Photonic Crystal Fibers (PCFs)

に関するアプリケーションノート

設計とシミュレーション

APN-APSS-PCF

Apollo Inc.
1057 Main Street West
Hamilton, Ontario L8S 1B7
Canada
Tel: (905)-524-3030
Fax: (905)-524-3050

www.apollophotonics.com

(有)ノア　コンサルティング
〒709-0854 岡山県赤磐郡瀬戸町江尻 1607 番地
Tel: (0869)-52-5288
Fax: (0869)-52-5278
E-mail：info@noah-c.com

www.noah-c.com

Disclaimer

In no event should Apollo Inc., its employees, its contractors, or the authors of this documentation be liable to you for general, special, direct, indirect, incidental or consequential damages, losses, costs, charges, claims, demands, or claim for lost profits, fees, or expenses of any nature or kind.

Document Revision: July 30, 2003
日本語版:2004 年 1 月 12 日（加筆修正）

Copyright © 2003 Apollo Inc.

All right reserved. No part of this document may be reproduced, modified or redistributed in any form or by whatever means without prior written approval of Apollo Inc.

日本語版は Apollo 社の了解のもとに(有)ノア　コンサルティング技術スタッフが日本語ユーザのために用意したものであり、許可なく複製、修正並びに再配布をすることはできません。

概要

このアプリケーションノートは APSS(Apollo Photonics Solution Suite)の導波路モジュールを用いて、フォトニック結晶ファイバ(PCF)の動作原理を含む理論、設計例、最適化について記されている。

以下の事柄が記されている。

- PFC の動作原理とユニークなモード特性の記述
- 特定分野へ応用することを前提として PFC に基づく導波路の基本設計過程
- 単一モード動作、分散、実効断面積、閉じ込め損、偏波依存性など PFC に基づく導波路に関係する重要事項の議論
- プロジェクトのインポート、導波路への適用、解法設定、シミュレーション結果の表示など PCF に基づく導波路設計のステップ
- PCF の応用やシミュレーション結果に関する幾つかの実例では既発表の論文結果との比較

APSS は４つのアプリケーションから成っている。それは、材料、導波路、デバイスと回路である。それぞれのモジュールは色んな目的に合致するように特化されているので多くの材料からなる多くのデバイスに対して適用が可能である。

Keywords

APSS、導波路モジュール、フォトニック結晶ファイバ(PCF)、単一モード動作、フォトニックバンドギャップ、分散、実効断面積、導波路解析、ベクトル有限差分法

目次

1 はじめに 5

2 理論 6

2.1 動作原理 6
2.2 性能パラメータ 7
2.3 基本設計思想 8
2.3.1 解析的方法 8
2.3.2 スケーリング変換 9
2.3.3 複雑な構造 10

3 設計とシミュレーション 10

3.1 全体設計 10
3.2 PCF の実効断面積 11
3.3 分散に関係した PCF (DSF、DFF と DCF) 12
3.4 シミュレーションと最適化 13

4 実例 16

4.1 材料設計 16
4.2 ユーザ定義導波路機能を用いての PCF の作成 17
4.3 導波路の解法設定 17
4.4 実行と表示 20

5 まとめ 22

6 参考文献 23

1 はじめに

フォトニック結晶ファイバ[1] (PCF またはホーリーファイバ(HF)とかマイクロ構造ファイバ(MOF)とも呼ばれる)は新しい分類のフォトニック結晶導波路である。これは、導波路の伝搬方向に三角形または六角形の空孔のフォトニック結晶アレイ[2]に高屈折率のディフェクト（または空孔が無く等価的に屈折率が高い領域）があるもので構成されている。従来のファイバと異なり、PCF の実効的なクラッドの屈折率は波長の関数となる。このため PFC は従来のファイバでは実現できない以下のような特徴を有している：広い波長範囲に渡っての単一波長動作、分散の制御性、線形や非線形応用を問わず広い実効断面積の制御性などである。そのユニークな特性と製造のし易さから PFC はシリカやポリマーなどの多くの光学材料で作成が可能である。また、これらは分散を制御できるファイバ[3]やスーパーコンティニウム光生成、大きな実効断面積ファイバをはじめ多くの応用の可能性がある。

PCF の光学的特性は空孔を熱に敏感な材料で満たすことで容易に制御できる。PC のフォトニックバンド構造に基づいて PCF は幾つかの理論モデルで解析が可能である。そのモデルは等価屈折率法、包絡線近似の解析的な手法からより厳密な有限差分法(FDM)や、時間領域有限差分法(FDTD)[1]がある。このアプリケーションノートでは主として有限差分法が用いられている。

> ***注意：***導波路モジュールに関して有効なカテゴリー情報や解法設定に関しては APSS ユーザマニュアルで導波路モジュールの項を参照されたい。また、単一モード条件や偏波依存などに関しては関係する他の APSS のアプリケーションノートも参照されたい。

2 理論

本節では PCF の動作原理とユニークなモード特性が記されている。また、その他の基本的な設計に関する事項や性能パラメータについても触れられている。

2.1 動作原理

図１に典型的な PCF の断面図を示す。規則的な三角形（または六角形）の空孔アレイの中心部分に屈折率が高いディフェクト（または空孔が無い部分）を有する構造である。空孔リングが N 重にあること以外に空孔の直径 d とピッチΛ の２つが設計パラメータとなる。

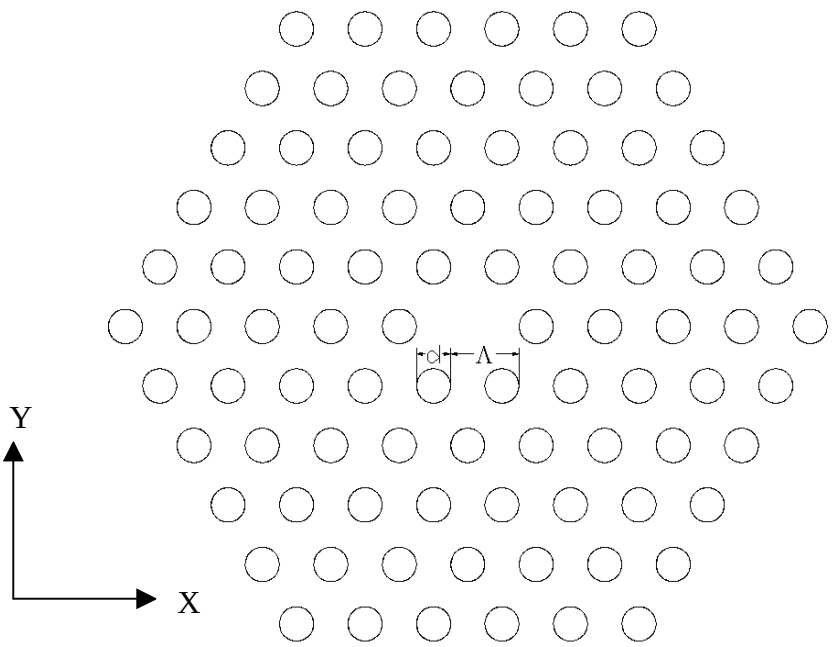


図１．規則正しい三角形の 5 重リング(N=5)からなる PCF の断面
2 つのパラメータとして空孔の直径 d とピッチ Λ がある

従来のステップ型屈折率のファイバ同様にPCFの動作原理も内部の全反射 (TIR: total internal reflection)に基づいている。またステップ型屈折率導波路との類似点はコアを取り巻く周辺の屈折率がコアより小さいと言うことである。PCのクラッドのバンド構造から最下位のバンドの実効屈折率 n_{FSM1} (または基底次のスペ

ースフィリングモードSFM1ともいい、波長に強く依存する)を求めることができる。それゆえに、導波モードでは実効屈折率 n_{eff} は式(1)の関係を満たす。

$$n_c > n_{eff} > n_{FSM1} \tag{1}$$

ここで n_c は導波路コアの屈折率（例えば、純粋なシリカなど）であり、n_{FSM1} はPCFのクラッドの実効屈折率である。従来のステップ型屈折率分布ファイバのモード特性を利用するには規格化実効周波数V_{eff}はシングルモードとなるためには2.405 以下で無ければならない。

$$V_{eff} = \frac{2\pi}{\lambda} a_{eff} \sqrt{n_c^2 - n_{FSM1}^2} \tag{2}$$

ここで a_{eff} は PCF の等価的なコア半径、λ は動作波長である。以下の事柄は重要である。

- Λ が PCF の空孔ピッチであるとすると、PCF の構造と波長に依存する実効的なコア半径 a_{eff} は$\Lambda/2$ とΛの間の値で無ければならない。
- クラッドの実行屈折率は波長依存性が強いので等価的なコア半径 a_{eff} も PCF 設計パラメータの中では波長依存性を有することになる。

しかし、全体としては PCF の動作原理は全反射(TIR)に基づいている。簡単のために、本アプリケーションノートでは、図１に示したように１つの空孔が中央に無い場合の例について主として述べることとする。しかし、もっと複雑なPCF(例えば、空孔が割れ目状になっていたり、偏波保持の観点から楕円形状であったり、空孔が無い部分があったりなどの特殊形状)でも同じような手法で設計が可能である。

2.2 性能パラメータ

PCF の性能パラメータとして伝搬定数、損失、グループ遅延、分散、実効断面積、モード径などは全て APSS で計算可能である。

> ***注意:*** これらのパラメータの詳細については APSS ユーザマニュアルの付録 IV(導波路パラメータ)を参照されたい。

2.3 基本設計思想

PCF の動作原理がわかり、シリカとかポリーマーなどの使われている材料に関する性能パラメータが明らかになり、単一モード動作や分散などの設計への要求が明確になると、設計者は解析的手法や数値解析手法を用いて要求されている PCF を設計することができる。

2.3.1 解析的方法

幾つかの PCF のモード特性を解析する手法がある。そして、それは２つに大別できる。

- 解析的または半解析的手法…等価屈折率法 (EIM)、包絡線近似(EAM)、モード展開法 (例えば、平面波展開法：PWE)
- 数値解析手法…有限差分法 (FDM),、有限要素法 (FEM)、時間領域有限差分法(FDTD).

PCF に関する理解を深めて良好な特性を有する PCF を製造するためには、解析的手法と数値解析手法を併用してより正確なモード特性を把握する。例えば、EIM は PCF をシリカのコア（またはディフェクト）がそれよりも実効的に低い屈折率で囲まれた導波路として取り扱いことができる。この様子はコアが無い場合のフォトニック結晶のバンド構造に対応している。言い換えれば、EIM はスペースフィリングモードに関係した PC クラッドの実効屈折率を計算することである。実効的なクラッド屈折率を求めることができれば従来の導波路理論により簡単に PCF のモード特性を得ることができる。しかし、本質的に避けることができない仮定から解析的手法では無限大まで広がった構造を解析対象とするために有限の数の空孔リング構造や独特な形をした PCF を取り扱うことはできない。このようなときには数値解析手法を用いる。APSS では数値解析手法として簡単で有力な FDM(有限差分法)を用いている。もし、設計者が EIM または EAM の利用を望むなら、数値解析手法を用いる前にバンド構造が計算されていなければならない。

2.3.2 スケーリング変換

音響波から光まで適用できる、マックスウエル方程式では電磁界には長さのスケーリングは無い。このためにモードフィールド、実効屈折率のスケーリング変換は位置r、周波数ωを同じ因子Mでスケーリングする[2]:

$$n_{eff}(\lambda, M)|_{fixed\ d/\Lambda} = n_{eff}(\frac{\lambda}{M}) \tag{3}$$

$$\bar{E}(r, \lambda, M)|_{fixed\ d/\Lambda} = \bar{E}(\frac{r}{M}, \frac{\lambda}{M}) \tag{4}$$

$$\bar{H}(r, \lambda, M)|_{fixed\ d/\Lambda} = \bar{H}(\frac{r}{M}, \frac{\lambda}{M}) \tag{5}$$

ここで、d/Λ はPCFのピッチに対する空孔径を示し、 λ は動作波長である。また、M はピッチ比(= Λ/Λ_0で例えば、 Λ_0 = 2.3 μmである)。モードフィールドや実効屈折率のスケーリング変換が与えられると、その他のモードパラメータに関与したスケーリング変換は次のようになる[3]。

$$D_g(\lambda, M)|_{fixed\ d/\Lambda} = \frac{1}{M} D_g(\frac{\lambda}{M}) \tag{6}$$

$$A_{eff}(\lambda, M)|_{fixed\ d/\Lambda} = M^2 A_{eff}(\frac{\lambda}{M}) \tag{7}$$

$$L_c(\lambda, M)|_{fixed\ d/\Lambda} = \frac{1}{M} L_c(\frac{\lambda}{M}) \tag{8}$$

$$\Gamma(\lambda, M)|_{fixed\ d/\Lambda} = \Gamma(\frac{\lambda}{M}) \tag{9}$$

ここでは、D_g は材料分散、A_{eff} は実効断面積、L_c 閉じ込めによるロス、Γ はシリカにおける光閉じ込め率である。同様に、固定されたピッチ比Λ のPCFのモードパラメータのスケーリングは以下のようになる[3]。

$$D_g(\lambda, N)|_{fixed\ \Lambda} \approx A(N) D_g(\frac{\lambda}{B(N)}) \tag{10}$$

$$A_{eff}(\lambda, N)|_{fixed\ \Lambda} \approx \frac{1}{C(N)} A_{eff}(\frac{\lambda}{D(N)}) \tag{11}$$

$$L_c(\lambda, N)|_{fixed\ \Lambda} \approx \frac{1}{E(N)} L_c(\frac{\lambda}{F(N)}) \tag{12}$$

$$\Gamma(\lambda, N)|_{fixed\ d/\Lambda} \approx \Gamma(\frac{\lambda}{G(N)}) \tag{13}$$

ここで、N は空孔直径の比(= d/d_0で、例えば、d_0 = 1.15 μmである)[3]。スケーリング変換を用いることによってPCFの d、Λ、λ に依存したモード特性を容易に計算することができる。そして、このスケーリング変換によって所望のPCF特性をもったファイバを設計することができる。

2.3.3 複雑な構造

PCF は、分散や大きな実効断面積を持つなど、ある目的に合致した設計は容易である。

しかし、PCF 独特の大きな非線形性、複屈折率特性などを利用するには特別な形状、形の組み合わせ、マルチコア構造や割れ目の空孔など複雑な設計が要求される。それらのより複雑な PCF の設計は、この実例では簡単なものしか述べていないが、このアプリケーションノートに記されているのと同様な方法で行うことができる。PCF ではπ/3 の対称性から２つの基本モードが縮退している。

3 設計とシミュレーション

3.1 全体設計

本節では PCF のモード特性設計の一般的な方法を紹介する。関連した設計の経験（例えば、分散など[3]）から、次のようなプロセスが用いられる。

(i) 制約付きのターゲット関数–ある波長に対する所望のモード特性を与える制約付きのターゲット関数(A_{eff} の値とか単一モードであるなど)を定義する。

(ii) スケーリング変換による第一段階の最適化–空孔の直径 d とピッチΛを変化させたとき、スケーリング変換でターゲット関数の最小化を行うことによる最適化を行う。

(iii) モード特性のためのモデルの高度化–前のステップ(ii)で得られた最適化された PCF で、与えられた波長で厳密なベクトル解析で PCF のモード特性を計算する。そして(ii)を繰り返す。

(iv) 最終設計の検証 – (iii)で最適化された PCF について、要求されている波長範囲において仕様の分散特性を満足しているかどうかをチェックするため、高精度かつ厳密なベクトル解析でモード特性を計算する。OK ならば他のモードパラメータも計算し設計を終了する。不満足ならターゲット関数を修正し(ii)-(iv)を繰り返す。

一般的には最終の PCF 構造はベクトル解析を用いた２，３回の修正で設計可能である。

3.2 PCF の実効断面積

設計パラメータを変えると PCF のモードの実効断面積 A_{eff} は 1.0 から 100.0 μm^2 程度まで変化する。図２は固定ピッチΛに対する実効断面積である。対応する要求条件からターゲット関数は容易に得られ、最終結果も容易に最適化されたものが得られる。

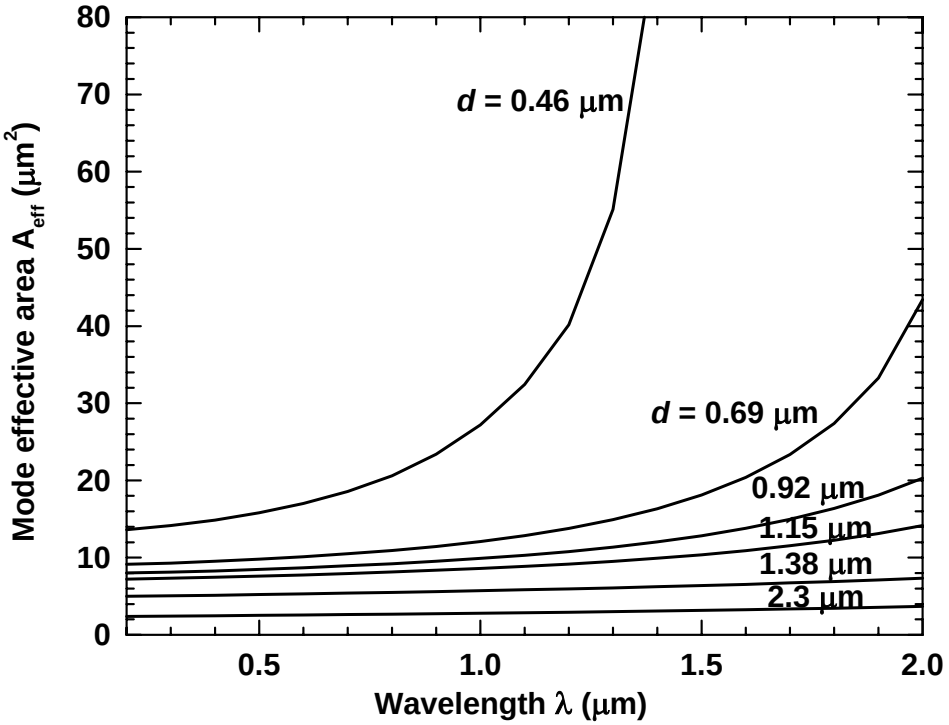


図２．異なる PCF に対する波長と実効断面積の関係（Λ = 2.3 μm 固定）

3.3　分散に関係した PCF (DSF、DFF と DCF)

分散特性が一つの特徴であるので PCF は分散に関係した応用—分散シフトファイバ(DSF)、分散フラットファイバ(DFF)、分散補償ファイバ(DCF)—がある。図３に典型的な PCF（$d/\Lambda > 0.2$ で要求された分散値 D_F はλ_{D1}、λ_{D2}、とλ_{D3}で実現：即ち、$D(\lambda_{Di}) = D_F, i = 1,2,3$））の分散の波長依存性を示す。対応する分散要求からターゲット関数は容易に得られ、最適化の結果として最終的な結果（構造設計値）が容易に得られる。

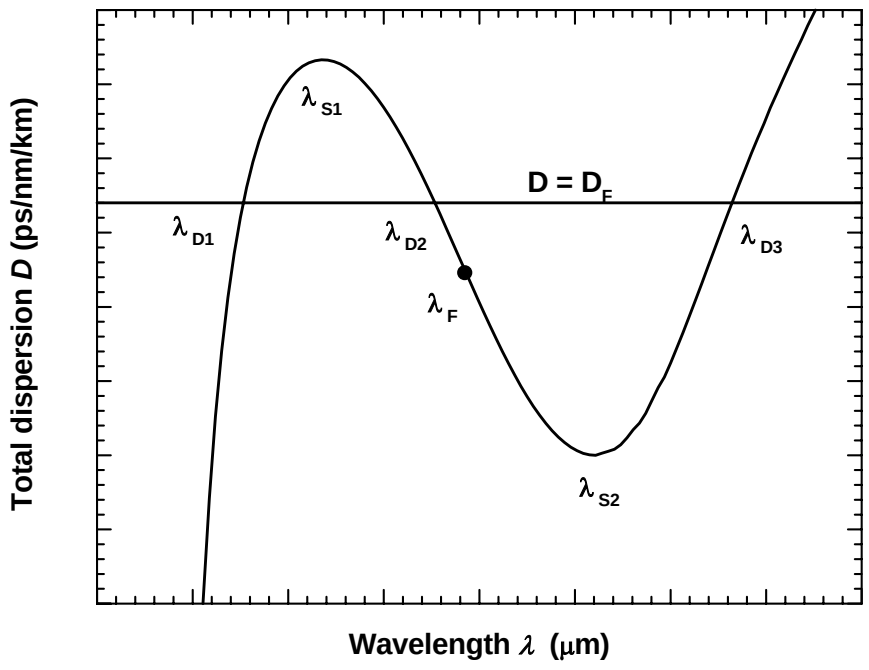


図３．**PCF** の分散 **D** の波長依存性（$\lambda_{D1}, \lambda_{D2}, \lambda_{D3}$,で特定の分散値 D_F となり、$\lambda_{S1}, \lambda_{S2}$ で３次の分散値がゼロ、λ_F で４次の分散値がゼロ）

3.4　シミュレーションと最適化

APSS を用いて設計者は全体構造または対称性を利用して半分の構造を定義してシミュレーションすることが可能である。半分の構造では計算時間を短くすることができる。しかし、曲がりに関係した特性を計算するには全体構造で計算しなければならない。

ユーザ定義のモデルを用いると異なった形や関数を有するユーザ独自の PCF を扱うことができる。図１に示すように典型的な PCF では楕円(“Ellipse”)と配列(“Array”)関数のみが用いられる。表１は半分の構造の楕円と配列関数をまとめたものである。図４は表１の 11-by-5-circle に対応する PCF であり、２つの設計パラメータ *d* (例えば、 =1.84 μm デフォルト値) 、ピッチ*Λ* (例えば、=2.3 μm デフォルト値：プログラムでは R と記述)が用いられている。

注意: APSS 導波路モジュールの利用方法に関するもっと詳しい情報は APSS ユーザマニュアルや導入マニュアルの導波路モジュールの項を参照されたい。

表１．半分の構造定義での楕円(“Ellipse”)と配列(“Array”)関数

PCF サイズ	**7-by-3-circle**	**11-by-5-circle**	**15-by-7-circle**
変数	ピッチ *R,*	空孔直径 *d,*	X の半分幅 *W*
ウインドウサイズ *X*	6*S*+2*d*	9*S*+2*d*	14*S*+2*d*
ウインドウサイズ *Y*	3*R*	5*R*	7*R*
第１の円情報	*d*, *d*, *W*-3*S*, *R*/2	*d*, *d*, *W*-5*S*, *R*/2	*d*, *d*, *W*-7*S*, *R*/2
アレイの幅 **図形間距離**	7×8 (2 *S*, R)	5×6 (2 *S*, R)	3×4 (2 *S*, R)
第２の円情報	*d*, *d*, *W*-2*S*, *R*	*d*, *d*, *W*-4*S*, *R*	*d*, *d*, *W*-6*S*, *R*
アレイの幅 **図形間距離**	6×7 (2 *S*, R)	4×5 (2 *S*, R)	2×3 (2 *S*, R)

注意：中間のパラメータ $S=R/2\tan(\pi/3.0)$ であり、*d* は空孔直径である。

円情報は X の半径、Y の半径、X の中心、Y の中心の４つのパラメータからなる。

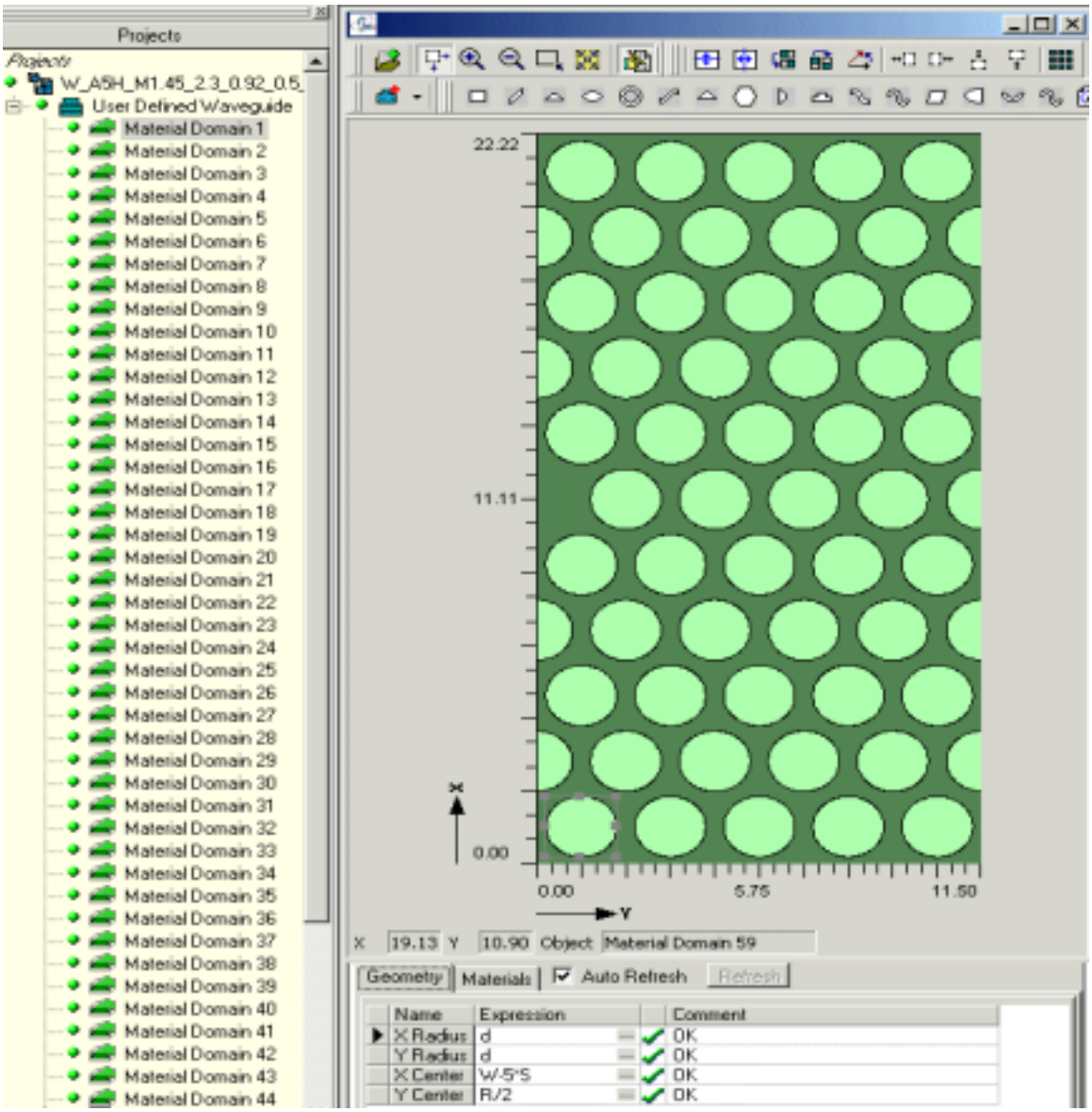


図４．２つの設計パラメータを有する 11-by-5 circle PCF

空孔直径 *d* (例えば、=1.84 μm デフォルト値) 、ピッチ*Λ* (例えば、 =2.3 μm デフォルト値)

PCF のプロジェクト作成後シミュレーションを行うことができる。また、定義変数に関してスキャンモードの計算も可能である。デバイスの解法に関しては様々な組み合わせの選択が可能である。例えば、実数(“Real”)または複素数(“Complex”)、直接解法(“Direct”)または緩和法(“Iterative”)、境界条件としては PML 条件の考慮の有無などである。

> ***注意:*** 導波路モジュールでの解法オプション導波路解析ツール（例えば、異なる導波路間の重なり積分、近視野/遠視野など）に関する詳しい情報は APSS のユーザマニュアル、導入マニュアルを参照されたい。

最後にユーザはモードフィールド、実効屈折率、伝搬定数、分散、実効断面積、モード径、ロスなどの導波路性能パラメータを表示させることができる。また、ASCII テキスト(*.txt)、Microsoft Excel (*.xls)、ビットマップ (*.bmp)など種々のファイルフォーマットでエキスポートすることができる。

4 実例

前節で概要を記した APSS 導波路モジュールは PCF を設計、シミュレーションするのに便利なプラットフォームである。以下はシリカ材料の同様なプロジェクトに対して、どのように導波路モジュールが用いられるかの実例である。

4.1 材料設計

既に述べたように、PCF 設計を開始する前に材料設計を終えていなければならない。APSS では InP とシリカの２種類の材料が既にテンプレートとして用意されている。これらの材料に加えてユーザ定義エディタが使えるので、より複雑な材料や新しいアプリケーションなどほとんど全部に対応可能である。本資料では、シミュレーション結果を既発表の論文と比較するために３項のセルマイヤー公式で表現できる純粋シリカが用いられている[4]。最初のステップは図５に示すように、一つの材料で波長範囲が 0.5～6.0 μm の材料プロジェクト “M_Silica_3_0.5_6_111” を作成することである。

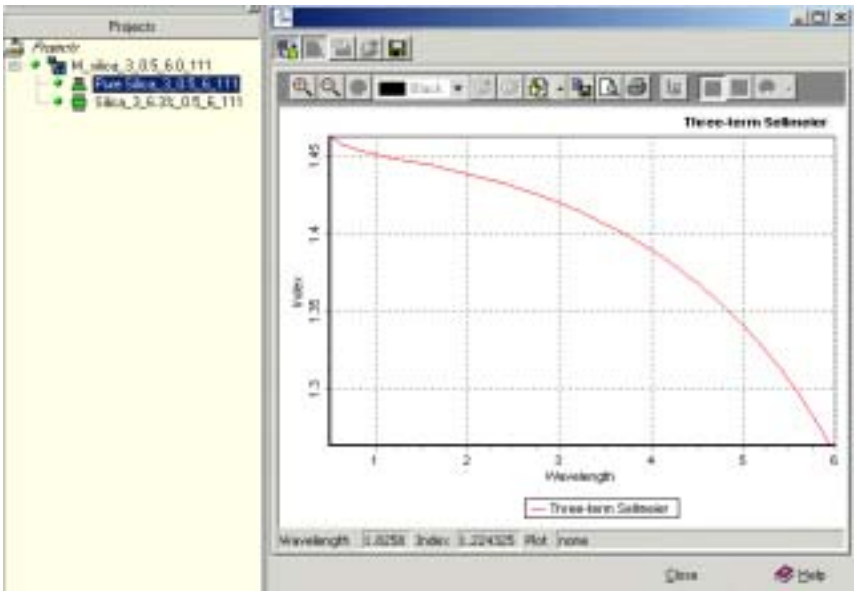


図５．PCF 導波路のシリカ材料プロジェクト

4.2　ユーザ定義導波路機能を用いての PCF の作成

この例では参考文献[1]に記されている２つの設計パラメータを用いて PCF プロジェクトを生成した。それは、図４(11-by-5 circle PCF)に示すように、空孔直径 *d* (例えば、 =1.84 μm デフォルト値)とそのピッチ *Λ* (例えば、=2.3 μm デフォルト値)である。 導波路プロジェクトは構造が対象であることを利用して、半分だけの構造で作成した。しかし、曲がり特性を生産する際には全体構造で解析しなければならない。

4.3　導波路の解法設定

PCF を作成した後、次のステップは のボタンをクリックすることでシミュレーションにふさわしい解法設定を選択することである。図６は、一般情報(“General Information”)と有限差分モード解析設定(“FD Mode Solver Setting”)の２つのタブからなる導波路解法設定(“Waveguide Solver Setting”) ウインドウである。一般情報(“General Information”)タブでは以下のことができる。

- シミュレーション(“Simulation”)またはスキャン(“Scan”)などの手法の選択
- 適当な波長範囲と波長の計算点の設定

- 図６に示すように、要求されたメッシュ設定(“Mesh setting”)の選択。図６ではバイリニア(“Bi-Linear”)法が選択されている。

高精度の結果を得るためには、両方向共に同じようなサイズのメッシュになるようになりかつ、メッシュ境界は誘電体境界と一致しなければならない（例えば、マルチセクションメッシュボタンを使う）。もし、スキャン(“Scan”)が選択されると、変数設定(“Variable Selection”)をしなければならない。また、スキャンに際しては構造チェック(“Structure Check”)を実行しなければならない。現在のバージョンでは、同時にスキャンできるのは２つまでである。

有限差分モード解析設定(“FD Mode Solver Setting”)タブは、一般設定(“General Setting”)と高度設定(“Advanced Setting”)の２つのサブタブがある。図７に示すように一般設定(“General Setting”)によってユーザは精度と計算時間の観点からふさわしい設定をすることができる。

> ***注意:*** 解法の種類や設定に関しての詳細は APSS ユーザマニュアルを参照されたい。

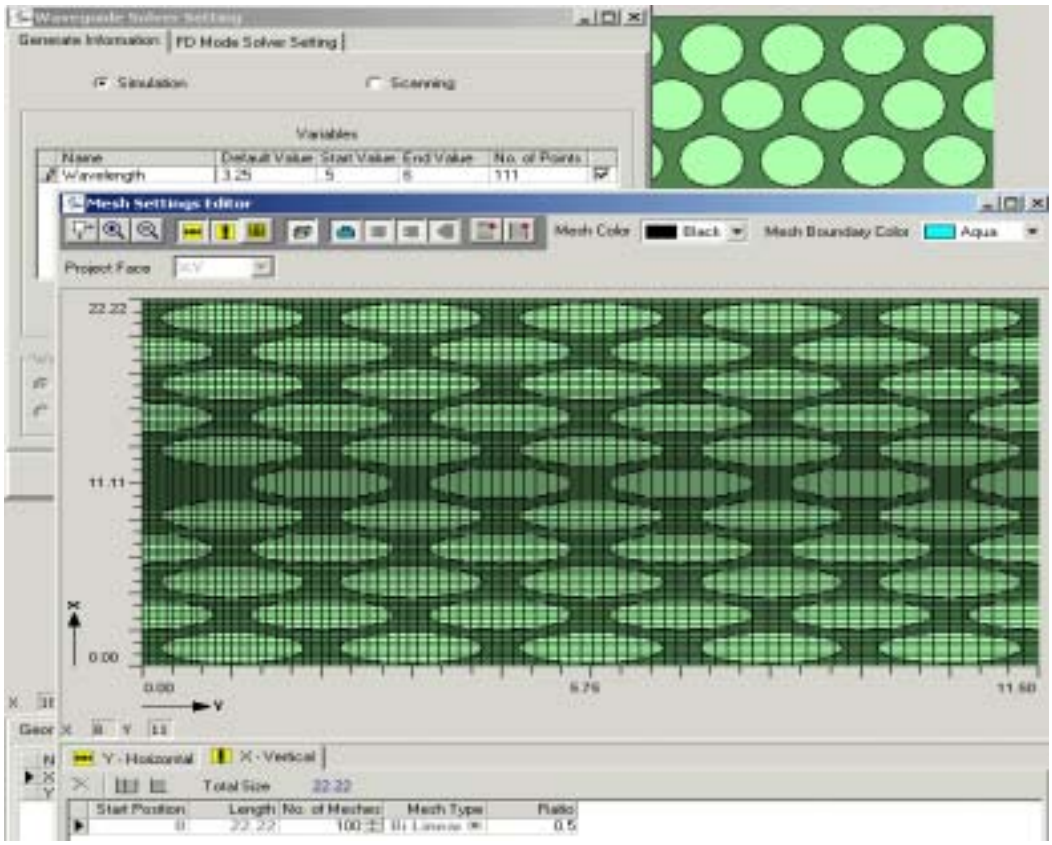


図６．導波路解法設定とメッシュ設定エディタ

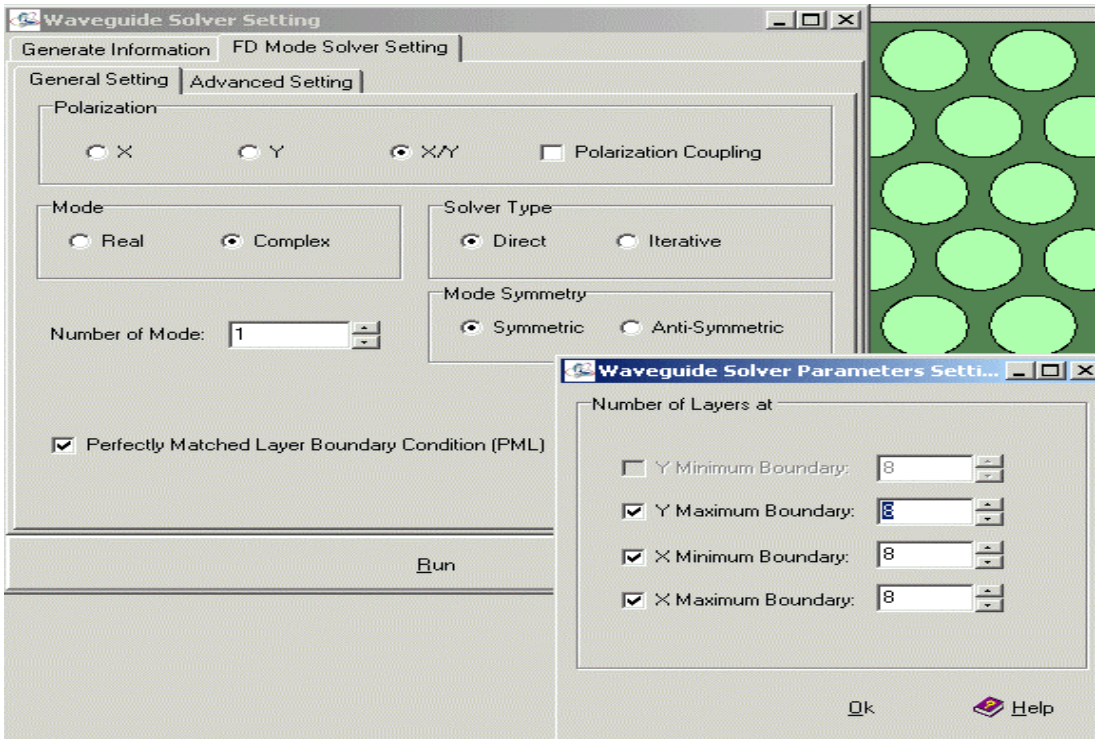


図７．有限差分(FD)の解法設定と PML 層の設定

4.4　実行と表示

解法設定を選択した後、実行(“Run”)ボタンをクリックすると PCF のシミュレーションをすることができる。シミュレーション後、 または ボタンをクリックすると S パラメータやセクションの位置(“Section Position”)で定義された位置におけるフィールド分布を見ることができる。図８は計算の結果得られた X-および Y-方向偏波の実効屈折率特性を示す。図９はモードフィールド E_x の X-方向偏波特性である。これらの結果は他の報告者の実験結果やシミュレーション結果とも一致する[5]。分散などいくつかのモードの特性はモード計算の精度に大きく依存し、シミュレーションの精度は解法設定に依存している。（分散は実効屈折率実部の２階微分で分散となる。）特に長波長での小さな d/Λでは、大きな数の空孔リングや細かなメッシュが要求される。

図１０は、PCF で導波路分散 D_g (材料分散は考慮せず、屈折率はシリカの 1.45) を d/Λをパラメータ (Λ=2.3 μm) として波長を変数にして示したものである。

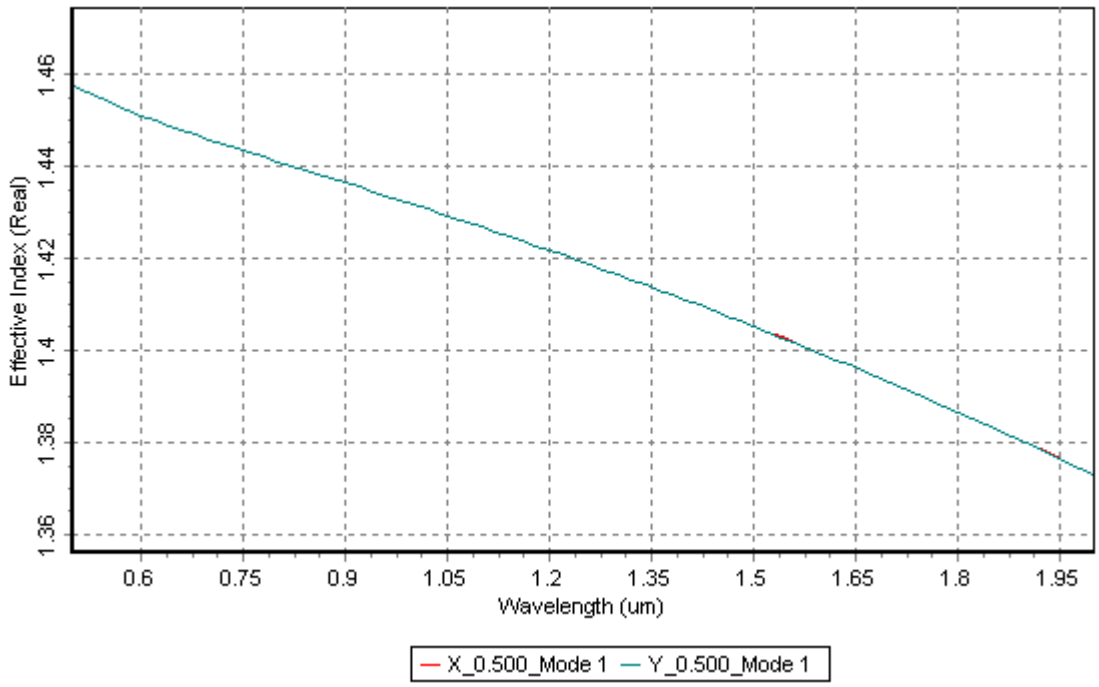
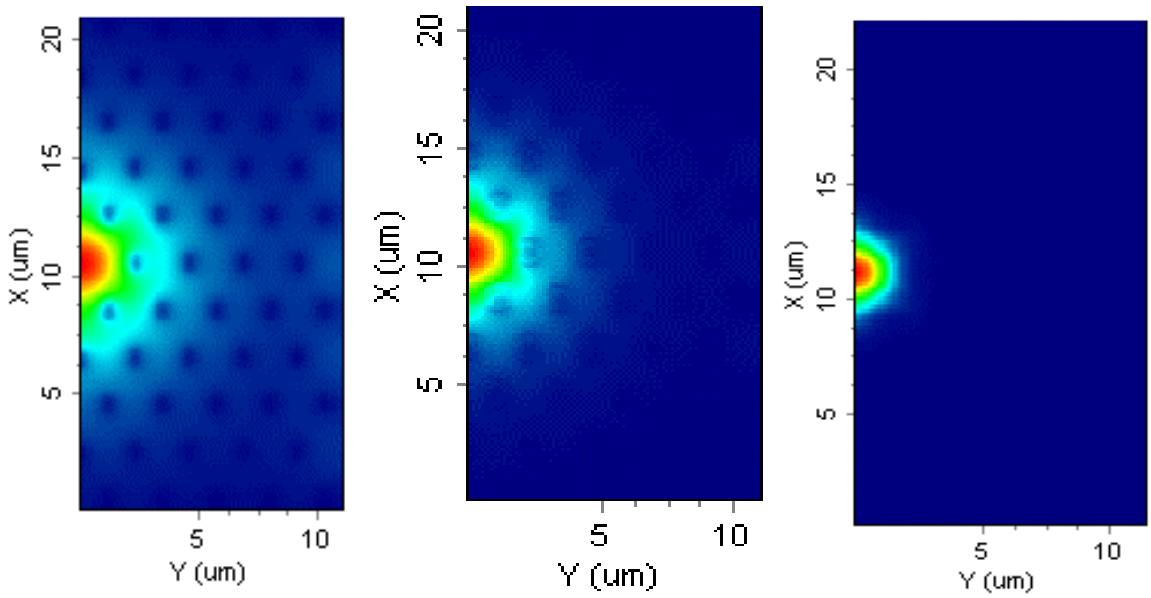


図８．PCF の実効屈折率特性(*d* =1.84 μm、*Λ*=2.3 μm)



(a) *d*=0.46 μm (b) *d* = 0.92 μm (c) *d* = 1.84 μm

図９．PCF の E_x モード計算結果（ピッチ*Λ*=2.3 μm 波長 1.55 μm）

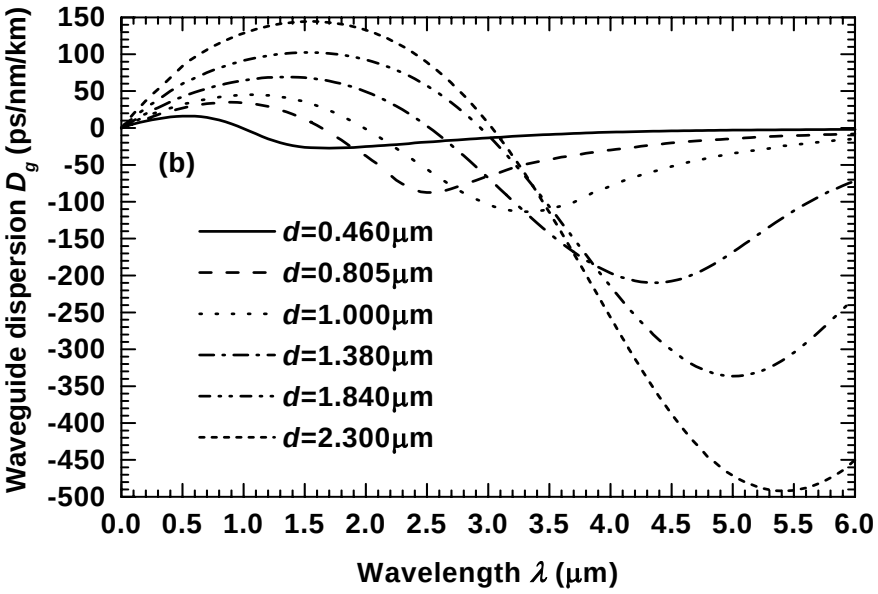


図１０．ピッチΛ=2.3 μm と固定し d/Λをパラメータとしたときの PCF の導波路分散 D_g

柔軟なシミュレーションやスキャンによって、空孔径、ピッチ、偏波、波長依存など設計パラメータの対する PCF の感度解析をすることは有意義である。

5 まとめ

参考文献から実例を取り上げ、APSS の導波路モジュールを用いて PCF をユーザフレンドリーにユーザ定義によって良好にシミュレーションできることがわかった。PCF の理論と動作原理についても言及した。最後に、材料から導波路までの設計プロセスを実例に基づいて記した。そして、シミュレーション結果は実験と良い一致をした。

6 参考文献

[1] J. Broeng, D. Mogilevstev, S. E. Barkou, and A. Bjarklev, “Photonic Crystal Fibers: A New Class of Optical Waveguides,” *Opt. Fib. Technol.*, vol. 5, pp. 305-330, 1999.

[2] J. D. Joannopoulos, *Photonics Crystals: Molding the flow of the light*, New Jersey: Princeton University Press, 1995.

[3] L. P. Shen, W.P. Huang, and S. S. Jian, “Design of photonic crystal fibers for dispersion-related applications,” *J. Lightwave Technol*., vol. 21, pp.1644-1651, July 2003.

[4] G. Agrawal, Nonlinear Fiber Optics. New York: Academic, 1995.

[5] J. C. Knight, T. A. Birks, P. St. J. Russell, and D. M. Atkin, “All-silica single-mode optical fiber with photonic crystal cladding,” *Opt. Lett*., vol. 21, pp. 1547–1549, 1996; Also, “errata,” vol. 22, pp. 484–485, 1997.