

酸化亜鉛の光デバイスへの応用に関する研究（第2報）

木島一広・清水章良・中村卓・河野裕・鳥養映子^{*1}・堀裕和^{*1}

Study on an Application of Zinc Oxide to Optical Devices (2nd Report)

Kazuhiro KIJIMA, Akio SHIMIZU, Takashi NAKAMURA, Hiroshi KONO,
Eiko TORIKAI^{*1} and Hirokazu HORI^{*1}

要 約

古くから身近にあり、比較的入手しやすい材料である酸化亜鉛の非線形光学特性に注目し、現在主に用いられているニオブ酸リチウムに代わり、酸化亜鉛によって電子機器からの発生電界測定が可能な光電界センサを実現することを目指して研究を行った。考案した結晶中の単一内部全反射を用いた光電界センサ構造に基づいて、コプレナ線路状電極を有する光電界センサの試作を行い、高周波電圧が検出可能であることを確認した。また、試作した光電界センサを適切なアンテナや増幅器と組み合わせることで、電子機器から発生する電界測定への適用が可能であることを確認した。

1. 緒 言

酸化亜鉛は、古くより顔料や白粉として多く用いられており身近な材料であるが、電子部品としてもバリスタ、サージアブソーバなどといった非線形抵抗素子や、表面弾性波素子などの圧電素子として用いられている¹⁾。さらに近年では、ワイドギャップ半導体としての特性に注目した発光素子、トランジスタなどの研究がなされたり、原料亜鉛の埋蔵量の多さや入手のしやすさから、透明導電膜などレアメタル利用部品の代替材料として研究活用されたりしている。また、酸化亜鉛は電気光学効果を有していることが知られている²⁾。現在、電気光学材料としては主に電気光学係数の大きなニオブ酸リチウム結晶が用いられており、その原料となっているニオブはその9割をブラジルからの輸入に頼っている。現状では安定した供給がされているが、専門家の中にはその資源偏在リスクを懸念する意見も出ている³⁾。そのため、材料供給の多様性の面から電気光学材料として異なる材料を用いる試みは有益であると思われる。

そこで、電気光学材料としての酸化亜鉛の応用例として本研究では、センサー測定器間を光で接続することで、電磁波を計測する上で金属ケーブルによる電波反射や信号減衰の低減が期待できる光電界センサの製作を試みた。

前報では、基礎的な光変調実験により、適切な材料形態（バルク、薄膜）や結晶方位などを検討したことについて報告した⁴⁾。

本報では、酸化亜鉛単結晶ウエハによる光電界センサの試作とシステムの構築について報告する。

2. 結晶中の単一内部全反射を用いた光電界センサ

今回、酸化亜鉛単結晶ウエハを用いた光電界センサは結晶中の単一内部全反射を用いた光電界センサ⁵⁾（以下s-TIR EO センサ）構造を用いて試作を行った。s-TIR EO センサ構造は過去に行ったニオブ酸リチウムによる光電界センサの研究結果^{6),7)}を踏まえて、本研究において考案した構造である。

s-TIR EO センサ構造は、誘電体上に置かれた結晶と結晶表面に形成された電極によって構成されている。電極に印加した高周波電圧によって電極間に発生する電界により誘起された結晶表面の屈折率変化を結晶表面での光の全反射で発生させたエバネッセント波によって検出する。構造の模式図を図1に示す。

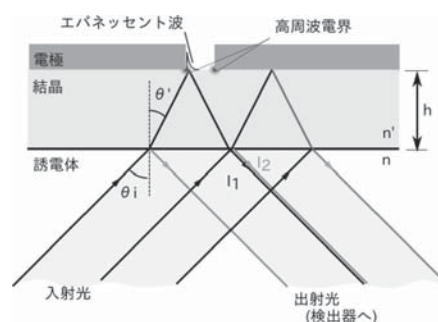


図1 s-TIR EO センサ構造の模式図

*1 山梨大学

このとき、s-TIR EO センサは斜入射干渉計を形成していると考えられる。高周波電界が結晶表面の屈折率変調を引き起こし、その結果結晶表面を伝搬するエバネッセント波に位相変調による位相シフトが生じる。すると、s-TIR EO センサにおいて、結晶と空気の界面（“上界面”という）で反射した光と、誘電体と結晶の界面（“下界面”という）で反射した光の間で生じた位相差に、この位相シフトが付加される。その後、検出器の部分において上界面で反射した光と下界面で反射した光が干渉することによって、位相変調から強度変調へ変換される。干渉の模式図を図2に示す。

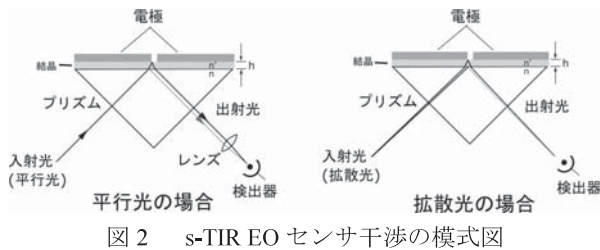


図2 s-TIR EO センサ干渉の模式図

3. 光電界センサの試作とシステム構築

3-1 コブレナ線路状電極を有する光電界センサ

本研究では、考案した s-TIR EO センサ構造に基づいて、コブレナ線路状の電極を有する光電界センサを試作した。図3に模式図を、図4に実物の写真を示す。

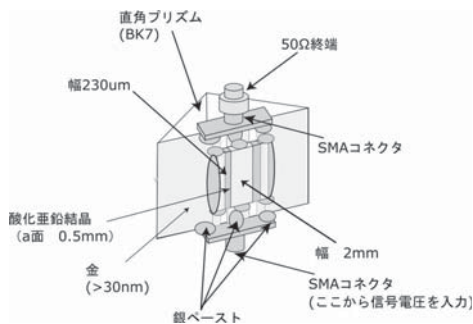


図3 コブレナ線路状の電極を有する光電界センサの模式図



図4 コブレナ線路状の電極を有する光電界センサの写真

試作したセンサでは、酸化亜鉛単結晶ウエハ（株）オルパパイオニア 10 mm×10 mm 厚さ 0.5 mm 両面研磨 a 面）を光学接着剤（Norland Products Inc. NOA63）により BK7 直角プリズム上に貼付している。さらに金蒸着でコブレナ線路状の電極を形成し、線路の両端となる部分に SMA コネクタを装着している。コブレナ線路の信号導体の幅は 2 mm、間隙の幅は 230 μm であった。線路の片端は 50Ω 終端器で終端し、残りの片端の SMA コネクタより高周波信号を入力する。

光電界センサの動作確認と特性測定を行うため、センサに信号発生器（Agilent Technologies Inc. E8257D）を用いて信号を印加した。実験系の模式図を図5に示す。

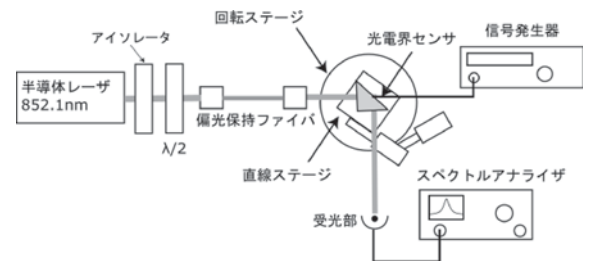


図5 光電界センサの動作確認実験系の模式図

プリズムと結晶界面に対するレーザー光（852.1 nm）の入射角は、結晶表面で全反射が生じるように臨界角より十分に大きくし 50° とした。光電界センサからの出力光はアバランシェフォトダイオードモジュール（浜松ホトニクス（株） C5658）で受光・検波し、スペクトルアナライザ（Rohde & Schwarz GmbH FSVR13）で測定した。この実験で得られたスペクトルの一例を図6に示す。また、100 MHz～1850 MHz まで 50 MHz きざみで測定した周波数特性を図7に示す。

周波数特性から、試作した光電界センサが感度を有する周波数範囲（最大値から 6 dB 低くなる範囲）は 100 MHz～1300 MHz であることが確認された。それ以外の周波数における感度低下は、用いたフォトダイオードモジュールの周波数帯域に制限されていると考えられる。

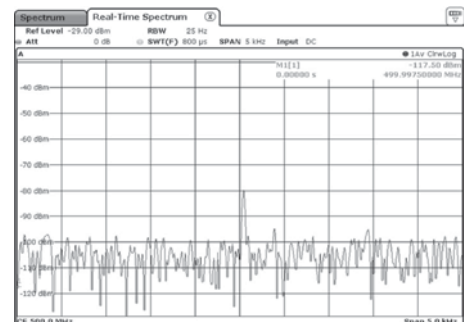


図6 観測されたスペクトル例
(中心周波数 500 MHz 信号発生器出力 16 dBm)

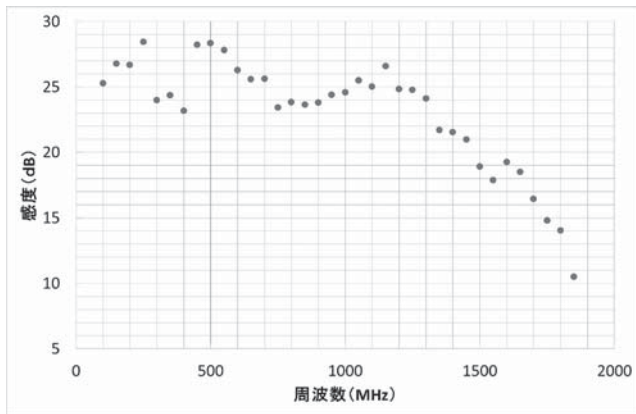


図7 コプレナ線路状の電極を有する光電界センサの周波数特性 (信号発生器出力 16 dBm)

さらに試作した光電界センサが、時間変化するスペクトルを持つ信号に対応できるか確認するため、搬送波周波数 500MHz, Dual Sine 信号 (周波数 1:2Hz 周波数 2:3Hz) を変調波とした周波数変調信号 (出力 16 dBm) を光電界センサに入力し、リアルタイムスペクトラムアナライザ機能を用いて測定を行った。測定した例を図 8 に示す。

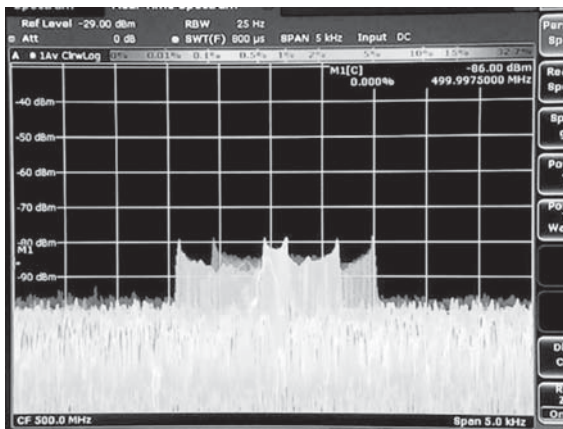


図8 時間変化するスペクトルを持つ信号の測定例

この測定の結果から、時間変化するスペクトルを持つ信号に対しても、何らかの遅れや時定数を持たずセンサが反応していることが確認された。このことから、試作した光電界センサは、デジタル変調各種の通信に用いられている信号の測定にも活用できるものと考えられる。

3-2 コプレナ線路状電極を有する光電界センサによる電界測定

試作した光電界センサを用いて、実際に電子機器から発生する電界を測定するために、測定システムの構築を行い、それを用いた電界測定を実施した。構築したシステムの模式図を図 9 に示す。

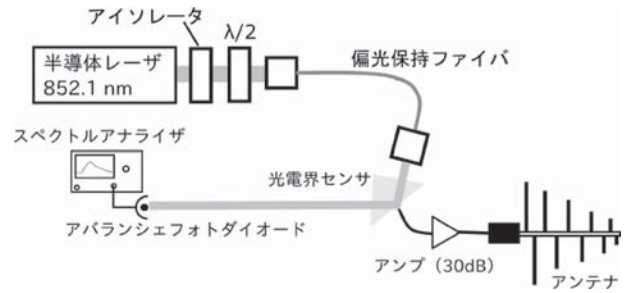


図9 電界測定に用いたシステムの模式図

光電界センサには、ログペリオディックアンテナ (Schwarzbeck Mess - Elektronik OHG UHALP9108-A) を利得 30 dB のプリアンプ ((有) ミリコム MA-0106) を介して接続し、電極に信号を入力した。結晶には、表面で全反射が生じるようにレーザ光 (852.1 nm) をプリズム-結晶界面に対して 50° の入射角で入射した。光電界センサからの出力光はアバランシェフォトダイオードモジュールで受光・検波し、スペクトルアナライザで測定した。

アナログコードレス電話器の子機を供試体として電界測定を行った際の写真を図 10 に、観測されたスペクトルを図 11 に示す。



図10 アナログコードレス電話子機の電界測定の様子

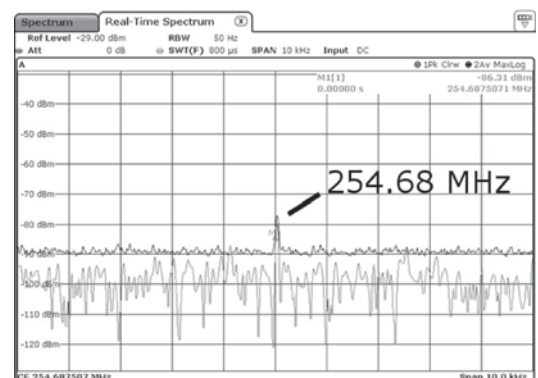


図11 アナログコードレス電話子機の電界測定により観測されたスペクトル

アンテナで直接スペクトラムアナライザに接続し受信した際の子機からの受信電力は -15.8 dBm (26.3 μ W)であった。

観測されたスペクトルでは、 254.68 MHz の周波数に子機の通信で用いている電波に対応したピークが観測された。これらの実験を通して、本研究で試作した光電界センサと、適切なアンテナとプリアンプとを組み合わせることにより、電子機器から発生される電界の測定が可能であることが確認された。

構築したシステムにおいて、プリアンプを用いない場合には発生電界に対応したスペクトルの観測が困難であったが、考えられる理由の一つとして、用いた単結晶が水熱合成法を用いて作成されたものであったため、結晶自体の抵抗率が低く⁸⁾、光電界センサの感度向上が進まなかったことがあげられる。抵抗率がより高い酸化亜鉛結晶が得られれば、さらなる感度向上が図られる可能性があるものと考えられる。

4. 結 言

本研究では、比較的入手しやすい材料である酸化亜鉛の非線形光学特性に注目し、現在主に用いられているニオブ酸リチウムに代わり、酸化亜鉛によって電子機器から発生する電界測定が可能な電界センサの実現することを目指して研究を行った。その結果、以下の成果が得られた。

- 結晶中の単一内部全反射を用いた光電界センサの構造を考案した。
- コブレナ線路状電極を有する光電界センサの試作を行い、高周波電圧が検出可能であることを確認した。
- 試作した光電界センサを適切なアンテナ、増幅器と組み合わせることで、電子機器から発生する電界の測定が可能となった。

本技術を応用することで、光信号伝送を用いた新規製品の開発が可能となることが期待される。

参考文献

- 1) 和佐清孝, 早川茂: 薄膜化技術 (共立出版, 東京) (2002)
- 2) 西原浩, 春名正光, 栖原敏明: 光集積回路 (オーム社, 東京) (1993)
- 3) 原田幸明: 資源リスクと対応 (シリーズ「日本の安全と科学技術」), (独) 科学技術振興機構 サイエンスポータル,
<http://scienceportal.jst.go.jp/archives/reports/safety/20122012_01.html> (2016-1-1 参照)

- 4) 木島一広, 清水章良, 中村卓, 河野裕, 鳥養映子, 堀裕和: 酸化亜鉛の光デバイスへの応用に関する研究, 山梨県工業技術センター研究報告, No.29, pp.17-19 (2015)
- 5) K. Kijima, O. Abe, A. Shimizu, T. Nakamura, H. Kono, S. Hagihara, E. Torikai, H. Hori: Electro-optical field sensor using single total internal reflection in electro-optical crystals, Opt. Rev., Vol.22, No.4, pp.623-628 (2015)
- 6) 木島一広, 萩原茂, 阿部治, 鳥養映子, 堀裕和: 微弱電界強度の測定法に関する研究, 山梨県工業技術センター研究報告, No.22, pp.128-130 (2008)
- 7) 木島一広, 河野裕, 阿部治, 鳥養映子, 堀裕和: 微弱電界強度の測定法に関する研究 (第 2 報), 山梨県工業技術センター研究報告, No.23, pp.79-81 (2009)
- 8) 遠藤治之, 泉田福典, 長谷川辰雄, 大嶋江利子, 米倉勇雄, 原田善之, 前田克己, 新倉郁生, 柏葉安兵衛: ZnO 単結晶基板の応用に関する研究, 岩手県工業技術センター研究報告第 12 号 (2005)