

LPDA 型光電界センサの開発に関する最新の報告

LPDA (Log-Periodic Dipole Antenna Array) 型光電界センサの改良と感度の向上

電子技術部		日 高 直 美
電子技術部	電子システムチーム	菅 間 秀 晃
		土 屋 明 久
		臼 井 亮 志
(株) ノイズ研究所		石 田 武 志
青山学院大学 理工学部		大 林 亮 佑
		橋 本 修

最初の LPDA (Log-Periodic Dipole Antenna Array) 型光電界センサでは、製作工程の問題から、光導波路の構造を単一導波路型^{1)~8)}としてきた。次のタイプでは、光導波路部分を光変調器としてよく用いられているマッシュツェンダー型⁹⁾とした。さらに、最新のタイプでは、電極構造に位相反転の手法¹⁰⁾を用いることによって、これまでの LPDA 型光電界センサに比較して大きく感度を向上させることができた。これによって、2GHz から 6GHz においては、ダイポールアンテナなど従来の測定系アンテナに匹敵する程度の感度を確保することができた。

キーワード：光電界センサ，アンテナ，マイクロ波，ニオブ酸リチウム，EMC，光通信

1 はじめに

IT の発達により、無線 LAN(2.4GHz, 5GHz), ETC (5.8GHz) など、マイクロ波の利用範囲は飛躍的に拡大しているものの、マイクロ波の測定には精度に問題を抱えている従来の測定系アンテナ（信号伝送線路として同軸ケーブルを使用しているアンテナ）を用いざるを得ない状況である。LPDA 型光電界センサは信号伝送線路として光ファイバを用いていることなどにより、正確に電界を測定することができ、マイクロ波帯域における電界センサとして注目されている。しかし、いままでは感度が低いことなどにより、十分に普及させることができなかった。

本研究では、いままで開発してきた LPDA 型光電界センサの構造の改良とそれに伴う感度の向上について述べる。また、同軸ケーブルを使用している従来の測定系アンテナとの感度の比較についても述べる。

2 構造

2.1 光導波路

これまで、発表してきた LPDA 型光電界センサには図 1 に示すように y カット z 伝搬ニオブ酸リチウム (LiNbO₃) を用いており、光導波路は単一導波路型としている。この方式を用いることの最大の利点は、光学的に安定していること、及び、作製が容易なことである。しかしながら、電気光学効果の小さい結晶方位であるため、光電界センサの母体となる光変調器などには、この結晶方位

が用いられることは少ない。

そこで、LPDA 型光電界センサの光導波路部分を、光変調器としてよく用いられているマッシュツェンダー型光導波路とした図 2 に示す LPDA 型光電界センサ（第一次改良）を作製した。この場合、図 1 の単一導波路型に比べ電気光学効果が大きいために感度の向上が期待でき、マッシュツェンダー型を用いることによって光学的な安定性が期待できる。また、単一導波路型では光導波路を透過型としていたところを、第一次改良では光導波路の長さをほぼ同じ長さにして反射型に改めた。

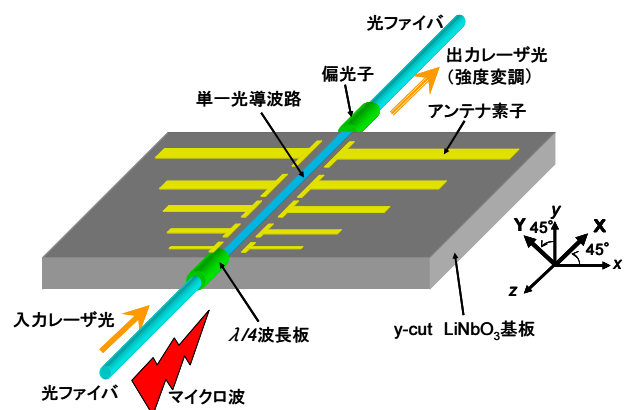


図 1 単一光導波路を用いた LPDA 型光電界センサ

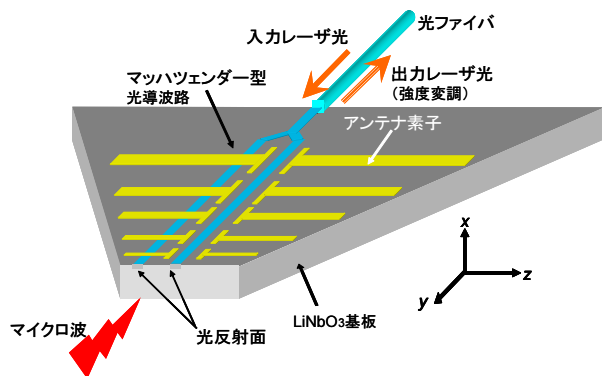


図2 マッシュエンダー型光導波路を用いた LPDA 型光電界センサ (第一次改良)

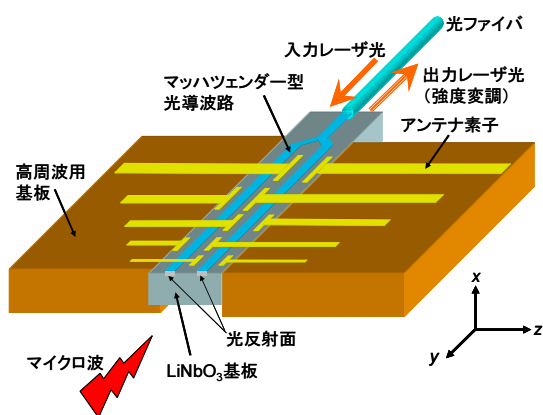


図3 電極に位相反転を施した LPDA 型光電界センサ (第二次・第三次改良)

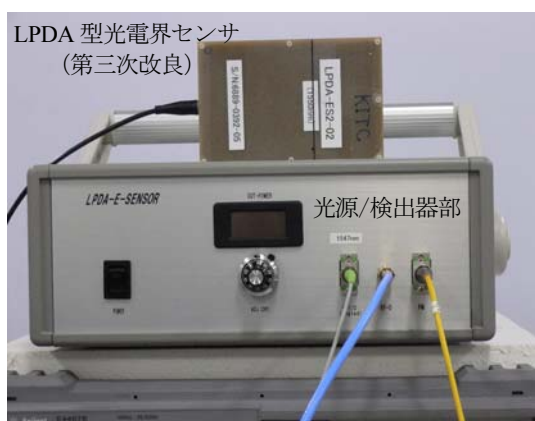


図4 LPDA 型光電界センサ (第三次改良) と光源/検出器部

図3に示す第二次改良及び第三次改良では、反射型とする利点を最大限に活かすため、それぞれのアンテナエレメントが半波長共振する角周波数 (ω) と光導波路中の光の往復時間 (τ) との積が 2π となるように、反射点からそれぞれのアンテナエレメントまでの距離を調整した。このため、第二次改良の光導波路の長さは、第一次改良の場合に比較して約2倍となっている。

2. 2 アンテナ

ニオブ酸リチウムの比誘電率は $\epsilon_x = \epsilon_y = 43$, $\epsilon_z = 28$ であり、かなり誘電率が大きい材料であるため波長短縮効果が大きい。そこで、第一次改良ではアンテナエレメントのないニオブ酸リチウム基板の端の部分を取り除いた。ただし、アンテナエレメント数、それぞれの大きさ及び光導波路方向の寸法などは、単一導波路型との性能比較を容易にするためこれと同じにした。

単一導波路型 (図1) 及び第一次改良 (図2) のように光導波路部分の材料とアンテナ部分の材料を一体とすることは、アンテナ部分で発生した圧電効果などによる帯電が不要な空間電界の発生を引き起こし、光電界センサの感度が不自然に変動するおそれがある。また、アンテナを形成する部分の材料を自由に選択できることは、光電界センサの設計の自由度を確保する意味でも重要である。第二次改良では、光導波路部分とアンテナ部分の材料を別体とし、アンテナ部分の材料に比誘電率が約10である高周波用回路基板を用いた。この場合、第一次改良に比べ、アンテナ部分の基板材料の誘電率が小さいので不要な部分の基板を取り除く処置を施さなかった。

第一次改良までは、アンテナエレメントと電極をつなぐ際に、隣り合ったエレメントの極性を同相としたが、第二次改良以降では、隣り合ったエレメント間で極性を反転する位相反転の手法を用いた。

2. 3 光源

第二次改良では、これまでと同じくレーザー光源の波長を約 $1.3\mu\text{m}$ としたが、第三次改良では、光源の波長を約 $1.55\mu\text{m}$ とした。図4に LPDA 型光電界センサ (第三次改良) と光源/検出器部の写真を示す。第二次改良においても、外観上は第三次改良と全く同じである。光源/検出器部の主要な構成要素は、 $1.55\mu\text{m}$ レーザー光源、光サーキュレーター、OE 変換器、プリアンプである。

3 結果及び考察

3. 1 光学的安定性

ニオブ酸リチウムは、良好な表面弾性波を示す材料として SAW デバイスなどへ利用されている。これまでのようにアンテナ部分にもニオブ酸リチウムを用いることは、光弾性効果や圧電効果などによる不要な空間電界の発生が電極部分に悪影響を与える恐れがあるので、光導波路以外の部分を別の材料とすることが求められた。実際に、第一次改良では感度の不自然な変動があり、これは当初アンテナ部分と光導波路部分が一体であることによって上記の理由により生じるものと考えてきた。

ニオブ酸リチウムに比較的波長の短いレーザー光を照射すると、結晶中に正と負に帯電した部分が生じ、空間電界

が発生する。空間電界は電気光学効果を通して屈折率変化をもたらす。この現象は光損傷¹¹⁾といわれ、レーザー光の波長やパワーに依存し発生する。この光損傷は、z 伝搬を用いた単一導波路型では発生しない。光電界センサの感度を高めるには、OE 変換器部に許容されるまで入力パワーを高めたいところであるが、光損傷の影響を避ける程度のパワーまでに限定する必要がある。第二次改良では、これまでと同じくレーザー光源の波長を約 1.3 μm としたため、10mW の入力光であっても、光損傷によって空間電界が発生し、LPDA 型光電界センサの変調動作の中心点がレーザー光の照射量と時間に依存し変化した。第三次改良では波長 1.55 μm のレーザー光を用いたところ、20mW のレーザー光を照射しても光損傷による影響は認められなかった。

3. 2 受信感度特性

図 5 は、単一導波路型、第一次改良及び第二次改良 LPDA 型光電界センサの感度を比較したものである。図では、最も感度の高い第二次改良の感度の最大点を 0dB としている。送信側のアンテナにはダブルリッジガイドホーンアンテナを用いた。第一次改良及び第二次改良では光損傷による変調動作の中心点の移動があったが、図は変調動作の中心点が大きく移動し、光損傷の影響が顕著となる前に測定した結果である。

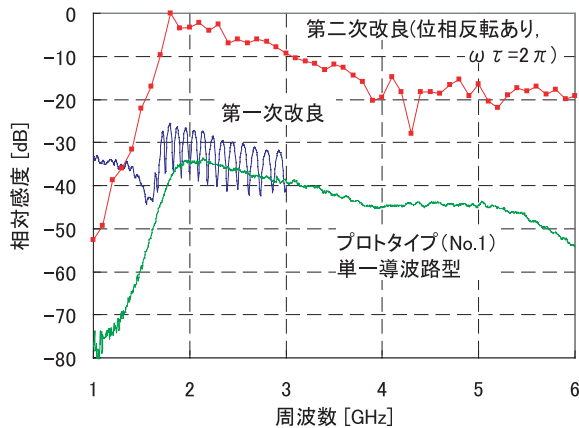


図 5 各 LPDA 型光電界センサの感度の比較

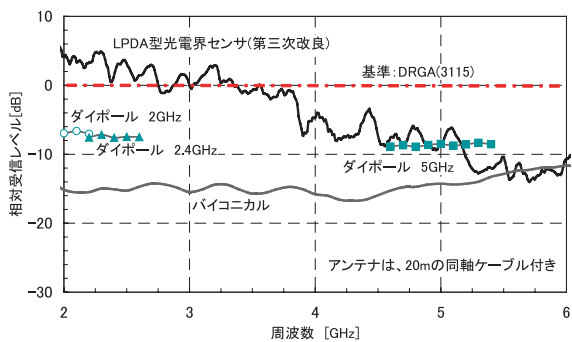


図 6 LPDA 型光電界センサ (第三次改良) と従来のアンテナを用いた場合の感度の比較

第一次改良では単一導波路型に比べて若干の感度の向上が認められるものの、周波数の変化に対する感度の変動が大きく、その変動の周期は、概ね各アンテナエレメントの共振周波数ごとに現れている。イスベルが提案したログペリオディックダイポールアンテナアレイ¹⁰⁾は、アンテナエレメントをフィーダー線につなぐ際に、位相反転の手法を用いているが、シミュレーション解析の結果、LPDA 型光電界センサでも同様に位相反転が必要であることがわかった。

位相反転を施した第二次改良では、単一導波路型に比較して、概ね各周波数で約 30dB の感度の向上がみられた。また、第一次改良のようなアンテナエレメントの共振周波数ごとに顕著に現れる周期的な感度の変動をなくすことができた。

第三次改良では、前述の理由により第二次改良よりもレーザー光の波長を長くし 1.55 μm としたが、感度は第二次改良と同等であった。この第三次改良と従来の測定系アンテナであるダブルリッジガイドホーンアンテナ (EMCO 3115)、ダイポールアンテナ (2GHz 用、2.4GHz 用、5GHz 用) 及びバイコニカルアンテナ (MBA 201) の感度を比較したところ、図 6 に示すとおりとなった。このとき送信側のアンテナには、EMCO 3115 を使い、各アンテナは 20m の同軸ケーブルで測定器とつないだ。図 6 の基準となる 0dB はダブルリッジガイドホーンアンテナ同士を対向させ測定した場合の感度である。このように、3GHz 以下では、LPDA 型光電界センサ (第三次改良) の方が、基準となるダブルリッジガイドホーンアンテナよりも若干感度が高く、2.4GHz 付近では、ダイポールアンテナに比較し約 10dB 感度が高い。また、バイコニカルアンテナと比較すると測定した 2~6GHz の範囲では、ほぼ LPDA 型光電界センサの感度が優れていることがわかった。このような感度の向上に至った最も重要な改良点は、 $\omega\tau = 2\pi$ としたこと及び位相反転の手法を用いたことである。

4 おわりに

これまで、光電界センサは感度が低く、EMI 測定など微弱な電波を検出する用途には用いられてこなかった。これまでの LPDA 型光電界センサでもこの点は同様であったが、今回の改良により、従来の測定系アンテナに匹敵するほどの感度を有するものを開発することができた。この LPDA 型光電界センサ (第三次改良) は、近傍と遠方の中間領域 (約数 cm ~ 約 1m) では、EMI 測定に用いることが可能である。また、このようなセンサと被測定物を近づけることができるという利点を活かし、複素誘電率測定への応用¹²⁾も期待できる。さらに、高感度・広帯域であることと、広い指向性を有することを活かし、マイクロ波通信を光で中継するシステムなどへの応用も考えられる。

今後は、このような LPDA 型光電界センサの応用範囲の拡大について検討を進めたい。

文献

- 1) N. Hidaka, K. Kobayashi, H. Sugama, R. Usui, Y. Tanabe, O. Hashimoto ; “Log-Periodic Dipole Antenna Array-type Optical Electric Field Sensor”, IEICE Trans. Electron., Vol. E88-C No. 1, 98-104, Jan.2005.
- 2) 日高直美, 菅間秀晃, 臼井亮, 小林賢, 田邊義博, 橋本修 ; “複数のアンテナエレメントと電極を有する光電界センサの周波数特性”, 信学論 (B), Vol.J87-B No.6, 916-920 (2004).
- 3) 田邊義博, 日高直美, 菅間秀晃, 臼井亮, 小林賢 ; “LPDA 型光電界センサの作成と特性評価” 神奈川県産業技術総合研究所研究報告, 9, 11 (2003).
- 4) 日高直美, 菅間秀晃, 臼井亮, 田邊義博, 小林賢 ; “対数周期ダイポール・アンテナ・アレイによる光電界センサの高感度・広帯域化” 神奈川県産業技術総合研究所研究報告, 10, 11 (2004).
- 5) 菅間秀晃, 日高直美, 臼井亮, 小林賢, 田邊義博, 石田武志, 中村孝, 橋本修 ; “LPDA 型光電界センサによる 3 次元電界強度分布測定” 神奈川県産業技術総合研究所研究報告, 11, 5 (2005).
- 6) 日高直美, 小林賢, 菅間秀晃, 臼井亮, 田邊義博 ; “Y カット Z 伝搬 LiNbO₃ を用いた複数の電極をもつ光電界センサ”, 信学技報, MW2003-161, 57-62 (2003).
- 7) 日高直美, 菅間秀晃, 臼井亮, 土屋明久, 小林賢, 石田武志, 中村孝, 大林亮祐, 橋本修 ; “偏光状態を考慮した LPDA (Log-Periodic Dipole Antenna Array) 型光電界センサのシミュレーション解析” 神奈川県産業技術総合研究所研究報告, 12, 1 (2006).
- 8) 高橋紹大, 日高邦彦, 河野照哉 ; “単一光導波路型ポッケルス電界センサ”, 電学論 B, 114 巻 1 号, 26-32 (1994).
- 9) K. Tajima, R. Kobayashi, N. Kuwabara, and m. Tokuda ; “Development of Optical Isotropic E-Field Sensor Operating More than 10 GHz Using Mach-Zehnder Interferometers”, IEICE Trans. Electron., Vol. E85-C, No.4, pp.961-968, Apr.2002.
- 10) D. E. Isbell, “log periodic dipole arrays”, IRE Trans. Antennas & Propag., AP-8, 3, pp260-267, May 1960
- 11) 西原浩, 春名正光, 栖原敏明 ; “6・5 LiNbO₃ 導波路, [1]各種作成方法とその比較,” 光集積回路, pp.171, オーム社, 東京, 1999.
- 12) 菅間秀晃, 土屋明久, 日高直美, 石田武志, 大林亮祐, 橋本修 ; “広帯域光電界センサを用いたマイクロ波帯域の誘電率測定に関する検討” 神奈川県産業技術総合研究所研究報告, 13, PP (2007) (投稿中)

Latest Report of Development of LPDA-type Optical Electric Field Sensor

Naomi HIDAKA, Hideaki SUGAMA, Akihisa TSUCHIYA, Ryo USUI, Takeshi ISHIDA, Ryousuke OBAYASHI and Osamu HASHIMOTO

Single optical waveguide was first used to fabricate Log-Periodic Dipole Antenna Array (LPDA) - type Optical Electric Field Sensor (OEFS) because of its simple fabrication process. Mach-Zehnder type commonly used for optical modulator was followed as a waveguide. Recently feeding polarity which is reversed between successive electrodes allows high sensibility to LPDA-type OEFS. The high sensibility of the recent LPDA-type OEFS is now comparable to one of an ordinal dipole antenna in frequency ranging from 2 to 6 GHz.