

ノコギリ波状の制御光による高効率・超高速波長スイッチの研究開発 (122103012)

Highly efficient and ultrafast wavelength converter using saw-tooth based control pulse

研究代表者

柏木謙 東京農工大学

Ken Kashiwagi, Tokyo University of Agriculture and Technology

研究期間 平成 24 年度～平成 26 年度

概要

将来のフォトニックネットワークでは、広帯域な信号を低消費電力でルーティングできる光ノードが要求される。本研究では、光波形整形器から生成した 100 GHz オーダのノコギリ波を制御光として、超高速に応答する光ファイバ中の相互位相変調により高効率かつ超高速の波長変換を実現する。波長変換量は制御光の光強度の傾きに依存するので、制御光の強度を変調して超高速の波長スイッチングを実現し、最終目標としてパケット単位の波長スイッチの実現を目標とする。

1. まえがき

インターネットなどの通信量の急速な発展に伴い、情報通信網はすでに必要不可欠な社会基盤となっている。データ通信量は加速度的に増加しており、その要求に応えるためネットワークノードは規模が大きくなり、消費電力が急速に増大している。そのため、ネットワークノードの全光化による高速化と低消費電力化の必要性が生じている。

100 Gbps 伝送速度の達成や波長分割多重技術による高密度化により、伝送路の大容量化が急速に進む一方で、ノードのスループットの制限と消費電力の増大は、フォトニックネットワーク構築のボトルネックとなり得る。高速のバースト(パケット)型波長スイッチが実現できれば、WDM システムのメリットを最大限に活かした低電力ノードが実現でき WDM の高密度化(DWDM 化)の加速により、ネットワークの伝送効率の飛躍的な向上が見込まれる。

そこで本研究課題では、広帯域な信号を高効率に波長変換する技術を確認し、パケット波長スイッチを開発する。広帯域な波長変換には全光型が不可欠であるが、その制御光の調整内容によってその波長スイッチング速度が制限される。波長変換技術で一般的な 4 光波混合(FWM)は、制御光の波長変更速度で変換光の波長変更速度が制限されてしまう。それに対して、相互位相変調(XPM)では制御光の強度波形の傾きでスペクトルシフト量が決定される。制御光の強度のみを調整すれば傾き制御ができるので、高速の光強度変調器を用いれば高速に波長スイッチングが可能となる。通常、XPM を利用する場合には光スペクトルが拡大してしまうが、ノコギリ波状の制御光を利用することで不要なスペクトル拡大を抑圧し、高効率な波長変換技術を実現した(図 1)。

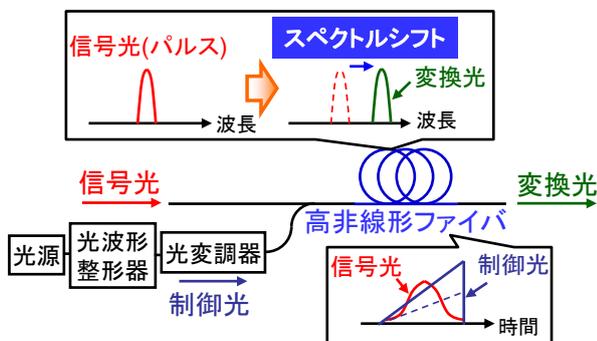


図 1 本研究課題での波長変換方式の模式図

2. 研究開発内容及び成果

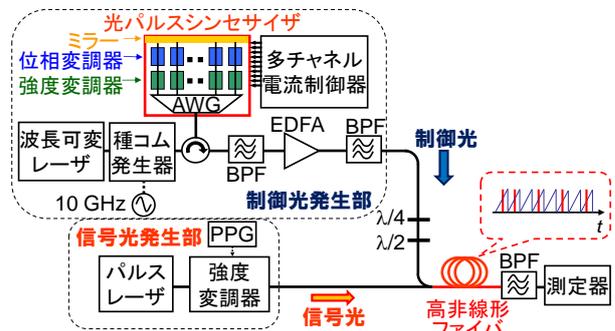


図 2 ノコギリ波を用いた高効率・高速波長変換器の実験系模式図

図 2 に本研究課題で用いる実験系の模式図を示す。実験系の左側上部は制御光発生部、左側下部は信号光生成部であり、右下の高非線形ファイバ中で波長変換を行う。1542.3 nm の波長可変レーザからの光を 2 台の位相変調器を縦列接続した種コム発生器により、10 GHz 間隔の光周波数コム(種コム)を生成した。この種コムは制御光の基となる光源である。その種コムを光パルスシンセサイザに入射し、コム各周波数成分を分離後、強度と位相を独立変調することで鋸歯状パルスを生じた。光パルスシンセサイザは 10 GHz 間隔のアレイ導波路格子(AWG)の 30 本の各出力導波路に強度と位相変調器を備えており、周波数軸上での変調によるパルス合成に必要な要素が一つの基板上に集積しているデバイスである。

各スペクトル成分の強度と位相は光パルスシンセサイザからの出力光を観測して目標となる波形になるよう調整した。本実験の制御光パルスは、パルス幅が 10 ps であり、立ち上がり時間と立ち下がり時間の傾きが 1:2、立ち上がり時間と立ち下がり時間がそれぞれ 13.3, 6.7 ps となる非対称な三角波とした。信号光は波長 1555 nm の繰り返し周波数 10 GHz のパルスレーザからの出力を強度変調器により変調して PRBS 信号を付加した。この時の信号光のパルス幅は 3.0 ps であった。

それぞれ生成した制御光と信号光のパルスを合波した後高非線形ファイバ(HNLF)中で XPM を誘起し、信号光スペクトルをシフトさせた。HNLF 出力ではバンドパスフィルタで信号光を取り出し、信号品質を評価した。

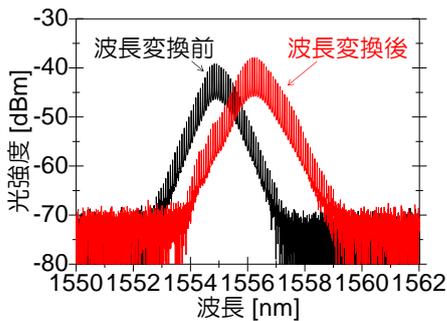


図3 波長変換前後での信号光のスペクトル変化

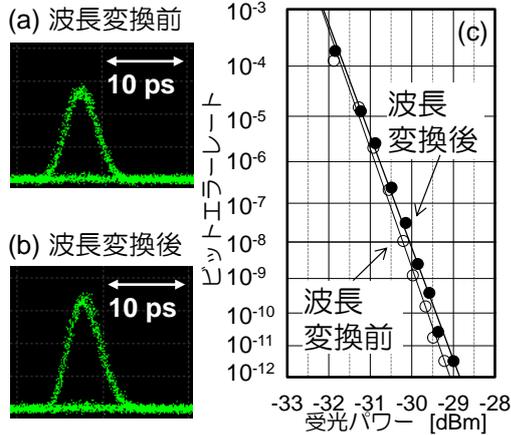


図4 信号波形((a) 波長変換前, (b) 波長変換後), (c) ビットエラーレート測定結果

図3に波長変換前後での信号光の光スペクトルの変化を示す。この光スペクトル測定の際にはBPFを使用していない。波長変換による光スペクトル形状の変化は抑えられ、1.5 nm長波長側へシフトしている。さらには、波長変換効率も高く、信号強度は増幅されている。ここで特筆すべきは、波長変換効率が高いために変換前の中心波長に元信号が残留していない点である。波長変換効率が低い場合には、元波長に残留する信号成分を除去する必要があるが、本研究課題では不要なためシンプルでエネルギー損失の少ないシステム構築が可能となる。このような点からも変換効率は重要な要素である。

波長変換前後の信号を評価した結果が図4である。図4(a), (b)はそれぞれ波長変換前後での信号波形を示しており、波形歪みは十分に抑圧され、変換後でもアイが十分に開いている。この結果からも、波長変換による信号品質劣化を低く抑えられていることが期待できる。図4(c)は波長変換前後でビットエラーレートを測定した結果である。両信号ともにエラーフリーを達成し、また波長変換によるパワーペナルティは0.2 dBと低く抑えることができた。

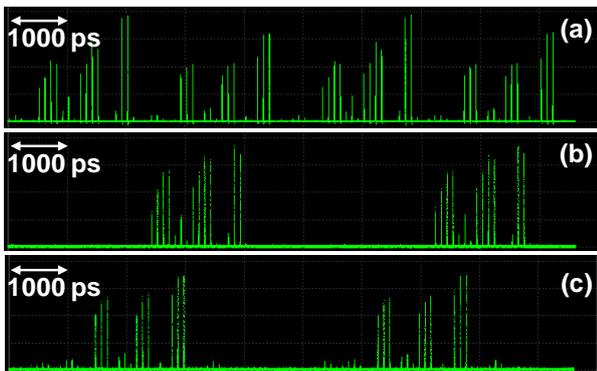


図5 パケット単位の波長変換の波形, (a)元信号, (b)変換後信号, (c)元波長信号

上記までは信号光を一括して波長変換していたが、本研究課題の方式ではパケット単位での波長変換が可能である。その実施結果を図5に示す。まず、パターンの異なる2種のパケットを生成し(図5(a)、一方のパケットのみに制御光を作用させ波長変換した(図5(b))。ここで元の波長に残った信号波形(図5(c))には、波長変換したパケット成分は残留していない。これは前述の変換効率が高いことが理由であり、この時間スロットを後処理なく使用することができるため、システム全体を簡素に構成できる。

3. 今後の研究開発成果の展開及び波及効果創出への取り組み

本研究課題は従来法とは異なり、新たなデバイスの開発をせずに、従来よりも波長変換効率を改善、波長スイッチング速度を高速化する技術を開発した。これにより、光パケット衝突の回避が可能であり、光ネットワークの高効率化と柔軟性の向上が見込まれる。

本研究課題では制御光が誘起するXPMを利用して波長変換を実現している。この時、ノコギリ波状の制御光を利用することで、高い変換効率や高速性などの特徴を生み出している。一方で、XPMによるシングルフォトン光源に対する波長変換技術は既に報告されている。このようなシングルフォトン光源など、損失の許されない超微弱な光源に対して非常に有用な技術である。従来のFWMによる波長変換の適用が困難な波長領域でも有効な手法のため、未踏な波長領域での光源や波長変換技術の開発を促進することができる。上記のように、本研究成果は産業の新規創出だけではなく、物理学的にも広い波及効果を持つ技術開発である。

4. むすび

本研究課題では、高効率かつ高速な波長スイッチングが可能となる波長変換技術を開発した。高効率であることはエネルギー面の有用性のみならず、時間軸・周波数軸の両面からシンプルなシステム設計・構築を可能とする技術である。

【誌上発表リスト】

- [1] Ken Kashiwagi, Kiyonobu Mozawa, Yosuke Tanaka, and Takashi Kurokawa, "Dark soliton synthesis using an optical pulse synthesizer and transmission through a normal-dispersion optical fiber," *Optics Express*, Vol. 21, No. 25, pp. 30886-30894, 6th Dec. 2013.
- [2] Ken Kashiwagi, "Packet-Based All Optical Wavelength Conversion Using Saw-Tooth Pulse Generated by Optical Pulse Synthesizer," *Conference on Lasers and Electro Optics 2014 (CLEO 2014)*, no. JTh2A.25, San Jose Convention Center, San Jose, California USA, 12th Jun. 2014.
- [3] Ken Kashiwagi, Azusa Hasegawa and Takashi Kurokawa, "High Speed Wavelength Switching Using Saw-Tooth Pulse Generated by Optical Pulse Synthesizer," *Conference on Lasers and Electro Optics 2013 (CLEO 2013)*, no. CTh4H.7, San Jose Convention Center, San Jose, California USA, 13th Jun. 2013.

【申請特許リスト】

- [1] 柏木謙、黒川隆志、波長変換装置、日本、2012年12月26日