액정기반 역파장분산 위상차필름

이지훈, 이효진, 양승빈, 김형민(전북대학교 공과대학 전자공학부)

1. 서 론

빛은 광학이방성(optical anisotropy)을 가진 매질에 입사하면 서로 다른 편광(polarization)과 위상(phase)을 갖는 두 개의 빛으로 나누어져 진행하는데, 이러한 현상을 복굴절(double refraction)이라고 한다[1-2]. 두 개의 빛 중 하나는 매질의 이상굴절률(extraordinary refractive index, n_e)을 느끼면서 진행하며, 이를 이상파(extraordinary wave, e-wave)라고 부른다. 나머지 하나의 빛은 매질의 정상굴절률(ordinary refractive index, n_o)을 느끼면서 진행하며 이를 정상파(ordinary wave, o-wave)라고 한다. E-wave와 o-wave는 서로 수직한 편광을 가지면서 다른 phase를 갖고 매질 내를 진행한다[1-2].

매질의 두께가 d, 입사하는 빛의 파장이 λ일 때, 매질 통과 후 e-wave와 o-wave는 $\Gamma=2\pi(n_e-n_o)d/\lambda$의 위상차(phase retardation)를 갖게 된다. 매질의 birefringence $\Delta n=n_e-n_o$와 d를 조절하면 입사 빛의 편광을 변화시킬 수 있으며, 이러한 소자를 retarder라고 부른다[1-2]. 선편광된(linearly polarized) 빛이 입사하는 경우, retarder의 $\Gamma=\pi$이면 투과한 빛의 편광은 입사 빛에 수직한 선편광이 되며 이러한 retarder를 half-wave retarder라고 한다. 또한 $\Gamma=\pi/2$ 이면 투과한 빛은 원편광이 되며, 이러한 retarder를 quarter-wave retarder라고 한다[1-2]. Retarder의 종류에는 Soleil-Babinet compensator, Pockel cell과 같이 Γ를 가변적으로 제어할 수 있는 active retarder와 고정된 Γ을 갖는 passive retarder가 있다[2]. 액정표시장치(liquid crystal display, LCD) 보상필름(compensation film) 또는 유기발광다이오드(organic light emitting diode, OLED) 디스플레이 반사방지필름에 사용되는 quarter-wave retarder 등은 passive retarder로써 acrylate, cycloolefin 등의 고분자 재료를 연신하거나 중합형 액정(reactive mesogen) 재료를 코팅하는 방법으로 제작된다[3].

2. 역파장분산 위상차필름

디스플레이용 보상필름의 성능이 극대화되기 위해서는 retarder가 모든 가시광선 영역 대에서 동일한 Γ값을 가지는, 다시 말해 retarder의 bandwidth가 충분히 넓어야 한다. 그런데 자연 상태로 존재하는 광학이방성

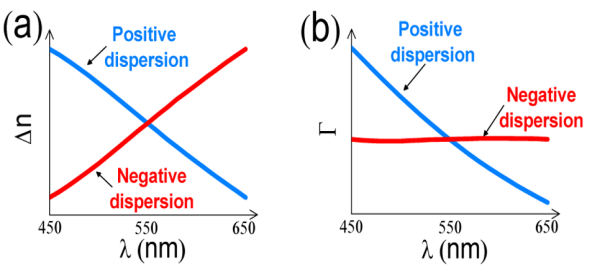

그림 1. 정파장분산(positive dispersion) 및 역파장분산(negative dispersion) retarder의 파장 λ에 대한 (a) birefringence Δn 및 (b) phase retardation Γ 모식도

을 갖는 매질은 대부분 파장이 길어질수록 Δn이 감소하는 정파장분산(positive dispersion) 특성을 갖는다[그림 1(a)]. 그 결과 Γ값이 파장이 길어질수록 감소하게 되어 retarder의 bandwidth는 좁아지고, 특정 파장에 맞춰 설계된 보상필름의 경우 다른 파장 영역에서는 Γ값이 상이하게 되어 보상효과가 제한된다[그림 1(b)]. 따라서 보상필름의 성능을 극대화하기 위해서는 파장이 길어질수록 Δn이 증가하는 역파장분산(negative dispersion) 특성을 갖는 retarder 재료가 필요하다[4-5].

역파장분산성이 강할수록 보상특성이 계속해서 개선되는 것은 아니며, 파장의 변화치만큼 Δn이 변화하여 결과적으로 Γ값이 일정하게 되어야 한다. Blue 빛의 파장 450nm와 Red 파장 650nm는 각각 Green 파장 550nm의 0.818, 1.181배이므로, $\Delta n(450nm)/\Delta n(550nm)=0.818$, $\Delta n(650nm)/\Delta n(550nm)=1.181$이 되어야 Γ값이 파장에 관계없이 일정하게 되고, 이상적인 보상특성을 낼 수 있다.

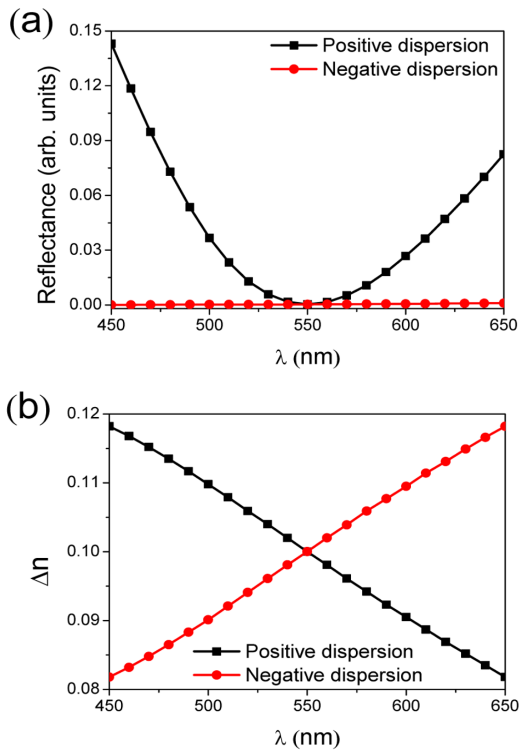

그림 2. (a) 정파장분산(positive dispersion) 및 역파장분산(negative dispersion) quarter-wave retarder를 사용한 OLED 반사방지필름의 정면 반사율 계산 결과, (b) 반사율 계산에 사용된 정파장 및 역파장분산 quarter-wave retarder의 Δn

그림 2(a)는 OLED 반사방지필름에 각각 정파장분산 특성을 갖는 quarter-wave retarder와 역파장분산 특성을 갖는 quarter-wave retarder를 적용했을 때 파장에 따른 패널 정면 반사율 계산결과를 보여준다. 그림 2(b)는 계산에 사용된 정파장분산 및 역파장분산 quarter-wave retarder의 파장에 따른 Δn값이다. 두 retarder 모두 λ=550nm의 빛에 대해 $\Gamma=\pi/2$의 값을 갖도록 하였다. 그림 2(a)에서 보듯이, 정파장분산 retarder를 사용했을 때는 550nm의 빛에 대해서 낮은 반사율을 보이지만 450nm와 650nm 빛에 대해서는 반사율이 증가하는 것이 확인된다. 반면, 역파장분산 retarder를 사용했을 때는 모든 파장에서 동일하게 낮은 반사율을 나타내는 것을 알 수 있다. 비단 OLED 반사방지필름 뿐만 아니라, LCD용 보상필름 역시 역파장분산 retarder를 사용할 경우 파장에 따른 보상특성 차이를 제거할 수 있어서 보상특성을 극대화시킬 수 있다.

3. 역파장분산 위상차필름 개발현황

3.1. 적층형(연신 필름)

역파장분산 retarder를 제작하는 방법으로써 가장 널리 알려져 있고 오랫동안 사용된 방법은 서로 다른 파장분산성을 갖는 두 개 또는 여러 개의 정파장분산 retarder를

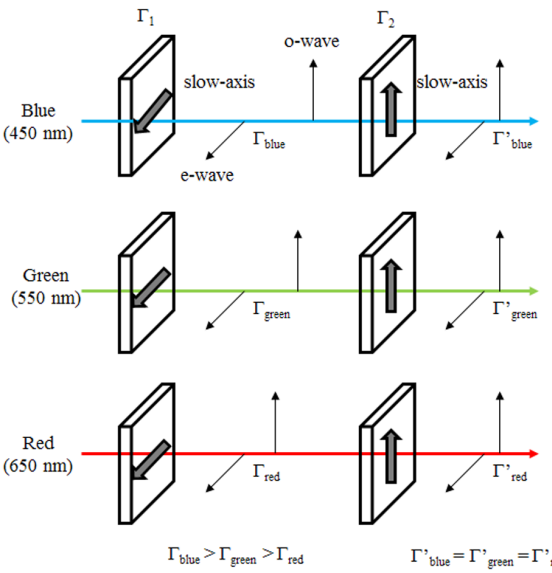

그림 3. 정파장분산 retarder 적층 방식에 의한 Γ파장분산성 보상원리

적층시키는 방법이다[4-7]. 이 방법은 Zeroth order retarder를 제작하는 방법으로 광학소자 제작 시 오랫동안 사용되어 왔으며 그 원리는 그림 3과 같다. 각각 phase retardation Γ_1, Γ_2를 갖는 두 개의 retarder의 optic axis를 수직하게 적층하면, 첫 번째 retarder를 통과한 e-wave와 o-wave 간에 phase retardation이 발생하는데 개별 retarder는 정파장분산성을 갖기 때문에 첫 번째 retarder 통과 후 phase retardation 값은 파장이 길어질수록 작아진다[그림 3]. 두 번째 retarder는 첫 번째 retarder에 대해 optic axis가 수직하게 정렬해있기 때문에 두 번째 retarder를 통과하고 나면 e-wave와 o-wave의 retardation 차이는 줄어들게 된다. 두 개의 retarder의 파장 분산성과 두께를 조절함으로써 두 번째 retarder를 통과한 후 모든 파장에서 phase retardation 값을 동일하게 만들 수 있다. 결과적으로 적층된 두 개의 필름이 역파장분산 특성을 갖는 retarder의 기능을 갖게 된다. Retarder 재료마다 고유한 파장분산 특성을 갖기 때문에 얻고자 하는 Γ값에 따라 개별 retarder의 재료와 두께를 그에 맞게 선정하고 설계하여야 한다.

디스플레이용 역파장분산 보상필름에도 상기한 zeroth order retarder를 제작하는 원리가 응용되었으며, 특히 연신필름을 적층한 역파장분산 보상필름으로 상용화된 바 있다[8]. 현재 상용화된 OLED용 반사방지 필름의 경우 선편광필름에 half-wave retarder와 quarter-wave retarder를 차례로 적층한 보상필름을 사용하고 있다. 제조사에 따라 약간씩 차이가 있으나 공정의 편리성을 고려했을 때 기본적으로 다음과 같은 구조가 바람직하다. Half-wave retarder는 2축 연신공정을 통해 optic axis가 선편광필름 투과축에 대해 22.5도를 이루게 한다. Half-wave retarder를 통과한 빛은 편광판의 투과축에 대해 45도를 이루는 선편광이 된다. Quarter-wave retarder의 optic axis는 선편광필름의 투과축과 평행하도록 하여 투과 후 최종적으로 원편광 상태가 되도록 한다. Half-wave retarder와 quarter-wave retarder 물질의 파장분산성과 두께를 조절하면 역파장분산 특성을 얻을 수 있다. 이와 같은 구조는 quarter-wave retarder를 machine direction(MD) 방향으로 1축 연신만하여 제조할 수 있기 때문에 공정 측면에서 가장 편리하다. 하지만 half-wave retarder의 optic axis를 22.5도만큼 필름 MD 방향으로 벗어나게 하기 위해서는 높은 2축 연신비율이 요구되며, 공정에 대한 재료 신뢰성 문제, 그리고 연신비에 따른 파장분산성 최적화 문제 등을 고려하여 half-wave retarder를 15도, quarter-wave retarder를 75도 방향으로 정렬시키는 방법들이 사용되고 있다. 연신필름을 적층하는 방식으로 제작된 통상적인 역파장분산 retarder의 경우 Δn(450nm)/Δn(550nm)~0.9, Δn(650nm)/Δn(550nm)~1.1 수준으로, 이상적인 역파장분산 특성에 미치지 못하는 문제가 있다.

3.2. 적층형(중합성 액정)

연신필름을 적층하는 방법 이외에 중합성 액정 재료(reactive mesogen, RM)을 적층하는 방법으로도 역파장분산 retarder film의 제작이 가능하다. 적층형 연신필름과 마찬가지로 적층형 액정 필름 역시 정파장분산 특성을 갖는 두 개 또는 여러 개의 층을 적층하여 제작되는데, 액정 재료의 경우 광배향 또는 문지르기 배향을 통하여 액정 재료의 optic axis 정렬 방향을 변화시키기가 용이하기 때문에 2축 연신 공정의 제한을 받는 연신필름과 달리 광학설계 시 유리하다. 또한 중합성 액정 재료의 Δn값은 통상 0.05 수준으로 수 마이크로미터 정도의 두께만으로 가시광선영역에서 quarter-wave retarder의 기능을 할 수 있어서 수십 마이크로미터의 두께를 갖는 연신필름에 비하여 박형화가 가능하다. 특히 향후 Flexible display 시장을 고려할 때 구부리거나 휘는 변형에 대한 안정성 면에서 유리하기 때문에 활발히 개발될 것으로 예상된다. 공정 면에서는 연신필름에서의 2축 연신과 같은 고난이도 공정이 없고 코팅으로 제작할 수 있는 장점이 있는 반면, 하나의 액정 층 위에 다른 액정 층을 적층 코팅 시 용매에 의해 아래 액정 층이 손상되는 문제를 회피할 수 있어야 한다. 이를 위해 서로 다른 내용매성을 갖는 액정 재료를 사용하거나 별도로 코팅된 액정 층을 전사하는 방식이 연구되고 있다[9].

액정 층을 적층하는 방식의 경우 광학원리 상 복굴절된 빛의 phase retardation을 이용하는 방식과 polarization waveguide를 이용하는 방법으로 다시 나눌 수 있다. 전

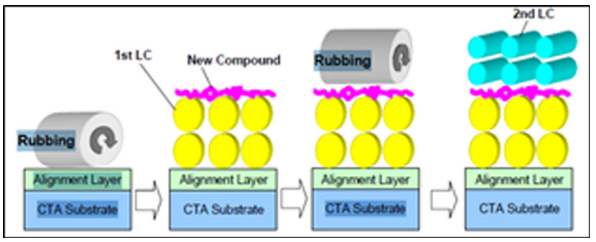

그림 4. Fuji Film에서 개발한 액정 적층형 역파장분산 retarder의 제조방법 및 구조[9]

자의 경우는 연신필름을 적층하는 방법과 동일한 원리이며, 구체적으로는 액정 분자의 방향자(director)가 균일하게 정렬된 retarder 두 층의 optic axis를 평행하지 않게 적층하여 두 retarder 간의 Γ의 파장의존성의 차이를 상쇄시키는 방법이다[9]. 후자의 경우는 액정 분자의 방향자가 꼬인 구조를 갖는 cholesteric 액정 재료를 사용하는 방법인데, 선편광된 빛이 액정 재료의 꼬인 director를 따라 waveguide되는 현상을 이용하는 것이다. 액정 분자의 굴절률과 꼬인 구조의 pitch가 다른 재료를 적층함으로써 최종적으로 통과한 빛의 Γ를 일정하게 할 수 있다[10]. Fuji Film에서는 전자의 원리를 이용한 역파장분산 보상필름을 최근 개발하였으며, 특히 막대형 중합성 액정과 디스크형 중합성 액정을 적층함으로써 NZ coefficient=(nx-nz)/(nx-ny) 값을 0.5에 가깝게 하여 시야각의존성 면에서도 우수한 특성을 갖는 역파장분산 보상필름을 보고하였다[9].

3.3. 일층형(연신 필름)

상기한 적층형 역파장분산 retarder는 두 개 이상의 층을 형성해야하기 때문에 공정이 번거롭고 제조단가 면에서 불리한 단점을 가지고 있다. 이러한 문제를 해결

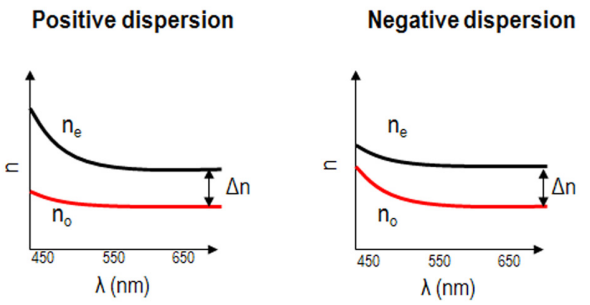

그림 5. 정파장분산 및 역파장분산 retarder의 파장에 대한 n_e 및 n_o 분포

하기 위하여 하나의 층만으로 역파장분산 특성을 나타내는 retarder를 개발하기 위한 연구가 진행되어왔다. 역파장분산 특성을 나타내기 위해서는 그림 5에서 보는 것과 같이 파장이 길어질수록 n_e는 완만하게 감소하고 n_o는 급격하게 감소하는 특성을 만족시켜야 하는데, 한 층의 retarder만을 이용하여 역파장분산 특성을 얻기 위해서는 적층형 retarder와는 다른 원리가 적용되어야 한다. 굴절률의 파장분산성은 물질의 흡수 spectrum에 의존하는데, 기본적으로 물질이 빛을 흡수하는 파장에 가까울수록 굴절률은 급격하게 감소하고, 흡수 파장에서 멀수록 굴절률은 완만하게 감소한다. 따라서 하나의 층으로 역파장분산 특성을 나타내기 위해서는 n_e 방향에서는 보다 짧은 파장의 빛을 흡수하여 가시광선 영역에서 굴절률이 완만하게 감소하고, n_o 방향에서는 보다 긴 파장의 빛을 흡수하여 가시광선 영역에서 굴절률이 상대적으로 급격하게 감소하도록 물질의 화학구조가 설계되어야 한다.

일본 Teijin사에서는 이러한 원리에 기초하여 copolymer 재료를 합성함으로써 역파장분산 특성을 갖는 retarder 필름을 제작하였다[11-12]. 그림 6에서 보는 것과 같이 rodlike unit과 discotic unit이 연결된 copolymer를 제작하였는데, 고분자를 연신하게 되면 일정한 방향으로 정렬하여 rodlike unit의 장축 방향이 n_e가 되고 discotic unit의 장축 방향이 n_o가 된다. Rodlike unit은 discotic unit에 비하여 보다 짧은 파장의 빛을 흡수하는 화학구조로 설계되어 가시광선 영역에서 n_e는 완만하게 감소하고 n_o는 급격하게 감소하여 결과적으로 역파장분산 특성을 나타내게 된다.

역파장분산 특성을 구현하는데 있어서 positive birefringence를 갖는 rodlike unit과 negative

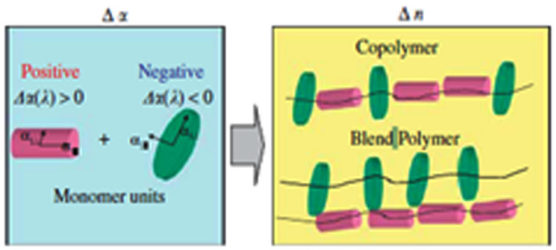

그림 6. Teijin에서 개발한 rodlike unit과 discotic unit을 갖는 copolymer를 이용한 역파장분산 구현 원리[11]

birefringence를 갖는 discotic unit을 함께 사용하는 경우가 많은데, 이는 역파장분산 특성을 구현하는데 있어 반드시 필수적인 것은 아니며, positive birefringence를 갖는 재료들끼리의 조합 또는 negative birefringence를 갖는 재료들만의 조합으로도 역파장분산 특성을 얻을 수 있다[4, 13].

3.4. 일층형(중합성 액정)

연신필름을 이용하는 일층형 역파장분산 retarder와 별도로 중합성 액정 재료를 이용하는 방법 또한 연구, 개발되고 있다. 중합성 액정 재료는 앞서 언급한 바와 같이 코팅 공정으로 제조가 가능하다는 공정의 간편함과 두께를 얇게 만들 수 있다는 장점을 갖는다. 대표적인 예로써 Merck사에서 개발한 그림 7과 같은 H 형태를 갖는 중합성 액정재료가 있다[14-15]. 역파장분산 특성을 나타낼 수 있도록 분자의 장축 방향에 해당하는 n_e 방향으로는 단파장의 빛을 흡수하고 단축 방향에 해당하는 연결 부위에는 장파장을 흡수하도록 하여 n_e에 비해 n_o가 가시광선영역에서 급격하게 감소하도록 하였다.

본 저자 연구진은 기존에 알려진 방식과 다른 방법으로서 smectic 액정 재료와 고분자 간의 self-organization을 이용하여 일층형 역파장분산 retarder를 구현하는 방법을 개발하여 보고한 바 있다[16-18]. 그림 8에서 보는 것과 같이 smectic 상을 갖는 액정 재료에 monomer를

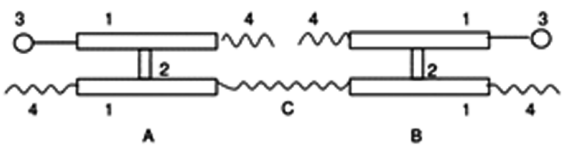

그림 7. Merck사에서 개발한 H 형태를 갖는 역파장분산 중합형 액정재료의 모식도[15]

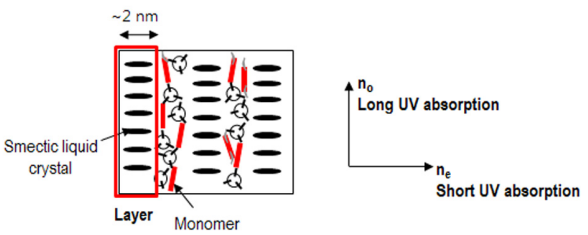

그림 8. Smectic 액정-고분자 혼합물의 분자 정렬 모식도

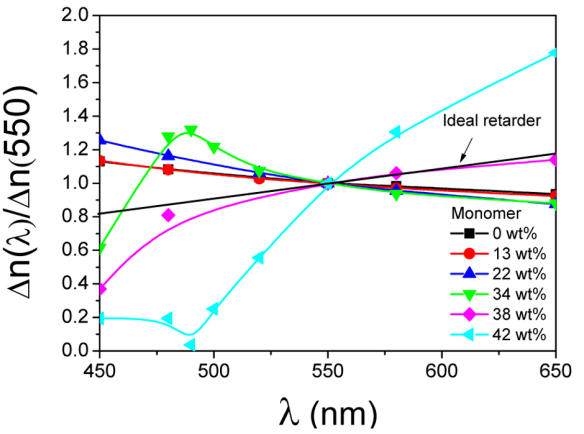

그림 9. 고분자 함량에 따른 ⊿n(λ)/⊿n(550nm)의 파장 의존성[16]

혼합하면 monomer 분자들이 smectic 액정의 층(layer) 사이에 위치하게 된다. Monomer에 비해서 짧은 파장의 빛을 흡수하는 액정 재료를 사용하여 가시광선 영역에서 n_e는 완만하게 감소하고 n_o는 급격하게 감소하도록 하여 역파장분산 특성을 구현하였다. 그림 9는 monomer의 함량에 따른 birefringence의 파장분산성을 측정한 결과인데, 순수한 액정의 경우 정파장분산 특성을 나타내는 반면, monomer의 함량이 증가할수록 역파장분산 특성이 나타나는 것을 알 수 있다. 특히 38wt%의 monomer 재료의 경우 단파장 영역을 제외하고 이상적인 역파장분산 특성에 가까운 수치를 내는 것이 확인되었다[16-17]. 일층형 고분자, H 형태 중합성 액정를 사용하는 이전의 방식은 분자 자체가 역파장특성을 갖는 재료를 합성하는 방식이기 때문에 합성의 난이도가 높은 반면, 본 연구진이 제안한 방식은 정파장분산 특성을 갖는 분자들 간의 self-organization을 이용하기 때문에 어려운 합성 공정 없이 널리 알려진 재료의 조합으로 쉽게 역파장분산을 구현할 수 있다는 장점을 가지고 있다.

4. 결 론

최근 역파장분산 보상필름의 개발동향을 살펴보면, 연신공정 대신 코팅공정을 사용한다는 장점과 더불어 향후 flexible application을 고려한 박형화 요구에 대응하여 액정재료 기반의 역파장분산 보상필름이 활발히 개발될 것으로 예상된다. 단일층으로 역파장분산 특성

을 내는 액정형 보상필름은 공정 면에서 적층형에 비해 유리하나 시야각 보상특성이라는 면에서는 적층방식이 유리한 점이 있기 때문에 당분간 상호 경쟁할 것으로 예상된다. 단일층 액정 방식의 역파장분산 보상필름은 성능 면에서 시야각보상 기능까지 갖춘 biaxial plate 형태로 개발이 된다면 분명하게 시장에서 차별화될 수 있을 것으로 예상된다.

참고문헌

[1] G. R. Fowles, Introduction to Modern Optics (Dover, 1989, New York) 169-185.
[2] S. O. Kasap, Optoelectronics and Photonics (Prentice Hall, New Jersey) 280-301.
[3] P. Yeh and C. Gu, *Optics of Liquid Crystal Displays* 2nd edition (John Wiley and Sons, 2010, New York) 571-662.
[4] S. Pancharatnam, P*roc. Ind. Acad. Sci. A* **41**, 130 (1955).
[5] D. Clarke, *Opt. Acta* **14**, 343 (1967).
[6] P. Hariharan, *Opt. Eng.* **35**, 3335 (1996).
[7] S. Shen, J. She, and T. Tao, *J. Opt. Soc. A.* **22**, 961 (2005).
[8] Y.-C. Yang and D.-K. Yang, P*roc. Soc. Inf. Disp.* 1955 (2008).
[9] Y. Takahashi, Y. Furuki, S. Yoshida, T. Otani, M. Muto, Y. Suga, and Y. Ito, *Proc. Soc. Inf. Disp.,* 381 (2014).
[10] R. K. Komanduri, K. F. Lawler, and M. J. Escuti, *Opt. Express* **21**, 404 (2013).
[11] A. Uchiyama and T. Yatabe, *Jpn. J. Appl. Phys.* **42**, 6941 (2003).
[12] A. Uchiyama, Y. Ono, Y. Ikeda, H. Shuto, and K. Yahata, *Poly. J.* **44**, 995 (2012).
[13] S. Yang, and J.-H. Lee, *Opt. Mater, submitted* (2015).
[14] O. Parri, G. Smith, R. Harding, H.-J. Yoon, I. Gardiner, J. Sargent, and K. Skjonnemand, *Proc. SPIE* **7956**, 1 (2011).
[15] K. Adlem, O. L. Parri, K. Skjonnemand, and D. Wikes, US Patent 8252389.
[16] H. Lee and J.-H. Lee, *Opt. Lett.,* **39**, 5146 (2014).
[17] S. Yang, H. Lee, and J.-H. Lee, *Opt. Express* **23**, 2466 (2015).
[18] H. Lee, S. Yang, and J.-H. Lee, *Cur. Appl. Phys.* **15**, 456 (2015).

저 자 약 력

이 지 훈

- 2013년-현재 : 전북대학교 전자공학부 조교수
- 2012년 : 삼성전자 종합기술원 전문연구원
- 2011년 : 부산대학교 전자공학부 연구교수
- 2010년 : NDIS Corporation Director
- 2008년 : Case Western Reserve University 물리학과 Post-doctor
- 2007년 : 고려대학교 물리학과 이학박사
- 2005년 : 고려대학교 물리학과 이학석사
- 2003년 : 고려대학교 물리학과 이학사

이 효 진

- 2014년-현재 : 전북대학교 전자공학부 석사과정
- 2014년 : 전북대학교 전자공학부 공학사

양 승 빈

- 2014년-현재 : 전북대학교 전자공학부 석사과정
- 2014년 : 전북대학교 전자공학부 공학사

김 형 민

- 2014년-현재 : 전북대학교 전자공학부 석사과정
- 2014년 : 전북대학교 전자공학부 공학사