

論文 / 著書情報  
Article / Book Information

|                   |                                                                                                                                                                            |
|-------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 題目(和文)            | 多値光変調器の回路設計に関する研究                                                                                                                                                          |
| Title(English)    |                                                                                                                                                                            |
| 著者(和文)            | 山崎 裕史                                                                                                                                                                      |
| Author(English)   | Hiroshi Yamazaki                                                                                                                                                           |
| 出典(和文)            | 学位:博士(工学),<br>学位授与機関:東京工業大学,<br>報告番号:甲第9858号,<br>授与年月日:2015年3月26日,<br>学位の種別:課程博士,<br>審査員:植之原 裕行,浅田 雅洋,小山 二三夫,宮本 智之,府川 和彦                                                   |
| Citation(English) | Degree:,<br>Conferring organization: Tokyo Institute of Technology,<br>Report number:甲第9858号,<br>Conferred date:2015/3/26,<br>Degree Type:Course doctor,<br>Examiner:,,,,, |
| 学位種別(和文)          | 博士論文                                                                                                                                                                       |
| Category(English) | Doctoral Thesis                                                                                                                                                            |
| 種別(和文)            | 論文要旨                                                                                                                                                                       |
| Type(English)     | Summary                                                                                                                                                                    |

# 論文要旨

## THESIS SUMMARY

|                         |               |                                                             |
|-------------------------|---------------|-------------------------------------------------------------|
| 専攻：<br>Department of    | 物理電子システム創造 専攻 | 申請学位 (専攻分野)： 博士 (工学)<br>Academic Degree Requested Doctor of |
| 学生氏名：<br>Student's Name | 山崎 裕史         | 指導教員 (主)： 植之原 裕行<br>Academic Advisor(main)                  |
|                         |               | 指導教員 (副)：<br>Academic Advisor(sub)                          |

### 要旨 (和文 2000 字程度)

Thesis Summary (approx.2000 Japanese Characters )

本論文は「多値光変調器の回路設計に関する研究」と題し 5 章で構成される。

第 1 章「序論」では、光ファイバ通信ネットワークの更なる大容量化や高機能化に向け、高度な多値光変調方式を駆使したデジタルコヒーレント通信技術の研究開発が活発に進められている背景を述べ、主要なデバイスの一つである多値光変調器の更なる高度化の必要性について述べている。さらに、本研究の目的は高度な多値変調方式に対応する新規光変調器の提案および動作実証であり、その達成に向けて特に光回路設計に着目し、従来体系化されていなかった光変調器の回路設計論を体系化した上で各種用途に合わせた新規回路を探索するアプローチをとると述べている。なお動作実証用のデバイス作製には既存技術である石英平面光波回路(PLC)と LiNbO<sub>3</sub> 位相変調器のハイブリッド構成を用いると述べている。

第 2 章「直列・並列型設計」では、プッシュプル駆動型マッハツェンダ変調回路(MZM)を直列および並列に接続することで多値光変調器を構成する設計手法を体系的に整理し、これを応用した新規変調器として 64QAM 変調器および 3D シンプレックス変調器の回路設計と実証実験結果を示している。本章ではまず、コンスタレーションのサブセット分割に基づく光変調器回路設計の手法を体系的に整理し、さらに並列接続部における入力側分岐比と出力側結合比を等しくすることで回路原理損失を最小化できることを新たに指摘している。64QAM 変調器においては、非対称カプラの対向配置により従来構成より 4.7dB 原理損失の小さい構成を提案、10Gbaud(60Gbps)において動作実証している。3D シンプレックス変調器においては、信号点配置の対称性に合わせた回路構成により従来構成に対し必要 MZM 数を 3 から 2 に削減しつつ原理損失を 2.1dB 低減する構成を提案、21.5Gbaud(43Gbps)において動作実証している。

第 3 章「共役型設計」では、前章で整理した直列・並列型設計を発展させた新しい変調器構成として共役型設計を提案し、これを応用した新規変調器として多値数可変変調器、PS-QPSK 変調器、およびデュアルキャリア変調器の回路設計と実証実験結果を示している。本章ではまず、共役型設計のコンセプトとして 2 並列 MZM 回路において生じる互いに複素共役な 2 出力信号を同時利用する構成を示し、その応用により直並列型より原理損失の小さい $\geq 8$  値変調器および正負両方向への周波数シフト光を同時に得る相補型周波数シフタ(CFS)が実現できることを示している。多値数可変変調器においては、共役型の採用と可変カプラの導入により、8 及び 16 値変調方式における約 2dB の原理損失低減と 4,8,16 値変調の切換え動作が可能な構成を提案、20Gbaud(40,60,80Gbps)において動作実証している。PS-QPSK 変調器においては、共役型の採用により従来構成に対し必要 MZM 数を 4 から 3 に削減しつつ原理損失を 3dB 低減する構成を提案、28Gbaud(84Gbps)において動作実証している。デュアルキャリア変調器においては、CFS と 4 並列 IQ 変調回路および偏波多重回路の集積により 2 周波数多重信号を 1 変調器で生成できる構成を提案し、CFS の光源周波数無依存・サブキャリア周波数間隔可変動作について実証するとともに、単独光源・単一変調器として世界初となる 400Gbps 信号生成に成功している。

第 4 章「線形応答型設計」では、前章までとは異なり多値電気信号で変調器を駆動することで多値光信号を生成するアプローチに着目し、ここで問題となる MZM の応答非線形性(Sin 応答特性)を光回路の工夫により解決する手法として線形応答型設計を提案・実証している。本章では、MZM の出力側カプラを  $2 \times 2$  として、一方から Sin 応答で表される主信号を得ると同時に、他方から得られる Cos 応答信号をさらに Sin 変調して補正信号を生成し、これを主信号と適切な比率で結合させることで応答特性の線形性を向上する回路設計を提案し、その特性を理論的に解析している。さらに上記設計指針に基づき、線形応答変調器(LQM)を 2 並列に接続した線形 IQ 変調器(LIQM)を作成し、従来 MZM を用いた回路に対し線形性と原理損失のトレードオフの改善および 16QAM 変調におけるコンスタレーションの歪みの抑制を確認している。

第 5 章「結論」では本研究で得られた成果を総括している。

備考：論文要旨は、和文 2000 字と英文 300 語を 1 部ずつ提出するか、もしくは英文 800 語を 1 部提出してください。

Note：Thesis Summary should be submitted in either a copy of 2000 Japanese Characters and 300 Words (English) or 1copy of 800 Words (English).

注意：論文要旨は、東工大リサーチリポジトリ(T2R2)にてインターネット公表されますので、公表可能な範囲の内容で作成してください。

Attention: Thesis Summary will be published on Tokyo Tech Research Repository Website (T2R2).

論文要旨

THESIS SUMMARY

|                         |               |                                          |                     |
|-------------------------|---------------|------------------------------------------|---------------------|
| 専攻：<br>Department of    | 物理電子システム創造 専攻 | 申請学位（専攻分野）：<br>Academic Degree Requested | 博士（工学）<br>Doctor of |
| 学生氏名：<br>Student's Name | 山崎 裕史         | 指導教員（主）：<br>Academic Advisor(main)       | 植之原 裕行              |
|                         |               | 指導教員（副）：<br>Academic Advisor(sub)        |                     |

要旨（英文 300 語程度）

Thesis Summary (approx.300 English Words )

The purpose of this study is to develop novel optical modulators that supports advanced multilevel modulation formats, which are essential for the evolution of fiber-optic networks. The thesis consists of 5 chapters.

Chapter 1 provides the historical and technical background to the development of optical modulators.

Chapter 2 organizes and consolidates the design theory of modulators using serial and parallel connections of Mach-Zehnder modulators (MZMs). Based on this theory, two novel modulators, the 64QAM modulator and the 3D-simplex modulator, were designed and fabricated by using a hybrid integration of silica planar lightwave circuits (PLCs) and an LiNbO<sub>3</sub> (LN) phase-modulator array. The both modulators showed smaller modulation losses than those with conventional approaches.

Chapter 3 proposes the conjugate modulators. By utilizing both of the conjugate pair of QPSK signals generated with a dual-parallel MZM, this new class of modulators offer smaller intrinsic modulation losses than those with conventional ones for the modulation levels of 8 and more. The conjugate configuration can also be used for generating two phase-locked frequency subcarriers. Three novel conjugate modulators, the flexible-format modulator, the PS-QPSK modulator, and the dual-carrier modulator, were designed and fabricated by using PLC-LN hybrid integration. The first two proved the reduction of modulation losses, while the last one demonstrated the two-subcarrier generation for a large-capacity (400-Gbps) transmission.

Chapter 4 proposes the linear optical modulator (LOM), which has been desired for use in the systems that rely on high-speed DACs to generate multilevel signals in the electronic domain. While the standard MZM has a nonlinear (sinusoidal) electro-optic response, the LOM achieves a linear response with a novel circuit design. Theoretical analysis and experimental results proved that the LOM has a clear advantage over the conventional MZM in terms of the tradeoff between the linearity and the intrinsic optical loss.

Chapter 5 summarizes this thesis and provides a future outlook.

備考：論文要旨は、和文 2000 字と英文 300 語を 1 部ずつ提出するか、もしくは英文 800 語を 1 部提出してください。

Note：Thesis Summary should be submitted in either a copy of 2000 Japanese Characters and 300 Words (English) or 1copy of 800 Words (English).

注意：論文要旨は、東工大リサーチリポジトリ(T2R2)にてインターネット公表されますので、公表可能な範囲の内容で作成してください。

Attention: Thesis Summary will be published on Tokyo Tech Research Repository Website (T2R2).