

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 27 年 6 月 23 日現在

機関番号：34315

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2013～2014

課題番号：25630173

研究課題名(和文)光電子融合型疑似ランダム系列発生技術と計測応用に関する研究

研究課題名(英文)Optical pseudo-random pulse pattern generation using combined technology of photonics and electronics and its application to optical sensing

研究代表者

灌口 浩一 (TAKIGUCHI, KOICHI)

立命館大学・理工学部・教授

研究者番号：70633254

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,900,000円

研究成果の概要(和文)：光信号をなるべく光領域でデジタル処理できれば、従来のアナログ処理技術では難しかった、高速・低消費電力で光ランダムパルス系列信号発生を実現可能である。このランダムパルスは自然界にはない規則性を持つので、光計測の高感度化、光通信の評価用パルス光源の実現に寄与可能である。

本研究では、光と電子技術の両者の利点を生かすことによって、100 Mbit/s～40 Gbit/sの動作速度を持ち、光計測・光通信両者に対応可能な光信号のデジタル処理技術を確立した。主目標の一つであった光計測の高感度化は未達成であるが、当初予定していなかった、光通信の符号を別の形態に簡便に変換できる回路を実現することができた。

研究成果の概要(英文)：If we realize digital processing technology of optical signals in the optical domain, we can generate high-speed and low-power consumption optical random pulse patterns. It was difficult to generate such optical pulses with conventional analogue signal processing. As these random pulse patterns have regularity that never emerges in nature, they are useful for realizing highly-sensitive optical sensing systems and optical pulse sources to evaluate optical communication systems.

In this research, I established the digital signal processing technology by utilizing combined technology of photonics and electronics. The processing technology has operating speed ranging from 100 Mbit/s to 40 Gbit/s, and can be applied to both optical sensing and communication. Although I have not achieved the highly-sensitive optical sensing system (one of original main purposes) yet, I could realize a simple format conversion circuit for the optical communication, which I originally unplanned.

研究分野：光エレクトロニクス

キーワード：光電子融合技術 光信号処理 光論理回路 光パルスパターンジェネレータ 光計測 光通信

### 1. 研究開始当初の背景

排他的論理和 (Exclusive Or: XOR) 回路は、様々な論理信号処理機能の基本回路であり、光信号用 XOR 回路の実現が期待されている。非線形光学効果を用いた全光型 XOR 回路が複数報告されている [Optics Communications, vol. 159, p. 208, 1999 等]。しかし光集積技術、安定な非線形材料・素子が未成熟なため、現状での全光型処理はかえって素子数の増大、構成の大型化を招き、消費電力低減効果も小さい。また、多モード干渉カプラ型光スイッチと受光器構成の光・電子融合型 XOR 回路が報告されている [ICEP 2002, p. 217, 2002.]。しかし構成要素が多く、入力信号のタップ光電変換信号を用いて元の入力信号を処理する複雑な構成のため、原理提案のみに留まっている。

申請者は 2000 年代前半から、光領域でのデジタル信号処理の実現が重要との問題意識を持ち続け、デジタル - アナログ変換光回路およびその応用である光パケット信号のラベル認識技術 [Electron. Lett., vol. 45, p. 466, 2009 等]、離散 / 高速フーリエ変換光回路およびその応用である光直交周波数分割多重信号分離技術 [Opt. Lett., vol. 36, p. 1140, 2011 等] などを実現してきた。その過程で、光信号の論理処理技術の重要性も認識し、従来取り組んできた光波干渉技術、光回路設計技術をベースとして、簡便な構成の XOR 回路、光 XOR 回路を基本構成要素とした、線形帰還型疑似ランダム系列発生回路およびその反射型光計測への応用の着想を得た。

### 2. 研究の目的

光通信、光計測で用いられる信号の生成、処理は、現状かなりの部分を電子回路に依存しており、動作速度の限界、構成の複雑化、消費電力増大の要因となっている。これらの欠点を打破するため、上記処理において本質的に高速、低消費電力である光技術の適用割合を高め、簡便な構成の光・電子融合型の信号論理処理回路技術を実現することは、種々の機能回路実現のため重要である。本研究の目的は、これまで実現が困難であった、様々な信号速度で動作し、簡便構成、小型、低消費電力の排他的論理和回路とその応用である疑似ランダム系列発生回路を、光・電子融合技術を駆使することによって実現することにある。また、新規疑似ランダム系列発生回路を反射型光計測技術に適用することによって、測定信号の S/N (Signal-to-Noise) 比向上を実現可能なことを実証する。

### 3. 研究の方法

本研究は、光・電子融合技術を駆使して、様々な信号速度で動作し、簡便な構成で、小型、低消費電力の光信号用論理処理回路 (排他的論理和回路、およびそれを応用した疑似ランダム系列発生回路) を実現するものであ

る。また、光計測分野への応用を通して本技術の有用性を検証することも重要な課題である。本目的の実現のために、【課題 1】XOR 回路の動作検証、【課題 2】XOR 回路を用いた疑似ランダム系列発生回路の実現、およびその反射型光計測技術への適用、に取り組む。申請者が提案する、2 種類の提案光・電子融合型 XOR 回路 [(a) バランス受光器+強度変調器構成、(b) マツハツェンダ型干渉計+受光器+強度変調器構成] の特性、機能拡張性をシミュレーション、予備実験によって検討し、優れた構成の実験検討を進める。シミュレーション、予備実験によって、検討論理処理回路が数 100 MHz ~ 40 GHz の帯域で動作可能であることを確認し、その初期応用として光計測用の数 100 Mb/s ~ 数 Gb/s オーダの疑似ランダム系列発生回路を実現する。また、疑似ランダム系列発生回路を、実際に光反射計測に適用し、測定距離拡大の日安となる受信信号の S/N 比を数 dB 程度向上させる。

### 4. 研究成果

#### (1) XOR 回路の動作検証

まず、光 XOR 回路の構成を決定するために、シミュレーション、予備検討を行った。その結果、以下の事項が明らかになった。

3 の (a) \ (b) 両構成とも、動作帯域は必要性能 (数 100 MHz ~ 40 GHz) を達成可能である。

光波の干渉を利用する (b) の構成では、通常の 1 入力受光器、低駆動電圧の電界吸収型半導体強度変調器を使用するため、消費電力面では (a) の構成より優位である。しかしながら、疑似ランダム系列発生回路構成時の動作安定化のためには、2 入力光波間の位相を波長の 1/100 以下で安定化させる必要がある。

光・電子融合集積技術が未成熟なため、現状、疑似ランダム系列発生回路中の光遅延線は、バルクあるいは光ファイバ光学系で構成する必要がある。従って今回は、2 の位相安定化条件の難しさから (a) の構成を用いて光 XOR 回路の実験検討を進めることとした。

図 1 に、(a) の構成と動作原理を示す。バランス受光器への入力信号 P1、P2 の強度が両方共 0 か 1 で等しい場合と、0、1 と互いに異なる場合、受光器の出力 E は、それぞれ 0、±1 となる。次に、E が 0、±1 のときの強度変調器の出力 P が、それぞれ最小 (0)、最大 (1) となるように変調器の動作条件を設定する。従って P は、P1、P2 の値が同じ場合には 0、異なる場合には 1 を出力するので、2 値信号 (On-Off Keying: OOK) 用の光 XOR 回路が実現できる。実験の結果、100 Mbit/s (光計測用) \ 10 ~ 40 Gbit/s (光通信用) の両ビットレート帯で動作する光 XOR 回路を実現することができた。図 2、3 にそれぞれ、10 Gbit/s、40 Gbit/s 入力信号における光 XOR 回路の出力特性を示す。入力信号として、図 2 では NRZ

(Non-Return-to-Zero) 信号、図 3 では RZ (Return-to-Zero) 信号を使用した。また図 4 には、40 Gbit/s 入力信号における光 XOR 回路の出力信号誤り率特性を示す。図 2~4 の結果から、提案した光 XOR 回路が 2 値信号に対して正常動作していることがわかる。図 4 において、入力信号に対して出力信号が 5.7 dB のパワーペナルティを有しているのは、使用したバランス受光器の帯域が 21.4 GHz と不十分だったこと、およびバランス受光器中の 2 つの受光器の感度が 0.58 A/W、0.62 A/W と異なっていたことが出力信号の劣化をもたらしたためである。

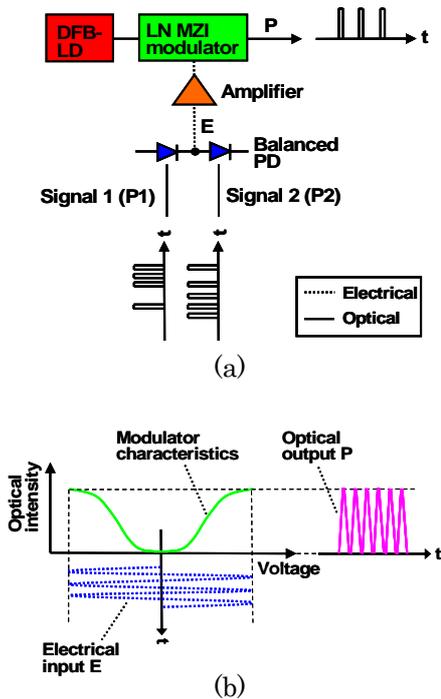


図 1 光 XOR 回路の(a)構成、(b)動作原理

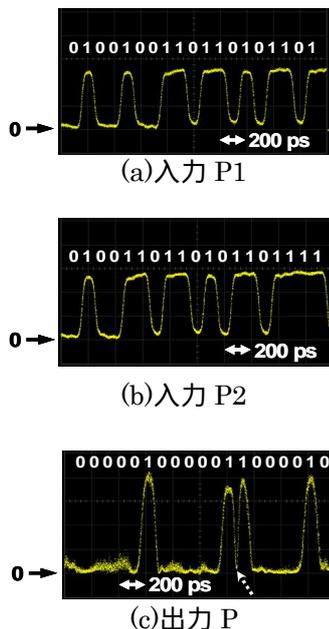


図 2 光 XOR 回路の入出力特性 (10 Gbit/s)

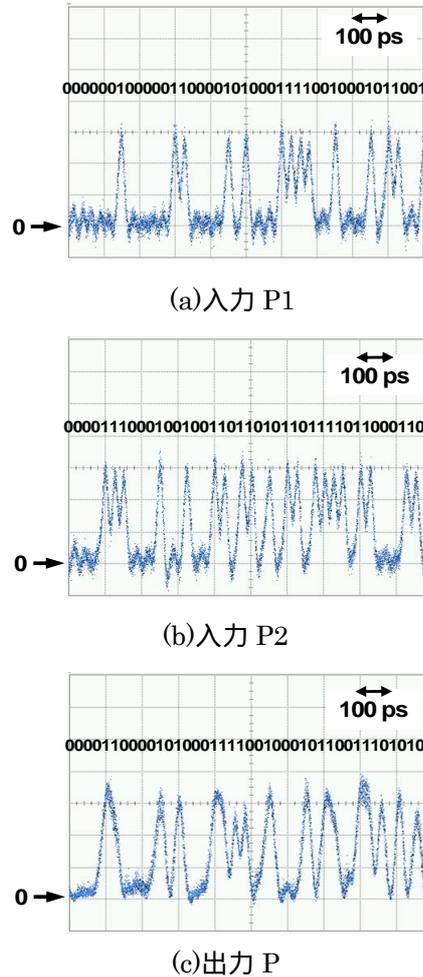


図 3 光 XOR 回路の入出力特性 (40 Gbit/s)

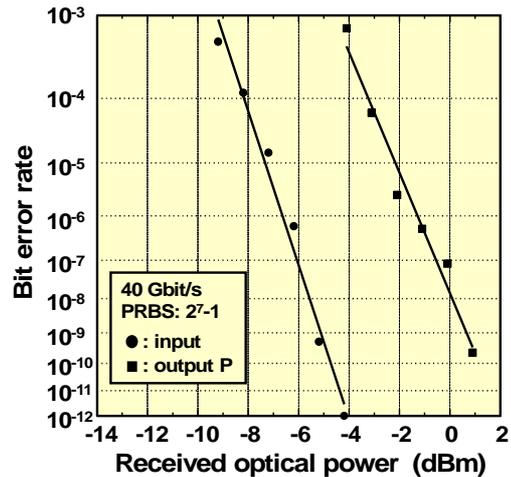


図 4 光 XOR 回路の信号誤り率特性

(2) XOR 回路を用いた疑似ランダム系列発生回路の実現、およびその反射型光計測技術への適用

現状、疑似ランダム系列発生回路を実現できていない状況にある。これは、線形帰還構成を用いるため、信号周回による雑音蓄積効果が予想以上に大きかったため、当初予定していた、増幅部の利得飽和、フィルタ挿入などの対策によっても解決されていないため

である。疑似ランダム系列発生回路は、反射型光計測技術用途などの低コストパルス光源として有用であるため、適宜、他の予算を活用して検討を継続する予定である。

しかしながら、数 10 Gbit/s 対応の光 XOR 回路を光通信における OOK 信号から 4 値 PAM (Pulse Amplitude Modulation) 信号へのフォーマット変換回路として使用できることがわかった。光 PAM 信号は、振幅レベル差を利用した多値変調フォーマットで、メトロネットワーク、加入者系、インターコネクトなどの短距離光伝送用の高速・高周波数利用効率信号として有望である。広く普及している OOK 信号を PAM 信号に簡便に変換できる回路は、光通信分野では重要である。構成は図 1 と全く同一であるが、バランス受光器の一方に入力する OOK 信号の光強度を他方の約半分に設定すると、バランス受光器の差動出力特性によって 4 値の PAM 信号が得られる。

20 Gb/s の 2 つの光 OOK 信号を、40 Gb/s (20 Gsymbol/s) の光 PAM 信号に変換した様子を図 5 に示す。生成 PAM 信号の誤り率は、出力アイパターン信号から  $5.4 \times 10^{-6}$  と見積もることができる。今回は手持ちの 2 値信号用の増幅器を用いたが、多値信号用の線形増幅器を適用することによって特性改善が可能である。

上記フォーマット変換回路と光 XOR 回路の 40 Gbit/s 動作に関して、英文論文誌 2 編に投稿中であるが、採否未定である。

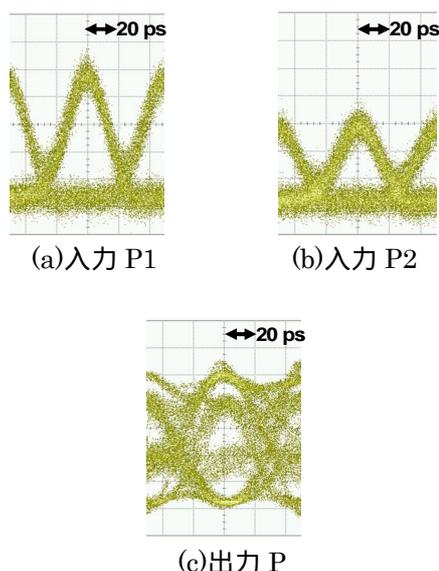


図 5 OOK-4 値 PAM 信号フォーマット変換回路の特性 (アイパターン)

## 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 2 件)

K. Takiguchi, Exclusive OR circuit for optical signals using combined

technology of photonics and electronics, Electronics Letters, 査読有, 50 巻, 2014, 692-693

doi: 10.1049/el.2013.2616

K. Takiguchi, Optical XOR circuit using combined technology of photonics and electronics, SPIE Proceedings, 査読無, 9009 巻, 2014, 41-46

doi: 10.1117/12.2034007

[学会発表](計 5 件)

K. Takiguchi, Modulation format converter for mapping OOK to 4-level PAM data using balanced detection and intensity modulation, SPPCom 2015, 2015 年 6 月 29 日, Boston, USA

灌口 浩一, バランス受光と強度変調を用いた OOK-PAM4 信号フォーマット変換回路, 電子情報通信学会 総合大会, 2015 年 3 月 11 日, 立命館大学 (滋賀県)

K. Takiguchi, Exclusive OR circuit for 40 Gbit/s optical signals based on balanced detection and intensity modulation, OECC/ACOFT 2014, 2014 年 7 月 9 日, Melbourne, Australia

灌口 浩一, バランス受光と強度変調を用いた光排他的論理和回路, 電子情報通信学会 総合大会, 2014 年 3 月 18 日, 新潟大学 (新潟県)

K. Takiguchi, Optical XOR circuit using combined technology of photonics and electronics, Photonics West 2014, 2014 年 2 月 4 日, San Francisco, USA

[その他]

ホームページ等

<http://www.ritsumei.ac.jp/~k-taki/takiguchilab.html>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

灌口 浩一 (TAKIGUCHI Koichi)

立命館大学・理工学部・教授

研究者番号: 7 0 6 3 3 2 5 4