

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 19 日現在

機関番号：14401

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2012～2014

課題番号：24360135

研究課題名(和文)分極反転技術を用いたプリコライゼーション高速光変調デバイスの開発

研究課題名(英文)Pre-equalizing high-speed electro-optic modulator utilizing polarization reversal technology

研究代表者

村田 博司(Murata, Hiroshi)

大阪大学・基礎工学研究科・准教授

研究者番号：20239528

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 14,500,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は、研究代表者がかねてから研究を進めてきた“強誘電体の分極反転構造を利用した高速光変調技術”を巧みに利用することにより、高速電気デジタル信号-光デジタル信号変換(高速光変調)と同時に光ファイバーの波長分散効果による波形劣化の補償(プリコライゼーション)を行うことができる“新しい分散補償光変調デバイス”を開発することを目的とするものである。3年間の研究期間において、デバイスの動作解析・設計、試作実験および高性能化・高機能化の追究とシミュレーションを行い、その基本動作特性を実証することに成功した。

研究成果の概要(英文)：We have proposed a pre-equalizing electro-optic (EO) modulator using traveling-wave electrodes and polarization-reversed structures for the compensation for fiber dispersion effect. The proposed EO modulator can convert high-speed electrical signals to optical signals and can compensate for the signal distortion caused by fiber dispersion at the same time. It can operate in the high frequency range over 100GHz since it is based on the Pockels effect in a ferroelectric crystal. Therefore, it is applicable to ultra-high-speed communication systems. In this research project, the analysis, design, fabrication, proposals of new schemes for advanced operation/function, and detailed simulation of the proposed device have been executed and its basic operations have been shown successfully.

研究分野：光エレクトロニクス

キーワード：光変調 分散補償 電気光学効果 光集積回路 分極反転

1. 研究開始当初の背景

現代のICT社会を支えている光ファイバー通信網のトラフィックは増加の一途を辿っている。我が国の光ファイバー通信網を飛び交うデータの総量は、2010年末の時点で1.7Tbpsを超えている(*)。このような大容量伝送が可能であるのは、単一モード石英光ファイバーの低損失性(伝送損失0.2dB/km)と大容量性(帯域幅>100THz)のゆえである。しかし、石英光ファイバーには、波長分散(波長1.55 μm における群速度分散 $D=16\text{ps}/\text{nm}\cdot\text{km}$)という欠点がある。波長分散によるスペクトル成分間の位相ずれ・時間遅延は、高速光信号波形に大きな歪みを生じさせる。例えば、40Gbps 2値ASK変調光(波長1.55 μm 、 $\Delta\lambda\sim 0.3\text{nm}$)を石英光ファイバーで10km伝送した場合、信号のスペクトル成分間には最大で50ps程度の時間遅延が生じ、そのままでは信号復調が困難となる。

波長分散による波形歪みを補償する技術としては、A/D変換回路とデジタルプロセッサを用いる方法や、逆の分散特性を持つ補償用ファイバーやファイバークレーティングを用いる方法などがある。デジタル方式は、プロセッサ等の動作速度に上限があり、次世代の100Gbps級超高速伝送への適用は容易ではない。また、動作速度が上がると回路の消費電力と発熱が加速度的に増大する問題もある。分散補償ファイバーやファイバークレーティングを用いる方式は、伝送速度の制限はないが補償できる波長範囲に限られる。波長によらず、100Gbps級超高速信号伝送に対応可能な分散補償技術は、まだ得られていない。(※総務省：「2010年度情報通信白書」)

2. 研究の目的

本研究の目的は、申請者がかねてから研究を進めてきた“強誘電体分極反転構造を用いた電気光学変調技術”を用いることで、100Gbps級伝送にも適応可能なE/O変換(光変調)と分散補償(プリコライゼーション)を同時に行う新しい高速高性能光変調デバイスを開発することである。このデバイスは、次のような特長を持っている。

- (1) 100Gbps級の超高速変調と分散補償特性が同時に得られる
- (2) 波長依存性が小さく光ファイバー通信のC-,L-,S-bandで動作可能
- (3) A/D変換回路やデジタルプロセッサが不要で低消費電力
- (4) On/Off-keying変調方式のみならず多値ベクトル変調方式にも適用可能
- (5) MEMS構造コプレーナ電極を用いることで、分散補償量の調節も可能

デバイスを駆動するための電気信号は、通常の高速度デジタル信号で良い。デバイスから出力された信号は、E/O変換と分散補償のためのプリコライゼーションが同時に施され

たものとなっており、一見すると歪んだ波形であるが、ファイバー伝送後に所望の光信号波形となる。

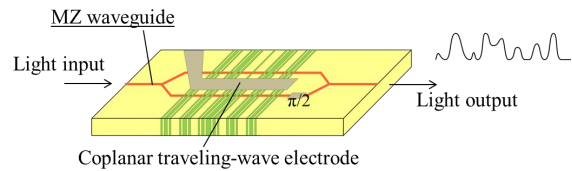


図1 デバイスの基本構成

3年間の研究において、デバイスの動作解析・設計・試作実験を行い、その有用性を実証することを目的とする。

3. 研究の方法

本研究課題においては、

- (1) デバイスの動作解析・設計
- (2) 試作実験
- (3) 高性能化・高機能化の追求
- (4) 分散補償特性の数値シミュレーション

の4点について研究を進めた。基板材料には、高速光変調器として広く用いられているニオブ酸リチウム(LiNbO₃)を用いることとした。動作光波長は、光ファイバーの分散による影響が問題となる1.55 μm 帯(C-band)をターゲットとした。変調信号は、繰り返し周波数10GHzあるいは40GHzで、変調フォーマットは、2値ASK(On-Off Keying)、BPSKを想定した。また、後述のように、ベクトル変調信号にも対応可能なデバイスについては、QPSKのプリコライゼーション可能となることを追究した。

4. 研究成果

- (1) 変換を用いた高精度プリコライゼーションデバイスの提案と設計

本研究で研究・開発するプリコライゼーションデバイスにおいては、自発分極の反転技術を用いて、プリコライゼーションに必要な伝達関数を合成する。当初想定していた設計においては、必要とされる伝達関数を単純に2値化して、分極反転形状を定めることとしていた。しかし、単純2値化の場合、高速変調動作において所望の特性とのズレが顕著となることが判明した。

そこで、新しい設計法として、変換方式を応用した高精度プリコライゼーション構成を提案した。これは、変換における関数として微細な(幅50 μm 程度)分極反転構造を導入して、これを平均化したものが所望の伝達関数となるように微細分極反転パターン列を決定するものである。

実際に、標準的な単一モード石英ファイバ

ーを用いた場合について、光波長 1.55 μm 帯においてファイバーの分散による波形劣化を補償するための伝達関数を解析により求め、対応する分極反転構造を - 変換方式を応用して精密に定めた。その結果、 - 変換方式を用いることにより、単純 2 値化方式に比べて、補償特性が大幅に改善することを見出した。

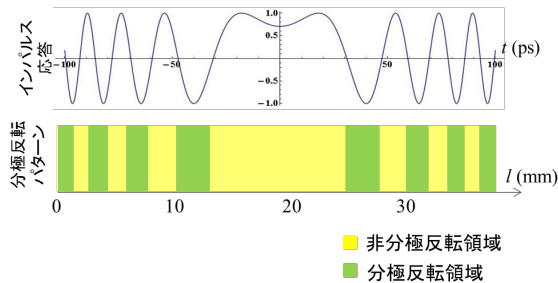


図2 単純 2 値化による分極反転パターン

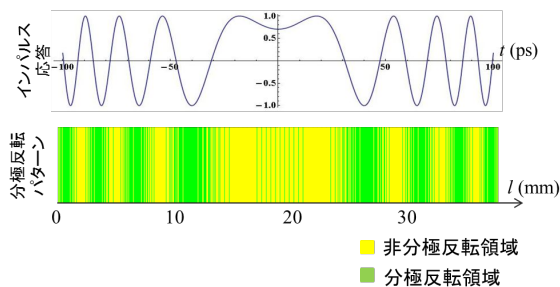


図3 - 変換による分極反転パターン

また、 - 変換方式を用いると、分散補償効果のみならず、光変調電極における変調信号の減衰の効果も同時に補償することができることを見出した。一連の研究成果を纏めて学会・研究会において発表したところ、その内容が評価され、2 件の賞(「電子情報通信学会エレクトロニクスソサイエティ学生奨励賞」、および「光エレクトロニクス研究会 学生優秀研究賞」)を得た。

(2) デバイスの試作

設計したプロトタイプデバイスを試作した。基板には 0.4mm 厚のニオブ酸リチウム結晶を用いた。光導波路の作製にはアニールプロトン交換法を、変調電極の作製には Al 蒸着とフォトリソグラフィを用いた。試作したデバイスの基本特性評価を行った。GSGプローブとネットワークアナライザを用いて、光変調電極における変調信号の減衰を測定して、分極反転により特性を補償できる範囲にあることを確かめた。微細分極反転構造を精度良く作製するための作製プロセスの確立に思いの外に時間が掛かったために、3 年間の研究期間内に、明瞭なプリコライジング特性の実験データを得るには至らなかったが、引き続き評価実験を続けており、データが得られ次第、学会発表および論文発表を

行う予定である。

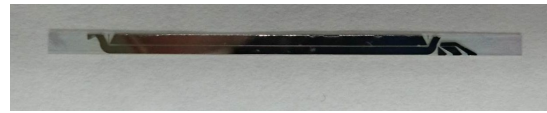


図4 試作したデバイス

(3) デバイスの高性能化・高機能化

さらに、光導波路の構成についても考察を行い、通常のマッハツェンダー型光導波路の代わりに二重マッハツェンダー型光導波路を用いた新しいデバイスを考案した。

二重マッハツェンダー型光導波路を用いることにより、ベクトル光変調における I 成分・Q 成分それぞれにプリコライジング特性を与えることができる。したがって、ベクトル光変調信号に対してもプリコライジング可能であることを明らかにした。

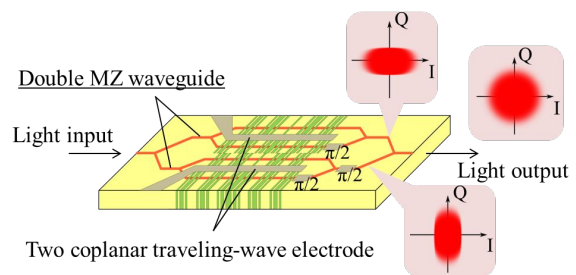


図5 二重マッハツェンダー型導波路を用いたベクトル光変調用プリコライジングデバイス

プリコライジングにおける分散補償量を調節することができるデバイス構成についても考究した。このプリコライジングデバイスは、進行波型光変調器における光波と変調波の速度不整合を巧みに用いるものである。分散補償量は、両者の速度差と電極長で決まる。したがって、速度差を調節することができれば、分散補償量を可変することができる。そこで、変調波の速度を可変することにより、分散補償量を制御できる新しいデバイスを考案して、特性の解析を行った。図6に分散補償量可変デバイスの構成を示す。進行波型電極の上部に誘電体板あるいは金属板を装荷して、その高さを MEMS 機構等により精密に制御することにより、分散補償量を可変とすることができる。

進行波型電極上に装荷するものとして厚さ 1mm 程度の LiNbO_3 板および Al 板を用いた場合について、補償可能な分散量(ファイバー長)を解析により求めた。結果を図7に示す。誘電体および金属板を装荷することにより、分散補償量を 50~120%調整可能であることを明らかにした。

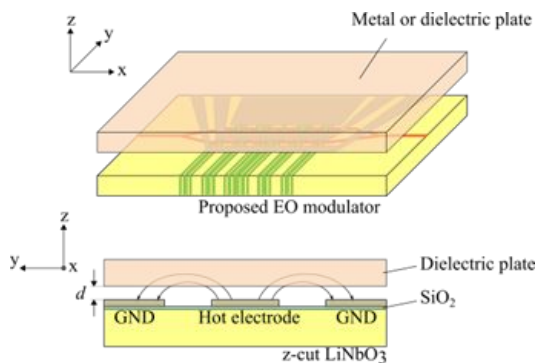


図6 分散補償量可変デバイス

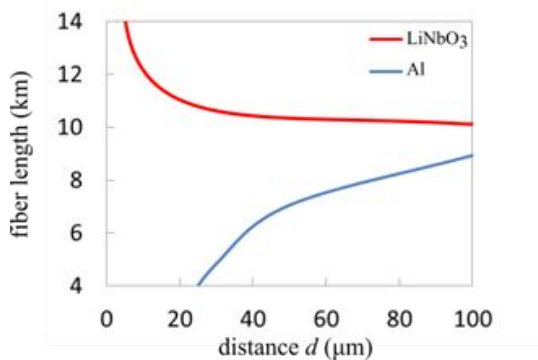


図7 補償可能ファイバー長の変化

(4) シミュレーション

設計したデバイスにおける分散補償特性を詳細に解析して、光信号波形の変化のシミュレーションを行った。

設計したデバイスにRZ 40Gbps信号を入力したときの光ファイバー伝送後の波形を図8に示す。ファイバー長10kmにおいて、入力信号とほぼ同じ波形が得られていることがわかる。

また、分散補償量可変デバイスにおけるシミュレーションも行った。図7に示す誘電体(LiNbO₃)装荷デバイスにおいて、誘電体板を進行波型電極上の12μmの位置に装荷したときの波形を図9に示す。ファイバー長12kmにおいて入力信号とほぼ同じ波形が得られており、補償量を調節できることを確かめた。

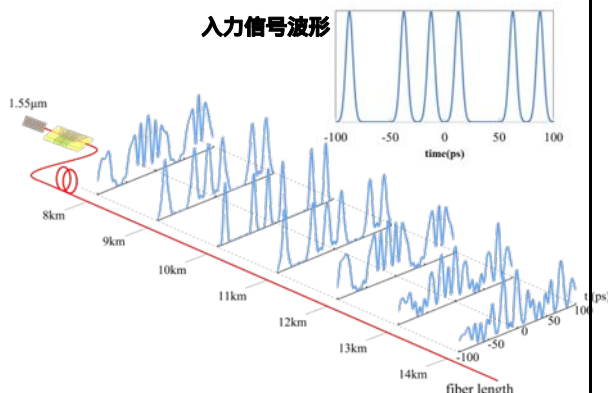


図8 伝送波形のシミュレーション

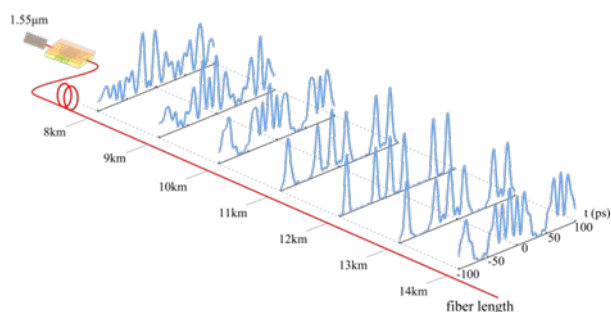


図9 誘電体板を装荷した場合のシミュレーション結果

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6件)

村田博司, “分極反転構造によるニオブ酸リチウムの電気光学特性制御,” 応用物理, Vol.84, No.6, pp.514-519, 2015.

Hiroshi Murata, and Yasuyuki Okamura, “High-speed signal processing utilizing polarization-reversed electro-optic devices,” (invited paper) IEEE/OSA Journal of Lightwave Technology, Vol.32, No.20, pp.3403-3410, 2014.

DOI:10.1109/JLT.2014.2319454

Hiroshi Murata, Katsuya Shibasaki, Kazuhisa Yamamoto, and Yasuyuki Okamura, “Speckle Control Using High-Frequency Signal Superposition to Semiconductor Laser,” Optical Review, Vol.21, No.1, pp.79-82, 2014.

Yusuf Nur Wijayanto, Hiroshi Murata, and Yasuyuki Okamura, “Electro-Optic Millimeter-Wave-Lightwave Signal Converters Suspended to Gap-Embedded Patch Antennas on Low-k Dielectric Materials,” IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, Vol.19, No.6, 3400709, 2013.

村田博司, “分極反転デバイスを用いた光 - マイクロ波制御,” オプトロニクス, Vol.31, No.371, pp.115-120, 2012.

Hiroshi Murata, Ryota Miyanaka, and Yasuyuki Okamura, “Wireless space-division-multiplexed signal discrimination device using electro-optic modulator with antenna-coupled electrodes and polarization-reversed structures,” International Journal of Microwaves & Wireless Technologies, Vol.4, No.3, pp.399-405, 2012.

〔学会発表〕(計12件)

三坪孝之, 村田博司, 岡村康行, “進行波型電極と分極反転構造を用いたプリコラジング電気光学変調器”, 電子情報通信学

会 光エレクトロニクス研究会(OPE),信
学技報(IEICE Technical Report), Vol.114,
No.431, OPE2014-193, pp.255-260,大阪大
学、豊中市 (2015年 1月 29-30日).

三坪孝之, 村田博司, 岡村康行, “分極反
転構造を用いた可変プリコライジング
高速電気光学変調器”, OPJ2014, 5aE2, 筑
波大学東京キャンパス, 東京都文京区
(2014年 11月 5-7日).

Takayuki Mitsubo, Hiroshi Murata, Yasuyuki
Okamura, “Design of Pre-equalizing
High-Speed EO Modulator with
Polarization-Reversed Structure Using
Delta-Sigma Transformation,” MWP/APMP
2014, TuEB-2, October 20-23, 2014,
Sapporo.

三坪孝之, 村田博司, 岡村康行, “マッハ
ツェンダー型導波路と分極反転構造を用
いたプリコライジング高速電気光学変
調器”, 2014年(平成 26年)秋季第 75
回応用物理学会学術講演会, 18p-C7-4, 北
海道大学, 札幌市 (2014年 9月 17-20日).

Hiroshi Murata, and Yasuyuki Okamura,
“High-speed signal processing utilizing
interaction between optical and millimeter
waves,” (Invited Talk) IEEE Summer
Topicals Meeting, TuD1.2, pp.103-104, July
14-16, 2014, Montreal, Canada.

三坪孝之, 村田博司, 岡村康行, “ファイ
バー分散補償のための分極反転構造高速
電気光学変調器”, 2014年電子情報通信
学会総合大会, C-14-21, 新潟大学, 新潟
市 (2014年 3月 18-21日).

村田博司, 高武直弘, 高島佑介, Y. N.
Wijayanto, 岡村康行, “分極反転構造を用
いたマイクロ波 - 光波変換デバイス”
(招待講演) シンポジウム「フロンティア
を標榜する分極反転デバイス」, 2014
年(平成 26年)第 61 回応用物理学会春
季学術講演会, 18p-F8-8, 青山学院大学,
相模原市 (2014年 3月 17-20日).

Hiroshi Murata and Yasuyuki Okamura,
“High-Speed Signal Processing and
Discrimination Utilizing Polarization-
Reversed Electro-Optic Devices,” (Invited
Talk) 2013 IEEE International Topical
Meeting on Microwave Photonics
(MWP2013), W1-1, pp.64-67, October
28-31, 2013, Alexandria, Virginia, USA.

村田博司, “分極反転を用いた光変調技
術”, (招待講演) 30p-V-1, レーザー学会
学術講演会第 33 回年次大会, 姫路商工
会議所, 姫路市 (2013年 1月 28-30日).

村田博司, “グリーンフォトンクス用
LiTaO₃分極反転デバイス”, (招待講演)
光材料・応用技術研究会, 12-3-3, リゾー
ピア熱海, 熱海市 (2012年 11月 16日).

村田博司, “分極反転電気光学デバイス
を用いた高速信号光変換・制御技術”, (依
頼講演) C-3-8, 秋季電子情報通信学会ソ

サイエティ大会, 富山大学, 富山市
(2012年 9月 11-14日).

村田博司, 郭藍, 出水達也, 岡村康行 :
“分極反転構造電気光学変調器を用いた
高速信号処理”, 電子情報通信学会 マイ
クロ波・ミリ波フォトンクス研究会
(MWP), 信学技報, Vol.112, No.1,
MWP2012-6, pp.31-35, 機械振興会館, 東
京都 (2012年 4月 6日).

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕
○出願状況(計 0 件)

○取得状況(計 0 件)

〔その他〕
ホームページ等
<http://www.ec.ee.es.osaka-u.ac.jp/>

6. 研究組織

(1)研究代表者

村田 博司 (MURATA, Hiroshi)
大阪大学・大学院基礎工学研究科・准教授
研究者番号 : 20239528

(2)研究分担者

塩見 英久 (SHIOMI, Hidehisa)
大阪大学・大学院基礎工学研究科・助教
研究者番号 : 00324822