フレキシブルディスプレイ用透明導電性フィルム

花 田 亨*

1. はじめに

近年のフラットパネルディスプレイ市場の成長は著しく、経済産業省の発表によると 2010 年に 12 兆円にもなると予想されている。2004 年度においても、デスクトップ PC やノートパソコン用の液晶モニターが堅調に推移し、薄型 TV 用として LCD, PDP, プロジェクターの需要が急激に拡大した。さらには、次世代薄型ディスプレイとして有望視されている有機 EL の市場も 2005 年から本格的に立ち上がり、今後大きく成長すると予測されている。また、近年のインターネットの急激な発展とモバイル機器の高性能化、さらにはデジタル家電の普及によって、ユビキタス社会の実現が本格化しており、これを支えるキーデバイスとしてフラットパネルディスプレイはますますの発展が期待される。このディスプレイに必要な部材の多くを日本の材料メーカーが供給しており、今後とも高品質でかつ高性能であり、さらには画期的な機能を有する部材の提供が期待されている。

このような市場の動きにともなって、薄く、軽く、耐衝撃性に優れるという特徴から、基板に高分子フィルムを用いたディスプレイの開発がここ数年間で活発になってきている。それはフレキシブルディスプレイあるいは電子ペーパーと呼ばれ、様々な表示方式のものが検討されている。例えば、TN 型、STN 型の LCD、ポリマーネットワーク型 LCD (PN-LCD)^{1),2)}、コレステリック LCD³⁾等の液晶方式をはじめ、電気泳動方式 (EPD)、有機エレクトロルミネッセンス (OLED) 等が挙げられる。さらには、高分子基板上に薄膜トランジスターを形成して、アクティブ駆動型のディスプレイを実現しようとする試みもある。弊社ではポリエチレンテレフタレートフィルムおよびポリカーボネートフィルムにインジウム—錫酸化物 (Indium Tin Oxide, ITO) を積層した透明導電性フィルムを抵抗膜方式のアナログタッチパネルや STN フィルム液晶向けに販売している³⁾。本稿では、弊社における透明導電性フィルムの開発から得られた知見をもとに、フレキシブルディスプレイ用の透明導電性フィルムに関する技術を解説する。

2. フレキシブルディスプレイ用透明導電性フィルムの特徴

フラットパネルディスプレイの基板に高分子フィルムを用いることで、薄くて軽く耐衝撃性に優れ、さらにはパネル形状の自由度が増し、曲面表示も可能なディスプレイデバイスが実現できると期待される。透明導電性フィルムを LCD の電極基板として使用するアイデアは、S. Takahashi⁴⁾らのグループと P. A. Penz⁵⁾らのグループから 1981 年に発表されている。実際に高分子フィルムを用いた LCD は 1983 年にカード電卓用の表示素子として初めて商品化された。90 年代に入ってからカード型ポケベルやハンディターミナルに採用されるようになり、TN 方式のセグメント型から STN 方式のドットマトリックス表示へと性能が向上した。2000 年には、4 階調で走査線数が 128 本のモノクロ STN パネルが商品化され携帯電話に採用された。さらに走査線数が 160 本の 256 色カラー STN パネルも試作された。最近では先にも述べたように様々な表示方式のディスプレイで透明導電性フィルムを基板に用いる検討が進められている。また、ロールフィルムを断裁せずにディスプレイパネルを製造する roll to roll processing により、製造コストを格段に引き下げる試みもある。

しかしながら、基板に高分子フィルムを用いる場合、通常のガラス基板では考慮する必要がなかった剛性、吸湿性、寸法安定性、耐熱性、ガス透過性といった特性が問題になる。パネルメーカーからは、製造プロセスへの適合性、パネルの表示品位および信頼性といった観点からフィルム基板の材料特性について様々な要望がなされるが、単に高分子フィルムに透明導電膜を積層しただけでは要求に応えることはできない。このため不足分の特性を補うための材料を基材フィルムにコーティングする方法が採られている。図 1 にプラスチック液晶用に開発された透明導電性フィルムの一例を断面図で示した。プラスチックフィルムをベースとして、その一方の面にガスバリア層とハードコート層を積層し耐溶剤性、ガスバリア性、耐擦傷性を確保している。そして、ベースフィルムのもう一方の面にハードコート層を介して透明導電膜を積層している。このハードコート層は透明導電膜との密着性、耐薬品性、絶縁性、パネル化工程で使用される周辺材料との適合性に配慮して設計されている。以下に、フレキシブルディスプレイ用の透明導電性フィルムの構成材料であるベースフィルム、ガスバリ

* Hanada, Toru
 帝人(株) 新事業開発グループ エレクトロニクス材料研究所
 東京都日野市旭が丘 4-3-2 (〒191-8512)
 2005.7.19 受理

Transparent conductive oxide
Hard coating
Base film
Gas barrier coating
Hard coating

図1 Cross section of plastic substrate for flexible display

ア層、透明導電膜に焦点を絞って順に解説する。

3. ベースフィルム

フレキシブルディスプレイ用に検討されている代表的な高分子フィルムとして、表1に溶剤キャスト法で成形された2種類のポリカーボネートフィルム(PC)、溶融押出法で成形されたポリエーテルスルホンフィルム(PES)、ならびに溶融押出後に二軸延伸して成形されたポリエチレンテレフタレート(PET)およびポリエチレンナフタレート(PEN)フィルムの諸特性をLCDで使用されているガラス基板と比較して記した。表1において“new-PC”は従来のPCより耐熱性と複屈折率を改良するために開発された新規なポリカーボネートフィルムである。いずれの高分子フィルムもガラスと比べると低密度で弾性率が低く、軽量化とフレキシビリティの観点で有利と言える。なかでもPENは他の高分子フィルムよりも弾性率が高くディスプレイの薄型化に有利といえよう。しかしながら、表1から判るように高分子フィルムはガラスに比べて寸法安定性、耐熱性、ガスバリア性が劣る。また、偏光板を使用するLCDでは複屈折率が問題になる。次にこれらの問題点について述べる。

3.1 寸法安定性

高精細なディスプレイを得るために、フォトリソグラ

フィー技術により電極のパターン形成が行われる。このとき、基板寸法が変化しやすいとパネルの歩留まりが低下するため、熱や吸湿による寸法変化ができるだけ小さい高分子フィルムが好まれる。表1に示したように、PCやPESなどの非晶性高分子フィルムよりも延伸して配向結晶化させたPETやPENのほうが熱膨張係数(CTE)は小さい。また、吸湿による寸法変化を抑えるには吸水率が小さい高分子フィルムに優位性がある。さらに、パネルの製造工程における加熱処理で基板が収縮するとパネルのアライメントを確保できなくなるので、高分子フィルムの熱収縮を極力下げるためにフィルムの内部歪を取り除く必要がある。特に、PETやPENなどの結晶性高分子フィルムは、延伸により機械的特性を発現させているため面内方向に強く配向しており、これらのフィルムを高精細なディスプレイ用の基板に使用する場合はガラス転移温度以上でアニール処理をする必要がある⁶⁾。これに対し、溶剤キャスト法で製膜したPCの未延伸フィルムは非晶質で内部歪も少ないため加熱による収縮に異方性が少なく収縮する量も小さいという特徴がある。

3.2 耐熱性

耐熱性については、例えばLCDの製造工程における配向膜やシール剤の焼成、異方性導電膜(ACF)等の熱圧着といった高温プロセスを考慮する必要がある。これらの周辺材料はガラス基板を主体に開発されたものであり使用温度が150℃以上である。また、一部の周辺材料に高分子フィルム用に低温プロセス化が進んだものもあるが、最低でも120℃以上の耐熱性が必要である。表1に示した高分子フィルムのなかではPESならびにnew-PCが200℃以上のガラス転移温度を有し高温プロセスに対する優位性が大きいと言える。これに対して、PETとPENのガラス転移温度はそれぞれ78℃および121℃と低い。これらは配向結晶性フィルムであり融点まである程度の弾性率を保持するため、ガラス転移温度以上の温度でもパネル製造プ

表1 Comparison of plastic films and glass substrate for LCD

		Glass for LCD	PC	new-PC	PES	PET*	PEN*
Manufactureing methods		Fusion	Sovent cast		Extrusion	Extrusion and biaxially Drawing	
Density		2.77	1.2	1.2	1.37	1.4	1.43
Young's Modulus (GPa)		73	2.2	2.8	2.2	5.3	6.1
Water absorption coefficient (%)		negligible	0.2	0.3	2.1	0.3	0.4
CHE (ppm/%RH)		negligible	5	5	30	12	12
Thermal properties	T _g (°C)	690	155	215	223	78 (T _m =258)	121 (T _m =269)
	Thermal shrinkage	negligible	0.05 @130℃	<0.01 @180℃	0.3 @180℃	MD:1.0, TD:0.5 @150℃	MD:0.5, TD:0.1 @150℃
	CTE (ppm/°C)	8	70	70	60	30	20
Optical properties	TT%	91	90	90	89	89	88
	Reflective Index <i>n_D</i>	1.54	1.59	1.61	1.65	1.66	1.7
	Re (nm) @550 nm	negligible	<10	<1	<10	NA	NA
Gas Permeability	O ₂ (cc・100 μm/㎡/day) @25℃ 50% RH	negligible	900	600	350	18	4
	H ₂ O(g・100 μm/㎡/day) @40℃ 100% RH	negligible	50	30	105	9	2

*MacDonald W. A., J. Materials Chem.(14), 4 (2004)

図2 The storage modulus E' and damping factor $\tan \delta$ of PC, new-PC and PEN measured by dynamic mechanical thermal analysis

ロセスに適合できる可能性がある。図2に動的粘弾性測定法によって得たPCおよびnew-PCならびにPENの貯蔵弾性率(E')と損失正接($\tan \delta$)を示した。PCなどの非晶性フィルムはガラス転移温度付近から高温側で E' が急激に低下するが、配向結晶性のPENでは温度上昇に伴う E' の低下は緩やかでガラス転移温度(121°C)以上の150°Cにおいても1 GPa以上の弾性率を保持する。

また、高分子フィルム上にThin Film Transista (TFT)に代表されるアクティブ素子を形成してアクティブマトリックス型のフレキシブルディスプレイを実現しようとする試みもある。その場合、成膜温度が比較的低いアモルファスシリコンTFTの形成でも220°C程度の耐熱性が要求される。これに対し250°C以上の耐熱性を有するフィルムとして、ポリシクロオレフィンや特殊ポリアリレート⁷⁾なども検討されている。しかし、高温の成膜プロセスに高分子フィルムが耐えても、TFT素子を形成する種々の無機薄膜は熱膨張係数が高分子フィルムより一桁程度小さいため、無機薄膜と高分子フィルムの間に応力が集中して薄膜が剥離したりクラックが発生したりする。これに対し、基板の熱膨張係数を下げるためにナノコンポジットを用いる技術や、基板に直接TFTを形成するかわりにガラス基板上で形成したTFT素子を高分子基板に転写する技術が報告されている⁸⁾。さらに、シリコン系の半導体の代りにペンタセンに代表される有機半導体を用いたTFT素子を低温で成膜する技術も注目されている⁹⁾。

3.3 光学特性

ディスプレイ用の基板では可視光領域にわたって光線透過率が高いことと、表示の鮮明度の点からヘイズを小さくすることが必要である。さらに、偏光板を用いるLCD用途ではフィルムの複屈折を考慮する必要がある。直線偏光を用いる液晶表示方式では、基板のリターデーション(複屈折率と基板厚の積)が大きいと偏光子を抜けてきた光が着色してしまう。したがって、基板のリターデーションは極力小さいことが好ましく、リターデーションの光軸である遅相軸のバラツキもできるだけ少なくする必要がある。ガラス基板は光学的に3次元で等方であるが、高分子フィルムでは面内方向の屈折率 n_x および n_y 、ならびに厚み方向の屈折率 n_z は異なる場合が多く、これを下げるために

図3 Optical isotropy of polycarbonate films (solvent cast)

は複屈折率の小さいポリマーを用いる必要がある。複屈折率は分子固有複屈折率と配向関数の積であり、これらを小さくできれば低リターデーションのフィルムが得られる。ここで、分子固有複屈折率はローレンツ・ローレンツ式で表され、分子鎖方向の分極率成分とこれの直交方向の分極率との差に比例して大きくなる。表1に示した高分子フィルムは何れもポリマー主鎖に芳香環があり分子固有複屈折率が大きいものであった。これに対し、新しく開発されたnew-PCフィルムは、従来のPCで用いている2, 2-ビス(4-ヒドロキシフェニル)プロパンに由来する繰り返しユニットの分極率を打ち消すような設計がなされており、リターデーションは膜厚が120 μm で1 nm未満と小さい(図3)。一方、フィルムを形成している高分子の配向を小さくする方法も複屈折率を下げるのに有効である。一般に、未延伸の高分子フィルムであっても、溶剤キャスト法で製膜されたフィルムは、溶融押出法で製膜されたものよりも内部歪が残りにくい。

3.4 ガスバリア性

ディスプレイ用の基板に高分子フィルムを用いる場合、高分子フィルムのガス透過性が問題になる。いずれのディスプレイデバイスにおいても電界または電流により表示の切り替えが行われており、過剰の水蒸気や酸素が表示素子と接触するとデバイスが劣化することから、例えばLCD用の高分子フィルムでは、40°C 90% RHにおいて0.1 g/m²/day未満の水蒸気透過度と0.1 cc/m²/day未満の酸素透過度が求められる。図4に市販の透明包装フィルムのガスバリア性能を示した。一般に高分子フィルムのガス透過係数は拡散係数と溶解度係数の積であらわれ、市販のフィルムのガスバリア性はこれらを考慮して設計されている。しかしながら、図4に示したように最も性能が良いシリカ蒸着PETフィルムでさえもLCD用の高分子フィルムに求められる目標値を満足できない。さらに有機EL素子を高分子フィルムで製造する場合、デバイスの信頼性を確保するために必要な水蒸気透過度は25°C 40% RHにおいて 1×10^{-5} g/m²/day以下と言われている¹⁰⁾。このような厳しいガスバリア性の要求値に対し、表1に示した高分子フィルムの性能はPENが比較的良好ではあるが、それでもLCD用の目標値よりも一桁大きいレベルにある。加

図4 Gas permeability of Commercially available packaging films

図5 Temperature dependence of water vapor permeability of plastic films

えて高分子フィルムのガス透過性は温度上昇にともない増大する (図5)。したがって、ディスプレイデバイスの信頼性を確保できるように、60℃90% RH 環境下での長時間保障を考慮して高分子フィルムのガスバリア性を十分に改良する必要がある。

4. ガスバリア層

先に記したようにベースフィルム単体のガスバリア性能ではディスプレイデバイスの信頼性を確保できないため、透明な無機薄膜やガスバリア性に優れる有機高分子膜をベースフィルムにコーティングして改良する方法が採られている。このうち有機高分子膜は温度上昇や湿度上昇に伴うガスバリア性の劣化が大きいいため、酸化ケイ素やアルミナ等の金属酸化物薄膜をPVDやCVDなどの真空成膜技術で積層する方法が効果的であると考えられている。無機薄膜をガスバリア層として積層した高分子フィルムのガス透過性は、無機薄膜のピンホール、粒界、マイクロクラッ

ク等の欠陥が支配的な因子として考えられている^{11), 12)}。したがって、ガスバリア性に優れるベースフィルム上にできる限り無欠陥の無機薄膜を形成できればガスバリア性は向上できる。無欠陥のバリア層を得るには、無機薄膜の成膜条件を最適化するだけではなく、ベースフィルムの表面平滑性や耐熱性なども重要な因子である。特に無機薄膜を形成する面が粗いと、その凸部による遮蔽でバリア層に欠陥ができやすいと考えられている。図6に厚さ120μmのnew-PCと厚さ125μmの2軸延伸PET上に厚さ30nmの酸化ケイ素の薄膜を同条件にてスパッタリング法で積層したフィルムの水蒸気透過率を絶対温度の逆数に対してプロットした。図6には酸化ケイ素の薄膜を形成する前のベースフィルム表面をAFMで測定した結果も併せて示した。PCの水蒸気透過率はベースフィルム単体ではPETよりも一桁ほど高いにもかかわらず、酸化ケイ素膜を積層した後の水蒸気透過率はPETの場合より約一桁低い値を示している。RMS値でみると、new-PCの表面粗さはPETよりも二桁も小さく、その平滑性がガスバリア層の成膜に影響していると思われる。なお、有機EL素子で要求されている水蒸気バリア性の目標値は25℃40% RHにおいて $1 \times 10^{-5} \text{ g/m}^2/\text{day}$ 以下と極めて高度であるが、無機/有機ポリマーの積層を繰り返してコーティングする方法が高度なガスバリア性を確保できる有望な技術として検討されている¹⁰⁾。

5. 透明導電膜

ディスプレイ用の高分子フィルムに用いる透明導電膜は、ガラス基板と同様に、DCマグネトロンスパッタリング法で成膜されたITOが主流である。ITOの透明性に関しては基礎吸収端が350nm近傍の近紫外域にあり、一方プラズマ波長が1~3μmの近赤外にあるため、可視域では透明である。しかし、屈折率は約2であり、反射損失が大きい。また、酸素雰囲気での反応性スパッタリングでITOを成膜する場合、雰囲気中の酸素分圧が低いほど酸素空孔濃度が増大し、膜は低抵抗となるが、同時に可視域での吸収が増大し透過率が低下する。一般に高精細なディスプレイを得るためにはシート抵抗が低い透明導電膜を積層する必要があるが、光学特性と比抵抗のバランスを考慮して透明導電層を成膜する必要がある。

ガラス基板上のITO膜は基板温度400℃で成膜したもので比抵抗が $1.3 \times 10^{-4} \Omega \cdot \text{cm}$ の低抵抗膜が得られている。また、カラーフィルター用に生産されているITOは150~200℃の基板温度で成膜され、比抵抗は $2 \times 10^{-4} \Omega \cdot \text{cm}$ である。またシート抵抗値では、大画面STNにおいてアドレス電極の線間寄生容量を減らして信号遅れを防ぐのに必要とされるシート抵抗が5Ω以下のITO膜も生産されている。

これに対し、フレキシブルディスプレイ用透明導電性フィルムにもITOが使われているが、高分子フィルム特有の耐熱性、強度、熱膨張係数、吸着ガスといった制約があり、ガラス基板での成膜方法を踏襲できない。スパッタ時に高分子フィルムから放出される不純物ガスの影響を抑えるために100℃以下の基板温度で成膜されるため、得られる膜は非晶質であり、比抵抗は $4 \times 10^{-4} \Omega \cdot \text{cm}$ 以下の

図6 Water Vapor permeability 30 nm silicon oxide layer deposited on new-PC film and Teijin DuPont Films biaxially oriented PET film (HSL). The surface roughness was measured by AFM tapping mode.

抵抗を得るのは難しい¹³⁾。また、シート抵抗を下げるためにITOを厚くすると圧縮応力が増して高分子フィルムが反ったり、ITOにクラックが発生したりする。このため、高分子フィルム上のITOは150 nm以下の膜厚で積層され、30 Ω以下のシート抵抗を得るのは難しい。また、耐熱性に優れた高分子フィルムを用いて、基板温度を高くして結晶質で比抵抗の小さい膜も成膜できるが、高分子フィルムの熱膨張係数がガラス基板に対して一桁大きいため成膜後に基板が大きく反るという問題が生じる。結晶質のITO膜を得るためには、低い基板温度で成膜した非晶質の膜を、成膜後に150℃程度で熱処理して結晶化させる方法もある。透明導電性フィルム特有の屈曲耐性を向上させるために結晶化度を適度に制御する方法も有効である。なお、できるだけ比抵抗が小さい透明導電膜を得るために、酸化インジウムに酸化亜鉛を添加したIZO (IDIXO)¹⁴⁾等のITO以外の酸化物導電材料が検討されている。IZOは結晶化温度が300℃以上と高いので高分子フィルムの実用領域で結晶化による応力を回避できる。

6. 新規フレキシブルディスプレイ用基板「SS 120」

ここでは、新しく開発されたフレキシブルディスプレイ用基板を紹介する¹⁵⁾。表2に新開発の「SS」の主要特性を

従来銘柄でPCをベースフィルムに用いた「HA」と比較して示した。SSのベースフィルムには、ガラス転移温度が215℃と従来品よりも60℃高く、固有複屈折率も小さい新開発のPCを用いている。ベースフィルムの位相差は1 nm以下であり、光学等方性に極めて優れている。また、弾性率が改良されたことによりフィルムの剛性ならびに表面硬度が向上したため、従来品と比較してパネル製造工程でハンドリングしやすくなりスクラッチ等による傷発生リスクを低減できると期待される。さらに、ベースフィルムの熱収縮率は180℃-2時間後で0.01%と小さく、例えば190℃-1時間程度のプレアニールを施せば熱収縮率はさらに一桁小さくなることを確認しており、極めて寸法安定性に優れた基板である。このことから180℃程度の工程温度でもパネルを製造でき、配向膜、シール剤、ACFといった周辺材料の選択幅を広げることができる。水蒸気バリア性は、塗工基板（透明導電膜を形成する前の基板）の水蒸気透過率が40℃90% RHにおいて0.05 g/m²/dayであり、ケイ素酸化物薄膜の成膜条件の最適化などにより性能が向上した。透明導電膜については巻き取り式スパッタ装置を用いてIZOをターゲットとしたDCマグネトロンスパッタ法により成膜して、可視光領域における全光線透過率が87%でシート抵抗値が30 Ω未満の特性が得られている。

表2 Properties of the new transparent conductive films for flexible displays

Name		HA	SS
Base Film	Polymer	PC	new-PC
	Thickness (μm)	100, 120	120
Transparent Conductive Oxide material		ITO	IZO
Surface Resistivity ($\Omega/\square$)		40, 200	30
Optical Properties	TT% (without TCO)	87 (91)	87 (90)
	Re (nm)	10	<1
Thermal Properties	Tg of Base Film ($^{\circ}\text{C}$)	155	215
	Practical Use ($^{\circ}\text{C}$)	130	180
	Thermal shrinkage	0.02 @130 $^{\circ}\text{C}$	<0.01 @180 $^{\circ}\text{C}$
	CTE (ppm/ $^{\circ}\text{C}$)	70	70
Mechanical Properties	Young's Modulus (GPa)	2.2	2.8
	Tensile Elongation (%)	170	13
Gas Barrier Properties @40 $^{\circ}\text{C}$ 90% RH	O ₂ (cc/m ² /day)	0.5	0.5
	H ₂ O (g/m ² /day)	1	0.05

7. おわりに

フレキシブルディスプレイ用透明導電性フィルムの開発では、ベースフィルムに使用するポリマーの設計、フィルム成型技術、各種機能性膜の設計とコーティング技術、さらには透明導電膜に関する技術を総合的に駆使することが必要である。既に、いくつかの表示方式のディスプレイで基板に高分子フィルムを用いたものが実用可能なレベルにある。しかしながら、ガラス基板を用いて先行するディスプレイをプラスチック化するという単なる後追いでは、技術面およびコスト面で市場に受け入れられるのは難しい状況にあると言われている。基板をプラスチック化したことによるフレキシブルな特性を生かし、ガラスのディスプレイでは出来ない新しい使い方、いわゆるカラーアプリケーションによる新市場の開拓が待たれる。最近、スマートカード、ウェアラブルディスプレイ、電子ペーパーなどの新しい携帯情報機器が活発に提案されており、今後の発展を大いに期待したい。

参 考 文 献

- 1) Fujisawa, T. et al. : Conference Record of the International Display Research Conference, 47 (2000)
- 2) Fujikake, H. et al. : Proc. of the International Display Workshop, 29 (2002)
- 3) 花田亨, 谷田部俊明 : 月間ディスプレイ, 6(8), 6 (2000)
- 4) Takahashi, S., Shimokawa, O., Inoue, H., Uehara, K. and Hirose, T. : SID digest, 86 (1981)
- 5) Pentz, P.A. et al. : SID digest, 116 (1981)
- 6) MacDonald, W. A. : *J. Materials Chem.* (14), 4 (2004)
- 7) P. Cirkel, et al. : Proc. of the International Display Wrkshop, p.311 (2002)
- 8) Utunomiya, S. et al. : SID digest, (31), 916 (2001)
- 9) Jackson, T. N. : SID proceedings of the International Display Research Conference, 58 (2003)
- 10) Weaver, M. E. et al. : *Applied Physics Letters*, (16), 2929 (2002)
- 11) Prins, W. and Hermans, J. J. : *Journal of Physical Chemistry*, (63), 716 (1959)
- 12) Rossi, G. and Nulman, M. : *Journal of Applied Physics*, (74), 5471 (1993)
- 13) 原寛, 谷田部俊明 : 月刊ディスプレイ, 5(9), 41 (1999)
- 14) 井上一吉 : 日本学術振興会第 166 委員会第 6 回研究会資料, (1998)
- 15) Hanada, T. et al. : Proc. Of the International Display Workshop, 401 (2002)