

# 直径 300nm のナノ光ファイバー共振器共振器の作製と特性測定

宮本洋子研究室

M2 福原美穂

## 1. 序論

本研究の目的は、セシウム原子との結合に最適な直径 300 nm のナノ光ファイバーを作製して共振器機能を持たせ、特性測定を行うことである。研究の背景として、ナノ光ファイバーの中の光と原子を強く結合させ、光を使って原子の量子状態を制御したり読み出したりしたいという目的がある。そのため、原子をファイバーの近くで安定してトラップし、原子発光のファイバーへの結合を効率よく行う必要がある。先行研究[1]より、直径 300 nm のナノ光ファイバーが適しているとされる。

本研究では直径 300nm のナノ光ファイバーの加工に適した延伸パラメータを検討し、フェムト秒パルスレーザーを用いて共振器構造を作製する。レーザー光の一部を遮ることで、ナノ光ファイバー上の 2 箇所 に同等の反射構造を作製し、共振器として機能させる。

## 2. 原理

### 2.1 ナノ光ファイバー

光ファイバーは石英ガラスやプラスチックなどの透明な誘電体でできた繊維で、全反射により光を閉じ込めて伝送するものである。構造としては、光が閉じ込められて伝播するコアとそれを囲むクラッドの二重構造となっている。コアは  $\text{GeO}_2$  や  $\text{P}_2\text{O}_5$  のような添加物を加えることによって、クラッドより少しだけ屈折率が大きくなっている。このため、光はコアとクラッドの境界で全反射を繰り返しながらコア中を伝播する。ナノ光ファイバーとは、一般的な通信用の光ファイバーを加熱・延伸することで、局所的に直径をサブミクロンサイズまで細くした光ファイバーのことである。加工前の光ファイバーはコアの屈折率が一定で、ステップインデックス型光ファイバーと呼ばれている。光はコア内を多くのモード（光の通り道）に分かれて伝播する。ナノ光ファイバーは光波長以下の直径を持つことにより、通常の光ファイバーとは異なる光学特性を示す。図 1 はナノ光ファイバー極細部の概略図である。ここではナノ光ファイバーの特性と、その作製方法について述べていく。



図 1. ナノ光ファイバー概略図

### 2.2 ナノ光ファイバー共振器

蛍光体から放出される光子を効率よくナノ光ファイバーへ取り込む方法として、図 2 のようにナノ光ファイバーへの共振器作製について考える。共振器を作製することにより、ナノ光ファイバー伝播モードへの光子カップリング効率の向上が期待できる。共振器を構成する仕組みとして、ブラッググレーティングをナノ光ファイバー上に 2 箇所作製し、特定波長の増強を今回行う。



図 2. ナノ光ファイバー共振器概観図

### 2.3 ナノ光ファイバブラッググレーティング

反射構造の説明として、ファイバブラッググレーティング (Fiber Bragg Grating: FBG) について説明する。FBG とは、図 3 が示すように、光ファイバのコアの屈折率に周期的な屈折率変化が形成されているファイバ型デバイスである。屈折率変化はグレーティング (回折格子) として働き、グレーティングの周期が作るブラッグ反射条件を満たす波長の光のみを反射させることができる。グレーティングを光ファイバ中に非破壊的に形成できるため、低損失・小型・高信頼性・伝送用光ファイバとの高い整合性など多くの利点を有している。

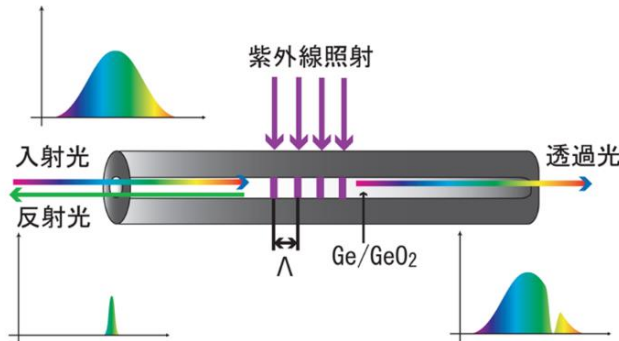


図 3. Fiber Bragg Grating[2]

## 3. 実験

### 3.1 ナノ光ファイバの作製

ナノ光ファイバは図 4 のナノ・マイクロテーパー光ファイバ製造装置 (石原産業) によって加熱・延伸することで作製する。この装置では酸素と水素の混合ガス (体積比 1:2) を燃焼させるバーナーで光ファイバを加熱する。バーナーへ流れるガス量は、マイクロ・コントローラにより制御することで一定を保つことができる。さらに光ファイバを固定する両端のステージ間距離をコンピュータ制御 (アプリケーション: Make Nanofiber ONF Control Program) によって変化させ、延伸している。本実験では、光ファイバホルダーの大きさを考慮し、ステージ間距離を 4.5 cm とした。作製したファイバの最小直径およびテーパー部の形状は、装置の延伸距離と延伸スピードによって決まる。この装置の延伸パラメーターについては後述する。また、加熱・延伸を行う際には同時に波長 852 nm のダイオードレーザーを入射し、透過率測定も行う。加熱・延伸を行う前に、光ファイバの加工箇所のパリマー被膜を除去し、除去しきれなかったポリマー被膜をアセトンで洗浄し、メタノールで拭き取る。さらに被膜を除去した箇所を加工開始直前に再度メタノールで洗浄することで、光ファイバ加熱時の透過率のロスを軽減することができる。作製されたナノ光ファイバはホルダー (図 5) に設置し、フェムト秒パルスレーザー加工を行う。走査型電子顕微鏡で観察を行うために、スパッタ装置 (株式会社真空デバイス: MSP-1S) で金薄膜加工を行う。

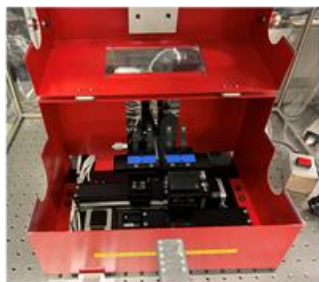


図 4. ナノ・マイクロテーパー光ファイバー製造装置

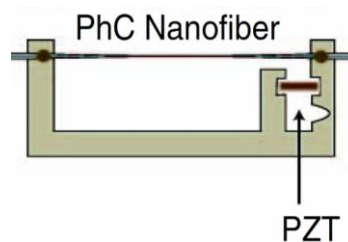


図 5. ホルダー

### 3.2 フェムト秒パルスレーザー加工

ナノ光ファイバーに周期的な屈折率変化をもたらすために、フェムト秒パルスレーザーをナノ光ファイバー上へ高強度に集光し、アブレーションにより溝を作製する[3]。図 6 は実験のスキーム図、表 1 は使用するフェムト秒パルスレーザーの詳細である。本実験では、位相マスクの上に銅線 ( $\phi = 500 \mu\text{m}$ ) を挿入した状態でナノ光ファイバー加工を行った。今回は共振器機能を持たせるために、クレーター加工を行わない箇所を作るために、銅線を用いてフェムト秒パルスレーザーの中央部分に影を作った。

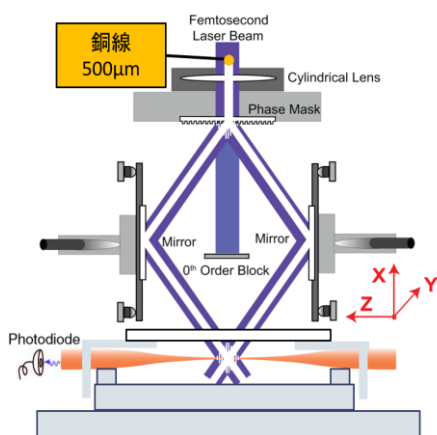


図 6. フェムト秒パルスレーザー加工

表 1. フェムト秒パルスレーザー

波長	400nm
パルス幅	120fs
照射パルス数	<1 回
パルスエネルギー	<1.3mJ
偏光	Y 軸方向

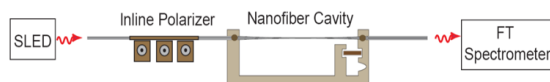


図 7. SLED を用いたスペクトル計測実験概略図

加工後はスーパーluminescent LED (SLED) を用いたスペクトル測定を行った。図 7 に SLED を用いたときの実験概略図を示す。測定装置にはフーリエ赤外分光器 (Nicolet 8700FT-IR、Thermo Fisher Scientific 社) を用いた。フーリエ赤外分光器の最高分解能は  $0.125 \text{ cm}^{-1}$  (3.75GHz) である。その後、走査型電子顕微鏡を用いてクレーター観察を行った。

## 4. 結果

### 4.1 バーナー延伸パラメーターの検討

まず波長 640nm のダイオードレーザーに適した直径 300nm ナノ光ファイバー作製時に使用していたバーナー延伸パラメーターを用いて、波長 852nm のダイオードレーザーを入射し、透過率測

定を行いながら加熱・延伸を行った。その結果作製されたナノ光ファイバーは透過率が加工前に対して 85%に低下した。延伸パラメーターを変更し、光ファイバーの直径変化を緩やかにすることで、透過率が 98%以上に維持することができた。さらに、作製されたナノ光ファイバーの最小直径が 300 nm ± 10 nm となる設計を検討した。結果直径 304 nm ± 4 nm のナノ光ファイバーを作製することができた。検討後のバーナー延伸パラメーターを表 2、検討した延伸パラメーターを用いて作製したナノ光ファイバーの作製前と比較した透過率を図 8、直径分布を図 9、撮影したナノ光ファイバーの SEM 画像を図 10 に示す。表内の swing length = バーナーの可動領域、swing speed = 時間あたりのバーナーの移動距離、stretching speed = 時間あたりの光ファイバー延伸距離、total stretching distance = 各 step 終了時の光ファイバー延伸距離を表している。直径平均は図 9 の測定位置から 1.0 mm - 3.0 mm 間の 5 点を用いて計算を行った。

表 2. 検討後のバーナー延伸パラメーター

	swing length[mm]	swing speed[m/s]	stretching speed[m/s]	total stretching distance[mm]
step1	5.5	3.2	2	0
step2	7	3.5	0.2	4.8
step3	10	5	0.1	17.2
step4	10	5	0.2	32.4
step5	2.5	2.5	0.4	54.2

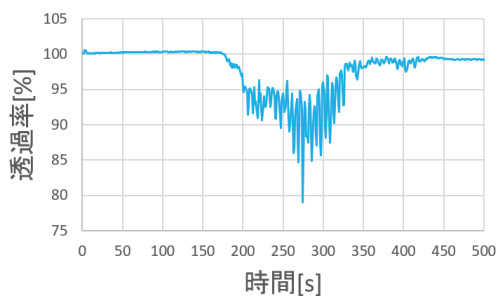


図 8. 検討後のパラメーターによる透過率測定

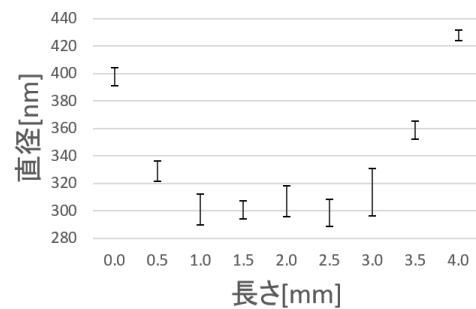


図 9. 検討後のパラメーターによる直径分布

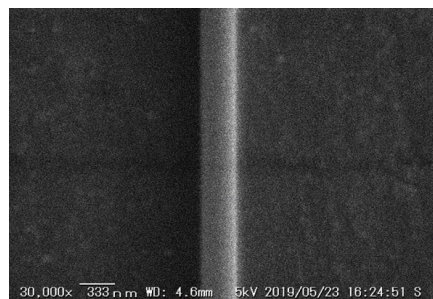


図 10. 検討後のパラメーターによるナノ光ファイバー SEM 画像

## 4.2 ナノ光ファイバー共振器特性

フェムト秒パルスレーザー加工によって作製されたクレーターの SEM 画像を図 11 に示し、クレ

ーター形成後のナノ光ファイバー断面の概念図を図 12 に示す。さらに X 偏光の透過スペクトルと Y 偏光の透過スペクトルの比較について述べる。X、Y 方向の定義は図 6、12 の通りとする。このときのフェムト秒パルスレーザーのパルスエネルギーは 0.38 mJ である。測定した X 偏光、Y 偏光のそれぞれの透過スペクトルを図 13 に示す。

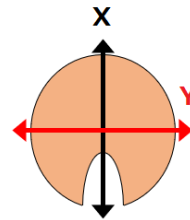
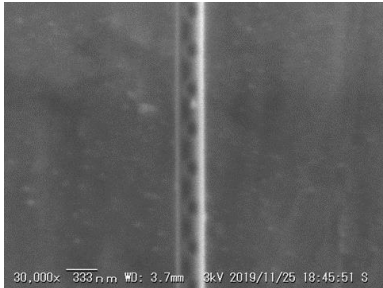


図 11. クレーターの SEM 画像

図 12. クレーター形成後のナノ光ファイバー断面の概念

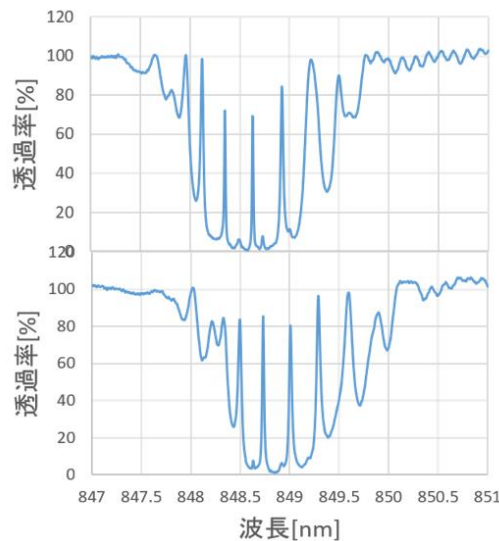


図 13. 透過スペクトル (上: X 偏光 下: Y 偏光)

## 5. 考察

図 13 から、透過率が下がっている領域があることから、フェムト秒パルスレーザー加工によるクレーター列はブラッググレーティングとして働いていることが分かる。さらに周期的に透過ピークが発生していることから、共振器としても働いていると考察できる。また X 偏光のスペクトルが Y 偏光のスペクトルと比較して、数 nm ほど短波長側にずれていることが分かる。加えて、透過スペクトルが非対称になっており、短波長側の方が長波長側よりも傾斜が急なバンド構造になっている。これは作製されたクレーター形状が一様ではないことによる実効屈折率の変化が影響している可能性がある。そして、観測された透過スペクトルのピーク幅と自由スペクトル領域を表 3 にまとめる。

表 2. 透過スペクトル

ピーク幅 [GHz]	自由スペクトル領域 [GHz]
58	115

ピーク幅を $\delta\nu$ 、自由スペクトル領域を $\Delta\nu$ とする。表 5.1 の値を用いて、共振器長とフィネスを求める。光速 $c$ は $3\times 10^8\text{m/s}$ 、実効屈折率 $n_{eff}$ は 1.01 より、(1)式から共振器長 $L$ は 1.3mm、(2)式からフィネス $F$ は以下の(2)式より 20 と求まる。

$$\Delta\nu = \frac{c}{n_{eff}L} \quad (1)$$

$$F = \Delta\nu/\delta\nu \quad (2)$$

ピーク幅と自由スペクトル領域から求められるフィネスの値が大きいほど結合効率を向上させることができ、理想としてはフィネスが 100 になると好ましいとされる[4]。

## 6. まとめ

本研究では、今後セシウム原子を用いることを想定し、波長 852nm の光の入射に適した直径 300nm のナノ光ファイバーを設計の作製し、フェムト秒パルスレーザーを用いて共振器加工を行った後、共振器特性を観測した。まず光ファイバーの加熱・延伸を行う際に使用するナノ・マイクロテーパー光ファイバー製造装置に用いるバーナー延伸パラメーターについての検討を行った。延伸パラメーターを変更しては光ファイバーの直径変化を緩やかにすることで、透過率延伸前のを 98%以上に維持することができた。さらに、作製されたナノ光ファイバーの最小直径が  $300\text{nm}\pm 10\text{nm}$  となる設計を検討した。結果直径  $304\text{nm}\pm 4\text{nm}$  のナノ光ファイバーを作製することができた。次にフェムト秒パルスレーザーを用いて共振器加工を行った。このとき、共振器機能を持たせるために、クレーター加工を行わない箇所を作るために、銅線を用いてフェムト秒パルスレーザーの中央部分に影を作った。そして、作製されたクレーターの観測を走査型電子顕微鏡を用いて行い、クレーターの観測に成功した。さらに SLED を用いて透過スペクトル測定を行った結果、透過率が下がっている波長領域が存在したため、ブラッググレーティングとして働いていることが分かった。また、周期的に透過ピークが発生しているため共振器としても働いていると考えられる。そして X 偏光のスペクトルが Y 偏光のスペクトルと比較して、数 nm ほど短波長側にズレが生じ、透過スペクトルが非対称になっており、短波長側の方が長波長側よりも傾斜が急なバンド構造になっていることも分かった。原因として、作製されたクレーター形状が一様でないことによる実効屈折率の変化が影響していると考えられる。今回得られたスペクトルのフィネスは 20 という結果も得られた。

## 参考文献

- [1] Kali P. Nayak, Jie Wang, and Jameesh Keloth, Real-time observation of single atoms trapped and interfaced to a nanofiber cavity, *Physical Review Letters* **123**, 213602 (2019).
- [2] 中西健太, “ナノ光ファイバーへの光共振器組込み加工法の開発,” 電気通信大学, 平成 26 年度修士論文
- [3] Kali P. Nayak, K. Hakuta, “Photonic crystal formation on optical nanofibers using femtosecond laser ablation technique,” *Opt. Exp.* Vol. 21, Issue 2, pp. 2480-2490 (2013).
- [4] Fam Le Kien, K. Hakuta, “Cavity-enhanced channeling of emission from an atom into a nanofiber,” *Phys. Rev. A* **80**, 053826 (2009).