

ナノ光ファイバー

¹電気通信大学フォトニックイノベーション研究センター

²(株)石原産業機能材料グループ

白田 耕藏¹, 飯田 秀徳²

Optical Nanofibers

Kohzo Hakuta¹ and Hidetoku Iida²

¹Center for Photonic Innovations, University of Electro-Communications

²Group of Functional Materials, Ishihara Sangyo Co. Ltd.

1. はじめに

通信用の光ファイバーの基本構造はコア／クラッド構造であり，伝播光は主として中央部のコアに閉じ込められ，一部はコア周囲の屈折率の低いクラッド部に浸み出してコア／クラッド伝播する。ナノ光ファイバーとは，通信用の光ファイバーの一部をサブミクロン直径に極細化したテーパー光ファイバーであり，その概念図を図1に示す。極細化したナノファイバーの領域での光伝播は通常のファイバー伝播とは異なり，ナノファイバー全体がコアとして機能し，ナノファイバーが置かれている環境外気がクラッドとして働くエアクラッド伝播となる。従ってナノファイバー伝播モードは周囲の外気中に半波長程度の領域（近接場領域）にわたり浸み出して分布し，結果としてナノファイバー周囲



図1 ナノ光ファイバー概念図

での光のモード密度はおよそ1波長程度の極微小領域に集中することになる。

量子力学によれば物質の発光の放出レートは発光点での光のモード密度に比例するので，光のモードが1波長程度の極微小領域に集中するナノファイバー周囲に量子ドット等のナノサイズの蛍光体を配置すれば，蛍光体は通常の自由空間とは異なり，その発光をファイバーモードに効率良く放出することになる。ファイバーモードへの蛍光放出効率にはナノファイバー直径が蛍光波長のおよそ半波長サイズの時に最大値20%を与える¹⁾。この効率の良いファイバーモードへの蛍光放出特性がナノファイバー応用を動機づける最大の特長である。典型的な応用分野は量子情報通信分野である。ナノファイバー表面に単一の量子ドット等を配置すれば，量子情報通信に必須なファイバーモードへの単一光子列を高効率に発生する技術に大きなベネ

〒182-8585 東京都調布市調布ヶ丘1-5-1

TEL 042-443-5447

FAX 042-443-5507

E-mail: k.hakuta@cp.i.uec.ac.jp

フィットを与え得る。また、センシング分野も重要な応用分野であろう。環境外気中に存在する極微量の物質をファイバーモードへの高効率発光を用いて高感度に検出する方法にも道を開き得る。ナノ光ファイバー法は未だ緒についたところであり、今後には様々な発展が期待できる。本稿では、ナノ光ファイバー法の基本技術について紹介する。

2. ナノ光ファイバー作製法

上記のようにナノファイバーでは光はエアクラッド伝播するので、通常ファイバーとナノファイバーをつなぐテーパー部ではコア/クラッド伝播とエアクラッド伝播との切り替わりが起こることになる。この切り替わりは、ファイバー屈折率と伝播光波長で決まる特定のファイバー直径で相転移的に起こり、その切り替わり転移直径はコアモードカットオフ径と呼ばれる。コアモードカットオフ径では伝播モードの切り替わりにより伝播光の散乱損失が起きやすい。高透過率のナノ光ファイバーを作製するテーパリングの最大の注意点はこの点にあり、このコアモードカットオフ近傍での径変化を十分に緩やかにして断熱的にテーパリングすることが肝要である。他の領域でのテーパーは急峻でも良いのでテーパー長をむやみに長くする必要はない。マルチテーパー技術により、通常の直径 $120\ \mu\text{m}$ から直径サブミクロンの領域までのテーパー長は $20\ \text{mm}$ 程度で高透過率のナノ光ファイバーが作製できる。現在ではテーパリングの理論解析に基づくコンピュータ制御加熱延伸技術が確立され、99%以上の光透過率が実現されている。ナノ光ファイバーの作製装置も商品として利用可能である²⁾。図2に作製したナノファイバーの直径分布例を示す。ナノファイバー部の直径は一様であり、一様部の長さは $2\ \text{mm}$ から $20\ \text{mm}$ 程度まで作製制御できる。ナノファイバー直径は $300\ \text{nm}$ 程度まではルーチ的に作製可能である。

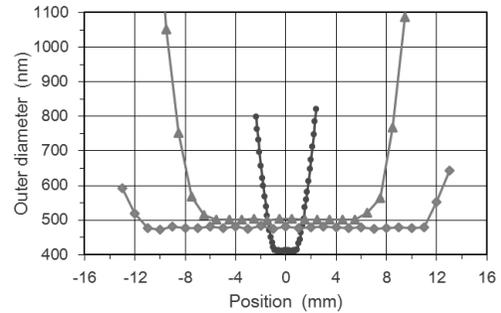


図2 ナノファイバー領域の直径分布

3. ナノファイバーの直径計測

ナノ光ファイバーの評価には光透過率計測と共に直径計測が不可欠である。標準的なナノファイバー直径計測は走査型電子顕微鏡 (SEM) 計測であり、図2に示した例もSEMによるものである。しかしSEM計測は、ナノファイバーを真空の試料室に入れるなど、煩雑な手続きが必要なオフライン計測である。一方、実際のナノファイバー作製を始めとする諸作業ではナノファイバー径をその場の条件下で簡便に計測することが望まれる。

本節では最近我々が開発したナノファイバー径の簡便で高精度な「その場計測」法³⁾を紹介する。図3に方法の概念図を示す。



図3 ナノファイバー直径計測法概念図

方法の要点はナノファイバー部に外部からグレーティングを接触させることである。グレーティングの中央部にはそのピッチの $3/2$ 倍の不連続部を設けている。このナノファイバー/グレーティング接触系では伝播光はグレーティングの凸部で実効的な屈折率増加を感じ、接触系全体でファイバーブラッググレーティング (FBG) が形成され、更にFBG中央の不連続部によりFBG光共振器が構成される。この共振器の共鳴波長はナノファイバー直径に依存するので共振器共鳴波長の計測によりナノファイ

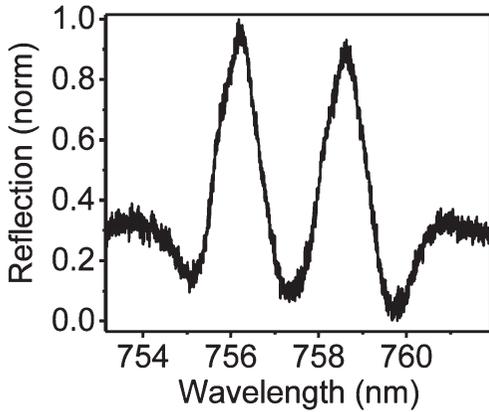


図4 接触系ナノファイバー共振器の反射スペクトル

バー直径が計測できることになるわけである。実際のグレーティングは石英基板上に電子ビームリソグラフィにより加工作製される。典型的なグレーティングパラメータであるが、ピッチは300–350 nm、総溝数は300程度である。従って、グレーティング幅は約100 μm となり、計測されるナノファイバー直径はナノファイバー上の約100 μm の領域での平均値となる。

図4にこの接触系ナノファイバー共振器の反射スペクトル例を示す。中央のディップが共振器共鳴である。ナノファイバー径の共鳴波長依存性は $\Delta D/\Delta\lambda_{\text{res}} \approx 3$ であるので、共鳴波長を0.5 nmの精度で計測すればナノファイバー径は1.5 nmと極めて高精度で計測できることに

なる。また、この系はナノファイバー作製装置にも容易に組み込み可能であり、ナノファイバー作製時にその場での直径測定が可能となる。

4. おわりに

ナノ光ファイバー技術としては、ナノファイバー部にナノ構造を直接に加工する技術も重要である。集束イオンビーム加工法⁴⁾やフェムト秒レーザー多光子干渉加工法⁵⁾などによりナノファイバー上に高Q値の共振器を組み込む技術が実現され、量子フォトニクスを始めセンシングや非線形光学にも新しい可能性を開きつつある。

ナノ光ファイバー法は様々に発展しつつある新しい方法であり、今後も多様な視点での応用展開が期待できる。本稿が本誌読者諸姉妹の興味を引き、様々なイマジネーションを膨らませるきっかけになれば望外の喜びである。

参考文献

- 1) R. Yalla, F. L. Kien, M. Morinaga, and K. Hakuta: Phys. Rev. Lett. 109, 063602 (2012).
- 2) <http://www.deltafiber.jp>
- 3) J. Keloth, M. Sadgrove, C. Yalla, and K. Hakuta: Opt. Lett. 40, 4122 (2015).
- 4) K. P. Nayak *et al.*: Opt. Express 19, 14040 (2011).
- 5) K. P. Nayak and K. Hakuta: Opt. Express 21, 2480 (2013).