表面反射を考慮した反射型TN液晶ディスプレイのセルギャップ測定

Cell-gap Measurement of Reflective TN-LCD while Considering Surface Reflection

佐竹 徹也[†], 西岡 孝博[†], 蔵田 哲之[†], 前原 利昭^{††}

Tetsuya Satake[†], Takahiro Nishioka[†], Tetsuyuki Kurata[†] and Toshiaki Maehara^{††}

Abstract A new cell-gap measurement method is described for reflective TN-LCD (twisted-nematic liquid crystal displays). We investigated reflected-intensity behavior in cell-gap measurement, which is based on reflective polarization analysis. The surface reflection of the sample was found to have a decisive influence on the obtained cell-gap value and was taken into account in the new method. The method showed good agreement with a transmissive cell-gap measurement in an experiment using a transmissive LC cell and external reflector. We applied it to microscopic cell-gap mapping using a microscope and a CCD camera system. The obtained map is consistent with the shape of the internal reflector.

キーワード：反射型液晶ディスプレイ, TN, セルギャップ, 測定方法, 表面反射

1. ま え が き

反射型液晶ディスプレイは、軽量、省電力、屋外での良好な視認性などの点から、携帯電話、PDA (Personal Digital Assistant)、携帯ゲーム機などの携帯機器向けディスプレイに用いられている。現在の反射型液晶ディスプレイの主流となっているのは、図1に示すような1枚偏光板方式の反射型TN (Twisted Nematic) 液晶ディスプレイである¹⁾。本方式の特徴としては、偏光板が上基板側にのみ用いられていることと、反射板(多くの場合、下部電極を兼ねる)が液晶セル内に内蔵され、かつ反射板の表面にはミクロンサイズの凹凸が設けられていることがあげられる。

また最近では、屋内、屋外を問わず良好な視認性が得られる半透過型の液晶ディスプレイが携帯機器向けに用いられるようになった。半透過型で現在主流となっているのは、一つの画素内に反射部と透過部を設ける方式¹⁾である。反射部の基本的な構成は、従来の1枚偏光板方式の反射型液晶ディスプレイと共通である。

セルギャップは液晶層の厚みを示す数値で、液晶ディスプレイの電気光学特性を左右する重要な設計パラメータで

図1 1枚偏光板方式の反射型TN液晶ディスプレイの構成
Structure of the single-polarizer reflective TN-LCD.

ある。1枚偏光板方式の反射型TN液晶ディスプレイでは、 $3\mu\text{m}$ 前後に設計される。またセルギャップは、製造現場において、プロセス管理のための重要なパラメータでもある。反射型液晶ディスプレイの場合、反射板の凹凸形状に対応するミクロなセルギャップ分布の測定も求められている。

透過型液晶ディスプレイ、あるいは反射板を外付けした反射型液晶ディスプレイのセルギャップ測定については、透過偏光解析に基づく測定方法が多数提案され、多くの測定装置が商品化されている。しかしながら、1枚偏光板方式の反射型液晶ディスプレイの場合、反射板が内蔵されているため、透過偏光解析に基づく方法ではセルギャップを測定することができない。

反射板を内蔵した反射型液晶ディスプレイのギャップ測定法に関しては、これまでに反射偏光解析に基づく測定方法が提案されている^{2)~7)}。測定方法は二つに大別される。

2003年2月7日受付, 2003年5月16日採録

[†] 三菱電機株式会社 先端技術総合研究所

(〒661-8661 尼崎市塚口本町8-1-1, TEL 06-6497-7496)

^{††} 三菱電機株式会社 新事業推進室

(〒461-8670 名古屋市東区矢田南5-1-14, TEL 052-723-7993)

[†] Advanced Technology R&D Center, Mitsubishi Electric Corp.

(8-1-1, Tsukaguchi-honmachi, Amagasaki, Hyogo, 661-8661, Japan)

^{††} Meiryo Technica Corp.

(5-1-14, Yada-minami, Higashi-ku, Nagoya, Aichi, 461-8670, Japan)

一つは平行ニコル配置と直交ニコル配置での反射光強度から算出する方法である^{2)~4)}。二つの配置に加え、波長板を挿入した場合や偏光子と検光子が45°の場合の反射光強度を用いる方法もある。もう一つは直交ニコル配置における消光位から算出する方法である^{5)~7)}。

平行ニコル配置と直交ニコル配置での反射光強度から算出する方法では、十分な測定精度が得られないと報告されている²⁾⁷⁾。これは、液晶ディスプレイのガラス表面での表面反射光が、平行ニコル配置での反射光強度にノイズとして加わるためである。

一方、直交ニコル配置における消光位から算出する方法では、表面反射光による影響は受けない。しかしながら、凹凸反射板を内蔵する場合、測定部位のセルギャップに分布があるために、消光位が精度よく計測できない。また本方法は、測定時にサンプルの回転を要するため、顕微鏡を用いた2次元セルギャップ分布の評価が容易ではない。

本論文では、平行ニコル配置と直交ニコル配置での反射光強度を用いるセルギャップ測定法において、表面反射光が測定値に与える影響を調べるとともに、表面反射を考慮することによって、測定精度を改善した新しいセルギャップ測定法を提案する。

以下、2章では反射偏光解析に基づくセルギャップ測定の基本原理について、3章では表面反射が測定精度に与える影響について、4章では表面反射を考慮した新しい解析法について記述する。さらに5章では、新しい解析法を用いたミクロな2次元セルギャップ分布評価について述べる。

2. セルギャップ測定の基本原理

液晶層を図2に示すように定義する。上基板側の液晶ダイレクタ方向を基準とし、入射直線偏光の偏光方向を角度 α （以下、入射偏光角 α と呼ぶ）で定義する。液晶層のツイスト角を Φ とする。なお α 、 Φ とも上基板側の液晶ダイレクタ方向に対して時計回り方向を正とする。セルギャップは d 、液晶の複屈折は Δn 、測定波長は λ とし、プレチルト

図2 液晶層の定義
Definition of the liquid crystal layer.

角は無視する。

図2で定義された液晶層の反射率は、ジョーンズ行列法によって式(1)のように表現される⁸⁾。 R_c は出射側検光子が入射偏光に対して直交ニコル配置の場合であり、 R_p は平行ニコル配置の場合である。

$$R_c = \left(\Gamma_0 \frac{\sin X}{X} \right)^2 \left\{ \Phi \frac{\sin X}{X} \cos(2\alpha) + \cos X \sin(2\alpha) \right\}^2 \quad (1)$$

$$R_p = 1 - R_c$$

ただし、

$$\Gamma_0 = \frac{2\pi\Delta n d}{\lambda}, \quad X = \sqrt{\Phi^2 + \left(\frac{\Gamma_0}{2} \right)^2}$$

である。

入射偏光角 α 、ツイスト角 Φ 、液晶複屈折 Δn 、測定波長 λ が既知なら、上記の反射率 R_c 、 R_p はセルギャップ d のみの関数である。したがって、反射偏光解析によって反射率が得られれば、セルギャップを算出することができる。

図3に反射率 R_c 、 R_p の計算結果を示す。ツイスト角 Φ は70°、液晶複屈折 Δn は0.071、波長 λ は546nmとし、セルギャップ d を2.5 μm から4.5 μm まで0.5 μm おきに変えた。いずれのセルギャップの場合でも、直交ニコル配置の反射率 R_c が0になる入射偏光角があり、かつ反射率0の入射偏光角は90°周期である。これは反射型のTN液晶層が一軸媒質として振舞うことを示している⁵⁾⁶⁾⁹⁾。また、反射率0の入射偏光角（消光位）は、セルギャップに依存して変化しており、前章に記したように、消光位のみからセルギャップを求めることが可能である。

平行ニコル配置においても、セルギャップが3.0 μm から4.0 μm の範囲で、反射率が0になる入射偏光角がある。この範囲のセルギャップの場合、反射型のTN液晶層は半波長板として振舞うことを示している。通常、1枚偏光板方式の反射型液晶ディスプレイでは、反射型のTN液晶層は半波長板になるように設計されるが、ツイスト角が70°の場合、非常に広いセルギャップマージンを有していることを示している。

図3 反射率の入射偏光角依存性（計算）
Calculated reflectance dependence on the input-polarization angle.

3. 表面反射の影響

平行ニコル配置と直交ニコル配置での反射光強度を用いるセルギャップ測定法において、反射率は二つの反射光強度を規格化して求められる。直交ニコル配置および平行ニコル配置での反射光強度を I_c 、 I_p とすると、 I_c 、 I_p は式(2)で表される。

$$\begin{aligned} I_c &= L \times R_c \times A_c \\ I_p &= L \times R_p \end{aligned} \quad (2)$$

ここで、 L は入射光量、 A_c は測定系の偏光特性を補正するためのパラメータである。

以下、式(2)を用いた場合のセルギャップ測定の精度検証実験について述べる。

3.1 実験方法

実験サンプルには、反射板を内蔵していない小型の透過型液晶セルを用いた。液晶セルには偏光板、位相差フィルムなども貼り付けられていない。ツイスト角 Φ は -70° 、液晶複屈折 Δn は0.071(at 546nm)である。セルギャップ d は、透過偏光解析(回転検光子法)に基づく測定装置(大塚電子製RETS)で予め測定し、 $3.22 \mu\text{m}$ であった。反射偏光解析時には、アルミをスパッタ蒸着して作製した平面ミラーの上に液晶セルを載せて、反射型液晶セルとした。

測定装置には偏光顕微鏡を用いた。図4に測定装置の概略を示す。測定波長は干渉フィルタによって546nmとした。検出器には、ペルチェ冷却式の高階調CCDカメラ(16ビット、65,536階調)を用い、面内平均強度を反射光強度とした。反射光強度測定時は、偏光顕微鏡の入射側偏光子を固定し(偏光面がハーフミラー面に平行)、出射側検光子を直交ニコル、平行ニコルの各配置に回転させた。顕微鏡の回転ステージを回すことにより、入射偏光角 α を変えながら、反射光強度 I_c 、 I_p を測定した。なお、本測定系での偏光特性補正パラメータ A_c は事前に測定を行い、1.12であった。

3.2 実験結果

図5に実験で得られた反射光強度 I_c 、 I_p の入射偏光角 α 依

存性を示す。式(2)を用いて、入射光量 L とセルギャップ d をパラメータとして、フィッティングを行った。図5中実線でフィッティングカーブを示す。入射偏光角 α が -10° 近辺でフィッティングカーブのずれが大きいことが示された。

入射偏光角 -10° 近辺では、平行ニコル配置での反射光強度 I_p は、小さいもののある程度の強度を有している。一方、図5中のフィッティングカーブあるいは図3に示した反射率の計算結果によると、入射偏光角 -10° 近辺では平行ニコル配置の反射率 R_p はほぼ0である。したがって、入射偏光角 -10° 近辺における平行ニコル配置の反射光強度 I_p の主成分は、液晶セルガラス表面の表面反射光であると考えられる。

図5の各入射偏光角における反射光強度から算出したセルギャップ値を図6に示す。入射偏光角 -10° 近辺において、セルギャップ値が大きく変化し、透過偏光解析により、事前に求めたセルギャップ値 $3.22 \mu\text{m}$ から大きくずれることが明らかになった。入射偏光角が -10° からはずれるほど、セルギャップ値の変動は小さくなった。表面反射光は、入射偏光角によらず一定であると考えられるので、平行ニコル配置での反射光強度 I_p 中の表面反射光成分比に対応して、図6のように測定値が変化していると考えられる。

図5 反射光強度の入射偏光角依存性
Measured reflected-intensity dependence on the input-polarization angle.

図4 測定装置
Schematic diagram of the measurement system.

図6 各入射偏光角での反射光強度から算出されたセルギャップ値
Cell gap calculated using measured reflected intensities at each input-polarization angle.

3.3 精度検証実験まとめ

以上のように、平行ニコル配置と直交ニコル配置での反射光強度を用いるセルギャップ測定法では、得られるセルギャップ値は、入射偏光角に依存して大きく変動することが確認された。変動の原因は、平行ニコル配置での反射光強度に含まれる表面反射光であると考えられる。表面反射光の影響を抑えるために、測定時の入射偏光角を限定する方法（平行ニコル配置での反射光強度が小さくなるような入射偏光角に設定しない）もあるが³⁾、測定精度がノイズ光量の大小に依存して不安定であることから実用的とはいえない。

4. 表面反射を考慮した新しい解析法

4.1 表面反射の考慮

今回、我々は平行ニコル配置と直交ニコル配置での反射光強度を用いるセルギャップ測定法において、表面反射を考慮した新しい解析法を考案した。図7にそのコンセプトを示す。入射光量 L のうちの一部は、液晶セルのガラス表面において反射されるので、この表面反射光量 S として新たに解析式に導入する。入射光量 L から表面反射光量 S を差し引いた光量 $L-S$ が液晶層によって変調される。直交ニコル配置では、検出器には変調を受けた成分のみ検出されるが、平行ニコル配置の場合は、変調を受けた成分に加えて表面反射光 S が検出される。

上記のコンセプトに基づく解析式は式(3)で表現される。

$$\begin{aligned} I_c &= (L-S) \times R_c \times A_c \\ I_p &= (L-S) \times R_p + S \end{aligned} \quad (3)$$

4.2 実験・解析

解析式(3)を用いて、再度、前章の実験結果の解析を行った。図8に、実験データとあわせて、新しい解析法によるフィッティングカーブを示す。フィッティング時には、入射光量 L 、セルギャップ d に加え、表面反射光 S もパラメータとした。得られたフィッティングカーブは、すべての入射偏光角にわたって実験データとよく一致した。フィッティングで得られたセルギャップ値は $3.21 \mu\text{m}$ であり、透過偏光解析による測定値($3.22 \mu\text{m}$)とよく一致した。

S/L で表される表面反射率は8.4%であり、ガラス-空気の単一界面としてはやや大きかった。原因は不明であるが、他の界面（例えば、液晶セルのガラス-ITO膜やITO膜-液晶層の界面、あるいは顕微鏡内の界面）からの反射が影響していると考えられる。

図8の各入射偏光角における、反射光強度から式(3)を用いて算出したセルギャップ値を図9に示す。セルギャップ算出に当たって、表面反射率 S/L にはフィッティングで得られた値(8.4%)を用いた。入射偏光角によらず、ほぼ一定のセルギャップ値が得られた。また得られたセルギャップ値は、透過偏光解析による測定値とよく一致した。ただし、より詳しく見ると、一部の入射偏光角(-55° , -10° ,

図7 表面反射を考慮した新しい解析法のコンセプト
Concept of the new analysis method with consideration of the surfacereflection.

図8 新しい解析法によるフィッティング
Fitting by new analysis method.

図9 新しい解析法を用いて算出されたセルギャップ値
Cell gap calculated by new analysis method.

+35°)ではややばらつきが見られた。これらの入射偏光角においては、直交ニコル配置あるいは平行ニコル配置のいずれかの反射光強度が小さくなっており、表面反射光以外の何らかの小さなノイズの影響を受けていると考えられる。

図10 透過偏光解析によるセルギャップ値との相関
Cell-gap correlation with the transmissive method.

次に、セルギャップを変えた幾つかの液晶セルを用意し、同様の実験・解析を行った。図10に透過偏光解析によるセルギャップ値と、新しい解析法を用いた反射偏光解析によるセルギャップ値の相関を示す。なお、透過偏光解析には、SPM (Stokes Parameter Method) 法^{10) 11)}に基づく測定装置(名菱テクニカ製LCDアナライザLCA-LU4^{12) 13)})を用いた。本装置も偏光顕微鏡を用いているので、測定位置・面積を反射偏光解析実験の場合とほぼ同一にすることができる。反射型TN液晶ディスプレイに用いられるセルギャップ範囲(2.5 μm ~4.0 μm)において、両セルギャップ値はよく一致した。

以上のことから、平行ニコル配置と直交ニコル配置での反射光強度を用いるセルギャップ測定法において、表面反射を考慮した新しい解析法を導入することにより、入射偏光角に依らず、透過偏光解析でのセルギャップ値とほぼ同じ値が得られることが確認できた。

5. 2次元セルギャップ分布測定

5.1 評価手順

前章で提案した新しい解析法を用いて、ミクロな2次元セルギャップ分布の評価を試みた。測定装置は、3章と同じ偏光顕微鏡システムを用いた。図11に評価手順を示す。

まず、入射偏光角を変えながら(回転ステージを回しながら)、ある特定の測定点での直交ニコル/平行ニコル配置の反射光強度を測定し、表面反射率 S/L を求める。

次に、入射偏光角を固定し、直交ニコル/平行ニコル配置の反射光強度の面内分布をCCDカメラで測定(撮影)する。

最後に、事前に得られた表面反射率 S/L を用いて、面内各点の反射光強度から、セルギャップを算出し、セルギャップ分布を求める。

なお、最初の表面反射率 S/L を求めるステップにおいて、前章までは、入射偏光角を20点以上変えて反射光強度を測定したが、 $\pm 10^\circ$ 以上異なる3点の入射偏光角での測定で充分である¹⁴⁾。

5.2 実験

実験サンプルには、図12に示すような表面に凹部のある

図11 2次元セルギャップ分布評価手順
Procedure for 2-dimensional cell-gap mapping.

図12 セルギャップ分布評価用サンプル
Sample for 2-dimensional cell-gap mapping.

図13 セルギャップ分布評価エリア
Photo of the evaluated area.

反射板を内蔵した小型の反射型液晶セルを用いた。液晶セル作製前の凹部の形状は、直径が8.0 μm 、深さが0.35 μm である。ツイスト角、液晶複屈折、測定波長は前章までの透過型液晶セルと同じである。評価時には、図13に示すように、測定範囲(18 μm 角)を100分割(10×10)して解析し、セルギャップ分布を求めた。

図14 2次元セルギャップ分布
Obtained 2-dimensional cell-gap map.

図14に得られたセルギャップ分布を示す。円形の凹部に対応して円形の凸形状を有するセルギャップ分布が得られた。セルギャップ分布において、凸部と平坦部のセルギャップ差は $0.26\mu\text{m}$ であり、元の凹部の深さ($0.35\mu\text{m}$)と一致しなかった。これは、スピコート塗布した配向膜の厚さが平坦部と凹部で異なる(凹部の方が厚い)ためと考えられる。

以上のように、新しい解析法を偏光顕微鏡システムに適用することによって、内臓反射板の凹凸に対応するミクロなセルギャップ分布の評価が可能であることが示された。

また、偏光顕微鏡を用いることで、通常の反射型TN液晶ディスプレイのセルギャップ測定のみならず、画素サイズの小さいLCoS(Liquid Crystal on Silicon)デバイスのセルギャップ測定も可能であると考えられる。

6. む す び

反射偏光解析に基づく反射型TN液晶ディスプレイのセルギャップ測定において、液晶セルガラス表面の表面反射光によって、セルギャップ測定値が大きく変動することを確認した。

今回、表面反射を考慮した新しい解析法を提案した。透過型液晶セルを用いた実験の結果、新しい反射偏光解析法によって、透過偏光解析によるセルギャップ値とほぼ同じ値が得られることを示した。

さらに、偏光顕微鏡システムに本解析法を適用することによって、内臓反射板の凹凸構造に対応したミクロな2次元セルギャップ分布が得られることも示した。

〔文 献〕

- 1) N. Kimura : "High-Performance Reflective TFT-LCD", Proc. AM-LCD'01, pp.55-58 (July 2001)

- 2) H.L. Ong : "Simple and Accurate Optical Reflection and Phase Compensation Methods for Reflective LCD Cell Gap", SID 01 Digest, pp.430-433 (June 2001)
- 3) T. Satake, T. Nishioka, T. Kurata, and T. Maehara : "Novel Gap Measurement Method of Reflective LCD", Proc. Asia Display/IDW'01, pp.185-188 (Oct. 2001)
- 4) D. Tanooka, S. Itoh, and I. Hirose : "Measurement Method for Cell Gap and Twist Angle of Reflective LCD", Proc. IDW'02, pp.105-108 (Dec. 2002)
- 5) S. T. Tang and H. S. Kwok : "Measurement of Reflective LCD Cell Gap", Proc. IDW'00, pp.109-111 (Nov. 2000)
- 6) S. T. Tang and H. S. Kwok : "Measurement of Reflective Liquid Crystal Displays", J. Appl. Phys., 91, pp.8950-8954 (June 2002)
- 7) W. K. Choi : "Reflective Liquid-Crystal Cell-Gap Measurement Using Input-Polarization-Angle Dependence", SID 02 Digest, pp.530-533 (May 2002)
- 8) S. T. Wu and D. K. Yang : "Reflective Liquid Crystal Displays", John Wiley & Sons, Ltd, Chichester, p.98 (2001)
- 9) S. Stallings : "Equivalent Retarder Approach to Reflective Liquid Crystal Displays", J. Appl. Phys., 86, pp.4756-4766 (Nov. 1999)
- 10) Y. Zhou, Z. He, and S. Sato : "A Novel Method for Determining the Cell Thickness and Twist Angle of a Twisted Nematic Cell by Stokes Parameter Measurement", Jpn. J. Appl. Phys., 36, pp.2760-2764 (May 1997)
- 11) Z. He, Y. Zhou, and S. Sato : "A Two-Dimensional Stokes Parameter Method for Determination of Cell Thickness and Twist Angle Distributions in Twisted Nematic Liquid Crystal Devices", Jpn. J. Appl. Phys., 37, pp.1982-1988 (Apr. 1998)
- 12) M. Okabe, M. Kaneko, T. Maehara, Y. Togashi, and S. Sato : "Evaluation of Cell Parameters of TN Liquid Crystal Cells by Using a Stokes Parameter Method", Mol. Cryst. and Liq. Cryst., 367, pp.771-778 (2000)
- 13) 前原利昭, 佐藤進 : "透過型液晶セル検査装置LCDアナライザLCA-LU4", 月刊ディスプレイ2001年12月号, 7, pp.12-19 (Dec 2001)
- 14) T. Satake, T. Nishioka, T. Kurata, and T. Maehara : "Reflective TN-LCD Cell-Gap Measurement Using Polarized Reflectance with Surface-Reflection Compensation", Proc. Eurodisplay2002, pp.887-890 (Oct. 2002)

佐竹 徹也 1991年、京都大学大学院工学研究科工業化学専攻修士課程修了。同年、三菱電機(株)に入社。以来、半導体デバイスのCVDプロセス開発に従事。1996年より、液晶ディスプレイの開発に従事。

西岡 孝博 1992年、東京工業大学工学部有機材料工学科卒業。1997年、同大学大学院博士課程修了。同年、三菱電機(株)に入社。現在、主として液晶パネルの光学設計および評価技術開発を担当。博士(工学)。

蔵田 哲之 1983年、大阪大学大学院工学研究科応用物理学専攻修士課程修了。同年、三菱電機(株)に入社。以来、有機機能性材料の研究開発、液晶ディスプレイの開発に従事。工学博士。

前原 利昭 1968年、東京電機大学工学部電気工学科卒業。同年、三菱電機(株)に入社。以来、工業用誘導電動機の開発設計、品質保証に従事。1997年以降、名菱テクニカ株式会社にて液晶ディスプレイ検査装置の開発設計に従事。