

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成25年6月7日現在

機関番号：24506

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2010～2012

課題番号：22560337

研究課題名（和文） マイクロ波回路を集積化した高機能光変調素子の研究

研究課題名（英文） Investigation on highly functional light modulator integrated with microwave circuits

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

研究成果の概要（和文）：電気光学結晶であるニオブ酸リチウム(LN)基板上へのマイクロ波回路の設計手法の確立し、LN基板上で変調電極とマイクロ波回路とを一体化するための技術課題を解決し、マイクロ波90°ハイブリッド回路をLN基板上に集積化した電気光学光SSB変調を初めて実現した。また、ハイブリッド回路部分の専有面積を従来構造の約1/3に小型化することに成功し、同回路を一体化した小型SSB変調素子を作成し、良好な変調特性を確認した。さらに、180°ハイブリッド回路であるラットレース回路の集積化した光変調素子の検討を行った。

研究成果の概要（英文）：Microwave circuits have been prepared onto LiNbO₃(LN) electro-optic crystal substrate. Integration of microwave circuits with the EO modulator has been realized. Microwave 90-degree hybrid was directly prepared onto the LN substrate, to create those two modulation signals from a single input signal. The coupler circuit was designed with miniaturized configuration of one third in area compared to the conventional structure. The SSB light modulator using this miniaturized coupler circuit was fabricated and its workability was confirmed by the experiments. Additionally, the rat-race circuit as a 180-degree hybrid was also considered to be prepared on LN substrate and integrated with EO modulator.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
22年度	1,800,000	540,000	2,340,000
23年度	900,000	270,000	1,170,000
24年度	600,000	180,000	780,000
年度			
年度			
総計	3,300,000	990,000	4,290,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：電気電子工学・電子デバイス・電子機器

キーワード：光デバイス・光回路

1. 研究開始当初の背景

将来期待されている高速ユビキタスネットワーク環境構築のためには、RoFに代表される光ファイバリンクを利用した高品質・高密度な高速無線信号伝送システムの普及が不可欠である。このような将来のRoFシステ

ムでは、小型化・低コスト化とともに、高密度・高品質な伝送も必要であり、光SSB変調や光FM変調などの高度な変調方式も要求される。特に光SSB変調では、通常の強度変調に比べて、波長多重方式での高密度伝送ができ、光ファイバの波長分散の影響を受けにく

いなどの優れた特徴が発揮される。

一方、光変調においては、直接変調方式では、高速変調や光SSB変調などの高機能な変調は不可能である。電気光学(EO)変調素子は高速性に優れ、原理的にSSBやFM等の高度な光変調動作も可能であるため、将来のRoFシステムには不可欠である。

EO変調素子による光SSB変調では、図1に示すように、EO結晶基板上に形成された光導波路によるマッハツェンダ干渉計を構成する2本の光導波路にそれぞれ独立に変調電極(A,B)を形成し、それぞれの電極に同振幅で 90° の位相差を持たせた変調信号を印加することによって実現される。ただし、変調特性の劣化を防ぐためには、両電極に印加する変調信号の振幅と位相差は精密に制御される必要がある。そのため、実際の光SSB変調器では、図2のように外部に設置したマイクロ波回路装置によって、変調信号の振幅と位相関係を制御する大がかりな構成となっており、それらの調整も必要である。

このような複雑な振幅・位相制御回路をEO変調素子内に一体化すれば、極めて小型で高機能な光変調素子を実現でき、RoFシステムの飛躍的な小型化、動作の安定化が期待できる。EO変調素子基板上に平面回路構造の振幅・位相制御回路を直接構成する方法は、小型化に最も効果的であるが、EO結晶(ニオブ酸リチウムなど)の誘電率異方性が大きく、マイクロ波回路設計の実績がほとんど無い。今回提案するような複雑で高精度が要求される振幅・位相制御回路を構成する試みは初めてである。

2. 研究の目的

本研究の全体構想は将来の光ファイバ通信システムを見据え、高速動作可能で従来にない高性能な光変調素子を実現することである。そのために、EO変調素子において、変調信号を処理するための平面回路構成の

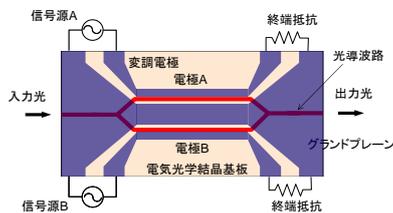


図1 2電極型電気光学変調素子の構成

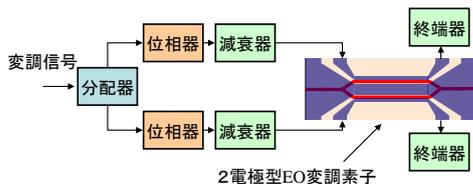


図2 電気光学SSB変調器の従来構成

マイクロ波回路を光導波路回路と同一光学基板上に集積化・一体化することによって、変調素子を飛躍的に小型化・高機能化し、動作の安定化を図ることを目的とする。

3. 研究の方法

上記技術課題を克服し、電力分配器や位相器などのマイクロ波回路を光回路基板上に集積化することによって、高精度な振幅・位相制御を行い、光SSB変調を可能とする高機能EO変調素子の実現を目指す。マイクロ波回路(振幅・位相制御回路)は直接EO結晶基板上に金属導体パターンで集積化する。目標仕様は、1550nm帯光において動作周波数帯は5GHzあるいは10GHzで、比帯域は10%以上、出力光スペクトルのスプリアス抑圧比30dB以上とする。本研究における主な技術的検討項目を以下に示す。

1. マイクロ波回路を集積したEO変調素子の全体構成を提案
2. 振幅・位相制御するマイクロ波回路設計・誘電率異方性を有する基板上への回路設計・回路構成の小型化
3. EO結晶上への回路作製
4. 光変調素子の設計、作製・評価
動作実験によりその性能を評価し、本研究成果の有効性を実証する。

4. 研究成果

(1) マイクロ波回路を集積したEO変調素子の全体構成の提案

90° ハイブリッド回路であるブランチャインカップラ(BC)は、図3に示す構造を有し、入力信号を等振幅で 90° の位相差を持つ2つの信号に分配する。そこで、BC回路を一体化した光SSB変調素子構造を提案した。

(2) 誘電率異方性を有する基板上への回路設計の検討

①ニオブ酸リチウム基板の上の伝送線路の特性評価

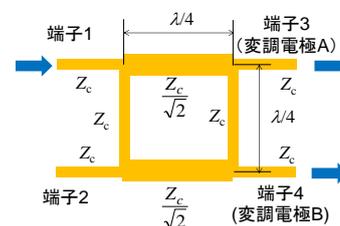


図3 90° ハイブリッドの基本構成

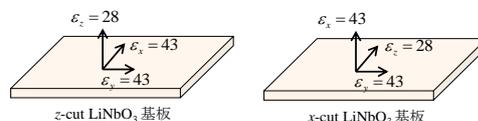
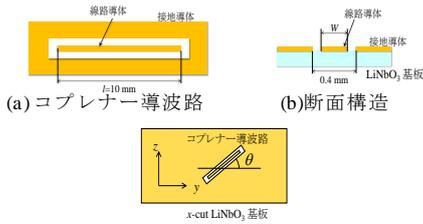


図4 LiNbO₃結晶基板の誘電率異方性



(a) コプレナー導波路 (b) 断面構造 (c) x-cut LN基板の際の線路角度
図5 試作したコプレナー導波路構造

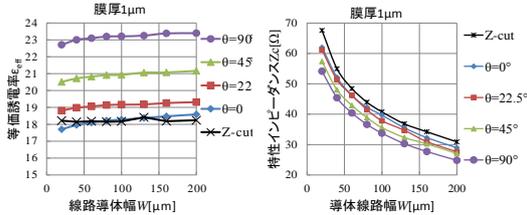


図6 等価誘電率 ϵ_{eff} と線路導体幅 W の関係 図7 特性インピーダンス Z_c と線路導体幅 W の関係

電気光学結晶であるニオブ酸リチウム (LiNbO_3 , LN) の誘電率は図 4 に示すとおり、 $\epsilon_x = \epsilon_y = 43$ 、 $\epsilon_z = 28$ であり、誘電率異方性が非常に大きく、誘電率自身も大きいので、通常の回路シミュレータを用いて、直接回路設計を行うことは事実上不可能である。そこで、まず初めに LN 基板上にコプレナー型伝送線路を形成し、その等価誘電率 ϵ_{eff} と特性インピーダンス Z_c を実験的に評価した。

LN 基板は図 4 に示すように x-cut LN では、表面内の面内方向でも異方性が生じる。そこで、図 5 にあるように、線路の方向と結晶工学上の y 軸方向との間の角度を θ とし、いくつかの θ に対するパターンを 0.5mm 厚の z-cut および x-cut の LN 基板上に作成した。測定では、線路の一方の端を開放して、他方の端からプローブを使って、反射損 (S_{11}) を測定した。図 6 には、測定した反射係数から算出した ϵ_{eff} を、横軸線路導体幅 W で表している。線路断面内の誘電率は、x-cut では、 $\theta=0^\circ$ の時は垂直方向が 43 (ϵ_x) 水平方向が 28 (ϵ_z) であるが、 $\theta=90^\circ$ では、垂直 (ϵ_x)、水平 (ϵ_y) 共に 43 となり、そのため ϵ_{eff} も θ に従って増加している。線路導体幅 W に対する ϵ_{eff} の変化については、 W を小さくすると空気中への電界の漏れが増えるので ϵ_{eff} が低下すると考えられる。z-cut については、 W を小さくすると空気中への電界の漏れが増えると同時に、基板内では水平方向 ($\epsilon=43$) の電界成分が、垂直方向 ($\epsilon=28$) に対して相対的に増えるので互いに打ち消し合い、 ϵ_{eff} の変化が少なかったと考えられる。

図 7 に、実測から求めた特性インピーダンス Z_c を示す。 Z_c は単位長あたりの線路容量に影響されやすいので、 W を大きくすると線路導体と接地導体との間隔が小さくなるため、線路容量が増加し、 Z_c が低下している。また、 θ によっても線路容量が変化するのがその影

響は、 W 程大きくはない。

(3) コプレナー型コプレナー型構造を用いた一体型光 SSB 変調素子の検討

① LN 基板上へのコプレナー型ブランチラインカップラの作成・評価

x-cut の LN 基板上では、線路の方向と結晶工学上の y 軸方向との角度によって等価誘電率、特性インピーダンス Z_c が変化することがわかった。そこで、面内方向での異方性のない z-cut の LN 基板上に BC の形成を行った。BC は、特性インピーダンス 50Ω を基準とすると、線路長 1/4 波長で、 $Z_c = 50\Omega$ と 35Ω の 4 つの線路からなり、Port1 から入力された信号が Port3 と Port4 に位相差 90° で等分配されて出力し、Port2 はアイソレーション端子となる。図 8 に、先の結果を基に 10GHz で設計したコプレナー線路型 BC 構造を、図 9 には電磁界解析結果を示す。その電力分配比の非対称性 (1:1 からのずれ) は 0.14dB であった。位相関係はほぼ 90° を満足している。

次に、実際に 0.5mm 厚の z-cut LN 基板上に 1 μm 厚の金薄膜でコプレナー線路型 BC の測定回路パターンを作製した。基板と金薄膜の密着性を向上させるために 10nm 厚の Ti 層を下地に用い、リフトオフ法によりパターン化を行った。パターンの作製後、ワイヤーボンディング装置を用い、コプレナー線路構造部分にエアブリッジを作製した。

測定では高周波プローブを用い、LN 基板上に形成した TRL 校正パターンで校正して参照面を基板上に設定することで、正確な測定に成功した。測定結果を図 10 に示す。10.6GHz で減衰し、電力分配比の非対称性は 0.19dB

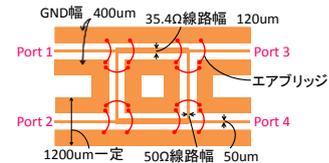


図8 LN基板上に設計したコプレナー型BC構造

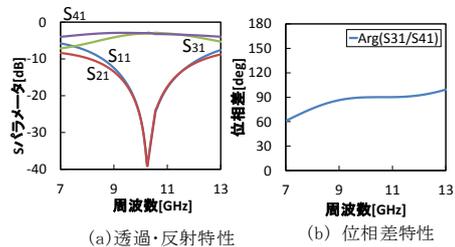


図9 BC回路の電磁界解析結果

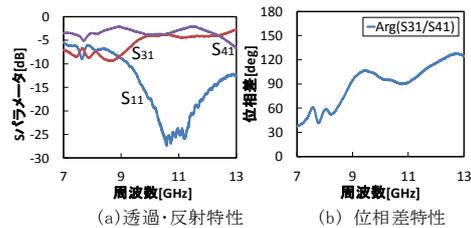


図10 BC回路の測定結果

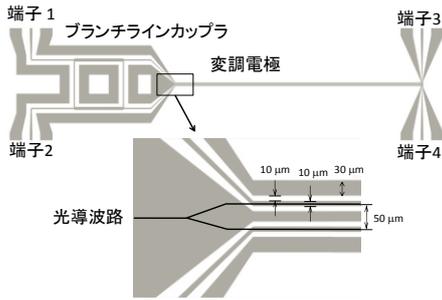


図11 変調電極一体化構造の形状

であった。位相関係もほぼ 90° であった。これより、電磁界解析の結果に比べ高い周波数で減衰しているが、電力分配比の非対称性、位相関係については大きな差は出ておらず、設計に近い特性が得られた。

②コプレナー型 BC を一体化した光 SSB 変調素子の作成・評価

図 11 に設計した BC 一体型構成の電気光学変調素子の変調電極を示す。表面に接地電極を持つコプレナー線路を用い、BC からの線路幅を徐々に縮小しながら変調電極に合わせた。変調電極は長さ 10mm で、接地電極に $10\mu\text{m}$ のギャップを介した幅 $10\mu\text{m}$ の平行する 2本の線路導体からなり、それぞれの線路導体の下に光導波路を配置した。2本の光導波路の間隔は $50\mu\text{m}$ である。

このパターンを光導波路を表面に作製した 0.5mm 厚の z -cut の LN 基板上に $1\mu\text{m}$ 厚の金薄膜で作製した。光導波路は幅 $7\mu\text{m}$ で、金属 Ti の熱拡散により作製した。変調電極の横に位相バイアスを 90° に設定するためのバイアス電極も作成した。図 12 に試作した変調素子の写真を図 13 には 8.5GHz での変調光スペクトルを示す。側波帯抑圧比は 30dB

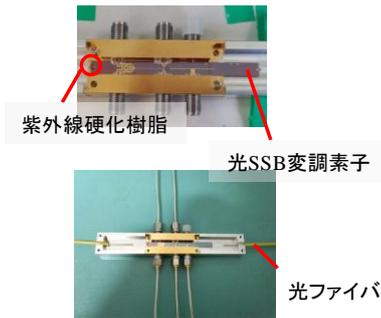


図12 コプレナー型BC一体型光SSB変調素子

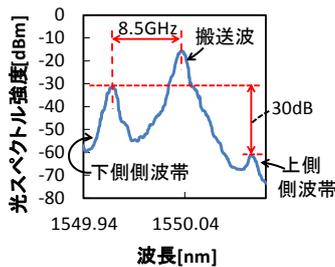


図13 変調光スペクトル

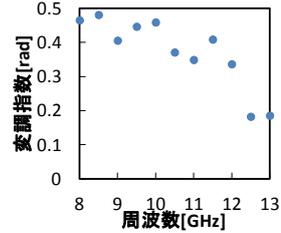


図14 変調指数の周波数特性

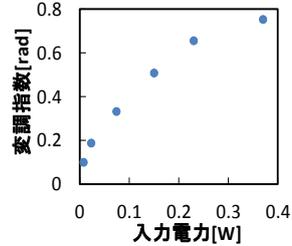


図15 変調指数の入力電力特性

以上あり、非常に良好な光 SSB 信号が確認できた。この側波帯抑圧比は、BC 回路の電力分配比率の非対称性に依存する。BC の電力分配比率を正確に制御することにより、側波帯抑圧比はさらに向上すると考えられる。変調波をポート 1 に入力したときの変調指数は 0.52rad であった。図 14 に、入力電力 0.1W 一定の周波数特性の実験結果を、図 15 に、周波数 10GHz 一定の入力電力特性の実験結果を示す。図 14 より、周波数が高いほど変調効率が下がっているが、これは光変調自身の周波数特性の影響によるものと推測される。図 15 より、入力電力に対し、変調指数は二次曲線的に増加し、入力電圧に比例していることがわかる。

(4)小型ブランチラインカップラと変調電極とを一体化した光 SSB 変調素子

①ブランチラインカップラの小型化

次に、BC の小型化と広帯域化について検討する。図 11 からわかるとおり、BC 回路のサイズは変調電極に比べてかなり大きくなる。そこで小型の BC 回路を LN 基板上で設計し、それを変調電極と一体化した光 SSB 変調素子について検討を行った。ここでは、回路設計の柔軟性を重視し、コプレナー構造に代えて、マイクロストリップ構造を採用した。

図 16 に、マイクロストリップ構造で、 0.5mm 厚の z -cut LN 結晶基板上に、 10GHz で設計した通常の BC 回路を示す。この回路を、縦方向はミアンダ構造線路で、横方向は終端開放容量性スタブを複数個付加した遅波線路で小型化した構造を図 17 に示す。中心周波数は 10GHz で、厚さ $1\mu\text{m}$ の金薄膜パターンからなる。終端開放容量性スタブは一つの容量が 0.15pF で、上下の線路にそれぞれ 8 個付加し遅波線路特性を持たせることにより、より短い長さで 4 分の一波長の電気長を実現

した。そして、縦方向線路のミアンダ構造と合わせて、BC 部分で約 1/3 に面積縮小が実現できた。図 18 に平面回路シミュレータ (genesys) で求めた周波数特性を示す。図より、10GHz では位相差 90° で等分配されていることがわかる。

②小型ブランチラインカップラと変調電極とを一体化した光 SSB 変調素子

図 19 に小型 BC 回路と変調電極とを接続した一体型電極パターンを示す。BC の線路間隔が小さいので線路変換部の占有面積も大幅に削減することができた。実際に、先ほどと同様の工程で実際に光変調素子を試作したものを図 20 に示す。この変調素子に 10GHz のマイクロ波信号を入力し、位相差バイアスを 90° に設定して観測した変調光スペクトルの例を図 21 に示す。一方の 1 次側帯がほぼ完全に抑圧された非常に良好な光 SSB 信号が得られていることがわかる。図 22 に入力電力 0.1W 一定での変調指数の周波数特性を、図 23 に周波数 10GHz 一定の変調指数の入力電力特性を示す。これら結果より、BC 部分の回路構成の改良により小型化された電極構造を有する光 SSB 変調素子の実現と性能の確認ができた。

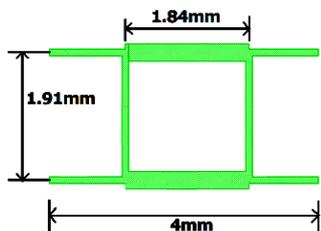


図16 通常のマイクロストリップ構造BC

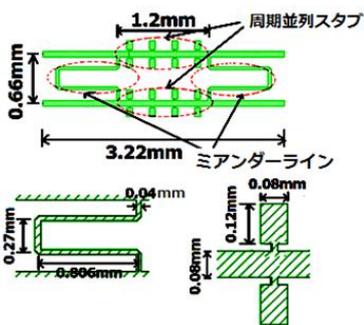
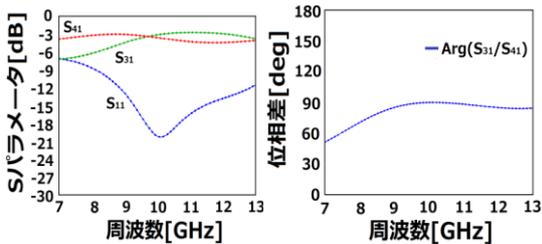


図17 小型化原理と小型BC構造



(a) 透過・反射特性 (b) 位相差特性

図18 小型BCの解析結果

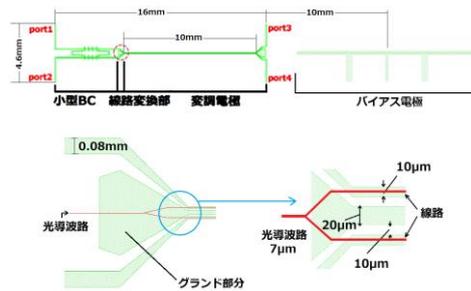


図19 小型BC一体型光SSB変調素子の電極構造

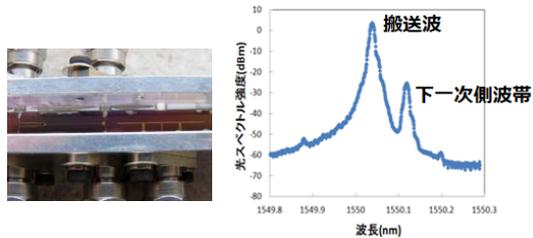


図20 小型BC一体型光SSB変調素子の写真

図21 小型BC一体型SSB変調素子の変調光スペクトルの一例

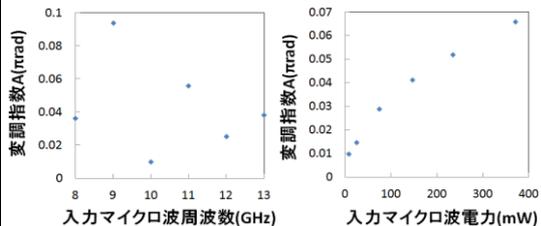


図22 変調指数の周波数特性 図23 変調指数の入力電力特性

(5) 光 FM 変調に向けたラットレース回路を一体化した光位相変調素子の検討

マイクロストリップ構造のラットレース (RR) 回路は図 24 に示すように、1つの 1/4 波長の線路と 3つの 1/4 波長線路から構成され、入力端子 1 から入力された信号は出力端子 1, 2 に逆位相で出力され 180° ハイブリッド回路として動作する。一方、入力端子 2 から入力された信号は、2つの出力端子に同位相で等分配される。したがって、出力端子 1, 2 を図 1 の 2 電極型光変調素子の 2つの電極にそれぞれ接続して、光変調動作をさせると、入力端子 1 に変調信号を入力した時は、逆相の信号が変調電極に入力されるので、干渉により光強度が変調される。一方、入力端子 2 に変調信号を入力した時は、同位相の信号が変調電極に入力されるので干渉は起こさず、光強度は変調されないが、位相変調成分は残る。したがって、入力端子 1 は振幅変調入力、入力端子 2 は位相変調入力端子となる。位相変調された光信号は、変調信号を時間微分した信号で周波数変調されていることと同等なので、予め、変調信号を演算処理しておくことによって光 FM 変調を実現することも可能である。

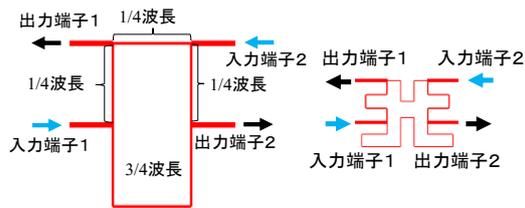


図24 標準的なマイクロストリップ構造のRR回路

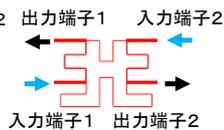


図25 小型RR回路の構成

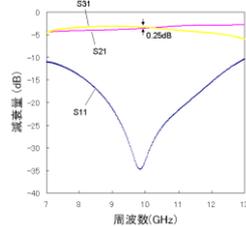


図26 小型RR回路の透過・反射特性

実際に、RR回路を一体化した変調素子を検討した。ただし、標準のRR回路はBC回路に比べてもサイズが大きいのので、RR回路の小型化についても検討した。図25はミアンダライン構造を利用して小型化した回路パターンで、これにより、標準構造よりも大幅に専有面積を削減できた。先ほどと同様に、0.5mm厚のLiNbO₃基板上に、100nmで設計した、平面回路構造の光変調素子構造を解析した結果を図26に示す。入力信号が2つの出力端子に等分配されていることがわかる。図25に示すRR回路と変調電極とを一体化した構造により、光FM変調も可能な一体型光変調素子が実現できることがわかった。

(6) 成果の位置づけと今後

マイクロ波回路を光回路基板に集積化することによって、高精度な振幅・位相制御を行い、ワンチップ構成の小型光SSB変調素子を実現した。本研究は、光学素子技術とマイクロ波・ミリ波回路技術との融合領域にあり、従来ほとんど検討されてこなかった内容である。複雑で高精度が要求される振幅・位相制御回路をLN基板上に直接形成し、光変調素子と一体化構成する試みは初めてであり、工学的価値も大きい。また、この研究課程で、高誘電率で異方性の大きなLN基板上へのマイクロ波回路の直接作成するというマイクロ波工学の分野でも極めて重要な技術課題を解決することができた。

今後は、本結果をさらに発展させ、より複雑で高度な光変調素子をマイクロ波回路一体型構成で実現させる予定である。特に、RR回路や他の回路も集積化した変調素子についても積極的に検討し、将来のROFシステム等の高速のアナログ信号を扱う高度な光変調素子を実現していきたいと考えている。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計5件)

① Y.Sumitomo, T.Kawai, A.Enokihara, 他5名, "Compact Wideband Rat-Race Hybrid Utilizing Composite Right/Left-Handed Transmission Lines", IEEE 13th Topical Meeting on Silicon Monolithic Integrated Circuits in RF Systems, WE3P-17, pp.207-209, 2013.

DOI: 10.1109/SiRF.2013.6489481

② A.Enokihara, T.Kawai, and T.Kawanishi, "Optical two-tone generation and SSB modulation using electro-optic modulator with suppressing redundant spectrum components", International Journal of Microwave and Wireless Technologies, Vol.3, no.3, pp.295-300, 2011.

DOI:10.1017/S175907871100047X

③ T.Kawai, H.Taniguchi, I.Ohta and A.Enokihara, "Broadband branch-line coupler with arbitrary power split ratio utilizing microstrip series stubs", 2010 European Microwave Conference (EuMC), pp. 1170-1173, 2010.

URL: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=5616093>

〔学会発表〕(計19件)

① 山本勝之他, 「LiNbO₃基板上の小型ブランチラインカップラと光SSB変調への応用」, 電子情報通信学会全国大会, 2013年3月19日~22日, 岐阜市.

② 米沢友里子他, 「マッハツェンダー型光変調器における変調電極間結合の光変調動作に与える影響の検討」, レーザー学会学術講演会, 2013年1月28日~30日,

③ 川村一代他, 「コプレナー型ブランチラインカップラを一体化した電気光学光SSB変調素子」 電子情報通信学会マイクロ波・ミリ波フォトニクス研究会, 2013年1月24日~25日, 吹田市.

④ 榎原晃他 「マイクロ波分配回路を一体化した電気光学変調素子の検討 ~LiNbO₃基板上へのブランチラインカップラの作製~」 電子情報通信学会マイクロ波・ミリ波フォトニクス研究会, 2012年4月6日, 東京都.

⑤ 榎原晃他 「光SSB変調器のためのマイクロ波分配回路のLiNbO₃基板上への作製」, 電子情報通信学会総合全国大会, 2012年3月20日, 岡山市.

〔その他〕

展示会: マイクロウエーブ展 2010, 2011, 2012 大学展示に出展 (2010年12月8日~10日、2011年11月30日~12月2日、2012年11月28日~30日、横浜市)

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