

高強度フェムト秒白色光源の開発

米田研究室

甲斐 敏浩

1. はじめに

本卒業論文では、フォトニッククリスタルファイバー (PCF) を用いた高強度フェムト秒白色光源の開発を行った。

近年、光応用計測や分光学などの様々な分野で盛んに使用されるようになった PCF は超短パルスレーザーと組み合わせることで容易に広帯域白色光の発生させることが出来ることが知られている。

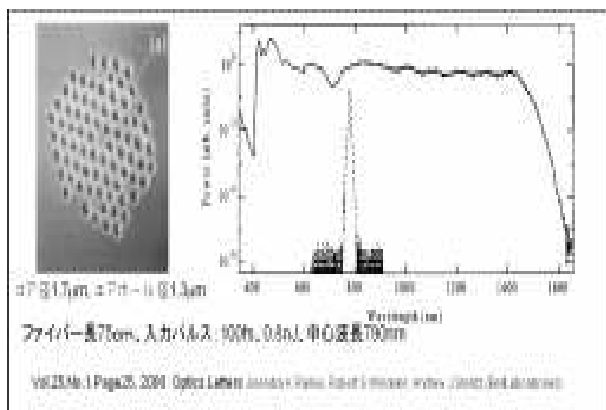


図1 PCFの特徴

しかし、長い PCF を用いると、分散が大きくなり、複雑なスペクトルとなるため、ポンププローブ計測のような、時間経過を測定するときには用いることが出来ない。

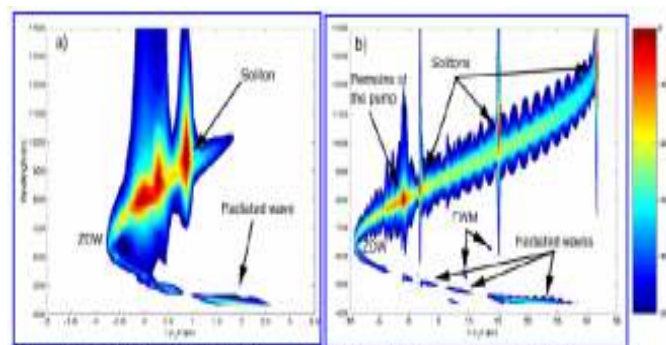


図2 ファイバーの長さによる分散の影響

そのため、PCF を短くしなければならないが、その分、非線形効果が弱くなり、白色光への変換効率が落ちてしまう。そのため、レーザーの入射強度を上げなければならない

いが、入射強度の増強に伴い、ファイバー端面に光学損傷が起きるといった問題があった。

そこで、本研究では、すでに原理実証が出来ていた PCF に液体レンズを装着する技術を用いて、光学損傷を抑制する方法を採用した。しかし、この技術には未完成であり、例えば、液体レンズの装着方法が完全に確立されていない点、さらに撥油コーティングが不完全なことで、レーザーを入射すると、光による劣化がおき、ファイバーの中に液体レンズが吸収されてしまうなどの問題があった。

ここでは、上記の問題に対する解決策の提案とそれを用いて今までよりも、より良い液体レンズの装着方法を開発した経緯をまとめた。

2. 液体レンズの原理

ファイバー端面に PC ファイバー構成材料と同程度の屈折率を持つ液体レンズを取り付け、本来むき出しであったエアホール部分をカバーする目的で、PC ファイバーの構成材料であるガラスと同等の屈折率を持つシリコンオイル (信越化学工業製) を用いている。シリコンオイルの屈折率は 1.4 なので、PC ファイバーと液体レンズとの境界面での反射を抑えることが出来る。また、可視領域での透過率は 100% であるので液体光学レンズとして使用することが可能である。

さらに粘性度が異なるシリコンオイルを組み合わせることにより、粘性度を変化させることが可能である。また、レンズの装着方法は単純であり、ファイバー端面を下向きにし、シリコンオイルに浸した後、引き上げるだけである。この単純な方法にもかかわらず、液体の表面張力を利用してコアに対する精度の高いアライメントを必要とせず、自動的に半球に近いレンズが形成される。



図3 液体レンズの干渉縞像

上図からわかるように液体レンズを測定するとは美しい円形状のニュートンリングとなっている。

また、液体の表面張力を利用した自己修復効果が確認されている。固体レンズの場合、一度割れたりして損傷してしまうと、もう使用することは出来ないが、液体レンズの場合、強度の強いレーザーを照射し液体内で光損傷が起こったとしても、元の状態に戻る。さらに、液体レンズが煤状になるまで損傷しても、その上から新たに液体レンズを追加することにより、再び損傷を受ける前の状態に戻すことも可能である。よって、液体レンズをPCファイバーに装着することによって、光損傷破壊強度を増加させるだけでなく、仮に破壊が起きても液体がその破壊を吸収し破壊を食い止めてくれることがわかっている。(図4は平成18年度、電気通信大学、高橋浩志の修士論文からの引用)

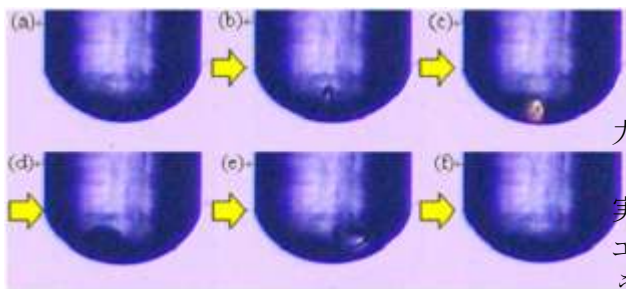


図4 液体レンズの自己修復効果の観測
(a) → (f) の順に時間が経過している。

PCファイバーに液体レンズを付けるためには、コアの部分に幾何学的に多数、

置しているエアホールの毛細管現象を抑制する必要がある。毛細管現象とは、液体中に立てた細い管内を液体が壁を濡らす程度により、液体が上昇または、下降をする現象である。毛細管現象により、液体が管内に浸入する高さは、液体の表面張力と、液体と壁との濡れやすさによって決まる。撥油処理をしないファイバーに液体レンズを装着すると、表面張力とエアホール内にシリコンオイル(液体レンズの原料)が吸い込まれたときの質量が釣り合うまで、シリコンオイルは吸収されてしまう。この関係を以下の図5に示す。

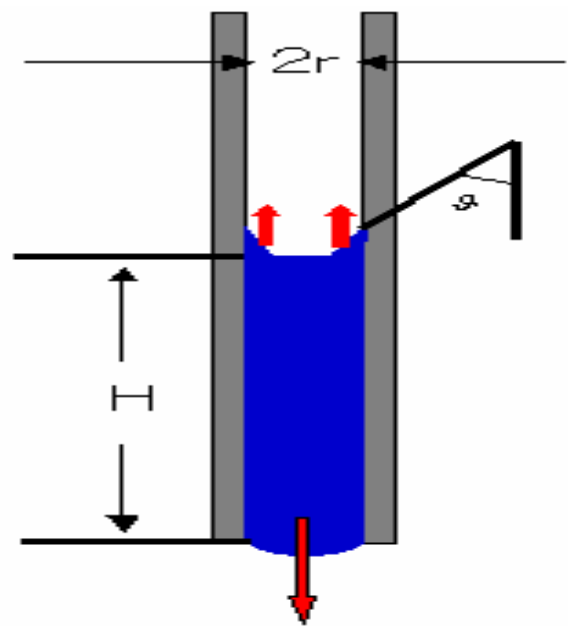


図5 表面張力と重力の釣り合い

図5より表面張力 γ と液体の全質量との釣り合いの方程式は次式のようなになる。

$$2\pi\gamma \cos\theta = \pi\rho Hr^2g \quad (2.1)$$

ここでは、接触角 θ 、液体の密度 ρ 、重力加速度 g とする。

実際に、シリコンオイルの表面張力及び密度、エアホールの半径を(2.1)式に代入して釣り合う液体中の高さを計算してみると、 $H \approx 4.4$ mとなる。PCファイバーは150本のエアホールがあるので、半球液体レンズに換算すると約3000個分となる。よって、エアホールの毛細管現象の影響はかなり大きいのがわかる。

エアホールの内壁を撥油処理するために、パラックコート（東京製品開発研究所）を用いている。撥油剤としては、シリコンオイルに対して濡れにくいものが良いとされ、濡れにくいものほど、シリコンオイルとの接触角が大きくなる。パラックコートを用いた理由は、シリコンオイルに対してパラックコートの接触角が一番大きいという実験結果が得られているためである。（平成18年度、電気通信大学、高橋浩志の修士論文ページ27より）

3. 撥油コーティングの問題点

次に、従来の方法でPCファイバーに液体レンズが装着できていたが、それは完全ではなく、毎回確実にレンズが付くわけではなかった。さらに、実際に高強度のレーザーを入射したときに、光によるコーティングの劣化が起きて、PCファイバーの中に液体レンズが吸収されてしまう現象が観測されていた。

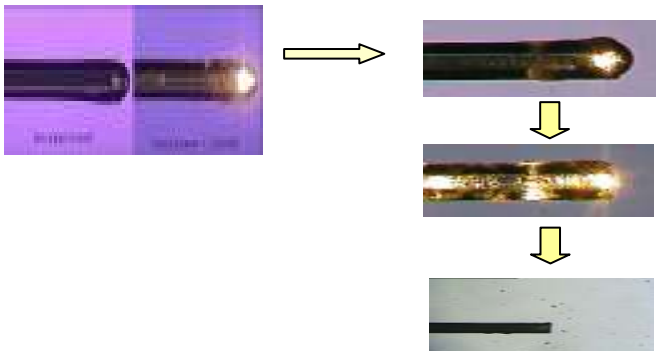


図5 光によるコーティングの劣化

4. 撥油コーティングの改善

3で示した問題を解決するために、コーティングの強化を行った。

一般的にコーティングを高めるには、表面の付着性を良くする、また、コーティングの完全性を上げるという方法がある。今回は、イソプロピルアルコールを使いPCファイバー内部のごみなどを取り除いた。

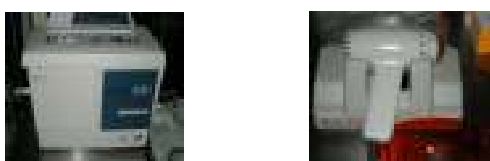


図6 超音波洗浄機と紫外線照射機

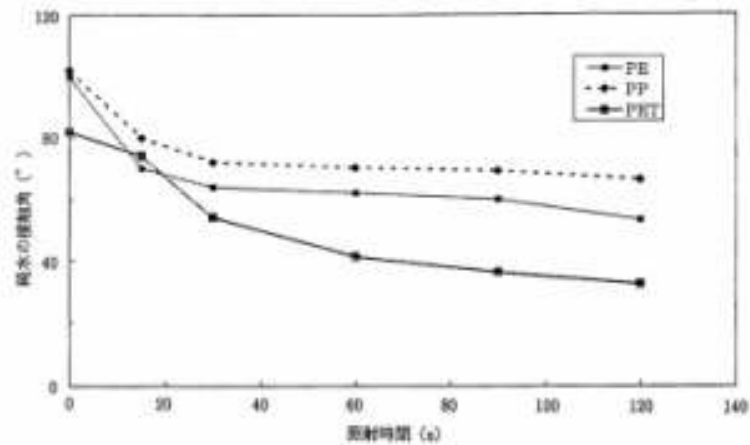


図7 各種プラスチックの表面改良

図7 紫外線照射によるプラスチックと水の親水性の向上

また、上のグラフから、紫外線照射時間の増加に伴い、水の接触角が低くなっていることから、材質と水の親水性が高まっているのがわかる。これにより、PCFにも紫外線を照射することにより、撥油コーティングの付着性を高めることを行った。

5. 油コーティングの時間

次に、撥油コーティングの時間を延長し、コーティングの膜を厚くすることによって、よりコーティングの効果を高め、液体レンズが完全に装着できるようになった。そのグラフを以下に示す。



図8 撥油処理(加熱)時間と液体レンズ装着の確率

上図からわかるように、撥油時間を1時間10分以上行くと、液体レンズの装着確率が100%になっているのがわかる。これより、撥油処理の時間は最低1時間10分以上行う必要があると考えられた。

また、撥油コーティングの強化を行ったことで、新たに、液体レンズがファイバーの側面に付くという問題が発生した。



図9 液体レンズがファイバー中心に付かない様子

この原因として考えられるのは、撥油処理をする際、PCファイバーのエアホール及び、端面だけではなく、側面も撥油コーティングされている。このため、PCファイバーをシリコンオイルに浸して引き上げる際に、液体レンズがその時の液体の量として安定な状態となるようにPCファイバーに装着されるためだと考えられる。安定な状態は多数存在するため、作るたびにファイバーに装着される液体レンズの位置は異なる。この問題を解決するために、ファイバー端面にだけしか、液体レンズが付かないように液体の量を調整したところ、ファイバーの中心に液体レンズを付けることが出来た。



図10 液体レンズがファイバー中心についている様子

ここで、図9と図10は同じファイバーに液体レンズを付けたときの写真である。液体の量を調整したところ、明らかに液体レンズがファイバーの中央に移動したのがわかる。

6. 結論
液体レンズ装着ファイバーの撥油コーティングを高めた。

さらに、撥油時間をコントロールすることで、PCFに確実にレンズをつけられるようになった。

7. 今後の展望
現在までの成果として、PCファイバーに液体レンズを確実に装着できるようになっている。よって、今後は実際に、短いPCファイバー(1cm程度)に高強度のレーザーを入射することによって、分散の少ない広帯域の白色光を観測したいと考えている。

8. 参考文献

1. 高橋浩志、“超短パルスレーザー用液体光学素子の研究”、平成18年度、電子工学専攻、光エレクトロニクス講座、修士論文

2.J.C.Knight, A.Apolonski “Maximization of supercontinua in photonic crystal fibers by using double pulses and polarization effects”(Applied Physics B77,319-324 2003)

3. 高橋浩志、“フォトニッククリスタルファイバーを用いた高強度白色光源の開発”、平成16年度、電子工学科、光エレクトロニクス講座、卒業論文

4. Limin Xiao, Wei Jin, and M.S.demokan, “Fusion splicing small-core photonic crystal fibers and single-mode fibers by repeated arc discharges,” Opt.Lett.32.115-117(2007)

5. Gyeong-Jun Kong, Jinchae Kim, Hae-Young Choi, Joo Eun Im, Byung-Hyuk Park, Un-Chul Peak, and Byeong Ha Lee, “Lensed photonic crystal fiber obtained by use of an arc discharge,” Opt.Lett.31,894-896(2006)

6. J.K.Ranka,R.S.Windeler, and A.J.Stentz, “Visible continuum generation in air-silica microstructure fibers with anomalous dispersion at 800nm,” Opt.Lett.25, 25-27(2000)