

電気光学センサーシステムを用いた誘電体膜厚推定に関する研究

NISHIYAMA, Kazuto / 西山, 千翔

(出版者 / Publisher)

法政大学大学院理工学研究科

(雑誌名 / Journal or Publication Title)

法政大学大学院紀要. 理工学研究科編

(巻 / Volume)

64

(開始ページ / Start Page)

1

(終了ページ / End Page)

4

(発行年 / Year)

2023-03-24

(URL)

<https://doi.org/10.15002/00026403>

電気光学センサーシステムを用いた 誘電体膜厚推定に関する研究

EVALUATION OF DIELECTRIC FILM THICKNESS USING ELECTRO-OPTIC SENSOR SYSTEM

西山千翔

Kazuto NISHIYAMA

指導教員 品川満

法政大学大学院理工学研究科応用情報工学専攻修士課程

This paper describes an evaluation method for the thickness of a dielectric film by integrating the electric field distribution in the electro-optic crystal using electromagnetic field simulation. The estimation results obtained from this method agree with the characteristics of the parallel-plate capacitance model, thus confirming that our method could evaluate the thickness of a dielectric film with a precision of 10 μm using an EO sensor system.

Keywords : EO sensor system, Thickness measurement, integral of electric field distribution

1. 序論

近年あらゆるモノがインターネットに接続される Internet of Things (IoT)の普及に伴い、小型コンピューターや集積回路などの精密機器が増加している。これらの電子部品や精密機器の故障原因として電磁波や静電気による影響が挙げられる。電磁波による精密機器への悪影響を防ぐために用いられている誘電体薄型フィルムなどはその厚みによって品質が変化する。よって誘電体薄型材料の製造の際には、材料そのものの厚みを測定する必要がある。そこで我々は被測定物を傷つけずに測定可能な非接触測定方法である電気光学(EO: Electro Optic)センサーシステム[1][2]を用いて、誘電体フィルムの厚みを非接触で測定する方法を研究している。図1にEOセンサーシステム系の構成を示す。

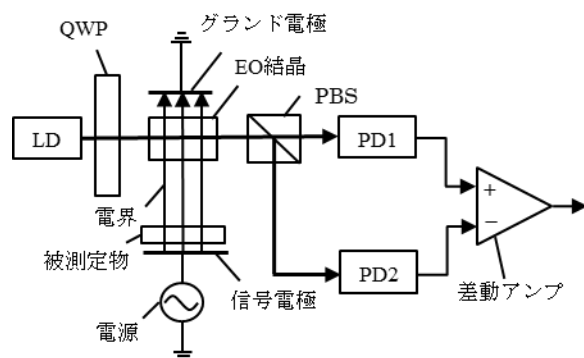


図1. EOセンサーシステム系

EOセンサーシステムは、EO効果[3]とレーザー光を用いた電界計測システムであり、人体通信機器や集積回路などの電子機器の測定に利用されている。図1よりEOセンサーシステムはLD（レーザダイオード）、QWP（1/4波長板）、EO結晶、PD（フォトダイオード）から構成されている。被測定物である誘電体フィルムは信号電極とEO結晶の間に位置しており、電源により発生した電界が印加されている。これまで、EOセンサーシステムを構成する素子の1つであるEO結晶内における電界分布は一樣であると仮定していたが、実際の電界分布はEO結晶内部の位置に依存することがわかった。したがって本研究では、電磁界シミュレーションを用いてEO結晶内部の電界分布を積分することにより、誘電体フィルムの厚みを評価する方法を提案し、EOセンサーシステムを用いた厚みの測定可能性を評価することを目的とする。

2. 厚み測定の測定原理

電界発生源から発生した電界が被測定物を透過する際、電界強度が変化する。被測定物を透過した後の電界強度から被測定物の厚みを算出する事で厚み測定を行う。電界強度の変化量は被測定物の厚みに依存するため、測定した電界強度の変化量から被測定物の厚みを算出できる。被測定物の厚みによって電界強度が単調に変化する時、測定した電界強度に対して厚みが一意に決まるため厚み測定が可能となる。厚み系の等価回路はコンデンサーを用いて表すことができる[4]。図2に等価回路のコンデンサーの層

モデルを示す。

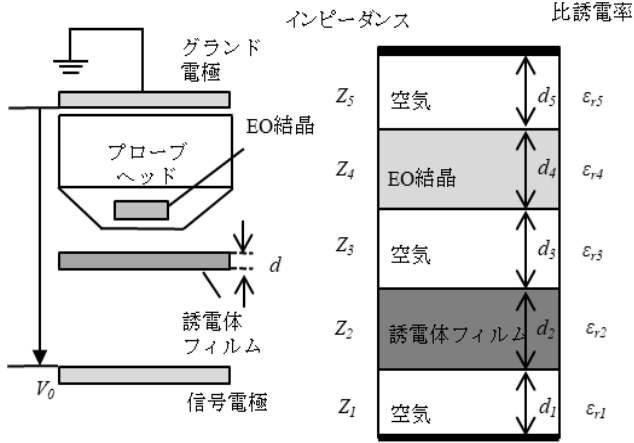


図 2. EO センサーシステムのコンデンサー層モデル

コンデンサーの層モデルは、3つの空気層、EO 結晶層、および誘電体フィルム層の 5 つの層から構成される。5 つの層のインピーダンスはそれぞれ Z_1, Z_2, Z_3, Z_4, Z_5 である。各層の距離は d_1, d_2, d_3, d_4, d_5 であり、比誘電率は $\epsilon_{r1}, \epsilon_{r2}, \epsilon_{r3}, \epsilon_{r4}, \epsilon_{r5}$ である。 V_0 は信号電極とグラウンド電極間にかかる電圧を表す。EO 結晶の上面と下面間の印加電圧 V_{EO} は次の式で表される。

$$V_{EO} = \frac{Z_4 V_0}{Z_1 + Z_2 + Z_3 + Z_4 + Z_5} \quad (1)$$

ここで、インピーダンス Z は平行平板面積 S 、角周波数 ω 、真空の誘電率 ϵ_0 により式 (2) で表される。

$$Z = \frac{1}{j\omega\epsilon_0 S} \times \left(\frac{d}{\epsilon_r} \right) \quad (2)$$

L は結晶の長手方向の長さである。EO 結晶内の電界を足し合わせて算出した EO 結晶の印加電圧 $F_{previous}(d_2)$ を式 (3) に示す。

$$\begin{aligned} F_{previous}(d_2) &= \int_0^n E(y) dy \\ &= L \times (V_{EO} / d_4) \\ &= L \frac{(d_4 / \epsilon_{r4}) V_0}{(d_1 / \epsilon_{r1}) + (d_2 / \epsilon_{r2}) + (d_3 / \epsilon_{r3}) + (d_4 / \epsilon_{r4}) + (d_5 / \epsilon_{r5})} \\ &= \frac{\gamma V_0}{\alpha - \beta d_2} \end{aligned} \quad (3)$$

以上より、結晶に印加される電圧は被測定物の厚み d_2 に依存して変化することがわかる。

3. シミュレーション方法

本研究ではパラメーターの値を任意に設定でき、構造

による影響を定量的に分析するための電磁界シミュレーターとして Keysight Technologies 社製の 3D フルウェーブ電磁界解析シミュレーター EMPro を使用した [5][6]。作成した厚み測定シミュレーションモデルを図 3 に示す。

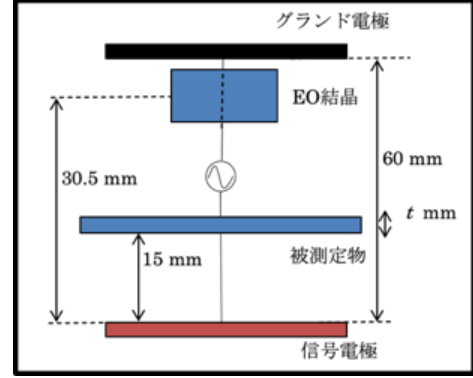


図 3. 厚み測定系のシミュレーションモデル

また各モデルの材質と比誘電率、およびモデルサイズをまとめたものを表 1 に示す。

表 1. 各モデルの比誘電率およびモデルサイズ

	材質 (比誘電率)	モデルサイズ
解析空間	FreeSpace(1)	600 mm×600 mm×600 mm
EO結晶	FreeSpace(1),またはZnTe(10)	3 mm×10 mm×1 mm
被測定物	ABS(2.8)	200 mm×200 mm× t mm
グラウンド電極	Cu(1)	100 mm×100 mm×0.01 mm
信号電極	Cu(1)	100 mm×100 mm×0.01 mm

設定するメッシュには、解析空間全体のメッシュの細かさを設定できる Target Mesh と、作成した個々のモデルに対してメッシュの細かさを設定できる FEM Meshing の 2 種類ある。メッシュ設定の様子を図 4 に示す。

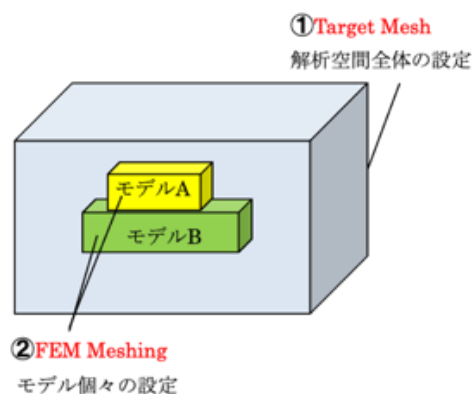


図 4. メッシュ設定方法

メッシュ最適化前後の細かさの解析結果比較を図 5 に示す。

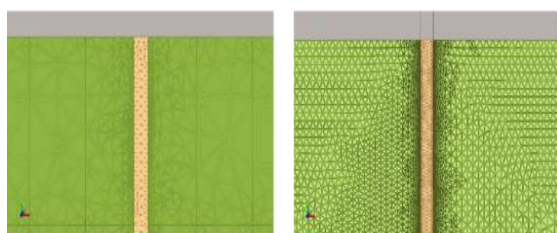


図 5. メッシュ最適化前後の細かさ比較

左側のメッシュ最適化前では、モデルを形成するメッシュのサイズが大きく、解析範囲が十分に小さくなっていないことがわかる。電界取得は、設定された最小のメッシュ（四角錐）ごとに行われるため、メッシュサイズが大きいとその分取得される電界強度も大雑把になってしまふ。一方右側のメッシュ最適化後では、メッシュのサイズが小さく、モデルの解析範囲が十分に小さくなっていることがわかる。またメッシュ最適化前後の電界分布の解析結果比較を図 6 に示す。

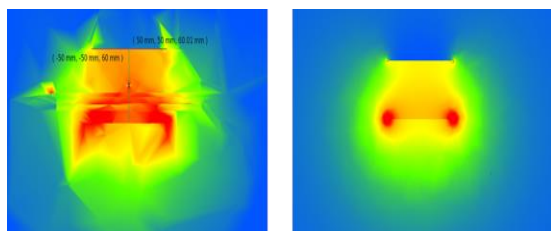


図 6. メッシュ最適化前後の電界分布比較

図 6 では電界強度を色別で表示させており、赤、オレンジ、黄色、緑の順で電界強度は低くなる。左図のメッシュ最適化前は歪で鋭く尖っている電界が目立ち、電界強度が場所によってどのように変化しているかがわかりにくい。一方で右図のメッシュ最適化後の電界分布は、電界が滑らかに発生しており電界強度の変化がわかりやすくなっている。したがってメッシュを細かくすることで解析精度が高まり電界分布は綺麗に表示されることが確認でき

た。以上から本解析でのメッシュ設定は、シミュレーション PC の性能限界設定である Target Mesh = 10 mm、FEM Meshing = 0.01 mm で決定する。

シミュレーションを実行するにあたり、新たな電界取得方法として積分を用いた方法を提案する。EO 結晶内でレーザー光が受ける偏光変化量は、電気光学結晶を小型のセルに分割し、各セルで取得した電界を足し合わせる手法を用いて求めた。セル内の電界成分を足し合わせる方法を図 7 に示す[7]。

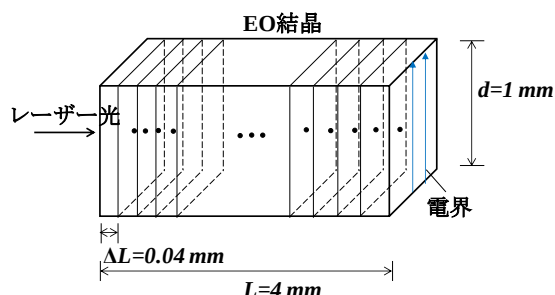


図 7. 結晶内セル電界足し合わせ方法

結晶内部の長手方向に、等間隔に 100 点の電界プロット点を設置し電界を計測する。測定したそれぞれの電界強度を電圧に変換し被測定物の厚みを変化させたときの電圧の変化量を求める。

求める電圧の式は(4)式で表される。

$$V(t) = \Delta L * (E_1 + E_2 + \dots + E_{100})$$

$$= \sum_{i=1}^{100} E_i * 0.1 \text{ mm} \quad (3.4)$$

従来では EO 結晶内部の電界強度は一樣であると考えられてきたが、実際には結晶内部の測定箇所によって電界強度にばらつきが生じるため、今回このように積分を用いて電界を均す方法を適用する。

4. 結果と考察

図 8 にコンデンサー層モデルの理論式から導出した解析式の結果を示す。

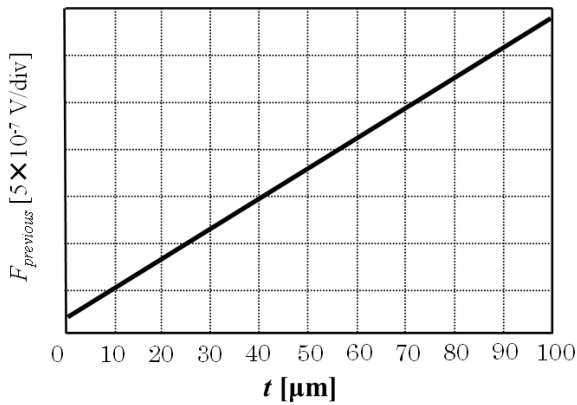


図 8. 平行平板電極モデルから算出した厚み測定結果

厚みがますにつれ測定電圧が増加する右上がりの傾向を確認できた。

続いて図 9 に結晶の中心 1 点でのみ電界を取得することで電圧を算出した結果を示す。また結晶中心の長手方向にプロット点を 100 点設置し、各点の電界強度を足しこむことで電圧を算出した結果を図 10 に示す。

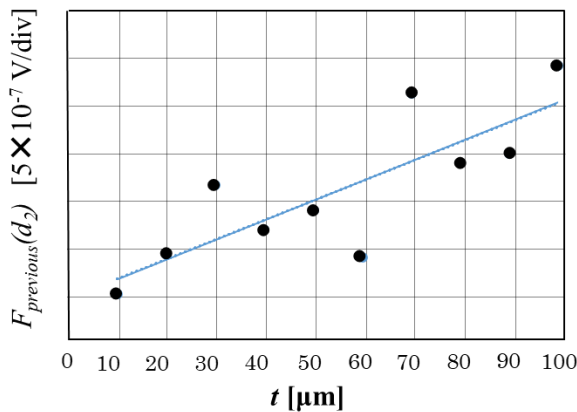


図 9. 電場積分を用いる前の厚み測定結果

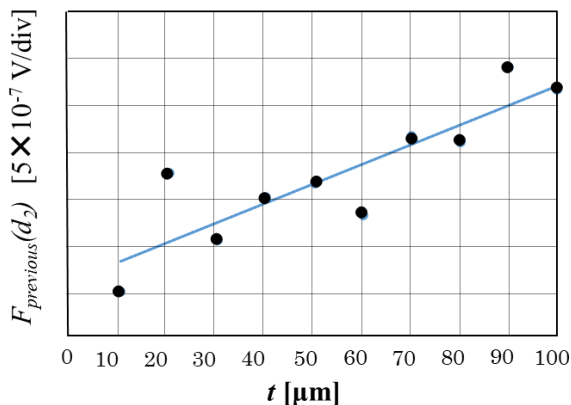


図 10. 電場積分を用いた後の厚み測定結果

最小二乗法により算出した単回帰式直線を図示したところ、被測定物の厚みを厚くしたとき電圧変化に単調増加の傾向が見られた。これは図 8 に示した理論式から導き

出した評価基準のグラフと同様に電圧が単調に増加していたことと一致した。またそれぞれのグラフで R^2 値を求めたところ、図 9 では $R^2 = 0.6561$ 、図 10 では $R^2 = 0.7483$ であった。したがって電界を代表点 1 点で取得する場合と比べ、電界取得点 100 点を足し合わせて算出する電界取得方法の方が強い相関が出ることが明らかとなった。

5. 結論

本論文では、電磁界シミュレーションを用いて EO 結晶の電界分布を積分することにより誘電体膜の厚みを評価する方法を提案した。電圧変化の傾向が単調増加である場合、測定値に対する被測定物の厚みは一意に決まるため、EO センサーシステムによるマイクロメートルオーダーでの厚み測定可能性があると評価した。複素数表示や電界取得方法を工夫しシミュレーション解析の精度を上げた結果、理論式に近い結果を得ることができた。

参考文献

- 1) M. Yada, Y. Ishihara, T. Naoe, M. Shinagawa, H. Sugino, H. Tanaka, J. Katsuyama, Y. Matsumoto, "Noise reduction method for electro-optic measurement system using variable gain amplifier," TENCON 2017 – 2017 IEEE Region 10 Conference, pp. 1969-1972, 2017.
- 2) T. Naoe, M. Yada, M. Shinagawa, Y. Matsumoto, J. Katsuyama, H. Tanaka, Y. Tanaka, "Invasiveness Estimation of Electro-Optic Probe in Electric Field," 12th International Conference on Sensing Technology, pp. 102-106, 2018.
- 3) Fei Long, Jianhuan Zhang, Chunrong Xie, Zhiwei Yuan, "Application of the Pockels Effect to High Voltage Measurement," 8th International Conference on Electronic Measurement and Instruments, IEEE, 2007.
- 4) 横山順一, "電磁気学", 講談社, 2009
- 5) N. Takano, S. Numamoto, M. Shinagawa, A. Miki, H. Imamura, K. Sato, and T. Asahi, "Influence of Structural Deviation in a Microstrip Patch Antenna on Millimeter Wave Performance," TENCON 2019 - 2019 IEEE Region 10 Conference (TENCON), 2019.
- 6) S. Numamoto, M. Ohno, M. Shinagawa, K. Tanaka, H. Imamura, K. Sato, T. Asahi, and T. Ono, "Millimeter-Wave Roughened Transmission Line Loss Analysis Using Electromagnetic Field Simulation," TENCON 2018 - 2018 IEEE Region 10 Conference, 2018.
- 7) 品川満, "フォトニック電界センサーの応用技術に関する研究," 博士論文, 2005.