

# 多機能光学シートの設計と試作

住友化学(株) 情報電子化学品研究所  
金 起 満\*  
筑波研究所  
窪 田 雅 明  
情報電子化学品研究所  
中 塚 木代春

## Design and Fabrication of a Multifunctional Light-Guide Plate for LCDs

Sumitomo Chemical Co., Ltd.  
IT-Related Chemicals Research Laboratory  
Kiman KIM  
Tsukuba Research Laboratory  
Masaaki KUBOTA  
IT-Related Chemicals Research Laboratory  
Kiyoharu NAKATSUKA

We developed a two-step design method of diffraction optical elements. In this method diffraction angle and polarization splitting property are adjusted separately by different manners. We also proposed a multifunctional light-guide plate for LCDs that combines the functions of light-guide plate, prism sheet, diffusion sheet, and polarization splitting film. The multifunctional light-guide plate was designed by this two-step design method and was fabricated. The properties of fabricated multifunctional light-guide plate substantially met the design targets.

### はじめに

テレビ、コンピュータ、電話などのディスプレイとしての液晶表示装置の普及が著しい。この液晶表示装置には特性ならびに光利用効率向上の目的で多数のフィルムやシートが使われている。バックライトだけでも、導光板、反射シート、プリズムシート、拡散シート、輝度向上フィルム等が各1~2枚使用されている。一方、省エネルギーやエコロジーならびに低コスト化の面からは部品点数の削減が求められる。導光板、プリズムシート、拡散シート、輝度向上フィルムを一枚の導光板にまとめた“多機能光学シート”の開発を行い所期の特性を得ることができた<sup>1)</sup>ので、概要を以下に紹介する。

### 設計

多機能光学シートは薄型、軽量、堅牢、低コストを実現するために導光板、プリズムシート、拡散シート、輝度向上フィルムを一枚の導光板にまとめたもので

あるが、各シートまたはフィルムの機能は適切に保たなければならない。できれば一層の特性向上を図りたい。

これらの機能は

- 1) 導光板：冷陰極蛍光灯 (CCFL) や発光ダイオード (LED) など線状または点状光源を均一な面状光源にする
- 2) プリズムシート：導光板の出射光を集光して正面輝度を高める
- 3) 拡散シート：導光板の反射構造やプリズムシートの形状などによる輝度ムラ解消
- 4) 輝度向上フィルム：自然光から $p$ 偏光と $s$ 偏光とを分離して、偏光板で吸収される偏光成分をリサイクルして光利用効率を高める

である。

導光板と輝度向上フィルムとを一体化する方法として、我々は導光板の出射面と対向する面に特定の角度の溝を付けた一種のプリズム集合体を提案した<sup>2)</sup>。また導光板を多層構造にすることも提案されている<sup>3), 4)</sup>。いずれもプリュースター角での界面反射を利用して偏光分離をする構造であるが、導光板を伝播する光の指向性が高くないと偏光分離が十分には行えない。

\*現職：東友ファインケム(株)

金属製のサブ波長周期の回折格子による wire grid<sup>5)</sup>も偏光分離の目的に使われるが、これも入射光の角度依存性が強く導光板に用いるには改良が必要である。導光板と一体化するため、我々は通常の wire grid の構成とは逆に金属の wire を太く厚くする方法を提案した<sup>6)</sup>。しかしながらプリズムシートや拡散シートの機能を統合するには未だ困難がある。

holographic 回折格子を応用すると導光板、プリズムシート、拡散シート、輝度向上フィルムすべてを一体化できる可能性がある。holographic 格子は二光束干渉により作成する方法と計算により作成する方法 (computer generated hologram, CGH) とがある。二光束干渉法は簡単であるが、hologram 作製装置の構成上の制約から上記すべての機能を盛り込むには困難をとまなう。導光板と輝度向上フィルムとを一体化する程度が限界と考えられる<sup>7)</sup>。後方散乱を最小化した上で、前方散乱の角度分布を制御した拡散フィルムも二光束干渉の holography で簡単に作製でき<sup>8)</sup>、これを応用して拡散板およびプリズムシートを一体化した導光板が提案されている<sup>9)</sup>が、この場合には偏光分離機能は期待されていない。一方、CGH は作製装置の制約がないので種々の機能を一体化することが可能である。導光板、プリズムシート、輝度向上フィルムを一体化し、さらにカラーフィルタの機能をも加えたものが提案されている<sup>10)</sup>。カラーフィルタを CGH などの回折素子で作製すると光利用効率が最大で約3倍向上することが期待できる。偏光分離に関しては出射方向が入射光の方向と直交する回折光の偏光度が最大になることを利用している<sup>7), 10)</sup>。しかしながら、この方式は入射光が指向性の高い平行光であることが必要である。また holographic 格子は speckle noise をはじめ種々の noise 発生の防止が困難であるうえに、入射光 (holography では再生光という) が hologram 作製時の参照光とは異なり非干渉性の白色光である点にも起因し、所期の特性を得ることが極めて難しい。

#### <二段階設計法>

noise のない均一な出射光を得るには hologram のような複雑な格子ではなく、単純な形状の回折格子が適すると考えられる。伝播する光と導光板の光出射面の法線とのなす角 (光出射面への入射角という) は導光板材料の屈折率で決まり、この屈折率を 1.45 とすると、光出射面への入射角は約 44 ~ 90 度の範囲となる。この入射光を ±2 次程度の低次回折光のみを生ずる回折格子で出射させると、出射角を ±23 度 ((90-44)/2 度) 程度にできることが期待される。一方、輝度向上のための偏光分離は回折格子の周期のみならず幅と厚みの影響が大である。したがって、

出射角と偏光分離性能とをある程度独立に制御できる可能性がある。我々はこの点に着目して、導光板、プリズムシート、拡散シート、輝度向上フィルムすべてを一体化した “多機能光学シート” の二段階設計法を開発した<sup>1)</sup>。

#### 1. 目標

多機能光学シートは導光板、プリズムシート、拡散シート、輝度向上フィルムすべてを一体化したものであり、これに CCFL や LED などの光源をセットして反射シートによるカバーを取り付ければバックライトシステムが完成するものである。従って多機能光学シートは完成したバックライトの特性で評価すべきである。絶対的な表面輝度や色度など CCFL や LED などの光源で決まる特性は除外すると、バックライトの主要な特性は、出射角度範囲、光利用効率、均斉度である。これらの特性を現行品と同等以上にすることを目標とした。ただし光利用効率の正確なシミュレーションが困難であるため、これを偏光分離度 ( $s/p$  比) すなわち出射光の  $s$  偏光と  $p$  偏光の強度比で代用することとした。各目標値は、

1) 出射角度範囲: -20 ~ 20 度

2) 偏光分離度: 19 以上

3) 均斉度: 70% 以上

である。ここで、偏光分離度 19 は偏光度に直すと 90% である。

#### 2. シミュレーション方法

出射角 (1) と偏光分離性能 (2) とをある程度独立に制御できるものとしてこれらを別々に最適化する二段階設計法を採用する。

##### (1) 出射角の制御

光の入射角  $i$  と出射角  $d$  とを、それぞれ入射光および回折光とが導光板の光出射面の法線となす角で表す。導光板および光出射側の材質 (透過回折光の場合は空気、反射の場合は導光板) の屈折率をそれぞれ  $n_1$  よび  $n_2$ 、光の波長を  $\lambda$ 、回折格子の周期をとすると、入射角  $i$  と出射角  $d$  との関係は次の grating equation で表される<sup>11)</sup>。

$$\lambda = \frac{m \cdot \lambda}{n_2 \cdot \sin d - n_1 \cdot \sin i} \quad (\text{Eq. 1})$$

または

$$\sin d = \frac{m \cdot \lambda + n_1 \cdot \sin i}{n_2 \cdot \lambda} \quad (\text{Eq. 2})$$

ここで  $m$  は回折次数を表す整数である。回折次数がゼロすなわち  $m=0$  のときには Eq. 2 は Snell の法則を

表す式と同じになり、ゼロ次回折光の出射方向は屈折の法則または反射の法則に従う。Eq. 2で右辺が1.0を超えると  $d$  が存在せず、伝播する回折光は発生しない。光の波長 に対して格子の周期 を適当に選ぶと、高次の回折光が出ないようにすることができる。特にゼロ次回折光のみが出るようにしたものをゼロ次回折格子 (zero order grating) といい、wire grid は動作波長の範囲内でゼロ次回折格子になっている。

この式は入射角と回折角との関係を示すだけで、回折光の強度や偏光に関しては何ら情報がない。偏光の方向によって回折光の強度または振幅が異なることがあっても、回折角は変化しないことを表している。またこの grating equation には導光板および出射側の媒質の屈折率のみで、格子自体の屈折率が入っていない。このことは格子自体が透明な誘電体であっても金属その他の光吸収媒質であっても回折光の出射角度は変わらないということである。このことが二段階設計法の根拠の一つになっている。この第一段階では回折光の出射角が  $-20 \sim 20$  度の範囲になるように格子の周期 のみを調節する。

(2) 偏光分離性能の制御

光の振動方向すなわち偏光を無視したスカラー波としての取り扱いでは不十分であり、電磁波として計算することが必要である。Maxwellの方程式を解くことが必要であるが、球形粒子による光散乱のMieの式などごく限られた場合以外には解析解が見つかっておらず、数値計算を実行することになる。ここでは周期構造を持った回折格子の解析に適すると考えられるRCWA (Rigorous Coupled Wave Analysis)<sup>12)</sup> を利用する。直線状に伸びる回折格子を直角に切った断面内ではどの方向から入射する光もすべての回折光がこの平面内に発生する。この条件では空間を2次元の平面に限定することができる。このとき偏光は電界の振動面がこの平面に平行 (parallel) な  $p$  偏光と直角 (perpendicular、独語でsenkrecht) の  $s$  偏光に分けることができる。入射光が回折格子を直角に切った断面内に無いときには回折光は平面内には収まらず、3次元のコーン状に広がる。従ってこの状態では  $p$ 、 $s$  偏光の分類もできない。このように回折光が3次元的に広がる回折を conical diffraction という<sup>13)</sup>。ここでは広く用いられている  $p$ 、 $s$  偏光の分類が可能で2次元の計算を行うこととする。

この第二段階では、第一段階で最適化した格子の周期 を変えることなく、格子の幅と高さならびに屈折率を調節して偏光分離度と回折効率とを最適化する。

3. 設計

光源にはLEDを用いることとする。出射光の波長

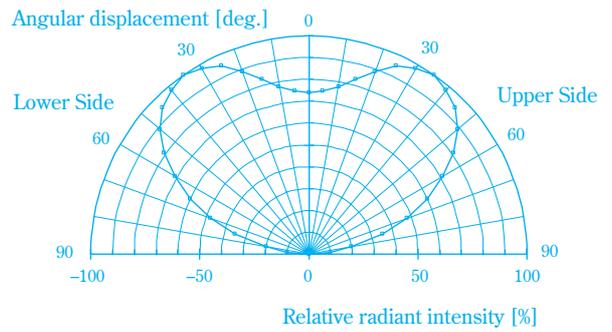


Fig. 1 The angular distribution of the LED used for the developed Multi Functional Light Guide Plate.

は555nmで半値幅が40nmであり、強度の角度分布はFig. 1に示すcardioid状のものである。

導光板は一般にPMMAが用いられているが、フォトリソグラフィおよびエッチングなどの微細加工耐性が高いことからここでは屈折率1.45の石英板を用いることとする。この石英板の光出射面およびそれに対向する面(裏面)は平行であり、くさび形にはなっていないものを用いる。屈折率が1.45であるから全反射角は43.6度であり、光源からの光の導光板の入射端面での入射角は  $\pm 43.6$  度の範囲にある。これはFig. 2に示すように導光板の入射面と直交する光出射面に対しては46.4 ~ 90度の入射角になり、導光板内を全反射しながら伝播することになる。

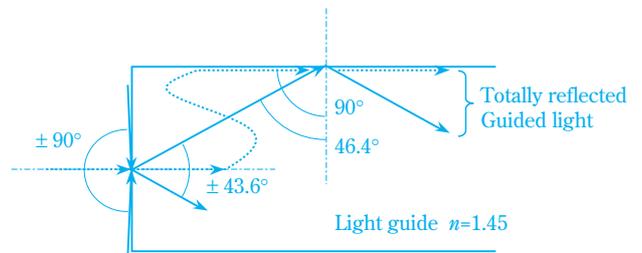
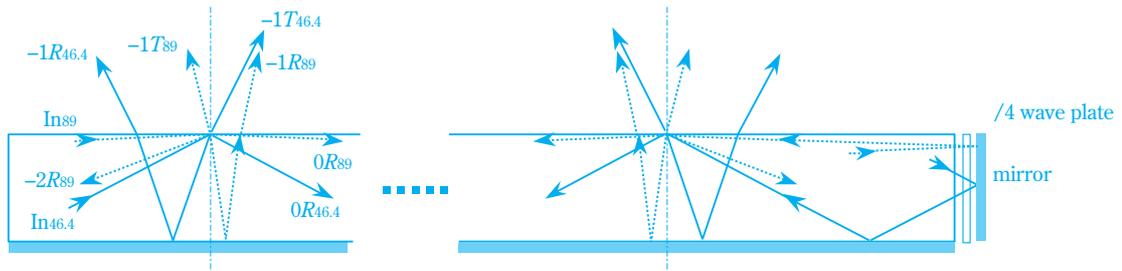


Fig. 2 Incident angles at entrance plane and exit plane of light guide plate.

(1) gratingの周期 の設計

導光板の中を伝播する光の光出射面すなわち grating面への入射角は46.4 ~ 90度の範囲にあるから、この光を  $\pm 20$  度の出射角で外部へ回折するようにすればよい。grating equationから周期 は  $0.420 \mu\text{m}$  と計算される。入射光、回折光の詳細をFig. 3およびTable 1に示す。透過回折光は-1次のみでゼロ次の透過回折光は現れない。反射回折光は0、-1、-2次が出現する。このうち0および-2次の反射回折光は光出射面ならびに裏面への入射角が全反射角を超えているから、再び導光板内を伝播して行く。-1次の反射回



**Fig. 3** Incident angle and diffraction angle  
Subscripts are incident or diffraction angles, respectively. *T* and *R* indicate transmitted and reflected waves, respectively. 1, 0, -2 depict diffraction orders.

**Table 1** The diffraction angles diffracted by the multifunctional light guide plate

<i>i</i> [deg]	<i>d</i> [deg]							
	1 <i>T</i>	0 <i>T</i>	-1 <i>T</i>	-2 <i>T</i>	1 <i>R</i>	0 <i>R</i>	-1 <i>R</i>	-2 <i>R</i>
46.4	none	none	15.8	none	none	46.4	-10.8	none
89.0	none	none	-7.4	none	none	89.0	5.1	-55.4

折光は裏面で反射されて再びgratingに入射する。このときの入射角は-10.8 ~ 5.1度の範囲にあって、透過回折光はゼロ次のみであり、-15.8 ~ 7.4度の範囲の出射角で透過して行く。以上、入射角46.4 ~ 90度でgratingに入射、回折して光取り出し面から導光板の外へ出る光はすべて±15.8度の出射角の範囲内に入っている。これは目標の出射角範囲±20度を満足している。

(2) gratingの屈折率、幅、高さの設計

まず偏光分離度 (polarization splitting ratio、*s/p* ratio) *PSR*とgrating面からの光出射率*E<sub>e</sub>*を定義する。grating面から出射する回折光は前記のように-1次透過光、-1次反射光のみである。したがって、次のように定義する。

$$PSR = \frac{E_{-1R}^s + E_{-1T}^s}{E_{-1R}^p + E_{-1T}^p} \quad (\text{Eq. 3})$$

$$E_e = \frac{E_{-1R}^s + E_{-1T}^s + E_{-1R}^p + E_{-1T}^p}{2}$$

ここに*E*は各次数の反射および透過回折光の回折効率であり、前記のRCWAによって計算できる。*E*のsubscriptは回折次数を表し、*R*および*T*はそれぞれ反射および透過回折光を示す。*s*および*p*偏光はそれぞれsuperscriptの*s*および*p*で指定する。

LED光源は導光板の光入射面に密着して取り付けられるものとする。こうするとFig. 1に示す強度分布を持った球面波状の光が導光板に入射することになる。これが導光板内で歪んだ球面波として回折の計算を行うのが一般的な方法であるが、こうすると入射光、

反射光、各次数の反射回折光相互の干渉による干渉縞が現れる。しかし実際のLEDは干渉性が高くなく実質的にincoherent光であるからこれらの干渉縞はノイズと見なさなければならない。そこで我々はこの干渉縞が生じない計算法を開発した<sup>14)</sup>。相互干渉が生じない条件で計算できるように空間や入射光を分解して回折光の強度分布を求め、これらを加算する方法である。ここでは球面波など任意の波面形状の光を方向と振幅の異なる複数の平面波に分解して、各平面波の回折光の回折効率*E*を求めてこの*E*の加算を行った。gratingへ入射する平面波の入射角は10度間隔でとり、その振幅はFig. 1から求めた。

次にgrating材料は実質的に吸収のない誘電体として、その屈折率の影響を調べた。grating材料の屈折率を1.50、1.75、および2.05として出射光の偏光分離度*PSR*を3、7、11、15、および19以上としたときの光出射率*E<sub>e</sub>*の最大値を計算した。この結果はTable 2に示すように、偏光分離度*PSR*を目標の19以上にするためにはgrating材料の屈折率を2.05またはそれ以上にすることが必要であった。この屈折率2.05は酸

**Table 2** *s/p* ratio and maximum light extraction efficiency of gratings having several refractive indices

<i>s/p</i> ratio	Light extraction efficiency		
	<i>n</i> = 1.50	<i>n</i> = 1.75	<i>n</i> = 2.05
> 3	0.18	0.51	0.54
> 7	0.09	0.28	0.37
> 11	-	0.17	0.31
> 15	-	-	0.30
> 19	-	-	0.24

化タンタル ( $Ta_2O_5$ ) の値である。2.50程度の高屈折率を持つ酸化チタンを用いるとさらに高性能が得られる可能性があるが、微細加工の容易さから今回は酸化タンタルを選んだ。

光波長555nm、基板の屈折率1.45、gratingの屈折率2.05、周期 $0.420\mu m$ のときgratingの幅と高さをいずれも $0.065\mu m$ としたとき、偏光分離度PSRが22.6で光出射率 $E_e$ が0.112となりこれが最適値であった。ところがTable 3に示す誤差がgratingの製作工程で生じる可能性がある。ここでover etchingはgrating材料の酸化タンタルのetchingが基板の石英にまで食い込む現象である。予想される最大の誤差が生じたときの特性の変化はTable 3に示すようなものである。over etchingが最大限に達したときには偏光分離度PSRが目標値に達しなくなるが、幅と高さの目標値は上記 $0.065\mu m$ のままで良いことがわかった。

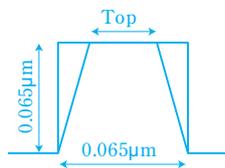
**Table 3** Fabrication error and grating characteristics

		PSR	$E_e$
width [ $\mu m$ ]	$\pm 0.015$	20.4 ~ 22.6	0.048 ~ 0.192
height [ $\mu m$ ]	$\pm 0.010$		
over etching [ $\mu m$ ]	0.07	13.9 ~ 22.6	0.087 ~ 0.192

さらに加工誤差によってgratingの形状が鈍ることも予想される。この影響を調べるため、矩形が鈍って台形になったときの偏光分離度PSRおよび光出射率 $E_e$ を計算した。結果はTable 4に示すようにPSRにはほとんど影響が無いが、台形の上部が狭くなるほど $E_e$ が低下することが知られた。

**Table 4** Effect of trapezium deformation of grating by fabrication errors

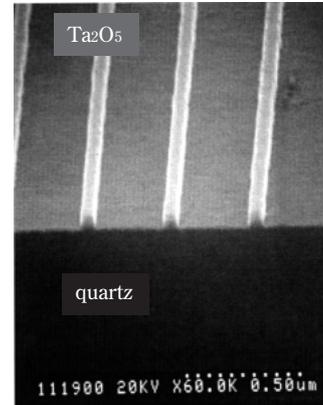
Top [ $\mu m$ ]	PSR	$E_e$
0.065	22.56	0.112
0.060	22.51	0.105
0.055	22.17	0.095
0.050	21.87	0.087



**製作**

設計した多機能光学シートをX線リソグラフィーを利用したエッチングにより試作した。100 × 100mmで厚みが1mmの石英基板の中心10 × 10mmの部分にgratingを形成した。できあがったgratingの走査型電

子顕微鏡 (SEM) 写真をFig. 4に示す。また各部の寸法の測定結果をTable 5に示す。予想した最大値の1/5 ~ 1/4の誤差で仕上がっていた。また形状のなまりはほとんど認められなかった。

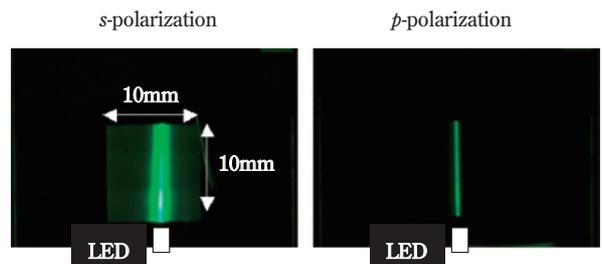


**Fig. 4** SEM image of the fabricated Multifunctional Light Guide Plate

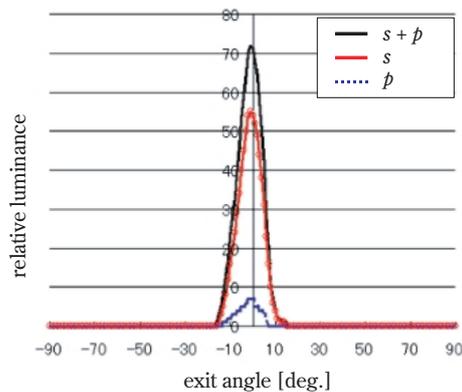
**Table 5** Measured size of fabricated grating

	size [ $\mu m$ ]	error [ $\mu m$ ]
period [ $\mu m$ ]	0.420	$\pm 0.000$
width [ $\mu m$ ]	0.065 ~ 0.069	+ 0.004
height [ $\mu m$ ]	0.065	$\pm 0.000$
over etching [ $\mu m$ ]	0.013	+ 0.013

試作した多機能光学シートにLEDを取り付け、裏面には反射率99%の鏡面反射板を取り付けた。光入射面に対向する面はopenのままとした。光出射面上に偏光フィルムを重ねてs、p偏光の明るさとその均一度とを見たのがFig. 5である。中央部の輝度の角度分布の測定結果をFig. 6に示す。LEDの取り付け誤差の関係で輝度のピークが約1度ずれているが、設計通り $\pm 15$ 度の範囲に出射している。偏光分離度は設計値23.0 (偏光度90.7%) に対し9.3 (偏光度80.4%)



**Fig. 5** Polarization splitting characteristics and luminance uniformity of the fabricated Multifunctional Light Guide Plate



**Fig. 6** Angular distribution of exit light from the fabricated Multifunctional Light Guide Plate

であった。この偏光度の設計値からのズレはconical diffractionの影響と考えているが、3次元測定と計算を行う必要がある。

### おわりに

出射角度範囲と偏光分離度を実質的に独立に調整する二段階設計法を開発して、薄型、軽量、堅牢、低コストを実現するために導光板、プリズムシート、拡散シート、輝度向上フィルムを一枚の導光板にまとめた多機能光学シートを設計・試作した。試作した多機能光学シートはほぼ設計値通りの特性を示した。しかしながら、(1)偏光分離度の設計値との相違がやや大きい、(2)微細加工の限界から大型のものが作り難い、(3)波長555nmのgreenの光に対応して設計したがredおよびblueには対応していないなどの問題がある。今後これらの問題の解決を行ってゆく必要がある。(1)に関しては3次元RCWAによって改善できるものと考えている。(2)の欠点は小型のエッジライト型バックライトをタイル状に貼り合わせて大型のLEDバックライトを作る場合には問題にならず、

TV用バックライトとして利用できる可能性がある。(3)に関してはred、green、blueなど複数の回折格子を重畳して作成する方法を開発し<sup>15)</sup>、実用化の検討を行っている。

### 引用文献

- 1) 住友化学(株), 特願2007-296977 .
- 2) 住友化学(株), 特開2005-259686 (2005) .
- 3) インターナショナル・ビジネス・マシーンス・コーポレーション, 特開平9-005739 (1997) .
- 4) H. Tanase, J. Mamiya and M. Suzuki, "A new back-lighting system using a polarizing light pipe", *IBM Journal of Research and Development*, **42** (3/4), (1998) .
- 5) Sony Co., U.S.Patent 5748368 (1998) .
- 6) S. Banerjee, K. Nakatsuka, "Compact design of light guides using metal grating based polarizing optical controller element," *IDW'07 (The 14th International Display Workshops)*, (2007) .
- 7) 旭硝子(株), 特開平11-281978 (1999) .
- 8) C. Gu, J. Lien, F. Dai and J. Hong, *J. Opt. Soc. Am. A*, **13**(8), 1704 (1996) .
- 9) S. Nam, M. G. Lee, J. H. Kim, J. H. Min, J. S. Choi, S. M. Lee, and H. Y. Choi, "Hologram based light-guide plate for LCD-backlights," *IDW'01 (The 8th International Display Workshops)*, (2001).
- 10) 大日本印刷(株), 特許第3608756号 (2005) .
- 11) M. Born and E. Wolf, "Principles of Optics", Pergamon Press, 3rd Edition (1964) .
- 12) M. G. Moharam and T. K. Gaylord, *J. Opt. Soc. Am.*, **71**, 811 (1981) .
- 13) E. N. Glytsis and T. K. Gaylord, *J. Opt. Soc. Am. A*, **4** (11), 2061 (1987) .
- 14) 住友化学(株), 特開2005-300697 (2005) .
- 15) 住友化学(株), 特願2008-310784 .



**金 起満**

*Kimán KIM*

住友化学株式会社  
情報電子化学品研究所  
研究員  
(現職：東友ファインケム株式会社)



**中塚 木代春**

*Kiyoharu NAKATSUKA*

住友化学株式会社  
情報電子化学品研究所  
シニア・リサーチ・スペシャリスト



**窪田 雅明**

*Masaaki KUBOTA*

住友化学株式会社  
筑波研究所  
主任研究員