

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20日 現在

機関番号：12301

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2010～2012

課題番号：22560033

研究課題名（和文） 石英系プレーナ光波回路の位相制御および診断技術の研究

研究課題名（英文） Research on phase compensation and diagnosis of silica-based planar waveguide circuits

研究代表者

高田 和正（TAKADA KAZUMASA）

群馬大学・大学院工学研究科・教授

研究者番号：20359590

研究成果の概要（和文）：

アレイ導波路型回折格子の各チャンネルの光結合を自動調芯する系を導入し、位相誤差を1チャンネルあたり20秒で測定できる干渉型位相誤差測定系を構築した。また、位相誤差データからスラブ導波路レンズ内の屈折率分布を導出するプログラムを開発した。更に、炭酸ガスレーザー照射の際に誘発される強度変動を0.3%に低減する方法を見出した。

研究成果の概要（英文）：

We developed the phase error measurement system where the optical coupling at each channel of an arrayed-waveguide grating could be made automatically. We created a program for revealing the refractive index change over the slab waveguide lens at the output ports by using the phase error distributions of individual channels measured with the system. We were able to reduce the intensity change due to CO₂ laser irradiation to 0.3% by expanding the diameter of the CO₂ laser light.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	1,500,000	450,000	1,950,000
2011年度	1,000,000	300,000	1,300,000
2012年度	500,000	150,000	650,000
年度			
年度			
総計	3,000,000	900,000	3,900,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：応用物理学・工学基礎・応用光学・量子光工学

キーワード：フォトニックネットワーク、光制御、光干渉、光位相制御

1. 研究開始当初の背景

インターネットに代表される高度情報化社会の進展は、新たな産業の振興、福祉・医療、教育などの様々な分野で市民生活の向上をもたらしている。このような「高度情報通信ネットワーク社会」をさらに推進し発展させるためには、幹線系・アクセス系のみならず、インターネットの端から端までの全ての情

報伝送処理を光領域で高品質・高効率に行う技術が不可欠である。電気変換信号の無い光通信の実現のためには、1本の光ファイバに数千の信号を同時に送ることが可能な幹線系フォトニックネットワークが不可欠であり、光の波長数（チャンネル数：ch）が数千に及ぶ光合分波器の開発がその成否を分ける基幹技術とみなされている。

我々はチャンネル数を飛躍的に拡大できる階層構成法を考案しその有効性を実証した。前段にはチャンネル間隔が2.5THzの10chのAWG、後段には25GHz間隔AWGを10台使用した。入射ポートに1,000波の光が入射すると、入射光は前段AWGで10分割、後段AWGによって更に100分割されるので、最終的に1,000chの分波を実現できる。このような光合分波器の各チャンネルでは、他の全てのチャンネルからのクロストークが累積されるので、後段として使用する狭チャンネル間隔AWG自身のクロストークを極限まで低減することが実用上重要な課題である。

2. 研究の目的

後段AWGのクロストークは、基板上での屈折率変化によって各アレイ導波路を伝播した後に出射ポートに集光する光線の位相が設計値からずれてしまう位相誤差によって生じる。従って、160チャンネル全てのクロストークを低減するためには、出射側に設置されたスラブ導波路レンズ内で作製時に固化された屈折率の歪みを補償する必要がある。本研究の目的は、スラブ導波路レンズ内の歪みを光誘起屈折率変化を利用して補償するため、全チャンネルにおける位相誤差を高精度かつ短時間で自動的に測定する技術、および測定値から屈折率分布を導出するプログラムの開発を行うことである。

また、導波路内の屈折率変化を直接測定すべく、ミリメートル空間分解能で導波路のブリルアン利得スペクトルを測定する技術を考案し、原理確認を進めている。本技術では、ポンプ光のパルスとCWのストークス光を石英系導波路内で対向伝播させる。測定部分に炭酸ガスレーザーを照射して周期的な温度変調を引加しながらポンプ光の光周波数を変えてストークス光のパワー変化すなわちスペクトルを測定する。屈折率はスペクトルがピークとなる周波数から求める。これまでに、UVレーザー照射により屈折率が変化した部分ではスペクトルが他の部分より約7MHzシフトしたデータが得られているが、炭酸ガスレーザー照射によりストークス光の強度が変調されるため、スペクトルのピークを精度よく測定できない状況である。このため、レーザー照射によって誘発される強度変調を低減することが本研究の目的である。

3. 研究の方法

(1) 位相誤差測定系の構築

スラブ導波路の屈折率歪みを高精度に導出するためには、160チャンネルの位相誤差を高精度かつ短時間で測定することが必要である。AWGの入力端と出力端における光学結合を短時間で行わせるため、1回転500パルスの5相ステップモータを搭載

した外部制御1軸ステージ(分解能0.025 μm /パルス)を2台組み合わせるXY軸ステージを構築した。当該ステージにおいて、(i)x軸方向の最適な位置をサーチし、(ii)XとY軸に関してスパイラル上に結合用のファイバを動かして光学的に最適な位置をサーチする光学調整プログラムを作成した。特に、ステージはエクセルをベースにしたプログラムがメーカーから提供されていたので、測定系全体をLabVIEWでコントロールするためのVisualBasicをベースにしたインターフェース用プログラムを作成した。

また、スラブ導波路を細かいメッシュに分割し、分割した各要素の屈折率を各チャンネルにおける位相誤差データからスラブ導波路レンズ上の屈折率分布を導出する逆投影法のプログラムを作成した。

(2) レーザ照射による強度変調の低減

炭酸ガスレーザーを照射して導波路を局部的に温度変調し、ブリルアン増幅を利用して照射部分の屈折率を測定するためには、誘発される強度変調を抑えながら温度を上昇させることが不可欠である。強度変調が最小となる照射条件を抽出するため、石英系導波路型マッハ・ツェンダー干渉計(MZI)を作製し、一方のアームをレーザー照射し、ビーム径をビームエキスパンダーで2~8倍に変化させながらMZIからの出力変化を測定した。

4. 研究成果

(1) 位相誤差測定系の構築

今回構築した調芯系を用いて、光ファイバとコア幅6 μm の石英系導波路との光結合を行った結果を図1に示す。図より、最低3回の調芯操作を行えば、相対的な標準偏差が0.8%以内で光ファイバの調芯が完了できることが分かった。3回の調芯時間は8秒以内であったため、光導波路の入射端及び出射端の調芯すなわち1チャンネル当たりの調芯に要する時間は16秒、位相誤差測定に2秒要したので、計20秒で測定全体を完了できた。

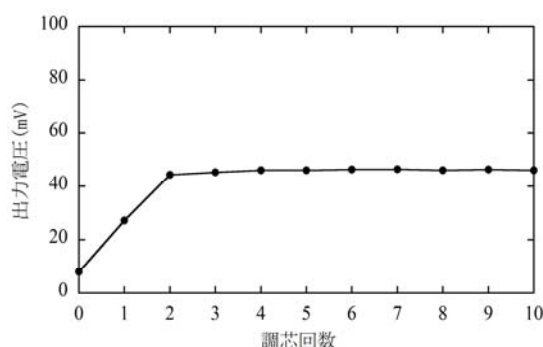


図1 調芯の回数と光結合出力との関係

位相誤差測定系と調芯システムを組み合わせ、位相測定値の測定誤差を求めた。アレイ導波路型回折格子ではチャンネルごとに光パワーが変化してしまい、位相誤差測定技術における測定精度を正確に導出することは難しかった。そこで、今回、光路長差が $240\ \mu\text{m}$ ずつ増加する石英系導波路型マッハ・ゼンダー干渉計 (MZI) を同一基板上に 31 台作製し、各 MZI における両アーム間の位相差を当該干渉計により測定した。測定対象を MZI とした理由は、入射光パワーを 2×2 カプラで当配分できるため、光パワーの損失を最小限に抑えられるからである。実験では、各 MZI に対して位相を 10 回測定し、これらの測定値の平均値を求めた。この測定作業を 10 回繰り返し、位相測定値のばらつきを求めた (図 2 参照)。この結果、ばらつきに関する標準偏差は $0.02\ \text{rad}$ であった。従来系による位相測定値の標準偏差は $4 \times 10^{-3}\ \text{rad}$ であったので、今回の自動化作業により変動量は 5 倍増加してしまったことになる。このような増加の原因としては、全自動化のために、参照光側や光ファイバカプラ出射ポート側などに機械的光スイッチを多用し、これらの部品内における反射によって、ビート雑音が増大したためと考えられる。

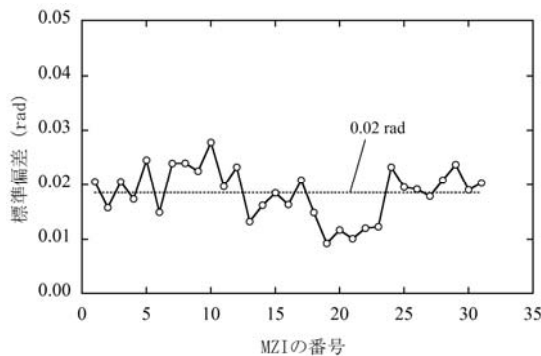


図 2 MZI の位相測定値の標準偏差

(2) スラブ導波路上の屈折率分布

スラブ導波路上の屈折率分布を位相誤差分布より導出するプログラムを作成した。スラブを細かいメッシュに分割し、各要素の屈折率を n_i 、アレイ導波路から出射ポートに入る k 番目の光路がメッシュを横切る幾何学的な距離を dL_{ki} とすると、一本の光路の光路長 P_k は、 $P_k = \sum_i dL_{ki} \cdot n_i$ すなわち、行列表現で $\mathbf{P} = \mathbf{dL} \cdot \mathbf{n}$ となる。ここで、 \mathbf{P} は P_k を成分とするベクトル、 \mathbf{n} は屈折率を成分とするベクトル、 \mathbf{dL} は dL_{ki} を成分とする行列を示す。 \mathbf{dL} の逆行列 \mathbf{dL}^{-1} を計算することにより、 \mathbf{n} は $\mathbf{n} = \mathbf{dL}^{-1} \cdot \mathbf{P}$ と表される。そこで今回、逆投影法により \mathbf{n} を求めるプログラムを作成した。すなわち、 h_k を k 番目の光路の長さ、 k 番目の光路が i 番目のメッシュに占める長さ

の割合を F_{ki} とし、 $dL_{ki} = h_k F_{ki}$ 及び $P'_k = P_k / h_k$ とすると、方程式は $P'_k = \sum_i F_{ki} n_i$ となる。このため、初期値の推定値 \mathbf{n}^{est} から、 $\mathbf{n}^{\text{est}(j)} = \mathbf{F}^T \mathbf{P}' + [\mathbf{I} - \mathbf{F}^T \mathbf{F}] \mathbf{n}^{\text{est}(j-1)}$ の関係式で反復的に数値計算を行った。スラブ導波路レンズを 15×15 のメッシュに分割し、一部に 0.1% の屈折率変化がある場合に本プログラムにてシミュレーションを行った結果、数回の反復ではほぼ同じ屈折率分布を導出できることが分かった (図 3 参照)。前述のごとく、今回構築した全自動位相誤差測定系では、測定値の変動量が目標値の 5 倍も増加してしまったため、今後は、変動量の要因の検討と低減に努め、再度、160 チャンネルの位相誤差を測定し、測定値から本プログラムを用いて屈折率分布を導出する予定である。

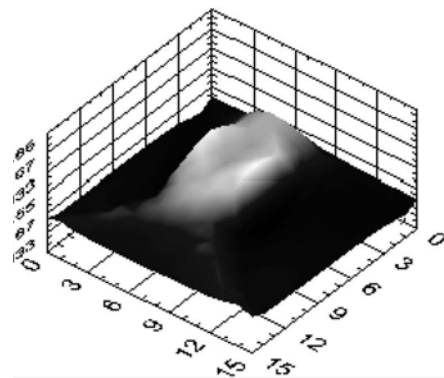


図 3 シミュレーション結果

(3) レーザ照射による強度変調の低減

炭酸ガスレーザーからの出射光のビーム径をビームエキスパンダーを用いて $16\ \text{mm}$ に拡大した後に、アパーチャーで $9\ \text{mm}$ 径の部分のみ抽出し、MZI の一方のアームの直線部分に照射した。石英基板上に作製された導波路では、加熱後に照射前の温度に完全に復帰させるためには 100 ミリ秒以上の緩和時間が必要であることを見出した。そこでレーザー照射の周期を $5\ \text{Hz}$ に設定し、図 4 に示すように MZI からの出力の変化を測定した。ここでレーザー波長は MZI の出力が最大となるように設定した。図より、レーザー照射により

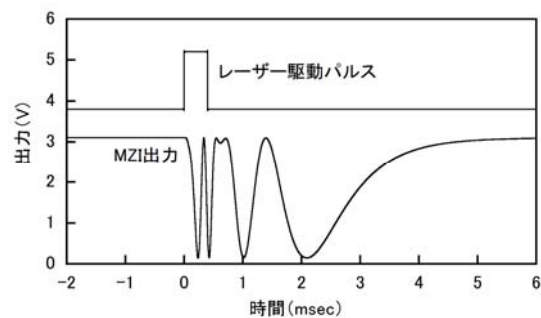


図 4 レーザー照射による MZI 出力の変化

MZI の出力が 2 周期分変化したので、最大で 4π rad の位相変化が生じたことが分かる。温度変化による石英ガラスの相対的な変化率を $7 \times 10^{-6} (\text{C}^{-1})$ とすれば、1 周期分の変化すなわち 2π rad の位相変化は 2.5°C の温度上昇に相当すると予想される。

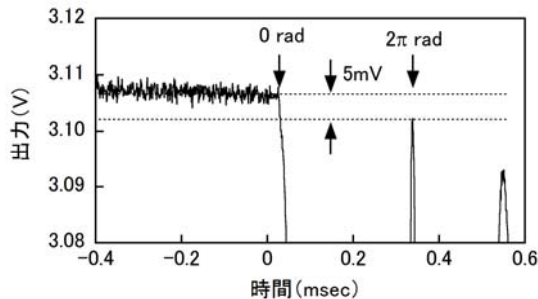


図 5 ピーク近辺での MZI 出力変化

図 5 は、MZI 出力がピークとなる近辺の信号変化を拡大表示したものである。照射直前の出力と、位相が 2π rad 変化して出力が最大となったときのピーク値の差は 5 mV であった。照射側のアームを伝搬していた光のパワーは 1.55 W に相当するため、 2π rad の位相変化すなわち 2.5°C の温度変化によって、光パワーの変化率は 3×10^{-3} であった。すなわち、ビームエキスパンダーを用いて長さ 9 mm の光導波路を照射することにより、当該導波路部分の温度を 2.5°C 上昇させても、強度変調を 0.3% まで低減できることが判明した。

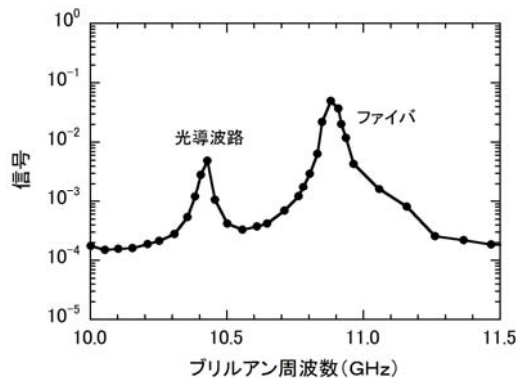


図 6 導波路モジュールのブリルアン信号

図 6 は、両端に光ファイバを接続した長さ 6 cm の石英系光導波路のブリルアン利得を測定した結果である。長さ 6 cm 全体のブリルアン信号レベルは、プローブ光パワーに対して 4×10^{-3} であり、 2.5°C の温度変調を誘起する際に生じる、(測定を阻止する雑音と同じ役目をする) 強度変調のレベルとほぼ同じであった。従って、当該導波路を照射

ビーム径の 9 mm に分割して各部分のみで生じるブリルアン増幅を測定するためには、S/N を更に $6/0.9 = 7$ 以上改善する必要がある。この改善を実現するため、ポンプ光の光強度を周波数 f_1 で変調し、温度変調の周波数を f_2 として、プローブ光中の $f_1 + f_2$ 成分を同期検波する手法を取り入れる予定である。

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 5 件)

- ① K. Takada, H. Aoyagi and K. Okamoto, "Spectrum retrieval using circular shift procedure in complex Fourier-transform integrated-optic spatial heterodyne spectrometer", 査読有, vol. 48, no. 8, pp. 448-449 (2012).
- ② K. Takada, H. Aoyagi and K. Okamoto, "Correction for phase-shift deviation in a complex Fourier-transform integrated-optic spatial heterodyne spectrometer with an active phase-shift scheme", 査読有, vol. 36, no. 7, pp. 1044-1046 (2011).
- ③ Tomohiro Hirose and Kazumasa Takada, "Maclaurin-series method for calculating dispersion in arrayed-waveguide grating multiplexers", Applied Optics, 査読有, vol. 38, no. 5, pp. 904-909 (2010).
- ④ K. Okamoto, H. Aoyagi, and K. Takada, "Fabrication of Fourier-transform, integrated-optic spatial heterodyne spectrometer on silica-based planar waveguide", Optics Letters, 査読有, vol. 35, no. 12, pp. 2103-2105 (2010).
- ⑤ K. Takada, H. Aoyagi, and K. Okamoto, "Complex-Fourier-transform integrated-optic spatial heterodyne spectrometer using phase shift technique, Electron", 査読有, vol. 46, no. 24, pp. 1620-1621 (2010).

[学会発表] (計 4 件)

- ① 青野光好, 佐藤伸一, 千葉明人, 高田和正, 岡本勝就, 低コヒーレンス光干渉を用いた MZI アレイの位相誤差測定, 第 59 回応用物理学関係連合講演会, 2012. 3. 18, 早稲田大学 早稲田キャンパス (東京都)
- ② 吉田篤史, 佐藤伸一, 千葉明人, 高田和正, 岡本勝就, 炭酸ガスレーザ照射による MZI アレイの位相誤差測定, 第 59 回応用物理学関係連合講演会, 2012.

3. 18、早稲田大学 早稲田キャンパス (東京都)
- ③ 青柳宏隆、高田和正、岡本勝就、位相シフト FISH 型分光器におけるスペクトル歪みの補正、第58回応用物理学関係連合講演会、2011. 3. 26、神奈川大学 (神奈川県)
- ④ 青柳宏隆、高田和正、岡本勝就、複素フーリエ変換を用いた FISH 型分光器、2010年秋季応用物理学学会、2010. 9. 14、長崎大学 (長崎県)

[図書] (計0件)

[産業財産権]

○出願状況 (計1件)

名称: Planar lightwave Fourier-transform spectrometer measurement including phase shifting for error correction

発明者: 高田和正、岡本勝就

権利者: 群馬大学、AiDi (株)

種類: 特許出願

番号: 米国 (13/192,577 公告番号 US8406580B2)、欧州 (11813160.6-1562 PCT/US2011045650)

出願年月日: 2011. 7. 28

国内外の別: 米国、欧州

[その他]

ホームページ等

なし

6. 研究組織

(1) 研究代表者

高田 和正 (TAKADA KAZUMASA)

群馬大学・大学院工学研究科・教授

研究者番号: 20359590

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし ()

研究者番号: