

微小なギャップを付けたパッチアンテナを用いた電気光学変調器

村田 博司 Yusuf Nur Wijayanto 岡村 康行

大阪大学 大学院基礎工学研究科 電子光科学領域
〒560-8531 大阪府豊中市待兼山町 1-3
E-mail: murata@ee.es.osaka-u.ac.jp

あらまし 我々の研究グループは、平面型アンテナと電気光学結晶とを組み合わせた種々のタイプのアンテナ電気光学変調デバイスを提案している。本稿では、「微小なギャップを付けたパッチアンテナ」を用いたデバイスについて述べる。マイクロストリップパッチアンテナの中央部分に幅が $5\mu\text{m}$ 程度の微小なギャップ（溝）をマイクロ波無線信号の偏波と垂直となる方向に設けておくと、電流の連続性のためにギャップ部分に強いマイクロ波電界（変位電流）が誘起される。それゆえ、ギャップの上部あるいは下部に電気光学結晶を配置して光導波路を作製しておけば、アンテナで受信された信号に応じて光導波路中を進む光波が変調されることになり、マイクロ波信号の受信と同時に光変調特性が得られる。パッチアンテナのみでマイクロ波信号-光信号変換機能が得られるので、アンテナで受信した信号を低擾乱で光信号に変換することができる。また、通常の給電回路を接続すればアンテナで受信した信号を取り出すこともできるので、光変調による信号モニタ機能を付加したパッチアンテナであると考えられる。本稿では、デバイスの構成と動作解析、設計、試作実験について述べる。

キーワード パッチアンテナ, 光変調, 電気光学効果, 電磁界計測, 光集積回路, 変位電流

Electro-Optic Modulator Using Gap-Embedded Patch Antenna

Hiroshi Murata Yusuf Nur Wijayanto Yasuyuki Okamura

Graduate School of Engineering Science, Osaka University.
1-3 Machikaneyama, Toyonaka, Osaka 560-8531 Japan.
E-mail: murata@ee.es.osaka-u.ac.jp

Abstract- We have proposed several new antenna-based optical modulation devices using planar antennas and electro-optic (EO) crystals. In this report, we discuss EO modulation devices using planar patch antennas embedded with a narrow gap. When a narrow ($\sim 5\mu\text{m}$) gap is embedded at the center of the metal film of a planar patch antenna to be perpendicular to the polarization of a wireless microwave signal, a strong microwave electric field (displacement current) is induced across the gap owing to the current flow continuity. By setting an EO crystal over/under the gap and fabricating a channel optical waveguide on the surface of the crystal along the gap, a lightwave propagating in the channel optical waveguide is modulated by a microwave signal received by the patch antenna. Therefore, wireless microwave signal receiving and its conversion to a lightwave signal are obtained simultaneously. The received signal by the patch antenna can be converted to a lightwave signal precisely since no extra microwave device/cable is needed for conversion. The output of the received microwave signal by the patch antenna is also obtainable by connecting an appropriate feeding circuit; this device can be considered as a new patch antenna with optical monitoring function. In this report, the device structure, operational principle, analysis, design and experimental results are presented.

Keywords Patch Antenna, Optical Modulation, Electro-Optic Effect, Electro-magnetic Field Measurement, Optical Integrated Circuit, Displacement Current

1. はじめに

電子分極の非線形性に起因する1次電気光学効果（ポッケルス効果, EO 効果）は、直流から THz 帯におよぶ高速・広帯域動作が可能であり、光を用いた電磁界計測をはじめ、高速光通信・光信号処理において有用である[1], [2]. 電磁界計測分野においては、測定対象となる電磁界への擾乱が小さいという特長を活かした種々の EO 電磁界センサが開発されており、アンテナ計測などに応用されている[3].

我々の研究グループは、アンテナ技術と EO 変調技術とを融合させた新しいタイプのアンテナ電極光変調デバイスの研究を進めている。特に、平面型アンテナを光変調器と同じ基板上に構成することで、アンテナで受信した信号を低擾乱で光信号に変換できることに着目して、いくつかの新構成 EO デバイスの提案・試作実験を行っている[4]-[11]. 本稿では、これらのデバイス中から、「微小なギャップを付けたパッチアンテナ」を用いた EO デバイスについて述べる。

マイクロストリップパッチアンテナの中央部分に幅が $5\mu\text{m}$ 程度の微小なギャップ（溝）をマイクロ波無線信号の偏波と垂直となる方向に設けると、電流の連続性のためにギャップ部分に強いマイクロ波電界（変位電流）が誘起される。それゆえ、ギャップの上部あるいは下部に EO 結晶を配置して光導波路を作製しておく、アンテナで受信された信号に応じて光導波路中を進む光波が変調されることになり、マイクロ波信号の受信と同時に光変調特性が得られる。パッチアンテナのみでマイクロ波信号-光信号変換機能が得られるので、アンテナで受信した信号を低擾乱で光信号に変換することができる[7]-[11]. また、通常の給電回路を接続すればアンテナで受信した信号を取り出すこともできる。光変調による信号モニタ機能のあるアンテナと考えることもできる。

これまでに、15~60GHz で動作するデバイスの試作を行い、アレイアンテナ構造を用いることによる高効率化・指向性制御[8], [10]や、偏波分離・光信号変換特性[9], 多層構造基板の適用[11], ビームフォーミングデバイスの設計[9], [10]等について報告している。以下では、デバイスの基本構成と動作解析、設計、試作実験について述べる。

2. デバイスの構造と基本動作

Fig. 1 に、我々が提案している「微小なギャップを付けたパッチアンテナ」を用いた光変調デバイス[7] の基本構造を示す。マイクロストリップパッチアンテナの中央付近に、幅が $5\mu\text{m}$ 程度の微小なギャップ（溝）を設けている。Fig. 1 は、基板に LiNbO_3 や LiTaO_3 等の EO 結晶を用いた場合の構成を示しているが、通常の誘電体と EO 結晶とを組み合わせた基板でも良い。（EO 結晶をパッチ導体の上に装荷する構成も可能である。EO ポリマー等を用いても良い。）基板の表面には、ギャップに平行に直線光導波路を設ける。光導波路はギャップ近傍に配置されており、設計光波長において基本モードのみが導波するものとする。Fig. 1 では1本の直線光導波路を用いた光位相変調器の構成を示しているが、マッシュツェンダー型

導波路を用いれば光振幅（強度）変調器となる。

このデバイスに、 x 方向の直線偏波（ギャップに垂直な偏波）を持つ無線信号が照射された場合を考える、無線信号が受信されるとパッチ導体には x 方向に表面電流が流れるが、電流の連続性のために、ギャップ部分には変位電流が誘起されることになる。つまり、ギャップ間に比較的強い電界が生じる。したがって、ギャップの直下に EO 結晶を配して光導波路を作製しておけば、光導波路中を伝搬する光波がアンテナで受信された信号で変調されることになり、無線信号-光信号変換が得られる。

また、基板を大きく取ってパッチアンテナをアレイ状に複数配置して、各アンテナのギャップを貫くように光導波路を作製する構成も考えられる。この場合は、各アンテナ素子で受信された信号で光波が逐次変調されるために、フェーズドアレイアンテナと同様な動作を示し、特定の方向に強い指向性を持った無線信号-光信号変換特性が得られる。さらに、ミランダギャップ構成[10]や EO 結晶の分極反転技術[4]を用いると、アレイアンテナとしての指向性を制御して所望の方向から到来する信号のみを選択的に光信号へ変換することも可能である[10].

方形パッチアンテナに十字方向（Fig. 1 の x 方向と y 方向）となるように2本のギャップと直線導波路を設ける構成を用いることもできる。この構成を用いた場合には、直交する2つの直線偏波成分を分離して、それぞれ異なる光信号に変換することが可能である[9].

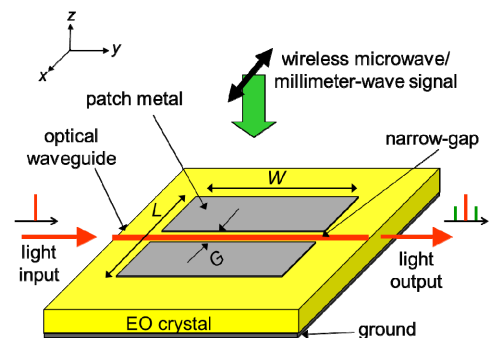


Fig. 1. Basic structure of the proposed EO modulation device using a patch-antenna embedded with a narrow gap.

3. 解析

方形パッチアンテナに直線偏波（ x 方向）のマイクロ波信号を照射した時の表面電流は下記のように表すことができる。

$$K_x(x, y, t) = K_{x0} \cos(\omega_m t) \cos\left(p \frac{2\pi}{\Lambda_m} x\right) \quad (1)$$

ここで、 K_{x0} は電流振幅、 p は電流定在波の次数、 Λ_m はマイクロ波信号の実効波長、 ω_m は角周波数である。パッチ導体の x 方向の長さ L が、マイクロ波実効波長の半波長であると

ときには基本共振モードが励振され ($p=1$), 表面電流は $x=0$ (パッチ導体の x 方向の中央) で最大となる.

Fig. 1 のようにパッチ導体の中央部分 ($x=0$) に微小なギャップ (溝) を設けると, 電流の連続性のためにギャップ部分には変位電流 ($\partial \mathbf{D} / \partial t$) が誘起される. Fig.2 に, ギャップを設けた方形パッチアンテナに, 上部から無線信号を照射したときの電磁界解析結果の例を示す. 解析には HFSS を用いた. アンテナに垂直に平面波を照射した場合のパッチ導体表面における電界分布を示している. ギャップの幅が $5\mu\text{m}$ 程度である場合には, パッチ導体のエッジよりも数倍以上強い高周波電界がギャップ間に誘起されることがわかった. 例えば, 基板に LiNbO_3 あるいは LiTaO_3 を用いた場合, 10mW 程度のマイクロ波・ミリ波を照射すると, 1mrad 程度の光位相変調指数が得られると見積もられる.

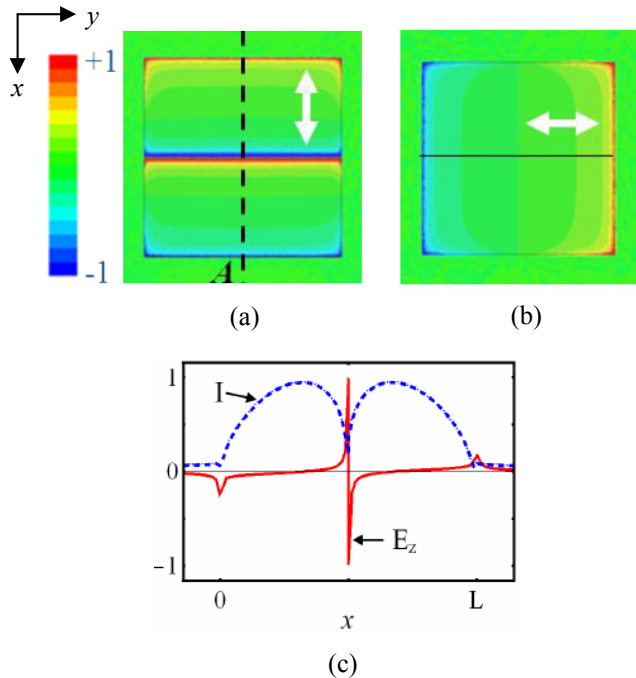


Fig. 2. Calculated electric field distributions on the surface of the substrate (xy -plane) under the irradiation of the microwave signal with x -polarization (a) and y -polarization (b). (c) indicates the calculated distributions of K_x and E_z along the line-A in (a).

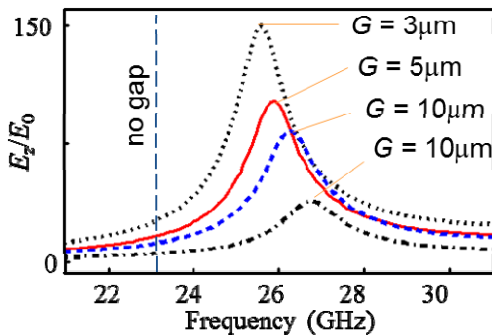


Fig. 3. Calculated frequency response of the electric field amplitude induced across the gap for different gap width values. (Substrate: 0.4mm -thick z -cut LiTaO_3 , Patch metal: $0.8 \times 0.8\text{mm}$)

照射するマイクロ波の周波数とギャップ部分における電界振幅との関係を求めたものを Fig. 3 に示す. ギャップを設けるとパッチアンテナとしての共振周波数は高周波側にシフトすることがわかる. また, ギャップを付けたパッチアンテナの等価回路モデルを Fig. 4 (b) に示す. この等価回路からも共振周波数が高周波側にシフトすることがわかる. 解析の結果から, 幅 $5\mu\text{m}$ 程度のギャップを設けることで, 共振周波数が 10% 程度高周波側にシフトするが, アンテナの利得や放射パターンには大きな変化は生じないものと予想される.

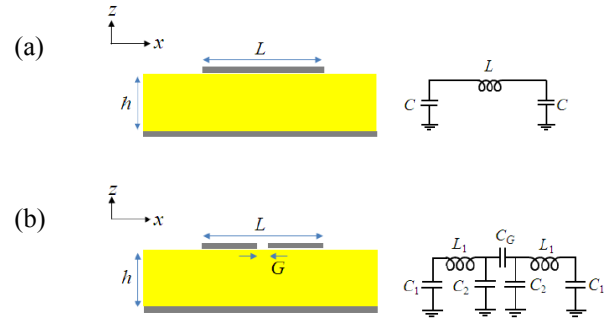


Fig. 4. Equivalent circuit models with/without a gap.

4. アレイアンテナ光変調デバイスの設計

微小ギャップを付けたパッチアンテナを光導波路に沿って複数個アレイ状に配置することで, マイクロ波-光波変換効率の向上と, 指向性の制御が期待できる. このようなアレイアンテナデバイスでは, 動作周波数が数 GHz 以上になると, 光波が光導波路中を伝搬する時間内における信号の位相変化 (光波走行時間効果と呼ばれることがある) を考慮することが必要となる[4], [8].

Fig. 5 (a) のアレイアンテナ構成において, アンテナエレメント間の距離を S , 無線信号の到来方向とアレイとの成す角を θ とすると, h 番目のエレメントにおいてギャップ間に誘起される電界は次式のように書くことができる.

$$E_x^h(x, y, z, t, \theta) = E_{x0} g_m(x, z) \sin(\omega_m t - k_m (h-1) S \sin \theta) \quad (2)$$

ここで, $g_m(x, z)$ はギャップ間に誘起される電界の xz 面内の分布関数, k_m は無線信号の空気中での波数である.

変調を受ける光波が h 番目のエレメントから $h+1$ 番目のエレメントまで伝搬するのに要する時間 T は, $T = S/v_g = S n_g/c$ (v_g および n_g はそれぞれ光波の群速度および群屈折率, c は真空中の光速) である. LiNbO_3 や LiTaO_3 を用いた光導波路中では, $n_g \sim 2$ であるので, $S=6\text{mm}$ とすると $T \sim 40\text{ps}$ である. この時間遅延を考慮して光変調特性を求めるためには, 導波路中を伝搬する光波が見る電界を用いれば良い. (2)式は, 静止座標系 (x, y, z, t) から見た電界であるので, 光波と共に進む座標系 (x', y', z', t') に変換することで光波が見る電界を求めることができる. 両座標系の関係 $y' = y - v_g t$ より, 光波が見る電界は次式のように表すことができる.

$$\begin{aligned}
E_{m-opt}^h &= E_x^h(x, y, z, \frac{y-y'}{v_g}, \theta) \\
&= E_{x0} g_m(x, z) \sin(\omega_m \frac{y-y'}{v_g} - k_m(h-1)S \sin \theta) \\
&= E_{x0} g_m(x, z) \sin(n_g k_m y - k_m(h-1)S \sin \theta + \varphi) \quad (3)
\end{aligned}$$

ここで、 $\varphi = -n_g k_m y'$ は光波がデバイスに入力したときの無線信号の位相である。Fig. 5 (b) は、光波が見る電界をプロットしたものである。光波走行時間効果のために、アンテナ上の電界振幅が変化することがわかる。(3)式を用いて、光波が受ける位相変調指数 $\Delta\phi$ は次式のように求めることができる。

$$\begin{aligned}
\Delta\phi(\theta) &= \frac{\pi}{\lambda} n_e^3 r_{33} E_{x0} \Gamma \\
&\times \sum_{h=1}^N \int_{(h-1)S}^{(h-1)S+W} \sin(n_g k_m y - k_m(h-1)S \sin \theta + \varphi) dy \quad (4)
\end{aligned}$$

ここで、 λ は光波の真空中における波長、 n_e は基板の屈折率、 r_{33} は EO 係数、 Γ は光波の導波モードの界分布とギャップ間に誘起される電界との重なりで決まる係数（重なり積分）、 N はアンテナエレメント数、 W はパッチアンテナの導波路方向の長さである。Fig. 5 (b) に示すように適切なエレメント間距離を定めると所望の角度から到来する信号の光への変換効率を最大化することができる。

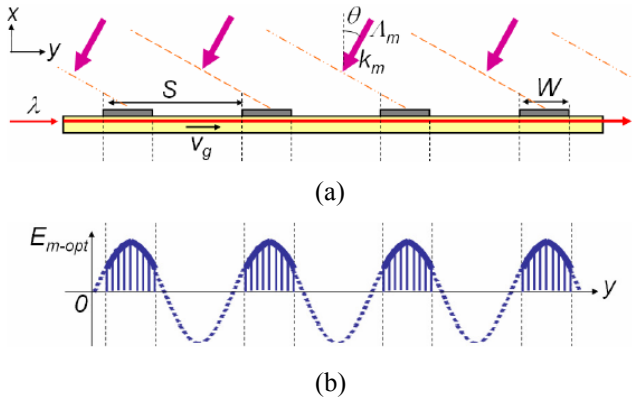


Fig. 5. Cross sectional view of the array antenna EO device using patch antennas embedded with a gap (a) and electric field observed by the lightwave propagating in the optical waveguide (b).

5. 試作・実験

5.1. デバイスの試作

設計したデバイスを試作した。基板には z-cut LiTaO₃ を用いて、光導波路はアニールプロトン交換法を用いて作製した。ギャップを付けたパッチ導体は Al 蒸着（厚さ 1μm）とリフトオフにより作製した。光導波路の伝搬損失を抑えるために Al 薄膜と結晶基板との間には厚さ 0.2μm の SiO₂ バッファ層を挿入した。裏面接地電極も厚さ 1μm の Al 薄膜を蒸着すること

により形成した。試作したデバイスの写真（裏面電極形成前）を Fig.6 に示す。また、このデバイスの諸元を Table I に示す。

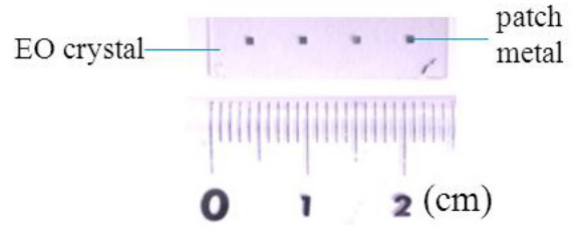


Fig. 6. Photograph of the fabricated device.

Table I. Parameters of the proto-type device.

Substrate material	z-cut LiTaO ₃ 0.4mm thick
Operational frequency f_m	26 GHz
Patch antenna metal size $L \times W$	0.8 x 0.8 mm
Gap width G	5 μm
Patch antenna separation S	5.4 mm
Antenna element number N	4
Operational light wavelength λ	1.55 μm
Optical waveguide fabrication	Annealed proton exchange
Optical buffer layer	SiO ₂ 0.2μm thick

5.2. 基本動作実験

試作デバイスの基本動作特性評価のための実験系を Fig. 7 に示す。デバイスからの出力光のスペクトルを、光スペクトラムアナライザを用いて測定することで、出力光の光位相変調指数を求めることができる。Fig. 8 に観測した変調光スペクトルの例を、Fig. 9 には位相変調指数の周波数特性の測定結果を示す。周波数特性は、設計とおおむね一致する傾向を示していることがわかる。Fig. 10 は、無線信号—光信号変換の指向性の測定結果を示している。4 素子のアレイアンテナ構造を用いた場合の結果である。ほぼ設計通りの特性が得られていることがわかる。

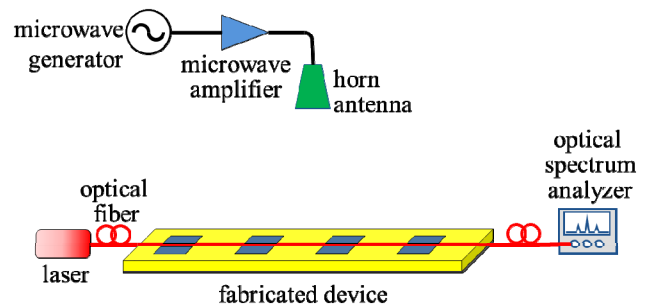


Fig. 7. Experimental set-up for the measurement of the fabricated EO device using the patch antennas embedded with a gap.

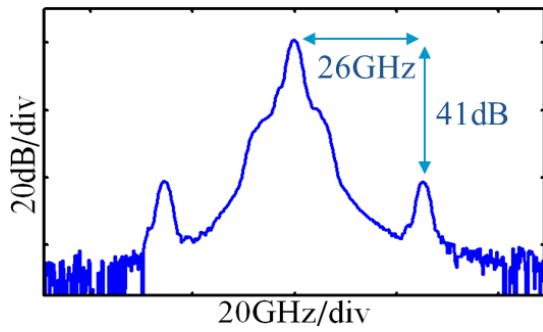


Fig. 8. Example of the measured optical spectrum from the fabricated device.

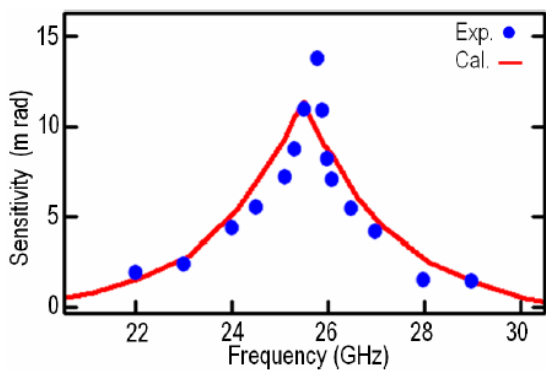


Fig. 9. Frequency response of the fabricated EO device using the patch-antenna embedded with a narrow gap.

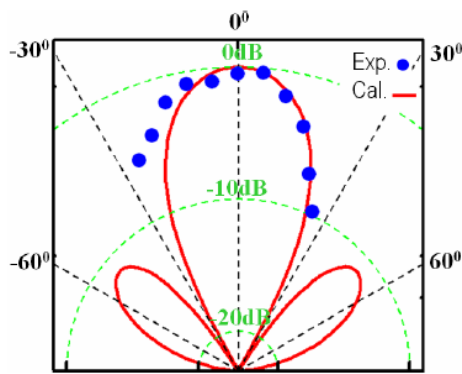


Fig. 10. Directivity in microwave-lightwave conversion of the fabricated EO device using a 4-element array of the patch-antennas embedded with a narrow gap at $f_m=26\text{GHz}$.

5.3. マイクロ波信号への再変換

試作したデバイスは、光変調器としては位相変調器である。マッハツェンダー型導波路を用いれば光強度変調器を構成することもできるが、高感度で線形性の良い応答を得るためには、光学バイアスの設定・調節機構が必要となる。本デバイスの特長である低擾乱性の観点からは、デバイスに光学バイアス調整機構を設けることは好ましくない。そこで、光波長多重通信システム向けに開発されたシャープカット光フィル

ターを用いて光スペクトルを整形・制御して強度変調光 (SSB 変調光) を生成させ、さらにマイクロ波信号へ再変換する実験を行った。

実験系を Fig. 11 に示す。デバイスからの出力光をシャープカットハイパス光フィルター (Filter transmission slope: $100\text{dB/nm}=75\text{dB}/100\text{GHz}$) に通させた後、光増幅器で増幅して高速フォトダイオードで検波した。フォトダイオードからの出力信号はスペクトラムアナライザで測定・評価した。光フィルター通過後のスペクトルを Fig. 12 に示す。Fig. 12 の光スペクトルにおいては、低周波側の光サイドバンド (LSB) 成分が測定限界以下になっており、また、光搬送波成分もかなり減衰した波形となっている。フィルター通過帯域にある高周波側光サイドバンド成分 (USB) と光搬送波成分との比は 6dB であり、これは位相変調指数が約 1rad の位相変調光のサイドバンド・搬送波比と同程度である。シャープカット光フィルターに入力された位相変調光の位相変調指数は、たかだか 10mrad 程度であるので、光フィルターと光増幅器を用いることで、デバイスの実効的な感度を大幅に向上 (位相変調指数で約 100 倍、サイドバンド・搬送波光パワー比で約 10^4 倍) できることがわかる。

光フィルターからの出力光をエルビウムドープファイバー増幅器 (利得約 30dB) に入力した後、高速フォトダイオード (3dB 帯域幅 45GHz) で検波した。再変換出力信号のスペクトルを Fig.13 に示す。マイクロ波信号への再変換を確認することができた。明瞭な C/N 比が得られ、試作デバイスと光フィルター、光アンプを併用することで、高感度なマイクロ波信号検出が可能であることを確認した。

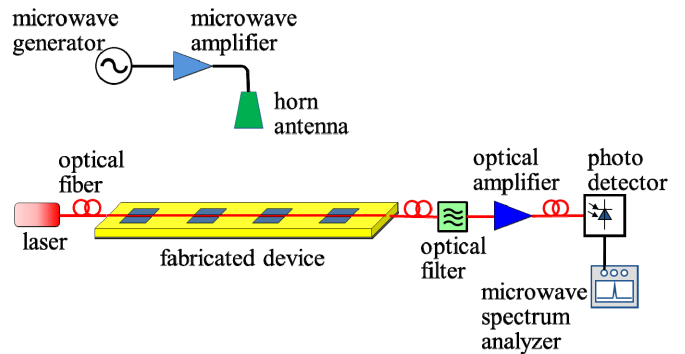


Fig. 11. Experimental set-up for the re-conversion to the microwave-signal.

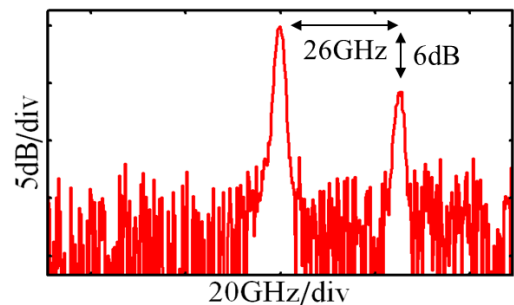


Fig. 12. Output spectrum from the sharp-cut filter.

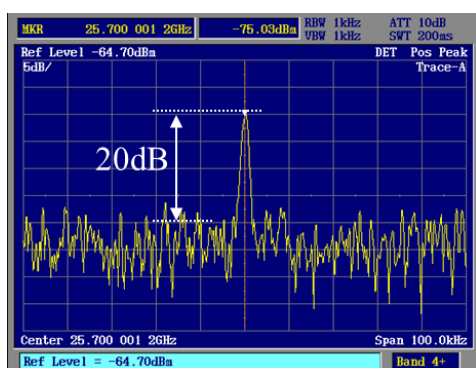


Fig. 13. Measured spectrum of the re-generated signal.

文 献

- [1] 桑原伸夫, “LiNbO₃ を用いた電界センサの歴史と今後の課題,” 第1回光応用電磁界計測(PEM)研究会, PEM2012-1, **vol.1**, no.1, pp.1-6, 2012.
- [2] 永妻忠夫, “電気光学効果を利用した電磁界計測技術の動向と将来展望,” 第5回光応用電磁界計測(PEM)研究会, PEM2013-6, **vol.2**, no.2, pp.1-6, 2013.
- [3] 黒川 悟, 廣瀬雅信, 小宮山耕司, “光技術を用いたアンテナ特性測定,” 信学論(C), **vol.J91-C**, no.1, pp.64-74, 2008.
- [4] H. Murata, R. Miyanaka, and Y. Okamura, “Wireless space-division-multiplexed signal discrimination device using electro-optic modulator with antenna-coupled electrodes and polarization-reversed structures,” *International J. Microwaves & Wireless Technol.*, **vol.4**, no.3, pp.399-405, 2012.
- [5] N. Kohmu, H. Murata, and Y. Okamura, “Electro-optic modulators using double antenna-coupled electrodes for radio-over-fiber systems,” *IEICE Trans. Electron.*, **vol.E96-C**, no.2, pp.204-211, 2013.
- [6] 西岡隼也, 村田博司, 岡村康行, “結合スプリットリング共振器構造を用いた 100GHz 帯無線-光変換デバイス”, 信学技報, MWP2012-88, **vol.112**, no.398, pp.277-282, 2013.
- [7] Y. N. Wijayanto, H. Murata, and Y. Okamura, “Novel electro-optic microwave-lightwave converters utilizing a patch antenna embedded with a narrow gap,” *IEICE Electronics Express*, **vol.8**, no.7, pp.491-497, 2011.
- [8] Y. N. Wijayanto, H. Murata, and Y. Okamura, “Electro-optic microwave-lightwave converters utilizing a quasi-phase-matching array of patch antennas with a gap,” *Electron. Lett.*, **vol.48**, no.1, pp.36-38, 2012.
- [9] Y. N. Wijayanto, H. Murata, and Y. Okamura, “Discrimination of wireless electromagnetic signals by electro-optic modulators using an array of patch antennas embedded with orthogonal gaps,” *Journal of Physics: Conference Series*, **vol.379**, no.1, 012017, 2012.
- [10] Y. N. Wijayanto, H. Murata, and Y. Okamura, “Wireless microwave- optical signal conversion in quasi-phase-matching electro-optic modulators using gap-embedded patch-antennas,” *IEICE Trans. Electron.*, **vol.E96-C**, no.2, pp.212-219, 2013.
- [11] Y. N. Wijayanto, H. Murata, and Y. Okamura, “Electro-optic millimeter-wave-lightwave signal converters suspended to gap-embedded patch antennas on low-k dielectric materials,” *IEEE J. Select. Topics Quantum Electron.*, **vol.19**, no.6, 3400709, 2013.

6. むすび

新しいタイプのアンテナ融合光変調デバイスについて述べた。マイクロ波・ミリ波帯無線信号の光信号変換・モニタデバイスとしての応用や、高周波電磁界の低擾乱な光プローブとしての応用などが期待できる。特に、高マイクロ波～ミリ波帯では伝送線路における信号の減衰が顕著となるので、用途によっては本稿のようなアンテナと光変調とを融合させたデバイスが効果を発揮すると考えられる。強誘電性電気光学結晶の分極反転技術による変調極性の制御技術[4]との併用も有効である。

また、光位相変調をベースとしたデバイスにおいて、シャープカット光フィルターと光増幅器を用いることにより、無線-光変換デバイス・センサとしての実効的な感度を大幅に向上させることが可能なことも示した。安定なレーザー光を光源として、高精度な光フィルターと低雑音光増幅器を用いることで、光応用電磁界計測のさらなる可能性が広がることが期待される。

現在、動作周波数をミリ波 60GHz 帯としたデバイスの開発も進めている。周波数が高くなると、パッチ導体のサイズが小さくなるので、このタイプのデバイスでは光波との相互作用長が小さくなり、変換効率が低下する。このために、基板を多層構造として、基板の実効誘電率を小さくした構成のデバイスを考案している[11]。アンテナの開口面積が大きくなるとともに、光波との相互作用長を大きくすることができるので数 dB の感度向上が期待できる。

謝 辞

貴重なご意見を頂いた、情報通信研究機構・川西哲也博士と菅野敦史博士に深く感謝します。また、解析・実験においてご協力を頂いた、本学大学院生高武直弘君にも感謝します。本研究の一部は、文部科学省科学研究費補助金基盤研究(B), SCAT 研究助成および JST A-STEP の補助を受けた。