

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 5 月 18 日現在

機関番号：24506

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26420313

研究課題名(和文) 波長チャープ量が制御された小型光変調素子とその応用

研究課題名(英文) Small-sized light modulator with optical frequency-chirp of which amount can be preset and its applications

研究代表者

榎原 晃 (Enokihara, Akira)

兵庫県立大学・工学研究科・教授

研究者番号：10514383

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,900,000円

研究成果の概要(和文)：波長チャープ量が正確に制御された電気光学変調器(EOM)を提案・実現し、有効な応用ができることを実証した。具体的には、非等分配ラットレース(RR)回路と呼ばれる変調信号を任意の電力分配比で分配するマイクロ波回路をEOM基板上に集積化する構成により、小型・単一チップ構成で実用性の高い波長チャープ変調器を実現した。このEOMを用いて、スペクトル平坦度2dB以下の7本の平坦光周波数コム信号発生に成功し、また、光ファイバ伝送での波長分散の影響を回避する方法についても実験的に確認した。さらに、チャープ変調を用いてEOMの非線形歪みを光学的に補償する新しい方法を提案し、その性能を解析により確認した。

研究成果の概要(英文)：An electro-optic light intensity modulator inducing optical frequency-chirp of which amount can be preset was proposed and realized. Its applications were also considered. The rat-race (RR) circuit, which operates as a 180-degree hybrid, with an asymmetric power split ratio was integrated with the electro-optic modulator on the same substrate. Thereby, the frequency-chirp modulation was realized by the modulator structure of a small-sized and single-chip configuration. As applications of this modulator, generation of the optical frequency comb consisting of seven spectrum components and the pre-chirp modulation for avoiding the optical fiber dispersion in optical fiber transmissions were successfully realized by the experiments. Moreover, a new optical compensation method of the nonlinear distortion in electro-optic modulators using the frequency-chirp modulation was proposed. The distortion suppression performance was confirmed by the calculation.

研究分野：マイクロ波フォトニクス、光エレクトロニクス

キーワード：電子デバイス・機器 電気光学変調器 波長チャープ 光周波数コム 歪み補償

1. 研究開始当初の背景

波長チャープとは、強度変調光に含まれる波長変動成分のことで、光変調器の構造上の問題や材料特性等の影響で生じる。光ファイバ中では波長により光の速度が異なる波長分散があるため、波長チャープを持つ光強度変調信号は通常よりも大きな波形歪みが生じ、光ファイバ伝送での性能劣化を招く。そのため、一般的な光変調素子では波長チャープは小さいことが望ましい。

しかし、所望の量の波長チャープを精度良く発生できる電気光学変調素子(EOM)があれば、単一波長光源から図1に示すように、強度が同じで、変調周波数の間隔で均等に並んだスペクトル成分からなる光周波数コム信号を生成できることが知られている。EOMで発生させた光周波数コム信号はスペクトル間隔が極めて正確なため、高密度波長多重光通信のための多波長光源や光周波数計測などへの応用が期待できる。また、光ファイバの波長分散を考慮して、逆の波長チャープを持つ光強度変調光を生成することで、波長分散による伝送特性の劣化を相殺するプリチャープ光変調を実現できる可能性もある。

図2には2電極型のEOMの構造を示す。電界によって屈折率が変化する電気光学(EO)結晶基板上に形成された光導波路からなるマッハツェンダ干渉計と、干渉計を構成する2本の光導波路に独立に電界を印加する変調電極1、2から構成される。変調電極に同振幅($A_1=A_2$)で逆位相の変調信号を印加

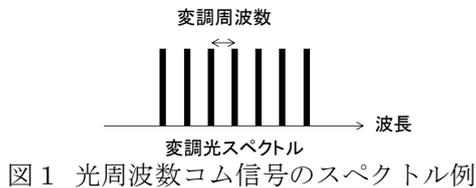


図1 光周波数コム信号のスペクトル例

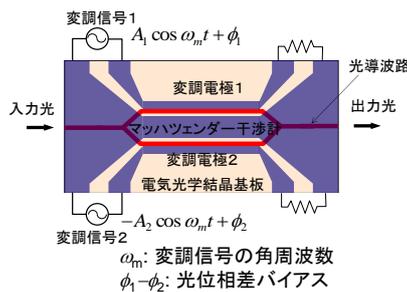


図2 2電極型EOMの構成

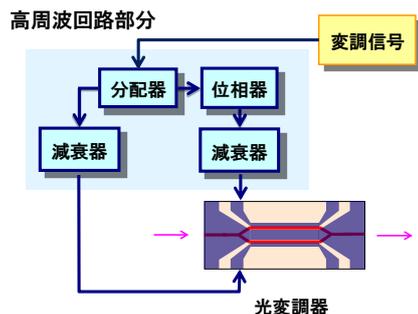


図3 外部回路による波長チャープ制御

すれば、位相変調された光波が干渉し、強度変調された出力光が得られる。ここで、変調信号の振幅に差が生じる($A_1 \neq A_2$)と位相変調成分が一部相殺されずに残り、これが、波長の変動つまり波長チャープを生じさせる。

したがって、2電極型EOMの両電極に印加する変調信号の振幅比と位相差を厳密に制御すれば、原理的には波長チャープが制御された強度変調光が得られる。そのためには、変調信号の振幅と位相を図3のように外部に設置した高周波回路によって制御する必要があり、ケーブルで接続された大がかりな装置構成となり、設置後調整が必要で、動作の安定性にも問題がある。

そこで、分配回路の一種であるラットレース(RR)回路の利用を検討した。図4は標準的なRR回路の原理図で、1/4波長と3/4波長の線路で構成される。ポート1への入力信号は、ポート3と4に逆位相で分配されるので、この回路をEO結晶基板上に形成し、ポート3、4を2電極型EOM(図2)の変調電極1、2に直接接続する。ここで、RR回路の分配比を調節し、両変調電極に印加される変調信号の振幅比($A_1:A_2$)を設定すれば、先に述べた原理で波長チャープを制御できる。

この構成により、RR回路の入力端子(ポート1)に変調信号を入力するだけの単一入力、単一チップ構成で、かつ無調整で動作する極めてコンパクトな、波長チャープが制御されたEOMが実現できると考えられる。

2. 研究の目的

本研究では、波長チャープ量が制御された小型で実用性の高い光変調素子を提案・実現し、さらに、有効な応用ができることを実証することを目的とする。本提案では電力分配比が決められた非等分配RR回路を集積化した小型で単一チップ構成のEOMを実現する。さらに、この変調器の応用として、高品質な光周波数コム信号を発生させること、また、光ファイバ伝送での波長分散の影響を相殺するプリチャープ変調の可能性を検討する。さらに、当初の予定にはなかった新たな応用として波長チャープを用いたEOMの非線形歪み補償についても検討した。

3. 研究の方法

上記目的を達成するために、以下の検討課題に取り組んだ。

1. EO結晶であるニオブ酸リチウム(LN)基板上で、分配比を設定できる非等分配RR回路の設計・作製手法の確立
2. 非等分配RR回路と変調電極とを一体化したEOMの設計・試作
3. 試作したEOMのチャープパラメータの精密な評価とEOMの構造の最適化
4. 光周波数コム信号発生、プリチャープ変調のためのEOMの設計・試作と有効性の実証
5. 波長チャープによるEOMの非線形歪み補償

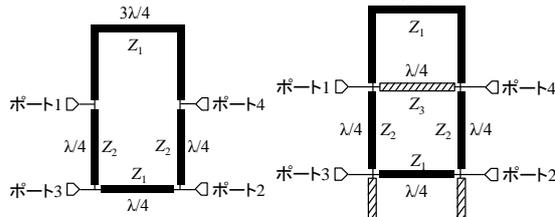


図4 RR回路の原理図

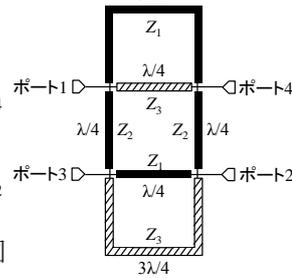


図5 並列リング型RR回路の原理図

高誘電率で異方性を有する LN 基板上に直接高周波回路を形成することは、回路サイズが非常に小さくなる利点があるが、設計・試作には大きな困難が伴う。本研究代表者は、以前の科研費研究課題 (22560337) で LN 基板上へのマイクロ波回路設計の実績があり、そこで蓄積した技術を適用した。また、研究分担者の河合は高周波回路設計・評価を担当し、独自に開発した並列リング型と呼ばれる高分配比 RR 回路の設計手法を本研究で活用した。さらに、国立研究開発法人情報通信研究機構とも協力し、素子の試作・評価、および、応用実験において、実験施設を借用した。

4. 研究成果

(1) ニオブ酸リチウム(LN)基板上での非等分配比 RR 回路の設計・試作・評価

図4の一般的なRR回路では電力分配比は線路の特性インピーダンス Z_1 と Z_2 の差によって設定できる。しかし、使用する LN 基板は非常に高誘電率なため高インピーダンス側の線路の線路幅が非常に狭くなり作製が困難となる。そこで、図5に示すような並列リング型構造のRR回路を検討した。この回路構成を使って、電力分配比 4.5:1、中心周波数 10GHz、0.5mm 厚の z-cut LN 基板上に設計したマイクロストリップ構造のRR回路パターンを図6に示す。 $Z_1=60\Omega$ 、 $Z_2=55\Omega$ 、 $Z_3=39\Omega$ とし、電磁界シミュレータを用いて構造の最適化を行った。線路導体には膜厚 $10\mu\text{m}$ の金薄膜を仮定し、ポート3、4を変調電極に接続した際に、位相差が 180° を維持するように線路を配置している。図7に解析により求めた周波数特性を示す。中心周波数 10GHz 付近において $|S_{31}|/|S_{41}|$ は 6.5dB で、これは電力分

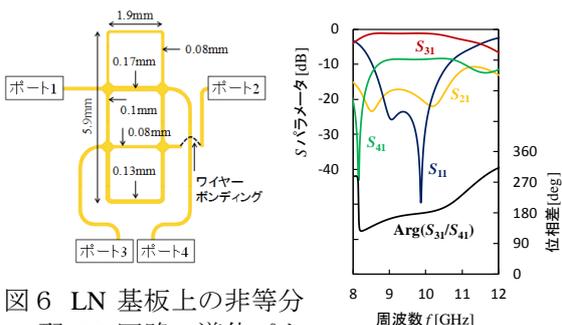


図6 LN 基板上の非等分配 RR 回路の導体パターン

図7 周波数特性 (解析結果)

配比では、4.5:1 に相当する。

図8にLN基板上に実際に作製したRR回路の写真を示す。導体膜はフォトリソグラフィと電解金メッキプロセスにより作成した。4ポート素子を測定するために新たに導入したプローバシステムで評価するためにプローブ接続用端子を設け、同一基板上に作製したTRL校正パターンを用いて校正を行った。これにより、参照面を基板上に設定して測定用端子部のインピーダンス不整合の影響を取り除いたため、図9に示すように良好な測定結果が得られた。中心周波数 11GHz 付近において S_{31} が少し波打っているが、これは、アイソレーションポートであるポート2からの僅かな反射が影響したと考えられ、これは解析により確認できている。

(2) 非等分配 RR 回路と変調電極とを一体化した波長チャープ制御 EOM の設計・試作

図10にRR回路を一体化したEOMの電極パターンを示す。変調電極長は 12mm とし、

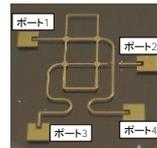


図8 試作したRR回路

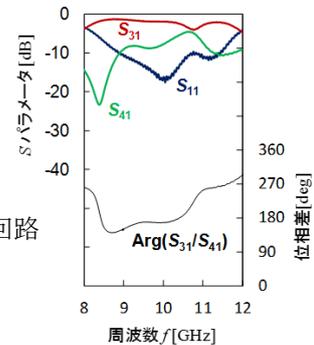


図9 プローバで測定したRR回路の特性

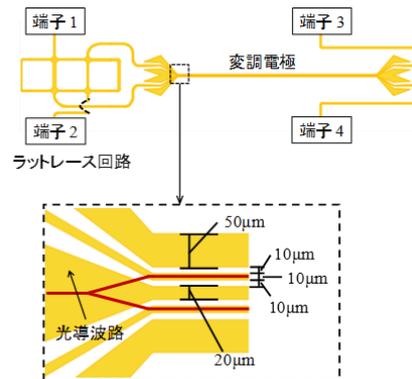


図10 RR回路を一体化したEOMの電極パターン

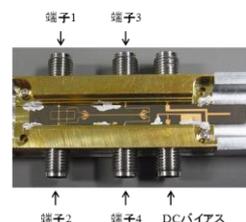


図11 試作したRR回路を一体型EOM

干渉計を構成する2本の光導波路上に2本の線路電極がそれぞれ配置されている。この線路電極の幅はともに $10\mu\text{m}$ で、中央の $20\mu\text{m}$ 幅の接地電極および外側の $50\mu\text{m}$ 幅の接地電極との間に、それぞれ $10\mu\text{m}$ のギャップを介して配置されたコプレーナ構造の変調電極とした。また、RR回路のポート3, 4はテーパ構造で線路を徐々に細くして各線路電極と接続した。RR回路は基板表面に接地電極がないマイクロストリップ構造であるので、それらを接続する際に接地電極同士は接続されていない。変調電極のすぐ横には光干渉の際の位相差バイアスの調整電極を配置している。光導波路は幅 $7\mu\text{m}$ で、Ti熱拡散により 0.5mm 厚のz-cutのLN結晶基板上に作製し、 SiO_2 による緩衝層を設けた後、電解メッキにより膜厚 $10\mu\text{m}$ の金でパターンを形成した。図11に測定用治具に取り付けた変調素子を示す。

(3) EOMのチャープパラメータの評価とプリチャープ変調への応用

①試作したEOMの変調特性の評価

作製したEOMの端子1にマイクロ波信号を入力し、他の端子には終端器を接続した。波長 $1.55\mu\text{m}$ のレーザ光源を用い、偏波コントローラにより偏波を調節し、光導波路に入射した。出力光はスペクトルアナライザにより観測した。図12に、変調光のスペクトルより算出した変調指数 A とチャープパラメータ α の周波数特性を示す。ここでは、位相差バイアスを変化させたときの変調光の搬送波と1次側波帯の強度の最大値と最小値から α と A を求める手法を新たに考案し、それを用いて算出した。

10GHzにおいて300mWのマイクロ波信号を入力した際の A は 0.22π rad、 α は0.47であった。変調指数、チャープパラメータはともに周波数による変動はあるが、 α は10GHz付近で約 ± 0.1 程度の範囲内にある。これ以外にも異なる設計条件でいくつかのEOMを作製したが、RR回路の電力分配比は10:1までのもので、最大0.6程度までのチャープパラメータが実現できている。

試作したEOMのチップサイズは約 $60\text{mm}\times 5\text{mm}$ で、この中に図3に相当する回路が集積化されており、位相調整などの後調整は不要である。また、端子1への単一の入力信号によってRR回路の電力分配比に応じたチャープ変調が可能である。このような高度な動作をするEOMを実用性の高い小型・ワンチップ構成で実現できたことは、大きな意義がある。また、この後に述べる様々な応用についても検討した。

②プリチャープ変調

光強度変調光を光ファイバ伝送させた後に、光検出器で検出すると、ファイバの波長分散のために特定の距離で検出感度が減衰する(Power Penalty)現象が起こる。この減衰距離が波長チャープに依存することを利

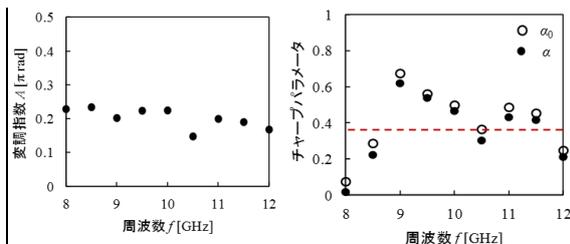


図12 変調指数 A とチャープパラメータ α の周波数特性

用して、プリチャープ変調による波長分散の影響の回避を検討した。

出力変調光を光ファイバ伝搬させ、フォトディテクタにより検出して、その出力を観測したものを図13に示す。ここで、光ファイバ伝送損失(0.2dB/km)は補償し、距離0で規格化している。また、チャープパラメータ $\alpha=0$, 0.47の時の理論計算結果も合わせて示している。図より計算結果と測定結果の一致から、試作したEOMの α は0.47であることが確認された。また、この実験結果から、40km付近において、 $\alpha=0$ の場合は検出感度が消失するところを、チャープ変調によってこれを10kmほどシフトさせて回避できることを示している。したがって、本EOMのチャープ変調によってファイバ分散による感度消失の影響を回避できることが確認できた。

(4) EOMの構造最適化と光周波数コム発生

①EOMの構造最適化

本研究の目標である7本の平坦光周波数コム発生に本EOMを適用するためには、0.3程度以上のチャープパラメータ α と 1.5π rad以上の大きな変調指数 A が必要と予想されている。先に作製したEOMの変調効率では、 1.5π radの A を得るためには計算上15W程度の入力電力が必要となり、実現が明らかに困難である。そこで、光変調器の変調効率の向上と数W程度の入力信号で動作できる耐電力性を目指して、光変調器の構造の改善を行った。

まず、図14に示すように、RR回路を変調電極と同じコプレーナ構造で再設計し、接続の際の変調信号の損失低減を図った。また、耐電力性能向上のために、金メッキプロセスの条件を最適化し、導体パターンには先の2

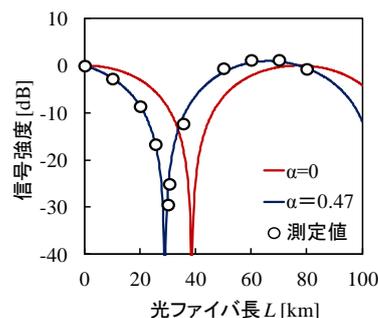


図13 光ファイバ長に対する信号強度の変化

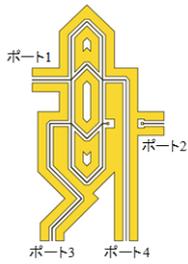


図 14 コプレナー構造の非等分配RR回路パターン

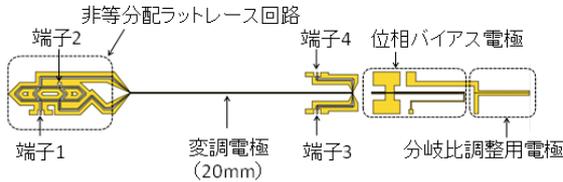


図 15 RR回路一体型構成の電極パターン



図 16 試作したEOM

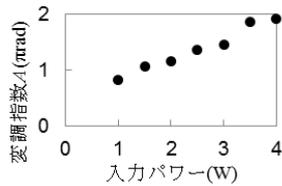


図 17 変調指数の信号電力依存性

倍の厚さの $20\mu\text{m}$ の厚膜の金を用いた。さらに、図のように構造を菱形にすることにより、回路の小型化を図っている。図 15 に RR 回路を一体化した EOM の導体パターンを示す。変調電極構造は先と同様である。RR 回路、変調電極ともにコプレナー構造であるために、接地電極が連続的に接続できている。電極長は 20mm とした。光電力分岐比の調整電極については本実験では使用していない。

作製した変調器を測定用治具に取り付けた写真を図 16 に示す。図 17 に 10.8GHz の変調信号に対する変調指数の入力パワー特性を示す。ここでは 5W 出力のパワーアンプで変調信号を増幅し、素子に印加した。最大の 4W 入力時でも正常に動作し、 $\alpha=0.34$ 、変調指数は 1.92π rad で、当初の目標を達成した。

②光周波数コム信号発生。
本 EOM を用い、変調動作時に変調光スペクトルが最も平坦になるように位相差バイアスを調整した。その時のスペクトル平坦度（中央 7 本または 9 本のスペクトル強度の最大と最小の比）を ΔI [dB] で表し、変調指数 A と ΔI の関係を図 18 に示す。また、参考のために $\alpha=0.34$ で計算した ΔI も示している。 $A=1.92\pi$ rad 付近で $\Delta I=1.98\text{dB}$ の最も平坦な 7 本のコム信号が得られた。図 19 は、その時のコム信号のスペクトルを示す。中央の 7 本のスペクトル成分が平坦で等間隔に並んだ良好なコム信号が得られており、本研究の当初の目標が達成できた。

(5) EOM の 3 次相互変調歪み補償の検討

通常の EOM は原理的に非線形特性を有するため歪みの発生が問題である。特に 3 次相

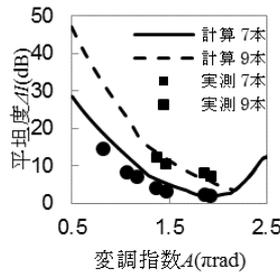


図 18 変調指数 A とスペクトル平坦度 ΔI の関係

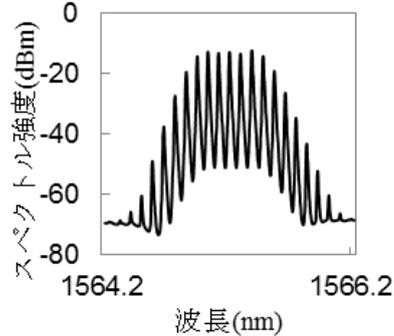


図 19 7本平坦光周波数コム信号の一例

互変調歪(IMD3)は信号周波数帯域内に発生するため深刻な影響を与える可能性がある。チャープ変調を行う 2 つの EOM を組み合わせさせたデュアル・パラレル型マッハツェンダ光変調器(DPMZM)を用いて IMD3 を光学的に補償する新しい方法を考案した。

図 20 に歪補償の原理図を示す。DPMZM において、並列接続された 2 つの EOM (MZM1, MZM2) を、同じ変調信号により、変調指数 A で互いに逆符号のチャープパラメータ ($\alpha_1=-\alpha_2$) を持つような光変調を行う。さらに、それら 2 つの変調光を $\Delta\phi$ の位相差をつけて合波させる。今、図に示すような角周波数 ω_1 、 ω_2 の 2 周波信号で動作させると、光検出器で 2 乗検波された受信出力には、通常は、基本波成分 (スペクトル強度 I_1) の両側に、非線形動作により $2\omega_1-\omega_2$ と $2\omega_2-\omega_1$ の IMD3 成分 (スペクトル強度 I_3) が生じる。

図 21 に、(a) $\alpha_1=\alpha_2=0$ 、(b) $\alpha_1=0.5$ 、 $\alpha_2=-0.5$ 、および、(c) $\alpha_1=1$ 、 $\alpha_2=-1$ の場合について、入力光強度で規格化した I_1 と I_3 の $\Delta\phi$ に対する変化を計算した結果を示す。ただし、 $A=0.1\pi$ とした。(a) では、 I_1 と I_3 は $\Delta\phi=\pi$ で両方とも同時に抑圧されるが、2 つの EOM に互いに逆符号のチャープを与えた (b) と (c) では、それぞれ、 $\Delta\phi=0.72\pi$ および、 $\Delta\phi=0.67\pi$ 付近に I_3 のみが減衰する点が生じることがわかる。

そこで、 $\Delta\phi$ を I_3 のみが抑圧される点に固定し、変調指数 A に対して I_1 と I_3 を計算した

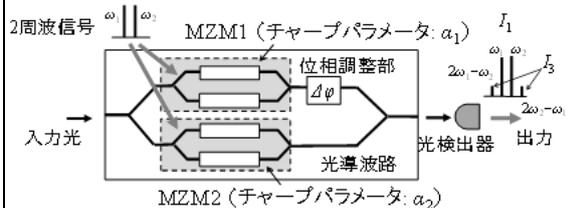


図 20 チャープ変調による歪補償の原理

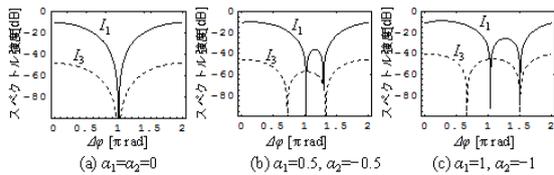


図 2.1 基本波および 3 次相互変調歪成分の $\Delta\varphi$ に対する変化

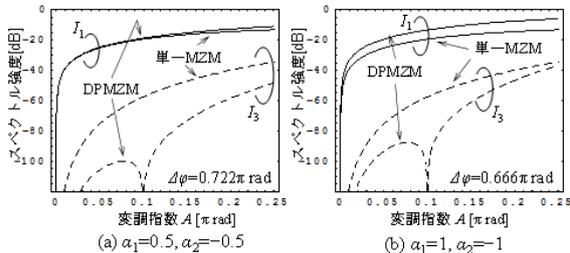


図 2.2 基本波および 3 次相互変調歪成分の変調指数 A に対する変化

結果 (太線) を図 2.2 に示す. 比較のために通常の単一 MZM による EOM の計算結果も示している (細線). 通常の単一 MZM に比べて I_3 が顕著に抑圧されることがわかる. 特に, $A=0.1\pi$ 周辺の広い範囲では 20dB 以上の歪補償効果が確認できる. 今後は, 本提案の歪み補償法の動作実証と, 歪み補償変調器の小型化・単一チップ化を目指していく.

(6) 成果の位置づけと今後

本研究で提案した電気光学変調器(EOM)は波長チャープを制御でき, 単一入力で動作するコンパクトな構造で実用性が高く, 産業上の意義も大きい. また, 光周波数コム信号発生などの他に, 当初の予定には無かった 3 次相互変調歪み補償などへの応用の有効性を示すことができた. 今後は, このようなチャープ変調を用いた EOM の新たな応用展開に関する研究を進めていく予定である.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 17 件)

- ① R.Nakamura, K.Yamamoto, T.Kawai, A.Enokihara, N.Yamamoto, T.Kawanishi, "Frequency Chirp Modulation by Electro-Optic Modulator Integrated with Microwave Rat-Race Circuit and Measurement of Chirp Parameter by Using Optical Fiber Dispersion," Proceedings of International Microwave Symposium, 査読有, THIF1-6, 2016.
DOI:10.1109/MWSYM.2016.7539999
- ② A.Enokihara, M.Yamamoto, T.Kawai, T.Kawanishi, "Low Chirp Modulation by Electro-Optic Intensity Modulator Using Microwave 180-Degree Hybrid Directly Formed on LiNbO₃ Substrate," IEICE Transactions on Electronics, 査読有, vol.E98-C, pp.777-782, 2015. DOI:10.1587/transele.E98.C.777
- ③ K.Yamamoto, T.Kawai, A.Enokihara,

T.Kawanishi, "Compact Electro-Optic Single Sideband Modulators Utilizing Miniaturized Branch-Line Couplers on LiNbO₃ Substrate," IEICE Transactions on Electronics, 査読有, vol.E98-C, pp.759-776, 2015.

DOI: 10.1587/transele.E98.C.769

④ K.Yamamoto, T.Kawai, A.Enokihara, T.Kawanishi, "Electro-Optic Single-Sideband Modulator Integrated with Branch-Line Coupler of Miniaturized Configuration Prepared on LiNbO₃ Substrate," Proceedings of European Microwave Conference, 査読有, EuMC35-1, pp.668-671, 2014.

DOI: 10.1109/EuMC.2014.6986522

⑤ T.Kawai, Y.Sumitomo, A.Enokihara, I.Ohta, K.Satoh, Y.Suzuki, H.Okazaki, S.Narahashi, "Parallel Ring-Line Rat-Race Circuit with Very Loose Coupling Utilizing Composite Right-/Left-Handed Transmission Lines," IEICE Transactions on Electronics, 査読有, vol.E97-C, pp.965-971, 2014.

DOI: 10.1587/transele.E97.C.965

〔学会発表〕(計 36 件)

- ①前田直樹, 中村亮太, 河合正, 榎原晃, 山本直克, 川西哲也「マイクロ波回路一体型電気光学変調器を用いた少数光周波数コム信号発生」電子情報通信学会総合大会, 2017 年 3 月 25 日, 名城大学(名古屋市).
- ②高瀬孔佑, 前田幸子, 河合正, 榎原晃, 他 3 名, 「波長チャープを用いた電気光学変調器の 3 次相互変調歪補償法の検討」, 電子情報通信学会 MWP 研究会, 2016 年 11 月 14 日, 機械振興会館(東京都).
- ③中村亮太, 山本勝之, 河合正, 榎原晃, 山本直克, 川西哲也, 「ラットレース回路一体型電気光学変調器による波長チャープ光変調と光ファイバ伝送特性の評価」, 電子情報通信学会 MWP 研究会, 2016 年 1 月 29 日, 神戸市産業振興センタ(神戸市).
- ④山本勝之, 河合正, 榎原晃, 川西哲也, 「波長チャープ変調のための非等分配ラットレース回路一体型電気光学変調素子」, 電子情報通信学会総合大会, 2015 年 3 月 13 日, 立命館大学(草津市).
- ⑤山本勝之, 河合正, 榎原晃, 川西哲也, 「電気光学変調器によるチャープ変調のための非等分配ラットレース回路の LiNbO₃ 基板上への作製」, 電子情報通信学会ソサイエティ大会, 2014 年 9 月 23 日, 徳島大学(徳島市).

6. 研究組織

(1) 研究代表者

榎原 晃 (ENOKIHARA, Akira)

兵庫県立大学・大学院工学研究科・教授
研究者番号: 10514383

(2) 研究分担者

河合 正 (KAWAI, Tadashi)

兵庫県立大学・大学院工学研究科・准教授
研究者番号: 30275309