

くわ た むね はる

氏 名 栗田 宗晴

授与学位 博士(工学)

学位授与年月日 平成22年9月 8 日

学位授与の根拠法規 学位規則第4条第1項

研究科, 専攻の名称 東北大学大学院工学研究科(博士課程) 電子工学専攻

学位論文題目 背面投写型ディスプレイの薄型化および高効率化に関する研究

指導教員 東北大学教授 川又 政征

論文審査委員 主査 東北大学教授 川又 政征 東北大学教授 枝松 圭一  
 東北大学教授 中沢 正隆 東北大学准教授 宮下 哲哉  
 客員教授 内田 龍男 特任教授 鈴木 芳人  
 (仙台高等専門学校)  
 客員准教授 川上 徹 客員准教授 関家 一雄  
 (未来科学共同研究センター) (未来科学共同研究センター)

## 論文内容要旨

### 1. 序論

電子ディスプレイは、電子機器からの電気的情報信号を人間が視覚で認識できる光情報信号に変換する機能を持つ電子デバイスであり、人間と各種電子機器を結ぶマン・マシン・インターフェースとしての役割を果たす。近年、情報通信技術の発展により社会全体の高度情報化、マルチメディア化が進み、情報流通量が飛躍的に増大している。このような情報化社会において、電子ディスプレイの果たすべき役割はますます重要となっている。

電子ディスプレイの歴史は古く、1897年にドイツの物理学者 K.F.Braun が CRT(Cathode Ray Tube: 陰極線管)を発明したことに始まる<sup>1)</sup>。CRT はテレビやコンピュータ用の表示デバイスとして長らくディスプレイの主役であった。その後、デジタルハイビジョン放送の実用化やインターネット、DVD 等のデジタルコンテンツの普及に伴い、高精細な映像表示に適した大画面ディスプレイへの要求が強くなった。しかし、CRT は、真空管を用いるという構造上、体積が大きく、大画面化も 40 型程度が限界とされていた<sup>2)</sup>。そこで、CRT に替わる次世代のディスプレイとして、液晶ディスプレイやプラズマディスプレイ、これらに次ぐ第三の大画面ディスプレイとして背面投写型ディスプレイが登場した。

液晶ディスプレイとプラズマディスプレイは、フラットパネルディスプレイと称される通り奥行きが小さいことを大きな特長としている。一方、背面投写型ディスプレイは、図 1 に示すように、高圧放電ランプからの光で照明された小型の表示デバイスを投写光学系によって透過型スクリーンに拡大投影するディスプレイであり、他方式に対し、より大画面を低コストで実現できることに加え消費電力も小さいという特長を有している。そこで本研究では、大画面ディスプレイとして最も有利な方式と考えられる背面投写型ディスプレイに着目した。しかし、背面投写型ディスプレイは、奥行き短縮と光利用効率の改善というその表示原理に基づく本質的な技術課題を有しているものの、このような課題を解決・解消できる有力な手法は未だ提案されていない。そこで本論文では、背面投写型ディスプレイの薄型化および高効率化を目的とし、それを実現するための新しい投写光学システムおよび光利用効率を改善する新しい方法を考案した。

### 2. 大投影角化による背面投写型ディスプレイの薄型化

従来の背面投写型ディスプレイでは、投影角を拡大し、投写距離を短くしようとすると、収差が生じるために奥行きを大幅に短縮できないという問題があった。この結果、直視型ディスプレイと比較してより多くの設置空間が必要となるほか、筐体デザインにも制約が生じていた。一般に、投影角が大きくなると歪曲や倍率色収差、像面湾曲が問題となる。

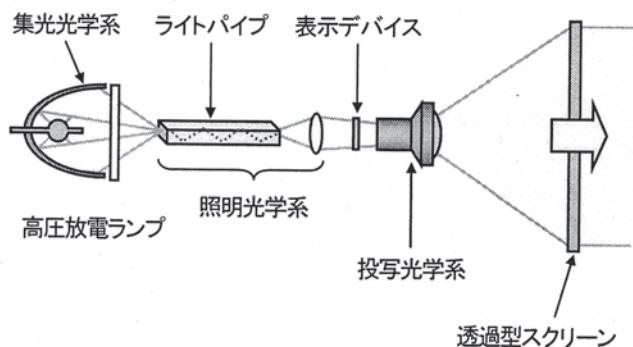


図 1 背面投写型ディスプレイの構成

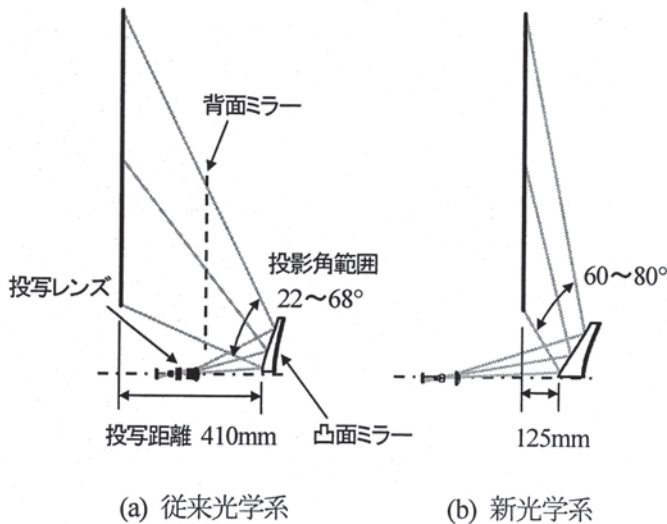


図2 投写光学系の構成

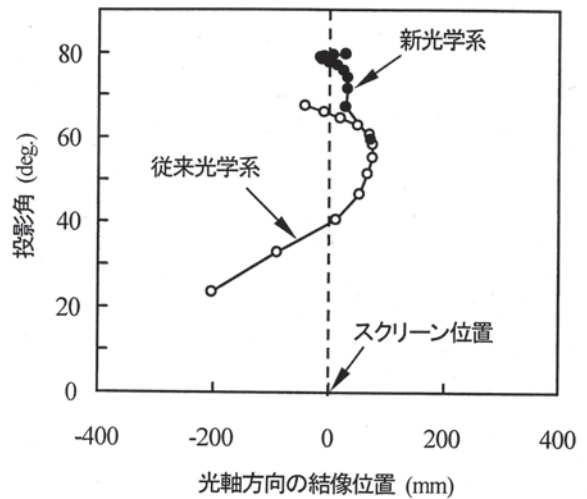


図3 像面湾曲

従来より、歪曲と倍率色収差は、投写光学系をレンズと凸面ミラーで構成することで補正可能であったが<sup>3)</sup>、投影角を一層大きくした場合に像面湾曲を十分に補正することはできなかった。すなわち、従来は、投影角の小さい光軸近傍のみ適用可能なPetzvalの定理に基づいて低次の像面湾曲を補正していた<sup>4)</sup>。しかし、投影角が大きくなると像面湾曲が激しくなり、その補正には著しく複雑な光学系を構成する必要があるため、実質的に薄型化は不可能と考えられていた。これに対し、光軸から大きく離れた大投影角領域のみを用いることを着想し、光軸近傍の像面湾曲を許容すれば、大角度領域では高次と低次の像面湾曲が互いに相殺して簡単な光学構成で補正できることを見出した。この補正原理を適用した新たな投写光学系を図2(b)に、その像面湾曲を図3に示す。投写レンズ構成を従来の10枚から4枚に簡素化しつつ、 $60^{\circ} \sim 80^{\circ}$ の大投影角領域において像面湾曲を従来比1/3以下に低減した。これにより、背面ミラーを用いて光路を折り返す従来構成と比較して、実効的に奥行きを約1/2に短縮した薄型ディスプレイの実現に成功した<sup>5)</sup>。

### 3. 集光効率の改善による背面投写型ディスプレイの高効率化

従来の集光光学系では、光源からの光の集光性が十分でなく大きな光損失が生じていた。この光損失を低減するため、集光光学系における光利用効率の改善手法について検討した。楕円形状のリフレクタと平面形状の前面板からなる従来の集光光学系における集光状態を図4(a)に示す。放射角の小さい光はリフレクタの曲率の大きい部分で反射され、ライトパイプの入射面よりも大きく結像する一方、放射角の大きい光はリフレクタの曲率の小さい部分で反射され、ライトパイプの入射面よりも小さく結像する。このように、従来では、アークからの光の放射角によって集光特性が大きく変化するためライトパイプに取り込めない光が多く、これが光損失を招いていた。そこで、図4(b)に示すように、放射角の小さい光をより小さく、放射角の大きい光をより大きく結像させる

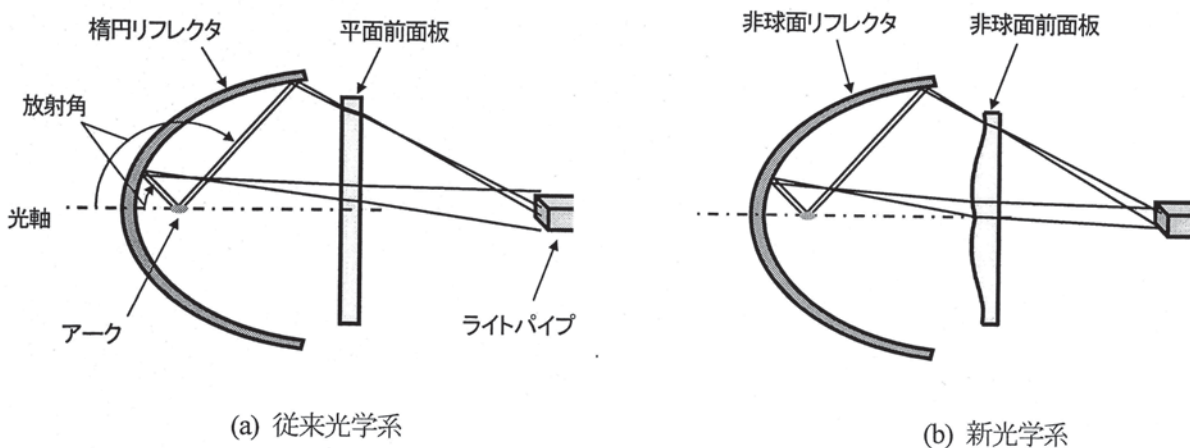
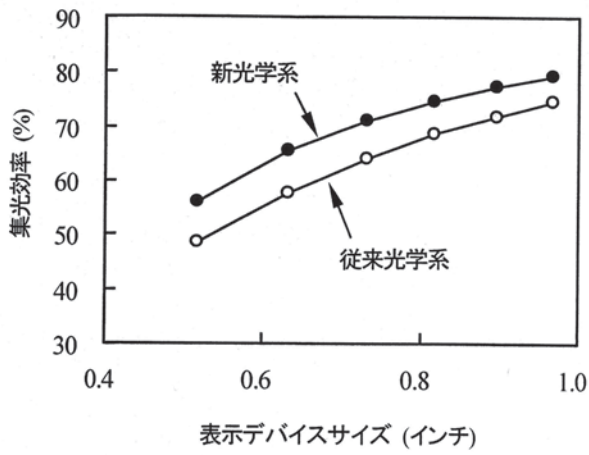
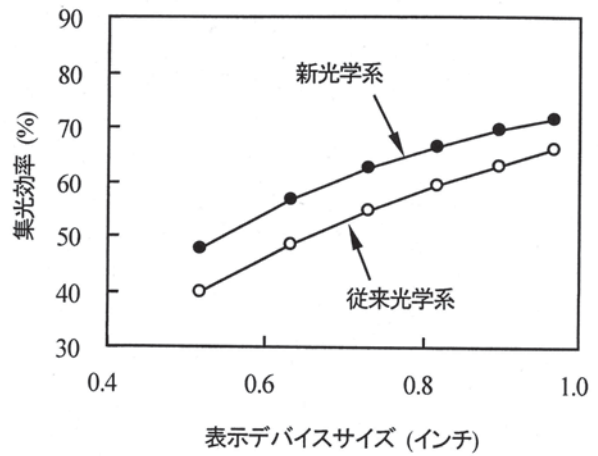


図4 集光光学系の構成



(a) アーク長 1.0mm



(b) アーク長 1.3mm

図5 集光効率

ために、リフレクタおよび前面板を非球面形状とした新たな集光光学系を考案した。この新たな集光光学系の集光効率を図5に示す。表示デバイスサイズが小さくなるほど効率は当然に劣化するが、いずれの条件下においても新たな光学系のほうが従来光学系よりも集光効率は上回っており、集光効率が改善されていることが示された。また、表示デバイスサイズが小さいほど、アーク長が大きいほど、集光効率の改善率は大きい。放射角の異なる光の結像倍率を適切に制御することにより、集光効率を最大20%程度向上させることに成功した<sup>6)</sup>。

#### 4. レーザ光源による背面投写型ディスプレイの高効率化

光利用効率を考える際に Etendue という概念が用いられる。Etendue は光束の断面積と立体角の積で表される幾何学的な概念であり<sup>7)</sup>、光源から放射される光の Etendue が光学系で受光可能な光の Etendue より大きければ光損失が生じる。放射光の立体角が大きい高圧放電ランプは Etendue が大きく、光損失も大きい。一方、近年では数 W 級の高出力を

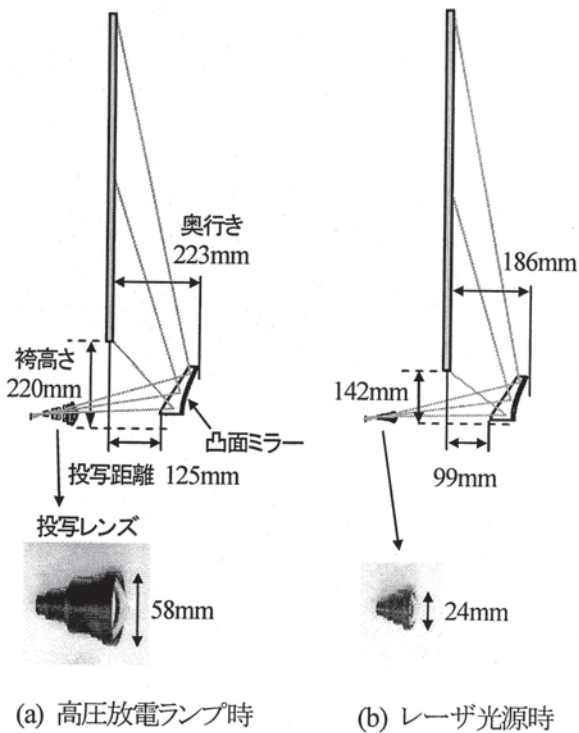
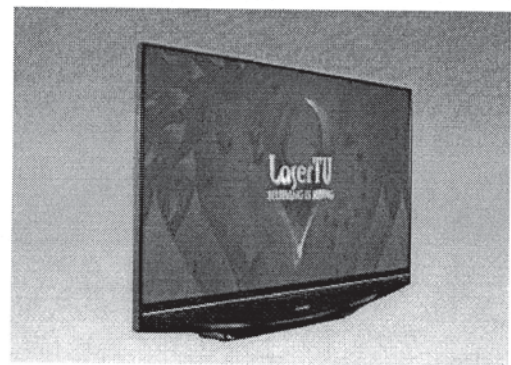


図6 投写光学系の構成



画面サイズ	65型
奥行き	255mm
投写光学系	レンズ+凸面ミラー方式
投写距離	99mm
投影角	80°
表示デバイス	DLP <sup>®</sup> チップ(0.65インチ)単板式
解像度	1920×1080
光源	RGBレーザー
色再現範囲	NTSC比180%
消費電力	135W

図7 レーザ光源ディスプレイ

持つ3原色の可視光小型レーザの進展により、これを民生用ディスプレイにも適用することが可能となってきた<sup>8-11)</sup>。そこで、一層の高効率化を実現するため、放射光の立体角が極めて小さいレーザを光源に用いることを検討した。合わせて、投写光学系の小型化による背面投写型ディスプレイの薄型化についても検討した。

レーザ光源は Etendue が極めて小さいため、小口径の投写光学系であっても高い集光効率が見込める。さらに、フィールドシーケンシャル方式のディスプレイでは、高圧放電ランプのような白色光源を用いるとカラーフィルターによる吸収で約2/3の光を損失するが、高速変調が可能なレーザではこのような損失を生じない。これらを考慮してディスプレイの構成を具体的に検討し、レーザを採用することにより、高圧放電ランプ時に比べ約4倍の高い光利用効率が実現可能となることを示した。また、大投影角における収差解析を行い、レーザ光源化により、光学系の口径に強く依存する収差は著しく低減する一方、投影角に強く依存する収差は高圧放電ランプ時と同様に補正が困難であることから、レーザ光源時にも、前述の大投影角の投写光学システムを適用することが有効であることを示した。レーザ光源に最適化した新たな投写光学系を図6に示す。小口径の小型投写光学系により、高圧放電ランプ時と比較して約20%の薄型化を可能とした。この投写光学系を搭載したレーザ光源ディスプレイを図7に示す。画面サイズは65型で奥行きは255mmであり、スタンド奥行きが300mm程度である大画面フラットパネルディスプレイに対して遜色ない程度の奥行きを実現した。また、消費電力は、同画面サイズの液晶ディスプレイに対して約1/3程度、高圧放電ランプ時に対して約2/3程度となる135Wであり、極めて高い光利用効率を実現した<sup>12)</sup>。

## 5. 結論

本研究では、背面投写型ディスプレイの薄型化および高効率化を目的とし、大投影角化、集光効率の改善、レーザ光源の利用を検討し、以下のことを明らかにした。

- (1) 大投影角において、光軸から大きく離れた一部の投影角範囲のみを使用し簡単なレンズ構成で像面湾曲を補正する、新たな像面湾曲の補正理論を確立した。
- (2) 本分野では最大となる80°の投影角を有する新たな薄型の背面投写型ディスプレイを実現し、大投影角の理論の有効性を実証した。
- (3) 集光光学系における効率損失の原因を明確にし、放射角ごとにアーク像の結像倍率を制御することで損失を低減できることを理論的に示すとともに、試作・評価によりその有効性を実証した。
- (4) レーザ光源を利用した高効率かつ薄型の背面投写型ディスプレイを実現し、レーザ光源利用時における大投影角の理論の有効性を実証した。

本研究の成果を基に、薄型かつ高効率な背面投写型ディスプレイの実用化に成功した。

## 参考文献

- 1) E. Yamazaki: "History of CRT Development", IDW'07 Digest, pp.729-732 (2007).
- 2) 菊池宏: "電子情報ディスプレイハンドブック", 培風館, p.435 (2001).
- 3) Shinsuke Shikama, Hiroshi Suzuki, Takao Endo and Kohei Teramoto: "Refractive-reflective optical system for realizing an ultra-thin rear projector", Journal of the SID Vol.11, No.4, pp.677-683 (2003).
- 4) M・ボルン, E・ウォルフ: "光学の原理 I", 東海大学出版会, p.224 (1998).
- 5) Muneharu Kuwata, Tomohiro Sasagawa, Kuniko Kojima, Junichi Aizawa, Akihisa Miyata, Shinsuke Shikama and Hiroaki Sugiura: "Projection optical system for a compact rear projector", Journal of the SID Vol.14, No.2, pp.199-206 (2006).
- 6) Muneharu Kuwata, Hayato Takeuchi, Tomohiro Sasagawa, Shinji Yagyu and Hiroaki Sugiura: "High-efficiency light-collection optics for lamp-based projection TV", Journal of the SID Vol.15, No.10, pp.829-836 (2007).
- 7) Matthew S. Brennessoltz and Edward H. Stupp: "Projection Displays Second Edition", WILEY, pp.271-272 (2008).
- 8) Takashi Miyoshi, Tokuya Kozaki, Tomoya Yanamoto, Yasushi Fujimura, Shin-ichi Nagahama and Takashi Mukai: "GaN-Based High-Power Blue Laser Diodes for Display Applications", SID'06 Digest, pp.1915-1917 (2006).
- 9) Greg Niven and Aram Mooradian: "Low Cost Lasers and Laser Arrays for Projection Displays", SID'06 Digest, pp.1904-1907 (2006).
- 10) Yoshihito Hirano, Takayuki Yanagisawa, Syuhei Yamamoto, Yasuharu Koyata, Makoto Okano, Tsuneo Hamaguchi, Akira Nakamura, Tetsuya Yagi and Hiroaki Sugiura: "Planar-Waveguide Green Laser for Laser TV", SID'08 Digest, pp.972-974 (2008).
- 11) Sunao Kurimura: "Green Laser Technology for Display Application", IDW'09 Digest, pp.1341-1344 (2009).
- 12) Muneharu Kuwata, Hiroaki Sugiura, Tomohiro Sasagawa, Atsushi Michimori, Eiich Toide, Takayuki Yanagisawa, Syuhei Yamamoto, Yoshihito Hirano, Masahiro Usui, Shigenori Teramatsu and Jun Someya: "A 65-in. slim (255-mm depth) laser TV with wide-angle projection optical system", Journal of the SID, Vol.17, No.11, pp.875-882 (2009).

# 論文審査結果の要旨

背面投写型ディスプレイは、小型の表示デバイスを光学系によってスクリーンに大きく拡大投写して映像を表示するものであり、容易に大画面ディスプレイを実現できるという特長を有している。しかし、投影角を拡大し、投写距離を短くしようとするとき収差が生じるために奥行きを大幅に短縮できないこと、光源からの光の集光性が十分でなく、光損失がかなり大きいことなどの問題があった。著者はこれらの問題を解決するために、大投影角の投写光学システムを可能とする新たな収差補正方法および光損失を低減させる新たな集光光学システム的设计法を確立した。また、光源にレーザーを用いた背面投射型ディスプレイを実現し、更なる光利用効率の改善と薄型化を達成した。本論文はこれらの成果を取りまとめたものであり、全文5章よりなる。

第1章は序論であり、本研究の背景及び目的について述べている。

第2章では、投影角の大きい投写光学システムにおける像面湾曲の補正方法について検討している。一般に、投影角が大きくなると像面湾曲が大きくなるが、従来は投影角の小さい光軸近傍のみ適用可能なPetzvalの定理に基づいて低次の像面湾曲を補正していた。しかし、投影角が大きくなると像面湾曲が激しくなり、その補正には著しく複雑な光学系を構成しなければならなくなり、実質的に薄型化は不可能と考えられていた。これに対して著者は光軸から大きく離れた大投影角領域のみを用いることを着想し、光軸近傍の像面湾曲を無視すれば大角度領域では高次と低次の像面湾曲が互いに相殺して簡単な光学構成で補正できることを見出した。具体的には、60~80°の大投影角領域で所望の補正を達成し、従来と比較して実効的に奥行きを約1/2に短縮した薄型ディスプレイの実現に成功している。これらの成果は実用的に高く評価できる。

第3章では、放電ランプの集光光学系における光利用効率の改善手法について検討している。楕円形状のリフレクタと平面形状の前面板からなる従来の集光光学系では、放電アークからの光の放射角度によって集光特性が大きく変化するので、かなりの光を次段のレンズ口径内に取り込むことができず、これが光損失を招いていた。そこで著者はリフレクタおよび前面板を非球面形状として放射角の異なる光を適切に集光させることにより、光利用効率を20%程度向上させ得ることを実証している。この改善手法は実用上高く評価することができる。

第4章では、レーザー光源を用いた場合の高効率化および薄型化について検討し、一般的な放電ランプに比べ発散角の極めて小さいレーザー光源を採用することにより光利用効率を大幅に向上させ得ることを明らかにしている。具体的には、第2章で検討した大投影角の投写光学システムにレーザー光源を適用することにより、放電ランプの場合と比較して、約30%の効率改善と約20%の薄型化が達成できることを実証している。また、このディスプレイは民生用テレビとして実用化され、国内外から高く評価されている。

第5章は結論である。

以上要するに本論文は、大投影角領域のみを用いることによる新しい像面湾曲の補正手法および光源からの光の利用効率の改善手法の確立、ならびにレーザー光源の導入による更なる薄型かつ高効率・背面投写型ディスプレイの実現を可能にしたものであり、画像工学ならびに電子工学の発展に寄与するところが少なくない。

よって、本論文は博士（工学）の学位論文として合格と認める。