

---

# 光配向膜上において安定なプレチルト角を誘起するための 新規光配向プロセス

## A General Method to Induce Durable Liquid-Crystal Pretilt Angle on Photo-Alignment Films

木村雅之 中田正一 楨田 穰 松木安生 熊野厚司 竹内安正 横山 浩  
Masayuki Kimura Shoichi Nakata Yutaka Makita Yasuo Matsuki Atsushi Kumano Yasumasa Takeuchi Hiroshi Yokoyama

A normal-incidence single-exposure scheme to obtain a stable pretilted alignment of nematic liquid crystals on photo-alignment polymer layers is proposed. The new scheme consists in periodically modulating the intensity of the normally incident linearly polarized near-ultraviolet light and unidirectionally scanning it on the photosensitive alignment layer. By properly choosing the relative directions of scan and polarization, this scheme works for any types of photo-alignment materials regardless of the resultant alignment direction relative to the polarization direction of the UV light. The pretilt appears in such a way that the nematic director is lifted up in the scan direction, similar to the case of the conventional cloth rubbing. This “photo-rubbing” method allows a fairly accurate control of the pretilt angle by way of the scan speed and the light intensity.

### 1 はじめに

情報通信政策に関する政府の基本方針である「e-Japan 戦略2」に沿って、ブロードバンドでユビキタスな情報流通社会のための基盤整備が開始されている。この高度情報社会をリードする上で、不可欠な液晶ディスプレイLCD (Liquid Crystal Display)には新たな用途が期待されている。その中心は、放送のデジタル化や高速ネットワークに対応する高画質、高精細機能を有する大型テレビやモバイルテレビ用液晶ディスプレイなどの次世代液晶ディスプレイである<sup>1)</sup>。

これら液晶ディスプレイの高精細化には、200ppi ~ 400ppi (pixel per inch)程度の解像度が求められるため、電極基板ピッチは数十ミクロン程度となる<sup>2)</sup>。このような高精細基板に対して、LCDの製造に不可欠な液晶配向処理を行う場合、従来のラビング法<sup>3)</sup>では微細な凹凸基板に対

して、ラビングが均等にかからず配向欠陥が生じる問題が指摘されている<sup>4)</sup>。また、軽量LCD用フィルム基板においても、基板の損傷を招く理由から非接触で液晶配向処理が行える新規プロセスの構築が求められている。このような状況下、次世代液晶デバイスのためのラビング法に替わる非接触液晶配向法として、光配向技術が注目されている<sup>5-9)</sup>。

液晶ディスプレイの製造に対し有効な光配向法を構築するためには、光照射により誘起される界面性能として、安定な液晶のプレチルト角の発現が求められる。液晶プレチルト角とは、図1に示すように液晶配向軸に沿った液晶分子の長軸と配向面とのなす角度であり、LCDの表示特性に大きく影響する。そのため、液晶プレチルト角は、液晶ディスプレイの高表示品質を達成するために不可欠な界面性能であり、発現角度の安定性が重要となる。

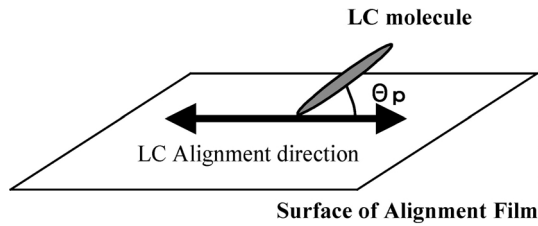


Fig. 1 LC Pretilt angle.

ところが、これまでの光配向法では、安定に液晶プレチルト角を得ることが難しく、これが実用化を困難にしているひとつの要因となっている。安定な液晶プレチルト角を得るためには、基板表面に非対称性(図2)を導入することが重要となる。光配向法においては、表面の対称性を崩す方法として、法線方向から任意の角度で光配向膜表面に対し、斜めに光照射を行う「斜め露光法」が試みられている。しかし、これまで、斜め露光法によるプレチルト角発現について、数多くの研究がなされているにもかかわらず、依然として、プレチルト角が照射角度に大きく依存することや、再現性の問題が指摘されており、実用化を目指す場合の開発課題となっている<sup>10-13)</sup>。さらに、次世代高精細LCDに不可欠な微細凹凸基板に対して、斜め露光により、効率良くプレチルト角が誘起されるかという懸念もある<sup>4)</sup>。

そこで、本開発研究では、法線露光下でも光配向膜表面上に効率良くプレチルト角を生じさせることができる新規光配向プロセスを検討した。新規プロセスでは、周期的な強度分布を持ったLPNUV光(PM-LPNUV: Periodically intensity-modulated linearly polarized near-ultraviolet)が一定速度で一方向に光配向膜面上をスキャンする。この光配向プロセスにより、光配向膜材料において安定な液晶プレチルト角の発現が可能である。この新しい光スキャン法ではスキャン方向へプレチルト角が持ち上がるため、「光ラビング法」と名付けた。

## 2 液晶プレチルト角を誘導するための非対称性

プレチルト角を発現させるためには、図2に示すように配向層表面において液晶の配向軸に沿って前方と後方に対する非対称性を誘起することが必要である。非対称性構造を誘起させる手段として、非接触配向法であるSiO<sub>2</sub>の真空斜法蒸着法が知られている<sup>14,15)</sup>。この方法では、蒸着ビームの入射角度を80度以上とすると、セルフシャドリング効果により蒸着膜において柱状構造が異方的に発達する。その結果、微細な非対称性が基板面に形成される。

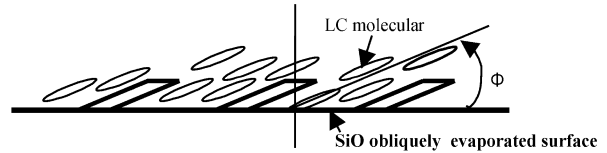


Fig. 2 Local alignment of Liquid-crystal director on the obliquely evaporated surface.

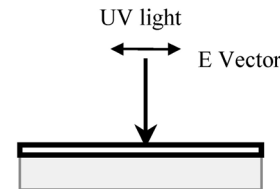


Fig. 3 Normal Incidence Exposure of UV light.

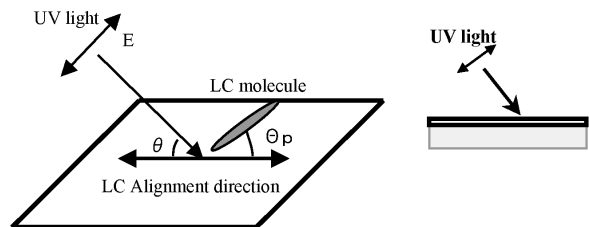


Fig. 4 Oblique irradiation method.

液晶分子の主軸はこの非対称構造にたいして平行となり、その結果、基板面にたいしてはある角度で主軸が持ちあがることになる。すなわち、プレチルト角 $\phi$ が生じる<sup>16,17)</sup>。

## 3 従来の光配向プロセスの問題点

光配向膜上に液晶プレチルト角を発現させる場合も、前節のSiO<sub>2</sub>の斜め蒸着膜と同様に、光照射により非対称性を誘導することが不可欠である。ところが、図3に示すような法線入射による露光では対称性は崩れず、その結果液晶プレチルト角は発現しない。

これに対し、照射面に対して偏光光を斜めに照射すると、液晶プレチルト角を発現させることができる。すなわち、図4のように光を電場ベクトルが膜表面とある角度をなすようにLPNUV(Linearly polarized near-ultraviolet)光の照射を行えば配向容易軸方向の前後で非対称性が生じるので、プレチルト角が得られる。斜め露光法を利用して、いくつかの光配向材料においてプレチルト角の発現が報告されている<sup>9-12)</sup>。

しかし、斜め露光法にはいくつかの問題点がある。たとえば、斜めに露光を行うために基板を傾けると、図5(a)のように光路差ができ、光配向膜表面には照度分布が生じ

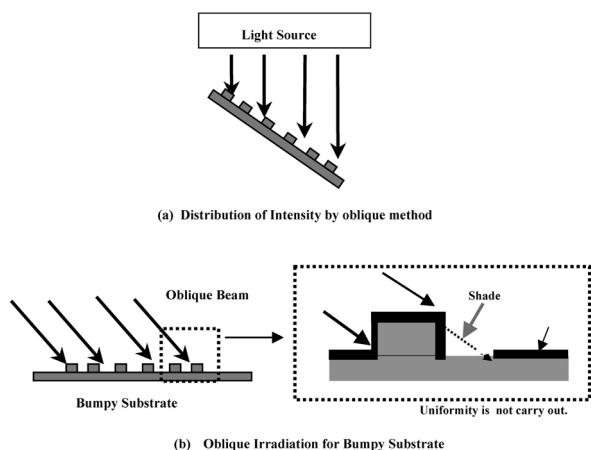


Fig. 5 The subjects for the oblique exposure method.

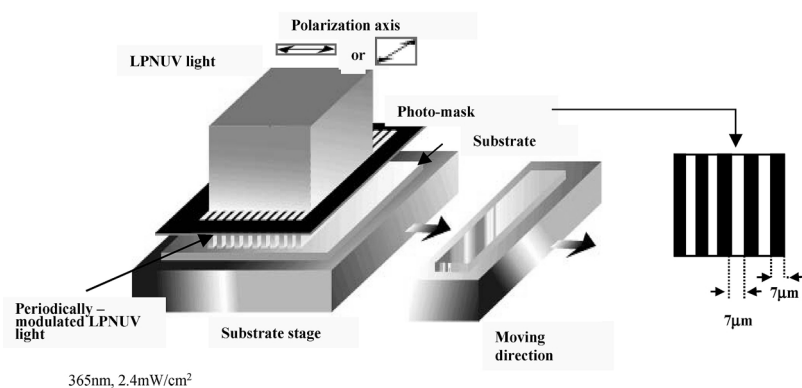


Fig. 7 Schematic diagram of Photo-rubbing method.

て、プレチルト角の面内分布が発生する。斜め露光における照度分布は、基板を固定し光源を傾けたとしても同様に起こる。これは、斜め露光法では、ガラス面内に均一にプレチルト角を発現させる難しさを示している。また、斜め露光では、プレチルト角は、入射角度に大きく依存するのみならず、基板上の複雑な光の反射などの影響により、その値は大きくばらつく<sup>(11,12)</sup>。さらに、図5(b)のように、高さ方向に数百nmの凹凸がある基板に斜め露光を施す場合、光の「陰」が発生し、配向を乱すことも考えられる。

上述した斜め露光法の問題が、光配向法の普及を妨げる原因のひとつとも考えられている。このような状況で、効率良く正確にプレチルト角の発現が可能な、斜め露光法に代わる新しい光配向法の構築が求められている。

## 4 実験

### 4.1 液晶プレチルト角発現のための新しい光配向法

従来の露光法における問題を踏まえて、本研究では光配向膜に法線方向から露光して、効率良くプレチルト角を発現させることが可能な光配向プロセスを検討した。新規

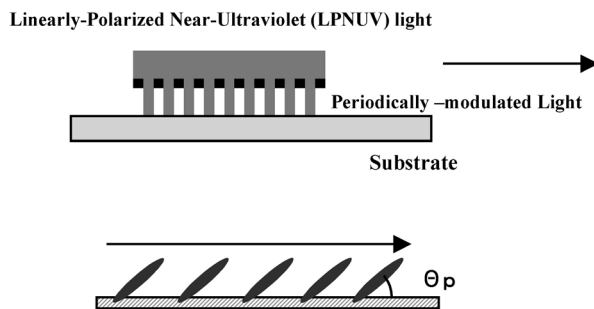


Fig. 6 Normal incidence single-exposure method: Photo-Rubbing Method.

の光配向法は図6に示すように、周期的な強度分布を持ったLPNUV光(PM-LPNUV光)が光配向膜表面上を一定速度でスキャンするものである。この「新規光配向プロセス」では、効率良く非対称構造が生成でき、その結果、正確に液晶プレチルト角を発現させることが可能となる。この新しい方法では、ネマチック液晶分子の長軸がスキャン方向に起き上がる。

### 4.2 光ラビング装置の構成

光ラビング法では、周期的強度分布を持つLPNUV照射光を光配向膜上で一定速度でスキャンさせることで、光配向膜上にプレチルト角が生ずる。図7に装置の構成図を示す。LPNUV光源と光配向膜基板との間にスリットフォトマスクを挿入することにより、LPNUV光の強度がスキャン方向に周期的に変化する。さらに、周期的強度分布をもつLPNUV光が、一方向に一定速度でスキャンする。実際は、光源とスリットは固定され、ガラス基板を乗せたステージが一方向に移動する。偏光光の波長は365nmであり、平均的強度は2.4mW/cm<sup>2</sup>である。一方、スリットマスクには、スライドガラスへのアルミの蒸着により作成した14μm

ピッチのスリットを用いた。LPNUVの偏光軸は、平行型光配向膜材料に対しては光ラビング光のスキャン方向と同一方向に、直交型光配向膜材料に対して、光ラビング光のスキャン方向と直角な方向に、それぞれ設定した。尚、平行型材料、直交型材料については、後述する。図8には、図7の構成図をもとに試作した光ラビング装置の外観を示す。

#### 4.3 実験試料

光ラビングによるプレチルト角発現特性について調べる

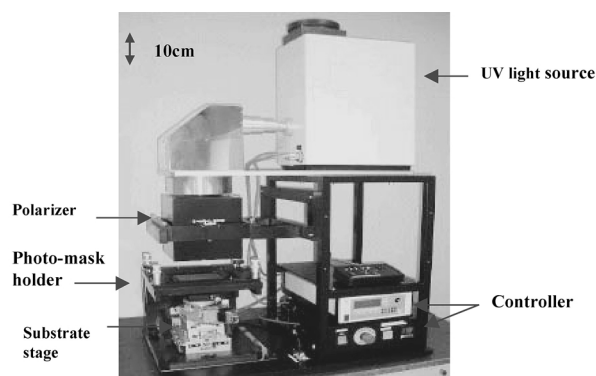
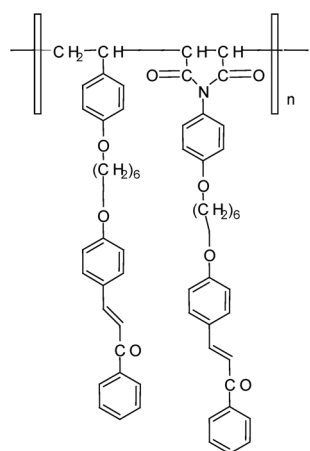


Fig. 8 Experimental System of Photo-rubbing method.

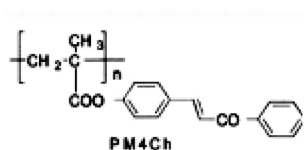
ため、二つの光配向膜材料を選択した。ひとつは、図9 (a)に示すフェニルマレイミド交互重合体にC6スペースを介し、カルボン側鎖を導入したPMI-15であり、これは平行型の光配向膜材料である<sup>18)</sup>。もうひとつは、図9 (b)に示すアクリル系カルコン光配向膜であるPM4chである<sup>8)</sup>。PMI-15は、図9 (a)に示すとおり、LPNUV照射の偏光軸に平行な液晶容易軸を誘起する平行型の光配向膜材料である<sup>20)</sup>。

一方、PM4chは図9 (b)に示すとおり、LPNUV照射の偏光軸の直交方向に液晶が配向する直交型光配向膜材料である<sup>21)</sup>。

ガラス基板に対して塗布する二つのポリマー溶液は、溶剤であるγ-BL(γ-ブチラクトン)に固形分濃度が3wt%となるよう調整を行った。溶液調整後のPMI-15ポリマー溶液を用いて、ガラス基板上に60nmから80nmの膜厚になるようスピナーを用いて塗布し、80℃でブレーク後、180℃でポストブークを行った。本実験では照射エネルギーを1.5J/cm<sup>2</sup>とした。光ラビングにより得られる配向性能の評価は、露光されたPMI-15フィルム基板2枚を用いて液晶セルを作成し、これら液晶セルの液晶配向状態や液晶プレチルト角の観察を行った。液晶セルには評価用液



(a)



(b)

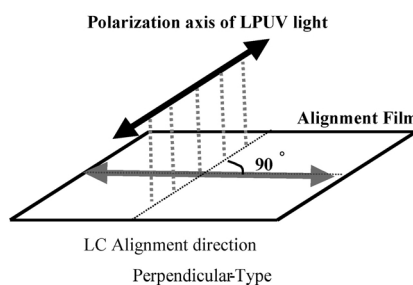
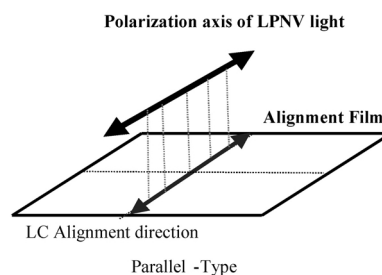


Fig. 9 Molecular structure of PMI-15 (a), and PM4Ch (b)

晶材料として、4-n-pentyl-4'-cyanobiphenyl (5CB:メルク社製)を用いた。

## 5 結果と考察

### 5.1 PM-LPNUVのスキャンによる液晶配向性およびプレチルト角の発現

まず、平行型PMI-15配向膜に対する光ラビング法によるプレチルト角の発現性を調べた。

実験に先立ち、LPNUV光の偏光軸は、図10のようにスキャン方向と平行に設定した。

PM-LPNUV光が静止した状態で露光したPMI-15フィ

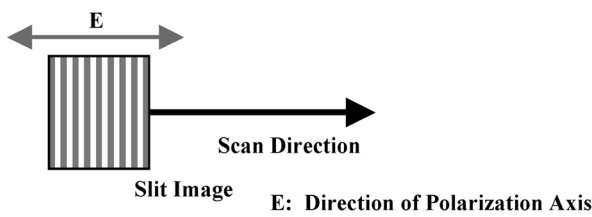


Fig. 10 The relation between polarization axis and the scan direction for parallel type of photo-alignment material.

ルム基板を用いて液晶セルを作成し、液晶配向状態の観察を行った結果を図11に示す。PM-LPNUVの静止状態では、露光部と未露光部が交互に存在するグレーティング模様が観察された。グレーティングのピッチはほぼスリットマスクのピッチと一致していた。このことは、L/λ (Line and Space) が $7\mu\text{m}$ のスリットマスクを介した、近接露光により1:1の露光象が配向膜表面上に生成したことを示している。また、図11の露光部では、液晶は偏光方向と同一方向に配向し、未露光部ではランダムに配向していた。

PM-LPNUV光をスキャンしたPMI-15フィルム基板を用いて作成した液晶セルの配向状態を図12に示す。ここでは、PM-LPNUV光を矢印の方向へ $37\mu\text{m}/\text{sec}$ の速度でスキャンさせた。図12から、わかるように、PM-LPNUV光をPMI-15フィルム表面にスキャンさせると、図11にみられたグレーティング模様は消失し、スキャン領域ではプレチルト角 $0.4^\circ$ の均一な液晶配向が得られた。尚、液晶の配向方向とチルトアップの方向は、図12のPM-LPNUVのスキャン方向に一致していた。

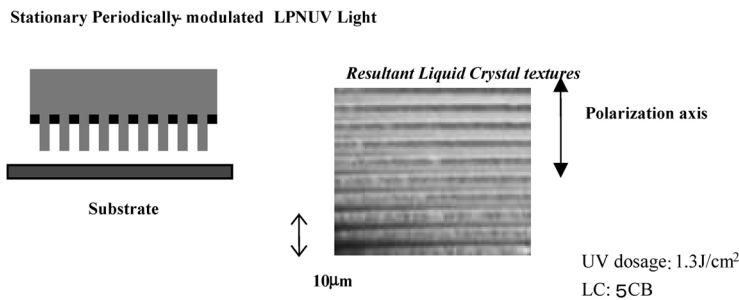


Fig. 11 Effects of scanning of periodically intensity-modulated linearly polarized near-ultraviolet (LPNUV) light on the photosensitive PMI-15 films. Resultant liquid crystal textures for stationary periodically modulated-LPNUV Light.

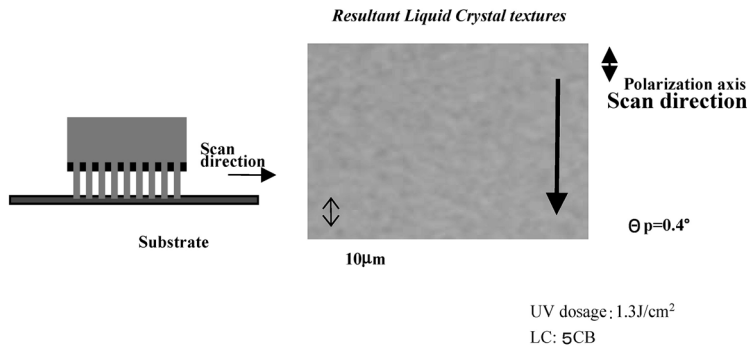


Fig. 12 Effects of scanning of periodically intensity-modulated linearly polarized near-ultraviolet (LPNUV) light on the photosensitive PMI-15 films. Resultant liquid crystal textures for periodically intensity-modulated LPNUV light scanned at a speed of  $35\mu\text{m}/\text{s}$ . In this figure, a uniform LC alignment with pretilt angle of was obtained along the scan direction.

## 5.2 PM-LPNUVのスキャン速度がプレチルト角に与える影響

前項では、プレチルト角発現にはPM-LPNUV光のスキャンがプレチルト角の発現に重要であることを示した。次に、PM-LPNUVのスキャン速度がプレチルト角の大きさに与える影響について詳細に検討を行った。PMI-15配向膜フィルム上にPM-LPNUVがスキャンする速度と液晶プレチルト角との関係を、図13に示す。液晶プレチルト角は、スキャン速度が $5\mu\text{m}/\text{sec}$ で0.3度となり、 $10\mu\text{m}/\text{sec}$ から $40\mu\text{m}/\text{sec}$ までは、安定に0.4度となる。スキャン速度が $50\mu\text{m}/\text{sec}$ 以上では、著しく増加し、 $70\mu\text{m}/\text{sec}$ で2.5度に達した。図13の2度以上のプレチルト角の標準偏差は10%以内であり、ラビング配向膜により達成されるレベルと同等であった。この結果は、光ラビング法ではプレチルト角をPM-LPNUV光のスキャン速度を選択することにより、実用に耐える程度に制御可能であることを示している。

## 5.3 プレチルト角の発現方向の検証

光ラビングにおける液晶分子の長軸の傾き方向を確認するため、プレチルト角発現方向とスキャン方向との関係を調べた。図14にその結果を示す。図14の写真の上部と下部では矢印A、Bで示された相反する方向に速度 $34\mu\text{m}/\text{sec}$ でスキャンした。ただし、PM-LPNUVのスキャンは、写真の中心を走査開始点としている。中心に観察される

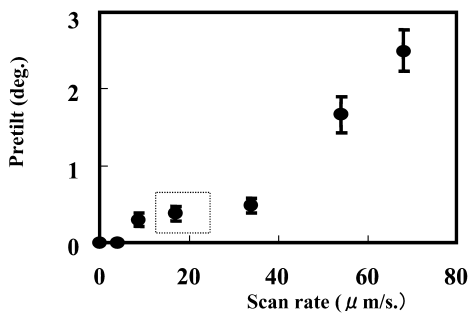


Fig. 13 Pretilt angle of 5CB on photo-rubbed PMI-15 films as a function of the scan rate.

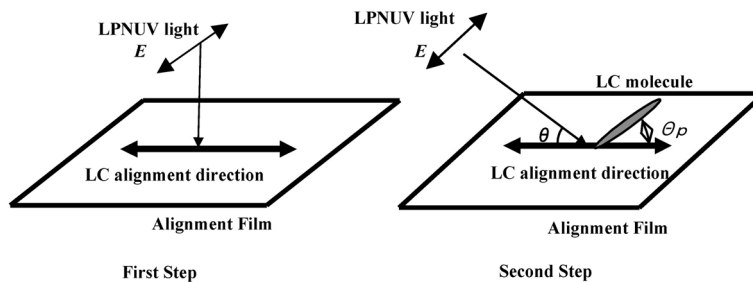


Fig. 15 Double exposure method for the perpendicular type.

拡散光のバンドはリバースチルトの界面を示している。このことは、有限のプレチルト角がそれぞれのスキャン方向に発現していることを示している。この結果より、液晶のチルトアップの方向はスキャン方向であることが確認できた。

## 5.4 直交型光配向膜材料に対する光ラビング

前項までに、光ラビング法でプレチルト角の安定性がラビング配向法並に改善されることを示した。ここでは、工業的利点として、光ラビング法の有効性を直交型の光配向膜材料で示す。

これまでの検討では、平行型の光配向膜材料を取り扱ってきたが、光配向膜材料にはもうひとつのタイプとして「直交型」がある。直交型光配向膜材料では、図(a)のように、光照射により偏光方向と直交方向に液晶が配向する。そのため、直交型材料では、従来の斜め露光法を用いて、一回の露光でプレチルト角を得ることが難しく、プレチルト角を得るためには、図15に示すように2段階の露光プロセスが必要となる。すなわち、最初に法線方向から偏光

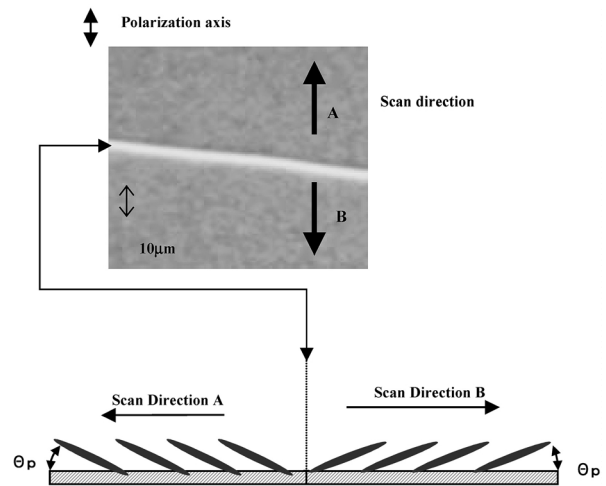


Fig. 14 Boundary texture between oppositely photo-scanning regions with reverse twists LC molecules tilt up in the scan direction as if LC alignment is lifted in the scan direction.

光を入射させてその偏光軸方向と直交方向に液晶を配向させた後、次に液晶配向軸に対して斜めに偏光光を照射することによりプレチルト角が得られる。ところがこの方法では、一回目の法線露光により、光配向膜内に対称性が生じてしまうため、次の斜め露光で一度できた対称性を崩すことは難しく、得られるプレチルト角も小さい。これは斜め露光法が、直交型光配向膜材料に対しては、プレチルト角発現法として充分機能を果たしていないことを示している。

光スキャン法では、直交型材料に対しても、図16に示すようにPM-LPNUV光の偏光軸をスキャン方向と直角な方向に設定することにより、一度の照射でプレチルト角を得ることが可能である。

直交型光配向膜材料であるPM4chの基板に対し、図16のように偏光軸をスキャン方向とは直交に設定し、光ラビングを行った結果を図17に示す。図17より、PM4chに対して光ラビングを行うと、均一な液晶配向が得られ、スキャン方向に沿って、 $0.4^\circ$ のプレチルト角が得られることがわかった。この結果より、直交型光配向膜材料に対して、従来の斜め露光ではプレチルト角を得るために二段階の露光が必要であったのに対し、光ラビングでは一回の露光で、プレチルト角の発現が可能であることが明らかとなった。

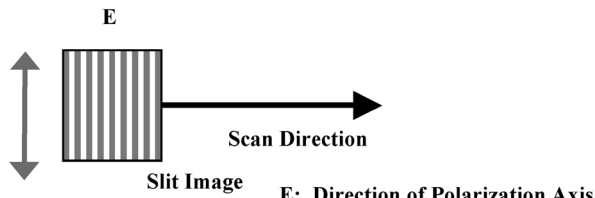


Fig. 16 The relation between polarization axis and the scan direction for perpendicular type of photo.

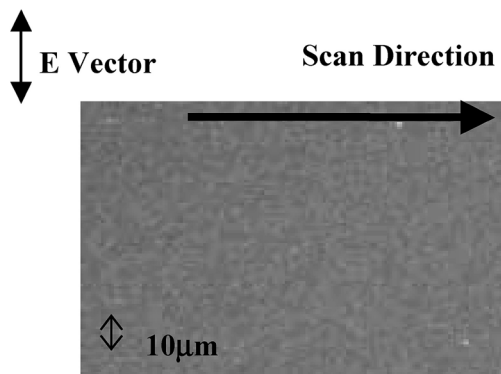


Fig. 17 Pretilt Angle of perpendicular type material, PM4ch.

## 5.5 光ラビングによる液晶プレチルト角発現機構の考察

### 5.5.1 解析実験

光ラビングによりプレチルト角が発現するメカニズムについては、配向膜表面の面内方向にのみならず面外方向における異方性の生成、ポリマー鎖の再配列に関する解析を行う必要がある。FT-IRや膜表面のリタデーシオンの測定より、フィルムの特角方向の異方性の変化を捉えようと試みたが、膜厚80nmに対して表面から深さ数nmの薄膜層の変化をこれら実験により捉えることは難しかった。

次に、AFMによる表面観察を行った。まず、PMI-15フィルムの露光部  $1.5\text{ J/cm}^2$  LPNUV光を照射した未露光部の表面状態の差異について、AFM観察を行ったところ、初期の膜厚、すなわち未露光部の膜厚が800nmであるのに対して、露光部は3nm程度、膜厚が減少することがわかった。露光部の膜厚の減少は、UV効果樹脂では良く知られている2量化にともなう体積収縮によるものと思われる<sup>19,20)</sup>。

次に、 $14\mu\text{m}$ ピッチのスリット露光マスクを用いて、図18のように、スキャンを行わずに法線方向より  $1.5\text{ J/cm}^2$ の露光をPMI-15フィルムを行った。

図19にスリットパターンにより露光されたPMI-15フィルム表面のAFM像を示す。図よりPMI-15表面にスリットパターンが転写されていることがわかる。表面形状の変化を、フィルム表面近傍の断面図として示した。未露光部に比べ

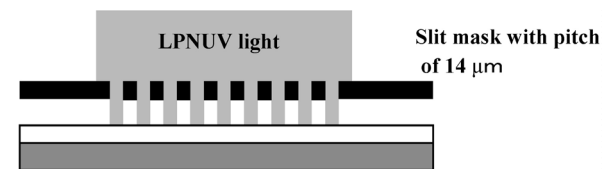


Fig. 18 Stationary exposure.

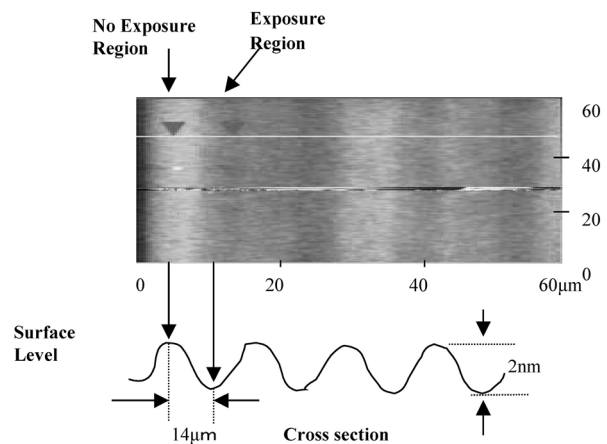


Fig. 19 A surface morphology observed by AFM.

て、露光部は凹状となりその段差は2nmとなっていることがわかった。

光ラビングを施したフィルムに対して、AFMの観察を実施したが、図に見られる顕著な凹凸形状は認められなかった。

また、X線全反射率測定による表面形状の変化やNEXAFSによる表面の異方的化学組成の解析も行った。X線全反射率の測定では、露光部と未露光部の差異についての情報は得られなかった。NEXAFSによる極角方向の物性変化の測定が進められているが、予備実験では、面内の異方性の生成を確認できる可能性を見出したものの、プレチルト角に関わる極角方向の界面情報を検出するには至っていない。光ラビングによるプレチルト角発現機構の解明のため、ナノスケールの表面状態を正確に捉えることができる解析手法の開発が待たれる。

### 5.5.2 発現機構の考察

以上のように、光スキャンにおけるプレチルト角の発現機構の解明には、裏付けとなる実験事実の積み重ねが必要であるが、現在考えられるモデルについて以下に示す。照射ビームの先端部では図20(a)に示すように露光部と未露光部の境界が生じる。この照射界面では、ポリマーの密度、極性、コンフォメーションに変化が生じ、ビームがポリマー表面を移動したときに非対称性を誘起することが考えられる(図20(a))。一方、AFMの結果より、露光部では2%程度の体積収縮があることがわかっている。ひとつの可能性として、ビーム先端では図20(b)に示したように、光反応サイドにおけるポリマー密度の増加によって引き起こされる高分子鎖の異方的な伸張・歪みが生じることが考えられる。したがって、光ラビングでは、PM-LPNUV光が光配向膜表面をスキャンすることにより、上述のような、面外の異方性に基づく非対称性構造が配向膜表面に生じ、このことがプレチルト角発現に参与しているものと考えられる。

## 6 光ラビングの改良型の検討

光ラビングは法線露光を基本としているため、基板は傾ける必要はない。そのため、光ラビング法を用いると、LCDの生産ラインにおいて最も好ましい流れ作業法による光配向プロセスが構築できる可能性がある。現在、光ラビング法の改良型として、工業的応用を視野にいれ、図21に示すように、流れ作業方式に適したプロジェクターを用いた光ラビング法も検討中である<sup>21)</sup>。プロジェクターによる光ラビングでは、周期的強度分布を持った偏光光はプ

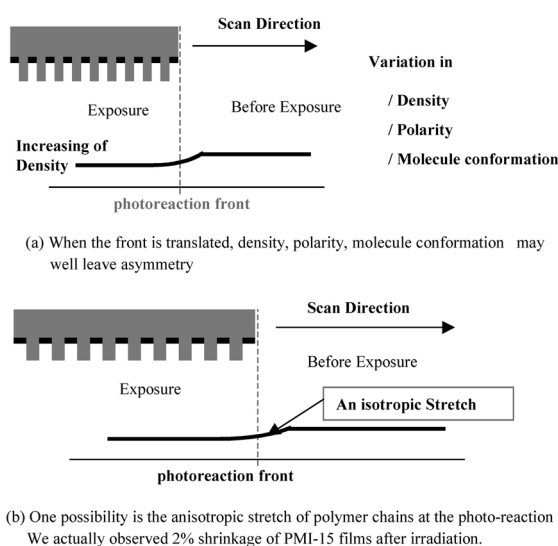


Fig. 20 Basic idea of photo-rubbing.

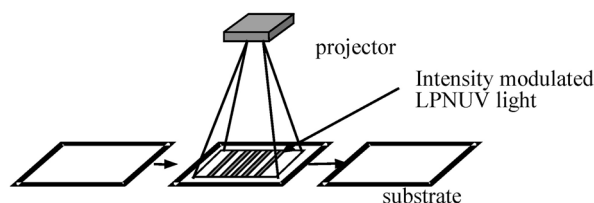


Fig. 21 The simplified photo-rubbing method by the projection exposure system such as the conveyer system.

ロジェクターにより、光配向膜表面に投影されるため、光配向膜基板は、図21のようにコンベア式に移動させるだけで良い。今後、有効な露光面積(現在、5cm<sup>2</sup>)の拡大を目指し開発を進める予定である。

## 7 まとめ

基板を傾けることなく法線露光により、光配向膜上の液晶プレチルト角を発現させる新規配向プロセスとして、光ラビング法を構築した。光ラビング法では、周期的な強度分布を持った近紫外光を光配向膜上で一定速度でスキャンさせると、そのスキャン方向にプレチルト角が発現することを示した。

次に、光ラビング法では、発現するプレチルト角は、スキャン速度により制御が可能であり、光配向膜の表面に誘起される液晶プレチルト角の安定性は従来のラビング法と同等になることを明らかにした。

この光ラビング法は、平行型と直交型のどちらの光配向材料でも一回の法線露光により再現性良く、且つ安定にプレチルト角が得られること、さらにベルトコンベア式の光配



---

向プロセスが設計可能なことから、工業的にも有望なプロセスであると思われる。

#### 謝辞

本開発研究は、実用化研究事業の一環としてNEDO (新エネルギー総合技術開発機構)より支援を受けて行われたものである。

#### 発表紙

Masayuki KIMURA, Shoichi NAKATA, Yutaka MAKITA, Yasuo MATSUKI, Atsushi KUMANO, Yasumasa TAKEUCHI and Hiroshi YOKOYAMA  
*Jpn. J. Appl. Phys.*, 41, pp. L1345-L1347 (2002.12).

New Photo-rubbing Technology by Projection Exposure System: Simplified method to Induce Stable Liquid Crystal Pretilt Angle On Photo-Alignment Films  
M. Kimura, S. Nakata, A. Kumano Y. Takeuchi and H. Yokoyama  
Technical Papers of International Symposium on Advanced Materials and Devices, pp.91-95, 2003

#### 引用文献

- 1 ) I. Kawamura: *Journal of the Image Information and Television Engineeres*, **54** (2004) 17.
- 2 ) Nikkei Business Publications: *Flat Panel Display 2003* (2003) 110.
- 3 ) J.A. Catellano: *Mol. Cryst. Liq. Cryst.*, **94** (1983) 33.
- 4 ) 長谷川正樹: *光技術コンタクト*, **39** (2001) 640.
- 5 ) W. Gibbons, P. S. Shannon, S. Sun and B. J. Swetlin: *Nature* **351** (1991) 49.
- 6 ) M. Schadt, K. Scmitt, V. Jozinkov and V. G. Chigrinov: *Jpn. J. appl. Phys.* **31** (1992) 2155.
- 7 ) M. Hasegawa and Y. Taira: *J. Photopolym. Sci.*

*Technol.* **8** (1995) 241.

- 8 ) Y. Makita, T. Natsui, S. Kimura, M. Kimura, K. Kuriyama, S. Nakata, Y. Mastuki, N. Bessho and Y. Takeuchi: *J. Photopolymer Sci. Tech.***11** (1998) 187.
- 9 ) M. Kimura, S. Nakata, Y. Makita, Y. Matsuki, A. Kumano, Y. Takeuchi, and H. Yokoyama: *Jpn. J. Appl. Phys.* **40** (2001) L352.
- 10 ) T. Hashimoto, T. Sugiyama, K. Katoh, T. Saitoh, H. Suzuki, Y. Iimura and S. Kobayashi: *SID '95*.
- 11 ) Y. Iimura, T. Saitoh, S. Kobayashi, and T. Hashimoto: *J. Photopolymer Sci. Technol.* **8** (1995) 257.
- 12 ) D. S. Seo and C.H. Lee: *Mol. Cryst. Liq. Cryst.* **329** (1999) 255.
- 13 ) D. S. Seo and L. L. Hang: *Liq. Cryst.* **23** (1999) 923.
- 14 ) J. L. Janing: *Appl. Phys. Lett.*, **21** (1972).
- 15 ) E. Guyon, T. Pieranski and M. Boix: *Lett. Appl. Eng. Sci.*, **1** (1973) 19.
- 16 ) W. A. Crosslamd, J. H. Morrissy and Needham: *J. Phys. D: Appl. Phys.*, **9** (1976) 2001.
- 17 ) W.R. Heffener, D.W. Berreman, M. Sammon, and S. Meibom: *Appl. Phys. Leet.* **36** (1980) 144.
- 18 ) S. Nakata, K. Kuriyama, M. Kimura, T. Natsui, Y. Makita, Y. Matsuki, A. Kumano and Y. Takeuchi: *Proceedings of the 6<sup>th</sup> International Display Workshops*, pp.89-92, 1999.
- 19 ) S. P. Pappas: *J. Radiation Curing July* (1987) 6.
- 20 ) D. L. Kurdikar and N. A. Peppas: *Polymer* **36** (1995) 2249.
- 21 ) M. Kimura, A. Kumano, Y. Takeuchi and H. Yokoyama: *Technical Papers of International Display Research Conference*, pp.325-328, 2003.