

レーザ加工用テーパ光ファイバの研究開発

小林 壮一 [フォトリソグラフィテクノロジー株式会社/代表取締役]

藤井 雄介 [フォトリソグラフィテクノロジー株式会社/技術主任]

須田 俊央 [フォトリソグラフィテクノロジー株式会社/技術主任]

三ツ野 仁 [株式会社共立鉄工所/代表取締役]

新関 健士 [株式会社共立鉄工所/部長]

三ツ野 豪 [株式会社共立鉄工所/係長]

背景・目的

レーザ技術の高度化に伴い、レーザ光の品質やエネルギー効率に着目し、非通信分野における応用技術への期待が高まり、小型・軽量で高出力化が可能な半導体レーザが、従来のガスレーザや固体レーザに代わる光源として普及し始めている。しかし、レーザ光を照射目的物まで導くための高出力用の光ファイバの開発が進んでいないため、使い勝手の良い高出力レーザが開発されてもその機能が十分に生かしきれていない状況にある。

上記課題を解決するため、本研究開発では、レーザから出射した光ビームの口径(スポットサイズ)を、ユーザが希望するサイズに変換できるスポットサイズ変換用光ファイバを開発する。

内容・方法

従来のスポットサイズ変換光学系は、出射光を平行光または集光する際、光ファイバ先端にマイクロレンズを用いるため、①部品点数が多い、②光パワー密度が小さい、③光ファイバへの結合損失が大きいといった課題が存在する。その解決の為、①大口径光ファイバのテーパ化を行い、光ファイバ出口のコア形状を任意に制御し、②レンズ系無しで集光可能なスポットサイズ変換用光ファイバを開発する。主な検討項目としては、大口径光ファイバをテーパ化し、目標とするコア径サイズを得る為、③テーパ角度と伝搬損失の依存性を明確化し、更には④テーパ角度と光ファイバを曲げた際に生じる原因(曲げ損失)の依存性を明らかにすることである。また⑤入射光強度がハイパワーであっても耐性を得る為、純粋石英コア/空気クラッド構造の特性について検討を行う。

結果・成果

3-1. 研究開発成果

3-1-1 作製方法について

本研究で作製するスポットサイズ変換用光ファイバは、PSTI 社短尺線引き装置を用い作製を行った。装置の構成を下記(図1)に示す。

①光ファイバ送りユニット

- ・直動ステージ：ステージストローク 400mm
速度(母材送り)：0.1~10mm/sec

②巻き取りドラムユニット

- ・ドラム径：φ330mm(樹脂製)
巻き取り速度：0.1~200mm/sec(巻き取りドラム周速)

③ステージコントローラ

- ・PC 動作(コントロールボード内蔵)

④熱源

- ・マイクロトーチ(O₂+プロパンガス)
※O₂+プロパンガスの流量は、マスフローコントローラにて精密制御

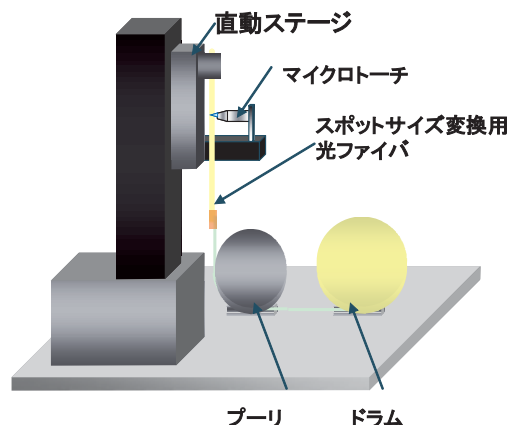


図1 短尺型光ファイバ線引き装置

短尺線引き装置は PC に連動されており、パラメータを入力することによって、線引きを開始する。

線引きされた光ファイバのテーパ形状作製方法は、線引き速度 v を線形に変化させることによりテーパ形状を形成する。光ファイバ母材が定常的に光ファイバに線引きされている場合には、下記(1)式で表される。

$$\pi \cdot R^2 \cdot V = \pi r^2 v \quad (1)$$

R = 母材半径 V = 母材送り速度

r = 光ファイバ半径(線引き後) v = 線引き速度

線引き速度変化によるテーパ形状作製例を下記に示す(図2)。

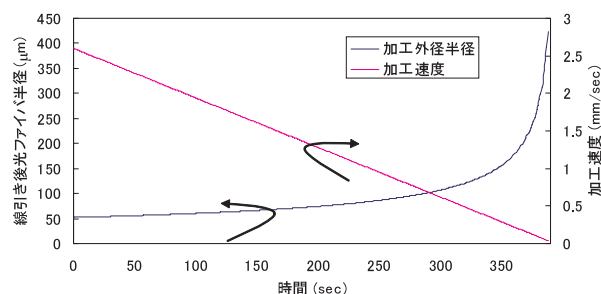


図2 外径800μm→125μm変換スポットサイズ変換ファイバ作製例

3-1-2 光ファイバタイプの選定

光ファイバのタイプは、一般的にコアの屈折率分布によってSI(Step Index)型とGI(Graded Index)型とに分けられる。SI(Step Index)型は、コア内の屈折率分布が一樣に設計されており、光の導波の振る舞いとしてはコア／クラッドの境界を全反射を繰り返し、光が導波する。GI(Graded Index)型は、コア内の屈折率分布が2乗分布になるよう設計されており、光の導波は直進する中心部分のモードの光は角度を持って進む周辺部分のモードの光よりも速度が速いので、中心部分の屈折率を高くし、周辺に行くに従って屈折率を徐々に低くするよう設計されている(図3)。本研究では、SI型、GI型の両方の光ファイバでスポットサイズ変換ファイバの作製を行い、テーパファイバに適する屈折率構造の解明を行った。

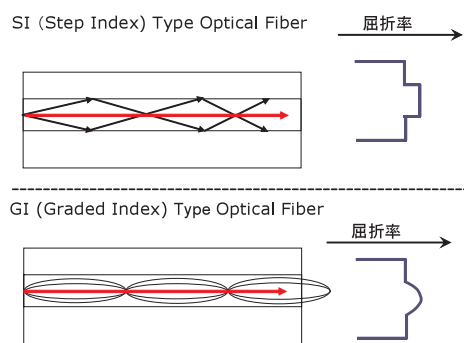


図3 光ファイバタイプについて(SI型、GI型)

各々の作製したスポットサイズ変換ファイバの仕様を下記に示す。

1) SI型スポットサイズ変換光ファイバ作製仕様

- ・ファイバタイプ：SI MMF
- ・入射コア径：600 μ m
- ・出射コア径：200 μ m
- ・ファイバ NA：0.2~0.3
- ・テーパ長：162mm
- ・ファイバ長：900mm

2) GI型スポットサイズ変換ファイバ作製仕様

- ・ファイバタイプ：GI MMF
- ・入射コア径：600 μ m
- ・出射コア径：200 μ m
- ・ファイバ NA：0.2~0.3
- ・テーパ長：160mm
- ・ファイバ長：1000mm

1)、2)条件で作製したスポットサイズ変換ファイバの下記測定条件で損失評価を行った。評価結果を図4に示す。
測定条件：

- ・測定波長：633nm(He-Ne レーザ)
- ・集光レンズ入射ビーム径：0.8mm
- ・測定用入射レンズ：×5倍(対物レンズ NA：0.1)、
×10倍(対物レンズ NA：0.25)、
×20倍(対物レンズ NA：0.4)

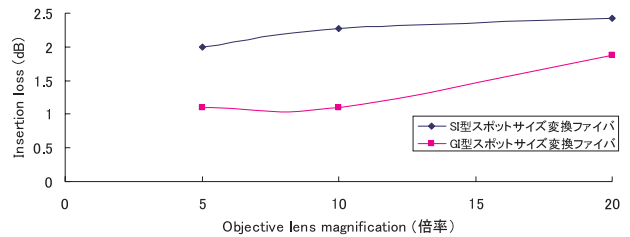


図4 SI型スポットサイズ変換ファイバ vs GI型スポットサイズ変換ファイバ

結果として、SI型よりGI型の方が挿入損失が低くスポットサイズ変換ファイバに適したファイバであることが解った。本研究では、GI型 MMF NA：0.2~0.3を用いたスポットサイズ変換ファイバの作製を行い光学特性の解明を行った。

3-1-3 光学特性評価

3-1-3-1 テーパ長による損失変化について：

スポットサイズ変換ファイバの低損失化の実現のため、テーパ部の長さによる損失値の変化を確認した。

下記同一入射条件において、テーパ長のみ異なるスポットサイズ変換光ファイバの損失変動結果を図5に示す。図5より、テーパ長が300mmより短いファイバにおいては挿入損失が3.0dBと非常に大きい値を示したが、テーパ長が1200mm程度の試料においては挿入損失が1.0dB以下と良好な結果を得ることが出来た。テーパ部長に依存した損失増の考察としては、テーパ部が短いと光の伝搬角(反射角度)が大きくなり臨界角を超え損失が増加すると考える。また、テーパ部が長くなったにも関わらず損失が増加した結果の原因は、今回作製に用いたマイクロトーチであると考えられる。これはマイクロトーチに用いるガス、O₂とLPガスをマスフローコントローラで制御しているが、外的要因(風圧等)等で炎が振れることにより作製されたファイバの形状が歪み、その結果損失が増加したと考えられる。

評価試料の詳細及び測定条件について：

- ・測定波長：633nm(He-Ne レーザ)
- ・入射コア径：600 μ m
- ・出射コア径：100 μ m
- ・ファイバタイプ：GI MMF
- ・測定波長：633nm(He-Ne レーザ)
- ・集光レンズ入射ビーム径：2.0mm

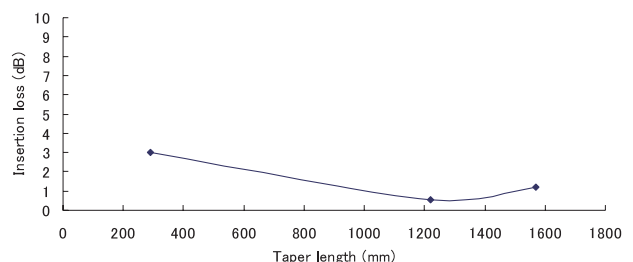


図5 テーパ長による挿入損失変動結果

- ・測定用入射レンズ：×5倍(対物レンズ NA：0.1)

3-1-3-2 入射角度依存性の検討：

入射角度の依存性評価方法は異なる倍率のレンズを用い光の入射条件を変化し、モード励振状態における損失変動評価を行った(図6)。測定条件を下記に示す。

評価試料の詳細及び測定条件について：

- ・測定波長：633nm (He-Ne レーザ)
- ・入射コア径：600 μ m
- ・出射コア径：100 μ m
- ・ファイバタイプ：GI MMF
- ・測定波長：633nm (He-Ne レーザ)
- ・集光レンズ入射ビーム径：2.0mm
- ・測定用入射レンズ：×5倍(対物レンズ NA：0.1)、
×10倍(対物レンズ NA：0.25)、
×20倍(対物レンズ NA：0.4)

図6の結果より、レンズ倍率の上昇と共に損失が急激に上昇していることから、テーパ部がモード励振状態に強く依存していることが解る。しかし、テーパ部の長さに対して損失差が発生していることから、テーパ部がスムーズ且つテーパ部の長尺化により低損失化の可能性を見出すことが出来た。

※テーパ部が長いにも関わらず損失が高い Taper length 1570mm のサンプルに関しては1)で述べた風圧等による外的要因による形状歪みのため損失が上昇したと考える。

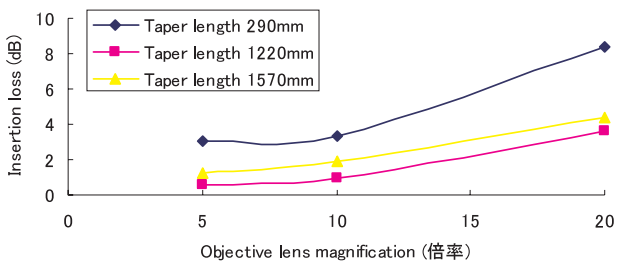


図6 対物レンズ別挿入損失

3-1-3-3 曲げ損失変化について：

レーザの小型化のためにはガイド用の光ファイバのフレキシブル性は、必要不可欠である。本検討では、曲げ半径による損失変化を確認し実用化に向けた課題等を明確にする。評価用曲げ半径は、300mm, 250mm, 200mm, 150mm, 100mm とし、同時に入射モード依存性の確認のため異なる NA を持つ測定用レンズ(対物レンズ)で入射を行い過剰損失評価を行った(測定条件を下記に示す)。結果を図7に示す。曲げ半径100mmにおいても最小損失は、0.2dB 以下と良好な結果を得た。しかし、入射モードに対する依存性が大きいことから1)同様、作製検討が望まれる。

評価試料の詳細及び測定条件について：

- ・測定波長：633nm (He-Ne レーザ)
- ・入射コア径：600 μ m
- ・出射コア径：100 μ m
- ・ファイバタイプ：GI MMF
- ・測定波長：633nm (He-Ne レーザ)
- ・集光レンズ入射ビーム径：2.0mm
- ・測定用入射レンズ：×5倍(対物レンズ NA：0.1)、
×10倍(対物レンズ NA：0.25)、
×20倍(対物レンズ NA：0.4)

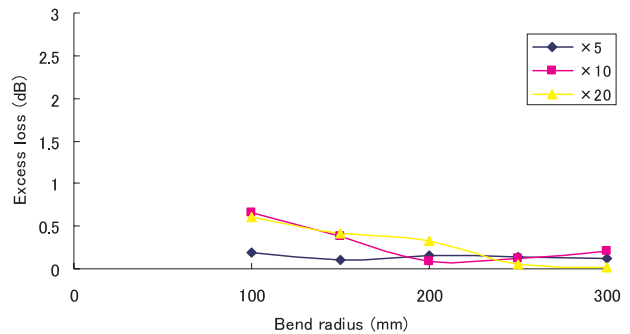


図7 曲げ半径による損失評価結果

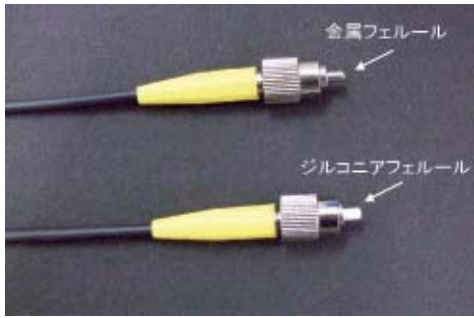
3-1-3-4 コネクタ加工技術について：

従来光通信で用いられている光コネクタ用フェルルは、信頼性が高く精密加工が可能なジルコニアが主流である。しかし、ジルコニアフェルルは成型技術により作製されるため異種外径に対するフレキシブル性が低く、入射・出射コア径がユーザ毎に異なるスポットサイズ変換用光ファイバに不向きである。

上記問題点の解決策として、従来のジルコニアに比べ価格が1/10以下で新規外径のフェルルの作製が容易な金属フェルルを採用した。金属フェルルが安価に作製できる要因として従来使用されているジルコニアフェルルは超硬金属を用いた成型技術により作製しているのに対し、電鍍によるメッキ手法を用い作製している点で安価な作製を実現している。採用した金属フェルルを用い、FC 及び SMA コネクタの作製検討を行ったところ透過損失、反射減衰量の光学特性でジルコニアフェルルと同等な結果を得た。コネクタ加工例(SMA 及び FC コネクタ)を図8に示す。



図8 a) SMA コネクタ加工例



b) ジルコニアフェルールと金属フェルールの加工例

3-2. 目標達成度について

目標達成度：計画の100% 達成できた。

表1に、掲げた目標値における達成度を示す。

表1 数値目標達成度

検討項目	検討内容	数値目標	数値達成度
挿入損失依存性	光ファイバをテーパ化する際のテーパ角度と伝搬損失の依存性	挿入損失<1.0dB	達成率 100% 挿入損失<1.0dB 入射条件: ×5 倍 (NA:0.1)
曲げ損失依存性	光ファイバをテーパ化した際のテーパ角度の曲げ損失依存性	曲げ損失<0.2dB(曲げ半径 r=100mm)	達成率 100% 曲げ損失<0.2dB 入射条件: ×5 倍 (NA:0.1)
光ファイバ NA	最適屈折率設計	NA=0.05~	達成率 100% テーパ角に最適な比屈折率差である NA : 0.2~0.3を採用
光ファイバ構造	純粋石英コア/空気クラッド等の純粋石英コアをベースとしたハイパワー対応光ファイバの設計・試作検討	コア径 : 600μm から 100μm への変換	達成率 100% コア径 600μm から 100μm への変換ファイバの作製

今後の展望

本研究では、素線状態での試作を完了し低損失化を実現したが製品化に向けては、更なる低損失化、耐ハイパワー用コード化技術等課題は残されている。

上記課題の解決策として、熱源に電気炉(セラミックヒータ等)を用い形状歪みの低減による低損失化検討、ハイパワー用コーティング検討としてテフロン系材料やポリイミド系材料によるコーティング技術の確立等がある。上記技術の開発を進め既に引合いのある眼科治療用装置メーカー、高出力 LD メーカーのユーザーニーズに合わせたファイバ形態でのサンプル出荷を行い、製品化を目指す。