

計測用途向け高速低電圧電気光学変調器の開発

市川 潤一郎[†] 及川 哲[†] 日隈 薫[†] 石川 佳澄[†] 本谷 将之[†]

[†]住友大阪セメント株式会社 〒274-8601 千葉県船橋市豊富町 585 番地

E-mail: [†] { jichikawa, soikawa, khiguma, yoishikawa, mmotoya }@soc.co.jp

あらまし 電気光学効果をもちいた光変調器の開発の歴史は長く、たえず低駆動電圧化と高周波化技術の開発が進められてきた。今日、ニオブ酸リチウムを用いた光変調器は、光ファイバ長距離大容量通信で広く使われている一方で、計測用途への適用検討も進められている。各国の研究機関や企業が通信用光変調器の開発を競い合い、低電圧で高周波駆動が可能な光変調器が出現したため、光変調方式による高純度ミリ波発生や光周波数コム発生への応用が注目されている。これらの計測用光源用途では、半波長電圧より大きな電圧で高周波駆動することもあり、光変調器には、さらなる高周波化と低電圧化が求められている。本稿では、電気光学変調器の高周波化と低消費電力化の技術を中心に報告する。

キーワード 光変調器, 電気光学効果, LiNbO₃, 電気光学ポリマー

Development of High Speed and Low Drive Voltage Electrooptic Modulators for Measurement Applications

Junichiro ICHIKAWA[†] Satoshi OIKAWA[†] Kaoru HIGUMA[†] Yoshizumi ISHIKAWA[†] and
Masayuki MOTOYA[†]

[†] Sumitomo Osaka Cement Co., Ltd. 585 Toyotomicho, Funabashi, Chiba, 274-8601 Japan

E-mail: [†] { jichikawa, soikawa, khiguma, yoishikawa, mmotoya }@soc.co.jp

Abstract An optical modulator based on electro-optic effect was proposed for several decades ago, and techniques for reducing driving voltages and extending operating frequencies have been developed by many research institutes and the industry in and out of Japan. Now, optical modulators using Lithium Niobate substrate are commonly used in broadband optical fiber communication systems, and applications to measurement systems using the modulators have been proposed. The development of low voltage, high frequency modulators have enabled the applications for millimeter wave generation and optical frequency comb generation. In these applications, still more reduction of voltage and furthermore expansion of operating band are required because driving voltage is generally larger than the half-wave length voltage. This paper reports technologies for reducing driving voltages and extending operating frequencies.

Keyword Optical Modulator, Electro-Optic Effect, LiNbO₃, Electro-optic Polymer

1. はじめに

電気光学効果を用いた光変調器は、光ファイバ通信網において送信デバイスとして重要な役割を担っているほか、様々な計測分野においても応用が期待されている。近年は、特に、光変調方式を用いた高純度ミリ波生成技術が注目されている。光変調方式を用いた高純度ミリ波発生および配信技術は、すでに電波天文台アルマ望遠鏡 (Atacama Large Millimeter / submillimeter Array : ALMA) での運用が開始された [1,2]。この高純度ミリ波の有用性と利用可能性は、電波天文台のような究極の特性が必要となる領域だけにとどまらない。60~70GHz帯のミリ波帯の無線システムの普及や新たな周波数領域の開拓とともに、その二次高調波や

100 GHz 超の信号の精密測定のための基準信号 [3] としても注目されている。さらに、ミリ波イメージング、ミリ波帯 RoF (Radio on Fiber) などの分野においても、この技術への期待が高まっている。これらの用途においては、高い周波数純度を持つ基準信号が求められることから、光変調方式 [4, 5] のプロジェクトが相次いで始まっており、今後、さらなる技術の広まりも期待される。

本稿では、高純度ミリ波発生技術の主要課題である、変調器の高周波化および低電圧化技術を報告する。

2. 電気光学効果を用いた外部変調器

外部変調器で用いられる基板の電気光学(EO)材料に

は、ニオブ酸リチウム (LiNbO₃:LN) が一般的に用いられている。進行波電極構造を用いて光と電気信号の速度を一致させること(速度整合)により、電極の作用長を確保しながら高速動作を実現できる [6]。また、LN の EO 効果の線形性は極めて高く、LN を光変調器の材料に用いれば、屈折率の変化量は電気信号の振幅に正確に比例する。この線形な高速応答性が LN を用いた EO 変調の最大の利点である。

2.1. 高消光比変調器

LN を用いて MZ 干渉計型の変調器を作製すれば、制御電圧に対する光振幅・強度変化である変調曲線は、理論上は正確なサインカーブ状となる。しかしながら、製造誤差などにより OFF 状態においても光出力が残留し、消光比が悪化するという問題がある。商用の通信用のゼロチャープ LN 変調器の消光比仕様がおおむね 40 dB 以下であり、不要な波長変化の指標であるチャープパラメータ α の仕様はおおむね 0.15 以内であるが、MZ 干渉計の光量のアンバランスがその一因である。通信用向けには、支障ない特性であるが、精密な計測用途では、問題が起こる可能性がある。そこで、図 1 に示すように MZ 型変調器を三個集積し、光回路のアンバランスを外部から加えた電圧 (MZA, MZB) で補償するという手法が提案されており、ON/OFF 消光比特性の大幅な改善が可能である [7]。

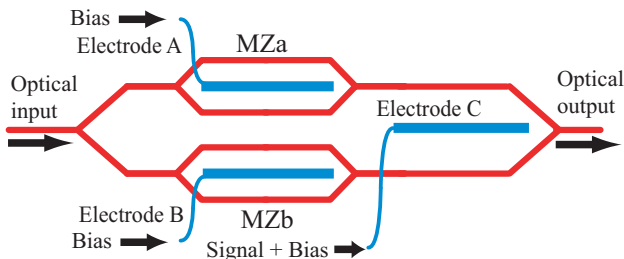


図 1 光量バランス補正による高消光比変調
Fig. 1 High Extinction Ratio modulator with Optical Trimmers

2.2. 光変調器によるミリ波発生(光 two tone 法)

光 two tone 法とは、波長のわずかに異なる二つの光を混合して光受光素子(PD)に入射し、差周波にあたるミリ波周波数のビート信号を取り出す方法である。波長を安定させた 2 つの光源を用いる方法と、一つの光源から光変調により複数の周波数成分をもつ変調光を用いる方式がある。

周波数 f_m の電気信号で位相変調器を駆動した場合、変調光スペクトルは、光源の周波数成分 f_0 の両側に変調周波数 f_m の周波数間隔で並ぶ側帯波成分を含んだものになる。側帯波成分の強度は、側帯波の各次数に応じたベッセル関数に従って変化するため、各周波数成分は、駆動信号の振幅、つまり駆動電圧の大きさに調整が可能である。そこで、目的とする周波数に対応す

る側帯波を二つ残して、搬送波や不要な側帯波成分をフィルタで除去し、高速な PD で検波すれば、ビート信号として極めて高純度のミリ波信号を取り出すことができる [8, 9]。

MZ 変調器の場合、バイアス点の調整により、さらに実用的なミリ波の発生が可能である。バイアス点をバイアススルと呼ばれる条件に設定して、周波数 f_m で駆動すると、搬送波成分 f_0 、偶数時の側帯波成分 $\pm 2f_m, \pm 4f_m, \dots, \pm 2nf_m$ 成分は抑圧される。奇数次の側帯波 $\pm f_m, \pm 3f_m, \dots, \pm (2n-1)f_m$ の成分は、光変調度、つまり駆動信号の大きさに従って変化する。バイアス点をバイアスフルと呼ばれる条件に設定して、周波数 f_m で駆動すると、奇数次の側帯波 $\pm f_m, \pm 3f_m, \dots, \pm (2n-1)f_m$ の成分は、抑圧され、搬送波 f_0 および偶数時の側帯波成分 $\pm 2f_m, \pm 4f_m, \dots, \pm 2nf_m$ の成分は、駆動信号の大きさに応じて変化する。駆動電圧の振幅とフィルタの組合せで、所望の次数同士の光 two tone 信号を発生可能であり、ビート信号として光検出器から高純度電気信号を取り出すことが容易である [10]。

光 two-tone 法によるミリ波の純度は、変調器の消光比、チャープ特性、バイアスや駆動振幅の制御精度などで制限される。光変調器法の大きな利点は、位相ノイズが極めて小さいこと、光のまま配信が容易であることである。技術的には、1980 年代にさかのぼれる古い技術であるが、これまで、高い消光比特性を有し、高周波で駆動電圧が小さい変調器が存在しなかったため、普及が進まなかった。

前述の高消光比変調器は、バイアススル設定時に搬送波成分をほぼ完全抑圧することが可能であり、極めて高純度の光 Two Tone 無線信号の生成に適している。その利点ゆえに、ALMA [1] のような究極的な精度を要する電波天文に適用された。一方、電波天文以外のミリ波発生用途では、特性とコストとのバランスが重要であり、変調器を低電圧化および広帯域化し、駆動電子回路の負荷を下げシステム全体を低コスト化することが課題である。

2.3. 光変調器による光コム信号の発生

計測関連技術として、光変調器による光周波数コム発生技術について簡単に紹介する。位相変調光のスペクトルは、各周波数成分の強度が不揃いではあるが、周波数間隔は正確に f_m であるため、これを光周波数コム発生器として用いることも試みられてきた。光周波数コム発生器としてはスペクトルが平坦な方が望ましいため、低損失な光位相変調器の両端に反射ミラーを形成してファブリペロエタロン構造として、大きな電圧で駆動して側帯波成分の強度を平坦化する工夫がとられている [11]。広いコム帯域を得るには、広帯域の変調器、低電圧の変調器の方が有利である。

一方、MZ 変調器では、2つの位相変調器の駆動電圧の振幅とMZ 変調器のバイアスを調整することにより、平坦なスペクトル特性の光周波数コム信号を得ることが可能である [12]. この場合、変調器をおよそ $5V\pi$ の大きな電圧振幅で駆動する必要があるため、やはり変調器の低電圧化が望まれる。

3. LN 変調器の低駆動電圧化技術

周波数特性を広帯域化する方法のうち、最も容易な手法は作用部電極を短くすることである。図2は、制御信号と伝搬光の速度が一致する条件における光応答性の試算例である。電極長 L が短いほど、周波数応答が良好であるが、周波数特性と駆動電圧特性はトレードオフ関係にある。

以下に、広帯域化・低電圧化を実現する手法の例をいくつか紹介する。LN 光変調器の広帯域化と低駆動電圧化への有効性が特に高い技術として、リッジ型光導波路 [13-15]、および、薄板構造 [16-19] が広く知られている。図3にリッジ型光導波路構造、図4に薄板型構造の模式図を示す。いずれも、電気信号の光への作用効率（重畳積分）を極限まで高めて低電圧化をはかる設計思想であり、脆性材料であるLN に対して超精密加工を駆使して高効率化を実現するものである。ともに、1970 年台に提案された方式であるが、脆性材料ゆえの加工プロセスの際の破損、強い焦電性材料ゆえのサージによるダメージなどの問題があり、実用化には四半世紀の年月を要した。現在、一部の通信用変調器に適用されているが、チップサイズの大きな高消光比変調器の作製に適用すると、加工の形状や加工精度によっては、加工表面で散乱や反射に起因する不要偏波成分の発生や不適切伝搬モード発生によって、ON/OFF 消光比特性が劣化するおそれがある。

また、電気信号の光への作用効率を実効的に高める手段として、光導波路を信号電極の近傍に配置する方法 [20] や、作用部の光導波路をマルチモード化する方法 [21] が提案されている。いずれも、効率を高めるために、電界が強い電極の近傍に光の強度分布が高い部分を配置する設計思想である。LN 基板の微細な加工が不要であり、基板の加工歪や屈折率や光導波路幅の不均一性に起因する光学的特性の悪化を回避できる可能性がある。しかしながら、光導波路間のクロストークの発生や高次モードへの変換の発生によって消光比特性が制限される。また、プロセスにおける位置ズレや線幅の許容度が小さい、といった欠点がある。図5に光導波路を、信号電極と接地電極の中心付近に配置した構成と信号電極の近傍に配置した構成の模式図を示す。信号電極の近傍に二つの光導波路を配置すれば、電界効率が改善し駆動電圧の低減が実現できる

が、光導波路間の光のクロストークが無視できない。光のクロストーク対策としては双方の光導波路の光の伝搬定数や伝搬特性を変える手法が有効である。必然的に光導波路構造、実効的電界効率ともにアンバランスな構成となるため、そのまま適用するとチャープが発生するが、作用部導波路の非対称性を途中で入れ替えるなどの工夫により、不完全ながらもチャープの発生を抑制することは可能である [20]. また、作用部の光導波路をマルチモード伝搬条件で作製しても、20dB 以上の On/OFF 消光比が得られることが報告されている [21].

他に、低駆動電圧化の技術として、電気光学効果がさらに大きな LN の使用 [22] や分極反転構造の適用 [22-24] が提案されている。分極反転構造の適用は、LN 変調器だけでなく、EO ポリマーを材料とする光変調器でも用いられており [26]. 分極反転構造は、集積型変調器における信号電極数の削減およびチャープパラメータの調整に有効な技術でもある。

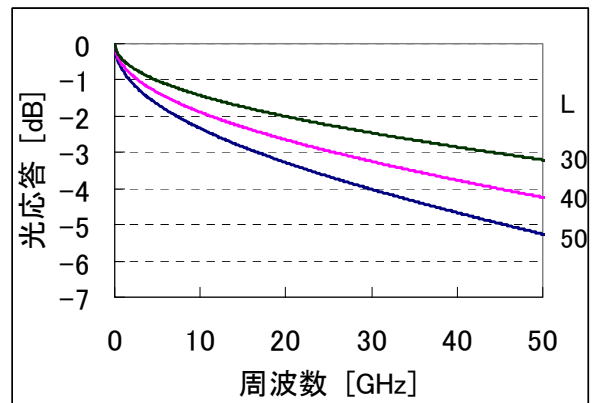


図2 光応答特性の電極長[mm]への依存性
Fig. 2 Electrode length [mm] dependency of Optical Response

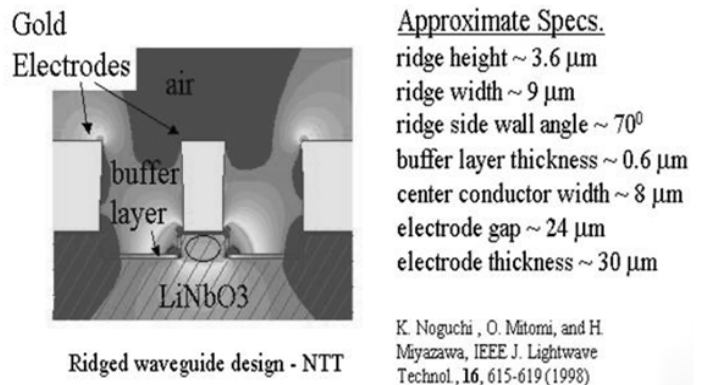


図3 リッジ型導波路構造による実効高効率化 [15]
Fig. 3 Enhanced Effective Electric field by Ridge waveguide structure [15]

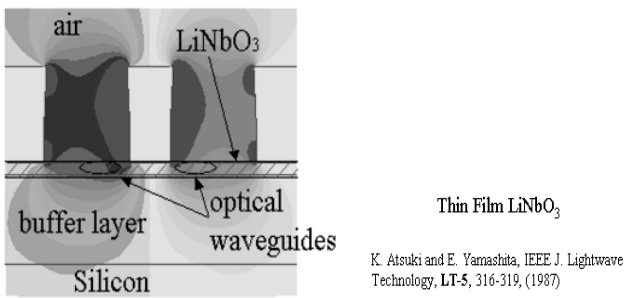


図4 薄板構造による高効率化 [18]

Fig. 4 Enhanced Effective Electric field by Thin Film Structure [18]

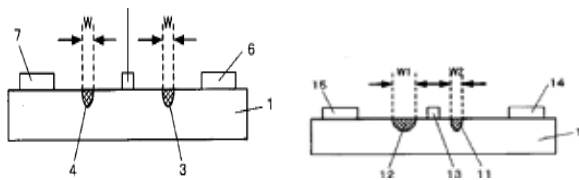


図5 光導波路の配置による実効高効率化の例 [20]

Fig. 5 Enhanced Effective Electric field by Asymmetric MZ waveguides [20]

4. LN 変調器の高周波化技術

先に述べたとおり、周波数特性と駆動電圧特性はトレードオフの関係にあり、現実的な駆動電圧の光変調器を LN で実現するには、数十ミリ以上の長さの作用部電極が必要となる。光とミリ波の速度の完全整合は必須の前提条件であり、さらに、いかにミリ波信号が減衰しない回路とするかが、技術の鍵となる。ミリ波帯対応ための課題は多岐にわたるが、ここでは、高周波様変調器におけるミリ波信号の損失の問題、特にミリ波で問題となる放射損失および接続部での損失を中心に技術課題と改善方法について述べる。

4.1. 放射損失の低減

誘電体を基板とした線路においては、マイクロ波—ミリ波の信号の伝搬損失の主要因は、導体の抵抗、特に表皮損失に起因する導体損失 α_c 、誘電体の複素誘電率 ($\tan \delta$) に起因する誘電損失 α_d と基板や筐体内部への放射損失 α_r の三つである。導体損失 α_c は、電極材料自体の抵抗値、電極表面の粗さおよび電極構造に依存する。商用の通信用変調器には、速度整合、インピーダンス整合と制御信号の低損失の伝搬を実現するため基板の表面に良導体を材料としたコプレーナ線路 (CPW) の電極が形成されている。CPW は良導体が基板の表面に配置される構成であり、酸化による変質の防止やマイグレーションの防止が必要である。導体損失

α_c の低減の点では、銀 (Ag) や銅 (Cu) などが望ましいが、変質やマイグレーションの防止のために、電極の材料としてはもっぱら金 (Au) が用いられている。電極材料に高温超伝導材を用いる試みも提案されており、その試作結果も報告されているが、材料本来の特性を発現するに至っていない。

市販の LN 結晶は、調和熔融組成であり Li 欠損点欠陥が多数含まれているにもかかわらず、誘電損失は比較的小さい材料である。その特性指標である複素誘電率は、ミリ波帯においても小さく、100 GHz における $\tan \delta$ は 0.004 との報告 [27] がある。THz 帯では吸収損失が大きいものの、ミリ波帯までに帯域では高周波回路の基板材料として十分使用できる材料である。

一方、放射損失については、LN が高誘電率 ($\epsilon_r=28, 45$) であること、また、CPW 自体が放射しやすい構造であることから、導体損失や誘電損失より低減策を深く検討する必要がある。

なお、CPW から誘電体基板へのマイクロ波・ミリ波は、CPW 側方への放射との基板の厚さ方向への放射に大別される。いずれも、CPW が周囲に対して速波導波路となるためにおこる本質的な放射損失である [28]。CPW 線路から誘電体基板への放射は、電極構造 (中心電極の幅、接地電極間の距離) に依存し、図 6 に示すように、側方および基板側に円錐状に特定の角度方向に強く放射する [28]。また、接地電極の間隔が大きいほど顕著である。したがって、配線電極の屈曲部、テーパ部や接続用パッド部で特に大きい。

変調器チップを金属筐体を実装して底面を導体とした構成 (CB-CPW) では、誘電体導波管としての作用が強いため、基板モードへの結合による放射損失は極めて大きい。放射損失を低減するには、カットオフとなるように基板を薄くすることや、二層の誘電体基板構造にすること [29, 30] が有効である。また、CPW の表面漏洩モードは接地電極の幅にも依存する [31]。

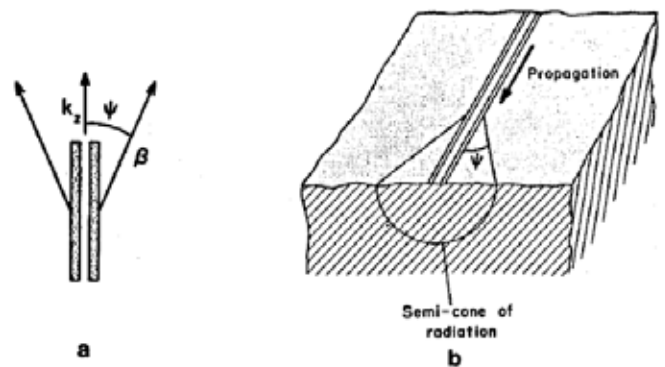


図6 CPW 線路における放射損失 [28]

Fig. 6 Radiation loss from CPW [28]

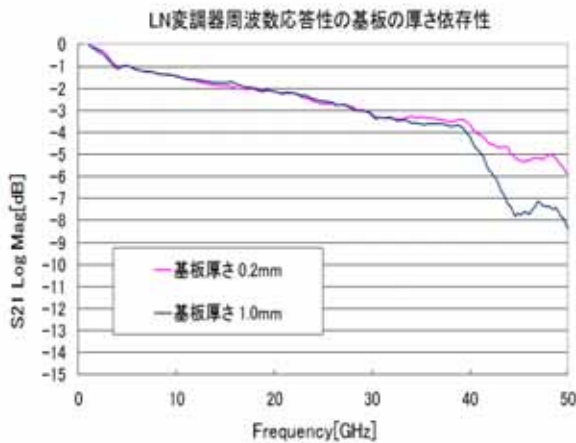


図 7 CPW 線路の放射損失による伝搬特性劣化の例
Fig. 7 Frequency dependency of optical response

変調器チップの幅や厚さによって、LN 変調器の帯域が制限されることは、古くから体験的に知られており、幅の狭い LN チップを用いた帯域の 20 GHz への拡大 [32] が報告されている。図 7 に周波数応答性の基板厚さ依存性の例を示す。LN を基板とした変調器では、広帯域のために CPW の屈折率を光波に対する屈折率（およそ 2.2）としていること、そのために CPW の接地電極間隔が広いこともあり、放射損失が大きくて不利である。また、LN の誘電率が高いため、SiO₂ 基板や Al₂O₃ 基板上の CPW では、100 GHz 以上で顕われるこの放射が、数 10 GHz でも顕著に表れる。解決策としては、チップのサイズダウンによる回避のほか、回路設計の工夫により、ある程度の低減は可能である。さらに線路の屈曲部の CPW 線路の中心電極と接地電極間を非対称にする構成 [33] や接地電極間隔を狭める構成 [34] が有効と考えられる。

これらの構造について、放射損失を低減するために、HFSSTM [35] などの電磁界解析をもちいて解析することは、LN-X 板のように、線路の進行方向によって実効誘電率が変化する構成においても、原理的には可能である。しかしながら、数ミクロンの電極構造から全長数十ミリの基板サイズを含めて、低周波からミリ波帯までの解析が必要であり、特性設計するには規模の大きな計算が必要となる。

放射の基板厚さ依存性は、基本的には、基板モードへの結合に起因するものである。LN の場合、薄い基板を用いることにより透過帯域が拡大する [36]。また、その結合周波数 f_c は、基板の厚さに依存し、LN-Z 板の場合には、 $f_c = 11.9/t$ [GHz] (t は基板厚さ [mm]) に強い放射損失があらわれる [37]。結合周波数 f_c 付近においては、マイクロ波ミリ波のほとんどが基板に放射、結合するため、光変調効率が大きく悪化する。

なお、基板厚さ方向への放射が、配線電極の屈曲部やテーパー部で強く起こることについては、実験的にも確認 [38, 39] されており、その解析も試みられている [40]。

CPW の側方および基板方向への放射のいずれにおいても、基板を 0.1mm 程度の肉薄に加工する方法が特に有効であることが、実験的に確認されている [41]。なお、厚さ 0.1 mm の LN 変調器基板は、低誘電率の材料によって補強することによって、金ワイヤーボンディングが可能であり、実装、モジュール化の際は、従来構造の LN 変調器チップとほぼ同様の取り扱いが可能である。このように本方法は、40 GHz~50 GHz の帯域での応答性を平坦化した変調器モジュールの実現に有効である。しかし、薄板化加工による機械的強度の低下に伴う基板の歪みにより、不要偏波成分が発生するなど、消光比特性を悪化させるおそれもある。

最近、変調器としてモジュール化されたものでなく、高周波プローブを用いての信号給電による駆動であるが、米国 Delaware 大学から、LN 変調器の 280 GHz における変調動作の報告 [42] があった。この報告の変調器チップでは、LN 基板を 30 μ m の厚さに加工している。基本的に、上記で議論してきた設計思想と同じである。

4.2. 接続部における損失の低減

外部回路、変調器チップの接続部のマイクロ波・ミリ波特性の改善も、V 帯(40-75GHz)~W 帯(75-111GHz)の周波数応答性の平坦化や特性確保のための課題である。LN 変調器の電極は高誘電率材料上の特種な CPW であるため、フィードスルー部の形状、中継基板の材料、スタブでの反射や基板への放射が動作帯域を制限する。LN 材料は誘電率の異方性が大きく三次元電磁界解析の適用が難しかったため、特性改善には主にカットアンドトライ的なアプローチが取られてきた。しかしながら、最近、誘電率異方性を考慮した誘電率異方性を考慮した三次元電磁界解析の技術が確立されてきており、異方性誘電体基板上の回路への適用 [43] も報告されている。

LN 変調器チップと中継基板の接続損失の解析事例としては、LN チップ上の CPW とアルミナ基板上の CPW のリボン接続の特性解析 [44] が報告されている。LN チップと中継基板のギャップや位置ズレを含めて、実験値との整合が確認されている。また、LN 変調器チップと導波管のフィンラインによる接続の解析 [45] も試みられている。CPW 中継基板と同軸コネクタとの接続例としては、ミリ波対応 PD のパッケージ解析例 [46] が報告されている。筐体と中継基板とギャップ、中継基板のサイズや側面処理の特性への影響などの解析が試みられている。

5. 今後の展開

5.1. ミリ波発生技術のその他の課題

高純度ミリ波発生に適した高消光比 LN 変調器は、当社が(独)情報通信研究機構 (NICT) からのライセンスを受け R&D 用途向けに販売している [47] が、その動作帯域の仕様は 10 GHz であった。現在、NICT 委託研究における試作開発において、高消光比変調器の帯域改善と低電圧化に取り組んでおり、帯域を 25 GHz 以上に引き上げるとともに、駆動電圧をほぼ半減させることに成功している [48]。

また、高い EO 効果を持つ材料として、有機 EO ポリマー材料が注目を集めている [49, 50]。まだ、市販デバイスとしての実績に乏しく、強いレーザ光への耐性や特性の経時変化などに課題が残るものの、LN よりも、低消費電力での変調が期待できること、高周波に対応したデバイスの設計自由度が高いこと、などの利点があり、今後、計測用途の変調器としての展開と普及も期待される。

5.2. 光 two-tone 法のその他の応用

計測装置としての実用化の具体的な取り組みとして、PD の周波数応答性評価装置の開発も行われている [51, 52]。光変調器の V_π の周波数依存性に起因する、サイドバンド発生効率の周波数依存性を、光アンプにより補償する機能が付加されており、良好な測定再現性が確認されている。光 two-tone 信号を基準信号としたアンテナの特性計測への取り組みも行われ、良好な結果が得られている [53, 54]。

変調器の低電圧化、広帯域化によって、光による通倍数、電気による通倍の選定の自由度はますます広がりつつあり、また、変調器の安定制御方法の開発が進んでおり [55, 56]、今後さらなる普及と新たな用途開拓が期待される。

6. まとめ

本稿では、ミリ波発生用の光変調器を中心に、その技術的課題や改善の取り組みなどについて紹介した。通信技術の発展で、高安定な光源、高精度な光フィルタなどが実現しつつある一方で、光変調器や PD の高速化・高周波化が進んでおり、計測分野への応用が検討されている。光変調器は、これまで単に電気信号を光信号に正確に変換することであったが、今後は高周波信号の発生をはじめとする様々な分野で利用されると期待される。そのためには、さらなる低消費電力化、高周波化などの技術開発を進めていきたい。

謝辞

本稿の内容の一部は、NICT 委託研究の成果によるものです。

参考文献

- [1] 国立天文台 ALMA 推進室, "ALMA アルマ望遠鏡 | 宇宙への究極の挑戦", (<http://alma.mtk.nao.ac.jp/j/>), (参照 2015-01-01).
- [2] 川西哲也, 木内均, "光で電波を見る - 高い周波数の電波を受信するための基準信号を光で造る -", NICT News, No.430, pp.3-4, Oct.2013.
- [3] 総務省総合通信基盤局電波部, "<基本計画書> 次世代無線通信測定技術の研究開発 基本計画書 「100GHz 超帯域無線信号の高精度測定技術の研究開発」", <http://www.tele.soumu.go.jp/resource/j/fees/purpose/pdf/110127kihonkeikakusho.pdf>, (参照 2015-01-01).
- [4] 総務省総合通信基盤局電波部, "<基本計画書 (案)> 未利用周波数帯への無線システムの移行促進に向けた基盤技術の研究開発「90GHz 帯リニアセルによる高精度イメージング技術の研究開発」", http://www.soumu.go.jp/main_content/000131457.pdf, (参照 2015-01-01).
- [5] (独)情報通信研究機構, "平成 24 年度 高度通信・放送研究開発委託研究「高い臨時設営性を持つ無線両用通信技術の研究開発」研究計画書", http://www2.nict.go.jp/collabo/commission/info/20120322koubo/theme_b001_koubo.pdf, (参照 2015-01-01).
- [6] M. Izutsu, Y. Yamane, and T. Suet a, "Broad-band traveling-wave modulator using a LiNbO3 optical waveguide," IEEE J. Quantum Electron., vol. QE-13, no. 4, pp. 287-290, Apr.1977.
- [7] T. Kawanishi, K. Higuma, T. Fujita, S. Mori, S. Oikawa, S. J. Ichikawa, T. Sakamoto, and M. Izutsu, "40Gbit/s Versatile LiNbO3 Lightwave Modulator," Proc. ECOC2005, Th2.2.6, Glasgow, Scotland, 2005.
- [8] Mender "Agile millimeter wave generation by sideband filtering" SPIE Proc, 3795, 1999.
- [9] P. Shen, N. J. Gomes, P.A. Davies, W. P. Shillue, P.G. Huggard and B.N. Elloson, "High-Purity Millimetre-Wave Photonic Local Oscillator Generation and Delivery," Proc. Inter National Meeting on Mirocrowave Photonics (MWP), pp.189-192, 2003.
- [10] J. J. O'reilly, P. M. Lane et. al, "Optical generation of very narrow linewidth millimetre wave signals," 1992.
- [11] B Widiyatmoko, K. Imai, M. Kourogi 光周波数コム発生器 信学技報 OPE2005-31, 2005
- [12] 坂本高秀 川西哲也 井筒雅之 マハツェンダ型光変調器を用いた超平坦光コム発生のための条件 信学技報 OPE2005-97, 2005.
- [13] I. P. Kaminow, V. Ramaswamy, R. V. Schmidt, and E. H. Turner, "Lithium niobate ridge waveguide modulator," Applied Physics Letters, 1974, vol.24, no.12, pp.622-624, 1974.
- [14] 皆方誠, 野田寿一, "リッジ型光導波路," 信学技報, OQE77-57, 1977.
- [15] K. Noguchi, O. Mitomi, H. Miyazawa, and S. Seki, "A broadband Ti:LiNbO3 optical modulator with a ridge structure," Journal of Lightwave Technology, vol.13, pp.1164-1168,1995.
- [16] E. Yamashita, and K. Atsuki, "Distributed Capacitance of a Thin-Film Electrooptic Light Modulator," Microwave Theory and Techniques, IEEE Transactions on, vol.12, no.1, pp. 177-178, 1975.

- [17] T. Sueta, and M. Izutsu, "High speed guided-wave optical modulators," *J. Opt. Commun.*, vol.3, pp.52-58, 1982.
- [18] K. Atsuki, and E. Yamashita, "Transmission Line Aspects of the Design of Broad-Band Electrooptic Traveling-Wave Modulators," *Journal of Lightwave Technology*, vol.LT-5, pp.316-319, 1987.
- [19] J. Kondo, K. Aoki, A. Kondo, T. Ejiri, Y. Iwata, A. Hamajima, T. Mori, Y. Mizuno, M. Imaeda, Y. Kozuka, O. Mitomi, and M. Minakata, "High-Speed and Low-Driving-Voltage Thin-Sheet X Cut LiNbO₃ Modulator With Laminated Low-Dielectric-Constant Adhesive," *IEEE Photon. Tech. Lett.*, vol.17, pp.2077-79, 2005.
- [20] 特許第 4128510 号 (2008-05-23).
- [21] D. W. Dofli and T. R. Ranganath, "50 GHz velocity-matched, broad wavelength LiNbO₃ modulator with multimode active section," *Electron. Lett.*, vol.28, no.13, pp.1197-1198, 1992.
- [22] 山本太, 横澤政貴, 近藤勝利, 齊藤勉, 神力孝, 市川潤一郎, "Mg:SLN を用いた広帯域光変調器", *電子情報通信学会 2005 総合大会講演論文集*, C-3-1, 2005.
- [23] N. Courjal, H. Porte, A. Martinez, and J. P. Goedgebuer, "LiNbO₃ Mach-Zehnder Modulator With Chirp Adjusted by Ferroelectric Domain Inversion," *Photonics Technol. Lett.*, vol.14, no.11, pp.1509-1511, 2002.
- [24] J. Ichikawa, S. Oikawa, F. Yamamoto, T. Sakane, S. Kurimura, and K. Kitamura, "Zero chirp broadband Z-cut LiNbO₃ optical modulator using polarization reversal and branch electrode," in *Proc. OFC2004*, MF56, 2004.
- [25] F. Lucchi, M. Belmonte, S. Balsamo, M. Villa, L. Trevisan, S. Pensa, G. Consonni, C. Emanuele, P. Vergani, M. Sottocorno, and V. Pruneri, "10Gb/s domain engineered LiNbO₃ integrated electro-optic modulator for inexpensive low voltage drivers," in *Proc. OFC2007*, OWH3, 2007.
- [26] G. Yu, J. Mallari, H. Shen, E. Miller, C. Wei, V. Shofman, D. Jin, B. Chen, H. Chen and R. Dinu, "40 GHz Zero Chirp Single-ended EO Polymer Modulators with Low Half-wave Voltage," in *Proc. OFC2013*, CTuN5, 2013.
- [27] W. M. Robertson, G. Arjavakingam, and G. V. Kopsay, "Broadband Microwave Dielectric Properties of Lithium Niobate," *Electron. Lett.* vol.27, no.2, pp.175-176, 1991.
- [28] D. P. Kasilingam and D. B. Rutledge, "Surface-wave losses of coplanar transmission lines," in *Proc. IEEE MTT-S Technical Digest*, C-5, 1983.
- [29] 公開特許公報 特開 1993-093892 (1993-04-16).
- [30] Y. Liu, K. Cha, and T. Itoh, "Non-leaky coplanar (NLC) waveguides with conductor backing," *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.* vol.43, no.5, pp.1067-1072, 1995.
- [31] M. Tsuji, H. Shigesawa, and A. A. Oliner, "New interesting leakage behavior on coplanar waveguides of finite and infinite widths," *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.* vol.39, no.12, pp.2130-2137, 1991.
- [32] M. Seino, N. Mekada, T. Yamane, Y. Kubota, M. Doi, and T. Nakazawa, "20 GHz 3 dB-bandwidth Ti:LiNbO₃ Mach-Zehnder modulator," in *Proc. ECOC '90*, Amsterdam, Paper PD-3, pp.999-1002, 1990.
- [33] S. Alexandrou, "The Bent Coplanar Waveguide at Sub-Terahertz Frequencies," Published doctoral dissertation, University of Rochester, USA, 1994.
- [34] 公開特許公報 特開 2010-072129 (2010-04-02).
- [35] Ansys HFSS Software, Ansys, Inc.
- [36] 特許公開公報 特開 2003-043437 (2003-03-13).
- [37] Y. Shi, "Micromachined Wide-Band Lithium-Niobate Electro-optic Modulators," *IEEE Trans. Microw. Tech.*, vol.54, no.2, pp.810, 2006.
- [38] G.K. Gopalakrishnan, W.K. Burns, and C.H. Bulmer, "Electrical loss mechanisms in traveling wave LiNbO₃ optical modulators," *Electron. Lett.*, vol.28, no.2, 207, 1992.
- [39] W. Kim, W.S. Yang, and H.Y. Lee, "Effects of parasitic modes in high-speed LiNbO₃ optical modulators," *Optics Express*, vol.12 no.12, pp.2568-2573, 2004.
- [40] T. Zhi and A. Mitchell, "Investigation of Substrate Modes in High-Speed LiNbO₃ Electro-optic Modulators," in *Proc. COIN - ACOFT 2007*, 2007.
- [41] A. Kanno, Kanno, A., T. Sakamoto, A. Chiba, T. Kawanishi, K. Higuma, M. Sudou, and J. Ichikawa, "120-Gb/s NRZ-DQPSK signal generation by a thin-lithium-niobate-substrate modulator," *IEICE Electronics Express* vol.7, no.11, pp.817-822, 2010.
- [42] J. Macario, P. Yao, S. Shi, A. Zablocki, C. Harrity, R. D. Martin, and D. W. Prather, "Full spectrum millimeter-wave modulation," *Optics express*, vol. 20, no.21, pp.23623-23629, 2012.
- [43] 相羽英, 蓮池建一, 小林禰夫, 馬哲旺 "異方性誘電率をもつ誘電体基板の伝送線路における実効誘電率の計算" *信学技報 MW2006-90*, 2006.
- [44] R. Shireen, S. Shouyuan, Y. Peng, and D. W. Prather, "Multi-Chip Module Packaging For W-Band LiNbO₃ Modulator," *IEEE microwave and wireless components letters*, vol.21, no.3, pp.145-147, 2011.
- [45] R. Shireen, "Design and characterization of modules for millimeter-wave imaging applications," Published doctoral dissertation, University of Delaware, 2010.
- [46] C. Jiang "Microwave and Millimeter-Wave Integrated Circuit Systems in Packaging," Published doctoral dissertation, Technical University of Denmark, 2010.
- [47] Sumitomo Osaka Cement Co. LTD., "Product Catalog : X cut LN SSB-SC Modulator and X cut LN FSK Modulator," http://www.socnb.com/report/ppproduct_e/up/t_sbx1.5_10.pdf,(accessed 2015-01-01).
- [48] in preparation
- [49] 大友明, "光通信の未来を拓く有機材料 -有機電気光学ポリマーが光変調・光スイッチをさらに高速で低消費電力に-", *NICT News*, No.409, pp.3-4, Oct., 2011.
- [50] F. Qiu, A. M. Spring, F. Yu, I. Aoki, A. Otomo, and S. Yokoyama, "Thin TiO₂ core and electro-optic polymer cladding waveguide modulators." *Applied Physics Letters* 102 233504. 2013.
- [51] K. Inagaki, T. Kawanishi, and M. Izutsu "Optoelectronic frequency response measurement of photodiodes by using high-extinction ratio optical modulator," *Electronics Express*, vol.9, no.4 pp.220-226, 2012.
- [52] T. Tangmala, U. Mankong, K. Inagaki, and T. Kawanishi, "PD Frequency Response Measurement

Technique Using MZM with Two-tone Light wave Power Control,"2013 Conference on Lasers and Electro-Optics Pacific Rim (CLEO-PR), WPF-32. 2013.

- [53] M. Amaya, S. Kurokawa, and M. Hirose, "Millimeter-wave Antenna Pattern Measurement Using High Extinction Ratio Mach-Zehnder Modulator," Proc. 2012 6th European Conference on Antennas and Propagation (EUCAP), pp.2574-2577, 2012.
- [54] M. Amaya, S. Kurokawa, and M. Hirose, "Antenna Pattern Measurement Using Nested Mach-Zehnder Optical Modulator and Uni-traveling Carrier Photodiode in Millimeter Wave," Proc. 2012 Conference on Precision Electromagnetic Measurements (CPEM), pp.638-639, 2012.
- [55] 坂井猛, 牟禮勝仁, 日隈薫, 及川哲, 市川潤一郎, "温度調節が不要な高純度 2 トーン光信号発生技術", 電子情報通信学会 2014 総合大会講演論文集, C-14-16, 2005.
- [56] Y. Oikawa, K. Toyoda, K. Ota, H. Iwai, K. Inagaki, T. Kawanishi, N. Shiga, "Carrier suppression for an optical tunable two-tone generator ranging up to 40 GHz with a compact and high speed phase modulator," Proc. 9th Optoelectronics and Communications Conference (OECC) and the 39th Australian Conference on Optical Fibre Technology (ACOFT), pp.332-334. 2014.