屈折界面において p 偏光透過率が高くなることを有効活用した 高効率バックライト

非会員 足立 昌哉 (株式会社ジャパンディスプレイ) 非会員 西澤 重喜 (株式会社日立ディスプレイ(当時))
非会員 島崎 勝輔 (マクセル株式会社)

High-Efficiency Backlight Effectively Using P-polarized Light at the Interface of Refraction

Non Member Masaya Adachi (Japan Display Inc.) ,
Non Member Shigeki Nishizawa (Hitachi Displays, Ltd.) and
Non Member Katsusuke Shimazaki (Maxell, Ltd.)

ABSTRACT

The objective of this research was to develop a high efficiency backlight for liquid crystal displays (LCDs). A typical LCD panel includes a pair of dye polarizers. The polarizer functions by absorbing light of one component and by allowing the other component, which has a plane orthogonal to the first component, to pass through the polarizer. Therefore, the polarizer absorbs at least 50% of the light illuminated onto the LCD panel if it is unpolarized. Hence, the ratio of the light from the backlight absorbed by the polarizer need to be reduced to achieve low power consumption in the LCD. Light output at the interface of refraction is known to contain more p-polarized light than s-polarized light, and this can be attributed to the transmittance difference between the two kind of light there. We make use of interface refractions from existing optical components and maintain the state of polarization as light passes through them. In accordance with this concept, we have successfully developed a polarized backlight utilizing a p-polarized light out-coupling by effectively using the interface refractions of optical components. In our backlight, the luminance for the p-polarized light was improved by 30% or more compared to that of a conventional backlight. In addition, this backlight can be composed of fewer components. Therefore, low power consumption can be achieved by applying our backlight to LCDs, and the added benefits are that the module can be made thinner and at low cost.

KEYWORDS : backlight, polarized light, interface reflection, refraction, LCD

1. 緒言

移動通信システムの進歩に伴い、スマートフォンなどのモバイル機器を通じて、いつでも、どこでもデジタル化された映像情報を観ることが可能な社会が実現している。モバイル機器の利用シーンの拡大に伴い、2次電池（バッテリー）による使用時間の確保・拡大のため、ディスプレイの低電力化への要求が高まっている。モバイル機器用のディスプレイとしては、有機発光ダイオード（OLED : Organic Light Emitting Diode）ディスプレイの他、従来から広く液晶ディスプレイ（LCD : Liquid Crystal Display）が採用されている。LCDは、照明光を出射するバックライトと、この照明光の透過量を調整することで画像を形成する液晶パネルとから構成される。液晶パネルの透過率は主として、部材透過率（偏光板やカラーフィルタなど光吸収性部材の透過率）、開口率（1画素のうち、表示に有効な領域の面積比率）、表示効率（液晶分子の配向状態から決定される光の透過効率）の3つから決まる。部材透過率はこれら3要因の中で最も低いため、液晶パネルの透過率向上にとって最大の課題となっている。部材透過率を下げる大きな原因の一つが偏光板である。偏光板は入射する光のうち、所定方向に振動面をもつ直線偏光は吸収し、これと直交する直線偏光は透過するという性質を有する。このため、バックライトの出射光が無偏光

であれば、約半分の光が偏光板で吸収され損失となる。偏光板での吸収損失を抑制する手段として、バックライトと液晶パネルの間に反射型偏光板を設ける方法がある。反射型偏光板としては円偏光を反射するタイプ¹⁾と直線偏光を反射するタイプ²⁾があり、円偏光を反射するタイプは1/4波長板と組み合わせることで透過光を直線偏光に変換する。反射型偏光板はバックライトの出射光の内、液晶パネル裏面の偏光板を透過する直線偏光は透過し、吸収される直線偏光は偏光板で吸収される前に反射する。反射型偏光板で反射した光はバックライトに戻り、そこで少なくともその一部が偏光解消し、再び反射型偏光板に向かった際、その一部が透過する。これを繰り返すことでLCDの輝度が向上するため、現在、反射型偏光板は様々なLCD製品に適用されている。反射型偏光板はこれを追加することで、コストが上昇し、厚みが増加する。このため、偏光板での吸収損失を低減する方法として、バックライトの出射光自体に所定の直線偏光が多く含まれる様にする技術の検討が行われている。例えば導光板に偏光ビームスプリッターとマイクロプリズムを備えたバックライト³⁾、導光板に等方性部材と非等方性部材から成る微細な界面を形成し、全反射を利用してs偏光を積極的に取り出す様に構成したバックライト^{4)~6)}が検討されている。或いは、直線偏光を出射する光源を用い、偏光状態を維持する導光板と組み合わせることで偏光を出射する様にしたバックライトが検

討されている⁷⁾。これらの方法は、いずれも特別な部材や構造を必要とする。

本研究の目的は、LCDの電力低減のため、所定の直線偏光をより多く出射するバックライトを実現することにある。この際、部材を増やすことはせず、既存の構成部材において各屈折界面においてp偏光の透過率がs偏光よりも高くなることを積極的に活用する⁸⁾。本報告は、屈折界面においてp偏光の透過率が高くなることを有効活用することで、所定の直線偏光をより多く出射する様に構成したバックライトの基本コンセプト及び設計指針について述べる。

2. 評価方法

2.1 バックライトの基本構成

図1は本検討に用いたバックライトの基本構成を示す概略図である。このバックライトは光源、導光板、反射シート、プリズムシート、及び拡散シートから構成される。光源として複数の白色LED (Light Emitting Diode) を用い、それらを導光板の一側面に整列配置する。図示しないフレーム等により各構成部材は固定される。光源から出射し、導光板に入射した光は導光板内を導波しつつ、プリズムシート及び拡散シートが配置された面から出射する。

図1 バックライトの概略構成図

Fig.1 Perspective view illustrating the configuration of backlight.

2.2 輝度の角度依存性

バックライトの輝度の測定には輝度計 (トプコン製 BM-7A: スポット径 0.2°) を使用した。輝度の角度依存性はアームに取り付けた輝度計を測定対象物を中心に所定の角度回転させ、その都度、輝度測定することで実現した。また、全方位の輝度分布測定にはEZContrast (ELDIM社製) を使用した。測定に用いたバックライトは照明の有効領域が66mm×37mm (対角2.98インチ, アスペクト比16:9) であり、照明領域の中心を測定点とした。

2.3 偏光度の測定と定義

図2に偏光度の測定系を示す。図には方位角 ϕ の定義も記載した。導光板の4つの側面のうち、光源が近接配置され、光入射面となる側面の長手方向をx軸と定義する。この場合、光源から出射して導光板に入射した光が導光板を導波する際の主たる方向 (導光方向) をy軸とし、導光板の光出射面に対する垂線方向をz軸と定義する。図示の通り、y軸の+方向を方位角0°とし、時計回りを+方向として方位角を定義する。また、極角 θ の+方向はy軸の+方向とする。検光子には偏光フィルム (日東電工製, SEG1425DU) を使用する。必要に応じて検光子の吸収軸を変え、その透過光の輝度を輝度計で測定する。後述する通り、導光板から出射する

光が最大輝度となる方向はyz平面に含まれる。このため、本稿では特にyz平面を進む光に着目し、検光子の透過軸 (吸収軸と直交する軸) がyz平面と平行なときの輝度を I_{pmax} 、直交するときの輝度を I_{pmin} とし、p偏光に対する偏光度 (以下、p偏光度とも呼ぶ) ρ_p を式(1)で定義する。また、 I_{pmax} のことをp偏光輝度、 I_{pmin} のことをs偏光輝度とも呼ぶ。

$$\rho_p = (I_{pmax} - I_{pmin}) / (I_{pmax} + I_{pmin}) \dots\dots\dots (1)$$

図2 偏光度の測定系

Fig.2 Schematic drawing of measurement set-up for degree of polarization.

偏光度以外の測定では、y軸 (yz平面) と平行な方向に透過軸を有する検光子を、液晶パネルの偏光板を模した形で、バックライトの光出射面に配置して偏光輝度を測定する。この輝度も、yz平面に振動方向を有する直線偏光に対する輝度であるため、本稿では、p偏光輝度と呼ぶ。尚、方位角 $\phi = 0^\circ$ 及び 180° 以外の方向に進む光に対しては、yz平面と平行な方向に振動する直線偏光は、必ずしもp偏光ではない。しかし、本稿では主として、yz平面に含まれる光に着目し議論を進めるため、yz平面と平行な方向に振動する直線偏光をp偏光と呼び、方位角 $\phi = 0^\circ$ 及び 180° 以外の方位に進む光の輝度に対しても、便宜上、この測定で得られる輝度をp偏光輝度と呼び議論を進めることをここに注記する。

3. 基本コンセプトと構造

3.1 p偏光有効利用の基本コンセプト

空気と透明部材との界面の様に屈折率が異なる物質どうしの界面では斜めに入射した光は屈折する。この際、p偏光とs偏光では透過率及び反射率が異なり、その透過率や反射率はフレネルの式から、また、その屈折角度はスネルの法則から求めることが出来る (付録に記載)。

図3はp偏光を有効活用するバックライトのコンセプト説明図であり、バックライトの一部構造を示す概略断面図である。屈折界面における透過率は、フレネルの式から求められる通り、p偏光がs偏光より高くなる条件が存在する。この条件を積極的に利用するため、プリズムシートはそのまま側にプリズム列を備え、プリズム稜線の方法は光源が近接配置され、光入射面となる導光板側面の長手方向 (x軸方向) に対し平行とする。この構造において導光板から出射し、プリズムシートをワンパスで通過する光を照明光として利用する。この際、導光板の表面、プリズムシートの裏面及びプリズム

列の表面の各界面において p 偏光の透過率が高くなることを相乗的に利用するため、プリズムシートは通過する光の偏光状態を維持できるように、光学的に等方な材料で構成する。以下、プリズムシートと拡散シートの詳細について、順に説明する。

図3 バックライトのコンセプト説明図 (断面概略図)
Fig.3 Explanatory drawing of the concept of our backlight.
(Cross sectional view.)

3.2 プリズムシートの構造

図4はバックライト部材の各界面における透過率の入射角依存性の計算値を示す。屈折率1.58は導光板及びプリズムシートの基材の屈折率、屈折率1.6はプリズムシートのプリズムの屈折率に概ね相当する値である。

図4 バックライト部材各界面での透過率の入射角依存性 (計算値)
Fig.4 Incident angle dependence of the transmittance of interface of backlight elements (calculated data).

図5は本開発で用いた導光板から出射する光の方位角 $\phi = 0^\circ$ における、p偏光輝度及びs偏光輝度の角度 (極角) 依存性を示す。導光板から出射するp偏光の輝度のピーク角度は約 74° である。ここで、図3に示す光線 (以下、主光線と呼ぶ) が導光板から 74° の角度で出射する光とすると、導光板表面への入射角度 θ_1 は 37.5° 、プリズムシート裏面への入射角度 θ_2 は 74° である。この光線のプリズムシートの基材内部での屈折角度 θ_3 は 37.5° 、プリズム内部での屈折角度 θ_4 は 36.9° となる。この光がプリズムの光源側の表面IS1に直接入射すると正面方向 (z軸方向) には向わないため、照明光として有効利用できなくなる。このためプリズム表面IS1の底

角 α は主光線が当たらない角度、すなわち 53.1° より大きくする必要がある。本検討では 5° 程度の尤度となる 58° を選択した。一方、光源とは反対側のプリズム表面IS2の底角 β は、主光線のプリズム表面IS2への入射角度 θ_5 が 32.1° となる 69° とした。この角度は、プリズムと空気との界面におけるブリュースター角 (32°) とほぼ一致する角度であり、p偏光の透過率をほぼ100%にすることができる角度である。図4に例示する通り、主光線の各界面における透過率はp偏光がs偏光より高く、特にプリズム表面IS2への入射角度はp偏光の透過率が100%となるブリュースター角に近い角度である。このため、プリズムシートから出射する光は、p偏光度が高くなる。

図5 導光板出射光の方位角 $\phi = 0^\circ$ におけるp偏光及びs偏光の輝度の角度依存性

Fig.5 Luminance distribution of the light guide plate for p-polarized and s-polarized light as a function of polar angle at $\phi = 0^\circ$.

さらにp偏光度を高める施策として、プリズムシートの裏面にプリズムシートの基材よりも屈折率が高い膜を一層設ける構造を考案した。図6はプリズムシートの断面構造を示す概略図である。プリズムシート裏面の屈折率が高くなると、空気との界面におけるブリュースター角はプリズムシート裏面への主光線の入射角度 $\theta_2 = 74^\circ$ に近づく。このためp偏光の透過率はより高く、s偏光の透過率はより低くなり、この界面を通過する光のp偏光度が向上する。しかし、プリズムシートの基材自体を高屈折率な材料にすることは、コストや生産性の面で現実的ではない。そこで、図6に示す通り、プリズムシートの基材裏面に高屈折率な薄膜を形成することを検討した。高屈折率膜は適切な膜厚を選択することで、空気と高屈折率膜との界面や、高屈折率膜と基材との界面での反射や透過による光学干渉によりp偏光の透過率を向上し、s偏光の透過率を抑制してp偏光度をより高くすることが可能になる。

図6 プリズムシートの断面概略図
Fig.6 Cross sectional view illustrating the prism sheet.

具体的には、高屈折率膜の膜厚 d を式(2)を満たす条件に

する．ここで、 λ は光の波長、 n_s は高屈折率膜の屈折率、 ε は高屈折率膜内の光の角度、 m は整数とする．

$$d = \lambda / (4 \cdot n_s \cdot \cos \varepsilon) \cdot (2m+1) \quad \cdots \cdots (2)$$

波長 λ は、可視光の波長、例えば比視感度が高い 550nm を考慮すれば良い．また、膜厚 d は、 m の値を 1 以上の整数として得られる値としても原理上は良いが、膜厚 d が大きくなると高屈折率膜の波長分散の影響により色の変化が生じる可能性があるため、本検討では $m=0$ で算出される値を膜厚 d として選択した．

図 7 にプリズムシートの裏面に入射角度 $\theta_s=74^\circ$ で入射する光の p 偏光の透過率及び p 偏光度と高屈折率膜の屈折率 n_s との関係を示す．この図は、高屈折率膜の膜厚 d を式 (2) から求められる値とし、マクスウェル方程式から導き出される特性マトリクスを用いた光学干渉を考慮した計算⁹⁾の結果である．p 偏光の透過率が增加すれば p 偏光輝度が向上する．さらに、s 偏光の反射が増加して、その透過率が低下すれば p 偏光度はより高くなる．例えば、二酸化チタンや硫化亜鉛で実現可能な屈折率 $n_s=2.35$ の場合、p 偏光の透過率が 99.8%、p 偏光度が 58.7% となる．計算上、p 偏光輝度の高さに対しては高屈折率膜の屈折率 n_s を 2.4 ぐらいにすることが理想だが、実用化に向けては、膜応力によるシートのそりや膜厚変動に対する感度など、信頼性や生産性を考慮した選択が望ましい．後述する通り、本評価では高屈折率膜として屈折率 n_s が 1.9 の材料を用いた．

図7 高屈折率膜の屈折率 n_s と p 偏光透過率及び p 偏光度の関係 (計算値)

Fig.7 Transmittance and polarization of p-polarized light vs refractive index of high refractive index layer (calculation data).

3.3 拡散シートの構造

図 8 は拡散シートの概略断面図である．本検討に用いた拡散シートは基材と基材上に配置したマイクロレンズアレイ及びマイクロレンズ表面を覆う平坦化膜から構成される．後述する通り、プリズムシート通過後の p 偏光輝度のピーク角度は約 10° であるため、拡散シートはこれを通過する光の偏光状態を維持しつつ、入射角度 θ_0 が約 10° である主光線の進行方向を正面方向へ補正する機能を備える．このため、その材質はプリズムシートと同様、光学的に等方なものとする．また、マイクロレンズは斜め方向に進む光の進行方向を正面

方向に変えるため、図示の通り偏心し、平均底角 γ が約 17° となる傾斜面を備える．平坦化膜は、マイクロレンズ (屈折率 1.56) よりも屈折率が低い透明体 (屈折率 1.40) で構成する．尚、マイクロレンズのピッチや大きさはプリズムシートとのモアレを抑制するためランダムとしている．

図8 拡散シートの断面概略図

Fig.8 Cross sectional view illustrating the diffusion sheet.

4. 評価結果

以下、評価結果について述べるが、初めにプリズムシートの作用効果を確認するため、導光板上にプリズムシートのみを配置した場合の結果を示し、その後、プリズムシート及び拡散シートを備える最終形態のバックライトの評価結果について述べる．

図9及び図10に導光板の上にプリズムシートのみを配置した状態の p 偏光輝度と s 偏光輝度の角度依存性 (方位角 $\phi=0^\circ$) を示す．図9はプリズムシート裏面に高屈折率膜が無い条件、図10は高屈折率膜がある条件の結果であり、両図ともに縦軸は、プリズムシート裏面に高屈折率膜が無い条件における s 偏光の正面輝度 (極角 0°) で規格化した相対輝度を示す．尚、本評価では高屈折率膜として酸化亜鉛93%+酸化アルミ7%の膜を用いた．その屈折率 n_s は1.9、膜厚 d は84nm である．両図から明らかとなり、プリズムシートを通過した光はプリズムシート裏面の高屈折率膜の有無に関わらず、s 偏光と比較して p 偏光がより高くなった．p 偏光輝度のピーク角度はいずれも約 10° であり、この角度における p 偏光輝度は s 偏光輝度と比較して、高屈折率膜が無い条件で1.9倍、高屈折率膜が有る条件で2.5倍となった．この差は、主に高屈折率膜が有る場合、プリズムシート裏面の s 偏光の反射率が高くなったためである．尚、高屈折率膜が有る条件のピーク輝度角度における p 偏光輝度の上昇率は約4%であった．

図9 プリズムシート通過後の p 偏光輝度及び s 偏光輝度の角度依存性 (高屈折率膜-無、方位角 $\phi=0^\circ$)

Fig.9 Luminance distribution for light output from a prism sheet without high refractive index layer for p-polarized light and s-polarized light as a function of polar angle at a fixed azimuth angle $\phi=0$ degree.

ライトの正面輝度(極角 0°)で規格化した相対輝度である。

図10 プリズムシート通過後の p 偏光輝度及び s 偏光輝度の角度依存性 (高屈折率膜-有, 方位角 $\phi=0^\circ$)

Fig.10 Luminance distribution for light output from a prism sheet with high refractive index layer for p-polarized light and s-polarized light as a function of polar angle at a fixed azimuth angle $\phi=0$ degree.

図11に導光板の上にプリズムシートのみを配置した状態における p 偏光度 ρ_p の角度依存性 (方位角 $\phi=0^\circ$) を示す. 図にはプリズムシート裏面に高屈折率膜が有る条件と無い条件を併記した. 高屈折率膜が有ることで p 偏光度は最大で50%を超えている. また, 高屈折率膜が無い場合でも p 偏光度は35%に達している. 高屈折率膜が有ることで p 偏光度は大幅に向上しているが, これは主としてプリズムシート裏面における s 偏光の反射率が増加し, s 偏光の輝度が低下したことが効いている. このため, プリズムシート裏面で反射した s 偏光をその偏光状態を解消し, 照明光として再利用することができれば p 偏光輝度がさらに向上する余地があると考えられる.

図11 プリズムシート通過後の p 偏光度の角度依存性 (方位角 $\phi=0^\circ$)

Fig.11 Degree of p-polarization of the light output from the prism sheet as a function of polar angle at a fixed azimuth angle $\phi=0$ degree.

次に, 導光板上にプリズムシートと拡散シートを配置して, 最終形態のバックライトとした場合の評価結果について述べる. 図12及び図13は, バックライトの p 偏光輝度の角度依存性を示す. 図12は方位角 $\phi=0^\circ$ における角度依存性, 図13は方位角 $\phi=90^\circ$ における角度依存性を示す. 両図共にプリズムシートの裏面に高屈折率膜が有る条件と無い条件に加え, 比較のため, 従来方式のバックライトに同じ電力を投入した時のデータを併記した. また, 両図の縦軸は共に従来方式のバック

図12 バックライト出射光の p 偏光輝度の角度依存性 (方位角 $\phi=0^\circ$)

Fig.12 Comparison of the normalized luminance for p-polarized light as a function of polar angle at a fixed azimuth angle $\phi=0$ degree.

ここで, 従来方式のバックライトとは, 導光板上に順に拡散シート1枚とプリズムシート2枚を配置したものである. プリズムシートは, 頂角が約 90° のプリズム列を有し, 2枚のプリズムシートはプリズム列をおもて側に向け, さらに互いのプリズムの稜線が直交するように配置したものである.

図9及び図10に示した通り, 本開発品ではプリズムシート通過後の方位角 $\phi=0^\circ$ 方向における p 偏光輝度のピーク角度は, 正面方向から $+10^\circ$ 程度ずれていた. しかし, 図12に示す通り, 上記拡散シートにより, そのピーク角度は -2° とほぼ正面方向に補正できた. また, 従来方式と比較して, 正面方向の p 偏光輝度は高屈折率膜が無い条件で30%, 高屈折率膜が有る条件で34%向上しており, さらに方位角 $\phi=0^\circ$ 方向ではほぼ全ての極角範囲で従来方式よりも高い p 偏光輝度が得られた. 一方, 方位角 $\phi=90^\circ$ 方向では, 正面方向 (極角 0°) を中心に, ほぼ対称の輝度分布となっており, 極角が $\pm 15^\circ$ より大きい範囲では, 従来方式よりも p 偏光輝度が低くなった.

図13 バックライト出射光の p 偏光輝度の角度依存性 (方位角 $\phi=90^\circ$)

Fig.13 Comparison of the normalized luminance for p-polarized light as a function of polar angle at a fixed azimuth angle $\phi=90$ degrees.

表1にバックライトの仕様を示す. 正面方向の p 偏光輝度は従来方式に対し, 高屈折率膜が有る場合に1.34倍(34%向上)

表1 バックライト仕様の比較
Table 1 Comparison of the backlight specifications.

Table 4. Comparison of the backlight specifications.				
	本開発品		従来方式	
	高屈折率膜有	高屈折率膜無		
光学特性	正面輝度 (p 偏光)	1.34	1.30	1.00
	p 偏光度 ($\theta = 0^\circ$)	37%	27%	0.3%
	輝度半値角 (p 偏光)	-16°~18°	-16°~18°	-18°~20°
	方位角 $\phi = 0^\circ$			
	輝度半値角 (p 偏光)	-18°~18°	-18°~18°	-26°~26°
	方位角 $\phi = 90^\circ$			
	正面輝度 (非偏光)	0.95	1.02	1.00
光学部材数	4	4	5	

となった。この際、従来方式では p 偏光度が 0.3% とほぼ非偏光だったのに対し、本開発品の p 偏光度は 37% であった。ここで、s 偏光を含む全ての光、すなわち、非偏光に対する正面輝度は高屈折率膜を有する本開発品は従来方式より 5% 低くなったが、出射光の偏光度を上げることで、特定の直線偏光 (p 偏光) に対する輝度については逆に高くできることを証明した。尚、輝度の半値角については、従来方式と比較すると、方位角 $\phi=0^\circ$ の方向で 4° 、方位角 $\phi=90^\circ$ の方向で 16° 狭くなった。このため、本開発品の正面輝度の向上効果については、出射光の偏光度向上とは別にバックライトの配光特性の違いが含まれていると考えられる。

また、従来方式のバックライトは、光学部材の数が反射シート、導光板、拡散シート及びプリズムシート 2 枚の計 5 つであるのに対し、本開発品では拡散シートに光の進行方向を補正する機能を兼用させることでプリズムシートが 1 枚となるため、薄型化に有利となっている。

尚、上記のとおり、本評価に用いたバックライトの有効照明領域は $66\text{mm} \times 37\text{mm}$ (対角 2.98 インチ、アスペクト比 16:9) であり、評価は主にその中心点で行った。有効照明領域の面内輝度分布については、従来のバックライトと同様、技術的に対処可能な設計事項だが、p 偏光度 ρ_p については、原理的な課題有無の確認が必要と考えられる。このため、導光板の中心から光源 (LED) 側に 20 mm 及びその反対側に 20 mm 離れた位置で p 偏光度 ρ_p を測定した。その結果、p 偏光度 ρ_p の差は 2% 程度であり、どちらか一方の側が高くなる等の特別な傾向は見られなかった。このため、少なくとも、今回評価に用いたような小型サイズ向けのバックライトであれば原理上の致命的な課題は無いと考えられる。

5. 検討

5.1 改良の余地について

本評価から導光板表面、プリズムシート裏面及びプリズムシート表面の各界面で p 偏光の透過率が高くなることを有効利用することで p 偏光度の高い光を出射するバックライトを実現できることを確認した。この結果、本開発品を LCD のバックライトとして採用し、液晶パネル裏面に備える偏光板の透過軸を p 偏光の偏光軸と一致させることで、同じ輝度であればバックライトの消費電力を約 30% 削減できる見通しを得た。但し、本開発品には更なる低電力化に向け、以下の 2 点を着目点とする改良の余地があると考えられる。

- ① 方位角 $\phi=0^\circ$ 方向において、表示装置としてはあまり必要がない角度範囲 ($\theta > 40^\circ$) の輝度が高い (表示

に有効利用されない光が多い)。

- ② s 偏光を含む全ての光 (非偏光) に対する輝度は高い。特に高屈折率膜が有る場合は、むしろ、正面輝度が低くなった。

①については、図 9 と図 10 に示す通り、拡散シートが無い状態、すなわち、プリズムシート通過時には極角 θ の絶対値が 30° より大きい角度範囲の不要光が特に大きくないことから、拡散シートを構成するマイクロレンズの形状の最適化を進めることで改善できる可能性がある。

②はプリズムシート裏面の s 偏光の反射率が高いことが原因と考えられる。例えば、高屈折率膜の屈折率 n_s が本評価で用いた 1.9 の場合には主光線の s 偏光に対する反射率は 60% である。対策としては 2 つのアプローチがある。一つは、導光板から出射する光の p 偏光度を向上して反射率が高い s 偏光を減らすこと。もう一つは、プリズムシート裏面で反射した s 偏光をその偏光状態を解消し、再び照明光として利用できる構造を構築することである。

5.2 他方式との比較

液晶パネルの裏面に備える偏光板での吸収損失を抑制する方法として、バックライトと液晶パネルの間に反射型偏光板を設ける方法がある^{1)~2)}。この方法は LCD の正面輝度を 1.35 倍に向上することができる。本開発品はこれに匹敵する 1.34 倍の正面輝度向上の効果が得られる。輝度の半値角は狭くなるが、反射型偏光板の様な追加の部材が不要であり、バックライト自体もより少ない構成部材で構成できるという利点がある。また、反射型偏光板を用いない方法として、特殊な構造や部材を備え高偏光度な光を出射するバックライトの検討が種々行われている^{3)~7)}。本開発品は、既存の構成部材の屈折界面において p 偏光の透過率が高くなることを積極的に利用するものであり、特殊な構造や部材を必要としない。このためコストや薄さの面で他の方式に対して優位性があると考えられる。

5.3 プリズムシートの基材について

上記の通り、本方式のバックライトでは、プリズムシートの基材として光学的に等方なフィルムを用いることが望ましい。これはプリズムシートを通過する光の偏光状態を維持することで高偏光度を達成するためである。本評価では基材として無延伸のポリカーボネートフィルムを用いた。尚、延伸フィルムであっても一軸延伸であれば、その遅相軸の角度を方位角 $\phi=0^\circ$ もしくは 90° となるように配置すれば偏光状態の変化は抑制できる。しかし、このようなフィルムは比較的高価である。このため、2 軸延伸したポリエチレンテレフ

タレート (PET) フィルムのように強度が高く、より安価な基材を用いることができれば工業的な優位性が高まる。そこで基材に PET フィルムを用いる場合の条件について検討した。

図 14 は導光板出射時の偏光を考慮していない輝度の角度特性を示す等輝度線図 (等輝度を明暗で表示) であり、全方位における極角 $0^{\circ} \sim 80^{\circ}$ の範囲の輝度分布を最大輝度で規格化した相対輝度で示したものである。導光板からの出射光は、方位角 $\phi = 0^{\circ}$ 、極角 $\theta = 72^{\circ}$ 、すなわち yz 平面 (xyz 軸については、図 2 参照) 内で輝度が最大となる。また、光が方位角 $\phi = \pm 20^{\circ}$ 、極角 $\theta = 65^{\circ} \sim 80^{\circ}$ の範囲に集中しているため、この角度範囲を特に考慮することにする。

ここで、プリズムシートの基材として厚さ $50\mu\text{m}$ 、主屈折率がそれぞれ $n_x=1.68, n_y=1.63, n_z=1.47$ である 2 軸性の PET フィルムを想定する。二軸性の透明体では、斜め方向に進行する光に対して、一軸性の透明体のように単純に考えることができない。そこで、二軸性の PET フィルムに全方位から p 偏光 (本稿では、 yx 面内、即ち、方位角 $0^{\circ} - 180^{\circ}$ 方向に振動方向を有する直線偏光) が入射したときに、PET フィルムを透過した光の偏光状態がどのように変化するかを市販ソフト (LCD Master : Shintech 社製) を用いて計算した。具体的には、PET フィルムを透過した光について p 偏光成分の割合 (p 偏光透過率) を計算し、評価した。

図 14 導光板出射時の輝度の角度特性

Fig.14 Polar angle properties of luminance of the light guide plate.

図 15 に計算結果を示す。図 15 は上記 PET フィルムに p 偏光を入射し、通過したときの p 偏光成分の割合 (p 偏光透過率) を示す等透過率線図 (等透過率を明暗で表示) である。図 15 (a), (b), (c) はそれぞれ PET フィルムの遅相軸を $\phi = 0^{\circ}, 45^{\circ}, 90^{\circ}$ とした場合の計算結果である。図 15 (a) に示す通り、遅相軸を $\phi = 0^{\circ}$ とした場合、 p 偏光透過率は方位角 $\phi = 0^{\circ}$ の軸上以外の考慮すべき角度範囲 (方位角 $\phi = \pm 20^{\circ}$ 、極角 $\theta = 65^{\circ} \sim 80^{\circ}$) において低下が見られる。また、図 15 (b) に示す通り、遅相軸を $\phi = 45^{\circ}$ とした場合、 p 偏光透過率は特に方位角 ϕ のマイナス側 ($\phi = 340^{\circ} \sim 360^{\circ} (=0^{\circ})$) の領域で低下している。一方、図 15 (c) に示す通り、遅相軸を $\phi = 90^{\circ}$ とした場合、考慮すべき角度範囲の p 偏光透過率の低下が小さい。このため、プリズムシートの基材として二軸性のフィルムを使う場合、その遅相軸を方位角 $\phi = 90^{\circ}$ 、すなわちプリズムの稜線と平行な方向とすれば、等方性のフィルムを用いる場合に匹敵する性能が期待できる。

(a) 遅相軸 $\phi = 0^{\circ}$

(a) Slow axis of base film $\phi = 0^{\circ}$.

(b) 遅相軸 $\phi = 45^{\circ}$

(b) Slow axis of base film $\phi = 45^{\circ}$.

(c) 遅相軸 $\phi = 90^{\circ}$

(c) Slow axis of base film $\phi = 90^{\circ}$.

図 15 基材 (PET フィルム) の p 偏光透過率分布 (計算値)

Fig.15 Transmittance properties of p -polarized light of the base film (calculated data).

6. 結言

液晶ディスプレイの低電力化のため、所定の直線偏光成分をより多く出射するバックライトを検討した。この際、複雑な構造や特殊な部材を新たに導入することなく、既存構成部材の各界面における屈折において、 p 偏光の透過率が s 偏光より高くなることを積極的に利用することを基本コンセプトとした。具体的には①プリズムシートとしてプリズム面をおもて面に備え、主光線がプリズム面に対しブリュースター角で入射するように非対称なプリズム断面形状を採用する。②プリズムシートの裏面に p 偏光の透過率が高くなると共に s 偏光の反射率が高くなる条件で高屈折率膜を設ける。③プリズムシートと拡散シートの基材に偏光状態を維持するため、光学的に等方なフィルムを用いる。これら①～③の要件を備えるバックライトを試作、評価した結果、 p 偏光度 37% の部分偏光を出射するバックライトを実現できることを確認した。こ

のバックライトを液晶ディスプレイに採用した場合、反射型偏光板を適用した場合に匹敵する正面輝度の向上効果（1.34倍）が得られる。また、本バックライトは特殊な構造や部材を必要とせず、より少ない部材で実現できるため、コストや薄さの面で優位性があると考えられる。

謝辞

本研究の遂行にあたり、バックライトの設計、試作及び評価に多大なる貢献をして頂いた株式会社ジャパンディスプレイの故白石恭久氏に深く感謝の意を表します。

本研究で使用したプリズムシート及び拡散シートの試作及びサンプルの提供をして頂いた日立マクセル株式会社（当時）の小川 容一氏、石原 信康氏、佐藤暢高氏に深く感謝の意を表します。

付録

付図1に例示する通り、屈折率が異なる透明媒体の界面に入射する光は屈折する。ここで、入射側透明体の屈折率を n_0 、屈折側透明体の屈折率を n_1 、入射角度を ξ_0 、屈折角度を ξ_1 、p 偏光の振幅透過率を t_p 、振幅反射率を r_p 、s 偏光の振幅透過率を t_s 、振幅反射率を r_s 、エネルギー透過率を T 、エネルギー反射率を R とすると、屈折角度はスネルの法則（式 A-1）、透過率及び反射率はフレネルの式（式 A-1～7）から求めることが出来る。

付図1 入射光の反射と屈折

Fig. A-1 Reflection and refraction of the incident light.

$$n_0 \sin \xi_0 = n_1 \sin \xi_1 \dots \dots \dots (A-1)$$

$$t_p = \frac{2n_0 \cos \xi_0}{n_1 \cos \xi_0 + n_0 \cos \xi_1} \dots \dots \dots (A-2)$$

$$t_s = \frac{2n_0 \cos \xi_0}{n_0 \cos \xi_0 + n_1 \cos \xi_1} \dots \dots \dots (A-3)$$

$$r_p = \frac{n_1 \cos \xi_0 - n_0 \cos \xi_1}{n_1 \cos \xi_0 + n_0 \cos \xi_1} \dots \dots \dots (A-4)$$

$$r_s = \frac{n_0 \cos \xi_0 - n_1 \cos \xi_1}{n_1 \cos \xi_0 + n_0 \cos \xi_1} \dots \dots \dots (A-5)$$

$$T_{s,p} = \frac{\tan \xi_0}{\tan \xi_1} t_{s,p}^2 \dots \dots \dots (A-6)$$

$$R_{s,p} = r_{s,p}^2 \dots \dots \dots (A-7)$$

参考文献

- 1) D. J. Broer, J. Lub and G. N. Mol, "Wide-band reflective polarizers from cholesteric polymer networks with a pitch gradient", Nature(London) 378, pp. 467-469 (1995).
- 2) M. F. Weber, C. A. Stover, L. R. Gilbert, T. J. Nevitt and A. J. Ouderkerk, "Giant Birefringent Optics in Multilayer Polymer Mirrors",

Science 287, pp. 2451-2456 (2000).

3) Z. Pang and L. Li, "Novel High Efficiency Polarizing Backlight System with a Polarizing Beam Splitter", SID Symposium Digest 30, pp.916-919 (1999).

4) H. J. B. Jagt, H. J. Cornelissen, D. J. Broer and C. W. M. Bastiaansen, "Micro-structured Polymeric Linearly Polarized Light Emitting Lightguide for LCD illumination", SID Symposium Digest 33, pp.1236-1239 (2002).

5) H. J. Cornelissen, H. P. M. Huck, D. J. Broer, S. J. Picken, C. W. M. Bastiaansen, E. Erdhuisen and N. Masssant, "Polarized Light LCD Backlight Based on Liquid Crystalline Polymer Film: A New Manufacturing Process", SID Symposium Digest 35, pp.1181-1181 (2004).

6) S. Hwang, Y. Kim, Y. Kim, S. Nam and S. Lee "Highly Efficient Backlight Unit with a Polarization-Separating Anisotropic Layer", SID Symposium Digest 38, pp.476-479 (2007).

7) Z. Luo, Y. W. Cheng and S. T. Wu, "Enhancing LCD Optical Efficiency with a Linearly Polarized Backlight and Polarization-preserving Light Guide Plate", SID Symposium Digest 45, pp.836-838 (2014).

8) M. Adachi, Y. Shiraishi, S. Nishizawa, Y. Ogawa and N. Ishihara, "High Efficiency Backlight Effectively Using P-polarized Light", SID Symposium Digest 42, pp.1423-1427 (2011).

9) 中村正行:「E x c e l V B Aによる光学多層膜のシミュレーション技術と最適設計」, (2002).

(受付日 2019 年 6 月 28 日／採録日 2019 年 10 月 30 日)

足立 昌哉（非会員）

（株）ジャパンディスプレイ

〒101-004 東京都港区西新橋 3-7-1

1993 年（株）日立製作所入社、日立研究所に勤務。2014 年（株）ジャパンディスプレイに転籍。有機 EL、液晶、MEMS などの表示デバイスの研究開発に従事。現在、東北大学大学院工学研究科博士課程後期在学中。SID 会員、日本機械学会会員。

西澤 重喜（非会員）

元（株）日立ディスプレイズ

1980 年京都大学大学院工学研究科修士課程修了、1987 年 Cornell 大学大学院電気工学科修士課程(米国)修了。1980 年 4 月（株）日立製作所に入社し、半導体、液晶ディスプレイの研究開発に従事。現在は、神戸大学にて産学連携の国家プロジェクトに従事。

島崎 勝輔（非会員）

マクセル（株）

〒822-1296 福岡県田川郡福智町伊方4680

1985年 日立マクセル（株）入社、筑波研究所（現開発本部）にて光磁気ディスク、光学シートなどの光学デバイスの研究開発に従事。現在、ライフソリューション事業本部に勤務。博士（工学）。