

高分子分散液晶ライトバルブとシュリーレン光学系を用いた投射型 3-D ディスプレイ：システム提案と基礎実験

滝沢 國治*

Stereoscopic Projection Display Using Polymer-Dispersed Liquid-Crystal Light Valves and a Schlieren Optical System: System Proposal and Basic Experiments

Kuniharu TAKIZAWA*

ABSTRACT : A stereoscopic projection display used with polarized eyeglasses is proposed. It consists of polymer-dispersed liquid-crystal light valves that modulate projection light based on the light scattering phenomenon, a polarization beam splitter, and a Schlieren projection optics. This display's features include a three-dimensional image display with a single projection system, half size and half power consumption compared with a conventional stereoscope projector with polarized eyeglasses. Measured electro-optic characteristics of a polymer-dispersed liquid-crystal cell inserted between crossed polarizers suggests that the proposed display achieves small cross talk and high-extinction ratio.

Keywords : three-dimensional image display, spatial light modulator, projector, polymer-dispersed liquid crystal, cross talk, extinction ratio

(Received March 22, 2006)

1. まえがき

偏光眼鏡付き投射型立体(3-D)ディスプレイは、両眼視差のみを利用しているため、①「箱庭効果」、②「書割効果」などの現実と異なる立体感を感じる、③疲労しやすい、など大きな問題を抱えているが、高精細なフルカラー3-D画像を多数の観賞者に提供できる唯一の手段である^{1)~3)}。このため、万博やアミューズメントスクエアなど様々なイベント会場において公開されている。しかし、図1に示すように2つの投射システムを用いて、1つの3-D画像を表示するためには、2次元画像を表示する投射型ディスプレイに比べて2倍のサイズと電力を必要とする。また、このシステムは、

- ①偏光素子で50%以上の光が失われる
- ②スクリーンの中心を除くとスクリーン面と2つの投射光学系の焦点面が一致しない
- ③台形歪が発生する
- ④投射画像の倍率に応じて2つの投射光の交差角度を変更しなければならない

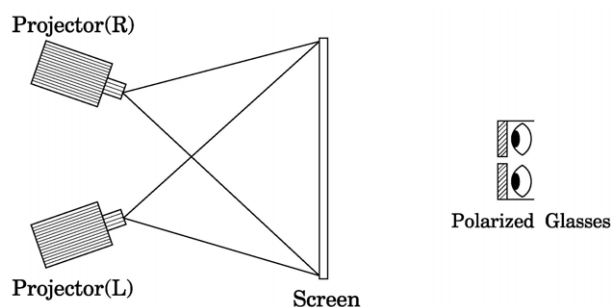


図1 Basic structure of a conventional 3-D projection-type display with polarized eyeglasses.

など3-D画像表示独特の種々の問題も有している⁴⁾。これらの課題を解決するため、筆者は、R,G,B 3原色のp波光とs波光の位相差(リタデーション)を制御する空間光変調素子、投射光をs波光とp波光に分離する偏光ビームスプリッタ(PBS)および1つの投射光学系を用いた新しい偏光眼鏡付き投射型3-Dディスプレイを提案した⁴⁾。

この3-Dディスプレイは、

- (1) 1つの投射光学系を用いて時分割せずに3-D画像を表示できる
- (2) ディスプレイとスクリーンの関係を自由に設定で

* 物質生命理工学科教授
Professor, Department of Materials and Life Science
(takizawa@st.seikei.ac.jp)

きる（表示画像を自由に拡大縮小できる）

(3) 光損失が非常に少ない

など、2つの投射光学系を用いる従来の投射型3-Dディスプレイにない優れた特徴を有している。しかし、このシステムは、投射光のリタデーションを制御するため、

- ① 可視光全域に渡り、高い偏光分離特性を有する PBS を必要とする
- ② 上記の特性をもつ PBS の作製は困難
- ③ PBS の偏光分離特性が劣化すると、3-D 画像のクロストークが大幅に増大する
- ④ 暗い 3-D 画像では、明るい画像よりクロストークが目立つ
- ⑤ 空間光変調素子の消光比が劣化すると 3-D 画像の消光比が大幅に劣化する

などの課題を抱えていた。

この論文では、リタデーション変調方式特有のこれらの課題を解決するために、高分子分散液晶ライトバルブ（PDLCLV）を用いた新しい偏光眼鏡付き投射型3-Dディスプレイを提案する。第2章および第3章では、この投射型ディスプレイの基本構成である単色投射型3-Dディスプレイの動作原理を述べるとともに、フルカラー投射型3-Dディスプレイの構成を明らかにする。これらのシステムには、1/4波長板、PDLC層、誘電体ミラー、光吸収層、フォトコンダクターおよび透明電極からなる光アドレス型PDLCLVが用いられる。新しい投射型3-Dディスプレイには、液晶と高分子からなる高分子分散液晶（PDLC）がキーマテリアルとなる⁵⁾⁻¹⁴⁾。そこで、第4章では、PDLCの構造と動作原理を述べるとともに、大きな複屈折率をもつシアノビフェニール系ネマティック液晶と液晶の常光線屈折率に近い屈折率をもつ紫外線硬化剤からなるPDLCセルの光変調特性を、シュリーレン光学系で測定した実験結果を示す。この実験結果からPDLCセルで変調された出力光は、入射光と同じ偏光状態をほぼ完全に保存することが明らかになる。さらに、PDLCを薄膜トランジスタ（TFT）で駆動する電気アドレス型PDLCLVを第5章で提案する。第6章では、PDLCの散乱/透過機能を利用して3-D画像を表示するときに重要になる、PBSおよびPDLCLVにおける反射光の低減方法について議論する。第7章は結論である。

2. 単色投射型3-Dディスプレイの構成と動作原理

PDLCLVを用いた単色投射型3-Dディスプレイの基本構成を図2に示す。このシステムは、光源からの無偏波単色の投射光をs波長とp波長に分離するPBS、s波長とp波

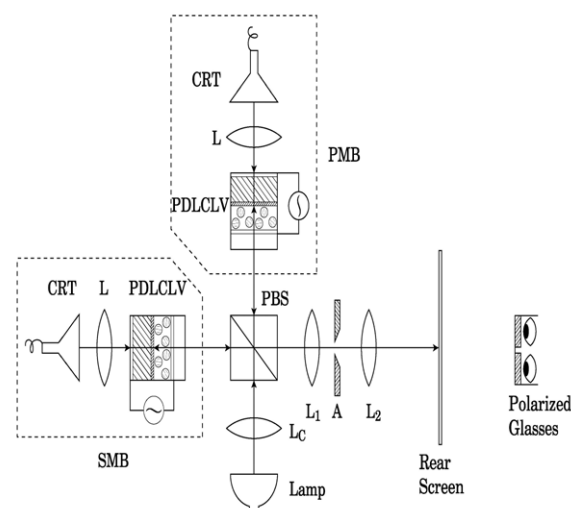


図2 Schematic diagram of a monochrome 3-D projection system. PBS, polarization beam splitter; L, image lens; L₁, L₂, projection lens; L_c, condenser lens; A, aperture; PDLCLV, polymer-dispersed liquid crystal light valve; CRT, Brown tube; SMB, light modulation block for converting s-wave light to p-wave light; PMB, light modulation block for converting p-wave light to s-wave light.

光を変調するブロック SMB、PMB および散乱角の小さな波光およびp波長をスクリーンに投射するシュリーレン光学系から構成されている。SMBおよびPMBは、左眼用映像（あるいは右眼用映像）を形成するCRTおよびCRTの暗い光信号で光源の明るい光を変調する光アドレス型PDLCLVなどからなる。

光アドレス型PDLCLVは、図3に示すように、反射防止膜ARF、1/4波長板QP、PDLC層、誘電体ミラーM、光吸収層AB、フォトコンダクターPC、透明電極ITOおよび基板ガラスGで構成される。従来のPDLCLV¹⁵⁾⁻¹⁸⁾との違いは、投射光側のガラス基板の代わりに、1/4波長板を用いることである。1/4波長板の役目は、直線偏光した入射光を円偏光に変換するとともに、誘電体ミラーで反射した円偏光を入射光と直交する直線偏光に変換することである。勿論、PDLC層を支える基板の役割も果たしている。フォトコンダクターは、液晶ディスプレイの薄膜トランジスタ（TFT）と同じく、PDLCに印加される電圧を制御する。その動作を簡単に述べる。光が当たらない暗状態ではフォトコンダクターの抵抗は非常に高いが、光を吸収するとキャリアが発生して、その抵抗値が低下する。これによってPDLC層に印加される電圧が増加する。フォトコンダクターはピクセル構造を持たないが、光照射によって形成されたキャリア画像の空間分解能は非常に高い。例えば、フォトコンダクターとしてBi₁₂SiO₂₀単結晶やアモルファスシリコンを用いたPDLCLVは、34~50 lp/mmの限界解像度をもつ¹⁵⁾⁻¹⁸⁾。このデバイスは、簡単な構造で大画面の高精細画像を表示することが出来るため、ディスプレイ

の基本的特性を評価するには都合がよい。特に 3-D ディスプレイは 3-D 画像の見易さや疲労などと観測者の生理的要因や心理的要因が複雑に絡み合っているため、表示画像を評価しながら、最適な 3-D ディスプレイを開発することが必要である。光アドレス型 PDLCLV は、画素構造をもたないため、解像度、画面サイズ、画像の縦横比などを自由に変えることができ、3-D ディスプレイの開発には好適なデバイスである。

PDLCLV の変調特性を決定する PDLC はサイズ $2 \sim 3 \mu\text{m}$ の粒状のネマティック液晶が高分子に取り囲まれた構造を持つ。液晶の常光線屈折率を n_o 、異常光線屈折率を n_e 、高分子の屈折率を n_p とすると、これらの屈折率の間には、次の関係が成立する^{15), 16)}。

$$\begin{aligned} n_o &\sim n_p \\ n_o &< n_e \end{aligned} \quad (1)$$

均一性の優れた画像を表示するためには、液晶粒のサイズが揃い、かつ、PDLC 層厚が均一であることが必要である。この投射型 3-D ディスプレイの動作は、以下の通りである。PBS で分離された p 波光および s 波光は、それぞれ $1/4$ 波長板を経て円偏波光に変換され、PDLC 層に入る。CRT の光画像がフォトコンダクターに書き込まれない場合、PDLCLV に印加される電圧の大半はフォトコンダクターに加えられ、PDLC 層に加えられる電圧は小さい。したがって、粒状の液晶は初期配向状態を保ち、その配向ベクトルは粒ごとに異なる方向を向く。このとき液晶粒の屈折率は n_o と n_e の中間の値となり、高分子の屈折率 n_p と大きく異なる。したがって、PDLC 層に入射した光は、液晶とポリマーの界面や液晶粒内で屈折および反射し、これを繰り返すことにより、散乱する。この散乱光は誘電体ミラーで反射し、PBS と投射レンズ L_1, L_2 を通過してスクリーンに向うが、殆どの散乱光はアパーチャ A で遮断される。従って、スクリーンは暗状態となる。

次に、フォトコンダクターに十分明るい書き込み光が入射すると、フォトコンダクターの比抵抗が大幅に減少して PDLC 層に十分な電圧が印加されるため、液晶分子は印加電界方向に配列する。このとき、PDLC 層に垂直に入射した投射光は、式(1)より、液晶とポリマーの屈折率差を感じないため、散乱せずに直進する。この非散乱光は、 $1/4$ 波長板を 2 度通過するため、入力光と直交した直線偏波光に変換され、PBS、投射レンズおよびアパーチャを通過してスクリーンに向かう。これは明状態であり、スクリーン照度は最大になる。

CRT の書き込み光が中間レベルの場合、散乱光の一部が

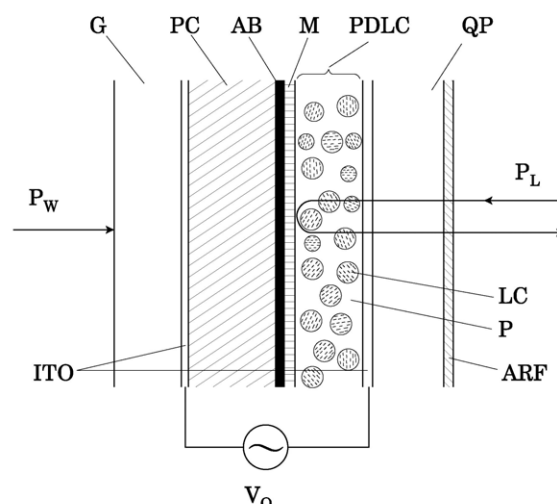


図 3 Schematic diagram of the PDLCLV. QP, quarter-wave plate; ARF, antireflection film; PDLC, polymer-dispersed liquid crystal; LC, liquid crystal droplet; P, polymer; M, dielectric mirror; AB, light absorption layer; PC, photoconductor; G, glass substrate; ITO, transparent electrode film; V_0 , applied voltage; P_w , writing light; P_L , projection light.

アパーチャを通過してスクリーンに到達する。このとき、散乱光がもとの偏光状態を維持していないと、クロストークが生じる。クロストークとは、右眼（あるいは左眼）に入るべき光が左眼（あるいは右眼）に入る現象であり、これが大きいと 3-D 画像の品質は大きく劣化する。PDLCLV は PDLC の散乱特性を利用して変調するため、変調された光はもとの偏光状態を保つのが困難であり、クロストークが大きいと思いがちだが、実はそうではない。第 4 章の実験結果が示すように、PDLC で変調され、アパーチャを透過した散乱光はもとの偏光状態をほぼ完全に保っている。

3. フルカラー投射型 3-D ディスプレイの構成

フルカラー投射型 3-D ディスプレイの基本構成を図 4 に示す。この 3-D ディスプレイは、6 個の p 波および s 波光用変調ブロック [PMB_R, PMB_G, PMB_B (以後 $PMB_{R,G,B}$ と略す) SMB_R, SMB_G, SMB_B ($SMB_{R,G,B}$ と略す)], PBS, ダイクロイックミラー DM, アパーチャ A を含むシュリーレン光学系および光源で構成される。6 個の光変調ブロックは、図 2 の単色 3-D システムのブロックと同じ構成である。ただし、誘電体ミラーおよび反射防止膜 ARF の波長特性は R, G, B 3 原色光に一致していなければならない。

Xe ランプやメタルハライドランプなどの光源から出た無偏波白色の投射光は、PBS により p 波光と s 波光に分離される。これらの光はダイクロイックミラー DM で 3 原色光に分解された後、 $PMB_{R,G,B}$ および $SMB_{R,G,B}$ に分配される。 $PMB_{R,G,B}$ および $SMB_{R,G,B}$ に入射した p 波光および s 波光は、

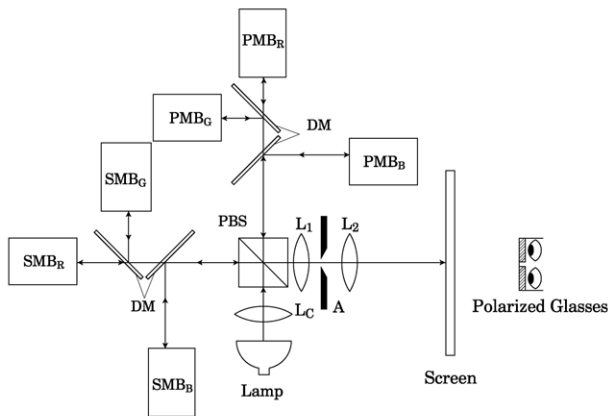


図 4 Schematic diagram of the full color 3-D projection-type display. SMB_{R,G,B}, light modulation blocks for converting 3 primary-color s-wave lights to p-wave lights; PMB_{R,G,B}, light modulation blocks for converting 3 primary-color p-wave lights to s-wave lights; DM, dielectric mirror.

左眼用および右目用映像信号で駆動される PDLCLV で変調される。

PDLCLV に加える映像信号のレベルを変えれば、散乱光強度が連続的に変化するため、フルカラー画像の表示も容易である。さらにこのシステムは、1 つの投射光学系で 3-D 画像を表示することができるなど、従来の投射型 3-D ディスプレイ⁴⁾と同様に第 1 章の(1)～(3)の特長を有し、かつ、その課題①～⑤を克服できる可能性をもつ。

4. PDLCLV の構造と光変調実験

偏光眼鏡式の投射型 3-D ディスプレイに PDLCLV を用いるためには、PDLCLV の出射光が入射光と同じ偏光状態を保つことが必要である。しかし、現実の PDLCLV では、オン状態でも液晶粒子とそれを囲むポリマーの間で完全に屈折率の整合が取れているわけではない。もしもこの屈折率不整合による散乱で偏光が変化すれば、それはクロストークとなり画質の劣化を招く。そこで、図 5 に示すように、PDLCLV セル、偏光板 P₁ および検光板 P₂ を含むシュリーレン光学系に直線偏光を入射して、PDLCLV の散乱特性と偏光状態との関係性を評価した。シュリーレン光学系の開口角 δ は、アパーチャ A₂ の開口部の半径を D_A 、第 2 レンズ L₂ の焦点距離を f_l とすると $\tan^{-1}(D_A/f_l)$ で与えられる。ここでは、光学系の開口角 δ を 5 度に設定した。この値は、 $\delta \geq 5^\circ$ ではアパーチャを透過する光量は δ にほとんど依存せずに飽和するという、これまでの実験結果に基づいている^{17), 18)}。図の IR と UV は、赤外線と紫外線を遮断するフィルタであり、BPF は特定の可視光を通すバンドパスフィルタである。

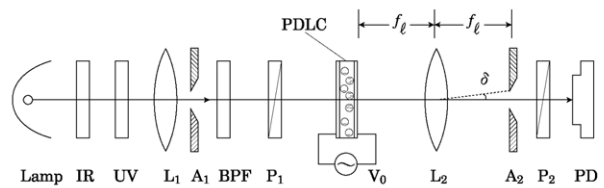


図 5 Schlieren optical system for measurement of electro-optic characteristics of the PDLCLV cell. IR, infrared light cut filter; UV, ultraviolet light cut filter; BPF, bandpass filter; P₁, polarizer; P₂, analyzer; L₁, L₂, lens; A₁, A₂, aperture; PD, photo detector; f_l , focal length of the lens L₂; δ , opening half-angle of the aperture A₂.

表 1 ネマティック液晶 BL-008 と 紫外線硬化性樹脂 NOA-65 の諸元

	Materials	
	BL-008	NOA-65
Refractive index at 589 nm	$n_o=1.527$	$n_o=1.524$
	$n_e=1.807$	
Dielectric constant	$\epsilon_{\perp}=6.1$	
	$\epsilon_{\parallel}=23.4$	4.1
Clearing point (°C)	97	—
Viscosity (cp)	79	1000—1200

実験に用いた PDLCLV は、シアノビフェニールネマティック液晶 (BL-008 Merck Co.) と紫外線硬化剤 (NOA-65 Norland 社製) からなる。これらの材料の物理的性質を表 1 に示す。液晶と硬化剤を 1 : 1 の重量比に混合し、さらに直径 10 μm のプラスチックスペーサを加えて、60° の温度で 3 時間攪拌した。この溶液を透明電極の付いたガラス基板 (30 x 40 mm² 厚さ 1.1 mm) にスピコートし、その上に透明電極の付いた別のガラス基板を載せ、1 kg/cm² の圧力を加えて、10 μm のセルギャップを形成した。最後に、波長 365 nm、強度 35 mW/cm² の空間的に均一な紫外線を 3 分間照射し、厚さ 10 μm の PDLCLV を有する液晶セルを作った。ITO 透明電極には錫を 5% ドープした In₂O₃ 膜 (厚さ 100 nm) を用いた。

図 6 の (a), (b), (c) は、青色光 (波長: 420~490 nm) 緑色光 (520~570 nm) および赤色光 (600~680 nm) , の 3 原色光の p 波成分を PDLCLV に入射したときの、PDLCLV の透過率 T_p (実線: 偏光板 P₁ と検光板 P₂ の偏光方向が一致する平行ニコル状態でアパーチャ A₂ を透過した p 波成分の強度と PDLCLV に入射した p 波成分の強度との比) と印加電圧 V_0 (実効値) との関係である。 N_s (ドット) は PDLCLV で p 波成分から s 波成分に変換された割合である。 N_s を求めるため、偏光板 P₁ と検光板 P₂ が直交したクロスニコル状態で、

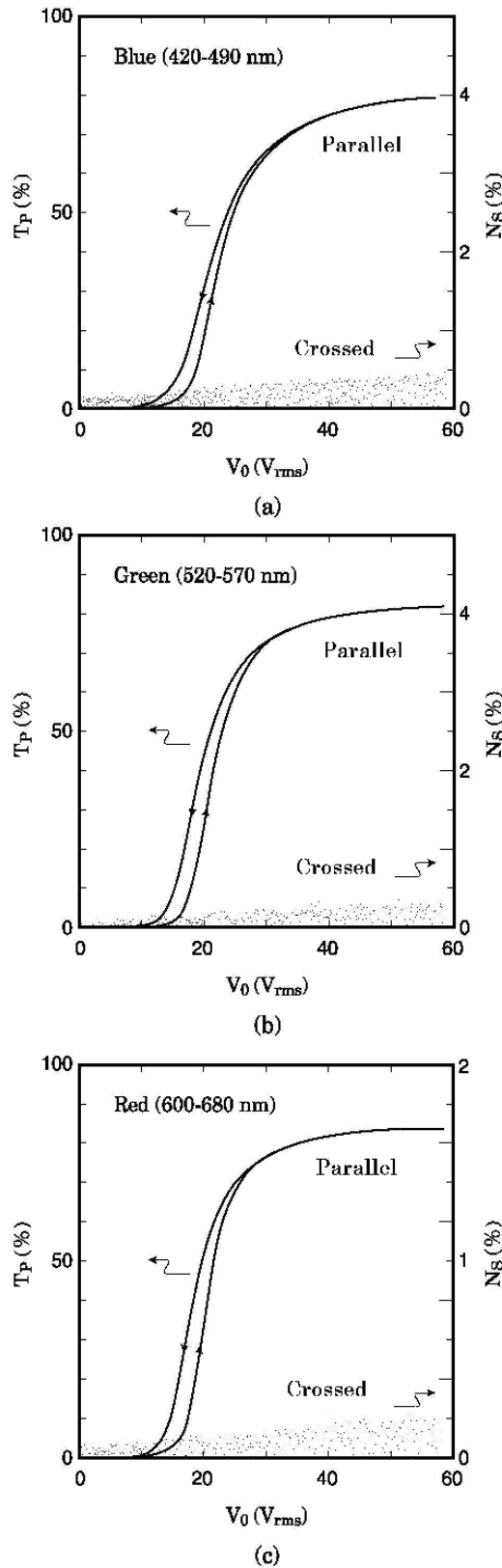


図6 Dependence of the transmittance T_p and N_s of the 10- μ m thick PDLC cell set between two polarizers on the applied voltage V_0 . T_p and N_s are the transmittance of p-wave light and s-wave light, respectively. (a) blue primary color light of wavelength 420-490 nm, (b) green primary color light of wavelength 520-570 nm, (c) red primary color light of wavelength 600-680 nm.

表2 PDLC セルの N_s/T_p と V_0 の関係

Drive voltage $V_0 (V_{rms})$	N_s/T_p		
	Blue	Green	Red
15	8.5×10^{-2}	3.4×10^{-2}	2.5×10^{-2}
17	4.1×10^{-2}	1.6×10^{-2}	7.1×10^{-3}
20	8.6×10^{-3}	2.0×10^{-3}	1.0×10^{-3}
25	3.1×10^{-3}	7.6×10^{-4}	8.1×10^{-4}
30	2.7×10^{-3}	1.0×10^{-3}	7.0×10^{-4}

アパーチャ A_2 を透過した s 波長の強度と PDLC に入射した p 波長の強度との比を測定した。3 原色光の s 波長成分を PDLC に入射した場合も、図 6(a)～(c) と同様の結果が得られた。

図 6 の立ち上がり曲線のデータから、PDLC で生じるクロストーク N_s/T_p と印加電圧 V_0 との関係を計算した。変調に適した印加電圧範囲 (15 V～30 V) における幾つかの N_s/T_p 値を表 2 に示す。この表は、ワーストケース ($V_0=15$ V で駆動された PDLC セルに青色光を入射した場合) でも、 N_s/T_p 値は 9% 以下であることを示している。この 3-D ディスプレイでは、光は PDLC 層を 2 回通るため、表 2 のワーストケースでも PDLC の散乱によって生じる 3-D システムのクロストークは 0.1% 以下になる。

これらの実験結果から次のことが明らかになる。

- (1) PDLC で変調されても、 $\delta=5^\circ$ のアパーチャを通過する殆どの光 (99.9% 以上) は、入射光と同じ偏光状態を保つ。
- (2) PDLC に印加する電圧が大きいくほど、また入射光の波長が長いほど、入射光の偏光状態はよく保存される。
- (3) 光が PDLC 層を往復する PDLCV の場合、ワーストケースでも $(N_s/T_p)^2 < 0.008$ となるから、散乱光を無視することができる。
- (4) PDLC がオン状態のとき、殆どの入力光がアパーチャを通過する。

(1)～(3) 項は、PDLC が投射型 3-D ディスプレイに十分応用できることを示唆している。(4) 項は 2 個の偏光板の間に液晶セルを挿入する従来の液晶光変調器に比べて、表示画像の輝度を 2 倍以上明るくできることを意味している。したがって、PDLC を用いた図 4 のシステムは、1 個の光源を用いて、2 個の光源を用いた図 1 のシステムと同等の明るさを確保できるという特徴をもつ。

5. 電気アドレス型 PDLCV

光アドレス型 PDLCV は、第 2 章に述べたように、投射型

3-D ディスプレイの開発に適した性質を有している。しかし、図2に示すようにCRTなどのディスプレイと組み合わせなければならないため、どうしてもシステムが大型になってしまう。この欠点を克服しコンパクトな投射型3-Dディスプレイを構築するためには、図7に示すように、フォトコンダクターの代わりに薄膜トランジスタ(TFT)アレーを用いて、映像信号でPDLCを直接駆動することが必要である。TFTを通してPDLCに信号電圧を直接印加するため、ここでは電気アドレス型PDLCVと呼ぶことにする。このデバイス自体が第2章に述べた光変調ブロックSMB(あるいはPMB)に相当する。ソース電極から供給される3-D映像信号とアドレス電極から供給されるゲート信号が同時にTFTに加えられると、ドレイン電極にキャリアが供給され、PDLCに電界が印加される。1つのドレイン電極は隣接するTFTの近傍まで傘のように広がり、その平坦部分が1画素を構成する。1/4波長板は、光アドレス型PDLCVと同様に、p波光をs波光に変換するあるいはその逆変換するために用いられる。電気アドレス型PDLCVを用いると、3-Dプロジェクターは非常にコンパクトになるが、このデバイスはまだ実現されていない。しかし、従来のPDLCVを3-D用デバイスに改良するプロセスには、技術的な困難さがないので、その製作は容易であろう。

6. 反射光を低減するための具体的方法

図2や図3に示す反射型ディスプレイでは、コントラストの高い画像を表示するためには、PBSやPDLCV表面での反射光を極力低減しなければならない。そのためには、PBSやPDLCVに様々な工夫を施さなければならない。まず、PBSやPDLCVの表面での反射光に注目しよう。これらの反射光は、1/4波長板を通過する前に生じるため、入射光と同じ偏光状態を保っている。したがってPBSが理想的ならば、反射光は元の路を逆進するため、スクリーンに到達することは無い。しかし、実際のPBSではp波光とs波光の分離が完全でないため、数%程度の光がスクリーンに向かう可能性がある。この雑音光を無視できるレベルまで軽減するには、PBSやPDLCVの表面に反射防止膜ARFを蒸着すればよい。文献15～18に記載されているように、PDLCVにARFをコーティングすることで、反射率を0.4～0.6%に低減し、スクリーンに向かう光を殆どゼロにすることは比較的容易である。最も注意すべきは、1/4波長板とPDLC層の間に挿入されるITO透明電極からの反射である。透明電極の屈折率(約1.9)は、PDLC層の屈折率(表1)や1/4波長板の屈折率(スタンダード材料である水晶では、常光線屈折率 $n_{qe}=1.5443$ 、異常

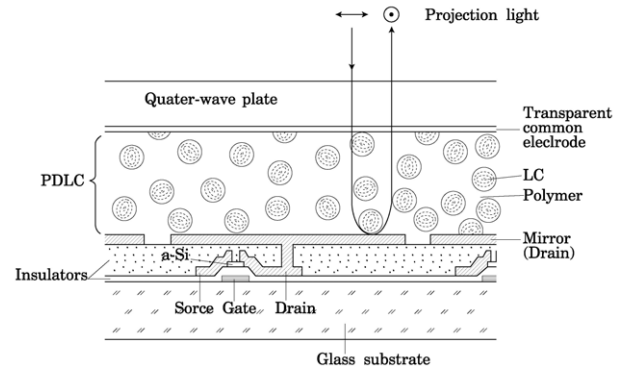


図7 Cross section schematic of the electrical addressing type PDLCV.

光線屈折率 $n_{qe}=1.5534$ 、波長 $\lambda=589.3\text{ nm}$ ¹⁹⁾よりも大きいため、最大で約1.4%の反射が生じる。この反射を低減する現実的な方策は、1/4波長板に透明電極に近い屈折率をもつ材料を用いることと、透明電極の厚さを最適化することである。人工サファイア(Al_2O_3)は、 $\lambda=589.3\text{ nm}$ のとき、 $n_{qe}=1.768$ 、異常光線屈折率 $n_{qe}=1.760$ であり、最大反射率は0.78%に軽減される¹⁹⁾。透明電極の厚さをコントロールすれば、この値をさらに低減することができる。その方法を以下に述べる。

図8は、サファイア製1/4波長板QPとPDLC層の間に挿入された透明電極膜ITOに垂直に入射した投射光が多重反射する様子を示している。PDLC層では光は散乱するため、PDLC層内部の多重反射は無視できる。サファイア板から透明電極に光が進むとき、透明電極からサファイア板に光が進むとき、および透明電極からPDLC層に光が進むときの界面の電界反射率と電界透過率をそれぞれ $r_1, t_1; r'_1, t'_1; r_2, t_2$ とすると、ITO電極膜で反射してサファイア板中へ反射する光の振幅 p_r は次の式で与えられる。

$$p_r = r_1 + t_1 t'_1 r_2 e^{i\phi} + t_1 t'_1 r'_1 r_2^2 e^{i2\phi} + t_1 t'_1 r_1^2 r_2^3 e^{i3\phi} + \dots = \frac{r_1 + r_2 e^{i\phi}}{1 + r_1 r_2 e^{i\phi}} \quad (2)$$

ただし、投射光の強度を1に規格化した。 ϕ は隣接する反射光の間の位相差で、透明電極膜の屈折率と厚さを n, d 、投射光の波長を λ とすると、次の式で与えられる。

$$\phi = \frac{4\pi n d}{\lambda} \quad (3)$$

ストークスの定理と式(2)を用いると、サファイア板に戻ってくる光のパワー反射率 P_r は以下の式で与えられる。

$$P = \frac{r_1^2 + r_2^2 + 2r_1r_2\cos\phi}{1 + (r_1r_2)^2 + 2r_1r_2\cos\phi} \quad (4)$$

r_1^2 および r_2^2 は、フレネルの公式より、下式で与えられる。

$$r_1^2 = \left(\frac{n_q - n_i}{n_q + n_i} \right)^2 \quad (5)$$

$$r_2^2 = \left(\frac{n_i - n_{eff}}{n_i + n_{eff}} \right)^2 \quad (6)$$

ここで、 n_q はサファイア板 QP の屈折率であり、常光線では n_{qo} 、異常光線では n_{qe} である。また、 n_{eff} は PDLC 層のオフ状態の実効的な屈折率である。ネマティック液晶と高分子の重量配合比を $\alpha : \beta$ とすると、Clausius-Mosotti の関係式より、 n_{eff} は次の式で与えられる²⁰⁾。

$$\frac{n_{eff}^2 - 1}{n_{eff}^2 + 2} \approx \alpha \frac{n_i^2 - 1}{n_i^2 + 2} + \beta \frac{n_p^2 - 1}{n_p^2 + 2} \quad (7)$$

ただし、 n_p は高分子の屈折率である。 n_ℓ はネマティック液晶の平均屈折率であり、Clausius-Mosotti の関係式を用いると、次の式で表される。

$$\frac{n_\ell^2 - 1}{n_\ell^2 + 2} \approx \frac{2}{3} \frac{n_o^2 - 1}{n_o^2 + 2} + \frac{1}{3} \frac{n_e^2 - 1}{n_e^2 + 2} \quad (8)$$

実験に用いた PDLC のネマティック液晶と紫外線硬化剤の配合比は $\alpha : \beta = 1 : 1$ であり、表 1 と式 (7), (8) より $n_{eff} = 1.591$ となる。この値と式 (4) ~ (6) を用いれば、ITO 膜のパワー反射率 P_r と厚さ d との関係を知ることが出来る。入射光の波長が 550 nm のときの P_r と d の関係を図 9 に示す。この図の実線と破線は、サファイア板の常光線屈折率 n_{qo} および異常光線屈折率 n_{qe} に対応するパワー反射率 P_r である。これより、ITO 膜の厚さ d を 140 ~ 170 nm にすれば、ITO 膜からの反射光は 0.1% 以下になる。

以上の議論より、PDLCLV の表面に反射防止膜を蒸着し、かつ、ITO 膜の厚さを最適化することにより、無用な反射光を無視できるレベルまで低減することが可能になる。

7. 結 論

高分子分散液晶ライトバルブ (PDLCLV) とシュリーレン

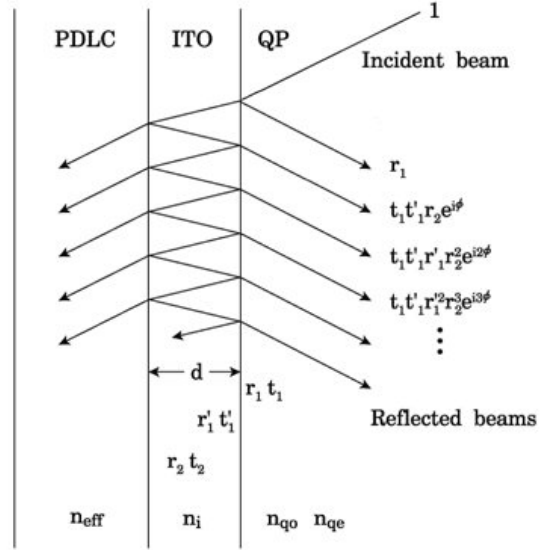


図 8 Multiple reflection of light in the multilayer structure consisting of a PDLC layer, an ITO film and a quarter-wave plate QP at normal incidence. The figure is drawn schematically in order to show each optical ray. n_{qo} , n_{qe} , ordinary and extraordinary indices of refraction of the quartz plate; n_i , refractive index of the ITO film; n_{eff} , effective index of refraction of the PDLC layer; d , thickness of the ITO film; r_1, t_1 , amplitude reflectance and transmittance at the interface in case of the beam propagation from QP to ITO; r_1', t_1' , amplitude reflectance and transmittance at the interface in case of the beam propagation from ITO to QP; r_2, t_2 , amplitude reflectance and transmittance at the interface in case of the beam propagation from QP to PDLC; ϕ , phase arising from an optical path length difference between adjacent rays.

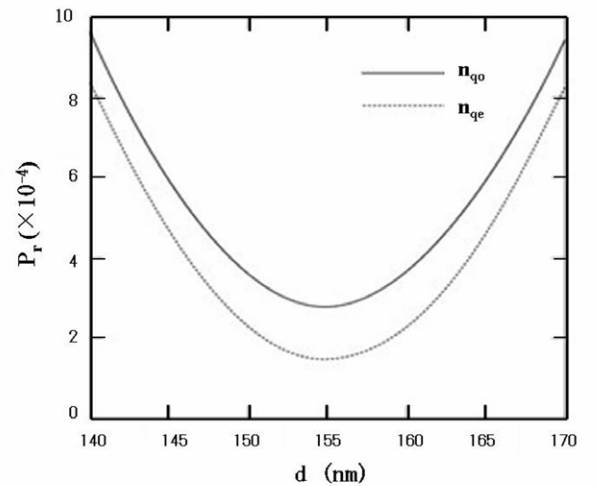


図 9 Dependence of the power reflectance of the multilayer structure shown in Fig.8 on the ITO film thickness d .

光学系からなる新しい投射型 3-D ディスプレイを提案した。始めに、2 つの PDLCLV とシュリーレン光学系からなる単色投射型 3-D ディスプレイと、6 個の PDLCLV と投射光学系からなるフルカラー投射型 3-D ディスプレイの構

造と動作原理を述べた。これらのシステムの性能を左右するのはPDLCである。そこで、筆者はシュリーレン光学系と偏光板を組み合わせた光変調システムを用いて、PDLCセルの光変調特性を測定した。その結果、PDLCの光散乱現象を利用した光変調では、

- ① 入射光と出射光の偏光状態は、ほぼ完全に一致する
 - ② 最大透過率は、2つの偏光板の間に液晶セルを挿入するこれまでの液晶変調器の2倍以上である
- などの優れた特性を有することが明らかになった。

次に、2種類の3-D映像用PDCLV-光アドレス型と電気アドレス型を提案し、投射型3-Dディスプレイの研究・開発には光アドレス型が、実用化には電気アドレス型が、それぞれ適していることを述べた。

この論文で提案した投射型3-Dシステムは、

- ① 1台のディスプレイで3-D映像を表示できる
- ② ズームレンズを用いることにより、2-D映像と同様に自由に画像を拡大・縮小できる
- ③ 光源の光をPBSでロスすることなく、すべて投射光に利用できる

など従来の投射型3-Dディスプレイにない特徴を備えているため、偏光眼鏡を用いた投射型3-Dディスプレイの実用性をさらに高めることが期待される。

参考文献

1. K. E. Jachimowicz and R. S. Gold, "Stereoscopic (3D) projection display using polarized color multiplexing," *Opt. Eng.* **29**, 838-842 (1990).
2. J.M.Haggerty, S. Reinsch, W. P. Bleha, and R.D. Sterling, "Stereoscopic large screen displays using liquid crystal light valve projectors," in *Large Screen and Projection Displays II*, W. P. Bleha, ed., *Proc. SPIE* **1255**, 114-122 (1990).
3. 磯野 春雄, 「立体 TV 動画像表示技術」 *光学* **26**, 300-307 (1997).
4. K. Takizawa, T. Fujii, T. Sunaga, and K. Kishi, "Three-dimensional large screen display with reflection-mode spatial light modulators and a single-projection optical system: analysis of a retardation-modulation method," *Appl. Opt.* **37**, 6182-6195 (1998).
5. J.L. Fergason, "Polymer encapsulated nematic liquid crystals for display and light control applications," *Society for Information Display International Symposium Dig.* **16**, Orlando, Florida, **16**, 68-70 (1985).
6. J.W. Doane, N.A. Vaz, B.-G. Wu, and S. Zumer, "Field controlled light scattering from nematic microdroplets," *Appl. Phys. Lett.* **48**, 269-271 (1986).
7. B.-G. Wu, J.L. West, and J.W. Doane, "Angular discrimination of light transmission through polymer-dispersed liquid-crystal films," *J. Appl. Phys.* **62**, 3295-3931 (1987).
8. A. Golemme, S. Zumer, J.W. Doane, and M.E. Neubert, "Deuterium NMR of polymer dispersed liquid crystals," *Phys. Rev.* **37**, 559-569 (1988).
9. P.S. Drazic, "Reorientation dynamics of polymer dispersed nematic liquid crystal films," *Liq. Crst.* **3**, 1543-1559 (1988).
10. T. Kajiyama, A. Miyamoto, H. Kikuchi, and Y. Morimura, "Aggregation states and electro-optical properties based on light scattering of polymer/(liquid crystal) composite films," *Chem. Lett.* **1989**, 813-816 (1989).
11. T. Fujisawa, H. Ogawa, and K. Maruyama, "Electro-optic properties and multiplexibility for polymer network liquid crystal display (PN-LCD)," in *Digest of the Ninth International Display Research Conference* (Institute of Television Engineers of Japan, Kyoto, Japan, 1989), 690-693.
12. A. Fuh and O. Caporaletti, "Polymer dispersed nematic liquid crystal films : the density ratio and polymer's curing rate effects," *J. Appl. Phys.* **66**, 5278-5284 (1989).
13. G.P. Montgomery, Jr., "Polymer-dispersed and encapsulated liquid crystal films," in *Large-Area Chromogenics : Materials and Devices for Transmittance Control*, C.G. Granqvist and C.M. Lampert, eds., **IS04**, SPIE Institute Series 577-606 (SPIE Press, Bellingham, Wash., 1990).
14. H. Fujikake, H. Kikuchi, T. Fujii, M. Kawakita, and K. Takizawa, "Uniform Microdroplet Formation of Polymer-Dispersed Liquid Crystal Using Undercoating Films," *Communications in Japan Pt.2*, **77**, 48-58 (1994).
15. K. Takizawa, H. Kikuchi, H. Fujikake, Y. Namikawa, and K. Tada, "Polymer-dispersed liquid crystal light valves for projection display," *Opt.*

- Eng. **32**, 1781-1790 (1993).
16. K. Takizawa, H. Kikuchi, H. Fujikake, Y. Namikawa, and K. Tada, "Reflection mode polymer-dispersed liquid crystal light valve," Jpn. J. Appl. Phys. **33**, 1346-1351 (1994).
 17. K. Takizawa, T. Fujii, H. Kikuchi, H. Fujikake, M. Kawakita, Y. Hirano, and F. Sato, "Spatial light modulators for high-brightness projection displays," Appl. Opt. **38**, 5646-5655 (1999).
 18. H. Kikuchi, T. Fujii, M. Kawakita, H. Fujikake, and K. Takizawa, "Design and fabrication of a projection display using optically addressed polymer-dispersed liquid crystal light valves," Opt. Eng. **39**, 656-669 (2000).
 19. 国立天文台編：理科年表（丸善社，東京 2002）
p. 463.
 20. 山口 重雄, 屈折率(共立出版 2000) pp. 94-97.