

平成21年3月30日現在

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2006～2008

課題番号：18360161

研究課題名(和文) 超高NA光波分布変換技術の開発

研究課題名(英文) Study on optical-field transformation by means of a high NA technology

研究代表者

白石 和男 (SHIRAIISHI KAZUO)

宇都宮大学・工学研究科・教授

研究者番号：90134056

研究成果の概要：本研究では、新しい光波スポットサイズ変換(SSC)技術を開発すべく、(1)平面光回路型のSSCとしてカスケードアップテーパ、(2)光ファイバ型のSSCとして高屈折率層被覆(HILC)レンズドファイバを用いる、という2つのアプローチをとった。

(1) カスケードアップテーパからのアプローチ

垂直テーパ導波路と平面テーパ導波路で構成されたSSCを作製し、光の入出力を単一モード光ファイバで行うことが出来た。1端当たりの過剰損失は2.6dBであり、良好なスポットサイズ変換特性を得た。さらに、発展型として垂直・水平方向の界分布を同時に変換できるSSC構造を新たに提案してその有効性を実証できた。より高性能化が期待でき、薄型化が可能なダウンテーパ型も考案した。

(2) HILCおよびプラノコンベックスのコンベックス型レンズドファイバからのアプローチ

スポット直径が $10\mu\text{m}$ の通信用光ファイバの界分布を、波長サイズ( $1.55\mu\text{m}$ )程度に集光できる高屈折率層被覆レンズドファイバ(HILCレンズドファイバ)を実現させることを目標とし、実際に $1.6\mu\text{m}$ を実現して目標を達成した。さらにプラノコンベックス型HILCレンズドファイバを考案・設計して実際に試作した。その結果、理論的には波長の1/5以下のビーム径に集光できることを明らかにした。試作・実験によりその有効性を実証できた。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2006年度	6,100,000	1,830,000	7,930,000
2007年度	5,000,000	1,500,000	6,500,000
2008年度	3,400,000	1,020,000	4,420,000
年度			
年度			
総計	14,500,000	4,350,000	18,850,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：電気電子工学・電子デバイス・電子機器

キーワード：光デバイス・集積化

1. 研究開始当初の背景

光ファイバは大容量通信媒体として最も重要な役目を担っている。

一方、光ファイバへの入出力光信号を高速処理するための、光の発生・変調・演算などを目的にして、フォトニック結晶デバイスやシ

リコン(Si)を媒質にした次世代導波路デバイスの研究開発が各国で進められている。しかしながら、これら次世代のデバイスと通信路用光ファイバでは伝搬する光の界分布サイズが30倍以上も異なる。これは、素子の断面寸法と比屈折率差を座標軸として見ると、両者の占める位置が大きく異なることに起因する。

## 2. 研究の目的

通信路としての光ファイバとの相互接続が効果的にできなければ、種々の次世代機能性デバイスの実用化は最終的に難しい。界分布サイズを変換させるスポットサイズ変換器(SSC)は、半導体レーザやファイバ用に従来から種々提案されてきた。しかし、スポットサイズの違いが30倍程度になると使えない。本研究は、この問題を解決する新しい光波スポットサイズ変換技術を開発することが目的である。

## 3. 研究の方法

### [1]カスケードアップテーパ

#### (1)テーパ作製プロセスの確立

以下の順序で、図1に示す構造のカスケード(縦続接続)アップテーパを作製するプロセスを確立した。

##### (a)垂直アップアップテーパの形成

スペーサを介したマスクを設け、上方から高周波スパッタにより a-Si:H を堆積させて作製した。スペーサの形状と垂直アップテーパ断面形状との関係を求めた。

##### (b) 垂直アップテーパ表面のラフネス低減

①テーパ上層を SiO<sub>2</sub> あるいは、屈折率を 3.5 から 1.45 まで自由に設定できる a-SiO<sub>x</sub>:H(x=0-2) の保護層を形成した。同じ装置で連続して形成できる。

(c) 屈折率分布が上面に向かって二乗型に変化する垂直アップテーパを考案、作製した。SSC 端面での位相が平坦になり光ビームが基板に平行に出射できるほか、電磁界分布の膜厚方向の単峰性が保ちやすい特長があることを見出した。

(d) SSC 形成部の Si 細線がリッジ形状を持つ場合には図2に示すような低屈折率部が自動形成されることを新たに見出した。これにより、横(y)方向への光の閉じ込め効果が生じ、SSCを形成する上で有利に働いた。

##### (e) 垂直アップテーパ端面の加工

①SOI 基板を高精度ブレードによるダイシングを行った。②量産性は低下するが、光学研磨を行なった。

##### (f) 面内アップテーパ作製

電子ビームリソグラフィーにより細線導波路と一体形成する。テーパ角は5度以下であれば高次モードの発生は無視できる。

#### (2)設計と解析

Si細線光導波路の比屈折率差は70%程度あり、金属導波管と同様に端面からの放射光は後方にも広がる(N A > 1)。ミリ波の誘電体導波路と全く同様な動作であり、この方面の専門家の協力を得て理論解析や現象の分析を行った。

#### (3)ファイバとの接続実験

最終的には光ファイバとの接続ができなければならない。Si細線の両端にスポットサイズ変換器を形成し、単一モード光ファイバ間に挿入して過剰損失を測定した。その結果、1端面あたり実質2.6dBの低損失で単一モード光ファイバと結合できることを証明した。図3は試作した試料の外観写真である。

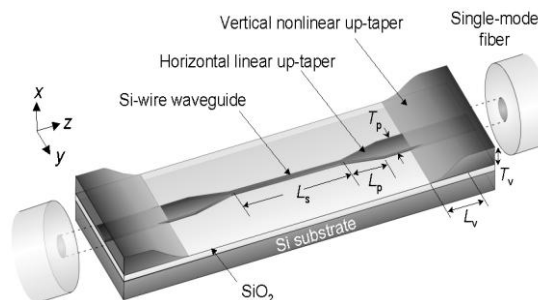


図1 縦続接続型スポットサイズ変換器

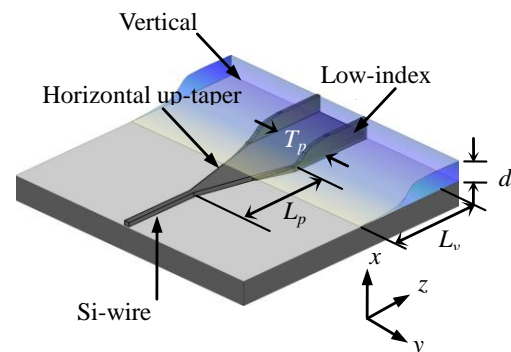


図2 合成アップテーパ型スポットサイズ変換器

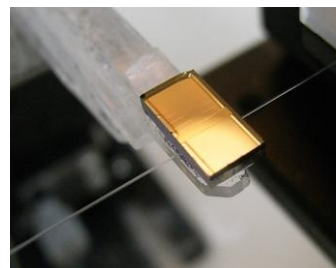


図3 試作サンプルの外観写真

[2]HILCレンズドファイバ

(1)平凸 (プラノコンベックス) 型 HILC レンズドファイバの開発

図4のようにファイバ先端にシリコンで微小なプラノコンベックスレンズを設ける構造を公案した。この構造の解析と作製を行った。測定の結果図5に示すように良好な集光特性を確認した。

(2)GI 接続型による更なる長作動距離化

HILC レンズドファイバは従来のものより2倍以上の作動距離がある。しかし、より長作動距離のデバイスがシステム側から要求されている。このため、1/4ピッチ長のGIファイバを利用した形の効果を実証する。同時に図6に示すようなプラノコンベックス型についても解析と試作によりその有効性を証明した。

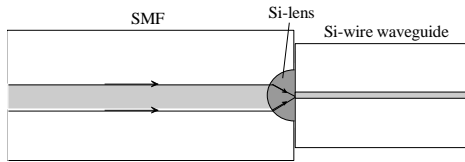


図4. プラノコンベックス型レンズドファイバ

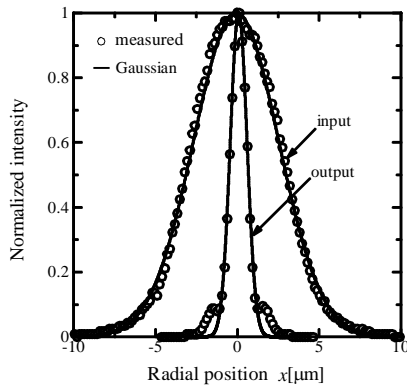


図5 光強度分布の測定結果

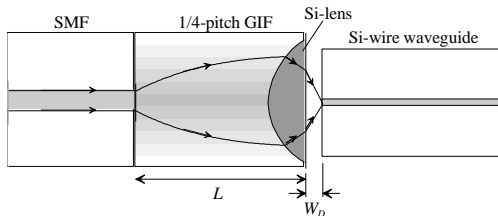


図6 GIF利用プラノコンベックス型レンズドファイバ

4. 研究成果

平面テーパ導波路と垂直テーパ導波路を縦列接続させたスポットサイズ変換器(SSC)を試作してモードフィールド直径(MFD)が $4.9\mu\text{m}$ へのスポットサイズ変換特性を実証した(05-06年)。垂直テーパ導波路の構造を改良しSSCのMFDをより大きく( $4.3\times 9.6\mu\text{m}^2$ ),より円形に( $5.4\times 5.1\mu\text{m}^2$ )に改善した(08年9月,09年3月)。図3に示すFiber To Fiberによる精密損失評価測定を実施した(08年3月)。結合損失は2.6dBにおさえることができた。理想的は1dB以下が望ましいものの、優れた値であり、何よりも構造が簡単で堅牢かつ波長特性や偏波特性に優れており、世界的にも高く評価される。また現状1mm長あるSSCの短尺化を目的に、図2に示す合成アップテーパ型SSCを新たに提案できた(09年3月)。

HILC レンズドファイバを試作し、回折限界近くのMFDを精密測定した(05年)。SMFの先端に平凸型の微小なシリコンレンズを形成した2種類の構造を提案し(図4と6),各々の集光MFDが $1.3\mu\text{m}$ ,  $1.9\mu\text{m}$ , 作動距離が $1\mu\text{m}$ ,  $7.2\mu\text{m}$ の実験結果を得た(08年9月)。また作動距離を大きくとる目的でコアレスファイバを用いたHILC レンズドファイバを試作し, MFDが $1.9\mu\text{m}$ , 長作動距離 $15\mu\text{m}$ を実証した(09年3月)。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計22件)

- (1) K. Shiraishi, N. Kawasaki, H. Yoda, K. Watanabe, M. Umetsu, T. Hitomi, and K. Muro "High-index layer coating on a lensed fiber endface for enhanced focusing power", Journal of Lightwave Technology, vol. 27, in press. 査読有.
- (2) H. Yoda, K. Shiraishi, H. Furuhashi, A. Ohshima, H. Tsuchiya, and C. S. Tsai, "A two-port single mode fiber-silicon wire waveguide coupler module using spot size converters," J. Lightwave Technol., vol. 27, in press. 査読有.
- (3) K. Shiraishi, M. Kagaya, K. Muro, H. Yoda, Y. Kogami, and C. S. Tsai, "Single-Mode Fiber with Plano-Convex Silicon Microlens for Integrated Butt-Coupling Scheme", Applied Optics, vol. 47, no. 34, pp. 6345-6349, Dec. 2008. 査読有.
- (4) H. Yoda, K. Muro, and K. Shiraishi, "Fabrication of rugate optical filters using a-SiO<sub>x</sub>:H thin-films", IEICE Trans. Electron., vol. E91-C, no. 10, pp. 1639-1643, Oct. 2008. 査読有.
- (5) K. Shiraishi, H. Yoda, A. Ohshima, H. Ikedo, and C. Tsai, "A silicon-based spot-size converter between single-mode fibers and Si-wire waveguides using cascaded tapers", Appl. Phys.

Lett., vol. 91, pp. 141120(1-3), Oct. 2007. 査読有.

(6) 川崎信幸、鹿野修司、依田秀彦、白石和男，“高効率非球面レンズド GIO ファイバの光学特性の解析と作製”，電子情報通信学会論文誌，vol. J90-C, no.3, pp. 256-264, Mar. 2007. 査読有.

(7) H. Yoda, H. Ikedo, T. Ketsuka, A. Irie, K. Shiraishi, and C. S. Tsai, "A high-performance micro GRIN-chip spot-size converter formed with focused ion-beam", IEEE Photon. Tech. Lett., vol. 18, no. 14, pp. 1554-1556, July 2006. 査読有.

[学会発表] (計 53 件)

(1) H. Yoda, K. Shiraishi, A. Ohshima, T. Ishimura, H. Tsuchiya, and C. S. Tsai, "Spot-Size Converter with Graded-Index Up-Taper for Si-Wire Waveguides," OFC/NFOEC 2009, San Diego, CA, Mar. 2009,

(2) H. Yoda, K. Shiraishi, A. Ohshima, T. Ishimura, H. Tsuchiya, and C. S. Tsai, "Spot-size converters for a two-port single-mode fiber-silicon wire waveguide coupler module," in Proc. 5th International Conference on Group IV Photonics, Sorrento, Italy, Sep. 2008.

(3) S. Kuroo, K. Shiraishi, H. Sasho, H. Yoda, K. Muro, "Triangular surface-relief grating for reduction of reflection from silicon surface in the 0.1-3 terahertz region," Conference on Lasers and Electro-Optics Quantum Electronics and Laser Science Conference (CLEO/QELS 2008), San Jose, CA, May 2008, paper CThD7.

(4) K. Shiraishi, M. Kagaya, K. Muro, H. Yoda and H. Tsuchiya, "A lensed fiber for butt coupling between high-index contrast waveguides and single-mode fibers," OFC/NFOEC 2008, San Diego, CA, Feb. 2008, paper JThA7.

(5) K. Muro, M. Kagaya, K. Shiraishi, H. Yoda, and C. Tsai, "A fiber with a convex-plano silicon micro lens for contact coupling between high-index contrast waveguides and single-mode fibers," in Proc. 5th Workshop on Fibre and Optical Passive Components (WFOPC 2007), Taipei, Taiwan, Dec. 2007, paper W2B-1.

[産業財産権]

○出願状況 (計 4 件)

(1) 名称：偏光子、その製造方法及び光モジュール

発明者：白石、小山

権利者：宇都宮大学

種類：特許権

番号：特願 2009-80742

出願年月日：平成 21 年 3 月 29 日

屋内外の別：国内

(2) 名称：レンズ付き光ファイバ及びその製造方法

発明者：小柴、白石

権利者：(株)モリテックス、宇都宮大学

種類：特許権

番号：特願 2009-074033

出願年月日：平成 21 年 3 月 25 日

屋内外の別：国内

(3) 名称：光学部品

発明者：白石、黒尾、佐生

権利者：宇都宮大学、(株)栃木ニコン

種類：特許権

番号：特願 2008-61993

出願年月日：平成 20 年 3 月 12 日

屋内外の別：国内

(4) 名称：光ファイバおよび光結合器

発明者：柳ヶ瀬、石川、古神、依田、白石

権利者：宇都宮大学、(株)村田製作所

種類：特許権

番号：特願 2007-037890

出願年月日：平成 19 年 2 月 19 日

屋内外の別：国内

○取得状況 (計 0 件)

[その他]

<http://shiraishi.ee.utsunomiya-u.ac.jp>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

白石 和男 (SHIRAISHI KAZUO)

宇都宮大学・工学研究科・教授

研究者番号：90134056

(2) 研究分担者

苫米地 義郎 (TOMABECHI YOSHIROU)

宇都宮大学・教育学部・教授

研究者番号：00008062

古神 義則 (KOGAMI YOSHINORI)

宇都宮大学・工学部・准教授

研究者番号：10260473

依田 秀彦 (YODA HIDEHIKO)

宇都宮大学・工学研究科・准教授

研究者番号：30312862

土屋 治彦 (TSUCHIYA HARUHIKO)

宇都宮大学・工学部・教授

研究者番号：40436291

(3) 研究協力者

Chen. S. Tsai

カリフォルニア大学アーバイン校・教授