




Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi

Derleme Makale

Mavi Faz: Sıvı Kristallerin Parlayan Yıldızı

 Nejmettin Avcı*

Fizik Bölümü, Fen Fakültesi, Muğla Sıtkı Koçman Üniversitesi, Muğla, TÜRKİYE

* Sorumlu yazarın e-posta adresi: navci@mu.edu.tr

DOI : 10.29130/dubited.549508

ÖZET

Bu çalışmada mavi faz sıvı kristallerin fiziksel özellikleri, fotonik ve optik uygulamaları hakkında genel bir bilgi verilmiştir. Mavi faz, izotropik sıvı ile kolesterik faz arasında bulunan bir sıvı kristal fazıdır. Çift bükümlü her bir silindirik yapı bu sistemin temel birimini oluşturur ve kendi kendine birleşerek üç boyutlu bir yapı meydana getirirler. Geleneksel bir sıvı kristal ile karşılaştırıldığında; milisaniyenin altında tepki hızı, herhangi bir hizalama katmanına ihtiyaç duymaması, optiksel olarak izotropik olması, ekranlar için geniş bir görüş açısı sağlaması ve hücre kalınlığına duyarlı olmaması mavi faz sıvı kristallerin kendine özgü fiziksel üstünlükleridir. Mavi faz sıvı kristaller bahsedilen bu avantajlarından dolayı optik sistemlerde, görüntüleme cihazlarında ve diğer benzeri uygulama alanlarında belirgin bir kullanım potansiyeline sahiptir.

Anahtar Kelimeler: Mavi faz, sıvı kristal, fotonik, optik, tepki süresi

Blue Phase: Shining Star of Liquid Crystals

ABSTRACT

In this study, general information about the physical properties, photonics and optical applications of the blue phase liquid crystals is given. The blue phase is a liquid crystal phase between the isotropic liquid and the cholesteric phase. Each double twisted cylindrical structure constitutes the basic unit of this system and is self-assembled to form a three-dimensional structure. Compared with conventional liquid crystal; sub-millisecond response time, no need for any alignment layer, the optically isotropic dark state, the wide viewing angle and the insensitivity to the cell thickness are the unique physical advantages of the blue phase liquid crystals. Due to these mentioned advantages, blue phase liquid crystals have a significant use potential in optical systems, imaging devices and other similar application areas.

Keywords: Blue phase, liquid crystal, photonic, optic, response time

I. GİRİŞ

Sıvı kristaller, hem katı kristallerin hem de izotropik sıvıların özelliklerini sergileyen malzemelerdir. Böylece sıvı kristaller benzersiz elektriksel ve optik özelliklere sahiptir. Sıvı kristalik ekranlar (LCD ekranlar) görsel ekran sektöründe önde gelen teknoloji haline gelmiştir. Bu LCD ekranlar küçük veya büyük ölçekli görüntüleme cihazlarında yer almaktadır. Örneğin küçük ölçekte; hesap makinelerinde, cep telefonlarda, dijital kameralarda ve kafaya monte edilen görüntüleme cihazlarında, orta ölçekte; dizüstü ve masaüstü bilgisayarlarda ve büyük ölçekte ise direkt görüşlü televizyonlarda kullanılmaktadır. Bu ekranların avantajları; yüksek çözünürlüklü ve parlak, paneli düz, hafif ve düşük enerjili olmalarıdır. Ayrıca bazı uygulamalarda ekranlar esnek ve bükülebilen türde olabilmektedir. LCD ekranlar geçirgen ve yansıtıcı modlarda çalıştırılabilir. Buna ek olarak sıvı kristaller fotonik cihazlarda da kullanılmaktadır. Örneğin lazer ışın yöneltici, değişken optik zayıflatıcı ve ayarlanabilir odaklı lens v.b. özellikleri sayesinde optik eleman olarak kullanılmaktadır. Sıvı kristaller hakkında araştırma ve incelemeler arttıkça şüphe yoktur ki sıvı kristaller bilgi teknolojisi çağında önemli bir rol oynamaya devam edecektir[1-13].

Sıvı kristal, katı kristal ile izotropik sıvı faz arasındaki ara bir fazdır. Sıvı kristal fazın ayırt edici özelliği moleküllerin (mezojenler) yön vektörü olarak adlandırılan ortak bir eksen boyunca yönelmesidir. Sıvı kristal ile kıyasla sıvılarda moleküllerin içsel bir düzeni yoktur. Katı kristal halde ise moleküllerin düzeni yüksektir ve zayıf öteleme düzen serbestliği vardır. Sıvı kristal fazın karakteristik yönelim düzeni geleneksel katı kristal ile sıvı faz arasındadır. Sıvı kristaller, sıradan bir sıvıya kıyasla bir miktar akışkanlık sergilemektedirler. Ancak katı kristaller gibi optiksel, elektriksel, manyetik v.b. fiziksel özellikleri anizotropiktir. Sıvı kristaller; termotropik ve liyotropik olmak üzere iki ana gruba ayrılır. Termotropik sıvı kristallerin yapıtaşları moleküller, liyotropik sıvı kristallerin ise misellerdir. Termotropik sıvı kristaller belirli bir sıcaklık aralığında ortaya çıkarken, liyotropik sıvı kristaller ise hem belirli bir sıcaklık hem de belirli bir konsantrasyon aralığında ortaya çıkmaktadırlar. Termotropik sıvı kristaller söz konusu aralıklardan daha düşük sıcaklıklarda katı kristal haldedir daha yüksek sıcaklıklarda ise izotropik sıvı halde bulunurlar [1-13].

Termotropik sıvı kristaller; nematik, smektik, mavi faz ve kolesterik olmak üzere dört ana grupta sınıflandırılır. Bir sıvı kristal materyalde bu fazların sadece birisi görülebileceği gibi birden çok faz da gözlenebilir. Bu sınıflandırma belirli sıvı kristal fazlardaki moleküllerin düzenlenmesi ve molekül dizilimine dayanmaktadır. Nematik sıvı kristaller uzun erimli yönelimsel düzene sahiptir. Ancak öteleme düzeni yoktur. Nematik sıvı kristallerdeki tüm moleküllerin ortalama yönelimi yön vektörü olarak tanımlanır. Smektik sıvı kristaller, nematik sıvı kristallerden farklıdır. Moleküller ek bir konum düzen derecesine sahiptir. Smektikler genellikle katmanlardan oluşur. Katmanlar içinde konumsal düzen yoktur ancak yönelimsel düzen vardır. Kolesterik faz (veya kiral nematik faz) tipik olarak kiral merkezi içeren mezojenik moleküllerden oluşur. Kiral, merkez molekül içi kuvvetler meydana getirir. Bu kuvvet, moleküllerin bir katmandan diğer bir katmana belirli açı ile dizilimini sağlar. Yani her bir katman nematiktir. Ancak katmanlar arası geçiş iki boyutlu nematik oluşturmaktadır [1-7].

Mavi faz ise kolesterik faz ile izotropik sıvı arasındaki sıcaklıklarda görülen bir sıvı kristal fazıdır ve yüksek oranda kiraliteye sahip sıvı kristal malzemelerde meydana gelir. Mavi faz ilk kez 1888'de keşfedilmesine rağmen dar sıcaklık aralığı (0.5-2°C) nedeniyle 1970'lere kadar popülerlik kazanmamıştır. Mavi fazın temel fiziğini anlamak için o zamandan bu yana büyük ilerleme kaydedilmiştir. Mavi faz güçlü optik aktivite özelliği sergilediği halde izotropiktir. Bu olaya dayanarak Saupe, mavi fazın kübik yapıya sahip olduğunu öne sürmüştür [13]. Daha sonra, mavi fazın yapılarını belirlemek için hem deneysel hem de teorik olarak birçok çaba harcanmıştır [14,15]. Sıcaklık artırıldığı durumlarda, üç mavi faz türü meydana gelebilir ve bunlar BPI, BPII ve BPIII faz

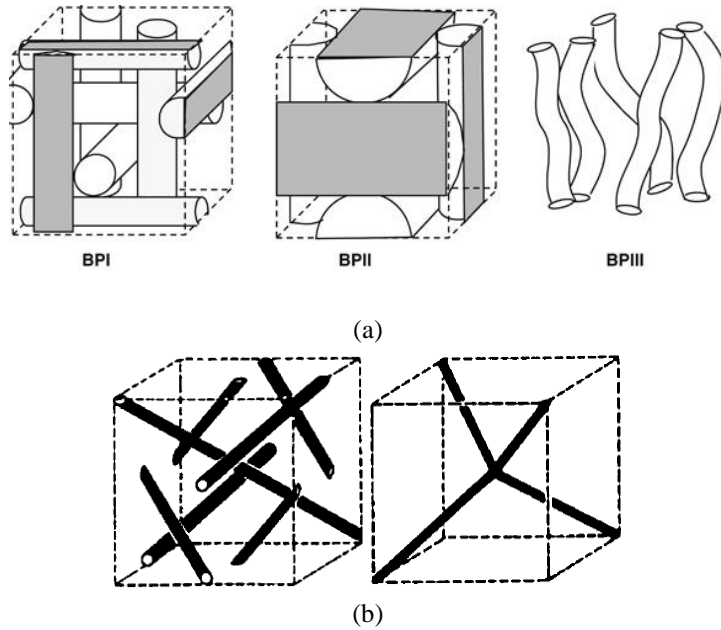
olarak adlandırılır. BPI fazı cisim merkezli kübik yapıdadır. BPII fazı ise basit kübik yapıdadır. BPIII amorf yapıya sahiptir ve izotropik sıvıya en yakın fazdır.

Bu çalışmada, mavi faz sıvı kristallerin temel özellikleri, hazırlama teknikleri ve nasıl karakterize edileceği hakkında bilgi verilmiştir. Ayrıca kararlı hale gelmiş mavi faz sistemde her bir bileşenin optimizasyonu, fotonik ve elektro-optik uygulamaları tartışılmıştır.

II. MAVİ FAZ SIVI KRİSTALLERİN TEMEL ÖZELLİKLERİ

A. MAVİ FAZLARIN BELİRLENMESİ

Mavi fazda moleküller bir silindir oluşturacak şekilde çift yönlü bükülerek hizalanır. Sıvı kristalin yön vektörleri tarafından oluşturulan tüm sarmal eksenler merkez çizgisine diktir. Silindirin yarıçapı boyunca sıvı kristal moleküller merkeze göre -45° ile $+45^\circ$ arasında döner. Her bir silindirik yapı bu sistemin temel birimini oluşturmaktadır. Bu yapı birimleri her mavi fazda farklı paketlenir (Şekil1a). Ancak bu silindirler üç boyutlu alanı sürekli bir şekilde dolduramazlar. Bu nedenle, mavi fazda çift bükümlü silindirler ve kübik simetri ile düzenli bir ağ oluşturan disklinasyonlar bir arada bulunmaktadır (Şekil1b). Silindirlerin temas ettiği noktalarda kusurlar (defektler) meydana gelir ve örgü kusurunun gücü $-\frac{1}{2}$ 'dir. Yani izotropik sıvı fazda olduğu gibi, kusur çekirdeğinde moleküller düzensiz yönelirler. Örgü kusur çekirdeğinin çapı yaklaşık olarak 10nm olduğu tahmin edilmektedir. Bu yarıçap, moleküllerin elastik sabitleri ile doğru orantılıdır. Bu kusurlar, yapıyı daha az kararlı hale getirme eğilimindedir ve bu da dar bir sıcaklık aralığına neden olur. Bu nedenle, mavi faz izotropik faza en yakın sıcaklık aralığında bulunmaktadır [16].



Şekil 1 (a) BPI, BPII ve BPIII moleküllerin oluşturduğu paket yapılar ve (b) BPI ve BPII fazların disklinasyon kusurları [14].

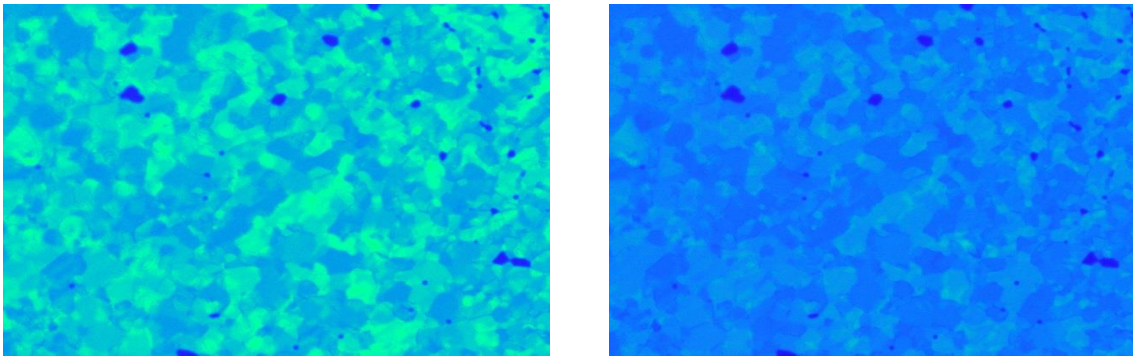
Mavi fazın geniş bir sıcaklık aralığında meydana gelmesi için anahtar çözüm, bu disklinasyon bölgelerin nano yapıları parçacıklar veya polimer materyallerle doldurulması ile sağlanır. Böylelikle mavi faz ile kiral nematik faz arasındaki termodinamik denge sözü edilen materyaller tarafından değiştirilebilir. Ancak BPIII'den izotropik sıvı faza geçiş için kritik bir nokta oluşur, böylece yüksek kiralitede BPIII

yavaş yavaş izotropik olarak değişir. BPIII fazın özellikleri diğer mavi fazların özellikleri kadar iyi anlaşılmamıştır [4,16].

Mavi faz sıvı kristaller fotonik kristal gibi kendiliğinden bir araya gelmiş periyodik yapılara sahiptir. Mavi fazların periyodik yapısı, görünür ışık spektrumu aralığında seçici Bragg yansımalarına neden olur. Bilindiği gibi seçici yansıma, kolesterik (kiral nematik) sıvı kristalde de meydana gelir. Yansıma dalga boyu $\lambda = \bar{n} \cdot p$ şeklindedir. Burada \bar{n} ortalama kırılma indisidir ve p burulma veya adım (pitch) uzunluğudur. Yansıma bandı $\Delta\lambda = \Delta n \cdot p$ genişliğindedir. Burada Δn sıvı kristal kristalin çift kırılma indisidir. Kiral nematik fazdan farklı olarak, mavi fazlar herhangi bir hizalama tabakasına ihtiyaç duymaz ve çeşitli kristal düzlemlere karşılık gelen birkaç yansıma dalga boyuna sahiptir. Yansıma dalga boyu şu şekilde ifade edilebilir:

$$\lambda = \frac{2na}{\sqrt{h^2 + k^2 + l^2}} \quad (1)$$

Burada a mavi fazların hücre örgü sabitini belirtir ve h, k, l Miller indisleridir. BPI'de, kafes sabiti bir adım uzunluğuna karşılık gelir. Ve kırınım pikleri (110), (200), (211) vb. düzlemlerde görülür. Yani, Miller indislerin $h + k + l$ toplamı bir çift sayı olmalıdır. BPII'de, a kafes sabiti yarım adım uzunluğuna karşılık gelir. Ve kırınım pikleri (100), (110) vb. düzlemlerde görülür [10,16]. Mavi fazın adım uzunluğu, kiral nematik fazın adım uzunluğundan biraz farklıdır. Ayrıca yansıma bant genişliği kiral nematik fazınkinden çok daha dardır. İki mavi fazın polarize optik mikroskop altında görüntülenmiş parçalı desenleri (tekstürleri) Şekil 2'de verilmektedir. Bu iki desen, farklı adım uzunluklarına sahip olduğundan dolayı farklı renkler sergilemektedir. Bir desen içerisindeki çoklu renkler farklı kristal düzlemlerine karşılık gelir. Bragg yansıma dalga boyu, ışığın geliş açısının yönüne duyarlıdır. Sıcaklık değişim hızı, uygulanan elektrik alan veya hizalama tabakaları gibi deneysel koşullar değiştirilerek yama desenlerindeki domain uzunluğu birkaç mikrondan birkaç yüz mikrona kadar ölçekte ayarlanabilir. Kübik yapılardan kaynaklanan Bragg yansımasının yanı sıra, polimer ile sıvı kristal arasındaki indis uyumsuzluğından dolayı düzensiz domain sınırları ışığın saçılmasına neden olur [14].



Şekil 2. Farklı kiral konsantrasyon ile hazırlanmış hücrelerin polarize optik mikroskop altında görüntülenmiş yama desenli tekstürleri.

Saçılma ince film hücrede gözlenmez ancak kalın numunede veya hacimli kılcal tüplerde daha belirgindir. Rezonans dalga boyları dışında, mavi fazlar optik olarak izotropiktir. Yani mavi fazın Bragg yansıması UV bölgesine (<380 nm) kayar. Daha kısa bir Bragg yansıma dalga boyu kontrast oranının artırmasına yardımcı olur ki bu da LCD ekranlar için aranan bir özelliktir [17-20].

Mavi faz sıvı kristallerin X-ışını kırınım sonuçları göstermektedir ki fazların yerel düzeni, sıvının düzeni gibidir. Mavi faz sıvı kristaller ışığın polarizasyon düzlemini güçlü bir şekilde döndürür. Mavi fazlarda herhangi bir çift kırınım gözlenmez ve optiksel olarak izotropiktir. BPI ve BPII fazlarının optik yansımaları katı kristallerin X ışınım yansımalarına benzerdir. BPI ve BPII fazlarının Bragg yansımaları üç-boyutlu fotonik bant aralıklı kristaller gibi mikrometre ölçekte üç boyutlu bir periyodik dizilimine karşılık gelir. Mavi fazların NMR (Nuclear magnetic resonance) spektrumları ise kolesterik fazından farklıdır [10].

B. ELEKTRO-OPTİK ÖZELLİKLERİ

Kerr etkisi (kuadratik elektro-optik etki olarak da bilinir), malzemenin kırılma indisinin elektrik alanla doğrusal olmayan bir şekilde değişmesi olaydır. Bu etki bazı sıvılarda daha belirgindir (Nitrobenzen v.b.). Nematik sıvı kristallerin nematik - izotropik faz geçiş sıcaklığının hemen üzerinde Kerr etkisi meydana gelir ve Kerr sabiti yüksektir [21]. Çünkü kısa erimli nematik benzeri düzen, izotropik sıvıdaki yöneliminin dalgalanmasına neden olur. Makroskopik olarak, mavi faz sıvı kristal dış bir elektrik alan olmadığında izotropik Kerr ortamıdır. Elektrik alan arttıkça mavi faz sıvı kristal molekülleri elektrik alan yönü boyunca anizotropik hale gelir. Kırılma indisinin değişimi düşük elektrik alanda Kerr etkisini takip eder ancak elektrik alan artmaya devam edince kademeli olarak doyuma ulaşır. Daha yüksek elektrik alan örgünün bozulmasına neden olabilir. Bu da genişletilmiş Kerr etkisi ile açıklanabilir [22]. Örgü bozulmalarının gevşeme süresi 10-100 ms arasındadır. Yeterince yüksek elektrik alan altında mavi faz, kiral nematik faza ve nihayetinde nematik faza dönüşebilir. Bu geçiş genellikle çok yavaştır (birkaç saniye veya daha uzundur) bu da istenmeyen histerezise veya kalıcı çift kırılmaya neden olur. Zayıf elektrik alan (E) bölgesinde indüklenen çift kırılma, dalga boyu (λ) ve Kerr sabiti (K)'ne aşağıdaki gibi bağlıdır.

$$\Delta n_{ind} = \lambda K E^2 \quad (2)$$

Genişletilmiş Kerr etkisine göre; polimer ile sabitlenmiş mavi faz sıvı kristallerin indüklenen çift kırılma indisi, dış elektrik alana aşağıdaki gibi bağlıdır [25].

$$\Delta n_{ind} = \Delta n_d \left[1 - \exp\left(-\frac{E}{E_d}\right)^2 \right] \quad (3)$$

Burada Δn_d doyuma ulaşmış indüklenen çift kırılma ve E_d ise doyum durumdaki elektrik alandır. Zayıf elektrik alan bölgesinde ($E \ll E_d$), Kerr sabiti aşağıdaki gibidir.

$$K \approx \frac{\Delta n_s}{\lambda E_d^2} \quad (4)$$

ve Gerber'in modeline göre [23], Kerr sabiti

$$K \approx \frac{\Delta n \Delta \epsilon \epsilon_o p^2}{k(2\pi)^2} \quad (5)$$

Burada $\Delta \epsilon$ ve k sırasıyla dielektrik anizotropi ve elastik sabitidir.

Mavi faz sıvı kristallerin tepki verme süresi [4]

$$\tau \approx \frac{\gamma_1 p^2}{k(2\pi)^2} \quad (6)$$

Burada γ_1 sıvı kristalin dönme viskozitesidir.

Geleneksel sıvı kristal ile karşılaştırıldığında, mavi faz sıvı kristaller kendine özgü bazı fiziksel özelliklere sahiptir. Bu özelliklerin en önemlileri ve teknolojiye etkileri aşağıda verilmektedir:

1. Moleküller uygulanan elektrik alanına karşı milisaniyenin altında ($\sim 300 \mu s$) tepki süresine sahiptir ve bu sayede ekran uygulamalarında görüntünün bozulması minimize edilerek seri halde akışı gerçekleşir. Günümüzdeki standart LCD televizyonlarda tepki süresi milisaniye mertebesinde. Mavi faz sıvı kristal moleküllerin tepki süresinin büyüklüğü, viskozite (splay viskozite) ile doğru, elastik sabitleri ile ters ve sarmal adımın karesi ile doğru orantılıdır. Bu fiziksel büyüklüklerin belirlenmesi uygulamalar açısından büyük önem arz etmektedir [24-26].
2. Mavi faz sıvı kristallerin kullanılması sayesinde sıradan bir LCD televizyon için gerekli olan ve önemli bir maliyet oluşturan renk filtrelerine ihtiyaç ortadan kalkmaktadır. Buna ek olarak, filtreye gerek olmadığından dolayı filtreli LCD'lere oranla enerji tüketimi de azalmaktadır [14,25,26].
3. Mavi faz sıvı kristal moleküllerin yönelimi için organik (polyimide) veya inorganik silikon oksitli yönelim tabakalarına gerek yoktur. Bu durum, aynı şekilde üretim maliyetini azaltacaktır. Sıradan bir LCD televizyonda moleküllerin yönelimi için bu yönelim tabakalarına ihtiyaç duyulmaktadır [14,25,26].
4. Mavi faz sıvı kristallere elektrik alan uygulanmadığı durumda optiksel olarak izotropiktirler. Elektrik alan uygulandığında ise Kerr etkisi sonucu mavi faz sıvı kristalin çift kırılma indisi değişmektedir. Alanla indüklenen çift kırılma indisi, dalga boyuna ve Kerr katsayısına bağlıdır. Kerr katsayısı uygulanan elektrik alanın karesi ile doğru orantılıdır. Çapraz polarizörler arasındaki sıvı kristallerin ışık geçirgenliği uygulanan voltaj ile orantılıdır [14,25,26]. Böylece LCD televizyonlara geniş bir bakış açısı kazandırılmış olur. Günümüzde LCD televizyonların geniş bir bakış açısına sahip olmaması en önemli problemlerden biridir. Mavi faz bu temel probleme de çözüm getirmektedir.

Tüm bu avantajlarına rağmen mavi faz sıvı kristal moleküllerin handikapları da yok değildir. Mavi faz sıvı kristal halinin düşük bir sıcaklık aralığında gerçekleşmesi uygulamalar açısından en büyük dezavantajdır. Mavi faz sıvı kristallerin optik uygulamalarda kullanılabilmesi için sıcaklık aralığının büyük ölçüde genişletilmesi ve oda sıcaklığında kullanılabilir hale gelmesi gereklidir. Çünkü standart kiral nematik sıvı kristal moleküller kullanılarak $1-2^{\circ}C$ den daha büyük bir sıcaklık aralığına sahip kararlı bir mavi faz sıvı kristalin elde edilmesi mümkün değildir. Bu fazın sıcaklık aralığını arttırmak amaçlı farklı çalışmalar yapılmış ve başarılı sonuçlar da elde edilmiştir [24-77].

Mavi faz sıvı kristallerin teknolojik uygulamaları için uygulama voltajı hala üstesinden gelinmesi gereken temel bir sorundur. Genel olarak, uygulanan gerilimi düşürmek için iki yöntem vardır. Birinci yöntem, büyük Kerr sabitine sahip mavi faz sıvı kristal malzemelerin ve reaktif seyrelticiler içeren polimer sistemlerin olduğu malzemelerin sentezlenmesidir [4,55]. Bugüne kadar geliştirilen mavi faz malzemelerinin çoğu, 0.4 ila 33.1 nm.V^{-2} arasında değişen Kerr değerlerine sahiptir [4,14,17,56]. İkinci yöntemde ise, çıkıntı (protrusion) elektrotlar, duvar şeklindeki elektrotlar, oluklu (corrugated) elektrotlar ve dikey alan geçişli (VFS) elektrotlar kullanılarak cihaz (ekran) yapısının optimizasyonu ile elektrik alanın etkisi arttırılmaktadır [76-83]. Uygulanan gerilimi azaltma konusundaki dikkate değer bu başarılarla rağmen, imalat işlemleri karmaşık, zor ve pahalıdır. Yani, mavi faz sıvı kristal tabanlı cihazlara uygulanan voltaj, aygıtın yapısına ve kullanılan malzemenin Kerr sabitine bağlıdır. Uygulama voltajı, Kerr sabitinin karekökü ile ters orantılıdır. Denklem 5'den görüleceği üzere Kerr sabitinin arttırılması için yüksek Δn ve $\Delta \epsilon$ değerlerine sahip bir sıvı kristal veya ötektik karışımlarına

ihtiyaç vardır. Sıvı kristallerin çift kırılma indisi elektronik konjugasyon uzunluğundan ve dielektrik anizotropisi ise dipol momentlerden belirlenir. Ancak sıvı kristallerin çift kırılma indisinin ulaşabileceği en yüksek değeri 0.8'dir [84]. Bir diğer kısıtlama şart ise mavi faz sıvı kristallerin adım uzunluğunun 200nm olmasıdır [4,56,57]. Bu kısa adım uzunluğu, daha yüksek uygulama gerilimine yol açacaktır. Çünkü mavi fazların ekran ve fotonik uygulamaları için görünür spektral bölgede şeffaf olmalıdır. Bu nedenlerden dolayı yüksek dielektrik anizotropiye sahip sıvı kristal ve ötektik karışımlara ihtiyaç duyulmaktadır.

C. MAVİ FAZ SIVI KRİSTALLERİN KARARLI HALE GETİRİLMESİ

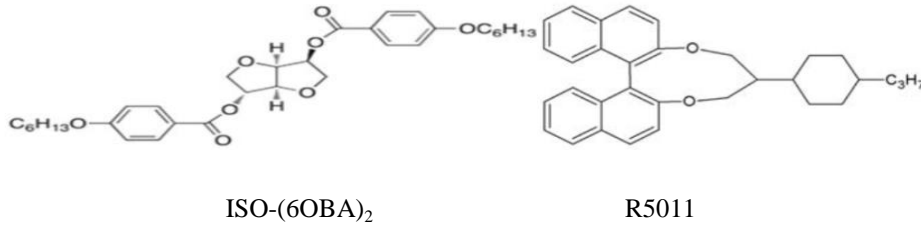
C.1. POLİMERLER İLE KARARLI HALE GETİRİLMESİ

Mavi faz sıvı kristallerin sıcaklık aralığını genişletmek için kullanılan yöntemlerden ilki polimer stabilizasyon yöntemidir [51-57]. Bu yöntemde öncelikle bir kiral katkı, monomer yapılı polimerler, bir foto-initiator ve sıvı kristal moleküllerin belirli oranlarda karışımları sonucu mavi faz sıvı kristal meydana gelir. Daha sonra monomerlerin çapraz bağlanabilmesi için hazırlanan karışım 30-40 dakika süre ile düşük güçteki mor ötesi ışığa maruz bırakılır. Bu işlem sırasında, mavi faz sıvı kristalin sıcaklık aralığı değişebilir. Bu yüzden mor ötesi ışınlama adım adım yapılır. Hazırlanan örneğin mavi faz sıcaklığında kalması için sıcaklık kademeli bir şekilde azaltılır. Kikuchi ve arkadaşları bir kiral katkı maddesi, monomer yapılı polimerler, bir initiator ve sıvı kristal moleküllerin belirli oranlarda karıştırılması sonucu mavi faz sıvı kristal meydana getirmiştir. Polimerizasyon tamamlandığında oda sıcaklığı dâhil 60°C sıcaklığına sahip bir mavi faz sıvı kristal elde edilmiştir [51]. Araştırmalardan bilindiği üzere bir sıvı kristal faza karşın polimerler izotropik sıvı faz aşamasında daha kolay çözülür. Bu nedenle, çapraz-bağlama işlemi sırasında polimer sıvı kristal içindeki disklinasyonlara doğru hareket eder. Çünkü disklinasyonun olduğu bölgede yönelimsel düzenin derecesi düşüktür. Polimer çapraz bağlanma işlemi tamamen gerçekleştiğinde polimer bulunduğu konumda sabitlenir. Böylece polimerin konumu sıcaklık değişiminden ya da uygulanan elektrik alandan bağımsız olur. Çünkü polimerler yönelimin daha az olduğu disklinasyonlarda olmayı tercih eder. Kiral nematik sıvı kristal faz geçişinde bile bu disklinasyon bölgelerinin konumu değişmez. Ve bu yüzden mavi fazdan kiral nematik faza geçişte normal olarak mevcut olan serbest enerjisinin azaltılması gerçekleşmez. Sonuç olarak, mavi faz sıvı kristalin polimer stabilizasyon ile birlikte sıcaklık aralığı çok daha geniş olur [51,56,57]. Böyle bir sistem için büyük bir elektro-optik Kerr etkisinin olduğu bildirilmektedir.

Mavi faz sıvı kristal sistemde, ev sahibi nematik sıvı kristal moleküllerin karışımı, hazırlanan toplam miktarın en yüksek konsantrasyonuna (%70 ila %90 arasında) sahiptir. Bu nedenle nematik sıvı kristal moleküller, sistem performansının (örneğin; sıcaklık aralığı, eşik voltajı ve tepki süresi gibi) belirlemede kritik rol oynar [4,10,13]. Ekran ve fotonik uygulamaları için çoğu sıvı kristal sistem gibi mavi fazın çalışma sıcaklık aralığının da -40°C ila 80°C arasında olması beklenir. Geniş bir sıcaklık aralığına sahip kararlı polimer faz elde etmek için, ilk olarak ev sahibi sıvı kristalin geniş bir nematik sıcaklık aralığında bulunması gerekir. Mavi faz sıvı kristalin alt sıcaklık sınırı çok önemli bir sorun olmamakla birlikte esas olarak üst sıcaklık sınırı nematik sıvı kristallerin izotropik sıvıya faz geçiş sıcaklığına göre belirlenir. Kararlı polimer faz sistemindeki diğer bileşenler, sistemin izotropik sıvıya faz geçiş sıcaklığını düşürme eğilimindedir. Bu yüzden geniş sıcaklık aralığına sahip, sözü edilen fazın elde edilebilmesi için, izotropik sıvı faz geçiş sıcaklığı T_c , 80°C'den daha yüksek olan nematik sıvı kristal moleküllerin seçilmesi esastır [4,56,57]. Bu kiral katkı maddesi ve konuk sıvı kristal ile doğrudan ilintilidir. Hızlı tepki süresi elde etmek için düşük viskoziteye sahip sıvı kristaller tercih edilir.

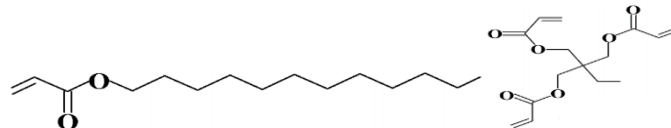
Kiral katkı maddeleri, mavi fazlardaki moleküllerin belirli bir yön boyunca dönmelerine neden olur. Mavi fazlar yalnızca sistemin kiralitesi belirli bir değeri aştığında görünür. Sistemin kiralitelikliğini

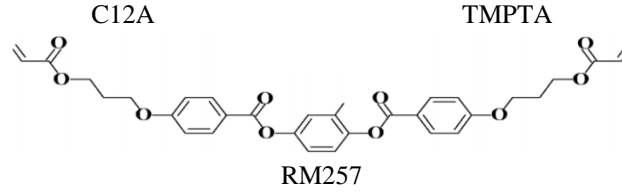
artırmak için, ya kiral katkı (dopant) miktarı artırılır ya da yüksek heliksel burulma gücüne (high twist power-HTP) sahip katkı maddesi kullanılır (Şekil3). Yani adım uzunluğu, HTP ve kiral katkı maddesinin konsantrasyonu (c) ile ters orantılıdır ($P = 1/(HTP * c)$) [4,10,12,14]. Böylece farklı kiral katkı maddeleri seçilerek veya kiral katkı maddesinin konsantrasyonu değiştirilerek Bragg yansıma dalga boyu ayarlanabilir. Kiral katkının burulma gücü Cano - Grandjean yöntemi yardımıyla belirlenir. Cano - Grandjean yöntemi, nematik sıvı kristal moleküllere eklenen kiral katkı nedeniyle oluşan kolesterik sarmalın hassasiyetinin belirlenmesi için kama benzeri bir sıvı kristal hücredeki şeritlerin renk kaymasına dayalı bir ölçme yöntemidir. Kiral katkıların çözünürlüğü nematik sıvı kristaller içindeki molekül yapısına bağlıdır [26]. Kiral katkı maddesinin küçük HTP'ye (örneğin CB15) sahip olması durumunda mavi faz elde etmek için kiral maddenin konsantrasyonu artırılmalıdır. Bu da bazı dezavantajlara yol açar: a) nematik sıvı kristallerin karışımındaki oranı daha düşük olacaktır ve daha düşük bir Kerr sabiti ile sonuçlanabilir. b) Çoğu kiral katkı maddesi sıvı kristal fazı sergilemez, bu nedenle daha fazla kiral katkı maddesinin eklenmesi mavi faz sıvı kristalin izotropik sıvı faz geçiş sıcaklığını azaltacaktır. c) Kiral katkı maddesinin çözünürlüğü genellikle sınırlıdır. Yani kiralin çok yüksek konsantrasyonu adım uzunluğunda doygunluğa neden olabilir. Sonuç olarak, mavi faz sıvı kristalin kararlılığı etkilenecektir. Bu yüzden mavi faz sıvı kristal elde etmek için yüksek heliksel burulma gücüne sahip katkı maddesi yaygın olarak kullanılmaktadır (örneğin R5011 veya ISO-(6OBA)₂).



Şekil 3. Kiral katkı malzemelerin kimyasal yapısı

Mavi fazın sıcaklık aralığını genişletmek için monomer seçimi esastır. Genellikle UV ışığa duyarlı tek ve çok fonksiyonlu monomerler olmak üzere iki tür monomere ihtiyaç duyulur ve sıcaklık aralığını genişletmek için belirli miktarda monomer gerekir. Karışımın ışığı saçmasını önlemek için monomerlerin konsantrasyonu % 11'in altında tutulmalıdır. Tipik olarak mavi fazı kararlı hale getirmek için diakrilat monomer (örneğin RM257) ve tek fonksiyonlu monomer (örneğin C12A: dodecyl acrylate) veya üç fonksiyonlu monomer (örneğin TMPTA: 1,1,1-trimethylolpropanetriacrylate) birlikte kullanılır (Şekil4). Polimer konsantrasyonu arttıkça, polimer ağı daha kararlı hale gelir, bu da daha hızlı tepki süresi ve daha yüksek çalışma voltajı sağlar. İki farklı monomerin ve monomer türlerinin kopolimerizasyon reaktivite oranı, polimer ağının oluşumunu da değiştirecektir. Yani genel polimer konsantrasyonu sabitlendikten sonra monomer oranı aynı zamanda polimer ağı kararlılığını da etkiler. 1: 1 oranı tercih edilir. Çünkü daha hızlı bir tepki süresi, daha az kalıcı çift kırılma indisi ve histeresiz sağlar. Hızlı tepki süresi muhtemelen mavi faz sıvı kristallerin en ilgi çekici özelliğidir. Hızlı tepki süresi kısa adım uzunluğundan ve güçlü polimer ağdan kaynaklanır. Sıvı kristal ile polimer ara yüzeydeki demirleme durumu, polimer ile kararlı hale gelen mavi faz yapının serbest enerjisini önemli ölçüde etkileyen faktörlerden biridir [4,56,57]. Bununla birlikte polimerlerin yüzeydeki fiziksel ve kimyasal etkisi, mavi faz sisteminin güçlü demirlenmesi veya zayıf demirlenmesi üzerinde önemli bir rol oynamaktadır [4,51-57].





Şekil 4. Monomerlerin kimyasal yapısı

Malzeme optimizasyonu yanı sıra polimerle kararlı hale gelmiş mavi faz sıvı kristal sistemin performansını foto başlatıcı konsantrasyonu, UV ışığın ışınlama koşulları (UV ışığın dalga boyu, ışık yoğunluğu, maruz kalma süresi) ve sertleşme sıcaklığı gibi faktörlerde etkiler. Kompoziti hazırlamak için UV ışığın dozu $\sim 3.6 \text{ J/cm}^2$ ve yoğunluğu 1 mW/cm^2 ila 20 mW/cm^2 arasında olmalıdır [4,14]. Daha uzun UV dalga boyu, daha düzenli bir şekilde sıvı kristal hücreye nüfuz eder ve daha yüksek kalitede polimer ağları üretilir. Bu işlem, histerezisin ve artık çift kırılmanın azaltılmasında yardımcı olur. Sistemin tepki süreleri (gevşeme ve yükselme zamanı), ışık şiddetinin en yüksek veya en düşük değerlerine ulaştığı voltajlar ani bir şekilde kesilerek veya uygulanarak ışık şiddetinin zamana göre değişimi $\%90$ 'ı ile $\%10$ 'ı veya $\%10$ 'ı ile $\%90$ 'ı arasındaki sürelerden belirlenir. Histerezis ve artık kırılma indisi sıvı kristal ekranlarda optik geçişi etkileyen önemli sorunlardır. Uygulanan voltajla ışık şiddetinin ileri ve geri yöndeki en düşük değerleri arasındaki fark ile sistemin artık çift kırılma indisi tespit edilir. Sistemin histeresizi uygulanan voltajla ışık şiddetinin en düşük değeri ve en yüksek değerinin yarısındaki, ileri ve geri yöndeki voltaj farkı ile belirlenir. Ayrıca malzemelerin iyonik safsızlığı ve foto başlatıcı konsantrasyonu mavi faz sıvı kristallerin çalışma voltajına olumsuz etki eder. Bu yüzden foto başlatıcı konsantrasyonu $\%1$ civarında kullanılır. Kullanılan malzemelerin saflık oranları da mümkün olduğunca yüksek olmalıdır.

C.2. BENT-CORE MOLEKÜLLER İLE KARARLI HALE GETİRİLMESİ

Mavi faz sıvı kristallerin sıcaklık aralığını genişletmek için kullanılan diğer yöntem ise ikili mezojenlerin bir araya getirilmesidir. Yani, iki sıvı kristal yapıyı oluşturan bileşimlerin bir hidrokarbon zincir ile birbirine bağlanmasıdır. Bu ikili mezojenlere yüksek burulma gücüne sahip bir kiral madde eklenildiğinde, mavi faz sıvı kristallerin sıcaklık aralığı yaklaşık 40°C 'ye kadar genişletilebilir. Bu karışımlar, geniş bir flekso-elektrik etkiye ve milisaniye mertebesinde anahtarlama süresine sahiptir [24,25].

Diğer bir yöntem ise T, L veya V şeklindeki molekül yapılarının karışımı ve üçlü mezojenler kullanılarak bu fazın elde edilmesidir. Yani, bent-core moleküllerin yüksek flekso-elektrik özellikleri, mavi faz sıvı kristallerin sıcaklık aralığının artmasında önemli bir rol oynamıştır. Bent-core sıvı kristaller ile ilişkili mavi faz özellikleri tamamen yeni bir araştırma konusudur [26-50]. Bu konudaki başlıca çalışmalarda; Kiral katkı madde ile V şekilli bent-core sıvı kristalin karıştırılması sonucu mavi fazlarda 10°C 'den daha büyük sıcaklık aralıkları elde edilmiştir [26]. Yüksek sarmal döndürme (HTP) gücüne sahip bir kiral katkı madde ile bent-core sıvı kristalin belirli bir oranda karışımı sonucu sıcaklık aralığı 20°C 'nin üzerinde olan amorf BPIII oluşturulmuştur [27]. Ayrıca önceki çalışmalarda, mavi faz sıcaklık aralığının saf mavi faz materyalin nematik faz aralığı ile sınırlı olduğu belirlenmiştir. Böylece, oda sıcaklığında mavi faz elde etmek için bent-core sıvı kristal materyallerin karışımlarının kullanılabilir olduğu önerilmiştir. Bent-core sıvı kristal moleküllere kiral merkezin uygun bir şekilde eklenmesi ile yüksek flekso-elektrik özellik ve moleküle kiralite sağlanmıştır. Ocak ve arkadaşları saf kiral merkez içeren bent-core malzeme kullanarak oda sıcaklığında BPIII faz elde etmiştir [28]. Aya ve arkadaşları eğik geometri şekilli asimetric dimer sıvı kristal molekülü sentezleyerek 37°C sıcaklık aralığında başka bir mavi faz raporlamıştır [29]. Nakata ve arkadaşları bent-core malzemeleri kiral nematik sıvı kristale ekleyerek sıcaklık aralığı 5°C olan mavi faz elde etmiştir [30]. Bu

çalışmadaki kiral nematik normalde mavi faz içermemektedir. 1, 3, 4-oxadiazole tabanlı bent-core malzemelerin türevinin bir çeşidini kiral nematik sıvı kristale ekleyerek sıcaklık aralığı 29 °C olan mavi faz elde edilmiştir. Zheng ve arkadaşları, fotopolimerizasyonun etkisini arttırmak için alilik grupların yerine akrilat grupları getirilerek bükülme merkezinde cyano grubu olan bent-core molekül sentezlenmiştir [31]. Böylelikle geniş bir sıcaklık aralığına (yaklaşık 48.6 °C) sahip mavi faz elde edilmiştir. Fakat UV ışık radyasyonundan sonra mavi faz sıcaklık aralığı yaklaşık 10°C azalmıştır. Bunun nedeni muhtemelen sterik konfigürasyonun değişimi ve cyano grubun polaritesinden kaynaklanmaktadır. Tüm bu sıcaklık aralığı iyileştirmelerine rağmen bent-core molekül içeren mavi faz sıvı kristallerin optiksel tepki süreleri çubuk şeklindeki molekülleri içeren mavi faz sıvı kristallerinkine oranla çok yavaştır [26-50].

C.3. NANO YAPILI MALZEMELER İLE KARARLI HALE GETİRİLMESİ

Mavi faz sıvı kristallerin sıcaklık aralığını genişletmek için kullanılmakta olan bir diğer yöntem ise kolloidal stabilizasyon tekniğidir. Polimer stabilizasyon fikrine benzer şekilde koloidal nanoparçacıklar doğal olarak düşük yönelim düzeninin olduğu bölgelere (disklinasyon kusurlarına) hareket eder [58-69]. Böylece disklinasyonun olduğu bölgeler koloidal nanoparçacıklar tarafından doldurulur. Sistemin serbest enerjisi azalır. Bu genel fikir doğrultusunda yapılan araştırmada disklinasyonun olduğu bölgeye 3.7 nm çapındaki küresel altın nano parçacıkların eklenmesi sonucu mavi faz sıvı kristallerin sıcaklık aralığının 0.5°C'den 5°C'ye kadar arttırıldığı bulunmuştur [58]. Diğer bir araştırmada ise 4.5 nm çapındaki küresel koloidal CdSe nanoparçacıkların mavi faz sıvı kristale eklenmesi sonucu BPIII fazının sıcaklık aralığının 20°C'ye kadar arttığı görülmüştür [60]. Polimerlerin ve nano parçacıkların birleşimi olan melez sistem Dierking tarafından kullanılarak mavi fazın sıcaklık aralığı dengelenmiş ve genişletilmiştir. Yaklaşık 30 nm çapındaki nano parçacıklar, % 5.0 trimethylolpropane triacrylate (TMPTA) ve iki fonksiyonlu monomer (C6M) içeren polimer kararlı mavi faz içine ağırlıkça % 0.5'lik bir konsantrasyonda dağıtılmıştır. ZnS nano parçacıklar katkılı karışımın mavi faz sıcaklık aralığı 41.2 °C artmıştır ve ferroelektrik BaTiO₃ nano parçacık katkılanması sonucu ise sıcaklık aralığının 45.9°C'ye genişlediği gözlenmiştir. Bu melez yöntemde, BPI'nın disklinasyon kusurları, nanoparçacık ve polimer zincirler tarafından kararlı hale getirilir. Buna ek olarak, melez yöntem hem sadece polimer katkı hem de sadece nano parçacık dağılımı yardımı ile edilen kararlı yapıdan daha verimli ve etkilidir [58].

Mavi faz sıvı kristallerin sıcaklık aralığını genişletmek için kullanılmakta olan bir diğer yöntem ise grafenlerle stabilizasyon tekniğidir [70-75]. Lavric ve arkadaşları az miktarda oleyil amin ile fonksiyonelleştirilmiş grafen nanoplateletleri kolesterik sıvı kristallere dağıtarak mavi faz sıvı kristallerin sıcaklık aralığını genişletmiştir [70]. Oleyil amin, hidrofobik ve esnek yapıya sahiptir ve grafen nano plaka yüzeyi çevreler. Bu etki, mavi faz yapı içindeki kusur çekirdeğin değişmesini ve bozulmasını zorlaştırır. Ni ve arkadaşları, geleneksel polimer ile kararlı hale gelen mavi faz sıvı kristallere az miktarda (%0.03-2.00) polianiline ile fonksiyonelleştirilmiş grafen nano-tabaka ilave etmiş ve elektro-optik özelliklerini incelemiştir [71]. Polianiline ile fonksiyonelleştirilmiş grafenin konulması ile mavi faz sıvı kristallerin yapısı korunmuştur. Mavi faz sıvı kristallerin kararlı sıcaklık aralığı, polianiline ile fonksiyonelleştirilmiş grafen ilave miktarı arttıkça 6.6°C'ye kadar çıkarılmıştır. Ağırlıkça % 0.05 olan polianiline ile fonksiyonelleştirilmiş grafen katkılı mavi faz sıvı kristallerin Kerr sabiti, polianiline ile fonksiyonelleştirilmiş grafen içermeyen mavi faz sıvı kristallere kıyasla yaklaşık % 55 oranında artmıştır. Böylelikle, mavi faz sıvı kristallere uygulanacak olan voltajı % 55 oranında azaltılmıştır. Aynı zamanda, bu kompozit malzeme ile birlikte sistemin elektro-optik özelliklerinde (histerezis, tepki süresi ve artık çift kırılma) değişme görülmemiştir.

Bunun yanında, azobenzen grafen kompozit yapılar benzersiz foto-tepki özellikleri gösterirler. Azobenzen, mavi fazı kararlı hale getirmek için kullanılacak bükülmüş şekilli (bent-shaped) bir

moleküldür. Zhang ve arkadaşları, azobenzen molekülleri kiral nematik sıvı kristallere katkılamış ve daha sonra fazın sıcaklığını değiştirerek BPI faza dönüştürmüştür [72]. Azobenzen molekülleri belirli dalga boylarında ışığa maruz kaldığında, cis-trans foto-izomerizm mekanizması sonucu seçici yansıyan dalga boyunun değişimine neden olur. Maruz kalma süresinin uzaması ile mavi faz yapısının tamamı bozulur ve mavi faz sıvı kristal izotropik sıvı fazına dönüşür. Azobenzen molekülü trans durumuna döndüğünde, mavi faz yapı ilk durumuna döner. Zhao ve arkadaşları bir mavi faz sistemine ağırlıkça % 0.5 amino azobenzen ile modifiye edilmiş grafen katmış ve mavi faz sıcaklığını 3.6°C'den 5.9°C 'a çıkartmışlardır [73]. Sıcaklık aralığının genişlemesi açık olmasa da, amino azobenzen ile modifiye edilmiş grafen iyi bir termal kararlılık gösterir. Bu mavi faz aralığındaki iyileşmenin sıcaklık değişiminden etkilenmeyeceği anlamına gelir. Zongcheng Miao ve arkadaşları bir mavi faz sistemine ağırlıkça % 0.5 amino azobenzen ile indirgenmiş grafen katmış ve mavi faz sıcaklığını 3.6°C'den 5.4°C 'a çıkartmıştır [74]. Amino azobenzen ile indirgenmiş grafen nanoyapıların katılınması, mavi faz sistemin hacmi ve etrafındaki disklinasyonlardaki serbest enerjinin azalmasına neden olmaktadır.

MinSu Kim ve arkadaşları indirgenmiş grafen oksit ile zenginleştirilmiş bir polimer ağı elektro-optik performansını incelemiştir. Böylelikle sistemin sadece iletkenliğini arttırmakla kalmamış, aynı zamanda sıvı kristal moleküllere karşı benzen halkalarının güçlü π - π etkileşimini sağlamıştır. Geleneksel polimer ile kararlı hale gelmiş mavi faz sıvı kristal ile karşılaştırıldığında çalışma voltajı % 32, tepki süresini %51 ve histerez % 53'e düşürülmüştür [75].

III. POTANSİYEL OPTİK VE FOTONİK UYGULAMALARI

Polimerle sabitlenmiş mavi faz sıvı kristaller, yukarıda bahsedilen özelliklere dayanarak fotonik uygulamalarda yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Mikroskopik olarak, çift bükümlü silindirlere oluşan ve kendiliğinden birleşen örgü yapılar doğal bir fotonik bant aralığına sahip üç boyutlu aygıtlardır. 2002 yılında, Cao ve arkadaşları bant kenar etki temelli saf mavi faz sıvı kristalden lazer yayılımı elde etmiştir [85]. 2006 yılında, Yokoyama ve arkadaşları polimerle sabitlenmiş mavi faz sıvı kristallerden lazer yayılımı elde etmiştir [86]. Bugüne kadar, mavi faz sıvı kristale dayalı optik grating performanslarını gösteren sayısız yaklaşımlar sunulmuştur. İki ortogonal IPS elektrot grupları kullanarak 1D/2D boyutlu değişebilen optik faz grating, dikey elektrik alan (VF) uygulayarak 1D/2D boyutlu değişebilen polimerle sabitlenmiş mavi faz sıvı kristallere gönderilen ışığın kutuplanmasından bağımsız optik grating [87], IPS elektrot grubu ve dikey elektrik alan birleşimi çift periyotlu ayarlanabilir polimerle sabitlenmiş mavi faz sıvı kristal optik grating [88], periyodik polimer dilim yapılı melez optik grating [89], methyl-kırmızı boya katkılı doğrusal olmayan holografik polimer şablonlu mavi faz sıvı kristal optik grating [90], görünür lazer ile üretilmiş mavi faz sıvı kristal optik grating [90], Gül (rose) Bengal ile katkılı periyodik saçaklardan oluşan mavi faz sıvı kristal optik grating [91], izotropik kırılma indisin değiştirilmesi ile oluşan Dammann optik grating [92] elde edilmiştir. Yazar ve arkadaşları polimer faz ayrıştırma yöntemi ile mavi faz sıvı kristal optik grating yapmıştır [93].

Son zamanlarda, bazı gruplar mavi faz sıvı kristallerin Fresnel lens potansiyelini araştırmışlardır [95-98]. Lin ve arkadaşları desenli elektrotları kullanarak yüksek verimli mavi faz sıvı kristal Fresnel lens elde etmiştir [95]. Tan ve arkadaşları tarafından holografik pozlama tekniği kullanarak mavi faz sıvı kristal Fresnel lens elde edilmiştir [96]. Yazar ve arkadaşları polimer faz ayrıştırma yöntemi ile mavi faz sıvı kristal Fresnel lens yapmıştır [97,98]. Mavi faz sıvı kristaller ayrıca fotonik kristallere olan son yıllarda ilgi nedeniyle yapay fotonik bant boşluk malzemeler veya doğal fotonik kristaller için model sistemler olarak kabul edilmektedir [99,100]. Mavi faz sıvı kristaller sadece düz düzlem ekranlar için çekici değil aynı zamanda gelecek nesil esnek ekran malzemeleri için de potansiyel adaydır. Esnek

ekran teknolojisi için cam yüzeylerin üzerinde; şok direnci, ekranın hafifliği, inceliği ve film yüzeyleri gibi özellikler göz önünde bulundurulmalıdır. Geleneksel LCD ekranların ana dezavantajı, sıvı moleküllerin hizalanması için cam yüzey üzerine poliimid tabakasına ve yüksek sıcaklıkta işlem yapılmasına ihtiyaç duymasındır. Bu ısıl işlem plastik yüzeyler için uygun değildir çünkü ısıtma işlemi sırasında yapının tekdüzeliği değişebilir. Bu nedenle, hizalama gerektirmeyen mavi faz sıvı kristal, bu tür esnek görüntüleme cihazlar için çok uygundur [101]. Kimura ve arkadaşları, olietilen tereftalat yüzey üzerinde polimer ile kararlı hale gelmiş bükülebilir bir ekran etmiştir ancak fazın sıcaklık aralığı $\sim 5.2^{\circ}\text{C}$ ve çalışma voltajı ise ~ 45 V'dur [102]. Öte yandan, Castles ve arkadaşları reaktif monomerlerin yüzdesini ve UV ışığın yoğunluğunu artırarak oda sıcaklığında gerilebilir mavi faz sıvı kristal rapor etmiştir [103].

IV. SONUÇ

Mavi faz sıvı kristaller özellikle hızlı tepki süresi gerektiren ekran ve fotonik uygulamalar için aday malzemelerdir. Ancak mavi faz sıvı kristal tabanlı aygıtların ticari olarak üretilmesi için yüksek çalışma voltajı, histeresiz ve düşük optik geçirgenlik gibi çalışma parametrelerindeki kısıtlamaların üstesinden gelinmesi gerekir. Mavi faz sıvı kristallerin dar sıcaklık aralığı ($0.5-1^{\circ}\text{C}$) nano yapıları parçacıkların eklenmesi veya polimerlerle karıştırılması yoluyla çarpıcı bir şekilde geliştirilmiştir. Yeni tip elektrotlu yapının tasarlanması ile mavi faz sıvı kristalin çalışma voltajını 10 V'den düşük, geçirgenliğini % 90'den daha yüksek hale getirilmiştir [76-83]. Mavi fazın teknolojik uygulamadaki olası en iyi örneği, Samsung Electronics Co., Ltd tarafından 2008 yılında Uluslararası bilgi ekranı derneğinde (Society for Information Display, SID) prototip 15 inç mavi faz LCD ekranın sunulmasıdır [104]. Bu tür çalışmalar artıkça sözü edilen fazın olumsuz özellikleri giderilecek ve gelecekte birçok uygulaması yaygın kullanılabilir hale gelecektir.

V. KAYNAKLAR

- [1] P. G. de Gennes and J. Prost, *The Physics of Liquid Crystals*, 2. Edition. New York, USA: Oxford University Press, 1993, pp. 45-57.
- [2] K. Iam-Choon and S. T. Wu, *Optics and Nonlinear Optics of Liquid Crystals*, 1. Edition, London, UK: World Scientific Pub Co Inc., 1993, pp. 77-83.
- [3] M. Kleman and O. D. Lavrentovich, *Soft Matter Physics: An Introduction*, 2. Edition, New York, USA: Springer, 2003, pp. 127-134.
- [4] S. T. Wu and D. K. Yang, *Fundamentals of Liquid Crystal Devices*, 2. Edition, New York, USA: John Wiley & Sons, Inc, 2006, pp. 317-345.
- [5] S. Singh and D. A. Dunmur, *Liquid Crystals: Fundamentals*, 1. Edition, London, UK: World Scientific. 2002, pp. 102-119.
- [6] S. Singh, "Phase Transitions in Liquid Crystals," *Physics Reports*, vol. 234, no. 2, pp. 107-269, 2000.

- [7] S. Kumar, *Liquid Crystals. Experimental Study Of Physical Properties And Phase Transitions*, Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2001, pp. 18-45.
- [8] B. Bahadur, *Liquid Crystal: Applications and Uses*, 1. Edition, New Jersey, USA: World Scientific, 1990, pp. 7-21.
- [9] M. Michael Hird, M. Bird, and J. P. Collings, *Introduction to Liquid Crystals: Chemistry And Physics*, 1. Edition, London, UK: Crc Press, 1997, pp. 3-25.
- [10] L. M. Blinov, *Structure and Properties of Liquid Crystals*, 1. Edition, New York, USA: Springer, 2011, pp. 19-32.
- [11] S. Chandrasekhar, *Liquid Crystals*, 2. Edition, New York, USA: Cambridge University Press, 1992, pp. 2-35.
- [12] S. M. Kelly, *Flat panel displays: advanced organic materials*, 1. Edition, Cambridge, UK: Royal Society of Chemistry, 2007, pp. 21-43.
- [13] A. Saupe, "On molecular structure and physical properties of thermotropic liquid crystals," *Molecular Crystals and Liquid Crystals*, vol.7, no. 1, pp. 59-74, 1969.
- [14] R. J. Miller and H. F. Gleeson, "Order parameter measurements from the Kossel diagrams of the liquid-crystal blue phases," *Physical Review E*, vol. 52 no. 5, pp. 5011-5021, 1995.
- [15] S. Meiboom, J. P. Sethna, P. W. Anderson, and W. F. Brinkman, "Theory of the blue phase of cholesteric liquid crystals," *Physical Review Letters*, vol. 46 no. 18, pp. 1216-1219. 1981.
- [16] H. Kikuchi, "*Liquid crystalline blue phases: In Liquid crystalline functional assemblies and their supramolecular structures*, Berlin, Germany, Springer, 2007, pp. 99-117.
- [17] H. S. Kitzerow, "The Effect of Electric Fields on Blue Phase," *Molecular crystals and liquid crystals*, vol. 202, no. 1, pp. 51-83, 1991.
- [18] G. Heppke, B. Jérôme, H. S. Kitzerow, and P. Pieranski, "Electrostriction of the cholesteric blue phases BPI and BPII in mixtures with positive dielectric anisotropy," *Journal de Physique*, vol. 50, no. 19, pp. 2991-2998, 1989.
- [19] H. Stegemeyer and F. Porsch, "Electric field effect on phase transitions in liquid-crystalline blue-phase systems," *Physical Review A*, vol.30, no. 6, pp. 3369-3371, 1984.
- [20] J. Yan, M. Jiao, L. Rao and S. T. Wu, "Direct measurement of electric-field-induced birefringence in a polymer-stabilized blue-phase liquid crystal composite," *Optics express*, vol. 18, no. 11, pp. 11450-11455. 2010.
- [21] B. X. Li, V. Borshch, S. V. Shiyankovskii, S. B. Liu, and O. D. Lavrentovich, "Kerr effect at high electric field in the isotropic phase of mesogenic materials ," *Physical Review E*, vol. 92, no. 5, pp. 050501-050505, 2015.

- [22] J. Yan, H. C. Cheng, S. Gauza, Y. Li, M. Jiao, L. Rao, and S. T. Wu, "Extended Kerr effect of polymer-stabilized blue-phase liquid crystals," *Applied Physics Letters*, vol. 96, no. 7, pp. 071105-071108, 2010.
- [23] P. R. Gerber, "Electro-optical effects of a small-pitch blue-phase system," *Molecular Crystals and Liquid Crystals*, vol. 116, no. 3, pp. 197-206, 1985.
- [24] H. J. Coles and M. N. Pivnenko, "Liquid crystal 'blue phases' with a wide temperature range," *Nature*, vol. 436, no. 7053, pp. 997-1002, 2005.
- [25] F. Castles, S. M. Morris, E. M. Terentjev, and H. J. Coles, "Thermodynamically stable blue phases," *Physical review letters*, vol. 104, no. 15, pp. 157801-157808, 2010.
- [26] M. Lee, S.T. Hur, S.H. Hong, H.J. Lee, S.T. Shin, S.W. Choi, and K. Song, "Temperature-dependent behaviours of blue phase I observed for a bent-core molecular system," *Molecular Crystals and Liquid Crystals*, vol. 550, no. 1, pp. 1-6, 2011.
- [27] S. Taushanoff, K. Van Le, J. Williams, R.J. Twieg, B.K. Sadashiva, H. Takezoe, and A. Jákli, "Stable amorphous blue phase of bent-core nematic liquid crystals doped with a chiral material," *Journal of Materials Chemistry*, vol. 20, no. 28, pp. 5893-5898, 2010.
- [28] H. Ocak, B. Bilgin-Eran, M. Prehm, S. Schymura, J.P. Lagerwall, and C. Tschierske, "Effects of chain branching and chirality on liquid crystalline phases of bent-core molecules: blue phases, de Vries transitions and switching of diastereomeric states," *Soft Matter*, vol. 7, no. 18, pp. 8266-8280, 2011.
- [29] K.V. Le, S. Aya, Y. Sasaki, H. Choi, F. Araoka, K. Ema, J. Mieczkowski, A. Jakli, K. Ishikawa, and H. Takezoe, "Liquid crystalline amorphous blue phase and its large electrooptical Kerr effect," *Journal of Materials Chemistry*, vol. 21, no. 9, pp. 2855-2857, 2011.
- [30] J. Thisayukta, H. Niwano, H. Takezoe, and J. Watanabe, "Enhancement of twisting power in the chiral nematic phase by introducing achiral banana-shaped molecules," *Journal of the American Chemical Society*, vol. 124, no. 13, pp. 3354-3358, 2002.
- [31] M. Nakata, Y. Takanishi, J. Watanabe, and H. Takezoe, "Blue phases induced by doping chiral nematic liquid crystals with nonchiral molecules," *Physical Review E*, vol. 68, no. 4, pp. 041710-041718, 2003.
- [32] Z. Zheng, D. Shen, and P. Huang, "Wide blue phase range of chiral nematic liquid crystal doped with bent-shaped molecules," *New Journal of Physics*, vol. 12, no.11, pp. 113018-113027, 2010.
- [33] Z. Zheng, D. Shen, and P. Huang, "The liquid crystal blue phase induced by bent-shaped molecules with different terminal chain lengths," *New Journal of Physics*, vol. 13 no. 6, pp. 063037-063042, 2011.

- [34] H. Wang, Z. Zheng, and D. Shen, "Blue phase liquid crystals induced by bent-shaped molecules based on 1, 3, 4-oxadiazole derivatives," *Liquid Crystals*, vol. 39, no. 1, pp. 99-103, 2012.
- [35] G. Zhu, X. W. Lin, W. Hu, Z. G. Zheng, H. F. Wang, H. Q. Cui, D. Shen, and Y. Q. Lu, "Liquid crystal blue phase induced by bent-shaped molecules with allylic end groups," *Optical Materials Express*, vol. 1, no. 8, pp. 1478-1483, 2011.
- [36] W. Q. Yang, G. Q. Cai, Z. Liu, X. Q. Wang, W. Feng, Y. Feng, D. Shen and Z. G. Zheng, "Room temperature stable helical blue phase enabled by a photo-polymerizable bent-shaped material," *Journal of Materials Chemistry C*, vol. 5, no. 3, pp. 690-696, 2017.
- [37] A. Yoshizawa, Y. Kogawa, K. Kobayashi, Y. Takanishi, and J. Yamamoto, "A binaphthyl derivative with a wide temperature range of a blue phase," *Journal of Materials Chemistry*, vol. 19, no. 32, pp. 5759-5764, 2009.
- [38] A. Yoshizawa, M. Sato, and J. Rokunohe, "A blue phase observed for a novel chiral compound possessing molecular biaxiality," *Journal of Materials Chemistry*, vol. 15, no. 32, pp. 3285-3290, 2005.
- [39] Z. G. Shen, D. Zheng, and P. Huang, "Wide blue phase range of chiral nematic liquid crystal doped with bent-shaped molecules," *New Journal of Physics*, vol. 12, no.11, pp. 113018-113024, 2010.
- [40] Z. Zheng, D. Shen, and P. Huang, "The liquid crystal blue phase induced by bent-shaped molecules with different terminal chain lengths," *New Journal of Physics*, vol. 13, no. 6, pp. 063037-063045, 2011.
- [41] M. A. Bates, "Bent core molecules and the biaxial nematic phase. A transverse dipole widens the optimal angle," *Chemical physics letters*, vol. 437, no. 4, pp. 189-192, 2007.
- [42] M. Nakata, Y. J. Watanabe Takanishi, and H. Takezoe, "Blue phases induced by doping chiral nematic liquid crystals with nonchiral molecules," *Physical Review E*, vol.68, no. 4, pp. 041710-041718, 2003.
- [43] A. C. Chanishvili, G. G. Petriashvili, and P. J. Collings, "Trans-cis isomerization and the blue phases," *Physical Review E*, vol.71, no. 5, pp. 051705-051712, 2005.
- [44] A. Yoshizawa, "Molecular design for stabilizing a blue phase III and electro-optical switching in the blue phase," *Journal of the Society for Information Display*, vol.16, no. 12, pp. 1189-1194, 2008.
- [45] M. Lee, S. T. Hur, H. Higuchi, K. Song, S. W. Choi, and H. Kikuchi, "Liquid crystalline blue phase I observed for a bent-core molecule and its electro-optical performance," *Journal of Materials Chemistry*, vol. 20, no. 28, pp. 5813-5816, 2010.
- [46] C. V. Yelamaggad, I. S. Shashikala, G. D. Liao, S. Shankar, S. K. Rao, Q. Li Prasad, and A. Jakli, "Blue phase, smectic fluids, and unprecedented sequences in liquid crystal dimers," *Chemistry of materials*, vol. 18, no. 26, pp. 6100-6102, 2006.

- [47] H. Iwamochi, T. Hirose, Y. Kogawa, and A. Yoshizawa, "Chiral T-shaped semiflexible compound exhibiting a wide temperature range blue phase III," *Chemistry letters*, vol. 39, no. 3, pp. 170-171, 2010.
- [48] W. He, G. Pan, Z. Yang, D. Zhao, G. Niu, W. Huang, X. Yuan, J. Guo, H. Cao, and H. Yang, "Wide blue phase range in a hydrogen-bonded self-assembled complex of chiral fluoro-substituted benzoic acid and pyridine derivative," *Advanced Materials*, vol. 21, no. 20, pp. 2050-2053, 2009.
- [49] E. Kemiklioglu and L. C. Chien, "Effect of achiral halogen-substituted bent-core molecules on the blue phases," *Journal of Molecular Liquids*, vol. 263, pp.399-405, 2018.
- [50] L. Wang, W. He, Q. Wang, M. Yu, X. Xiao, Y. Zhang, M. Ellahi, D. Zhao, H. Yang, and L. Guo, "Polymer-stabilized nanoparticle-enriched blue phase liquid crystals," *Journal of Materials Chemistry C*, vol. 1, no. 40, pp. 6526-6531, 2013.
- [51] H. Kikuchi, M. Yokota, Y. Hisakado, H. Yang, and T. Kajiyama, "Polymer-stabilized liquid crystal blue phases," *Nature materials*, vol. 1, no. 1, pp. 64-71, 2002.
- [52] L. Rao, J. Yan, S. T. Wu, S. I. Yamamoto, and Y. Haseba, "A large Kerr constant polymer-stabilized blue phase liquid crystal," *Applied Physics Letters*, vol. 98, no. 8, pp. 081109-081115, 2011.
- [53] J. Yan and S. T. Wu, "Effect of polymer concentration and composition on blue phase liquid crystals," *Journal of Display Technology*, vol. 7, no. 9, pp. 490-493, 2011.
- [54] Y. Haseba and H. Kikuchi, "Optically isotropic chiral liquid crystals induced by polymer network and their electro-optical behavior," *Molecular Crystals and Liquid Crystals*, vol. 470, no. 1, pp. 1-9, 2007.
- [55] Y. Hisakado, H. Kikuchi, T. Nagamura, and T. Kajiyama, "Large electro-optic Kerr effect in polymer-stabilized liquid-crystalline blue phases," *Advanced Materials*, vol. 17, no. 1, pp. 96-98, 2005.
- [56] J. Yan and S. T. Wu, "Polymer-stabilized blue phase liquid crystals: a tutorial," *Optical Materials Express*, vol. 1, no. 8, pp. 1527-1535, 2011.
- [57] Y. Chen and S. T. Wu, "Recent advances in polymer-stabilized blue phase liquid crystal materials and devices," *Journal of Applied Polymer Science*, vol. 131, no. 13, pp. 122-137, 2014.
- [58] I. Dierking, W. Blenkhorn, E. Credland, W. Drake, R. Kociuruba, B. Kayser, and T. Michael, "Stabilising liquid crystalline blue phases," *Soft Matter*, vol.8, no. 16, pp. 4355-62, 2012.
- [59] E. Karatairi, B. Rožič, Z. Kutnjak, V. Tzitzios, G. Nounesis, G. Cordoyiannis, J. Thoen, C. Glorieux, and S. Kralj, "Nanoparticle-induced widening of the temperature range of liquid-crystalline blue phases," *Physical Review E*, vol. 81, no. 4, pp. 041703-041710, 2010.

- [60] M. Lavrič, G. Cordoyiannis, S. Kralj, V. Tzitzios, G. Nounesis, and Z. Kutnjak, "Effect of anisotropic MoS₂ nanoparticles on the blue phase range of a chiral liquid crystal," *Applied optics*, vol. 52, no. 22, pp. E47-E52, 2013.
- [61] H. Qi and T. Hegmann, "Impact of nanoscale particles and carbon nanotubes on current and future generations of liquid crystal displays," *Journal of Materials Chemistry*, vol. 18, no. 28, pp. 3288-3294, 2008.
- [62] H. Yoshida, Y. Tanaka, K. Kawamoto, H. Kubo, T. Tsuda, A. Fujii, S. Kuwabata, H. Kikuchi, and M. Ozaki, "Nanoparticle-stabilized cholesteric blue phases," *Applied physics express*, vol. 2, no. 12, pp. 121501-121520, 2009.
- [63] H. Yoshida, K. Kawamoto, Kubo, H. Tsuda, T. Fujii, A. S. Kuwabata, and M. Ozaki, "Nanoparticle-Dispersed Liquid Crystals Fabricated by Sputter Doping," *Advanced Materials*, vol. 22, no. 5, pp. 622-626, 2010.
- [64] J. M. Wong, J. Y. Hwang, and L. C. Chien, "Electrically reconfigurable and thermally sensitive optical properties of gold nanorods dispersed liquid crystal blue phase," *Soft Matter*, vol. 7, no. 18, pp. 7956-7959, 2011.
- [65] L. Wang, W. L. He, X. Xiao, F. G. Meng, Y. Zhang, P. Y. Yang, L. P. Wang, J. M. Xiao, H. Yang, and Y. F. Lu, "Hysteresis-free blue phase liquid-crystal-stabilized by ZnS nanoparticles," *Small*, vol. 8, no. 14, pp. 2189-2193, 2012.
- [66] L. Wang, W. He, X. Xiao, M. Wang, M. Wang, P. Yang, Z. Zhou, H. Yang, H. Yu, and Y. Lu, "Low voltage and hysteresis-free blue phase liquid crystal dispersed by ferroelectric nanoparticles," *Journal of Materials Chemistry*, vol. 22, no. 37, pp. 19629-19633, 2012.
- [67] A. Yoshizawa, "Material design for blue phase liquid crystals and their electro-optical effects," *RSC Advances*, vol. 3, no. 48, pp. 25475-25497, 2013.
- [68] S. H. C. Jeong, S. Aya Kang, F. Araoka, K. Ishikawa, and H. Takezoe, "Are chiral dopants with higher twisting power advantageous to induce wider temperature range of the blue phases?," *Liquid Crystals*, vol. 40, no. 7, pp. 951-1000, 2013.
- [69] H. F. Gleeson and H. J. Coles, "Dynamic properties of blue-phase mixtures," *Liquid Crystals*, vol. 5, no. 3, pp. 917-926, 1989.
- [70] M. Lavrič, V. Tzitzios, S. Kralj, G. Cordoyiannis, I. Lelidis, G. Nounesis, and Z. Kutnjak, "The effect of graphene on liquid-crystalline blue phases," *Applied physics letters*, vol. 103, no. 14, pp. 143116-143121, 2013.
- [71] S. Ni, H. Li, S. Li, J. Zhu, J. Tan, X. Sun, and C. C. Lo, "Low-voltage blue-phase liquid crystals with polyaniline-functionalized graphene nanosheets," *Journal of Materials Chemistry C*, vol. 2, no. 9, pp. 1730-1735, 2014.

- [72] W. Zhang, X. Wang, D. Wang, Z. Yang, H. Gao, Y. Xing, and H. Yang, "Blue phase liquid crystals affected by graphene oxide modified with aminoazobenzol group," *Liquid Crystals*, vol. 43, no. 5, pp. 573-580, 2016.
- [73] Y. Zhao, X. Qiao, K. Li, S. Ding, S. Tian, H. Ren, and Z. Miao, "Blue phase liquid crystals stabilized by graphene oxide modified with aminoalkyl group," *Molecular Crystals and Liquid Crystals*, vol. 664, no. 1, pp. 1-8, 2018.
- [74] Z. Miao, D. Wang, H. Gao, X. Wang, J. Gu, and H. Hu, "Graphene oxide modified with aminoazobenzol group stabilized blue phase liquid crystals," *Molecular Crystals and Liquid Crystals*, vol. 634, no. 1, pp. 33-40, 2016.
- [75] M. Kim, R. K. Mishra, R. Manda, G. Murali, T. H. Kim, M. H. Lee, and S. H. Lee, "Reduced graphene oxide (RGO) enriched polymer network for highly-enhanced electro-optic performance of a liquid crystalline blue phase," *RSC Advances*, vol. 7, no. 27, pp. 16650-16654, 2017.
- [76] M. Jiao, Y. Li, and S. T. Wu, "Low voltage and high transmittance blue-phase liquid crystal displays with corrugated electrodes," *Applied Physics Letters*, vol. 96, no. 1, pp. 011102-011110, 2010.
- [77] L. Rao, Z. Ge, S. T. Wu, and S. H. Lee, "Low voltage blue-phase liquid crystal displays," *Applied Physics Letters*, vol. 95, no. 23, pp. 231101-231108, 2009.
- [78] H. C. Cheng, J. Yan, T. Ishinabe, and S. T. Wu, "Vertical field switching for blue-phase liquid crystal devices", *Applied Physics Letters*, vol. 98, no. 26, pp. 261102-261109, 2011.
- [79] L. Rao, H. C. Cheng, and S. T. Wu, "Low voltage blue-phase LCDs with double-penetrating fringe fields," *Journal of Display Technology*, vol. 6, no. 8, pp. 287-289, 2010.
- [80] H. C. Cheng, J. Yan, T. Ishinabe, N. Sugiura, C. Y. Liu, T. H. Huang, and S. T. Wu, "Blue-phase liquid crystal displays with vertical field switching," *Journal of Display Technology*, vol. 8, no. 2, pp. 98-103, 2012.
- [81] L. Rao, Z. Ge, and S. T. Wu, "Viewing angle controllable displays with a blue-phase liquid crystal cell," *Optics Express*, vol. 18, no. 3, pp. 3143-3148, 2010.
- [82] Y. Huang, H. Chen, G. Tan, H. Tobata, S. I. Yamamoto, E. Okabe, and S. T. Wu, "Optimized blue-phase liquid crystal for field-sequential-color displays," *Optical Materials Express*, vol. 7, no. 2, pp. 641-650, 2017.
- [83] Y. Sun, Y. Zhao, Y. Li, P. Li and H. Ma, "Optimisation of in-plane-switching blue-phase liquid crystal display," *Liquid Crystals*, vol. 41, no. 5, pp. 717-720, 2014.
- [84] R. Dąbrowski, P. Kula, and J. Herman, "High birefringence liquid crystals," *Crystals*, vol. 3, no. 3, pp. 443-482, 2013.
- [85] W. Cao, A. Muñoz, P. Palffy-Muhoray, and B. Taheri, "Lasing in a three-dimensional photonic crystal of the liquid crystal blue phase II," *Nature materials*, vol. 1, no. 2, pp. 111-113, 2002.

- [86] S. Yokoyama, S. Mashiko, H. Kikuchi, K. Uchida, and T. Nagamura, "Laser emission from a polymer-stabilized liquid-crystalline blue phase," *Advanced materials*, vol. 18, no. 1, pp. 48-51, 2006.
- [87] J. Zhu, J. G. Lu, J. Qiang, E. Zhong, Z. Ye, Z. He, X. Guo, C. Dong, Y. Su, and H. P. D. Shieh, "Polarization-independent blue-phase liquid-crystal gratings driven by vertical electric field," *Journal of the Society for Information Display*, vol. 20, no. 6, pp. 341-346, 2012.
- [88] G. Zhu, J. N. Li, X. W. Lin, H. F. Wang, W. Hu, Z. G. Zheng, H. Q. Cui, D. Shen, and Y. Q. Lu, "1D/2D switchable grating based on field-induced polymer stabilized blue phase liquid crystal," *Journal of Applied Physics*, vol. 111, no. 3, pp. 033101-033108, 2012.
- [89] J. Yan, Q. Li, and K. Hu, "Polarization independent blue phase liquid crystal gratings based on periodic polymer slices structure," *Journal of Applied Physics*, vol. 114, no. 15, pp. 153104-153110, 2013.
- [90] J. Yan, Y. Xing, and Q. Li "Dual-period tunable phase grating using polymer stabilized blue phase liquid crystal," *Optics letters*, vol. 40, no. 19, pp. 4520-4523, 2015.
- [91] J. Yan, Y. Li, and S. T. Wu, "High-efficiency and fast-response tunable phase grating using a blue phase liquid crystal," *Optics letters*, vol. 36, no. 8, pp. 1404-1406, 2011.
- [92] Y. Li Yuan, Y. Chen, C. P., Liu, S. Rong, N. W. Li, X. Li, P. Zhou, J. Lu, R. Liu, and Y. Su, "Polymer-stabilized blue-phase liquid crystal grating cured with interfered visible light," *Optics express*, vol. 23, no. 15, pp. 20007-20013, 2015.
- [93] N. Avci and S. J. Hwang, "Electrically tunable polarisation-independent blue-phase liquid crystal binary phase grating via phase-separated composite films," *Liquid Crystals*, vol. 44, no. 10, pp. 1559-1565, 2017.
- [94] Y. T. Lin, H. C. Jau, and T. H. Lin, "Polarization-independent rapidly responding phase grating based on hybrid blue phase liquid crystal," *Journal of Applied Physics*, vol. 113, no. 6, pp. 063103-063110, 2013.
- [95] C. H. Lin, Y. Y. Wang, and C. W. Hsieh, "Polarization-independent and high-diffraction-efficiency Fresnel lenses based on blue phase liquid crystals," *Optics letters*, vol. 36, no. 4, pp. 502-504, 2011.
- [96] J. Tan, Y. Song, J. L. Zhu, S. B. Ni, Y. J. Wang, X. Y. Sun, J. G. Lu, B. R. Yang, and H. P. D. Shieh, "Blue phase LC/polymer Fresnel lens fabricated by holographics," *Journal of Display Technology*, vol. 10, no. 2, pp. 157-161, 2014.
- [97] N. Avci, Y. H. Lee, and S. J. Hwang, "Switchable polarisation-independent blue phase liquid crystal Fresnel lens based on phase-separated composite films," *Liquid Crystals*, vol. 44, no. 7, pp. 1078-1085, 2017.
- [98] Y. H. Lin, N. Avci, and S. J. Hwang, "High-diffraction-efficiency Fresnel lens based on annealed blue-phase liquid crystal-polymer composite," *Liquid Crystals*, pp. 1-8, 2019.

- [99] R. M. Hornreich, S. Shtrikman, and C. Sommers, "Photonic band gaps in body-centered-cubic structures," *Physical Review B*, vol. 49, no. 16, pp. 10914-10919, 1994.
- [100] P. Etchegoin, "Blue phases of cholesteric liquid crystals as thermotropic photonic crystals," *Physical Review E*, vol. 62, no. 1, pp. 1435-1442, 2000.
- [101] Z. Hussain, A. Masutani, D. Danner, F. Pleis, N. Hollfelder, G. Nelles, and P. Kilickiran, "Ultra fast polymer network blue phase liquid crystals," *Journal of Applied Physics*, vol. 109, no. 11, pp. 114513-114519, 2011.
- [102] M. Kimura, N. Nagumo, T. N. Oo, N. Endo, H. Kikuchi, and T. Akahane, "Single-substrate polymer-stabilized blue phase liquid crystal display," *Optical Materials Express*, vol. 3, no. 12, pp. 2086-2095, 2013.
- [103] F. Castles, S. M. Morris, J. M. C. Hung, Malik Muhammad Qasim, A. D. Wright, Shabeena Nosheen, and S. S. Choi, "Stretchable liquid-crystal blue-phase gels," *Nature materials*, vol.13, no. 8, pp. 817-822, 2014.
- [104] Samsung Electronics Co. Ltd., *SID International Symposium, Seminar and Exhibition*, Los Angeles, USA, May, 2008.