

透過型 Four Detectors Polarimeter の開発とその応用

川畑 州一^{*1}

Development of a Transmission type Four Detectors Polarimeter and its application

Shuichi KAWABATA^{*1}

Abstract

This report describes the development of a Transmission type Four Detectors Polarimeter (T-FDP) and its application to the in-situ observation of dynamic behavior of smectic liquid crystal (SLC). A slight but clear hysteresis loop was observed in the trajectory of the smectic liquid molecules driven by alternative voltage.

1. はじめに

光は横波であり、偏り（偏光）を示す。この偏光を利用したデバイスとして、液晶ディスプレイや液晶プロジェクターなどが最近よく目につくようになった。また偏光は画像の表示装置だけではなく、複屈折の測定をはじめ、さまざまな計測にも用いられる。例えば光弾性では、材料内部に生じた応力分布を、偏光により縞模様として直接目で見るができる。また表面や薄膜の計測には古くから偏光解析法が用いられてきた。偏光解析法は、偏光を試料に入射させ、反射光あるいは透過光に生じた偏光状態の変化を計測して試料の光学定数を求める方法であるが、特に薄膜の厚さに対する感度に優れ、膜厚をナノメートル以下の精度で測定することができる。その為、最近のナノ科学の発展に伴い、その応用は飛躍的に拡大している。

偏光計測において、光の偏光状態を測定する手法は様々であるが、著者は Azzam 等¹⁻³⁾によって発表された Four Detector Polarimeter (FDP) に注目した。これは、四つの光検出器に入射した偏光の光強度を測定するだけで入射光の偏光状態が決定できる、大変シンプルな装置である。光検出器以外には、偏光子や検光子それに $\lambda/4$ 板などの偏光素子を一切必要とせず、また機械的な可動部もない。四つの光検出器で測定された光強度を A/D 変換ボードを通してコンピュータに入力すれば、たちどころに入射偏光の偏光状態が決定できる。

著者は、FDP を実際に偏光計測へ応用すべく、従来の FDP に改良を加えた透過型 FDP の開発を行なった。そして、それを用いて液晶分子の動的挙動を観察した。観察は交流電圧で駆動されたスメクチック液晶分子に直線偏光を入射させ、その透過光の偏光状態を透過型 FDP で測定した。測定は in-situ で行なわれ、その結果は逐次コンピュータのディスプレイ上のポアンカレ球に表示されるようにした。

ここでは、著者の開発した透過型 FDP (T-FDP) と、それを用いたスメクチック液晶の動的挙動の観察結果について報告するが、その前に、測定の基礎となる偏光について概説する。

2. 偏光の基礎⁴⁻⁶⁾

光の偏光状態は、光の電気ベクトルの先端が描く軌跡として定義される。光の伝播方向に垂直な面内で、電気ベクトルの先端が直線を描く場合、その光は直線偏光と呼ばれ、電気ベクトルの先端が円を描く場合は円偏光と呼ばれる (Fig.1)。そして、電気ベクトルの先端が楕円を描く場合、それは楕円偏光と呼ばれる。楕円偏光では、その楕円率と長軸の方位角によって、さまざまな偏光状態が存在する。さらに、光が伝播してくる方向から覗いたときに、電気ベクトルが楕円を描く向きにより、右回り、左回りの区別がある。また、先の直線偏光や円偏光は、それぞれ楕円率が 0 および 1 の特別な楕円偏光と見なす事もできる。

^{*1} 東京工芸大学工学部基礎教育研究センター教授
2004 年 5 月 12 日 受理

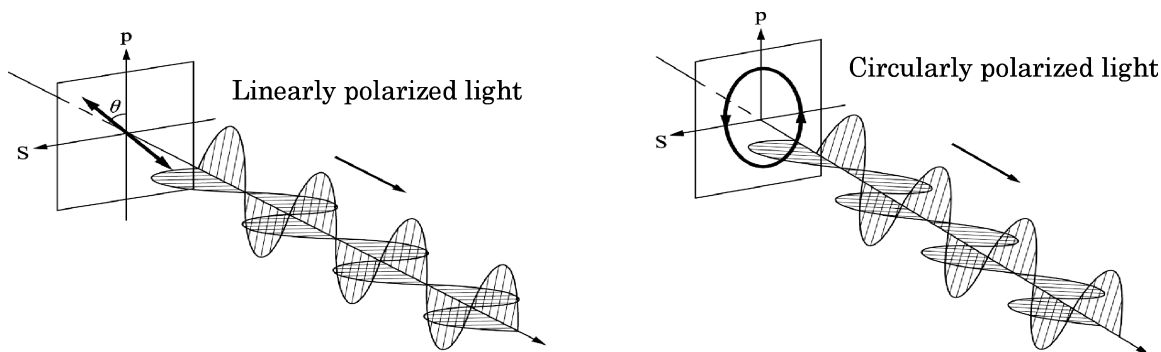


Fig.1 Schematic representation of the polarized light

一方、偏光の電気ベクトルの先端が描く軌跡は、互いに直交する二つの電気ベクトルの“重ね合わせ”として表わすことができる。この場合、偏光状態は二つの電気ベクトルの、振幅比と位相差により決定される (Fig.2)。例えば、振幅比が1で、位相差が0または π の二つの電気ベクトルを重ね合わせると、その合成した電気ベクトルの軌跡は方位角 45° の直線となる。また、振幅比が1でも、位相差

が $\pm \pi/2$ の場合は合成した電気ベクトルの軌跡は円となる。ここで、複号は円偏光の回転の向きを表わす。また逆に、光の偏光状態を互いに直交する二つの電気ベクトルに分解して考えることもできる。楕円偏光は、長軸方向の電気ベクトルと短軸方向の電気ベクトルとに分解でき、その位相差が $\pi/2$ である。

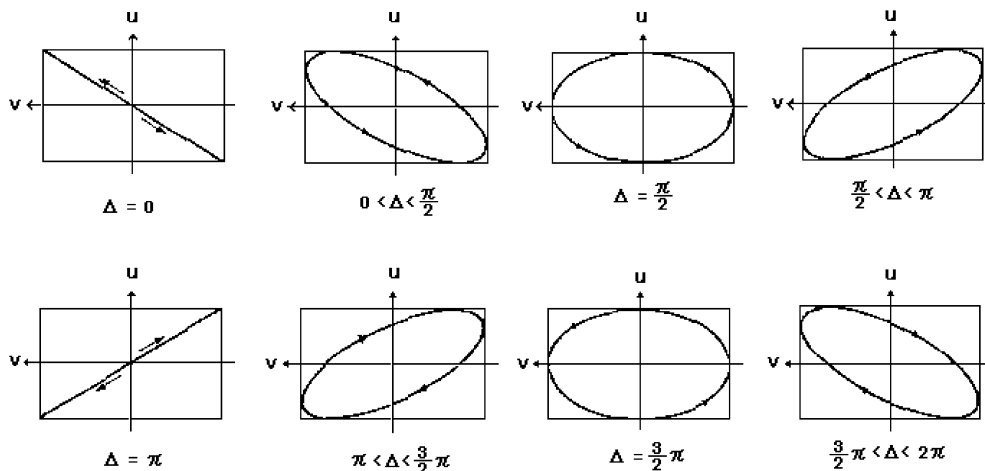


Fig.2 Polarization and its phase difference

光の偏光状態はまた、ポアンカレ球と呼ばれる単位球の球面上の点としても表示される。ポアンカレ球とは、球を地球と見なしたとき、楕円偏光の方位角 θ の2倍、 2θ を経度とし、その楕円率角 ε の2倍、 2ε を緯度として表わしたもので、北半球を左回りの楕円偏光、南半球を右回りの楕円偏光と約束する。すると、直線偏光は、楕円率角 ε が0であるから、ポアンカレ球上では、緯度0 (赤道) 上の点として表わされる。また、球の北極と南極は楕円率角 ε が $\pi/4$ と $-\pi/4$ なので、それぞれ左回りの円偏

光と右回りの円偏光を表わす (Fig.3)。

ポアンカレ球では偏光状態の変化が球面上での作図として理解できるので、ポアンカレ球による偏光の表示は直感的で大変便利である。さらにまた、ポアンカレ球の中心を原点とする三次元直交座標 $S_1-S_2-S_3$ を考え、ポアンカレ球上の偏光状態の三次元直交座標 S_1, S_2, S_3 とその光強度 S_0 を組として表わしたものはストークスペクトルとよばれるが、ストークスペクトル (S_0, S_1, S_2, S_3) も偏光状態を表わすのに良く用いられる方法である。

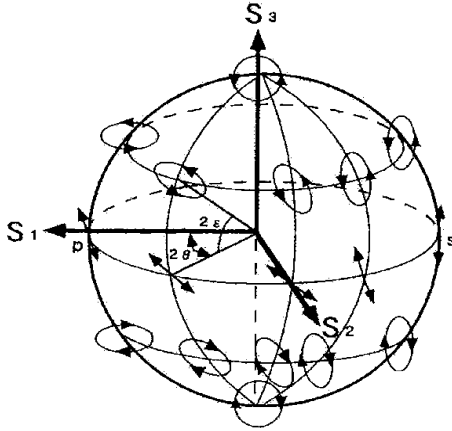


Fig.3 Poincare sphere and Stokes parameters

ストークスペクトルによる偏光状態の表示は、作図的なポアンカレ球と比較すると、偏光状態を代数的に取り扱うのに便利である。ちなみに、 $(1, \cos 2\theta \cos 2\varepsilon, \sin 2\theta \cos 2\varepsilon, \sin 2\varepsilon)$ は方位角 θ 、楕円率角 ε の楕円偏光を表わす。光学系に入射する偏光状態を \mathbf{S}_{in} 、射出する偏光状態を \mathbf{S}_{out} とすると、一般に、 $\mathbf{S}_{out} = \mathbf{M} \cdot \mathbf{S}_{in}$ の関係が成り立つ。ここで、 \mathbf{M} は 4×4 の行列で、光学系のミューラーマトリックスとよばれる。

3. Transmission type Four Detectors Polarimeter (T-FDP)

Azzam 等は、Fig. 4 に示すように、振れて配置された四つのディテクターに光を順次入射させ、その出力電流から入射光の偏光状態を決定する Four Detector Polarimeter (FDP) を開発した。Fig. 4 のように、光の入射面が振じれるように配置した四つの

$$S_0 = r_p^2 + r_s^2 = 1$$

$$S_1 = r_p^2 - r_s^2 = -\cos 2\Psi$$

$$S_2 = 2 \cdot r_p \cdot r_s \cdot \cos(\delta_p - \delta_s) = \sin 2\Psi \cdot \cos \Delta$$

$$S_3 = 2 \cdot r_p \cdot r_s \cdot \sin(\delta_p - \delta_s) = \sin 2\Psi \cdot \sin \Delta$$

光検出器で、光を順次反射させると、各光検出器からは、入射光の偏光状態に依存した出力電流が得られる。すなわち、最初の光検出器に入射する光のストークスペクトルを \mathbf{S} とし、各光検出器からの出力電流 I_i ($i=1, 2, 3, 4$) を成分とするベクトルを \mathbf{I} (I_1, I_2, I_3, I_4) とすると、 \mathbf{S} と \mathbf{I} の間には、 $\mathbf{I} = \mathbf{A} \cdot \mathbf{S}$ の関係が成り立つ。ここで、 \mathbf{A} は装置の特性行列とよばれ、光検出器の特性およびその幾何学的配置で決まる装置固有の行列である。そして、キャリブレーションにより、装置の特性行列 \mathbf{A} を決定すれば、逆に、各光検出器からの出力電流 \mathbf{I} より入射光の偏光状態 \mathbf{S} を、 $\mathbf{S} = \mathbf{A}^{-1} \cdot \mathbf{I}$ として求めることができる。

FDP は機械的な可動部がなく装置の構成も単純で、かつ高速な測定が可能である。また、測定原理もシンプルでかつ、光の全ストークスパラメータを測定できるので、部分偏光をも測定できる。

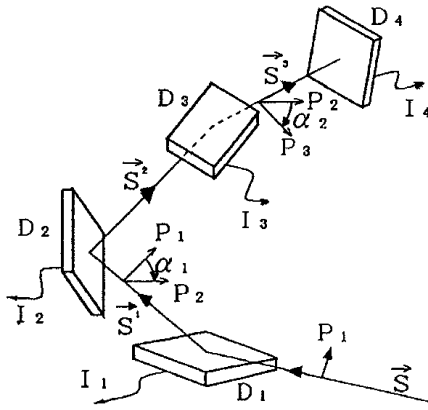


Fig.4 Schematic diagram of the FDP

$$\begin{pmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_3 \\ I_4 \end{pmatrix} = \mathbf{A} \cdot \begin{pmatrix} S_0 \\ S_1 \\ S_2 \\ S_3 \end{pmatrix}$$

$$\mathbf{A} = \mathbf{I} \cdot \mathbf{S}^{-1}$$

$$\begin{pmatrix} S_0 \\ S_1 \\ S_2 \\ S_3 \end{pmatrix} = \mathbf{A}^{-1} \cdot \begin{pmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_3 \\ I_4 \end{pmatrix}$$

ただ従来の FDP には、

- (1) 四つの光検出器を空間的に振じった位置に配置する為、その光軸が折れ曲がり、光学系としては光軸調整が厄介である。
- (2) 光検出器は表面のカバーガラスを取り外して使用する必要があり、特注が必要となる。
さらに、むき出しになった光電面の汚れによる、装置の特性行列の経時変化が懸念される。
- (3) 光検出器からの反射率は数%程度なので、四つ目の光検出器に入射する光の強度は最初の検出器に入射する光の強度に比べ3桁から4桁ほど小さくなる。従って、最後の光検出器では S/N 比が極端に低下する。

などの、難点もいくつか指摘される。そこで、これらの点を改良すべく透過型 FDP (Transmission type Four Detectors Polarimeter : T-FDP) の開発を行なった。

3.1 装置

Fig.5 に示すように、光軸上に入射角 45° でかつ、光軸を回転軸としてそれぞれ回転させた三つの半透明鏡を直線的に配置する。そして、それぞれの鏡に入射した光が鏡で反射され、それぞれの三つの光検出器にはほぼ垂直に入射するようにした。四つ目の光検出器には三つの半透明鏡を直線的に透過した光が入射するようにしてある。そして、透過型 FDP (T-FDP) の特徴として、

- (1) 直線光学系なので、装置の光軸調整が容易である。
- (2) 装置の構成を従来の FDP に比べてよりコンパクトにできる。
- (3) 市販の検出器がそのまま使用できる。
- (4) 三つの半透明鏡の反射率を、前面からそれぞれ、 $1/4$ 、 $1/3$ 、 $1/2$ とすることにより、それぞれの光検出器に入射する光の平均強度を、大雑把に言って、同程度にすることができる。

従って、各光検出器の S/N 比に極端な差が生じない。

などが挙げられる。

3.2 キャリブレーション

装置の特性行列を決定するには、四つの既知の入射偏光に対する各光検出器からの出力電流をそれ

ぞれ測定すればよい。入射させた偏光状態の 4×4 の行列を S_{cal} とし、そして測定された電流の 4×4 の行列を I_{cal} とすると、装置の特性行列 A は $A = I_{cal} \cdot S_{cal}^{-1}$ の式より求められる。

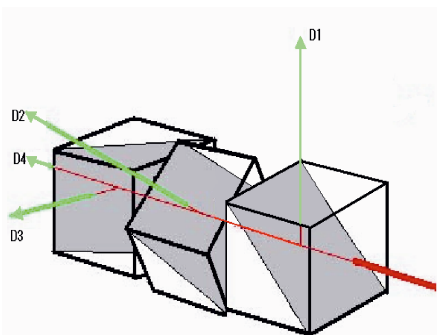


Fig.5 Optical Configuration of the T-FDP

実際のキャリブレーションにおいては、偏光子と $\lambda/4$ 板を用いて、既知の偏光状態にセットし、そのときの各光検出器からの出力を測定する。この手順を四回繰り返すことで、四つの既知の入射偏光に対する各光検出器からの出力電流が得られる。四つの既知の入射偏光を作る手順を簡略化する為に、偏光子と $\lambda/4$ 板の方位をそれぞれ、 0° 、 10° にセットしたまま、二つを一体にして 120° ずつ回転できる装置を作った。また、四つ目の偏光状態は円偏光にセットできるように $\lambda/4$ 板の方位を -45° にピンで合わせられるようになっている (Fig.6)。

またキャリブレーションにおいては、各入射偏光の強度も別途、測定する必要があるが、この手順も入射偏光の測定と同時にこなせるように工夫した。それは入射偏光の一部を、偏光状態を変えずに反射させるようにし、その反射光の強度を五つ目の光検出器で測定した。これにより、光源の強度変動がキャリブレーションに及ぼす影響を極力押さえることができる。

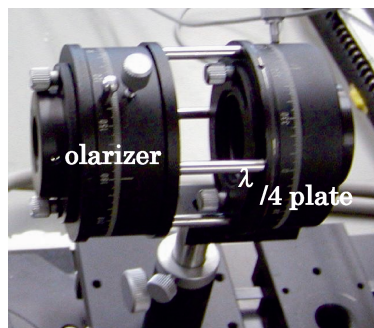


Fig.6 Calibrator

キャリブレーションを終えた後、装置のパフォーマンスを調べた。まず、装置の前に偏光子を置き、それを回転させた。結果はポアンカレ球の赤道線上を測定点が移動することが確認できた (Fig.7a)。次に、偏光子の後に $\lambda/4$ 板を置き、その $\lambda/4$ 板を回転させたら、測定点はポアンカレ球上で、正しく 8 の字を描いた (Fig.7b)。

Fig.7b $\lambda/4$ plate rotation

Fig.7a Polarizer rotation

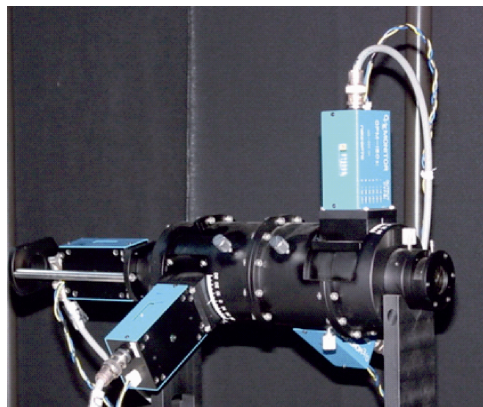
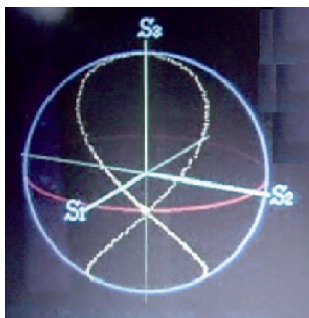


Fig.8 Picture of the T-FDP

Fig.8 に試作装置の写真を示す。写真で直方体の四つの突き出た箱が光検出器で、増幅器もその中に内蔵されている。また、装置の諸特性を Table1 に示す。

Table1 Specifications of the T-FDP

Wavelength : 632.8 nm (He-Ne Laser)

Beam splitter : Evaporated Cr translucent mirror

Twist angle of the each beam splitter : 120°

A/D converter : 12 bit (0 – 10 V)

Sampling time : 12 msec (10 times averaging)

Accuracy and Sensitivity

azimuthal angle $\delta \theta = \pm 0.1^\circ$, $\sim 0.01^\circ$

elliptic angle $\delta \varepsilon = \pm 0.5^\circ$, $\sim 0.01^\circ$

4. 透過型 FDP (T-FDP) による液晶の動的挙動の観察⁷⁾

開発した透過型 FDP を用いて、スメクチック液晶 (SLC) 分子の動的挙動を観察した。スメクチック液晶は強誘電性の液晶で、電界中では液晶分子はその双極子モーメントが電界と平行となるように配向する。スメクチック液晶分子を屈折率楕円体で近似すると、その双極子モーメントは短軸方向を向

いて、外部電界のない状態での分子の配向は基板にほぼ平行である。そして、二枚のガラス板で薄くサンドウィッチしたスメクチック液晶に、面に垂直に交流電界を印加すると、液晶分子は半円錐状に回転する。この様子は、液晶を透過する光の偏光状態の変化を in-situ で測定することにより、観察できる筈である。Fig.9 に装置の全体写真を示す。

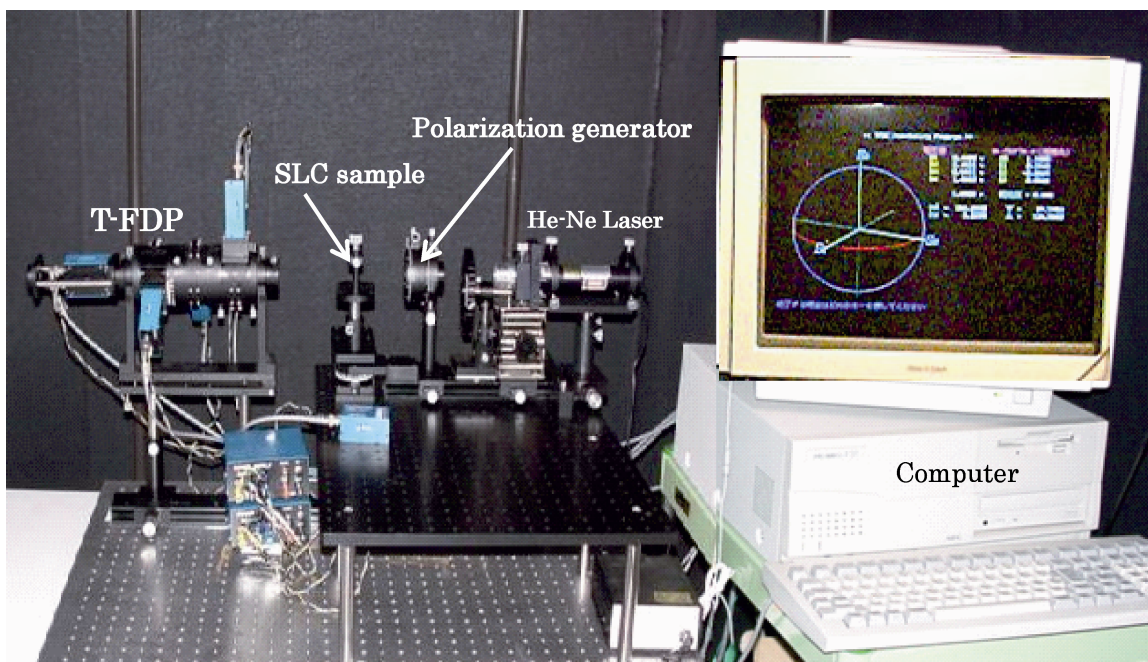


Fig.9 Optical setup of the Transmission type Four Detectors Polarimeter (T-FDP)

T-FDP からの各出力信号は A/D 変換器をとおしてマイクロコンピュータに入力される。すると、あらかじめキャリブレーションで得られた装置の特性逆行列を用いて、直ちに偏光状態が求められる。そして、求められた偏光状態はコンピュータのディスプレイに描かれたポアンカレ球上に逐次表示される。Fig.10a と Fig.10b はそれぞれ、1Hz、12V の交流電界で駆動したスメクチック液晶の透過型

FDP による動的挙動の観察結果とその解析結果を示す。解析においては、液晶分子の挙動を移相板の回転に置き換えて、その位相差と方位角の変化を求めた。その結果、方位角における振動とそれに伴う位相差の非対称性が見られた。さらに、スメクチック液晶分子の往復運動において、往きと帰りで若干のヒステリシスが見られた。

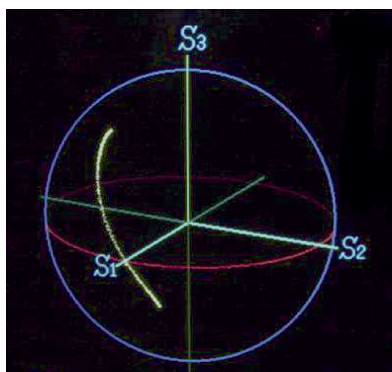


Fig.10a Trajectory of the polarization state

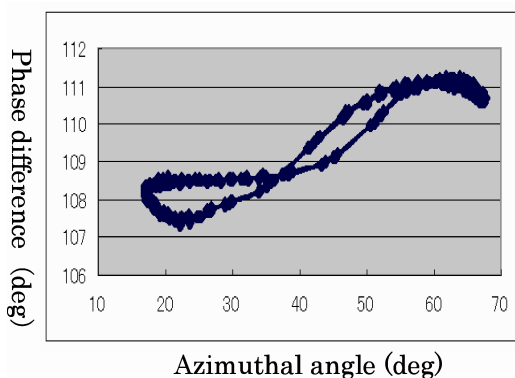


Fig.10b Dynamic behavior of the SLC

5. おわりに

透過型 FDP とそれを用いて観察したスメクチック液晶分子の動的挙動について報告したが、これら、交流電界中でのスメクチック液晶分子の若干のヒステリシスを示す挙動は、高速測定が容易な透過型 FDP によって、より明確となった。

参考文献

- 1) R. M. A. Azzam, Opt. Acta. 29, 685-689 (1982)
- 2) R. M. A. Azzam, Opt. Lett. 10, 309-311 (1985)
- 3) H. Schwiecker et. al., Proc. SPIE 1746,222-230 (1992)
- 4) W. A シャークリフ 「偏光とその応用」 共立出版 (1965)
- 5) 土井康弘 「偏光と結晶光学」 共立出版 (1975)
- 6) R. M. A. Azzam and N. M. Bashara, "Ellipsometry and polarized light" (North-Holland, Amsterdam, 1980)
- 7) S. Kawabata et. al., Proc. SPIE, 4829, 47-48 (2002)