

TN 液晶の応答特性

富田 英雄・中嶋 政幸*

Transient Response Characteristics of Twisted Nematic Liquid Crystal

Hideo TOMITA and Masayuki NAKAJIMA*

Abstract

In several liquid crystals, a liquid crystal using a twisted nematic effect (TNLC) is very popular. In the case of applying a transmission light control of LC to high speed display, it is most problem that a light switching speed of LC is very slow. The authors measured the transient response waveforms at light switching precisely, as a means of elucidation of some factors in LC device is related to switching speed. The paper described the characteristics of transient response at rise and decay in light switching, and the qualitative investigation on electro-optic characteristics of TNLC to driving voltage, cell thickness and aligning agent.

1. ま え が き

液晶の歴史は古いが¹⁾²⁾、近年になってネマティック液晶³⁾を中心として急速にその応用は伸びてきた。現在、表示デバイスとして様々な分野に応用されているが、透過光制御による高速ディスプレイ化を考えた場合、応答速度の遅さが最大のネックとなる。この問題は様々な面から研究改良されつつあり、その実現も現実のものとなってきた⁴⁾。液晶の応答速度は、大別して以下の3項目から決定されよう。

1. 液晶マテリアルの特性
2. 液晶セルの構造
3. 液晶の駆動方法

これらは互いに相乗して作用するので、独立に議論することは困難である。また、液晶自体新しい素材が次々と開発されるにおよんで、その物理化学的の解明も十分なされていない現状である。したがって、応答速度の様々な要因を解明するにあたって、精確な応答特性を把握する必要がある。本研究では、新素材について言及するものではないが、応答速度を解明する有力な手がかりとなる精密な応答波形を現出することができたので、これによりセル構造(セル厚や界面処理方法)や駆動電圧に対する液晶の電気光学的特性について定性

的な検討を試みた。

2. TN 液晶とその特性

2.1 電気光学効果

液晶(LC)の電気光学効果の中で、特に注目される一つに捩れネマティック効果(twisted nematic effect: 以下TNと略す)がある⁵⁾。Fig. 1はTNLCの光スイッチング原理を示している。LCセルは、透明電極を塗布した2枚のガラス基板の間(数 μm 程度の厚さ)に正の誘電異方性を有するネマティック液晶を注入し、その液晶分子長軸が上下の基板間で90度捩れた配列を示す。(a)の場合は、直線偏光された入射光がLC

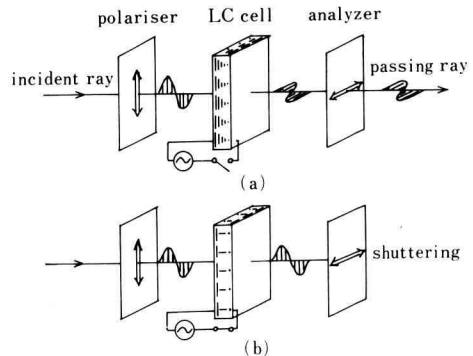


Fig. 1. Electro-optic effect of TNLC.

* 東京計器(株)
昭和59年9月27日受理

の分子軸方向と一致すれば、セルを通過中に分子の振れに沿って90度だけ回転偏光する。したがって、光は直交ニコルの検光子を通過することになる。いま、同図(b)のようにLC電極間にあるしきい値電圧 V_{th} 以上の直流または交流を印加すると、液晶の分子軸は電場方向を向いてしまい、入射光はもはや90度旋光せずそのまま通過するため、光は検光子で遮断されることになる。

以上は偏検光子を直交ニコル配置の場合であったが、平行ニコルでは光スイッチングの関係が全く逆になる。ここで、TN効果のしきい値電圧 V_{th} は

$$V_{th} = \pi \sqrt{\frac{k_{11} + (k_{33} - 2k_{22})/4}{\epsilon_0 \cdot \Delta\epsilon}} \quad (1)$$

$\Delta\epsilon$: LCの誘電異方性, ϵ_0 : 真空の誘電率,

$k_{11} k_{22} k_{33}$: 弾性率

で表わされ、 V_{th} はセル厚に関係しない⁴⁾。

2.2 供試液晶セル

Fig. 2は、本研究で用いた液晶セルの構成図(a)と外形図(b)である。(a)のディレクタの方向は、ガラス面に接する液晶分子の配列方向であり、上下90度の角度をなしている。これは同時にラビングの方向を示している。透明電極はいわゆる NESA コートで、その上に表面配向剤を塗布または蒸着し、布などで一定方向にラビングする⁴⁾。光の制御部分は、同図(b)の斜線を施した部分であり、試料のパラメータとしてセル厚 d と表面配向剤を変えた。

実験に用いた液晶成分は、実用的見地から製品化されたものを用いた。以下にその仕様を記す。

試料成分: ロッシュ 2701

配向剤: テフロン蒸着またはポリイミド塗布

セル厚: $6.5 \sim 9.3 \mu\text{m}$ 中の6枚, 計12枚

また、液晶成分の物性定数は次の通りである。

melting point [°C]: < -30

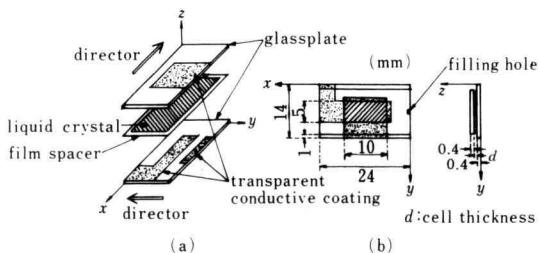


Fig. 2. Constitution of LC cell.

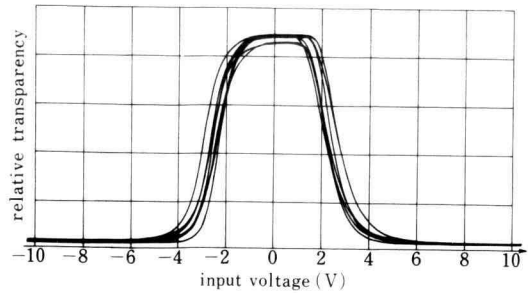


Fig. 3. Static characteristics of input voltage vs. transmitted light.

clearing point [°C]: 91.2

$\Delta\epsilon (= \epsilon_{//} - \epsilon_{\perp})$: +6.19 (=9.55-3.36)

$\Delta n (= n_{//} - n_{\perp})$: 0.142

elastic constant $k_{11}, k_{22}, k_{33}/k_{11}$ [$\times 10^{-12}\text{N}$]: 18.

52, 8.93, 1.17

viscosity [cp]: 24.8 (22°C)

なお、偏光板は別置とし、直交ニコル配置で測定を行った。

はじめに、約450~650 nmの範囲ではほぼ一様な分光分布を示すハロゲンランプを光源とし、熱カットフィルタ (IRA-25S) を通して液晶の静特性を測定した。Fig. 3は、厚さの違う数枚の試料を用いた静特性曲線を重ね合わせたものであり、よく知られた特性である。この特性は、印加電圧を直流とし、-10Vの方向から+10Vの方向に向かって徐々に増加させた場合の透過光量を表わし、縦軸は透過量の相対値である。特性のパラッキにはいくつかの原因があろう。一つには、直交ニコル偏光板の微小な角度ずれ、入射光による液晶の温度上昇(周囲温度は室温 $21^{\circ}\text{C} \pm 0.5^{\circ}$ に保った)やラビングの均一性などが考えられる。 V_{th} は(1)式の如くセル厚に無関係であるが、Fig. 3の各々の特性からもほぼ一定となることが確かめられた。ただし、ここでは最大光量の10%と90%に到達する電圧を比較した⁴⁾。

ところで、+10Vから逆方向に電圧を減少させていくと、液晶の無極性質から同様の特性が得られるはずであるが、実際には若干のヒステリシスが存在する。この原因は、印加電圧の増減スピードに関係する液晶分子の対流の影響も考えられるが、上述のパラッキの原因も多分に関係していると考えられる。液晶は直流電圧で駆動すると、性能劣化を速める原因ともなり、印加電圧の極性による影響を受けないある程度の高い周波数

の交流電圧を印加することが一般的である⁴⁾。

3. 応答特性の実験

液晶のダイナミックな動きを解明する上で、応答特性を得ることは大変重要である。本研究の目的は、液晶に V_{th} 以上の電圧をステップ的に上昇または減少させ、液晶の光スイッチング現象の応答曲線を精密に測定することにある。従来、この特性は液晶の理論的解明に重要であるため、様々な種類のデータが発表されているが⁸⁻¹⁴⁾、NT 液晶についてはなお一層の細部にわたる現象を忠実に把握する必要があると思われる。本実験では、高速度サンプリング A/D 変換器とマイクロコンピュータを用いた記録装置を製作し、実験を行なった。Fig. 4 は、その測定ブロック線図を示す。光源としては、単一波長(683.2 nm)を有する直線偏光形の安定な He-Ne レーザーを用い、測光用減衰フィルタを通して光源とした。偏検光子は、入射面 10×10 mm、長さ 20 mm のグラントムソンプリズムを用い、受光素子は立上り時間 3 ns のシリコンフォトダイオードを用い、予め精密な照度較正を行なった。駆動電圧発生器は、記録装置からのトリガー信号により、Fig. 5 に示す如く 0V から立上る 1 kHz 変調を施した方形波電圧を発生させる。ここで、変調周波数は標準的な 1 kHz を選んだ⁴⁾。測定では、電圧 V_i をパラメータとして、各素子ごとに数回の実験を繰り返した。受光素子から送られた応答信号は、サンプリング周期 15 ns、フルスケール 256 分解能の A/D 変換器を用いて、10 k バイトのメモリに蓄えられ、測定後同様な D/A 変換器により X-Y レコーダに出力する。これらは全てマイクロコンピュータによって自動計測される。

ところで、駆動電圧に対する液晶の応答時間を整理するにあたって、その定義を行なう必要がある。こ

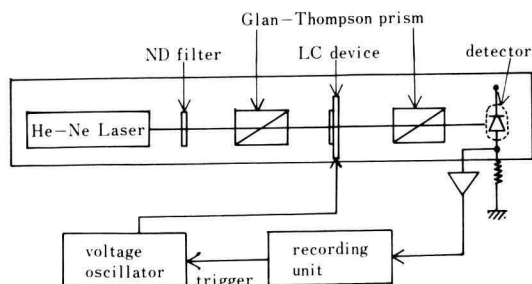


Fig. 4. Schematic diagram for measurement of transient response.

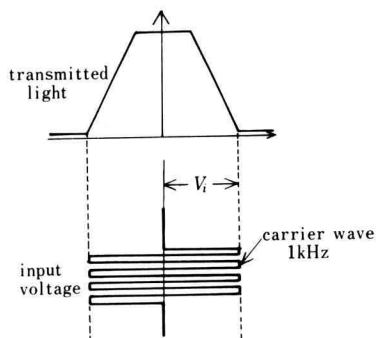


Fig. 5. LC driving method in experiment.

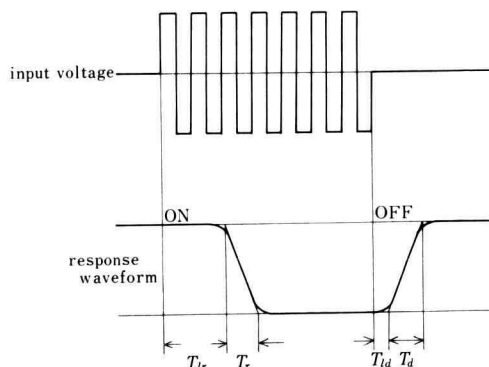


Fig. 6. Definition of response time.

では、過去の例を考慮して⁹⁾¹⁰⁾¹¹⁾ Fig. 6 の如く、立上り遅れ時間: T_{lr} , 立上り時間: T_r , 立下り遅れ時間:

T_{ld} , 立下り時間: T_d と定義する。立上りとは、ステップ電圧投入によって液晶の光シャッターリングが開始することをいい、立下りとは、駆動電圧を零にステップ減衰させた時の光開路状態をいう。

4. 実験結果と検討

4.1 応答波形

測定に際しては、温度条件を室温 $21^\circ \pm 1^\circ \text{C}$ に設定した。応答波形の一例として、Fig. 7 に表面配向剤にテフロンを用い、セル厚 $d = 9.0 \mu\text{m}$ の場合の立上り特性を示す。同図でわかるように、印加電圧を大きくすれば遅れ時間は大幅に短縮されるが、立上り時間の電圧に対する変化は僅少である。電圧に対する遅れ時間の影響は、液晶のキャパシタンス変化によるものと考えら

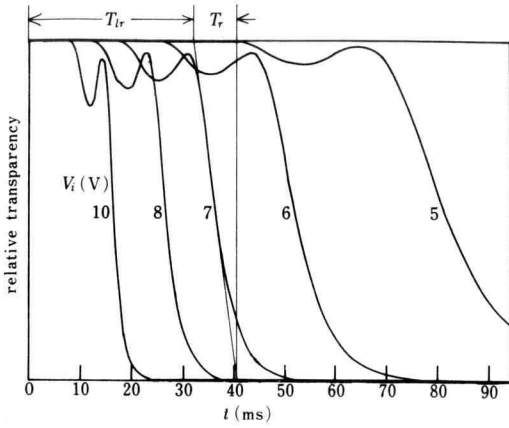


Fig. 7. Transient response of LC device at V_i on. (aligning agent: teflon, $d=9.0 \mu\text{m}$)

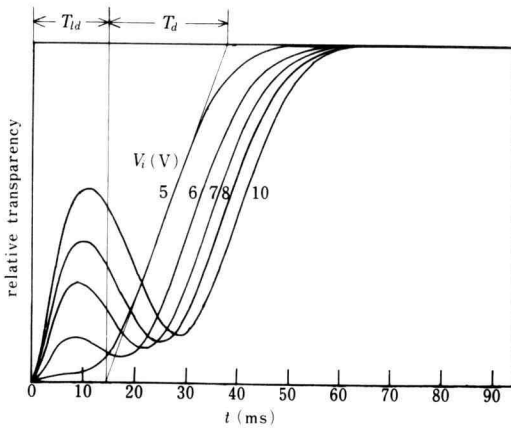


Fig. 8. Transient response of LC device of V_i off. (teflon, $d=9.0 \mu\text{m}$)

れる¹³⁾。したがって、高電圧になれば容量的に早く飽和値に適するので、その時点で液晶分子の遷移が開始され、急激な立上りが行なわれると考える。この立上り時間の電圧依存性はそれほど大きくなく、液晶分子の粘性、配向強度やセル厚などによって決まるものであろう。ここで、遅れ時間中にうねりが見られ、この部分でわずかに偏光が起ることを示している¹²⁾¹³⁾。これは興味ある特異な現象である。いくつかの原因が考えられるが、いまのところ、その機構を説明するに至っていないので、この究明は別な機会にゆずりたい。

次に、同様な立下り応答波形を Fig. 8 に示す。この場合、立上り同様、遅れ時間中に大きなうねりが見られる。この現象は、分子が遷移中いわゆる back flow に

より光散乱するためと考えられるが、明確な解明については別な機会にゆずりたい。このうねりは特に高電圧時に大きくなるので、蓄積電荷の影響は大であろう。然して後に立下りが行なわれるが、この時間 T_d は電圧の影響を受けていない。

以上が応答波形の一例であるが、他の素子についても同様な波形が得られた。その内、一部はうねりが定常値（電圧零時の透過光）を越えるものも存在したが、その原因は偏光時の光波長依存性により、レーザー波長より通過し安い状態になり得るものと考えられる。

4.2 電圧に対する特性

全ての応答波形から、各応答時間の電圧に対する変化を整理して Fig. 9~Fig. 16 に示した。ところで、理論的には総体的な立上り時間 $\overline{T_r}$ 及び立下り時間 $\overline{T_d}$ は、TNLC の場合

$$\overline{T_r} = \frac{\eta_i d^2}{\epsilon_0 \Delta \epsilon V^2 - k_{ii} \pi^2} \quad (2)$$

$$\overline{T_d} = \frac{\eta_i d^2}{k_{ii} \pi^2} \quad (3)$$

η_i : 粘性率, V : 印加電圧, k_{ii} : 弾性率

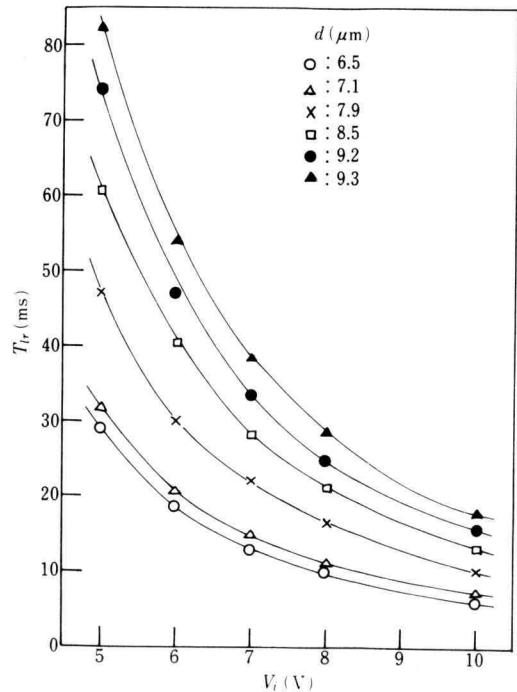


Fig. 9. Lag time vs. V_i at rise. (aligning agent: polyimide)

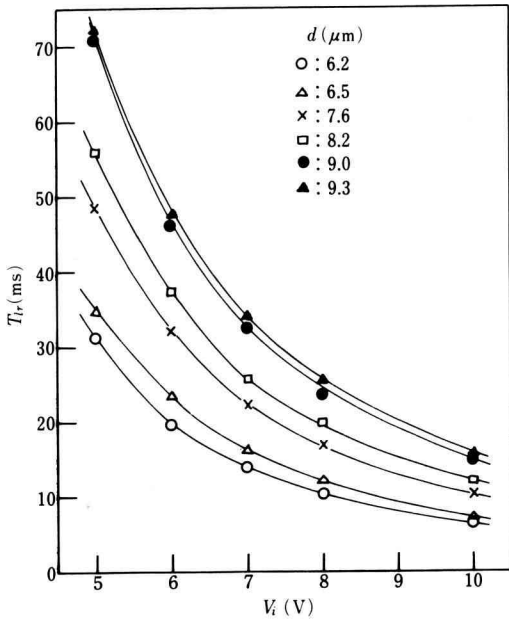


Fig. 10. Lag time vs. V_i at rise. (teflon)

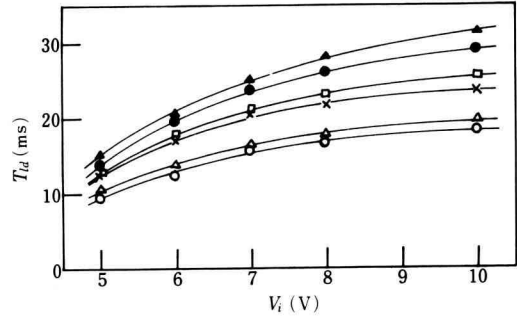


Fig. 13. Lag time vs. V_i at decay. (polyimide)

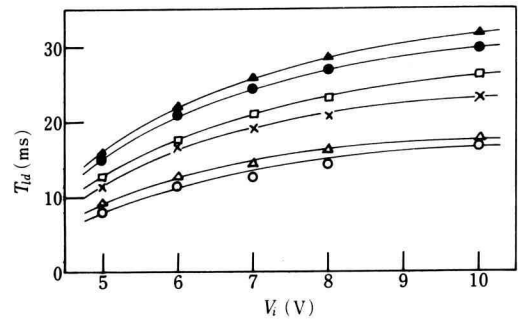


Fig. 14. Lag time vs. V_i at decay. (teflon)

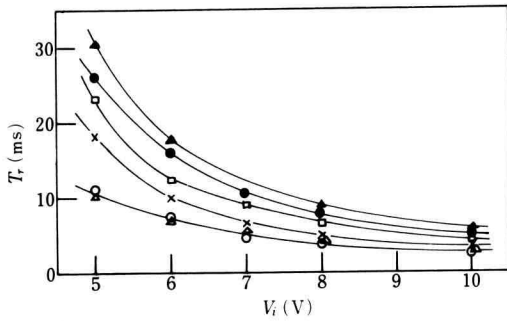


Fig. 11. Rise time vs. V_i . (polyimide)

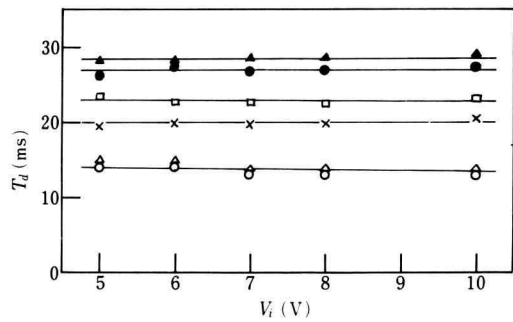


Fig. 15. Decay time vs. V_i . (polyimide)

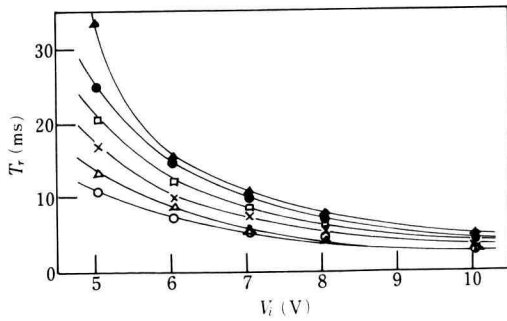


Fig. 12. Rise time vs. V_i . (teflon)

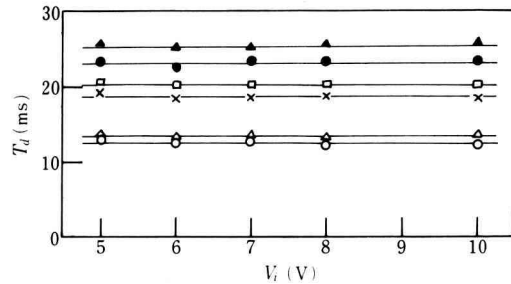


Fig. 16. Decay time vs. V_i . (teflon)

で表わされている⁷⁾¹⁵⁾。上式から、一定なセル厚に対して $\overline{T_r}$ は V^2 に反比例し、 $\overline{T_d}$ は電圧に依存しない。また、セル厚に対しては各々 d^2 に比例する。これらを考慮して特性を考察してみよう。

まず、Fig. 9~Fig. 12 に示す立上り特性では、たしかに V^2 に反比例する傾向が見られる。また、立上りでは遅れ時間 T_{lr} の影響が大きいことがわかる。それは多分にセル厚に関係したものであろう。表面配向剤（ポリイミドとテフロン）による界面処理の影響の相異は、同図からは明確な差異が認められない。

次に、Fig. 13~Fig. 16 に示す立下り特性では、遅れ時間 T_{ld} は多少電圧の影響があると思われるが、立上り時間 T_d は電圧に対して全く変化しないことがわかる。即ち、以上の結果はある程度理論を裏づけるものであろうと考える。また、表面配向剤による差異はここでもあまり見られない。

4.3 セル厚に対する特性

前述の特性をセル厚 d に対する特性に書き換えて Fig. 17~Fig. 20 に示した。セル厚に対する応答時間は(2)(3)式から d^2 に比例するといわれる。しかし、本実験程度の少ない試料の測定では、同図からこの判断は明確にできないと思われる。ポリイミドにおいて、わずかにその傾向が見られることがわかる。さらに、配向剤の差異については、同図から判断すれば、顕著な差異は認められないが、わずかにポリイミドが有効であると思われる。しかし、これらについてはなお一層

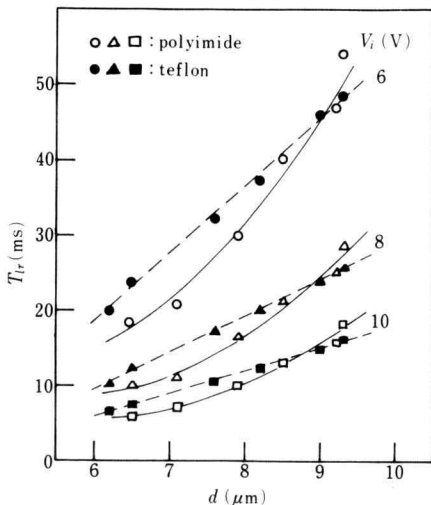


Fig. 17. Lag time vs. cell thickness d at rise.

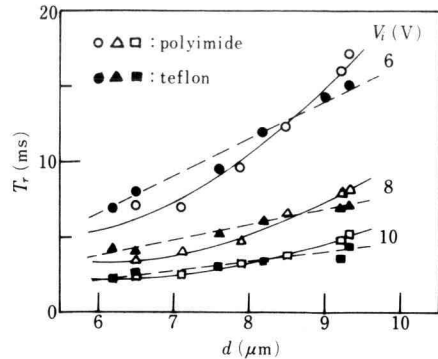


Fig. 18. Rise time vs. cell thickness d .

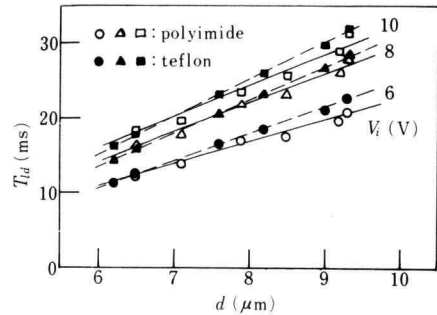


Fig. 19. Lag time vs. cell thickness d at decay.

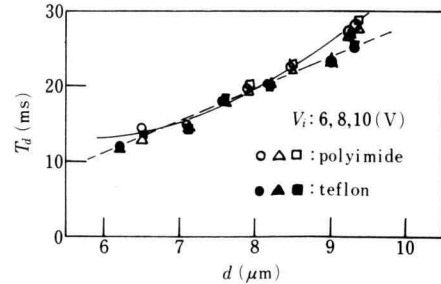


Fig. 20. Decay time vs. cell thickness d .

の究明が必要であると考えられる。

5. あとがき

以上でセル厚と配向剤をパラメータとした印加電圧に対する応答特性を検討した。本研究では、基礎的な特性のみを提示して、定性的な検討を試みたに終始したが、これらの特性から、いかにして応答時間の短縮をはかることができるかのいくつかの鍵が見出されよ

う。例えば、一般的駆動において、立上り時間を短かくするために、はじめ高電圧を印加する。然して後に、低電圧に移行させ立下りに備え、off 時の立下り時間を短かくすることが考えられる。これは、時分割駆動などと称してよく知られている⁴⁾。

本実験において、応答波形からいくつかの特異な現象が見られた。これらの理論的究明には、高度な物理化学的解析を必要とするが、今後の高性能化に向けての重要な課題の一つとなろう。

最後に、本研究を進めるにあたり、試料提供や貴重な御助言をいただきました日本ロッシュ (株) 寺田佳織氏並びにセイコー電子工業 (株) 山本修平氏に深謝いたします。さらに、液晶に関して多大な御教示を度々いただきました東京農工大学間多 均先生と本研究を御支援御指導をいただきました上智大学三山 醇先生に厚く感謝申し上げます。

文 献

- 1) F. Reinitzer: Monatshefte für Chemie, 9 (1888).
- 2) O. Lehmann: Z. physik. Chem., 4 (1889).
- 3) W.H. de Jeu: 『Physical Properties of Liquid Crystalline Materials』, Gordon & Breach, N.Y. (1980).
- 4) 松本, 角田: 『液晶の最新技術』, 工業調査会 (1983).
- 5) M. Schadt, W. Helfrich: Appl. Phys. Lett., 18 (1971).
- 6) 佐々木: 『液晶エレクトロニクスの基礎と応用』, オーム社 (1979).
- 7) E. Jakeman, E.P. Raynes: Rhys. Lett., 39A (1972).
- 8) G.H. Heilmeyer: J. Chem. Phys., 44 (1966).
- 9) 香西他: 第 17 回応物関係連合講演会 (1970).
- 10) 松本他: 応用物理, 45 (1976).
- 11) 中野: 第 2 回液晶討論会, 4V08 (1976).
- 12) 松村他: 第 4 回液晶討論会, 3S06 (1978).
- 13) 長江他: 第 7 回液晶討論会, 4U18 (1981).
- 14) 近藤他: 第 8 回液晶討論会, 3V18 (1982).
- 15) H. Koelmans, A.M. van Bortel: Mol. Cryst. Lig. Cris., 12 (1971).