

研究種目：特定領域研究
 研究期間：2005～2008
 課題番号：17068012
 研究課題名（和文） 多重光機能システムと次世代フォトニック信号処理への応用
 研究課題名（英文） Photonic Signal Processing
 Using Variable Spectrum Control Systems
 研究代表者
 小館 香椎子 (KODATE KASHIKO)
 日本女子大学・理学部・教授
 研究者番号：20060668

研究成果の概要：本研究では、平成19年度までに得られた多重光機能システムと次世代フォトニック信号処理への応用に関する研究成果をふまえ、導波路型光波シンセサイザ（Optical Spectrum Synthesizer:OSS）・自由空間型可変スペクトルシェイパー（Variable Bandwidth Spectrum Shaper）を用いたスペクトル領域における位相制御技術の新展開と超高速フォトニックネットワークにおける実用システムへの適用に関する検討を行った。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2005年度	16,400,000	0	16,400,000
2006年度	19,600,000	0	19,600,000
2007年度	16,400,000	0	16,400,000
2008年度	13,100,000	0	13,100,000
総計	65,500,000	0	65,500,000

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・量子工学
 キーワード：フォトニックネットワーク、光機能システム、導波路型光波シンセサイザ、自由空間型可変スペクトルシェイパー、符号・復号化、超高速光クロック生成、位相符号

1. 研究開始当初の背景

近年のインターネットによるWebサービス充実等の進展に伴い、通信トラフィックの急速な増加が続いている。波長分割多重方式技術の導入で伝送容量は10Tbit/sに達し、トラフィック対応への見通しも立ってきているが、依然としてルーティングを行うノード部分がボトルネックとなる可能性が高く、ノード処理にも光技術を活用したフォトニックネットワークの必要性が高まっている。

また、コア網ノード部分の全光化の課題に対して、光ラベルスイッチングの実現、超高

速処理化、スケーラビリティの拡大、可変性、低コスト・低消費電力化などが求められている。そこで、この要求を満たす「従来技術の未開拓領域における光の極限利用と光波マルチプロセッシング技術」の実現のために、本研究では光の特性と利点を取り入れた位相の制御、分散の補正や時間・周波数情報の大容量一括処理を行うための新しい多重光機能システムの提案を目的とする。さらに試作システムを用いたバーチャルパラレルフォトニック信号処理について検討を加えた。

2. 研究の目的

本研究では、通信ネットワーク内の急激な総トラフィック量の増加および使用環境・時間帯の違いから生まれるトラフィック量のスケーラビリティの急増化に対応可能な高精度反射型 AWG を用いた光波シンセサイザを使用し、次世代フォトニック信号処理システムの開発を行うことを目的とした。また、最先端の光パケットラベル技術や光符号多重方式にも対応する新しい多重空間光処理機能を提供し、実験的実証の検討を行った。

さらに、フォトニックネットワーク実現に貢献する光の周波数・時間・空間の自由度を活かした新しい多重光機能デバイスの設計、試作、システム化を行い、その実用可能性を明示した。

本研究により、光機能システムの提案に留まらず新しい光学機能原理の創出・それを具体化したデバイスの実現・システム化の一連の進展の中で独自のフォトニック信号処理概念創生に貢献することが可能である。また、日本女子大学と情報通信研究機構の共同研究により、先駆的なかつ実用化を視野に入れた光機能デバイスの提案とサブシステムの実現に向けて研究を加速することができた。

3. 研究の方法

多重光機能デバイスの基礎特性取得には、日本女子大学の3つのクリーンルーム施設と既存の大型除振光学実験台を用意し、光通信帯域の波長可変レーザおよび広帯域光源、光スペクトラムアナライザを使用した。

日本女子大学で得られた基礎特性結果をふまえ、情報通信研究機構内の光通信システム系（高速パルス光源、パターンジェネレータ、ストリークカメラ、安定化電源、その他高速変調器類）を使用したフォトニックネットワークシステムを用い、実証実験を行った。

4. 研究成果

(1) 導波路型光波シンセサイザを用いたフォトニック信号処理

スペクトル領域の符号・復号化の光処理を行うためのフーリエ変換用機能デバイスとしてアレイ導波路格子 (Arrayed Waveguide Grating:AWG) に着目した。AWG は入出力導波路と2つのスラブ導波路、一定の長さの差を持つアレイ導波路群から構成されており、フーリエ変換機能を有する。また、入力に光パルスまたはパルス列を用いた場合、時間軸上での直接処理が難しい 100GHz 以上の超高速の信号を扱うことが可能である。この利点を活かした導波路型光波シンセサイザ (Optical Spectrum Synthesizer:OSS) は、石英ガラス光導波路を用いた光回路および入出力

用の偏波保持ファイバ、温度制御回路、位相シフタ駆動用配線部から構成される。

この OSS に搭載する AWG を、設計パラメータから最適化された出力導波路と同じピッチで、入力導波路を複数化した $N \times N$ AWG にすると、ある1つの出力導波路に強め合う波長は入力導波路によってシフトすることがわかる。さらに、 N 個のフーリエ周波数成分で $N \times N$ パターンを構成するためには、AWG の周回性を利用する。各入力導波路の光路は AWG の Free Spectrum Range に依存する周波数帯域を有しており、FSR をチャンネル間隔周波数 Δf の N 倍になるように設計すると、 $N \times N$ のパターン内で使用する周波数成分は合計 N 個になる。したがって、AWG の入力を N ポートに増やすことによって、異なるチャンネルから入力された同じ波長の光信号は、過不足なく必ず異なる出力チャンネルから出力される。そこで N 個の周波数面チャンネル数の変調パターンに合う入力チャンネルポートに光パルス列を入力することにより、一括で波形整形や光ラベル処理を可能にするマルチポート光波シンセサイザを考案し、中心波長 1552.524nm、チャンネル間隔 10GHz、チャンネル数 20 の AWG を組み込んだ 20 ポート光波シンセサイザを試作した。マルチポート OSS の構成を図 1 に示す。

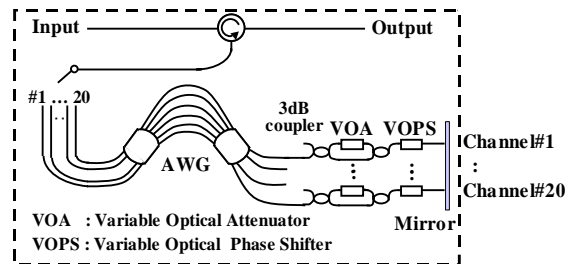


図 1 OSS の構成

① 光パルス信号の多重符号・復号化

光ラベル処理にむけたフォトニック多重処理の検討として、周期 9 の prime 符号 {0100100100} (prime number: $p=3$ 、先頭の 0 はダミーのビット) を用い、スペクトル領域における光多重符号・復号化を行った。

本来は符号器、復号器として OSS が 1 台ずつ必要であるが、今回は 1 台の OSS を利用し、全 20 のポートの内、ポート #1、#2 を符号化用、#11~#20 を復号化用として使用した。

光源として、モード同期レーザ (MLLD) から AWG の中心波長と同じ波長 1552.524nm、繰り返し周波数 10GHz、パルス幅 2ps の光パルスを発生させ、符号器となる光波シンセサイザのポート #1、#2 に同時に光信号を入力し、VOA を使って各スペクトル成分の強度パターンを prime 符号で符号化し、ラベル生成を行った。AWG の波長シフト特性によりポート #2

ではポート#1から出力されるラベル#1に対して1bitシフトしたラベル#2の光信号が出力される。このラベル#1、#2を合波し、光波シンセサイザの復号化用ポート#11~#20を用いて復号化を行った。

その結果、ラベル#1、#2で符号化された光信号を合波し、復号化によりラベル#1、#2の光信号を取り出すことができた。また、他の出力からは符号化と不一致のスペクトルが出力された。一致符号と不一致符号の出力の消光比は10dBになった。光通信システム専用のシミュレーションにおいても実験と同様の結果が得られ、光波シンセサイザが光多重符号・復号器として良好に機能していることを実証した。

②多波長光コム生成器とOSSを組み合わせた大規模光符号ラベル生成・処理

20ポートOSSおよび光コム生成器から生成した4波長光コムの繰り返し周波数10GHzパルス列を変調器により1GHzにレート落とし、OSSのポート1~20までを使用して80種の光符号ラベル生成を行った。

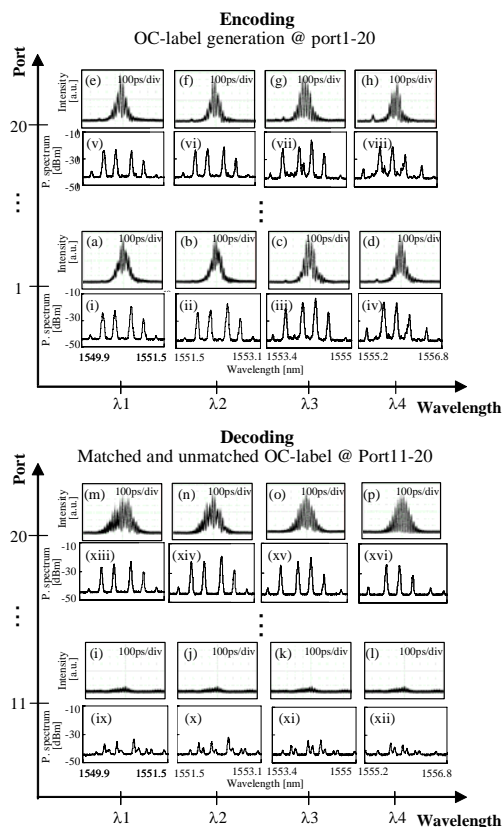


図2 大規模光符号ラベルの生成と処理

生成した80種光符号ラベルのスペクトルと時間波形を図2(i)-(viii), (a)-(h)に示す。また、今回試作したOSSは1台のみであるため、1つのOSSのポート1~10までを符号化、ポート11~20までを復号化用ポートとして

使用し、40並列の光符号・復号化を行い、スペクトルと時間波形ともに符号・復号化の良好な結果が得られた(図2(ix)-(xvi), (i)-(p))。

また、応用として光符号分割多重を実験的に実証することに成功した。光コム生成器で生成する波長帯域数を増やすことにより、更なる光符号ラベル数向上の見込みがある。

③THzレート可変光クロックの生成

時間領域でのパルス間隔 Δt はスペクトル領域でのスペクトル成分のモード間隔と逆数の関係にある。したがって、超高速な光信号ほど、スペクトル領域では広帯域でありモード間隔も広くなるため、モード1つ1つの独立制御が原理的には容易になる。このように、スペクトル領域で制御を行うことで時間領域では直接制御をすることが困難な超高速光信号も高精度に操作することができる。

この原理をふまえ、光周波数領域においてスペクトル成分の振幅と位相を独立に制御可能なOSSの高次回折次数とSC光源を用いることにより、繰り返し周波数可変(1.28THz, 2.56THz)のTHzレート光クロックの生成を実験的に実証した。本手法では、OSSに組み込んだAWGの中心波長を変化させることにより、生成THz光クロックの中心波長を可変することも可能である。

(2)自由空間型帯域可変スペクトルシェイパーを用いたフォトニック信号処理

近年、超高速デバイスの性能向上により、光ファイバで伝送できる伝送速度は飛躍的に向上した。それにより、大容量通信の実現のために伝送速度の更なる高速化が進められ、毎秒テラビット(Tbps)オーダーの伝送容量やより複雑な信号処理技術の実現が期待されている。

160GHz以上の繰り返し周波数を持つ超高速光パルスの処理は、光パルスをフーリエ変換し、そのスペクトルを変調することにより、制御後のスペクトルの逆フーリエ変換で得られる波形を間接的に制御する手法が有効である。このようなスペクトルシェイパーはこれまでにも多く開発されているが、スペクトル成分の位相と振幅を独立に制御することは困難であった。

(1)で成果を示したように本研究では導波路型OSSを提案し、その有効性を示した。しかし、このOSSはフーリエ変換素子としてAWGを使用しているため、スペクトルの各モードの透過帯域がガウス分布になり、モード間の一部の信号がカットされてしまうこと、また変調するスペクトルの全帯域がAWGのfree spectrum rangeに制約されることなどの課題が残っていた。これらの問題を解決するため、フーリエ変換素子として回折格子を用い、C

バンド全域において 10GHz スペーシングでスペクトル成分の位相・振幅制御可能な、帯域可変スペクトルシェイパー (Variable bandwidth spectrum shaper:VBS) を新たに提案し、(株) オプトクエストにより開発が進められ、製品化された。図 2 に示す VBS は自由空間型の光学系により構築し、フーリエ変換素子に回折格子を使用しているため、スペクトルの各モード帯域が矩形になり、高精度なスペクトル制御を実現した。

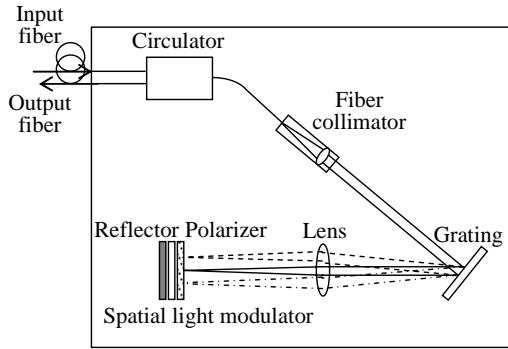


図 3 VBS の構成

①超高速光パルス処理

試作した VBS を用いて THz オーダーの超高速光クロック生成実験を行った。光源部分は 10GHz モードロック半導体レーザと光ファイバ増幅器 (EDFA)、分散補償ファイバ (DFP) を組み合わせ、スーパーコンティニウム (SC) 光を生成した。

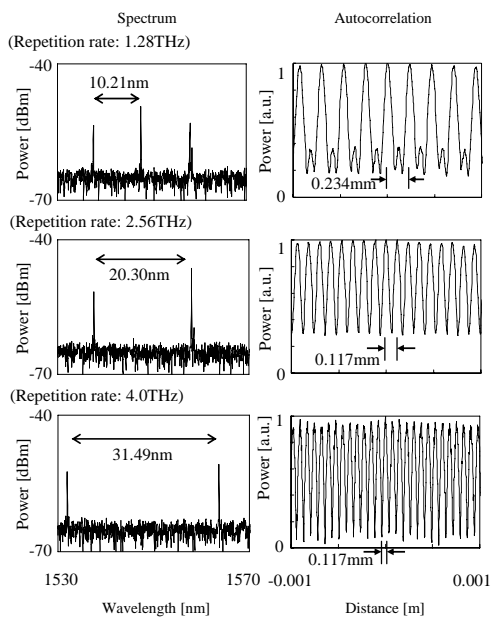


図 4 VBS による超高速光クロック生成

SC 光は、スペクトルのモード間隔が 10GHz で C バンド全体に渡って広がっている。この SC 光を VBS に入力し、SLM の強度でスペクトル制御を行い、スペクトルモード間隔を変化さ

せたときのスペクトルと出力光パルスの自己相関波形を図 4 に示す。

実験結果より、スペクトル上のモード間隔が 1.28THz、2.56THz、最大 4 THz まで可変に制御されている。また、制御した光の自己相関波形のピーク間隔も測定しており、実時間上での出力光パルスの繰り替えし周波数が 4THz まで可変に制御できていることを確認した。

さらに、生成する THz 光クロックの中心波長の制御実験として、スペクトルの中で抑圧しないで残すモードの波長を 2nm 変えることに成功した。この原理により、VBS における生成光パルスの中心波長の制御可能波長域は 10~20nm である。

②パルス整形

VBS を用いたパルス整形の実証実験として、光パルスの位相の制御によるパルス圧縮実験を行った。

はじめに、MLLD から発振され、VBS を通過した光パルスのスペクトルと自己相関波形による光パルス幅 (Δf) の測定を行った。このときの自己相関波形の半値幅と hyperbolic-secant (sech) 関数でフィッティングした際の第 2 高調波半値幅 (Δ) は、3.052ps と 1.978ps であり、スペクトルの帯域は $\Delta f = 0.1903\text{THz}$ であった。

次に、VBS によって位相を制御し、パルス幅を大きくしたときの光パルスの自己相関波形の半値幅と sech 関数でフィッティングした際の半値幅は、4.225ps と 2.738ps に整形され、スペクトル分布の帯域は $\Delta f = 0.2003\text{THz}$ になった。この光パルスのスペクトル成分の位相を制御し、パルス幅が一番圧縮できるように制御を行った。

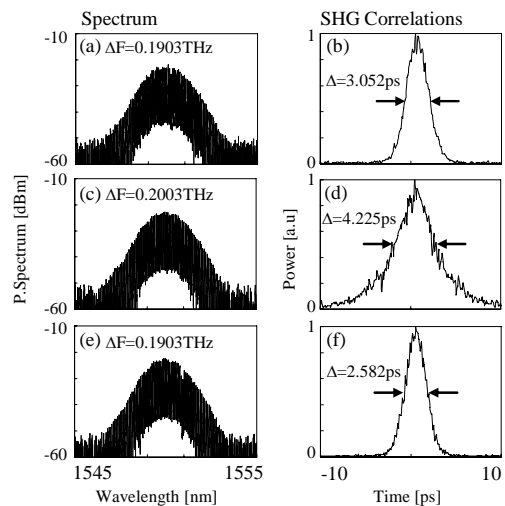


図 5 VBS によるパルス整形

(a), (b) MLLD から出力された光パルス
(c), (d) VBS において整形前の光パルス
(e), (f) VBS で整形された光パルス

その結果、自己相関波形の半値幅と sech 関数でフィッティングした際の半値幅は 2.582 ps と 1.673ps であり、スペクトル分布の帯域は $\Delta f=0.1903\text{THz}$ であった (図 5)。これらの結果より、スペクトルの位相制御を行うことにより MLLD の出力光パルスの半値幅が圧縮されたことを実験的に実証した。

③位相制御による時間拡散 Binary Phase Shift Keying (BPSK) 符号の生成および符号処理

VBS を用いたスペクトルの強度・位相の制御による、時間拡散 BPSK 符号ラベル生成および光符号ラベルの実証実験およびシミュレーションを行った。試作した VBS が 1 台であったため、実験では VBS で生成したラベルを復号化するために、トランスバーサルフィルタ (Transversal Filter: TVF) を用いた。さらに、TVF を符号器、VBS を復号器として使用し、時間拡散 BPSK 符号を VBS で復号化できるかを確認した。

光源には 10GHz レートの MLLD を使用した。MLLD から発振された繰り返し周波数 10GHz、パルス幅 2ps の光パルスを VBS に入力し、スペクトルの強度と位相を制御することにより、時間領域で 200Gchip/s の 8chip の符号 (00 π 00 π 00) に符号化した。この符号化した光パルスを TVF に入力し、時間領域で一致符号 (00 π 00 π 00) と不一致符号 (π π 0 π 0 π 00) で復号化を行った。

図 6 に符号・復号化の実験結果、シミュレーション結果を示す。

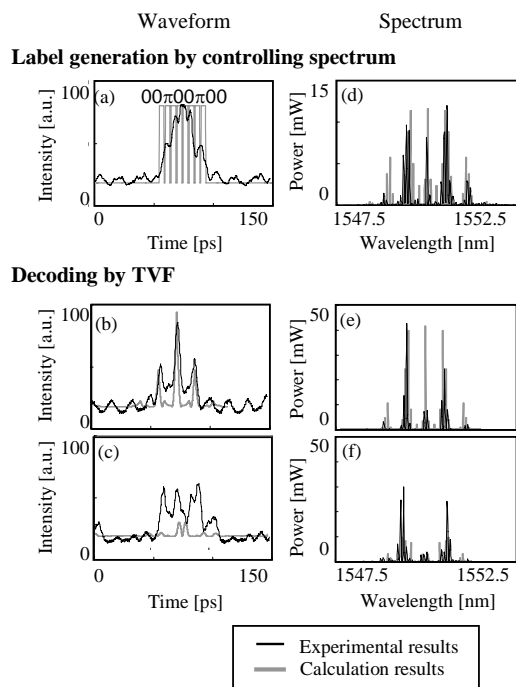


図 6 VBS を用いた時間拡散 BPSK 符号処理

図 6(a) と (d) はスペクトル制御により符号化された時間波形とスペクトル、図 6(b) と (e) は TVF により一致符号で復号化された時間波形とスペクトル、図 6(c) と (f) は不一致符号で復号化した時間波形とスペクトルである。自己相関、相互相関の特徴を確認し、VBS を用いたスペクトル制御による符号処理の可能性を示した。

さらに、VBS を用いたスペクトル制御によるマッチトフィルタリング特性を確認するために、TVF を符号器、VBS を復号器として用いた光ラベル処理実験を行った。図 6 に示した結果とほぼ同様な結果を得ており、しきい値と引くことにより自己相関・相互相関を識別できることを実験的に確かめた。

以上に述べた日本女子大学と情報通信研究機構の共同研究は、著名な論文誌への掲載や国際会議における受賞等の成果につながった。また、本研究の成果はフォトニックネットワークのノード処理の光化を促進するだけでなく、ネットワーク以外の光計測技術、光センシング技術への各分野における光機能デバイスの創出となった。今後は、より高機能な革新的フォトニックネットワーク技術への新しい展開が期待できる。

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 8 件)

- ① M. Mieno, Y. Komai, N. Wada, S. Shinada, T. Yoda, T. Miyazaki, and K. Kodate: "Ultrafast Time-spread Optical BPSK Code Label Generation and Processing Based on Variable Bandwidth Spectrum Shaper," IEEE Photon. Technol. Let. 査読有, vol. 21 (2009) pp. 860-862.
- ② S. Anzai, Y. Komai, M. Mieno, N. Wada, T. Yoda, T. Miyazaki, and K. Kodate: "Optical clock generation with tunable repetition rate and central wavelength using variable-bandwidth spectrum shaper," Opt. Express, 査読有, vol. 17 (2009) pp. 4932- 4937.
- ③ Y. Komai, S. Anzai, N. Wada, F. Moritsuka, T. Miyazaki and K. Kodate: "Repetition-Rate-Tunable Terahertz Optical Clock Generation Based on OSS Using Attenuation and Phase-Tunable Arrayed Waveguide Grating," Jpn. J. Appl. Phys. 査読有, vol. 46 (2007) pp. 5508-5511.
- ④ K. Nakajima, Y. Komai, E. Watanabe, F. Moritsuka, S. Anzai and K. Kodate: "Fabrication of near-infrared volume phase holographic grism with high

efficiency and high dispersion, and its application to a wavelength de-multiplexing device," Opt. Rev. 査読有, vol. 14, (2007) pp.201- 207.

- ⑤F. Moritsuka, N. Wada, T. Sakamoto, T. Kawanishi, Y. Komai, S. Anzai, M. Izutsu and K. Kodate: "Multiple optical code-label processing using multi-wavelength frequency comb generator and multi-port OSS," Opt. Express, 査読有, vol. 15 (2007) pp. 7515-7521.
- ⑥Y. Komai, N. Wada, F. Moritsuka and K. Kodate: "Multi-port OSS using arrayed waveguide grating for photonic parallel processing," Proc. SPIE, 査読有, vol. 6025 (2005) pp. 204-210.
- ⑦N. Wada, Y. Komai, F. Moritsuka and K. Kodate: "160GHz to 20GHz variable rate RZ and CS-RZ pulse trains generation based on phase and attenuation tunable high-resolution AWG, and its application to photonic networks," Proc. SPIE, 査読有, vol. 6028 (2005) pp. 414-421.

[学会発表] (計37件)

- ①S. Anzai, M. Mieno, Y. Komai, N. Wada, T. Yoda, T. Miyazaki and K. Kodate: "Amplitude, Phase, and Bandwidth Tunable High-resolution Optical Spectrum Shaper and its Application for Optical Communication Systems," OFC/NFOEC (2008/2/28) San Diego.
- ②S. Anzai, Y. Komai, M. Mieno, N. Wada, T. Yoda, T. Miyazaki and K. Kodate: "Repetition Rate and Central wavelength Tunable Terahertz Optical Clock Generation Using Variable Bandwidth Spectrum Shaper," OECC/I00C (2007/7/11) Yokohama.
- ③S. Anzai, Y. Komai, M. Mieno, N. Wada, T. Yoda, T. Miyazaki and K. Kodate: "Variable Rate and Tunable Central wavelength Terahertz Repetition Rate Optical Clock Generation Using Variable Bandwidth Spectrum Shaper," CLEO/EUROPE (2007/6/19) Munich.
- ④F. Moritsuka, N. Wada, T. Sakamoto, T. Kawanishi, Y. Komai, S. Anzai, K. Kodate, and M. Izutsu, "Large Scale, Multiple, Optical Code-Label Generation and Processing Based on Multi-Port, Tunable Spectrum Synthesizer and Electro-Optic Frequency Comb Generator," 32th ECOC (2006/9/27) Cannes.
- ⑤Y. Komai, S. Anzai, N. Wada, F. Moritsuka, T. Miyazaki and K. Kodate: "256 and

1.28THz Repetition-Rate Tunable Optical Clock Generation Based on Attenuation and Phase Tunable Cyclic Arrayed Waveguide Grating and Spectrum Equalizer with Supercontinuum Generation," 32th ECOC (2006/9/27) Cannes.

- ⑥Y. Komai, N. Wada, F. Moritsuka and K. Kodate: "Multi-port OSS using arrayed waveguide grating for photonic parallel processing," 20th ICO (2005/8/25) Changchun.

[図書] (計1件)

- ①宮崎哲弥, 淡路祥成, 神尾亨秀, 原井洋明, 和田尚也: 「図解でわかる最新光ネットワーク技術のすべて」, 情報通信研究機構超高速フォトニックネットワークグループ編, 日本実業出版社 (2005).

[産業財産権]

○出願状況 (計1件)

- ①光波形整形装置: 和田尚也, 朴成哲, 依田琢也, 駒井友紀, 杜塚英美, 小舘香椎子: 同左: 特許権: 特開 2008-310190: 国内

[その他]

○受賞 (計1件)

- ①S. Anzai, Y. Komai, M. Mieno, N. Wada, T. Yoda, T. Miyazaki and K. Kodate: Best Paper Award, OECC/I00C (2007.7.11).

6. 研究組織

(1) 研究代表者

小舘 香椎子 (KODATE KASHIKO)
日本女子大学・理学部・教授
研究者番号: 20060668

(2) 研究分担者

今井 元 (IMAI HAGIME)
日本女子大学・理学部・教授
研究者番号: 40386305

駒井 友紀 (KOMAI YUKI)
日本女子大学・理学部・助教
研究者番号: 60409274

和田 尚也 (WADA NAOYA)
情報通信研究機構・情報通信部門・研究
マネージャー

研究者番号: 20358873

宮崎 哲弥 (MIYAZAKI TETSUYA)
情報通信研究機構・情報通信部門・
グループリーダー
研究者番号: 90358870

(3) 連携研究者

なし