Sıvı Kristallerin Emülsiyon Damlalarının Anizotropik Lazer Kaviteleri Olarak Kullanılması

Program Kodu: 2537

Proje No: 114F253

Proje Yürütücüsü:

Yrd. Doç. Dr. Alexandr JONAS

Araştırmacı:

Prof. Dr. Alper Kiraz

Bursiyerler:

Şeyma Şükran Nayır

OCAK 2017

İSTANBUL

Önsöz

Bu raporda TÜBİTAK-ASCR tarafından desteklenen 114F253 numaralı "Sıvı Kristallerin Emülsiyon Damlalarının Anizotropik Lazer Kaviteleri Olarak Kullanılması" başlıklı araştırma projesinden elde edilen sonuçlar açıklanmaktadır.

Bu ikili işbirliği projesinde, optik tuzaklama ile tuzaklanan, çözünmenin olmadığı bir konak sıvısında bulunan ve boya molekülü katkılı sıvı kristal emülsiyon mikrodamlaları ile minyatür lazer kaynakları geliştirilmiş ve bu kaynakların özellikleri incelenmiştir. Sıvı kristal emülsiyon mikrodamlalarının emisyon spektrumlarının ortam sıcaklığının kontrollü değiştirilmesi ve değişik genlik ve frekansta harici AC elektrik alan uygulanmasıtyla tersinir bir şekilde taranabildiği gösterilmiştir. Elde ettiğimiz sonuçlar, bu yaklaşımların mikrofluidik çipler içinde tümleştirilebilecek minyatür ve taranabilen lazer ışık kaynaklarının elde edilmesinde kullanılabileceğini göstermiştir.

Projedeki çalışmalar İstanbul Teknik Üniversitesi, Koç Üniversitesi, İstanbul Şehir Üniversitesi ve Bilimsel Aygıtlar Enstitüsü, Brno Çek Cumhuriyeti'ndeki proje ekibi tarafından gerçekleştirilmiştir. Proje ekibi Türkiye'de Yrd. Doç. Dr. Alexandr Jonáš, Prof. Dr. Alper Kiraz ve bursiyer Şeyma Şükran Nayır ile Çek Cumhuriyeti'nde Prof. Dr. Pavel Zemánek, Dr. Oto Brzobohatý, Dr. Jan Ježek ve Dr. Zdeněk Pilát'tan oluşmuştur.

İçindekiler

1 Giriş 12

2 Literatür Özeti ve Projenin Amacı 14

2.1 Sıvı Mikrodamla Temelli Optofluidik Kovuklar 14

2.2 Sıvı Mikrodamlaların Optik Olarak Tuzaklanması 17

2.3 Projenin Amacı 19

3 Spektral Tarama Deneylerinde Kullanılan Sıvı Kristal Emülsiyonlarının Karakterizasyonu 20

4 Spektral Tarama Deneyleri İçin Örnek Odacığının Tasarımı ve Üretimi 24

4.1 SK Emülsiyon Sıcaklığının Kontrollü Değiştirilmesi İçin Geliştirilen Isıtmalı Mikrofluidik Çip 24

4.2 İncelenen Mikrodamlalara Harici Elektrik Alan Uygulanması İçin Geliştirilen Kapiler Tüp Temelli Örnek Odacığı 25

4.3 Sabit Ortam Sıcaklığında İncelenen Mikrodamlaya Harici Elektrik Alan Uygulanması için Geliştirilen Aktif Sıcaklık Kontrollü Kapiler Tüp Temelli Örnek Odacığı 26

4.4 İncelenen Mikrodamlalara Elektrik Alan Uygulanması İçin Geliştirilen ITO Kaplamalı Lamel Temelli Örnek Odacığı 27

4.5 İncelenen Mikrodamlaya Harici Elektrik Alan Uygulamak için Geliştirilen Sıvı Elektrodlara Sahip Mikrofluidik Çip 28

4.6 Çift Hüzmeli Optik Tuzakta Hapsolmuş Mikrodamlalarla Spektral Tarama Deneyleri İçin Kullanılan Kapiler Tüp Temelli Örnek Odacığı 29

5 Sıvı Kristal Emülsiyon Mikrodamlalarının Işıma Spektrumlarının Emülsiyon Sıcaklığının Kontrolü İle Taranması 31

5.1 Radyal SK Fazdan İzotropik SK Faza Tersinir Bir Şekilde Geçişin Sonucu Olarak SK Emülsiyon Mikrodamlalarının Işıma Spektrumlarının Taranması 31

5.2 Sıcaklık Değişimi ile İzotropik Emülsiyon Mikrodamlalarının Işıma Spektrumlarının Taranması 35

5.3 Çift Hüzmeli Bir Optik Tuzak İle Hapsedilmiş SK Emülsiyon Mikrodamlalarının Sıcaklık Kaynaklı Spektral Taraması 38

6 Sıvı Kristallerin Emülsiyon Mikrodamlalarının Işıma Spektrumlarının Harici Elektrik Alan İle Taranması 40

6.1 Katı-Hal Elektrod Sistemlerinin Kullanımıyla FGM Spektrumlarının Elektrik Alana Bağlı Taranması 40

6.2 Sıvı Elektrod Sistemi ile FGM Spektrumlarının Elektrik Alana Bağlı Taranması 44

7 Tuzaklama Lazer Hüzmesinin Polarizasyonunun Kontrol Edilmesiyle SK Emülsiyon Mikrodamlalarının Işıma Spektrumlarının Taranması 49

8 Sonuç 55

9 Kaynakça 56

Şekiller Listesi

Şekil 2-1: Küresel bir rezonatörün FGM'leri. (a) Geometrik optik gösterimi (b) Dalga optiği gösterimi. (c) Boya molekülü katkılı bir su mikrodamlasının örnek FGM spektrumu. Rezonansa $n\lambda = 2\pi a n_i$ (n – mod sayısı) eşitliğinin sağlandığı dalgaboylarında (λ) ulaşılır. 15

Şekil 2-2: Mikrodamla geometrisinde nematik SK fazının moleküler direktörünün iki temel düzenlenmesi (arrangements). (a) Direktörün radyal düzenlenmesi: şematik gösterim ve polarizasyon mikroskobu görüntüsü. (b) Direktörün bipolar düzenlenmesi: şematik gösterim ve polarizasyon mikroskobu görüntüsü. 16

Şekil 2-3: Kiral bir mikrodamlada SK moleküllerinin düzenlenmesi. SK molekülleri yüzeye parallel şekilde bulunurlar. (Humar 2010) referansından alıntıdır. 16

Şekil 2-4: Tek hüzme ile optik tuzaklama (optik cımbızlama) için kullanılan deneysel geometri. 17

Şekil 2-5: Çift hüzmeli optik tuzaklama için kullanılan deneysel geometri (optik esnetici). Ters yönde ilerleyen tuzaklama lazer hüzmeleri ortak bir eksen boyunca hizalanır. 18

Şekil 3-1: Darbeli bir lazer ile değişik boya katkılı SK emülsiyon mikrodamlalarından kaydedilen ışıma spektrumları. (a) 5CB + Nile Red + 4 mM SDS; (b) 5CB + Nile Red + 0.7 mM SDS; (c) 5CB + Nile Red + > 1200 mg/L Triton X100; (d) 5CB + Nile Red + 300 mg/L Triton X100; (e) PCBN + Nile Red + 1200 mg/L Triton X100; (f) 7CB + Nile Red + 1200 mg/L Triton X100. Küçük resimler değişik emülsiyon sistemlerinde polarizasyon mikroskopisi ile kaydedilen mikrodamla görüntülerini göstermektedir. Öçlekler: 10 μm. 22

Şekil 3-2: Sıvı kristallerin emülsiyon mikrodamlalarının optik spektroskopisi için kullanılan deney düzeneği. Küçük resim optik cımbızlama ile tuzaklanmış ve pompa hüzmesi ile pompalanan bir mikrodamlanın detayını göstermektedir. D1, D2: çift renkli aynalar, F: bant-geçiren filtre, FM: katlanabilen ayna, L1, L2: mercekler, M: ayna, PBS: polarize hüzme ayracı, ve WP: yarım dalga plakası. 23

Şekil 4-1: Spektroskopik deneylerde sıvı kristal emülsiyonlarının kontrollü bir şekilde ısıtılması için kullanılan mikrofluidik çip prototipi. 24

Şekil 4-2: Sıvı kristallerin emülsiyon mikrodamlalarına harici elektrik alan uygulanması için geliştirilen kapiler tüp temelli örnek odacığı. (sol) Örnek odacığının şematiği. (sağ) Örnek odacığının üretildikten sonraki hali..... 25

Şekil 4-3: Aktif sıcaklık kontrolü ile SK emülsiyon mikrodamlalarına harici elektrik alan uygulamak içingeliştirilenkapiler tüp temelli örnekodacığı. (sol) Harici soğutma kanalı içeren ısı eşanjörünün şematik gösterimi. (sağ) Örnek odacığının gerçeklendikten sonraki fotoğrafı. 26

Şekil 4-4: Sıvı kristal emülsiyon mikrodamlalarına harici elektrik alan uygulamak için geliştirilen ITO kaplamalı mikroskop lamelleri temelli örnek odacığı. 27

Şekil 4-5: Optik olarak tuzaklanmış SK mikrodamlalarına harici elektrik alan uygulamak için geliştirilen sıvı elektrodlara sahip mikrofluidik çip. (a) Çipin şematik gösterimi. (b) Üretilen çipin detaylı görünümü. Bu görünüm (a)'da sarı dikdörtgen ile gösterilen kısmın görünümüdür. (c) Elde edilen çipin tümünün görünümü. 28

Şekil 4-6: SK emülsiyon mikrodamlalarının çift hüzmeli optik tuzak ile hapsolması için kullanılan kapiler tüp temelli örnek odacığı. (sol) Örnek odacığının şematiği ve deneysel düzeneğin optik illüstrasyonu, (sağ) Örnek odacığı ve deneysel sistemin gerçeklenmiş halinin detaylarını gösteren fotoğraf. 30

Şekil 5-1: Kontrollü sıcaklık değişimleri ile bir SK mikrodamlanın ışıma spektrumunun taranması. 32

Şekil 5-2: SK emülsiyon mikrodamlalarının ışıma spektrumunda kontrollü sıcaklık değişimleri ile elde edilen tarama döngüleri. Sarı yatay çizgiler Şekil 5-1'de gösterilen SK mikrodamla ışıma spektrumlarına karşılık gelmektedir. 33

Şekil 5-3: Optik olarak tuzaklanmış bir SK mikrodamlasının tersinir faz geçişi boyunca kaydedilmiş FGM spektrumları. SK mikrodamla radyal fazdan izotropik faza optik tuzaklama gücünün değişimiyle tersinir bir şekilde geçmektedir. 1-108 numaralı kayıtlar (frame) arasında tuzaklama gücü arttırılırken, 109-216 numaralı kayıtlar arasında tuzaklama gücü azaltılmıştır. Sarı çizgilerle belirtilen zamanlardaki mikrodamla spektrumları Şekil 5-4'te gösterilmektedir. Düz ve kesik çizgili oklar değişik radyal dereceye *n* sahip FGM'lerin spektral kaymalarını belirtir..... 33

Şekil 5-4: Sıcaklık temelli faz geçişi sırasında optik olarak tuzaklanan bir SK mikrodamlasından kaydedilen FGM spektrumları. Mikrodamla tuzaklama gücünün değiştirilmesiyle önce radyal SK fazında bulunuyor (a), daha sonra eriyerek izotropik faza geçiyor (b), ve sonra radyal SK faza geri dönüyor (c). Küçük resimler polarizasyon mikroskopisi kullanılarak elde edilen SK mikrodamla görüntülerini göstermektedir. 34

Şekil 5-5: Tuzaklama lazer gücünün değiştirilmesiyle optik olarak tuzaklanmış izotropik SK emülsiyon mikrodamlalarının ışıma spektrumlarının taranması. (a) Spektral tarama deneylerinde kullanılan deney düzeneğinin şematiği. Tuzaklama lazer ışığının soğurumu örnek odacığını oluşturan ITO-kaplamalı kapilerinin üstünde ve altında ısınmış bölgeleri (hot spots) oluşturur. (b) Örnek odacığının görüntüsü. 36

Şekil 5-6: Tuzaklama lazer hüzmesinin gücünün değiştirilmesiyle bir SK mikrodamlanın ışımasının spektral olarak taranması. Bütün spektrumlar için iki tam güc değiştirme döngüsü gerçekleştirilmiştir. Herbir döngüde tuzaklama hüzme gücü 240 mW'tan 720 mW'a periyodik olarak 10 adımda değiştirilmiştir. Adımlar arası bekleme süresi (dwell time) (a) τ = 3000 ms; (b) τ = 5000 ms; (c) τ = 7000 ms; (d) τ = 10000 ms olarak seçilmiştir. 37

Şekil 5-7: Tuzaklama lazer hüzmerinin gücünün değiştirilmesiyle SK mikrodamla ışımasının spektral taraması. Her iki spektrumda da iki tam güç modülasyon döngüsü gerçekleştirilmiştir. Bu döngülerde tuzaklama gücü mikroskobun girişinde 1200 mW ile 2400 mW arasında 10 adımda periyodik olarak değiştirilmiştir. Deneylerde bekleme süresi (dwell time) olarak (a) τ = 7000 ms ve (b) τ = 10000 ms kullanılmıştır. 38

Şekil 5-8: Çift hüzmeli optik tuzak ile hapsedilmiş bir radyal SK emülsiyon mikrodamlasının (çap ~11.5 μm) tuzaklama lzer gücünün modülasyonu sonucu sıcaklık ile spektral taraması. Küçük resim mikrodamlanın polarizasyon mikroskobu görüntüsünü gösterir. 39

Şekil 6-1: SK moleküler direktörünün harici elektrik alan (E_{el}) ile hizalanması (a) Elektrik alan yok ike SK mikrodamla radyaz fazda bulunuyor. (b) Elektrik alan açıldığında çubuk şeklindeki SK molekülleri elektrik alan ile kısmi olarak hizalanır. Hizalanmanın miktarı uygulanan elektrik alanın genliği ve frekansı ile değişir. 40

Şekil 6-2: Bipolar SK emülsiyon mikrodamlasının (5CB + Nile Red + 300 mg/L Triton X100 su içinde) optik tuzaklama hüzmesinin polarizasyonunun değiştirilmesiyle döndürülmesi, tuzaklama hüzme gücü ~20 mW. Beyaz oklar polazirasyon yönünü belirtmektedir. Polarizasyon yönü yaklaşık 60 s'de soldan sağa doğru 180 derece döndürülmüştür. Ölçek: 10 μm. 41

Şekil 6-3: Bipolar bir SK emülsiyon mikrodamlasının (5CB + Nile Red + 300 mg/L Triton X100 su içinde) tuzaklama hüzmesi (E_{beam}) ve ITO elektrodlar arasındaki (E_{el}) elektrik alan ile döndürülmesi. (a) Deneysel geometri; (b) E_{el} = 0 için mikrodamla E_{beam} yönünde hizalanır; (c) E_{el} = E_{max} için mikrodamla E_{el} (sayfanın içine doğru) yönünde hizalanır. Ölçek: 10 μm. 42

Şekil 6-4: Farklı sıvı kristal fazlarda SK emülsiyon mikrodamlalarında elektrik-alanın yol açtığı ışıma spektrumu taraması. (a) Radyal SK mikrodalmlaları; (b) bipolar SK mikrodamlaları. Küçük resimler incelenen mikrodamlaların görüntülerini gösterir. Ölçekler: 10 μm..... 43

Şekil 6-5: Sıvı elektrodlu bir mikrofluidikçip içinde hapsolmuş bir radyal SK emülsiyon mikrodamlasının (çap ~10 μm) ışıma spektrumunun elektrik alan ile spektral taranması..... 44

Şekil 6-6: Değişik tuzaklama lazer güçlerinde tuzaklanan SK emülsiyon mikrodamlasının modüle edilmiş AC elektrik alan ile spektral taraması. (a) P_{trap} = 1.0 W, (b) P_{trap} = 4.5 W, (c) P_{trap} = 7.0 W, (d) P_{trap} = 1.0 W. Şekildeki etiketler her durum için gözlenen maksimum spektral tarama aralığını $\Delta\lambda$ verir. Mikrodamla çapı: ~12 μm. 45

Şekil 6-7: Mikrodamlaya uygulanan elektrik alan genliğinin değiştirilmesi ile optik olarak tuzaklanmı bir SK emülsiyon mikrodamlasında tersinir bir şekilde gözlenen faz geçişi. 47

Şekil 7-1: Sıvı kristal (SK) emülsiyon mikrodamlalarının ışıma spektrumlarının tuzaklama lazer hüzmesinin polarizasonunun döndürülmesile. (a) Spektral tarama deneylerinde kullanılan deney düzeneğinin. Tuzaklama lazer hüzmesinin polarizasyonu optik eksene yerleştirilen bir $\lambda/2$ plakasının döndürülmesiyle kontrol edilir. (b) ~12 μm çapında, Al-kaplamalı kapiler tüp içinde bulunan bir mikrodamladan elde edilen örnek spektral tarama eğrisi. Örnek üzerindeki tuzaklama lazeri gücü ~150 mW'dir. Tuzaklama hüzme polarizasyonu 360° boyunca sürekli döndürülmüştür. Bunun sonucu olarak fısıldayan galeri

modları (FGM'ler) ~1.2 nm'lik genlikle periyodik bir şekilde spektral olrak taranmıştır. 49

Şekil 7-2: SK emülsiyon mikrodamlalarından polarizasyon temelli spektral tarama elde edilmesi için kullanılan deney düzeneği. Tuzaklama ve uyarı hüzmelerinin polarizasyonu iki $\lambda/2$ plakası yardımıyla bağımsız olarak döndürülebilmektedir; tuzaklama hüzmesinin yolundaki $\lambda/2$ plakası bir stepper-motor ile bilgisayar ilekontrol edilebilmektedir. İki Renkli (dichroic) ayna iki hüzmenin optik mikroskoba gönderilmeden önce birleştirilmesini sağlar. 51

Şekil 7-3: SK mikrodamla ışımasında spektral taramanın değişik tuzaklama ve uyarı hüzme konfigürasyonlarında gözlenmesi. (a) Polarizasyon yönlerinin ve uyarı hüzme odak noktasının mikrodamla görüntüsündeki konumunun tanımları. Kırmızı ok: tuzaklama hüzmesinin polarizasyonu (örnekte "N/S"), yeşil ok: uyarı hüzmesinin polarizasyonu (örnekte "N/S"), yeşil nokta: uyarı hüzme odak noktasının konumu (örnekte "E"). (b) Uyarı hüzme polarizasyonu "E/W", uyarı odak noktası "S" ve tuzaklama hüzme polarizasyonunun "E/W"'den "N/S"'ye hızlı döndürüldüğü durumda kaydedilen spektral tarama eğrisi. (c) Uyarı hüzme polarizasyonu "E/W", uyarı odak noktası "S" ve tuzaklama hüzme polarizasyonunun "N/S"'den "E/W"'ye hızlı döndürüldüğü durumda kaydedilen spektral tarama eğrisi. (d) Uyarı hüzme polarizasyonu "E/W", uyarı odak noktası "E" ve tuzaklama hüzme polarizasyonunun "E/W"'den "N/S"'ye hızlı döndürüldüğü durumda kaydedilen spektral tarama eğrisi. (e) Uyarı hüzme polarizasyonu "N/S", uyarı odak noktası "E" ve tuzaklama hüzme polarizasyonunun "E/W"'den "N/S"'ye hızlı döndürüldüğü durumda kaydedilen spektral tarama eğrisi. Beyaz oklar, tuzaklama hüzmesinin polarizasyonunun ilk değiştirilmesinden sonra FGM tarama yönünü gösterir. 52

Şekil 7-4: Kapiler tüp temelli örnek odacığının değişik oryantasyonlarında polarizasyon ile FGM'lerin spektral taraması. (a) Standart oryantasyondaki örnek odacığı (kapiler tüp duvarları N/S yönüne parallel). (b) 90 derece döndürülmüş oryantasyondaki örnek odacığı (kapiler tüp duvarları E/W yönüne parallel). Beyaz oklar polarizasyon döndürülmesi sırasındaki FGM tarama yönünü belirtir. Ölçek: 20 μm. 53

Özet

Optofluidik lazer kaynakları geliştirmenin en önemli ön koşulu içlerinde uygun bir kazanç ortamı bulunduran, aktif akışkan-temelli optik resonatörlerin (kovukların) elde edilmesidir. Düşük kırınım indisli bir ortamda bulunan sıvı mikrodamlalar yüksek kaliteli optik rezonanslar olan fısıldayan galeri modlarına (FGM'lere) ev sahipliği yapan, kendiliğinden oluşan optofluidik kovuklar olarak davranırlar. Normal sıvıların aksine sıvı kristaller (SK'ler) harici elektrik alan ve ortam sıcaklığı değişimi ile kontrol edilebilen optik anizotropiler gösterirler. Bu nedenle, SK mikrodamlaları taranabilen optofluidik kovukların elde edilmesine olanak sağlar.

Bu ikili işbirliği projesinde, optik tuzaklama ile tuzaklanan, çözünmenin olmadığı bir konak sıvısında bulunan ve boya molekülü katkılı SK emülsiyon mikrodamlaları ile minyatür lazer kaynakları geliştirildi ve bu kaynakların özellikleri incelendi. Bu amaçla, birçok flöresan boya katkılı SK'ler ile konak sıvı-sürfaktan sistemi incelendi. İncelenen optik olarak tuzaklanmış (tek hüzmeli veya çift hüzmeli optik tuzak ile) SK emülsiyon mikrodamlalarının optik özelliklerinin harici etkenlerle (sıcaklık değişimi, AC elektrik alan) değiştirilmesine olanak sağlayan birçok yeni örnek odacığı tasarlandı ve üretildi. Ortam sıcaklığının kontrollü değiştirilmesiyle SK mikrodamlasında elde edilen faz geçişi sonucu FGM spektrumlarının hemen hemen tümüyle tersinir bir şekilde taranabildiği gösterildi. Efektif kırınım indesinin uzaysal profilinin değişik genlik ve frekansta AC elektrik alan ile değiştirilmesi sonucu SK mikrodamlaların FGM'lerinin spektral taraması gösterildi. Elde ettiğimiz sonuçlar, bu yaklaşımların mikrofluidik çipler içinde tümleştirilebilecek minyatür ve taranabilen lazer ışık kaynaklarının elde edilmesinde kullanılabileceğini göstermektedir.

Bu projede elde edilen sonuçlar değişik uluslararası konferanslarda sunuldu. Projede elde edilen en önemli sonuçların açıklandığı bir uluslararası dergi yayını halen hazırlanma aşamasındadır.

Anahtar Kelimeler

Optofluidik, sıvı kristaller, sürfaktanlar, emülsiyon mikrodamlaları, flöresan boya molekülleri, fısıldayan galeri modları, tümleşik taranabilen boya lazerleri, optik tuzaklama, ışık polarizasyon kontrolü, mikrofluidik çip, sıcaklığa bağlı tarama ve faz geçişleri, elektrik alana bağlı tarama

Abstract

Active fluid-based optical resonators (cavities) containing a suitable gain medium are a prerequisite for developing on-chip integrated optofluidic sources of laser light. Liquid microdroplets suspended in a low-refractive index environment act as self-assembled optofluidic cavities hosting high-quality optical resonances - whispering gallery modes (WGMs). Liquid crystals (LC) – in contrast to ordinary liquids - show optical anisotropy that can be controlled externally by electric field or changes of the ambient temperature. Thus, LC droplets are attractive for implementing tunable optofluidic cavities.

In our collaborative research project, we have developed and characterized miniature sources of laser light based on dye-doped emulsion LC droplets suspended in an immiscible aqueous environment and confined spatially in an optical trap. To this end, we have explored various combinations of fluorescently dyed LCs and host liquid – surfactant systems. We have designed and manufactured several novel sample chambers that allow adjusting the optical properties of the studied LC emulsion droplets by external stimuli (temperature changes, AC electric field) in parallel with optical trapping of LC droplets in a single- or dual-beam optical trap. We have shown that the WGM emission spectrum of an LC droplet-based resonator can be largely and (almost) reversibly tuned by controlled changes of the ambient temperature that induce phase transitions in the LC droplets. We have also demonstrated the possibility of tuning WGMs of LC droplet cavities by modifying the spatial profile of the effective refractive index of the cavity via external AC electric field of varied magnitude and frequency. Our results indicate feasibility of these approaches for creating miniature tunable sources of coherent light that can be integrated into microfluidic chips.

The results obtained within the project have been presented at several international conferences. An article summarizing the most significant results of the project is currently in preparation.

Keywords

Optofluidics, liquid crystals, surfactants, emulsion microdroplets, fluorescent dyes, whispering gallery modes, integrated tunable dye lasers, optical trapping, light polarization control, microfluidic chips, temperature-induced tuning and phase transitions, electric field-induced tuning.

1 Giriş

Bu projenin temel bilimsel hedeflerini sıvı kristallerin (SK'lerin) emülsiyon mikrodalalarının yüksek kaliteli optik rezonanslar olan fısıldayan galeri modları (FGM'ler) bulunduran optofluidik kovuklar olarak geliştirilmesi ve bu kovukları kullanan minyatür boya lazerlerinin spektral tarama özeeliklerinin incelenmesi oluşturdu. Flöresan katkılı SK emülsiyonlarının sulu ortamda stabil olarak hazırlanmasını sağlayan uygun malzeme kombinasyonlarının belirlenmesi ve optik olarak tuzaklanmış SK emülsiyon mikrodamlalarının optik spektroskopik incelenmeisne izin veren örnek odacıklarının tasarlanmasından sonra aşağıdaki mekanizmalarla mikrodamla FGM emisyon spektrumunun taranmasına yol açabilecek incelendi:

1) Tüm örnek odacığının ortam sıcaklığının değişmesi.
2) Optik tuzaklama için kullanılan lazer gücünün değiştirilmesiyole SK mikrodamlasının sıcaklığında local değişiklik elde edilmesi.
3) İncelenen mikrodamlaya göre tuzaklama lazer hüzmesinin doğrusal polarizasyon yöneliminin değiştirilmesi.
4) İncelenen mikrodamlaya değişik genlik ve frekansta AC elektrik alan uygulanması.

SK mikrodamla sıcaklığının global veya lokal kontrolüyle gerçekleştirilen deneylerde mikrodamlalarda oluşturulan faz geçişleriyle FGM spektrumlarının değişiminin yüksek bir korelasyonla elde edildiği gösterildi. Buna mikrodamla erimesi veya kristalizasyonu ile kırınım indisi uzaysal profilinin değişimi neden oldu. Yeterince küçük sıcaklık değişimlerinde mikrodamlalar aynı fazda kaldı (sıvı kristal veya izotropik faz) ve bu durumda da FGM poziasyonlarının tersinin kayması gözlendi.

FGM spektral taramalarının tuzaklama lazerinin polarizayon yönelimi ile değişimi üzerine yapılan detaylı incelemeler sonucu bu taramaların termal nedenlerden kaynaklandığı ve tuzaklama hüzmesinjin elektrik alanı ile mikrodamlanın içindeki SK moleküllerinin etkileşmesinden kaynaklanmadığı anlaşıldı. Bunun sonucu olarak, yukarıki paragprafta açıklanan sıcaklık ilişkili tarama durumunun bu durumda da uygulanabileceği anlaşıldı.

İncelenen SK mikrodamlalarına harici AC elektrik alan uygulamalarının değişik kristal fazlarda değişik sonuçlar verdiği gözlendi. Bipolar SK mikrodamlaları bir bütün olarak dönüp uygulanan elektrik alan yöneliminde yönelirken izotropik SK mikrodamlalarının küresel simetrisinin bozulduğu gözlendi. Her iki durumda da elektrik alan ile etkileşim sonucu FGM'lerin tersinir bir şekilde spektral taraması elde edildi.

Bu proje süresince (24 ay) elde edilen sonuçlar SK mikrodamlalarıyla mikrofluidik çipler içinde tümleştirilebilecek minyatür lazer ışık kaynaklarının geliştirilmesinin mümkün olduğunu göstermiştir. Elde edilen sonuçlar birçok uluslararası konferansta sunulmuştur ve bu oknferansların kitapçıklarındaki yayınlar 2017 yılında basılmış olacaktır. Projede elde edilen yeni ve önemli sonuçların özetlendiği bir makale halen hazırlanmaktadır. Bu makalenin yüksek etki faktörlü bir dergiye (örneğin Lab on a Chip, ACS Photonics) sunulması planlanmaktadır.

Bu proje sonuç raporu projedeki tüm etkinlikleri ve elde edilen sonuçları içermektedir. Raporun aşağıda sıralanan altbaşlıkları ilerleyen bölümlerde detaylandırılmıştır:

a) Literatür özeti ve projenin amacının açıklanması (Bölüm 2),

b) Spektral tarama deneylerinde kullanılan SK emülsiyonlarının karakterizasyonu açıklanması (Bölüm 3),

c) Optik olarak tuzaklanmış SK emülsiyon mikrodamlalarının spektral taranmasında kullanılan değişik örnek odacıklarının tasarımlarının ve üretimlerinin açıklanması (Bölüm 4),

d) Sıvı kristal emülsiyon mikrodamlalarının ışıma spektrumlarının emülsiyon sıcaklığının kontrolü ile taranmasının açıklanması (Bölüm 5)

e) Sıvı kristallerin emülsiyon mikrodamlalarının ışıma spektrumlarının harici elektrik alan ile taranmasının açıklanması (Bölüm 6)

f) Tuzaklama lazer hüzmesinin polarizasyonunun kontrol edilmesiyle sıvı kristal emülsiyon mikrodamlalarının ışıma spektrumlarının taranmasının açıklanması (Bölüm 7)

g) Sonuç (Bölüm 8)

h) Kaynakça (Bölüm 9)

2 Literatür Özeti ve Projenin Amacı

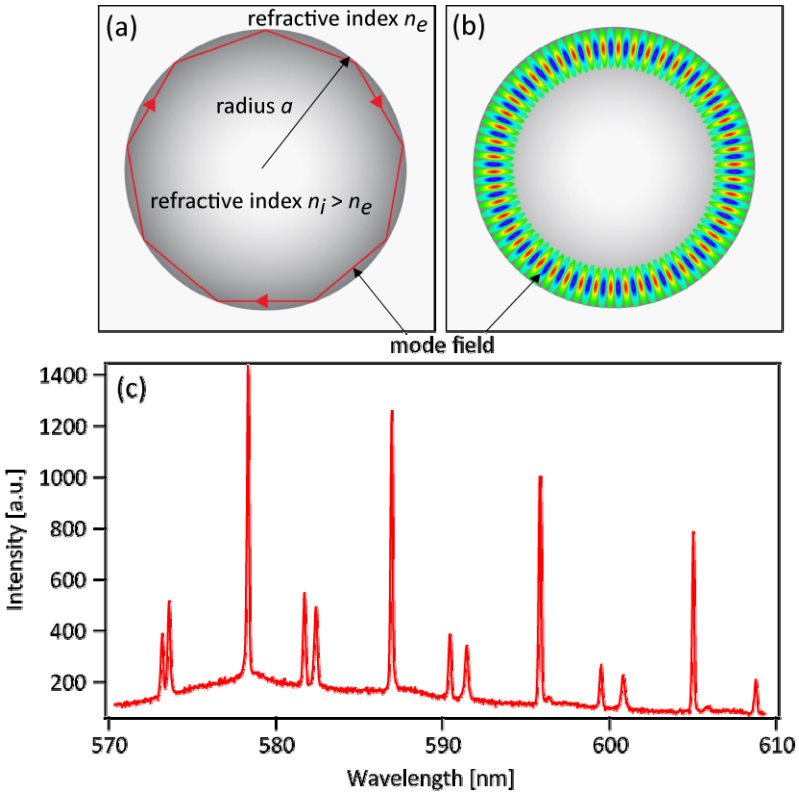
2.1 Sıvı Mikrodamla Temelli Optofluidik Kovuklar

Optofluidik araştırma alanı akışkanların kullanımıyla katı malzeme temelli uygulamalarda ulaşılamayan yeni tümleşik optik ve fotonik sistemlerin elde edilmesine olanak tanır. Bu alan, akışkanların şekillendirilmesinin kolaylığını onların değişik oranlarda karıştırılmasıyla değişik kırınım indislerini elde etmenin kolaylığını birleştirir (Squires and Quake 2005). Ayrıca, akışkanlar moleküller ve hücreler için doğal taşıma ortamlarını oluştururlar, bu nedenle kompak çip-içinde-lab analitik ve hazırlayıcı (preparative) optofluidik sistemlerinin çok işlevli yapısal ve bileşimsel elemanlarınu oluştururlar (Monat *et al.* 2007; Fan and White 2011).

Optik rezonatörler tümleşik optofluidik sistemlerin en önemli komponentlerindendir. Optik kovuklar ışık dalgalarını çok hassas olarak belirlenmiş frekanslarda elektromanyetil rezonan modlar olarak saklayabilirler. Gelen ışığın frekansına göre kovuğun gösterdiği cevabın çok hassas bir şekilde değişmesi, optik kovuklarla tasarlanan ekleme-çıkarma filtreleri, anahtarlar veya zayıflatıcılar (attenuators) gibi optik aygıtların temelini oluşturur (Vahala 2003). Bunun yanında rezonansdaki optik modlar, kovuk içinde yüksek ışık genliklerinin saklanmasına neden olur. Bu sayede elde edilen güçlü ışık-madde bağlaşması doğrusal olmayan optik etkilerin rezonan olmayan koşullara göre çok daha küçük eşik güçlerinde ulaşılmasına neden olur. Bunun sonucu olarak, kazanç ortamı barındıran, aktif, akışkan temelli optik kovuklar optofluidik lazer ışık kaynaklarının oluşturulmasında kullanılır (Azzouz *et al*. 2006; Kiraz *et al.* 2007). Sıvının yüzey geriliminin sonucu olarak elde edilen küresel geometriye sahip ve pürüssüz yüzeyli sıvı mikrodamlalar, ortamın kırınım indisi (n_e) mikrodamla kırınım indisinden (n_i) küçük olduğu durumda cazip, kendiliğinden oluşan, fısıldayan galeri modlarına (FGM'lere) evsahipliği yapan optofluidik kovuklar olarak ortaya çıkar (bakınız Şekil 2-1). Tümüyle içten yansıma ile mikrodamla yüzeyine çok yakın yerlerde bulunan bu optik rezonanslar 10^8 mertebesinde kalite faktörlerine sahip olur ve böylece lazer ışımasının gözlenmesini sağlar (Qian *et al.*1986; Righini *et al.* 2011).

Sıvı kristaller (SK'ler) asimetrik çubuksu yapılı moleküllerinden dolayı anizotropik iç yapılara sahiptir ve karmaşık akışkanlar içinde özel bir sınıfı oluşturur. SK'ler katılarda gözlendiği gibi çeşitli derecelerde uzun mesafeli kristal

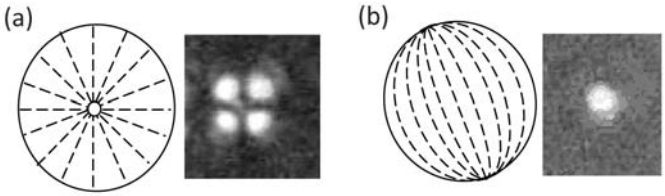
düzenlenme gösterebilirler (bakınız Şekil 2-2) (Musevic 2013). Bunların yanında, SK'ler akışkan özelliklerini korurlar ve bu sayede elektrik alan, mekanik stres veya sıcaklık değişiklikleri gibi harici etkenlere maruz bırakıldıklarında moleküler oryantasyonları kolayca değiştirilebilir. SK'lerin uzun ölçekteki moleküler organizasyonu ve moleküler ölçekteki asimetrik yapıları SK sıvıların kontrol edilebilen optik çiftkırılım (birefringence) ve polarizasyon anizotropisi göstermelerine yol açar. Optik özellikler üzerindeki bu eşsiz kontrol imkanı şu ana kadar SK temelli ekran teknolojilerinde birçok uygulama bulmuştur (Chen 2011).



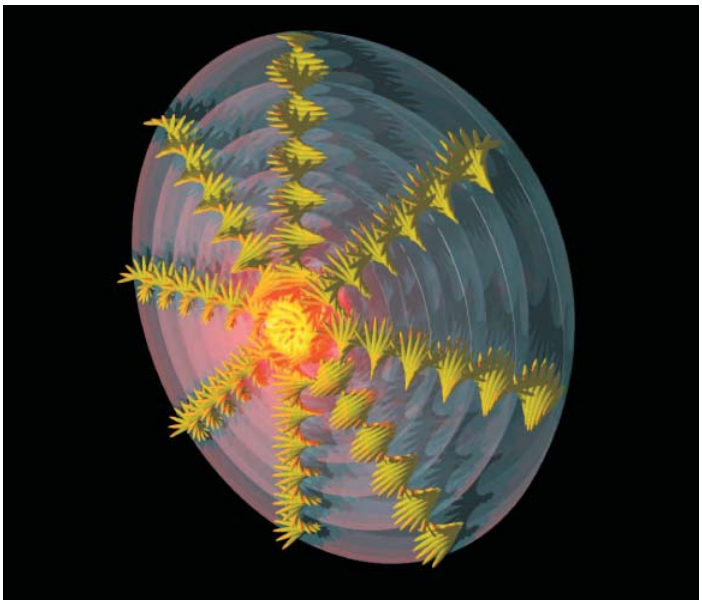
Şekil 2-1: Küresel bir rezonatörün FGM'leri. (a) Geometrik optik gösterimi (b) Dalga optiği gösterimi. (c) Boya molekülü katkılı bir su mikrodamlasının örnek FGM spektrumu. Rezonansa $n\lambda = 2\pi a n_i$ (n – mod sayısı) eşitliğinin sağlandığı dalgaboylarında (λ) ulaşılır.

Bunların yanında, bazı SK fazları uzun mesafeli moleküler organizasyonun heliks karakterinden dolayı kiral özellikler gösterirler. Bu ya SK moleküllerinin kendi kiral özelliklerinden ya da sıvıda bulunan kiral bir katkı malzemesinden kaynaklanabilir (Crawford and Zumer 1996). Anizotropik SK moleküllerinin sıvı fazdaki heliks organizasyonu periyodik modülasyonlara sebep olur ve böylece malzemede fotonik kuşak açıklığı gözlenebilir (Cipparrone *et al.* 2011) (bakınız Şekil 2-3). SK fazının ne olduğuna bağlı olarak bu fotonik kuşak açıklığı bir boyutludan üç boyutluya değişebilir ve heliks yapısının ölçeğine bağlı olarak

spectrumun görünür dalgaboyu aralığında yer alabilir. Böyle fotonik kuşak açıklığı bulunduran kiral SK malzemeler optofluidik uygulamalar içinçok caziptir. Çünkü bu malzemeler çokça taranabilen pasif ve aktik optik komponenetler ile düşük kovuk boyutlarına sahip, yüksek çıkış güçlü ve düşük eşik enerjili aynasız lazerlerin geliştirilmesine olanak sağlar (Coles and Morris 2010).



Şekil 2-2: Mikrodamla geometrisinde nematik SK fazının moleküler direktörünün iki temel düzenlenmesi (arrangements). (a) Direktörün radyal düzenlenmesi: şematik gösterim ve polarizasyon mikroskobu görüntüsü. (b) Direktörün bipolar düzenlenmesi: şematik gösterim ve polarizasyon mikroskobu görüntüsü.



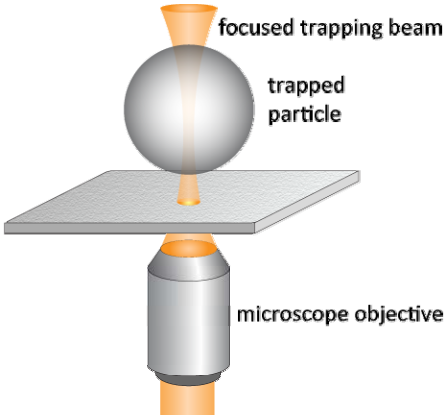
Şekil 2-3: Kiral bir mikrodamlada SK moleküllerinin düzenlenmesi. SK molekülleri yüzeye parallel şekilde bulunurlar. (Humar 2010) referansından alıntıdır.

SK mikrodamla temelli minyatür boya lazerleri daha önce Humar et al. tarafından çalışıldı. (Humar *et al.* 2009) çalışmasında yazarlar katı elastomer matrix içine gömülü boya katkılı nematik SK mikrodamlalarının harici bir AC elektrik alanı ile taranmasını gösterdiler. Daha sonra aynı grup yüzey üzerinde duran kiral kolesterik (cholesteric) emülsiyon mikrodamlalarını temel alan Bragg-tipi optik mikrokovuklarının ortamın sıcaklığı ile tersinir bir şekilde taranabildiğini

de gösterdi (Humar and Musevic 2010). Bu çalışmalar değişik SK mikrodamlalarından taranabilen mikrolazerler elde edilebileceğini göstermiş olsa da, böyle lazer kaynaklarının esnek bir şekilde manipülasyonu bu çalışmalarda gösterilmemiştir.

2.2 Sıvı Mikrodamlaların Optik Olarak Tuzaklanması

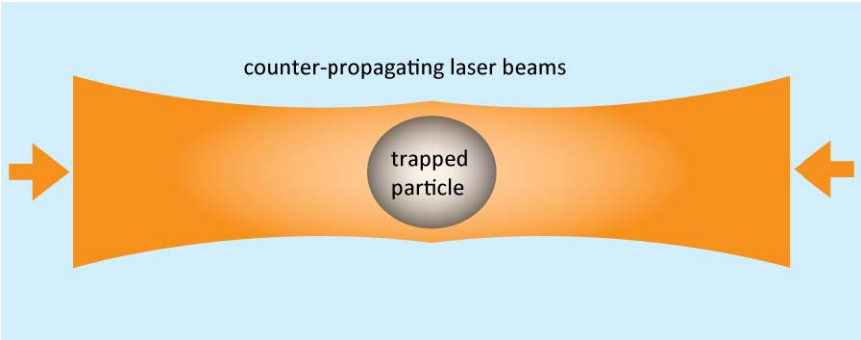
Sıvı mikrodamlalarda FGM'lerde lazer ışımasının detaylı incelemesi için mikrodamla pozisyonunun uzun süreler boyunca sabitlenmesi gerekmektedir. Su veya başka polar sıvıların aerosoller mikrodamlalarıyla çalışırken mikrodamlaların pozisyon stabilizasyonu süperhidrofobik yüzey kullanımı ile başarılabilir (Kiraz *et al.* 2007).Benzer bir yaklaşım ıslanma özellikleri değiştirilmiş (hidrofobik ve hidrofilik bölgeler barındıran) yüzeyler kullanılarak emülsiyon mikrodamlalarına da sınırlı bir şekilde uygulanabilmiştir (Ramos and Weitz 2001). Pratik uygulamalar için bir sonraki aşama lazer ışıması gösteren mikrodamlaların pozisyonunun harici mikromanipülasyon ile temassız kontrol edilmesidir. Optik tuzaklama özellikle küçük mikrodamlaların stabil bir şekilde sabitlenmesi için çok uygun olan ve havada veya sıvı ortamlarda yüksek sayıda parçacığın aynı anda manipülasyonuna izin veren bir mikromanipülasyon tekniğidir (Burnham and McGloin 2006; Aas *et al*. 2013a).



Şekil 2-4: Tek hüzme ile optik tuzaklama (optik cımbızlama) için kullanılan deneysel geometri.

Mikro ve nanoparçacıkların optik tuzaklanması için en sık kullanılan yöntem tek lazer hüzmesinin yüksek nümerik açılı bir mikroskop objektifi ile kırınımla sınırlı bir odak noktasına odaklanması ile elde edilen optik cımbızlamadır (Ashkin *et al*. 1986). Bu konfigürasyonda kendisinden daha küçük kırınım indisine sahip bir ortamda bulunan dielektrik parçacıklar en yüksek optik genliğin olduğu noktaya (odak noktasına) doğru hareket eder ve denge haline ulaşılır (bakınız

Şekil 2-4). Optik tuzaklama için gerekli kırınım indisi kontrastı parçacıktaki FGM'lerin bulunması ve uyarılması için de geçerli olduğu için, optik tuzaklama ile tuzaklanan parçacıkların aynı zamanda FGM spektroskopilerinin gerçekleştirilmesi mümkündür (Aas *et al*. 2013a; Karadag *et al.* 2013). Optik cımbızlama geometrisi optik tuzaklamada basitliği beraberinde getirir; stabil bir şekilde tuzaklama ve manipülasyon için yanlızca bir odaklanmış lazer hüzmesi yeterlidir. Buna ragmen, tuzaklama hüzmesinin yüksek derecede odaklanması lokilize ısınmayı da beraberinde getirebilir. Bu da tuzaklanan parçacığın zarar görmesine neden olabilir.



Şekil 2-5: Çift hüzmeli optik tuzaklama için kullanılan deneysel geometri (optik esnetici). Ters yönde ilerleyen tuzaklama lazer hüzmeleri ortak bir eksen boyunca hizalanır.

Optik cımbızlamaya alternative olarak, ortamdan yüksek kırınım indisine sahip dielektrik parçacıklar ters yönde ilerleyen iki lazer hüzmesi ile tuzaklanabilirler (optik esnetici geometrisi) (Guck *et al*. 2001; Aas *et al*. 2013b). Optik esnetici – veya çift hüzmeli optik tuzak – hassas bir şekilde hizalanmış ters yönde ilerleyen iki lazer hüzmesinden oluşur. Bu lazer hüzmeleri örneğin optik fiberler ile elde edilebilir (bakınız Şekil 2-5). Her iki hüzmenin enine Gausyen profillerinden dolayı yüksek kırınım indisli parçacıklar (örneğin su içindeki yağ mikrodamlaları) hüzme eksenine doğru çekilir ve bunun sonucu olarak parçacıklar optik eksen boyunca hareket edip iki hüzmenin radyasyon basınçlarının birbirini eşitlediği noktada dengeye ulaşır. Optik esneticide daha geniş lazer hüzmeleri kullanıldığı için örneğe lazer ısınması ile zarar verilmesi riski daha azdır. Bunun yanında iki tuzaklama hüzmesinin genlik profilleri uzaysal ışık modülatörleri ile dinamik olarak modifiye edilebilir. Dolayısıyla klasik bir tek hüzmeli optik tuzak ile tuzaklanamayacak daha değişik parçacıklar çift hüzmeli tuzak ile tuzaklanabilir (Cizmar *et al*. 2011). Ayrıca, optik esneticinin parçacığa uyguladığı yüzeysel stresler tuzaklanan parçacığın deformayonuna (esnetilmesine) neden olur. Bu şekilde yakın zamanda FGM emisyon spektrumunun kontrpllü bir şekilde taranması gösterilmiştir (Aas *et al*. 2013b).

2.3 Projenin Amacı

Optofluidik genç ve dinamik bir bilimsel disiplindir ve çıktıları tümleşik optik ve fotonik devreler ile kompak çip-içinde-lab analitik ve hazırlayıcı (preparative) sistemlerin tasarımı ve geliştirilmesinde benzersiz uygulamalar bulmaktadır. Optofluidik araştırmalarının önemi optofluidik ile ilgili makalelerin sayısının istikrarlı bir şekilde artışıyla da gözlenmektedir.

Optofluidik alanındaki faaliyetleri içeren bu ikili işbirliği projemiz boya molekülü katkılı sıvı kristal mikrodamlalarından minyatür taranabilen lazer ışık kaynaklarının geliştirilmesi ve karakterizasyonuna odaklanmıştır. Projenin spesifik amaçları aşağıda sıralanmaktadır:

- SK mikrodamlaları ile spektroskopik deneyler için uygun SK emülsionlarının belirlenmesi ve karakterizasyonu
- Optik olarak tuzaklanmış SK emülsiyon mikrodamlalarına kontrollü bir şekilde harici uyarıcıların (ortamı sıcaklığı, tuzaklama hüzmesinin polarizasyonu, AC elektrik alanı) uygulanması için gerekli örnekodacıklarının tasarımı ve üretimi
- Emülsiyon ortamının sıcaklığının değiştirilmesiyle optik olarak tuzaklanmış SK emülsiyon mikrodamlalarının FGM spektrumlarının taranmasının gözlenmesi ve karakterizasyonu
- Değişik genlik ve frekansta uygulanan AC elektrik alan ile optik olarak tuzaklanmış SK emülsiyon mikrodamlalarının FGM spektrumlarının taranmasının gözlenmesi ve karakterizasyonu
- Doğrusal polarizasyona sahip tuzaklama lazer hüzmesinin polarizasyon yönünün incelenen mikrodamlaya göre döndürülmesiyle optik olarak tuzaklanmış SK emülsiyon mikrodamlalarının FGM spektrumlarının taranmasının gözlenmesi ve karakterizasyonu
- FGM ışımasını tarama yöntemlerinin mikrofluidik çiplerin içine tümleştirilmesi.

3 Spektral Tarama Deneylerinde Kullanılan Sıvı Kristal Emülsiyonlarının Karakterizasyonu

Sıvı kristal (SK) ile mikrodamla temelli optofluidik mikrokovukları kullanan boya lazeri gösterimleri için uygun SK, boya molekülü, sürfaktan, ve ev sahibi sıvı kombinasyonunun belirlenmesi gereklidir. Bu kombinasyon kararlı SK emülsiyon mikrodamlalarının optik deneyler için gerekli olan belirli bir SK fazında üretilmesini sağlayacaktır. Kullanılan malzemeler için geçerli kısıtlar şöyle sıralanabilir:

- Kullanılan SK'nin ev sahibi sıvı ile karışamama özelliği deneyler sırasında elde edilen mikrodamlaların kararlı boyutlarını belirleyecektir,
- Emülsiyon mikrodamlalarında fısıldayan galeri modlarının (FGM'lerin) desteklenebilmesi için SK ile ev sahibi sıvının kırınım indisleri arasında yeterli kontrast bulunmalıdır ($n_{LC} > n_{host}$),
- Kullanılan boya molekülünün SK içinde iyi biz çözünürlüğe sahip olması gerekmektedir.

Bu kısıtlar ışığında optimum malzeme sisteminin belirlenebilmesi için aşağıdaki boya katkılı SK emülsiyonları su (n_{host} = 1.33) içinde incelenmiştir:

a) 5CB sıvı kristali (isotropik fazda kısınım indisi n_{LC} = 1.58, 640 nm'de) + Nile Red boya molekülü + 4 mM sodium dodecyl sulfate (SDS) sürfaktan. Yaklaşık 23°C oda sıcaklığında bu malzeme kombinasyonu moleküler direktörün **radyal** yönelimde (orientation) olduğu sıvı kristal emülsiyon mikrodamlaları üretmektedir (tipik bir mikrodamla görüntüsü Şekil 3-1a'da gösterilmektedir).

b) 5CB + Nile Red + 0.7 mM SDS. Yaklaşık 23°C oda sıcaklığında bu malzeme kombinasyonu moleküler direktörün **bipolar** yönelimde (orientation) olduğu sıvı kristal emülsiyon mikrodamlaları üretmektedir (tipik bir mikrodamla görüntüsü Şekil 3-1b'de gösterilmektedir).

c) 5CB + Nile Red + > 1200 mg/L Triton X100 sürfaktan. 23°C'den yüksek oda sıcaklığında bu malzeme kombinasyonu **isotropik** (**erimiş**) fazda sıvı kristal emülsiyon mikrodamlaları üretmektedir (tipik bir mikrodamla görüntüsü Şekil 3-1c'de gösterilmektedir).

d) 5CB + Nile Red + 300 mg/L Triton X100. Yaklaşık 23°C oda sıcaklığında bu malzeme kombinasyonu moleküler direktörün **bipolar** yönelimde (orientation)

olduğu sıvı kristal emülsiyon mikrodamlaları üretmektedir (tipik bir mikrodamla görüntüsü Şekil 3-1d'de gösterilmektedir).

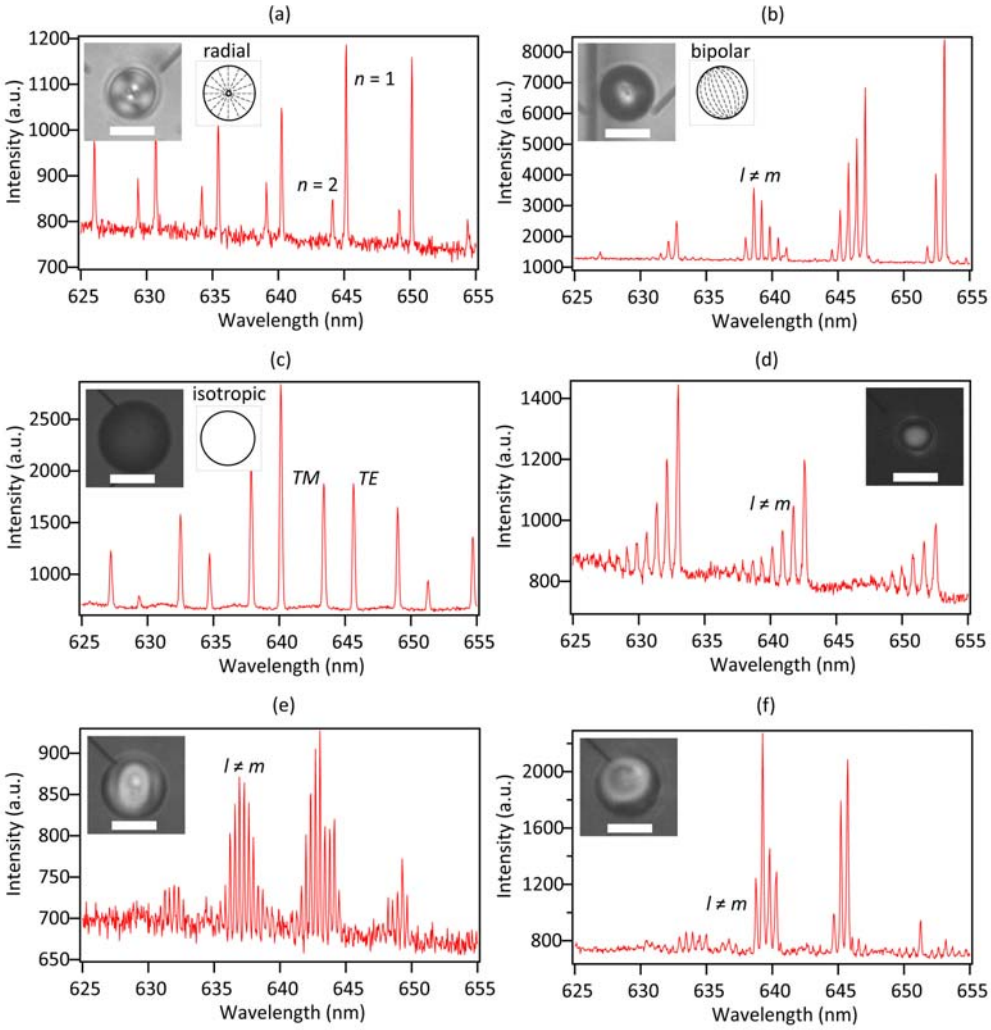
e) PCBN sıvı kristali (isotropik fazda kısınım indisi n_{LC} = 1.58, 640 nm'de) + Nile Red + 1200 mg/L Triton X100. Yaklaşık 23°C oda sıcaklığında bu malzeme kombinasyonu moleküler direktörün **bipolar** yönelimde (orientation) olduğu sıvı kristal emülsiyon mikrodamlaları üretmektedir (tipik bir mikrodamla görüntüsü Şekil 3-1e'de gösterilmektedir).

f) 7CB sıvı kristali (isotropik fazda kısınım indisi n_{LC} = 1.56, 640 nm'de) + Nile Red + 1200 mg/L Triton X100. Yaklaşık 23°C oda sıcaklığında bu malzeme kombinasyonu moleküler direktörün **bipolar** yönelimde (orientation) olduğu sıvı kristal emülsiyon mikrodamlaları üretmektedir (tipik bir mikrodamla görüntüsü Şekil 3-1f'de gösterilmektedir).

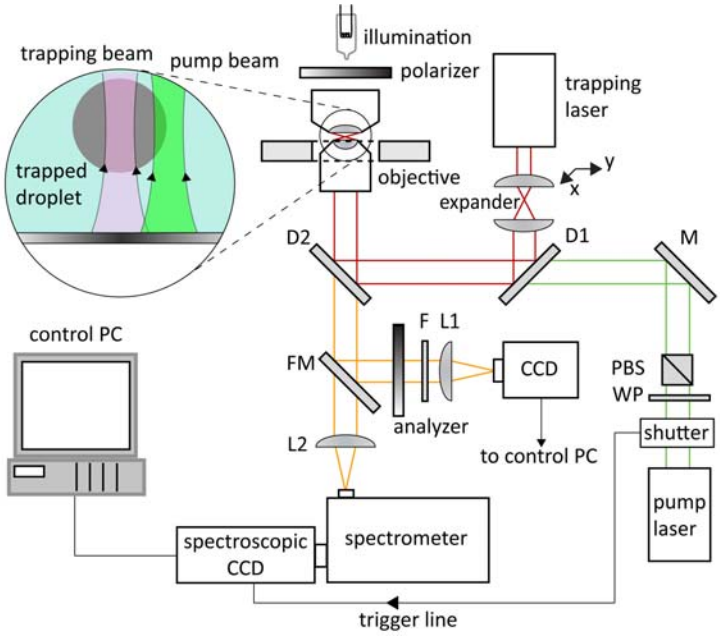
Yukarıda açıklanan a) – f) SK emülsiyonları ile kaydedilen tipik lazer ışıma spektrumları Şekil 3-1'de gösterilmektedir. Bütün spektroskopik ölçümler 23-26°C arası oda sıcaklığında, aktif sıcaklık kontrolü olmadan gerçekleştirilmiştir. İncelenen mikrodamlalar tek hüzmeli bir optik tuzak (optik cımbızlama) ile sabitlenmiştir. Optik cımbızlama CW kızılötesi bir lazerin (dalgaboyu 1064 nm) yüksek nümerik açılı bir mikroskop objektifi ile odaklanması ile elde edilmiştir (Aas 2013a) (bakınız Şekil. 3-2). Optik olarak tuzaklanmış SK mikrodamlalarından ışıma elde edilmesi için bu mikrodamlalar darbeli bir yeşil lazerin (dalgaboyu 532 nm) çepere odaklanması ile pompalanmıştır. Mikrodamlalardan yayılan ışıma optik cımbızlama için kullanılan mikroskop objektifi ile toplanıp bir spektrometrede analiz edilmiştir. İncelenen SK mikrodamlaları polarizör ve analizör barındıran bir ters mikroskop ile de görüntülenebilmektedir. Bu sayede polarizasyon mikroskopisi kullanılarak sıvı kristal fazının incelenmesi mümkün olmaktadır.

Şekil 3-1'de gösterilen mikrodamla spektrumları incelenen mikrodamlalarda SK moleküllerinin dahili uzun menzilli düzenlerinin farklılıklarını göstermektedir. SK direktörünün radyal yönelimi sonucu (Şekil 3-1a) SK mikrodamlaları tümüyle küresel simetri göstermektedir. Bunun sonucu olarak, aynı açısal kip sayısı *l*'e sahip FGM'ler aynı dalgaboyunda gözlenen yoz kipler (degenerate modes) teşkil etmiştir. SK direktörünün radyal yönelimi güçlü bir çiftkırılımı (birefringence) beraberinde getirmektedir. Bunun sonucu olarak TE polarizasyona sahip FGM'lerin (elektrik alan mikrodamla yüzeyine teğet) gördüğü sıradan (ordinary) kırınım indisi n_o ile TM polarizasyona sahip FGM'lerin (elektrik alan mikrodamla

yüzeyinin normali yönünde) gördüğü sıradışı (extraordinary) kırınım indisi n_e arasında yüksek bir fark görülmektedir. $n_o < n_e$ olduğu için ev sahibi sıvı kırınım indisi (n_{host}) ile mikrodamla kırınım indisi arasındaki kontrast TM FGM'leri için yeterli olurken TE FGM'ler için yeterli olmamaktadır. Bunun sonucu olarak spektrumda TE FGM'ler gözlenmemektedir (Humar *et al.* 2009). Mikrodamla yüzeyine en yakın şekilde dolaşan, en düşük radyal kip sayısına (n = 1) sahip TM FGM'lerin yanında, daha yüksek derece radyal kipler de (n = 2) radyal SK mikrodamlalarında bulunmaktadır. Bu daha yüksek radyal kipler genellikle n = 1 kiplerine göre daha küçük kalite faktörleri (Q-faktörleri) göstermektedir.



Şekil 3-1: Darbeli bir lazer ile değişik boya katkılı SK emülsiyon mikrodamlalarından kaydedilen ışıma spektrumları. (a) 5CB + Nile Red + 4 mM SDS; (b) 5CB + Nile Red + 0.7 mM SDS; (c) 5CB + Nile Red + > 1200 mg/L Triton X100; (d) 5CB + Nile Red + 300 mg/L Triton X100; (e) PCBN + Nile Red + 1200 mg/L Triton X100; (f) 7CB + Nile Red + 1200 mg/L Triton X100. Küçük resimler değişik emülsiyon sistemlerinde polarizasyon mikroskopisi ile kaydedilen mikrodamla görüntülerini göstermektedir. Öçlekler: 10 μm.



Şekil 3-2: Sıvı kristallerin emülsiyon mikrodamlalarının optik spektroskopisi için kullanılan deney düzeneği. Küçük resim optik cımbızlama ile tuzaklanmış ve pompa hüzmesi ile pompalanan bir mikrodamlanın detayını göstermektedir. D1, D2: çift renkli aynalar, F: bant-geçiren filtre, FM: katlanabilen ayna, L1, L2: mercekler, M: ayna, PBS: polarize hüzme ayracı, ve WP: yarım dalga plakası.

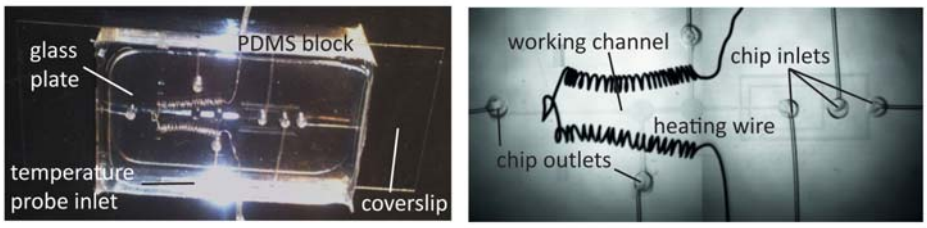
SK direktörün bipolar oryantasyonu durumunda (Şekil 3-1b, d, e, f) küresel simetri bozulmaktadır. Bunun sonucu olarak aynı açısal kip sayısı *l,* ve farklı azimutal kip sayılarına *m*, sahip kipler farklı kırınım indisi profillerini görmektedir. Dolayısıyla, Şekil 3-1a'da gözlenen FGM'lerin kip yozlaşması kalkar ve $l \neq m$ eşitsizliğini sağlayan kipler farklı dalgaboylarında gözlenir (Hossein-Zadeh and Vahala 2006). Bu şekilde kip yozlaşmasının kalkması tek spektral tepelerin yerini tepe ailelerinin alması ile gösterir.

Son olarak izotropik fazdaki mikrodamlalarda (Şekil 3-1c) SK moleküllerinin uzun menzilli düzeni tümüyle kaybolur. Bunun sonucu olarak SK mikrodamlaları normal sıvı mikrodamlalar gibi davranırlar. Bunun sonucu olarak çiftkırılım ortadan kalkar ve mikrodamla hem TM hem de TE polarizasyona sahip FGM'leri barındırabilir (Righini *et al.* 2011). Uzun menzilli düzenin kalkmasıyla mikrodamlanın küresel simetrisi sağlanır ve bunun sonucu olarak FGM'lerde kip yozlaşması gözlenir.

4 Spektral Tarama Deneyleri İçin Örnek Odacığının Tasarımı ve Üretimi

Belirli dış etkenlerle boya katkılı SK emülsiyon mikrodamlalarının spektral cevaplarının taranması çalışmaları için çeşitli örnek odacıkları tasarladık ve ürettik. Bu örnek odacıkları aşağıdaki bölümlerde açıklanmaktadır.

4.1 SK Emülsiyon Sıcaklığının Kontrollü Değiştirilmesi İçin Geliştirilen Isıtmalı Mikrofluidik Çip



Şekil 4-1: Spektroskopik deneylerde sıvı kristal emülsiyonlarının kontrollü bir şekilde ısıtılması için kullanılan mikrofluidik çip prototipi.

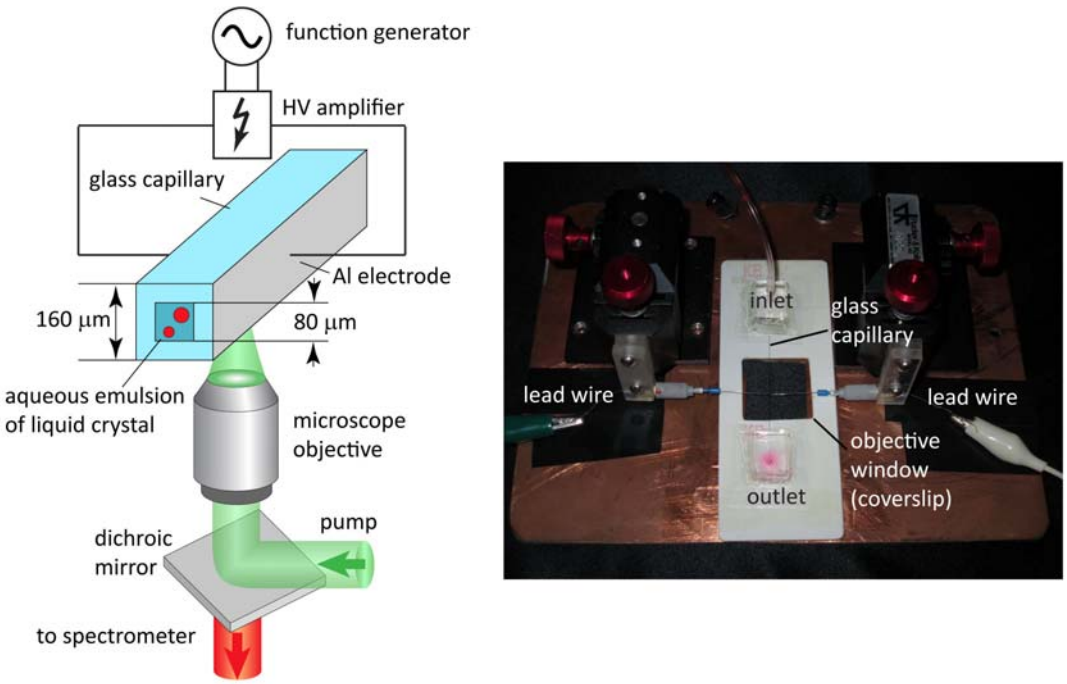
Şekil 4-1'de çalışılan sıvı kristal emülsiyonlarının sıcaklığının kontrolüne izin veren mikrofluidik çip prototipi gösterilmektedir. Bu çip PDMS bloğun içine yerleştirilmiş bir dirençli kablo bulundurur. Dirençli kablo harici bir güç kaynağına bağlıdır ve böylece güç kaynağı voltajının ayarlanması ile çipin ısıtılması mümkün olmaktadır. Çipin gerçek zamanlı sıcaklığı bir girişe yerleştirilen PT100 platünum direnç probu ile ölçülebilmektedir. İncelenen SK emülsiyonları çipin içindeki akışkan kanala (genişlik ~200 mikron, yükseklik ~50 mikron) yüklenir. Bu akışkan kanal PDMS blok ile bir lamel arasında oluşturulmuştur. Lamel ters geometrideki mikroskop ile optik erişimi sağlar ve PDMS bloğa geri dönüşümsüz bir şekilde bağlanmıştır. Çipin ısınma sırasında PDMS ve camın farklı ısıl genleşme katsayılarından dolayı bozulmasını engellemek için, PDMS blok içine bir cam plaka yerleştirilmiştir. Böylece PDMS bloğun bükülmeye karşı direnci arttırılmaktadır.

Tipik bir ısıtma deneyinde incelenen mikrodamla mikrofluidik kanal içinde optik cımbızlama ile hapsedilir (bakınız Şekil 3-2). Ara sıra kanal içinde oluşan sıvı akışları mikrodamlayı optik tuzakdan dışarı iten hidrodinamik kuvvetlere yol açabilir. Bunun önüne geçip deneylerdeki kararlılığı arttırmak için deneylerde çip girişi ve çıkışına esnek tüpler bağlanmıştır. Bu tüplerin serbest uçlarının

manipülasyonu ile kanal boyunca oluşan hidrpstatik basınç farkının sıfıra yakın tutulması ve dolayısıyla sıcı akışının önüne geçilmesi mümkün olmaktadır.

4.2 İncelenen Mikrodamlalara Harici Elektrik Alan Uygulanması İçin Geliştirilen Kapiler Tüp Temelli Örnek Odacığı

Sıvı kristal moleküllerinin yönelimi polarize olabilmelerindeki anisotropiden dolayı harici bir elektrik alan kullanılarak değiştirilebilir. Böylece optik özelliklerinde değişiklikler gözlenir. Harici bir elektrik alana maruz kaldıklarında SK moleküllerinin direktörü uygulanan elektrik alana paralel yönde yönelmeye çalışır. Bu mekanizma sıvı kristal temelli mikro ölçekli rezonatörlerin spektral profillerinin taranması için kullanılabilir (Humar *et al.* 2009).

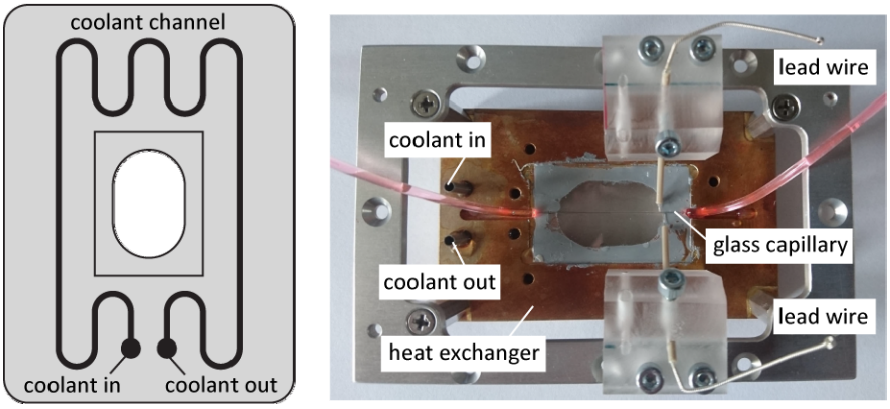


Şekil 4-2: Sıvı kristallerin emülsiyon mikrodamlalarına harici elektrik alan uygulanması için geliştirilen kapiler tüp temelli örnek odacığı. (sol) Örnek odacığının şematiği. (sağ) Örnek odacığının üretildikten sonraki hali.

Deneylerimizde sıvı kristallerin emülsiyon mikrodamlaları ile çalışıyoruz. Bu konfigürasyon katı alttaşların üzerine konumlanmış SK filmlerini içeren tipik deney düzeneğinden faklıdır. Emülsiyon akışını kontrol ederken emülsiyon mikrodamlalarına kontrollü bir şekilde harici elektrik alan verilmesi için Şekil 4-2'de gösterilen dikdörtgen kesitli cam kapiler temelli örnek odacığı kullanılmıştır.

Kapileri tübün kenarları 5 nm titanyum ve 50 nm aluminyumdan oluşan iletken kaplama ile kaplanmıştır. Bu metalik tabakalar elektrik alan uygulanması için gerekli elektrodlar olarak davranırlar. Örnek odacığına optik erişim alt duvardan gerçekleştirilir. Aydınlatma ışığı da örnek odacığının üst duvarından gönderilir. İnce duvarlı kapiler tübü mekanik zarardan korumak için tüpün altında bir lamel bulundurulur. Bu lamel yağ daldırmalı objektif çalışmaları için de gerekli arayüzey görevini üstlenir. Harici elektrik alan yan duvarları bastırılmış ince ve esnek kurşun kablolar ile uygulanır. Tipik bir deneyde belli bir genlik ve frekansda AC elektrik alan fonksiyon jeneratörü ve yüksek voltajlı yükselteç yardımıyla örneğe uygulanır (Şekil 4-2, sol).

4.3 Sabit Ortam Sıcaklığında İncelenen Mikrodamlaya Harici Elektrik Alan Uygulanması için Geliştirilen Aktif Sıcaklık Kontrollü Kapiler Tüp Temelli Örnek Odacığı



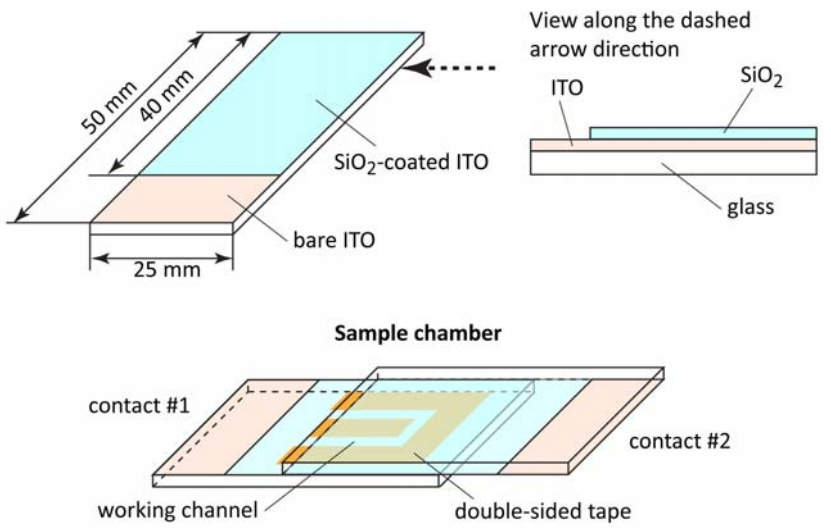
Şekil 4-3: Aktif sıcaklık kontrolü ile SK emülsiyon mikrodamlalarına harici elektrik alan uygulamak içingeliştirilenkapiler tüp temelli örnekodacığı. (sol) Harici soğutma kanalı içeren ısı eşanjörünün şematik gösterimi. (sağ) Örnek odacığının gerçeklendikten sonraki fotoğrafı.

Bölüm 4.2'de açıklanan kapiler tüp temelli örnek odacığı optik olarak tuzaklanmış SK mikrodamlasına harici elektrik alan uygulanmasına izin verir; ancak bunu yaparken sıcaklık bağımsız olarak kontrol edilemez. Daha iyi tanımlanmış deneysel koşullarda çalışmak için bu örnek odacığının daha ileri bir versiyonu geliştirilmiştir. Bu versiyonda kapiler tüp içindeki SK emülsiyonunun sıcaklığı aktif olarak kontrol edilebilir. Yeni versiyon örnek odacığının temel komponenti içinde kanal bulunduran bakır bir bloklı ısı eşanjörüdür. Isı eşanjörünün kanallarına soğutma suyu pompalanır (ilüstrasyon için bakınız Şekil 4-3). Örnek odacığının daha önceki versiyonunda olduğu gibi, bu versiyonda da

alüminyum kaplamalı yan duvarları bulunan kapiler tüp bir mikroskop lameli ile desteklenir ve böylece daldırma (immersion) mikroskop objektifi ile görüntülememümkün olur. Isı eşanjörü ile kapiler tüp arasındaki ışı trasnferini güçlendirmek için lamel ile eşenjör yüzeyi arasına ısı ileten pasta sürülmüştür.

Deneyler sırasında, ısı taşıyan sıvı (su) elşanjör kanalına sıvı sıcaklığı kontrol edilebilen harici bir sirkülatör ile sürekli pompalanmıştır. Böylece, örneğin sıcaklığı ortamın oda sıcaklığından yukarıda ya da aşağıda istenen değere sabitlenebilmiştir. Bu tür bir sıcaklık kontrolüne Bölüm 4.1'de açıklanan Joule ısıtması temelli sıcaklık kontrolü ile ulaşılamamıştır.

4.4 İncelenen Mikrodamlalara Elektrik Alan Uygulanması İçin Geliştirilen ITO Kaplamalı Lamel Temelli Örnek Odacığı



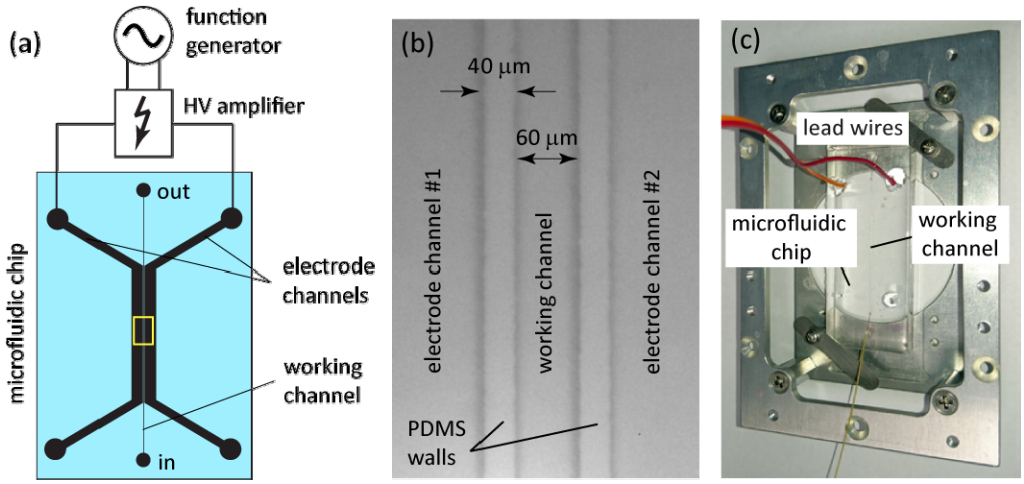
Şekil 4-4: Sıvı kristal emülsiyon mikrodamlalarına harici elektrik alan uygulamak için geliştirilen ITO kaplamalı mikroskop lamelleri temelli örnek odacığı.

Önceki bölümlerde açıklanan cam kapileri tüp temelli örnek odacığının üretimi kolaydır. Ayrıca bu örnek odacığı yeniden kullanılabilirdir ve örnek sıvısının kolayca değiştirilmesine izin verir. Ancak, kapileri tüp duvarlarında bulunan elektrodlar arasındaki göreceli yüksek mesafeden (160 mikron) dolayı kapileri tüp içinde yüksek elektrik alanların oluşturulması mümkün olmamaktadır. Bunun yanında, kapileri tübün üst ve alt duvarları yakınındaki elektrik alanda inhomojenlikler gözlenmektedir. Bu inhomojenliklerin nedeni, çalışma

frekanslarında (100 kHz – 1 MHz) cam ve sıvı emülsiyonların göreceli permitivitelerinin arasındaki yüksek farklılıklardır.

Yukarıda sözü edilen dezavantajlardan kurtulmak için SK emülsiyonlarına elektrik alan uygulamak için alternatif bir örnek odacığı geliştirdik. Bu örnek odacığı, kısmi olarak SiO_2 ile kaplanmış, ince ve opak iletken indiyum-kalay-oksit (indium-tim oxide, ITO) tabakalarına sahip iki mikroskop lamelinden oluşturuldu (bakınız Şekil 4-4). İki lamel ITO-kaplı yüzeyleri birbirine bakacak şekilde 30 mikron kalınlığında bir çift taraflı bant kullanılarak yapıştırıldı. Çift-taraflı bantta kesilmiş U-şeklindeki bir kanal incelenecek emülsiyonun gönderilmesi için kullanıldı. ITO tabakaları üzerine eklenen koruyucu SiO_2 tabakalar sıvı içinde iletim akımlarının oluşmasını engelledi. İletim akımları sıvının ısınmasına ve elektroliz ile buhar ve gaz baloncuklarının oluşmasına yol açmaktadır. Kapiler tüp temelli örnek odacığından farklı olarak, ITO lamelli örnek odacığında uygulanan elektrik alan tuzaklama ve optik pompalama ışık hüzmelerinin ilerleme yönüne paralel yönde uygulanabilmektedir. Bu, SK moleküllerinin direktörlerinin yönelimine harici kuvvetlerin etkisinin araştırılması için farklı imkanlar sağlamaktadır.

4.5 İncelenen Mikrodamlaya Harici Elektrik Alan Uygulamak için Geliştirilen Sıvı Elektrodlara Sahip Mikrofluidik Çip



Şekil 4-5: Optik olarak tuzaklanmış SK mikrodamlalarına harici elektrik alan uygulamak için geliştirilen sıvı elektrodlara sahip mikrofluidik çip. (a) Çipin şematik gösterimi. (b) Üretilen çipin detaylı görünümü. Bu görünüm (a)'da sarı dikdörtgen ile gösterilen kısmın görünümüdür. (c) Elde edilen çipin tümünün görünümü.

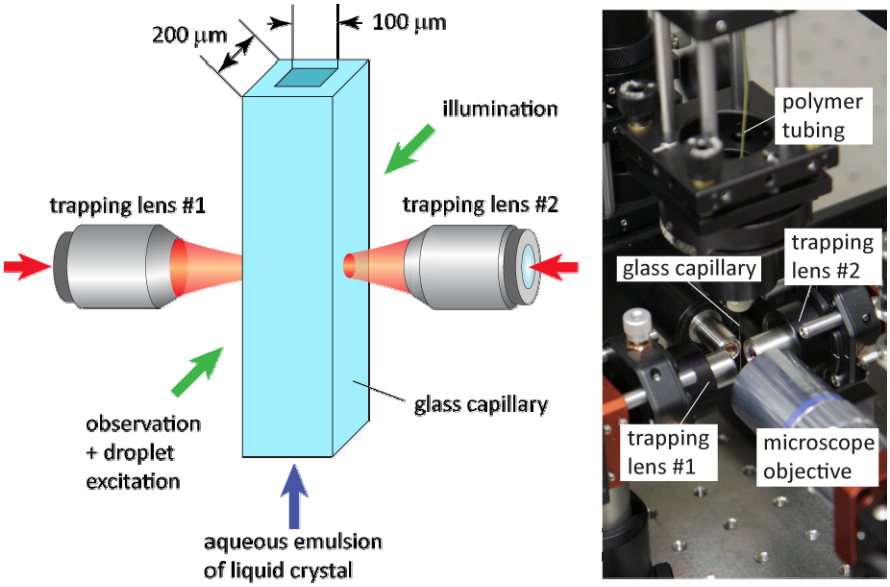
Bölüm 4.2-4.4'de incelenen SK mikrodamlalara harici elektrik alan uygulanması için kullanılan tüm örnek odacıkları katı ince film elektrodlar (aluminyum temelli veya ITO temelli) kullanmıştır. Böyle ince filmlerin alttaş üzerinde hazırlanması kolay ve elde edilen elektrodların yüksek iletkenliklere sahip olmalarına ragmen, tuzaklama lazerinin elektrod malzemesi tarafından soğurulması örneğin ısınmasına yol açmıştır. Bu istenmeyen ısınma kontrollü gerçekleştirilen deneylerin sonuçlarını etkileyen termal etkilere (konak sıvısının konveksiyonu ve hatta SK mikrodamlaların faz geçişleri) yol açmıştır. Bu da elde edilen verilerin anlaşılmasını zorlaştırmıştır.

Bu sorunun çözümü için yeni bir mikrofluidik çip tasarladık ve ürettik. Bu yeni çipte incelenen mikrodamlaya harici elektrik alan ışığı soğurmayan elektrodlarla uygulanabilmektedir. Burada temel fikir, iletken katı hal elektrodların tuzaklama lazer dalgaboyunda soğurumu çok düşük olan yoğun bir elektrolit çözeltisi ile değiştirilmesine dayanır. Şekil 4-5a'da yeni tasarlanan bu mikroflüdik çipin şematiği gösterilmektedir. Çip yerleşimi oldukça basittir. PDMS'den üretilen çip SK mikrodamlalarının bulunduğu düz çalışma kanalını içerir. Bu kanal ince PDMS duvarlarla (kalınlık ~40 mikron; bakınız Şekil 4-5b) elektrod sıvısıın (10% w/w NaCl su çözeltisi) içeren geniş kanallardan ayrılır. Alt taraftan çip mikroskop lameli ile kapatılır ve bu sayede çipe optik erişim mümkün olur. Deneyden önce elektrod kanalları elektrod sıvısı ile doldurulur ve daha sonra yüksek voltaj elektroniğine bağlı kurşun teller elektrod kanallarının içine doğrudan yerleştirilir (bakınız Şekil 4-5c). Daha sonra incelenen emülsiyon merkezdeki çalışma kanalına yüklenir. Deney süresince elektrod kanalların durumu incelenir ve elektrod sıvısının kurumadığına emin olunur. Bu oldukça kolay bir adımdır ve kuruma elektrod sıvı kanallarının çıkışlarına yerleştirilen tampon (buffer) sıvılarıyla daha da fazla engellenebilir.

4.6 Çift Hüzmeli Optik Tuzakta Hapsolmuş Mikrodamlalarla Spektral Tarama Deneyleri İçin Kullanılan Kapiler Tüp Temelli Örnek Odacığı

Bölüm 4.1-4.5'te açıklanan örnek odacıkları SK emülsiyon mikrodamlalarının tek hüzmeli optik tuzaklama (bakınız Şekil 2-4) ile hapsolduğu deneyler için uygundur. Bu tuzalama geometrisinde örneğe optik erişimin tek bir uzaysal yönden gelmesi yeterlidir. Çift hüzmeli optik tuzak (bakınız Şekil 2-5) uygulaması ise örnek odacığına ikinci bir yönden de erişimin olmasını gerektirir.

Bu sayede karşıt yönlerde hareket eden iki tuazklama hüzmesi örneğe gönderilebilir. Bu koşulun kare kesit alanına sahip bir cam kapiler tüp ile sağlanması rahatça mümkün olur.



Şekil 4-6: SK emülsiyon mikrodamlalarının çift hüzmeli optik tuzak ile hapsolması için kullanılan kapiler tüp temelli örnek odacığı. (sol) Örnek odacığının şematiği ve deneysel düzeneğin optik illüstrasyonu, (sağ) Örnek odacığı ve deneysel sistemin gerçeklenmiş halinin detaylarını gösteren fotoğraf.

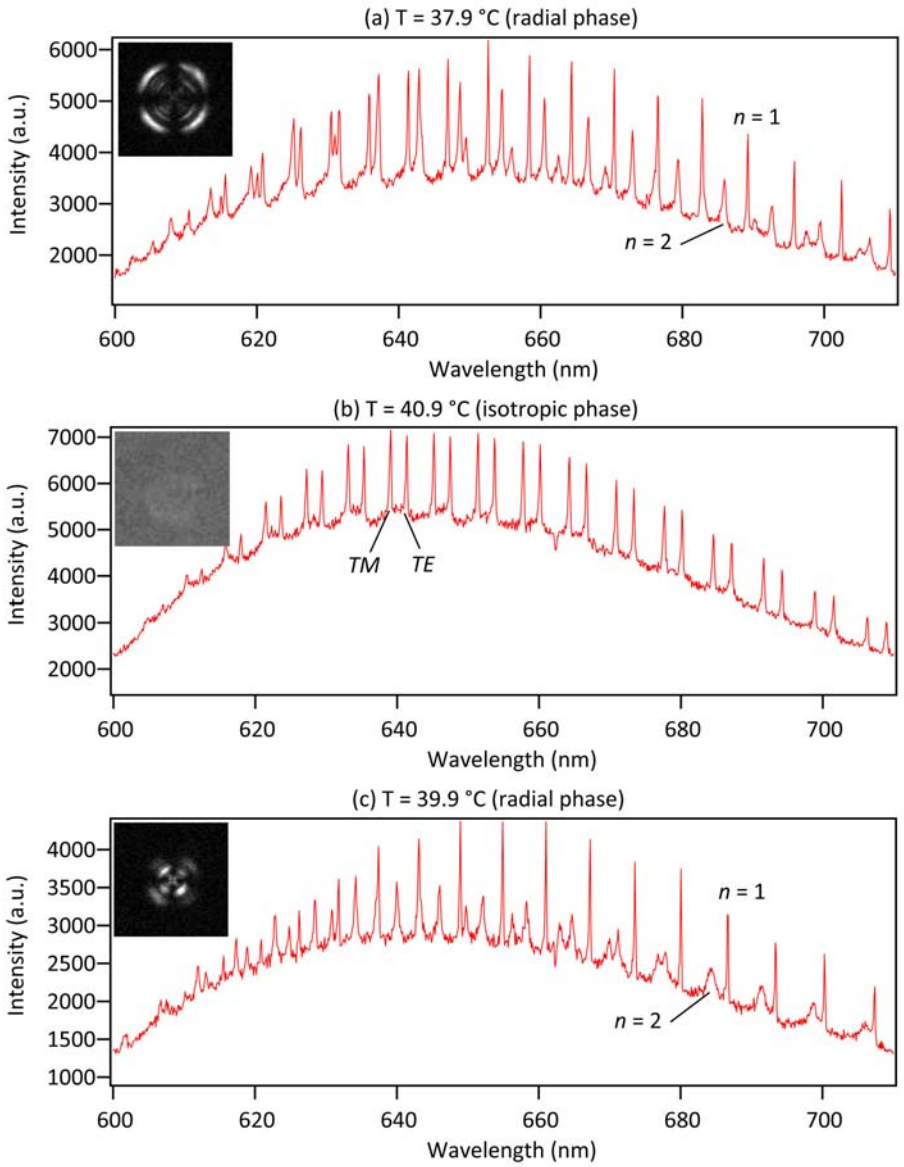
Şekil 4-6 SK emülsiyon mikrodamlalarının çift hüzmeli optik tuzak ile hapsolması için kullanılan örnek odacığının şematik çizimini (sol) ve gerçekleştirilmiş deneysel düzeneğin fotoğrafını (sağ) göstermektedir. Dikey olarak konumlandırılmış cam kapiler tüp polimer tüp ile bir şırıngaya (şekilde görünmüyor) bağlanır ve bu sayede SK emülsüyonlar kapiler tüpe açık olan alt tarafından uygulanır. Kapiler tüp üç boyutlu bir hareket merhalesine tutturulmuştur ve bu sayede 1 ve 2 numaralı tuzaklama mercekleri ile mikroskop objektifine göre hassas bir şekilde hareket ettirilir. Çift hüzmeli optik tuzağı oluşturan, ters yönde hareket eden iki lazer hüzmesi (dalgaboyu 1064 nm) 1 ve 2 numaralı tuzaklama mercekleri ile odaklanır ve kapiler tübün yan duvarlarının içerisinden gönderilir. Optik olarak tuzaklanmış bir SK emülsiyon mikrodamlası arka duvardan gönderilen polarize beyaz ışık ile aydınlatılır ve kapiler tübün ön duvarından, iki tuzaklama hüzmesinin eksenine dik yönde bir mikroskop objektifi aracılığıyla gözlenir. İncelenen SK mikrodamlalarında flöresans gözlenmesi için yeşil pompa hüzmesi (dalgaboyu 532 nm) kapiler tüp içine aynı mikroskop objektifi aracılığıyla odaklanır. Daha sonra mikrodamla ışıması 2 numaralı tuzaklama merceği aracılığıyla toplanır.

5 Sıvı Kristal Emülsiyon Mikrodamlalarının Işıma Spektrumlarının Emülsiyon Sıcaklığının Kontrolü İle Taranması

5.1 Radyal SK Fazdan İzotropik SK Faza Tersinir Bir Şekilde Geçişin Sonucu Olarak SK Emülsiyon Mikrodamlalarının Işıma Spektrumlarının Taranması

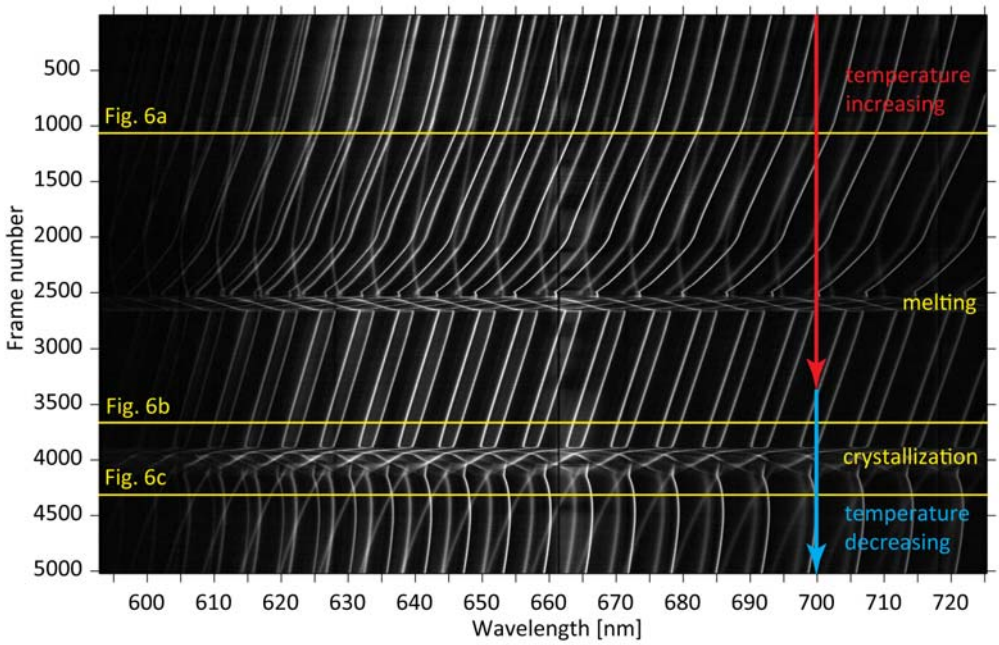
Bölüm 4.1'de açıklanan sıcaklık kontrollü mikrofluidik çipi kullanarak, SK mikrodamlalarının ışıma spektrumlarında sıvı-kristal fazdan (düşük sıcaklık) isotropik faza (yüksek sıcaklık) ve ters yönde geçişleri ardaşık ısıtma-soğutma döngüleri ile inceledik. Bu çalışmalarda 5CB sıvı kristali 4 mM w/w Nile Red boya moleküli ile 0.1% SDS/su içinde karıştırıldı. Bölüm 3'de açıklandığı gibi bu malzeme sistemi yaklaşık 25 °C oda sıcaklığında radyal sıvı kristal faz vermektedir.

Isıtma/soğutma döngülerinin değişik evrelerinde 13.5 μm çapında, optik cımbızlama ile tuzaklanmış bir SK mikrodamlasından kaydedilen tipik ışıma spektrumları Şekil 5-1'de gösterilmektedir. Her spektrumdaki küçük resim polarizasyon mikroskopisi kullanılarak kaydedilmiş mikrodamla görüntüsünü vermektedir. Bu görüntüler mikrodamla içinde SK moleküllerinin iç organizasyonlarını vermektedir. Radyal SK fazında mikrodamla görüntüsü bir artı sembolünü barındırır ve ışıma spektrumu değişik radyal derecelerde, *n*, TM-polarize FGM'leri gösterir (Şekil 5-1a). TE-polarize FGM'lerin bu spektrumda bulunmayışı olağan kırınım indisi ile ev sahibi sıvı kırınım indisi arasında yeterli seviyede bulunmayan kırınım indisi kontrastından kaynaklanır (bu konu Bölüm 3'de açıklanmıştır). Yaklaşık ~40.1°C'de erime ve isotropik faza geçişten sonra mikrodamlanın çiftkırılım özeliği ortadan kalkar ve polarizasyon mikroskobu görüntüsünde mikrodamla hemen hemen görünmez olur (Şekil 5-1b). Aynı zamanda, n = 2 TM FGM'ler yok olurken n = 1 TE FGM'ler, n = 1 TM FGM'ler ile benzer genliklerde gözlenmeye başlar. Sıcaklık tekrar düşürüldüğünde SK faz tekrar sağlanır, mikrodamla tekrar polarizasyon mikroskobu ile görünür hale gelir ve ışıma spektrumu Şekil 5-1a'da gösterilen orijinal haline geri döner (Şekil 5-1c).

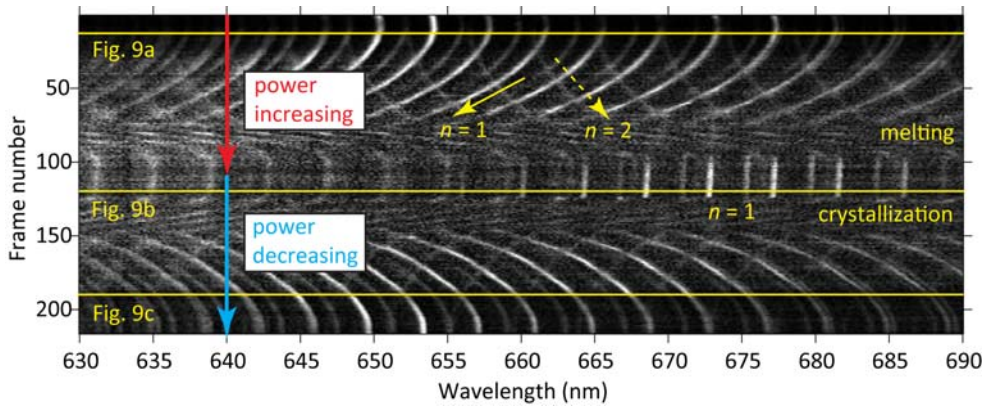


Şekil 5-1: Kontrollü sıcaklık değişimleri ile bir SK mikrodamlanın ışıma spektrumunun taranması.

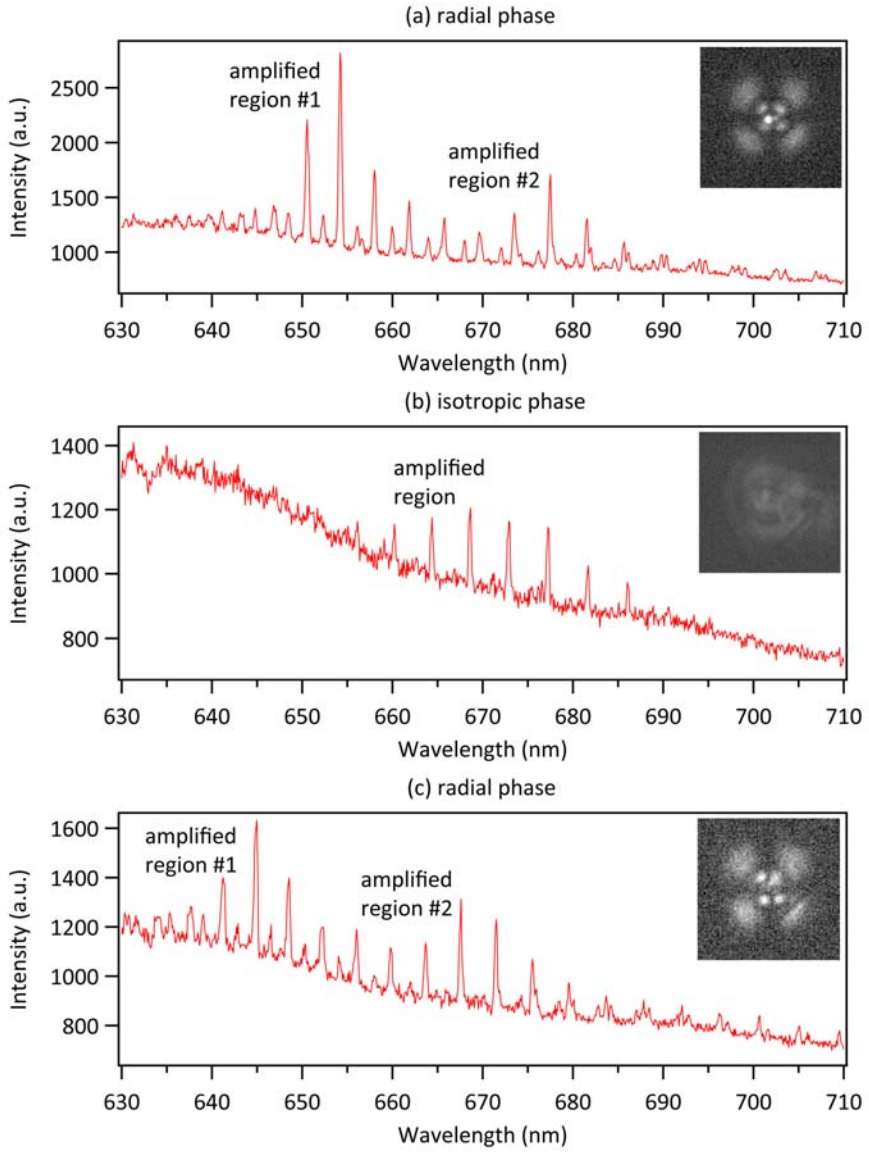
Şekil 5-2'deki iki boyutlu spaktral grafik, Şekil 5-1'de örnekleri gösterilen komple sıcaklık tarama döngüsüdür. Bu sıcaklık tarama döngüsünde emülsiyon mikrodamlasının sıcaklığı önce 37.5°C'den 41.1°C'ye arttırılır (1 – 3400 numaralı çerçeveler), 40.1 °C noktası 2500 numaralı çerçevede geçilir. 3400 numaralı çerçevede maksimum değerine ulaştıktan sonra sıcaklık azaltılır, 3900 numaralı çerçevede SK kristalizasyonu gözlenir ve 5022 numaralı çerçevede 39.9°C sıcaklığa erişilir. Faz geçiş noktalarını geçtikten sonra (çerçeve numaraları 2500 ve 3900), spektral değişimlerin dinamiği çok hızlı hale gelir. Bunun yanında, deney boyunca tüm modların spektrumun mavi renk tarafına doğru kaydığı da gözlenir. Bunun nedeni ev sahibi sıvıda mikrodamlanın kısmi çözünmesidir.



Şekil 5-2: SK emülsiyon mikrodamlalarının ışıma spektrumunda kontrollü sıcaklık değişimleri ile elde edilen tarama döngüleri. Sarı yatay çizgiler Şekil 5-1'de gösterilen SK mikrodamla ışıma spektrumlarına karşılık gelmektedir.



Şekil 5-3: Optik olarak tuzaklanmış bir SK mikrodamlasının tersinir faz geçişi boyunca kaydedilmiş FGM spektrumları. SK mikrodamla radyal fazdan izotropik faza optik tuzaklama gücünün değişimiyle tersinir bir şekilde geçmektedir. 1-108 numaralı kayıtlar (frame) arasında tuzaklama gücü arttırılırken, 109-216 numaralı kayıtlar arasında tuzaklama gücü azaltılmıştır. Sarı çizgilerle belirtilen zamanlardaki mikrodamla spektrumları Şekil 5-4'te gösterilmektedir. Düz ve kesik çizgili oklar değişik radyal dereceye *n* sahip FGM'lerin spektral kaymalarını belirtir.



Şekil 5-4: Sıcaklık temelli faz geçişi sırasında optik olarak tuzaklanan bir SK mikrodamlasından kaydedilen FGM spektrumları. Mikrodamla tuzaklama gücünün değiştirilmesiyle önce radyal SK fazında bulunuyor (a), daha sonra eriyerek izotropik faza geçiyor (b), ve sonra radyal SK faza geri dönüyor (c). Küçük resimler polarizasyon mikroskopisi kullanılarak elde edilen SK mikrodamla görüntülerini göstermektedir.

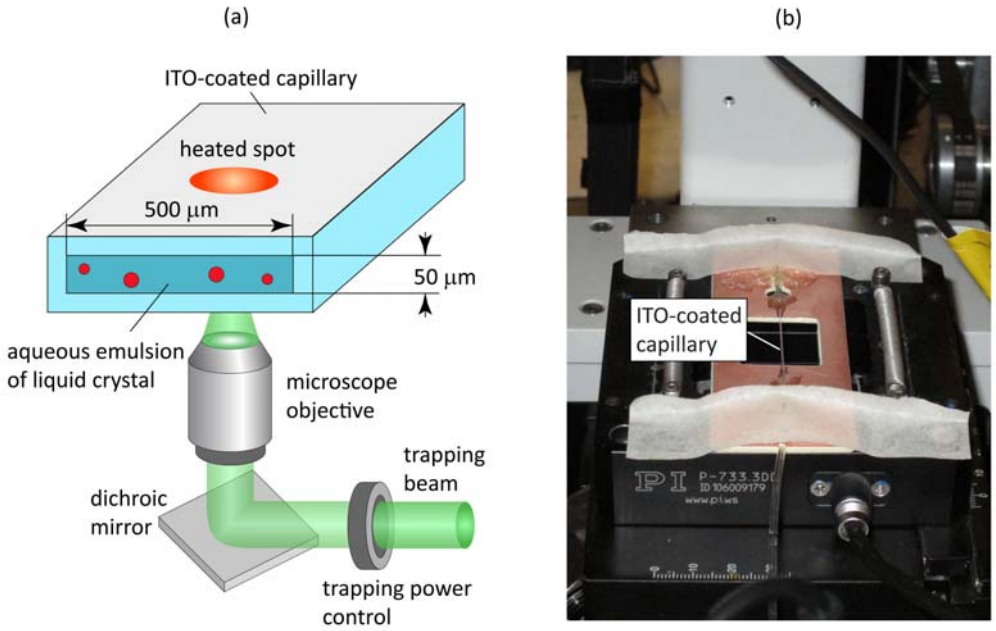
SK mikrodamlasının tuzaklama lazer gücünün değiştirilmesiyle radyal SK fazından izotropik faza ve daha sonra tekrar radyal SK faza geçişini gösteren tipik spektral tarama deneyi sonuçları Şekil 5-3'te gösterilmektedir. Bu deneylerde ~22 μm çapında radyal bir SK mikrodamlasından (5CB + 1% w/w Nile Red + 4 mM sodium dodecyl sulfate emülsiyon sistemi – bakınız Bölüm 3) ışıma spektrumları kaydedilirken optik tuzaklama gücü 30 mW'dan 2500 mW'a arttırılıp sonra 30 mW'a geri azaltılmıştır. Bu sırada mikrodamla ışıma spektrumu ve

polarizasyon mikroskop görüntüleri eş zamanlı olarak kaydedilerek faz geçişinin ilerlemesi gözlenmiştir. Şekil 5-3'te gösterildiği gibi, mikrodamla eridiğinde FGM spektrum yapısı büyük ölçüde değişmektedir; faz geçişi sırasında değişik radyal derecelere *n* sahip FGM'ler farklı yönlerde spektral kayma göstermektedir (bakınız *n* = 1 ve *n* = 2 dereceli FGM'leri gösteren düz ve kesik çizgili oklar). İzotropik fazda sadece en düşük radyal derecede (*n* = 1) olan FGM'ler gözlenmektedir. Mikrodamla ilk sıcaklığına geri soğutulduğunda ise, spektrum radyal SK fazın özelliklerini göstermektedir. Spektral tarama döngüsünün soğutma kısmının ısıtma kısmının bir ayna görüntüsü olduğu gözlenir. Bu davranış yukarıda ısıtılan mikrofluidik çiplerde gözlenen davranış ile aynıdır; ancak burada kullanılan deneysel konfigürasyon mikrodamla sıcaklığının çok daha hassas ve lokalize bir şekilde kontrol edilmesini sağlar ve bu nedenle SK'lerin faz geçişlerin çok daha yüksek hassasiyetle izlenebilir. Faz geçişi boyunca mikrodamlanın değişimi Şekil 5-4'te daha ayrıntılı bir şekilde gösterilmektedir. Bu şekilde kaydedilen ışıma spektrumları polarizasyon mikroskop görüntüleri ile birlikte gösterilmektedir. Burada çarpı şeklinde görülen mikrodamla görüntüleri radyal SK fazını belirtirken daha belirsiz olan görüntü izotropik faza belirtir. Şekil 5-4a ve 5-4c, Şekil 5-4b ile karşılaştırıldığında ışıma spektrumunun değişik bölgelerindeki FGM'lerin şiddetinin uyarılmış ışıma nedeniyle arttığı gözlenir; radyal SK mikrodamlasında iki farklı spektral bölgede FGM genliğinin arttığı gözlenirken izotropik fazda yalnızca bir spektral bölgede FGM genliğinin arttığı gözlenir. Bu spektral bilgi sıcaklık temelli faz geçişinin mekanizması hakkında daha detaylı bilgi verecek niteliktedir. Bu da gösteriyor ki SK mikrodamlalarının optik spektroskopisi sıvı kristal fiziğine temel seviyede de katkı sağlayabilecektir.

5.2 Sıcaklık Değişimi ile İzotropik Emülsiyon Mikrodamlalarının Işıma Spektrumlarının Taranması

İzotropik emülsiyon mikrodamlalarında dahi sıcaklık değişimleri mikrodamlanın kırınım indisi ve çapında küçük değişimlere neden olur ve bunun sonucu olarak mikrodamla rezonans dalgaboylarında iki yönlü spektral kayma gözlenebilir (Aas 2013b). Bu etki özellikle izotropik SK mikrodamlalarında daha güçlü bir şekilde gözlenir. Sıradan sıvılarla karşılaştırıldığında izotropik SK mikrodamlalarının içsel organizsyonu küçük pertürbasyonlara karşı çok daha hassastır. Bu durumu teyid etmek amacıyla deneyler serisi gerçekleştirdik. Bu deneylerde optik cımbızlama ile tuzaklanan izotropik SK mikrodamlalarının ışıma

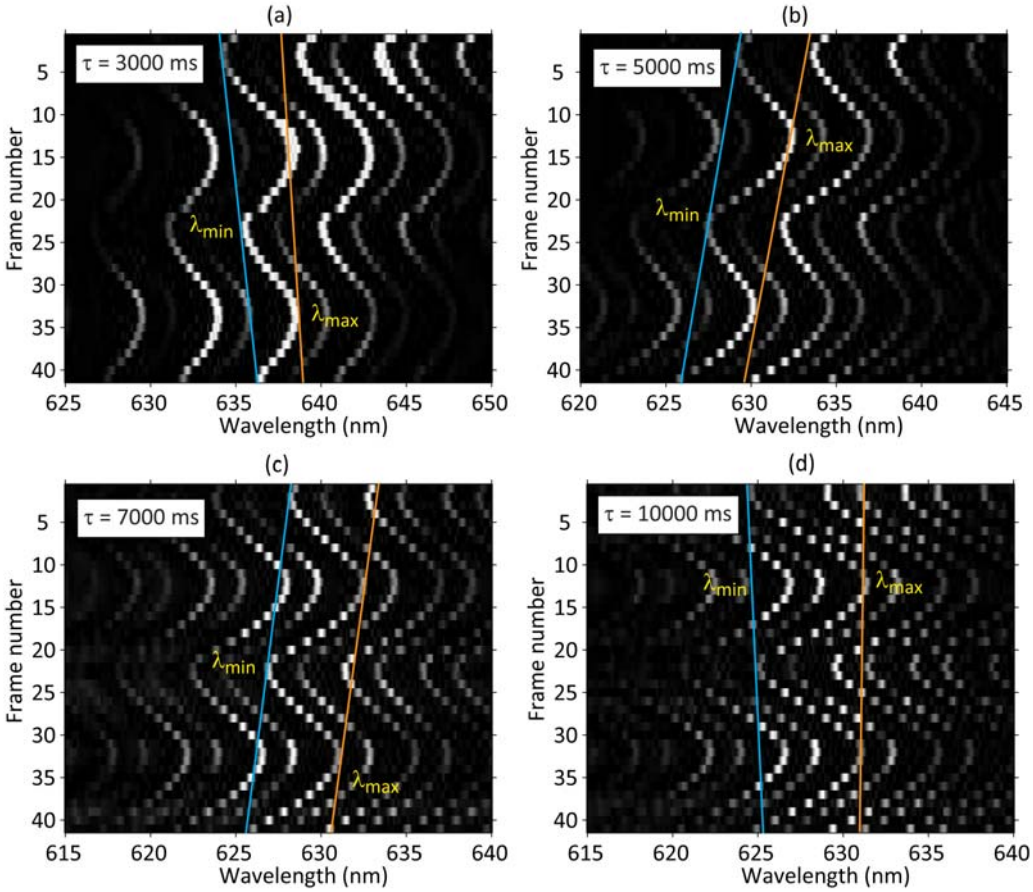
spektrumları değişik tuzaklama lazer gücünde kaydedildi. Tuzaklama hüzmesinin ısıtma etkilerini arttırmak için dikdörtgen kesite sahip cam kapiler örnek odasını oluşturduk. Bu örnek odasının üst ve alt kısımları geçirgen, ve kısmı olarak soğuran indiyum-kalay oksit (indium-tin oxide - ITO) katmanı ile kaplandı (Şekil 5-5). Tuzaklama laser hüzmesinin soğurumu üst ve alt yüzeylerde ısınmış bölgeleri (hot spots) oluşturdu. Bu sayede SK emülsiyonun lokal olarka ısıtılması sağlandı.



Şekil 5-5: Tuzaklama lazer gücünün değiştirilmesiyle optik olarak tuzaklanmış izotropik SK emülsiyon mikrodamlalarının ışıma spektrumlarının taranması. (a) Spektral tarama deneylerinde kullanılan deney düzeneğinin şematiği. Tuzaklama lazer ışığının soğurumu örnek odacığını oluşturan ITO-kaplamalı kapilerinin üstünde ve altında ısınmış bölgeleri (hot spots) oluşturur. (b) Örnek odacığının görüntüsü.

Tuzaklanmış ~19 μm çağında bir SK mikrodamlasından (5CB + 0.3 % w/w Nile Red + 1200 mg/L Triton X100 emülsiyon sistemi) kaydedilen örnek spektral tarama eğrileri Şekil 5-6'da gösterilmektedir. Bu deneylerde tuzaklama hüzme gücü 240 mW ile 720 mW arasında iki tam modülasyon döngüsü boyunca değiştirilmiştir. Şekil 5-6'da gösterilen 4 ölçümde adımlar arası bekleme süresi (dwell time) 3000 ms (Şekil 5-6a) ile 10000 ms (Şekil 5-6d) arasında değiştirilmiştir. λ_{min}, λ_{max} ile etiketlenmiş mavi ve turuncu çizgiler modülasyon döngüleri boyunca seçilen FGM için minimum ve maksimum dalgaboylarını birleştirir. FGM tarama genlikleri τ = 3000 ms için 3.1 nm, τ = 5000 ms için 4.0 nm, τ = 7000 ms için 4.8 nm ve τ = 10000 ms için 6.3 nm olarak belirlenmiştir. Daha yüksek bekleme sürelerinde spektral tarama aralığının artması termal

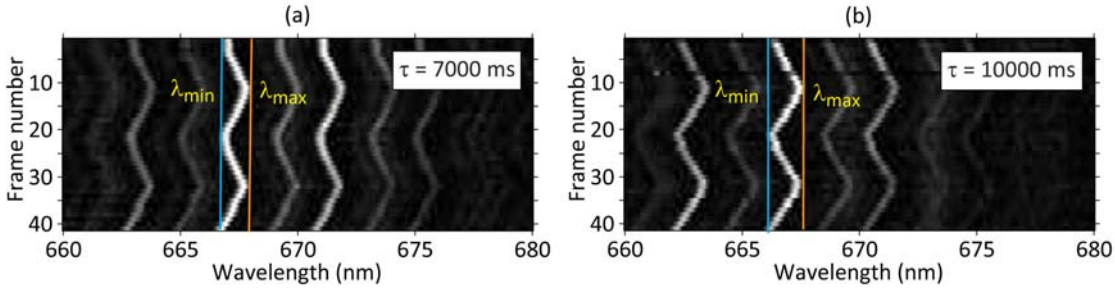
etkilerin gevşeme (relaxation) zamanları ile açıklanabilir. En yüksek spektral taramanın gözlendiği en yüksek bekleme süresi durumunda bile gözlenen spektral tarama tamamen tersinirdir. Bu da SK mikrodamlanın konak sıvıdaki çözünmesinin spektral taramayı etkilemediğini gösterir. Tuzaklama gücünün arttırılmasıyla mikrodamla FGM'lerinin spektrumunun kırmızı tarafına kaydığı gözlenir. Bu davranış daha önce su içindeki daldırma (immersion) yağ mikrodamlaları ile gözlenen trend ile uyumludur (Aas 2013b).



Şekil 5-6: Tuzaklama lazer hüzmesinin gücünün değiştirilmesiyle bir SK mikrodamlanın ışımasının spektral olarak taranması. Bütün spektrumlar için iki tam güç değiştirme döngüsü gerçekleştirilmiştir. Herbir döngüde tuzaklama hüzme gücü 240 mW'tan 720 mW'a periyodik olarak 10 adımda değiştirilmiştir. Adımlar arası bekleme süresi (dwell time) (a) τ = 3000 ms; (b) τ = 5000 ms; (c) τ = 7000 ms; (d) τ = 10000 ms olarak seçilmiştir.

ITO-kaplamalı cam kapiler örnek odacığı, göreceli olarak düşük tuzaklama güçlerinde mikrodamla FGM'lerinde hemen hemen tümüyle tersinir 5 nm'nin üzerinde spektral tarama gözlenmesini sağlamaktadır. Ancak bu konfigürasyonda SK mikrodamlalarının optik tuzakta kısıtlanması termal etkilerden dolayı oluşan

sıvı konveksiyonları nedeniyle daha zordur. Konak sıvının konveksiyonundan kaynaklanan bu kötü etkiden kurtulmak için güç ile spektral tarama deneylerini önceki ile aynı boyutlarda çıplak cam kapileri tüpten oluşan örnek odacığı ile tekrarladık. Bu şekilde ~20 μm çapındaki bir SK mikrodamlasıyla elde edilen tipik spektral tarama eğrileri Şekil 5-7'de gösterilmektedir. Soğuran ITO tabakasının bulunmaması nedeniyle bu deneylerde daha yüksek tuzaklama güçleri kullanılmıştır (çıplak cam kapiler tüp deneylerinde ortalama güç 1800 mW iken ITO-kaplamalı kapiler tüp deneylerinde ortalama güç 480 mW'tır) ve daha düşük spektral tarama genlikleri elde edilmiştir (τ = 7000 ms için 0.9 nm ve τ = 10000 ms için 1.3 nm). Bunlara rağmen mikrodamla optik tuzaklaması çok daha stabil olmuştur ve SK mikrodamlanın konak sıvıda az da olsa çözünmesinin önüne geçilmiştir. Pratikte kapiler duvarlarının üzerine kaplanacak optimum ITO kaplama kalınlığı bulunabilir. Bu optimum kalınlık ile orta tuzaklama güçlerinde birkaç nm'lik spektral tarama genliklerine konak sıvı konveksiyon etkilerini az seviyede tutarak ulaşılması mümkün olabilmelidir.

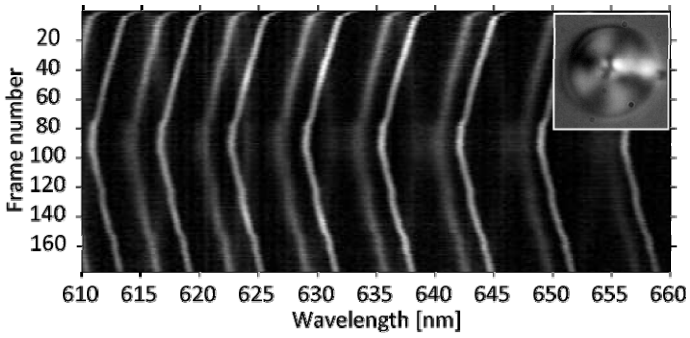


Şekil 5-7: Tuzaklama lazer hüzmerinin gücünün değiştirilmesiyle SK mikrodamla ışımasının spektral taraması. Her iki spektrumda da iki tam güç modülasyon döngüsü gerçekleştirilmiştir. Bu döngülerde tuzaklama gücü mikroskobun girişinde 1200 mW ile 2400 mW arasında 10 adımda periyodik olarak değiştirilmiştir. Deneylerde bekleme süresi (dwell time) olarak (a) τ = 7000 ms ve (b) τ = 10000 ms kullanılmıştır.

5.3 Çift Hüzmeli Bir Optik Tuzak İle Hapsedilmiş SK Emülsiyon Mikrodamlalarının Sıcaklık Kaynaklı Spektral Taraması

Bölüm 5.1'de açıklandığı gibi, tuzaklama lazer gücünün modüle edilmesi ile optik olarak tuzaklanmış radyal SK emülsiyon mikrodamlalarının sıcaklığı lokal olarak kontrol edilebilir ve böylece spektral tarama elde edilir. Tuzaklama lzser gücündeki değişiklikler yeterince küçük olduğu takdirde, SK mikrodamla kristalin

fazda kalır ve mikrodamla erimesinden kaynaklı ani spektral değişiklikler gözlenmez.

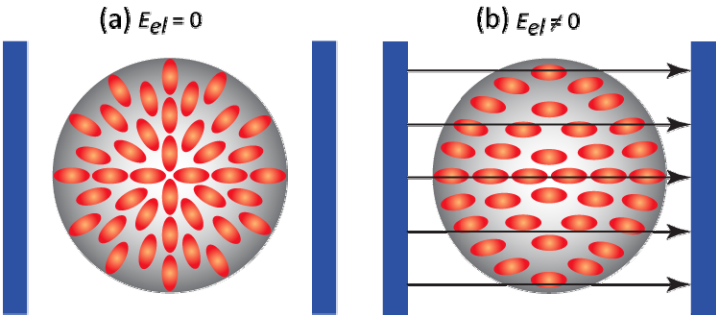


Şekil 5-8: Çift hüzmeli optik tuzak ile hapsedilmiş bir radyal SK emülsiyon mikrodamlasının (çap ~11.5 μm) tuzaklama lzer gücünün modülasyonu sonucu sıcaklık ile spektral taraması. Küçük resim mikrodamlanın polarizasyon mikroskobu görüntüsünü gösterir.

Çift hüzmeli optik tuzak konfigürasyonunda tuzaklama lazer gücünün modülasyonu ile SK emülsüyon mikrodamlalarının ışıma spektrumlarının sıcaklık ile taramasına ulaşılabilir. Bu geometride iki tuzaklama hüzmesinin gücü birbirini dengelediği için bu hüzmelerin güçlerinin senkronize bir şekilde değiştirilmesi mikrodamlanın hapsedilmiş konumunda değişmeye neden olmaz. Şekil 5-8 ~11.5 μm çapında bir radyal SK emülsiyon mikrodamlasından (5CB SK + % 0.3 % w/w Nile Red boya molekülü + 1.05 mM SDS sürfaktan, su içinde) kaydedilen örnek bir tarama eğrisini gösterir. Bu deneyde 1. çerçevede tuzaklama lazer gücü minimum değerinde iken 90. çerçevede maksimum değerine (her bir hüzmede < 800 mW) ulaşır ve daha sonra tekrar başlangıç değerine düşer. Tuzaklama lazer gücünün tüm değerleri için gözlenen mikrodamla radyal SK fazını korumuştur. İncelenen bu spesifik mikrodamla için spektral tarama aralığı $\Delta\lambda$ = 2.8 nm olmuştur. Genel olarak, belirli bir maksimum tuzaklama lazer gücü için gözlenen sıcaklık kaynaklı spektral tarama miktarı radyal SK mikrodamlalarında izotropik SK mikrodamlalarına göre daha fazladır (Şekil 5-7 ile Şekil 5-8'I karşılaştırın). Bunun sebebi mikrodamla kristalin haldeyken mikrodamla kırınım indisinin ve/veya boyutunun sıcaklık ile değişiminin çok daha fazla olmasıdır. Bunun yanında, iki durumda gözlenen spektral tarama yönü karşıttır: radyal SK mikrodamlalarının TM-polarize FGM'leri artan sıcaklık ile mavi yönde kayarken (çünkü TM-FGM'ler tarafından gözlenen ektraordineri kırınım indisi n_e izotropik değerine n_{LC} azalır) izotropik SK mikrodamlalarının hem TE hem TM polarize FGM'leri artan sıcaklık ile kırmızı yöne kayar (mikrodamlanın boyut ve kırınım indisinin değişimi kaynaklı (Aas *et al.* 2013b)).

6 Sıvı Kristallerin Emülsiyon Mikrodamlalarının Işıma Spektrumlarının Harici Elektrik Alan İle Taranması

Bölüm 5.1'de SK emülsiyon sıcaklığının faz geçişi noktasının civarında dikkatli değiştirilmesiyle tek SK mikrodamlalarından gözlenen flöresan spektrumunda büyük değişiklikler gözlenebildiğini gösterdik. Bunun yanında Bölüm 5.2'de sıcaklık temelli spektral kaymaların izotropik mikrodamlalarda dahi gözlendiğini gösterdik. Ancak, örnek sıcaklığının harici kontrol ile çok yavaş değişmesi ve faz geçişi noktası civarında mikrodamla iç yapısının sıcaklığa olan yüksek bağımlılığı, faz geçişi noktası civarında mikrodamla ışıma spektrumunun hassas bir şekilde taranmasını çok zorlaştırmaktadır.



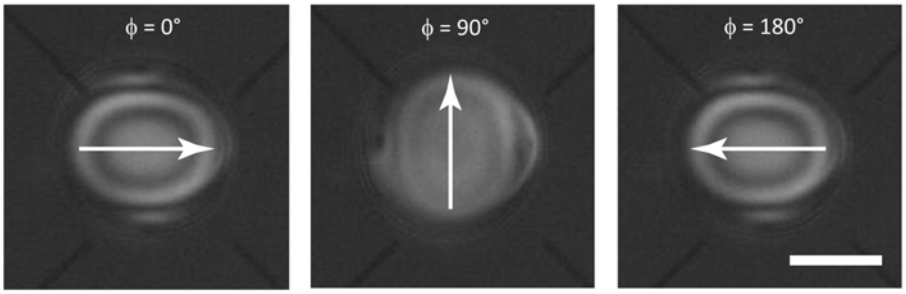
Şekil 6-1: SK moleküler direktörünün harici elektrik alan (E_{el}) ile hizalanması (a) Elektrik alan yok ike SK mikrodamla radyaz fazda bulunuyor. (b) Elektrik alan açıldığında çubuk şeklindeki SK molekülleri elektrik alan ile kısmi olarak hizalanır. Hizalanmanın miktarı uygulanan elektrik alanın genliği ve frekansı ile değişir.

Bölüm 4.2'de açıklandığı gibi elektrik alan SK moleküllerinin director yönelimlerinin değiştirilmesinde kullanılabilir ve böylece SK mikrodamlanın etkin (effective) kırınım indisinin uzaysal profili değiştirilebilir (bakınız Fig. 6-1) (Humar *et al.* 2009). Bu da FGM'lerin optik yol uzunluklarının değişmesiyle sonuçlanır ve böylece mikrodamla ışma spektrumu taranmış olur.

6.1 Katı-Hal Elektrod Sistemlerinin Kullanımıyla FGM Spektrumlarının Elektrik Alana Bağlı Taranması

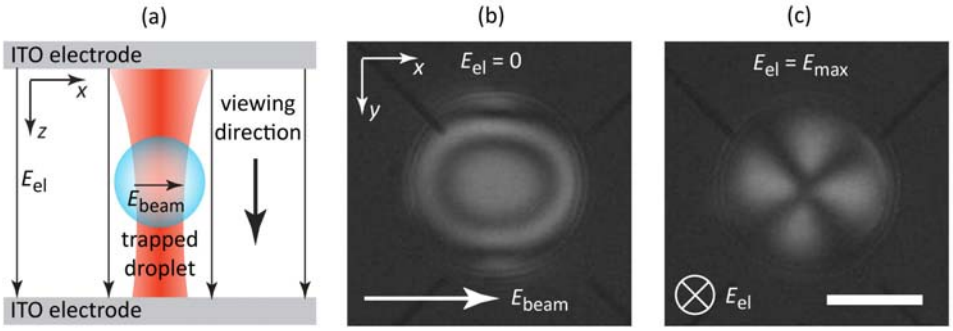
Optik olarak tuzaklanmış tek SK mikrodamlalarının flöresans ışıma spektrumlarına elektrik alanın etkisinin incelenmesi için Bölüm 4.2-4.4'de açıklanan örnek odacıkları Şekil 3-2'de gösterilen el yapımı mikrospektroskopik

sistem ile birlikte kullanıldı. Değişik genlik ve frekansta AC elektrik alan örnek odacığının elektrodlarına sinüsoydal AC voltaj uygulanmasıyla elde edildi. Elektrodları süren AC voltaj bir fonksiyon üreteci (Tektronix, AFG3021C) ve yüksek voltajlı yükselteç (Tektronix, AFG3021C) ile elde edildi. Bu düzenek ile yaklaşık ~1 MHz'lik frekanslara kadar maksimum 260 V tepeden tepeye (peak-to-peak) sürücü sinyal genliğe V_{max} elde etmek mümkün olmaktadır. Tipik bir tarama deneyinde sürücü AC voltajı döngüsel olarak 0 ile V_{max} arasında arttırılıp azaltılmaktadır. Seçilen V_{max} değeri de her döngüde değiştirilmektedir. Her AC voltaj değeri için çalışılan mikrodabmladan bir lazer ışıması spektrumu kaydedilmiştir. AC voltajın ayarlanması ile spektrum kaydı arasındaki bekleme süresi de deney sırasında ayarlanabilmektedir.



Şekil 6-2: Bipolar SK emülsiyon mikrodamlasının (5CB + Nile Red + 300 mg/L Triton X100 su içinde) optik tuzaklama hüzmesinin polarizasyonunun değiştirilmesiyle döndürülmesi, tuzaklama hüzme gücü ~20 mW. Beyaz oklar polazirasyon yönünü belirtmektedir. Polarizasyon yönü yaklaşık 60 s'de soldan sağa doğru 180 derece döndürülmüştür. Ölçek: 10 μm.

SK emülsiyon mikrodamlalarının uygulanan elektrik alan ile etkileşim karakteristiği mikrodamla içindeki SK moleküllerinin yapısı ile ilişkilidir. Moleküler direktörün tek eksen yönünde yöneldiği bipolar SK mikrodamlaları direktör yöneliminin uygulanan elektrik alan ile paralel olması için dönmektedir. Bunun yanında, radyal ve isotropik SK mikrodamlalarının elektrik alan altında tercih edilen bir yönelimleri yoktur. Bipolar bir SK molekülü bir optik tuzak içine hapsedildiğinde mikrodamla yönelimini belirleyen birincil etki tuzaklama hüzmesinin polarizasyon vektörüdür (bakınız Şekil 6-2). Mikrodamla tuzaklama hüzmesi ile harici elektrik alana aynı anda maruz bırakıldığında ise elde edilen mikrodamla yönelimi iki elektrik alanın genliklerinin birbirine göre değerlerine göre belirlenir.

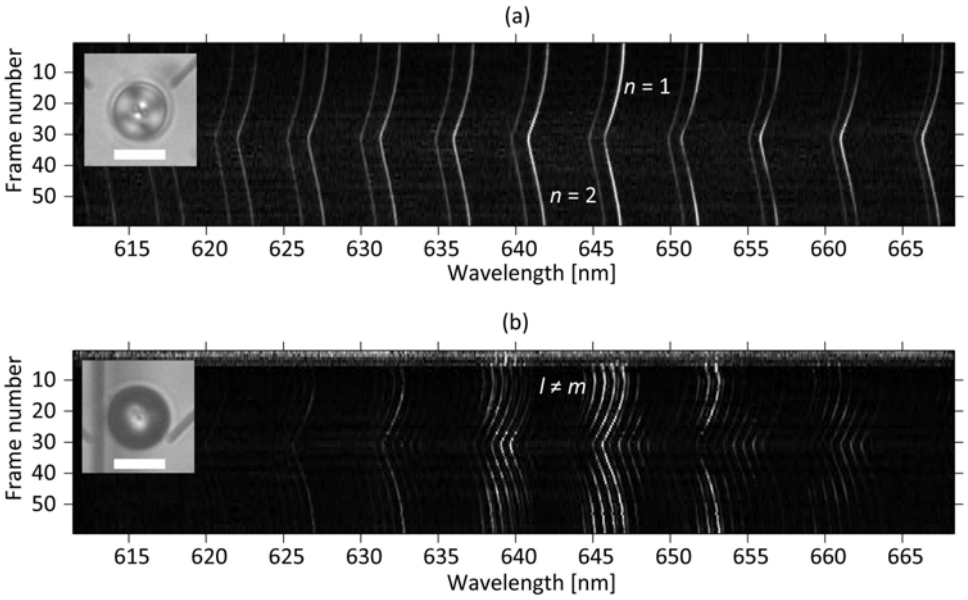


Şekil 6-3: Bipolar bir SK emülsiyon mikrodamlasının (5CB + Nile Red + 300 mg/L Triton X100 su içinde) tuzaklama hüzmesi (E_{beam}) ve ITO elektrodlar arasındaki (E_{el}) elektrik alan ile döndürülmesi. (a) Deneysel geometri; (b) $E_{el} = 0$ için mikrodamla E_{beam} yönünde hizalanır; (c) $E_{el} = E_{max}$ için mikrodamla E_{el} (sayfanın içine doğru) yönünde hizalanır. Ölçek: 10 μm.

Şekil 6-3'te optik tuzaklama ile tuzaklanmış (tuzaklama gücü ~20 mW) bir bipolar SK mikrodamlanın tuzaklama hüzmesine paralel yönde gönderilen harici AC elektrik alan E_{el} ile kontrollü döndürülmesi gösterilmektedir. Elektrik alan Şekil 4-4'de gösterilen opak ITO elektrodların arasına 1 MHz frekansında ~80 V tepeden tepeye genliğe sahip bir AC voltaj uygulanmasıyla elde edilir. Bu deneyde tuzaklama hüzmesinden ve elektrod sisteminden dolayı oluşan elektrik alanları E_{beam} ve E_{el} birbiriyle her zaman dik durumdadır, ve bu nedenle bu elektrik alanların yönelim etkileri birbiriyle yarışmaktadır (Şekil 6-3a). Başlangıçta, E_{el} 0'a eşitlenir. Bunun sonucu olarak mikrodamla tuzaklama hüzmesinin polarizasyonu yönünde yönelir (Şekil 6-3b). Daha sonra E_{el} kademeli olarak E_{max} değerine kadar yükseltildiğinde mikrodamlanın yöneliminin harici elektrik alan yönünde değiştiği gözlenmektedir (Şekil 6-3c). Mikrodamla yönelimindeki bu değişiklik polarizasyon mikroskobu görüntüsünde rugby topu görüntüsünden siyah çapraz işareti görüntüsüne geçiş olarak kendini gösterir. Anlatılan bu döngü tamamiyle tersinirdir ve E_{el} 'in 0'a geri getirilmesiyle orijinal mikrodamla yöneliminin elde edilmesi mümkündür.

Değişik SK fazların uygulanan AC elektrik alana cevaplarını karşılaştırmak için suda değişik derişimlerde SDS sürfaktanı bulunduran 5CB/Nile Red emülsiyonlarıyla deneyler gerçekleştirdik. AC elektrik alanın yol açtığı spektral taramaları radyal SK emülsiyon mikrodamlalarında (4 mM SDS, bakınız Şekil 3-1a) ve bipolar SK emülsiyon mikrodamlalarında (0.7 mM SDS, bakınız Şekil 3-1b) çalıştık. Şekil 6-4 radyal ve bipolar SK mikrodamlalarıyla tek bir tarama döngüsünde 1 MHz AC voltajın 0 Vpp (çerçeve 1) – 230 Vpp (çerçeve 30) – 0 Vpp (çerçeve 60) arasında değişimi sonucu elde edilen spektrumları

göstermektedir. Bölüm 3.1'de tartışıldığı gibi, radyal yönelime sahip mikrodamlalar küresel simetriye sahiptir ve bu nedenle basit ışıma spektrumları vardır. Bu mikrodamlalarda iki FGM ailesi gözlenir, bu iki aile farklı iki radyal mod sayısına *(n = 1, 2)* karşılık gelir (Şekil 6-4a). Küresel simetriden dolayı faklı açısal mod sayısı (*l*) ve azimutal mod sayısına (*m*) sahip modların yoz (degenarate) olduğu gözlenir. Oysa, bipolar mikrodamlalarda sadece mikrodamla kutuplarını birleştiren eksene göre dönel (rotational) simetri bulunmaktadır. Bunun sonucu olarak değişik *m* sayılarına sahip FGM'şerfarklı kırınım indislerine maruz kalırlar ve FGM'lerin yozluğunun ortadan kalktığı gözlenir (Şekil 6-4b).

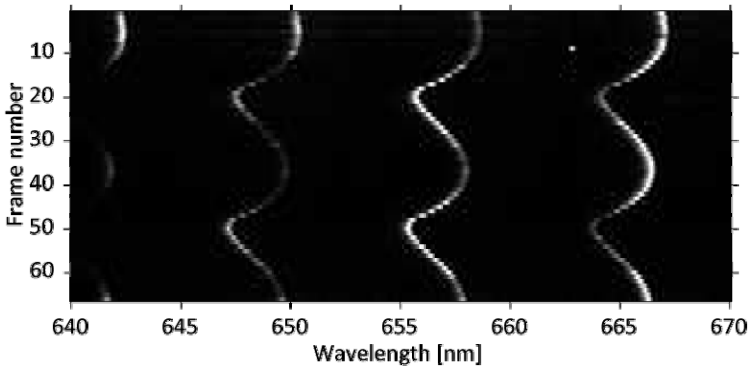


Şekil 6-4: Farklı sıvı kristal fazlarda SK emülsiyon mikrodamlalarında elektrik-alanın yol açtığı ışıma spektrumu taraması. (a) Radyal SK mikrodalmlaları; (b) bipolar SK mikrodamlaları. Küçük resimler incelenen mikrodamlaların görüntülerini gösterir. Ölçekler: 10 μm.

Radyal ve bipolar SK mikrodamlalarında uygulanan elektrik alan genliğine bağlı olarak elde edilen spektral tarama mekanizmalarının farklı olduğunu düşünüyoruz. Bipolar SK mikrodamlalar uygulanan elektrik alan ile bir bütün olarak dönerken (bakınız Şekil 6-3) radyal SK mikrodamlaların uygulanan elektrik alan ile radyal-simetriye sahip moleküler direktörlerinde bozunmalar gözlenmektedir. Bunun sonucu olarak kırınım indisi uzaysal profili değişmektedir (Humar *et al.* 2009). Şekil 6-4'te gösterilen spektral seriler için radyal mikrodamlalarda ~1.2 nm ve bipolar mikrodamlalarda ~1.4 nm spektral tarama gözlenmiştir.

6.2 Sıvı Elektrod Sistemi ile FGM Spektrumlarının Elektrik Alana Bağlı Taranması

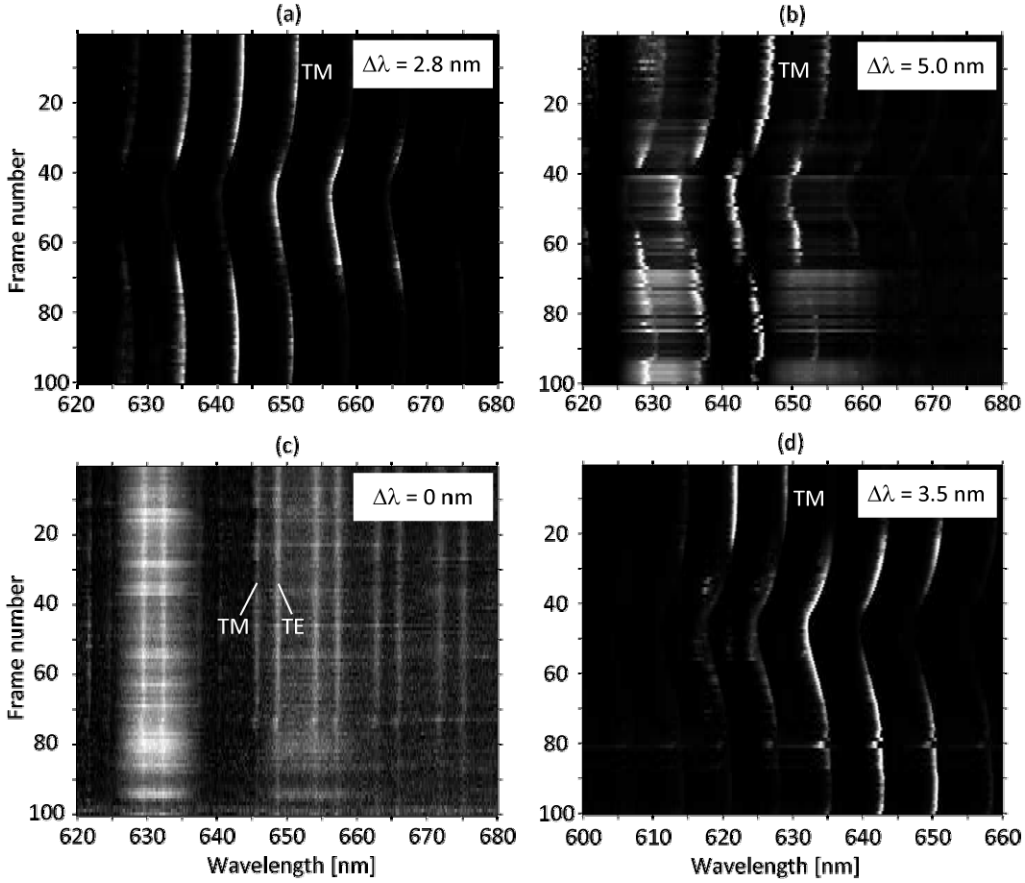
Bölüm 4.5'de açıklandığı gibi optik olarak tuzaklanmış SK emülsiyon mikrodamlalarına harici AC elektrik alan uygulanmasında kullanılan katı-hal elektrodlar kısmi olarak tuzaklama lazerini soğurmaktadır. Bunun sonucu olarak da örneğin ısınması spektral tarama deneylerini olumsuz etkilemektedir. Bu istenmeyen etkilerden tümüyle opak sıvı elektrodların kullanımı ile kurtulmak mümkündür (detaylar için bakınız Bölüm 4.5). Sıvı elektrodlu mikrofluidik çip temelli örnek odacıkları (detaylar için bakınız Şekil 4-5) ile SK emülsiyon mikrodamlalarının konak (host) sıvısının termal konveksiyonundan etkilenmeden stabil ve tümüyle üç boyutlu bir şekilde optik tuzaklanması mümkn olmaktadır. Bu sayede, mikrodamlalar uzun süreler boyunca gözlenip analiz edilmekte ve böylece deneysel düzenek daha rahat çalışılabilir bir hale gelmektedir.



Şekil 6-5: Sıvı elektrodlu bir mikrofluidikçip içinde hapsolmuş bir radyal SK emülsiyon mikrodamlasının (çap ~10 μm) ışıma spektrumunun elektrik alan ile spektral taranması.

10 μm çapındaki bir radyal SK emülsiyon mikrodamladan (5CB SK + 0.3 % w/w Nile Red boya molekülü + 1.05 mM SDS sürfaktan, su içinde) iki tarama döngüsü boyunca kaydedilen spektral seriler Şekil 6-5'de gösterilmektedir. Her bir tarama döngüsünde uygulanan 1 MHz'lik AC elektrik alanın genliği 0 Vpp (1, 35 ve 70 numaralı çerçeveler) ile 300 Vpp (20 ve 50 numaralı çerçeveler) arasında değişmektedir. Bu deney boyunca mikrodamla tek hüzmeli bir optik tuzak ile sabitlendi ve tuzaklama lazer gücü olarak 1 W kullanıldı. Şekil 6-4a'da gösterilen spektral seridekine göre SDS sürfaktan konsantrasyonunun azaltılması mikrodamlanın uygulanan elektrik alana daha hassas olmasına neden olmuştur. Bu etkinin sebebi SK moleküllerinin mikrodamla yüzeyine o kadar güçlü bir şekilde bağlanmamasıdır. Aynı zamanda mikrodamla kullanılan tuzaklama lazer gücünde oda sıcaklığında hala radyal SK fazda bulunmaktadır. Bu deneyde

kullanılan AC elektrik alanın maksimum genliği (~300 Vpp), tuzaklama lazer gücü (1 W) ve mikrodamla çapı (~10 μm) için gözlenen tersinir spektral tarama aralığı ~2.6 nm'dir. Bu spektral tarama aralığı benzer boyutta radyal SK mikrodamlasının kapiler tüp temelli örnek odacığında (bakınız Şekil 6-4a ve bu şekille ilgili tartışma yazısı) daha düşük sürfaktan konsantrasyonu ve daha yüksek AC elektrik alan genliği ile incelendiği deneylerde gözlenen spektral arama aralığından daha yüsektir.

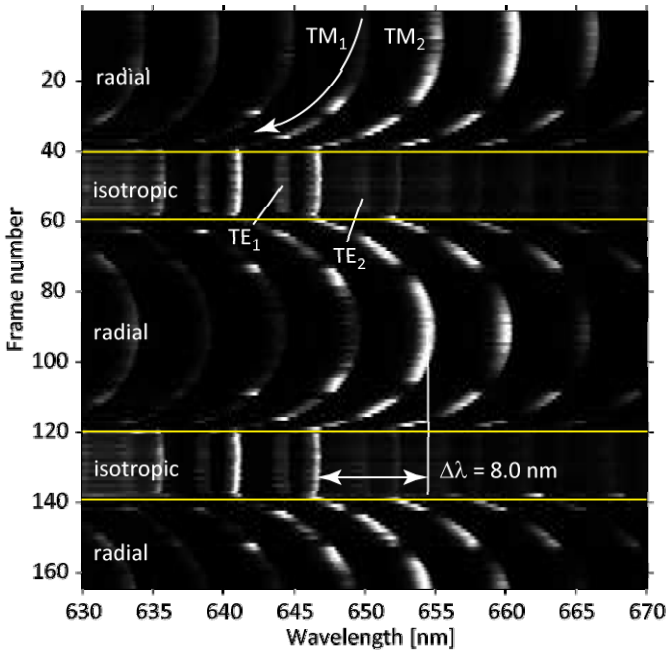


Şekil 6-6: Değişik tuzaklama lazer güçlerinde tuzaklanan SK emülsiyon mikrodamlasının modüle edilmiş AC elektrik alan ile spektral taraması. (a) P_{trap} = 1.0 W, (b) P_{trap} = 4.5 W, (c) P_{trap} = 7.0 W, (d) P_{trap} = 1.0 W. Şekildeki etiketler her durum için gözlenen maksimum spektral tarama aralığını Δλ verir. Mikrodamla çapı: ~12 μm.

Emülsiyon hazırlanmasında daha düşük sürfaktan konsantrasyonu kullanılması sonucu SK mikrodamlaları ortam sıcaklığının arttırılması gibi dış etmenlere daha hassas bir hale gelirler. Mikrodamla sıcaklığının mikrodamlanın AC elektrik alana olan cevabına olan etkisini test etmek için aynı SK mikrodamlasının tek hüzmeli optik tuzakta değişik tuzaklamalazer güçlerinde tutulduğu deneyler gerçekleştirdir. Bu sayede incelenen mikrodamlanın lazer

kaynaklı ısınma ile kontrollü bir şekilde eritilmesi mümkün oldu. Bir radyal SK emülsiyon mikrodamlası (çap ~12 μm) ile değişik tuzaklama lazer güçlerinde gerçekleştirilen deneyler serisinin sonuçları Şekil 6-6'da gösterilmektedir. Bu deneylerde mikrodamla aynı AC elektrik alan tarama döngüsüne (alan frekansı 1 MHz, alan genliği 1. çerçevede 0 Vpp ile 50. çerçevede 300 Vpp arasında arttırılır ve daha sonra 100. çerçevede tekrar 0 Vpp değerine düşürülür) maruz bırakılmıştır. Kullanılan en düşük tuzaklama lazer gücü olan 1 W için gözlenen spektral tarama aralığı, $\Delta\lambda$ = 2.8 nm, Şekil 6-5'de benzer boyuttaki mikrodamla için gözleneninkine çok yakındır. Tuzaklama lazer gücünün 4.5 W'a arttırılması daha yüksek spektral tarama aralığı ($\Delta\lambda$ = 5.0 nm) ile FGM pozisyonlarında artan belirsizliği beraberinde getirir. Bu artan belirsizlik sonucu mikrodamlada termal temelli faz geçişi de gölenir (bakınız Şekil 6-6b). Kullanılan en yüksek tuzaklama lzer gücü olan 7 W için ise (Şekil 6-6c) mikrodamla izotropik faza erir ve bunun sonucu olarak gözlenen FGM motifi ile elektrik alana mikrodamlanın ecvabı çok fazla değişir. Değişik açısal sıralarda TM-polarize FGM'lerin gözlenmesi (Şekil 3-1a ile karşılaştırın) yerine benzer genlikte hem TE hem de TM polarize FGM'ler (bakınız Şekil 3-1c) gözlenir. Bunula birlikte mikrodamla uygulanan elektrik alana karşı hassaslığını kaybeder ve FGM'lerin spektral pozisyonları alan genliğinin değiştirilmesiyle değişmez. Bunun sebebi, arttırılmış sıcaklıkta mikrodamla içindeki SK moleküllerinin sıradan bir sıvı gibi davranması ve uygulanan AC elektrik alan ile oryantasyonlarının değişmemesidir. Tuzaklama lazer gücü 1 W'a tekrar azaltıldığında, FGM'lerin ilke görünümleri ve uygulanan elektrik alana hassasiyetleri geri gelir (bakınız Şekil 6-6d). Bu durumda gözlenen spektral tarama aralığı, $\Delta\lambda$ = 3.5 nm, aynı koşullarda deney başında gözlenen spektral aralıktan (Şekil 6-6a) daha yüksektir. Bunu mikrodamlanın sıcaklığının hala önceki yüksek tuzaklama lazer güçlü deneylerden dolayı yüksek olmasına bağlıyoruz. Bunun sonucu olarak mikrodamla daha uyumlu davranır çünkü SK moleküllerinin düzenlerini geri getiren elastik kuvvetler termal kuvvetlerce kısımı olarak destabilize edilmektedir. Deneylerimiz gösterdi ki (sonuçlar gösterilmemekte) yüksek tuzaklama lazer gücü sonrası düşük tuzaklama lazer gücü ile yapılan ardışık deneylerde elde edilen spektral tarama aralığı zamanla, mikrodamlanın soğumasıyla azalmaktadır. Bütün bu sonuçlar birleştirildiğinde Şekil 6-6'da sunulan sonuçlar kanıtlamaktadır ki elektrik alan temelli yüksek spektral tarama elde edilmesi için mikrodamla içinde SK molekllerinin radyal düzende (kristalin) yapıyasahip olmaları gerekmektedir. Şekil 6-6a, 6-6b ve 6-6d'de gösterilen tarama eğrilerine daha yakından bakıldığında tarama döngüsü

boyunca meksimum ışıma genliğinin belli bir FGM'den başka bir FGM'ye doğru kaydığı gözlenir. Bu davranış FGM'lerin lazer ışıması özelliğinden kaynaklanmaktadır. Mikrodamla içsel yapısının uygulanan elektrik alanın modülasyonu ile değişmesi lazer kazancını ve FGM'lerin kalite faktörlerini değiştirir. Bunun sonucu olarak, başla uyarılmış ışıma ile yükseltilen bir FGM'nin genliği daha sonra daha az yükseltilebilir ya da bu etkinin tam tersi gözlenebilir.



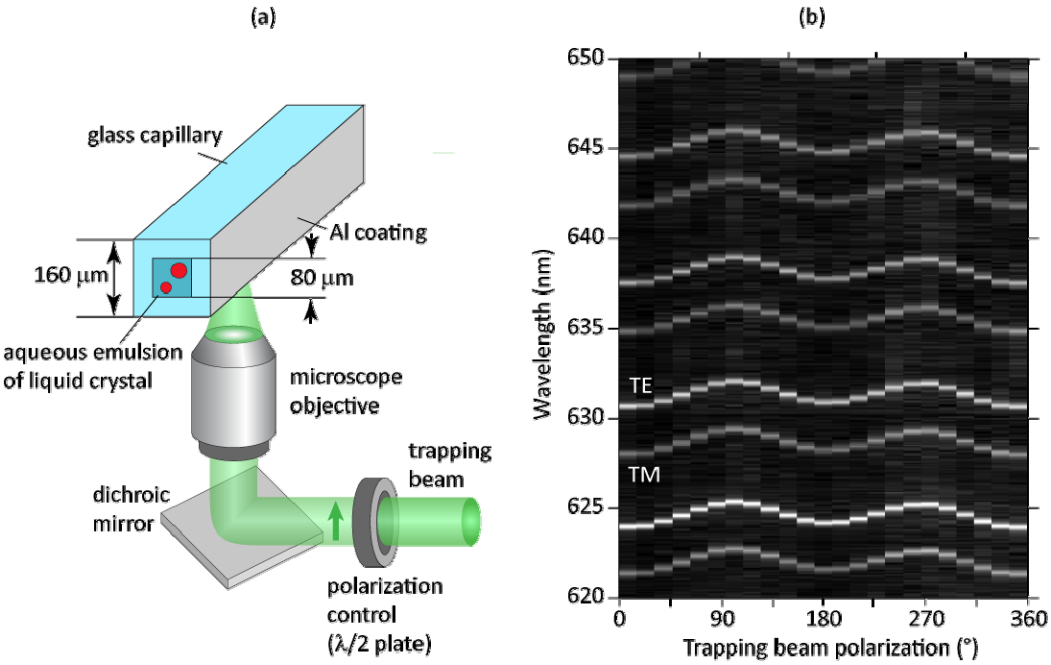
Şekil 6-7: Mikrodamlaya uygulanan elektrik alan genliğinin değiştirilmesi ile optik olarak tuzaklanmı bir SK emülsiyon mikrodamlasında tersinir bir şekilde gözlenen faz geçişi.

Deneylerimizde birçok defa – özellikle daha büyük mikrodamlalar (çap > 14 μm) kullanıldığında – AC elektrik alanının yüksek genliğinin düşük tuzaklama lazer gücünde mikrodamlada tersinir bir şekilde faz geçişine yol açtığı gözlendi. Şekil 6-7'de ~15.5 μm çapında bir radyal SK mikrodamlası ile gerçekleştirilen böyle örnek bir deneyin sonuçları gösterilmektedir. Bu deneyde tuzaklama lazer gücü 1 W'tır ve mikrodamla standart elektrik alan tarama döngüsüne (alan frekansı 1 MHz, alan genliği periyodik olarak 0 Vpp'dan 300 Vpp'ye ve daha sonra tekrar 0 Vpp'ye değiştirilir) maruz bırakılmıştır. Elektrik alan genliğinin 0 Vpp'den (çerçeve 1) arttırılmasıyla mikrodamla öncelikle geniş ($\Delta\lambda$ = 8 nm) ve sürekli spektral tarama gösterir. 40. çerçevede elektrik alan genliği ~250 Vpp'ye ulaşır ve bu anda mikrodamla aniden izotropik faza erir. Bu faz geçişi ile birlikte spektrumda daha önce gözükmeyen TE-polarize FGM'ler belirir. Ayrıca, daha fazla artan elektrik alan genliğine karşı çok düşük bir spektral hassasiyet gözlenir. Ancak, elektrik alan genliği ~250 Vpp'nin altına tekrar düşürüldüğünde spektral

motif ve elektrik alan genliğine karşı gözlenen spektral hassasiyet yeniden gözlenir. Bu davranış hemen hemen tümüyle tersinirdir ve ardaşık tarama döngüleri boyunca gözlenmiştir. Daha büyük SK mikrodamlalarının harici uyarıcılara (elektrik alan, sıcaklık) karşı yüksek hassasiyeti bu durumlarda daha yüksek spektal tarama aralıklarının gözlenmesine yol açar. Bunun nedeni, büyük mikrodamlalarda SK moleküllerinin mikrodamla yüzeyine bağlanmasının daha az önemli olmasıdır. Bunun sonucu olarak harici kuvvetler SK fazda etkin olan dahili oryantasyon kuvvetlerinin üstesinden gelirken daha az güçlük çekerler. Şekil 6-6‘da gösterilen tarama eğrilerinde olduğu gibi, bu durumda da maksimum ışıma genliğine sahip FGM tarama döngüsü boyunca değişir. Bunun nedeni belli bir dahili yapıda maksimum kazanca sahip FGM’nin lazer ışıması göstermesi sonucu oluşan doğrusal olmayan etkilerdir.

7 Tuzaklama Lazer Hüzmesinin Polarizasyonunun Kontrol Edilmesiyle SK Emülsiyon Mikrodamlalarının Işıma Spektrumlarının Taranması

Şekil 6-2'de gösterildiği gibi, bipolar SK mikrodamlalarının uzaysal yöneliminin kontrolü için tuzaklama hüzmesinin doğrusal polarizasyonunun kullanılması yeterlidir. Ancak, isotropik SK mikrodamlalarında tercih edilen bir mikrodamla yönelimi bulunmamaktadır ve bu mikrodamlaların sıradan sıvıların mikrodamlaları gibi davranmaları beklenir.



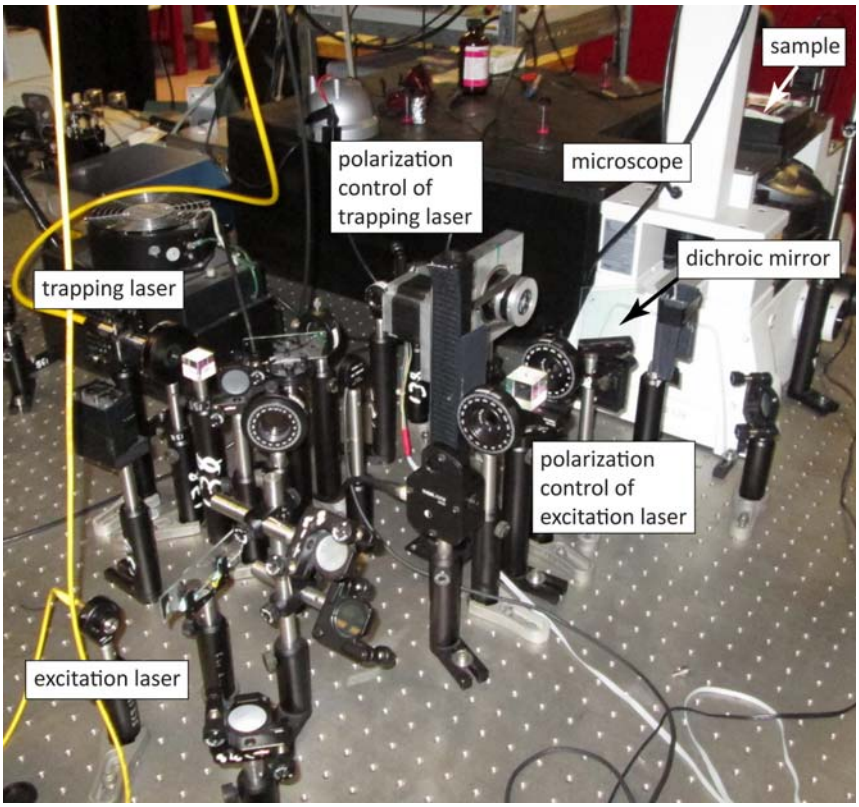
Şekil 7-1: Sıvı kristal (SK) emülsiyon mikrodamlalarının ışıma spektrumlarının tuzaklama lazer hüzmesinin polarizasonunun döndürülmesile. (a) Spektral tarama deneylerinde kullanılan deney düzeneğinin. Tuzaklama lazer hüzmesinin polarizasyonu optik eksene yerleştirilen bir λ/2 plakasının döndürülmesiyle kontrol edilir. (b) ~12 μm çapında, Al-kaplamalı kapiler tüp içinde bulunan bir mikrodamladan elde edilen örnek spektral tarama eğrisi. Örnek üzerindeki tuzaklama lazeri gücü ~150 mW'dir. Tuzaklama hüzme polarizasyonu 360° boyunca sürekli döndürülmüştür. Bunun sonucu olarak fısıldayan galeri modları (FGM'ler) ~1.2 nm'lik genlikle periyodik bir şekilde spektral olrak taranmıştır.

Buna karşın, sürpriz bir şekilde deneylerimiz optik cımbızlama ile tuzaklanmış isotropik mikrodamlaların ışıma spektrumlarının tuzaklama hüzmesinin polarizasyonuna bağlı olduğunu gösterdi. Şekil 7-1 isotropik bir SK emülsiyon mikrodamlasından (5CB + 0.3 % w/w Nile Red + 1200 mg/L Triton X100 su içinde, > 25 °C sıcaklık) elde edilen spektrumlar serisini göstermektdir. Bu deneyde Şekil 4-2'de gösterilen yan duvarları metal kaplamalı kapiler tüp temelli örnek odacığı kullanılmıştır ve elekrodlara AC elektrik alan uygulanmamıştır. Deney boyunca tuzaklama hüzme gücü 150 mW'da sabit tutulmuş ve tuzaklama hüzmesinin polarizasyonu bir yarım dalga plakası ile sabit bir oranda döndürülmüştür. Mikrodamla isotropik fazda olduğu için hem TM hem de TE FGM'ler spektrum serisinde benzer genliklerde görülmektedir (Şekil 3-1c'de gösterilen isotropik mikrodamla spektrumuyla da karşılaştırılabilir). Şekil 7-1'de gösterildiği gibi FGM'lerin spektral pozisyonları tuzaklama lazer hüzmesinin polarizasyonunun döndürülmesi sonucu periyodik bir modülasyona uğramaktasır. Gene olarak, tuzaklanmış SK mikrodamlalarının spektral tarama genliği tuzaklama lazer hüzmesinin gücünün arttırılması ve polarizasyonunun dönme oranının azaltılmasıyla arttığı gözlenmiştir. Çıplak camlı kapiler tüp içinde ve yüksek yansımalı dielektrik tabaka ile kaplı kenar camlara sahip kapiler tüpte de benzer etkileri gözlemiştik; ancak, bu her iki durumda da spektral tarama genliği oldukça düşüktü ve spektral tarama ancak yüksek tuzaklama güçlerinde gözlenmişti. Bütün bunlar Al-kaplamalı kapiler içinde tuzaklanan mikrodamlaların lazer soğurumu ile ısıtılması sonucu sıcaklıklarının artmasının önemine işaret etmişti.

FGM'lerdeki bu polarizasyon temelli spektral tarama mekanizmasını ortaya çıkarmak için sistematik ölçümler gerçekleştirdik. Bu amaçla, tuzaklama ve uyarı lazer hüzmelerinin bağımsız kontrolüne izin verecek ekilde deney düzeneğimizi modifiye ettik; bu amaçla hüzme yörüngelerine iki adet döndürülebilen $\lambda/2$ plakası yerleştirdik (Şekil 7-2). Daha sonra, optik olarak tuzaklanmış SK emülsiyon mikrodamlalarından değişik (uyarı ve tuzaklama hüzmesi) polarizasyon yönelimlerinde ve mikrodamla çeperinde değişik uyarı noktalarında ışıma spektrumları kaydettik.

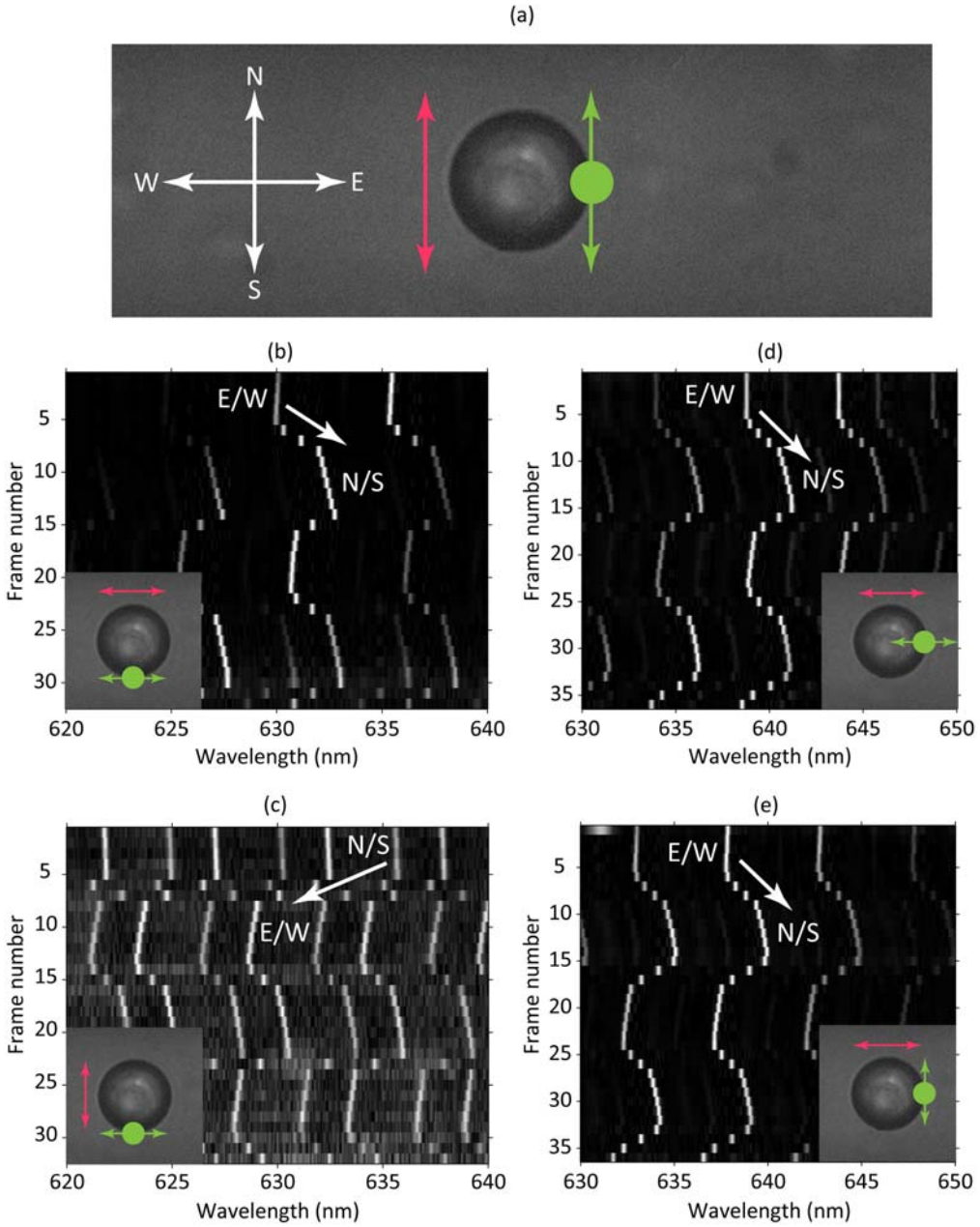
Deylerimizden elde edilen bu tür spektral tarama eğrilerinin özeti Şekil 7-3'te gösterilmektedir. Bu deneylerde 5CB + 0.3 % w/w Nile Red + 1200 mg/L Triton X100 emülsiyon sistemi kullanılmıştır. Bütün ölçümler için kullanılan polarizasyon yönelimleri ve uyarı hüzme odak pozisyonları şeklin açıklamasında

verilmiştir. Değişik spektral tarama eğrilerinin karşılaştırması aşağıdaki sonçlara işaret eder:



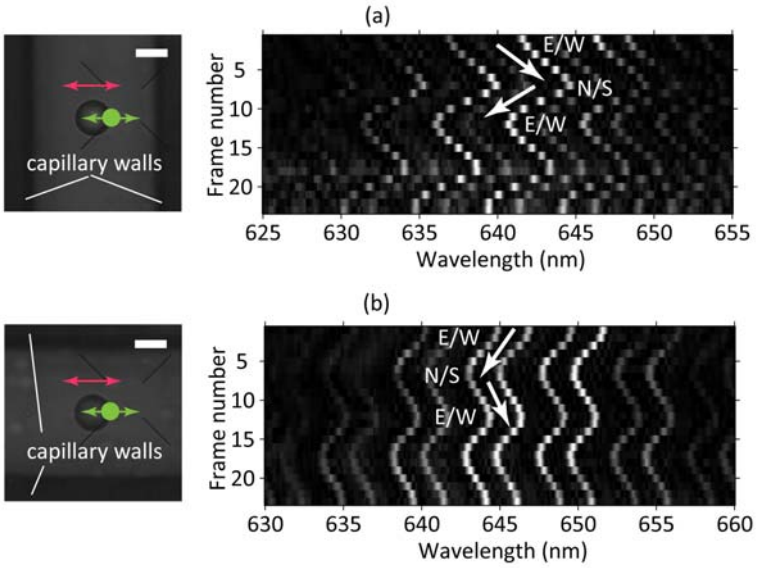
Şekil 7-2: SK emülsiyon mikrodamlalarından polarizasyon temelli spektral tarama elde edilmesi için kullanılan deney düzeneği. Tuzaklama ve uyarı hüzmelerinin polarizasyonu iki $\lambda/2$ plakası yardımıyla bağımsız olarak döndürülebilmektedir; tuzaklama hüzmesinin yolundaki $\lambda/2$ plakası bir stepper-motor ile bilgisayar ilekontrol edilebilmektedir. İki Renkli (dichroic) ayna iki hüzmenin optik mikroskoba gönderilmeden önce birleştirilmesini sağlar.

- Mikrodamlanın çeperinde uyarı hüzmesinin odak noktasının konumunun FGM spektral tarama yönüne bir etkisi yoktur (Şekil 7-3b, 7-3d ve 7-3e karşılaştırıldığında bu sonuca ulaşılır)
- Uyarı hüzmesinin polarizasyon yönünün FGM spektral tarama yönüne bir etkisi yoktur (Şekil 7-3d ve 7-3e'yi karşılaştırın)
- Tuzaklama hüzmesinin başlangıç polarizasyon yönünün 90 derece döndürülmesi FGM spektral tarama yönünün değiştirmektedir (Şekil 7-3b ve 7-3c'yi karşılaştırın)



Şekil 7-3: SK mikrodamla ışımasında spektral taramanın değişik tuzaklama ve uyarı hüzme konfigürasyonlarında gözlenmesi. (a) Polarizasyon yönlerinin ve uyarı hüzme odak noktasının mikrodamla görüntüsündeki konumunun tanımları. Kırmızı ok: tuzaklama hüzmesinin polarizasyonu (örnekte "N/S"), yeşil ok: uyarı hüzmesinin polarizasyonu (örnekte "N/S"), yeşil nokta: uyarı hüzme odak noktasının konumu (örnekte "E"). (b) Uyarı hüzme polarizasyonu "E/W", uyarı odak noktası "S" ve tuzaklama hüzme polarizasyonunun "E/W"'den "N/S"'ye hızlı döndürüldüğü durumda kaydedilen spektral tarama eğrisi. (c) Uyarı hüzme polarizasyonu "E/W", uyarı odak noktası "S" ve tuzaklama hüzme polarizasyonunun "N/S"'den "E/W"'ye hızlı döndürüldüğü durumda kaydedilen spektral tarama eğrisi. (d) Uyarı hüzme polarizasyonu "E/W", uyarı odak noktası "E" ve tuzaklama hüzme polarizasyonunun "E/W"'den "N/S"'ye hızlı döndürüldüğü durumda

kaydedilen spektral tarama eğrisi. (e) Uyarı hüzme polarizasyonu “N/S”, uyarı odak noktası “E” ve tuzaklama hüzme polarizasyonunun “E/W”’den “N/S”’ye hızlı döndürüldüğü durumda kaydedilen spektral tarama eğrisi. Beyaz oklar, tuzaklama hüzmesinin polarizasyonunun ilk değiştirilmesinden sonra FGM tarama yönünü gösterir.



Şekil 7-4: Kapiler tüp temelli örnek odacığının değişik oryantasyonlarında polarizasyon ile FGM’lerin spektral taraması. (a) Standart oryantasyondaki örnek odacığı (kapiler tüp duvarları N/S yönüne parallel). (b) 90 derece döndürülmüş oryantasyondaki örnek odacığı (kapiler tüp duvarları E/W yönüne parallel). Beyaz oklar polarizasyon döndürülmesi sırasındaki FGM tarama yönünü belirtir. Ölçek: 20 μm.

Yukarıda özetlenen spektral tarama trendlerinden şu sonuç çıkartılabilir: FGM spektral tarama yönü, uyarı lazer hüzmesinin tuzaklama lazer hüzmesinin polarizasyon vektörünü içeren düzleme göre konumundan bağımsızdır. Bu nedenle FGM dalgaboylarında tuzaklama hüzmesinin polarizasyonunun döndürülmesiyle gözlenen kaymalar doğrusal polarizasyonlu tuzaklama hüzmesi ile Al-kaplamalı kapileriden oluşan örnek odacığının asimetrik etkileşiminden kaynaklanmalıdır. Bu hipotezi doğrulamak için standart oryantasyonda (Al-kaplamalı kapiler tüp duvarları kameranın N/S yönüne paralel – tanım için bakınız Şekil 7-3a) ve 90 derece döndürülmüş oryantasyonda (Al-kaplamalı kapiler tüp duvarları E/W yönüne paralel) konumlandırılmış kapiler tüpler ile deneyler gerçekleştirdik.

Kapileri tüp temelli örnek odacığının iki konfigürasyonu için elde edilen spektral tarama eğrileri Şekil 7-4’de gösterilmektedir. Bu deneylerde benzer boyutlarda SK mikrodamlaları (~20 μm; 5CB + 0.3 % w/w Nile Red + 1200 mg/L

Triton X100 emülsiyon sistemi) kullanılmıştır. Her iki durumda da uyarıcı hüzme odak noktasını mikrodamla üzerinde aynı konumda ("E") tuttuk. Bu deneylerde uyarıcı hüzmenin polarizasyon yönelimi ("E/W"), tuzaklama hüzmesinin başlangıçtaki polarizasyon yönelimi ("E/W") ve tuzaklama gücü (250 mW mikroskobun girişinde) aynı idi. Tuzaklama hüzmesinin polarizasyonu 360° boyunca döndürüldü. Bunun sonucu olarak iki tam FGM tarama döngüsü elde edildi. Şekil 7-4a ve 7-4b karşılaştırıldığında anlaşılıyor ki diğer tüm deneysel parametreler aynı tutulurken kapiler tüpün ekseninin 90 derece döndürülmesi ile FGM'lerin spektral tarama yönü değiştiriliyor. Sonuç olarak FGM tarama yönünün tuzaklama hüzmesinin polarizasyonunun kapileri tüpe göre oryantasyonuna bağlı olduğu görülüyor. Bu davranış Al-kaplamalı kapiler tüp duvarlarının metal kaplamaya parallel veya dik polarizasyonda ışıkla aydınlatıldığında farklı derecede ısınmasıyla açıklanabilir. Genel olarak, kapileri tüp duvarlarına göre tuzaklama hüzmesinin polarizasyonu döndürüldüğünde, tuzaklama hüzmesinin Al-kaplamalı duvarlar tarafından ısınması sonucu elde edilen ısınma değişir. Isınma miktarı polarizasyon yönü Al-kaplamalı kapiler tüp duvarlarına parallel olduğunda maksimum olur (Şekil 7-4a), bu N/S yönünde polarizasyon yönelimine denk gelir. Öte yandan polarizasyon yönü E/W yönünden N/S yönüne doğru döndrüldüğünde ısınma miktarı kademeli olarak artar ve bunun sonucu olarak mikrodamla FGM'lerinde kırmızı-kayma gözlenir (Aas *et al*. 2013b); polarizasyonun ters yönde döndürülmesi ise (N/S'den E/W yönüne) mikrodamla FGM'lerinin mavi-kayma göstermesine neden olur (Şekil 7-4a). Kapiler tüp ekseni 90 derece döndürüldüğünde ise durum tersine değişir; tuzaklama hüzmesinin maksimum soğurumu polarizasyon yönü E/W olduğunda gözlenirken polarizasyonun N/S yönüne doğru kademeli değiştirilmesi ısınma miktarını azaltır ve dolayısıyla FGM dalgaboylarında mavi-kayma gözlenir (Şekil 7-4b).

8 Sonuç

Bu ikili işbirliği projesi ile boya molekülü katkılı, başka bir sıvıda optik tuzaklama ile hapsolmuş SK emülsiyon mikrodamlaları minyatür ve spektral olarak taranabilir lazer ışık kaynakları olarak geliştirilmiş ve karakterize edilmiştir. Bu amaçla birçok değişim boya molekülü katkılı SK ve konak (host) sıvı – sürfaktan kombinasyonları araştırıldı. İncelenen SK emülsiyon mikrodamlalarının harici uyaranlar (sıcaklık değişimi, AC elektrik alan) ile optik özelliklerinin değiştirilmesine ve aynı zamanda tek hüzmeli veya iki hüzmeli optik tuzaklama ile tuzaklanmalarına izin veren birçok yeni örnek odacıkları tasarlandı, üretildi ve test edildi. Bu örnek odacıkları kullanılarak, ortam sıcaklığının kontrollü değiştirilmesinin neden olduğu SK faz geçişleri sayesinde SK mikrodamla temelli bir optik rezonatörün FGM ışıma spetrumunun geniş spektral aralıklarda ve (hemen hemen) tersinir bir şekilde taranabildiği gösterildi. Ssabit bir fazda (radyal veya izotropik) bulunan bir mikrodamla ışıma spektrumunun da sıcaklık ile tersinir bir şekilde spektral taranması gösterildi. Bunların yanında, değişen genlik ve frekansta uygulanan harici AC elektrik alanın çiftkutuplu (birefringent) rezonatörün etkin kırınım indisinin uzaysal profilini değiştirmesiyle optik olarak tuzaklanmış SK mikrodamla rezonatörlerinin FGM'lerininspektral olarak taranabileceği de çalışmalarımızda gösterildi. Elde ettiğimiz sonuçlar, bu yaklaşımlar ile mikrofluidik çipler içine tümleştirilebilecek, minyatür, taranabilir, fazuyumlu ışık kaynaklarının geliştirilebileceğini göstermektedir. Bu yaklaşımlar arasında, özellikle, SK mikrodamlalarının elektrik alan temelli spektral taraması için kullanılan sıvı elektrodlar barındıran mikrofluidik çip çekici bir uygulama platformu oluşturmaktadır.

Proje süresince elde edilen sonuçlar birçok uluslararası konferansta sunulmuş ve optofluidik ile fotonik alanlarında çalışmalar yapan bilimsel komunite tarafından çok pozitif geri bildirimler alınmıştır. Halen elde edilen en çarpıcı sonuçların veyeni bulguların özetlenildiği bir uluslararası makale sonlandırılmak üzeredir. Bu makalenin yüksek etkili bir uluslararası dergiye (Lab on a Chip, ACS Photonics vb.) gönderilmesi hedeflenmektedir.

9 Kaynakça

Aas M, Jonas A, Kiraz A (2013a). Lasing in optically manipulated, dye-doped emulsion microdroplets. Optics Communications 290:183–187

Aas M, Jonas A, Kiraz A, Brzobohaty O, Jezek J, Pilat Z, Zemanek P (2013b). Spectral tuning of lasing emission from optofluidic droplet microlasers using optical stretching. Optics Express 21:21380–21394

Ashkin A, Dziedzic JM, Bjorkholm JE, Chu S (1986). Observation of a single-beam gradient force optical trap for dielectric particles. Optics Letters 11:288-290

Azzouz H, Alkhafadiji L, Balslev S, Johansson J, Mortensen NA, Nilsson A, Kristensen A (2006). Levitated droplet dye laser. Optics Express 14:4374–4379

Burnham DR, McGloin D (2006). Holographic optical trapping of aerosol droplets. Optics Express 14:4175-4181

Chen RH (2011) Liquid Crystal Displays: Fundamental Physics and Technology, Wiley

Cipparrone G, Mazzulla A, Pane A, Hernandez RJ, Bartolino R (2011). Chiral self-assembled solid microspheres: a novel multifunctional microphotonic device. Advanced Materials 23:5773–5778

Cizmar T, Brzobohaty O, Dholakia K, Zemanek P (2011). The holographic optical micro-manipulation system based on counter-propagating beams. Laser Physics Letters 8:50-56

Coles H, Morris S (2010). Liquid-crystal lasers. Nature Photonics 4:676–685

Crawford GP, Zumer S (1996) Liquid Crystals in Complex Geometries: Formed by Polymer and Porous Networks, Taylor & Francis

Fan X, White IM (2011). Optofluidic microsystems for chemical and biological analysis. Nature Photonics 5:591–597

Guck J, Ananthakrishnan R, Mahmood H, Moon TJ, Cunningham CC, Kas J (2001). The optical stretcher: a novel laser tool to micromanipulate cells. Biophysical Journal 81:767-784

Hossein-Zadeh M, Vahala KJ (2006). Fiber-taper coupling to Whispering-Gallery modes of fluidic resonators embedded in a liquid medium. Optics Express 14:10800–10810

Humar M, Ravnik M, Pajk S, Musevic I (2009). Electrically tunable liquid crystal optical microresonators. Nature Photonics 3:595–600

Humar M, Musevic I (2010). 3D microlasers from self-assembled cholesteric liquid-crystal microdroplets. Optics Express 18:26995–27003

Karadag Y, Aas M, Jonas A, Anand S, McGloin D, Kiraz A (2013). Dye lasing in optically manipulated liquid aerosols. Optics Letters 38:1669-1671

Kiraz A, Sennaroglu A, Doganay S, Dundar MA, Kurt A, Kalaycoglu H, Demirel AL (2007). Lasing from single stationary, dye-doped glycerol/water microdroplets located on a superhydrophobic surface. Optics Communications 276:145–148

Monat C, Domachuk P, Eggleton BJ (2007). Integrated optofluidics: A new river of light. Nature Photonics 1:106–114

Musevic I (2013). Nematic colloids, topology, and photonics. Philosophical Transactions of The Royal Society A 371:20120266

Qian SX, Snow JB, Tzeng HM, Chang RK (1986). Lasing droplets: highlighting the liquid-air interface by laser emission. Science 231:486–488

Ramos L and Weitz DA (2001). Patterned colloidal coating using adhesive emulsions. Langmuir 17:2275-2277

Righini GC, Dumeige Y, Feron P, Ferrari M, Nunzi Conti G, Ristic D, Soria S (2011) Whispering gallery mode microresonators: Fundamentals and applications. Rivista Del Nuovo Cimento 34:435–488

Squires TM, Quake SR (2005). Microfluidics: Fluid Physics at the nanoliter scale. Reviews of Modern Physics 77:977–1026

Vahala KJ (2003). Optical microcavities. Nature 424:839–846.