

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 25 年 5 月 30 日現在

機関番号：12201

研究種目：基盤研究（B）

研究期間：2009～2012

課題番号：21360161

研究課題名（和文） シリコンベース高屈折率光技術の開発

研究課題名（英文） Research on silicon-based high-index contrast optical technologies

研究代表者

白石 和男（SHIRAIISHI KAZUO）

宇都宮大学・大学院工学研究科・教授

研究者番号：90134056

研究成果の概要（和文）：

シリコン細線導波路用のスポットサイズ変換器（SSC）として、偏波無依存垂直方向ダウンテーパ型とトンネル結合型、の2つの構造を実現した。偏波無依存垂直方向ダウンテーパ型は、面に垂直方向にリアクティブイオンエッチングによってダウンテーパにするだけの簡単なプロセスで実現できた。トンネル結合型についても試作に成功し、良好な特性を得た。偏波分離素子として応用できること、およびTM-likeモードに限ればスポットサイズ変換器として動作することが明らかになった。レンズド光ファイバについては、HILC（高屈折率層被覆）型およびプラノコンベックス（平凸）型の堅牢化および高性能化をはかった。ファイバフェルルを用いる形態を考案し、従来問題だった機械的な脆弱さを克服し、集光特性に優れ、使い勝手のよいレンズドファイバを実現した。

研究成果の概要（英文）：

Two types of spot-size converter (SSC) have been successfully realized. The polarization-insensitive vertical down taper type was easily realized with a simple process employing reactive etching technique. The process can fabricate the vertical down-taper to silicon waveguides that has horizontally up taper structure. The tunnel-coupled type was obtained by depositing a gap layer on the silicon waveguide with the horizontal up taper, and then depositing a cap layer onto it. The TM-like mode was measured to couple from Si waveguide to the cap layer, whereas the TE-like mode propagates along the Si-waveguide without coupling to the cap layer. The phenomena show that the structure operates as the polarization splitter. As far as the TM-like mode concerned, the structure operates as the SSC nicely. Also robust and high-focusing power two types of lensed fibers, HILC and plano-convex, have been successfully obtained. The robustness was attained by employing commercially available fiber ferrules. Mechanically robust and user-friendly lensed fibers have been obtained. Excellent lensed fibers with a high focusing power and long working distance characteristics have been successfully obtained with the process.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	3,700,000	1,110,000	4,810,000
2010年度	3,400,000	1,020,000	4,420,000
2011年度	3,600,000	1,080,000	4,680,000
2012年度	2,500,000	750,000	3,250,000
年度	0	0	0
総計	13,200,000	3,960,000	17,160,000

研究分野：光エレクトロニクス

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：シリコン、光ファイバ、レンズドファイバ、光通信、NA

### 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・光路切替・演算などを目的にして、フォトニック結晶デバイスや化合物半導体あるいはシリコン(Si)を媒質にしたSi細線導波路などの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。

現在の光通信分野を中心として使われている光素子の屈折率と構造を座標軸にした場合、伝送路の光ファイバとSi細線導波路、半導体レーザやフォトニック結晶デバイスは両極端に位置する。一方で、空白となる領域も存在し、この領域での光技術を開拓すれば、従来は困難だった機能を実現できる新素子が生まれる可能性が高い。同時に、現在両極端にある光素子間を高効率で接続する技術が不可欠であった。

### 2. 研究の目的

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・光路切替・演算などを目的にして、フォトニック結晶デバイスや化合物半導体あるいはシリコン(Si)を媒質にしたSi細線導波路などの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、従来の光素子とその比屈折率差と断面サイズの2次元で見た場合、数10%の比屈折率差をもち、断面サイズがサブミクロンから数ミリまでの素子が空白であった。この領域での光技術を開拓すれば、従来は困難だった機能を実現できる新素子が生まれる可能性が高い。そこで、本研究は、(1)構造パラメータが大幅に異なる光素子間の相互接続技術の確立(2)高屈折率光学素子および関連技術の開拓を目的とする。光通信で使われる $1.55\mu\text{m}$ 帯やテラヘルツ帯で透明かつ高屈折率なシリコン(Si)をベースとする。

### 3. 研究の方法

(1)ダウンテーパ構造によるSSCの低損失化

光ファイバと低損失で結合でき、作製が容易な、新しい構造のSSCを開発する。従来、用いていたアップテーパ構造とは逆のダウンテーパ構造を実現させる。これまでの研究

で既にアップテーパ型については、ファイバとの結合実験の段階までできていた。従来、実験的に得られている、光ファイバとSi細線導波路との結合損失は2.6dBである。SSC部材料の吸収による損失は0.6dBであるので、散乱損失の要因が大きいと考えている。ダウンテーパにおいても同様な要因が考えられた。散乱の原因は、電子ビーム露光に起因する面内テーパの側面の凹凸と、高周波スパッタによるテーパ形成時の表面凹凸であると予想した。そのため、以下の方法で実験を行った。①電子ビーム露光時のパターン形成方法の変更、②テーパ部の極表面層の酸化、化学エッチングによる平滑化、③高周波スパッタ時のアルゴンイオンのピーニング効果増強による、テーパ表面の平滑化。この結果、目標とする低損失、かつ偏波依存性の小さいSSCが開発できた。また、膜表面の散乱の問題を回避するために、新たにトンネル結合型の試作開発を行った。

### (2) 新型レンズドファイバの開発

申請者が考案したシリコンベースの新しいレンズドファイバ、すなわちファイバ先端に微小な平凸Siレンズを形成し、ファイバのコアを伝搬してきた光を、その小さな曲率半径(5~10 $\mu\text{m}$ )と大きな屈折率(3.5)によって極小ビーム径に集光させる構造を実現する。現在の作製手順は放電による凹面の球面化を行っており、正確さと再現性に問題がある。そこで、多モードファイバ用の、屈折率が2乗形をしたファイバプリフォームを購入し、研究協力者が所属する企業に依頼して単一モードとなる条件に設定して線引きする。これにより、エッチングのみで理想的かつ再現性良く、微小平凸レンズを形成できると考えている。予備実験として、既存の多モードGIファイバのコアをエッチングした結果、良好な凹面が形成され、本方法が有効との見込みを得ている。一方、HILC(高屈折率層被覆)型と呼ぶ、先端凸型のレンズドファイバも試作する。これらのファイバをフェルール化することにより堅牢化を図る。

### 4. 研究成果

スポットサイズ変換器：シリコン細線導波路用のスポットサイズ変換器として、(1)偏波無依存垂直方向ダウンテーパ型と(2)トンネル結合型、の2つの構造を実現した。

(1)については、面内方向にアップテーパを持たせたシリコン細線導波路を、面に垂直方向にリアクティブイオンエッチングによ

てダウンテーパにするだけの簡単なプロセスで実現できた。TEおよびTM-likeモードに対してそれぞれ、2.8dBおよび2.7dBの結合損失が得られ、低損失性と偏波依存性が小さいことの両者を実証できた。(2)については、面内方向にアップテーパを持たせたシリコン細線導波路の表面に60nm厚の石英ギャップ層を成膜したのち、厚さ10 $\mu$ mのa-Si:H膜を製膜してキャップ層としたトンネル構造を形成した。TM-likeモードはキャップ層に結合し、TE-likeモードはキャップ層に結合せずシリコン導波路層に沿って伝搬することが観察できた。これにより、偏波分離素子として応用できること、およびTM-likeモードに限ればスポットサイズ変換器として動作することが明らかになった。

レンズド光ファイバ：集光特性に優れたレンズドファイバとしてHILC型およびプラノコンベックス型のレンズドファイバのロバスト化および高性能化をはかった。双方の構造とも、従来問題だった機械的な脆弱さを克服し、使い勝手のよいレンズドファイバとするために、ファイバフェルールを用いる形態を実現した。市販のファイバフェルールに、先端に固有ビーム径GIファイバを融着した単一モードファイバを挿入し、フェルール端面研磨および化学エッチングによりHILC型およびプラノコンベックス型のフェルール化レンズドファイバが実現できた。集光特性に優れた性能を有することも実験的に確認することができた。

#### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計9件)

- ① K. Shiraishi and H. Yoda, "Infrared polarizer employing multiple metal-film subwavelength gratings," *Optics Express*, 査読有, vol. 21, accepted for publication.
- ② K. Shiraishi, H. Yoda, and C. Tsai, "A two-port polarization-insensitive coupler module between single-mode fiber and silicon-wire waveguide," *Optics Express*, 査読有, vol. 20, no. 22, pp. 24370-24375, Oct. 2012.
- ③ 小藤美紗子, 稲川雄太, 依田秀彦, 白石和男, "インプリント法によるテラヘルツ帯用金属薄膜サブ波長格子構造偏光子の作製," *電子情報通信学会論文誌(C)*, 査読有, vol. J95-C, No. 3, pp. 58-59, Mar. 2012
- ④ K. Shiraishi, H. Yoda, Y. Kogami, and C. S. Tsai, "High Focusing Power Lensed Fibers Employing Graded-Index Fiber with Eigen-Beam Diameter," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 査読有, vol. 23, no. 19, pp.

1376-1378, Oct. 2011.

- ⑤ K. Shiraishi, S. Oyama, and C. S. Tsai, "A Polarizer Using Thin Metallic-Film Sub-Wavelength Grating for Infrared to Terahertz Region," *Journal of Lightwave Technology*, 査読有, vol. 29, no. 5, pp. 670-676, March 2011.
- ⑥ S. Kuroo, S. Oyama, K. Shiraishi, H. Sasho, and K. Fukushima, "Reduction of light reflection at silicon-plate surfaces by means of subwavelength gratings in terahertz region," *Applied Optics*, 査読有, vol. 49, pp. 2806-2812, May 2010.
- ⑦ 愛川和彦, 金田恵司, 白石和男, "分散補償ファイバモジュールの高性能化" *電子情報通信学会論文誌(B)*, 査読有, vol. J92-B, no. 7, pp. 1121-1129, Jul. 2009.
- ⑧ 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.*, 査読有, vol. 27, no. 10, pp. 1315-1319, May 2009.
- ⑨ 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*, 査読有, vol. 27, no. 7, pp. 864-870, April 2009.

[学会発表] (計7件)

- ① K. Shiraishi, T. Daidoji, H. Yoda, and C. S. Tsai, "Vertical-Tunneling Spot-Size Converters for Silicon-Wire Waveguides," The 9th International Conference on Group IV Photonics (GFP), San Diego, CA, Aug. 2012, paper ThP 5.
- ② K. Shiraishi, M. Kofuji, Y. Inagawa, H. Yoda, and C. S. Tsai, "Fabrication of Thin Metallic-film Subwavelength-Grating Polarizers for Terahertz Region by the Imprinting Method," Conference on Lasers and Electro-Optics Quantum Electronics and Laser Science Conference (CLEO/QELS 2012), San Jose, CA, May 2012, paper JW2A45.
- ③ H. Yoda, T. Tashiro, K. Shiraishi, and C. S. Tsai, "Response Evaluation of Tunable Optical Bandpass Filter Using a-Si:D/SiO<sub>2</sub> Multilayer," The Asia-Pacific Interdisciplinary Research Conference 2011, Toyohashi, Nov. 2011, paper 18PP-71.
- ④ K. Shiraishi, H. Yoda, and C. S. Tsai, "Miniaturized Spot Size Converters for

Coupling between Single-Mode Optical Fibers and Silicon Photonic Circuits," 16th Microoptics Conference, Hsinchu, Taiwan, Oct. 2010, paper TB2. (Invited).

⑤ K. Shiraishi and C. S. Tsai, "Silicon-based spot-size conversion techniques for efficient coupling between wire-waveguides and single-mode fibers," (12<sup>th</sup> ISMOT (12<sup>th</sup> International Symposium on Microwave and Optical Technology), New Delhi, India, Dec. 2009, paper I-422. (Invited).

⑥ S. Oyama, K. Shiraishi, C. S. Tsai, H. Yoda, and Y. Kogami, "A metal-film sub-wavelength grating polarizer for terahertz and infrared regions," 15th Microoptics Conference, Tokyo, Oct. 2009, paper D-5.

⑦ T. Ishimura, H. Yoda, K. Shiraishi, S. C. Tsai, and C. S. Tsai, "A simultaneous up-tapering spot-size converter for silicon-wire waveguides," 15th Microoptics Conference, Tokyo, Oct. 2009, paper L-2.

[産業財産権]

○出願状況 (計 1 件)

名称：偏光子

発明者：白石、稲川

権利者：宇都宮大学

種類：特許

番号：特開 2012-177797

出願年月日：2011 年 2 月 25 日

国内外の別：国内

○取得状況 (計 4 件)

① 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：宇都宮大学

種類：特許

番号：特許第 5190400 号

取得年月日：2013 年 2 月 1 日

国内外の別：国内

② 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

番号：特許第 5137084 号

取得年月日：2012 年 10 月 10 日成立

国内外の別：国内

③ 名称：コリメータレンズモジュールの製造方法、そのコリメータレンズモジュール及びその製造装置

発明者：依田、白石、大関、丸山

権利者：宇都宮大学

種類：特許

番号：特許第 4691637 号

取得年月日：2011 年 3 月 4 日

国内外の別：国内

④ 名称：先端に高屈折率層を形成したレンズ付き光ファイバおよびそのレンズ付き光ファイバを用いた光結合モジュール

発明者：白石、川崎、渡邊

権利者：宇都宮大学

種類：特許

番号：特許第 4416129 号

取得年月日：2009 年 12 月 4 日

国内外の別：国内

6. 研究組織

(1) 研究代表者

白石 和男 (SHIRAISHI KAZUO)

宇都宮大学・大学院工学研究科・教授

研究者番号：90134056

(2) 研究分担者

依田 秀彦 (YODA HIDEHIKO)

宇都宮大学・大学院工学研究科・准教授

研究者番号：30312862