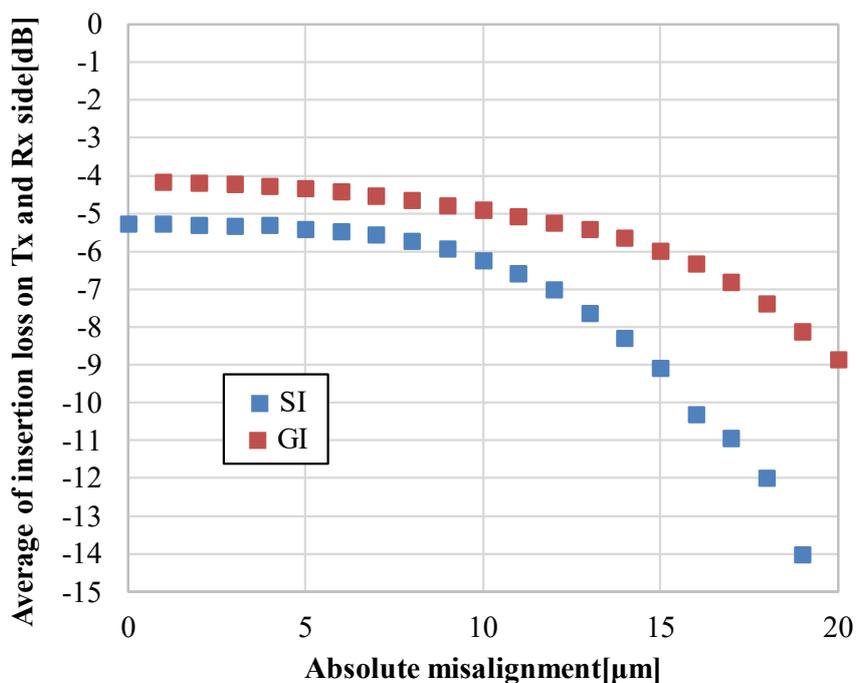


Fig. 4-16 全リンク損失と水平方向オフセットの関係

4.3.5 シミュレーションとの比較

得られた実験結果を検証するために、光線追跡シミュレーションを用いて直角光路変換型光リンクで生じる損失を理論計算し、その結果を実測値と比較する。

光線追跡法に基づく本シミュレーションでは、吸収損失や散乱損失等、材料由来の光損失は生じない設定となっているので、計算される光損失には各接続点での結合損失のみが含まれることとなる。実際のポリマー光導波路では、2.2.3 項にて紹介した材料の化学構造由

来の吸収損失や散乱損失が生じる他、ポリマー内のマイクロな不均一構造による散乱損失 [4-6]が生じている。よって、本シミュレーションにて計算される損失値と、実際に発生する光損失値との間には大きな乖離が生じることに留意しなければならない。ただし本研究では、光リンク内にて生じる結合損失に注目しており、光導波路の構造(コアサイズや導波路 NA など)やミラー構造に起因して生じる結合損失を検証する限りでは、本シミュレーションは実際の結合系を十分反映し得ると判断した。

45° ミラーによる直角光路変換を含むシミュレーションの設計については、4.4節に詳しく記載する。Fig. 4-19 に示すシミュレーションモデルと同一のモデルを用いて計算を行った。導波路構造パラメータ(Fig. 4-21 にて定義)については、クラッド厚は 40 μm 、コアサイズは 40 \times 40 μm 、コア/クラッドの屈折率は 1.553/1.536、ミラー角度は 45° とし、矩形 GI 型導波路の場合の屈折率分布は(2-5)式にて $p=q=3$ とした場合の屈折率分布をそれぞれ設定した。

シミュレーションモデル内で生じたリンク損失(結合損失)の計算結果を Fig. 4-17 に示す。モデル内の各接続点での結合損失に内訳されている。GI 型導波路のリンク損失は 0.57 dB であり、SI 型に比べ 0.74 dB もの低損失性を示していることがわかる。各接続点での結合損失内訳に注目すると、特に Connection 2 と Connection 4 にて、大きな優位性を発揮していることがわかる。これは、GI 型コア特有の光閉じ込め効果によって出射 NFP が小さく抑えられるために、マルチモードファイバや PD との光結合の際に高い結合効率が得られたためだと考えられる。

よって、理論計算及び実測評価双方で見られた、矩形 SI 型に対する矩形 GI 型導波路の低損失性は、光の閉じ込めによる導波路出射側での高結合効率に起因するものであり、GI 型導波路はミラーを含む直角光路変換型光リンクでも優れた光学特性を発揮することが明らかとなった。

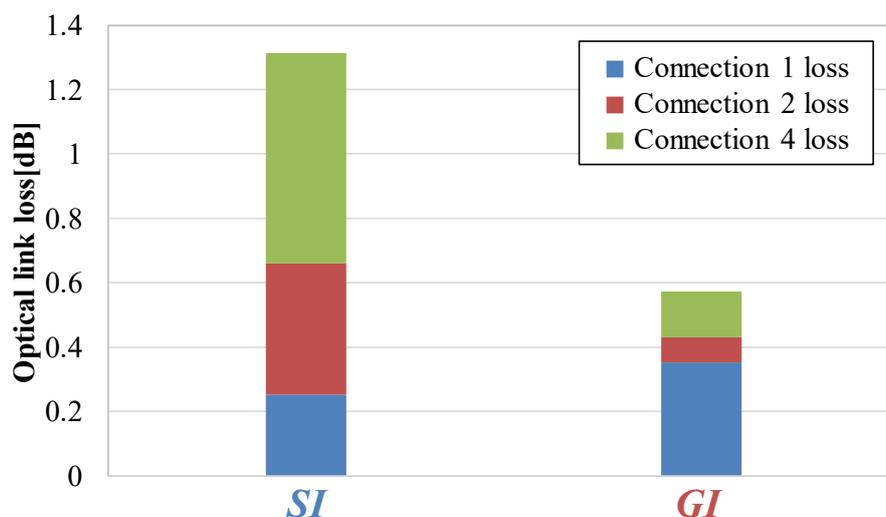


Fig. 4-17 矩形コア導波路のリンク損失の計算値

ここで、Fig. 4-17に示した光損失は、4.3.3項にて示した実測挿入損失値に比べ著しく低い値となっている。また、SI型とGI型の損失値の差も、実測値とは異なる。この理由について考察する。

前述の通り、本シミュレーションで計算された光損失は、結合損失のみを含んでおり、伝搬損失等の材料由来の損失や、接続点で生じるフレネル反射損失等を含んでいない。計算値と実測値の相違を検討するために、これらの損失要因を考慮することとした。

本実験で用いた矩形SI型、矩形GI型導波路の伝搬損失は、それぞれ0.044 dB/cm、0.035 dB/cmと見積もられている(カットバック法にて測定)。導波路長は10 cmであるため、各導波路の伝搬損失値は、0.44 dB、0.35 dBと計算される。

フレネル反射損失は、屈折率の異なる媒質間の境界面に光が入射した際に生じる。本検討では、光源-導波路間、導波路-ファイバ間、導波路-PD間にエアギャップがあると想定し、各接続点にて空気($n = 1.0$)との屈折率差によってフレネル反射損失が生じるものとした。フレネル反射の計算方法については、4.4.3.3項に詳しく記載する。フレネル反射損失を計算した結果、光源側導波路(Connection 1, 2)で生じるフレネル反射損失、受光器側(Connection 3, 4)で生じるフレネル反射損失は、どちらも0.575 dBと計算された。

シミュレーションで計算された結合損失に加え、伝搬損失及びフレネル反射損失の計算結果をまとめると、Fig. 4-18のようになる。伝搬損失、結合損失、フレネル反射損失をすべて足し合わせたものを全光損失と呼ぶこととし、全光損失をTable 4-6にまとめた。Table 4-6より、GI型導波路はSI型に比べ、理論的に0.95 dBの優位性を示しており、これはTable 4-4に示した実測値1.05 dBとよく一致する。このことから、実測値と計算値との差異には伝搬損失が大きく寄与していたと考えられる。

しかしながら、損失値に関しては、光源側、受光器側ともに、実測値は計算値に比べ依然と高い値を示している。これは、ミラー構造に起因する差異だと考えられる。シミュレーシ

ョンでは、ミラー面は平滑であることを想定しており、粗さ等を加えていない。ミラー角度は正確に 45° に設定されている。しかしながら実際には、ミラー表面粗さやミラー角度ずれによって、ミラー反射の際に散乱損失等の過剰損失が発生するおそれがある。この影響により、実測にて高い挿入損失が観測されたものと考えられ、ミラー構造の最適化の重要性が示されたといえる[4-5].

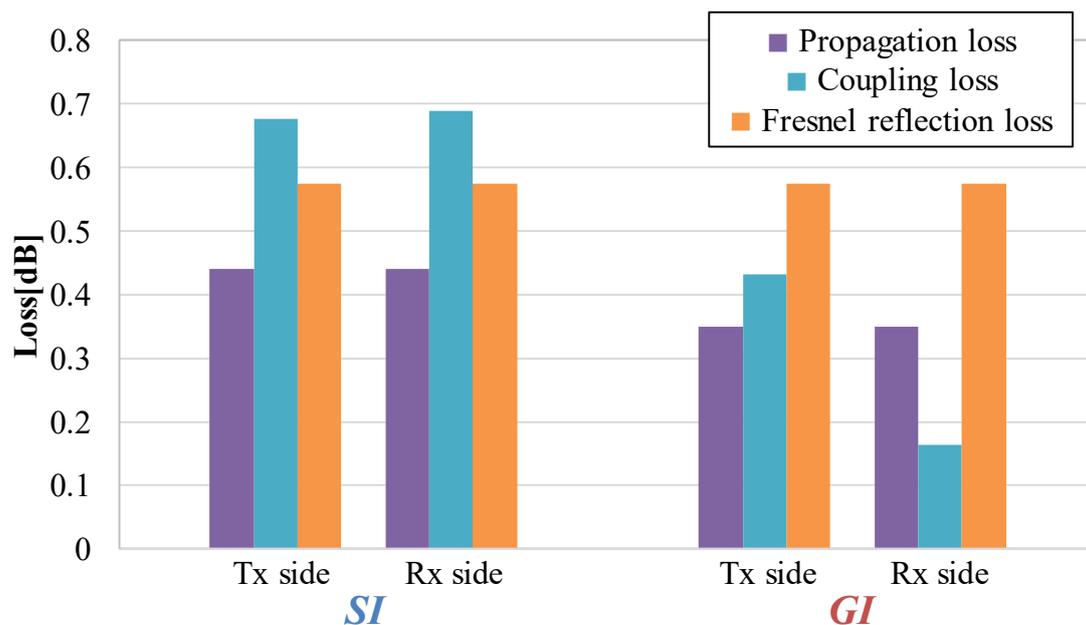


Fig. 4-18 伝搬損失, 結合損失, フレネル反射損失の計算値

Table 4-6 矩形コア導波路の全光損失の計算結果

	SI waveguide	GI waveguide
Tx side	1.69 dB	1.36 dB
Rx side	1.71 dB	1.09 dB
Total	3.40 dB	2.45 dB
Difference between SI and GI	0.95 dB	

4.4 45° ミラーを介した高効率光結合のための最適導波路構造

設計

前節では、45° ミラーが形成された矩形コアポリマー光導波路の光学特性を実測評価し、45° ミラーを介した光結合特性について、SI型とGI型を比較した。本節では、本研究にて最も注目する円形GI型ポリマー光導波路の45° ミラーを介した光結合特性について理論的に解明する。特に、円形GI型光導波路が45° ミラーを介した高効率光結合を実現するための最適導波路構造を策定するべく、各種導波路構造パラメータに注目した解析を主として取り扱う。

本節では、導波路特性解析方法として、光線追跡法によるシミュレーションを採用した。シミュレーションには、汎用シミュレーションソフトである *Zemax* を使用した。

光線追跡法では、光線方程式に従い、光の伝搬方向 z に対する微小領域内 Δz にて光線の方法ベクトルを逐次計算し、各光線の軌跡を追う。任意の領域での光強度は光線の本数で算出する。本来、光導波路内に存在する伝搬モードは互いに異なる伝搬定数を有するため、コア内を伝搬する各モードが取り得る伝搬角度は離散的になるが、光線追跡法では、コア-クラッドの全反射条件を満たすすべての角度を持つ光が連続的に伝搬する。そのため、各モードの伝搬定数がほぼ連続的であるとみなせるほど多数の伝搬モードが光導波路内に存在する場合、すなわちマルチモード光導波路の場合の解析に適する。特に、光反射や光屈折など、光の伝搬方向の急激な変化を伴う現象を追う場合に適した方法である。以上のような理由から、本研究でのマルチモード光導波路に対する45° ミラーによる反射を介した伝搬解析には、光線追跡法によるシミュレーションを採用した。

4.4.1 シミュレーション設定

4.4.1.1 シミュレーションモデル

本研究では、Fig. 4-19 に示すシミュレーションモデルを用いて、45° ミラーを介した直角光路変換を含む光リンクにて生じる光損失を検討した。Fig. 4-19 に示したモデルは、オンボード・ボード間光リンクを想定しており、Fig. 2-11 に示した直角光路変換型光リンクを表現している。光配線板に実装された2つのポリマー光導波路が、ボード間光インターコネクトを実現するGI型マルチモードファイバ(GI-MMF)によって接続されている。二つの導波路をそれぞれ光源側導波路、受光器側導波路と呼ぶ。

光源には、ガウシアン分布を有し、スポットサイズ $10 \mu\text{m}$ 、 $\text{NA} = 0.20$ の光を出力する光源オブジェクトを用いることで、VCSEL光源を想定した。Fig. 4-20 に光源の強度分布及び角度プロファイルを示す。45° ミラーは、光源側導波路入射端、受光器側導波路出射端の

オブジェクトに 45° の角度をつけることによって表現した。空気($n=1.0$)との屈折率差による反射現象を利用した設定であり、表面コーティング等は一切施していない。また、ミラー面は平滑であることを想定し、粗さを加えていない。二つの導波路を接続するファイバは、市販されている $50\ \mu\text{m}$ 径 GI-MMF を想定した設定となっており、コア、クラッドの屈折率がそれぞれ 1.483, 1.469, ファイバ NA がおよそ 0.20 となる仕様である。市販の GI 型ファイバと同様、屈折率分布係数は $g=2$ としている。受光器側出射端には $50\ \mu\text{m}$ 径の PD を想定した円形ディテクタを配置しており、光線を検出し強度換算する。光源オブジェクト及び円形ディテクタは、それぞれ光導波路表面から $1\ \mu\text{m}$ の空隙を設けた位置に配置しており、光学素子と限りなく近接した位置に光導波路を形成した場合のリンクを想定している。導波路、ファイバの長さはすべて $5\ \text{cm}$ である。リンク内のオブジェクトは、吸収損失や散乱損失等、材料由来の光損失は生じない設定となっているので、この系で生ずる損失は各接続点での結合損失のみとなる。モデル内の 4 つの接続点をそれぞれ Connection 1, 2, 3, 4 と呼ぶ。

特に断りのない限り、導波路としては円形 GI 型導波路に加え、円形 SI 型導波路、矩形 SI 型導波路について計算を行い、これら三つの結果を比較した。円形 GI 型導波路は Mosquito 法で作製された導波路を想定しており、矩形 SI 型導波路は直接露光法で作製された導波路を想定している。解析目的として円形 SI 型導波路についても検討することで、コア外形状、コア内屈折率分布による特性の相違を解明する目論見である。

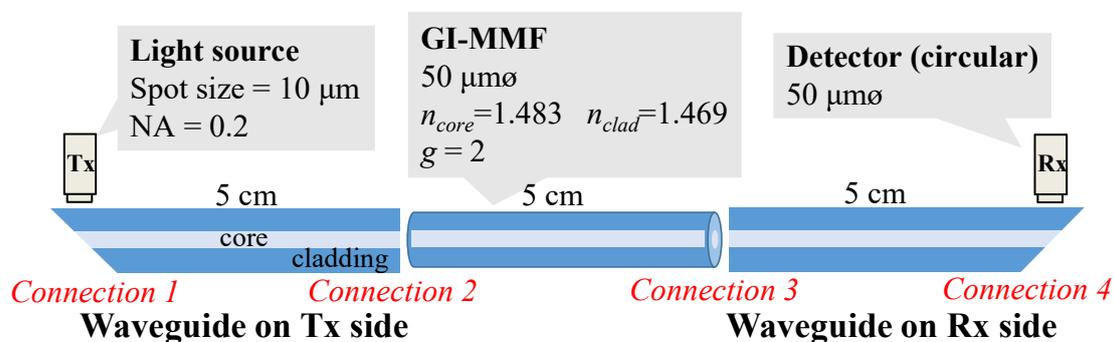


Fig. 4-19 シミュレーションモデル

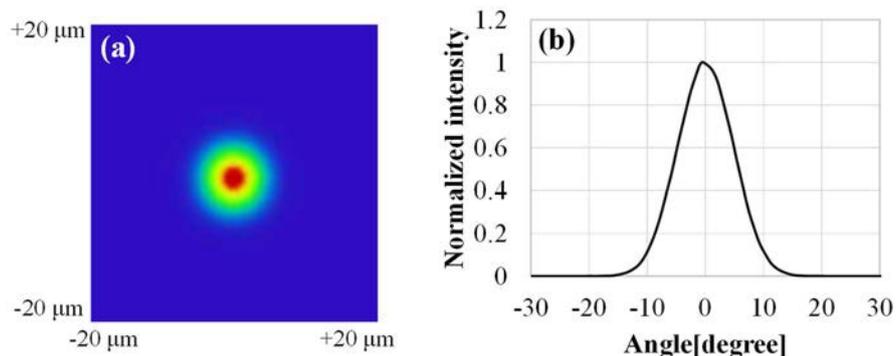


Fig. 4-20 光源モデル (a)強度分布 (b)角度プロファイル

4.4.1.2 導波路構造パラメータ

本章では、 45° ミラーを有する導波路の特性を決定づけるパラメータとして、導波路構造パラメータを定義した。導波路構造パラメータには、クラッド厚、コアサイズ、コア・クラッドの屈折率、ミラー角度、コア内屈折率分布があり、それぞれ Fig. 4-21 のように定義づけられる。クラッド厚はクラッド上面からコア上部までの距離、コアサイズは円形コアの場合は直径、矩形コアの場合は一片の長さを指す。

コア内屈折率分布については、第2章にて紹介した屈折率分布式を用いる。円形コア導波路に対しては(2-4)式、矩形コア導波路に対しては(2-5)式をそれぞれ適用し、屈折率分布係数 g , p , q によって屈折率分布を設計する。

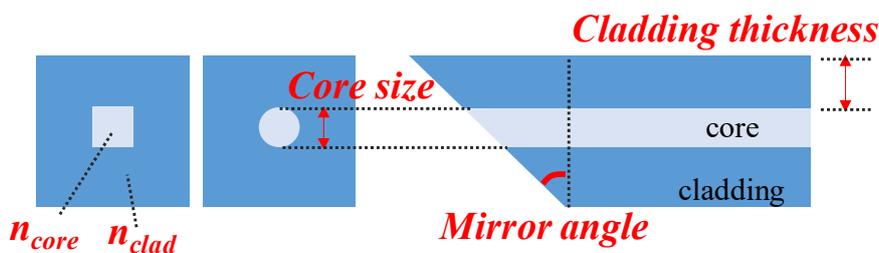


Fig. 4-21 導波路構造パラメータ

4.4.2 直角光路変換型光リンクで生じるリンク損失の解析

本項では、導波路構造パラメータを固定したときのリンク損失を検討することで、円形 GI 型・円形 SI 型・矩形 SI 型導波路の直角光路変換型光リンク内での特徴を明らかにすることを目的とする。

本項での導波路構造パラメータは、それぞれ次のように固定した。クラッド厚を $25 \mu\text{m}$ 、コアサイズを $50 \mu\text{m}$ 、コア、クラッドの屈折率をそれぞれ 1.526, 1.511, ミラー角度を 45° ,

GI型導波路の場合のコア内屈折率分布係数を $g=2$ としている。

Zemaxでは、任意の位置にディテクタを配置することで、各位置での強度を検出することができる。この機能を用いて、Connection 1~4の各接続点(光源出力後、光源側導波路出射後、50GI-MMF出射後、Rxの4ヵ所)にディテクタを配置することによって、リンク内で生じていく光損失を追跡した。計算結果をFig. 4-22に示す。

Fig. 4-22より、リンク内を光が伝搬にするにつれ、光損失が生じていく様が見て取れる。Rxにて最終的に受光されたときの光損失値は、円形GI型、円形SI型、矩形SI型導波路の場合に、それぞれ0.781 dB, 1.49 dB, 3.25 dBと算出された。SI型導波路に注目すると、コア形状の円形化に伴い、1.76 dBもの損失低減がなされていることがわかる。さらに、円形コア内に屈折率分布を形成することによって、0.71 dBもの優位性を発揮できることがわかる。

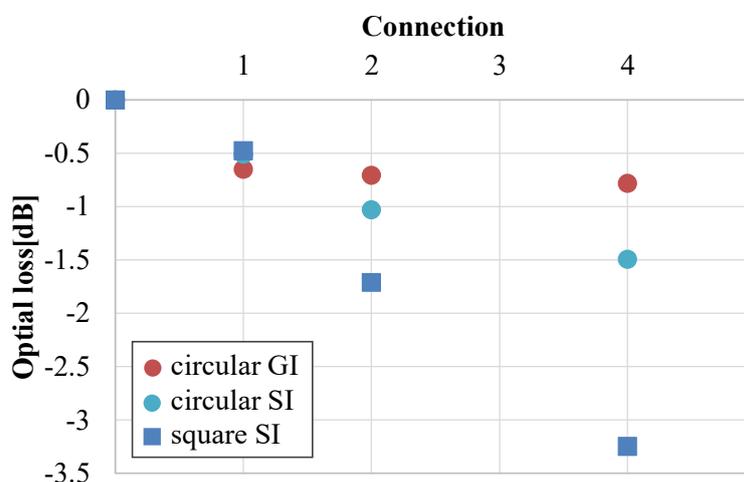


Fig. 4-22 各接続点での光損失

前述の通り、本研究でのシミュレーションモデルにて算出される光損失は結合損失のみを含んでいるため、各ディテクタ位置での光強度の差を計算することによって、各接続点で生じる結合損失を得ることができる。Fig. 4-22に示したリンク損失を、各接続点で生じる結合損失に内訳した結果をFig. 4-23に示す。

Fig. 4-23より、円形GI型導波路は、Connection 1に関しては、SI型に比べわずかに高い結合損失を示しているが、Connection 2, Connection 3&4の結合損失は、SI型に比べ非常に低い値であることがわかる。ここで、Connection 3での光結合は、50GI-MMFからコアサイズ $50\ \mu\text{m}$ の導波路コアへの結合であるので、コアサイズ及びNAのミスマッチによる結合損失は生じないと判断される。そのため、接続点3&4の損失値は、その大部分を接続点4の結合損失が占めると考えてよい。よって、円形GI型導波路は、特に導波路出射時の結合部(Connection 2, 4)にて優位性を示し、その優位性がリンク全体での低損失性につながるといえる[4-7]。

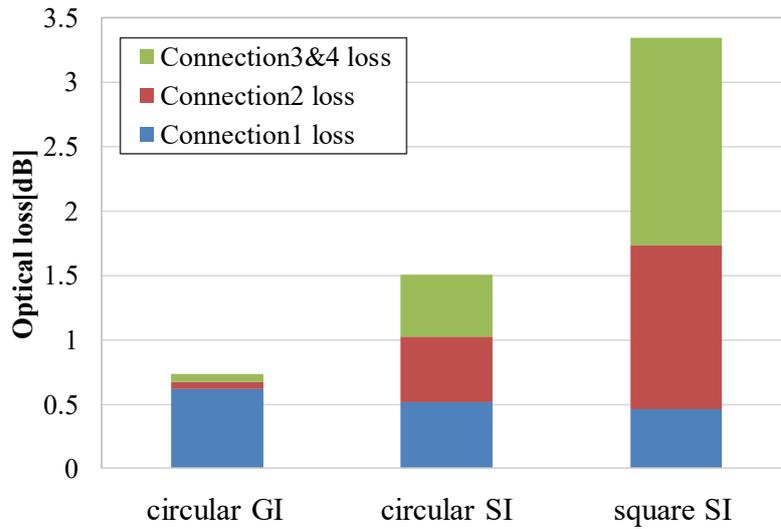


Fig. 4-23 各接続点での結合損失内訳

Connection 2 と Connection 4 に配置したディテクタにて検出された位置強度分布(NFP)を、円形 GI 型と矩形 SI 型について Fig. 4-24 に示す. なお, 示したディテクタのサイズは $50 \times 50 \mu\text{m}$ である.

Fig. 4-24 より, 矩形 SI 型導波路の場合には, 矩形ディテクタ全体に光線が拡がって分布していることがわかる. Connection 2, 4 は, それぞれ $50 \mu\text{m}$ 径の円形ファイバ, 円形 PD との結合部であるので, $50 \times 50 \mu\text{m}$ の矩形ディテクタ全体に拡がった出射光との結合効率は悪化する.

これに対し, 円形 GI 型導波路では, コア中心に光が閉じ込められている様子が確認でき, ミラーによる反射を介した後の Connection 4 でも小さなスポットを維持していることがわかる. さらに, そのスポットサイズは $50 \mu\text{m}$ 以下であることが確認できるため, ファイバや PD との高い結合効率を確保できたのだと考えられる. このことから, GI 型導波路は特有の光の閉じ込め効果をミラー介在後も維持し, 導波路出射部にて著しく高い結合効率を実現するために, たとえ導波路入射部にて SI 型に比べ大きい結合損失を示したとしても, リンク全体では大きな優位性を発揮できるといえる.

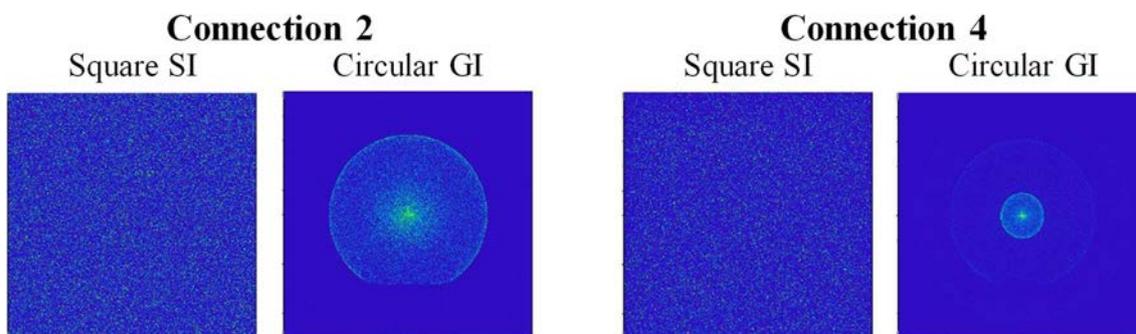


Fig. 4-24 Connection 2, 4 の光強度分布

ミラー部(Connection 1, 4)にて生じる損失をより詳細に検討するために、ミラー部損失を要因ごとに分類する検討を行った。ミラー部損失の分類を Fig. 4-25 に示す。

光源側導波路では、ミラー部損失はクラッドロス、ミラーロス、導波路ロスの3つに分類できる。光源からの出力光には、クラッド伝搬中の拡がりによって、ミラー到達までの間にコアの外へと漏えいしてしまう光が存在する。これにより生じる損失をクラッドロスと呼ぶ。また、ミラーに到達したとしても、全反射条件を満たさずに反射時に漏えいしてしまうミラーロスが生じる。ミラーで反射された光が、コアへの結合条件(NA 等)を満たさずに漏えいすることによる損失を、導波路ロスと呼ぶ。

受光器側導波路では、ミラー部損失は二つに分類できる。ミラー反射時に全反射条件を満たさず生じるミラーロスと、ミラー反射後のクラッド伝搬によるスポット拡がりの影響で、PD に結合できずに生じるクラッドロスである。

これらの損失を、Fig. 4-26 のようにディテクタを複数配置し、その強度差を計算することで解析した。計算結果を Fig. 4-27 に示す。

Fig. 4-27 より、光源側導波路に注目すると、ミラーロスについては導波路間に大きな損失差は見受けられないのに対し、導波路ロスについては、円形 GI 型導波路が SI 型に比べ大きな値を示していることがわかる。GI 型導波路には、コア内に形成された屈折率分布により、コア中心から遠ざかるほど屈折率差が減少するというローカル NA が顕在する。そのため、ミラーによる反射を受け、角度をもった光が導波路に入射するとき、結合効率が悪化しやすい。この影響により、SI 型に比べ高い導波路ロスを示したものと考えられるが、その差は 0.2 dB 以下に抑えられていることも確認できる。

一方、受光器側導波路に関しては、円形 GI 型導波路はミラーロス、クラッドロスともに、SI 型に比べ非常に低い値を示していることがわかる。SI 型導波路内でも、円形 SI 型と矩形 SI 型の損失値に大きな差があることが確認できる。

SI 型導波路の場合、出射 NFP がコア全体に拡がるのみではなく、導波路出射光 NA も GI 型に比べ大きく、導波路内に存在し得る最大の角度を持つ光線が存在する。そのため、受光器側のミラー面に対して臨界角以上の角度を持つ光線が到達する割合が GI 型に比べ大きく、

ミラーロスの増大につながったと考えられる。また、大きなスポットサイズ、大きな角度をもってミラー反射を受けた光は、クラッド伝搬後のスポット拡がりも大きく、PD 結合の際にクラッドロスが大きくなる結果となる。特に矩形 SI 型導波路は、PD サイズと比較して大きなコアサイズを持つため、クラッドロスの増大が顕著となったと考えられる。

GI 型導波路は、特有の光閉じ込め効果により、SI 型に比べより小さなスポットサイズ、より低い NA をもってミラーに到達するため、全反射条件を満たしやすいことから、ミラーロスを低減できる。さらに、ミラー反射後も小スポットサイズを維持することにより、クラッドロスも低く抑えられたのだと考えられる[4-7]。

以上の検討により、円形 GI 型導波路は、ミラー介在後も光の閉じ込め効果を維持することによって、主に受光器側にて、SI 型に比べ大きな優位性を発揮するといえる。

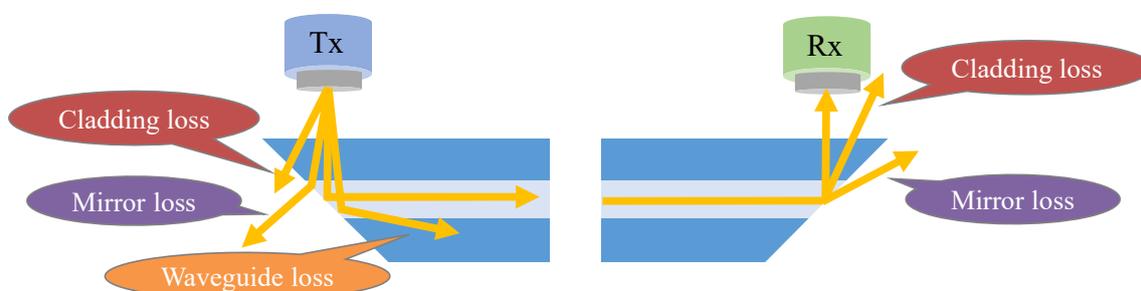


Fig. 4-25 ミラー部損失要因

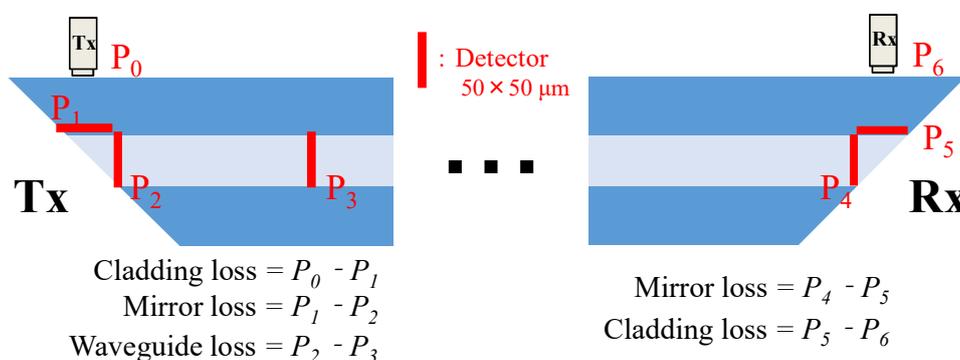


Fig. 4-26 ミラー部損失シミュレーションモデル

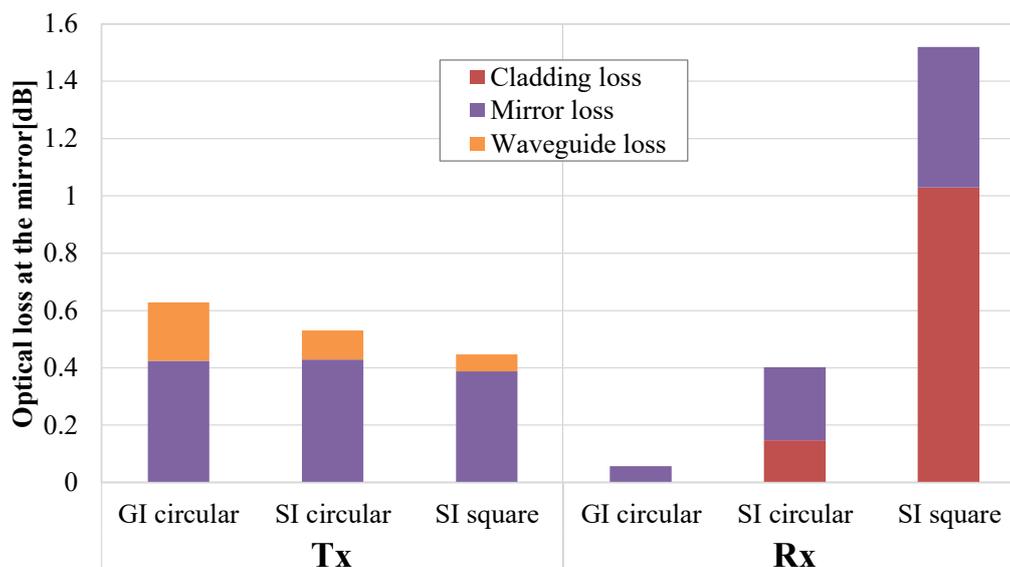


Fig. 4-27 ミラー部損失計算結果

4.4.3 導波路構造パラメータ検討による最適構造設計

ここまでの検討では、導波路構造パラメータを固定し、直角光路変換型光リンクで生じる光損失について検討を行うことで、円形 GI 型導波路の SI 型に対する優位性を確認した。本項では、各種導波路構造パラメータを変更した検討を行うことで、高効率光結合に必要な導波路最適構造を設計する。

4.4.3.1 クラッド厚の検討

コアサイズを $50\ \mu\text{m}$ 、コア、クラッドの屈折率を 1.526, 1.511, ミラー角度を 45° 、GI 型導波路の屈折率分布を $g = 2$ に固定し、光損失のクラッド厚依存性を検討した結果を Fig. 4-28 に示す。

Fig. 4-28 より、クラッド厚が減少するにつれて光損失も減少しており、特に円形 GI 型にてその減少傾向が顕著であることがわかる。矩形 SI 型の場合には、クラッド厚減少に伴う損失低減が次第に飽和し、クラッド厚 $0\ \mu\text{m}$ の場合にも $3\ \text{dB}$ を超える損失値を示すことが予想される。これに対し、円形 GI 型導波路は、クラッド厚が $225\ \mu\text{m}$ と大きい場合には円形 SI 型に比べ大きな損失値を示しているが、クラッド厚減少に伴い急激に損失が減少し、クラッド厚 $125\ \mu\text{m}$ 以下にて他の導波路に比べ低損失を示している。クラッド厚 $25\ \mu\text{m}$ の場合には、矩形 SI 型に比べ $2.61\ \text{dB}$ もの優位性を発揮していることがわかる。

GI 型コアの場合、コア内に形成された屈折率分布により、コア中心から遠ざかるほど導波路のローカル NA が低下し、光源側での結合効率悪化につながる。クラッド厚が大きい場合には、光源からの光はクラッド伝搬による拡がりをもってコアに結合するため、ローカル

NAにより結合効率が低下する。ただし、クラッド厚を小さく抑え、小スポットにてGI型の励振を行った際には、そのスポットを導波路伝搬中も維持し、光源側、受光器側双方での結合効率向上につながると考えられる[4-7]。

45°ミラーを介した光結合部に、光学レンズ素子を配置し、光が大きく開口した場合にも集光効果により結合効率を維持する例も存在するが、レンズ素子の導入コストは無視できない。GI型導波路であれば、クラッド厚低減により光源側での結合効率さえ確保すれば、導波路出射時にはGI型コア自身の特性により、レンズ素子を要することなく受光器との高結合効率を実現可能である。このことから、45°ミラーを介した高効率結合の実現のためにはクラッド厚の削減が重要であり、その条件下にて円形GI型導波路の優れた光学特性が発現されるといえる。

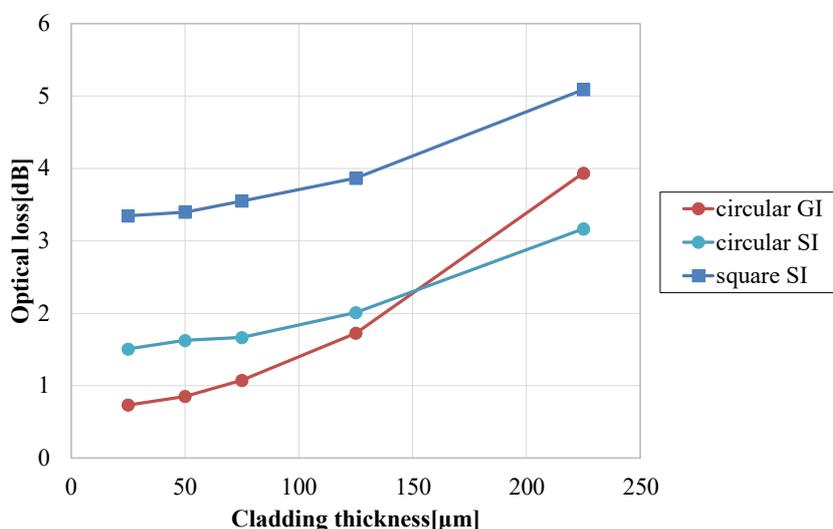


Fig. 4-28 クラッド厚と光損失の関係

4.4.3.2 コアサイズの検討

コア、クラッドの屈折率を 1.526, 1.511, ミラー角度を 45°, GI型導波路の屈折率分布を $g=2$ に固定し、光損失のコアサイズ依存性を検討した結果を Fig. 4-29 に示す。クラッド厚を 125 μm, 25 μm に設定した場合について比較している。

Fig. 4-29 より、SI型導波路ではコアサイズ変化に対し損失値の極小点が存在するのに対し、円形GI型導波路はコアサイズ増大とともに損失が減少し、コアサイズおよそ 50 μm 以上の広範囲にて、約 1 dB 付近の安定した低損失性を保っていることがわかる。この傾向は Fig. 4-29(b)に示した、クラッド厚 25 μm の場合により顕著であり、コアサイズ 35 μm 以上の広範囲にて、他の導波路に対する優位性を発揮している。コアサイズ 40 μm の場合には、矩形SI型に対して 0.56 dB の優位性を示しているが、比較的大きな 60 μm コアサイズでは、その優位性は 4.47 dB にまで増大する。

これは、SI型導波路の場合には、導波路入射部の結合効率を確保するためにコアサイズを大きく設定すると、導波路出射部ではコア全体に強度分布が広がるために結合効率が悪化してしまうという、コアサイズに対するトレードオフの関係があるのに対し、GI型導波路では、特有の光の閉じ込め効果により、コアサイズが大きい場合にも出射NFPを小さく抑え、出射側での高結合効率を維持できるためだと考えられる。

ただし、Fig. 4-29(b)より、コアサイズ35 μm の場合には、すべての導波路がほぼ同じ損失値を示し、GI型導波路の優位性が見られていない。Fig. 4-29の結果は、50 μm 径のPDで受光する場合を想定していたが、光配線板上では、さらなる通信の高速化に向け、高速応答が可能である小ディテクタサイズを有するPDが応用されつつある。そこで、35 μm 径のPDを想定した場合についても同様の計算を行い、その結果をFig. 4-30に示した。ここでクラッド厚は25 μm である。

Fig. 4-30より、35 μm 径のPDの場合には、円形GI型導波路のSI型に対する優位性がより顕著となり、コアサイズ35 μm の場合にも、矩形SI型に比べ1.32dBもの低損失性を示している。SI型導波路は出射スポットの広がりにより、受光器側の結合効率がPDのサイズに大きく左右されるのに対し、GI型導波路は光の閉じ込め効果により出射スポットサイズをミラーによる反射を介した後も小さく抑えるため、PDの小径化に対しても高い結合効率を維持できると考えられる[4-7]。

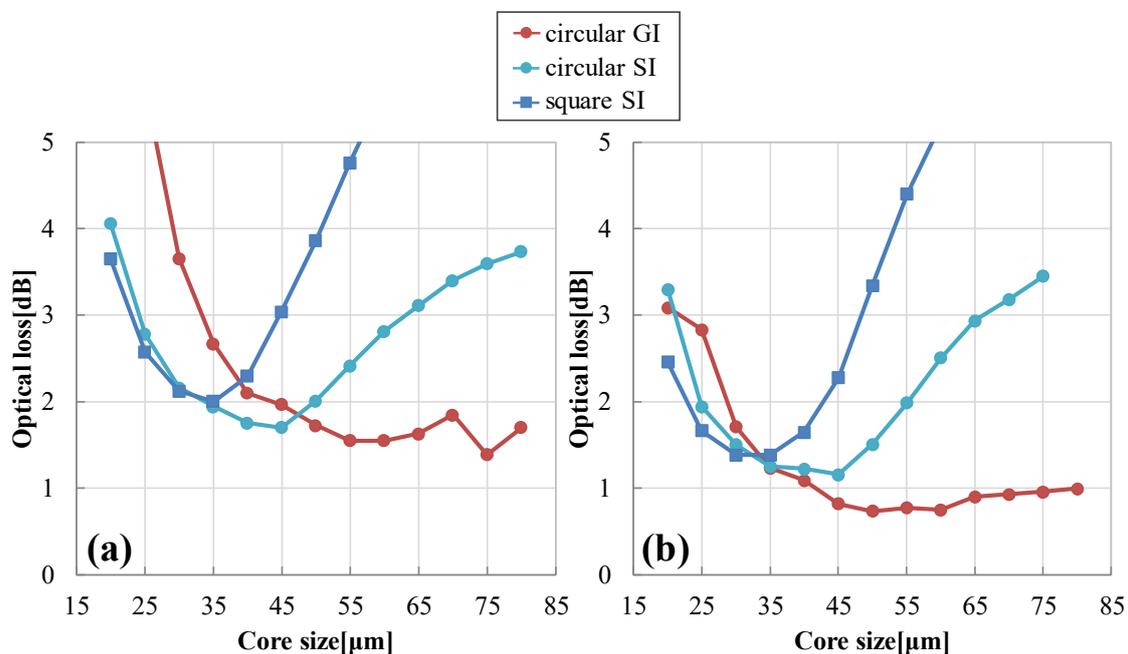


Fig. 4-29 コアサイズと光損失の関係 (50- μm PD)
 (a)クラッド厚 125 μm (b)クラッド厚 25 μm

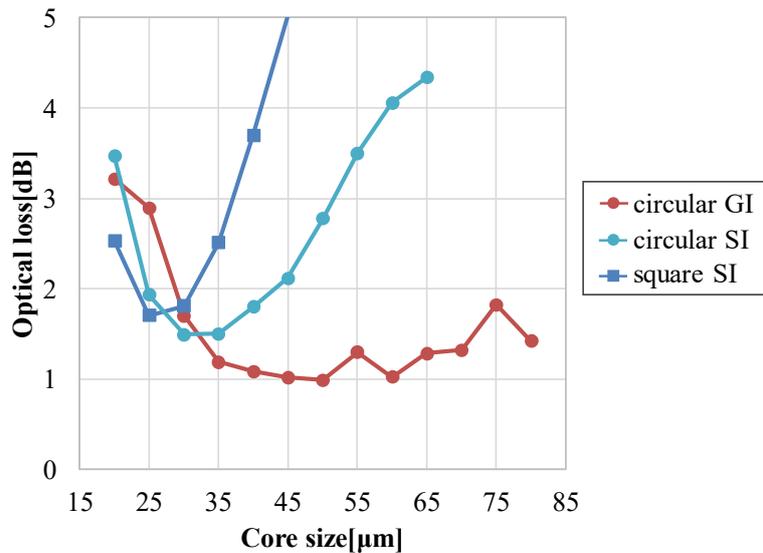


Fig. 4-30 コアサイズと光損失の関係 (35- μm PD)

4.4.3.3 屈折率の検討

コア、クラッド材料の屈折率が光損失に与える影響を検討した。クラッド厚を 125 μm 、コアサイズを 50 μm 、ミラー角度を 45°、GI 型導波路の屈折率分布を $g = 4$ に固定した。Fig. 4-31 のように、コアの屈折率を 1.525 から 1.80 まで段階的に変化させ、それぞれの場合に導波路 NA が 0.20, 0.25, 0.30 となるようなクラッドの屈折率を設定し、計算を行った。光損失とコア屈折率の関係を示す計算結果を Fig. 4-32 に示す。

Fig. 4-32 より、全光損失は導波路 NA(WGNA)には大きく依存せず、コア屈折率への依存度が大きいことがわかる。また、円形 GI 型、円形 SI 型、矩形 SI 型導波路で同様のグラフ形状が得られていることから、コア形状やコア内屈折率分布にも、屈折率依存傾向は影響されないといえる。

また、コア屈折率増大に伴い、光損失は減少するが次第に安定化し、およそ 1.65 以上のコア屈折率では損失値の大きな変化は見られない。これは、本シミュレーションではミラー表面コーティングを施していないため、コア屈折率が低い場合にのみ、空気-コア間の屈折率差が小さくなり、ミラー反射時に全反射条件を満たさないミラーロス(Fig. 4-25 で定義)が増大するためだと考えられる。コア屈折率およそ 1.575 以下にて急激な損失上昇が見られたことから、およそ 1.6 以上の屈折率を有するコア材料を選択すれば、ミラーロスによる影響を抑えることができるといえる。

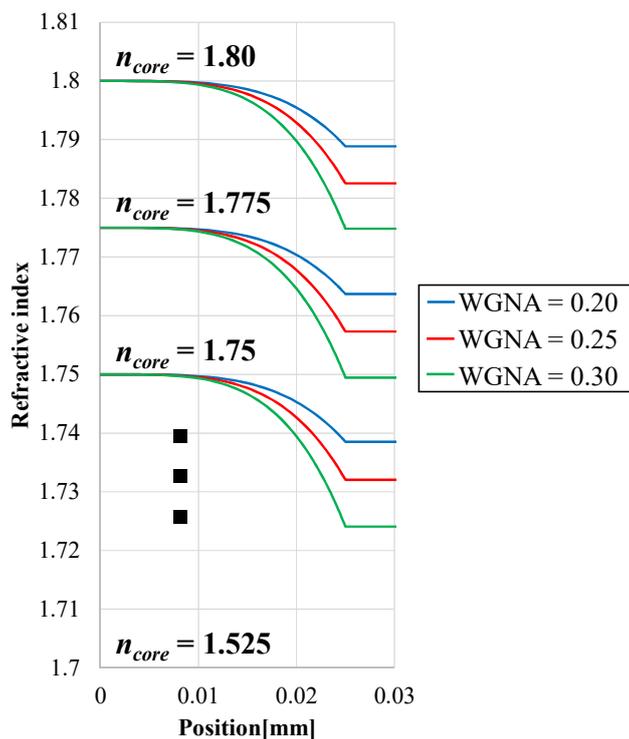


Fig. 4-31 屈折率分布モデル

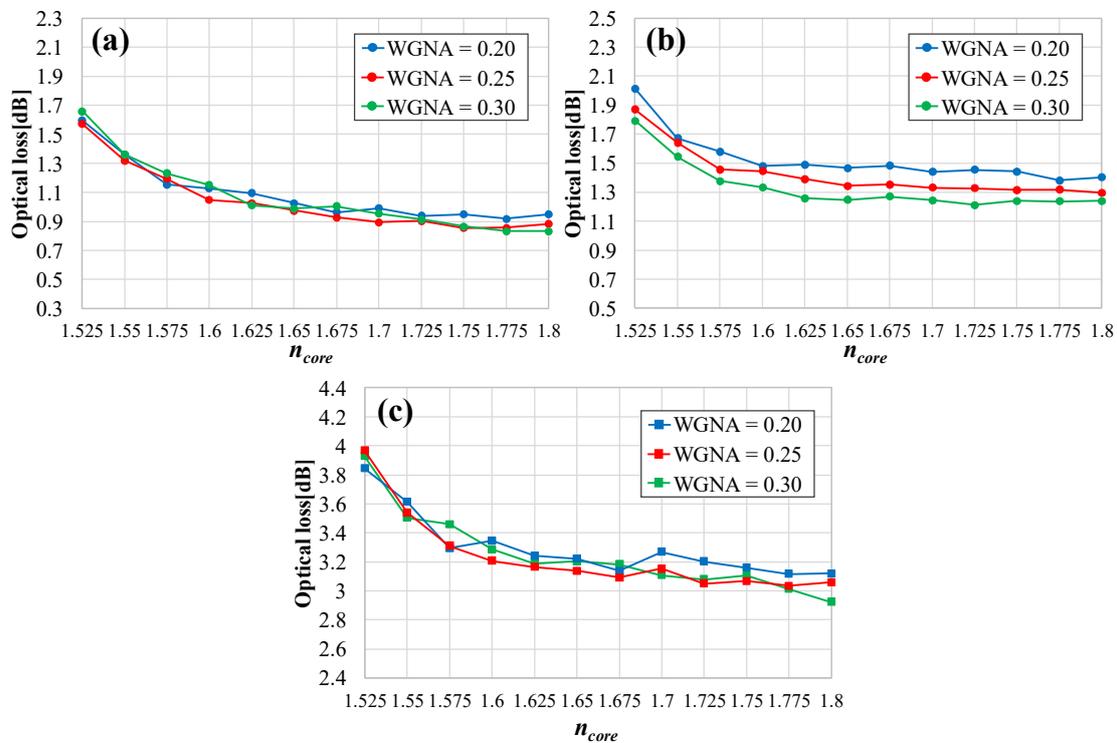


Fig. 4-32 光損失とコア屈折率の関係

((a)円形 GI 型導波路 (b)円形 SI 型導波路 (c)矩形 SI 型導波路)

反射時のミラーロス低減のための手法として、ミラー表面のコーティング技術が存在する。金属めっきをミラー表面に施すことでいかなる角度を持つ光に対しても全反射を実現させる手法である[4-8]。そこで、シミュレーションモデルにて、すべての光線を反射させるオブジェクトをミラー面に配置することによって、金属ミラーコーティングを想定した計算を行った。ミラーコーティング以外のその他の条件は同一とした。結果を Fig. 4-33 に示す。また、Fig. 4-32 と Fig. 4-33 の結果の差を計算することによって、金属ミラーコーティングを施したことによる損失低減量を示すグラフを得、Fig. 4-34 に示した。

ミラーコーティングを施した場合には、Fig. 4-32 では見られた低コア屈折率での急激な損失上昇は生じず、コア屈折率に対して安定した損失特性を示すことが Fig. 4-33 よりわかる。このことから、およそ 1.575 以下の低屈折率のコア材料を用いたときには、ミラー反射時の漏えい光によるミラーロスが大きく生じるおそれがあり、金属コーティングを施すことによってその損失を低減できるといえる。

ただし、Fig. 4-34 に示した金属ミラーコーティングによる損失低減量に注目すると、たしかに $n_{core} = 1.525$ の場合にはおよそ 0.4 dB ほどの損失低減を実現しているが、その値はコア屈折率増加に伴い急激に減少し、 $n_{core} > 1.60$ ではミラーコーティングによる恩恵がほとんど得られていないことがわかる。よって、屈折率 1.60 以上のコア材料を用いることで、ミラーコーティング過程を経ずともミラーロスを最大限低く抑えることができるといえる [4-7]。

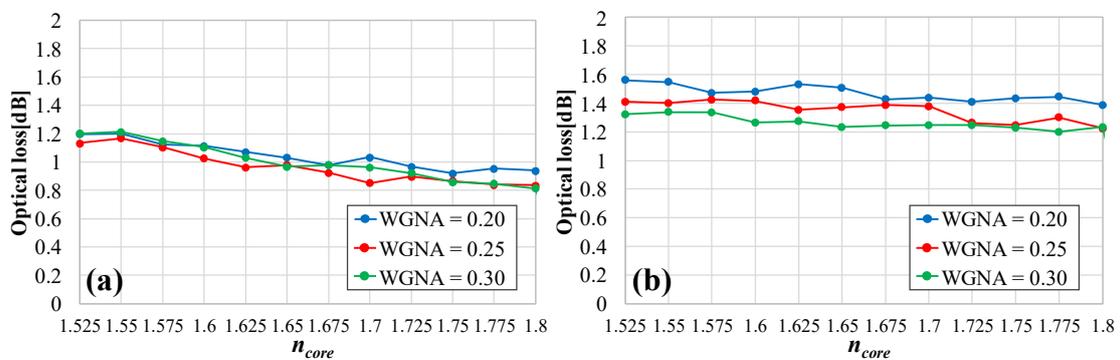


Fig. 4-33 金属ミラーコーティング後の光損失とコア屈折率の関係
((a)円形 GI 型導波路 (b)円形 SI 型導波路)

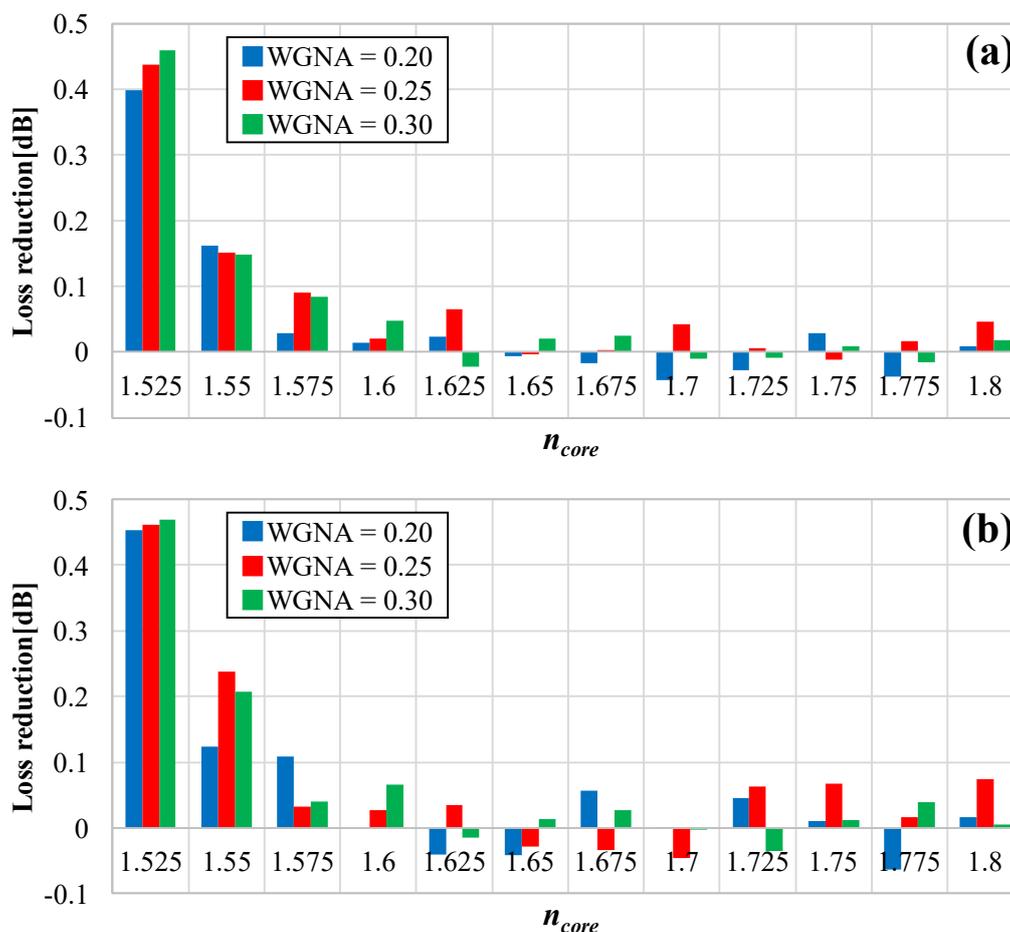


Fig. 4-34 金属ミラーコーティングによる損失低減量とコア屈折率の関係
(a)円形 GI 型導波路 (b)円形 SI 型導波路)

金属ミラーコーティングによる影響を詳細に知るために、損失低減量を各接続点の結合損失ごとにまとめたグラフを Fig. 4-35 に示す。Fig. 4-35 は、WGNA = 0.30 の円形 GI 型導波路についての結果を示している。

Fig. 4-35(a)(c)より、ミラー反射を含む接続点(Connection 1, Connection 4)では、低コア屈折率の範囲にて金属コーティングによる損失低減がなされていることがわかる。

これに対し、Fig. 4-35(b)の Connection 2 の結合損失に注目すると、低コア屈折率にて、金属コーティングを施すことによって損失が増大している。これは、金属コーティングを施さない場合には Connection 1 でのミラー反射の際に漏れいするほどの角度を持った光が、金属コーティングの恩恵によってコアに結合できたとしても、導波路伝搬後に Connection 2 にて MMF との NA のミスマッチにより結局漏れいしてしまうためだと考えられる。よって、金属ミラーコーティングを施すことは、ミラーロスの低減をもたらす一方、Connection 2 での結合損失増大も同時に引き起こすため、リンク全体での損失低減に対しては効率的に作用しない。

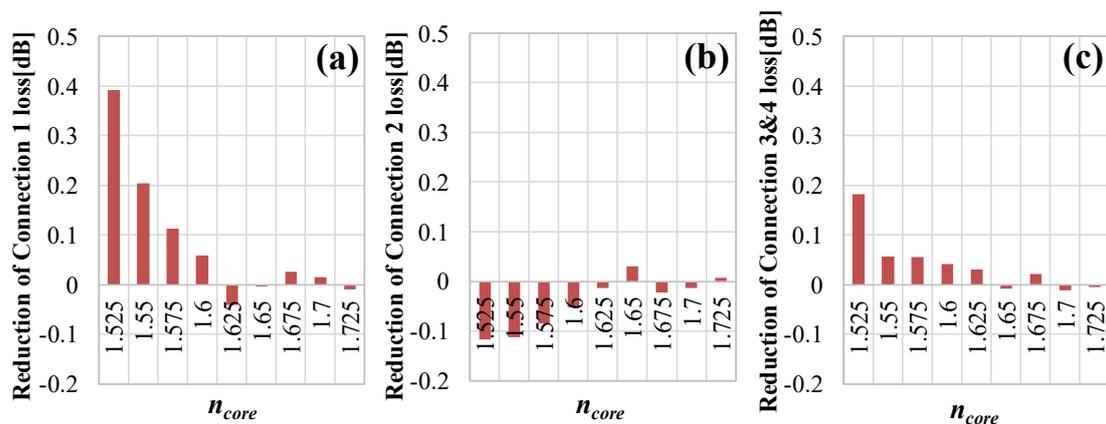


Fig. 4-35 各接続点での金属ミラーコーティングによる損失低減量とコア屈折率の関係
(円形 GI 型導波路, WGNA = 0.30)
((a)Connection 1 (b)Connection 2 (c)Connection 3&4)

また、本シミュレーションでは、ミラーコーティングを施した場合、光は全反射され、反射によるエネルギー損失は生じないことを想定していた。しかし実際には、光の金属表面反射の際には、金属物質固有の放射係数による光の吸収現象が生じる。金や銀、銅などのミラーコーティングに用いられる金属の放射係数は、波長 $1\ \mu\text{m}$ において $0.02\sim 0.06$ 程度であり [4-9]、ミラーでの反射の際に $0.1\sim 0.3\ \text{dB}$ ほどの吸収損失が生じることとなる。光リンク内にミラーによる反射が 2 回含まれる場合には、最低でも $0.2\ \text{dB}$ の吸収損失が生じる。

金属吸収損失が $0.2\ \text{dB}$ 生じたと仮定し、その損失値を Fig. 4-34(a)に示したシミュレーション結果に計上した場合の結果を Fig. 4-36 に示す。コア屈折率が 1.525 である場合を除き、ミラーコーティングによって損失を低減させるどころか、損失増大を招いてしまうおそれがあることがわかる。

よって、Fig. 4-35 に示した各接続点での損失低減量や、Fig. 4-36 に示した金属吸収損失を考慮した場合、金属ミラーコーティングによる損失低減は必ずしも効率的に作用しないことがわかる。さらにミラーコーティングにかかる工程やそれに伴うコストを考えるのならば、およそ 1.60 以上の屈折率を有するコア材料を使用することで、材料自身の効果によりミラーロス低減させることが望ましいといえる。

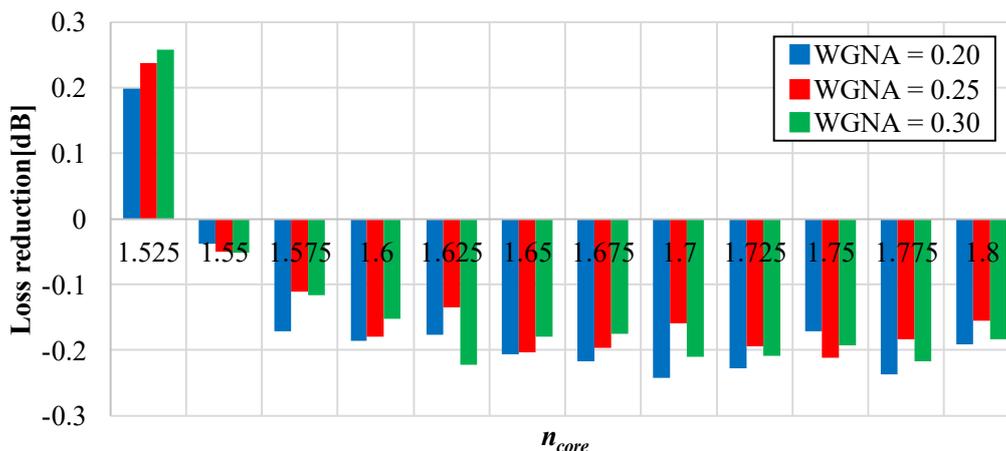


Fig. 4-36 金属吸収を考慮した場合の金属ミラーコーティングによる損失低減量とコア屈折率の関係(円形 GI 型導波路)

以下では、最適な屈折率をより詳細に知るための検討を行う。

本研究で用いたシミュレーションモデルでは、光導波路や光ファイバは吸収損失や散乱損失等、材料由来の光損失は一切含まない設定である。加えて、屈折率の異なる物質の境界面にて生じるフレネル反射損失も含まれていない。よって、計算された光損失値は各接続点で生じる結合損失のみを表している。ただし、フレネル反射損失の大きさは材料の屈折率に依存するため、リンク損失の材料屈折率依存性を検討するためには、フレネル反射損失の影響を考慮に入れる必要がある。フレネル反射損失の大きさは、光の偏光方向への依存に加え、境界面への入射角にも依存するが、入射角がゼロとみなせる場合には偏光方向への依存性がなくなり、その反射率は次式のように表される。

$$R = \left(\frac{n_1 - n_2}{n_1 + n_2} \right)^2 \tag{4-1}$$

ここで、 n_1 , n_2 はそれぞれ入射側、出射側材料の屈折率である。本研究のシミュレーションモデルでは、Fig. 4-37 に示すように、6カ所にてフレネル反射損失が生じる。その損失値を(4-1)式を用いて算出し、シミュレーションで計算した結合損失値に加えることで、全光損失とした。全光損失とコア屈折率の関係を示すグラフを Fig. 4-38 に示す。なお、この検討では金属ミラーコーティングは施していない。

フレネル反射損失を考慮することにより、Fig. 4-32 では安定化していた $n_{core} > 1.65$ での光損失に変化が見られた。Fig. 4-38 より、いずれの WGNA、コア構造の場合にも、全光損失はコア屈折率およそ 1.60 付近にて最低値を示していることがわかる。

低コア屈折率では、Fig. 4-32 の場合と同様に、ミラーロスの影響で損失増大が生じていると考えられる。これに対し、高コア屈折率の場合には、(4-1)式によりフレネル反射損失が増大する。その影響により、コア屈折率およそ 1.65 以上にて徐々に損失が増加するものと考えられる。このコア屈折率に対するトレードオフの関係により、光損失の屈折率依存傾

向に極小点が現れ、最適な屈折率が明らかとなった[4-7].

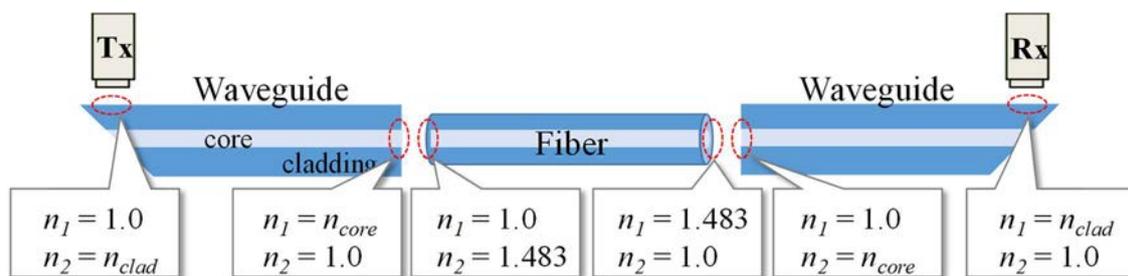


Fig. 4-37 フレネル反射損失発生点

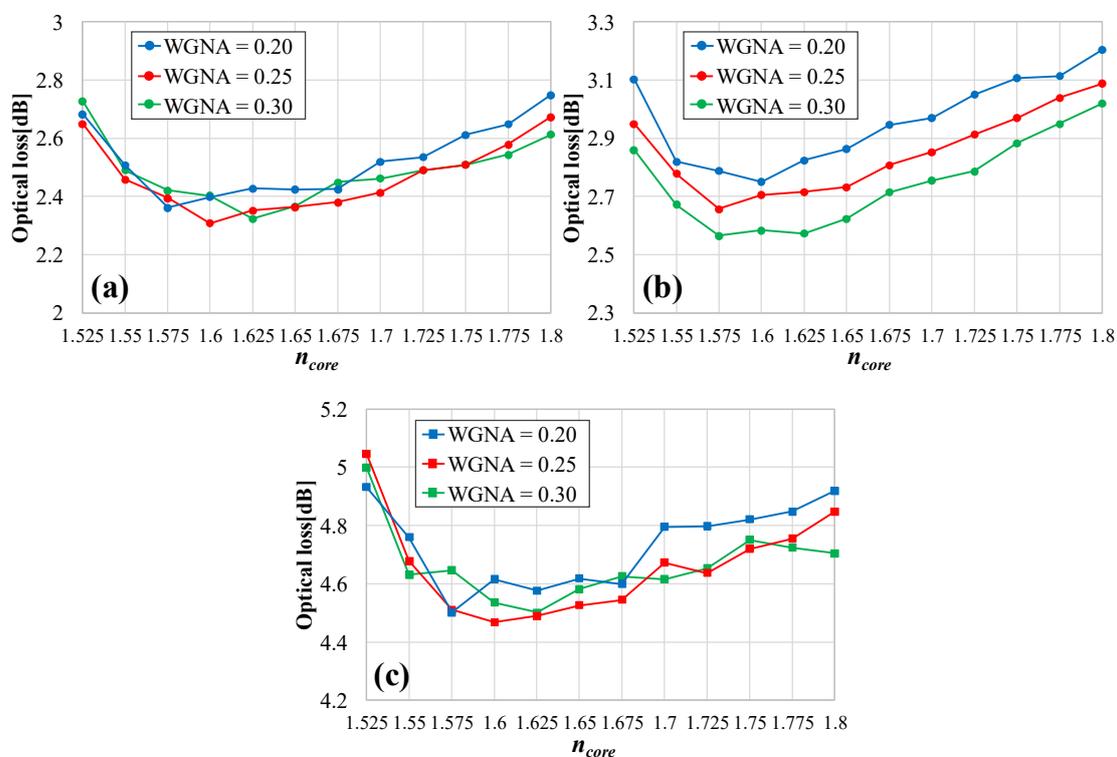


Fig. 4-38 フレネル反射損失を含めた光損失とコア屈折率の関係
(a)円形 GI 型導波路 (b)円形 SI 型導波路 (c)矩形 SI 型導波路)

4.4.3.4 ミラー角度の検討

ミラー角度が光損失に与える影響を検討した. クラッド厚を $125\ \mu\text{m}$, コアサイズを $50\ \mu\text{m}$, GI 型導波路の屈折率分布を $g = 4$ に固定した.

これまでの導波路最適構造設計の検討では, Fig. 4-19 に示したモデルにて, 光源側・受光器側導波路双方を含むリンク全体で生じる光損失を計算していた. しかし, ミラー角度の

検討に関しては、光源側、受光器側それぞれのミラーについて詳細に検討を行う必要があると判断したため、Fig. 4-39 に示すようにモデルを2つに分割して計算を行うこととした。これにより、SI型、GI型導波路を同一の励振条件下にて比較できるため、純粋なミラー部特性検討が行える。

Fig. 4-39 のモデル内の光源側導波路は、Fig. 4-19 に示したリンク全体のシミュレーションモデル内の光源側導波路と同一の励振条件下にあるが、受光器側導波路の励振条件はモデルによって異なる。そこで、Fig. 4-39 のモデル内の受光器側の導波路のことを、擬似受光器側導波路と呼ぶことにする。

WGNA を 0.25 に固定し、コア屈折率を 1.525, 1.65 とした場合について、光損失のミラー角度依存性を検討した結果を、Fig. 4-40, Fig. 4-41 にそれぞれ示す。

Fig. 4-40, Fig. 4-41 より、いずれの導波路の場合にも、ミラー角度ずれが最適角度から $\pm 1^\circ$ 以内であれば、過剰損失は 0.25 dB 以下に収まることがわかる。

ただし、ミラー角度ずれに対するトレランス形状は、それぞれの場合で異なる。Fig. 4-40 より、コア屈折率が 1.525 と低い場合には、角度トレランス形状は非対称であり、光源側と疑似受光器側で最適ミラー角度(最低損失値を示すミラー角度)が異なることが見て取れる。一方、コア屈折率が 1.65 まで増大すると、Fig. 4-41 に示したように対称なトレランス形状が得られ、最適ミラー角度は光源側、疑似受光器側共に 45° に一致することがわかる。この理由について考察する。

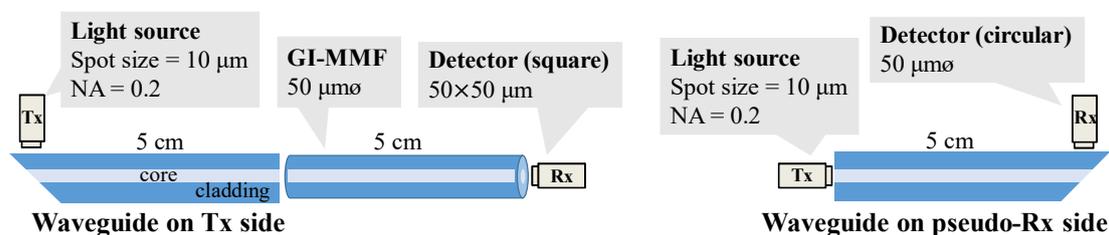


Fig. 4-39 ミラー角度依存性検討のシミュレーションモデル

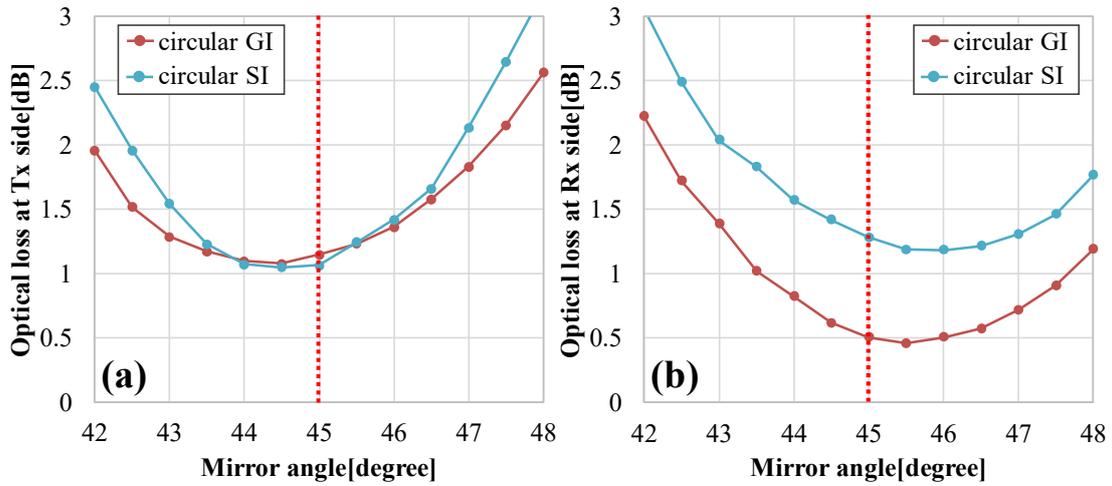


Fig. 4-40 光損失とミラー角度の関係 ($n_{core} = 1.525$, $WGNA = 0.25$)
 ((a)光源側導波路 (b)擬似受光器側導波路)

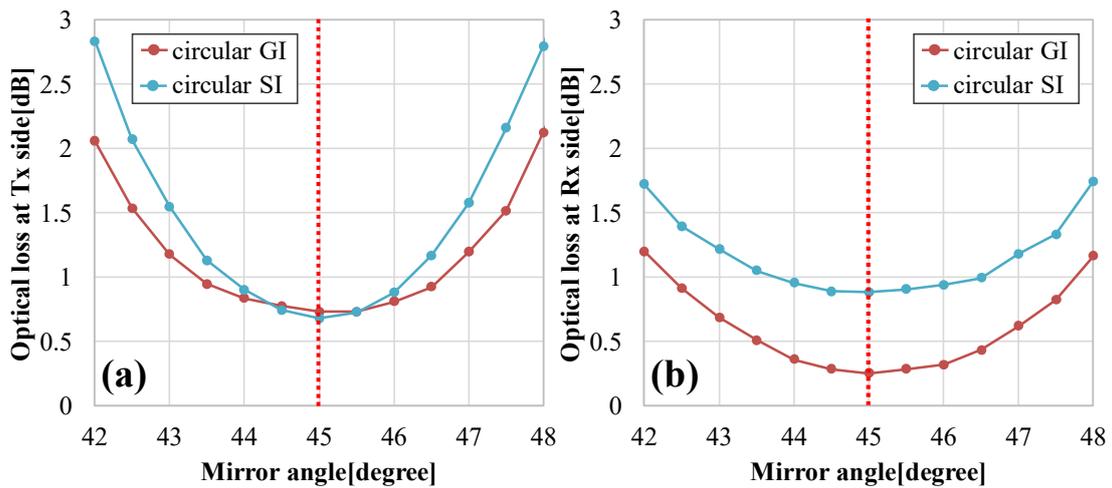


Fig. 4-41 光損失とミラー角度の関係 ($n_{core} = 1.65$, 導波路 $NA = 0.25$)
 ((a)光源側導波路 (b)擬似受光器側導波路)

比較的大きなミラー角度の場合(目安として「 45° 以上」と表記)について考える。光源側ミラーでは、光源からの出力光に対し、ミラー面の入射角が急峻になるため、ミラーロスが増大しやすい(Fig. 4-42(a))。一方で、受光器側では、ミラー面への入射角が大きくなるため、ミラーロスの低減につながるというトレードオフの関係がある(Fig. 4-42(b))。ミラー角度が比較的小さい場合(「 45° 以下」と表記)には逆の関係が成り立つ(Fig. 4-42(c)(d))。よって、ミラーロス低減のためには、光源側ミラー角度は 45° 以下、受光器側ミラー角度は 45° 以上であることが望ましい。以上のミラーロスの影響により、Fig. 4-40 に示した低コア屈折率($n_{core} = 1.525$)の場合には、光源側と擬似受光器側とで、最適ミラー角度に差異が生

じたものと考えられる[4-7].

コアの屈折率が高くなり、ミラーロスの影響が緩和された場合について考える。ミラー角度が 45° から変化し、反射後の光の持つ角度に変化が生じると、光源側ミラーでは導波路ロスの増大に、受光器側ミラーではクラッドロスの増大につながる(Fig. 4-42(a)-(d)). 高コア屈折率となりミラーロスの影響を無視できるようになった場合に、この導波路ロスとクラッドロスの影響が顕在化してくる。そのため、Fig. 4-41に示した高コア屈折率($n_{core}=1.65$)の場合の結果では、光源側受光器側共に、ミラー角度 45° にて最低損失値を示したのだと考えられる。

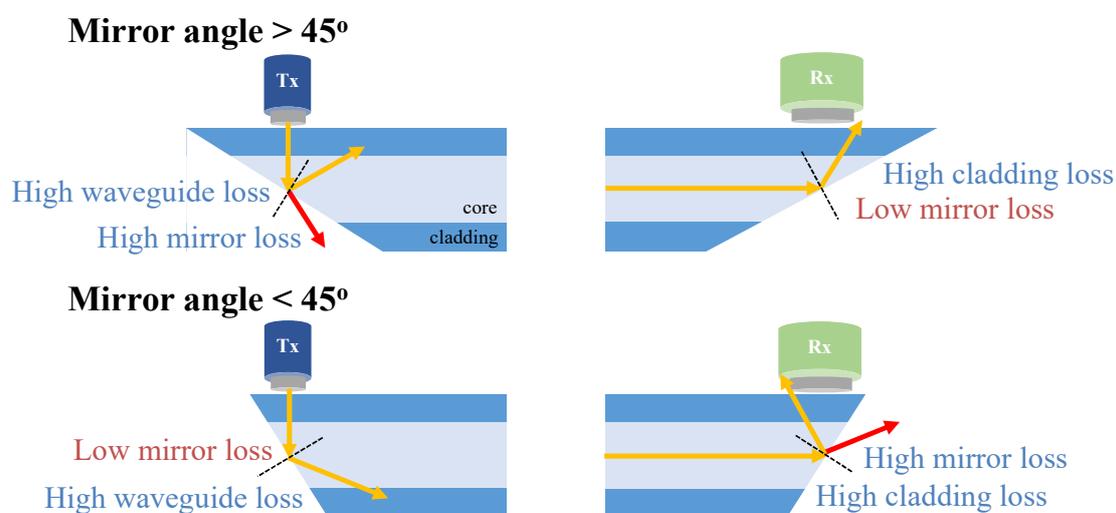


Fig. 4-42 ミラー角度ずれによる影響

光配線板上では、ひとつの導波路が、光源側導波路として・受光器側導波路として、どちらにも用いられる可能性がある。そのため、光源側ミラー、受光器側ミラーでの最適ミラー角度の差異の傾向を知る必要がある。

そこで、最適ミラー角度とコア屈折率の関係を検討した。光源側導波路、疑似受光器側導波路それぞれについてミラー角度トレランスグラフを計算し、そのグラフを二次関数近似した場合に、最小損失値を得る角度を最適ミラー角度とした。結果を Fig. 4-43 に示す。

Fig. 4-43 より、コア屈折率増大とともに、光源側、疑似受光器側での最適ミラー角度が互いに徐々に近づいていき、ある一定以上のコア屈折率にて完全に一致する様子が見られる。以下では、この最適ミラー角度の収束の速さが、各グラフプロットによって異なることに着目した考察を行う。

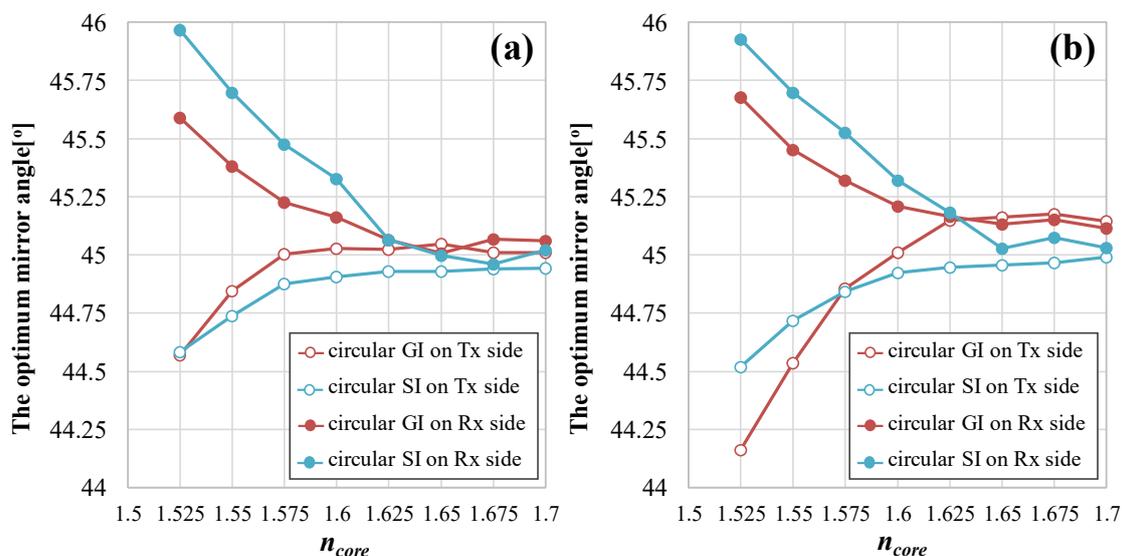


Fig. 4-43 最適ミラー角度とコア屈折率の関係 (a)WGNA = 0.20 (b)WGNA=0.30

まず WGNA への依存性について考察する。Fig. 4-43 (a)と(b)を比較すると、SI 型導波路の場合には WGNA による傾向の違いは見られないのに対し、GI 型導波路は、WGNA = 0.30 の場合、WGNA = 0.20 の場合と比較して収束の傾きが急峻であり、屈折率依存傾向が強いことがわかる。特に光源側にてその傾向が顕著である。これは、GI 型コア特有のローカル NA の影響であると考えられる。SI 型の場合には WGNA に変化があったとしても、コア中心屈折率が一定であれば、コア内屈折率分布に変化はない。よって、ミラーロスにも変化は生じないため、グラフ形状に影響しなかったといえる。一方、GI 型導波路では、コア中心屈折率及び屈折率分布係数が同一でも、WGNA が上昇した場合(クラッド屈折率が低下した場合)、屈折率勾配がより急峻になるため、コア内同一位置に対するローカル NA は低下する。これは Fig. 4-31 に示した屈折率分布モデルからも確認できる。よって、GI 型導波路では、WGNA が大きいほどミラーロスが増大しやすいという特徴があるため、WGNA = 0.30 の場合には、コア屈折率上昇によるミラーロス低減効果が効率的に作用し、急激に収束する傾向が見られたのだと考えられる。ただし、受光器側ミラーでは、GI 型コアの光閉じ込めにより、ローカル NA の比較的高いコア中心にてミラー反射がなされるため、WGNA による影響を受けにくい。そのため、光源側でのみ顕著な WGNA 依存性が見られたのだと考えられる。

次に、SI 型導波路と GI 型導波路の比較を行う。受光器側では、SI 型導波路が GI 型に比べ、最適ミラー角度の収束の傾きが大きいことがわかる。これに対し、光源側では、GI 型導波路の場合に急激な収束が見られる。SI 型導波路の場合には、導波路出射光角度が大きいため、受光器側にてミラーロスが増大しやすい。そのため、受光器側にてコア屈折率上昇によるミラーロス低減効果が GI 型に比べ効率的に作用したのだと考えられる。一方、GI 型

導波路では、先述の通り、ローカルNAの存在により光源側にてミラーロスの影響を大きく受ける。ただし、受光器側では光閉じ込めによりミラーロスの影響を緩和するために、光源側のみにてSI型に比べ大きな屈折率依存傾向を示したのだと考えられる。

以上の傾向をふまえ、光源側と受光器側の最適ミラー角度が一致する屈折率に注目すると、Fig. 4-43より、いずれのWGNAの場合にも、GI型導波路がSI型に比べ、より小さなコア屈折率にて最適ミラー角度の一致を実現していることがわかる。コア屈折率およそ1.625以上にて、WGNA = 0.20の場合にはおよそ45.0°，WGNA = 0.30の場合にはおよそ45.2°の最適ミラー角度に収束している。このことから、GI型導波路はより広範囲な材料選択にて、同一構造を持つ導波路であっても、光源側、受光器側双方にて低損失を得ることができるといえる。

4.4.3.5 屈折率分布の検討

最後に、コア内屈折率分布が光損失に与える影響を検討した。シミュレーションモデルには、4.4.3.1～4.4.3.3項と同様、Fig. 4-19に示したモデルを用いた。クラッド厚を25 μm、コア、クラッドの屈折率を1.553、1.536、ミラー角度を45°に固定した。GI型導波路には、屈折率分布形状の設定に(2-4)式を用いた円形コア導波路に加え、(2-5)式を用いた矩形コアについても検討をし、屈折率分布係数(g あるいは p, q)を変化させたときの光損失を計算した。計算に用いた屈折率分布形状をFig. 4-44に示す。

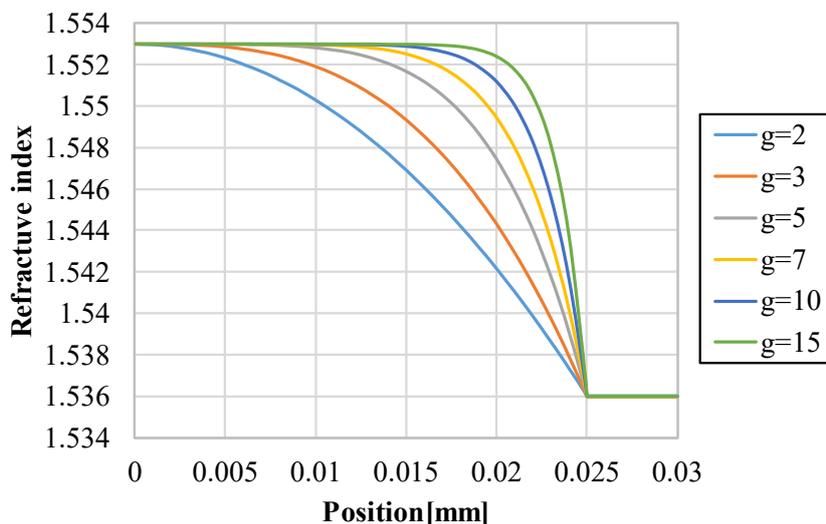


Fig. 4-44 屈折率分布設定

円形コア導波路

まずは、円形コア内の屈折率分布を変化させた場合の結果をFig. 4-45に示す。コアサイ

ズを 30 μm , 50 μm , 65 μm とした場合及び、ディテクタサイズを 50 μm 径, 35 μm 径とした場合について、それぞれ比較をしている。

この結果に対し、コアサイズごとに着目した考察を行う。

コアサイズ 65 μm に注目すると、屈折率分布が十分形成できている場合($g=2$)には低損失性を示しているが、屈折率分布係数が増大するにつれて急激に損失が上昇している様子が見て取れる。この傾向は Fig. 4-45(b)の 35 μm 径 PD の場合に特に顕著であり、ディテクタと比較して大きなコアサイズに光が拡がって分布した場合、受光器側での結合効率が悪化してしまうことが示唆される。

コアサイズ 50 μm の場合には、Fig. 4-45(a)では、 $g=2\sim7$ 程度の範囲にて安定した低損失性を示している。よって、50 μm 径の PD を用いる場合であれば、ある程度($g=7$ 以下)の屈折率分布が形成されていれば光閉じ込めが十分に発揮され、GI 型の優位性を示すといえる。しかし、Fig. 4-45(b)の 35 μm 径 PD 受光の場合には、コアサイズ 65 μm の場合と同様に急激な損失上昇が見られる。

コアサイズ 35 μm の場合には、 $g=2$ の場合に損失上昇が見られることから、小さなコアに対して十分な屈折率分布が形成されることにより、光源側にてローカル NA による結合効率の悪化が生じてしまうと考えられる。ただし、Fig. 4-45(a)(b)を比較すると、PD のディテクタサイズが変化した場合にもグラフ形状に変化が見られず、 $g=3\sim7$ 程度の範囲にて安定した損失特性を示していることがわかる。よって、PD の小径化に対しては、GI 型導波路であってもコアサイズの縮小化が必要となる可能性が示唆された。

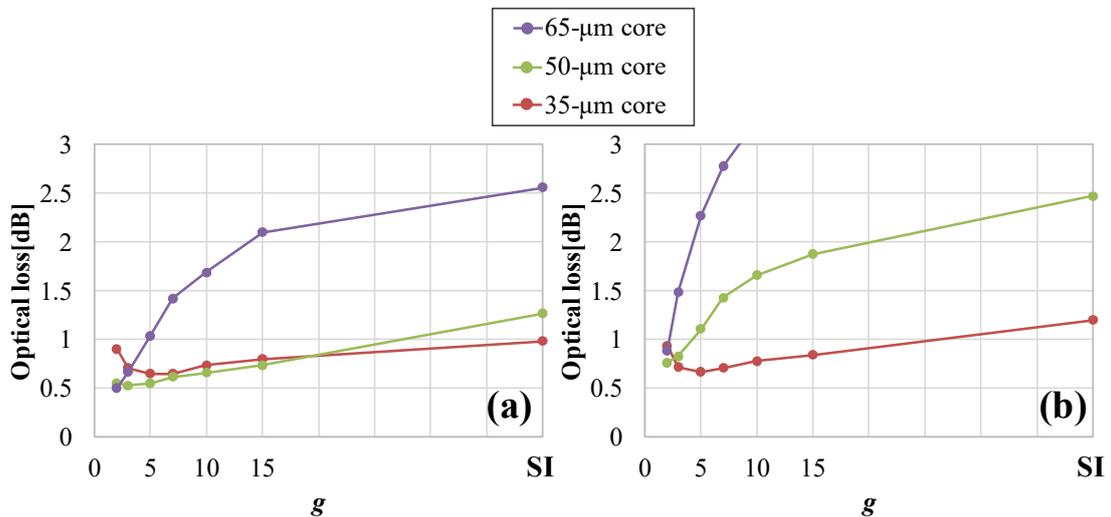


Fig. 4-45 円形コア導波路の光損失と屈折率分布係数の関係
((a)50- μm PD (b)35- μm PD)

矩形コア GI 型導波路の有用性

Mosquito 法が円形コアへの GI 型屈折率分布形成を可能とするのに対し、4.3 節にて触れ

たフォトアドレス法や、当研究室でも検討を進めているインプリント法によって、矩形コア内へのGI型屈折率分布形成が検証されている[4-10].

そこで、矩形GI型コアの有用性を検討するために、円形GI型導波路に加え、矩形GI型導波路及び、矩形コア内の一方向(ここでは鉛直上方向)にのみ屈折率分布が未形成状態の「一方向SI型導波路(1D-SI型導波路)」の三種類の導波路に対し、屈折率分布依存性を計算し、その結果を比較した.

まずはコアサイズを50 μm , 屈折率分布係数を3に固定した場合の結果を Fig. 4-46 に示す. ディテクタサイズを35 μm 径, 50 μm 径とした場合について比較をしている.

Fig. 4-46 より、円形GI型、矩形GI型導波路はほぼ同じ損失値を示していることがわかる. よって、屈折率分布係数3程度の十分なGI型分布がコア内に対称に形成されている場合には、矩形GI型導波路はコアの外形状の影響を受けず、円形GI型コアと同様の特性を示すと考えられる. しかし、Fig. 4-46の結果より、1D-SI型導波路の損失値は円形GI型・矩形GI型導波路に比べ大きく、Fig. 4-46(b)の35 μm 径のPDを用いる場合にはその差がより顕著であることがわかる. たとえ矩形コア内の三方向に対し、屈折率分布係数3程度の十分なGI型分布が形成されていたとしても、一方向のみがSI型分布であるという非対称性が生じた場合、GI型コア特有の光閉じ込めが十分に発揮されず、受光器側での結合効率悪化につながってしまうといえる.

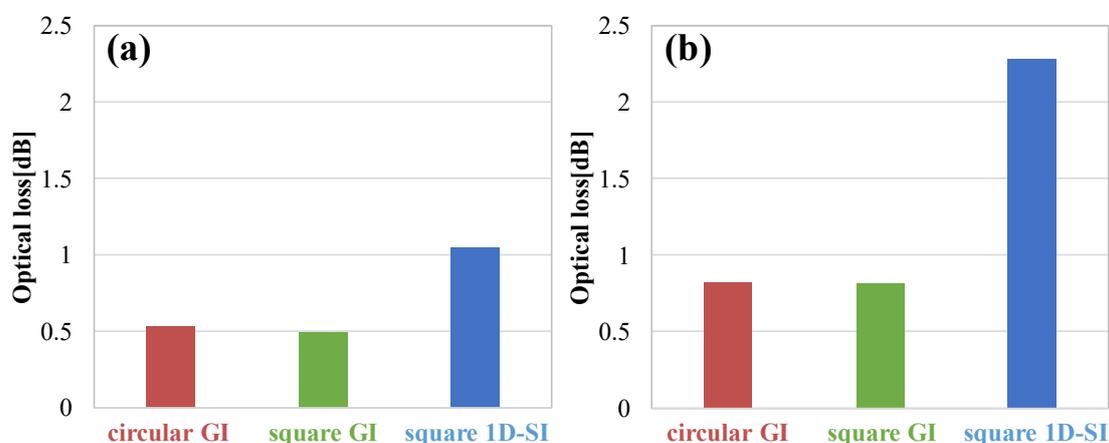


Fig. 4-46 光損失と屈折率分布係数の関係 (a)50- μm PD (b)35- μm PD

次に、円形GI型、矩形GI型、1D-SI型導波路に対し、屈折率分布係数を変化させた場合の結果について、Fig. 4-47, Fig. 4-48に示す. それぞれ、コアサイズを50 μm , 35 μm とした場合の結果である.

Fig. 4-47に示した、コアサイズ50 μm の場合について考察する. 矩形GI型導波路に注目すると、屈折率分布係数が小さい場合には円形GI型導波路と同等の損失値を示しているが、屈折率分布係数上昇とともに急激に損失が上昇し、円形GI型導波路との損失差が増大

していく様子が見て取れる。Fig. 4-47(b)の $35\ \mu\text{m}$ 径 PD の場合には、屈折率分布係数 5 の段階ですでに $0.8\ \text{dB}$ ほどの損失差が生じていることがわかる。よって、矩形コアの場合、たとえ対称な GI 型分布が形成されていたとしても、その分布が不十分であると、円形 GI 型に比べ急激に損失上昇が生じてしまうといえる。

ただし、Fig. 4-48 に示したコアサイズ $35\ \mu\text{m}$ の導波路では、屈折率分布係数が小さい場合、円形 GI 型導波路にはローカル NA による光源側結合効率悪化の影響とみられる損失上昇が生じている。矩形 GI 型導波路にも同様の傾向が見られるが、円形 GI 型に比べその影響を抑えることができ、低損失を示していることが確認できる。

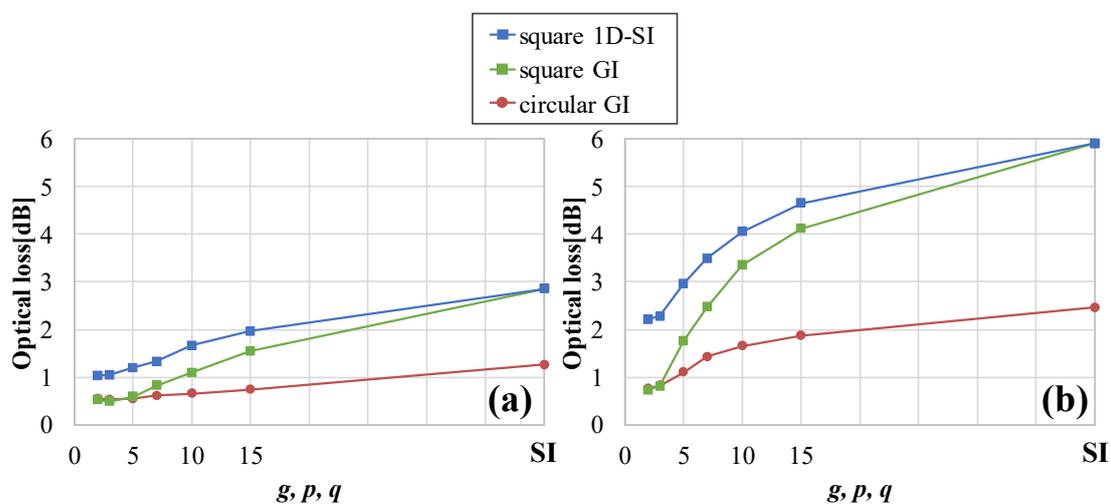


Fig. 4-47 光損失と屈折率分布係数の関係 (コアサイズ $50\ \mu\text{m}$)
 ((a) $50\text{-}\mu\text{m}$ PD (b) $35\text{-}\mu\text{m}$ PD)

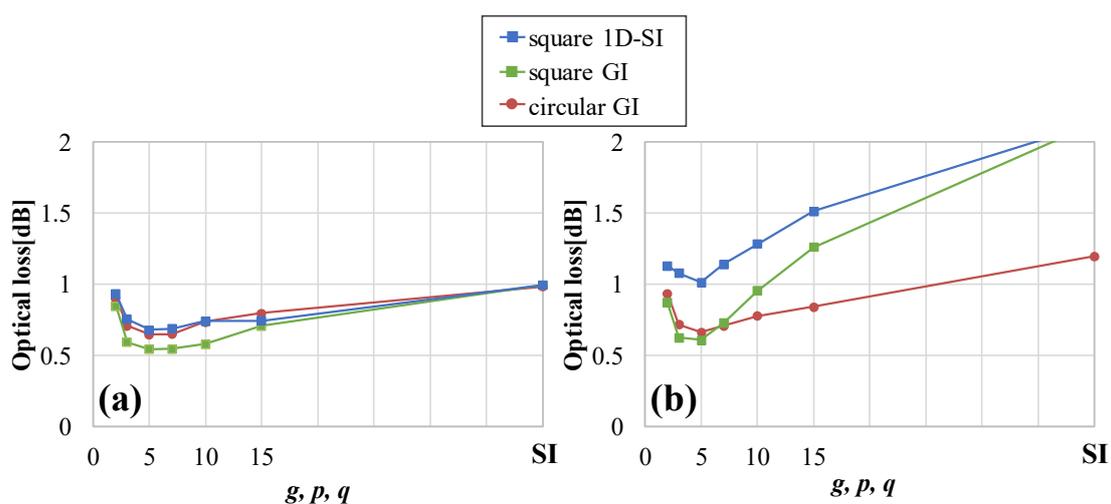


Fig. 4-48 光損失と屈折率分布係数の関係 (コアサイズ $35\ \mu\text{m}$)
 ((a) $50\text{-}\mu\text{m}$ PD (b) $35\text{-}\mu\text{m}$ PD)

総じて、円形 GI 型導波路は矩形コア導波路に比べ、屈折率分布係数上昇に対して比較的安定した損失特性を示すといえる。ただし、最適な屈折率分布及びコア形状は、コアサイズや用いる PD のサイズに依存するために、使用用途に合わせた設計が必要となる。

4.4.3.6 円形 GI 型光導波路の最適構造パラメータ

これまでの検討にて、円形 GI 型導波路は、最適な導波路構造パラメータを有する場合に、 45° ミラーを介した高効率光結合を実現できることを示してきた。Table 4-7 に、円形 GI 型導波路の最適構造パラメータについてまとめる。

結合損失低減のためには、クラッド厚はできる限り小さく設計するのが望ましい。しかし、作製工程や光配線板の仕様上、クラッド厚低減が困難な場合が想定される。ただし、クラッド厚が $150\ \mu\text{m}$ 以下であれば、円形 GI 型導波路は SI 型に比べ優位性を発揮できることがわかった。

GI 型導波路の利点の一つとして、広範囲のコアサイズにて低損失性を維持できる点が挙げられる。本検討では、小ディテクタサイズの PD による受光を想定した場合にも $45\sim 60\ \mu\text{m}$ 程度のコアサイズ範囲にて、円形 GI 型導波路は低結合損失を維持できるとわかった。

材料屈折率に関しては、 45° ミラーを介した光損失は導波路 NA には依存しないため、コアの屈折率にのみ着目すればよい。屈折率が 1.60 付近のコア材料を用いることで、高効率光結合を実現すると同時に、ミラー表面へのコーティングが不要になるという 2 つの利点が得られることがわかった。

ミラー角度への依存性は、コア材料の屈折率と密接な関係がある。1.625 以上の比較的高屈折率の場合には、光源側と受光器側の最適ミラー角度が一致し、その角度はおよそ 45.04° である(導波路 NA が 0.2 である場合)。ただし、 0.5° 程度の角度ずれであれば、過剰損失は低く抑えられる。

最適な屈折率分布形状は、導波路のコアサイズや想定する PD のディテクタサイズに依存する。いずれの場合にも、(2-4)式にて屈折率分布係数 g が 2~3 程度となる屈折率分布がコア内に形成されていれば、円形 GI 型導波路としての優れた光学特性を十分に発揮できるといえる。

Table 4-7 円形 GI 型導波路の最適構造パラメータ

Waveguide structural parameters	The optimum design
Cladding thickness	< 150 μm
Core size	45 μm ~ 60 μm
Refractive index of core material	≈ 1.60
Mirror angle	45.04° at n_{core} of larger than 1.625
Refractive index profile	$g = 2 \sim 3$

4.5 45° ミラーを有する円形コアマルチモードポリマー光導波路の光学特性

前節では、導波路構造パラメータを各種変更した場合に、45° ミラーを介した光結合を含むリンク内で生じる光損失を計算し、高効率光結合に最適な導波路構造を明らかにした。本節では、実際に 45° ミラーを有する円形コアポリマー光導波路を作製し、その光学特性を実験的に評価する。

4.5.1 Mosquito 法による 45° ミラーを介した高効率光結合の実現

4.5.1.1 光導波路作製及びミラー形成

4.4 節では、導波路構造パラメータを変化させた場合に直角光路変換型光リンク内で生じる光損失を計算し、45° ミラーを介した高効率光結合実現のために最適な導波路構造パラメータを明らかにした。本項では、最適構造パラメータを有するポリマー光導波路が実際に 45° ミラーを介した高効率光結合を実現可能か検証するために、Mosquito 法を用いて実際に円形コアのマルチモードポリマー光導波路を作製する。その際、最適な導波路構造パラメータを有する導波路と、そうではない導波路を作り分け、比較することで検討を行う。

Mosquito 法では、作製パラメータを調整することにより、作製される導波路の構造パラメータをある程度制御可能である。コアサイズは吐出圧力や走査速度等を制御することにより、コア・クラッドの屈折率は使用する材料の選定により、ミラー角度はミラー形成方法の工夫により、コア内屈折率分布は、適切なコア、クラッド材料組合せを選定したうえで露光待機時間を設定することにより、それぞれ制御が可能である。

最適構造設計前に作製した導波路を導波路 S、シミュレーションによる設計後に最適な構造パラメータを有するように作製した導波路を導波路 G と、それぞれ呼ぶこととする。導

波路 S, G の作製パラメータを Table 4-8 に示す.

導波路 S, G とともに, コア径が約 50 μm となるように吐出圧力, ニードル走査速度を設定している. 材料については, 導波路 S は最適設計を考慮せず, (株)ADEKA 製シリコーン樹脂である低屈折率のコア材料を使用しているのに対し, 導波路 G では, 4.4.3.3 項にて最適と判断された屈折率 1.600 のコア材料を選定するべく, 日産化学(株)製 有機-無機ハイブリッド樹脂 SUNCONNECT®シリーズを採用している.

Mosquito 法ではコアモノマーとクラッドモノマーの相互拡散によって GI 型屈折率分布を形成する. コア・クラッド材料に相溶性がある場合は, コアモノマー吐出から紫外線露光による硬化までの間に一定の待機時間を設けることによって, 材料拡散が進行し, 屈折率分布が形成される. 一方で, コア, クラッドモノマー間の拡散係数が小さい場合には, ある程度の待機時間内では材料拡散は進行せず, その状態で紫外線硬化を行えば, ほぼ SI 型分布とみなせる屈折率プロファイルを持つ導波路を作製することも可能である. 導波路 S のコア, クラッド材料として採用した FX-712, FX-715 は相溶性が低いため, モノマー間の相互拡散が進行しにくい. そのため, 導波路 S ではコア内には SI 型プロファイルが形成されると見込める. これに対し導波路 G のコア, クラッド材料である NP-003 と NP-210 は相溶性が高いため, 適切な露光待機時間を与えることで GI 型屈折率分布を形成可能である. 導波路 G に対しては, コアモノマー吐出終了から紫外線露光開始までに 300 秒の露光待機時間を与え, 導波路 S の場合にはコアモノマー吐出終了後すぐに紫外線露光を行った.

クラッド厚については, 両導波路ともに, 導波路作製の際に, コアモノマーを吐出する高さを段階的に変化する複数チャンネルを形成し, クラッド厚の異なるチャンネルを複数得ることで, クラッド厚の最適制御を図った[4-11].

Table 4-8 導波路 S, G の作製条件

	Waveguide S	Waveguide G
Core material	FX-W712 (ADEKA Corp.) ($n_d = 1.526$, 12000 cP)	NP-003 (Nissan Chemical Corp.) ($n_d = 1.600$, 53000 cP)
Cladding material	FX-W715 (ADEKA corp.) ($n_d = 1.484$, 1050 cP)	NP-210 (Nissan Chemical Corp.) ($n_d = 1.580$, 9000 cP)
Dispense pressure	230 kPa	550 kPa
Needle-scan velocity	16 mm/s	12 mm/s
Needle-inner diameter	150 μm	150 μm

以上の条件にて作製した導波路 S, G の端面写真(後にミラーを形成する側の端面)を Fig. 4-49, Fig. 4-50 にそれぞれ示す. クラッド層内での高さが異なる複数チャンネルが形成されていることがわかる. 導波路 S では 1 チャンネルずつ 9 種類のクラッド厚, 導波路 G では 2 チャンネルずつ 6 種類のクラッド厚を有するコアを形成した. 導波路 G の場合には, 最下層

に位置する Ch. 1, 2 にて, 少々のコアをつぶれが観測できるが, 著しいコア形状の乱れはなく, ほぼ円形状のコアが得られたといえる.

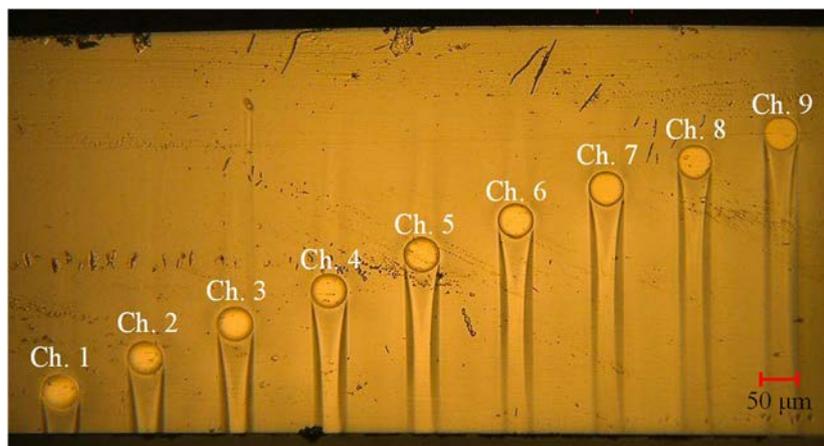


Fig. 4-49 導波路 S の端面写真

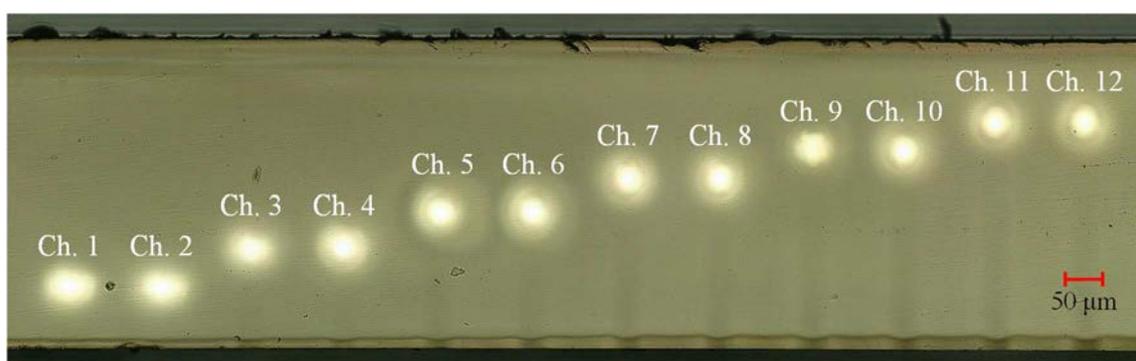


Fig. 4-50 導波路 G の端面写真

これらの導波路に対し, Fig. 4-51 に示す評価系にて, ミラー形成前の挿入損失を測定した. この評価系では, 励振条件として, VCSEL 光源及び 50GI-MMF プローブを用いている. これは, ミラー形成後の評価の際, $NA = 0.20$ 程度の光を出力する光源との結合を想定した場合の, クラッド厚の影響を知るためである. 測定結果を Fig. 4-52, Fig. 4-53 に示す.

Fig. 4-52 より, 導波路 S では, ミラー形成前段階では, クラッド厚による損失値の大きな変化は見られないことがわかる. 標準偏差は光源側で 0.17 dB, 受光器側で 0.08 dB である. 一方, 導波路 G の場合には, Fig. 4-53 より, ミラー未形成の段階でも下層のチャネルほど損失増大傾向にあることがわかる. これは, Fig. 4-50 の断面写真にて観測された, 下層コアの形状つぶれが起因していると考えられる. ただし, 形状による損失差は 0.5 dB 程度におさまっており, 標準偏差も光源側, 受光器側でそれぞれ 0.22 dB, 0.14 dB 程度であることから, 問題なくクラッド厚ごとの比較を行える範囲内であると判断し, 検討を続けるこ

ととした。Ch. 9のみ、他のチャンネルに比べて1 dB以上もの大きな挿入損失を示しており、これはコアの構造不整(コアの蛇行、埃などの不整因子の混入、屈折率分布の乱れ)によるものと考えられ、クラッド厚に起因しない損失要因が大きく影響するおそれがあるため、以下ではCh. 9のみを検討対象から除外する。

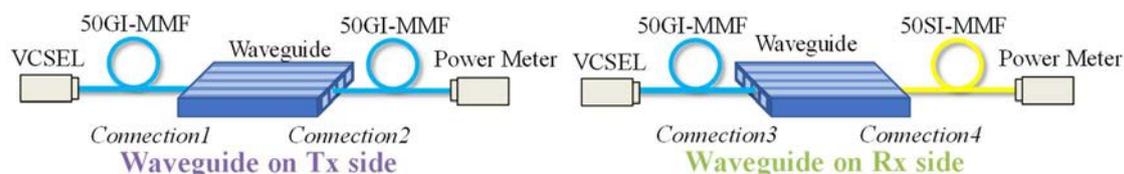


Fig. 4-51 ミラー形成前の挿入損失評価系

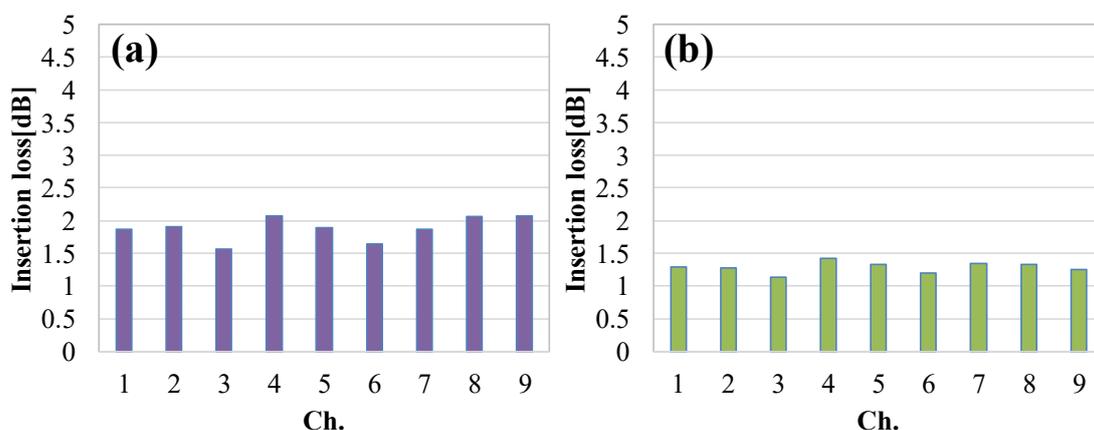


Fig. 4-52 導波路Sのミラー形成前挿入損失測定結果

(a)光源側導波路 (b)受光器側導波路

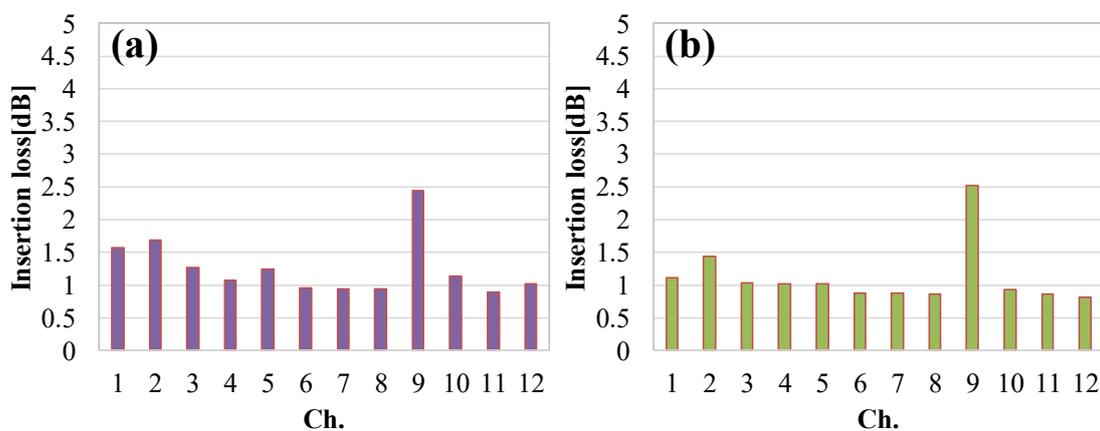


Fig. 4-53 導波路Gのミラー形成前挿入損失測定結果

(a)光源側導波路 (b)受光器側導波路

これらの導波路に対し、片側の端面に研磨によりミラーを形成した。ミラー形成後の導波路の側面写真を Fig. 4-54 に示す。

Fig. 4-54 の画像から解析した結果では、導波路 S、導波路 G のミラー角度はそれぞれ 46.93°、45.98° と測定された。最適ミラー角度を 45° とすると、2° 未満の角度ずれが生じている。

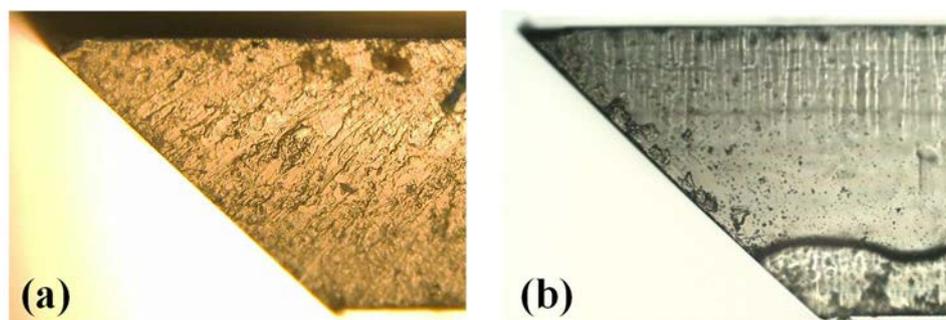


Fig. 4-54 ミラー形成部の側面写真 (a)導波路 S (b)導波路 G

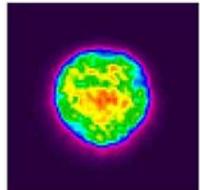
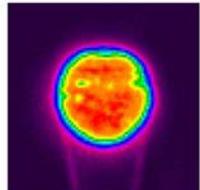
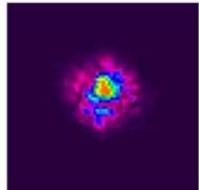
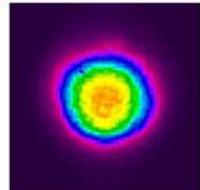
4.5.1.2 ミラー形成後の光学特性評価

ミラー形成後の導波路に対し、光源側導波路出射側(Connection 2)での Near Field Pattern(NFP)を測定した結果を Table 4-9 に示す。光源を LED とし、励振プローブを SMF、50GI-MMF とした場合についてそれぞれ測定している。導波路 S は Ch. 8、導波路 G は Ch. 11 の結果を示しており、比較的クラッド厚が小さなチャンネルどうしの比較をしている。

導波路 S の場合には、SMF を用いて極小スポットにて導波路を励振した場合にも、出射 NFP は導波路コア全体に拡がって分布しており、50GI-MMF による励振の場合と出射スポットサイズに大きな違いはないことが Table 4-9 よりわかる。これに対し、導波路 G の場合には、励振プローブに依存して出射 NFP が大きく変化している。SMF 励振の場合には出射スポットサイズが小さく抑えられ、導波路コア中心に光を強く閉じ込めている様子が見える。50GI-MMF 励振の場合には、出射 NFP は導波路コア全体に拡がっているが、NFP 内には光強度の勾配が見られ、中心ほど光強度を強く閉じ込めていることがわかる。

これら特性の違いは、導波路コア内に形成された屈折率分布の相違によるものと考えられる。導波路 S では相溶性の低いコア、クラッド材料を用いているためモノマーどうしの材料拡散が進行せず、コア内に SI 型プロファイルが形成されていると推測される。これに対し、導波路 G では相溶性の高いコア、クラッド材料を選定し、適切な露光待機時間を与えたことにより、十分な GI 型屈折率分布がコア内に形成されていると考えられる。これにより、GI 型コアを有する導波路 G にて光の閉じ込め効果が観測され、ミラーによる反射及び導波路伝搬後にも SMF による極小スポットが維持されたといえる。

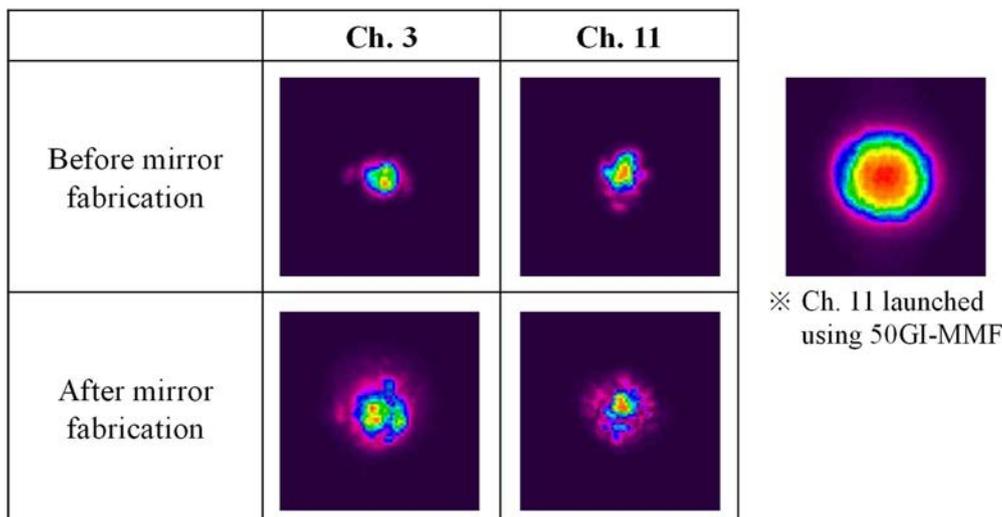
Table 4-9 導波路 S, G のミラー形成後の NFP

Launch probe	Waveguide S		Waveguide G	
	SMF	50GI-MMF	SMF	50GI-MMF
NFP				

なお、導波路 G のうち、異なるクラッド厚を有する 2 チャンネルに対し、励振プローブとして SMF を用いた際の NFP について、ミラー形成前とミラー形成後を比較する。光源側出射端(Connection 2)での NFP 測定結果を Table 4-10 に示す。約 263 μm と比較的大きなクラッド厚を有する Ch. 3 と、約 90 μm の比較的小さなクラッド厚を有する Ch. 11 を比較している。スケールの参考として、ミラー形成前の Ch. 11 を 50GI-MMF によって励振した場合の NFP も併せて示してある。

Table 4-10 より、ミラー形成前では、Ch. 3, Ch.11 ともに出射 NFP がコア中心に閉じ込められている様子が確認できる。チャンネルによってスポットサイズに変化はなく、同等な屈折率分布が形成されており、SMF の小スポットサイズを導波路伝搬後も維持していたことがうかがえる。これに対しミラー形成後の NFP では、チャンネルによってスポットサイズに差が生じている。Ch. 3, Ch.11 ともに、コア中心への閉じ込め傾向は維持しているものの、ミラー形成前に比べてスポットが拡大している。これは、ミラー形成後は SMF からの光が直接コアに入射せず、クラッドを伝搬しミラーでの反射を介した後にコアに結合するため、スポットが幾分か拡大した状態で導波路が励振されたためであると考えられる。クラッド厚の大きい Ch. 3 では、このスポット拡大が顕著であり、導波路伝搬後の出射 NFP でも、クラッド厚の小さな Ch. 11 に比べ、大きなスポットサイズを示したのだと予想される。このように、クラッド厚の増大は、ミラー形成導波路の特性に大きく影響を与え、ミラー入射時の結合効率を悪化させるだけでなく、出射 NFP の拡がりにより導波路出射時の結合効率にまで影響を及ぼすおそれがあるといえる。

Table 4-10 導波路 G のミラー形成前後の NFP



次に、導波路 S, G に対し、Fig. 4-55 のような評価系を構築し、挿入損失を測定した。Fig. 4-56 に、光源側導波路、受光器側導波路それぞれの測定結果を示す。縦軸を挿入損失、横軸をクラッド厚とすることで、挿入損失のクラッド厚依存傾向を見ている。なお、導波路 G の結果は、同じクラッド厚に設計された 2 チャネル分の平均値を計算している。光源側、受光器側導波路の結果を足し合わせ、リンク全体での損失値として概算した結果を Fig. 4-57 に示す。また、挿入損失とクラッド厚の関係にて比較を行うと、導波路 S, G の直線導波路状態での損失差や、直線導波路状態でのチャネル間損失差の影響も含まれ、クラッド厚に起因しない傾向も含まれるおそれがあるため、ミラー形成に伴う損失増大量とクラッド厚の関係を示すグラフを Fig. 4-58 に示す。

Fig. 4-56 より、導波路 S, G とともに、クラッド厚の減少に伴い挿入損失も減少している。しかし、導波路 S の場合には、クラッド厚 250 μm を下回るとグラフ傾きが平坦化し、光源側導波路では挿入損失約 4 dB にて損失減少が打ち止めとなる様子が見て取れる。これに対し導波路 G では、主に光源側にて、クラッド厚減少とともに急激に挿入損失も減少している。リンク全体での損失とした Fig. 4-57 の結果でも同様に、導波路 G はクラッド厚低減によって損失が効率的に減少する傾向を示しており、クラッド厚 90 μm では 2.00 dB という低リンク損失を実現している[4-11]。Fig. 4-58 に示したミラー形成に伴う損失増大量は、リンク全体で 0.204 dB(光源側で 0.062 dB, 受光器側で 0.142 dB)に抑えられ、ミラーによる過剰損失はほぼ生じていないことがわかる。

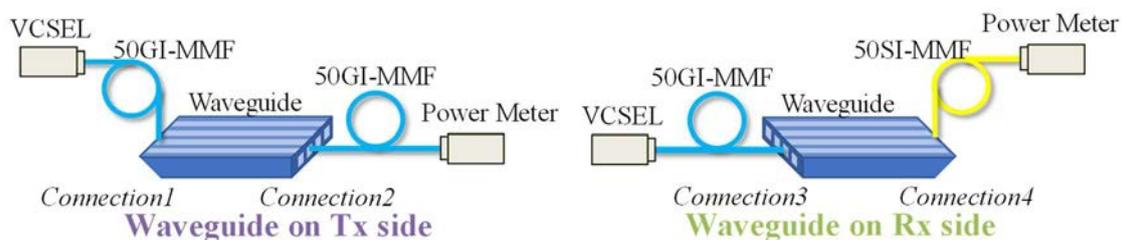


Fig. 4-55 ミラー形成後の挿入損失評価系

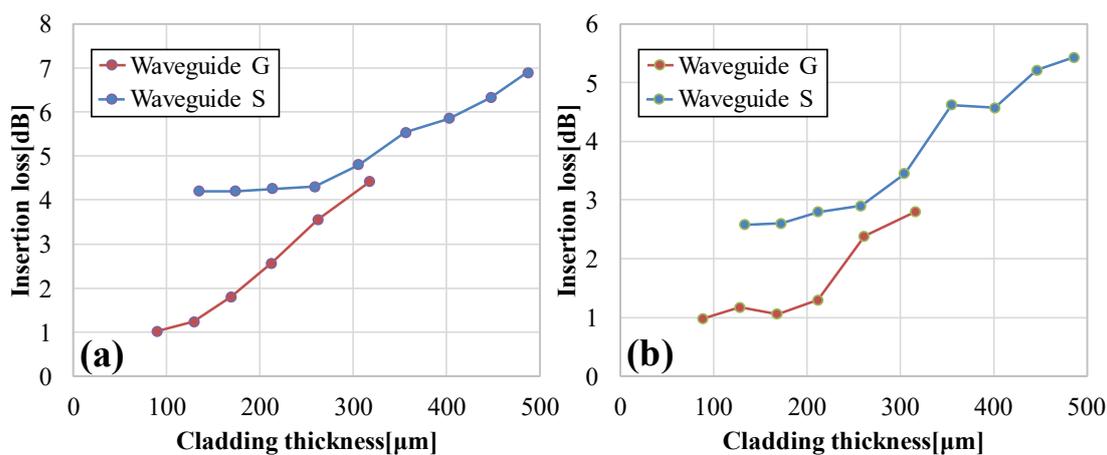


Fig. 4-56 挿入損失とクラッド厚の関係 (a)光源側導波路 (b)受光器側導波路

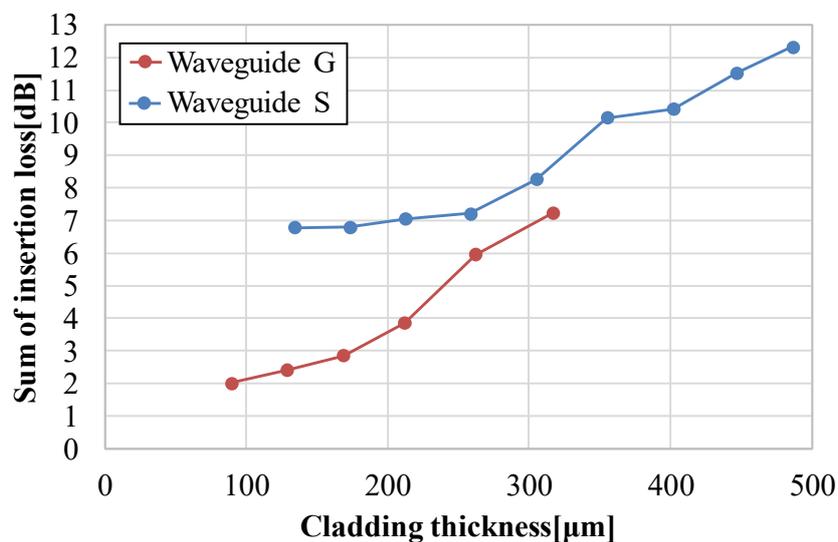


Fig. 4-57 リンク全体での損失とクラッド厚の関係

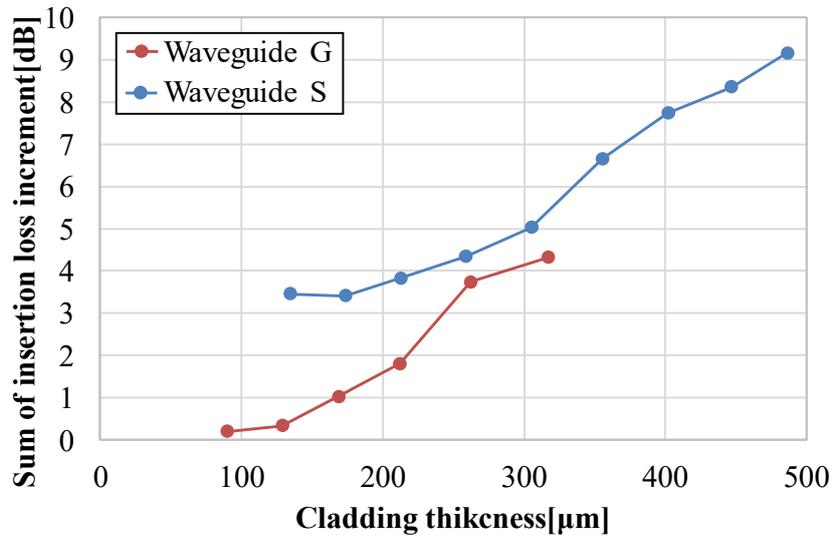


Fig. 4-58 ミラー形成に伴うリンク損失増大量とクラッド厚の関係

4.4.3.1 項に示したクラッド厚依存性の理論計算にて、円形 GI 型導波路は SI 型に比べ、その光損失がクラッド厚に強く依存することを示した。本実験にて、導波路 S は SI 型プロファイル、導波路 G は GI 型プロファイルを有していたと考え、本結果はシミュレーション結果の傾向と一致する。ただし、Fig. 4-28 の結果は、円形 SI 型、円形 GI 型導波路が互いに同一の屈折率を有する設定のもと計算を行っているため、本実験の条件とは異なる。そこで、シミュレーション上にて、円形 SI 型導波路のコア、クラッドの屈折率をそれぞれ 1.526, 1.484、円形 GI 型導波路のコア、クラッドの屈折率をそれぞれ 1.600, 1.580 と設定し、実験で用いた材料と一致させた。そのうえで、再度クラッド厚依存性を光線追跡シミュレーションによって計算した結果を Fig. 4-59 に示す。なお、コアサイズは 50 μm、ミラー角度は 45°、GI 型導波路の屈折率分布係数は $g=4$ に設定している。

Fig. 4-59 より、本実験と同一の屈折率設定下でも、円形 GI 型導波路は円形 SI 型に比べ、クラッド厚減少に伴い効率的にリンク損失が低減される様子がわかる。リンク損失の計算値には、フレネル反射損失や伝搬損失等を含めていないため、損失値自体は実験値と比較して低く算出されているが、非常に類似した傾向を示しているといえる。

また、Fig. 4-59 の結果を、Fig. 4-28 と比較すると、円形 GI 型のみコア屈折率を高く設定したことによって、円形 SI 型光導波路に対する優位性がより広いクラッド厚範囲にて確認できる。よって、本実験で作製した二つの導波路は、コア屈折率及びコア内屈折率分布の 2 つの観点で比較することができ、より高いコア屈折率を有しコア内屈折率分布が形成されていた導波路 G にて、低損失化に成功したといえる。

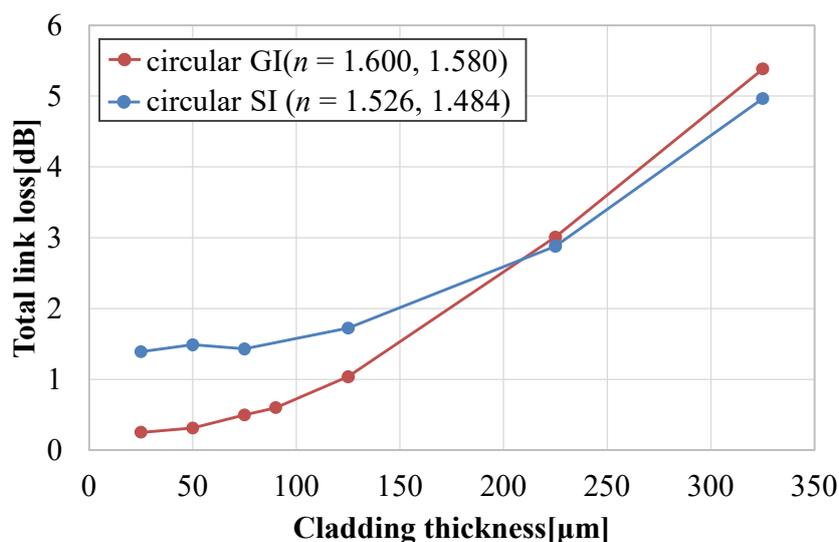


Fig. 4-59 リンクロスの計算値とクラッド厚の関係

4.5.1.3 最適構造設計による高効率化の実現

以上の検討により、導波路 G では、クラッド厚、コアサイズ、材料屈折率、コア内屈折率分布のすべての導波路構造パラメータにて、シミュレーションによる最適構造設計の結果を反映し、十分な低損失化がなされていると判断できた。最後に、この導波路 G を、最適構造設計を十分に反映していない導波路 S と比較することで、低損失化を確認する。

導波路 S、導波路 G とともに、最も小さなクラッド厚を有するチャンネル(導波路 S は Ch. 9、導波路 G は Ch. 11 と Ch. 12 の平均)について、ミラー形成前後の挿入損失を Table 4-11、Table 4-12 にまとめる。

導波路 S では、光源側、受光器側ともに、ミラー形成により損失が大きく増大していることが Table 4-11 よりわかる。ミラー形成後のリンク全体の損失量は、6.79 dB にも及んでおり、ミラー形成によってリンク損失が倍増してしまっていることは無視できない問題である。

これに対し、Table 4-12 より、導波路 G はミラー形成に伴う損失増大を劇的に抑え、ミラー形成後の光源側、受光器側導波路はいずれも 1 dB 程度の低損失を示している。そのため、ミラー形成後のリンク全体の損失は 2.00 dB を達成している[4-7]。

Fig. 4-60 に、導波路 S、導波路 G の挿入損失の値を用い、最適構造設計前後の挿入損失の比較をまとめる。最適設計導波路では、最適構造設計前の導波路と比べ、ミラー形成に伴う過剰損失を 3.26 dB も低減させ、4.79 dB ものリンク損失低減を果たした。

Table 4-11 導波路 S(Ch. 9)のミラー形成前後の挿入損失

	Tx	Rx	Total
NO mirror	2.07 dB	1.26 dB	3.33 dB
WITH mirror	4.21 dB	2.58 dB	6.79 dB
Loss increment due to mirror fabrication	2.14 dB	1.33 dB	3.46 dB

Table 4-12 導波路 G(Ch. 11, 12)のミラー形成前後の挿入損失

	Tx	Rx	Total
NO mirror	0.957 dB	0.844 dB	1.80 dB
WITH mirror	1.02 dB	0.986 dB	2.00 dB
Loss increment due to mirror fabrication	0.0615 dB	0.142 dB	0.204 dB

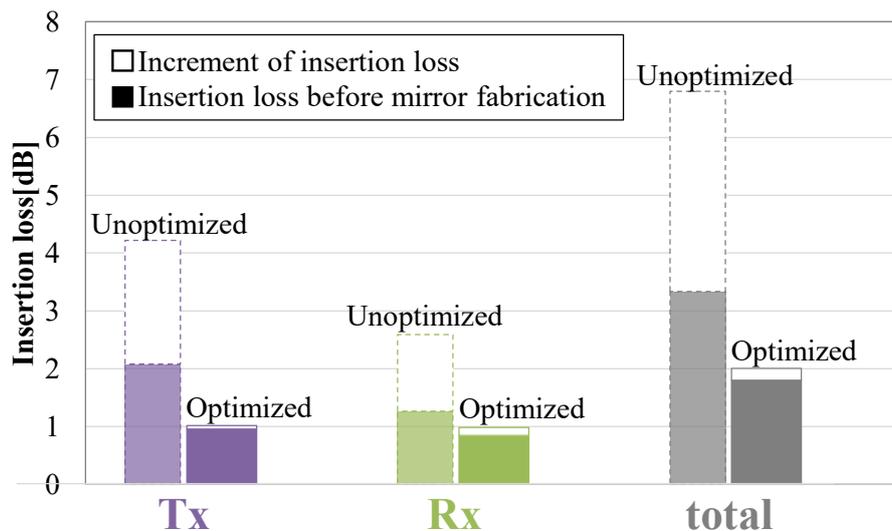


Fig. 4-60 最適構造設計前後の導波路の挿入損失比較

最適構造設計を十分に反映しなかった導波路 S が高損失を示した理由について再度考察する。これには、導波路構造パラメータが最適ではなかったことに加え、導波路コアが SI 型プロファイルを有していたことが大きく起因している。SI 型コアからの出射光は、コア全体に拡がって分布するために、導波路出射側での結合効率を悪化させやすい[4-1]。そのため、導波路 S はミラー形成前の直線導波路であっても比較的高い挿入損失を示す結果となった。さらに、4.4.3.2 項にて検討したように、SI 型導波路の場合、ミラー形成後の光損失はコアサイズの変動に対して増減しやすい傾向がある。そのため、コア径のわずかな変動が、ミラー形成後の損失増大に与える影響が大きかったものと考えられる。また、コア屈折率が

1.526 と比較的低い値であったために、光源側、受光器側双方にてミラーロス(4.4.2 項にて定義)が大きく発生し、全体の損失を増大させる結果となった。比較的低いコア屈折率の場合、ミラー角度トレランス形状が非対称となることが 4.4.3.4 項の検討によりわかっており、光源側と受光器側の最適ミラー角度が一致しない。導波路 S は 46.93° のミラー角度を有していたため、光源側でのミラー角度ずれによる損失増大を引き起こしていたと考えられる。

これに対し導波路 G では、GI 型屈折率分布がコア内に十分形成されていた。そのため、4.4 節にて検討した円形 GI 型導波路の最適構造設計を反映させることで、その効果を十分に発揮することができ、 45° ミラーを介した高効率光結合を実現できた。

4.5.2 Mosquito 法による円形 GI 型光導波路の 45° ミラーを介した高速

光伝送

本項では、前項にて 45° ミラーを介した高効率光結合を実現した円形 GI 型導波路と同一の作製条件にて並列チャンネルを有する導波路を作製し、多チャンネル同時高速伝送を行い、通信デバイスとしての有用性を図る。

4.5.2.1 並列マルチチャンネル導波路作製及び光学特性評価

Mosquito 法により、Table 4-8 に示した導波路 G の作製パラメータと同一の作製条件にて、並列マルチチャンネルを有する長さ 5 cm の直線導波路を作製した。チャンネル間ピッチは $125\ \mu\text{m}$ となるよう設計している。なお、コアモノマー吐出後、紫外線露光開始までの間に 300 秒の露光待機時間を設けることによって GI 型屈折率分布の形成を試みた。この導波路に対し、研磨により 45° ミラーを形成した。ミラー未形成側の端面写真及び、ミラー形成部の側面写真を Fig. 4-61 に示す。

Fig. 4-61(a)のように、 $50\ \mu\text{m}$ 程度のコア径を有する並列 4 チャンネルの光導波路の作製に成功した。また、この導波路のクラッド厚はおよそ $125\ \mu\text{m}$ であり、4.4.3.1 項にて議論した、円形 GI 型導波路が優位性を発揮するに足るクラッド厚を実現している。Fig. 4-61(b)の画像から解析した結果では、ミラー角度は 47.27° と測定された。最適ミラー角度を 45° と仮定すると、 2.27° の角度ずれが生じている。

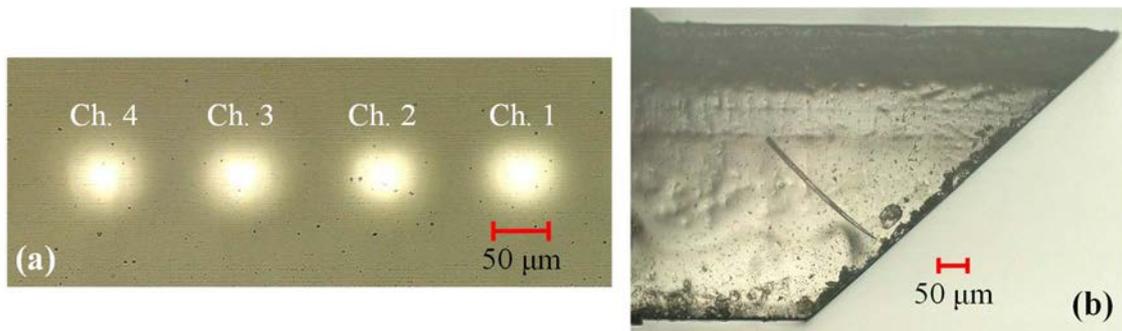


Fig. 4-61 作製した円形 GI 型導波路 (a)端面写真 (b)ミラー形成部側面写真

作製した導波路に対し, Fig. 4-62, Fig. 4-63 のような評価系を用いて, ミラー形成前と形成後, それぞれについて光学特性を評価した. 光源側導波路の励振プローブには SMF を用い, スポットサイズ $10\ \mu\text{m}$ 程度の VCSEL 光源による励振を想定している.

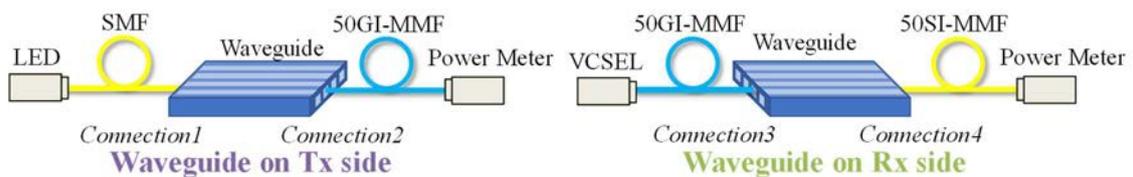


Fig. 4-62 ミラー形成前の挿入損失評価系

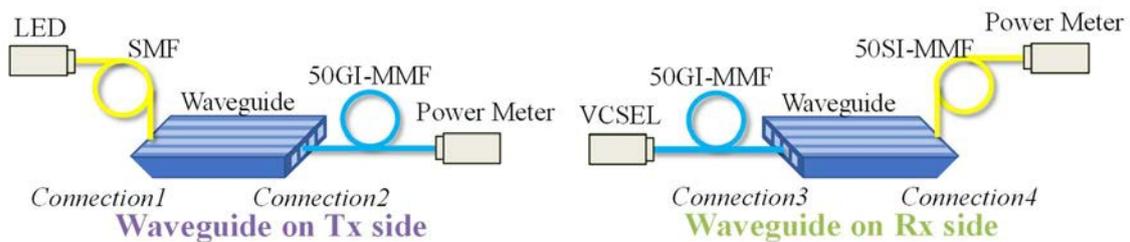


Fig. 4-63 ミラー形成後の挿入損失評価系

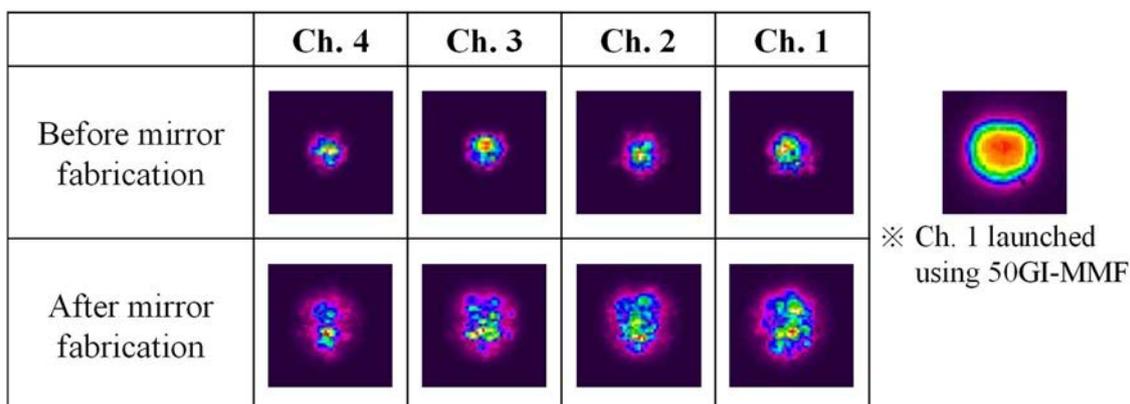
まず, ミラー形成前後それぞれについて, 光源側導波路出射端(Connection 2)での NFP の測定結果を Table 4-13 に示す. スケールの参考として, ミラー形成前の Ch. 1 を 50GI-MMF によって励振した場合の NFP も併せて示してある.

Table 4-13 より, ミラー形成前の NFP に注目すると, 50GI-MMF 励振の場合の NFP と比較して, すべてのチャンネルが小さな出射スポットサイズを実現していることがわかる. このことから, 作製された直線導波路は励振プローブである SMF の小スポットサイズを導波路伝搬後も維持しているといえ, 光の閉じ込め効果を発揮する GI 型屈折率分布がコア内に形

成されていたと考えられる。

ミラー形成後の NFP に注目すると、ミラー形成前と比べ出射 NFP が拡大してしまっているものの、そのスポットはコア全体には広がらず、コア中心への光の閉じ込め傾向を保っている。このことから、作製されたポリマー光導波路は、入射端にてミラーによる光路変換を介した場合にも、光の閉じ込め効果を維持しているといえる。

Table 4-13 ミラー形成前後の NFP 測定結果



次に、挿入損失の測定結果を Fig. 4-64 に示す。4 チャンネルそれぞれのミラー形成後の挿入損失を示しており、ミラー形成前の挿入損失とミラー形成に伴う損失増大量に内訳されている。また、この結果より、4 チャンネルの挿入損失の平均値を計算したものを Table 4-14 にまとめた。光源側導波路と受光器側導波路の挿入損失値を足し合わせることによって、光リンク全体での損失値を概算している。

Fig. 4-64 より、チャンネルごとの損失値のばらつきは少ないことがわかり、その標準偏差は光源側、受光器側ともに 0.14 dB 以下に収まっていることから、粗さムラのない均一なミラー面が形成されていたといえる。

Table 4-14 より、ミラー形成後のリンク全体の損失値は 2.85 dB と概算され、ミラー形成に伴う損失増大は 0.41 dB に抑えられているものの、4.5.1 節にて検討した最適化導波路と比べ損失が増大しており、最適化が完全ではないことが見て取れる。

この損失増大量には、クラッド厚増大及びミラー角度ずれによる過剰損失が含まれていると考えられる。本項にて作製した導波路はクラッド厚が約 125 μm であり、クラッド厚が 90 μm であった最適化導波路に比べ、クラッド厚が増大している。Fig. 4-59 に示したシミュレーション結果によると、円形 GI 型導波路のクラッド厚が 90 μm から 125 μm に増大すると、リンク全体にておよそ 0.3 dB 程度の過剰損失が生じる。また、ミラー角度は 47.27° であり、最適値から 2° 以上の角度ずれが生じている。4.4.3.4 項の Fig. 4-41 に示したミラー角度トレランスの計算結果を参照すると、ミラー角度が 47° の場合にはリンク全体にて 0.5 dB ほどの過剰損失が生じる計算となる。シミュレーションでは、コア屈折率を 1.65 に設定

している点、光源及び受光器の位置を固定しており導波路とのアクティブアライメントを行っていない点など、本実験とは異なる条件であるために厳密な比較はできないが、ミラー角度ずれが過剰損失発生に寄与していたことは確実であろう。

よって、本実験が示した 0.41 dB という損失増大量は、クラッド厚増大及びミラー角度ずれによる過剰損失が占めていたことが予想される。ただし、4.5.1 項にて紹介した最適設計が十分でない導波路 S と比べれば、大幅な損失低減がなされているため、最適構造選択による低損失化にある程度成功していたといえる。

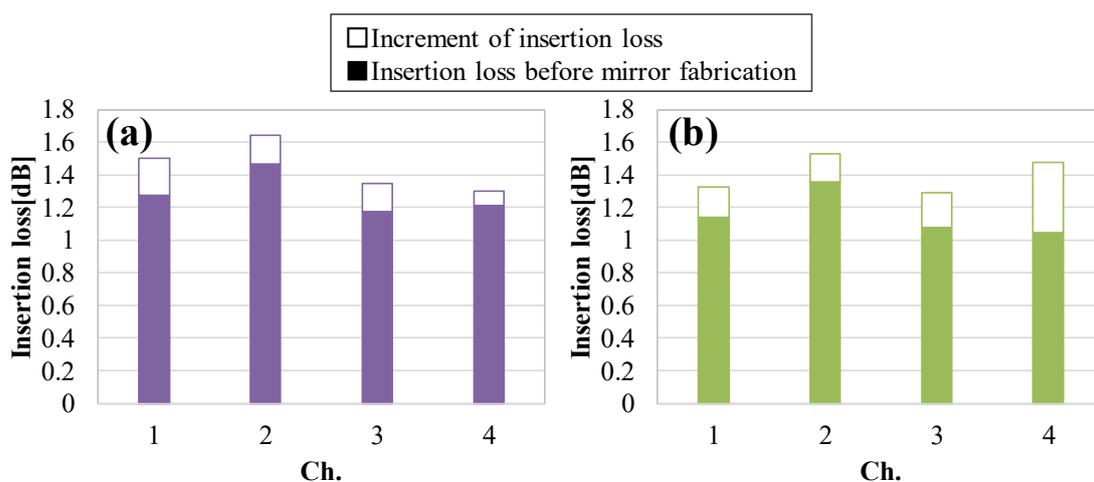


Fig. 4-64 ミラー形成後の挿入損失測定結果 (a)光源側導波路 (b)受光器側導波路

Table 4-14 ミラー形成前後の挿入損失平均値

	Before mirror fabrication	After mirror fabrication	Loss increment
Tx side	1.28 dB	1.45 dB	0.16 dB
Rx side	1.16 dB	1.40 dB	0.25 dB
Total	2.44 dB	2.85 dB	0.41 dB

次に、Fig. 4-65 に示した評価系にて単チャンネル励振時の他チャンネルへのクロストークを測定した。励振プローブ及び受光プローブを導波路の Ch. 3 に位置合わせした状態から、受光プローブを導波路ピッチ方向にスキャンさせ、各位置での光強度を測定した。測定結果を Fig. 4-66 に示す。

Fig. 4-66 より、光源側・受光器側導波路ともに、隣接チャンネルへのクロストークは-30 dB 以下に抑えられていることがわかる。50GI-MMF 励振という、高次モードの光が励振される条件下でも低クロストークを維持していることから、GI 型特有の光の閉じ込め効果が発揮され、隣接チャンネルへの光の漏えいを回避できたのだと考えられる。

ミラーを介した光結合を含む直角光路変換型光結合系では、光はミラーによる反射を受

けるのみならず、厚みのあるクラッド中を伝搬する。クラッド伝搬中のスポット拡がりにより、コアへの結合及び受光器との結合の際に隣のチャンネルに光が漏れいするおそれがあるため、クロストークの増大が懸念されていた。特に、本実験にて作製した導波路はチャンネル間距離が $125\ \mu\text{m}$ という狭ピッチ構造を有しているため、クロストーク増大が顕著になると見込まれた。

しかしながら、Fig. 4-66 の結果より、 $-30\ \text{dB}$ 以下の低クロストークが確認されたことから、ミラーによる結合を介した後も低クロストークを実現するに足る光の閉じ込め効果が維持されていたと考えられる。

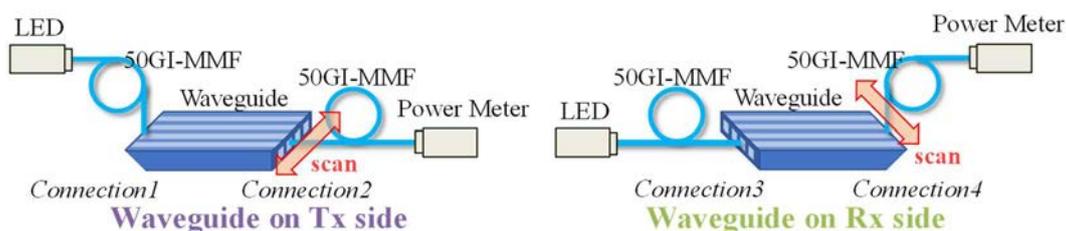


Fig. 4-65 クロストーク評価系

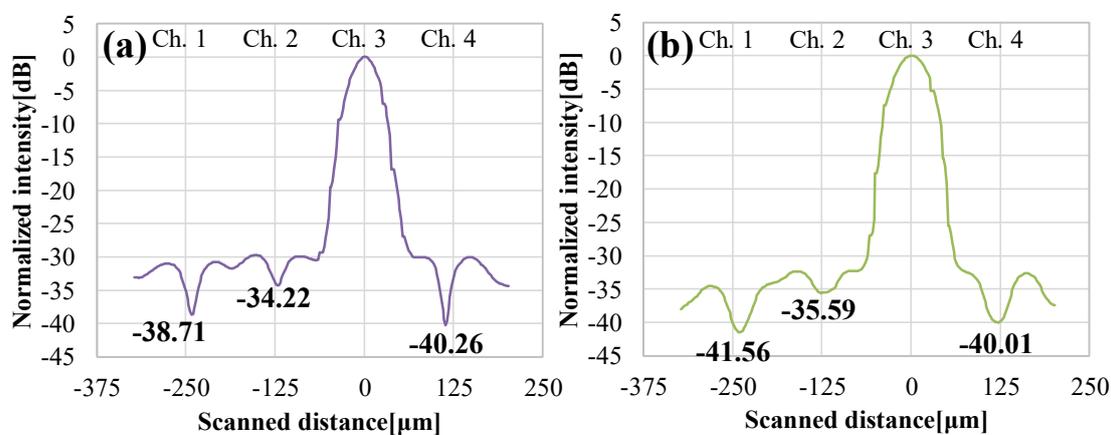


Fig. 4-66 ミラー形成後のクロストーク測定結果 (a)光源側導波路 (b)受光器側導波路

4.5.2.2 マルチチャンネル同時信号伝送実験

これまでの検討では、一本の励振プローブを用いて単チャンネルを励振した場合の光学特性の評価を行ってきたが、実際の光配線板では、並列光導波路の複数チャンネルを同時励振して信号伝送が行われる。よって、ポリマー光導波路の実用化のためには、マルチチャンネル励振下での光学特性評価が不可欠となる。

以下では、実際の光リンクを想定し、波長 $850\ \text{nm}$ 帯の4チャンネルVCSELアレイを搭載した

光エンジン(古河電気工業(株)製)を用いてマルチチャンネル励振を行った際の光学特性の検討を行う。

まず, Fig. 4-67 のような評価系を構築し, 光源側導波路に対し, 125 μm ピッチのファイバリボンを用いて励振した際の NFP 及び各チャンネルの挿入損失を測定した。励振ファイバリボンは, 導波路の Ch. 3 にて最大強度が得られる位置に固定し, 受光プローブである 50GI-MMF は, チャンネルごとに最大強度が得られるよう位置を適宜設定した。

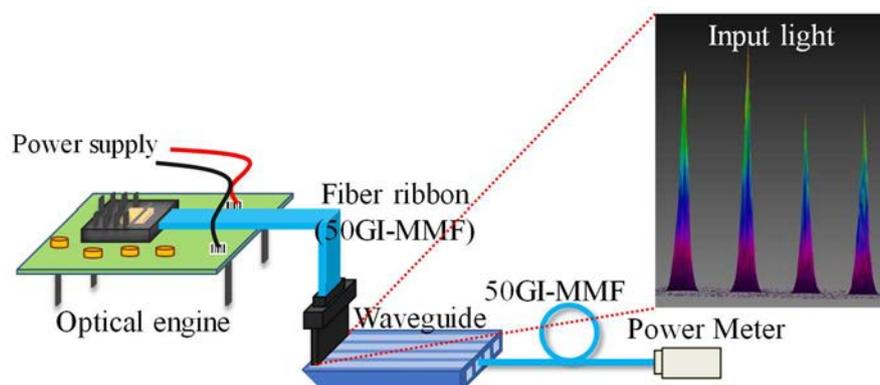


Fig. 4-67 マルチチャンネル励振時の評価系

Fig. 4-68(a)に光導波路出射端での NFP の測定結果を, Fig. 4-68 (b)にマルチチャンネル励振(Ch. 3 に最適位置合わせ)時の各チャンネルの挿入損失の測定結果をそれぞれ示す。

Fig. 4-68(a)より, 4 チャンネルすべてからの出力光が確認でき, 45° ミラーを通したマルチチャンネル励振に成功したといえる。しかし, Fig. 4-68 (b)より, マルチチャンネル励振時のチャンネルごとの挿入損失のばらつきは, 単チャンネル励振時の結果と比較して大きく, 最大で 0.68 dB の挿入損失差(Ch. 4-Ch. 3 間)が生じている。これは, ファイバリボンと導波路間の結合損失によるものと考えられる。Mosquito 法で作製された導波路のチャンネル間ピッチに, 設計値である 125 μm からのずれがあることにより, 最適位置合わせをした Ch. 3 以外のチャンネルでは, ファイバリボンとの間に位置ずれが生じ, 結合損失が発生していたと考えられる。ただし, 位置ずれの影響がある中でも, すべてのチャンネルにて挿入損失は 4 dB 以下に抑えられ, 十分に並列信号伝送が可能であると判断される。

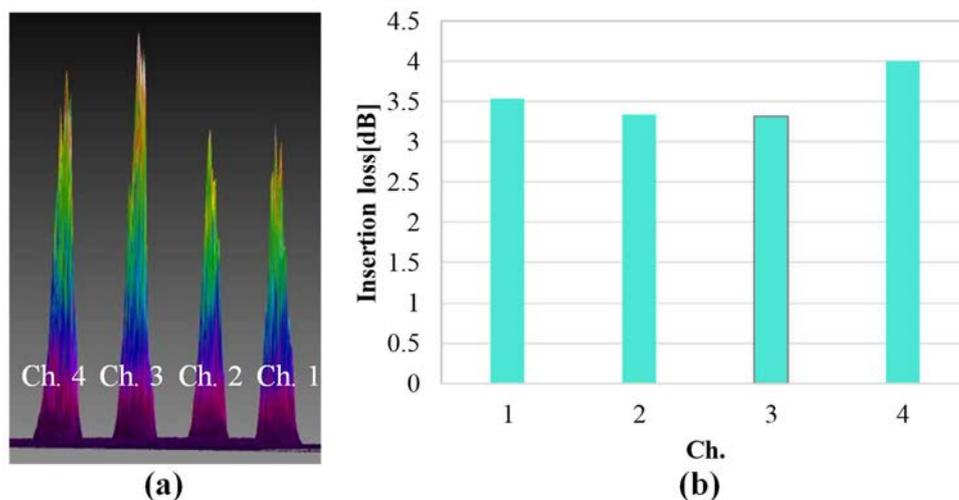


Fig. 4-68 マルチチャンネル励振時の測定結果 (a)NFP (b)挿入損失

そこで, Fig. 4-67 の評価系にて受光プローブとして用いた 50GI-MMF 出射端を光エンジンの Rx モジュールに結合し, 接続されたオシロスコープ及びエラーアナライザを用いて, チャンネルごとの伝送信号波形の観測及び BER(Bit Error Rate)の計測を行った. その評価系を Fig. 4-69 に示す. 当研究室ではこれまでも, GI 型ポリマー光導波路を用いた高速信号伝送の実験例を示してきた[4-12][4-13]が, 45° ミラーによる光路変換を含んだ 28 Gbps マルチチャンネル高速信号伝送は初の試みとなる. 28 Gbps 信号伝送時の各チャンネルの出射アイパターンの測定結果を Fig. 4-70 に示す.

本実験にて, 28 Gbps 並列高速信号伝送下における全チャンネルエラーフリー(BER10^{-12})を達成した. Fig. 4-70 より, すべてのチャンネルにて eye が十分開口していることが確認できる. ジッターによる劣化もほとんど生じていないことから, チャンネル間クロストークによる影響をミラー形成後も小さく抑え, 28 Gbps 高速信号伝送を実現したといえる.

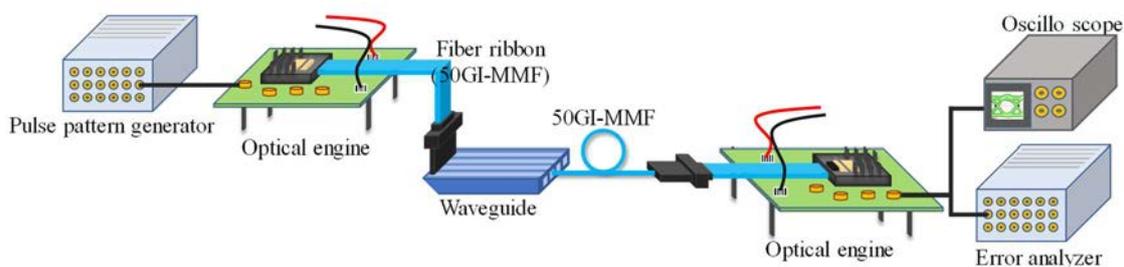


Fig. 4-69 マルチチャンネル同時信号伝送評価系

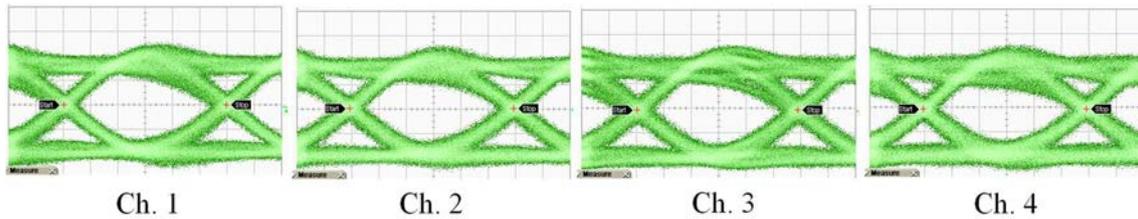


Fig. 4-70 マルチチャネル 28 Gbps 信号伝送時のアイパターン

4.6 結言

本章では、 45° ミラーを介した光結合系に注目し、GI 型ポリマー光導波路の光結合特性の解明及び高効率光結合の実現を目指した。

まず、 45° ミラーによる直角光路変換を含まない光リンクについて、矩形 SI 型、円形 GI 型ポリマー光導波路の光結合特性を評価・比較した結果、円形 GI 型導波路は特有の光閉じ込め効果により、コアサイズが大きい場合にも受光素子との高結合効率を維持し、導波路入出射時双方にて結合損失を低減できる可能性があることがわかった。

次に、 45° ミラー加工を施した矩形コアポリマー光導波路に対し、SI 型・GI 型の光学特性評価を行った結果、矩形 GI 型導波路は、特有の光の閉じ込め効果を 45° ミラー介在後も維持し、位置ずれがある場合にも矩形 SI 型導波路に比べ常に低損失性を示した。このことから、 45° ミラーを介した光結合系でも、GI 型導波路は特有の優れた光学特性を示すことが明らかとなった。

光線追跡シミュレーションを用いて、 45° ミラーを含む光リンクにて生じる光損失を検討した結果、円形 GI 型導波路はミラーを介した後も特有の光閉じ込め効果を維持し、導波路出射部での高結合効率を実現することによって、SI 型に比べ優位性を示すことを理論的に確認した。また、導波路構造パラメータを各種変更させた検討を行うことによって、円形 GI 型導波路が 45° ミラーを介した高効率光結合を実現するための最適な導波路構造を明らかにした。最適構造設計に基づき、Mosquito 法にて円形 GI 型ポリマー光導波路を作製した結果、設計前に比べ、3.26 dB もの結合損失低減を果たした。また、作製した導波路により、28 Gbps のマルチチャネル高速信号伝送に成功した。

Reference

- [4-1] 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," IEEE J. Lightw. Technol., Vol. 31, No. 24, pp. 4004-4015 (2013).
- [4-2] Y. Koike, "Fundamentals of Plastic Optical Fibers," WILEY-VCH (2015).

- [4-3] 岩井則広, 高木啓史, 清水均, 今井英, 川北泰雅, 神谷慎一, 平岩浩二, 高木智洋, 石川卓哉, 築地直樹, 粕川秋彦, “光インタコネクション用 1060 nm VCSEL アレイ”, 古河電工時報, 第 125 号 (2010).
- [4-4] 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,” Proc. of SPIE 2010, Vol. 7607, 76070S (2010).
- [4-5] Y. Morimoto and T. Ishigure, “Low-loss light coupling with graded-index core polymer optical waveguides via 45-degree mirrors,” Opt. Express, Vol. 24, No. 4, pp. 3550-3561 (2016).
- [4-6] T. Noda and Y. Koike, “Bandwidth enhancement of graded index plastic optical fiber by control of differential mode attenuation,” Opt. Express, Vol. 18, No. 3, pp. 3128-3136 (2010).
- [4-7] Y. Morimoto and T. Ishigure, “Design for polymer optical waveguides realizing efficient light coupling via 45-degree mirrors,” Opt. Express, Vol. 27, No. 8, pp. 10839-10853 (2019).
- [4-8] H. Numata, S. Nakagawa, Y. Taira, “High-density optical interconnect based on TIR and metal coated precise mirror attached waveguide,” Proc. of Conference on Lasers and Electro-Optics 2009, JWA40 (2009).
- [4-9] FINTECH, “各種物質の放射率(吸収率)”, <https://www.fintech.co.jp/etc-data/housharitsu.htm> (2020 年 1 月閲覧).
- [4-10] K. Abe, Y. Oizumi, and T. Ishigure, “Low-loss graded-index polymer crossed optical waveguide with high thermal resistance,” Opt. Express, Vol. 26, No. 4, pp. 4512-4521 (2018).
- [4-11] Y. Morimoto, K. Date, and T. Ishigure, “Accurate core alignment for polymer optical waveguide in the Mosquito method for high-efficient coupling,” Proc. of 2018 IEEE Electronic Components and Technology Conference (ECTC), pp. 2444-2449 (2018).
- [4-12] R. Kinoshita, D. Suganuma, and T. Ishigure, “Accurate interchannel pitch control in graded-index circular-core polymer parallel optical waveguide using the Mosquito method,” Opt. Express, Vol. 22, No. 7, pp. 8426-8437 (2014).
- [4-13] 阿部光平, 2017 年度慶應義塾大学修士論文 (2018).

第5章

シングルモードポリマー光導波路の光結合特性

5.1 緒言

第2章でも述べたように、データセンタ内光インターコネクタ技術として、伝送帯域距離積に優れるシングルモード光リンクの導入が検討されている。オフボード領域のシングルモード光ファイバ(SMF)とオンチップ領域のシリコン細線導波路とを高効率につなぐ光素子としてポリマー光導波路に期待が寄せられている。その際、SMF-ポリマー光導波路間の結合にはバットカップリングが、シリコン細線導波路-ポリマー光導波路間の結合にはアディアバティックカップリングがそれぞれ想定される。

本章では、Mosquito 法にて作製した円形コアシングルモードポリマー光導波路の光結合特性を詳細に検討すべく、同種ポリマー材料を用い、直接露光法にて矩形コアシングルモードポリマー光導波路を作製し、両者の光学特性を比較する。

まず、SMF とバットカップリングした際の光結合特性について詳細に検討する。次に、シリコン細線導波路とアディアバティックカップリングした際の光結合特性について、導波路モードソルバを用いた理論計算により検証する。この理論計算により、シリコン細線導波路とのアディアバティックカップリングを考慮した際にはシングルモードポリマー光導波路の偏波依存光学特性が極めて重要であることが明らかとなったことを受け、作製した導波路に対し、1310 nm, 1550 nm の両波長にて偏波依存光学特性を実測評価する。

また、光結合特性、偏波依存光学特性それぞれについて、導波路モードソルバによるシミュレーションにて検討し、導波路コア外形状やコア内屈折率分布が与える影響について理論的に解析する。

5.2 シングルモードポリマー光導波路のバットカップリング時の光結合特性

当研究室では Mosquito 法にて作製された円形 GI 型ポリマー光導波路に着目しており、作製条件の選定によりシングルモードスケールのコアを形成することに成功している。しかし、この方法により作製された円形 GI 型シングルモード導波路の光学特性の詳細な検討は未だ不十分であり、さらには、従来の矩形 SI 型コアのシングルモードポリマー光導波路と比較検討した例はこれまでになかった。

そこで本節では、直接露光法及び Mosquito 法にて作製された、直線パターンを有するシングルモードポリマー光導波路の基本的な光学特性について評価した結果を報告する。

5.2.1 評価系及び評価導波路

シングルモードポリマー光導波路の光学特性評価には、Fig. 5-1 に示す評価系を用いた。波長 1550 nm あるいは 1310 nm の半導体レーザに接続されたシングルモードファイバ(SMF)によって導波路に光を入射する。導波路からの出力光を、再び SMF にて受光し、その強度をパワーメータにて検出する。

SMF には、住友電気工業(株)製の PA-A2 を用いている。これは、汎用 SMF に比べファイバの屈折率差を大きく設計することで耐久曲げ半径を大きくしており、データセンタ内通信用途として開発されたものである[5-1]。PA-A2 の Near Field Pattern(NFP)を測定した結果を Fig. 5-2 に示す。NFP から解析されるモードフィールド径(MFD, 強度が最大強度の $1/e^2$ となる、実効的な直径のこと)は、波長 1310 nm, 1550 nm にてそれぞれ $7.177 \mu\text{m}$, $7.752 \mu\text{m}$ であった。

ここで、受光プローブを SMF から $105\text{-}\mu\text{m}$ 径 SI 型マルチモードファイバ(105SI-MMF)に置き換えた場合、シングルモード導波路コアに対して十分大きいファイバコアにて導波路出射光を受光するため、フレネル反射等の界面損失を除けば、導波路-受光プローブ間にて生じる結合損失はほぼゼロであると考えてよい。そのため、SMF を受光プローブとして使用した場合との挿入損失との差を計算することで、導波路-SMF 間にて生じる結合損失を見積もることができる(フレネル反射損失は受光プローブによらずほぼ同等であると仮定し、相殺できるとしている)。このような目論見から、受光プローブを SMF あるいは 105SI-MMF とした場合双方について、挿入損失を測定することとした。

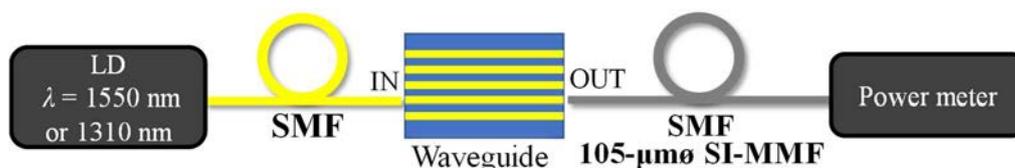


Fig. 5-1 シングルモードポリマー光導波路の評価系

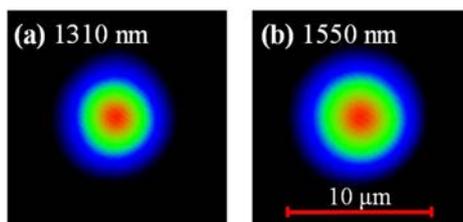


Fig. 5-2 PA-A2 ファイバの NFP (a)1310 nm (b)1550 nm

次に、本節にて評価するシングルモードポリマー光導波路について述べる。直接露光法，Mosquito 法にて作製された矩形 SI 型，円形 GI 型シングルモード光導波路の端面写真を Fig. 5-3，Fig. 5-4 にそれぞれ示す。

Fig. 5-3 より，直接露光法により作製された導波路コアは，コア-クラッド界面が明瞭であり，SI 型の屈折率プロファイルを持つことがわかる。直接露光法では，“コア高さ”に関しては，スピコート工程により決定されるため，一導波路中ではすべてのチャンネルにて均一値となる。一方，フォトマスクパターン幅を変えることで，同一サンプル内に異なる“コア幅”にて複数のコアを形成することが可能である。本節では，6, 7, 8, 9, 10 μm のパターン幅を選定し，Fig. 5-3 に示すようにパターン幅に対応して異なる幅を有する導波路コアについて，それぞれ評価する。コア高さは，すべてのチャンネルにて 6.5 μm である。

これに対し，Fig. 5-4 より，Mosquito 法にて作製された導波路コアは，コア-クラッド界面が不明瞭であり，材料相互拡散による GI 型プロファイルが形成されていることがわかる。Fig. 5-4 に示したチャンネル番号はコアモノマーの吐出順につけられており，Ch. 1 には最も長い露光待機時間が，Ch. 12 には最も短い露光待機時間が与えられている。

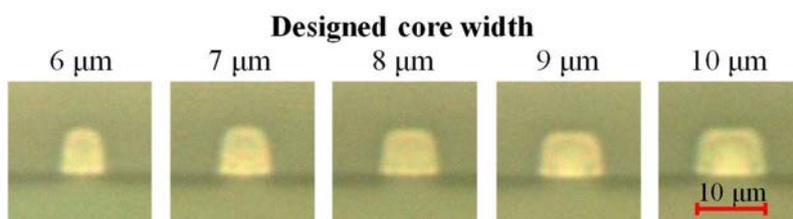


Fig. 5-3 直接露光法にて作製された矩形 SI 型シングルモード光導波路の端面写真

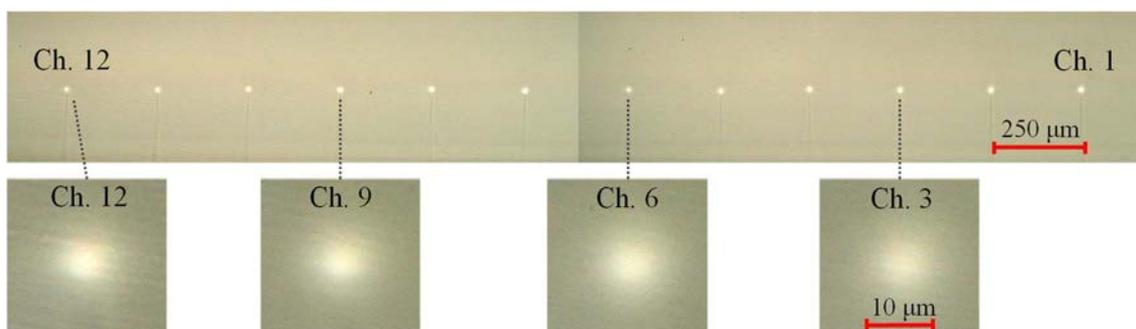


Fig. 5-4 Mosquito 法にて作製された円形 GI 型シングルモード光導波路の端面写真

なお，作製したシングルモードスケールポリマー光導波路が実際にシングルモード条件を満たしているかの判別は，次のように行っている。

シングルモードポリマー光導波路に対し，SMF を用いて光を入射したときの出射光強度プロファイルを観測する。SMF の入射位置を導波路コア中心から水平方向，垂直方向それぞれに $\pm 10 \mu\text{m}$ 程度まで徐々にずらしたときに，出射強度プロファイルのピーク位置が変動

しなかった場合にシングルモードコアと認定する。導波路コアがシングルモード条件を満たさず、最低次モード以外のモードが存在し得る場合には、SMFの入射位置がコア中心から遠ざかったときに、出射強度プロファイルのピーク位置ずれが生じるか、あるいはダブルピーク形状のプロファイルが観測される。

5.2.2 Near Field Pattern とモードフィールド径の測定

まず、シングルモード光導波路と他の光学素子の結合効率を議論する際に重要となる、MFD を評価するため、作製した二つの導波路に対し、NFP を測定した。

5.2.2.1 矩形 SI 型シングルモード光導波路(直接露光法)の NFP 特性

直接露光法にて作製された矩形 SI 型シングルモード光導波路の、波長 1310 nm, 1550 nm での NFP 及び波長 1550 nm での出射光強度プロファイルの解析結果を、Fig. 5-5 及び Fig. 5-6 にそれぞれ示す。直接露光法で作製した矩形 SI 型コアは、Fig. 5-3 に示されるように、コア幅とコア高さが一致しない長方形、さらには台形構造となっているため、導波路の出射 NFP は真円形状とはならず、楕円形状になっていることが Fig. 5-5 よりわかる。そのため、Fig. 5-6 に示される出射強度プロファイルも、幅方向と高さ方向のプロファイルが完全に一致していない。

MFD は、シングルモードコアのモードプロファイルにて、最大強度の $1/e^2$ となる強度が得られる径として定義される。シングルモードコアの場合、モードプロファイルは導波路の出射 NFP と一致するため、出射光強度プロファイルを測定することで、導波路コアの MFD を解析することができる。導波路コア出射強度プロファイルから得られる、MFD の解析結果を Fig. 5-7 にまとめる。ここでは、MFD と、実際に形成されたコア幅の関係をグラフに示しており、導波路コアが台形構造である場合、形成コア幅はコアの下底長さとして定義している。Fig. 5-7 より、矩形 SI 型導波路では、コア幅の減少とともに、幅方向の MFD は徐々に減少する一方で、高さ方向の MFD は増加していることがわかる。これは、コア幅の減少により光がコア内に閉じ込めきれなくなり(モードの実効屈折率が減少することとなり)、その結果、幅方向のみならず高さ方向にもエバネッセント光としてしみ出すためであると考えられる[5-2]。この傾向により、幅・高さ方向の MFD が互いに一致しないチャンネルがほとんどであった。なお、コア幅に依存して変動する MFD の変化量は同一波長内では最大で $1.5\mu\text{m}$ 程度であり、実際のコア幅の変化(最大 $4\mu\text{m}$ 程度)に対して小さな範囲にとどまっている。

前述の通り、直接露光法では“コア幅”についてはパターン転写時のフォトマスクパターン幅の設定により制御されるのに対し、“コア高さ”についてはコアモノマー製膜時のスピコート条件により決定される。つまり直接露光法では、対称性のある正方形コアを得るた

めには、コア幅とコア高さをそれぞれ別の方法にて制御する必要がある[5-2]. そのため、コア形状の精密な制御が困難であり、本研究にて作製した導波路コアのように、出射 NFP が楕円形状となってしまう場合が多い。

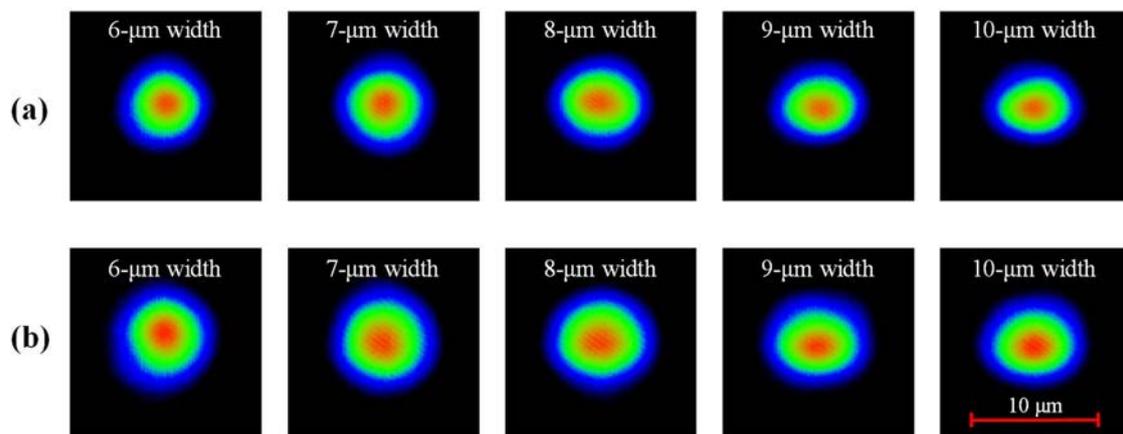


Fig. 5-5 矩形 SI 型導波路(直接露光法)の NFP (a)1310 nm (b)1550 nm

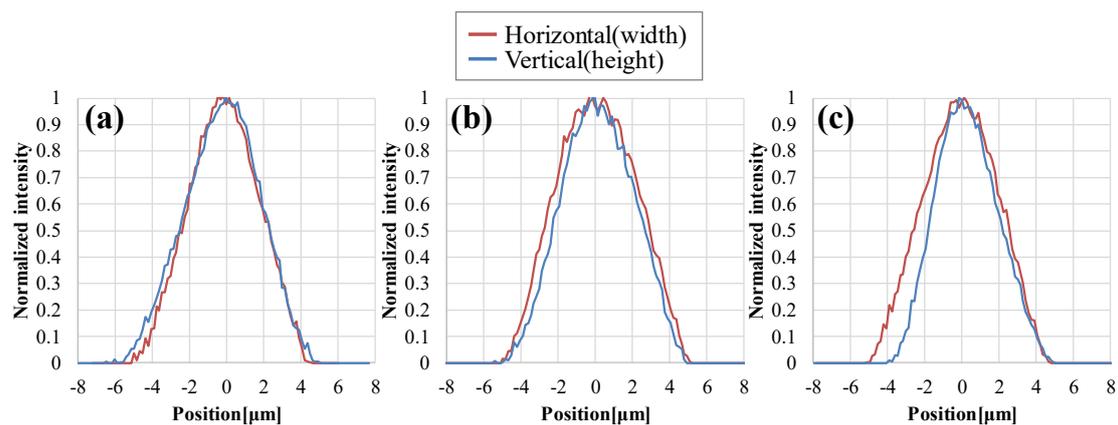


Fig. 5-6 矩形 SI 型導波路(直接露光法)の出射光強度プロファイル(波長 1550 nm)
(a)6 μm 幅設計コア (b)8 μm 幅設計コア (c)10 μm 幅設計コア

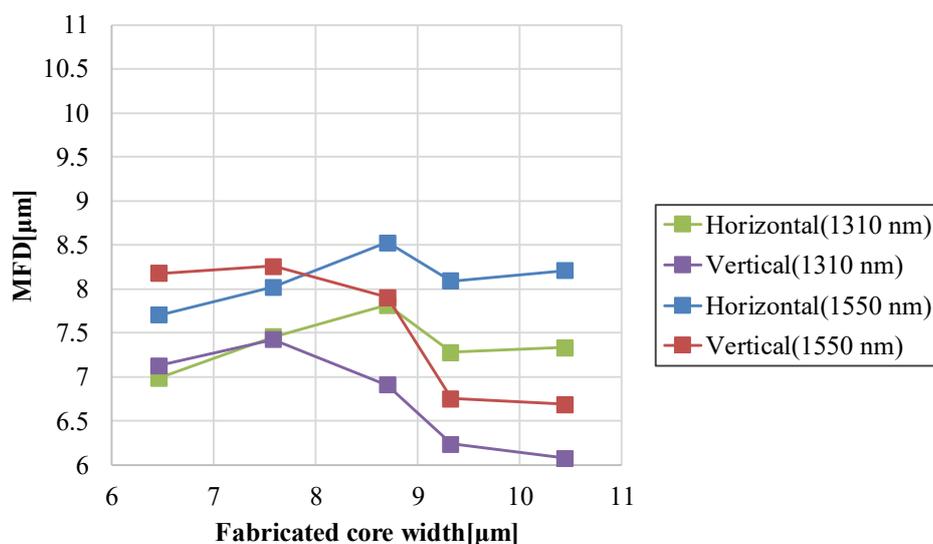


Fig. 5-7 矩形 SI 型導波路(直接露光法)の MFD と形成コア幅の関係

5.2.2.2 円形 GI 型シングルモード光導波路(Mosquito 法)の NFP 特性

Mosquito 法にて作製された円形 GI 型シングルモード光導波路について、NFP, 出射光強度プロファイル(波長 1550 nm), 及びそこから算出される MFD の解析結果を, Fig. 5-8, Fig. 5-9, Fig. 5-10 にそれぞれ示す. Fig. 5-8 より, Mosquito 法で作製した導波路コアの出射 NFP はほぼ完全な真円形状を示すことがわかる. Fig. 5-9 に示すように, 幅方向, 高さ方向の出射光強度プロファイルが完全に一致しており, 汎用 SMF と同様にガウシアン分布にフィッティングできるモードプロファイルを有しているといえる[5-3]. Fig. 5-10 から, 円形 GI 型導波路では, 露光待機時間の増加とともに, 幅方向, 高さ方向ともに MFD が増加しており, 両者の MFD はほぼ等しい値であることがわかる.

Mosquito 法によるコアパターン形成工程に注目する. コアモノマーは円形断面を有するニードルから吐出される. このとき, 使用するコア, クラッド材料の粘度比[5-4]や, クラッドモノマー中でのコア吐出高さ[5-5]が, 形成されるコア断面形状に影響を及ぼすことがわかっている. それら条件の適切な選定により, コアパターンはニードルからの吐出後も, 幅方向, 高さ方向が等方的に制御された円形状を保つことができ, 後の紫外線露光によりその形状が固定される. そのため, 直接露光法に比べ, 対称性のある円形コアを容易に作製可能である.

さらに, 矩形 SI 型導波路では, コア幅を変化させた場合でも, MFD の大きな変動は見られなかったのに対し, 円形 GI 型導波路の場合には露光待機時間の変化により, MFD は 7.5 μm 程度(Ch. 12)から 10 μm 程度(Ch. 3)にまで大きく変動していることがわかる(波長 1550 nm の場合). これは, Mosquito 法では露光待機時間の変化により, コア径のみならず屈折率差も同時に変化するためである.

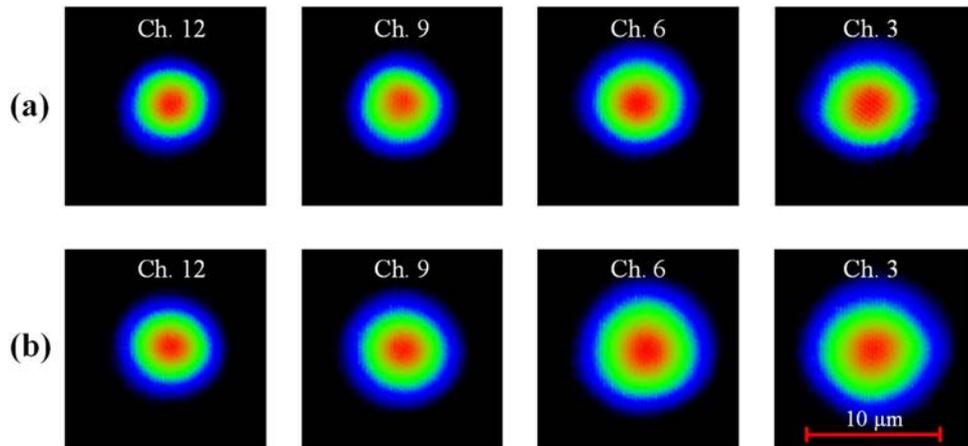


Fig. 5-8 円形 GI 型導波路(Mosquito 法)の NFP (a)1310 nm (b)1550 nm

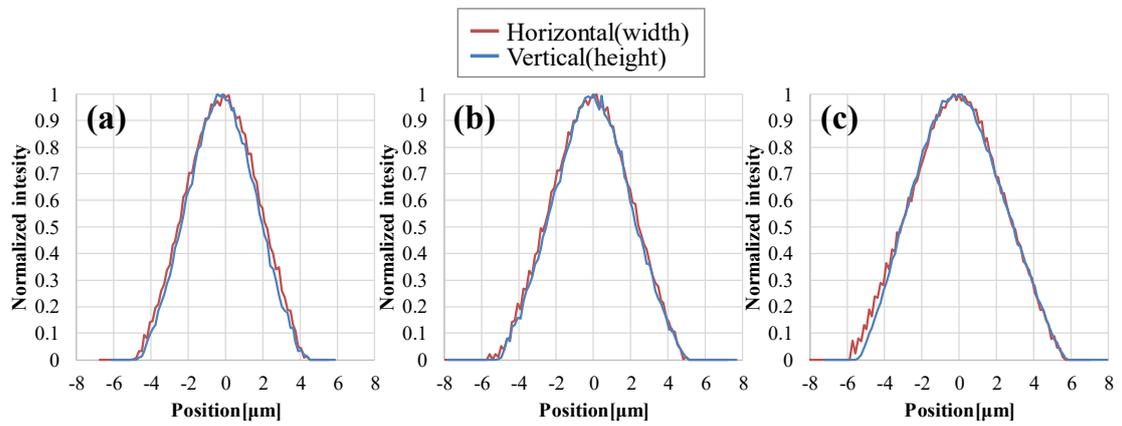


Fig. 5-9 円形 GI 型導波路(Mosquito 法)の出射光強度プロファイル(波長 1550 nm)

(a) Ch. 12 (b) Ch. 9 (c) Ch. 6

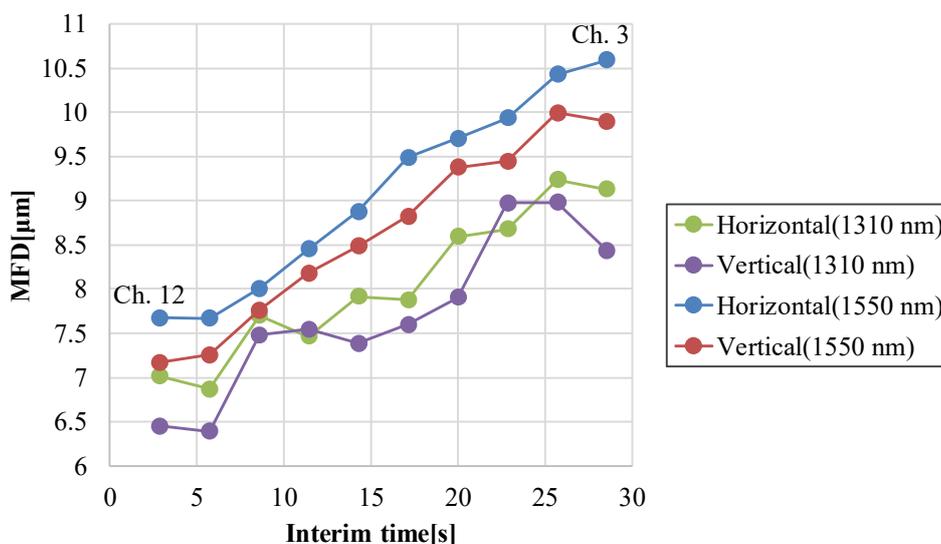


Fig. 5-10 円形 GI 型導波路(Mosquito 法)の MFD と露光待機時間の関係

ここで、矩形 SI 型光導波路、円形 GI 型光導波路双方にて、同一のコアに対し、波長 1310 nm での MFD は、波長 1550 nm の場合と比較して小さな値となっている。これは、波長が短いほどコア内を伝搬する最低次モードの実効屈折率が大きくなり、光がより強くコアに閉じ込められるためである。NFP 及び MFD の大きさの波長依存性は、5.4 節にて論ずる偏波依存光学特性にて重要となる。

5.2.3 光損失の測定

Fig. 5-1 に示した評価系にて、光損失を測定した結果について報告する。ここでは、波長 1550 nm のレーザを用いた場合の結果のみ記載する。

5.2.3.1 挿入損失測定による結合損失推定

矩形 SI 型導波路及び円形 GI 型導波路の挿入損失を測定した結果を Fig. 5-11 に示す。受光プローブとして SMF 及び 105SI-MMF を用いた場合の挿入損失値をそれぞれ示している。また、本研究にて評価している導波路の全長は、矩形 SI 型導波路が 3 cm であるのに対し、円形 GI 型導波路は 5 cm であるため、伝搬損失(波長 1550 nm では約 0.44 dB/cm[5-6])の影響により円形 GI 型導波路が矩形 SI 型に比べ高い損失値を示す結果となっている。

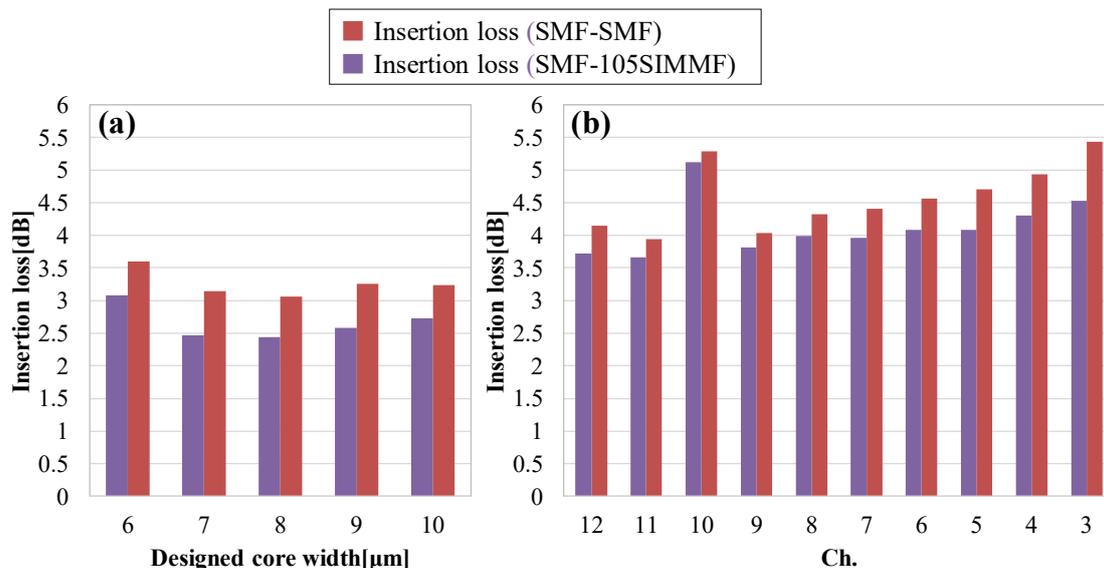


Fig. 5-11 シングルモード光導波路の挿入損失測定結果
(a)矩形 SI 型導波路 (b)円形 GI 型導波路

この結果を用いて、2つの評価系間の挿入損失差を計算することで得られる、SMF-導波路間の結合損失の見積り値を Fig. 5-12 に示す。

円形 GI 型導波路の場合には、露光待機時間に依存して結合損失が大きく変化しており、露光待機時間が 8.56 秒である Ch. 10 にて、極小値を示すことが Fig. 5-12(b) よりわかる。これは、Fig. 5-10 に示したように、露光待機時間に依存して導波路コアの MFD が大きく変化することにより、SMF とのモードプロファイルの一致度が変化し、結合効率に影響を及ぼすためであると考えられる。

そこで、円形 GI 型導波路の各チャンネルの MFD と、受光プローブとして用いた PA-A2 ファイバの MFD との差を計算し、Fig. 5-13 のようにまとめた。PA-A2 ファイバとの MFD 差はチャンネル番号に応じて線形に変化しており、Ch. 10 にてほぼゼロとなることがわかる。この傾向は、Fig. 5-12(b) のグラフ形状とよく一致する。つまり、SMF と MFD が一致している導波路コアほど、SMF との高結合効率を実現していたと判断できる。このことから、Mosquito 法で作製した円形 GI 型導波路コアは、対称性のあるモードプロファイルを実現しているため、MFD を一致させることで SMF との結合効率を向上できるといえる。

これに対し、矩形 SI 型導波路の場合には、どのコア幅でも 0.5~0.7 dB 程度の結合損失が生じていることが Fig. 5-12(a) よりわかる。矩形 SI 型導波路の MFD は全チャンネルにて 7 μm~8.5 μm 程度 (Fig. 5-7 参照) であり、PA-A2 ファイバの MFD (7.752 μm) と大きな違いはない。それにも関わらず、結合損失を生じている理由は、5.2.2.1 項にて議論したように、矩形 SI 型コアのモードプロファイルが真円形状とはならず非対称であるためと考えられる。

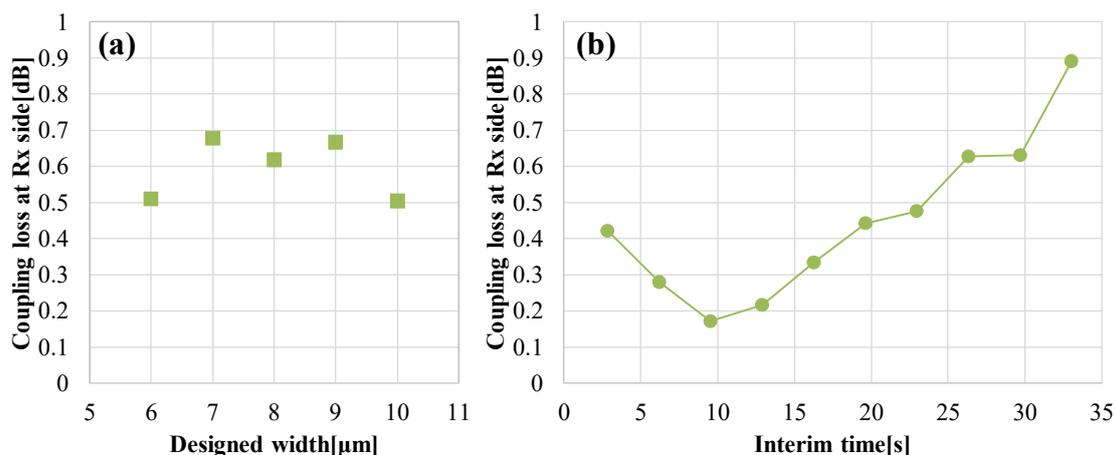


Fig. 5-12 SMF-導波路間の結合損失見積もり値 (a)矩形 SI 型導波路 (b)円形 GI 型導波路

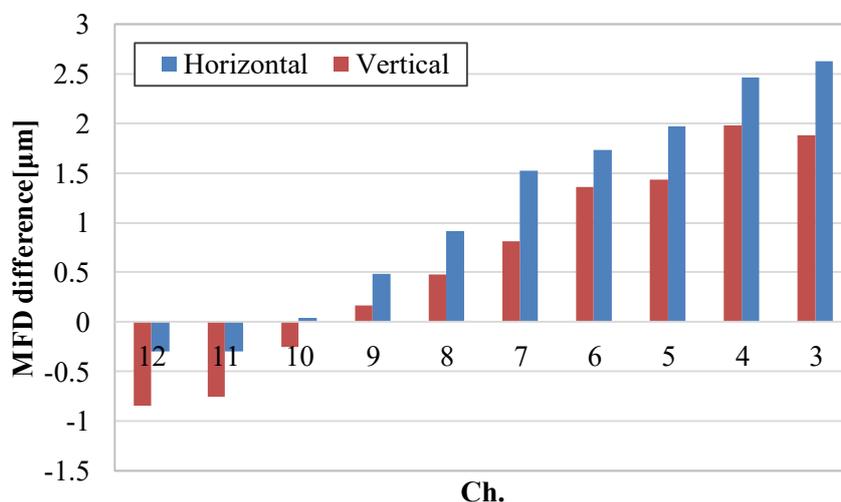


Fig. 5-13 円形 GI 型導波路の PA-A2 ファイバとの MFD 差

実際に、矩形 SI 型導波路及び円形 GI 型導波路の出射強度プロファイルと、SMF の出射強度プロファイルを重ね合わせて比較したものを、Fig. 5-15, Fig. 5-16 にそれぞれ示す。両導波路ともに、SMF と MFD が最も一致したチャネルを採用しており、矩形 SI 型導波路では 8 μm 幅設計コア、円形 GI 型導波路では Ch. 9 の結果を示している。

矩形 SI 型導波路の場合には、出射強度プロファイルの形状は、水平方向、幅方向どちらに対しても SMF とわずかに異なることが Fig. 5-14 より見て取れる。このように、一次元プロファイルから得られる MFD が SMF とほぼ一致していたとしても、モードプロファイルの非対称性によりモードプロファイルの不一致が生じ、SMF との結合効率を悪化させるおそれがある。

これに対し、Fig. 5-15 より、円形 GI 型導波路の場合には、出射強度プロファイルが SMF と完全に一致していることがわかる。このプロファイルの一致度が SMF との高結合効率に

寄与していたと考えられる。Mosquito 法では、その作製工程の特徴により、対称性のある円形コアを容易に形成可能であることから、プロフィールの一致度が良く取れるといえる。

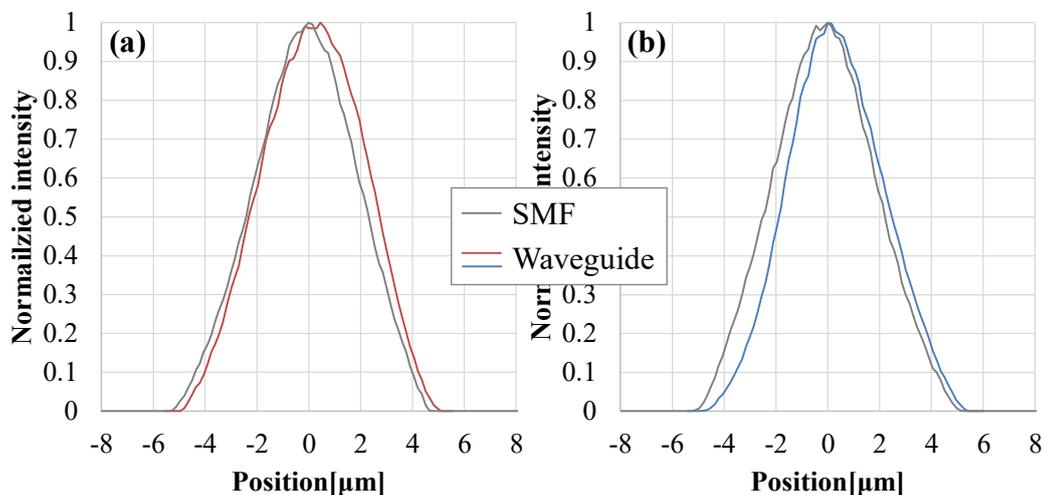


Fig. 5-14 矩形 SI 型導波路(8 μm 幅設計コア)と SMF の出射強度プロフィール比較
(a)水平方向 (b)垂直方向

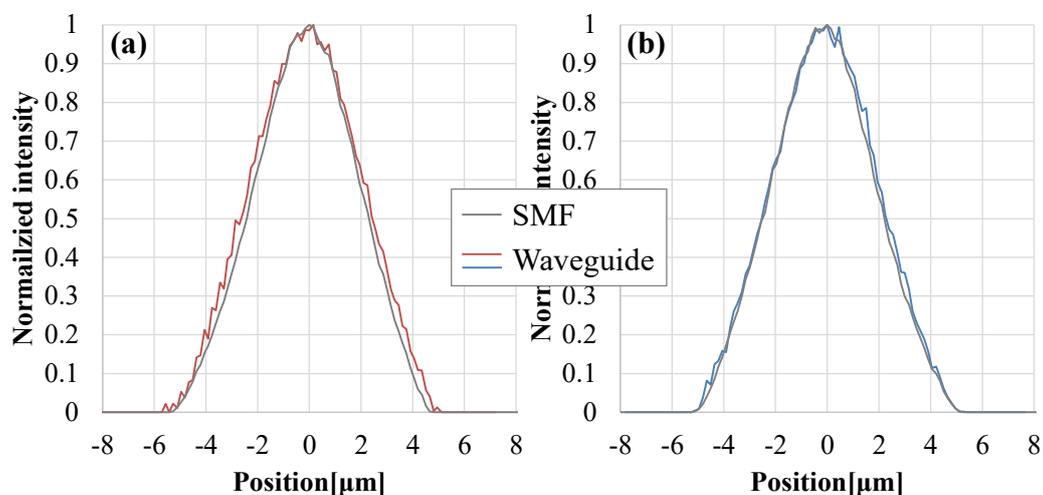


Fig. 5-15 円形 GI 型導波路(Ch. 9)と SMF の出射強度プロフィール比較
(a)水平方向 (b)垂直方向

この検討では、導波路出射側の結合部にて生じる結合損失を見積もった。導波路入射時にも同等の結合損失が生じていたと仮定すると、本評価では、Fig. 5-12 に示した結合損失の 2 倍量の結合損失が生じていたと考えることができる。この結合損失を全体の挿入損失から差し引いた量が、すべて伝搬損失であったとみなすと、この伝搬損失を 3 cm 分に換算することで、5 cm 長であった円形 GI 型導波路の挿入損失を 3 cm 長の場合に換算できる。これ

により,長さの異なる矩形 SI 型導波路との比較が可能となる. 3 cm 換算時の挿入損失を Fig. 5-16 に示す. それぞれ結合損失と伝搬損失に内訳されている. Fig. 5-16 より, 伝搬損失は両導波路のほぼすべてのチャンネルにて 2 dB 程度であり, 導波路コア形状やコアサイズ, 屈折率分布に依存せずほぼ一定であることがわかる.

よって, シングルモードポリマー光導波路の光損失にて支配的となるのは結合損失であり, 結合損失低減が低損失化のためには重要である. Mosquito 法にて作製された円形 GI 型導波路は, 露光待機時間の調整によってモードプロファイルを SMF と一致させることで高結合効率化が可能であり, 最も一致度が取れた Ch. 10 では片端で 0.171 dB の低結合損失を達成した. 円形 GI 型導波路の 3 cm 長換算時の最低損失値は 2.59 dB(Ch. 9)であり, 矩形 SI 型導波路の 3.06 dB(8 μm 幅設計コア)に対して 0.53 dB もの優位性を示した.

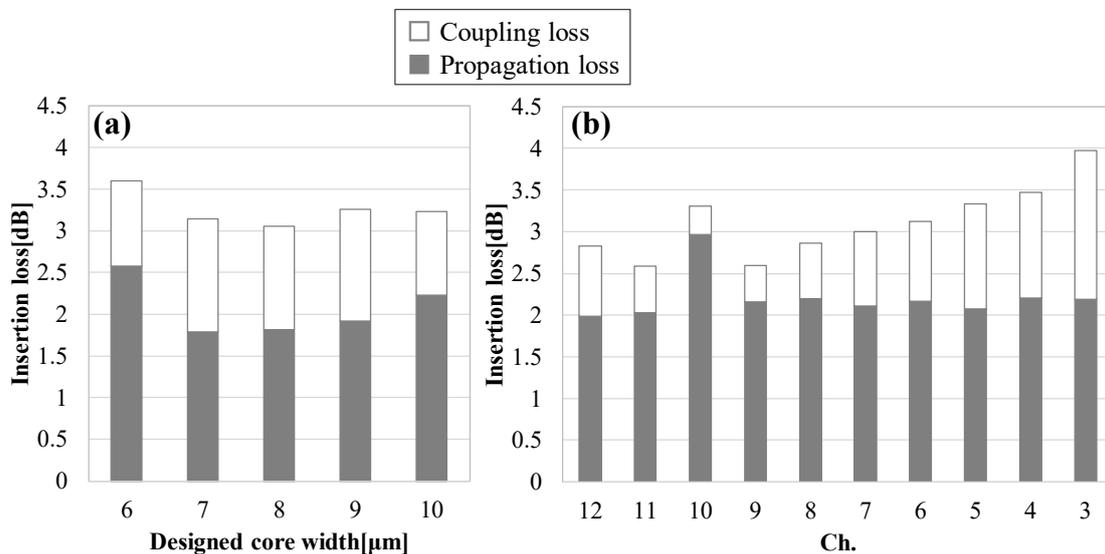


Fig. 5-16 3 cm 長換算時の伝搬損失と結合損失の内訳
(a)矩形 SI 型導波路 (b)円形 GI 型導波路

5.2.3.2 重なり積分による光結合損失の検証

シングルモード光導波路を他の光学素子と接続した際の結合効率は, 理論的に予測することが可能である. 光導波路-光ファイバ間のバットカップリング時の結合効率は, 光導波路と光ファイバのモードプロファイルの重ね合わせ積分で表される. 光ファイバ, 光導波路のモードプロファイルをそれぞれ $f_1(x, y)$, $g_1(x, y)$ とするとき, 結合効率 Γ_c は次式で表される[5-7].

$$\Gamma_c = \frac{|\int f_1(x, y)g_1(x, y)dx dy|^2}{\int f_1^2(x, y)dxdy \cdot \int g_1^2(x, y)dxdy} \quad (5-1)$$

本項では, (5-1)式を用いて光ファイバ-光導波路間の結合効率を解析し, 実測による見積

りの結果と比較する。

そこで、本研究にて用いたファイバ及び導波路に対し、実際に測定した NFP から、二次元の強度プロファイルを抽出し、モードプロファイルとみなすこととした。抽出した二次元出射強度プロファイルの一例を Fig. 5-17 に示す。このプロファイルは、 $0.15032\ \mu\text{m}$ ごとに強度をプロットしており、最大強度が 1 となるように規格化されている。

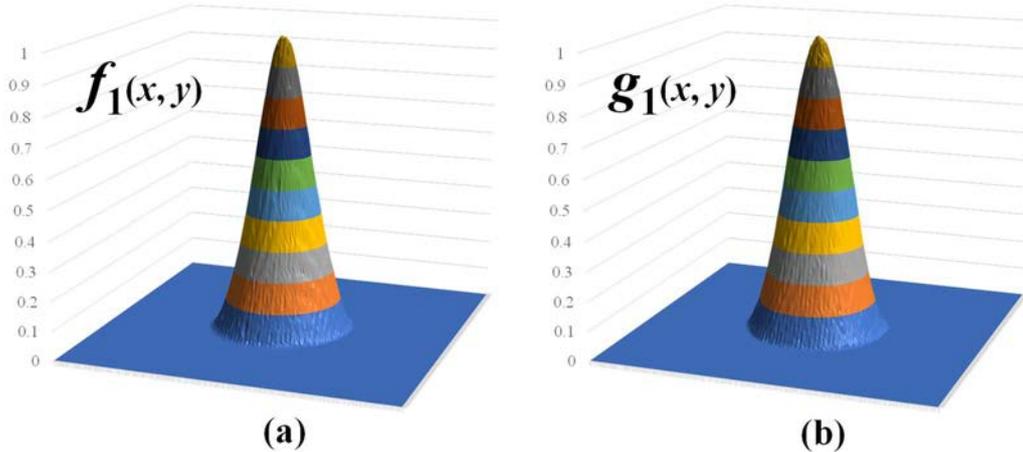


Fig. 5-17 2次元出射強度プロファイル (a)PA-A2 (b)矩形 SI 型導波路(8- μm 幅設計コア)

PA-A2 ファイバのプロファイルを $f_1(x)$ 、各導波路コアのプロファイルを $g_1(x)$ として、(5-1) 式を用いて結合効率を計算した。結合効率から得られる、結合損失の計算結果を Fig. 5-18 にまとめる。

Fig. 5-18(b)より、円形 GI 型導波路の結合損失計算値は、露光待機時間の減少とともに徐々に減少し、露光待機時間 13 秒(Ch. 9)にて最小値(0.055 dB)となることがわかる。この傾向は、Fig. 5-12(b)に示した、実測評価をもとに見積もられた結合損失の傾向とよく一致する。よって、SMF-導波路間にて生じる結合損失は、モードプロファイルの不一致によるものが支配的であったことが確認できた。

矩形 SI 型導波路の場合も、各コア設計幅に対する結合損失の傾向は、Fig. 5-12(a)に示した実測結果の傾向とよく一致している。MFD が最も一致していた 8- μm 幅設計コアでも結合損失は 0.2 dB と計算され、円形 GI 型導波路の計算結果に比べ高い値を示している。このように、矩形 SI 型導波路の場合には、モードプロファイルが真円形状とはならず非対称であるために、円形 GI 型導波路に比べ SMF との結合損失低減に限界があることが示唆された。

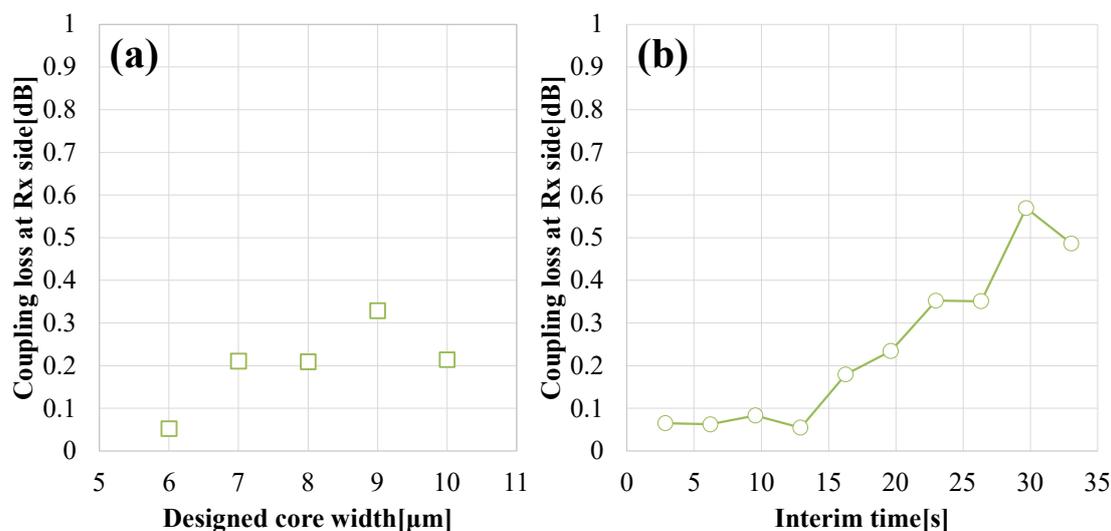


Fig. 5-18 強度プロファイルの重なり積分による SMF-導波路間の結合損失
(a)矩形 SI 型導波路 (b)円形 GI 型導波路

5.2.4 ミスアライメントトレランスの測定

最後に、導波路サンプルのミスアライメントトレランス(軸ずれ耐性)を評価するため、Fig. 5-1 の評価系にて、励振プローブの水平方向(幅方向)及び垂直方向(高さ方向)にオフセットを加えた場合の光結合効率をそれぞれ測定した。なお、シングルモード導波路の結合効率は、(5-1)式に示したようにモードプロファイルの重ね合わせ積分により決定づけられるので、接続する対象が同一であれば、光の入射方向に依存しない。つまり、Fig. 5-1 の評価系では、励振プローブ及び受光プローブに同一の SMF を用いている限りは、導波路の入射部及び出射部は同等の結合特性を示すものとして、ここでは入射部の結合特性のみに注目する。測定波長は 1550 nm に統一している。

矩形 SI 型導波路、円形 GI 型導波路のミスアライメントトレランスの測定結果を Fig. 5-19, Fig. 5-20 にそれぞれ示す。縦軸の結合効率は、各位置にて得られる光強度を最適位置合わせ時の光強度で規格化したものであり、軸ずれが生じた際に生じる過剰損失量を示している。

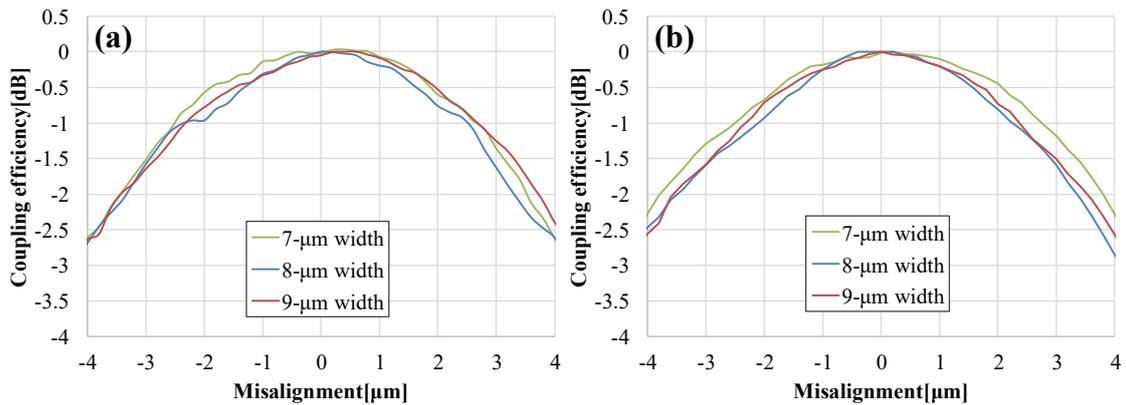


Fig. 5-19 矩形 SI 型導波路のミスアライメントトレランス (a)水平方向 (b)垂直方向

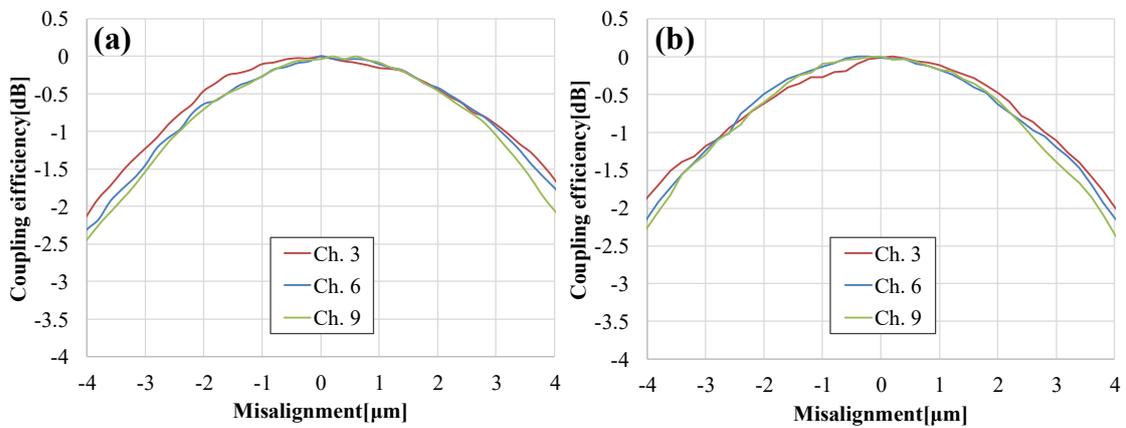


Fig. 5-20 円形 GI 型導波路のミスアライメントトレランス (a)水平方向 (b)垂直方向

ミスアライメントトレランスの測定結果を用い、結合効率が -1 dB となるときの軸ずれ量を知ることで、 -1 dB トレランス幅(軸ずれによる過剰損失を 1 dB 以下に抑えるための許容軸ずれ範囲)を計算することができる。Fig. 5-21 に、 -1 dB トレランス幅の計算結果をまとめる。

Fig. 5-21 より、矩形 SI 型、円形 GI 型導波路ともに、 $4.3 \sim 5.8 \mu\text{m}$ 程度のトレランス幅を示しており、軸ずれによる過剰損失を 1 dB 以下に抑えるためには、 $\pm 2 \sim 3 \mu\text{m}$ の精度での軸合わせが要求されることがわかる。また、導波路間、チャンネル間に大きな差異は見られない。ただし、Fig. 5-7 や Fig. 5-10 に示した MFD の解析結果と照らし合わせると、MFD が大きいチャンネルほど、大きなトレランス幅を示す傾向がわずかにあることが見て取れる。たとえば、円形 GI 型導波路にて、MFD が $8.452 \mu\text{m}$ である Ch. 9 のトレランス幅は $7.46 \mu\text{m}$ であるのに対し、MFD が $10.59 \mu\text{m}$ である Ch. 3 のトレランス幅は $8.29 \mu\text{m}$ と大きい(すべて水平方向の結果を用いている)。これは、導波路の MFD が大きい場合には、SMF との結合部に軸ずれが生じた場合にも、SMF とのモードプロファイルの重なりが持続され、結合効率が悪化しにくいためだと考えられる。

しかしながら、SMF と比べて大きな MFD を示す導波路は、軸ずれ耐性を向上させる可能性がある一方で、これまで議論してきた通り、最適位置合わせ時の結合効率悪化は避けられない。つまり、シングルモードポリマー光導波路を SMF とバットカップリングさせる場合、最適位置合わせ時の結合効率と、軸ずれ耐性はトレードオフの関係にある。最適位置合わせ時の結合効率向上を優先させた場合、接続対象と全く同一のモードプロファイルを有するコアを設計することが望ましい。その場合、軸ずれ耐性も一意に定まり、わずかな軸ずれによって結合効率が低下することとなる。よって、導波路設計の際には、要求される損失値や軸ずれ耐性によって、最適なモードプロファイルを有するコアを形成する必要がある。

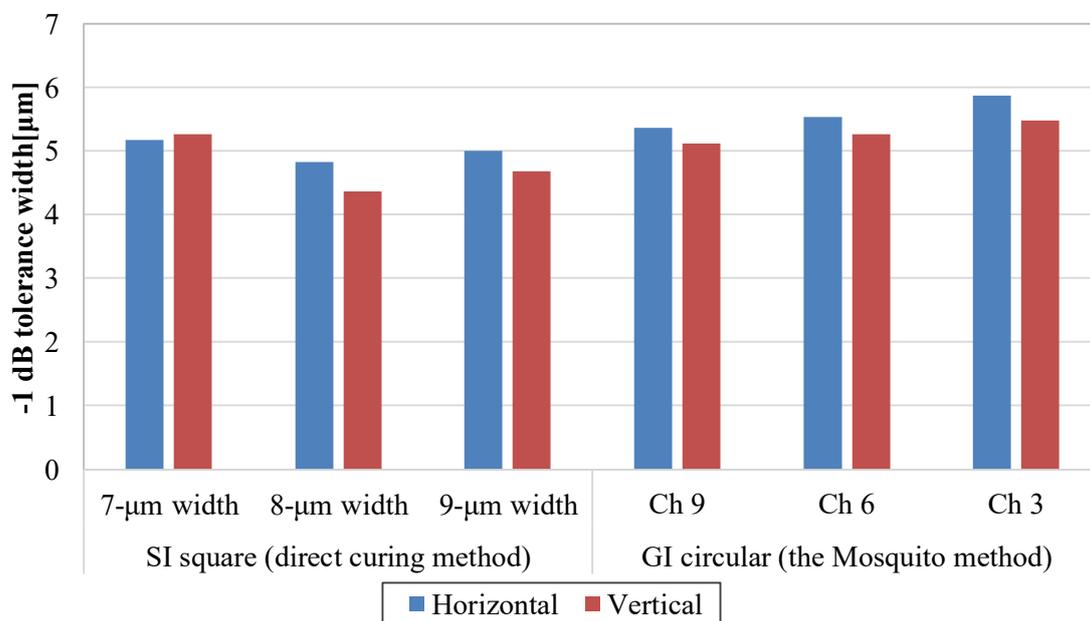


Fig. 5-21 -1 dB トレランス幅

5.2.5 シミュレーションによるシングルモード光導波路の光学特性の検証

本項では、シングルモード光導波路の基本的な光学特性及びバットカップリング時の光結合特性について、導波路モードソルバ FIMMWAVE, FIMMPROP を用いて検討した結果について報告する。

導波路モードソルバ FIMMWAVE では、任意の光導波路断面に対し、断面の境界条件とマクスウェル方程式を満たす条件を数値解析し、光導波路内に発生する固有モードを導き出す。導出された固有モードそれぞれに対し、電磁界分布や実効屈折率を解析することができ

る. FIMMPROP では, 固有モード展開法[5-8]に基づき, FIMMWAVE によって 2 次元断面内にて得られた固有モードを 3 次元方向に展開し, 伝搬させる. 光導波路断面構造が伝搬方向に対して均一な場合, あるいは緩やかな変化を持つ場合であれば, 各固有モードの伝搬・結合を独立して追跡することができる. マルチモード光導波路など, 伝搬モード数が多い場合には, 計算数が膨大となるため適さない. しかし, 本研究のように, 単純な直線パターンのシングルモード光導波路内の光波伝搬を解析するにあたっては, マクスウェル方程式の厳密解を算出するという点で有用である.

5.2.5.1 コア形状及びコア内屈折率分布と MFD の関係

シングルモードポリマー光導波路と他の光学素子との結合を考慮する際, モードプロファイル及びそこから算出される MFD が重要となる. 本項では, シングルモードポリマー光導波路の MFD を決定づける導波路構造について, シミュレーションを用いて解析する.

Fig. 5-22 のように, 矩形 SI 型コア, 円形 GI 型コアに加え, 円形 SI 型コア及び矩形 GI 型コアを設計し, これらを比較することで, コア外形状及びコア内屈折率分布が MFD に与える影響について理論的に検討することとした. 屈折率分布設計には, 円形 GI 型コアは(2-4)式にて $g=2$ としたとき, 矩形 GI 型コアは(2-6)式にて $g=3$ としたときの屈折率分布をそれぞれ用いている.

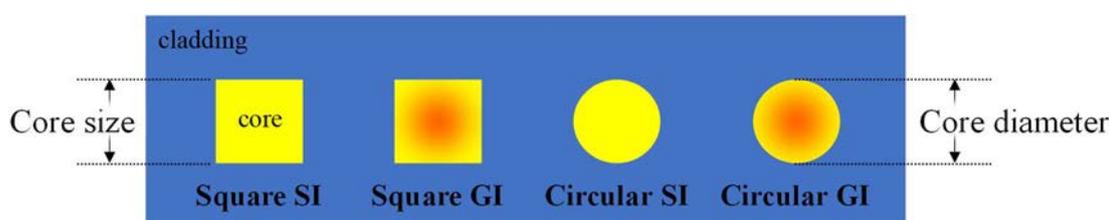


Fig. 5-22 導波路コア設計

まず, 各導波路コアに対し, コアサイズまたはコア径(以下, 「コアサイズ」に統一して表記)を変化させた場合の MFD を計算した. ここで, コア, クラッドの屈折率は 1.567, 1.560, 波長は 1550 nm に設定した. その結果を Fig. 5-23 に示す. シングルモード条件を満たすコアサイズの範囲をグラフ化しており, 各グラフにおける最大コアサイズが, その導波路コアのカットオフコアサイズを示している.

いずれの導波路コアの場合にも, コアサイズに対して極小値を示すグラフの形状となっていることが Fig. 5-23 よりわかる. これは, コアサイズを縮小していった際, ある一定のコアサイズまでは光が十分にコア内に閉じ込められるために, コアサイズの縮小とともに MFD も縮小していくのに対し, コアサイズが一定以上より小さくなった場合には, コア内に閉じ込めきれなくなった光がエバネッセント光としてクラッドにしみ出すため, コアサ

イズ縮小に応じて MFD が拡大していく傾向を示している[5-9].

円形 SI 型コアを矩形 SI 型コアと比較すると、グラフがわずかに右方向にシフトしており、コアの円形化によるカットオフコアサイズの増大(シングルモード条件の緩和)がわずかに見られるが、グラフ形状に大きな相違はない。よって、SI 型屈折率分布の場合には、コア外形状が MFD に与える影響は小さいといえる。

矩形 GI 型コアを矩形 SI 型コアと比較すると、カットオフコアサイズの拡大が見られるとともに、Fig. 5-23 の上方向にもグラフがシフトし、MFD の拡大が生じていることがわかる。コア内に GI 型屈折率分布を形成することで、ローカル NA が低下し、導波路コアの実質的な屈折率差が減少するため、シングルモード条件が緩和したためだと考えられる[5-10]。さらに、矩形 SI 型コアの場合には極小点を境として、コアサイズ変化に伴い MFD が急峻に変化するグラフ形状であるのに対し、矩形 GI 型は矩形 SI 型に比べ緩やかな MFD 変化を示していることがわかる。GI 型屈折率分布を付与することで、コアサイズ変化に対して MFD の変化が鈍感となる傾向を示している。

さらに円形 GI 型コアに注目すると、矩形 GI 型に比べ、グラフ位置がさらに右上方向にシフトしており、カットオフコアサイズ及び MFD の拡大が生じていることがわかる。16 μm という大きなコアサイズでもシングルモード条件を満たしており、そのときの MFD は 8.95 μm にも及ぶ。また、コアサイズに対する MFD の変化がより緩やかな形状を描いていることも見て取れる。矩形 SI 型コアでは、コアサイズが 5 μm から 7 μm に変化したとき、0.84 μm もの MFD 拡大が生じるのに対し、円形 GI 型コアではコアサイズが 10 μm から 12 μm に変化したとき、MFD の拡大量はわずか 0.097 μm である。

SI 型屈折率分布の場合にはコアの円形化は大きな影響を持たなかったのに対し、GI 型屈折率分布の場合には、コアの外形状によってもコア内屈折率分布に差異が生じるため、コア外形状が与える影響が大きいといえる。

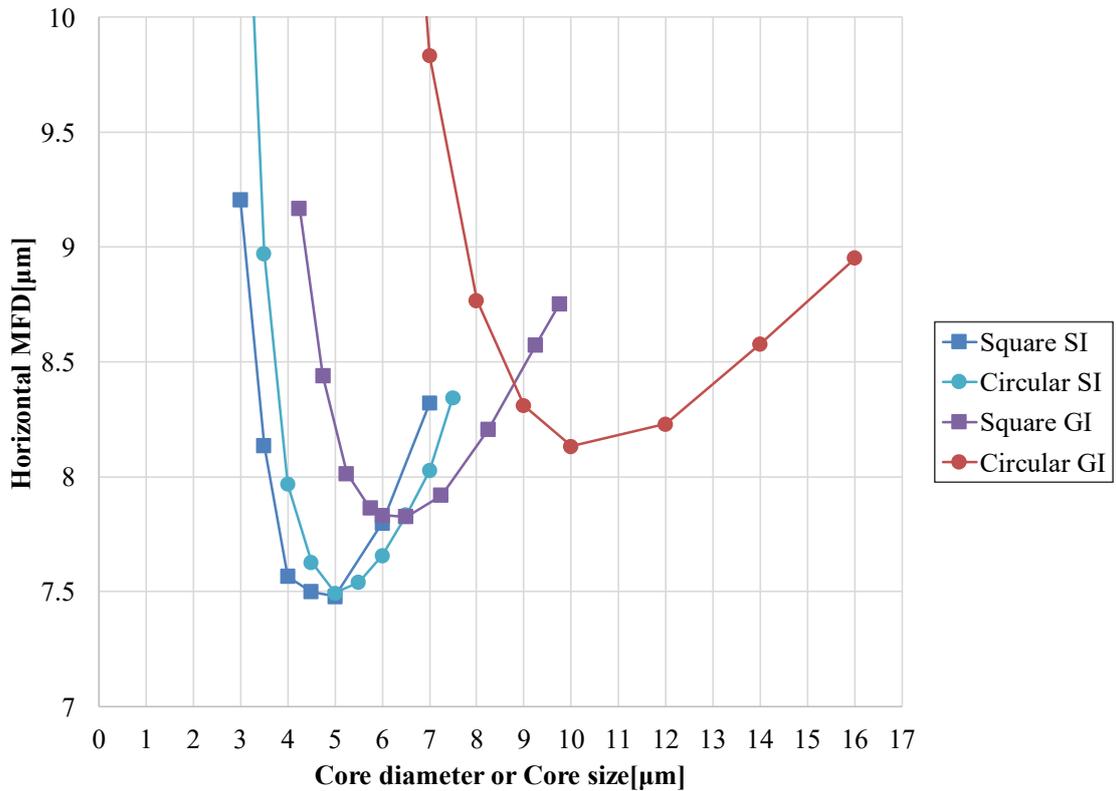


Fig. 5-23 MFD とコアサイズの関係

次に、コアサイズを固定し、導波路の屈折率差を変化させた場合の MFD を計算した。矩形 SI 型、円形 SI 型、矩形 GI 型、円形 GI 型に対し、それぞれコアサイズを 5 μm, 5.5 μm, 7 μm, 12 μm に固定した。これらのコアサイズは、Fig. 5-23 に示した計算結果にて、MFD の極小点付近のプロットを抽出したものである。導波路 NA に対する MFD の計算結果を Fig. 5-24 に示す。

Fig. 5-24 より、導波路コアの種類によらず、導波路 NA の低下とともに、MFD は一様に拡大していることがわかる。よって、MFD と導波路 NA の関係は、導波路コアの外形状や屈折率分布には影響を受けず、導波路の屈折率差によってのみ決定づけられるといえる。

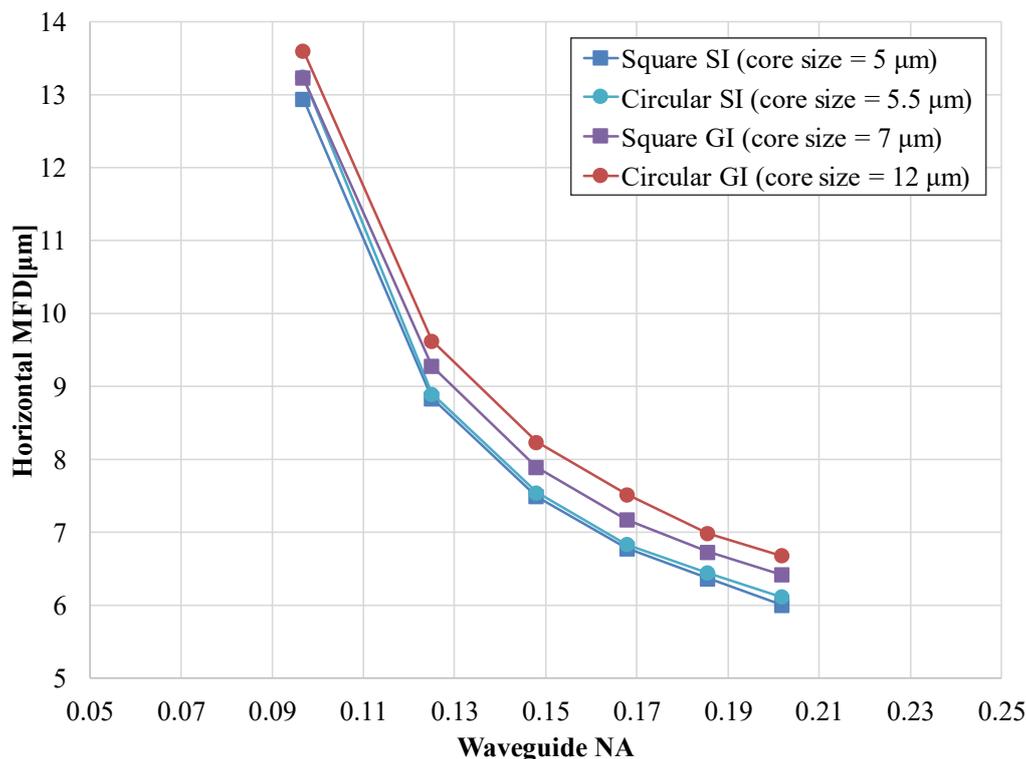


Fig. 5-24 MFD と導波路 NA の関係

以上の理論計算により、円形 GI 型導波路は、SI 型導波路や、矩形コア導波路に比べ、シングルモード条件が緩和されるため、大きなコアサイズでもシングルモード条件を満たし、より大きな MFD を実現可能であることを確認した。

なお、Mosquito 法では、露光待機時間によって導波路のコア径が変化すると同時に、屈折率差及び折率分布も変化していく。そのため、Fig. 5-23 及び Fig. 5-24 に示した、導波路のコアサイズ及び NA が MFD に与える影響が複合的に作用するため、導波路コアの MFD の予測は非常に複雑となる。当研究室では現在、Fick の法則を用いてコア、クラッドモノマー間の拡散現象を理論的に解析し、任意の露光待機時間に対する両モノマーの濃度分布及びそれにより決定づけられる屈折率分布を推定する検討に着手している[5-11]。この検討により、任意の露光待機時間を与えられた導波路コアの MFD を予測することも可能になってきている[5-12]。

なお、本項目では、他の光学素子との結合を考えるうえで MFD に注目したが、たとえ MFD が一致していたとしても、モードプロファイルが一致しているとは限らず、結合効率が悪化するおそれがある。結合効率を議論するためには、コア形状が変化した際のモードプロファイルへの影響を詳細に検討する必要があることに留意しなければならない。これについては次の項目にて論じる。

5.2.5.2 結合損失を決定づける導波路構造

本項では、シングルモード光導波路と SMF を接続した際に生じる結合損失について、導波路のコア外形状、コア内屈折率分布、コアサイズ等を変化した場合を想定し、シミュレーションを用いた理論計算にて検討していく。

シミュレーション設計

SMF との結合損失をシミュレーションにて評価するのにあたり、まず、実測評価にて励振プローブ及び受光プローブとして用いた、住友電気工業(株)製の PA-A2 ファイバと同等の構造をシミュレーションにて設計する。PA-A2 ファイバの構造パラメータ(コア径や屈折率等)に関する具体的な情報は開示されていないが、カットオフ波長が 1260 nm であることと、通常の SMF に比べて高 NA であることはわかっている[5-1]。この情報に加え、Fig. 5-2 に示した PA-A2 ファイバの NFP から解析される MFD は波長 1310 nm, 1550 nm にてそれぞれ 7.177 μm , 7.752 μm であったことから、これらの条件をすべて満たすファイバ構造を Table 5-1 のように設計した。Table 5-1 のパラメータを用いて設計されたコアの MFD は Table 5-2 のように計算され、実際の PA-A2 ファイバの MFD の測定値に十分近い値となっている。以下の検討では、原則として Table 5-1 の構造パラメータを有する SMF との結合を想定し、結合効率の評価を行っていく。

Table 5-1 PA-A2 ファイバのシミュレーション設計

	1310 nm	1550 nm
Core size	6.4 μm	
n_{core}	1.45435	1.45159
n_{clad}	1.44680 (SiO ₂)	1.44402 (SiO ₂)
Waveguide NA	0.148	

Table 5-2 PA-A2 ファイバのシミュレーション上の MFD

		1310 nm	1550 nm
MFD	Vertical	7.068 μm	7.792 μm
	Horizontal	7.066 μm	7.798 μm

次に、本シミュレーションにて評価する光導波路を設計する。Fig. 5-22 に示したような、矩形 SI 型、円形 SI 型、矩形 GI 型、円形 GI 型導波路について評価・比較する。結合効率を評価するうえでは、MFD 及びモードプロファイルの一致が最重要であることはこれまで議

論してきたとおりであるが、コア形状やコア内屈折率分布の異なる導波路どうしを比較する場合、Fig. 5-23 の結果からわかる通り、MFD が互いに大きく異なるために、明確な基準を設けて比較する必要がある。

そこで、導波路どうしの MFD の統一を図るため、PA-A2 ファイバとほぼ同等の MFD を有するような導波路構造を設計し、その構造を基準とすることとした。

コアサイズに対する MFD の傾向は、Fig. 5-23 にて議論したように、極小点を持つグラフ形状となる。極小点よりコアサイズが大きい側では、コア内に十分光が閉じ込められているのに対し、極小点よりコアサイズが小さい側では、コア内に光が閉じ込めきれなくなり、エバネッセント光としてクラッドにしみ出している。両者を区別するために、前者のモードを閉じ込めモード、後者をエバネッセントモードと名付けることとする(Fig. 5-25 参照)。

各導波路に対し、閉じ込めモード、エバネッセントモードそれぞれについて、MFD が PA-A2 とほぼ等しくなるように導波路構造を設計したところ、Table 5-3 に示す構造が得られた。波長は 1550 nm に統一している。Table 5-3 に示すように、矩形 SI 型、円形 SI 型、矩形 GI 型、円形 GI 型導波路に対し、閉じ込めモード、エバネッセントモードそれぞれについて、MFD が約 7.79 μm となる導波路構造が設計できている。以下では、この導波路構造を基準として、検討を行っていく。

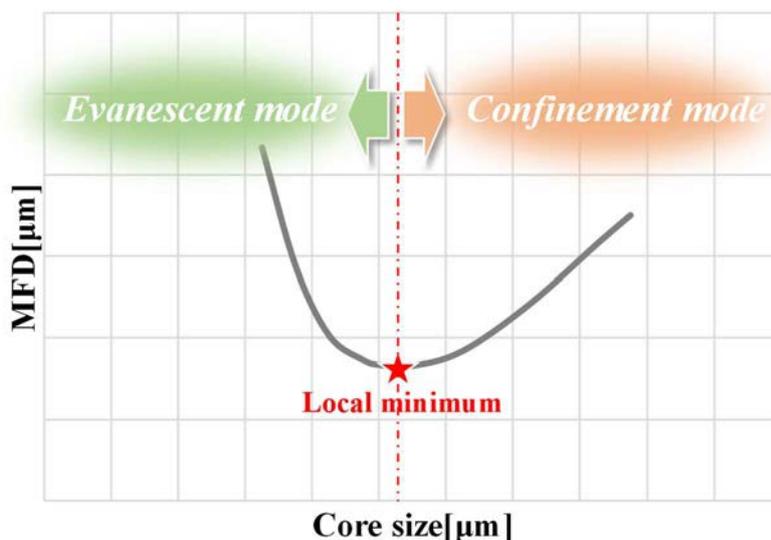


Fig. 5-25 閉じ込めモードとエバネッセントモードの定義

Table 5-3 SMF と MFD が一致する導波路コアのシミュレーション設計

	Square SI		Circular SI		Square GI		Circular GI	
	Confinement	Evanescent	Confinement	Evanescent	Confinement	Evanescent	Confinement	Evanescent
Core size	6.4 μm	3.32 μm	6.4 μm	4.19 μm	8.2 μm	4.4 μm	13.8 μm	6.77 μm
n_{core}	1.45232		1.45159		1.452861		1.453996	
n_{clad}	1.44402 (SiO ₂)							
Waveguide NA	0.155		0.148		0.160		0.170	
MFD (H)	7.7948 μm	7.8014 μm	7.7945 μm	7.7945 μm	7.7956 μm	7.7911 μm	7.7939 μm	7.7966 μm
MFD (V)	7.7949 μm	7.7912 μm	7.7881 μm	7.7838 μm	7.7935 μm	7.7799 μm	7.7906 μm	7.7843 μm

結合効率を評価する際のシミュレーションモデルを Fig. 5-26 に示す. PA-A2 ファイバと光導波路をバットカップリングしたモデルであり, PA-A2 ファイバ側の端面から入射した各モード光の, 光導波路側の出射端面での各モードへの遷移率を計算することができる. 本シミュレーションでは伝搬損失は計算されないため, このモデル内では結合損失のみが生じる. よって, 導波路出射端面での光強度を検出することで, PA-A2-光導波路間にて生じた結合損失を計算することができる.

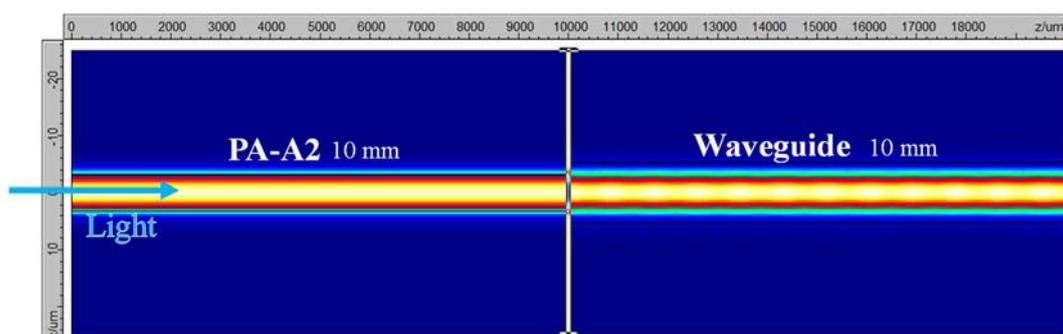


Fig. 5-26 結合効率評価のためのシミュレーションモデル

モードプロファイルと結合効率の関係

ここまでの検討にて, 結合効率向上のためには, MFD の一致のみならず, モードプロファイルの一致が重要であることを述べた. ここでは, 導波路コアの外形状や屈折率分布ごとのモードプロファイルの相違に注目し, 結合損失への影響について検討する.

Table 5-3 にて設計した, MFD が互いに一致している導波路に対し, 出射強度プロファイルと比較する. 水平方向のコア中心線上の一次元プロファイルを, 閉じ込めモード, エバネッセントモードについて, それぞれ Fig. 5-27, Fig. 5-28 に示す. 閉じ込めモード, エバネッセントモード双方にて, 導波路コアの種類によってプロファイルのわずかな相違が見られるものの, 一次元プロファイルで見ている限りは, 大きな相違は見受けられない.

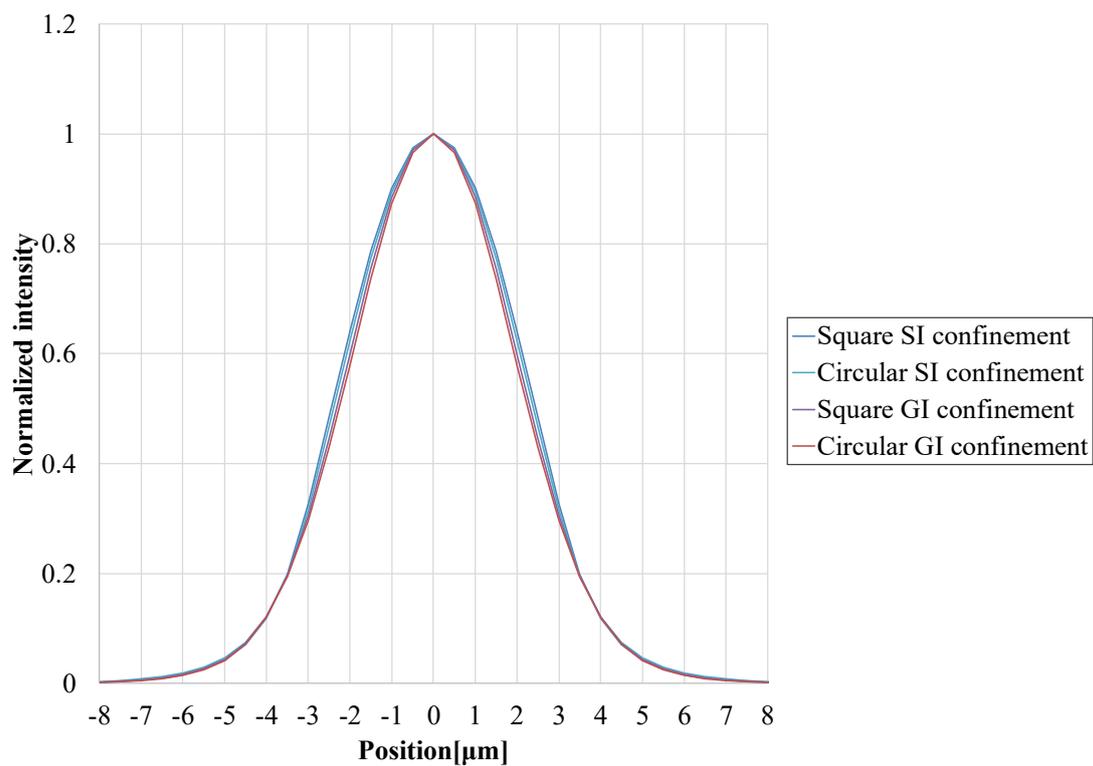


Fig. 5-27 閉じ込めモードの一次元出射強度プロファイル

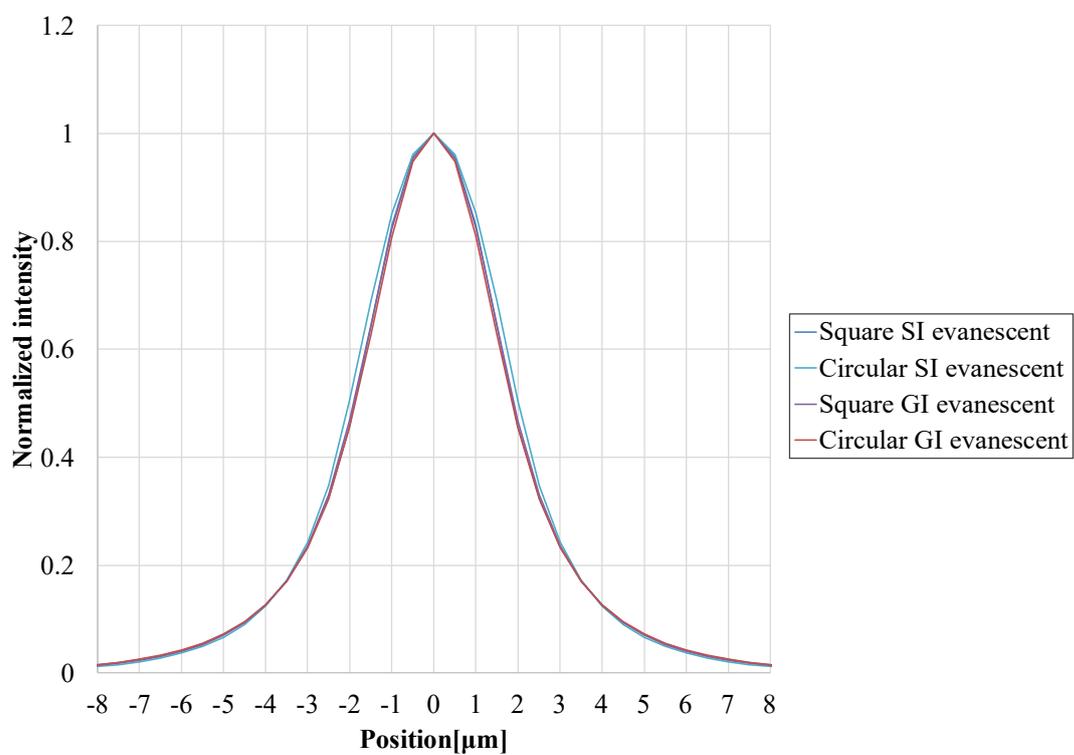


Fig. 5-28 エバネッセントモードの一次元出射強度プロファイル

ここで、円形 SI 型導波路のみに注目し、閉じ込めモードとエバネッセントモードの出射強度プロファイルと比較したものを Fig. 5-29 に示す。設計通り、強度が最大強度の $1/e^2$ となる径である MFD は一致しているが、その他の位置ではプロファイルに相違があることがわかる。このように、MFD が一致していたとしても、プロファイルが一致しているとは限らず、特に閉じ込めモードとエバネッセントモードの間にはプロファイルの大きな相違が生まれるおそれがある。

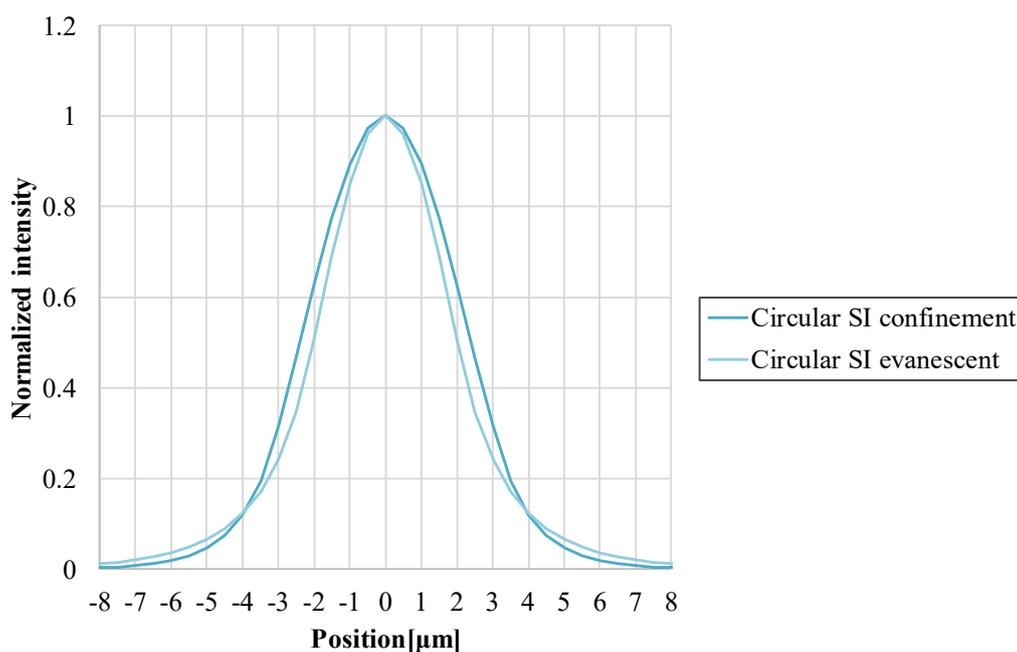


Fig. 5-29 閉じ込めモードとエバネッセントモードの出射強度プロファイル比較
(円形 SI 型導波路)

次に、これらの導波路に対し、PA-A2 ファイバとの結合損失を計算した結果を示す。閉じ込めモード、エバネッセントモードの場合の結合損失計算結果を Fig. 5-30, Fig. 5-31 にそれぞれ示す。

閉じ込めモードの場合、円形 SI 型導波路は PA-A2 ファイバと全く同一のコア構造を設計しているので、結合損失の理論計算値は当然 Fig. 5-30 のようにゼロとなる。矩形 SI 型、矩形 GI 型、円形 GI 型については、結合損失がわずかに生じている。これは、Fig. 5-27 にて確認された、プロファイルの若干の相違によるものである。しかしながら、結合損失値はわずか 0.01 dB 未満であることから、MFD が接続対象と一致し、かつ導波路構造に対称性がある場合には、大きな過剰損失につながるほどのプロファイルの相違は生じないといえる。

これに対し、エバネッセントモードの場合は、いずれの導波路でも 0.2~0.35 dB 程度の結

合損失が生じていることが Fig. 5-31 よりわかる。これは、PA-A2 ファイバの伝搬モードは閉じ込めモードであり、エバネッセントモードが伝搬する導波路コアとの間には、Fig. 5-29 に示したモードプロファイルの相違があったためであると考えられる。このように、MFD が一致しているのにも関わらず大きな結合損失が生じる場合があることがわかり、シングルモードポリマー光導波路の結合効率向上を目指すうえでは、モードプロファイルの制御が重要であることが再確認された。



Fig. 5-30 MFD 一致時の SMF との結合損失(閉じ込めモード)

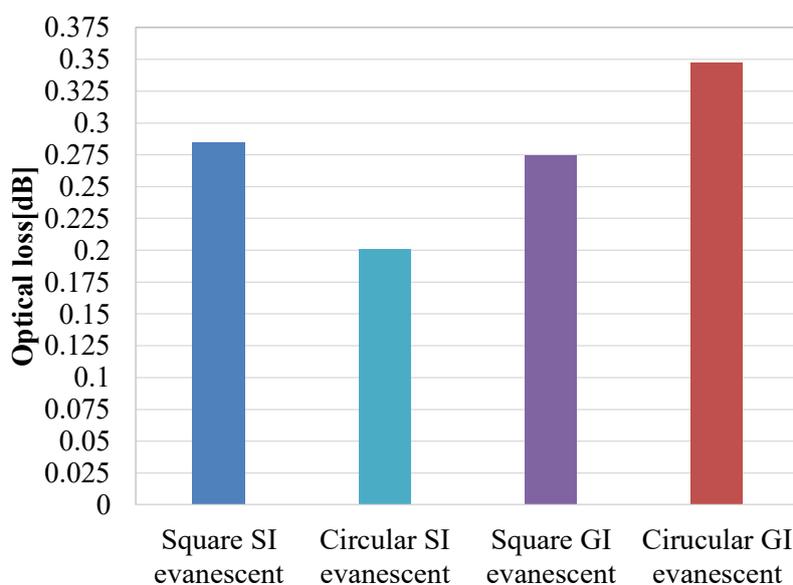


Fig. 5-31 MFD 一致時の SMF との結合損失(エバネッセントモード)

矩形コア歪みによるプロファイル及び結合損失への影響

前項目の検討では、コアが対称構造を持っている場合のみを想定していた。直接露光法で作製した矩形 SI 型シングルモードポリマー光導波路は、コア形状は完全な正方形あるいは長方形であることが理想であるが、実際には、Fig. 5-3 に示したように、台形状となり、かつコア上部の角は丸みを帯びる傾向にある。また、直接露光法では、アンダークラッド、コア、オーバークラッドの三層の積層工程を踏み、層ごとに露光回数が異なるため、アンダークラッドとオーバークラッドの屈折率が異なることが予想される。本項目では、コア構造に歪みや非対称性が生じた場合のモードプロファイルや結合損失への影響を検討した。

本項目で設計した導波路コアを Fig. 5-32 に示す。長方形コアに加え、上底と下底の長さが異なる台形コア、上部のみ丸みのある半円筒形コア、クラッドの屈折率が層ごとに異なるコアを設計した。

これら 4 種類の導波路に対し、閉じ込めモードの MFD が PA-A2 ファイバとほぼ一致するように導波路構造パラメータを設計した結果を Table 5-4 にまとめる。水平、垂直方向の MFD の平均値が約 $7.79 \mu\text{m}$ となるように設計されている。

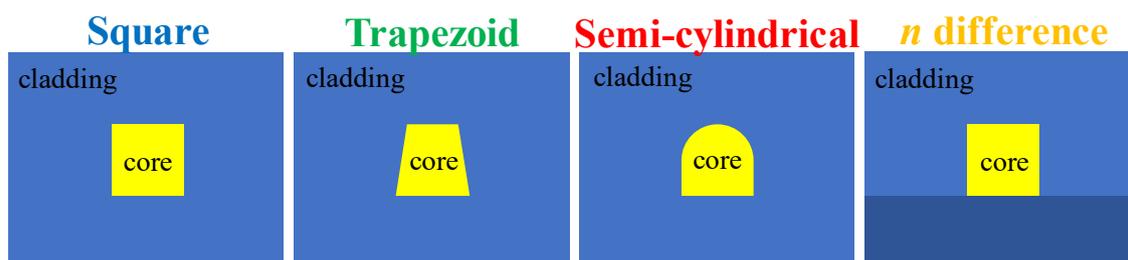


Fig. 5-32 直接露光法を想定した導波路コア設計

Table 5-4 SMF と MFD が一致する導波路コア(直接露光法想定)のシミュレーション設計

	Square SI	Trapezoid	Semi-cylindrical	<i>n</i> difference
Core width	6.4 μm	5.4 μm / 7.3 μm	6.4 μm	6.4 μm
Core height	6.4 μm	6.4 μm	6.4 μm	6.4 μm
n_{core}	1.45232	1.45232	1.451897	1.453082
n_{clad}	1.44402 (SiO ₂)	1.44402 (SiO ₂)	1.44402 (SiO ₂)	1.4460 / 1.44402 (SiO ₂)
MFD (H)	7.7948 μm	7.7950 μm	7.8147 μm	7.6468 μm
MFD (V)	7.7949 μm	7.7953 μm	7.7684 μm	7.9290 μm
MFD (ave.)	7.7948 μm	7.7951 μm	7.7916 μm	7.7879 μm

4 種類の導波路の出射強度プロファイルを比較するため、水平方向のコア中心線上の一次元プロファイルを図 5-33 に示す。各導波路コアのプロファイルはほぼ一致しており、相違はほとんど見られない。よって、コア中心線上の一次元プロファイルを見ている限りは、コア形状や屈折率の歪みによるプロファイルの乱れは生じていないように見受けられる。

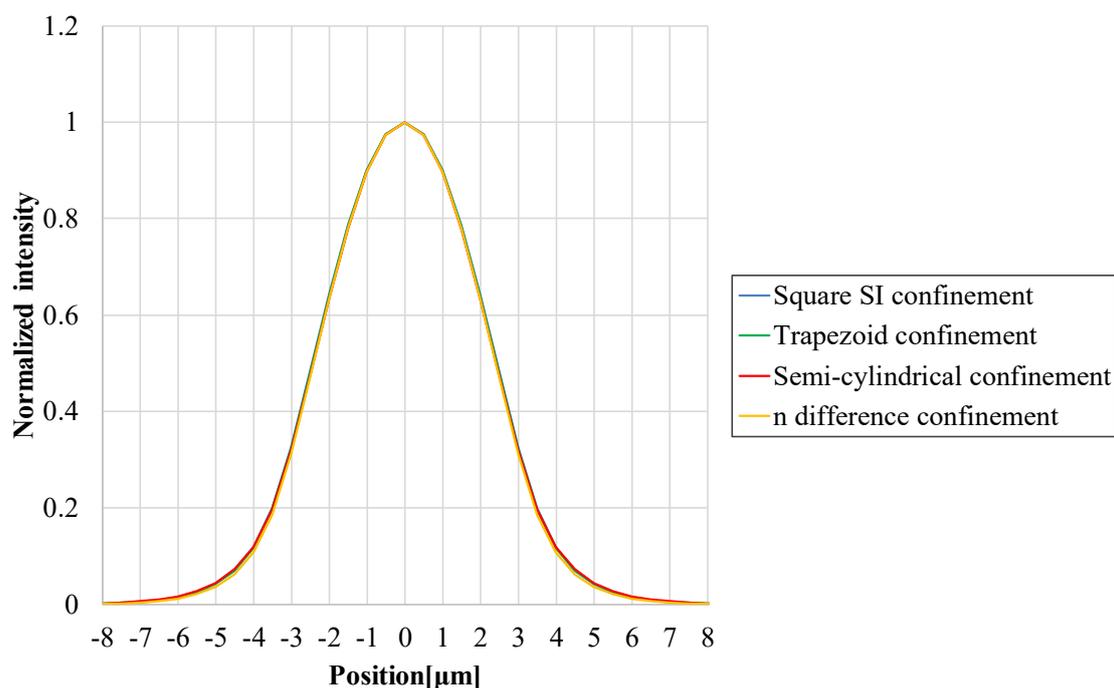


Fig. 5-33 直接露光法想定導波路コアの一次元出射強度プロファイル

次に、4種類の導波路に対し、Fig. 5-26に示したシミュレーションモデルにて、PA-A2ファイバとの結合損失を計算した結果をFig. 5-34に示す。矩形SI型コアではわずか0.010 dBであった結合損失が、台形コアでは0.014 dB、半円筒形コアでは0.025 dB、クラッド屈折率が異なるコアでは0.026 dBとなり、非対称構造ゆえの過剰損失が見られる。結合損失の絶対値は最大で0.026 dB程度と小さい値ではあるが、矩形コアと比べた場合、2.5倍にも及ぶ損失上昇が発生している点は無視できない。Fig. 5-33に示した一次元プロファイルではほとんど相違が見られなかったにもかかわらず損失上昇を生じたことから、コア中心線を通る一次元プロファイルによる評価では不十分であったといえる。

よって、コア形状や屈折率の歪みにより対称構造が崩れた場合には、特有の過剰損失が生じるおそれがあり、モードプロファイルの二次元的な一致が重要であることがわかった。

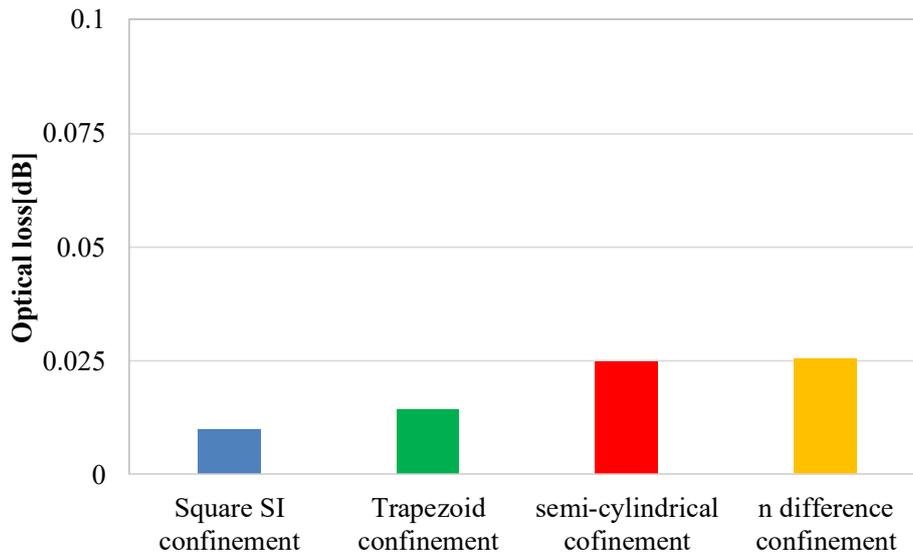


Fig. 5-34 直接露光法想定導波路コアの MFD 一致時の SMF との結合損失

コアサイズ変化による結合損失への影響

前項目までの検討にて、MFD が一致している場合のモードプロファイル及び結合損失について明らかにした。本項目では、矩形 SI 型、円形 SI 型、矩形 GI 型、円形 GI 型導波路に対し、コアサイズが変化した場合の結合損失への影響を検討した。

Table 5-3 にて設計した、閉じ込めモードの基準コア構造から、コア幅のみが変化(コア縦横比が変化)していく場合と、コア高さと同様にコア幅が同時に変化(コアサイズが変化)していく場合、双方について結合損失を計算した。コア幅変化の場合の結果を Fig. 5-35 に、コアサイズ変化の場合の結果を Fig. 5-36 にそれぞれ示す。

Fig. 5-35 に注目すると、基準構造からコア幅が変化していくにつれて、過剰損失が生じていくことがわかる。コア幅が変化することによって導波路の MFD が変化し、SMF との MFD 及びモードプロファイルの不一致が生じるためと考えられる。導波路間の差異に注目すると、矩形 SI 型、円形 SI 型導波路に比べ、矩形 GI 型、円形 GI 型導波路はコア幅ずれが生じた場合にも過剰損失を低く抑えることができている。これは、Fig. 5-23 にて確認したように、GI 型の場合にはコア幅が変化した際にも、MFD が大きく変化しない特有の傾向があるためだと考えられる。ただし、コア幅ずれが $\pm 2 \mu\text{m}$ 程度の範囲内であれば、いずれの導波路についても、過剰損失は 0.05 dB 以下にとどまり、導波路間に大きな差は生じていない。

コアサイズずれの場合には、コア幅のみが変化していく場合と比べて、より大きな過剰損失が生じていくことが Fig. 5-36 よりわかる。特に矩形 SI 型、円形 SI 型の場合には、コアサイズ縮小方向、拡大方向双方にて損失の急上昇が見られる。コアサイズ縮小方向に見られる損失上昇は、コアサイズ縮小によりコア内のモードが閉じ込めモードからエバネッセントモードへと変化し、閉じ込めモード-エバネッセントモード間のモードプロファイルの不一致(Fig. 5-29 参照)が生じていくためである。コアサイズ拡大方向に見られる損失上昇は、

MFD の不一致による過剰損失に加え、導波路コアのシングルモード条件が不成立となり、最低次以外のモードが存在し得ることによって基底モードどうしの結合効率が低下するためだと考えられる。

これに対し、円形 GI 型導波路の場合には、コア幅ずれの場合とほとんど傾向が変わらず、大きなコアサイズずれがある場合にも低損失を維持している。4 μm のコア幅ずれが生じた場合にも、結合損失は 0.03 dB にも満たない。これは、Fig. 5-23 にて議論したように、矩形 SI 型導波路ではコアサイズに対して MFD が急激に変化し、SMF との結合効率が悪化してしまうのに対し、円形 GI 型導波路はコアサイズが変化した場合にも MFD が比較的鈍感に推移するため、SMF との MFD の一致を維持できるためである。特に、矩形 SI 型導波路では、モードプロファイルが SMF と良く一致する閉じ込めモードを実現するコアサイズの範囲が狭く、すぐにエバネッセントモードへと推移して大きな結合損失を生じてしまうのに対し、円形 GI 型導波路はより広いコアサイズ範囲にて閉じ込めモードを実現するため、SI 型にて見られた損失の急上昇をまねくことがない。また、円形 GI 型導波路はカットオフコアサイズが大きく、より大きなコア径でもシングルモード条件を満足するため、高次モード発生による結合効率低下も生じにくい。

よって、円形 GI 型導波路は、コアサイズ的设计ずれが生じた場合にも、SMF との高結合効率を維持できる可能性があるといえる。

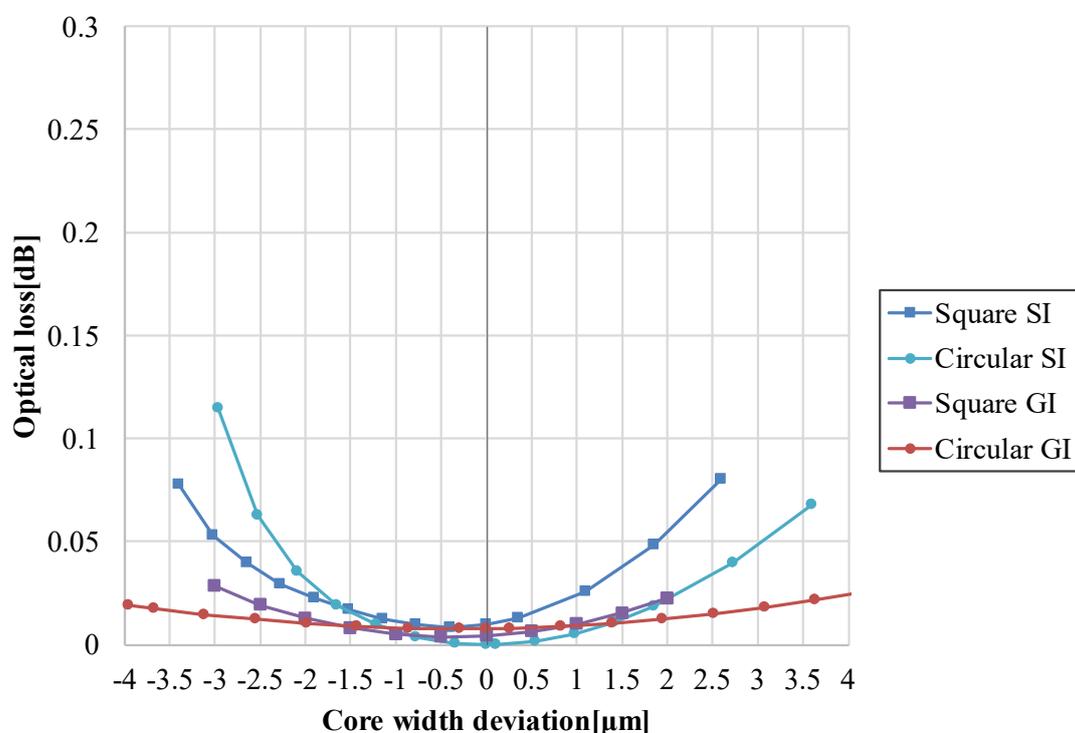


Fig. 5-35 光損失とコア幅ずれの関係

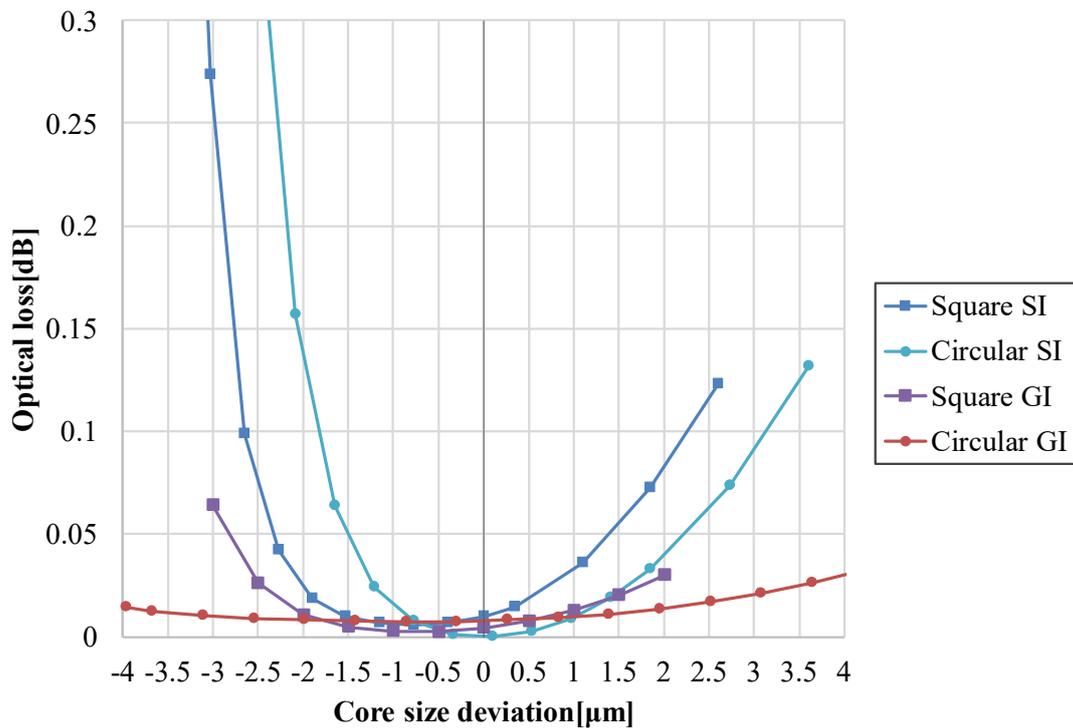


Fig. 5-36 光損失とコアサイズずれの関係

5.2.5.3 ミスアライメントトレランス

5.2.4 項にて、矩形 SI 型導波路と円形 GI 型導波路のミスアライメントトレランスを実測し、シングルモードポリマー光導波路の軸ずれ耐性は MFD の大きさのみで決定づけられることを示した。本項では、シングルモード光導波路の軸ずれ耐性をシミュレーションにて検討することで、実測での考察の裏付けを図る。

Table 5-3 にて設計した導波路に対し、Fig. 5-26 に示したシミュレーションモデルにて、PA-A2 ファイバに軸ずれを加えた場合の結合効率を計算した。導波路が閉じ込めモード、エバネッセントモードの場合のミスアライメントトレランス計算結果を Fig. 5-37, Fig. 5-38 にそれぞれ示す。閉じ込めモード、エバネッセントモードの場合ともに、導波路間のミスアライメントトレランスのグラフ形状の相違はほとんど見られない。同等の MFD を有する複数の導波路が、同等の軸ずれ耐性を示したことから、シングルモード光導波路の軸ずれ耐性は MFD(モードプロファイル)の大きさのみで決定づけられ、導波路の種類には依存しないといえる。

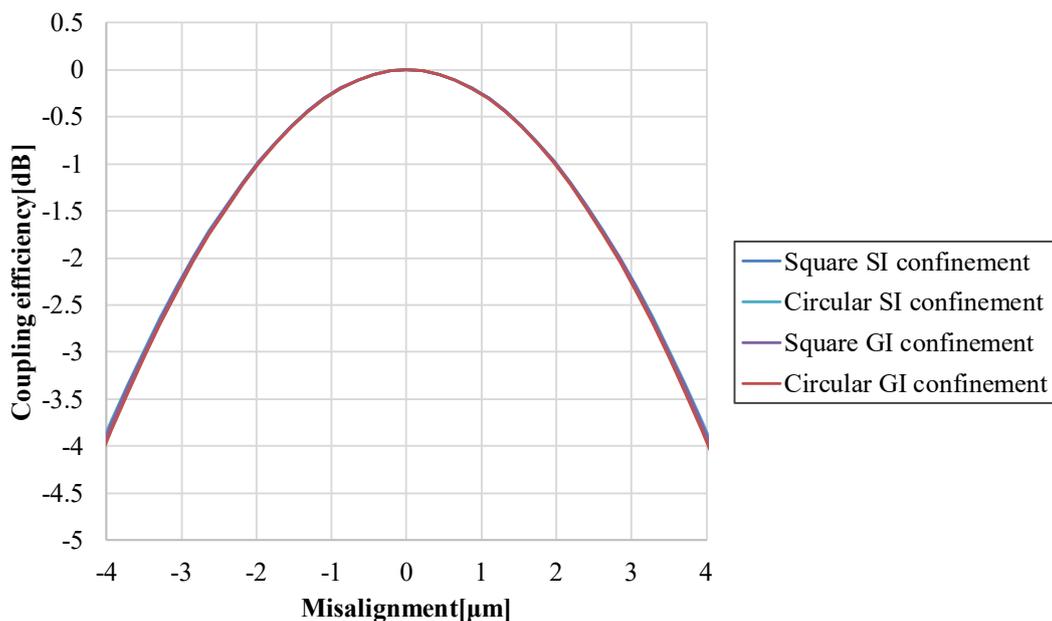


Fig. 5-37 SMF とのミスアライメントトレランス(閉じ込めモード)

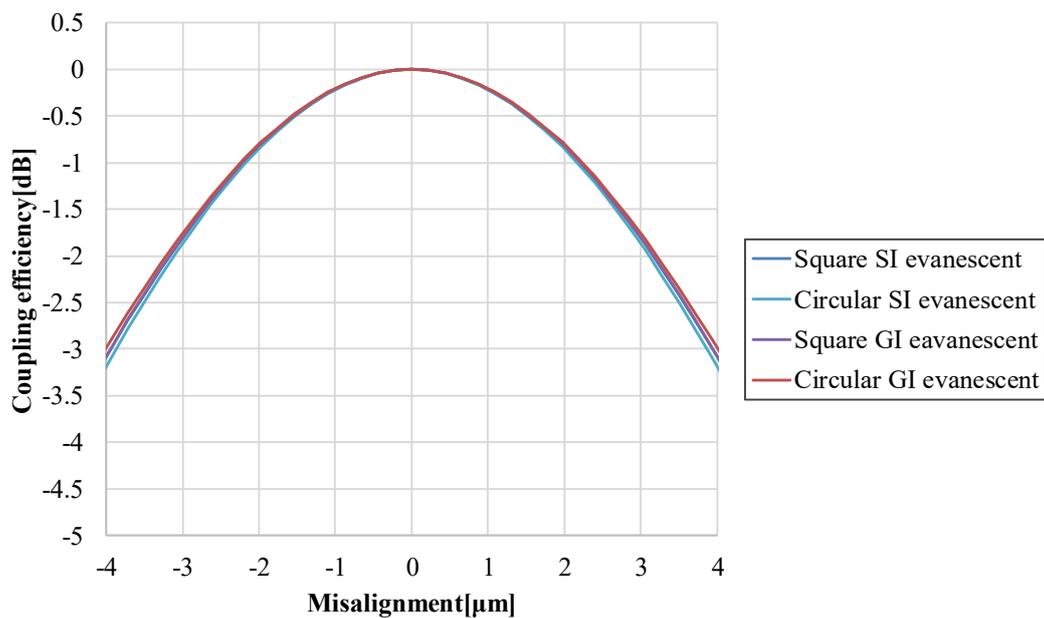


Fig. 5-38 SMF とのミスアライメントトレランス(エバネッセントモード)

ここで、円形 SI 型導波路のみに注目し、閉じ込めモード、エバネッセントモードを比較した場合のミスアライメントトレランスを Fig. 5-39 に示す。エバネッセントモードの場合、閉じ込めモードの場合に比べて広いミスアライメントトレランスを示すことがわかる。各ミスアライメントトレランスの計算結果から得られる -1 dB トレランス幅を Fig. 5-40 に

まとめる．閉じ込めモードの場合には，すべての導波路にて $3.99\ \mu\text{m}$ 程度の $-1\ \text{dB}$ トレランス幅を示すのに対し，エバネッセントモードの場合には $4.33\sim 4.47\ \mu\text{m}$ 程度の $-1\ \text{dB}$ トレランス幅を示し，軸ずれ耐性が向上している．これは，エバネッセントモードの場合には，モードプロファイルが閉じ込めモードに比べ細い形状を示している(Fig. 5-29 参照)ため，PA-A2 ファイバとの結合部に軸ずれが生じた場合にも，PA-A2 ファイバとのモードプロファイルの重なりが持続され，結合効率が悪化しにくいためだと考えられる．この傾向は，5.2.4 項にて論じた実測結果とも一致する．このように，MFD が一致していてもモードプロファイル形状が大きく異なれば軸ずれ耐性にも違いが現れることが確認された．

5.2.4 節でも述べたように，SMF と比べて大きな(あるいは小さな)MFD を示す導波路は，軸ずれ耐性を向上させる可能性がある一方で，最適位置合わせ時の結合効率悪化は避けられないという，トレードオフの関係を示す．本シミュレーション結果でも，高軸ずれ耐性を示したエバネッセントモードの導波路は，最適起位置合わせ時には $0.2\sim 0.35\ \text{dB}$ 程度の大きな結合損失を生ずることが，Fig. 5-31 の計算結果にてすでに示されている．よって，導波路設計の際には，要求される損失値や軸ずれ耐性によって，最適なモードプロファイルを有するコアを形成する必要があることが，シミュレーションによっても確認された．

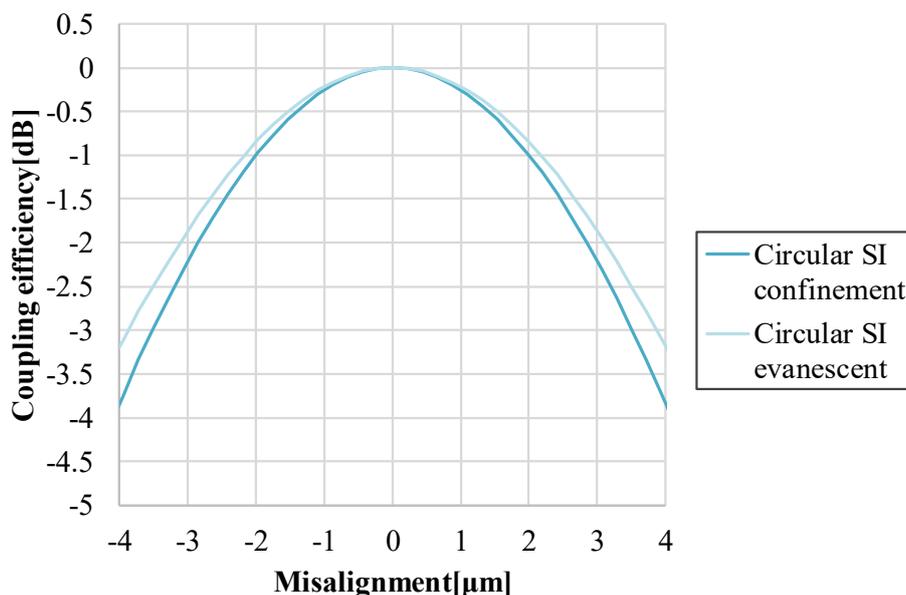


Fig. 5-39 閉じ込めモードとエバネッセントモードのミスアライメントトレランス比較 (円形 SI 型導波路)

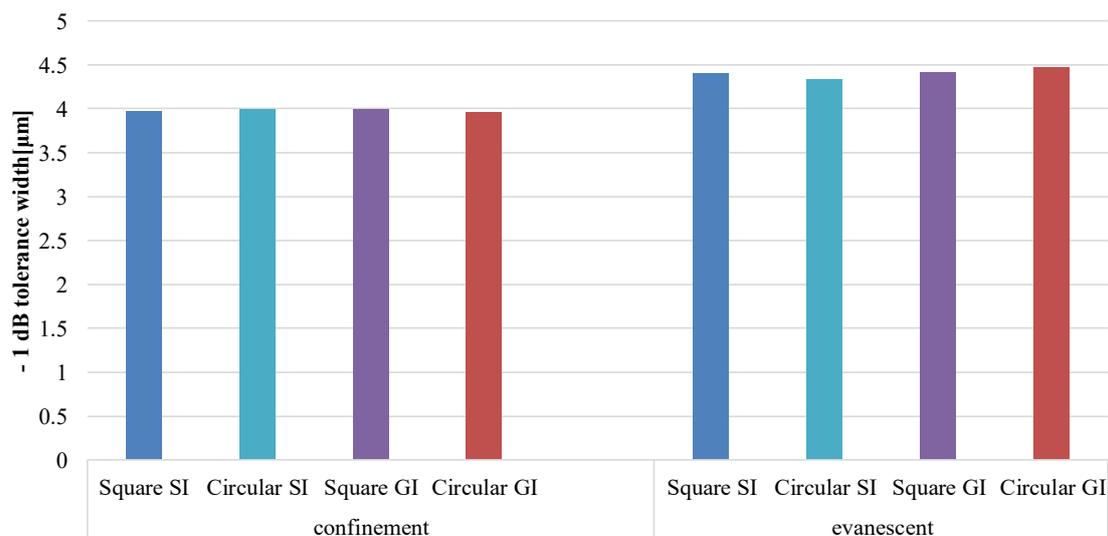


Fig. 5-40 -1 dB トレランス幅計算結果

5.3 シングルモードポリマー光導波路-シリコン細線導波路間の

アディアバティックカップリングシミュレーション

前節では、シングルモードポリマー光導波路をシングルモードファイバ(SMF)とバットカップリングした際の光結合特性について、実測評価及び理論計算によって詳細に検討した。これに対し、シリコン細線導波路との結合の際に想定されるアディアバティックカップリングを実現するためには、Fig. 5-41 に示すように、ポリマー光導波路コアの剥き出し構造を形成し、シリコン細線導波路コアと接触させるか、あるいはシリコン細線導波路コアを内包する形でポリマー光導波路コアを形成する必要がある。当研究室では、このような構造を有するポリマー光導波路を作製するべく検討を進めている。

本節では、導波路モードソルバを用いた理論計算にて、シリコン細線導波路-ポリマー光導波路コア間のアディアバティックカップリング特性について検証する。

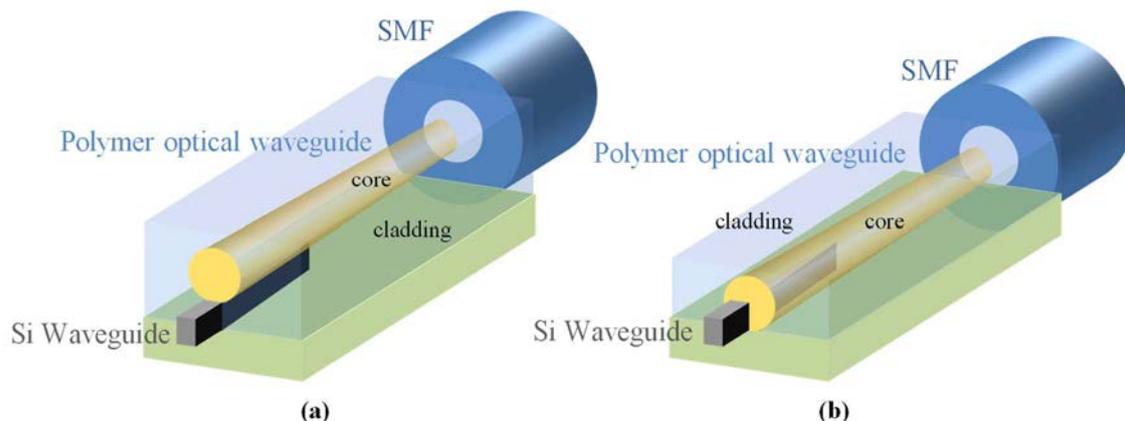


Fig. 5-41 アディバティックカップリング方式 (a)コア剥き出し形式 (b)コア内包形式

5.3.1 シミュレーション設定

本シミュレーションでは、チップ上に形成されたシリコン細線導波路に対して、コアが剥き出しとなったポリマー光導波路を接触させた場合(Fig. 5-41(a)参照)を想定した。Fig. 5-42 にシミュレーションモデルを示す。

シリコン細線導波路のコア(Si , $n_{1550} = 3.477$)は、酸化ケイ素クラッド(SiO_2 , $n_{1550} = 1.444$)上に形成された剥き出し形状を有しており、 SiO_2 クラッド及び空気($n = 1.0$)との屈折率差によりコア内に光を閉じ込める。アディバティックカップリング実現のためには、コア内に存在する最低次モードの実効屈折率及び伝搬定数を伝搬方向に対して徐々に減少させるべく、コアを先細りのテーパ形状とする必要がある。シリコン細線導波路は、半導体プロセスと同様にリソグラフィプロセスによって作製されるため、同一平面内配線パターンの自由度が高い。そのため、コア高さは一定としたうえで、コア幅のみが同一平面内にて変化するテーパ形状を設計した。コア高さは $0.22 \mu\text{m}$ に固定し、コア幅は一方の端面では $0.4 \mu\text{m}$ 、他方の端面では $0.1 \mu\text{m}$ とした。シリコン細線導波路のコア幅と実効屈折率の関係を計算した結果を Fig. 5-43 に示す。Fig. 5-43 より、コア幅が $0.4 \mu\text{m}$ である端面では、TE, TM モードの実効屈折率はそれぞれ 2.18, 1.75 と計算されるのに対し、コア幅が $0.3 \mu\text{m}$ にまで減少した際には、TE, TM モードの実効屈折率はそれぞれ 1.70, 1.63 にまで減少していることがわかる。TE モードはコア幅 $0.265 \mu\text{m}$ 未満、TM モードはコア幅 $0.2125 \mu\text{m}$ 未満にてシリコン細線導波路内に存在し得なくなる。

ポリマー光導波路断面は、コアを取り巻く四方向のうち一方のみがコア剥き出し構造となっており、その面にてシリコン細線導波路と接している。ポリマー光導波路のコアサイズは伝搬方向に対して一定であり、テーパ形状とはなっていない。ポリマー光導波路のコア、クラッドの屈折率は 1.573, 1.560 にそれぞれ設定している。

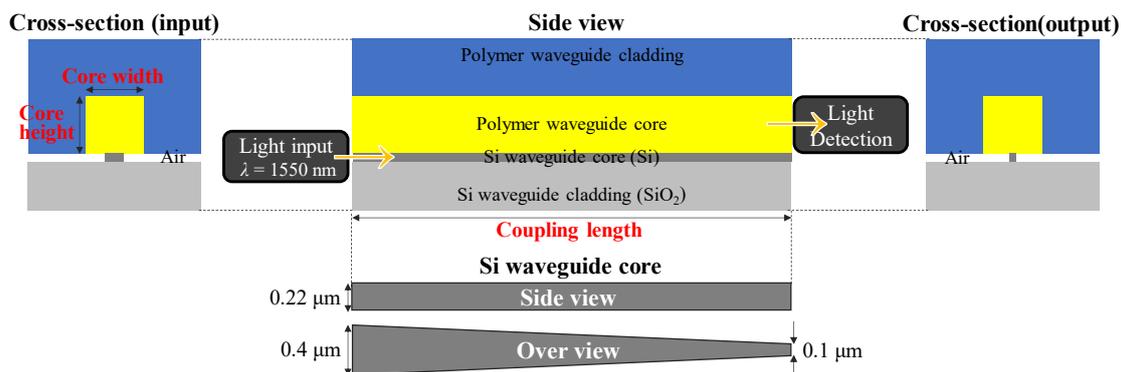


Fig. 5-42 アディアバティックカップリングシミュレーションモデル

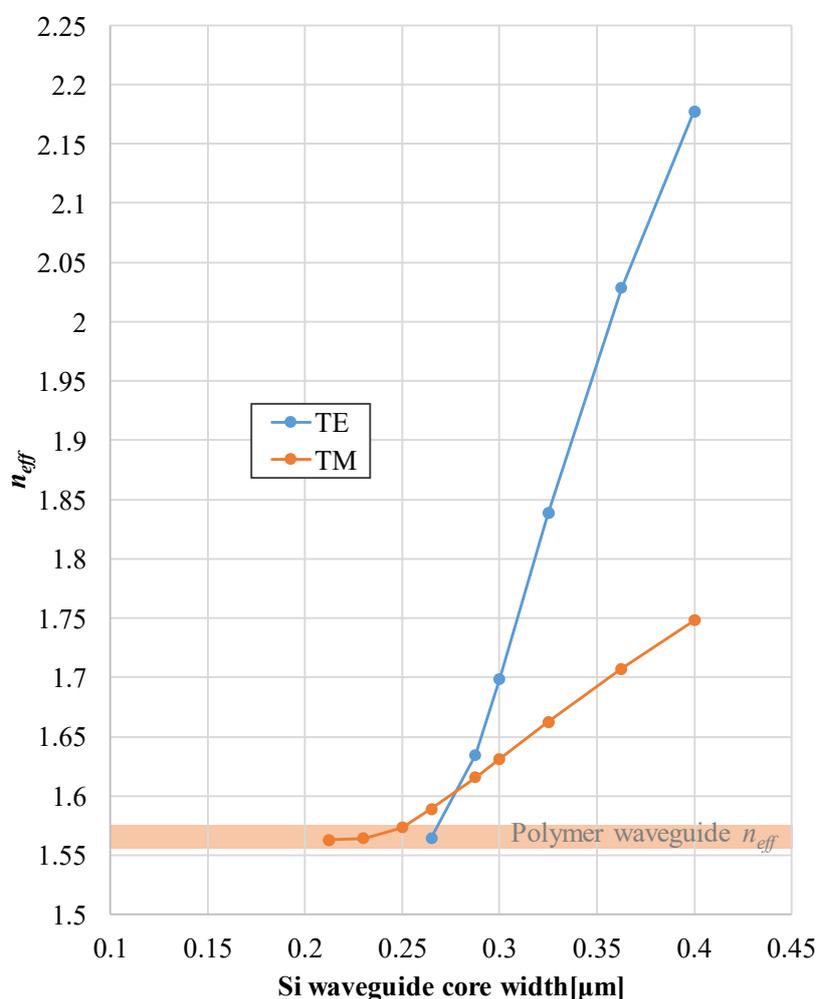


Fig. 5-43 シリコン細線導波路のコア幅と実効屈折率の関係

このようなシミュレーションモデルに対し、シリコン細線導波路コアに波長 1550 nm の光を入射した際に、ポリマー光導波路コアから出射される光を検出した。導波路モードソルバではモードごとに結合効率を計算することができるため、TE モード、TM モードそれぞれ

れについて光結合効率を計算した。なお、シリコン細線導波路とポリマー光導波路が互いに接している距離である結合長は 15000 μm に設定している。

結合効率計算の際、ポリマー光導波路のみコアサイズを変化させ、アディアバティックカップリング効率のポリマー光導波路コアサイズ依存性を検討した。ポリマー光導波路として矩形 SI 型導波路を設計したとき、ポリマー光導波路のコアサイズとポリマー光導波路内を伝搬する各モードの実効屈折率の関係を計算した結果を Fig. 5-44 に示す。

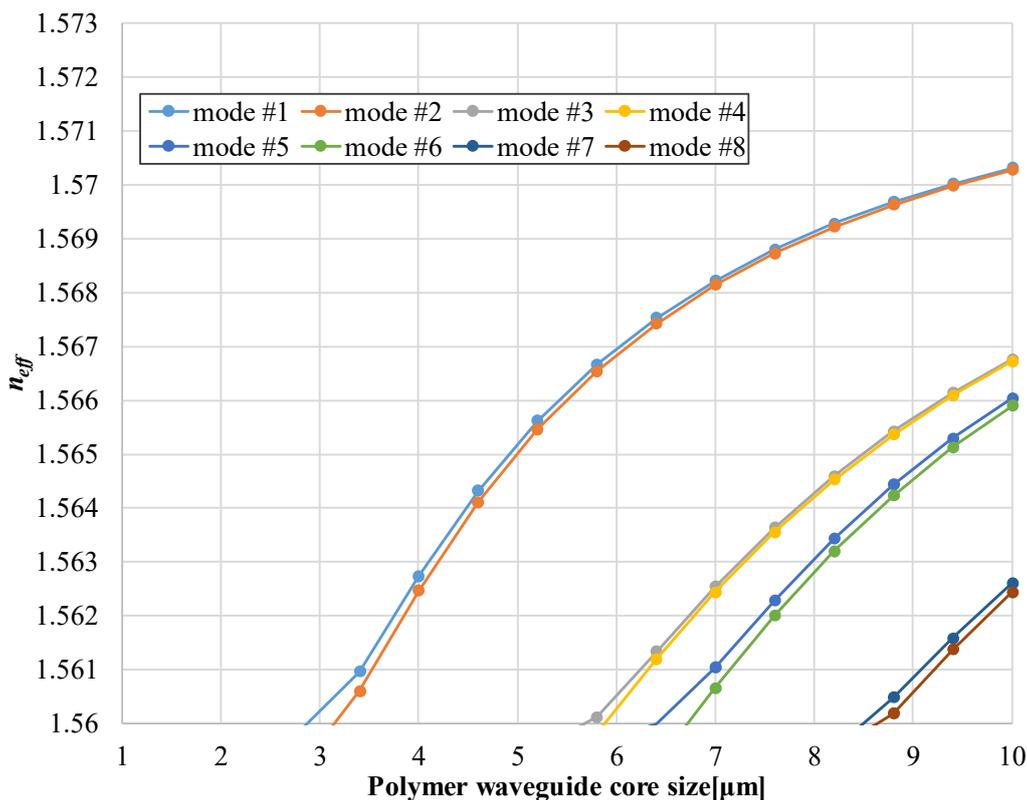


Fig. 5-44 ポリマー光導波路コアサイズと実効屈折率の関係

本研究では、ポリマー光導波路コアが正方形である場合のみならず、ポリマー光導波路コアの幅と高さの比を、4:5, 1:1, 5:4, 3:2, 2:1 と固定した場合について、コア高さを変化させた(同時にコア幅も変化することとなる)ときの結合効率をそれぞれ計算した。また、ポリマー光導波路としては、Fig. 5-45 に示したように、矩形 SI 型、矩形 GI 型、円形 SI 型、円形 GI 型導波路をそれぞれ設計し、それらの結果を比較した。

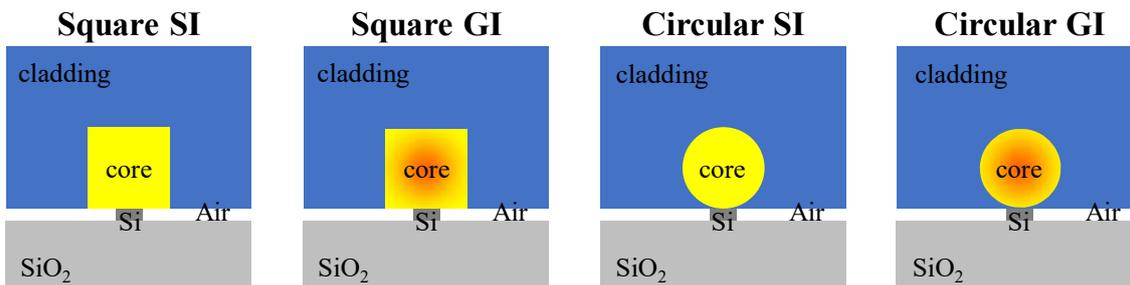


Fig. 5-45 アディアバティックカップリングシミュレーション用導波路設計

5.3.2 アディアバティックカップリング時の結合効率

ポリマー光導波路として、矩形 SI 型、矩形 GI 型、円形 SI 型、円形 GI 型導波路を用いた場合の、アディアバティックカップリング効率計算結果を Fig. 5-46, Fig. 5-47, Fig. 5-48, Fig. 5-49 にそれぞれ示す。ポリマー光導波路のコア高さと結合効率の関係を、TE モード、TM モードの場合についてそれぞれ示している。ここでの結合効率は、シリコン細線導波路コア内の TE, TM モードが、それぞれポリマー光導波路のコア内の最低次モードの TE, TM モードへどれだけ遷移したかを表す値である。

まず、TE モードの結合効率に注目する。Fig. 5-46(a), Fig. 5-48(a)より、矩形 SI 型と円形 SI 型導波路の結合効率には大きな相違は見られない。コア内屈折率分布が均一である SI 型の場合には、コアの外形状にほぼ依存せずアディアバティックカップリングが実現されといえる。これに対し、コア内に GI 型屈折率分布が形成された場合には傾向が異なる。Fig. 5-47(a)より、矩形 GI 型導波路の場合には、結合効率を 100%に維持できるコアサイズの範囲が、SI 型に比べ小さくなっていることがわかる。さらに、円形 GI 型導波路の場合には、Fig. 5-49(a)より、さらに結合効率が悪化しており、コア幅とコア高さの比率が 2:1 以外の場合には、いかなるコアサイズでも結合効率が 100%に満たない。

これは、GI 型導波路の場合には、シリコン細線導波路コアとの接触面付近のコア内屈折率が低いためであると考えられる。コアが剥き出し構造を有するとしても、コア内に GI 型屈折率分布が形成されていると、屈折率が最大となるコア中心部まで距離があるため、シリコン細線導波路コアからの光の遷移に支障をきたすこととなる。特にコアサイズが大きくなるほど、シリコン細線導波路コアとポリマー光導波路コア中心間の距離が大きくなるため、Fig. 5-49(a)に示した円形 GI 型導波路の場合には、コアサイズ増大に伴い結合効率が急激に悪化したものと考えられる。また、コア外形状(矩形あるいは円形)や、コア幅とコア高さの比率が変化することによってもコア内屈折率分布が変化するため、結合効率に大きな影響を及ぼしたものと考えられる。

以上より、剥き出し構造のポリマー光導波路コアをシリコン細線導波路コアと接触させる結合方式の場合には、GI 型屈折率分布の形成により結合効率が悪化するおそれがあるこ

とがわかった。そこで、シリコン細線導波路コアを内包する形でポリマー光導波路コアを形成(Fig. 5-41(b)参照)し、ポリマー光導波路コア中心とシリコン細線導波路コア間の距離を低減することによって、結合効率悪化を防ぐことができる可能性がある。Mosquito 法の場合には、ニードル走査プログラムの適切な制御により、クラッドモノマー中の所望の位置にコアを形成することができるので、このような構造を実現可能であると考えている。

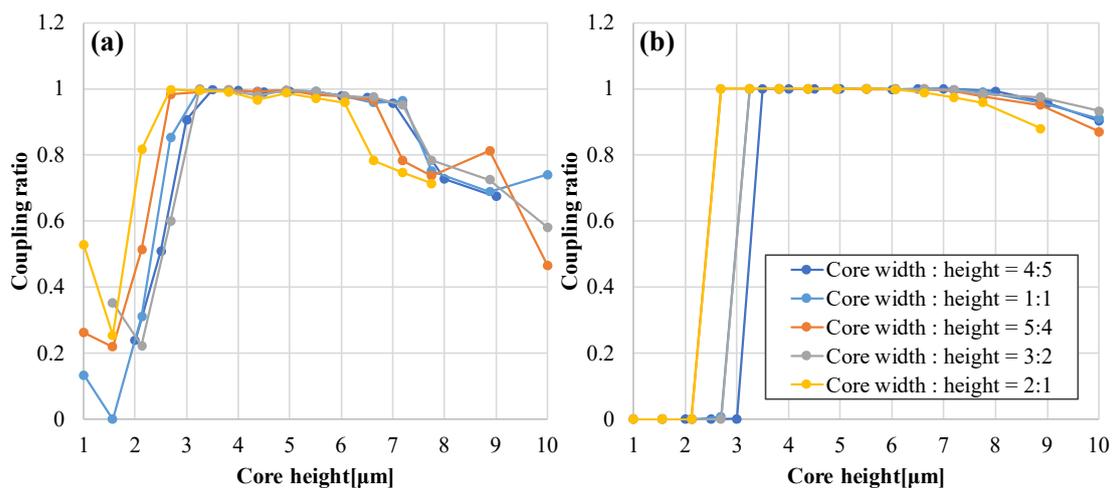


Fig. 5-46 アディアバティックカップリング効率とポリマー光導波路コアサイズの関係 (矩形 SI 型導波路) (a)TE モード (b)TM モード

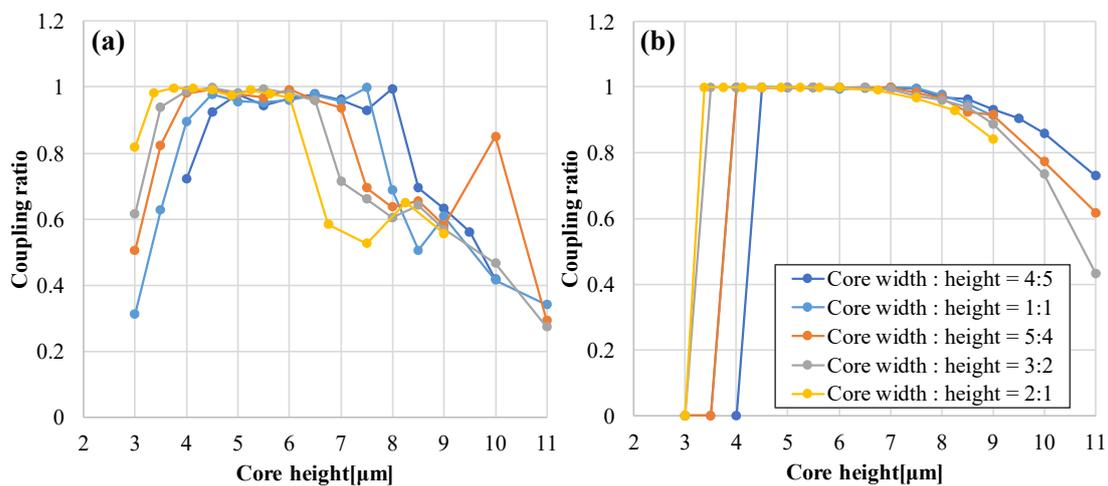


Fig. 5-47 アディアバティックカップリング効率とポリマー光導波路コアサイズの関係 (矩形 GI 型導波路) (a)TE モード (b)TM モード

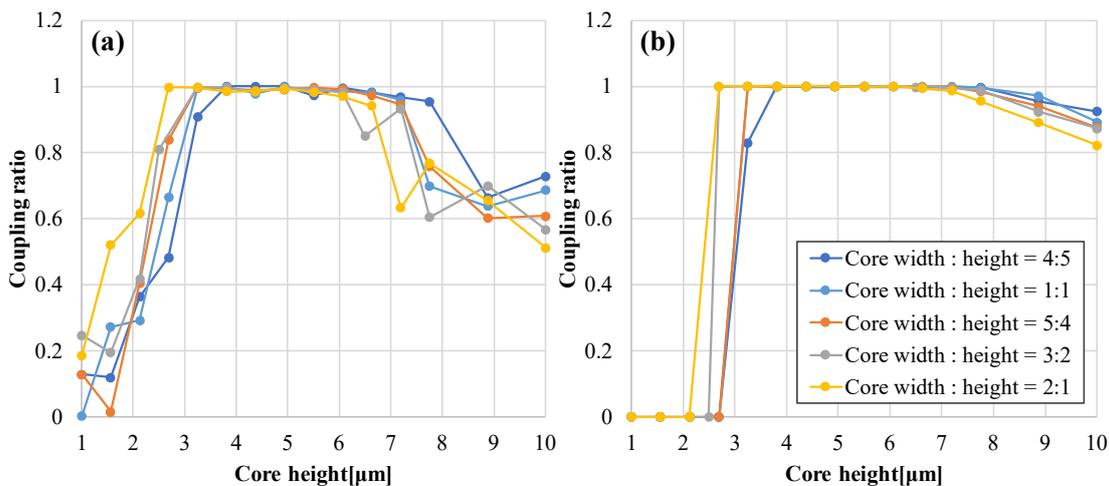


Fig. 5-48 アディアバティックカップリング効率とポリマー光導波路コアサイズの関係 (円形 SI 型導波路) (a)TE モード (b)TM モード

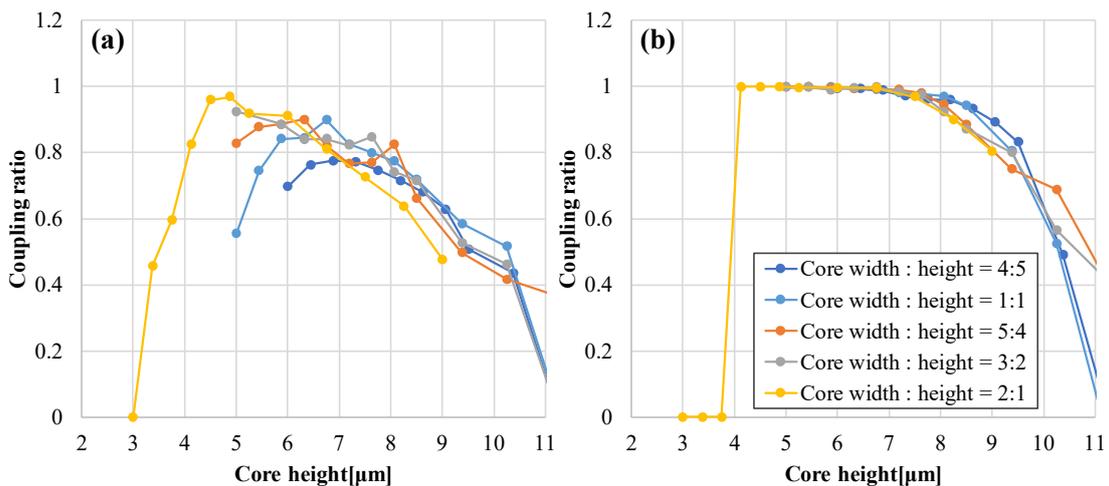


Fig. 5-49 アディアバティックカップリング効率とポリマー光導波路コアサイズの関係 (円形 GI 型導波路) (a)TE モード (b)TM モード

また、いずれの導波路の場合にも、TE モード、TM モードの場合で傾向が大きく異なることがわかる。矩形 SI 型導波路に注目すると、TM モードの結合効率は、ポリマー光導波路のコア高さに対してほぼ 100%を維持しているのに対し、TE モードの場合には、ある範囲外のコアサイズでは、結合効率が低下してしまうことが Fig. 5-46 よりわかる。

TE モード、TM モードの場合で結合効率に差が生じる理由は、テーパ構造による実効屈折率の変化の違いに起因していると考えられる。Fig. 5-43 に示したように、シリコン細線導波路コア幅の変化に伴う、シリコン細線導波路内のモードの実効屈折率の変化は、偏波方向によって異なる。TM モードの実効屈折率はコア幅に対して緩やかに変化しているのに対

し、TE モードの場合にはコア幅縮小に伴い、実効屈折率が急激に減少していることが Fig. 5-43 よりわかる。そのため、結合長を一定にした場合には、TE モードは、TM モードの場合に比べ、単位長さあたりの実効屈折率(伝搬定数)の変化量が大きくなる。これに対し、ポリマー光導波路の実効屈折率は、Fig. 5-44 に示したようにいかなるコアサイズでも 1.56 ~ 1.57 程度の値をとる。最低次モードの伝搬定数が互いに一致したときにアディアバティックカップリングが実現するため、シリコン細線導波路コアにおいて、単位長さあたりの実効屈折率(伝搬定数)の変化量が大きい TE モードは、結合効率が悪化しやすいものと考えられる。

ここで、矩形 SI 型、矩形 GI 型、円形 SI 型、円形 GI 導波路に対し、Fig. 5-46 から Fig. 5-49 までの結果にて、最も高い結合効率を実現したコアサイズにて、それぞれ結合長と結合効率の関係を計算した。その結果を Fig. 5-50 に示す。なお、最も高い結合効率を実現したコアサイズの値は、それぞれ図内に記載している。

いずれの導波路の場合にも、結合長を十分に確保することによって、TM モードのみならず TE モードについても、結合効率を 100%にまで向上できることが Fig. 5-50 よりわかる。テーパ構造により実効屈折率が急激に変化する TE モードであっても、結合長を長くすることで、単位長さあたりの実効屈折率の変化量を小さく抑え、結合効率を向上できるといえる。ただし、円形 GI 型導波路の場合には、TE、TM モード双方にて 100%の結合効率を確保するために必要な結合長は 20000 μm にも及んでおり、デバイスの小型化を考えた際、これほどの結合長を実現できない場合が想定できる。その場合、偏波モードによってアディアバティックカップリング効率が異なるため、シングルモードポリマー光導波路に結合した光は偏波状態に偏りが生じているおそれがある。

よって、シングルモードポリマー光導波路の偏波依存光学特性は極めて重要であり、その解明が必要である。次節では、シングルモードポリマー光導波路の偏波依存光学特性について検討する。

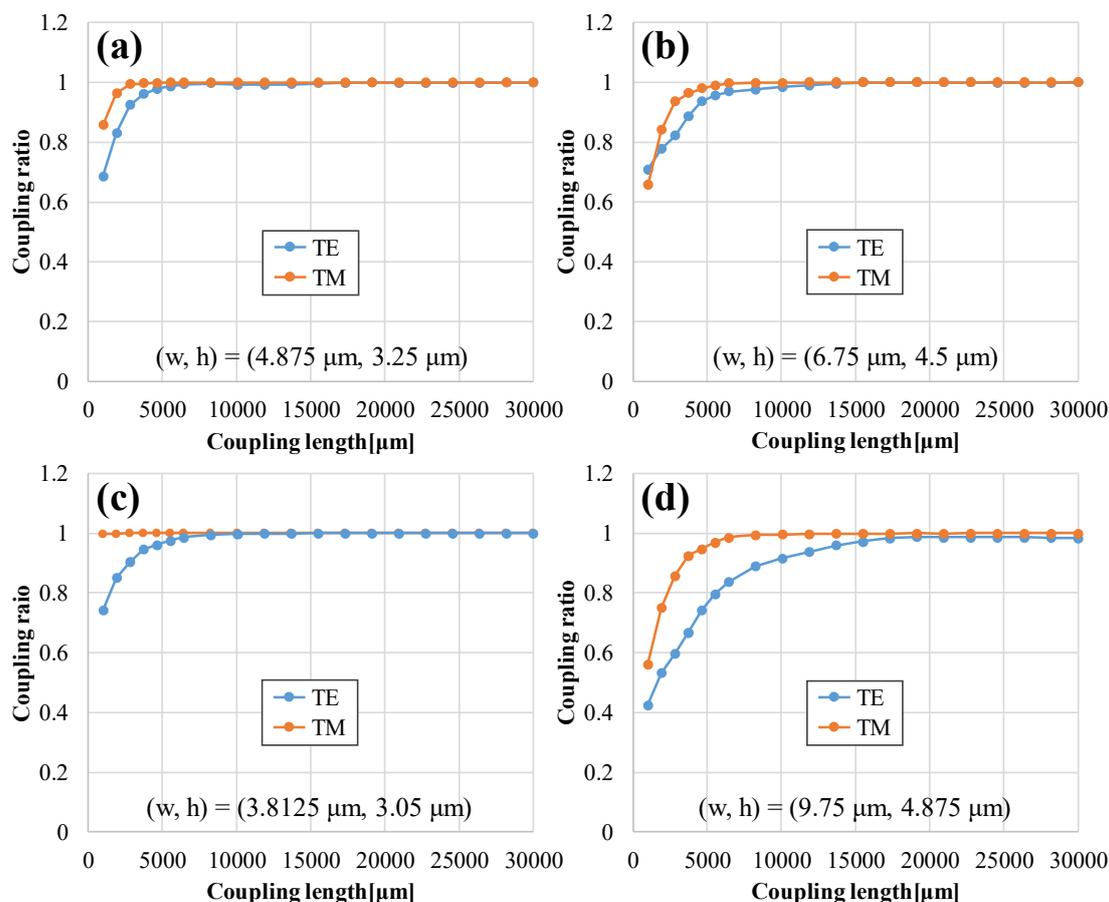


Fig. 5-50 アディアバティックカップリング効率と結合長の関係
 (a)矩形 SI 型導波路 (b)矩形 GI 型導波路 (c)円形 SI 型導波路 (d)円形 GI 型導波路

5.4 シングルモードポリマー光導波路の偏波依存光学特性

シリコン細線導波路や他のアクティブ光学素子との結合を考慮する際、シングルモードポリマー光導波路の偏波依存光学特性は極めて重要である。特に、従来のリソグラフィプロセスによって作製されたポリマー光導波路の偏波依存光学特性は問題視されてきた [5-13][5-14][5-15]。そこでは、偏波依存損失は作製工程中の体積収縮やコア材料付近の熱膨張係数の相違の影響でポリマー材料に付与されるストレスによって生じるとされ、これらのストレスによる影響の低減が重要であるとされてきた[5-16]。

本節では、5.2 節と同様に、日産化学(株)製 有機-無機ハイブリッド樹脂 SUNCONNECT®シリーズを用いて作製されたシングルモードポリマー光導波路について、偏波依存光学特性を実験的に評価し、それらを比較する。

5.4.1 偏波依存光学特性評価対象

5.4.1.1 評価する偏波依存光学特性

シングルモードファイバ(SMF)やシングルモードポリマー光導波路の偏波依存光学特性のうち、本研究にて評価した二つの光学特性について紹介する。

偏波消光比 (PER : Polarization Extinction Ratio)

偏波消光比(PER)とは、最小偏光パワー P_{min} と最大偏光パワー P_{max} の比率を dB 単位で表した値であり、次式にて得られる。

$$PER = 10 \log \frac{P_{max}[\text{mW}]}{P_{min}[\text{mW}]} = P_{max}[\text{dBm}] - P_{min}[\text{dBm}] \quad (5-2)$$

偏波依存損失 (PDL : Polarization Dependent Loss)

偏波依存損失(PDL)とは、偏波入力とそのすべての状態にわたって変化するときの挿入損失変化最大量を dB 単位で表した値であり、次式にて得られる。

$$PDL = LOSS_{max}[\text{dB}] - LOSS_{min}[\text{dB}] \quad (5-3)$$

5.4.1.2 評価方法

本研究では、シングルモードポリマー光導波路の偏波消光比及び偏波依存損失を評価した。

偏波消光比の評価系を Fig. 5-51 に示す。波長 1310 nm または 1550 nm の直線偏光がレンズファイバより出力され、導波路に入射する。導波路からの出力光は空間を伝搬し、偏光フィルタを通してパワーメータにて検出される。レンズファイバからの出力光のスポットサイズは 6 μm 、NA は 0.16 である。

レンズファイバは、偏波コントローラ及び偏波制御ハンドルに接続されており、その偏光状態を制御できるようになっている。はじめに偏波制御ハンドルにて適切な偏光状態を確立しておくことで、偏波コントローラによる偏光角度指定のみで、偏波保持特性をもたない通常のレンズファイバからも直線偏光を出力できる仕組みである。

なお、偏波コントローラにて偏光角度を 0° に設定すると水平方向の直線偏光(導波路に対する TE モード)を出力し、偏光角度 90° 設定のとき垂直方向の直線偏光(導波路に対する TM モード)を出力する。偏光フィルタは、任意の偏光方向のみを選択的に透過させることができ、フィルタ角度 0° のときは TE モードの光のみが透過するのに対し、フィルタ角度 90° のときは TE モードの光は遮断され、TM モードの光のみが透過する。

レンズファイバからの出力光を直線偏光に制御する手順について説明する。レンズファ

ファイバからの出力光をパワーメータにて直接検知する。偏波コントローラを用いて、偏光角度設定を 90° (TM モード) に設定した状態で、偏光フィルタの角度を 0° に調整して TE モードの光のみを検出可能にする。レンズファイバからの出力光強度をパワーメータにて検知しながら、偏波制御ハンドルを手動で調整し、光強度が最小となるハンドル位置を探す。その状態でハンドル位置を固定し、偏波コントローラにて任意の偏光角度を設定することで、TE モードから TM モードまでの直線偏光を自由に選択することができるようになる。

偏波消光比を測定する方法について述べる。まず、偏波コントローラにて偏光角度を 0° に設定し、TE モードの直線偏光を導波路に入射する。導波路からの出力光を検出する際、偏光フィルタの角度を 0° から 180° まで 10° おきに変化させ、各フィルタ角度での光強度を測定した。測定した光強度のうち、最大、最小の光強度の値を用いて、(5-2)式により偏波消光比を計算することができる。

Fig. 5-51 の評価系にて導波路を用いず、レンズファイバから出力される直線偏光をパワーメータにて直接検知した際の、各フィルタ角度に対する光強度を測定した結果を Fig. 5-52 に示す。フィルタ角度が変化するのに応じて光強度が周期的に大きく変化しており、レンズファイバからの出力光が偏光していることがわかる。Fig. 5-52 には、TE モードに加え、TM モード出力時のグラフも併せて示しており、互いに 90° の位相ずれを示していることから、偏光方向も適切である。TE モード出力時の偏波消光比は、波長 1310 nm, 1550 nm にてそれぞれ 36.24 dB, 37.93 dB であり、レンズファイバからの出力光は十分な直線偏光状態にあると判断できる。



Fig. 5-51 偏波消光比の評価系

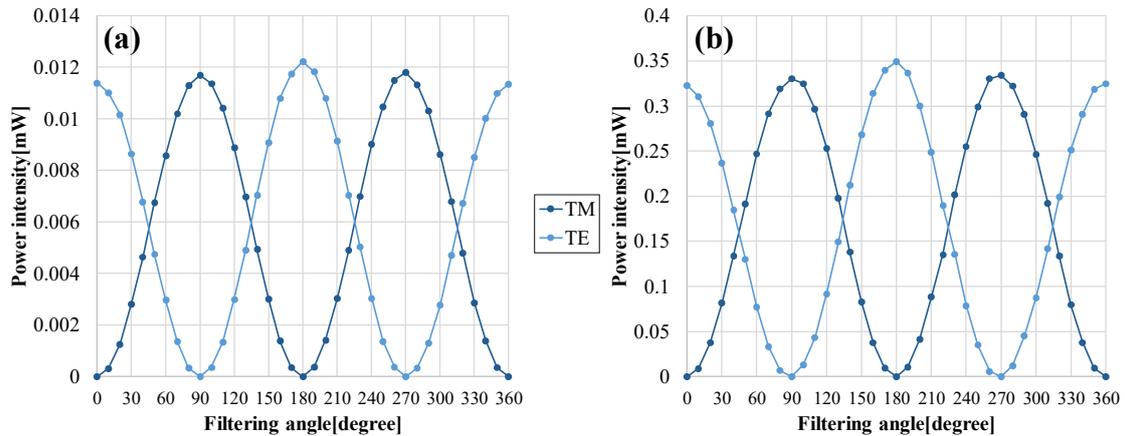


Fig. 5-52 レンズファイバの出力光強度と偏光フィルタ角度の関係
(a)1310 nm (b)1550 nm

次に、偏波依存損失の評価系を Fig. 5-53 に示す。偏波消光比の評価系と同様に、レンズファイバからの直線偏光を導波路に入射する。導波路からの出力光を再びシングルモードレンズファイバにより受光し、その出力光強度をパワーメータにて検出する。偏波コントローラにて偏光角度を 0° (TE モード) から 15° 刻みに 180° (再び TE モード) まで変化させ、各偏光角度における光強度を測定した。レンズファイバからの出力光をレンズファイバにて直接受光した場合の光強度(Back to Back 強度)との差を計算することで、各偏光角度に対する導波路の挿入損失を得る。偏光角度に対する最大の挿入損失と最小の挿入損失を知ることによって、(5-3)式を用いて偏波依存損失(PDL)を計算することができる。

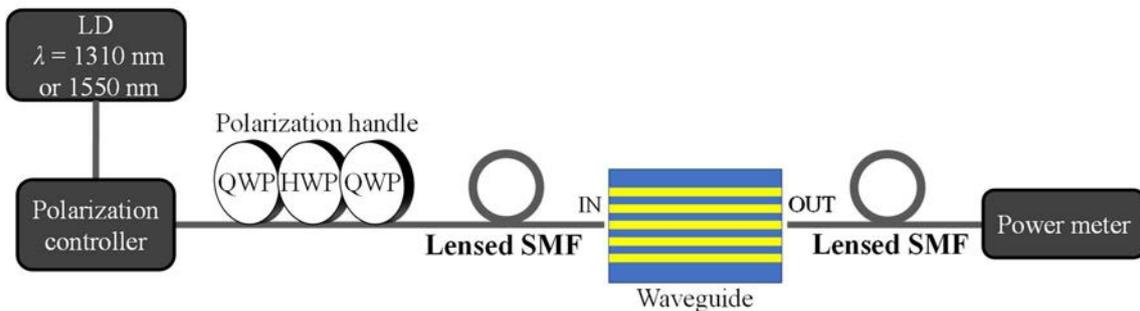


Fig. 5-53 偏波依存損失の評価系

5.4.1.3 評価導波路

偏波依存光学特性評価に用いたポリマー光導波路について記す。直接露光法を用いて作製した矩形 SI 型導波路、Mosquito 法を用いて作製した円形 GI 型導波路、インプリント法を用いて作製した矩形 GI 型導波路をそれぞれ評価した。

直接露光法を用いて作製した矩形 SI 型導波路の端面写真を Fig. 5-54 に示す. 5.2 節にて評価した矩形 SI 型導波路と同様の作製条件にて作製された導波路であり, マスクパターン幅により予想されるコア設計幅を 7, 8, 9 μm とした導波路コアを評価する. 導波路長は 3.0 cm である.

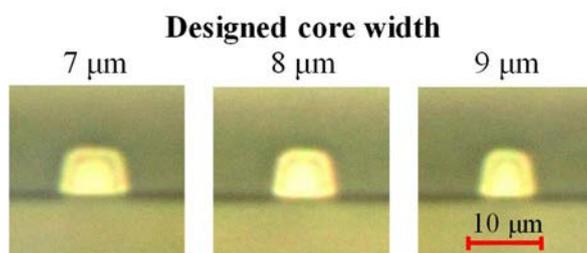


Fig. 5-54 直接露光法にて作製された矩形 SI 型光導波路の端面写真

Mosquito 法を用いて作製した円形 GI 型導波路の端面写真を Fig. 5-55 に示す. 5.2 節にて評価した円形 GI 型導波路と同一である Fig. 5-55(a)の導波路 A に加え, 作製条件の異なる導波路 B, 導波路 C についても評価する. 導波路 A, B, C のコア, クラッド材料には, すべて NP-005, NP-213 を用いており, 材料の相違はない. いずれの導波路も 12 チャネルの複数チャネルを有しており, 各チャネルには異なる露光待機時間が与えられている.

各導波路の作製条件を Table 5-5 に示す. 導波路作製時にコアモノマーを吐出するニードルとして, 導波路 A には円筒形状の通常ニードルを用いているのに対し, 導波路 B, C には, ニードル長を短く抑え, 先端をテーパ形状とすることで圧力応答性を高めた精密ニードル [5-17] を使用している. また, モノマー相互拡散の速度に大きく寄与する, 作製時のクラッドモノマー温度を, 導波路 A 作製時には室温である 25°C に, 導波路 B, C 作製時には比較的低温である 17°C, 15.8°C にそれぞれ制御している. そのため, 導波路 B, C では, モノマーの拡散速度が抑えられ, 単位露光待機時間あたりの MFD 増大量を表す「MFD スロープ」が小さくなる [5-18]. また, 導波路 A, B は 5.0 cm 長, 導波路 C は 10.0 cm 長であるため, 導波路長による比較も行える.

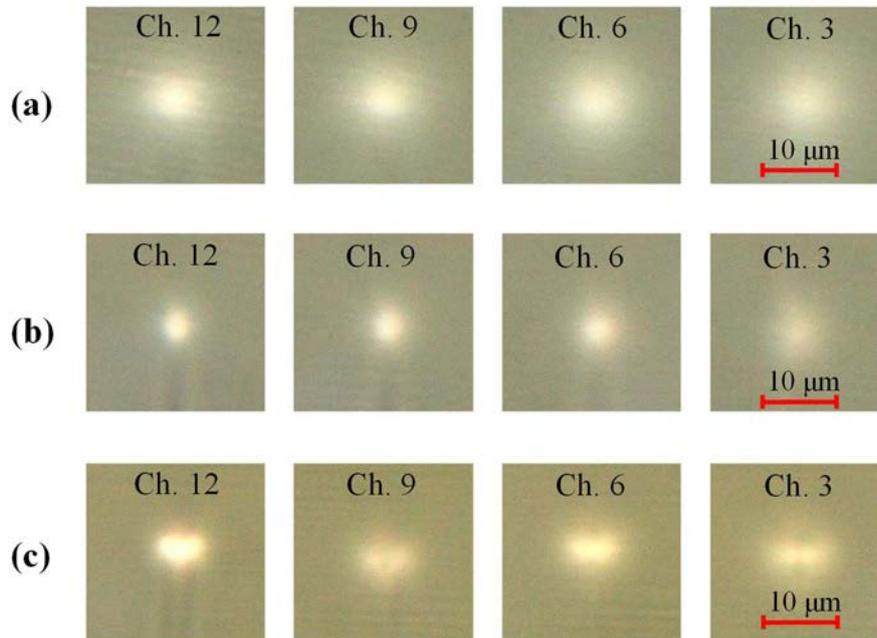


Fig. 5-55 Mosquito 法にて作製された円形 GI 型光導波路の端面写真
(a)導波路 A (b)導波路 B (c)導波路 C

Table 5-5 偏波光学特性評価用の円形 GI 型導波路の作製条件

	Waveguide A	Waveguide B	Waveguide C
Needle type	Normal	Precise	Precise
Cladding temperature	25 °C	17 °C	15.8 °C
Waveguide length	5.0 cm	5.0 cm	10.0 cm

インプリント法を用いて作製した矩形 GI 型導波路の端面写真を Fig. 5-56 に示す[5-21]. 矩形 GI 型導波路のコア, クラッド材料には日産化学(株)製 SUNCONNECT®シリーズの NP-001, NP-208 を用いている. 矩形 SI 型導波路, 円形 GI 型導波路と同系統の材料を用いているため, 対等に比較することができる. 導波路長は 4.0 cm である.

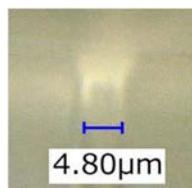


Fig. 5-56 インプリント法にて作製された矩形 GI 型導波路の端面写真

5.4.2 偏波保持特性(偏波消光比)の評価

5.4.2.1 矩形 SI 型光導波路(直接露光法)の偏波保持特性

矩形 SI 型導波路の偏波保持特性の測定結果を Fig. 5-57 に示す。このグラフは、偏光フィルタ角度に対する規格化出力光強度を示しており、導波路出力光の偏光状態を表している。

Fig. 5-57 より、フィルタ角度 0° 及び 180° のときに最大強度を示すことから、出射光は導波路伝搬後にも TE モードに偏光していることがわかり、導波路伝搬中の偏光状態の大きな乱れはないといえる。

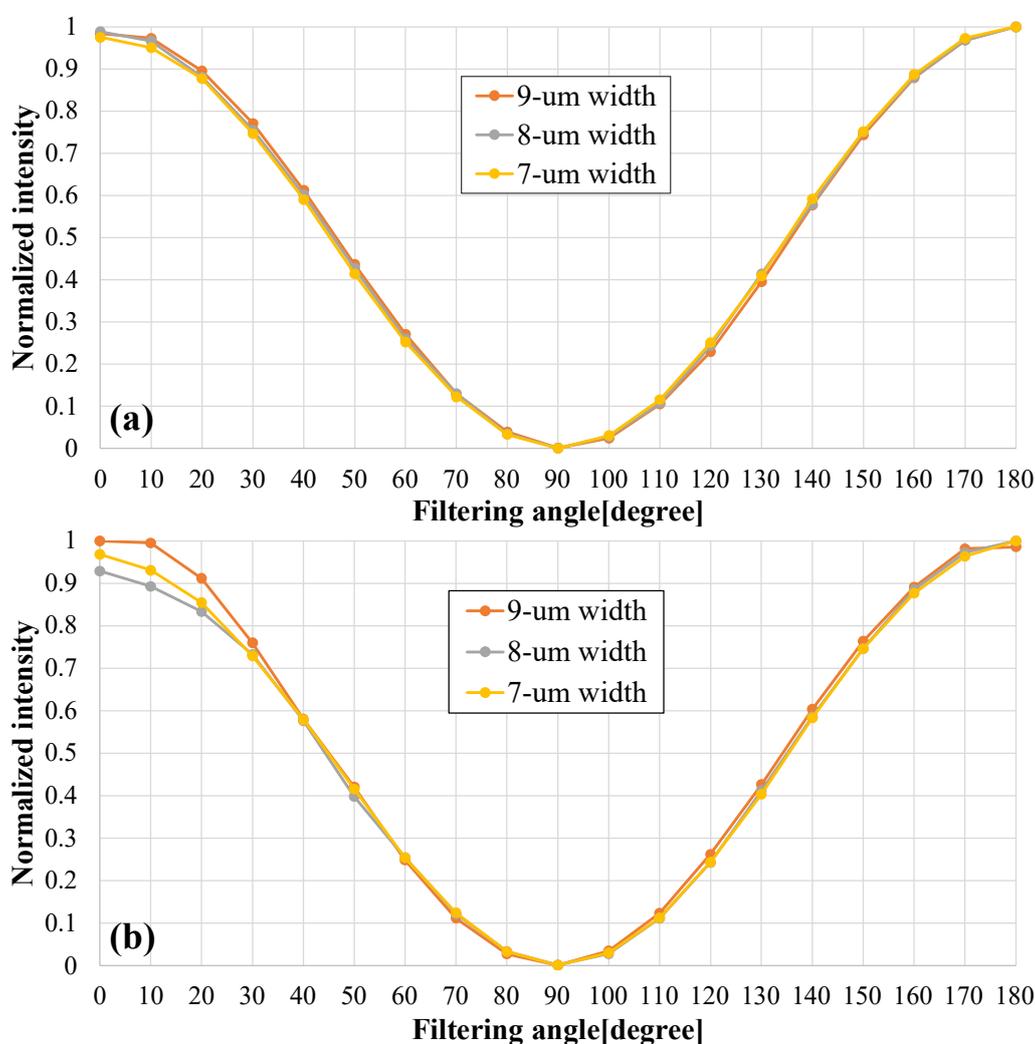


Fig. 5-57 矩形 SI 型導波路の規格化出力光強度と偏光フィルタ角度の関係
(a)1310 nm (b)1550 nm

Fig. 5-57 の結果より求められる偏波消光比を Fig. 5-58 にまとめる. いずれのコア幅の場合にも, 矩形 SI 型導波路は, 導波路伝搬後にも両波長にて 30 dB 程度の偏波消光比を実現している. 以上の結果から, 矩形 SI 型導波路は, 3 cm 程度の導波路長であれば, 導波路伝搬中に偏波状態を乱すことがないといえ, 偏波依存光学特性を評価するうえで十分な偏波保持性を有すると判断してよい.

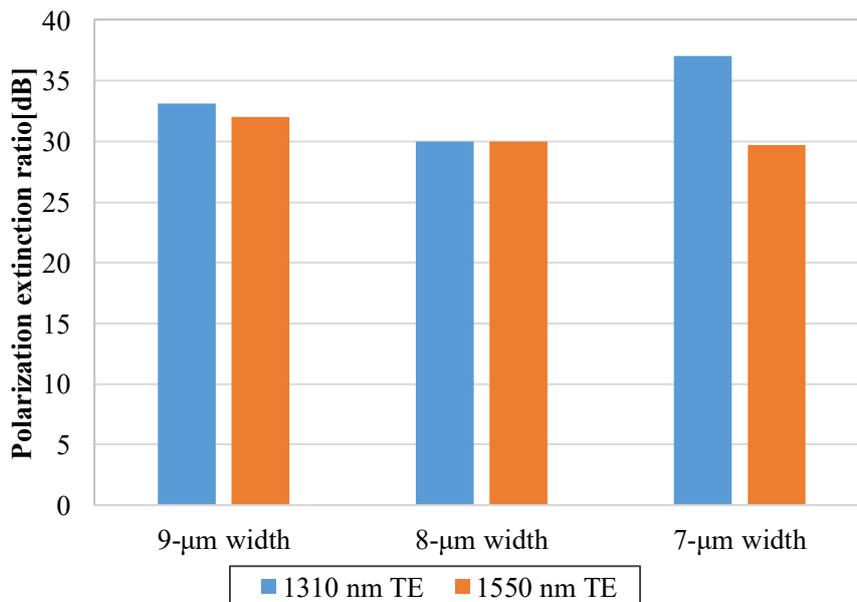


Fig. 5-58 矩形 SI 型導波路の偏波消光比

5.4.2.2 円形 GI 型光導波路(Mosquito 法)の偏波保持特性

円形 GI 型導波路の導波路 A に対し, 偏波保持特性を測定した結果を Fig. 5-59 に示す. 矩形 SI 型導波路の場合と同様に, 導波路出力光は, 両波長にてよく偏光していることがわかる.

ただし, Fig. 5-59(a)に示した波長 1310 nm の場合には, 最小強度を示すフィルタ角度が 90° からわずかにシフトしており, 導波路伝搬中に偏光状態が TE モードからわずかに回転している様子がうかがえる. 特に, より短い露光待機時間を与えられたチャンネルほど, 比較的大きな偏光方向の回転を示している.

これは, Mosquito 法にて作製された導波路コアがほぼ完全な真円形状を有しており, かつ露光待機時間が短い場合にはモノマーの過剰拡散を抑えることができ, コアの対称性を維持できるためであると考えられる. 特に, 5.2.2 項にて議論したように, 波長 1310 nm の場合には, 1550 nm の場合と比べ, 光強度分布が対称性の良いコア内に強く閉じ込められるため, より偏光状態の変化が起こりやすいと考えられる[5-19].

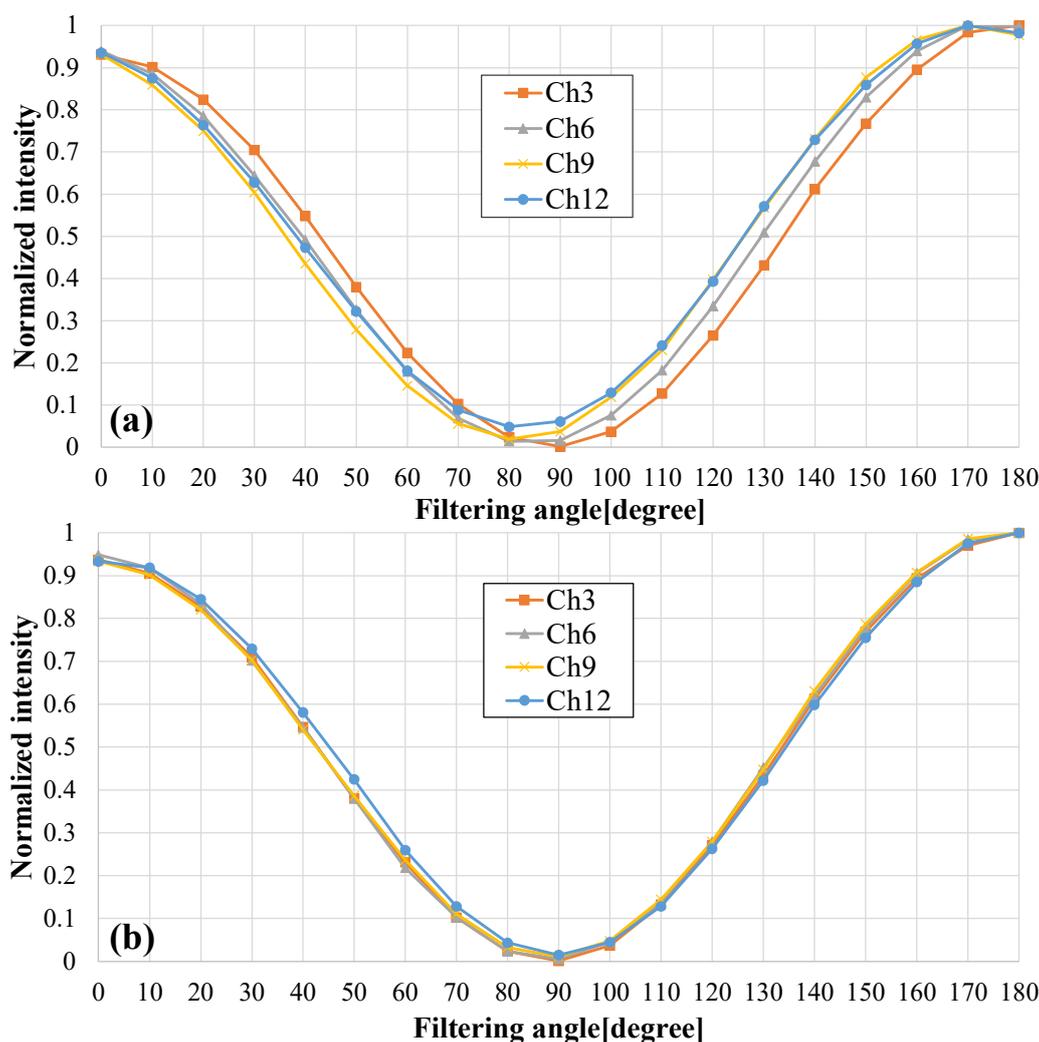


Fig. 5-59 円形 GI 型導波路(導波路 A)の規格化出力光強度と偏光フィルタ角度の関係
(a)1310 nm (b)1550 nm

Fig. 5-59 の結果より計算される、各チャンネルの偏波消光比を Fig. 5-60 に示す。1310 nm, 1550 nm とともに、露光待機時間が短くなるほど偏波消光比が減少しており、導波路入射前は十分に確立していた直線偏光状態が、導波路伝搬によりわずかに解消している様子が見られる。しかしながら、いずれの波長でもすべてのチャンネルにて 13 dB 以上の偏波消光比は維持している。また、Fig. 5-59 にて確認された偏光方向の回転も、最大でも 10° 未満のわずかな回転であることから、偏波依存光学特性を評価するうえで、深刻な偏光状態の劣化は生じていないと判断できる。

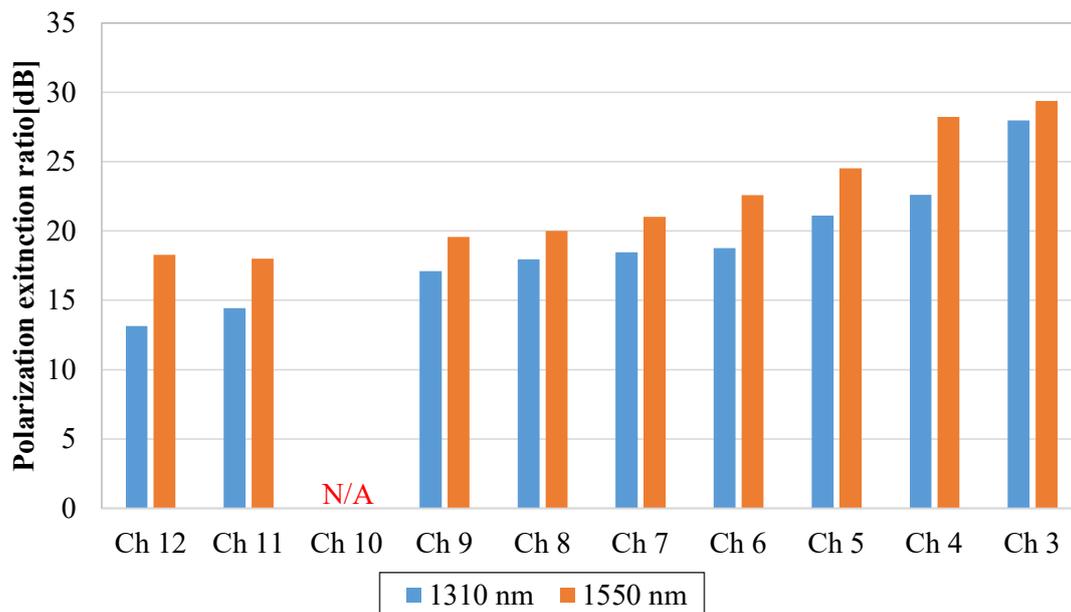


Fig. 5-60 円形 GI 型導波路(導波路 A)の偏波消光比

ここで、偏光方向のわずかな回転が見られた波長 1310 nm について、導波路 B, C に対しても偏波保持特性を測定した結果を Fig. 5-61, Fig. 5-62 にそれぞれ示す。モノマー拡散速度を抑えた導波路 B, モノマー拡散速度を抑え、かつ導波路長を長くした導波路 C いずれの場合にも、偏光方向の回転は生じず、導波路伝搬後も偏光状態をよく維持していることが、Fig. 5-61, Fig. 5-62 より見て取れる。

偏波方向のわずかな回転が見られた導波路 A に対し、傾向の差を生じた理由については詳細にはわかっていないが、作製時の温度やコアの楕円比率等、導波路構造のわずかな違いが影響していると考えられる。

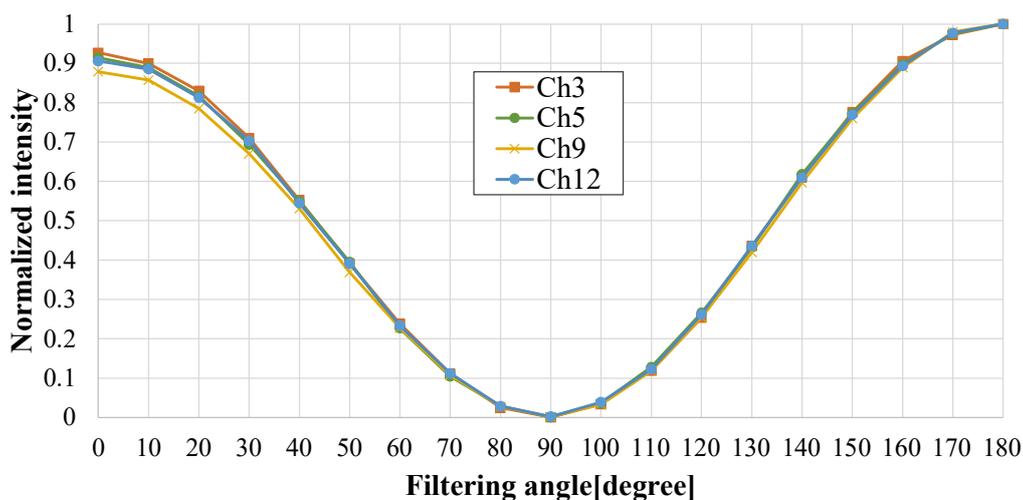


Fig. 5-61 円形 GI 型導波路(導波路 B)の規格化出力光強度と偏光フィルタ角度の関係 (1310 nm)

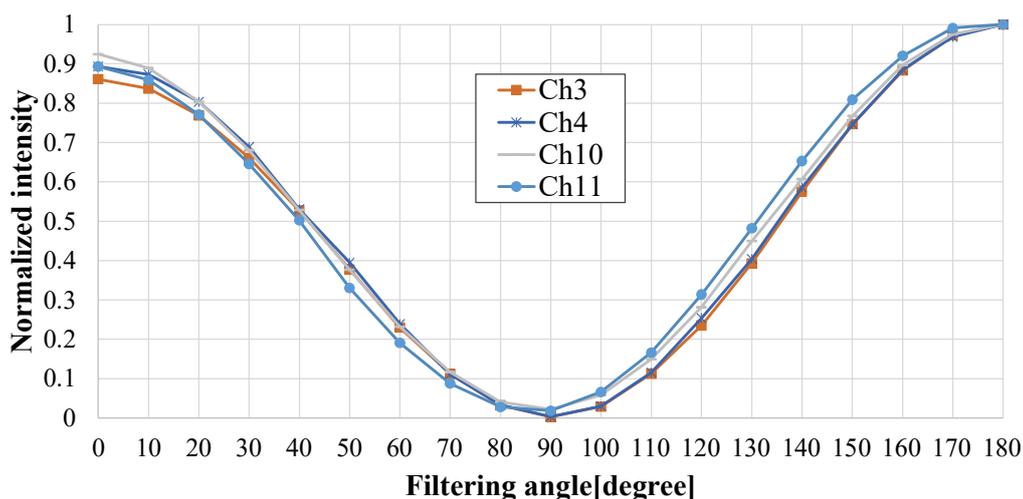


Fig. 5-62 円形 GI 型導波路(導波路 C)の規格化出力光強度と偏光フィルタ角度の関係 (1310 nm)

導波路 A, B, C について、波長 1310 nm での偏波消光比と露光待機時間の関係を Fig. 5-63 に示す。いずれの導波路の場合にも、露光待機時間が短くなるにつれて、偏波消光比が減少していくことがわかる。Mosquito 法にて作製した導波路は、露光待機時間を長く与えることで、導波路伝搬中の偏波保持特性をわずかに向上させることができる。

ただし、導波路長を 10 cm とした導波路 C の場合にも、露光待機時間が短いチャンネルでも 15 dB 以上の偏波消光比を維持していることから、数 cm~10 cm 程度の導波路伝搬では、偏光状態の大きな乱れは生じないと判断してよい。

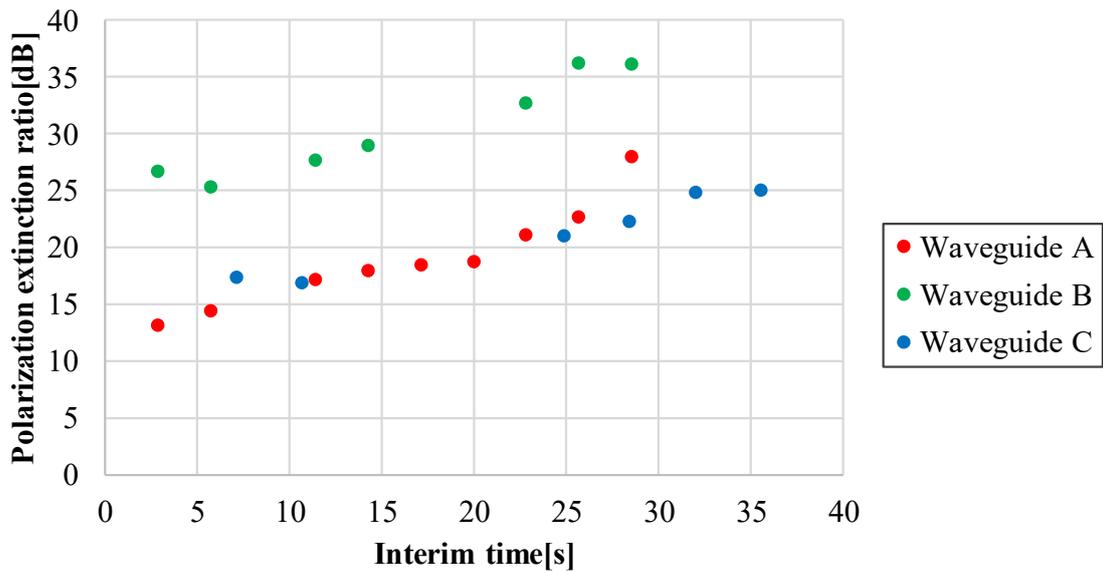


Fig. 5-63 円形 GI 型導波路の偏波消光比と露光待機時間の関係(1310 nm)

5.4.2.3 矩形 GI 型光導波路(インプリント法)の偏波保持特性

矩形 GI 型導波路の偏波保持特性の測定結果を Fig. 5-64 に示す。波長 1310 nm, 1550 nm の場合ともに、導波路出力光はよく偏光しており、TE モードとして入射した偏光状態を、出射時にも維持していることがわかる。偏波消光比は、1310 nm, 1550 nm にて、それぞれ 20.1 dB, 18.0 dB であった。よって、矩形 GI 型導波路についても、4.0 cm の導波路伝搬中に偏光状態を大きく乱すことはなく、偏波依存光学特性を評価するうえで十分な偏波保持性を有するといえる。

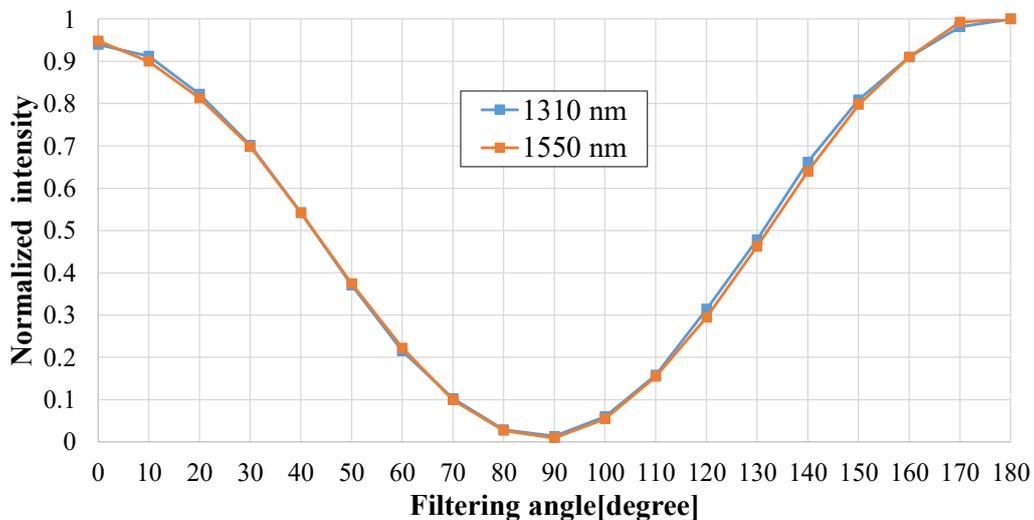


Fig. 5-64 矩形 GI 型導波路の規格化出力光強度と偏光フィルタ角度の関係

5.4.3 偏波依存損失の評価

5.4.3.1 矩形 SI 型光導波路(直接露光法)の偏波依存損失特性

矩形 SI 型導波路の 9 μm 幅設計の各チャネルに対し, Fig. 5-53 に示した評価系にて波長 1310 nm のレーザを用いた場合に, 各偏光角度に対する導波路の挿入損失を測定した結果を Fig. 5-65 に示す. いずれのチャネルでも, 偏光角度によって挿入損失がわずかに異なり, TE モードの場合に比べ, TM モードにて低損失を示していることがわかる.

8 μm , 7 μm 幅設計のチャネルに対しても同様の測定を行い, (5-3)式を用いて偏波依存損失(PDL)を計算した結果を Fig. 5-66 に示す. この PDL の値は, 設計コア幅が同じである 8 チャネル分の平均値を算出している. 波長 1310 nm では, 矩形 SI 型導波路は若干の偏波依存損失を示すものの, いずれのコア幅でもその値は 0.1 dB 未満と小さく, 非常に安定した偏波依存損失特性を示すことが Fig. 5-66 よりわかる.

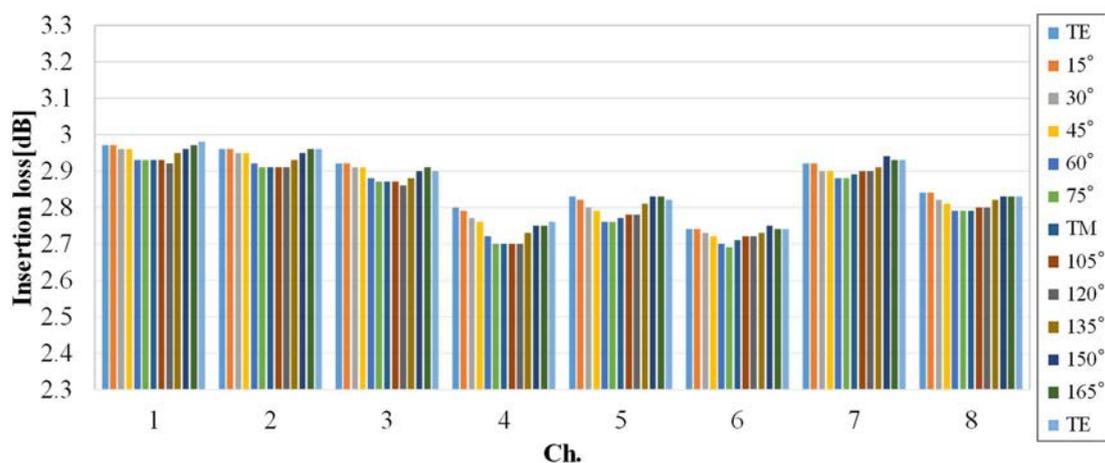


Fig. 5-65 矩形 SI 型導波路(9 μm 幅設計)の各偏光角度に対する挿入損失測定結果 (1310 nm)

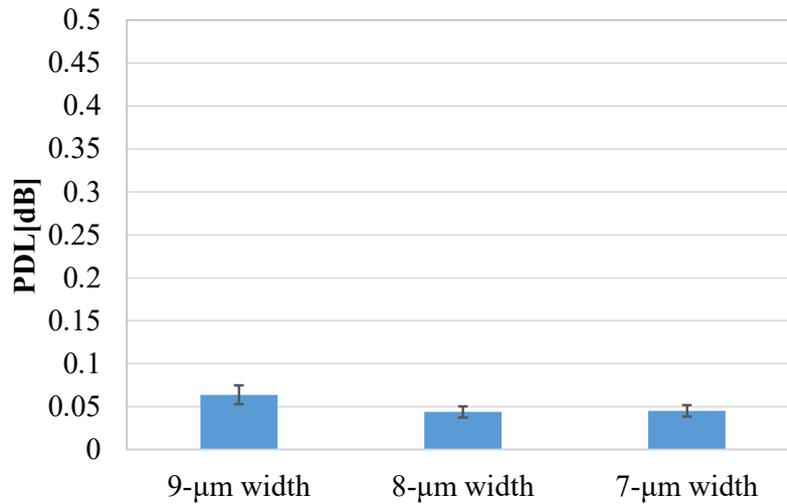


Fig. 5-66 矩形 SI 型導波路の偏波依存損失(1310 nm)

これに対し、波長 1550 nm のレーザを用いた場合に、矩形 SI 型導波路の 9 μ m 幅設計の各チャネルに対し、各偏光角度での導波路の挿入損失を測定した結果を Fig. 5-67 に示す。

波長 1310 nm の場合とは異なり、偏光角度によって挿入損失が大きく変化しているチャネルがあることが Fig. 5-67 よりわかる。しかし、TE モードが最低損失を示す場合と、TM モードが最低損失を示す場合がチャネルによって二分化され、傾向が安定しない。

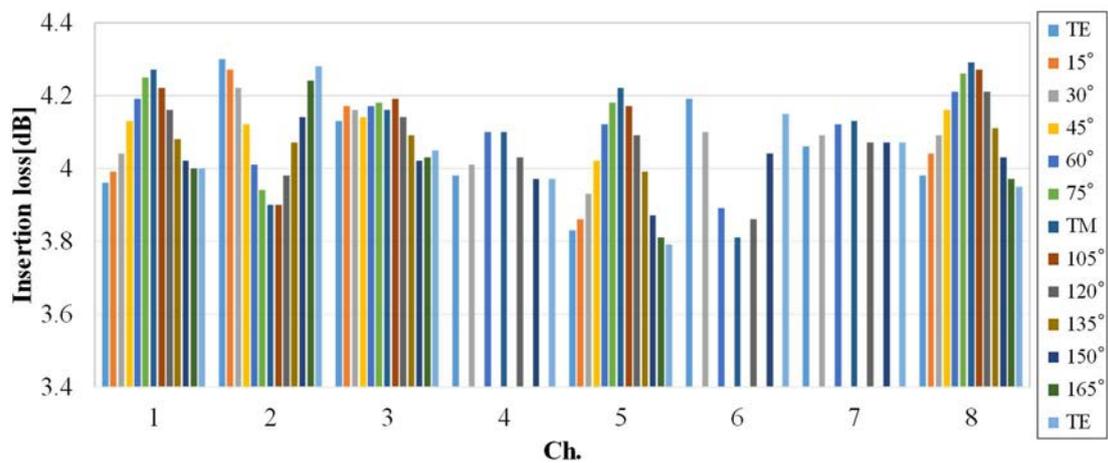


Fig. 5-67 矩形 SI 型導波路(9 μ m 幅設計)の各偏光角度に対する挿入損失測定結果 (1550 nm)

チャネルによる傾向の不安定性について検証するために、測定チャネルを Ch. 4 に固定し、導波路出力光強度を 5 分おきに測定することで、偏波依存損失特性の時間的安定性を評価することとした。各偏光角度に対する出力光強度を測定した後に、TM モード励振時の出力

光強度から、TE モード励振時の出力光強度を差し引いた値を計算した。TE モードと TM モードの Back to back 強度が等しいと仮定すると、この計算値は、TM モードと TE モードの損失差(TE モードが高損失の場合に正)とみなせる。計算結果を Fig. 5-68 に示す。

測定開始時(測定時間 0 分)には、TE モードが TM モードに比べ低損失を示していたのに対し、測定開始から 35 分経過したとき、TE モードと TM モードの損失の大小関係が入れ替わり、TM モードが低損失を示すこととなる。測定時間が 90 分となると、再び大小関係の入れ替わりが生じ、TE モードが低損失となる。

このように、波長 1550 nm では、偏波依存損失特性が時間経過に応じて変動する様子が確認された。

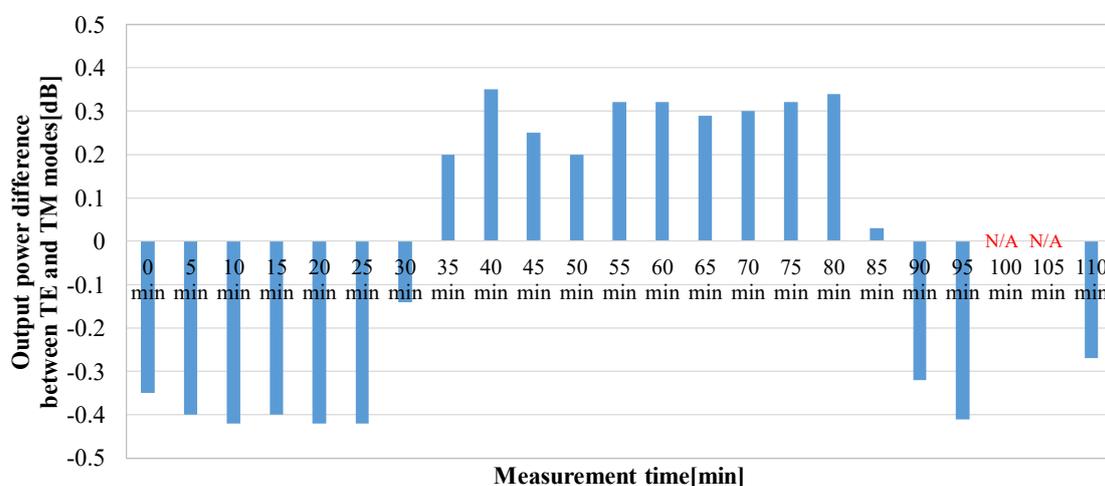


Fig. 5-68 測定時間に対する TE モードと TM モードの損失差

時間的に偏波依存損失特性が変動する中で、測定時に最も大きな偏波依存損失を示したチャンネルについて、各偏光角度での挿入損失測定結果を Fig. 5-69 に示す。どのコア幅についても、偏光方向に応じて損失値が大きく変動しており、最大の PDL は 0.4 dB にも及ぶことが Fig. 5-69 よりわかる。

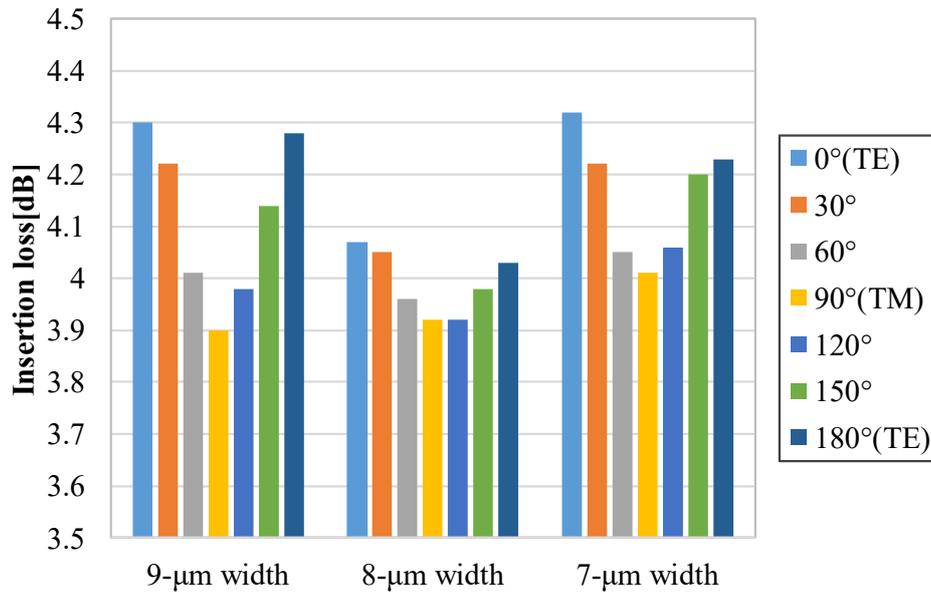


Fig. 5-69 矩形 SI 型導波路(最大偏波依存を示すチャネル)の偏光角度に対する挿入損失測定結果(1550 nm)

偏波依存損失特性の波長による相違は、コア内光強度分布の大きさが波長によって異なることに起因すると考えられる。5.2.2 項にて議論した通り、1550 nm の場合の NFP や MFD は、1310 nm の場合に比べ大きく、光強度がコアエッジ付近にまで広く分布している。そのため、コアエッジ付近の界面不正や構造揺らぎ等の影響を強く受けると考えられる。

直接露光法による SI 型コア形成の際、コア-クラッド界面(上面、2つの側面、底面の計4面)はそれぞれ異なるプロセスにて形成される。底面は硬化したアンダークラッド(スピノコートにて塗布)上にコアモノマーをスピノコートすることで形成される。2つの側面は、紫外線露光によるフォトマスクパターンの転写、及びその後の現像によって形成される。そして上面については、最初はコアモノマーのスピノコートにより形成されるが、紫外線露光後の現像工程によってその界面状態が変化する。第3章にて報告したように、コアモノマーへのパターン転写時は、酸素阻害下にて紫外線露光を行うため、コア上面には数 μm 程度の厚さの未硬化層が残存する。この未硬化層は現像によって取り除かれるため、結果的に現像工程中にコア上面が改めて形成されることとなる。このように、コアの上面、側面、底面は、それぞれ異なる表面状態を有する。さらに、直接露光法は3層の積層工程を踏むため、三度の紫外線照射が必要である。この紫外線による硬化時に、体積収縮によるストレスがポリマー材料に非対称的に付与されることが予想される。このようなコア、クラッド中にかかるストレスや微小な揺らぎ、界面荒れ等が、コア内を伝搬する光にも影響を与え、不安定な偏波依存損失特性を引き起こすものと考えられる[5-19]。

さらに、直接露光法で作製した導波路コアは完全均一な SI 型屈折率分布を有するため、屈折率の微小な変動に非常に敏感となることが予想される。そのため、時間的に変動する出

力光強度を示したものと考えられる。

5.4.3.2 円形 GI 型光導波路(Mosquito 法)の偏波依存損失特性

円形 GI 型導波路(導波路 A)に対して、Fig. 5-53 に示した評価系にて同様の測定を行った。最も短い露光待機時間が与えられた Ch. 12 について、各偏光角度に対する挿入損失測定結果を Fig. 5-70 に示す。また、各チャンネルの PDL を計算した結果を Fig. 5-71 に示す。

Fig. 5-70 より、1310 nm、1550 nm の両波長にて、挿入損失は偏光角度によらずほぼ一定値を示しており、偏波依存性がほとんど見られない。PDL の計算値は、波長 1310 nm のみならず 1550 nm の場合にも、すべてのチャンネルにて 0.1 dB 以下を示していることが Fig. 5-71 よりわかり、非常に安定した偏波特性を示しているといえる。

これには複数の理由が考えられる。まず、Mosquito 法で作製されたコアは、非常に対称性の良い真円形状であるため、導波路コアにかかる幾何学的ストレスがほとんどないと考えられる。さらに、Mosquito 法による導波路作製工程では、一度の紫外線露光のみで導波路を得ることができるため、硬化時の体積収縮による構造的なストレスが、コアに与える影響が小さいことも挙げられる。また、材料拡散による GI 型屈折率分布がコア内に形成されているので、コア、クラッド材料の濃度分布が緩やかに変化している。そのため、材料どうしの熱膨張係数の相違がコア内にて緩和される他、コア-クラッド界面不整による影響も低減できるものと考えられる[5-19]。

以上の要因から、Mosquito 法により作製された円形 GI 型導波路は、光強度分布がコアエッジ付近に広がった場合であっても、偏光角度によらず安定した光学特性を示すといえる。

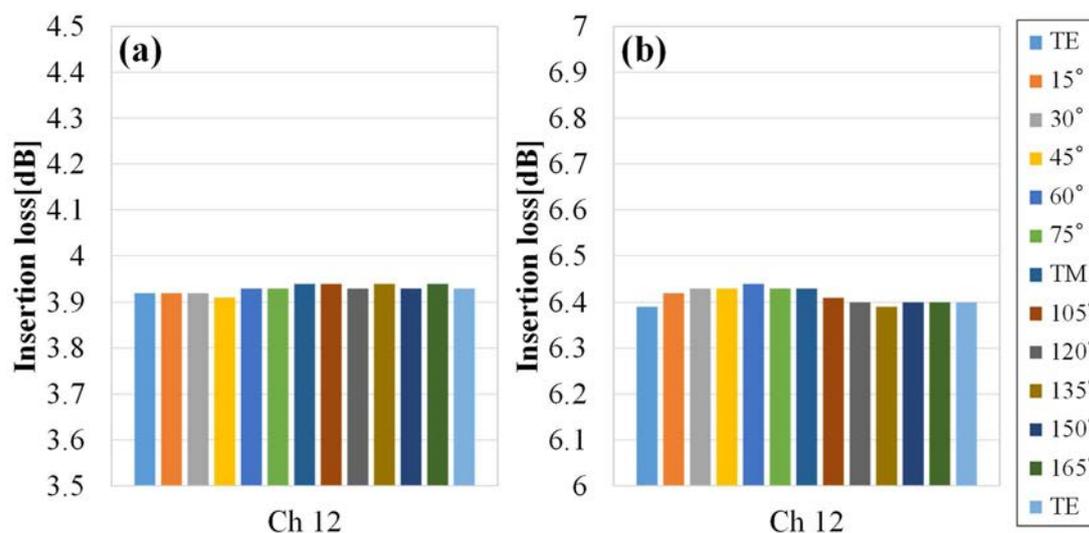


Fig. 5-70 円形 GI 型導波路(導波路 A, Ch. 12)の各偏光角度に対する挿入損失測定結果 (a)1310 nm (b)1550 nm

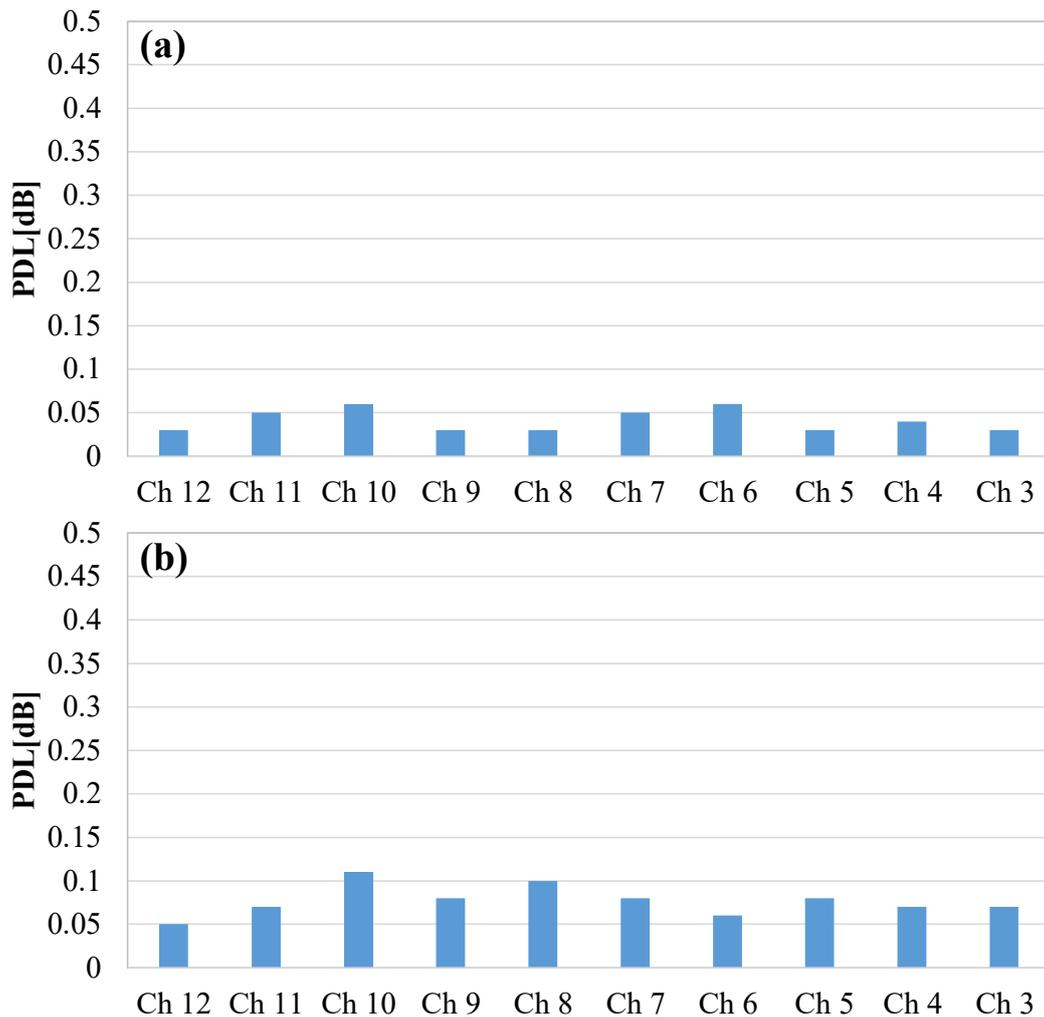


Fig. 5-71 円形 GI 型導波路(導波路 A)の偏波依存損失 (a)1310 nm (b)1550 nm

異なる条件にて作製した導波路 B, 導波路 C についても, PDL を評価した結果を Fig. 5-72, Fig. 5-73 にそれぞれ示す. これまでの結果により偏波依存損失特性がより生じやすいと判断される波長 1550 nm での測定結果である.

導波路 B, 導波路 C についても, ほぼすべてのチャンネルにて 0.1 dB 以下の PDL を示していることが Fig. 5-72, Fig. 5-73 よりわかる. Mosquito 法にて作製した円形 GI 型導波路は, 多少の作製条件の相違によらず, 安定した偏波依存損失特性を示すと判断できる.

Fig. 5-55 (c)に示した導波路端面写真より, 導波路 C のコア形状は完全な真円とはならず, 水平軸の長い楕円形状であった. 楕円形状にもかかわらず非常に安定した PDL 特性を示したことから, 幾何学的なコアの対称性は偏波特性に大きな影響は与えず, 作製工程中に体積収縮や熱膨張係数の相違によって付与される構造的ストレスや微小な界面揺らぎ等による影響が支配的であることが示唆された.

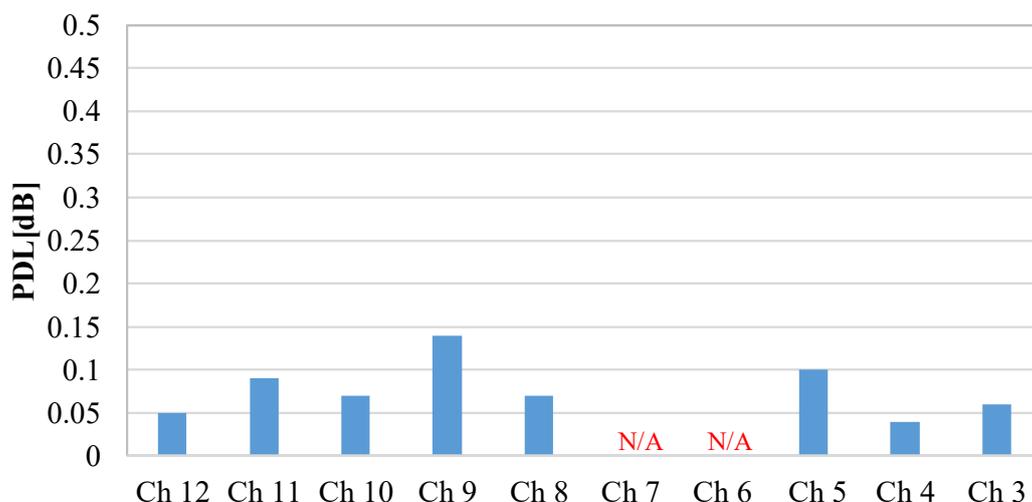


Fig. 5-72 円形 GI 型導波路(導波路 B)の偏波依存損失(1550 nm)

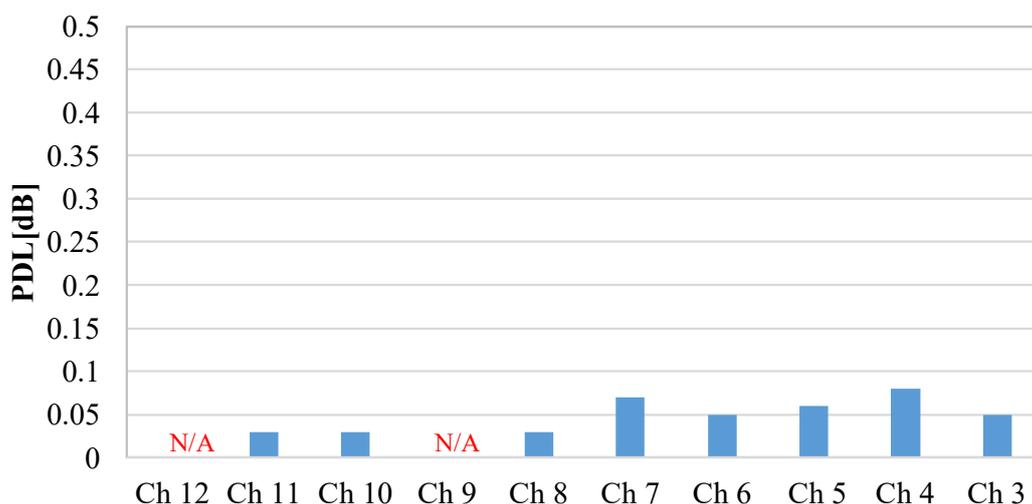


Fig. 5-73 円形 GI 型導波路(導波路 C)の偏波依存損失(1550 nm)

5.4.3.3 矩形 GI 型光導波路(インプリント法)の偏波依存損失特性

インプリント法により作製された矩形 GI 型導波路に対しても, Fig. 5-53 に示した評価系にて同様の測定を行った. 導波路内の全 7 チャンネルを評価したところ, いずれのチャンネルにおいても偏光角度に対して挿入損失が大きく変化する偏波依存性を確認した. PDL の値はチャンネルによって異なり, その標準偏差は 1310 nm, 1550 nm の両波長ともに約 0.16 dB にも及んだ. 全チャンネルの PDL の平均値に最も近い PDL を示したチャンネル(Ch. 8)の, 各偏光角度に対する挿入損失の測定結果を Fig. 5-74 に示す. 波長 1310 nm, 1550 nm の場合ともに, 挿入損失が偏光角度に大きく依存している様子が確認できる. 波長 1550 nm では, 0.59 dB にも及ぶ PDL を示している. ただし, 矩形 SI 型導波路では確認された時間依存性

は見られず、継時で特性が変動する様子は確認されなかった。

インプリント法による導波路作製では、アンダークラッド形成、コア充填、オーバークラッド形成の3工程を踏む。紫外線露光回数に注目すると、アンダークラッド硬化に3回、コア硬化に1回、オーバークラッド硬化に1回の、計5回にも及ぶ紫外線照射を作製工程に含む[5-21]。そのため、硬化時の体積収縮によりポリマー材料に付与されるストレスが大きいと予想される。さらに、GI型コアを作製する際には、アンダークラッドモノマーやコアモノマーの硬化時に紫外線照射量をあえて制限して半硬化状態とし、その後コアモノマーやオーバークラッドモノマーとの拡散をうながすことで、GI型屈折率分布を形成する工夫を施している[5-21]。モノマーどうしの相互拡散現象を利用するMosquito法と異なり、拡散方向に偏りが生じ、対称とはならない。コア-クラッド界面(上面、2つの側面、底面の計4面)のうち、側面及び底面については半硬化アンダークラッド-コアモノマー間の拡散により屈折率分布を形成するのに対し、上面に形成される屈折率分布は、半硬化コア-オーバークラッドモノマー間の拡散により形成される。そのため、形成されるGI型屈折率分布を対称に制御することが非常に困難であり、非対称な屈折率分布がコア内に形成されることとなる。インプリント法によるシングルモードポリマー光導波路作製の成功例は未だ少なく[5-21]、コア付近の屈折率分布や界面状態など未解明の部分が多い。

以上の特徴から、導波路コア内にかかるストレスや、コア-クラッド界面付近の構造揺らぎが大きいと、コア内に閉じ込められる光強度分布の大きさに関わらず、いずれの波長に対しても偏波依存損失特性を示したものと考えられる。さらに、導波路にあらかじめ付与される構造的ストレスが大きいと、測定時に生じる時間的なゆらぎの影響が相対的に小さくなり、時間依存性は示さなかったものと考えられる。

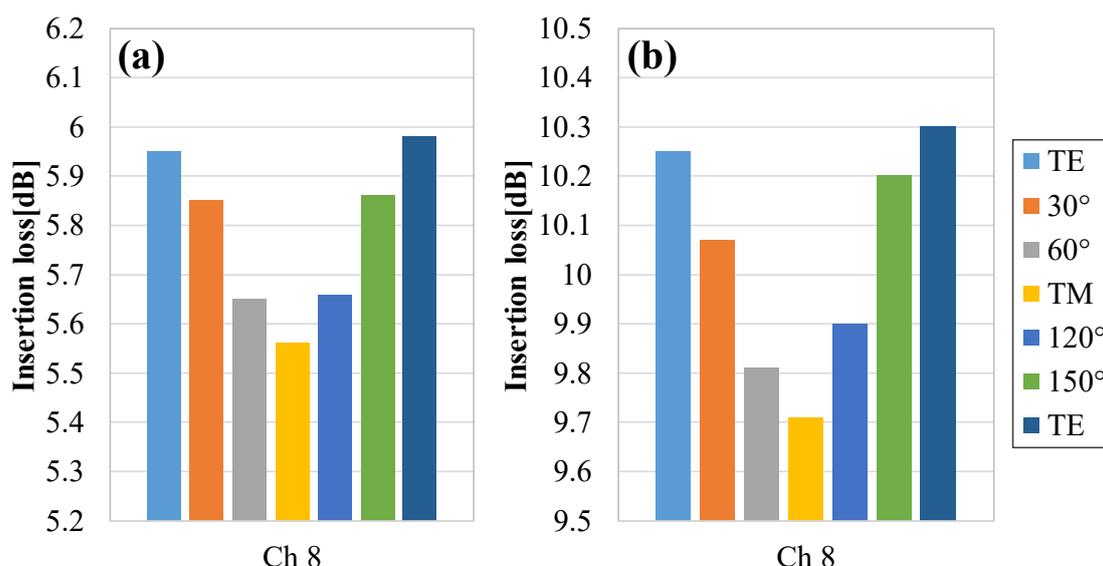


Fig. 5-74 矩形GI型導波路(Ch. 8)の偏光角度に対する挿入損失測定結果
(a)1310 nm (b)1550 nm

5.4.3.4 偏波依存損失比較

矩形 SI 型導波路(直接露光法), 円形 GI 型導波路(Mosquito 法), 矩形 GI 型導波路(インプリント法)の偏波依存損失特性を総括する. 各導波路の PDL 評価結果を Fig. 5-75 にまとめる. それぞれの導波路に対し, 測定した全チャネルの PDL の平均値を示している. ただし, 時間依存性が確認された, 波長 1550 nm での矩形 SI 型導波路の PDL のみ, 最大 PDL を示したチャネルの評価結果を採用している.

インプリント法により作製された矩形 GI 型導波路は, 波長 1310 nm, 1550 nm にてそれぞれ 0.44 dB, 0.46 dB の PDL を示しており, 波長によらず高い偏波依存損失特性を示す.

直接露光法により作製された矩形 SI 型導波路は, コア内に光が強く閉じ込められる 1310 nm 波長では 0.051 dB(Fig. 5-75 に示した全コア幅の平均値)の低 PDL 特性を示している. これに対し, 光強度分布がコアエッジ付近まで広がる 1550 nm 波長では, PDL は 0.33 dB にまで上昇し, 偏波依存性が生じる.

これらに対し, Mosquito 法により作製された円形 GI 型導波路は, いずれの導波路も両波長にて PDL を大幅に低減させている. Fig. 5-75 に示した全測定導波路の平均 PDL を計算すると, 波長 1310 nm, 1550 nm にてそれぞれ 0.049 dB, 0.068 dB となる. 偏波依存性が生じやすい波長 1550 nm であっても偏波依存損失を小さく抑え, 矩形 SI 型導波路に比べ 1/4 以下の PDL を達成した.

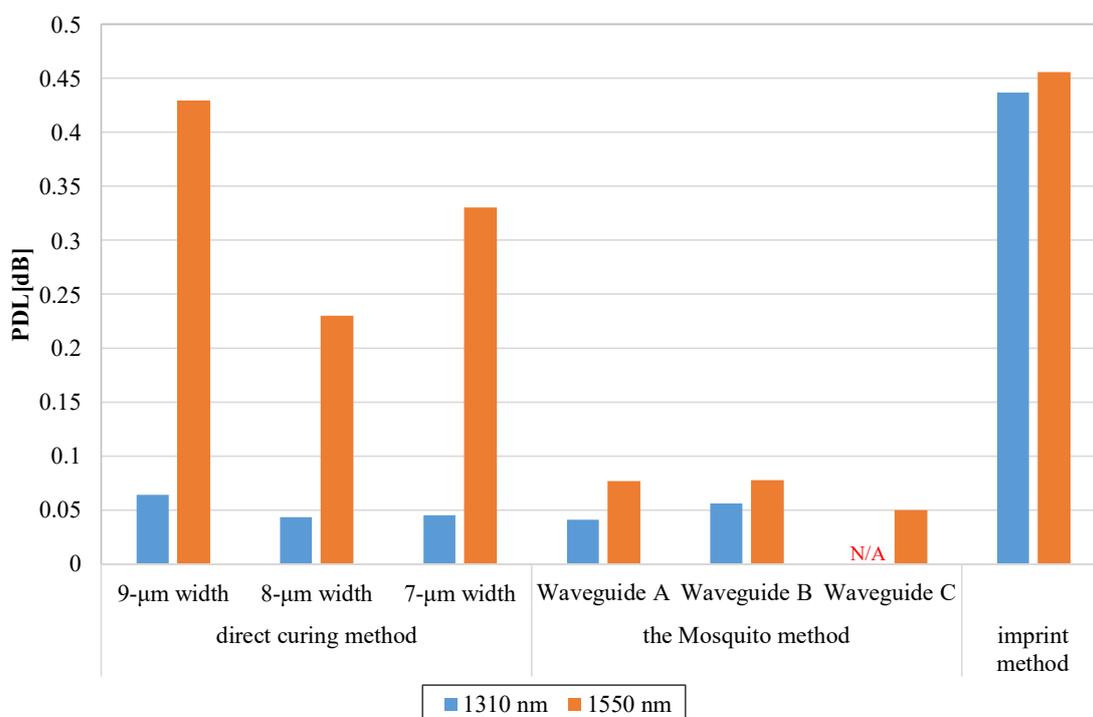


Fig. 5-75 評価導波路の偏波依存損失まとめ

5.4.4 偏波依存光学特性のシミュレーション

前項までの実測評価により、ポリマー材料にかかるストレスや材料中の屈折率ゆらぎ等が、シングルモードポリマー光導波路の偏波依存光学特性に大きな影響を与えることが示唆された。これらは作製時及び評価時の環境に依存して生じるため予測が難しく、偏波特性への影響について理論的に解析するのは非常に困難である。

そこで本項では、予想可能な範囲のポリマー光導波路の構造不正が偏波依存特性に与える影響について知るために、偏波依存損失をシミュレーションで検討した結果について述べる。シミュレーションには、導波路モードソルバ FIMMPROP を用いる。

導波路モードソルバでは、特定の光導波路断面にて発生する伝搬モードを、固有モード展開法[5-8]により解析する。異なる断面を有する光導波路どうしを接続した場合に、それぞれの伝搬モード間の結合効率を計算する。そのため、同一断面の光導波路伝搬中には光損失は一切発生しない。

実測評価にて生じる偏波依存損失は、光導波路内伝搬中に生じる場合と、他光学素子との結合の際に生じる場合があり、それらの要因が複合的に作用することが予想されるが、本シミュレーションでは結合損失の偏波依存性のみが検出されることに留意する必要がある。

5.4.4.1 コア形状の非対称性の偏波依存光学特性への影響

5.4.3.2 項では、楕円形状のコアを有する円形 GI 型導波路が偏波依存損失をほとんど示さなかったことから、コアの幾何学的な形状が偏波依存損失特性に与える影響は小さいという可能性を提示した。本項では、コア形状の非対称性が偏波依存光学特性に与える影響をシミュレーションにて検証する。

コアの縦横比の偏波依存損失特性への影響

本項目では、矩形コアや円形コアの縦横比が変化した場合の偏波依存損失への影響を検討する。5.2.5.2 項にて設計した住友電気工業(株)製の PA-A2 ファイバを想定した SMF と、光導波路を接続した際に生じる光損失を、Fig. 5-76 に示したシミュレーションモデル(Fig. 5-26 を再掲)を用いて計算した。光導波路の断面設計を Fig. 5-77 に示す。実測評価対象であった矩形 SI 型導波路、矩形 GI 型導波路、円形 GI 型導波路を想定した構造を設計している。コア、クラッドの屈折率を 1.567, 1.560 に固定したうえで、SMF と最も MFD の値が近くなるコアサイズを、各々の構造に対する基準コアサイズとしている。なお、GI 型導波路の屈折率分布は、5.2.5 項のシミュレーションの場合と同様の設計である。

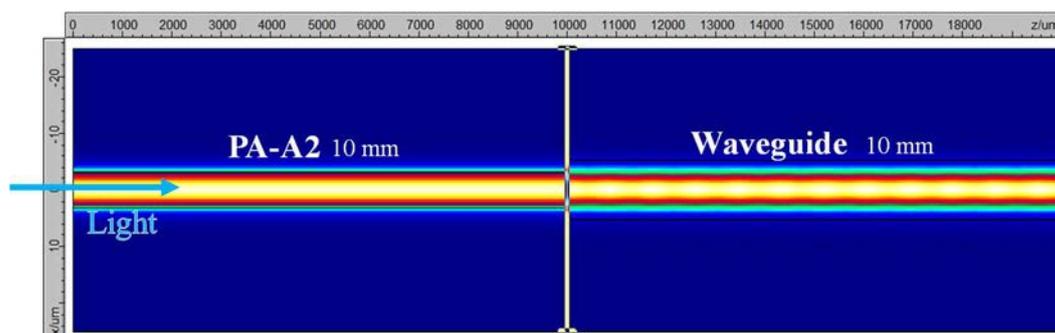


Fig. 5-76 結合効率評価のためのシミュレーションモデル

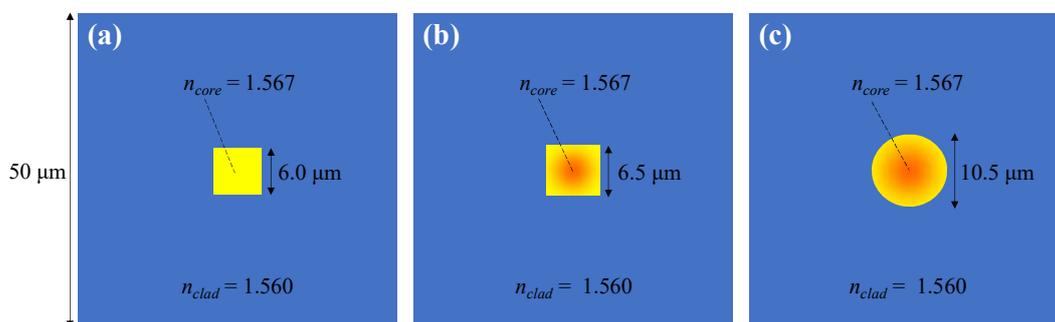


Fig. 5-77 偏波依存光学特性シミュレーション用導波路断面設計

(a)矩形 SI 型導波路 (b)矩形 GI 型導波路 (c)円形 GI 型導波路

以上の設計のもと、光導波路のコア高さは基準値に固定し、コア幅のみを変化させたときの光損失を計算した。波長は、実測評価にて偏波依存損失が生じやすいと判断された 1550 nm に設定した。導波路モードソルバではモードごとに結合効率を計算することができるため、SMF 内の TE, TM モードが、光導波路の TE, TM モードにそれぞれ結合する際の光損失を計算した。TE モードと TM モードの光損失の差を計算することで、偏波依存損失(TE モードが高損失の場合に正)を得た。光導波路のコアの縦横比に対する偏波依存損失の計算結果を Fig. 5-78 に示す。

Fig. 5-78 より、コア縦横比が 1 から変化し、コア形状が完全な正方形あるいは真円ではなくなった場合にも、偏波モード間に損失差はほとんど生じないことがわかる。よって、コアの幾何学的な形状が偏波依存損失特性に与える影響は小さいことが、理論的にも確認できた。

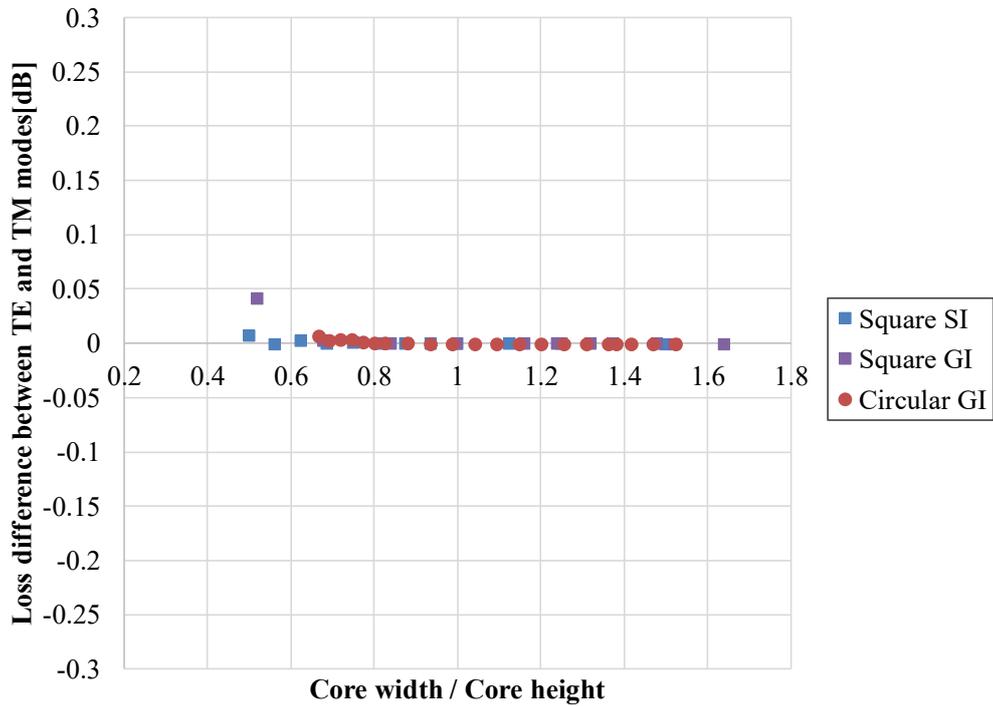


Fig. 5-78 偏波依存損失とコア縦横比の関係

矩形コアの台形化による偏波依存損失特性への影響

本項目では、矩形コアの形状に歪みが生じ、台形状となった場合の偏波依存損失への影響を検討する。前項目と同様に、Fig. 5-76 に示したシミュレーションモデルを用いて、SMFと光導波路を接続した場合に生じる結合損失を偏波モードごとに計算する。計算に用いた台形コア光導波路の断面設計を Fig. 5-79 に示す。コア上底(Core upper width)とコア下底(Core lower width)が互いに異なる台形コアを設計している。コア上底とコア下底の大きさは、コア高さに対応して決定され、Fig. 5-79 内の表に示すように、2 パターンの台形状を設計している。なお、コア内屈折率が一律な SI 型導波路を想定している。

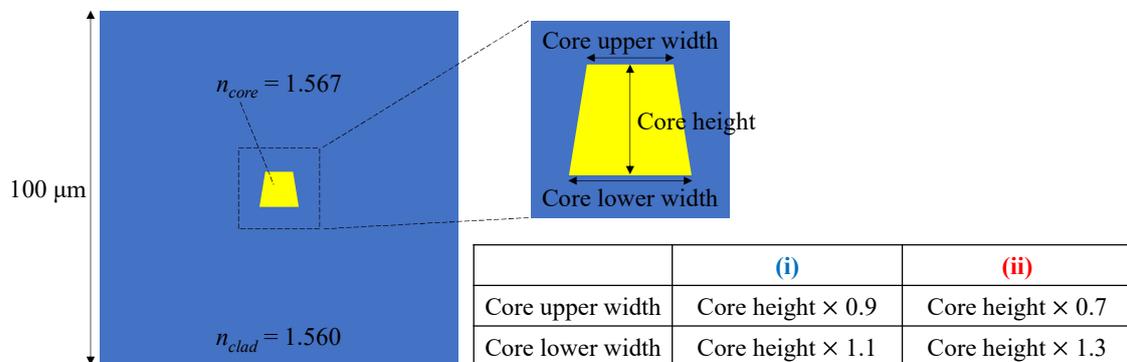


Fig. 5-79 偏波依存光学特性シミュレーション用台形コア導波路断面設計

以上の設計をもとに、導波路のコア高さを変化(同時にコア上底及びコア下底も変化)させた場合の光損失を計算した。波長は 1550 nm に設定している。計算された偏波モードごとの光損失の差を計算することで、偏波依存損失(TE モードが高損失の場合に正)を得た。偏波依存損失とコア高さの関係を Fig. 5-80 に示す。グラフの凡例として示した(i), (ii)は、Fig. 5-79 内の表に示した 2 パターンの台形状にそれぞれ対応している。いずれの台形状の場合にも、偏波モード間に損失差はほとんど生じていないことが Fig. 5-80 よりわかる。このことから、コアの外形状に歪みが生じた場合にも、偏波依存損失特性に与える影響は小さいといえる。

5.2.5.2 項で示した Fig. 5-34 にて議論したように、矩形コアに歪みが生じ、台形状となった場合、モードプロファイルの崩れにより SMF との結合の際に過剰損失が生じるおそれがある。しかし、このような過剰損失が生じた場合にも、偏波モード間に損失値の差異はなく、偏波依存損失にはつながらないことが本項目により明らかとなった。

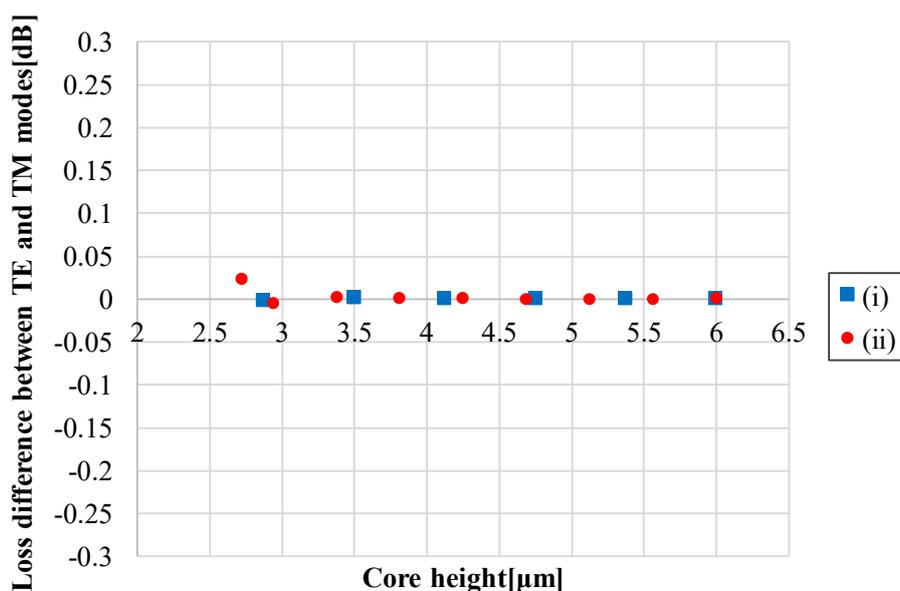


Fig. 5-80 台形コア導波路の偏波依存損失とコア高さの関係

5.4.4.2 クラッド内屈折率分布の偏波依存光学特性への影響

直接露光法では、3 回の積層工程(アンダークラッド、コア、オーバークラッド)を踏むために、層ごとに紫外線露光回数が異なるのは先述の通りである。そのため、層によって硬化時間の差やストレスの付与具合の差が生じ、同じ材料であっても屈折率に若干の差が生じることが予想される。このような屈折率分布が実際に測定されたわけではないが、クラッド内屈折率分布が偏波依存損失に与える影響を知る目的で、非対称クラッド屈折率を有する導波路を想定したシミュレーションを行うこととした。

設計した導波路の端面図を Fig. 5-81(a)に示す. アンダークラッドとオーバークラッドの屈折率がわずかに異なるよう設計している. また, 導波路全体の厚さは $40\ \mu\text{m}$ であるのに対し, 導波路幅は $200\ \mu\text{m}$ の設計であり, 実際に作製された導波路の大きさを表現した. Fig. 5-81(b)に示したシミュレーションモデルを用い, Fig. 5-81(c)のような断面を有する SMF とのバットカップリングを想定している. SMF 内の最低次の TE, TM モードが, 光導波路内の最低次の TE, TM モードへと結合する際の光損失を独立して計算した. TE モードと TM モードの光損失の差(TE モードが高損失の場合に正)を偏波依存損失(PDL)と定義し, 光導波路のコアサイズを変化(コア幅とコア高さを同時に変化)させた場合の PDL を計算した. 光導波路のコアサイズに対する PDL の計算結果を Fig. 5-82 に示す.

Fig. 5-82 より, 両波長の場合にて, 光導波路のコアサイズが小さくなるにつれて, PDL が生じていることがわかる. この PDL は, 先述の通り, SMF-光導波路間の結合損失が偏波モードごとに異なるために生じたものである. TE モードの場合に高損失を示した理由は, SMF を伝搬する TE モードが, 光導波路コアの最低次 TE モード(Fig. 5-83(a))のみならず, オーバークラッド及びコア内に電磁界分布を有する特異モード(Fig. 5-83(b))にも結合するためだと考えられる. この特異モードは, オーバークラッド・アンダークラッドの屈折率の相違により, $25\ \mu\text{m}$ 程度の厚さのオーバークラッド内に光が閉じ込められることによって発生したものである. 一方, TM モードについては特異的なモードは発生せず, SMF 内の TM モードは光導波路コアの最低次 TM モードへと高効率に結合する. このような TE モードと TM モードの挙動の違いから, 両者の間に損失差が生じ, 偏波依存結合損失につながるものと考えられる. さらに, 光導波路のコアサイズが小さくなるにつれて, SMF コア-光導波路コア間の MFD のミスマッチが増大し, SMF 内の TE モードが導波路クラッドモードへとより結合しやすくなるため, 光導波路コアサイズに依存する形で PDL が生じたのだと考えられる.

また, 波長による違いに注目すると, 波長 $1550\ \text{nm}$ では, 波長 $1310\ \text{nm}$ の場合に比べ, より大きなコアサイズでも偏波依存損失が生じていることが Fig. 5-82 よりわかる. たとえば, コアサイズ $4.09\ \mu\text{m}$ の場合, 波長 $1310\ \text{nm}$ では偏波依存損失は $0.001\ \text{dB}$ にも満たないのに対し, $1550\ \text{nm}$ では $0.865\ \text{dB}$ の偏波依存損失を示している. これは, 波長 $1550\ \text{nm}$ の場合は, 光導波路コアの最低次モードの電界分布が $1310\ \text{nm}$ の場合に比べて広がるため, より大きなコアサイズでも SMF との MFD のミスマッチが増大し, 偏波依存結合損失が生じるものと考えられる.

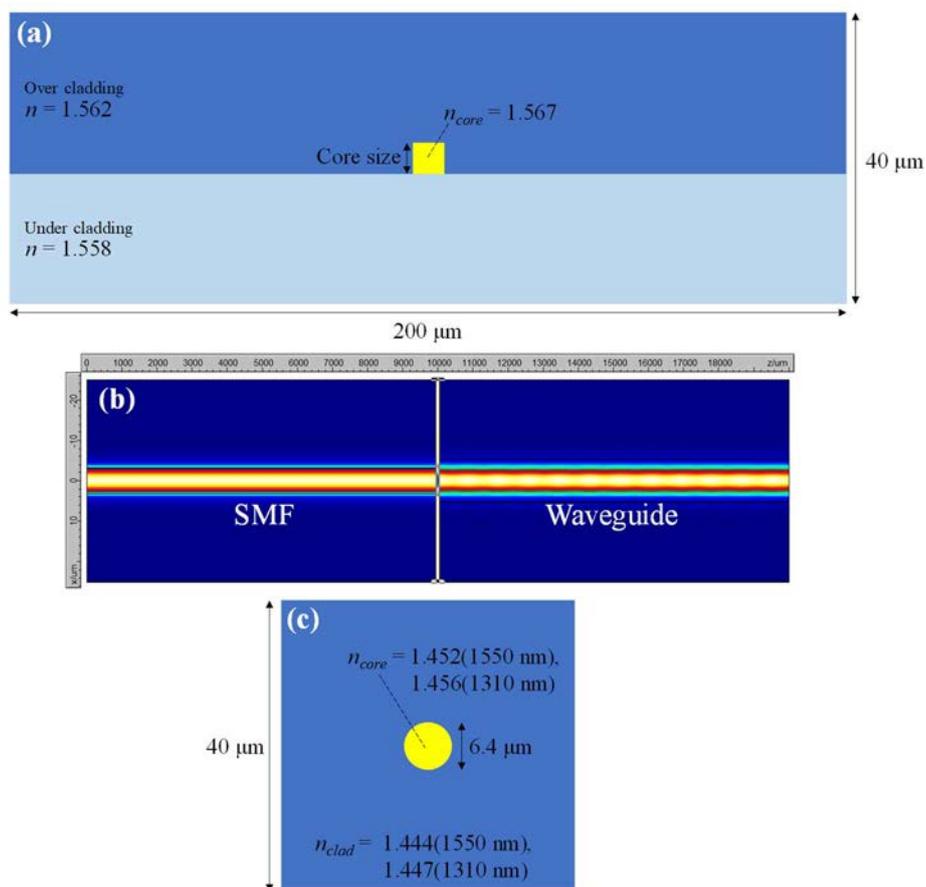


Fig. 5-81 (a)直接露光法により作製された矩形 SI 型光導波路を想定した導波路断面設計 (b)シミュレーションモデル (c)SMF 断面設計

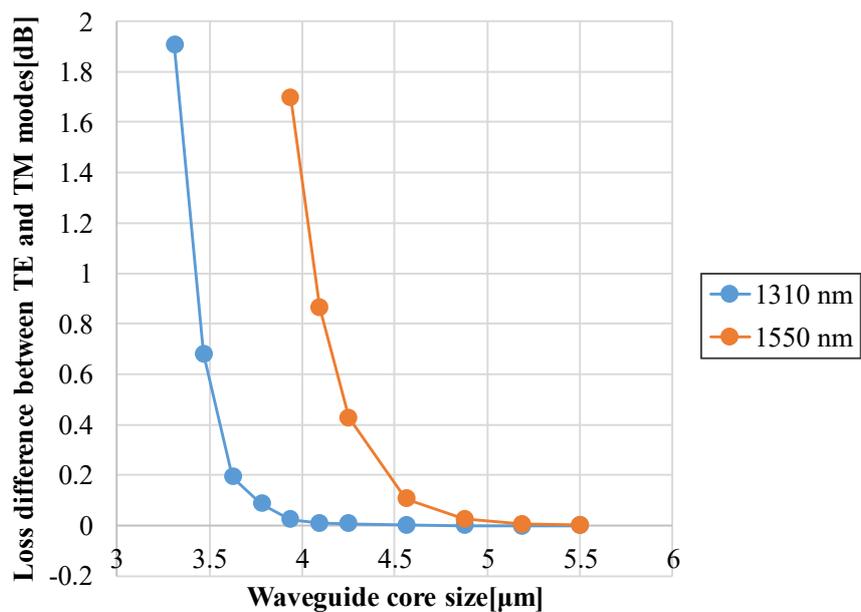


Fig. 5-82 偏波依存損失とコアサイズの関係

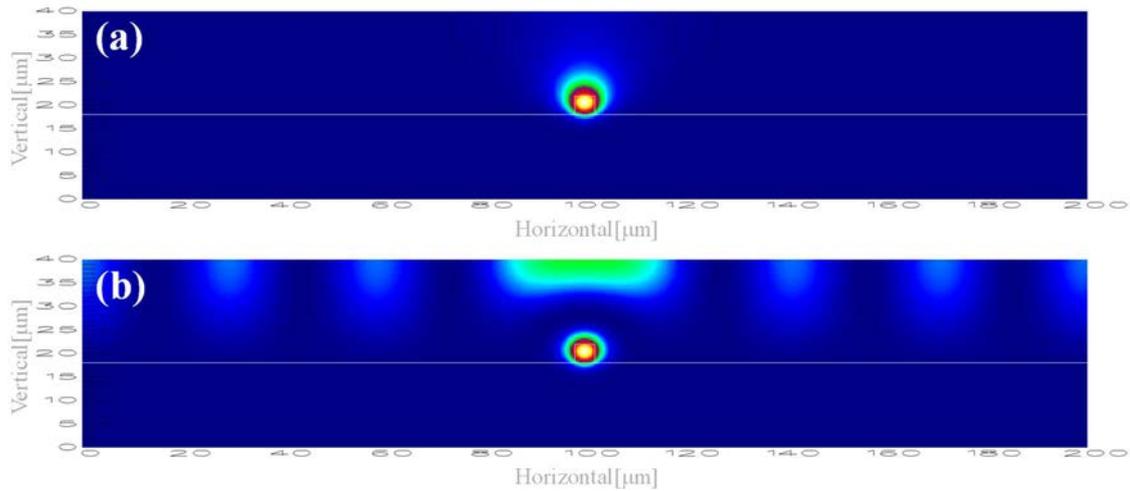


Fig. 5-83 (a)導波路の最低次 TE モード分布 (b)導波路の特異クラッドモード分布 (導波路コアサイズ 4 μm , 波長 1550 nm)

先述の通り、本シミュレーションでは固有モード展開法に基づき、設計した光導波路断面内に生じるすべてのモードが、放射されることなく伝搬モードとして振る舞う仕様となっている。本項目にて設計した光導波路断面は、全体のサイズが $200 \times 40 \mu\text{m}$ という有限値であり、シミュレーションの仕様上、断面のエッジではすべての光が全反射されるため、クラッド全体が光を閉じ込め伝搬させるコアとして機能する。そのため、本来であれば放射モードとなって導波路伝搬とともに電界分布を失っていくモードが、クラッド内の伝搬モードとして結合に寄与することとなる。よって、Fig. 5-83(b)に示したような特異的なクラッドモードは、本来であれば観測されない可能性が高いことに留意しなければならない。ただし、本シミュレーションにて計算した結合損失は、SMF、光導波路にそれぞれ固有である基底モードどうしの結合損失であるので、クラッドモードの存在の有無にかかわらず生じることに相違はない。したがって、本シミュレーションにて確認された偏波依存損失特性は、実際にも観測し得るといえる。

以上の結果により、コア内屈折率が一樣である場合にも、クラッド内の屈折率分布の影響により、偏波依存損失が生じる可能性があることを示した。さらに、波長 1310 nm と 1550 nm の場合とで、偏波特性が異なる場合もあることを理論的に示した。

5.5 結言

本章では、データセンタ内の光インターコネクト技術として注目を集めるシングルモードポリマー光導波路の他の光学素子との光結合特性に注目した検討を行った、

シングルモードファイバ(SMF)とのバットカップリング時の光結合特性を検討するべく、

直接露光法にて作製された矩形 SI 型導波路と Mosquito 法にて作製された円形 GI 型導波路に注目し、同種ポリマー材料を用いて両者の光学特性を比較した。その結果、矩形 SI 型導波路では、SMF との高結合効率を実現するために必要な、対称性のある真円形状のモードプロファイルを有するためには、コアの外形状の精密な制御が必要とされるのに対し、Mosquito 法では、フォトマスクフリーの簡便な手法にて、対称性のあるガウシアンプロファイルを有する円形コアを容易に作製可能であることがわかった。一方、シングルモードポリマー光導波路を SMF とバットカップリングする際の軸ずれ耐性は、MFD の大きさで決定づけられ、コア内屈折率分布による違いはほとんどないことがわかった。

次に、シリコン細線導波路とのアディアバティックカップリング時の光結合特性について、導波路モードソルバを用いた理論計算により検証した。その結果、ポリマー光導波路コア内の屈折率分布はアディアバティックカップリング効率に大きな影響を及ぼすことがわかった一方で、結合長を十分に確保することで、いかなる導波路でも結合効率を向上できることを示した。また、アディアバティックカップリング効率は偏波モードによって異なることがわかり、シリコン細線導波路との結合を考慮した際には、シングルモードポリマー光導波路の偏波依存光学特性が重要であることが明らかとなった。

最後に、シングルモードポリマー光導波路の偏波依存光学特性を評価した。その結果、直接露光法にて作製された矩形 SI 型導波路、インプリント法にて作製された矩形 GI 型導波路は、波長 1550 nm にて 0.4 dB もの偏波依存損失を示したのに対し、Mosquito 法にて作製された円形 GI 型導波路は、作製プロセス中にポリマー材料に付与されるストレスの影響を限りなく低減させ、1310 nm, 1550 nm の両波長にて非常に安定した偏波依存光学特性を示すことがわかった。

Reference

- [5-1] 住友電気工業, “光ファイバ・ケーブル”, <https://www.optigate.jp/pdf/catalog/cable.pdf> (2019 年 11 月閲覧).
- [5-2] 森本祥江, 疋田真, 松井瞳, 藤原悠人, 石樽崇明, “Mosquito 法 および 直接露光法によるシングルモードポリマー光導波路の作製と光学素子との高効率光結合検討”, 第 32 回エレクトロニクス実装学会 春季講演大会 (2019).
- [5-3] Y. Morimoto, M. Hikita, H. Matsui, Y. Fujihara, and T. Ishigure, “Low-loss single-mode polymer optical waveguides: comparison between direct-curing and the Mosquito methods,” Proc. of 2018 IEEE CPMT Symposium Japan (ICSJ), pp. 145-146 (2018).
- [5-4] 齊藤侑季, 2016 年度慶應義塾大学修士論文 (2017).
- [5-5] R. Kinoshita, D. Sukanuma, and T. Ishigure, “Accurate interchannel pitch control in graded-index circular-core polymer parallel optical waveguide using the Mosquito method,” Opt. Express, Vol. 22, No. 7, pp. 8426-8437 (2014).

- [5-6] H. Nawata, “Organic-inorganic hybrid material for on-board optical interconnects and its application in optical coupling,” Proc. of 2013 IEEE CPMT Symposium Japan (ICSJ), pp. 126-129 (2013).
- [5-7] 山内潤治, 藪哲郎, 「光導波路解析入門」, 森北出版株式会社 (2007).
- [5-8] D. F. G. Gallagher and T. P. Felici, “Eigenmode expansion methods for simulation of optical propagation in photonics – pros and cons,” Proc. of SPIE 2003, Vol. 4987, pp. 69-82 (2003).
- [5-9] 安原和貴, 於豊, 石樽崇明, “Si フォトニクスチップ接続のためのポリマー光導波路型スポットサイズコンバータ”, 電子情報通信学会 光エレクトロニクス研究会 (2016).
- [5-10] Y. Fujihara and T. Ishigure, “Fabrication for organic-inorganic hybrid resin based single-mode polymer optical waveguides using the imprint method for high density optical circuit,” Proc. of 2018 IEEE CPMT Symposium Japan (ICSJ), pp. 125-126 (2018).
- [5-11] Y. Sakaguchi and T. Ishigure, “Simulation of refractive index profile formed in polymer optical waveguides fabricated using the Mosquito method,” Proc. of 2019 IEEE CPMT Symposium Japan (ICSJ), pp. 145-146 (2019).
- [5-12] 小林佑衣, 阪口洋至, 石樽崇明, “Mosquito 法による円形コアシングルモードテーパ光導波路の作製とスポットサイズコンバータへの応用”, 電子情報通信学会 光エレクトロニクス研究会 (2019).
- [5-13] Y. H. Min, M. H. Lee, and J. Y. Do, “Polarization dependent loss in polymeric rib channel waveguide”, IEEE Photon. Technol. Lett., Vol. 12, No. 11, pp. 1483-1485 (2000).
- [5-14] J. M. Lee, S. Park, M. H. Lee, J. T. Ahn, J. Ju, and K. H. Kim, “Simple method to adjust polarization dependence in polymeric arrayed waveguide gratings,” IEEE Photon. Technol. Lett., Vol. 15, No. 7, pp. 927-929 (2003).
- [5-15] S. Y. Cheng, K. S. Chiang, and H. P. Chan, “Polarization dependence in polymer waveguide directional couplers,” IEEE Photon. Technol. Lett., Vol. 17, No. 7, pp. 1465-1467 (2005).
- [5-16] M. F. Hossain, H. P. Chan, M. A. Uddin, and R. K. Y. Li, “Efficient design of polarization independent polymer optical waveguide devices,” Proc. of 14th Optoelectronics and Communications Conference, WA5 (2009).
- [5-17] H. Matsui and T. Ishigure, “Fabrication for single-mode core fan-in/out polymer optical waveguide using the Mosquito method,” Proc. of BiCOP 2019 (2019).
- [5-18] H. Matsui, S. Yakabe, and T. Ishigure, “Applicability of the Mosquito method to fabricate fan-in/out device for single-mode multicore fiber,” Proc. of 2019 IEEE CPMT Symposium Japan (ICSJ), pp. 63-66 (2019).
- [5-19] 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,” IEEE J. Lightw. Technol. [in printing].
- [5-20] Y. Morimoto, H. Matsui, M. Hikita, and T. Ishigure, “Polarization dependence analysis of

polymer optical waveguides,” Proc. of 2019 IEEE CPMT Symposium Japan (ICSJ), pp. 183-186 (2019).

[5-21] 藤原悠人, 2018年度慶應義塾大学修士論文 (2019).

第6章

結論

ハイパフォーマンスコンピュータの性能向上やデータセンタ内トラフィック増大に対応するため、コンピュータ機器筐体内に光配線を導入する光インターコネクタ技術の重要性が高まっている。すでに筐体内には光ファイバリンクが広く導入されており、今後は電子回路基板上の信号伝送を光化するオンボード光インターコネクタ技術として、ポリマー光導波路が注目される。

当研究室では、従来の研究開発主対象であった階段屈折率(SI)型ポリマー光導波路に対し、低損失性、低クロストーク性に優れる分布屈折率(GI)型ポリマー光導波路に着目し、その優れた光学特性を実証してきた。特に、円形 GI 型コアポリマー光導波路の作製法として Mosquito 法を独自考案し、作製の簡便性、基板実装性、自由配線性などの特徴を活かしながら、GI 型ポリマー光導波路の光配線板応用を目指してきた。しかしながら、オンボード光インターコネクタ技術への応用のためには、ポリマー光導波路と光ファイバや光源・受光器などの他の光学素子との結合の高効率化に対する検討が不十分であった。

そこで本研究では、オンボード光インターコネクタ応用に向け、光導波路・光学素子間光結合特性に着目した。当研究室にて提唱する円形 GI 型コア光導波路に対し、他のコア形状やコア内屈折率分布を有するポリマー光導波路との比較を行いながら、理論計算、実測の両面からポリマー光導波路の光結合特性を評価し、高効率光結合を実証することを目指した。

本章では、その研究成果の総括を述べる。

ポリマー光導波路の作製

マルチモード光リンクの使用波長帯である 850 nm のみならず、シングルモード光リンクでの使用が想定される波長 1310 nm, 1550 nm においても低損失性を示す有機-無機ハイブリッド樹脂を用いて、矩形 SI 型コア光導波路が作製可能な直接露光法、円形 GI 型コア光導波路が作製可能な Mosquito 法、矩形 GI 型コア光導波路が作製可能なインプリント法それぞれにて、マルチモードポリマー光導波路、シングルモード光導波路の作製条件を確立した。これにより、同種ポリマー材料によるコア形状、コア内屈折率分布、作製プロセスの対等な比較を可能とした。

マルチモードポリマー光導波路の光結合特性

マルチモードポリマー光導波路のバットカップリング時の光結合特性を、同種材料にて作製した矩形 SI 型、円形 GI 型光導波路に対して評価した結果、円形 GI 型光導波路は特有の光閉じ込め効果により、コアサイズが大きい場合にも受光素子との高結合効率を維持し、

導波路入出射時双方にて結合損失を低減できる可能性があることがわかった。

次に、マルチモードポリマー光リンクにて想定される、面発光レーザ・ポリマー光導波路間の 45° ミラーによる反射を利用した光結合系に注目し、ポリマー光導波路の光結合特性を評価した。

矩形コアの SI 型、GI 型光導波路に対し、 45° ミラーを介した光結合特性評価を行った結果、矩形 GI 型光導波路は、特有の光閉じ込め効果を 45° ミラー介在後も維持し、位置ずれがある場合にも矩形 SI 型光導波路に比べ常に低損失性を示した。

光線追跡シミュレーションを用いて、 45° ミラーを介した光結合を含む導波路リンクにて生じる光損失を検討した結果、円形 GI 型光導波路はミラーによる反射を介した後にも特有の光閉じ込め効果を維持し、導波路出射部での高結合効率を実現することによって、SI 型に比べ優位性を持つことを理論的に確認した。同様に光線追跡シミュレーションにより、円形 GI 型光導波路が 45° ミラーを介した高効率光結合を実現するために最適な導波路構造(クラッド厚、コアサイズ、屈折率、ミラー角度、コア内屈折率分布)を明らかにした。

シミュレーションによる設計をもとに、最適導波路構造を有する円形 GI 型ポリマー光導波路を実際に作製した結果、設計前に比べ、3 dB もの結合損失低減を果たした。また、最適構造を有する円形 GI 型並列コアポリマー光導波路を用いて、28 Gbps のマルチチャネル高速信号伝送に成功した。

これらのことから、GI 型ポリマー光導波路は、適切な導波路構造の選定により、 45° ミラーを介した光結合を含む場合にも特有の優れた光学特性を示すことが明らかとなった。

シングルモードポリマー光導波路の光結合特性

シングルモード光リンクにて、オフボード領域のシングルモード光ファイバ(SMF)とオンチップ領域のシリコン細線導波路を高効率につなぐ光結合素子としてのシングルモードポリマー光導波路の光学特性に注目した。直接露光法により作製した矩形 SI 型コアシングルモードポリマー光導波路、Mosquito 法により作製した円形 GI 型コアシングルモードポリマー光導波路を同種ポリマー材料にて比較した。

SMF との光結合特性を評価した結果、Mosquito 法では、フォトマスクフリーの簡便な手法にて、対称性のある円形コアを容易に作製可能であるため、同手法にて作製された円形 GI 型光導波路は、対称性のあるガウシアンモードプロファイルを有し、SMF との高効率光結合を実現した。

シリコン細線導波路とのアディアバティックカップリング時の光結合特性を、導波路モードソルバを用いたシミュレーションにて理論検討した結果、いずれの導波路コア形状、コア内屈折率分布の場合にも、アディアバティックカップリング効率は偏波モードによって異なることがわかり、シリコン細線導波路との結合を考慮した際には、シングルモードポリマー光導波路の偏波依存光学特性が重要であることが明らかとなった。

シングルモードポリマー光導波路の偏波依存光学特性を、波長 1310 nm, 1550 nm にて評

価した。その結果、矩形 SI 型光導波路は、波長 1550 nm にて単純な直線構造パターンでも 0.4 dB もの偏波依存損失を示したのに対し、Mosquito 法にて作製された円形 GI 型光導波路は、いかなる偏波状態にもよらず、両波長にて非常に安定した光学特性を示した。

本技術の将来展望

本研究から、マルチモード光リンク、シングルモード光リンク双方にて、他の光学素子との高効率光結合を実現するポリマー光導波路構造が明らかとなった。この結果を受け、Mosquito 法によって作製される円形 GI 型コアポリマー光導波路の、オンボード光インターコネクト技術としての応用が期待できる。

特に、マルチモード光リンクでは、導波路コア内への GI 型屈折率分布形成によって、導波路入出射時双方での結合効率向上が可能となることは極めて重要である。本研究で検討したバットカップリング時の光結合及び 45° ミラーを介した光結合にとどまらず、あらゆる結合系にて、GI 型光導波路は適切な導波路構造の形成により高効率化を実現する可能性がある。特に、Mosquito 法による導波路作製では、作製パラメータを変更するのみで容易にコア径等の導波路構造の変化が可能であり、最適構造の形成を行いやすい。本論文にて、Mosquito 法では 3 次元光配線などの複雑構造も形成可能であると述べたが、形成が可能であることにとどまらず、複雑構造を有した場合にも高結合効率を実現できる可能性があり、その特徴を活かした新規光モジュールへの応用が期待できる。

シングルモード光リンクでは、光結合効率向上という目的に対しては、GI 型分布の形成は必須とは限らない。ここでは、Mosquito 法による導波路作製の特徴として、GI 型分布が形成可能である点ではなく、その作製プロセスの簡便性が非常に重要となる。バットカップリング時の高結合効率化のためには、コア形状及びモードプロファイルの対称性が極めて重要であるが、クラッドモノマー内に円形コアを直接吐出するという Mosquito 法の最大の特徴そのものが、対称構造を可能としている。また、シングルモード光リンクで重要となる偏波依存光学特性の安定化のためには、ポリマー材料にかかるストレスを最大限緩和させる作製プロセスを踏む Mosquito 法の価値が高まる。これは、他のいかなる作製手法でも実現が困難であった特徴である。よって、Mosquito 法によるシングルモードポリマー光導波路作製技術を確立したことは、ポリマー光導波路の応用の幅を劇的に広げるであろう。

謝辞

本研究は、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、同大学工学部石樽崇明教授の指導のもとに行ったものです。

本研究を進めるにあたり、数々の貴重なご助言やご指導を賜りました石樽崇明教授に深く感謝申し上げます。常に学生一人一人としっかりと向き合い、的確な助言をくださる先生のおかげで、自らの研究テーマに誇りをもって研究に取り組むことができました。修士課程修了後、再び進路に迷って途方に暮れていた私に、石樽先生が次の道を明るく照らし出してくださったからこそ、本博士論文を執筆するほどに成長することができました。石樽研究室に初めて所属したときから7年間、数えきれないほどたくさんの方を石樽先生から教わりました。石樽研究室で学んだことや得た経験を大事にし、今後の研究活動にも全力で取り組んでまいりたいと存じます。

本博士論文の副査を引き受けてくださった、小池康博教授、津田裕之教授、牧英之准教授に、厚く御礼申し上げます。お忙しい中、日程調整等に親身にご協力くださり、審査の間は大変貴重なご指摘、ご助言を賜りましたこと、重ねて感謝申し上げます。副査の先生方と議論をさせていただいたおかげで、本論文を執筆することができました。

石樽研究室の訪問研究員として、何度も慶應義塾大学に足を運んでくださり、数々のご助言をくださりました疋田真氏に心から感謝申し上げます。「Mr. ポリマー光導波路」と呼ばれるほど博識な疋田氏には、ポリマー光導波路の作製技術の確立に関してお力添えを頂くのみにとどまらず、実験の進め方や研究活動で大事にすべき考え方など、たくさんの方をご教授いただきました。今後の研究活動にも必ずや活かしてまいります。

マルチモードファイバリボンや高速信号伝送実験環境をご提供くださり、数々のご助言を賜りました古河電気工業株式会社的那須秀行氏、長島和哉氏に深く謝意を表します。当研究室での伝送実験環境構築の際にも絶大なるサポートをいただき、時間を惜しまずご協力くださりましたこと重ねて感謝申し上げます。伝送実験に関してのみならず、研究遂行のうねで重要となる考え方についても親身にご教授くださり、感謝の限りです。

本研究にてポリマー光導波路材料として用いた、有機-無機ハイブリッド樹脂であるSUNCONNECT®シリーズをご提供くださり、数々のご助言を賜りました日産化学株式会社の縄田秀行氏、大島寿郎氏に深く謝意を表します。

本研究にて、シングルモードポリマー光導波路の偏波依存光学特性を評価するにあたり、光学特性評価環境をご提供くださった Fraunhofer Heinrich Hertz Institute の Moritz Kleinert 氏をはじめとするハイブリッド PIC グループの皆様にご深く謝意を表します。1ヶ月にわたる長期滞在を受け入れてくださり、多くのディスカッションの機会もいただきましたこと、重ねて感謝申し上げます。

本研究にて、ポリマー光導波路の光結合特性を評価するために用いた、矩形 GI 型コアポ

リマー光導波路サンプルをご提供いただき、数多くのご助言を頂きました住友ベークライ
ト株式会社の守谷公雄氏、堀元章弘氏、北添雄真氏に深く謝意を表します。

本研究にて、直接露光法によるポリマー光導波路の作製技術を確立するにあたり、実験環
境をご提供くださった産業技術総合研究所の天野建氏に深く謝意を表します。

本研究を進めるうえで重要な知見となりました、シングルモードポリマー光導波路のコ
ネクタ加工について、実験環境のご提供のみにとどまらず、親身にご教授・ご助言くださり
ました株式会社白山の竹崎元人氏に深く謝意を表します。

本研究を進めるうえで重要な背景知識となる、光回路実装技術の最新動向について、多く
の知見を学ばせていただく環境を賜りました、エレクトロニクス実装学会 光回路実装技術
委員会 ロードマップ委員の皆様には厚く御礼申し上げます。

私は、一時所属を離れていた 2016 年度を除き、2013 年度から 2019 年度の長きにわたり、
石樽研究室に所属させていただきましたが、その期間、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。

まず、研究室配属当初、私の指導員として、研究の進め方、実験機器の使用法、結果の
考察やまとめ方等について、数々のご助言・ご指導をいただきました木下遼太氏に心より感
謝申し上げます。同じく研究室の先輩として、多くのことをご教授いただきました工藤拓也
氏、山下洋平氏、菅沼大輔氏、高橋麻美氏にも感謝申し上げます。

同期である榎本忠幸君、大泉悠太郎君、古後佑典君、鈴木球太君、三谷真利奈さん、吉田
翔君と、学部 4 年生から修士 2 年生までの 3 年間、切磋琢磨しながら過ごした研究室生活
は、私の成長の糧となりました。改めて御礼申し上げます。

後輩である相賀建人君、香取健司君、齊藤侑季さん、シング アンジャニ・プラタブ君、
戸田帆志彦君、増田輝君、安原和貴君、山内瞭君、阿部光平君、菅沼昂平君、伊達玖実さん、
望月康平君、吉田百合重さんは、それぞれの研究テーマに尽力し、当時のみならず後々の石
樽研究室にとっても非常に重要となる研究成果を導き出しました。本研究を進めるうえで
もその多くを参考にさせていただきましたこと、改めて感謝申し上げます。

博士課程の先輩として先導していただき、貴重なディスカッション及び語学力向上の機
会をいただきましたラッセル エムディー オマール ファルク氏に感謝申し上げます。

インプリント法によるシングルモードポリマー光導波路作製条件の策定において重要な
結果をもたらし、同方法にて習得したリソグラフィ技術をご教授くださった藤原悠人君に
深く謝意を表します。本研究にて直接露光法によるポリマー光導波路の作製技術を確立す
る際にも絶大なるサポートをいただき、ディスカッションの際には、研究者として非常に優
れた考察力に基づくご助言を多く賜りました。本研究に大きく貢献いただいた藤原君に心
より感謝申し上げます。また、石樽研究室の博士課程学生として同志である幡井亮介君にこ
れまでの御礼を申し上げます。後輩とは思えないほど頼れる幡井君には、本研究の背景知識
の学習や、研究結果に対する考察の際にも、親身にサポートいただきました。石樽研究室の
リーダーのような存在となる幡井君のこれからの益々の活躍を楽しみにしています。また、

同じく同期のような存在である中崎蒔乃さん、中村純君、中山知樹君、丸島千波さんと一緒に過ごした日々は、私の研究室生活にとってかけがえのないものでした。改めて感謝申し上げます。

本研究にて評価したシングルモードポリマー光導波路の作製技術確立は、松井瞳さんの功績によるものです。シングルモードポリマー光導波路の提供ならびに有意義なディスカッションの機会をいただき、私の学会発表や国際論文投稿の際にも共著者として貢献いただきましたこと、感謝申し上げます。同じく後輩である五十嵐遥彦君、阪口洋至君、中澤良太君、堀江敏史君と、2年半に渡り有意義な研究室生活を共に過ごさせていただいたことに感謝申し上げます。同年度の卒業生として共に次の道に踏み出せることを嬉しく思います。

本研究にて紹介した、Mosquito 法によるマルチモードポリマー光導波路の作製方針を導き出した石井真穂さんに感謝申し上げます。これは、本研究でも特に重視した、複数の導波路作製法による比較を可能とする、非常に価値ある功績です。シングルモードポリマー光導波路によるスポットサイズコンバータ作製検討において大きな結果をもたらし、シリコン細線導波路-シングルモードファイバ間の高効率光結合化に貢献した小林佑衣さんにも感謝申し上げます。同じく後輩である上坊俊貴君、小渡巧君、坂本英樹君、濱拓樹君も、それぞれの研究テーマにて有力な結果をもたらし、熱心に研究に取り組む姿を見させてくださったことに感謝申し上げます。

本研究テーマの最有力引継者として、ディスカッションを共にした長谷龍二君に、この1年の御礼を申し上げます。本研究にてマルチモードポリマー光導波路のバットカップリング時の光結合特性を解明したことは、長谷君の功績です。同じく後輩である後藤貫太君、金野裕介君、高橋諄向君、田村惇至君の来年度からの活躍にも期待しています。

海外からの留学生として石榑研究室に所属し、不断の努力と独自の視点で大いに健闘してくださったサリー ヌール フダ氏、モンダル ジャパトシュ氏、林聯宇君に感謝申し上げます。

社会人博士課程として石榑研究室にご所属くださり、企業で活躍する研究者ならではの知見をもとに多くのご助言をくださりました矢加部祥氏、高武直弘氏に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。私の後期博士課程への進学を温かく見守ってくださった母の支えや、研究者としても先輩である姉の助言をなくしては、本研究は存在し得ません。この場を借りて御礼を申し上げます。

2020年2月10日 森本 祥江