

令和 6 年 6 月 3 日現在

機関番号：24506

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2020～2023

課題番号：20K04601

研究課題名(和文)多モード干渉光導波路構造を用いた高機能な電気光学素子の研究開発

研究課題名(英文)Research on Electro-optic devices using multi-mode interference waveguides

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) 3,400,000円

研究成果の概要(和文)：多モード干渉(MMI)光導波路素子を、初めてTi拡散LN導波路で実現した。そして、多分岐のMMI光結合器を用いて、新たな機能を持つ電気光学変調素子を提案し、実験的にその動作実証を行った。主な具体的成果としては、チューナブルな2×2MMI光結合器を設計し、それを用いて50dBを超える高消光比のマッハツェンダ光変調器(MZM)や側波帯抑圧比の優れた光単一側波帯(SSB)変調器を実現した。また、1×3光結合器を用いた3並列干渉構造光変調器構造を提案し、光SSB変調器や光ファイバの分散補償が可能な光変調器などの高機能な光変調器の動作実証を行った。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では、今までなされてこなかったTi拡散LN光導波路を用いたMMI導波路素子技術を確立した。その技術を用いて、従来のY分岐光導波路では実現不可能な多分岐の光結合器を、電気光学効果を有するTi拡散LN導波路で初めて実現し、これらMMI結合器を用いて、従来にない高性能な光変調器を、非常にシンプルな構成で実現した。高速で低遅延の通信が求められる6Gなどの将来の通信システムなどにおいて、これら高機能な光変調器の利用が期待できる。

研究成果の概要(英文)：Multimode interference (MMI) optical waveguide devices have been realized using Ti-diffused LN waveguides for the first time. Then, electro-optic modulators with new functions were proposed using multi-branch MMI optical couplers, and their operation was experimentally demonstrated. The main results include the design of a tunable 2 × 2 MMI optical coupler and the realization of a Mach-Zehnder modulator (MZM) with a high extinction ratio exceeding 50 dB and an optical single sideband (SSB) modulator with an excellent sideband suppression ratio using the MZM. In addition, a three-parallel interference optical modulator structure using 1 × 3 optical couplers was also proposed, and the operation of highly functional optical modulators such as an optical SSB modulator and an optical modulator capable of optical fiber dispersion compensation were demonstrated.

研究分野：マイクロ波フォトンクス

キーワード：多モード干渉光導波路 電気光学変調素子 ニオブ酸リチウム 光結合器 90°ハイブリッド チタン  
拡散光導波路

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

マッハツェンダ型電気光学変調器(MZM)は、高速で高品質な光変調が可能のため、大容量光ファイバ通信等で広く用いられている。MZMでは、単一モード光導波路によるマッハツェンダ干渉計を構成し、分岐・合波には通常は Y 分岐光導波路が用いられる。基板には、電気光学効果を有するニオブ酸リチウム(LiNbO<sub>3</sub>, LN)結晶が現在の通信システムで多く使用されている。LNは安定な材料で、金属チタン(Ti)を熱拡散することで容易に低損失な光導波路を形成できる。一方で、光導波路内で2次元的に光波を伝搬させて、平面的な合波・干渉により複雑な動作を可能にする多モード干渉(Multi-Mode Interference, MMI)導波路素子が提案されている。2×2 光カップラ(あるいは、光結合器とも言う)などの複数端子の光カップラが実現できるので、電気光学素子の光回路の一部に MMI 導波路を用いれば電気光学素子の高機能化が期待できる。

しかし、MMI 導波路は、構造設計において電磁界解析などの高度な手法が要求され、さらに、設計した構造を正確に再現できる導波路構造が望まれる。そのため、MMI 素子には、Si などの半導体や SiO<sub>2</sub> のように高精度に微細加工できる材料で、リッジ型構造の導波路が主に用いられてきたが、Si や SiO<sub>2</sub> は電気光学効果を有しない材料である。これに対して、LN は異方性を有し、また、Ti 拡散導波路は屈折率が連続的に変化するため、Ti 拡散 LN 導波路で高精度に MMI 構造を設計することは困難であった。先行研究では、Ti 拡散 LN 導波路を用いた MMI 素子を実際に試作した報告は、申請者が調査した限り存在しない。

### 2. 研究の目的

本研究の独自な点は、今までなされてこなかった Ti 拡散 LN 光導波路を用いた MMI 構造素子を具体的に設計し、試作して動作実証まで目指すところにある。そして、この MMI 素子技術を確認し、それを基に、従来に無い新しい構成の電気光学素子を実現するところに創造性を発揮していく。

### 3. 研究の方法

本研究の技術課題は、Ti 拡散 LN 導波路による MMI 導波路素子の設計、作製、評価の一連の手法を確認し、MMI 導波路素子の特性の電界制御を可能とする構成を検討し、MMI 構造による光結合器を用いた高性能で高機能な高速光変調素子の設計、作製と、その動作を実験的に確認することである。

### 4. 研究成果

#### (1) 2×2MMI カップラを用いたマッハツェンダ型光学変調器

##### 1.1 2×2MMI カップラの特性と高消光比変調動作

MMI カップラを用いたマッハツェンダ型光学変調器(MZM)の基本構成を図 1 に示す。入力側に 1×2MMI カップラ、出力側にチューナブルな 2×2MMI カップラを用いて構成し、ビーム伝搬法(BPM)を用いてカップラの構造を設計した。基板は厚さ 0.5mm の z-cut LN 基板を用い、光導波路は 85nm 厚の Ti を 1035°C、7.8h 熱拡散して作製した。2×2MMI カップラには、図 2 に示すように分配比制御のための電極を表面に設け、分配比調整電圧  $V_T$  を印加する。1.55 $\mu\text{m}$  光を用い、 $V_T=0$  で、低周波変調信号  $V_m$  を与えた際の出力光強度の変化を図 3 に、 $V_T$  を変化させたときの出力 2 の変調の際の消光比、および、2×2 MMI カップラの出力位相差の測定結果を図 4 に示す。これらの結果より、 $V_T$  によって消光比が変化し、 $V_T=0$  では消光比が 50dB 以上の光変調動作を観測

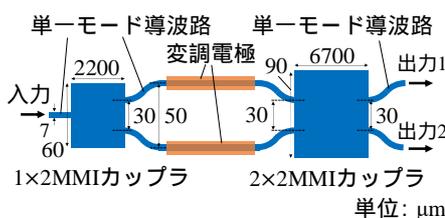


図 1 MZM の構成

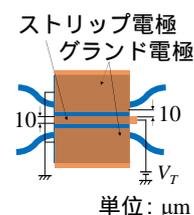


図 2 分配比制御電極を設けた 2×2MMI カップラ

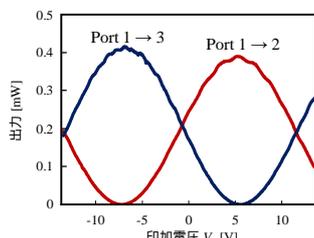


図 3 変調電圧  $V_m$  に対する出力光強度の変化

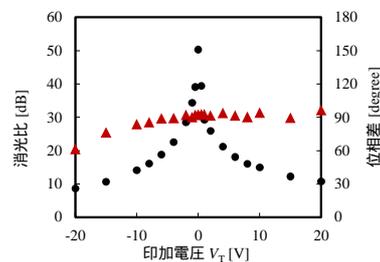


図 4 印加電圧  $V_T$  に対する消光比と位相差の変化

し、その際の出力位相差がほぼ  $90^\circ$  となり、本 MMI カップラが光  $90^\circ$  ハイブリッドとして動作していることが確認できた。

## 1.2 光 SSB 変調

光 SSB 変調は光ファイバの波長分散の影響を受けにくい光ファイバ無線においても有用である。図 5 に光 SSB 変調のための高周波変調電極を示す。10GHz で設計したマイクロ波  $90^\circ$  ハイブリッドとして動作するブランチラインカップラ回路(BC)とコプレーナ線路からなる変調電極とを直接接続した構造である。これにより、単一の入力信号で  $90^\circ$  位相差を持つ 2 つの信号が変調電極に印加されるので、位相推移法に基づく光 SSB 変調が実現できる。図 6 に 200mW の変調信号を入力し、いくつかの  $V_T$  で観測した出力 2 の変調光スペクトルを示す。 $V_T$  の調整により MMI カップラの分配比が変化することで、不要側波帯の強度が変化し、 $-4.3V$  の時に最大の側波帯抑圧比(37dB)が得られた。この電圧は図 4 に示した最大消光比での  $V_T(0V)$  とは異なるが、これは、BC のマイクロ波分配比のずれなどが原因で生じる 2 つの変調電極間の変調指数のアンバランスを  $V_T$  で補償しているものと思われる。

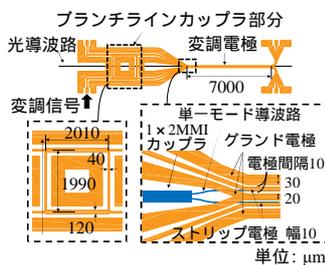


図 5 光 SSB 変調用電極

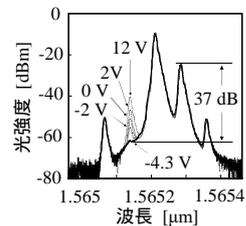


図 6 変調光スペクトル

## (2) 多重並列干渉光変調器[3]

### 2.1 3 並列干渉光変調器

次に、MMI 光カップラを用いた多重並列干渉構造の一つとして、図 7 に示す 3 並列構造の光変調器について検討した。ここでは、光導波路 1 と 3 とで通常の MZM を構成して光変調動作をさせる。中央の光導波路 2 からは、無変調光( $A_2=0$ )を合波比  $\eta_2$  と位相  $\phi_{b2}$  でこの変調光に重畳して干渉させ、変調光スペクトルの搬送波成分を制御する。

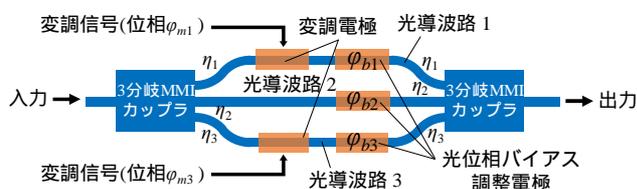


図 7 3 並列干渉光変調器

#### 2.1.1 3分岐 MMI 光カップラの作製・評価

はじめに、主要な構成要素である 3 分岐 MMI 光カップラの設計・評価について述べる。図 8 (a) には、波長  $1.55\mu\text{m}$  で設計した Ti 拡散 LN による 3 分岐 MMI カップラの光導波路構造を示す。MMI 導波路部の幅  $W = 90\mu\text{m}$ 、入出力導波路の間隔を  $W_p = 30\mu\text{m}$  とした。多モード導波路部の長さ  $L$  は  $2.5\sim 4\text{mm}$  の範囲で作製した。入出力導波路幅は  $7\mu\text{m}$  とし、損失の低減と構造上のトレランスの改善のために図のように導波路幅を最大  $20\mu\text{m}$  までテーパ状に広げて MMI 光導波路部と接続している。光導波路は先と同様の条件で作製した。図 8 (b) には、 $L$  に対する光電力分配比と過剰損失を測定した結果を示す。損失は同基板上に作製した単一モードの直線導波路との挿入損の差から推定している。作製した光カップラの分配比について  $\eta_1$  と  $\eta_3$  とがほぼ等しい対称性を維持した状態で  $\eta_2$  は  $L$  によって変化している  $L=3.4\text{mm}$  付近ではほぼ 3 等分配となり、このときの過剰損失は約  $1.4\text{dB}$  であった。

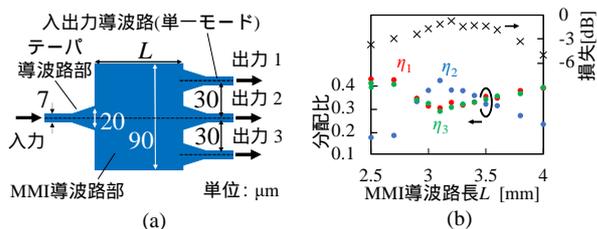


図 8 3 分岐 MMI カップラ  
(a) 光導波路構造 (b) 測定結果

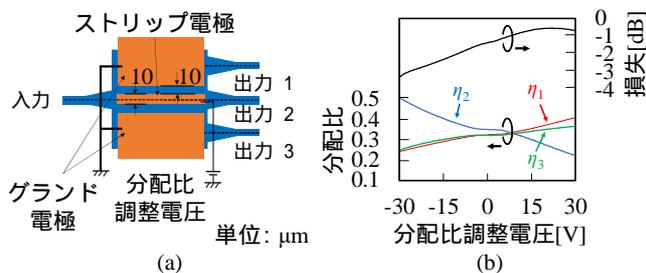


図 9 3 分岐 MMI カップラの光電力分配比調整  
(a) 電極構造 (b) 測定結果変調光スペクトル

次に、光電力分配比の電圧調整について検討した。図 9 (a) に示す構造の電極をカップラ上に形成し、光電力分配比を測定した結果を図 9 (b) に示す。 $\eta_1$  と  $\eta_3$  はほぼ等しいまま、 $\eta_2$  を  $0.22\sim 0.5$  の範囲で制御できていることが確認できた。MMI 導波路部の伝搬モード間の実効屈折率差が印加電界で効果的に変化し、 $\eta_2$  が調節できたものと思われる。

### 2.1.2 光 SSB 変調の変調制御

次に、光 SSB 変調において、変調光スペクトルの搬送波成分を調節して、変調度を増大化することを検討した。変調光スペクトルの搬送波側波帯強度比  $R$  を調節することで光電力変調度  $M$  ( $=$ 光強度振幅  $I_s$  / 平均光強度) の調節が原理的に可能である (図 10 (a))。そこで、光 SSB 変調を図 7 の光導波路 1, 3 を使って行い、光導波路 2 に分配された無変調光には位相バイアス  $\phi_{b2}$  を与えて、出力側の光カップラで光 SSB 変調光に合波する。実際に、光カップラを等分配とし、位相変調指数  $m=0.05\pi$  rad のときの、出力光の光強度振幅  $I_s$  と  $M$  の計算結果を図 10 (b) に示す。図より、 $\phi_{b2}$  を調節して、搬送波強度を抑圧することで、変調度  $M$  を増大させることが可能であることがわかる。

図 10 (c) には、試作した光変調器を示す。電極は膜厚  $1\mu\text{m}$  の金薄膜からなる。図 10 (d) に  $10\text{GHz}$ 、 $220\text{mW}$  で位相差  $90^\circ$  の信号を入力して光 SSB 変調を行っている状態で、 $\phi_{b2}$  を変化させた時の変調光スペクトルの変化を示す。上 1 次側波帯は抑圧状態で、下 1 次側波帯に対する  $R$  が変化し、これに伴い、 $M$  は  $0.17 \sim 0.99$  の広い範囲で制御できていることが確認できた。

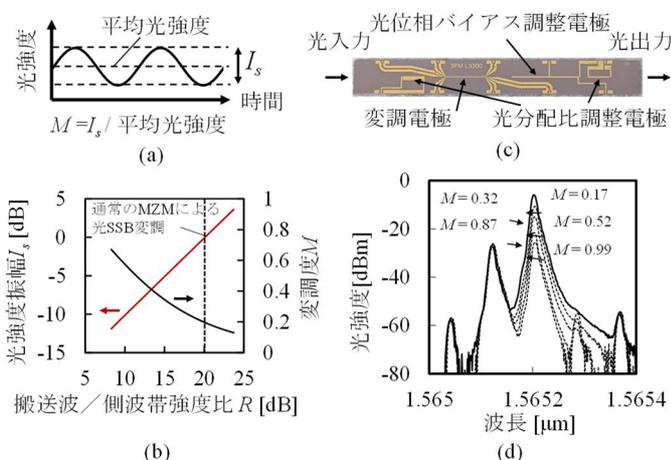


図 10 光 SSB 変調信号の変調制御 (a)出力光の時間波形の例 (b)変調特性 (c)作製した光変調器 (d)出力光スペクトル

### 2.1.3 波長分散補償

通常の振幅変調光が波長分散の影響を受けると、搬送波と両側波帯成分の間の位相差が変化し、復調の際にフェージングにより復調信号強度が低下する。そこで、図 7 の構成を用いて波長分散で生じる上記の位相差を補償するように、搬送波の位相を制御すれば、波長分散の影響を回避できる可能性がある。

そこで、光導波路 1, 3 を使って、搬送波抑圧両側波帯変調 (SC-DSB 変調) を行う。この場合は、互いに逆相の 2 つの変調信号 ( $\phi_{m3} - \phi_{m1} = \pi$ ) により、同じ位相変調指数  $A_1 = A_3 = m$  で変調し、 $180^\circ$  位相差バイアス ( $\phi_{b3} - \phi_{b1} = \pi$ ) を与えて合波する。光導波路 2 では位相バイアス  $\phi_{b2}$  を与えた無変調光を搬送波として供給する。

本構成での波長分散補償時の  $m$  に対する復調信号強度  $I_{PD}$  と光強度変調度  $M$  の計算結果を図 11 (a) に示す。MZM による光 SSB 変調の特性も示している。本構成では、SSB 変調に比較して、 $I_{PD}$  は 4dB 程低下するが、 $M$  は 2.5 倍に増加することがわかる。 $M$  は光カップラの光分配比により調節することが可能である。

先の実験と同じく、図 7 の光変調器に  $10\text{GHz}$  の変調信号を与えて、 $m=0.146\pi$  rad で変調を行った。また、分散補償動作を確認するために、長さ  $10\text{km}$  および  $20\text{km}$  の単一モード光ファイバを伝送した後の光波の測定も行った。図 11 (b) は、横軸は  $\phi_{b2}$  で、縦軸は光ファイバ伝送後の光波を PD で検波した後の復調信号強度  $I_{PD}$  である。ここで、光ファイバの伝搬ロスの影響は取り除いており、 $I_{PD}$  はそれぞれ最大値で規格化している。また、光ファイバなし ( $0\text{km}$ ) の場合の  $I_{PD}$  が極大、極小の時の変調光スペクトルを図 11 (c)(d) に示す。図 11 (b) から、どの光ファイバ長においても、 $\phi_{b2}$  を調節すれば、フェージングを回避し、 $I_{PD}$  を最大化できることがわかる。また、図 11 (c)(d) から、 $\phi_{b2}$  を調節する過程では波長スペクトルの各成分の強度には変化はなく、搬送波の位相のみが制御されていることもわかる。

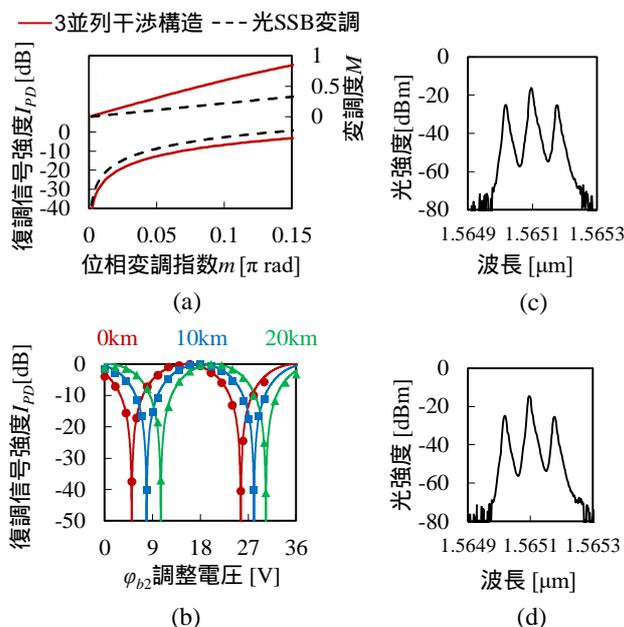


図 11 波長分散補償に関する解析、測定結果 (a) 変調特性 (b) 測定結果 (c) IPD 極小付近の光スペクトル (d) IPD 極大付近の光スペクトル変調光スペクトル

### (3) 6 並列干渉光変調器による 6 通倍変調

図 1 2 (a) に 6 並列干渉構造を用いた通倍光変調器の原理図を示す。各導波路での、変調指数や変調信号の位相、位相バイアスを適切に設定すれば、位相変調光の合波数に応じて、図 1 2 (b) に示すような変調周波数の 6 倍の間隔の光スペクトルを生成することが可能である。これを光検出器で復調すると光学的に 6 通倍された信号が得られる。電子回路や光学フィルタを用いることなく、光変調動作だけでミリ波やテラヘルツの超高周波信号の生成が期待できる。

図 1 3 (a) に、本構成に必須となる 6 分岐 MMI カップラの光導波路構造を示す。 $W=120\mu\text{m}$ ,  $Wp=20\mu\text{m}$  として、BPM 解析を行った結果  $L=3.3\text{mm}$  付近で等分配となり、図 1 3 (b) に示すような多モード干渉に基づく電界分布が観測された。図 1 3 (c) に先と同様の条件で作製した LN 導波路による MMI 光カップラの光電力分配比と過剰損失を測定した結果を示す。 $L=2.9\text{mm}$  付近でほぼ 6 等分配となり、過剰損失も最小となった。

次に、この 6 分岐光カップラで構成した 6 並列干渉光変調器を作製し、 $10\text{kHz}$  の変調信号を用いて、通倍変調実験を行った。各位相変調部の位相変調指数  $m=1.3\pi\text{rad}$  として所望の動作条件を設定し、出力光を PD で二乗検波した後の信号波形とその周波数スペクトルを図 1 4 に示す。変調信号に対して 6 倍の周波数の復調信号が得られていることが、時間波形およびスペクトルから確認できる。また、6 通倍信号強度に対して他の周波数成分が 23dB 以上抑圧されており、低周波ではあるが 6 通倍変調動作が確認できた。

### (4) まとめ

$1\times 2$ ,  $2\times 2$ ,  $1\times 3$ ,  $1\times 6$  の多分岐 MMI カップラを設計し、Ti 拡散 LN 導波路を用いて初めて実験的に動作を実証した。さらに、本 MMI カップラを用いて多重並列干渉光変調器を構成し、実際にその動作を確認した。3 並列干渉光変調器では変調光スペクトルの搬送波成分を制御して、変調度の増大や分散補償可能な光変調器を設計し、その動作を確認した。6 並列干渉光変調器では 6 通倍された復調信号が得られることを確認した。今後は、上記変調器を組み合わせたより高性能な光変調器や、マイクロ波変調信号による通倍変調でミリ波信号を生成することなどが期待できる。

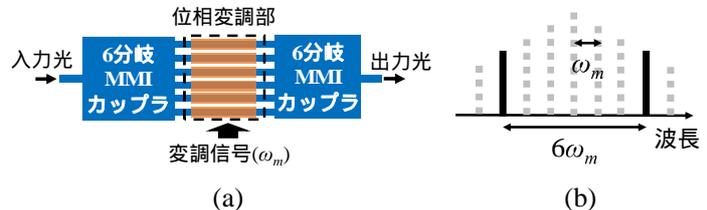


図 1 2 6 並列干渉構造を用いた通倍光変調器 (a)変調器構成 (b)出力光スペクトル変調光スペクトル

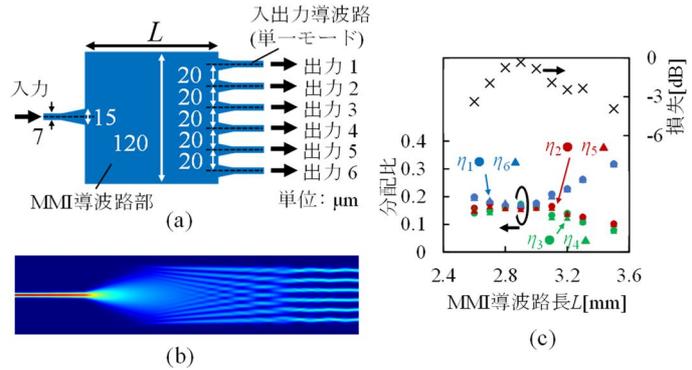


図 1 3 6 分岐 MMI カップラ (a)導波路構造 (b)電磁界分布 (c)測定結果

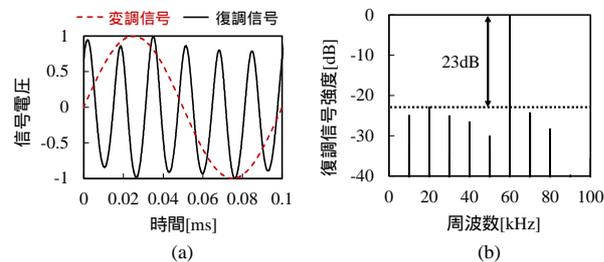


図 1 4 6 通倍変調実験の測定結果 (a)時間波形 (b)復調信号の周波数スペクトル変調光スペクトル

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計17件（うち査読付論文 17件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Yasumori Shotaro, Sato Takanori, Morimoto Keita, Kawai Tadashi, Enokihara Akira, Nakajima Shinya, Kanno Atsushi	4. 巻 41
2. 論文標題 Electro-Optic Modulator With Tunable Multimode Interference Couplers Based on LiNbO3 Waveguides and Optical Single-Sideband Modulation	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Journal of Lightwave Technology	6. 最初と最後の頁 7059 ~ 7066
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/JLT.2023.3324838	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 YASUMORI Shotaro, MORIKAWA Seiya, SATO Takanori, KAWAI Tadashi, ENOKIHARA Akira, NAKAJIMA Shinya, AKAHANE Kouichi	4. 巻 E107.C
2. 論文標題 Optical Mode Multiplexer Using LiNbO3 Asymmetric Directional Coupler Enabling Voltage Control for Phase-Matching Condition	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 IEICE Transactions on Electronics	6. 最初と最後の頁 146 ~ 149
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1587/transele.2023ECS6011	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Fukunaga Masatoshi, Kawai Tadashi, Enokihara Akira	4. 巻 -
2. 論文標題 Compact five-way power divider using unequal LC-ladder dividers with two matching frequencies	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Asia-Pacific Microwave Conference Proceedings, APMC2023	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/APMC57107.2023.10439763	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 HIRAI Anna, MATSUMOTO Yuichi, SATO Takanori, KAWAI Tadashi, ENOKIHARA Akira, NAKAJIMA Shinya, KANNO Atsushi, YAMAMOTO Naokatsu	4. 巻 E105.C
2. 論文標題 Mach-Zehnder Optical Modulator Integrated with Tunable Multimode Interference Coupler of Ti:LiNbO3 Waveguides for Controlling Modulation Extinction Ratio	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 IEICE Transactions on Electronics	6. 最初と最後の頁 385 ~ 388
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1587/transele.2021ECS6018	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Sato Takanori, Enokihara Akira	4. 巻 8
2. 論文標題 An electro-optic full adder designed with coupled Si ring resonators for highly dense integration	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Results in Optics	6. 最初と最後の頁 100230 ~ 100230
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.rio.2022.100230	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Yasumori Shotaro, Hirai Anna, Sato Takanori, Morimoto Keita, Kawai Tadashi, Enokihara Akira, Nakajima Shinya, Kanno Atsushi	4. 巻 -
2. 論文標題 Mach-Zehnder Electro-optic Modulator with Multimode Interference Couplers of LiNbO3 Waveguides for Single Sideband Modulation	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 2022 IEEE International Topical Meeting on Microwave Photonics, MWP 2022 - Proceedings	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/MWP54208.2022.9997678	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 土屋歩, 河合正, 榎原晃	4. 巻 142
2. 論文標題 任意3周波数整合による一定の比帯域幅を有するデュアルバンド準集中定数型電力分配器	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 電気学会論文誌 C	6. 最初と最後の頁 806 ~ 810
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1541/ieejeiss.142.806	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Fukunaga Masatoshi, Kawai Tadashi, Enokihara Akira	4. 巻 -
2. 論文標題 Unequal LC-Ladder Divider with Broad/Dual-Band Characteristics Utilizing Two-Frequency Matching	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Asia-Pacific Microwave Conference Proceedings, APMC2022	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.23919/APMC55665.2022.9999819	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Hirai Anna, Matsumoto Yuichi, Sato Takanori, Kawai Tadashi, Enokihara Akira, Nakajima Shinya, Yamamoto Naokatsu	4. 巻 501
2. 論文標題 Optical multimode interference couplers of Ti:LiNbO3 waveguides and electrical tuning of power splitting ratio	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Optics Communications	6. 最初と最後の頁 127325 ~ 127325
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.optcom.2021.127325	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Tsuchiya Ayumu, Okuda Taiji, Kawai Tadashi, Enokihara Akira	4. 巻 -
2. 論文標題 Experimental Study of UHF/SHF Dual-Band Semi-Lumped-Element Power Dividers	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 2021 IEEE International Symposium on Radio-Frequency Integration Technology (RFIT)	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/RFIT52905.2021.9565259	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Tsuchiya Ayumu, Kawai Tadashi, Enokihara Akira	4. 巻 -
2. 論文標題 Design of Semi-Lumped-Element Power Divider with Arbitrary Three Matching Frequencies	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 2021 IEEE Asia-Pacific Microwave Conference (APMC)	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/APMC52720.2021.9661766	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Kawai Tadashi, Nakai Ryosuke, Enokihara Akira	4. 巻 -
2. 論文標題 28GHz-band Compact Uniplanar 180-degree Rat-race Hybrid with Broadband Characteristics	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 2021 46th International Conference on Infrared, Millimeter and Terahertz Waves (IRMMW-THz)	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/IRMMW-THz50926.2021.9567329	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 FURUBAYASHI Daichi, KASHIWAGI Yuta, SATO Takanori, KAWAI Tadashi, ENOKIHARA Akira, YAMAMOTO Naokatsu, KAWANISHI Tetsuya	4. 巻 E103.C
2. 論文標題 Electro-Optic Modulator for Compensation of Third-Order Intermodulation Distortion Using Frequency Chirp Modulation	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 IEICE Transactions on Electronics	6. 最初と最後の頁 653 ~ 660
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1587/transele.20190CP0002	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Hirai Anna, Sato Takanori, Kawai Tadashi, Enokihara Akira, Nakajima Shinya, Yamamoto Naokatsu	4. 巻 -
2. 論文標題 Design and Fabrication of MMI Optical Coupler Using Ti-diffused Lithium Niobate Waveguides	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 2020 International Topical Meeting on Microwave Photonics (MWP)	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.23919/MWP48676.2020.9314583	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Kawai Tadashi, Nagano Kensuke, Enokihara Akira	4. 巻 -
2. 論文標題 Dual-Band Semi-Lumped-Element Power Dividers at UHF/SHF Bands	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 2020 50th European Microwave Conference (EuMC)	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.23919/EuMC48046.2021.9338021	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Tsuchiya Ayumu, Nagano Kensuke, Kawai Tadashi, Enokihara Akira	4. 巻 -
2. 論文標題 Design of Dual-Band Four-Way LC-Ladder Dividers	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 2020 IEEE International Symposium on Radio-Frequency Integration Technology (RFIT)	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/RFIT49453.2020.9226184	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Nagano Kensuke, Tsuchiya Ayumu, Kawai Tadashi, Enokihara Akira	4. 巻 141
2. 論文標題 Experimental Study of Quasi-Lumped-Element Power Divider Utilizing LC-Ladder Circuits at SHF-Band	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 IEEJ Transactions on Electronics, Information and Systems	6. 最初と最後の頁 94 ~ 98
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1541/ieejieiss.141.94	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計17件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 9件)

1. 発表者名 安森 昌太郎, 森本 佳太, 河合 正, 榎原 晃, 中島 慎也, 赤羽 浩一
2. 発表標題 多分岐MMI光カップラを用いた多重並列干渉光変調器の検討
3. 学会等名 電子情報通信学会マイクロ波テラヘルツ光電子技術研究会
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 安森 昌太郎, 森本 佳太, 河合 正, 榎原 晃, 中島 慎也, 赤羽 浩一
2. 発表標題 3並列干渉構造による波長分散補償が可能な光変調器
3. 学会等名 電子情報通信学会ソサイエティ大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Fukunaga Masatoshi, Kawai Tadashi, Enokihara Akira
2. 発表標題 Compact five-way power divider using unequal LC-ladder dividers with two matching frequencies
3. 学会等名 31st Asia-Pacific Microwave Conference, APMC 2023 ( (国際学会) )
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 安森昌太朗, 真野紗耶加, 森本佳太, 河合 正, 榎原 晃, 中島慎也, 赤羽浩一
2. 発表標題 LiNbO3による1×3 MMI光カップラと3並列干渉光変調器の検討
3. 学会等名 電子情報通信学会総合大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 宮元蒼平, 森川誠也, 佐藤孝憲, 河合 正, 榎原 晃, 中島慎也, 赤羽浩一
2. 発表標題 LiNbO3導波路による非対称方向性結合器を用いたモード変換素子
3. 学会等名 電子情報通信学会総合大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Yasumori Shotaro, Hirai Anna, Sato Takanori, Morimoto Keita, Kawai Tadashi, Enokihara Akira, Nakajima Shinya, Kanno Atsushi
2. 発表標題 Mach-Zehnder Electro-optic Modulator with Multimode Interference Couplers of LiNbO3 Waveguides for Single Sideband Modulation
3. 学会等名 2022 IEEE International Topical Meeting on Microwave Photonics, MWP 2022 (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Fukunaga Masatoshi, Kawai Tadashi, Enokihara Akira
2. 発表標題 Unequal LC-Ladder Divider with Broad/Dual-Band Characteristics Utilizing Two-Frequency Matching
3. 学会等名 Asia-Pacific Microwave Conference Proceedings, APMC (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名	平井 杏奈、安森昌太郎、松本 祐一、佐藤 孝憲、河合 正、榎原 晃、中島 慎也、菅野敦史、山本 直克
2. 発表標題	LiNbO <sub>3</sub> 導波路によるチューナブルMMI光カップラを用いた高消光比マッハツェンダー光変調器
3. 学会等名	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
4. 発表年	2022年

1. 発表者名	安森昌太郎、平井 杏奈、松本 祐一、佐藤 孝憲、河合 正、榎原 晃、中島 慎也、菅野敦史
2. 発表標題	LiNbO <sub>3</sub> 導波路によるチューナブルMMIカップラとマイクロ波分配器を一体化した光SSB変調器
3. 学会等名	電子情報通信学会総合大会
4. 発表年	2022年

1. 発表者名	Tsuchiya Ayumu, Okuda Taiji, Kawai Tadashi, Enokihara Akira
2. 発表標題	Experimental Study of UHF/SHF Dual-Band Semi-Lumped-Element Power Dividers
3. 学会等名	2021 IEEE International Symposium on Radio-Frequency Integration Technology (RFIT) (国際学会)
4. 発表年	2021年

1. 発表者名	Tsuchiya Ayumu, Kawai Tadashi, Enokihara Akira
2. 発表標題	Design of Semi-Lumped-Element Power Divider with Arbitrary Three Matching Frequencies
3. 学会等名	2021 IEEE Asia-Pacific Microwave Conference (APMC) (国際学会)
4. 発表年	2021年

1. 発表者名 Kawai Tadashi、Nakai Ryosuke、Enokihara Akira
2. 発表標題 28GHz-band Compact Uniplanar 180-degree Rat-race Hybrid with Broadband Characteristics
3. 学会等名 2021 46th International Conference on Infrared, Millimeter and Terahertz Waves (IRMMW-THz) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Anna Hirai, Takanori Sato, Tadashi Kawai, Akira Enokihara, Shinya Nakajima, Naokatsu Yamamoto
2. 発表標題 Design and Fabrication of MMI Optical Coupler Using Ti-diffused Lithium Niobate Waveguides
3. 学会等名 2020 International Topical Meeting on Microwave Photonics (MWP) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 平井 杏奈、松本 祐一、佐藤 孝憲、河合 正、榎原 晃、中島 慎也、山本 直克
2. 発表標題 Ti拡散LiNbO3導波路による多モード干渉素子の作製・評価と素子特性の電圧制御の検討
3. 学会等名 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
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 平井 杏奈、松本 祐一、佐藤 孝憲、河合 正、榎原 晃、中島 慎也、山本 直克
2. 発表標題 LiNbO3導波路によるMMI光結合器の作製と分配特性の電圧制御
3. 学会等名 電子情報通信学会総合大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Kawai Tadashi、Nagano Kensuke、Enokihara Akira
2. 発表標題 Dual-Band Semi-Lumped-Element Power Dividers at UHF/SHF Bands
3. 学会等名 2020 50th European Microwave Conference (EuMC) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Tsuchiya Ayumu、Nagano Kensuke、Kawai Tadashi、Enokihara Akira
2. 発表標題 Design of Dual-Band Four-Way LC-Ladder Dividers
3. 学会等名 2020 IEEE International Symposium on Radio-Frequency Integration Technology (RFIT) (国際学会)
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	佐藤 孝憲 (Sato Takanori) (60835809)	北海道大学・情報科学研究院・准教授  (10101)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------