

テーパファイバの有効コア断面積及び群速度分散特性

王 朝陽^{†a)} 辻 寧英^{††} 曾根 宏靖^{††} 今井 正明[†]
佐藤 信也[†]

Effective Core Area and Group Velocity Dispersion Properties in Tapered Fibers

Zhaoyang WANG^{†a)}, Yasuhide TSUJI^{††}, Hiroyasu SONE^{††}, Masaaki IMAI[†], and Shinya SATO[†]

あらまし テーパファイバの遷移部分において、長手方向に変化する有効コア断面積及び群速度分散を有限要素法より厳密に評価した。電界分布がコア、クラッド、空気各領域にまたがって伝搬することにより、有効コア断面積の変化が説明される。また、ゼロ分散波長が短波長側にシフトすることも明らかになった。

キーワード テーパファイバ、有効コア断面積、群速度分散、有限要素法

1. まえがき

最近、従来の通信用ファイバを加熱延伸することにより極端に細くした双方向テーパファイバを用いて、平坦性に優れたスーパーコンチニウム (Supercontinuum: SC) スペクトル発生が実験や解析により報告されている [1]~[3]。文献 [4] では、均一に細いウエスト部分のみならずテーパ遷移部分 (長さ 15 mm, 図 1 参照) が SC スペクトル特性に影響することが示唆された。それはゼロ分散波長 (Zero Dispersion Wavelength: ZDW) の付近で高次非線形効果が顕著になるためと考えられる。したがって、光ファイバ中の非線形性の大きさを表す有効コア断面積 (A_{eff}) の評価は重要である。また、ファイバのクラッド外径を通常寸法の $125\ \mu\text{m}$ から $1\ \mu\text{m}$ 以下に細くした場合、ZDW 及び群速度分散 (Group Velocity Dispersion: GVD) については十分に解明されていない。本研究では、伝搬波長とクラッド径の変化に対するテーパファイバの A_{eff} と GVD 特性を数値解析した。ただし、テーパ遷移部分における SC スペクトルの伝搬特性にはここで触れない。

2. テーパファイバの A_{eff} と GVD 特性

本解析では、SC 発生実験 [1] によく用いられた Corning 社製 SMF28 ファイバ (コア径 $8.2\ \mu\text{m}$, クラッド

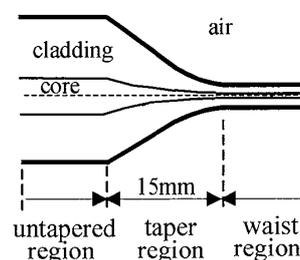


図 1 双方向テーパファイバの入射部 [4]
Fig.1 Input of biconical tapered fiber [4].

径 $125\ \mu\text{m}$, 比屈折率差 0.36%) のような軸対称均一コア光ファイバ構造を対象とする。磁界全成分を用いた有限要素法でベクトル波動方程式を解いた。磁界の非発散条件を満足しないときに発生するいわゆるスプリアス解を抑圧するために、ベナルティー法を用いた [5]。波長に対するコア、クラッドの屈折率はセルマインナー方程式を用いて計算した。また、クラッド径を $125\ \mu\text{m}$ から $0.3\ \mu\text{m}$ まで変化させる際、コア、クラッドの直径比を一定 ($8.2/125 = 0.0656$) と仮定した。

有効コア断面積 A_{eff} は次式で定義される： $A_{eff} = 2\pi[\int_0^\infty |E(r)|^2 r dr]^2 / \int_0^\infty |E(r)|^4 r dr$, ここで r と $E(r)$ はそれぞれ動径座標, 基本モードにおける電界の振幅分布である。図 2 に電界分布より計算した A_{eff} の変化を示す。波長が $1550\ \text{nm}$ から $850\ \text{nm}$ まで変化するとき、 A_{eff} が少しシフトするが、ファイバのクラッド径が $2\sim 10\ \mu\text{m}$ の範囲で A_{eff} の波長依存性はない。また、ファイバが細くなると、 A_{eff} は伝搬波長にかかわらず、同じ傾向の減少-増大-再び減少-再び増大を繰り返すことが分かった。これはファイバに閉じ込めた光波は (i) 最初にコアを伝搬するが、(ii) 次第にクラッド部に漏れていき、(iii) 更に完

[†] 室蘭工業大学工学部, 室蘭市

Faculty of Engineering, Muroran Institute of Technology,
27-1 Mizumoto-cho, Muroran-shi, 050-8585 Japan

^{††} 北見工業大学工学部, 北見市

Faculty of Engineering, Kitami Institute of Technology, 165
Koen-cho, Kitami-shi, 090-8507 Japan

a) E-mail: s1461016@mmm.muroran-it.ac.jp

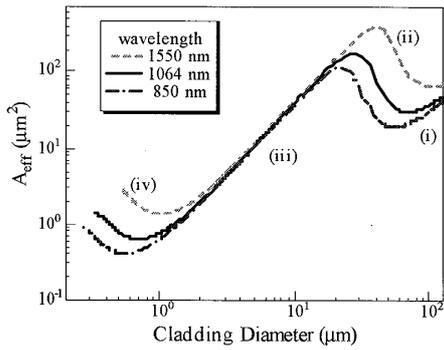
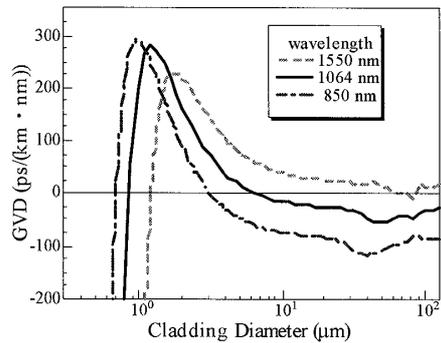
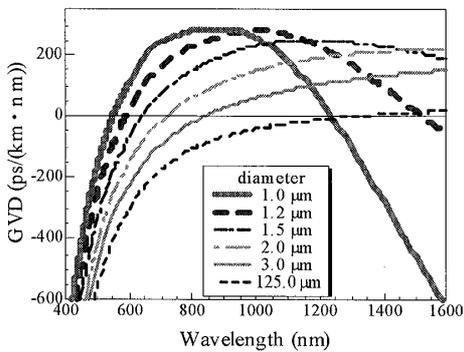


図2 有効コア断面積の変化
Fig. 2 Variation of effective core area.



(a)



(b)

図3 ファイバのクラッド径 (a) と波長 (b) に対する GVD 特性

Fig. 3 GVD characteristics as a function of (a) cladding diameter, (b) wavelength.

全にクラッド部を伝搬し, (iv) 最後はクラッド外側の空気に広がるためである [6]. 図中に, (i)~(iv) の領域を示した.

次に, 波動方程式から算出された伝搬定数を周波数に関して 2 階微分して, $GVD = -(2\pi c/\lambda^2)(d^2\beta/d\omega^2)$ が得られる. ここに c , λ , β , ω はそれぞれ光速, 波長, 伝搬定数と周波数である. ファイバのクラッド径及び波長に対する GVD 特性をそれぞれ図 3 (a), (b) に示す. クラッド径を $125\ \mu\text{m}$ から約 $10\ \mu\text{m}$ まで細

くすると, 分散値は正常分散値 ($GVD < 0$) を示しているが, 少し変動する. 続いて直径を約 $2\ \mu\text{m}$ まで極端に細くすると, 分散値は急に増加し, 異常分散領域 ($GVD > 0$) に入る. しかし, GVD は最大値 ($291\ \text{ps}/(\text{km}\cdot\text{nm})$ @ $850\ \text{nm}$) に至ると, 再び急速に減少する. これも前述した電界分布のクラッド外径依存性に関係することが知られている [4]. また, クラッド径のテーパ化により, ゼロ分散波長 ZDW が短波長側にシフトしている. 図 3 (b) から, クラッド径が $1.2\ \mu\text{m}$ まで細くなると, ZDW が短波長側 ($590\ \text{nm}$) に移動するほか, 長波長側 ($1525\ \text{nm}$) に第二 ZDW が存在することが分かった. この第二 ZDW を利用すれば, 近赤外線レーザを用いても SC スペクトルを発生させることが可能となる [3].

3. むすび

テーパファイバのクラッド径を極端に細くすると, 電場分布がクラッドの外側に漏れることにより A_{eff} と GVD が変化することを示した. クラッド径が $1.2\ \mu\text{m}$ 以下になると, 第二ゼロ分散波長が近赤外領域にも存在するようになることを実証した. SC スペクトル光の発生のためには, 三次以上の高次分散特性も調べる必要があるが, それについては今後の課題とする.

文献

- [1] T.A. Birks, W.J. Wadsworth, and P. St.J. Russell, "Supercontinuum generation in tapered fibers," *Opt. Lett.*, vol.25, no.19, pp.1415–1417, Oct. 2000.
- [2] J.M. Dudley and S. Coen, "Numerical simulations and coherence properties of supercontinuum generation in photonic crystal and tapered optical fibers," *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, vol.8, no.3, pp.651–659, May/June 2002.
- [3] J.M. Harbold, F.Ö. Ilday, F.W. Wise, T.A. Birks, W.J. Wadsworth, and Z. Chen, "Long-wavelength continuum generation about the second dispersion zero of a tapered fiber," *Opt. Lett.*, vol.27, no.17, pp.1558–1560, Sept. 2002.
- [4] R. Zhang, X. Zhang, D. Meiser, and H. Giessen, "Mode and group velocity dispersion evolution in the tapered region of a single-mode tapered fiber," *Opt. Express*, vol.12, no.24, pp.5840–5849, Nov. 2004.
- [5] 小柴正則, "軸対称光ファイバの有限要素法解析," 光導波路解析, 第 8 章, 朝倉書店, 東京, 1990.
- [6] P. Dumais, F. Gonthier, S. Lacroix, J. Bures, A. Villeneuve, P.G.J. Wigley, and G.I. Stegeman, "Enhanced self-phase modulation in tapered fibers," *Opt. Lett.*, vol.18, no.23, pp.1996–1998, Dec. 1993.

(平成 18 年 12 月 26 日受付)