

液晶プロジェクター用高輝度光学系

今井雅雄

アクティブマトリクス型液晶パネルをライトバルブとして用い、その表示画像をスクリーンに拡大投射する液晶プロジェクターは、小型、軽量の装置で容易に大画面映像を得ることが可能である。マルチメディアの急速な進展に伴い、AV機器やプレゼンテーション用ディスプレイ¹⁻³⁾として、その利用価値が高まってきている。解像性能に関しては、100万画素以上の高精細液晶ライトバルブと高性能投射光学系の開発により⁴⁻⁶⁾、画面全体にわたって鮮明な映像を再現でき、実用上十分な性能に達している。今後は、液晶ライトバルブの高集積化により、液晶プロジェクターのよりいっそうの小型軽量化、低コスト化が期待される。一方、明るさに関しても、明室で大画面映像を観察できることを目標に、光源の性能向上や高開閉率液晶ライトバルブの開発、さらには光学系の工夫により高輝度化が進められている。

本稿では、まず液晶プロジェクターの明るさを示す測光量について述べた後、最近の高輝度、高光利用効率化光学系の技術動向を解説する。

1. 液晶プロジェクターの明るさ

一般にディスプレイの明るさは表示面上の測定点の輝度 L [cd/m^2] で示される。プロジェクターの場合も同様に投射画面上の輝度が明るさを示す。ただし、以下に挙げるプロジェクター固有の特徴があるため、輝度以外の明るさの表記方法も用いられる。

① 投射方式には前面投射（フロント）方式と背面投

Projection optics for high-brightness liquid crystal projector (1996年2月22日受理)
Masao IMAI 日本電気(株)光エレクトロニクス研究所
(〒216 川崎市宮前区宮崎 4-1-1)

射（リア）方式の2種類がある。

② 輝度は、使用されるスクリーンの特性や投射画面サイズに依存する。

③ 他のディスプレイと比較して、明るさの均一性（画面四隅と中央部における明るさの比）が低い。

①と②の特徴において、フロント方式の場合にはユーザーがスクリーンを決めるので、その特性やサイズは未知であるのに対し、リア方式ではプロジェクターとスクリーンが一体となっているので、スクリーンの特性やサイズは既知である。したがって、プロジェクター装置の明るさは、フロント方式の場合にはプロジェクターから出射される光束 Φ [lm] を、一方リア方式の場合にはスクリーン面上の輝度 L [cd/m^2] を用いる。ただし、一般のユーザーは光束の単位であるルーメン (lm) を日常使用しないため、フロント式プロジェクターのカタログには40型スクリーンに投射した場合の照度 E [lux] を記載する場合がある。光束と照度の関係は後述する式(1)で表される。

ここで、光束の値は全出射光束を正確に求めるのではなく、次の測定方法による値であることに注意しなければならない。光束 Φ [lm] は投射画面中央部の照度 E [lux] を測定し、これに投射画面の面積 A [m^2] を乗じた値で与えられる。

$$\Phi = E \cdot A \quad (1)$$

つまり、③の特徴のために、光束値は実際よりも大きな値になる。照明方法によっては、中央部分の明るさのみを高くすることは可能だが、均一性が1/3以下になると著しく画質を損なってしまう。したがって、プロジェクターの高輝度化においては、光束値（言い換えると中央部分の照度）だけを高くするのではなく、同時に均一性

も向上させることが重要である。同様に、明るさの性能を示す場合には、均一性の数値も示すのが望ましい。

アメリカではこの点を考慮した測定方法がANSI (American National Standards Institute) によって規格化されている。この規格では、投射画面を3×3に9分割し、それぞれの中央部分を測定点とする。各測定点における照度を測定し、式(1)に基づく光束値を算出した後、それらを平均化して光束値を求める。前述の光束と区別する場合には、ANSI lm という単位で表記される。

一方、スクリーン面上の(中央部の)輝度と光束の関係は、投射画面の面積を A [m^2]、スクリーンゲインを G とすると次の式で表される。

$$L = \frac{G\Phi}{\pi A} \quad (2)$$

スクリーンゲインは、スクリーンの指向性によって生じる見かけ上の利得であり、完全拡散面に対する比として表される。一般には2~4程度のものが多く使用される。ディスプレイの輝度は200 cd/ m^2 程度必要であり、スクリーンゲインを3とすると、40型スクリーンで約100 lmが、80型スクリーンで約400 lmが必要な光束の目安となる。

輝度に関しても均一性を示すことは重要であるが、スクリーンの指向性のため、測定位置の関数となる。同一条件で比較できるように測定方法の規格化が望まれる。

このほかにも投射光学系の効率を示す値としては、光束値をランプ電力で割ったlm/Wを用いることもある。

2. 液晶プロジェクターの光利用効率

液晶テレビに用いられているカラーフィルター付きの液晶パネル1枚を拡大投影すると単板式液晶プロジェクターが得られる。しかし、赤、緑、青の画素を空間的に配置していることと、吸収型のカラーフィルターを用いることにより、画素数と明るさはともに1/3になってしまう。高精度でしかも明るい投射画像の要求が強いことから、現状では3枚の液晶ライトバルブを用いた3板式液晶プロジェクターが多く開発されている。

3板式液晶プロジェクターの光学系を図1に示す⁷⁾。光源から出射した白色光をダイクロイックミラーなどの色分離光学系で赤、緑、青の3原色の光に分離し、それぞれ3枚の液晶ライトバルブをそれぞれ照明する。各液晶ライトバルブで変調された光を、再びダイクロイックミラーなどの色合成光学系で合成した後、投射レンズでスクリーン上に投射する。以上の過程において、各構成

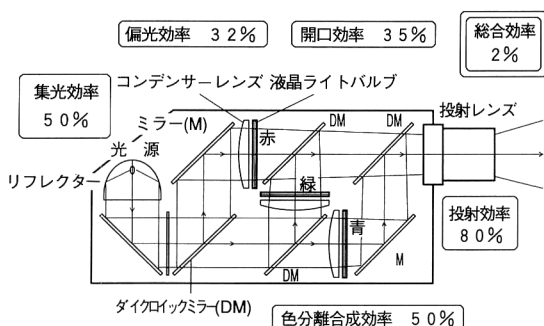


図1 液晶プロジェクターの構成と光利用効率。

要素での光利用効率を分析すると、以下のようになる。

[1] 集光効率:50% 光源から出射した光束をリフレクターで集めて、コンデンサーレンズに入射させ、さらにその光束を投射レンズに入射させる効率。光源の発光点(アーク)が有限な大きさをもつために光束が発散し光を損失する。また、投射画面の明るさの均一性を得るために光源のガラスにフロスト処理をした場合にも、光束が発散し光を損失する。さらに、液晶ライトバルブは矩形であるのに対し、照明光の照射領域の形状が円形であるため損失が生じる。

[2] 色分離合成効率:50% ダイクロイックミラーや反射ミラーの透過率や反射率、7面の透過、反射面で光が減衰する。また、白色光を3原色に分解する際に、視感度の高い黄色の成分を除去するため効率が約25%低下する。

[3] 偏光効率:32% TN (twisted nematic) 液晶を用い、画像に応じて光を強度変調するためには2枚の偏光板(偏光子と検光子)が必要である。光源からの光は自然光であり、偏光子として作用する偏光板の透過率は約40%である。一方、検光子に入射する光はすでに直線偏光となっているので透過率は約80%である。

[4] 開口効率:35% 液晶ライトバルブの各画素における光を透過する領域の割合(開口率)と、ガラス表面および画素部のガラス/透明電極/液晶等の界面における反射損失による。

[5] 投射効率:80% 投射レンズの透過率に、口径食による損失が加わる。

以上の効率をすべて掛け合わせると、液晶プロジェクターの光利用効率は約2%と非常に小さな値となる。この光利用効率を改善するために、以下のような技術が開発されている。

3. 高輝度化技術

3.1 集光効率の改善

光源から出射した光束が液晶ライトバルブを効率よく照明するには、照明光の指向性を高める必要がある。通常、放物面鏡を用いて光源からの光束を平行光束化する。しかし、光源が有限な大きさをもつので集束光や発散光が生じ損失する。当初から液晶プロジェクター用光源としては、発光効率が高いメタルハライドランプ⁸⁾を採用してきた。従来、アーク長は7 mm 以上であったが、最近ではショートアーク化が進み5 mm 程度のもが開発され⁹⁾、さらにアーク長1.4 mm の新規ランプも開発されている¹⁰⁾。

照明系においては、半導体露光装置等に用いられているオプティカル・インテグレーター（1対の蠅の眼レンズで構成される光学系）を適用することで、照明光束の矩形変換とリレー光学系による集光効率の改善が行われている^{11,12)}。同時に、明るさの均一性も70%以上が得られている。この光学系の構成を図2に示す。リフレクターで反射された円形光束は、それぞれが液晶ライトバルブの表示面と相似の矩形形状である第1のレンズ群に入射し多数の光束に分割される。これらの光束は対応する第2のレンズ群に入射し、第2のレンズ群によって第1のレンズ群のそれぞれの開口部が液晶ライトバルブ上に重ね合わされて結像される。この場合、第2のレンズ群に効率よく光を入射させるためには、やはり光源のショ

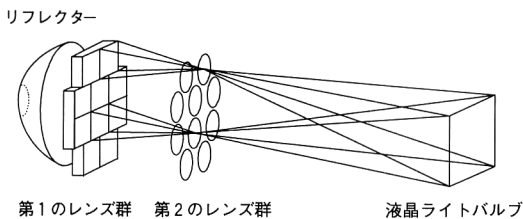


図2 オプティカル・インテグレーターの構成。

ートアーク化が重要である。また、第2のレンズ群のそれぞれの開口形状を照明光の照射角に合わせて変化させることにより、効率を向上させる方式も報告されている¹³⁾。

このほかにも、リフレクターから発散する光束をもうひとつのリフレクターを用いて、光源側に戻す二重リフレクターを液晶プロジェクターに適用した報告がある¹⁴⁾。

3.2 偏光効率の改善

液晶ライトバルブに用いるTN液晶は直線偏光をスイッチして表示を行うので、照明光は直線偏光であることが要求される。光源からの出射光は自然光であり、これを直線偏光化するのに偏光板が用いられる。偏光板を用いた場合、約60%の光量は吸収損失し、光利用効率は著しく低下する。さらに吸収された光が熱に変わり、偏光板の性能を劣化させる問題もあるので、光源の高光出力化に制約を生じさせる。そこで、光源からの自然光をすべて直線偏光に変換することができれば、それは単に効率を2倍にすることだけにとどまらず、偏光板の劣化も解消することができる。これまで、このような利点に着目し、いくつかの偏光変換光学系が提案されている¹⁵⁻²¹⁾。

図3に、筆者らが開発し製品に適用した偏光変換光学系の構成^{3,20,21)}を示す。偏光ビームスプリッター(PBS)、ミラー、1/2波長板からなる偏光変換光学系を光軸に対称に配置している。光源からの自然光は、PBSで偏光方向が互いに直交する2つの直線偏光光(p偏光、s偏光)に分離される。PBSを透過したp偏光光は直接液晶ライトバルブの中央領域を照明する。一方、PBSの斜面で反射されたs偏光光は、ミラーで光路を折り曲げられた後、1/2波長板でその偏光方向が90°回転され、p偏光光の偏光方向と等しくなる。そして、液晶ライトバルブの左右両端近傍を照明する。この結果、自然光は効率よく直線偏光に変換される。さら

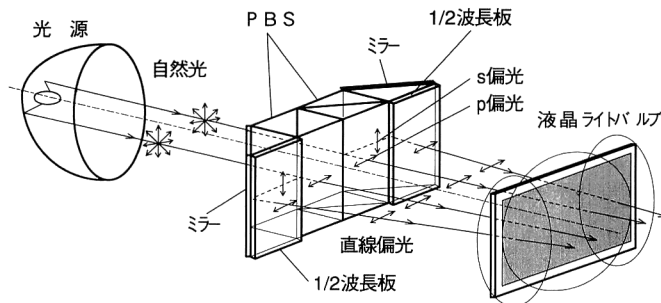


図3 偏光変換光学系の構成。

に、照射領域は横長になり、矩形の液晶ライトバルブを効率よく照明できる。しかも3光束による液晶ライトバルブの照明位置をそれぞれずらしているため照明光の照度分布の均一性がよい。本偏光変換光学系をワークステーション対応高精細液晶プロジェクターに適用した。このプロジェクターは、光源として250 Wのメタルハライドランプを用いている。液晶ライトバルブは、開口率が35%で1280×1024画素を有している。光束は400 lmが得られ、均一性も40%と良好な値を示した。投射効率は1.6 lm/Wである。

このほかに偏光効率を改善する方法としては、偏光板を用いないポリマー分散型液晶等の散乱型液晶を使用することや²²⁾、コレステリック液晶で偏光板と色分離光学系を構成する方式がある²³⁾。さらに、偏光変換光学系では2つの偏光光を合成する際に合成角度が大きくなると、投射レンズの口径食により損失が生じるが、この問題点を解決するために、光源からの光束を偏光子として作用するPBSでp偏光とs偏光に分離した後、ミラーで光路を折り曲げ、1枚の液晶ライトバルブを表裏からそれぞれの光束で照明し、その透過光を再び検光子として作用する同じPBSに入射させることで偏光成分を有効利用する光学系も提案されている²⁴⁾。

3.3 開口効率の改善

液晶ライトバルブの開口率を向上させるには、配線やTFT (thin film transistor) の微細化が必要である。さらに、高輝度の投射光に対してTFTが誤動作するのを防ぐための遮光マスク(ブラックマトリクス)が必要であり、これらが開口率を決定する。従来は、この遮光マスクはTFTが形成されているガラス基板とは対向するガラス基板上に形成されており、液晶セルの組立て(接着)精度を考慮してマージンが加えられていた。液晶ライトバルブの高精細化が進むとこのマージンが無視できなくなり、開口率を低下させる大きな要因となっていた。この問題点を解決するために、遮光マスクをTFT基板側に形成することにより1.5倍の高開口率化が図られた¹⁾。

また、多結晶シリコン(p-Si) TFTを用いた液晶ライトバルブでは、p-Si TFTがa-Si TFTに比べて電子移動度が高いことから、その面積を小さくすることができ、高開口率化に有利である。ビデオ表示やパソコン画面表示(VGA: video graphics array, 640×480画素)用では、a-Si TFTを用いたものに比べてp-Si TFT液晶ライトバルブの表示面積は1/4と高集積化が行われたにもかかわらず、開口率は1.5倍以上のものが得られて

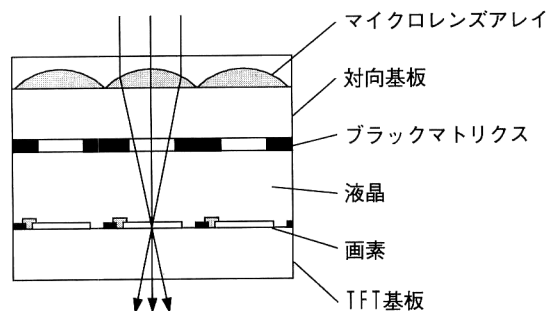


図4 マイクロレンズアレイを用いた液晶ライトバルブ。

いる²⁵⁾。

各画素ごとに微細なレンズ(マイクロレンズアレイ)を配置し、光学的に実効的な開口率を2倍以上向上させる技術も開発されている²⁶⁾。図4にマイクロレンズアレイを用いた液晶ライトバルブの構成を示す。マイクロレンズアレイは液晶ライトバルブに接合され、各レンズの焦点に各画素の開口が配置されている。この方式において、開口部に効率よく光を入射させるには、照明光束のひろがり角度を十分小さくすることが要求されるので、光源のショートアーク化が重要となる。また、マイクロレンズのNA (numerical aperture) を大きくすることで、集光サイズを小さくする構成も示されている²⁷⁾。

液晶ライトバルブを1枚だけ使用し、カラー表示を行う単板式液晶プロジェクターにもマイクロレンズアレイが適用されている。ただし、カラー表示を行うのに、直視型液晶ディスプレイと同様にカラーフィルターを設ける構成では、明るさが1/3以下になってしまう。そこで、従来のカラーフィルターを用いずにカラー表示を行う方式が開発された²⁸⁾。照明光をダイクロミックミラーで色分解する際に、各色の光束にわずかな角度差をもたせ、それらで1枚の液晶ライトバルブを照明する。液晶ライトバルブには3画素に1個の割合でマイクロレンズを配置し、角度差をもった各色の照明光が異なる位置に集光することを利用して明るいカラー画像を得る。マイクロレンズと色分解を同時に行ったり^{29,30)}、色分解のみを行う³¹⁾ホログラフィック光学素子も報告されている。

このほかには、反射型の液晶ライトバルブを用いて高開口率化を行った例もある³²⁾。

3.4 投射効率の改善

投射レンズにF値の小さなレンズを用いると投射画面は明るくなる。ただし、3板式の場合には、投射レンズと液晶ライトバルブの間に色合成用のダイクロミック

ミラーがあるため、投射レンズのバックフォーカスが長い。したがって、F値の小さなレンズを得ようとするとき、投射レンズの口径が非常に大きくなってしまふ。バックフォーカスを短くするには、色合成光学系に2種類のダイクロイック面を直交させて配置したクロスダイクロイックプリズム³³⁾が有効である。

先に述べた、オプティカル・インテグレーター、偏光変換光学系、そしてマイクロレンズアレイ等を用いた照明光学系のNAと投射光学系のNAとのマッチングは、投射画面の明るさを決定する重要な要素であり、光学システムのバランスのとれた設計が必要である。

液晶プロジェクターは、大画面でありながら細かい文字も鮮明に表示することができ、マルチメディア時代の大きな画面ディスプレイとしてその有用性が評価されている。最近では、特にマルチメディア・プレゼンテーションの需要が伸びてきており、さらに今後は家庭用大画面高品位TVとしての発展が予想される。これらの用途には暗い部屋で使用するわけにはいかない。本稿で述べた高輝度化技術や今後の技術開発により、液晶プロジェクターはより明るい部屋でも使用可能となり、その利用分野がさらに広がるものと考えられる。

文 献

- 1) N. Takahashi, K. Nakashima, Y. Hirai, O. Sukegawa and S. Kaneko: "A high aperture ratio pixel structure for high density a-Si TFT liquid crystal light valves," *Society for Information Display International Symposium Digest of Technical Papers (SID '93 Digest)*, **24** (1993) pp. 610-613.
- 2) K. Kubota, M. Imai, S. Kaneko, Y. Tashiro, K. Mochizuki, M. Sakamoto and T. Matsumoto: "High resolution high brightness liquid crystal projector for work station," *Proc. SPIE*, **2407** (1995) 119-124.
- 3) 窪田恵一, 今井雅雄, 松本隆幸: "投射型液晶ディスプレイ", *光学*, **24** (1995) 611-616.
- 4) M. Hijikigawa: "Progress in liquid-crystal projection," *Society for Information Display International Symposium Digest of Technical Papers (SID '92 Digest)*, **23** (1992) pp. 265-268.
- 5) K. Takeuchi, Y. Funazo, M. Matsudaira, S. Kishimoto and K. Kanatani: "A 750-TV-line-resolution projector using 1.5-megapixel a-Si TFT LC modules," *Society for Information Display International Symposium Digest of Technical Papers (SID '91 Digest)*, **22** (1991) pp. 415-418.
- 6) M. Yokozawa, N. Okamoto, T. Matsumoto, R. Fujimura and T. Hirashima: "High definition TV rear projector using LCD panels," *Conference Record of the 1991 International Display Research Conference (IDRC '91)* (1991) pp. 4-7.
- 7) M. Sakamoto, M. Imai, H. Moriyama, S. Tsujikawa, H. Ichinose, S. Kaneko, H. Hayashi, T. Honjo, K. Urano, T. Ueno, T. Yanase and N. Nishida: "High-quality-image EDTV liquid-crystal-projector," *Society for Information Display International Symposium Digest of Technical Papers (SID '91 Digest)*, **22** (1991) pp. 419-423.
- 8) K. Kawai and M. Matsumoto: "Short arc metal halide lamp suitable for projector application," *Proc. SPIE*, **2407** (1995) 23-35.
- 9) T. Higashi and T. Arimoto: "Long-life DC metal-halide lamps for LCD projector," *Society for Information Display International Symposium Digest of Technical Papers (SID '95 Digest)*, **26** (1995) pp. 135-136.
- 10) E. Schnedler and H. v. Wijngaarde: "Ultrahigh-intensity short-arc long-life lamp system," *Society for Information Display International Symposium Digest of Technical Papers (SID '95 Digest)*, **26** (1995) pp. 131-134.
- 11) A. H. J. van den Brandt, H. J. Blankers, S. Jinsi, P. J. M. van Os, M. V. C. Stroomer, W. A. G. Timmers, W. G. C. Verbeek and H. A. de Werd: "New plusfactor in an LCD-projector," *Conference Record of the 1991 International Display Research Conference (IDRC '91)* (1991) pp. 151-154.
- 12) N. Okamoto, T. Matsumoto, H. Kamakura, A. Kato, I. Yutasaka, Y. Sekiya, Y. Matsueda and T. Hirashima: "500-lm HDTV rear projector using p-Si TFT LCDs," *Conference Proceedings of the 13th International Display Research Conference (Eurodisplay '93)* (1993) pp. 525-528.
- 13) 橋本吉弘, 宮武義人: "異形開口レンズアレイを用いた液晶プロジェクタ用高効率照明光学系", *光学連合シンポジウム 浜松 '94 予稿集* (1994) pp. 135-136.
- 14) M. Deguchi, T. Maruyama, H. Inage, T. Kakuda, F. Yamasaki and S. Asai: "Development of high-brightness compact LC projector," *IEEE Trans. Cons. Electron.*, **41** (1995) 529-535.
- 15) 今井雅雄, 坂本幹雄, 窪田恵一: "液晶プロジェクタ高輝度投射光学系用偏光変換素子", 1989年電子情報通信学会秋季全国大会講演論文集5, C-34 (1989) p. 34.
- 16) M. Imai, M. Sakamoto, K. Kubota, Y. Kato and N. Nishida: "High-brightness liquid crystal light valve projector using a new polarization converter," *Proc. SPIE*, **1255** (1990) 52-58.
- 17) M. Imai, M. Sakamoto and N. Nishida: "A polarization converter for high-brightness liquid crystal light valve projector," *Proceedings of the 12th International Display Research Conference (Japan Display '92)* (1992) pp. 235-238.
- 18) S. Shikama, E. Toide and M. Kondo: "A polarization transforming optics for high luminance LCD projector," *Conference Proceedings of the 10th International Display Research Conference (Eurodisplay '90)* (1990) pp. 64-67.
- 19) C. Nicolas, B. Loiseaux, J. P. Huignard and A. Dupon: "Efficient optical configuration for polarized white light illumination of 16/9 LCDs in projection display," *Proceedings of the 12th International Display Research Conference (Japan Display '92)* (1992) pp. 121-124.
- 20) M. Imai, H. Shiratori, Y. Tashiro, M. Sakamoto and K. Kubota: "A novel polarization converter for high-brightness liquid crystal light valve projector," *Conference Proceedings of the 13th International Display Research Conference (Eurodisplay '93)* (1993) pp. 257-260.
- 21) 潮屋幸則, 今井雅雄, 加藤彦志, 石垣長実, 白鳥弘敏, 西原昌彦, 齊藤裕之, 田代義春, 坂本幹雄: "ワークステーション対応液晶プロジェクター光学系", 1994年テレビジョン

- 学会年次大会講演予稿集 (1994) pp. 35-36.
- 22) H. Kunigida, Y. Hirai, Y. Ooi, S. Niiyama, T. Asakawa, K. Masumo, H. Kumai, M. Yuki and T. Gunjima: "A full-color projection TV using LC/polymer composite light valves," *Society for Information Display International Symposium Digest of Technical Papers (SID '90 Digest)*, **21** (1990) pp. 227-230.
 - 23) M. Shudt and J. Funkschilling: "Novel polarized liquid crystal color projection and new TN-LCD operating modes," *Society for Information Display International Symposium Digest of Technical Papers (SID '90 Digest)*, **21** (1990) pp. 324-327.
 - 24) B. G. Rho and J. S. Kim: "A new LCD projector system with higher brightness," *Proceedings of the 15th International Display Research Conference (Asia Display '95)* (1995) pp. 83-85.
 - 25) 小池啓文, 林 祐司, 飯田正幸: "3.3 cm (1.3 型) 31 万ドット液晶ディスプレイ", *電子材料*, 7 月号別冊 (1995) 23-28.
 - 26) H. Hamada, F. Funada, M. Hijikigawa and K. Awane: "Brightness enhancement of an LCD projector by a planar microlens array," *Society for Information Display International Symposium Digest of Technical Papers (SID '92 Digest)*, **23** (1992) pp. 269-272.
 - 27) H. Hamada, A. Fujii, Y. Mizuguchi, T. Shibatani, F. Funada and K. Awane: "A new high definition microlens array built in p-Si TFT-LCD panel," *Proceedings of the 15th International Display Research Conference (Asia Display '95)* (1995) pp. 887-890.
 - 28) H. Hamada, H. Nakanishi, F. Funada and K. Awane: "A new bright single panel LC-projection system without a mosaic color filter," *Conference Record of the 1994 International Display Research Conference (IDRC '94)* (1994) pp. 422-423.
 - 29) C. Joubert, A. Delboulbe, B. Loiseaux and J. P. Huignard: "Holographic elements for LCD projectors," *Proc. SPIE*, **2406** (1995) 248-259.
 - 30) N. Ichikawa: "Holographic optical element for liquid crystal projector," *Proceedings of the 15th International Display Research Conference (Asia Display '95)* (1995) pp. 727-729.
 - 31) B. A. Loiseaux, C. Joubert, A. Delboulbe, J. P. Huignard and D. Battarel: "Compact spatio-chromatic single-LCD projection architecture," *Proceedings of the 15th International Display Research Conference (Asia Display '95)* (1995) pp. 87-89.
 - 32) 竹田 守, 田窪米治, 田村達彦, 岩井 宏, 宇喜多謙二, 小森一徳: "ハイビジョン用液晶投写型テレビの反射型高密度 TFT アレイ", 1989 年電子情報通信学会秋季全国大会講演論文集 5, C-30 (1989) p. 30.
 - 33) S. Morozumi, T. Sonehara, H. Kamakura, T. Ono and S. Aruga: "LCD full-color video projector," *Society for Information Display International Symposium Digest of Technical Papers (SID '86 Digest)*, **17** (1986) pp. 375-378.