



ハイブリッド配向液晶電気光学マイクロレンズにおける 光学的特性および分子配向

増田 伸・能勢 敏明・佐藤 進

秋田大学鉱山学部電子工学科 〒010 秋田市手形学園町 1-1

(1990年12月10日受付, 1991年1月24日受理)

Optical Properties and Molecular Orientation in a Hybrid-Aligned Liquid Crystal Electrooptical Microlens

Shin MASUDA, Toshiaki NOSE and Susumu SATO

Department of Electronics, Mining College, Akita University,
1-1, Tegata Gakuencho, Akita 010

(Received December 10, 1990; Accepted January 24, 1991)

A hybrid-aligned liquid crystal electrooptical microlens is prepared using a hole-patterned electrode and nematic liquid crystals having a positive or a negative dielectric anisotropy in order to improve the lens performances. Light intensity profiles of the microlens and relations between converging efficiency and a diameter of the hole-pattern are measured. The converging efficiency of the hybrid-aligned liquid crystal microlens with a positive dielectric anisotropy is five times as large as that of a homogeneously aligned liquid crystal microlenses. Further, lens properties of a hybrid-aligned microlens with a negative dielectric anisotropy can also be improved. The lens performances of the hybrid-aligned microlens are discussed by using simple molecular orientation models.

1. はじめに

最近の液晶を用いたディスプレイデバイスの展開は目覚ましいものがあり、フルカラーの高精細ディスプレイの実現を目指して研究が盛んである。これらの液晶デバイスでは通常一対の平板電極の間に液晶を封入し、両電極間に生じる均一な電界による分子の配向効果に基づく電気光学効果を利用している。一方、筆者らは不均一な電界中における分子配向による空間的に不均一な屈折率分布特性を利用した新しい液晶光学デバイスを提案してきた¹⁻³⁾。すなわち、誘電異方性が正(p形)のネマティック液晶を用い、円形パターン状に電極を取り除いた基板と平板電極基板との組合せによる非対称な電極構造を有するホモニアス配向セルを作製し、その光学的諸特性の測定を行ってきた¹⁻³⁾。このとき、軸対称状に分布する不均一電界が得られ、この電界による液晶分子の配向効果によって微小なレンズ効果(液晶電気光学マイクロレンズ、以下液晶マイクロレンズと略す)が得られ、比

較的低い印加電圧で凸レンズ特性、高い印加電圧のとき凹レンズ特性が得られることが示されている¹⁻³⁾。

しかし、このようなホモニアス配向の液晶マイクロレンズでは、液晶分子の初期配向が基板に対して一定の方向でかつ平行になっているために、軸対称状の電界が印加された場合に、円形パターン内で液晶分子が基板から立ち上がる方向が異なるため液晶分子の配向状態が少し異なった二つの領域に分かれ、その境界部に液晶分子の配向方向と垂直方向にディスクリネーションラインが発生し、光学的特性に悪影響を及ぼすことが問題となっていた²⁾。このようなディスクリネーションラインが発生しないようにするために、電界印加により液晶分子の立ち上がる方向が一定に定まるように液晶分子の初期配向をホメオトロピック配向およびホモニアス配向処理を行った基板の組合せによるハイブリッド配向⁴⁾とした液晶マイクロレンズを作製した⁵⁾。

一方、誘電異方性が負(n形)の液晶を用いたホメオトロピック配向液晶マイクロレンズでは、低電圧印加で

凹レンズの特性となり、比較的高い印加電圧のとき凸レンズ特性が得られることが示されているが、凸レンズ特性では応答速度の面で有利であると考えられる⁶⁾。しかし、電界分布に対応して液晶分子が放射状に配向するため、放射状の偏光特性を有する偏光板を用いないと円形パターン全体をレンズとして有効に利用できない。

本研究では、以上のようなこれまで得られている液晶マイクロレンズの光学的特性における問題点を改善するため、初期配向処理をハイブリッド配向とし、p形およびn形液晶を用いて液晶マイクロレンズを作製し、それらの光学的特性の詳細な測定を行い、不均一電界中での分子配向モデルを用いてその特性を検討した結果について述べる。

2. 実験方法

2.1 ハイブリッド配向液晶マイクロレンズの作製

ITO ガラス基板およびガラス基板にアルミニウム膜を真空蒸着しフォトエッチング法によりそれぞれ直径が250, 450, 700 μm の円形パターン状に電極を除去した基板を組み合わせたセル内に、液晶材料として誘電異方性が正である K 15(BDH)または誘電異方性が負である ZLI-4318 (MERCK) を真空封入し、それぞれ p形, n形液晶マイクロレンズを作製した。なお、液晶セルの厚みはマイラースペーサを用いて 50 μm または 25 μm とし、円形パターン電極面には ZLI-3124 (MERCK) を用いて垂直配向処理を行い、また、対向電極としての ITO 平板電極面には PVA (polyvinyl alcohol) の塗布およびラビング処理を行うことによりハイブリッド配向とした。

2.2 透過光強度分布特性

光源として、He-Ne レーザー (1 mW) およびポリメータの組合せによる平行光線を用い、X-Y-Z ステージに固定した CCD リニアイメージセンサー (東芝 TCD 106 C, 1 ピクセル 7 μm) により液晶マイクロレンズの透過光強度を測定し、光軸方向における透過光強度分布特性を求めた。なお、レーザー光の偏光方向を液晶分子の配向方向と一致させ、ITO 基板側から入射し測定を行った。

2.3 偏光顕微鏡を用いたシステムによる干涉縞および像の観察

液晶セルを透過した常光と異常光の干渉による干涉縞の測定を行い、円形パターンにおける屈折率分布特性を求めた。ここで、単色光源として He-Ne レーザーを用い、偏光顕微鏡のポーラライザとアナライザを直交ニコ

ルとし、その間に液晶マイクロレンズセルをラビング方向がポーラライザの偏光方向に対して 45 度となるように挿入した。さらに、得られた像を CCD イメージセンサー (NED NC 8-C) およびパーソナルコンピュータを用いたシステムによって解析した。

次に、n形ハイブリッド配向液晶マイクロレンズにおいて、円形パターン内での液晶分子の配向状態を調べるため、ラビング方向と平行に偏光した白色光を ITO 基板側から入射し、アナライザの偏光方向を回転しながらその透過光の偏光特性を観察した。

2.4 光ファイバを用いたシステムによる集光効率の測定

液晶マイクロレンズの焦点位置に光ファイバ (シングルモード, コア径 10 μm) を置き、He-Ne レーザーと光ファイバとを液晶マイクロレンズによって結合し、マイクロレンズによる集光効率を測定した。すなわち、円形パターン部を透過した光ビームがすべて光ファイバ内に集光された場合 (効率 100%) に対する液晶マイクロレンズを用いた場合の集光の割合を集光効率と定義し、おのおの液晶マイクロレンズにおける集光効率を測定した。このとき、液晶マイクロレンズの開口数は光ファイバのそれよりも十分小さいため開口数損失は無視できるものとした。

3. 実験結果

3.1 p形液晶によるハイブリッド配向液晶マイクロレンズ

Fig. 1 に直径 700 μm , セル厚 50 μm の p形ハイブリッド配向液晶マイクロレンズの透過光強度分布特性を示す。電圧を印加しない場合には、Fig. 1(a) に示すように入射した光がそのまま液晶セルを透過し、レンズ効果が生じていないことがわかる。Fig. 1(b) は 6 V 程度の比較的低い電圧を印加した場合であり、液晶セルからの距離が増加するとともに透過光の幅が狭くなり、ピーク強度が最大となった後に減少していることから、入射光が集光されていることがわかる。印加電圧をさらに増して 20 V とすると、Fig. 1(c) に示したように集光特性は認められず、透過光が発散していることが確認でき、凹レンズ特性が得られていることがわかる。

透過光強度が最大となる距離がレンズの焦点距離に対応しているとして求めた印加電圧と焦点距離の関係を **Fig. 2** に示す。印加電圧が 0 V のとき液晶セルはレンズ効果を示さない (焦点距離無限大) が、印加電圧が大きくなるとともに焦点距離が短くなり、最小値をとった

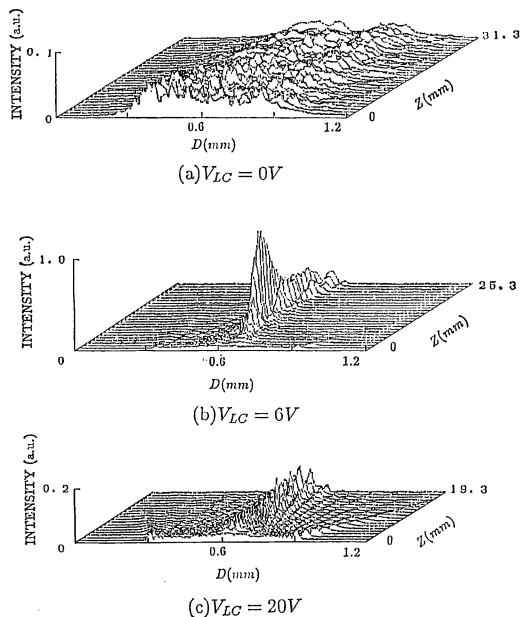


Fig. 1 Light intensity profiles through the hybrid-aligned liquid crystal microlens with a positive dielectric anisotropy. (a) $V_{LC}=0$ V; (b) $V_{LC}=6$ V; (c) $V_{LC}=20$ V.

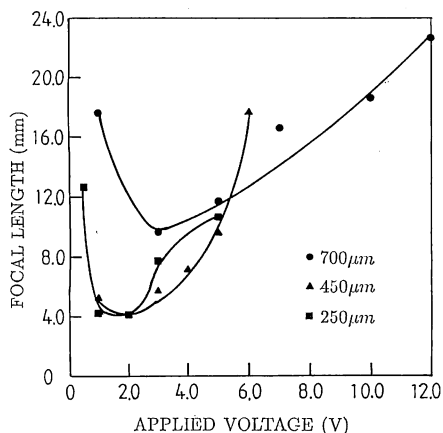


Fig. 2 Relationship between the focal length and the applied voltage in the hybrid-aligned liquid crystal microlens with a positive dielectric anisotropy. The thickness of the cell is $50 \mu\text{m}$.

後再び長くなる様子が見られる。また、液晶層の厚みが同じ場合には、パターンの直径が大きいほうが焦点距離が長くなっているが、これは直径が大きくなるとパターン内での屈折率分布が緩やかになるためであると考えられる。

次に、透過光強度分布特性より求めた印加電圧とピーク強度の特性を **Fig. 3** に示す。一般のレンズでは、その集光特性が同程度ならば直径の大きなレンズのほうが

入射光量が多いため集光ピーク強度が大きくなると考えられる。本研究における液晶マイクロレンズでは、円形パターンの直径が $250 \mu\text{m}$ 、セル厚が $50 \mu\text{m}$ の場合に最も大きなピークが生じており、効率のよいレンズが得られていると考えられる。このときのピーク値は p 形液晶によるホモニアス配向の液晶マイクロレンズの場合⁵⁾ よりも大きく、さらに、集光スポットの径が $7 \mu\text{m}$ 以下と小さくなっており、ハイブリッド配向とすることによって集光特性を改善することができた。

Fig. 4 に偏光顕微鏡を用いたシステムにより観察した p 形液晶によるハイブリッド配向液晶マイクロレンズにおける干渉像を示す。電圧を印加すると、電界強度が大きい円形パターンのエッジ付近から液晶分子が電界方向に配向するために干渉縞が現れ、さらに印加電圧を大きくすると、干渉縞が円形パターン状となって中心部に移動し、周辺部から新たな縞が現われる。非常に大きな電圧を印加すると、ポーライザとアナライザの偏光方向に対応する十字状のパターンが現れ、液晶分子が軸対称状に配向している様子が観察される。このようなハイブリッド配向の液晶マイクロレンズでは、p 形ホモニアス配向の液晶マイクロレンズにおいて低電圧印加時に

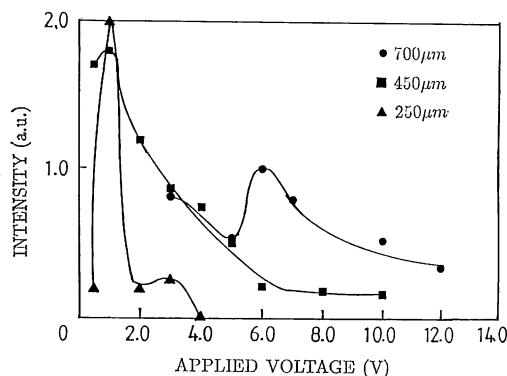


Fig. 3 Relationship between the peak intensity and the applied voltage in the hybrid-aligned liquid crystal microlens with a positive dielectric anisotropy. The thickness of the cell is $50 \mu\text{m}$.

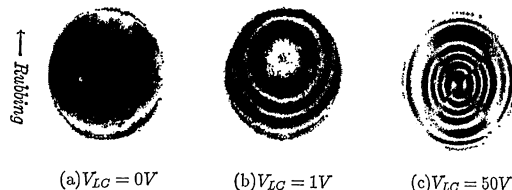


Fig. 4 Fringe patterns of the hybrid-aligned liquid crystal microlens with a positive dielectric anisotropy. (a) $V_{LC}=0$ V; (b) $V_{LC}=1$ V; (c) $V_{LC}=50$ V.

見られたようなディスクリネーションラインは観察されなかった。

p形液晶を用いたハイブリッド配向マイクロレンズ、およびp形ホモニアス配向の液晶マイクロレンズによる集光効率を測定した結果を Fig. 5 に示す。この図より、ホモニアス配向液晶マイクロレンズでは円形パターンの直径を変化しても集光効率が 5% 程度とあまり変化しないが、ハイブリッド配向の液晶マイクロレンズではパターン直径が小さくなるとともに集光効率が大きくなり、パターン直径 250 μm、セル厚 50 μm の場合に 24% と大きな値が得られることがわかる。これは、ホモニアス配向の液晶マイクロレンズにおいて見られるディスクリネーションラインがハイブリッド配向のマイクロレンズでは生じないためであると考えられる。

以上の結果より、円形パターン内における液晶分子の配向状態として Fig. 6 に示すようなモデルを考える。円形パターン電極側は垂直配向、ITO 透明電極側は平行配向処理を行っているので、電圧を印加しない場合には液晶分子は同一方向に一樣に立ち上がるような配向になっていると考えられる。比較的低い電圧を印加した場合には、電界強度の大きい円形パターンの周辺部付近の液晶分子の長軸方向が電界方向に配向し始めるために実効的に屈折率が異常光に対応する値よりも小さくなり、液晶分子の屈折率がパターンの中心部へ向かって大きくなるような分布状態、すなわち凸レンズ特性が得られるものと考えられる。また、このとき、液晶分子が電界方向に立ち上がる方向が一様でかつなめらかであるため、ディスクリネーションラインは生じないものと考えられ

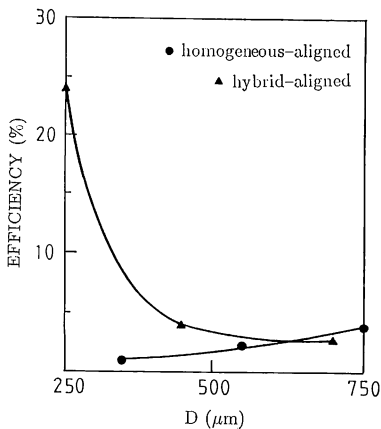


Fig. 5 Relationship between the converging efficiencies and the diameter of the hole-pattern in the hybrid-aligned and homogeneous-aligned liquid crystal microlens with a positive dielectric anisotropy. The thickness of the cell is 50 μm.

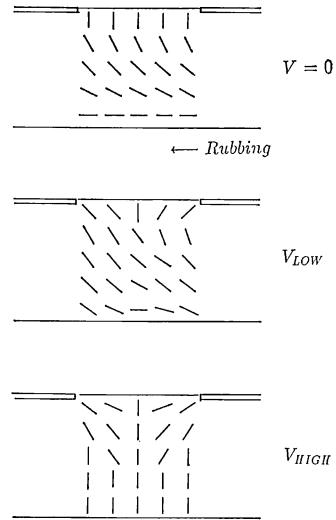


Fig. 6 Molecular orientation models of the hybrid-aligned liquid crystal microlens with a positive dielectric anisotropy.

る。さらに印加電圧を大きくすると、パターン全域において液晶分子の長軸が電界方向に配向するようになり、電界方向の分布により円形パターンの中心に向かって液晶分子の屈折率が小さくなるような分布状態、すなわち凹レンズ特性が得られるものと思われる。

3.2 n形液晶によるハイブリッド配向液晶マイクロレンズ

n形液晶によるハイブリッド配向液晶マイクロレンズの透過光強度分布特性を Fig. 7 に示す。電圧を印加しない場合には、入射光がそのまま液晶セルを透過しているが、数V程度の比較的低い電圧を印加すると透過光が徐々に広がっているような凹レンズ特性が得られていることがわかる。印加電圧をさらに大きくすると、透過光強度分布特性に鋭いピークが見られる集光特性を示し、凸レンズ特性が得られることがわかる。

透過光強度分布特性より得られた印加電圧-焦点距離特性を液晶セル厚をパラメータとして Fig. 8 に示す。電圧を印加しない場合には、液晶セルは素通り状態であるが、凸レンズとしての特性が現れるような電圧を印加すると集光特性から焦点距離を測定することができる。このとき、印加電圧の増加とともに焦点距離が短くなり、さらに印加電圧が大きくなるとほとんどの液晶分子が電界方向と垂直に配向するために、焦点距離が一定となることがわかる。液晶セル厚が 25 μm と 50 μm の場合に電圧-焦点距離特性がほぼ一致しているが、12 μm のスペーサを用いた場合には焦点距離が長くなるという結

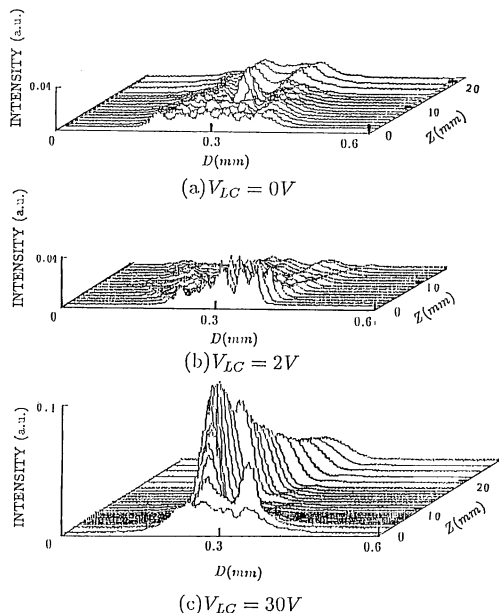


Fig. 7 Light intensity profiles through the hybrid-aligned liquid crystal microlens with a negative dielectric anisotropy. The diameter of the hole-pattern is $250\ \mu\text{m}$ and the thickness of the cell is $50\ \mu\text{m}$. (a) $V_{LC}=0\ \text{V}$; (b) $V_{LC}=2\ \text{V}$; (c) $V_{LC}=30\ \text{V}$.

果が得られた。これは、初期配向で液晶セルのITO基板側ではホモニアス配向であり、また、円形パターン内の電界分布のシミュレーションの結果より、n形液晶を封入した液晶セルに十分大きな電圧を印加した場合、厚い液晶セルではITO基板側の分子がほぼ一様に基板に対し平行に配向したままであると考えられ、そのために液晶層の厚みの増加分がすべてレンズ効果に寄与していないことによるものと考えられる。

次に、透過光強度分布特性より得られた印加電圧-ピーク強度特性を、円形パターンの直径をパラメータとして **Fig. 9** に示す。印加電圧の増加とともにピーク強度が大きくなり飽和するという特性が得られた。これは、ある値以上の印加電圧で大部分の液晶分子が電界方向と垂直に配向してしまうことを示している。

n形液晶によるハイブリッド配向液晶マイクロレンズにおいて、ITO基板側からラビング方向すなわち液晶分子の配向方向の偏光を入射し、偏光顕微鏡を用いて観察した結果を **Fig. 10** に示す。図から、アナライザの偏光方向に平行な方位で明るくなり、またアナライザを回転すると明るい領域も追従して回転していることがわかる。すなわち、ホモニアス・軸対称配向の液晶セルによる軸対称偏光素子の場合⁷⁾と同様に、ITO基板側から

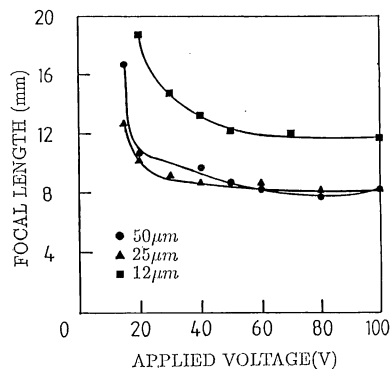


Fig. 8 Relationship between the focal length and the applied voltage in the hybrid-aligned liquid crystal microlens with a negative dielectric anisotropy. The diameter of the hole-pattern is $250\ \mu\text{m}$.

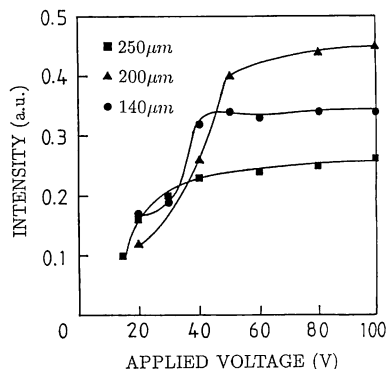


Fig. 9 Relationship between the peak intensity and the applied voltage in the hybrid-aligned liquid crystal microlens. The thickness of the cell is $50\ \mu\text{m}$.

入射した直線偏光が液晶分子の配向状態に応じて放射状に分布した偏光状態に変化していることがわかる。しかし、ディスクリネーションラインがラビング方向に生じており、液晶分子が完全に放射状に配向しているわけではないことがわかり、集光特性に悪影響を及ぼしているものと考えられる。また、この測定により、同じセル厚では円形パターンの小さい場合のほうが電界強度が大きいため、円形パターンが大きい場合よりも良好に放射状に配向していることが確認され、集光特性および集光効率が良いと考えられる。

さらに、p形ハイブリッド配向液晶マイクロレンズの場合と同様に、光ファイバへの集光効率を測定し、n形液晶によるホモトピック配向液晶マイクロレンズの場合と比較した結果を **Fig. 11** に示す。同程度の液晶セ

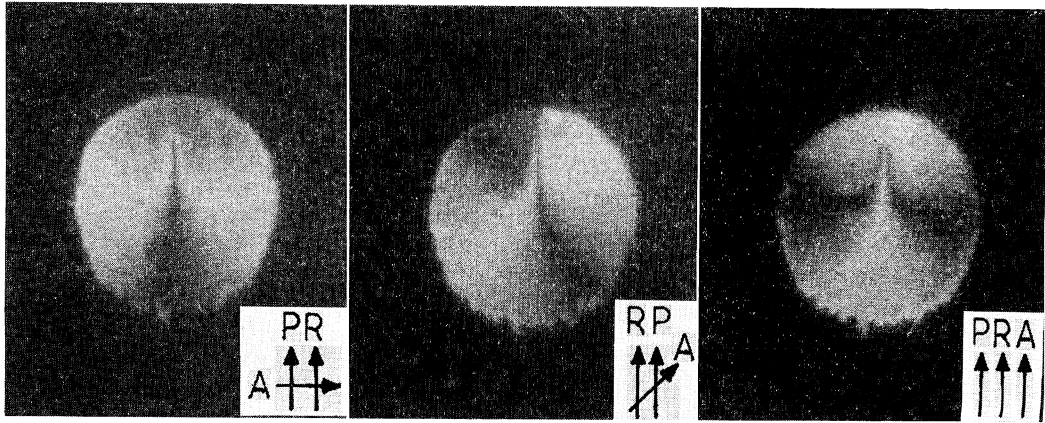


Fig. 10 Photographs of the hybrid-aligned microlens with a negative dielectric anisotropy using a polarizing microscope. The applied voltage is 100 V. A: analyzer, P: polarizer, R: rubbing.

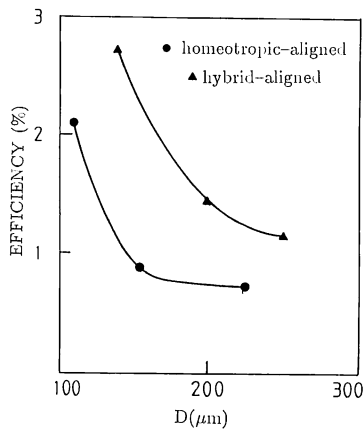


Fig. 11 Relationship between the converging efficiencies and the diameter of the hole-pattern in the hybrid-aligned and homeotropic-aligned liquid crystal microlens with a negative dielectric anisotropy. The thickness of the cell is 50 μm.

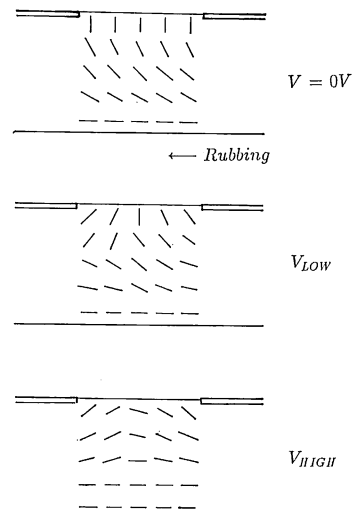


Fig. 12 Molecular orientation models of the hybrid-aligned liquid crystal microlens with a negative dielectric anisotropy.

ル厚, パターン直径で比較すると, ハイブリッド配向液晶マイクロレンズのほうが集光効率が大きくなっており, レンズ特性が改善されていることがわかる。

以上の結果を基に, n形液晶を用いたハイブリッド配向液晶マイクロレンズの分子配向モデルを **Fig. 12** に示す. 電圧を印加しない初期のハイブリッド配向状態から, 比較的低電圧印加においてパターンの周辺部付近の液晶分子が電界方向に垂直に配向し始め, 円形パターン中心に向かって屈折率が小さくなるような凹レンズとしての分布状態への変化が生じる. さらに電界を大きくすると, 液晶分子が電界方向に垂直に配向し, 円形パターン内の中心に向かって屈折率が大きくなる凸レンズとしての分布状態が得られるものと思われる。

4. ま と め

p形液晶を用いたハイブリッド配向液晶マイクロレンズでは, 透過光強度分布特性より, 集光スポットの大きさが 7 μm 以下となっており, ホモジニアス配向液晶マイクロレンズと比較して 1/3 以下に絞られていることがわかった. さらに, 電圧印加時にディスクリネーションラインが生じないため集光特性が改善され, 同じ程度のホモジニアス配向液晶マイクロレンズと比較して5倍程度の集光効率の改善効果が得られた。

n形液晶を用いたハイブリッド配向液晶マイクロレンズにおいて, 低電圧印加において凹レンズ特性, 高電圧

印加において凸レンズ特性が確認された。また、同じセル厚の場合、円形パターンの小さい場合のほうが電界強度が大きく、より放射状に近い状態に液晶分子を配向させることができるため集光特性、および集光効率ともよくなることがわかった。さらに、直線偏光の入射光が放射状に分布した偏光状態に変化し、レンズとして動作するために直線偏光板を使用した場合でもホメオトロピック配向のn形液晶マイクロレンズと比較して2倍程度の集光効率の改善を行うことができた。

文 献

- 1) T. Nose and S. Sato: "A liquid crystal microlens obtained with a non-uniform electric field," *Liq. Cryst.*, **5** (1989) 1425-1433.
- 2) T. Nose and S. Sato: "Optical properties of a liquid crystal microlens," *Proc. SPIE*, **1230** (1990) pp. 17-20.
- 3) 能勢敏明, 佐藤 進: "ネマティック液晶素子による光ファイバスイッチ", 電子通信学会技術報告, **ECM 88-42** (1988) pp. 7-12.
- 4) 佐藤 進, 和田正信: "多層構造混合液晶セルによる色彩表示", 東北大学電通談話会記録 (1974) pp. 43-47.
- 5) T. Nose and S. Sato: "Optical properties of a hybrid aligned liquid crystal microlens," *The 13th International Liquid Crystal Conference, Vancouver, APP-50-P-II* (1990) p. 37.
- 6) 能勢敏明, 辺春博幸, 増田 伸, 佐藤 進: "液晶マイクロレンズの特性と光ファイバスイッチへの応用", 電子情報通信学会技術報告, **ECM 90-24** (1990) pp. 29-36.
- 7) R. Yamaguchi, T. Nose and S. Sato: "Liquid crystal polarizers with axially symmetrical properties," *Jpn. J. Appl. Phys.*, **28** (1989) 1730-1731.