エレクトロウェティングを用いた赤外波長制御素子

Infrared Wavelength Control Device using Electrowetting

雲 梯 隆 夫[†]

Takao Unate[†]

あらまし エレクトロウェティング (EW) とは基板/液体の界面を横切る電界が変化することにより、基板/液体の界面張力が変化し基板と液体の濡れ性が変わることによって基板の上の小さな液滴を動かすことができる現象である。一般的には2液を用いて非極性オイルと電解液で構成され、電極基板と電解液間に電圧を印加すると電解液が濡れ広がる。非極性オイルの代わりに極性オイルである液晶を用いたEWが可能であることが報告されている。本報告では赤外波長域で選択反射特性を持つ液晶を用いたEW素子を作製し、電圧印加によりオイルの濡れ広がり性をコントロールすることで赤外域の選択反射光を制御できることを示した。機能性を持つカイラルネマチック液晶とEWのシャッタ効果を組み合わせることで特定波長を制御できる素子が可能であり新たな応用も期待できる。

キーワード：エレクトロウェティング、カイラルネマチック液晶、電解液、接触角、界面張力、赤外波長

1. ま え が き

近年電子産業の発展は著しくコンピュータと人間のインタフェースとして多くの液晶表示素子 (LCD) モードが開発され、モニタ、スマートフォン、自動車などに用いられている。印刷物に変わる表示素子^{1) 2)}も開発が進められ、偏光板を使わないEW現象を用いた明るい反射型表示素子が注目されている^{3) ~ 5)}。われわれは極性オイルである液晶を用いてDC駆動によるEW現象が接触角-印加電圧特性が垂直軸に対して非対称性を示すことを報告した⁶⁾。本研究の目的は赤外域に選択反射機能を持つカイラルネマチック液晶 (Ch-N LC) を用いたEW素子を作製し、EWのシャッタ効果と組み合わせることで特定波長を制御できる素子の可能性を示すことである。

図1に2液を用いたEW⁷⁾の構造を示す。電極基板の上に形成された誘電絶縁層と撥水層、オイルと電解液で構成される。は電解液の接触角を示す。一般的にオイルは非極性を示すアルカン系炭化水素が用いられ、電解液は水、塩の水溶液、エチレングリコールなどの極性液体が用いられている。EWとは基板電極と電解液間に直流電圧を印加することで電解液は撥水基板上を濡れ広がり電解液の接触角が小さくなる現象である。

図1において、電圧が印加されない時の平衡状態はYoungの式で表される。

$$\gamma_1 = \gamma_2 \cos \theta + \gamma_3 \quad (1)$$

図1 2液を用いたエレクトロウェティングの構造図

$\gamma_1, \gamma_2, \gamma_3$ は撥水層/オイル、オイル/電解液、電解液/撥水層の界面張力を示す。

電圧が印加された時の平衡状態はLippmann⁸⁾の式で表される。

$$\gamma_2 \cos \theta = \gamma_1 - \gamma_3 + \frac{1}{2} \frac{\epsilon_0 \epsilon}{d} V^2 \quad (2)$$

ϵ_0 は真空の誘電率、 ϵ と d は誘電絶縁層と撥水層を一層の誘電層と見なした時の比誘電率と膜厚、 V は印加電圧を示す。

2. 実 験

2.1 エレクトロウェティングセル

EW現象を用いたデバイスを製造するためには、バンクによって囲まれた画素を用いなければならない⁶⁾。図2にエレクトロウェティングセル (EW-Cell) 構造を示す。バンクによって分離された二つの画素はOff (左) およびOn (右) 状態を表している。透明導電層 (ITO: $<30 \Omega/\square$) を有する

図2 エレクトロウェティングセル構造図

ガラス基板上に誘電体絶縁層（ポリイミドSE5291日産化学（株））および撥水層（フロロポリマー AF1600 DuPont）を形成した、各々の膜厚は500 nm, 1100 nmであり、熱硬化は各々200℃で行った。撥水層形成後、感光性樹脂（SU-8 Micro Chem）を用いて画素の周囲に高さ6μmのバンクをフォトリソグラフィによって形成した。オイルを大気中で画素内に入れた後、画素基板と対向基板を電解液中で貼り合わせることでEW-Cellを作製した。電圧が印加されると電解液が濡れ広がりオイルは部分半円状になる。画素サイズは開口部と画素部は各々100×100μmと115×115μmである。

2.2 オイルと電解液

オイルは赤外域（700～900 nm）に選択反射特性を持ち、誘電率異方性（ $\Delta\epsilon$ ）が正と負の2種類のCh-N LCを混合し $\Delta\epsilon=0$ に調合した平均誘電率を持つ液晶（LCA-wc）、電解液は極性を示す単一成分であるエチレングリコール（EG）を用いた。

2.3 測定系

2.3.1 反射分光測定

EW-Cellの分光反射率は拡散反射分光装置（反射測定ユニットSM-250分光計器（株））を用いて測定した。図3に拡散反射分光測定の概略図を示す、入射光（5 nm ステップで

図3 拡散反射分光測定系概略図

図4 EW-Cellの On/Off 画素写真

400～1000 nm）は試料の法線方向に対し8°で入射、測定エリア1mmφ、EW-Cellで拡散反射された光は積分球を用いて測定され、EW-Cellの画素基板はGNDに接続され直流駆動した。標準白色板の反射率を100%とした。

2.3.2 測定エリア

図4に偏光顕微鏡下でのEW-CellのOff/On状態の画素写真を示す。クロスニコル下では液晶は位相差を持っているため着色し、液晶以外とバンク部は位相差がないため黒くなる。図4に示す白丸は測定領域を示し、測定領域（直径1mm円）には約59.4画素（0.115×0.115mm）があり、測定値は画素の平均値となる。

3. 測定結果と考察

3.1 測定結果

3.1.1 LCA-wcの反射率－分光特性

EW-CellのOff状態の画素の反射測定値（ R_{Pixel} ）は開口率（開口部の面積）／（画素部の面積）を AP とすると液晶部のみの反射率（ R_{LC} ）とバンク部のみの反射率（ R_{Bank} ）の和で示される。

$$R_{Pixel} = R_{LC} \times AP + R_{Bank}(1 - AP) \quad (3)$$

バンク部のみの反射率は画素のない周辺部で測定し求めることができる。図5に測定値、と式（3）を用いて求めたLCA-wcのみの反射率－分光特性を示す。

図5 Off状態の画素、バンク、LCA-wcのみの反射率－分光特性

3.1.2 印加電圧に対する反射率－分光特性

図6 (a), 図6 (b) は印加電圧に対するEW-Cellの反射率－分光特性を示す。LCA-wcは $\Delta\epsilon=0$ であるが平均誘電体とみなすと電界中では電界の方向に沿って配列する。画素が開き始める電圧 $V_{th} = -81.4$ Vである。図6 (a) は -81.4 V以下では800 nm近傍のみで反射率が増加し、図6 (b) は -81.4 V ~ -118.4 Vの範囲では可視域と赤外域ともに反射率が減少している。また可視域において印加電圧が -81.4 Vから -88.8 Vに変化した時の反射率の変化は他の電圧変化に比べて大きい。IRピーク値はなだらかに減少している。図6 (a), 図6 (b) の結果を明確にするため、図6 (c) に可視域と赤外ピーク値の反射率の電圧依存性を示す。可視域(400 $\sim$ 700 nm)では膜による干渉が見られる

図6 (a) 印加電圧0 V ~ -81.4 V時のEW-Cellの電圧印加時の反射率－分光特性、(b) 印加電圧 -81.4 V ~ -118.4 V時のEW-Cellの電圧印加時の反射率－分光特性、(c) 可視域と赤外ピーク値の反射率の電圧依存性

ため反射率の平均値を用いた。

3.2 考察

以下の説明において可視域では400 $\sim$ 700 nmでの平均反射率、赤外域では選択反射のピーク反射率を用いた。

3.2.1 白色反射板としての液晶層

EW-Cellに用いたカイラル液晶を含むLCA-wcとカイラル液晶を含まないネマティック液晶(LCA-woc)を基板上に滴下し垂直方向から見た液滴の写真を図7に示す。LCA-wcは乳白色、LCA-wocは白濁色を示す。LCA-wcはらせん構造を有しらせんピッチの長さにより選択反射波長は決まる、らせん構造のダイレクターの向きはランダムな方向を示し平行入射光に対し全波長域でランダム反射するため乳白色を示し白色反射板として働く、一方LCA-wocはらせん構造を有しないため白濁色を示す。

図5に示したLCA-wcの反射率－分光特性とEW-Cellの画素内に電解液EGのみを満たした反射率－分光特性を図8に示す。EG層の400 $\sim$ 1000 nmの平均反射率は7.8%であり反射成分はガラス/空気界面での反射(8%)が支配的である。LCA-wc層の反射がEG層の反射より高い反射率を示している。

3.2.3 EW-Cellの反射率－分光特性

図6 (a) は画素が閉じているが赤外ピーク値の増加を示すのは、電圧印加によりLCA-wcのダイレクターの向きが電界により整い反射率が増加したためであり、電界により液晶分子の配列が整うことは液晶表示素子においてよく見られる現象である。図6 (b) は画素が開くことにより可視域と赤外域も減少している。図6 (c) は印加電圧が V_{th} より高くなるに従い可視域と赤外ピーク値の反射率は急峻な減少

図7 無印加時の液滴LCA-wocとLCA-wcの写真

図8 LCA-wcと電解液の反射率－分光特性

後ならかに減少している。赤外ピーク値の減少が可視域に比べて大きいのは、印加電圧が高くなりLCA-wcのダイレクターの向きが整い、液晶分子の配列が変化したためである。

この現象は画素サイズとオイルの接触角の関係から明らかにされている⁹⁾。

3.2.4 特定波長を制御する素子

赤外選択反射を持つLCA-wcを用いたEW-Cellは印加電圧が $0 \sim V_{th}$ では赤外域での反射が増加し、印加電圧が V_{th} 以上では赤外域での反射が減少することが解かった。LCA-wcの選択反射特性とEWのシャッタ効果を組み合わせることで選択波長の強度を制御することが可能である。選択反射波長領域を広く、効率を良くするためには材料あるいは画素設計の最適化、逆回転方向を示すカイラル液晶との併用などを用いれは選択反射効率の向上が期待できる。

4. む す び

一般的にEWに非極性オイルが用いられているが、われわれは極性オイルを用いても可能であることを報告してきた^{6) 9)}。この特性を用いた新たなデバイスとして、夏季は室内に入る赤外線を制御し室内での温度上昇を抑え、冬季は室内の赤外線の放出を制御し室内を快適にすることができる「エコウィンドウ」が期待できる、また可視光域では明るさも制御できる。本報告では選択反射機能があるLCA-wcを用いて選択波長域の反射光を制御できることを示した。

謝辞 液晶材料をご提供頂いたメルク社に感謝いたします。

〔文 献〕

- 1) B. Comiskey, J.D. Albert, H. Yoshizawa and J. Jacobson: "An electrophoretic ink for all-printed reflective electronic displays", *Nature* **394**, pp.253-255 (1998)
- 2) R. Hattori, S. Yamada, Y. Masuda, N. Nihei and R. Sakurai: "Ultra Thin and Flexible Paper-like Display using QR-LPD® Technology", *SID Symp Dig Tech Pap.*, pp.136-139 (2004)
- 3) G. Beni and S. Hackwood: "Electro-wetting displays", *Appl. Phys. Lett.* **38**, pp.207-209 (1981)
- 4) R.A. Hayes and B.J. Feenstra: "Video-speed electronic paper based on electrowetting", *Nature* **425**, pp.383-385 (2003)
- 5) J. Heikenfeld and A.J. Steckl: "High-transmission Electrowetting Light Valves", *Appl Phys Lett.* **86**, pp.151121-1-151121-3 (2005)
- 6) T. Unate, T. Nagase and H. Naito: "Electrowetting of Nematic Liquid Crystals", *Proc. of the 22nd IDW*, pp.62-64 (2015)
- 7) F. Mugele and J.C. Baret: "Electrowetting: from basics to application", *J. Phys. Condens. Matter* **17**, pp.R705-R774 (2005)
- 8) T. Roques-Carmes, R.A. Hayes, M.J. Schlangen: "A physical model describing the electro-optic behavior of switchable optical elements based on electrowetting", *J Appl Phys.* **96**, pp.6267-6271 (2004)
- 9) T. Unate, T. Nagase and H. Naito: "Performance of Electrowetting Cell using Liquid Crystals", *the Imaging Society of Japan* **58**, pp.284-291 (2019)

うなて たかお
雲梯 隆夫 1976年、信州大学理学専攻科物理学専攻修了。1980年、星電器製造(株)入社。ホシデンフィリップス、フィリップスに転籍。アクティブLCDの研究・開発に従事。2003年、積水化学工業(株)入社。液晶関連部材の研究・開発に従事。2010年、定年退職。2014年、大阪府立大学大学院工学研究科電子・数物系専攻博士後期課程入学。2019年、中退。