

研究

Twisted nematic 液晶空間光変調器の 位相変調特性の測定

高橋 毅・石井 行弘

職業能力開発大学校電子工学科 〒229 相模原市橋本台 4-1-1

(1993年9月7日受付, 1993年11月29日受理)

Phase-Modulation Measurement of Twisted Nematic Liquid-Crystal Spatial Light Modulators

Takeshi TAKAHASHI and Yukihiro ISHII

Department of Electronics, University of Industrial Technology,
4-1-1, Hashimotodai, Sagamihara 229

(Received September 7, 1993; Accepted November 29, 1993)

The phase variation of twisted nematic liquid-crystal spatial light modulators (TNLC-SLMs) has been measured by a double-path type Twyman-Green interferometer. The features by using the double-path interferometer have wide dynamic phase response as a function of applied voltage with less effect of the intensity modulation on the measurement. The experimental results have been compared with the numerical results by the use of Jones calculus. The calculus shows that the phase modulation in the double-path beam is exactly unequal to two times the phase modulation in the single-path beam. The value of the difference between them is changed by applying the voltage of a TNLC-SLM. This value has negligible influence upon the phase modulation ranging from 0 to 2π rad.

1. はじめに

ツイストネマティック (twisted nematic 以下 TN) 液晶空間光変調器は、電気アドレス式の簡便な光変調器として計算機ホログラムの実時間表示¹⁻³⁾ や、光情報処理⁴⁾ 系の入力装置として広く利用されている。TN 液晶空間光変調器は、液晶分子のねじれ構造により生ずる旋光性を利用して、強度変調器として用いられている。さらに、強度変化の影響の少ない位相変調器として用いるためには、偏光子と検光子をそれぞれ入射面側、出射面側の液晶分子のディレクタ (director) と平行にし、光学的閾値 (optical threshold)⁵⁾ 以下の電圧で動作させることが必要である。

TN 液晶空間光変調器の位相変化量は、被検物体を光線が1回通過するシングルパス干渉光学系であるマッハツェンダー干渉計を用いて測定されている⁵⁻⁷⁾。印加電

圧の広い範囲で位相変化量を測定する際、印加電圧が光学的閾値を超えると TN 液晶空間光変調器の透過光強度変化が急峻に生じる。この強度変化により干渉縞のコントラストが低下するため、広い電圧範囲の位相変化量の測定は困難になる。

本研究は、印加電圧の広い範囲で強度変調の影響を低減し、良好な干渉縞コントラストを保持しながら位相変化量を測定する手法として、光線が TN 液晶空間光変調器を往復するダブルパス干渉光学系による測定法を提案する。ダブルパス光路を用いることにより、往路で旋光された光が復路で逆方向に旋光されるので、旋光による強度変化は低減される。

ジョーンズの計算法 (Jones calculus)⁸⁾ を使用して、TN 液晶空間光変調器の位相と強度の変調特性が、従来報告されているシングルパス光路⁵⁻⁷⁾ とダブルパス光路のそれぞれの場合について計算、比較される。計算結果

から、ダブルパス光路による位相変化量は、シングルパス光路の位相変化量の正確に2倍ではなく、その位相変化量と比較して、最大で $\lambda/4$ の位相差が生じている。しかしながら、位相変調器として用いる 0 から 2π rad の範囲においては、このような大きな位相差を生じない。よって、この範囲で動作する位相変調器では、ダブルパス干渉光学系により測定した位相変化量の $1/2$ を、シングルパス光路の位相変調量と見做しても許容できる。また、強度変化の計算結果から、シングルパス光路の強度透過率は、印加電圧が光学的閾値を超えることにより漸近的に 3% に近づき、干渉縞のコントラストは低下する。他方、ダブルパス光路の最小の強度透過率は 63.3% となり、干渉縞のコントラストの低下は少ない。TN 液晶空間光変調器の印加電圧による強度透過率変化の測定結果は、ジョーンズの計算法と比較され良い一致を示している。

2. 位相変調特性の測定

本報告の実験で使用する TN 液晶空間光変調器は、セイコーエプソン製ビデオプロジェクタ VPJ-700 の赤色情報表示用液晶パネルを用い、位相変調器として使用するため付属の偏光板を取り除いている。赤色表示用の液晶パネルを使用した理由は、液晶パネルが赤色光用に設計されているため緑色用、青色用パネルと比較して、同一の波長に対する最大の位相遅延 (phase retardation) を生じているからである。TN 液晶パネルのサイズは、1.27 インチ、画素数は、70,400 画素 (横 320×縦 220)、ツイスト角 (twisted angle) は 80 度となっている。液晶パネルは、TFT アクティブ・マトリクス方式により駆動される。

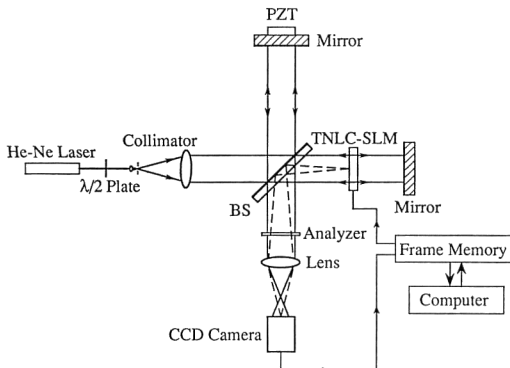


Fig. 1 A phase-shifting Twyman-Green interferometer to measure the phase variation in a TNLC-SLM.

印加電圧に対する位相変調量の測定は、**Fig. 1** に示すトワイマン・グリーン干渉計を用い、位相シフト干渉法により行われた。干渉計の光源は、消光比 500:1 を有するヘリウム・ネオンレーザーを使用し、そのビームは、 $\lambda/2$ 板を通過しコリメータに入射される。TN 液晶空間光変調器に入射する光波の直線偏光方向は、入射側の液晶分子のディレクタに平行な偏光板を基準にして、その偏光方向に一致するように $\lambda/2$ 板を回転し、ディレクタの方向と合致される。TN 液晶空間光変調器の印加電圧は、走査線方向の 1 ラインごとに 1 V から 0.023 V のステップで 4 V まで階段状に印加し、この電圧範囲の位相変化が同時に測定できるようになっている。TN 液晶空間光変調器は、干渉計の物体光の腕に配置され、参照光のミラーには piezo 素子 (PZT) が取付けられている。この PZT は、4 ステップ位相シフト法で要求される $0, \pi/2, \pi, 3\pi/2$ rad の位相量を与える。検光子 (analyzer) の偏光方向は、 $\lambda/2$ 板通過後の光板のそれと平行である。干渉縞は、CCD カメラにより観測されフレームメモリに蓄積される。フレームメモリに蓄積された干渉縞画像からコンピューターにより 4 ステップ法の位相導出の計算を行い、TN 液晶空間光変調器の位相量が測定される。

Fig. 2 は、一つの位相シフトを与えたときの干渉縞画像を示す。**Fig. 2** の縦軸は、走査線方向と垂直で 1 V から 4 V までの電圧変化を表している。**Fig. 2** の干渉縞は、TN 液晶空間光変調器の位相歪み、および、参照光側のミラーがわずかに傾けられるために生じる干渉成分を含んでいる。そこで、TN 液晶空間光変調器の電源を切った状態で干渉測定を行い位相分布を求め、測定値から差し引くことにより TN 液晶空間光変調器の真の位相変調量が得られている。**Fig. 3** は、この手法により測定された印加電圧に対する位相変調量を表している。位相変調量は、ダブルパス干渉光学系により測定されて

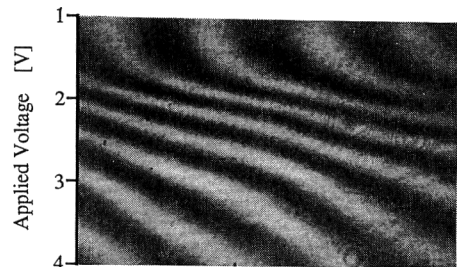


Fig. 2 An interferogram of a TNLC-SLM giving one phase shift by a PZT. The ordinate denotes the applied voltages ranging from 1 to 4 volts.

いるので測定値の 1/2 を取っている。

ダブルパス干渉計を用いる干渉計測における強度変調の影響を調べるため、印加電圧に対する TN 液晶空間光変調器の強度透過率変化の測定を行う。強度透過率の測定は、Fig. 1 の光学系において PZT 側の光路をカットし、CCD カメラの代わりに Si フォトディテクタを使用して行う。Fig. 4 は、印加電圧に対する強度透過率の変化を示し、印加電圧 0 V での強度で規格化した値を表している。TN 液晶空間光変調器は交流駆動されているので、印加電圧の値は実効電圧である V_{rms} で表示する。この場合の測定結果は○印で表示され、最低の強度透過率は、印加電圧 2.4 V において 61.2% である。Fig. 4 に×印で示した値は、シングルパス光路を用いた印加電圧に対する強度透過率変化の測定結果である。この結果から、強度透過率が急激に低下する初期電圧で定義される光学閾値電圧は 2.3 V である。この電圧より大きな電圧を印加することにより強度透過率は 6.3% に近づく。

Fig. 3 の印加電圧に対する位相変調量のデータから、0.07 V おきに抽出した測定値が Fig. 5 の○印に示されている。これらの位相変調量のデータを用い、13 次の多項式にフィッティングした曲線が実線で表されている。この結果から、1.1 V から光学的閾値電圧 2.3 V の範囲で 0 から 2π rad の位相変化が得られている。Fig. 4 の×印に示すように、この電圧範囲で最小の強度透過

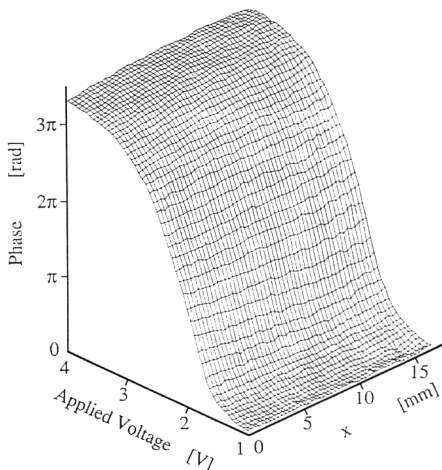


Fig. 3 Three-dimensional phase map of the phase modulation of a TNLC-SLM as a function of voltages. The measurement is performed by subtracting the surface nonuniformity from the raw data with a double-path Twyman-Green interferometer.

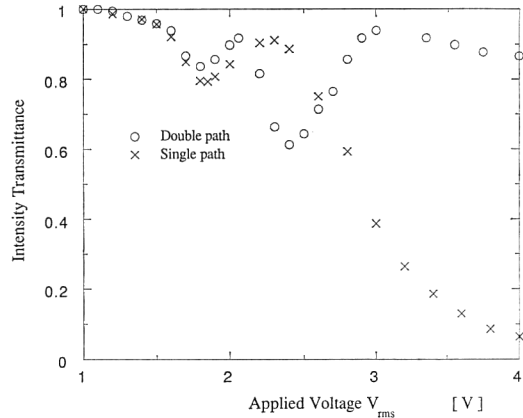


Fig. 4 Plots of experimental intensity modulations versus applied voltages. The open circle corresponds to the result measured from a double-path beam and the × character corresponds to the one measured from a single-path beam.

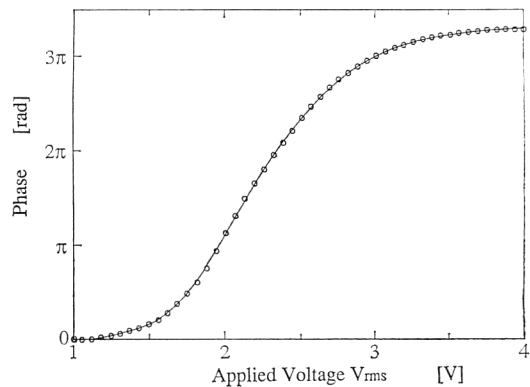


Fig. 5 Experimental result of the phase modulation as a function of voltages is extracted from the data of Fig. 3 in the double-path interferometer. The data marked by the open circle is fitted with a polynomial as shown in a solid curve.

率は 80% となっている。他方、ダブルパス光路で、 2π rad の位相変調量を生じる電圧 2 V までの範囲における最小の強度透過率は、Fig. 4 の○印で表された実験結果から 86.7% となっている。

3. TN 液晶空間光変調器の光変調特性の計算

この章では、ジョーンズの計算法を用い TN 液晶空間光変調器の印加電圧に対する位相と強度の変調量をシングルパスとダブルパスのそれぞれのケースについて解

析し数値計算を行う。

TN 液晶は、光学軸と分子軸が平行な単軸結晶として扱うことができる。Fig. 6 に示す TN 液晶空間光変調器の厚みを d とし、光線は z 軸に沿って伝播する。入射面で x 軸に平行に配向された液晶分子は、出射面で 80 度回転している。このようにゆっくりねじれている複屈折性物質中の光の伝播は、ジョーンズの計算法により計算できる^{6,8)}。

電界が印加されていないときの、常光線と異常光線の屈折率をそれぞれ n_o 、 n_e とするとジョーンズマトリクス (Jones matrix) は次式で表せる。

$$\mathbf{J}_S = \exp(-i\Phi) \begin{bmatrix} \cos \frac{4\pi}{9} & \sin \frac{4\pi}{9} \\ -\sin \frac{4\pi}{9} & \cos \frac{4\pi}{9} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \cos X - i \frac{\Gamma}{2} \frac{\sin X}{X} & -\frac{4\pi}{9} \frac{\sin X}{X} \\ \frac{4\pi}{9} \frac{\sin X}{X} & \cos X + i \frac{\Gamma}{2} \frac{\sin X}{X} \end{bmatrix} \quad (1)$$

ここで、

$$\Gamma = \frac{2\pi d}{\lambda} (n_e - n_o), \quad (2)$$

$$\Phi = \frac{\pi d}{\lambda} (n_e + n_o), \quad (3)$$

$$X = \sqrt{\left(\frac{4\pi}{9}\right)^2 + \left(\frac{\Gamma}{2}\right)^2}, \quad (4)$$

である。また、 Γ は位相遅延を表し、添え字の S はシングルパス光路であることを示し、 $i = \sqrt{-1}$ である。(1) 式の第 1 番目のマトリクスは、ツイスト角 $80^\circ (= 4\pi/9)$ による座標回転を表している。

Fig. 6 に示したミラーにより反射される光線におい

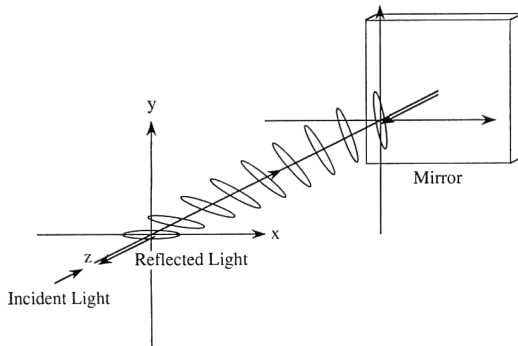


Fig. 6 The schematic of the 80° twisted nematic liquid-crystal material. The ray reflected by a mirror again passes through a TN liquid crystal.

て、入射面で x 軸から 80 度回転した方向に配向された液晶分子は、出射面で x 軸と平行になるようにツイストしている。このとき、ジョーンズマトリクスは、

$$\mathbf{J}'_S = \exp(-i\Phi) \begin{bmatrix} \cos X - i \frac{\Gamma}{2} \frac{\sin X}{X} & -\frac{4\pi}{9} \frac{\sin X}{X} \\ \frac{4\pi}{9} \frac{\sin X}{X} & \cos X + i \frac{\Gamma}{2} \frac{\sin X}{X} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \cos \frac{4\pi}{9} & -\sin \frac{4\pi}{9} \\ \sin \frac{4\pi}{9} & \cos \frac{4\pi}{9} \end{bmatrix}, \quad (5)$$

となる。光線が TN 液晶空間光変調器を往復するときのジョーンズマトリクスは、(1)、(5) 式の積により計算され、

$$\mathbf{J}_D = \mathbf{J}'_S \mathbf{J}_S = \exp(-2i\Phi) \times \begin{bmatrix} \cos 2X - i \frac{\Gamma}{2} \frac{\sin 2X}{X} & -\frac{4\pi}{9} \frac{\sin 2X}{X} \\ \frac{4\pi}{9} \frac{\sin 2X}{X} & \cos 2X + i \frac{\Gamma}{2} \frac{\sin 2X}{X} \end{bmatrix}, \quad (6)$$

となる。添え字の D はダブルパス光路であることを示す。

TN 液晶空間光変調器に電圧を印加することにより液晶分子は電界方向にチルトする。このとき、チルト角 θ における異常光線の屈折率を $n_e(\theta)$ とする。したがって、電界が印加されたことによるジョーンズマトリクスの Γ と Φ は、 n_e を $n_e(\theta)$ に置き換えることにより、

$$\Gamma = \frac{2\pi d}{\lambda} [n_e(\theta) - n_o], \quad (7)$$

$$\Phi = \frac{\pi d}{\lambda} [n_e(\theta) + n_o] = \Phi_0 + \frac{\Gamma}{2}, \quad (8)$$

となる。ここで、 $\Phi_0 = (2\pi/\lambda)n_o d$ は印加電圧によらない定数で、今後の解析において除外する。よって、ジョーンズマトリクスは、(1)、(6) 式から Γ のみの関数となる。 Γ の最大値は、電界が印加されていないときで (7) 式から

$$\Gamma_{\max} = \frac{2\pi d}{\lambda} (n_e - n_o), \quad (9)$$

となる。 Γ は、電圧を印加することにより減少しゼロに近づく。

ジョーンズマトリクスの (1)、(6) 式を使用して、TN 液晶空間光変調器の透過光の強度変化量と位相変化量の Γ の依存性がそれぞれ計算される。入射光は入射側の液晶分子のディレクタ (x 軸) に平行で、検光子は出射側の液晶分子のディレクタに平行の場合を考える。シングルパス光路とダブルパス光路における TN 液晶空間光変調器の透過光の複素振幅は (1)、(6) 式からそ

それぞれ次のようになる.

$$\mathbf{E}_S = \mathbf{J}_S \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$= \exp\left(-i\frac{\Gamma}{2}\right) \begin{bmatrix} \cos\frac{4\pi}{9} & \sin\frac{4\pi}{9} \\ -\sin\frac{4\pi}{9} & \cos\frac{4\pi}{9} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos X - i\frac{\Gamma}{2} \frac{\sin X}{X} \\ \frac{4\pi}{9} \frac{\sin X}{X} \end{bmatrix}, \quad (10)$$

$$\mathbf{E}_D = \mathbf{J}_D \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} = \exp(-i\Gamma) \begin{bmatrix} \cos 2X - i\frac{\Gamma}{2} \frac{\sin 2X}{X} \\ \frac{4\pi}{9} \frac{\sin 2X}{X} \end{bmatrix}. \quad (11)$$

ここで, $\begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix}$ は入射単位電界である. それぞれの光路における出射光の複素振幅は, (10), (11)式から

$$\begin{aligned} E_{S,P} &= \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos\frac{4\pi}{9} & \sin\frac{4\pi}{9} \\ -\sin\frac{4\pi}{9} & \cos\frac{4\pi}{9} \end{bmatrix} \mathbf{E}_S \\ &= \left(\cos X - i\frac{\Gamma}{2} \frac{\sin X}{X}\right) \exp\left(-i\frac{\Gamma}{2}\right), \quad (12) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} E_{D,P} &= \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \mathbf{E}_D \\ &= \left(\cos 2X - i\frac{\Gamma}{2} \frac{\sin 2X}{X}\right) \exp(-i\Gamma), \quad (13) \end{aligned}$$

となる. ここで, P は偏光方向が出射側の液晶分子のディレクタに平行であることを示している. (12), (13)式に示された複素振幅から強度透過率 T , および, 位相変調量 δ はそれぞれつぎのように計算される.

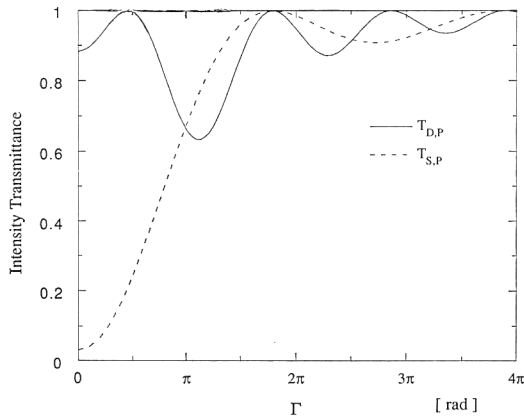


Fig. 7 Dependence of the intensity modulation characteristics on the phase retardation Γ , calculated from Jones matrix. The solid line corresponds to the case of a double-path beam, and the dashed line corresponds to a single-path beam.

$$T_{S,P} = 1 - \left(\frac{4\pi}{9} \frac{\sin X}{X}\right)^2, \quad (14)$$

$$\delta_{S,P} = \frac{\Gamma}{2} + \tan^{-1}\left(\frac{\Gamma}{2} \frac{\tan X}{X}\right), \quad (15)$$

$$T_{D,P} = 1 - \left(\frac{4\pi}{9} \frac{\sin 2X}{X}\right)^2, \quad (16)$$

$$\delta_{D,P} = \Gamma + \tan^{-1}\left(\frac{\Gamma}{2} \frac{\tan 2X}{X}\right). \quad (17)$$

(14), (16)式から計算される位相遅延 Γ の変化に対する強度変調量は **Fig. 7** に示す. これらの $T_{S,P}$, $T_{D,P}$ は, それぞれ, Fig. 4 の ×印, ○印で示した強度透過率の測定値に対応している. (15), (17)式から計算される Γ の変化に対する位相変調量は **Fig. 8** に示される. 本報告のダブルパス光路を用いた位相変化の実験結果をシ

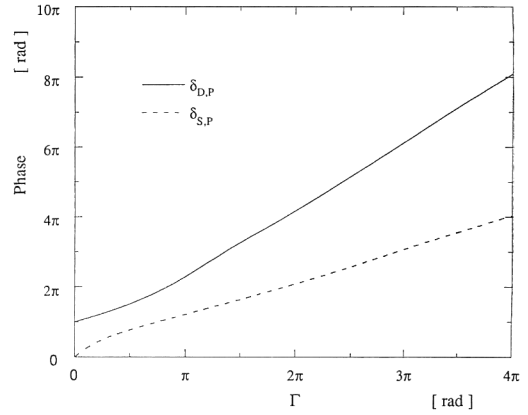


Fig. 8 Dependence of the phase modulation characteristics on the phase retardation Γ , calculated from Jones matrix. The same drawing as Fig. 7.

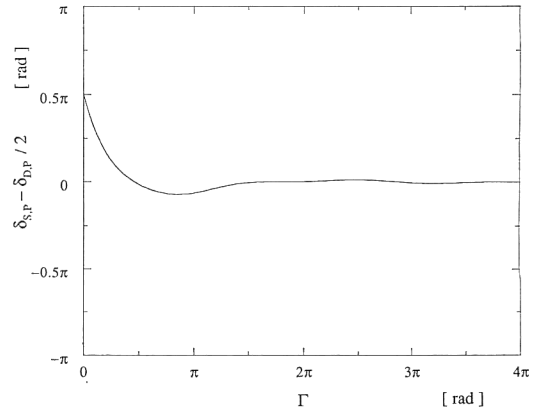


Fig. 9 The difference of the phase modulation between $\delta_{S,P}$ and $\delta_{D,P}/2$ as a function of the phase retardation Γ of a TNLC-SLM, calculated from Jones matrix.

ングルパス光路で使用する光情報処理系の入力装置に用いることを考慮する. そのため, Γ の変化に対するダブルパス光路とシングルパス光路の位相変化量を比較し, (15), (17)式を用いて $\delta_{s,p} - \delta_{d,r}/2$ が計算され, 結果は Fig. 9 に示される. Fig. 9 の結果から, ダブルパス光路の位相変化量の 1/2 とシングルパス光路の位相変化量との差は, Γ の値すなわち印加電圧により変化する. この差の最大値は, Γ がゼロに近づくときゼロの近傍で $\lambda/4$ である. Γ がゼロに等しいときは, (15), (17)式からこの差はゼロになる.

4. 考察とまとめ

TN 液晶空間光変調器の印加電圧に対する位相変調特性が, ダブルパス干渉光学系であるトワイマン・グリーン干渉計を用いて測定された. Fig. 2 に示したようにダブルパス干渉光学系では, 光学的閾値より高い電圧においても, TN 液晶空間光変調器の強度透過率の変化による干渉縞コントラストの低下が少ない. よって, 広い範囲の印加電圧に対する位相変調量が測定でき, 実験結果は Fig. 3, Fig. 5 に表されている. Fig. 4 の強度透過率の測定結果から, 1V から 4V の電圧範囲においてダブルパス光路における最小の強度透過率は 61.2% であり, 結果として, Fig. 2 に示したように干渉縞のコントラストの低下が少ないことを現している. シングルパス光路においては, 最小の強度透過率は 6.3% であり, シングルパス干渉計を用いる位相変調量の測定はこの強度透過率の変化により干渉縞のコントラストが低下し困難になる.

ジョーンズの計算法を用いて 80 度ツイストの TN 液晶空間光変調器の位相変化と強度透過率変化が計算された. 位相変化の計算結果は, ダブルパス光路の位相変化量が正確にシングルパス光路の位相変化量の 2 倍に等しくなることを表している. ダブルパス光路の位相変化量の 1/2 とシングルパス光路の位相変化量との差は, 位相遅延 Γ すなわち印加電圧の値より変化する. 最大の差は, Γ がゼロに近づくときゼロの近傍で $\lambda/4$ である. 位相遅延 Γ と印加電圧の関係は, Fig. 4 の実験結果と Fig. 7 の数値計算の結果から印加電圧 1V から光学的閾値電圧 2.3V の範囲で Γ の 3.9π から 1.7π rad となる. Fig. 5 に示すように, この閾値電圧以下の動作における位相変調範囲は 0 から 2π rad である. Fig. 9 で示した差 ($\delta_{s,p} - \delta_{d,r}/2$) の最大値は位相遅延 Γ の

1.7π rad 以下で生じている. このため, 光学的閾値電圧より低い電圧, すなわち, Γ が 1.7π rad より大きい範囲で使用することを考慮すると, この差の最大値の影響は無視できる. したがって, この場合は, ダブルパス干渉光学系により測定した位相変化量の 1/2 をシングルパス光路の位相変化量と見做しても許容できる.

ジョーンズの計算法による強度透過率変化の計算結果である Fig. 7 と実験結果を表す Fig. 4 とは, よく一致した傾向を示している.

本報告の TN 液晶空間光変調器を 2π rad まで動作する位相変調器として使用する際, 最も強度変化が少ない光学配置はダブルパス光路である. その理由は, Fig. 6 に示すように光線の往復により位相変調を 2 倍感受するので動作電圧範囲が少ないことに起因する. この場合, 最小の強度透過率は, Fig. 4 の実験結果から 86.7% である. さらに, 強度変化のない位相変調器として使用する場合には, ホモジニアス配向液晶パネルを用いる必要がある^{7,9)}.

最後に, 本研究を行う上でご援助いただいたチノン(株)研究所の小林正夫氏に感謝いたします.

文 献

- 1) F. Mok, J. Diep, H.-K. Liu and D. Psaltis: "Real-time computer-generated hologram by means of liquid-crystal television spatial light modulator," *Opt. Lett.*, **11** (1986) 748-750.
- 2) T.H. Barnes, T. Eiju, K. Matsuda and N. Ooyama: "Phase-only modulation using a twisted nematic liquid crystal television," *Appl. Opt.*, **28** (1989) 4845-4852.
- 3) J. Amako and T. Sonehara: "Kinoform using an electrically controlled birefringent liquid-crystal spatial light modulator," *Appl. Opt.*, **30** (1991) 4622.
- 4) D. Casasent and S.-F. Xia: "Phase correction of light modulators," *Opt. Lett.*, **11** (1986) 398-400.
- 5) N. Konforti and E. Marom: "Phase-only modulation with twisted nematic liquid-crystal spatial light modulators," *Opt. Lett.*, **13** (1988) 251.
- 6) K. Lu and B.E.A. Saleh: "Theory and design of the liquid crystal TV as an optical spatial phase modulator," *Opt. Eng.*, **29** (1990) 240-246.
- 7) 阿須間宏明, 慮 学農, 本田捷夫, 大山永昭: "液晶パネルの位相変調特性," *光学*, **20** (1991) 98-102.
- 8) A. Yariv and P. Yeh: *Optical Waves in Crystals* (A Wiley-Interscience Publication, New York, 1983) chapter 5.
- 9) 高木康博, 西川真悟, 大頭 仁: "液晶を用いた光の振幅と位相の同時変調," 第 38 回応用物理学会予稿集 (1991) 29 p-A-3.