

機関番号：32612

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2012～2013

課題番号：24656244

研究課題名(和文) PLZT導波路を用いた超高速スペクトル制御回路の研究

研究課題名(英文) Study on a high-speed optical spectrum control circuit using PLZT waveguides

研究代表者

津田 裕之 (TSUDA, HIROYUKI)

慶應義塾大学・理工学部・教授

研究者番号：90327677

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,100,000円、(間接経費) 930,000円

研究成果の概要(和文)：モノリシック構成で多チャンネル位相変調器を有するPLZTモノリシック可変波長フィルタの設計・試作を行った。フィルタのクロストークは、TE偏光において-14 dB、TM偏光において-13 dB、3 dB帯域幅は、TE偏光、TM偏光どちらも110 GHzであり、応答時間40 ns以下の高速動作を実現した。光スペクトル制御回路の制御方法を検討し、振幅スペクトル制御では、任意の中心波長で帯域可変動作が可能なことを確認し、位相スペクトル制御では、可変遅延動作を実現した。また、石英アレイ導波路回折格子とPLZT位相変調器アレイを集積し、スイッチング時間13ns以下の波長選択動作に成功した。

研究成果の概要(英文)：The PLZT-based monolithic tunable wavelength filter with multiple channel phase shifters was designed and fabricated. Crosstalks of the filter were -14 dB for TE polarized light and -13 dB for TM polarized light, respectively. The filter 3-dB bandwidth and the response time were 110 GHz and less than 40 ns for both polarizations. The operation method of the spectrum control circuit was studied. The variable bandwidth filtering and arbitrary delay operation were successfully demonstrated with the spectrum control circuit. The silica-based arrayed-waveguide gratings and the PLZT-based optical switches were hybrid integrated and it showed the fast wavelength selective operation with a switching time of less than 13 ns.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：電気電子工学、ネットワーク工学

キーワード：光導波路 光スイッチ 光スペクトル制御回路 ハイブリッド集積 石英光回路 PLZT光回路 光信号処理

1. 研究開始当初の背景

光ネットワークの中継光ノードにある波長選択光スイッチ、アレイ導波路回折格子 (AWG: Arrayed-waveguide grating) の多段接続による光信号スペクトルの狭窄化によって、光信号の最大ホップ数が制限され、ネットワーク構成の柔軟性が大きく犠牲になっている。また、光ノードにおける消費電力を低減するために、電気信号処理の軽量化を可能とする光段での高度な信号処理が求められている。従来、AWG を利用する光スペクトル制御回路は、石英導波路により構成されてきた。スペクトル制御には、熱光学効果による屈折率変化を利用していたため、制御に数十 ms の時間が必要であった。本研究では、PLZT 導波路による位相変調器を用いるので制御に要する時間を 10ns に高速化することが出来る。さらに、分光には石英導波路を利用するので、低損失かつ低分散特性を持たせることが出来るので適用範囲が広い。

2. 研究の目的

本研究では、光スペクトル制御回路の位相変調部に高速変調可能な PLZT (ランタノドープジルコン酸チタン酸鉛) 導波路を利用し、応答速度を 10ns に向上させることを目的とする。

3. 研究の方法

(1) 研究体制

素子設計、石英導波路作製、ハイブリッド実装、評価、伝送実験は研究代表者と大学院生で実施する。石英導波路プロセス装置、伝送実験系について産業技術総合研究所の設備を利用し、河島 (連携研究者) の協力を得る。また、PLZT 導波路部分には、エピフォトニクス (株) の協力を得る。

(2) H24 年度研究実施計画

① 多チャンネル PLZT 位相変調器ハイブリッド集積法の確立

スペクトル制御器では、連続的に位相を制御する必要があるため、PLZT 位相変調器には、高いリニアリティが要求され、ヒステリシスなどが生じない導波路材料組成にしなければならない。また、スペクトル制御を容易に行い、過剰雑音や波形歪みを減らすために、偏波依存性及び集積界面の反射低減も重要な課題である。

- ・リニアリティの高い位相変調特性: PLZT 組成を変化させた標準 2×2 光スイッチを試作し、その消光特性を評価することによって適切な PLZT 組成を選択する。

- ・偏波依存性の改善: 導波路断面形状の最適化により、電圧印可状態での TE/TM 光に対する実効屈折率差を少なくする。

- ・界面反射の低減: 石英/PLZT 界面の傾き角を 10 度程度と大きめに設定し、反射光が迷光として導波路に結合しないようにする。

- ・チャンネル数が多く、隣接する導波路間での

電気及び光結合が生じにくいレイアウト設計を行う。

- ② 任意の位相・振幅透過スペクトルを得るための位相シフタアレイ駆動方法の確立

あるチャンネルの位相シフタを駆動したときの損失は隣接するチャンネルとの位相差で決定される。また、チャンネル周波数間隔は AWG の周波数分解能の半分以下に設定するので、周波数分解能の幅で位相と振幅を制御する自由度は有している。しかしながら、両者を完全に独立に制御することは出来ないため、所望の位相・振幅透過スペクトルを得るための計算法を明らかにする。

③ 小型光スペクトル制御回路の試作と評価

連続的なスペクトル制御のためには、チャンネル間隔は分解能の 1/2 以下にする必要がある。スペクトル制御回路では、PLZT 位相変調器部分も含めて、導波路長を等長化する必要がある。PLZT 導波路は、直線導波路のみで構成するので、石英導波路において、等長化のための導波路レイアウトを行う。

(3) H25 年度研究実施計画

① 10ns 応答スペクトル制御実証実験

デバイスをモジュール化し、任意のスペクトル制御動作の確認と、10ns での高速制御のデモンストレーションを行う。

② 高分解能光スペクトル制御回路の試作と評価

前年度の結果を踏まえ、光スペクトル制御回路のチャンネル数を増大させ、高精度に光スペクトルが制御できるように改良する。また、改良デバイスの評価と伝送実験への適用を検討する。

4. 研究成果

(1) PLZT モノリシック可変波長フィルタ

ハイブリッド型に先立って、モノリシック構成で多チャンネル位相変調器を有する PLZT デバイスについて検討を行った。

① PLZT 埋め込み型導波路

Nb-doped SrTiO₃ (NST) 基板の上に、Solid-phase epitaxy (SPE) 法によって単結晶の PLZT を成長させる。これが下部クラッドとなる。同様に、SPE 法によってコア層を成膜し、Induced coupled plasma (ICP) によるエッチングを行う。これにより導波路のコアがパターンニングされる。下部クラッドとコアでは、PLZT の組成を変えることで屈折率を変えている。最後にコアを埋め込むように、SPE 法を用いて上部クラッド層を成膜する。電極は、スパッタリングとリフトオフのプロセスを用いて導波路の上に形成する。Beam propagation method による計算から、導波路はシングルモードであり、最小曲半径は 3 mm である。また、導波路伝搬損失はおおよそ 1 dB/cm である。

② アレイ導波路回折格子型可変波長フィルタ

図 1(a) に AWG 型可変波長フィルタの構造を示す。

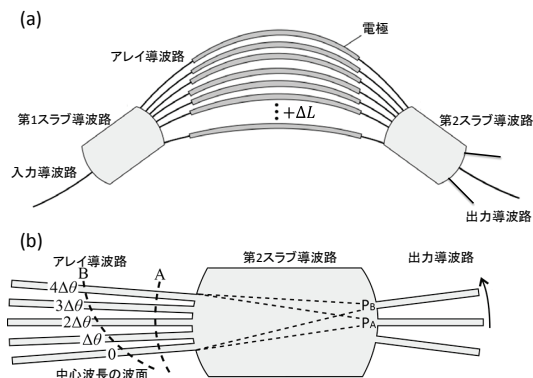


図 1 : AWG 型可変波長フィルタの構造

AWG を構成する入力導波路、第 1 スラブ導波路、アレイ導波路、第 2 スラブ導波路、出力導波路と、アレイ導波路のそれぞれの導波路に設けた電極から構成される。電極に電圧を印加し、電気光学効果を利用して、アレイ導波路の光の位相差を制御する。図 1 (b) に動作原理を示す。電圧を印加しない場合、第 2 スラブ導波路とアレイ導波路の境界における波面は、曲線 A で示される。このとき、中心波長の光は出力ポート P_A を焦点とする。電圧を印加し、波面を曲線 B のように傾ける。このとき、中心波長の光の焦点は出力ポート PB に変わる。このときの焦点の移動量 Δx は、式 (1) で表される。

$$\Delta x = \frac{\lambda f}{2\pi n_s d} \Delta \theta \quad (1)$$

λ は中心波長、 f はスラブ導波路長、 n_s はスラブ導波路の等価屈折率、 d はスラブ導波路境界におけるアレイ導波路の隣接導波路間隔である。 $\Delta \theta$ は位相変化量である。図 1 (b) に示すように、内側から k 番目の導波路では、 $(k-1)\Delta \theta$ の位相変化を与える。

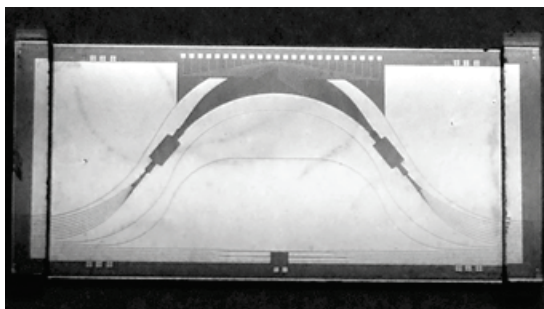


図 2 : AWG 型可変波長フィルタの写真

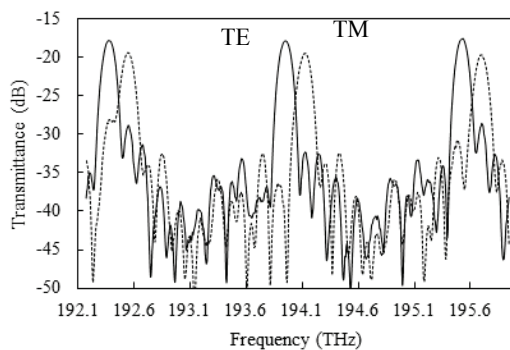
AWG の設計は、チャンネル間隔 200 GHz、チャンネル数 8、FSR (free spectral range) 1600 GHz とした。回折次数は 120、アレイ導波路での隣接導波路の行路長差は 77.1 μm 、アレイ導波路本数は 24 である。デバイスは、9.0 mm x 25.0 mm の大きさである。電極は、アレイ導波路の各導波路の上であり、電極数は 24、電

極長は 4.0 mm である。チップ写真を図 2 に示す。

③ 静特性

可変波長光源、偏波コントローラ、パワーメータを用いて透過特性を測定した。AWG の中心ポートに光を入射し、入力に対応する中心ポートの出力を測定した。偏波コントローラを用いて、TE 偏光、TM 偏光をそれぞれ入射したときの電圧を印加しない場合の透過特性を図 3 に示す。

図 3 : 電圧を印加しない場合の透過特性



透過特性のピークにおける損失は、TE 偏光において 18dB、TM 偏光において 19dB であった。この損失は、3dB の導波路伝搬損失とおおよそ 5dB/connection の結合損失を含む。これは、AWG の過剰損失が 5dB であることを示している。結合損失は、導波路端面の加工が不完全であったため、予想された 1dB/connection より大きくなった。クロストークは、TE 偏光において -14dB、TM 偏光において -13dB であった。3dB 帯域幅は、TE 偏光、TM 偏光どちらも 110GHz であった。偏波による中心波長のずれは 190GHz であり、このずれから推定される複屈折は 0.002 である。

次に、アレイ導波路の 24 の電極それぞれの電圧を制御し可変波長特性を測定した。TM 偏光の中心ポートから中心ポートへの透過特性を測定した。表 1 に各チャンネル選択動作における制御電圧と位相変化量を示す。表 1 に示した電圧をアレイ導波路の一方の端から反対側の端まで繰り返し印加する。アレイ導波路の隣接導波路間の位相差 $\Delta \theta$ が $1/4\pi$ のとき、1 チャンネル分透過特性がシフトする。 $2/4\pi$ 、 $3/4\pi$ 、 $4/4\pi$ のとき、それぞれ 2、3、4 チャンネル分シフトする。1 チャンネルは、AWG のチャンネル間隔の 200GHz に相当する。 $1/4\pi$ 、 $2/4\pi$ 、 $3/4\pi$ 、 $4/4\pi$ の位相変化に相当する電圧は、それぞれ 2.0 V、4.7 V、6.0 V、10.0 V であった。半波長電圧は、10.0 V であり、動作に必要な最大位相変化 $7/4\pi$ に相当する電圧は、14.0 V であった。図 4 に FSR = 1600 GHz の範囲において、200 GHz 間隔で波長チャンネルを選択する動作を示す。電圧を印加しない場合を含めて、8 通りの波長選択動作を表している。

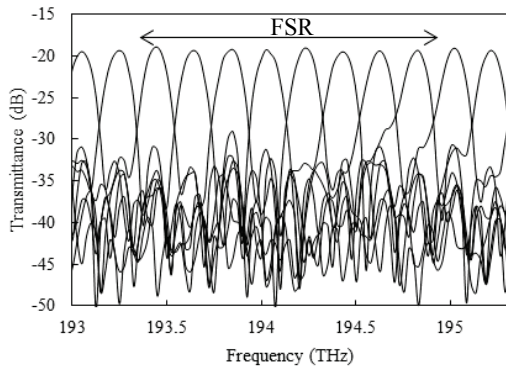


図 4：波長選択特性

表 1：制御電圧と位相変化量

Channel shift	Control voltage (V) Phase shift (rad.)
-3	10.0, 4.0, 14.0, 8.0, 2.0, 12.0, 6.0, 0.0 5/4 π , 2/4 π , 7/4 π , 4/4 π , 1/4 π , 6/4 π , 3/4 π , 0
-2	14.0, 9.3, 4.7, 0 3/2 π , 2/2 π , 1/2 π , 0
-1	14.0, 12.0, 10.0, 8.0, 6.0, 4.0, 2.0, 0 7/4 π , 6/4 π , 5/4 π , 4/4 π , 3/4 π , 2/4 π , 1/4 π , 0
1	0, 2.0, 4.0, 6.0, 8.0, 10.0, 12.0, 14.0 0, 1/4 π , 2/4 π , 3/4 π , 4/4 π , 5/4 π , 6/4 π , 7/4 π
2	0, 4.7, 9.3, 14.0 0, 1/2 π , 2/2 π , 3/2 π
3	0, 6.0, 12.0, 2.0, 8.0, 14.0, 4.0, 10.0 0, 3/4 π , 6/4 π , 1/4 π , 4/4 π , 7/4 π , 2/4 π , 5/4 π
4	0, 10.0 0, π

また、200 GHz より小さい量の変調波長動作も可能であり、動作の例を図 5 に示す。アレイ導波路の隣接導波路における位相差を $1/4\pi$ 以下として電圧を印加している。

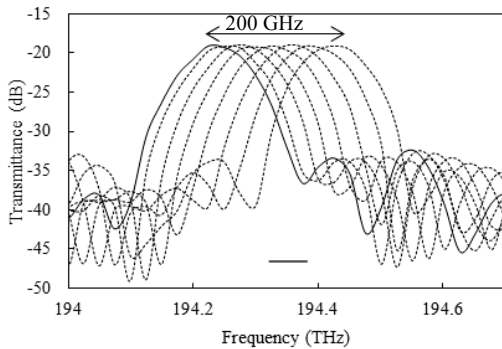


図 5：200 GHz 以下の可変波長動作

④ 動特性

波長切り替えに必要な時間を測定した。可変波長光源の波長を透過特性のピーク波長に設定し、フォトディテクタとオシロスコープを用いて出力波形を測定する。可変波長動作は、4 チャンネルシフトとして、偶数番の電極に対して電圧を印加する。パルスジェネレータで生成した周波数 3 MHz の矩形波をアンプで増幅し、バイアスティーを用いて 0V か

ら 10.0V に変化する矩形波を印加電圧波形とした。図 6 に PLZT へ印加された電圧波形の測定結果を示す。立ち上がり時間は 36 ns、立ち下がり時間は 32 ns であった。これは、電極容量の充電にかかる時間を表している。1 電極に対して 1 台のアンプを用意することが難しいため、偶数番にあたる 12 の電極をひとつのアンプで駆動している。1 電極を充電する時間に比べおよそ 12 倍の時間がかかっていると考えられる。図 7 に波長切り替え動作を示す。194.103 THz と 193.352 THz の波長が切り替わっている。194.103 THz においては、立ち上がり時間 32 ns、立ち下がり時間 38 ns であった。193.352 THz では、立ち上がり時間 34 ns、立ち下がり時間 37 ns であった。高速波長切り替えにおいて、消光比の劣化の可能性があるので今後の検討が必要である。

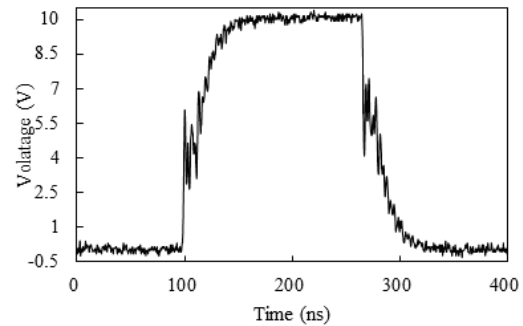


図 6：PLZT への印加電圧波形

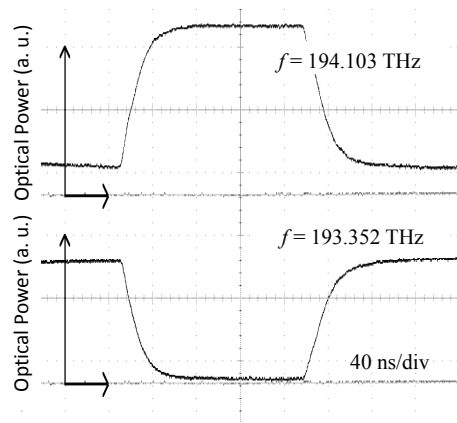


図 7：高速波長切り替え応答

(2) 石英光スペクトル制御回路による位相制御方法の検討

① 位相シフタアレイ駆動方法の検討

図 8 に光スペクトル制御回路モジュールを示す。チップにはファイバリボンが接続され、可変位相シフタ駆動用基板、ペルチェ素子と温度コントローラ接続用ケーブルが内蔵されている。モジュールの基板温度は温調により 25℃ (可変パルス遅延測定時は 23.5℃) に保つようにした。可変波長光源お

よびパワーメータ、128チャンネル電源は GPIB によって制御した。

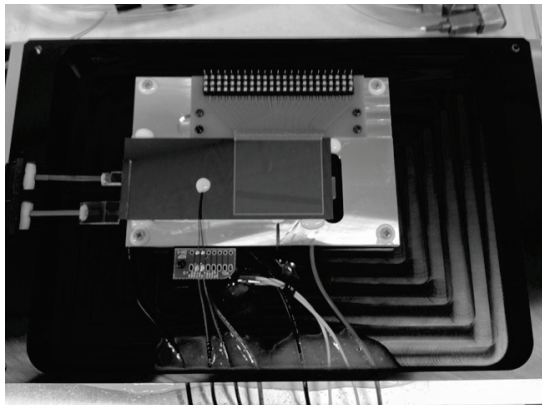


図 8：光スペクトル制御回路モジュール

可変位相シフタの駆動には 128 チャンネル電源を用い、チャンネルごとに電流値を設定して行う。しかし可変位相シフタに用いている薄膜ヒータの抵抗値のばらつきや、電源の精度の問題により、同じ電流値を設定しても同じ位相シフトとはならない。このため、チャンネルごとに電流値-位相シフト特性を補正する必要がある。直流電源とデジタルマルチメータを用いて I-R 特性を測定した。次に 128 チャンネル電源の電圧特性と上で測定した V-R 特性から実際に流れる電流値を測定し、設定電流値と実際に流れる電流値を補正する。I-I' 特性を算出した。電力位相係数をチャンネルごとに補正した。補正後に位相を $0\sim 2\pi$ まで変化させた場合、該当チャンネルの透過率はコサインカーブ状に変化し、 0 と 2π を設定した場合の透過率は等しくなる。

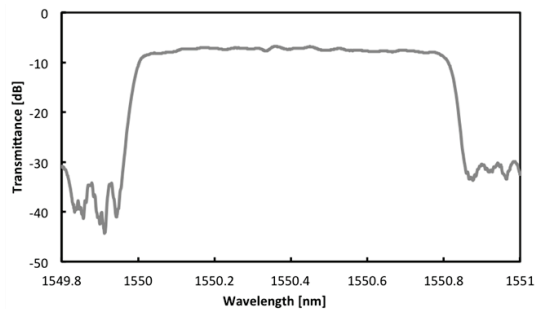


図 9：光スペクトル制御回路の透過特性

位相誤差補償アルゴリズムを適用し、実際のモジュールにおいて透過スペクトルの平坦化を試みた。図 9 はアルゴリズムを 1 回適用した場合の透過スペクトルである。制御帯域においてほぼ平坦な透過スペクトルを得ることができたが、 0.9 dB 程度のわずかなリップルが残存している。

② 振幅/位相スペクトル制御

位相誤差補償を行った状態から可変位相シフタを動作させ、振幅スペクトル制御を行

った。任意の中心波長で帯域可変動作が可能であることを確認できた。図 10 は、帯域幅を 12.5 GHz として透過中心周波数を変化させた結果である。適切な位相制御を行うことで任意の透過スペクトルが実現可能である。

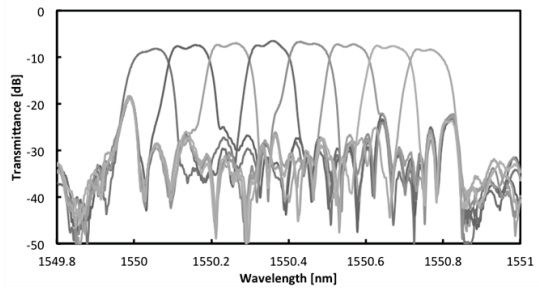


図 10：透過振幅スペクトル制御実験

本回路は光信号の位相スペクトルを制御することで、信号に遅延を与える、分散補償を行う、といった動作が可能である。位相スペクトル制御の例として可変パルス遅延制御実験を行った。図 11 に結果を示す。

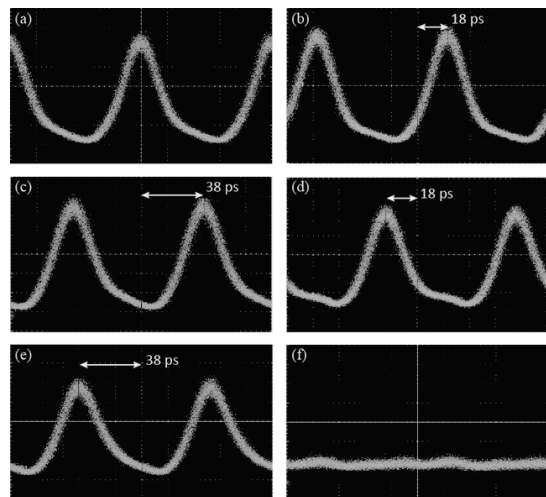


図 11：位相変化量とパルス遅延 (a) 0 (b) $-\pi/16$ (c) $-\pi/8$ (d) $\pi/16$ (e) $\pi/8$ (f) $\pi/2$

入力パルス列は 12.5 Gbps、パルス幅 10 ps のガウシアン形である。生位相制御によりパルス遅延時間の制御が可能であることを確認した。

(3) PLZT-石英ハイブリッド集積デバイス

石英アレイ導波路回折格子と PLZT 位相変調器アレイを集積し、波長選択動作に成功した。図 12 にハイブリッド素子の構成を示す。入力信号は第 1 の AWG で各波長に分光され、波長毎に PLZT の 1×2 スイッチで切り替えられる。その後、再び AWG によって合波されるが、その出力ポートは、スイッチの切り替えによって選択される。即ち、波長毎にどちらかのポートから任意に出力可能である。図 13 には、具体的な構成図を示す。石英導波路と PLZT 導波路は位置合わせ後に接着されて固定される。

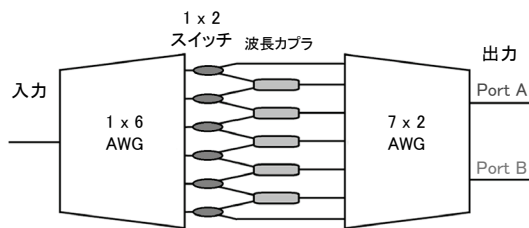


図 12：波長選択スイッチの構成

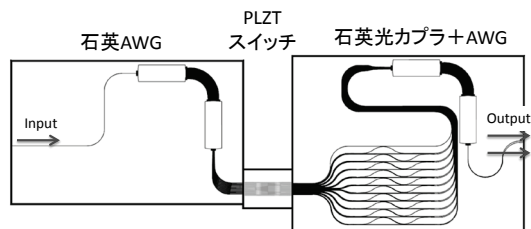


図 13：石英導波路と PLZT 導波路の接続構成

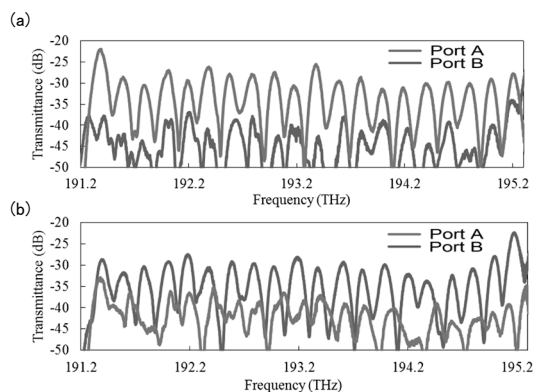


図 14：波長切り替え特性

PLZT スイッチにより、PortA に出力する場合と PortB に出力する場合を切り替えた特性を図 14 に示す。挿入損失は 30dB 程度と大きく、また、消光比も 10dB 程度であり、今後の改善が必要であるが、原理確認は達成した。また、スイッチング時間は 13ns 以下であった。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 2 件)

① H. Asakura, K. Nashimoto, D. Kudzuma, M. Hashimoto and H. Tsuda, “High-speed wavelength selective operation of a PLZT-based arrayed-waveguide grating,” Electron. Lett., 査読有り, Vol. 48, No. 16, 2012, pp. 1009-1010.

② Hideaki Asakura, Keiichi Nashimoto, David Kudzuma, Masahiko Hashimoto, and Hiroyuki Tsuda, “200-GHz spacing, 8ch, high-speed wavelength selective arrayed-waveguide grating using buried PLZT waveguides,” IEICE Electron. Express, 査読有り, Vol. 9, No. 7, 2012, pp. 712-717.

〔学会発表〕(計 7 件)

① 津田裕之、梨本恵一、河島整、桑原正史、「波長多重通信用光機能回路」、第 52 回 光波センシング技術研究会講演会、25、東京理科大学、東京、2013 年 12 月 4 日。

② 林修平、水野隆之、高橋浩、池田達彦、津田裕之、「光スペクトル制御回路の振幅及び位相制御特性」、2013 年電子情報通信学会ソサイエティ大会、C-3-22、福岡工業大学、福岡、2013 年 9 月 17 日。

③ Hideaki Asakura, Mirzad Farhan, and Hiroyuki Tsuda, 「Phase Error Measurement of Arrayed-waveguide Grating」、JSAP-OSA Joint Symposia, 17a-D5-4、同志社大学、京都、2013 年 9 月 16 日。

④ Hideaki Asakura, Keiichi Nashimoto, David Kudzuma, Masahiko Hashimoto, and Hiroyuki Tsuda “Crosstalk Reduction of a PLZT Arrayed-Waveguide Grating by Phase Error Compensation,” The 10th Conference on Lasers and Electro-Optics Pacific Rim (CLEO-PR 2013), W04-5, Kyoto, Japan, July 3, (2013).

⑤ Hiroyuki Tsuda, “Photonic functional devices for an optical network node using arrayed-waveguide gratings,” Photonics Global Conference, 3-4E-4, Singapore (2012).

⑥ Hideaki Asakura, Hiroyuki Tsuda, Keiichi Nashimoto, David Kudzuma, Masahiko Hashimoto, “Error-free tunable channel selection using a PLZT arrayed-waveguide grating,” Photonics in Switching 2012, Fr-S36-016, Ajaccio, France, Sep. 11-14, (2012).

⑦ 浅倉 秀明、梨本 恵一、David Kudzuma、橋本 政彦、津田 裕之、「PLZT 埋め込み型導波路を用いた 200GHz チャンネル間隔アレイ導波路回折格子の可変波長特性」、レーザ・量子エレクトロニクス研究会、LQE2012-3、福井大学、福井、2012 年 5 月 25 日。

6. 研究組織

(1) 研究代表者

津田裕之 (TSUDA, Hiroyuki)
慶應義塾大学・理工学部・教授
研究者番号：9 0 3 2 7 6 7 7

(3) 連携研究者

河島整 (KAWASHIMA, Hitoshi)
産業技術総合研究所・ネットワークフォトン
クス研究センター・副研究センター長
研究者番号：9 0 3 5 6 8 4 0