

電磁界計測のための高速電気光学変調デバイス

村田 博司

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 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)は、DCからTHz帯にもおよぶ広帯域な応答が可能であり、電磁界計測に非常に有効である。なかでも、LiNbO₃、LiTaO₃は強誘電性光学結晶であり、自発分極の方向によって相互作用の極性が決まる。近年、これらの強誘電性光学結晶の自発分極の方向を、基板内において任意の形状で反転させる技術が開発されて、高性能な非線形光波長変換デバイスが得られている。この分極反転技術を利用すると、電磁界-光波相互作用の極性を自在に設定・調節することができるので、高性能な電磁界計測デバイスを実現することができる。例えば、アンテナ電極を光導波路に沿ってアレイ状に並べたデバイスに分極反転技術を適用すると、1つのアンテナアレイだけで複数の指向性を同時に得ることができる。到来方向推定技術としても有望と考えられる。本稿では、我々が提案しているデバイスについて報告する。

キーワード 電磁界計測, 光変調, 分極反転, 平面アンテナ, 指向性制御, 光集積回路

High-Speed Electro-Optic Devices for Electro-Magnetic Field Measurements

Hiroshi MURATA

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 The Pockels effect based on a nonlinear electronic polarization is attractive for electro-magnetic field measurements, since it can respond to an electric field in the extremely wide frequency range from DC to THz. LiNbO₃ and LiTaO₃, which are important Pockels crystals, also exhibit ferroelectric responses. Therefore, the sign of interactions between an electro-magnetic field and a lightwave is dependent on the direction of their spontaneous electric polarization. Recently, the technology for arbitrary reversal of the direction of spontaneous polarization in LiNbO₃ and LiTaO₃ has been developed and applied to the fabrication of nonlinear optical devices to obtain high-performance light-wavelength conversion. Utilizing the polarization reversal technology to electro-optic devices for electro-magnetic field measurements, several devices with advanced functions are obtainable. In this report, the new electro-optic device we have proposed is presented.

Keywords Electro-Magnetic Field Measurement, Optical Modulation, Polarization Reversal, Planar Antenna, Directivity Control, Optical Integrated Circuit

1. はじめに

LiNbO₃、LiTaO₃は、電子分極に起因する1次電気光学効果(ポッケルス効果)を示す。その応答周波数は、DCからTHz帯まで達しており、電磁界計測において非常に有用である。

また、LiNbO₃、LiTaO₃は強誘電性光学結晶であり、比較的大きな自発分極を持っている。しかし、結晶が開発された当時は、組成比や欠陥等の精密な制御が難しく、その強誘電性を発現させること、すなわち、自発分極の方向を外部印加電界によって反転させることは困難であった。1990年代に結晶

成長技術が大きく進歩して高品質な光学結晶が得られるようになり、LiNbO₃、LiTaO₃結晶の自発分極を反転させることが可能となった[1]。この分極反転技術を用いて微細な周期分極反転グレーティングを形成することで、高性能非線形光波長変換デバイスが開発されている。これらの波長変換デバイスは、レーザーディスプレイ等に実用化されている[2]。

本稿では、電磁界計測のための電気光学変調デバイスにおける分極反転技術の可能性について述べる。デバイスを構成するLiNbO₃、LiTaO₃結晶基板にあらかじめ選択的に分極反転

構造を形成すると、電気-光相互作用の符号を局所的に選択的に反転させることができる。したがって、分極反転領域を光波との相互作用の符号や大きさに応じて適切に定めることにより、高機能・高性能なデバイスを得ることが期待できる[3]。特に、対象となる信号が準ミリ波帯からミリ波帯になると、変調電極や給電線路における信号の位相変化や減衰、さらには光波走行時間の影響を考慮する必要があり、分極反転技術は非常に有効であると考えられる。

以下では、我々が提案しているアンテナ電極を用いた光変調デバイス[4]について述べる。

2. アンテナ電極を用いた光変調デバイス

2.1. デバイスの構造

図1に、デバイスの基本構造を示す。基板には LiNbO₃ や LiTaO₃ 等の強誘電性電気光学結晶を用いて、自発分極の方向を基板に垂直な方向に取る (z-cut 結晶を用いる)。基板表面にマイクロストリップパッチアンテナとマイクロストリップ平行結合線路定在波共振型電極を直結させたアンテナ電極を形成する。このアンテナ電極を直線光導波路に沿ってアレイ状に配置する。光導波路は、設計光波長においては単一モード導波路であるとし、複数の直線導波路を共振型電極の下部に配置してある。さらに、各導波路には電波-光変換の指向性に対応する異なる分極反転構造を作製する。基板の裏面は接地電極である。

パッチアンテナで受信された電波信号はマイクロストリップ線路を介して、共振型電極へ給電される。共振型電極の長さは、所望の電波信号周波数で定在波共振するように定めてあり、定在波共振電界によって光導波路中を伝搬する光波が変調される。また、アンテナ電極素子を光導波路に沿って複数個アレイ状に配置させることで、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つ。このとき、分極反転構造を導入すると、アンテナ電極間隔はそのまま、指向性の主ビーム方向を変えることができる。換言すると、分極反転パターンを変えることで、所望の方向から到来する電波信号のみを選択的に光信号へ変換することができる。図1のように、各導波路に異なる分極反転パターンを定めることで、対応する方向から到来する電波信号によって変調された光 (位相変調光) を得ることができる。

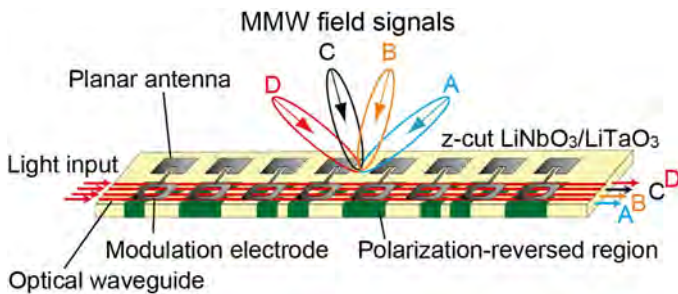


図1 分極反転構造アンテナ電極光変調器の基本構造

2.2. 分極反転による指向性制御

光導波路中を伝搬する光波がN素子のアンテナ電極アレイにより受ける光変調特性を考える。光波伝搬方向を+y方向とする。図2のように入射角度θで到来する平面波の電波信号は、アンテナで受信されて共振型電極に送られ、共振型電極には定在波変調電界が誘起される。

共振型電極上の定在波電界は、一般に次式のように書ける。

$$E_m^0(x, y, z, t) = E_0 f_m(x, z) \sin(n_m k_m y) \cos(\omega_m t) \quad (1)$$

ここで、E₀ は電界振幅、f_m(x, z) は x-z 断面における電界の分布関数、n_m は信号の電極 (線路) 上での実効屈折率、k_m は真空中での信号の波数、ω_m は信号の角周波数である。

各アンテナ電極は同じ形状で同じ特性であるとし、間隔を S とする。このとき、h 番目の共振型電極における定在波変調電界は、入射角 θ による位相差を考慮すると、次式となる。

$$E_m^h(x, y, z, t, \theta) = E_0 f_m(x, z) \sin(n_m k_m \{y - (h-1)S\}) \times \cos(\omega_m t + n_0 k_m (h-1)S \sin \theta) \quad (2)$$

ここで、n₀ は大気中の屈折率 (=1) である。

(2)式は、静止座標系から見た変調電界である。光変調特性を求めるためには、光波群が光導波路中を伝搬する時間 (光波走行時間) 内の位相変化を考慮して、「光波が見る変調電界」を求めねばならない。「光波が見る変調電界」は、静止座標系 (x, y, z) から、光波群と共に進む運動座標系 (x', y', z) (y' = y - v_gt) への変換により、次式のように求めることができる。

$$\begin{aligned} \tilde{E}_m^h &= E_m^h(x, y, z, \frac{y-y'}{v_g}, \theta) \\ &= E_0 f_m(x, z) \sin(n_m k_m \{y - (h-1)S\}) \\ &\quad \times \cos(n_g k_m y + n_0 k_m (h-1)S \sin \theta + \phi) \end{aligned} \quad (3)$$

ここで、v_g は光波の群速度、n_g は光波の群屈折率、φ は光波がデバイスに入射した時の信号の位相である。光導波路中を伝搬する光波が受ける屈折率変化は、この電界に比例する。

ここで、基板の自発分極の向きを選択的に反転させることを考える。自発分極の向きが反転すると、光波が受ける屈折率変化の符号が逆転する。そこで、自発分極のパターンを表す関数 P(y) を導入する。自発分極を反転させた領域で P(y) = -1、それ以外の領域で P(y) = +1 と定義すると、出力される光波の位相変化量 (位相変調指数) は次式となる[3]。

$$\begin{aligned} D(\theta) &= \frac{\pi}{\lambda} n_e^3 r_{33} E_0 \Gamma \\ &\quad \times \sum_{h=1}^N \int_{(h-1)S}^{(h-1)S+L_e} P(y) \sin(k_m n_m \{y - (h-1)S\}) \\ &\quad \times \cos(n_g k_m y + n_0 k_m (h-1)S \sin \theta + \phi) dy \end{aligned} \quad (4)$$

ここで、λ は光波波長、n_e は異常光屈折率、r₃₃ は電気光学係数、Γ は印加電界低減定数 (光波電界の分布関数と変調電界の分布関数との重なり積分)、L_e は共振型電極の長さである。

図3に電波-光信号変換の指向性の計算例を示す。図3は、

8素子のアンテナ電極アレイにおいて、2倍波で共振する定在波共振型変調電極を用いた場合の例である。適切な分極反転パターンをあらかじめ基板に作製しておくことで、最適信号変換角度やその角度幅を自在に設定することができる。

以上のことから、分極反転構造を用いることにより、特定の角度から入射した電波信号による電界成分のみを、光信号に変換可能であることがわかる。

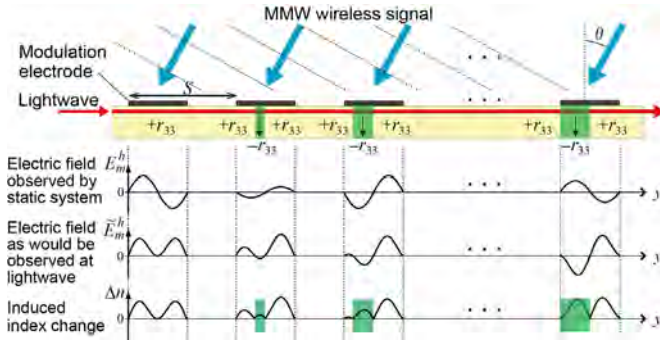


図2 共振型電極における電界と光波が受ける屈折率変化

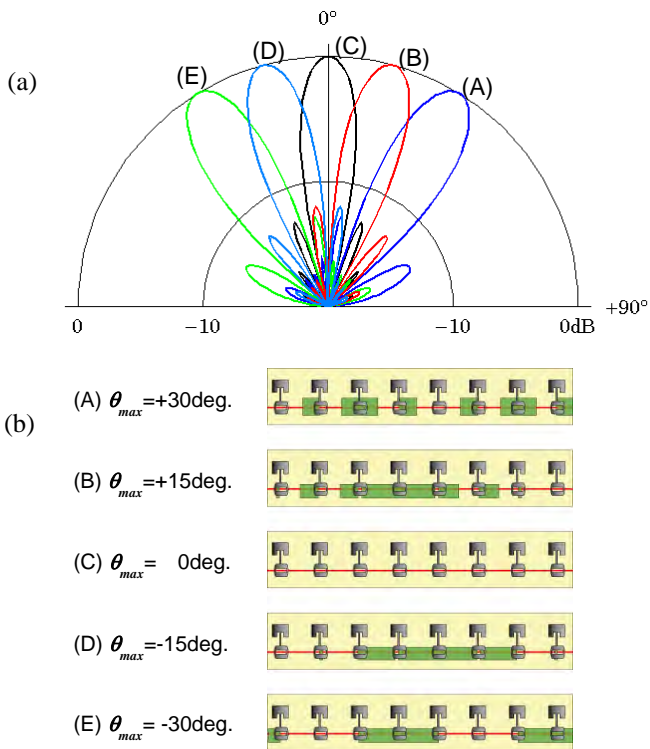


図3 電波-光信号変換の指向性(a)とこれらの特性を得るための分極反転パターン(b)

2.3. デバイスの設計と試作

このデバイスの設計のもう一つのポイントは、アンテナ電極である。アンテナ電極の設計では、マイクロストリップパッチアンテナと定在波共振型変調電極それぞれの共振周波数とインピーダンスを整合させて接続する必要がある。我々は、

HFSSを用いてアンテナ電極の解析と設計を行っている。

動作周波数 38GHz、基板を 0.4mm 厚 z-cut LiTaO₃ とした場合のアンテナ電極の解析結果と設計例を図4に、試作したデバイスの写真を図5に示す。

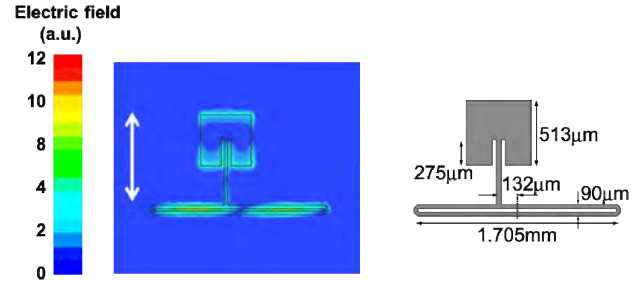


図4 アンテナ電極の解析結果と設計パラメータ

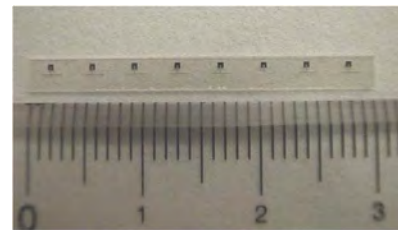


図5 試作したデバイス

2.4. 動作実験

基本動作検証実験のための系を図6に示す。直線偏波のミリ波 38GHz 信号をデバイスの上部から照射し、各光導波路から出力される光のスペクトルを光スペクトラムアナライザで観測した。照射した信号の電力は 10mW 程度である。

図3(b)における(B)および(C)の分極反転パターンを施した光導波路からの出力光スペクトルの測定結果を図7に示す。図7(a)はデバイスへの入射角 $\theta=0^\circ$ の時、図7(b)は入射角 $\theta=15^\circ$ の時の出射光スペクトルである。図7(a)では分極反転パターン(C)を持つ光導波路からの出力光にミリ波信号照射による光変調サイドバンドが確認できるが、分極反転パターン(B)を持つ光導波路からの出力光では光サイドバンドは非常に小さい。一方、図7(b)では、両者の特性が逆転している。つまり、分極反転パターンを変えるだけで、電気-光変換の特性が明瞭に切り替わっていることがわかる。

図8は、信号のデバイスへの入射角と位相変調指数((4)式)をレーダーチャートで示したものである。分極反転を導入することで、電磁界センシングの指向性をコントロールできることがわかる。試作デバイスでは、光導波路(B)と光導波路(C)における信号の分離比は 13dB であった。これは、理論特性(図3(a))と良い一致を見ている。

アンテナ電極素子数を増やせば、変換効率と分離比がさらに向上する。また、変調電極の構成を工夫すれば、4~6本程度の光導波路を同時に変調することも可能である。つまり、4~6チャンネルの信号分離が期待できる。各導波路からの出力

光を比較すれば、到来方向推定も可能と考えられる。

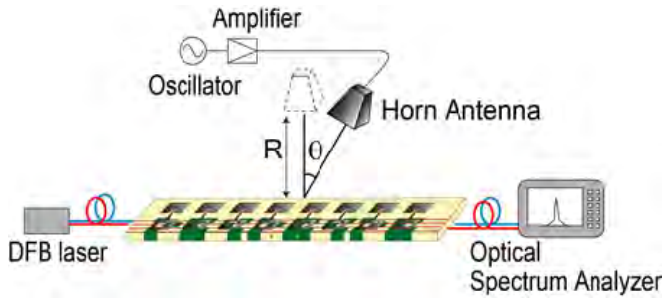


図6 実験系

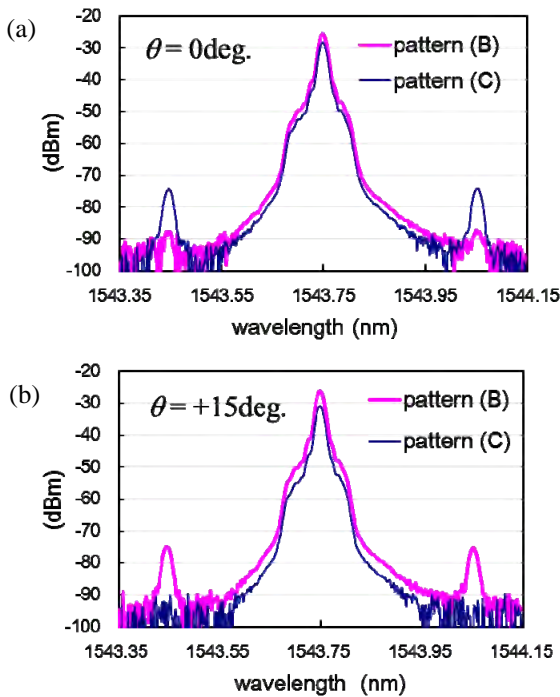


図7 変調光スペクトルの例
(a) 入射角 $\theta=0^\circ$, (b) 入射角 $\theta=15^\circ$

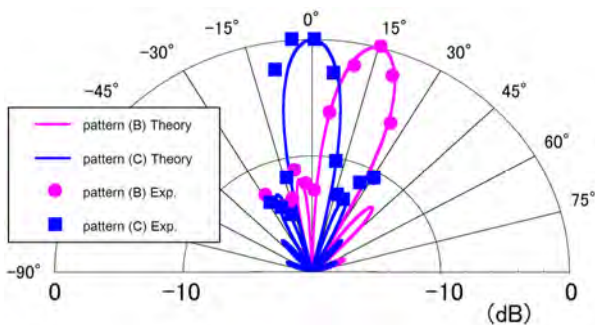


図8 電波-光信号変換の指向性の測定結果

3. むすび

高周波電磁界と光波の相互作用においては、分極反転技術による極性の制御が有用であることを示した。ミリ波帯では、通常の線路における信号減衰が顕著となるので、アンテナと光変調電極を直結したアンテナ電極光変調器が有効であるが、分極反転技術はアンテナ電極光変調器の有用性をさらに高めることができる。

また、本稿で紹介したデバイスは、見方を変えると、光変調によって電磁界の時間的畳み込み演算を行っていると考えられる。光波の走行時間による時間遅延とレーザー光のコヒーレンス時間が十分長いことを利用して畳み込み特性を得ている。時間的畳み込みを利用して、デバイスの高感度化を図っているとも言える。構成をさらに工夫すれば、高周波信号同士の相互相関等を得ることも可能である。

本稿で紹介したアンテナ電極変調デバイスの他にも、パッチアンテナに光変調電極を直接組み込んだタイプの無線-光変換デバイスの研究も進めている[5], [6]。共振型電極を用いた場合に比べて変換効率は低いものの、非常に簡単な構成であり、かつ精密な共振特性の調節が不要という特長がある。分極反転による特性制御も可能である。

謝 辞

日頃ご指導頂く、大阪大学 岡村康行教授、永妻忠夫教授に深く御礼申し上げます。また、デバイスの解析・設計・実験にご協力頂いた、本学卒業生および大学院生、須田規仁君、宮中亮太君、Yusuf Nur Wijayanto 君、高武直弘君に感謝します。本研究の一部は、文部科学省科研費基盤研究(B)およびSCAT 研究費助成の援助を受けた。

参考文献

- [1] 宮澤信太郎, 栗村直 編, “分極反転デバイスの基礎と応用”, オプトロニクス社, 2005.
- [2] 黒田和男, 山本和久, 栗村直 編, “解説レーザーディスプレイ”, オプトロニクス社, 2010.
- [3] 村田博司, “分極反転電気光学変調器”, オプトロニクス, **vol.30**, no.351, pp.112-117, 2011.
- [4] H. Murata, R. Miyanaka, 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] Y. N. Wijayanto, H. Murata, 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.
- [6] Y. N. Wijayanto, H. Murata, 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.