

Южно-Уральский государственный университет

Кафедра оптоинформатики

КАЛАШНИКОВ Игорь Николаевич

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ МАТРИЦЫ ДЖОНСА
ЖИДКОКРИСТАЛЛИЧЕСКОЙ ЯЧЕЙКИ**

Выпускная квалификационная работа магистра

Научный руководитель
д.ф.-м.н. Н.Д. Кундикова

Челябинск 2018

Оглавление

Введение

1 Особенности жидких кристаллов. Обзор литературы

1.1 Основные виды жидких кристаллов

1.2 Электрооптические свойства жидких кристаллов

1.3 Применение жидких кристаллов

2 Методы определения матрицы Джонса

2.1 Матричный метод Джонса для определения элементов матрицы Джонса

2.2 Метод определения элементов матрицы Джонса, основанный на теореме Савенкова

3 Экспериментальное определение матрицы Джонса жидкокристаллической ячейки

3.1 Экспериментальное определение элементов матрицы Джонса методом, основанном на теореме Савенкова

Заключение

Литература

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время, высокоскоростная фазовая модуляция, с низким энергопотреблением, пользуется большим спросом для различных применений, таких как дисплеи, перестраиваемые решетки, управление лучом, а также несколько других фотонных устройств [1-6]. Жидкокристаллические (ЖК) фазовые модуляторы очень популярны для этой цели, и среди всех ЖК фаз широко используются нематические жидкие кристаллы. Однако, нематики имеют медленную реакцию и, кроме того, эта медленная реакция становится еще хуже, если толщину слоя ЖК увеличивать для получения фазовой модуляции 2π . Последнее означает, что фаза может быть плавно настроена от нуля до 2π . Есть ряд фотонных приборов таких как жидкокристаллические линзы, перестраиваемые фокусаторы и корректоры волнового фронта [7-8], где модуляция 2π имеет решающее значение. В связи с этим, проводятся многие усилия в процессе оптимизации для достижения наивысшей эффективности в различных ЖК электрооптических модах для высокоскоростной фазовой модуляции. Для улучшения времени реакции в некоторых недавних работах на более быстрое переключение режимов жидких кристаллов включали, режим полимерно-стабилизированной синей жидкокристаллической фазы (PSBPLC) и хиральный наноструктурированный прибор, основывающийся на эффекте Керра [9-16].

Постоянная Керра для PSBPLC((ПССЖКФ)полимерно-стабилизированной синей жидкокристаллической фазы) как правило меньше по сравнению с другими перестраиваемыми фазовыми ЖК модуляторами [2,5,14]. Этот способ характеризуется относительно небольшое фазовым изменением. Однако, недавно сообщалось в работах [4,9,13,17] что существует новый класс PSBPLS (полимерно-стабилизированной синей жидкокристаллической фазы), который показывает более высокий показатель постоянной Керра. Для получения этих материалов, процедура изготовления является очень сложной, поскольку она требует специальных условий обработки такие как, ультрафиолетовое отверждение при точной температуре

в пределе синей жидкокристаллической или изотропной фазе и смеси некоторых составляющих компонент [18,19].

Сегнетоэлектрические жидкие кристаллы (FLC) означают другое и выступают наиболее успешным вариантом характеризующиеся очень быстрым временем отклика [20]. Однако, большинство сегнетоэлектрических ЖК фаз не подходит для устройств чисто фазовой модуляции, так как развертка оптической оси в срезе ячейки производит изменения в состоянии поляризации падающего света. Для того что бы обойти проблему переключения оптической оси, система, состоящая из сегнетоэлектрической ЖК пластины, зажата между двумя четвертьволновыми пластинами [21,22]. Но в этой системе 2π фазовой модуляции смектический угол наклона должен быть равен 45° . Эта задача является реальной проблемой для материальной науки. Даже в том случае если некоторые антисегнетоэлектрические и сегнетоэлектрические жидкие кристаллы обладают требуемым углом наклона, сложность заключается в том что, что время отклика резко возрастает, когда угол наклона поднимается до 45 градусов [20,23].

Здесь мы обсудим подход к фазовой модуляции, которая использует электрооптические свойства спиральной структуры в деформированной спирали сегнетоэлектрических жидких кристаллов (DHFLC) [20-24]. Для эффективного тензора диэлектрической проницаемости гомогенизированных вертикально-ориентированных деформированных спиралей сегнетоэлектрических жидкокристаллических ячеек (VADHFLCs) с субволновым шагом, оказалось, что, в согласии с результатами экспериментального исследования [22], где режим VADHFLC был использован для достижения 2π фазовой модуляции на длине волны 1,55 мкм, подавляются в плоскости вращения оптической оси. Оптическая анизотропия субволнового шага VADHFLCs оказывается в основном по двум осям и, в режиме низкого напряжения, электрического поля зависимость двулучепреломления обладает квадратичной нелинейностью, которые могут быть истолкованы как ориентационной эффекта Керра.

Для эффективного тензора диэлектрической проницаемости обеспечивается однородность вертикально-деформированной спирали сегнетоэлектрических ЖК субволнового шага. Отсюда вытекает то, что в соответствии с результатами экспериментальных исследований, вариант вертикально-деформированной спирали сегнетоэлектрических ЖК был использован для достижения 2π фазовой модуляции длиной волны в 1,55 мкм, в плоскости вращения подавления поворота оптической оси. Анизотропия оптических свойств укороченного шага вертикально-деформированной спирали сегнетоэлектрических ЖК обнаруживает, как правило, двуосную анизотропию и в низковольтном режиме, зависимость электрического поля демонстрирует двулучепреломление квадратичной нелинейности, что может объясняться как ориентационный эффект Керра [9, 25].

Линейный поляризованный свет может приобретать эллиптичность из-за вакуумного магнитного двулучепреломления [26, 27] из-за сильных взаимодействий между хиральными молекулами и орбитальным угловым моментом света [28] и из-за отражения от интерференционного зеркала [29-31]. Двулучепреломление и дихроизм можно индуцировать в растянутом напряженном объемном полупроводниковом оптическом усилителе [32]. Эллиптическая поляризация света появляется в локализованных структурах в широкополосных вертикально-полостных поверхностно-излучающих лазерах [15,33]. Распространение через двулучепреломляющий или хиральный материал, отражение или преломление на границе раздела приводит к тому, что линейно поляризованный свет также становится эллиптически поляризованным [34]. Измерения эллиптичности предоставляют информацию о степени выравнивания оптически анизотропных блоков [35] и о двулучепреломлении слоя нервных волокон сетчатки приматов [36].

Для определения эллиптичности светового пучка используются фотометрические методы, включающие измерение параметров Стокса и эллипсометрические методы [34,37,38]. Значения полученной эллиптичности

могут быть как 10^{-3} [15]. В принципе, известные фотометрические методы позволяют измерять небольшие эллиптичности, но требуют точных фотометрических приборов и достаточно мощных лазеров. Эллипсометрические методы требуют компенсатора (фазовую пластинку) и анализатора. Если эллиптически поляризованный свет распространяется через компенсатор и анализатор, световая гамма может происходить при правильной ориентации компенсатора и анализатора. Для определения любого состояния поляризации в качестве компенсатора обычно используется четвертьволновая пластинка с фазовой задержкой $\Gamma = \pi / 2$ [34,39,40].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким, образом, в результате проведенных исследований была собрана экспериментальная установка для определения элементов матрицы Джонса жидкокристаллической ячейки при различных приложенных полях.

Выбран метод для экспериментального определения элементов матрицы Джонса жидкокристаллической ячейки, который основывается на теореме Савенкова.

Экспериментально определены эффективные параметры и матрица Джонса жидкокристаллической ячейки при различных приложенных полях.

Обнаружено

- ориентация медленной оси ЖК-ячейки нелинейно зависит от приложенного поля;
- двулучепреломление ЖК-ячейки нелинейно зависит от приложенного прикладываемого поля.
- линейный и циркулярный дихроизм практически не зависят от величины приложенного поля.

Полученные результаты могут быть использованы для описания динамики преобразования состояния поляризации света, проходящего через ЖК-ячейку при изменении прилагаемого напряжения, а также выбора такого состояния поляризации на входе в ЖК-ячейку, которое бы обеспечивало максимальный контраст интенсивности прошедшего через анализатор излучения при максимальном и минимальном значении приложенного электрического поля.

Литература

1. Engström, D., O'Callaghan, M. J., Walker, C. & Handschy, M. A. Fast beam steering with a ferroelectric-liquid-crystal optical phased array. *Appl. Opt.* **48**, 1721 (2009).
2. Ren, H., Lin, Y., Fan, Y. & Wu, S. Polarization-independent phase modulation using a polymer-dispersed liquid crystal. *Appl. Phys. Lett.* **86**, 141110 (2005).
3. Martínez, J. L., Martínez-García, A. & Moreno, I. Wavelength-compensated color Fourier diffractive optical elements using a ferroelectric liquid crystal on silicon display and a color-filter wheel. *Appl. Opt.* **48**, 911–918 (2009).
4. Hisakado, Y., Kikuchi, H., Nagamura, T. & Kajiyama, T. Large electro-optic Kerr effect in polymer-stabilized liquid-crystalline blue phases. *Adv. Mater.* **17**, 96–98 (2005).
5. Pozhidaev, E. *u dp*. Phase modulation and ellipticity of the light transmitted through a smectic C* layer with short helix pitch. *Liq. Cryst.* **37**, 1067–1081 (2010).
6. Jákli, A. Liquid crystals of the twenty-first century – nematic phase of bent-core molecules. *Liq. Cryst. Rev.* **1**, 65–82 (2013).
7. Vdovin, G. V. *u dp*. Modal liquid crystal wavefront correctors. *Bull. Russ. Acad. Sci. Phys.* **72**, 71–77 (2008).
8. Kotova, S. P. *u dp*. Technology and electro-optical properties of modal liquid crystal wavefront correctors. *J. Opt. A Pure Appl. Opt.* **5**, S231–S238 (2003).
9. Hisakado, Y., Kikuchi, H., Nagamura, T. & Kajiyama, T. Large electro-optic Kerr effect in polymer-stabilized liquid-crystalline blue phases. *Adv. Mater.* **17**, 96–98 (2005).
10. Weinberger, P. John Kerr and his effects found in 1877 and 1878. *Philos. Mag. Lett.* **88**, 897–907 (2008).
11. Melnichuk, M. & Wood, L. T. Direct Kerr electro-optic effect in noncentrosymmetric materials. *Phys. Rev. A* **82**, 1–9 (2010).

12. Pozhidaev, E. P. *u ∂p*. Enhanced orientational Kerr effect in vertically aligned deformed helix ferroelectric liquid crystals. *Opt. Lett.* **39**, 2900 (2014).
13. Shi, L., Kumar Srivastava, A., Chigrinov, V. G. & Kwok, H.-S. Kerr effect and Kerr constant enhancement in vertically aligned deformed helix ferroelectric liquid crystals. *Chinese Phys. B* **25**, 094212 (2016).
14. Pozhidaev, E. P. *u ∂p*. Orientational Kerr effect and phase modulation of light in deformed-helix ferroelectric liquid crystals with subwavelength pitch. *Phys. Rev. E* **87**, 1–8 (2013).
15. Azzam, R. M. A. The intertwined history of polarimetry and ellipsometry. *Thin Solid Films* **519**, 2584–2588 (2011).
16. Pozhidaev, E. P. *u ∂p*. Enhanced orientational Kerr effect in vertically aligned deformed helix ferroelectric liquid crystals. *Opt. Lett.* **39**, 2900–3 (2014).
17. Zhu, J. L. *u ∂p*. Improved Kerr constant and response time of polymer-stabilized blue phase liquid crystal with a reactive diluent. *Appl. Phys. Lett.* **102**, 19–23 (2013).
18. Yan, J. *u ∂p*. Low voltage and high contrast blue phase liquid crystal with red-shifted Bragg reflection. *Appl. Phys. Lett.* **102**, (2013).
19. Peng, F. *u ∂p*. Low temperature and high frequency effects on polymer-stabilized blue phase liquid crystals with large dielectric anisotropy. *J. Mater. Chem. C* **2**, 3597–3601 (2014).
20. Chigrinov, V. G., Srivastava, A. K. & Pozhidaev, E. P. Ferroelectric Liquid Crystals: Physics and Applications. *Liq. Cryst. their Appl.* **16**, 9–21 (2016).
21. Srivastava, A. K., Chigrinov, V. G. & Kwok, H. S. Ferroelectric liquid crystals: Excellent tool for modern displays and photonics. *J. Soc. Inf. Disp.* **23**, 253–272 (2015).
22. Lee, J.-H. *u ∂p*. High-speed infrared phase modulators using short helical pitch ferroelectric liquid crystals. *Opt. Express* **13**, 7732 (2005).
23. Kurp, K., Czerwiński, M. & Tykarska, M. Ferroelectric compounds with

- chiral (S)-1-methylheptyloxycarbonyl terminal chain – their miscibility and a helical pitch. *Liq. Cryst.* **42**, 248–254 (2015).
24. Andreev, A. L. & Kompanets, I. N. Paper No 9 . 1 : Unique Parameters of Display Cells Based on New FLC , and Prospects of Their Applications (Invited Paper). *EuroDisplay* 185–188 (2013).
 25. Schlick, M. C. *u dp*. Large Electro-Optic Kerr Effect in Ionic Liquid Crystals: Connecting Features of Liquid Crystals and Polyelectrolytes. *ChemPhysChem* 1–9 (2018). doi:10.1002/cphc.201800347
 26. Della Valle, F. *u dp*. Measurements of vacuum magnetic birefringence using permanent dipole magnets: The PVLAS experiment. *New J. Phys.* **15**, 1–25 (2013).
 27. Zavattini, E. *u dp*. PVLAS : probing vacuum with polarized light. *Nucl. Phys. B - Proc. Suppl.* **164**, 264–269 (2007).
 28. Wu, T., Wang, R. & Zhang, X. Plasmon-induced strong interaction between chiral molecules and orbital angular momentum of light. *Sci. Rep.* **5**, 18003 (2015).
 29. Carusotto, S. *u dp*. The ellipticity introduced by interferential mirrors on a linearly polarized light beam orthogonally reflected. *Appl. Phys. B Photophysics Laser Chem.* **48**, 231–234 (1989).
 30. Bielsa, F. *u dp*. Birefringence of interferential mirrors at normal incidence : EEExperimental and computational study. *Appl. Phys. B Lasers Opt.* **97**, 457–463 (2009).
 31. Dupré, P. Birefringence-induced frequency beating in high-finesse cavities by continuous-wave cavity ring-down spectroscopy. *Phys. Rev. A - At. Mol. Opt. Phys.* **92**, 1–14 (2015).
 32. Xiang, S. *u dp*. Polarization properties of vertical-cavity surface-emitting lasers subject to feedback with variably rotated polarization angle. *Appl. Opt.* **48**, 5176–5183 (2009).
 33. Averlant, E., Tlidi, M., Thienpont, H., Ackemann, T. & Panajotov, K. Vector cavity solitons in broad area Vertical-Cavity Surface-Emitting Lasers. *Sci.*

- Rep.* **6**, 1–7 (2016).
34. Kathrein, C. C. *u dp.* Reorientation mechanisms of block copolymer/CdSe quantum dot composites under application of an electric field. *Soft Matter* **12**, 8417–8424 (2016).
 35. Guo, L. Q. & Connelly, M. J. Signal-induced birefringence and dichroism in a tensile-strained bulk semiconductor optical amplifier and its application to wavelength conversion. *J. Light. Technol.* **23**, 4037–4045 (2005).
 36. Rylander, H. G., Kemp, N. J., Park, J., Zaatari, H. N. & Milner, T. E. Birefringence of the primate retinal nerve fiber layer. *Exp. Eye Res.* **81**, 81–89 (2005).
 37. Shinki, M. *u dp.* Autocalibrating Stokes polarimeter for materials characterization. *Appl. Opt.* **51**, 4113 (2012).
 38. Holmes, D. A. & Feucht, D. L. Formulas for Using Wave Plates in Ellipsometry. *J. Opt. Soc. Am.* **57**, 466 (1967).
 39. Clarke, D. Interference effects in single wave plates. *J. Opt. A Pure Appl. Opt.* **6**, 1036–1040 (2004).
 40. Bibikova, E. A. & Kundikova, N. D. Properties of an adjustable quarter-wave system under conditions of multiple beam interference. *Appl. Opt.* **52**, 1852 (2013).
 41. Kurokawa, T. & Fukushima, S. Spatial light modulators using ferroelectric liquid crystal. *Opt. Quantum Electron.* **24**, 1151–1163 (1992).
 42. Cohen, G. B., Pogreb, R., Vinokur, K. & Davidov, D. Spatial light modulator based on a deformed-helix ferroelectric liquid crystal and a thin a-Si:H amorphous photoconductor. *Appl. Opt.* **36**, 455–459 (1997).
 43. Vicari, L. Optical Applications of Liquid Crystals. *Opt. Appl. Liq. Cryst.* 284 (2003). doi:10.1887/0750308575
 44. Блинов, Л. М. *Жидкие кристаллы: Структура и свойства.* (М.: Книжный дом «ЛИБРОКОМ», 2013).
 45. Vertogen, G. & Willems, W. H. *Thermotropic Liquid Crystals, Fundamentals.* (Springer Berlin Heidelberg, 1988). doi:10.1007/978-3-642-

46. Rego, J. a., Harvey, J. a. a., MacKinnon, A. L. & Gatlula, E. Asymmetric synthesis of a highly soluble 'trimeric' analogue of the chiral nematic liquid crystal twist agent Merck S1011. *Liq. Cryst.* **37**, 37–43 (2009).
47. Provenzano, C., Pagliusi, P. & Cipparrone, G. Highly efficient liquid crystal based diffraction grating induced by polarization holograms at the aligning surfaces. *Appl. Phys. Lett.* **89**, 87–90 (2006).
48. Mitov, M. Cholesteric Liquid Crystals with a Broad Light Reflection Band. *Adv. Mater.* **24**, 6260–6276 (2012).
49. Bunning, T. J. Cholesteric liquid crystals: properties and applications. *Liq. Cryst. Today* **23**, 23–24 (2014).
50. Ponti, S., Becchi, M., Oldano, C., Taverna, P. & Trossi, L. Optical properties of short pitch cholesteric liquid crystals. *Liq. Cryst.* **28**, 591–598 (2001).
51. Блинов, Л. М. Электрооптические эффекты в жидких кристаллах. *Успехи физических наук* **114**, 67–96 (1974).
52. Bloisi, F. & Vicari, L. Polymer Dispersed Liquid Crystals. *Opt. Appl. Liq. Cryst.* 162–215 (2003). doi:10.1887/0750308575
53. Vertogen, G. & de Jeu, W. H. *Thermotropic Liquid Crystals, Fundamentals. Journal of Chemical Information and Modeling* **45**, (Springer Berlin Heidelberg, 1988).
54. Beresnev, L. A. *u dp.* Deformed helix ferroelectric liquid crystal display: A new electrooptic mode in ferroelectric chiral smectic C liquid crystals. *Liq. Cryst.* **5**, 1171–1177 (1989).
55. Barnik, M. I., Baikarov, V. a., Chigrinov, V. G. & Pozhidaev, E. P. Electrooptics of a thin ferroelectric smectic C* liquid crystal layer. *Mol. Cryst. Liq. Cryst.* **143**, 101 (1987).
56. Pozhidaev, E. *u dp.* Photoalignment of ferroelectric liquid crystals by azodye layers. *Japanese J. Appl. Physics, Part 1 Regul. Pap. Short Notes Rev. Pap.* **43**, 5440–5444 (2004).
57. Pozhidaev, E., Chigrinov, V. & Li, X. Photoaligned ferroelectric liquid

- crystal passive matrix display with memorized gray scale. *Japanese J. Appl. Physics, Part 1 Regul. Pap. Short Notes Rev. Pap.* **45**, 875–882 (2006).
58. Kuczyński, W. & Stegemeyer, H. Ferroelectric properties of smectic C liquid crystals with induced helical structure. *Chem. Phys. Lett.* **70**, 123–126 (1980).
 59. Peigné, A. *u dp*. Adaptive holographic interferometer at 155 μm based on optically addressed spatial light modulator. *Opt. Lett.* **40**, 5482 (2015).
 60. Haseba, Y., Kikuchi, H., Nagamura, T. & Kajiyama, T. Large Electro-optic Kerr Effect in Nanostructured Chiral Liquid-Crystal Composites over a Wide Temperature Range. *Adv. Mater.* **17**, 2311–2315 (2005).
 61. Lehmann, W. *u dp*. Giant lateral electrostriction in ferroelectric liquid-crystalline elastomers. *Nature* **410**, 447–450 (2001).
 62. Pozhidaev, E. P. *u dp*. New Chiral Dopant Possessing High Twisting Power. *Mol. Cryst. Liq. Cryst.* **509**, 300/[1042]-308/[1050] (2009).
 63. Kumada, A. & Hidaka, K. Directly high-voltage measuring system based on pockels effect. *IEEE Trans. Power Deliv.* **28**, 1306–1313 (2013).
 64. Melikyan, A. *u dp*. High-speed plasmonic phase modulators. *Nat. Photonics* **8**, 229–233 (2014).
 65. Ahn, C., Masud, A. R., Hong, S., Shen, T. & Song, J. Particle size dependence of electro-optical switching in ZrP nano colloid. *Liq. Cryst.* **00**, 1–7 (2018).
 66. Rahman, M. A., Mohd Said, S. & Balamurugan, S. Blue phase liquid crystal: Strategies for phase stabilization and device development. *Sci. Technol. Adv. Mater.* **16**, 1–21 (2015).
 67. Liu, Q., Yuan, Y. & Smalyukh, I. I. Electrically and optically tunable plasmonic guest-host liquid crystals with long-range ordered nanoparticles. *Nano Lett.* **14**, 4071–4077 (2014).
 68. Kumar, R. & Raina, K. K. Enhanced ordering in polymer stabilised ferroelectric liquid crystal guest-host composites: evidence by polarised fluorescence spectroscopy. *Liq. Cryst.* **41**, 694–700 (2014).

69. Goel, P., Arora, M. & Biradar, A. M. Evolution of excitation wavelength dependent photoluminescence in nano-CeO₂ dispersed ferroelectric liquid crystals. *RSC Adv.* **4**, 11351 (2014).
70. Kiselev, A. D., Pozhidaev, E. P., Chigrinov, V. G. & Kwok, H. S. Polarization-gratings approach to deformed-helix ferroelectric liquid crystals with subwavelength pitch. *Phys. Rev. E* **83**, 1–11 (2011).
71. Zgueb, R., Dhaouadi, H. & Othman, T. Dielectric relaxation spectroscopy and electro-optical studies of phase behaviour of a chiral smectic liquid crystal. *Liq. Cryst.* **41**, 1394–1401 (2014).
72. Gupta, S. K. *и др.* CdSe quantum dot-dispersed DOBAMBC: an electro-optical study. *Liq. Cryst.* **40**, 528–533 (2013).
73. Chigrinov, V. G., Srivastava, A. K. & Pozhidaev, E. P. Ferroelectric Liquid Crystals: Physics and Applications. *Liq. Cryst. their Appl.* **16**, 9–21 (2016).
74. Pozhidaev, E. P. *и др.* Rotational viscosity of the smectic C* phase of ferroelectric liquid crystals. **67**, 283–287 (1988).
75. Томили́н, М. Г. & Пестов, С. М. *Свойства жидкокристаллических материалов.* (СПБ.: Политехника, 2005).
76. Ермаков, С., Родненко, В., Белоенко, Е. & Б, К. *Жидкие кристаллы в технике и медицине.* (Минск: Асар, 2002).
77. Сонин, А. С. *Введение в физику жидких кристаллов.* (М.: Наука, 1983).
78. Fleischmann, E. K. & Zentel, R. Liquid-Crystalline Ordering as a Concept in Materials Science: From Semiconductors to Stimuli-Responsive Devices. *Angew. Chemie - Int. Ed.* **52**, 8810–8827 (2013).
79. Браун, Г. & Уолкер, Д. *Жидкие кристаллы и биологические структуры.* (М.: Мир, 1982).
80. Томили́н, М. Г. *Взаимодействие жидких кристаллов с поверхностью.* (СПБ.: Политехника, 2001).
81. Crawford, G. P., Eakin, J. N., Radcliffe, M. D., Callan-Jones, A. & Pelcovits, R. A. Liquid-crystal diffraction gratings using polarization holography alignment techniques. *J. Appl. Phys.* **98**, (2005).

82. Pozhidaev, E. E. P. E. P. *u dp*. Optical response of ferroelectric liquid crystals doped with metal nanoparticles. *Appl. Phys. Lett.* **23**, 063115 (2014).
83. Petriashvili, G. & Japaridze, K. Paper like cholesteric interferential mirror. *Opt. ...* **21**, 20821–20830 (2013).
84. Koromyslov, A. V, Zhiganov, A. N., Kovalenko, M. A. & Kupryazhkin, A. Y. Helium defectoscopy of cerium gadolinium ceramics Ce_{0.8}Gd_{0.2}O_{1.9} with a submicrocrystalline structure in the impurity disorder region. *Phys. Solid State* **55**, 2537–2542 (2013).
85. Umadevi, S., Feng, X. & Hegmann, T. Large area self-assembly of nematic liquid-crystal-functionalized gold nanorods. *Adv. Funct. Mater.* **23**, 1393–1403 (2013).
86. Lv, J. A. *u dp*. Photocontrol of fluid slugs in liquid crystal polymer microactuators. *Nature* **537**, 179–184 (2016).
87. Hasegawa, H. *u dp*. Recovery of indium from end-of-life liquid-crystal display panels using aminopolycarboxylate chelants with the aid of mechanochemical treatment. *Microchem. J.* **106**, 289–294 (2013).
88. Chen, P. *u dp*. Arbitrary and reconfigurable optical vortex generation: a high-efficiency technique using director-varying liquid crystal fork gratings. *Photonics Res.* **3**, 133 (2015).
89. Todorov, T., Nikolova, L. & Tomova, N. Polarization holography. 1: A new high-efficiency organic material with reversible photoinduced birefringence. *Appl. Opt.* **23**, 4309–4312 (1984).
90. Gori, F. Measuring Stokes parameters by means of a polarization grating. *Opt. Lett.* **24**, 584–586 (1999).
91. Tervo, J. & Turunen, J. Paraxial-domain diffractive elements with 100% efficiency based on polarization gratings. *Opt. Lett.* **25**, 785–6 (2000).
92. Tervo, J. & Turunen, J. Transverse and longitudinal periodicities in fields produced by polarization gratings. *Opt. Commun.* **190**, 51–57 (2001).
93. Cincotti, G. Polarization Gratings: Design and Applications. *IEEE J. Quantum Electron.* **39**, 1645–1652 (2003).

94. Nersisyan, S. R., Tabiryan, N. V., Steeves, D. M. & Kimball, B. R. Crystals and Their Use for Polarization Insensitive Optical Switching. *Physics (College Park, Md)*. **18**, 1–47 (2009).
95. Bomzon, Z., Kleiner, V. & Hasman, E. Space-variant polarization state manipulation using subwavelength metal grating. *Tech. Dig. Summ. Pap. Present. Conf. Lasers Electro-Optics. Postconf. Tech. Dig. (IEEE Cat. No.01CH37170)* **192**, 169–181 (2001).
96. Bomzon, Z., Biener, G., Kleiner, V. & Hasman, E. Real-time analysis of partially polarized light with a space-variant subwavelength dielectric grating. *Opt. Lett.* **27**, 188–190 (2002).
97. Biener, G., Niv, A., Kleiner, V. & Hasman, E. Near-field Fourier transform polarimetry by use of a discrete space-variant subwavelength grating. *J. Opt. Soc. Am. A. Opt. Image Sci. Vis.* **20**, 1940–1948 (2003).
98. Gorodetski, Y., Biener, G., Niv, A., Kleiner, V. & Hasman, E. Space-variant polarization manipulation for far-field polarimetry by use of subwavelength dielectric gratings. *Opt. Lett.* **30**, 2245–2247 (2005).
99. Tam, A. M. W. *u dp*. Enhanced performance configuration for fast-switching deformed helix ferroelectric liquid crystal continuous tunable Lyot filter. *Appl. Opt.* **53**, 3787 (2014).
100. Bomzon, Z., Niv, A., Biener, G., Kleiner, V. & Hasman, E. Polarization Talbot self-imaging with computer-generated, space-variant subwavelength dielectric gratings. *Appl. Opt.* **41**, 5218–5222 (2002).
101. Bomzon, Z., Biener, G., Kleiner, V. & Hasman, E. Space-variant Pancharatnam–Berry phase optical elements with computer-generated subwavelength gratings. *Opt. Lett.* **27**, 1141 (2002).
102. Yirmiyahu, Y., Niv, A., Biener, G., Kleiner, V. & Hasman, E. Vectorial vortex mode transformation for a hollow waveguide using Pancharatnam–Berry phase optical elements. *Opt. Lett.* **31**, 3252–3254 (2006).
103. Eakin, J. N., Xie, Y., Pelcovits, R. A., Radcliffe, M. D. & Crawford, G. P. Zero voltage Fredericksz transition in periodically aligned liquid crystals.

- Appl. Phys. Lett.* **85**, 1671–1673 (2004).
104. Presnyakov, V., Asatryan, K., Galstian, T. & Chigrinov, V. Optical polarization grating induced liquid crystal micro-structure using azo-dye command layer. *Opt. Express* **14**, 10558–10564 (2006).
 105. Provenzano, C., Pagliusi, P. & Cipparrone, G. Electrically tunable two-dimensional liquid crystals gratings induced by polarization holography. *Opt. Express* **15**, 5872–8 (2007).
 106. Roush, F. W. $Z = F (X , Y)$. *Math. Soc. Sci.* **13**, 87–88 (1987).
 107. Savenkov, S. N., Sydoruk, O. I. & Muttiah, R. S. Conditions for polarization elements to be dichroic and birefringent. *J. Opt. Soc. Am. A* **22**, 1447 (2005).
 108. Berry, M. V. & Dennis, M. R. The optical singularities of birefringent dichroic chiral crystals. *Proc. R. Soc. A Math. Phys. Eng. Sci.* **459**, 1261–1292 (2003).
 109. Landau, L. D., Lifshitz, E. M. & Pitaevskii, L. P. *Electrodynamics of Continuous Media*. (Pergamon, Oxford, 1984).