Mikroakışkan Çip İçinde Optik Esnetme ile Taranabilen Mikrodamla Lazerlerinin Geliştirilmesi

Proje No: 111T059

Doç. Dr. Alper KİRAZ Dr. Alexandr JONÁŠ Mehdi AAS

Fizik Bölümü, Koç Üniversitesi, Rumelifeneri Yolu, Sariyer, 34450 Istanbul, Türkiye

> Prof. Dr. Pavel ZEMÁNEK Dr. Oto BRZOBOHATÝ Dr. Jan JEŽEK Zdeněk PİLÁT

Institute of Scientific Instruments of the ASCR, v.v.i., Královopolská 147, 61264 Brno, Czech Republic

OCAK 2014 İSTANBUL

Önsöz

Bu raporda TÜBİTAK ve Çek Cumhuriyeti Bilimler Akademisi (Academy of Sciences of the Czech Republic) tarafından desteklenen 111T059 numaralı "Mikroakışkan Çip İçinde Optik Esnetme ile Taranabilen Mikrodamla Lazerlerinin Geliştirilmesi" başlıklı araştırma projesinden elde edilen sonuçlar açıklanmaktadır.

Proje kapsamında optik manipülasyon teknikleri kullanılarak değişik mikrodamla mikrolazerleri geliştirilmiş ve geliştirilen mikrolazerler spektroskopik olarak karakterize edilmiştir. Optik cımbızlama kullanılarak manipüle edilen sıvı içindeki emülsiyon mikrodamlalarında veya havadaki aerosol mikrodamlalarında lazer ışıması gözlenmiştir. Optik esnetme kullanılarak emülsiyon mikrodamlaları bir mikroakışkan çip içinde sabitlenmiş ve mikrodamlanın deformasyonu ile spektral olarak taranabilen lazer ışıması elde edilmiştir. Süperhidrofobik yüzey üzerinde duran mikrodamlalar kullanılarak FRET lazeri ve bakterileri kazanç ortamı olarak kullanan "biyolojik" bir mikrodamla lazeri geliştirilmiştir. Ayrıca çift hüzmeli optik tuzaklama düzeneği ile kırmızı kan hücrelerinin mekanik özelliklerinin anlaşılması üzerine çalışmalar yürütülmüştür. Elde edilen sonuşların organik ışık kaynaklarının geliştirilmesi ve biyo-algılama gibi konularda sonuçlara yol açması beklenmektedir.

Projedeki çalışmalar Koç Üniversitesi Nano-Optik Araştırma Laboratuvarı ile Bilimsel Aygıtlar Enstitüsü, Brno Çek Cumhuriyeti'nde proje ekibi tarafından gerçekleştirilmiştir. Proje ekibi Türkiye'de Doç. Dr. Alper Kiraz, Dr. Alexandr Jonáš ve Mehdi Aas ile Çek Cumhuriyeti'nde Prof. Dr. Pavel Zemánek, Dr. Oto Brzobohatý, Dr. Jan Ježek ve Zdeněk Pilát'tan oluşmuştur. Ayrıca proje boyunca Dr. Yasin Karadağ ile Martin Šiler çalışmalara önemli katkılarda bulunmuştur.

İçindekiler

1	Giri	iş10					
2	Ön çalışmalar11						
2.1 Gerçekleştirilen satın almalar							
2.2 Uygun Sıvıların Seçimi ile İlgili Çalışmalar ve Deneyler							
3	Opt	ik c	umbızlama ile tuzaklanana emülsiyon mikrodamlalarında lazer ışıması				
göz	gözlenmesi16						
4	4 Optik cımbızlama ile havada manipüle edilen sıvı aerosollarda lazer ışımasının						
göz	zlenm	esi					
5	Opt	ik es	netme ile taranabilen mikrodamla lazeri geliştirilmesi				
5	5.1 Mikroakışkan çip üretimi27						
5.2 Elde edilen sonuçlar							
5.2.1 Ku			Kullanılan Yağ/Su Emülsiyon Sistemi				
5.2.2		2.2 Emülsiyon mikrodamlalarının yüzey geriliminin azaltılması					
5.2.3 Benzeşimler ve beklentiler			Benzeşimler ve beklentiler				
	Deneysel sonuçlar ve tartışma						
	5.2.	5	Microfluidik damla üretimi				
6	Proje konusuyla ilgili olarak yürütülen diğer çalışmalar4						
6.1 Sıvı kristal mikrodamlalarda spektral olarak taranabilen lazer ışıması gözlenme							
6.2 Su tutmayan yüzey üzerindeki mikrodamlaları temel alan FRET lazeri gös							
6.3 Kazanç ortamı olarak bakteri hücrelerini bulunduran mikrodamla lazeri ç							
		43					
6	6.4	4 Kırmızı kan hücrelerinin optik esnetme ile elastik özelliklerinin incelenmesi4					
7	Sonuç49						
8	Referanslar						

Tablolar Listesi

Tablo 2-1: Deneylerde kullanılan değişik sıvıların temel özellikleri	14
Tablo 2-2: Deneylerde kullanılan değişik boya moleküllerinin temel özellikleri	14

Şekiller Listesi

Sekil 2-1: Laboratuvarımızda kurulumu ve testi tamamlanan 10 W çıkış gücünde sürekli Sekil 2-2: Laboratuvarımızda kurulumu ve testi tamamlanan Teknofil marka UV aydınlatma Sekil 2-3: Laboratuvarımızda kurulumu ve testi tamamlanan Princeton Instruments marka PIXIS 100 model hassas spektroskopik CCD kamera.12 Sekil 2-4: Düşük kırınım endeksine sahip Cargille yağı içindeki 45 □m çapında gliserol/su mikrodamlasından gözlenen lazer ışıması spektrumu. Bu gösterimde gliserol/su Şekil 3-1: Küçük resim optik olarak tuzaklanmış bir mikrodamlanın tuzaklama ve pompalama hüzemelerine göre konumunu göstermektedir. D1, D2 – cift renkli aynalar, F – band geciren, FM – katlanabilir ayna, L1, L2 - mercekler, M - ayna, PBS – polarize hüzme ayırıcı, WP – $\lambda/2$ dalga plakası......17 Şekil 3-2: Optik olarak manipule edilen bir mikrodamlada lazer ışıması (çap 27 µm). Oklar alt yüzey üzerinde duran sabit bir referans mikrodamlasını göstermektedir. Tuzaklanan mikrodamla önce düzlemde (a)-(b) daha sonra da şeklin düzleminden dışa doğru hareket Şekil 3-3: Mikrodamla ışımasının pompa lazer gücüne göre değişimi. 620 nm'de bulunan bir FGM'nin ve rezonan olmayan arkaplan ışımasının pompa lazer gücü ile değişimi gösterilmiştir. Küçük şekil ölçülen ışıma değerlerinin spektral konumunu gösterir. Bu ölçümdeki mikrodamlanın çapı 31 µm'dir.....20 ışıması dalgaboyunun mikrodamla çapı ve boya molekülü Sekil 3-4: Lazer konsantrasyonuna göre değişimi. Mikrodamla boyutu ve boya molekülü konsantrasyonu spektrumların yanında belirtilmiştir. Bu deneylerde kullanılan ortalama pompa gücü ve pozlandırma zamanı 0.7 mW ve 6 ms'dir.....21 Şekil 3-5: Kendinden sönmenin lazer ışıması spektrumuna etkisi. 34 µm çapındaki mikrodamladan kaydedilen 1., 9., ve 19. Spektrumlar. Bütün spektrumlar için ortalama pompa gücü ve pozlandırma zamanı 1.8 mW ve 10 ms'dir......21

Şekil 4-1: 9.4µm çapındaki bir gliserol/su mikrodamlasından değişik uyarı fluenslerinde kaydedilmiş ışıma spektrumları: (a) 0.49mJ/cm², (b) 1.70mJ/cm², and (c) 3.06mJ/cm². WGM A ve WGM B lazer ışıması gösteren FGM'leri göstermektedir. Küçük reism: Lazer ışıması Şekil 4-2: 9.4 µm çapındaki gliserol/su mikrodamlasında lazer ışıması gösteren FGM'lerin ve Sekil 4-3: Caplari 7.7, 8.4, 9.0, 9.6, 10.1, and 11.0 µm (aşağıdan yukarıya) olan 6 farklı aerosoldan 2.41mJ/cm²'lik aynı uyarı lazer fluensinde kaydedilen lazer ışıması spektrumları (b) Lazer ışıması gösteren 34 aerosolün FSR'lerinin ortalama lazer ışıması dalgaboyuna Şekil 5-1: Kaplaması kaldırılmış 125 µm çapındaki bir optik fiber ve iki adet 160 µm genişliğinde kare kapiler ile elde edilen kalıp......27 Şekil 5-2: Kaplaması kaldırılmış 125 µm çapındaki bir optik fiber ve iki adet 600 µm Şekil 5-4: (üst) Elde edilen mikroakışkan çipin şematik görüntüsü. "Inlet" ve "outlet" kullanılarak emülsiyon damlaları mikrokanala doldurulur. (alt) Mikroakışkan çip içinde bulunan hassas ayarlanmış iki multimod fiber (cekirdek (core) çapı 50 µm kaplama (cladding) çapı 125 µm). PDMS kare kanalın genişliği 160 µm fiber uçları arası mesafe 134 µm'dir.....29 Şekil 5-5: 160 µm genişliğinde mikrokanala ve optik fiber eklenmesi için 125 µm genişliğinde Şekil 5-6: 600 µm genişliğinde mikrokanala ve optik fiber eklenmesi için 125 µm genişliğinde Sekil 5-7: İki adet üç-boyutlu hareket sehpası ile tutulan optik fiberler PDMS mikroakışkan Sekil 5-8: Ters geometrideki mikroskopa adapte edilmiş fiber-tuzaklama düzeneğinin Sekil 5-9: Çift hüzmeli optik tuzak tarafından sabitlenmiş bir mikrodamlanın görüntüsü.......32 Şekil 5-10: (a) Deneysel düzeneğin çizimi, (b) Mikrodamla uyarı geometrisi, (c) 49 µm Şekil 5-11: Interfacial measurement setup with a Teflon Wihelmy plate probe in the flat interface of dye doped immersion oil/AOT-NaCI-Water solution(5mM-40mM respectively). .35 Sekil 5-12: (a) Prolat sferoid (prolate spheroid) sematiği, (b) Üç boyutlu ışın izleme benzeşim sonucları. Fiberlerin ekseni üzerinde (on axis) veya bu eksene dik bir noktada (off axis) uyarı olduğunda optik esnetme lazer gücüne bağlı olarak FGM'lerin spektral pozisyonlarının değişimi. Bu benzeşimde 50 µm çapında bir mikrodamla, 1.5 mN/m arayüz gerilimi, iki

Özet

Proje kapsamında optik manipülasyon teknikleri kullanılarak değişik mikrodamla mikrolazerleri geliştirilmiş ve geliştirilen mikrolazerler spektroskopik olarak karakterize edilmiştir. Bunun için optik cımbızlama ve çift hüzmeli optik tuzaklama düzenekleri kurulmuş bu düzenekler optik spektrometre ile birllestirilmistir. Cift hüzmeli optik tuzaklama düzeneği mikroakışkan çip içinde optik fiberler ile gerçekleştirilmiştir. Kurulan deney düzenekleri ile gerçekleştirilen deneylerde birçok yeni mikrolazer geliştirilmiştir. Bu deneylerde optik cımbızlama kullanılarak manipüle edilen sıvı icindeki emülsiyon mikrodamlalarında veya havadaki aerosol mikrodamlalarında lazer ısıması gözlenmistir. Optik esnetme kullanılarak emülsiyon mikrodamlaları bir mikroakışkan cip içinde sabitlenmiş ve mikrodamlanın deformasyonu ile spektral olarak taranabilen lazer ışıması elde edilmiştir. Ayrıca bu deney düzenekleri ile halen kırmızı kan hücrelerinin elastik özelliklerinin incelenmesi, mikrodamla FRET lazerlerinin gelistirilmesi ve kazanc ortamı olarak bakterileri barındıran mikrodamla lazerlerin geliştirilmesi üzerine çalışmalar yürütülmektedir. Projede elde edilen sonuçlar şu ana kadar uluslararası dergilerde dört yayına dönüştürülmüştür, en az bir yayın ise hazırlanma aşamasındadır ve yakında uluslararası dergilere gönderilecektir. Proje sonuçlarının organik ışık kaynaklarının geliştirilmesi ve biyo-algılama gibi konularda çalışmalara esin kaynağı olması beklenmektedir.

Anahtar Kelimeler

Fısıldayan galeri kipi, mikrodamla, optik manipülasyon, optik cımbızlama, optik esnetme, optik spektroskopi, boya lazeri, biyolojik lazer, FRET lazeri, kırmızı kan hücresi

Abstract

With this project novel droplet resonator-based microlasers have been developed and characterized using optical spectroscopy experiments. For that purpose, experimental setups were built for optical tweezing and dual-beam optical trapping of droplet resonators and these setups were combined with optical spectrometers. The dual-beam optical trap was realized using optical fibers in a microfluidic chip. Novel microlasers were demonstrated with experiments using these setups. In these experiments, lasing was observed in emulsion microdroplets or aerosol microdroplets manipulated in a liquid or in air with optical tweezing. Emulsion microdroplets were also stabilized in a microfluidic chip with a dual-beam optical trap, and stretched using optical stretching giving rise to tunable laser emission due to geometrical deformation. These experimental setups are still being used for characterization of elastic properties of red blood cells, developing microdroplet FRET lasers, and microdroplet lasers which have bacteria as their gain medium. Up to now, project results were published in four international journal poublications. At least one other publication is currently in preparation and will soon be submitted to an international journal. Overalli the project results are expected to conitrubute to the development of novel organic light sources and bio-sensors.

Keywords

Whispering gallery mode, microdroplet, optical manipulation, optical tweezers, optical stretching, optical spectroscopy, dye laser, biological laser, FRET laser, red blood cell

1 Giriş

Ayarlanabilir büyüklüklere, şekillere ve kırılım indislerine sahip sıvı mikrodamlalara dayanan optik mikrokovuklar, yüksek kaliteli optik rezonansları (fısıldayan galeri kiplerini) barındırırlar [1]. Bu özellikleri, mikrokodamlalarıı, ışık kaynakları, kimyasal sensörler ve biyosensörler gibi çip entegreli optofluidik uygulamalarda kullanışlı hale getirmiştir [2]. Mikrodamlaların optofluidik sistemlerde kullanılmasını içeren pek çok yöntem geliştirilmektedir [3]. Bu yöntemler arasında mikroakışkan çiplerde mikrodamlaların incelenmesi önemli bir yer tutar [4]. Mikroakışkan çip içindeki mikrodamlaların [5-7] pozisyonlarını optik manipüasyon yöntemleri ile sabitlemek ve entegre dalgakılavuzları / fiber optik kablolar ile etkileşmelerini sağlamak mümkündür.

Projenin amacı mikroakışkan çipler içinde bulunan mikrodamlalardan spektral olarak taranabilen mikrolazerler elde edilmesi olmuştur. Bu kapsamda mikroakışkan çip içinde bir çift hüzmeli optik tuzak kullanılarak optik esnetme yöntemi ile mikrodamlalar deforme edilmesi [8-9]. Bu sayede mikrodamlaların fısıldayan galeri kiplerinden (FGK'lerden) elde edilen lazer ışımasının spektral taranması başarılmıştır. Bu yöntem ile mikrodamla lazer ışıması spektral olarak 0.5 nm'ye yakın değerlerde düşük dalgaboyu ya da yüksek dalgaboyuna doğru taranabilmiştir. Ayrıca bu süreçte optik esnetme için kullanılan lazerin mikrodamlayı ısıtmasının etkileri de incelenmiştir.

İki senelik proje süresince gerçekleştirilen çalışmalar aşağıdaki alt başlıklarda toplanmıştır:

a) Ön çalışmalar, satın almalar, uygun sıvı sistemlerinin ve boya moleküllerinin belirlenmesi

b) Optik cımbızlama ile tuzaklanana emülsiyon mikrodamlalarında lazer ışıması gözlenmesi

c) Optik cımbızlama ile havada manipüle edilen sıvı aerosollarda lazer ışımasının gözlenmesi

d) Optik esnetme ile taranabilen mikrodamla lazeri geliştirilmesi

e) Biyolojik kazanç ortamlı mikrodamla lazerinin geliştirilmesi

Bu altbaşlıklar ilerleyen bölümlerde detaylandırılmaktadır.

2 Ön çalışmalar

2.1 Gerçekleştirilen satın almalar

Projemizin ilk döneminde iki adet şırınga pompası hariç tüm demirbaş parçaların satın alımı tamamlanmıştır. Aşağıda satın alımı tamamlanan fiber lazer sistemi, UV aydınlatma sistemi ve hassas CCD kamera sisteminin laboratuvarımızdaki kurulmuş olarak fotoğrafları sunulmaktadır.

Fiber Lazer Sistemi



Şekil 2-1: Laboratuvarımızda kurulumu ve testi tamamlanan 10 W çıkış gücünde sürekli dalga kipinde çalışan IPG Photonics marka Yb fiber lazeri.

UV Aydınlatma Sistemi



Şekil 2-2: Laboratuvarımızda kurulumu ve testi tamamlanan Teknofil marka UV aydınlatma sistemi.

Hassas CCD Kamera



Şekil 2-3: Laboratuvarımızda kurulumu ve testi tamamlanan Princeton Instruments marka PIXIS 100 model hassas spektroskopik CCD kamera.

2.2 Uygun Sıvıların Seçimi ile İlgili Çalışmalar ve Deneyler

Projemizde birbirine karışmayan, aralarındaki kırınım endeksi farkının yüksek olduğu ve yoğunlukları birbirine yakın iki sıvının belirlenmesi gerekmektedir. Bu sıvılardan yüsek kırınım endeksine sahip olanı mikrodamla sıvısı diğeri ise ortam sıvısı olarak kullanılacaktır. Ayrıca projemizdeki lazer ışıması çalışmaları için seçici bir şekilde mikrodamla sıvısına ya da mikrodamla yüzey, ile ortam arasındaki arayüze katkılandırılacak boya moleküllerinin belirlenmesi gerekmektedir. Projemizin ilk döneminde bu amaçla aşağıdaki sıvı sistemleri ve boya molekülleri üzerinde çeşitli deneyler gerçekleştirilmiştir. Kullanılan bu sıvı sistemleri ve boya molekülleri tablo 2-1 ve 2-2'de listelenmiştir. Bu denemelerimiz sonucunda mikroskop daldırma (immersion) yağı ve distile su sistemi ile DI(3) boya molekülü en uygun sıvı sistemleri ve boya molekülü olarak belirlenmiştir.

Sıvı adı	Katalog	20°C'de	Yoğunluk	Çözünürlük	Yüzey
	Numarası	kırınım	(g/cm³)		gerilimi
		endeksi			(mN/m)
Su	Deiyonize	1.334	1.00		72.8
Gliserol		1.474	1.261	Suda	64.8
				çözünür	
Benzil alkol		1.539	1.045	Suda kısmen	39
				çözünür (4	
				g/mL)	
Cargille	43421	1.293	1.88	Suda	Bilinmiyor
firmasından				çözünmez	
satın alının					
düşük kırınım					
endeksine					
sahip sıvı					
Cargille	16482	1.515	0.923	Suda	Bilinmiyor
firmasından	Туре А			çözünmez	

mikroskop					
endeks					
eşlleştiren					
daldırma yağı					
Merck	104699	1.515	1.02	Suda	Bilinmiyor
mikroskop				çözünmez	
daldırma yağı					

Tablo 2-1: Deneylerde kullanılan değişik sıvıların temel özellikleri

Boya molekülü adı	Uyarı dalgaboyu (nm)	lşıma dalgaboyu aralığı (nm)	Çözücü
Rhodamine B	532	560-660	Su, etanol
PDI	532	560-660	Kloroform
Dil(3)	532	570-660	Kloroform

Tablo 2-2: Deneylerde kullanılan değişik boya moleküllerinin temel özellikleri

Deneylerimizde ilk olarak gliserol/su mikrodamlaları düşük kırınım endeksine sahip Cargille firması sıvısı içinde incelenmiştir. Bu çalışmalarda istenen fısıldayan galeri modları (FGMler) yapısı ve lazer ışıması gözlemlense de (Şekil 2-4'de görüldüğü gibi) bu sıvı sisteminin optik tuzaklama için uygun olmadığı anlaşılmıştır. Bunun temel nedeni mikrodamla sıvısı ile ortam sıvısı arasındaki yüksek yoğunluk farkıdır. Ortaya çıkan yüksek kaldırma kuvveti bu sistemde optik tuzaklamayı zorlaştırmıştır.



Şekil 2-4: Düşük kırınım endeksine sahip Cargille yağı içindeki 45 □m çapında gliserol/su mikrodamlasından gözlenen lazer ışıması spektrumu. Bu gösterimde gliserol/su mikrodamlaları 100 µM Rhodamine B boya molekülü ile katkılandırılmıştır.

3 Optik cımbızlama ile tuzaklanana emülsiyon mikrodamlalarında lazer ışıması gözlenmesi

Çalışmalarımız için uygun olduğu belirlenen daldırma yağı, su ve DI(3) boya molekülü sistemi ile ilk olarak tek hüzme ile optik tuzaklama (optik cımbızlama) çalışmaları greçekleştirilmiştir. Bu mikrodamlalarda lazer ışıması gözlenmiş ve elde edilen sonuçlarımız 10 numaralı referansta verilen Optics Communications dergisindeki makalede yayınlanmıştır.

Şekil 3-1'de tek hüzmeli bir optik tuzak ile tuzaklanan mikrodamlalarda lazer ışıması görmek için kullanılan deney düzeneği görülmektedir. Sürekli dalga kipinde çalışan bir kızılötesi lazer (dalgaboyu 1064 nm, ortalama güç 300 mW) optik tuzaklama için kullanılmıştır. Bu lazer hüzmesi hüzme genişleticiden geçirildikten sonra iki çift renkli aynadan yansıtılmış ve örnek odacığına bir su daldırmalı mikroskop objektifi (Nikon, NA=1.2, 60x) ile odaklanmıştır. Dil(3) boya molekülü ile katkılandırılmış mikrodamlalar ayrıca pasif Q-anahtarlamalı bir katı-kal (dalgaboyu 1064 nm, darbe genişliği 20 ns ve tekrar oranı 33 kHz) lazerinin çıkışının ikinci harmonik dönüşümü ile elde edilen 532 nm yeşil lazer ile pompalanmıştır. Pompa lazeri aynı mikroskop objektifi kullanılarak mikrodamlaların çeperine yakın noktalara odaklanmıştır. Tuzaklanmış mikrodamladan elde edilen ışıma aynı mikroskop objektifi ile toplanmış ve monokromatör ve CCD kameradan oluşan bir optik spektrometre ile spektroskopik olarak incelenmiştir. Boya moleküllerinin çabuk fotosönmesini (photobleach) engellemek için deney düzeneğine spektrometre ile senkronize çalışan bir örtücü (shutter) eklenmiştir.



Şekil 3-1: Küçük resim optik olarak tuzaklanmış bir mikrodamlanın tuzaklama ve pompalama hüzemelerine göre konumunu göstermektedir. D1, D2 – çift renkli aynalar, F – band geçiren, FM – katlanabilir ayna, L1, L2 - mercekler, M - ayna, PBS – polarize hüzme ayırıcı, WP – $\lambda/2$ dalga plakası.

Deneyler için seçilen mikrodamla emülsiyon sistemi daldırma yağı ve sudan oluşmaktadır. Bu iki sıvı arasında yüksek bir kırınım endeksi farkı ve düşük bir yoğunluk farkı vardır. Bu optik tuzaklamayı kolaylaştırırken daldırma yağı mikrodamlalarında FGMlerin barınabilmesine olanak vermektedir. Ayrıca daldırma yağı mikrodamlalarının hidrofobik yüzeyleri de deneylerden kullanılan cam lamellerin yüzeyine mikrodamlaların yapışmasını engelleyerek deneysel kolaylık sağlamıştır.

Deneylerde kullanılan boya molekülü Dil(3) (1,1'-Dioctadecyl-3,3,3',3'-tetramethylindo carbocyanine perchlorate, Sigma Aldrich) hidrofilik bir kromofora ve hidrofobik yan halkalara sahiptir dolayısıyla sürfaktan özelliği gösterir. Bu boya molekülünün soğurma maksimum dalgaboyu 550 nm, ve ışıma maksimum dalgaboyu ise yaklaşık 590 nm'dir. Sürfaktan özeeliğinden dolayı bu boya molekülleri yağ-sıvı arayüzüne yerleşirler ve aynı bölgede bulunan FGMlerin çok verimli bir şekilde uyarılmasını sağlarlar (Holler1998). Deneylerimizde Dil(3) kloroform içinde çeşitli yoğunluklarda çözülmüş ve daldırma yağına 1'e 9 oranında

eklenmiştir. Mikrodamlalar Dil(3) katkılı daldırma yağının su ile 1'e 50 oranında birleştirilmesi ve elde edilen solüsyonun elle hızlı bir şekilde karıştırılması ile elde edilmiştir. Bu şekilde <1 ile 100 µm arasında çaplara, 1.506 kırınım endeksine ve 0.1 ila 1 mM Dil(3) katkısına sahip mikrodamlalar elde edilebilmiştir. Hazırlanan emülsiyon sistemi daha sonra iki cam lamelden yapılan bir kapiler odacığın içine aktarılmıştır.

Optik spektrumlarda gözlenen serbest dalgaboyu aralığı (free-spectral range) $\Delta\lambda$, ortalama lazer ışıması dalgaboyu λ ve kırınım endeksleri (mikrodamla sıvısı n₂= 1.506 evsahibi sıvı n₁ = 1.334) kullanılarak mikrodamlaların yarıçapları *a* aşağıdaki asimtotik ilişki ile belirlenmiştir [11]:



Tek Optik Hüzmeli Tuzak ile Tuzaklanan Mikrodamlalarla Elde Edilen Sonuçlar

Şekil 3-2'de tek hüzmeli optik tuzak ile manipule edilen 27 µm çapındaki bir mikrodamla lazerinden elde edilen sonuçları göstermektedir. Bu mikrodamla üç değişik konuma manipule edilmiş ve bu konumlarda lazer ışıması elde edilen ışıma spektrumlarında gözlenmiştir. Işıma spektrumlardan Dil(3) boya molekülünün 580-650 nm arasındaki genel ışıması ile birlikte 615 nm civarında bazı FGMlerin yüksek genlikte ışıması görülmektedir. Yüksek genlikte ışıma gösteren bu FGMlerde lazer ışıması gözlenmektedir. Bir boya lazerinin karakteristik özelliği olarak lazer ışıması gösteren FGMler Dil(3) ışımasının maksimumuna (yaklaşık 590 nm) göre kırmızı dalgaboylarında yer alır. Bunun nedeni boya moleküllerinin kendinden soğurmasından dolayı 615 nm bölgesinin daha az soğurmanın olduğu lazer ışıması için daha uygun bir bölge olmasıdır.



Şekil 3-2: Optik olarak manipule edilen bir mikrodamlada lazer ışıması (çap 27 μm). Oklar alt yüzey üzerinde duran sabit bir referans mikrodamlasını göstermektedir. Tuzaklanan mikrodamla önce düzlemde (a)-(b) daha sonra da seklin düzleminden dısa doğru hareket ettirilmiştir (b)-(c).

Lazer ışımasının gözlenmesi için aktif ortamın sağladığı kazancın kavite kayıplarından fazla olması gerekmektedir. Bu koşul ancak bir eşik pompalama gücü aşıldığında sağlanabilir. Şekil 3-3'de 31 µm çapında bir mikrodamla çin gerçekleştirdiğimiz eşik pompa gücü analizi gösterilmektedir. Bu ölçümde bir FGMden toplanan ışıma ile arkaplan ışıması pompa lazer gücüne göre analiz edilir. FGM ışımasının eşik pompa gücüne kadar arkaplan ışımasına paralel bir şekilde arttığı eşik gücünden yukarıda ise doğrusal olmayan bir şekilde arttığı görülür. Pompa lazeri gücüne doğrusal olmayan bir şekilde bağlı olan FGM ışıması lazer ışımasının gözlendiğinin tartışmasız kanıtını oluşturur. Şekil 7'deki mikrodamla için eşik pompa gücü değeri aynı şekilde incelenmiş ve 26 ile 40 µm çapındaki iki mikrodamla için eşik pompa güçleri 140 ile 35 µW olarak belirlenmiştir. Bu sonuçlarda daha büyük mikrodamlalar için elde edilen daha küçük eşik pompa gücü değerleri literatürdeki diğer çalışmalarla da uyumlu olmuştur (Tang2011).



Şekil 3-3: Mikrodamla ışımasının pompa lazer gücüne göre değişimi. 620 nm'de bulunan bir FGM'nin ve rezonan olmayan arkaplan ışımasının pompa lazer gücü ile değişimi gösterilmiştir. Küçük şekil ölçülen ışıma değerlerinin spektral konumunu gösterir. Bu ölçümdeki mikrodamlanın çapı 31 µm'dir.

Mikrodamla lazer ısımasının spektral pozisyonu boya molekül konsantrasyonuna ve mikrodamla çapına göre değişir (Tang2011). Şekil 3-4'de değişik çaplara ve boya molekülü konsantrasyonlarına sahip mikrodamlalar ile elde edilen deney sonuçları gösterilmektedir. Bu sonuclarda aynı boya molekülü konsantrasyonunda mikrodamla boyutu arttıkca lazer ısıması dalgaboyunun kırmızıya kaydığı görülmektedir. Ayrıca benzer çapa ve farklı boya molekülü mikrodamlalarla yaptığımız çalışmalar konsantrasyonlarına sahip boya molekülü konsantrasyonu arttıkça lazer ışıması dalgaboyunun kırmızıya kaydığını göstermiştir. Bu sonuçlar literatürde daha önce rapor edilen sonuçlarla uyumludur (Vezenov2005, Tang2011). Lazer ışımasında spektral tarama bir mikrodamlada zamanla gözlenen kendinden sönmeden (photobleaching) dolayı da gözlenmiştir. Bu sonuçlar Şekil 3-5'de gösterilmektedir. Bu şekilde aynı mikrodmala için pompalama zamanı arttıkça boya moleküllerinin kendinden sönmesinden dolayı lazer ışımasının mavi dalgaboylarına kaydığı açıkça görülmektedir.



Şekil 3-4: Lazer ışıması dalgaboyunun mikrodamla çapı ve boya molekülü konsantrasyonuna göre değişimi. Mikrodamla boyutu ve boya molekülü konsantrasyonu spektrumların yanında belirtilmiştir. Bu deneylerde kullanılan ortalama pompa gücü ve pozlandırma zamanı 0.7 mW ve 6 ms'dir.



Şekil 3-5: Kendinden sönmenin lazer ışıması spektrumuna etkisi. 34 µm çapındaki mikrodamladan kaydedilen 1., 9., ve 19. Spektrumlar. Bütün spektrumlar için ortalama pompa gücü ve pozlandırma zamanı 1.8 mW ve 10 ms'dir.

4 Optik cımbızlama ile havada manipüle edilen sıvı aerosollarda lazer ışımasının gözlenmesi

Bu çalışmamız 12 numaralı referansta verilen Optics Letters dergisindeki makalede yayınlanmıştır. Opik cımbızlama ile havada manipüle Rhodamine B ile katkılandırılmış 7.7 ile 11.0 µm arasında çapa sahip gliserol-su mikrodamlalarında lazer ışıması gözlenmiştir. Bu çalışmada bir kızılötesi lazer mikrodamlaların optik cumbızlama ile tuzaklanmasında kullanıldı (λ =1064nm, 300mW maksimum güç; Crystalaser). Tuzklama lazer hüzmesi yüksek nümerik açılı bir mikroskop objektifi (NA=1.2, 60x su daldırmalı; Nikon) ile odaklandı. Tuzaklama lazerinin odak noktasındaki gücü 5-10 µm çaplarındaki mikrodamlaları tuzaklamak için 3.5 mW seviyesine sabitlendi. Bir Q-anahtarlamalı Nd:YVO4 lazerinin ışımasının frekans ikilemesi ile 532 nm'de darbeli yeşil lazer hüzmesi tuzaklama lazer hüzmesi tuzaklama lazer oranı) elde edildi. Bu pompalama lazer hüzmesi tuzaklama lazer hüzmesi ile birleştirilerek örneğe gönderildi. Yeşil pompa lazer hüzmesi nyoluna yerleştirilen bir hüzme örtücü pompa lazerinin mikrodamlaları sadece belirli zamanlarda pompalamasını sağladı.

Deneylerde, tuzaklama ve pompalama lazer hüzmeleri örnek odacığının alt kısmında bulunan cam lamel üst yüzeyi üzerine yaklaşık 20 µm yüksekliğe odaklanmıştır. Fısıldayan galeri modlarının (FGMlerin) verimli pompalanabilmesi için pompa lazeri odak noktası yaklaşık olarak mikrodamlaların kenarına ayarlanmıştır.

Tuzaklanan mikrodamlalardan gelen lazer ışıması aynı mikroskop objektifi ile toplandı ve bir monokromatör (odak uzaklığı 500 mm; Acton research) ve CCD kameradan (Princeton Instruments Pixis 100) oluşan bir spektrometre ile algılandı. Mikrodamlalardaki boya moleküllerinin hızlı sönmelerini (photobleaching) engellemek için pompa lazer ışınının yoluna bir hüzme örtücü (shutter) yerleştirildi. Hüzme örtücünün çalışması 10 ms'lik pozlama süresi boyunca CCD kamera ile senkronize edildi. Kompakt bir ultrasonik nebülizatör (JIH50; Beuer) kullanılarak % 39 oranında gliserol ve 1 mM Rhodamine B bulunduran gliserol-su mikrodamlaları üretildi (mikrodamla kırınım endeksi n_{int} = 1.38, yoğunluk ρ =1.099 g/cm³). Ultrasonik nebülizatörün kapalı bir cam örnek odacığına eklenmesiyle üretilen mikrodamlaların dış havak akımlarından etkilenmesi engellendi ve ayrıca odacık içinde hemen hemen sabit bir neme ulaşıldı. Ar/O2 plazma ile muamele edilmiş bir lamel örnek odasının altına tutturuldu. Lamellerin plazma temizliğine maruz bırakılması yüzeylerinde yeterli hydrofilikliğe erişilmesini sağladı. Böylece lamel yüzeyinde büyük damlaların oluşması yerine homojen bir sıvı filmin oluşması sağlandı. Bu tuzaklama ve pompalama lazer hüzmelerinin odak dağılımının bozulmaması için bu gereklidir. Deneyler sırasında, tuzaklanan mikrodamlacların ilk çapları 5 mikron civarında idi. Büyük damlacıklar daha sonra tuzaklama noktasına çekilen başka mikrodamlaların mevcut mikrodamla ile füzyonu ile elde edilmiştir. En sonunda elde edilen tuzaklanan mikrodamlaların çapları mikroskop görüntülerinden tahmini olarak elde edilmiş ve FGM spektrumlarında gözlenen serbest dalgaboyu aralığı (free spectral range, $\Delta\lambda$) ile hassas bir şekilde belirlenmiştir. Bunun için dalgaboyu ve bilinen kırınım katsayıları (mikrodamla için n_{int}=1.38, hava için n_{ext}=1.00) aşağıdaki asimptotik formülünün içine yerleştirilerek yarıçap (*a*) belirlenmiştir [11]:

$$a = \frac{\lambda^2}{2\pi n_{ext} \Delta \lambda} \frac{\arctan\left(\left[\left(\frac{n_{int}}{n_{ext}}\right)^2 - 1\right]^{1/2}\right)}{\left[\left(\frac{n_{int}}{n_{ext}}\right)^2 - 1\right]^{1/2}}$$

9.4µm çapında tuzaklanmış bir gliserol/su mikrodamlasından değişik uyarı fluenslerinde kaydedilen ışıma spektrumları Şekil 1'de gösterilmektedir. Şekil 4-1(a)'da düşük uyarı fluensinde lazer ışıması göstermeyen FGM'ler görülmektedir. Genel olarak FGM'ler radyal, azimutal ve açısal mode saıları ve polarizasyon (TE ya da TM) ile karakterize edilir. Şekil 1(a)'da aynı mod ailesine mensup (radyal mod sayıları ve polarizasyonları yanı) FGM'ler gösterilmektedir. Böyle iki ardışık FGM arasındaki spektral mesafeden 10.7 nm'lik FSR belirlenmiştir. Lazer ışımasının gözlenmesi için kavitedeki kayıpların net kavite kazancından daha düşük olması gerekir. Uyarı fluensi ve mikrodamlanın içindeki boya molekülü miktarı bu koşulun saplanması için kritik öneme sahiptir. Şekil 4-1(b) ve 4-1(c)'de görüldüğü gibi A ve B ile gösterilen λ = 608nm ve λ = 618nm civarındaki iki FGM eşik fluensleri olan 0.76 mJ/cm² ve 0.84mJ/cm² değerlerinin üzerinde lazer ışıması göstermektedir.



Şekil 4-1: 9.4µm çapındaki bir gliserol/su mikrodamlasından değişik uyarı fluenslerinde kaydedilmiş ışıma spektrumları: (a) 0.49mJ/cm², (b) 1.70mJ/cm², and (c) 3.06mJ/cm². WGM A ve WGM B lazer ışıması gösteren FGM'leri göstermektedir. Küçük reism: Lazer ışıması gösteren tuzaklanmış mikrodamlanın optik mikroskop görüntüsü.



Şekil 4-2: 9.4 µm çapındaki gliserol/su mikrodamlasında lazer ışıması gösteren FGM'lerin ve arkaplan ışıması seviyelerinin uyarı fluensi ile değişimleri.

Şekil 4-2'de lazer ışıması gösteren FGM A ve FGM B'nin ve arkaplan ışıması seviyelerinin uyarı fluensi ile değişimi gösterilmektedir. FGM A ve FGM B için elde edilen eğrilerin analiz edilmesi sonucu bu FGM'ler için eşik uyarı fluens değerleri 0.76mJ/cm² ve 0.84mJ/cm² olarak belirlenmiştir. Beklenildiği gibi arkaplan ışımalarının doğrusal olarak arttığı bir lazer ışıması eşiği göstermediği görlmüştür. Küçük mikrodamlalarda karşılaşılan yüksek radyatif kayıplar FGM'lerin alite faktörlerinin (Q-faktörlerinin) üstsel olarak azalmasına neden olur. Bu da lazer ışıması gözlenen mikrodamlaların çapı için bir alt sınır oluşturur. Bizim deneysel koşullarımızda bu alt limit 7.7 µm olarak belirlenmiştir. Bu değerden düşük çaplı mikrodamlalarda lazer ışıması gözlenmemiştir.

Aynı boya molekülü konsantrasyonu için mirodamla çapı arttıkça lazer ışıması gösteren FGM'lerin spektral pozisyonunun daha büyük dalgaboylarına (kırmızıya) doğru kaydığı gözlenmiştir. Şekil 4-3(a) bu etkiyi göstermektedir. Bu şekilde sabit 2.41mJ/cm²'lik uyarı fluensinde 6 değişik çapa sahip mikrodamlanın lazer ışıması spektrumları gösterilmektedir. Herhangi bir mikrodamla için ortalama lazer ışıması dalgaboyu (mean lasing wavelength, $\lambda_{ortalama}$) lazer ışıması gösteren modların şiddetleri ile ağırlıklı ortalamanın hesaplanması ile elde edilir. $\lambda_{ortalama}$ ile FSR arasındaki ilişki 34 mikrodamla için Şekil 4-3(b)'de gösterilmektedir. İncelenen mikrodamla çap aralığında (7.7µm ile 11.0µm arasında) SR'nin $\lambda_{ortalama}$ 'nın artışı ile ile hemen hemen doğrusal orantılı bir şekilde azaldığı gözlenmiştir. Bu ilişki literatürde daha önce yapılan çalışmalarda da gözlenmiştir [7].



Şekil 4-3: Çapları 7.7, 8.4, 9.0, 9.6, 10.1, and 11.0 μm (aşağıdan yukarıya) olan 6 farklı aerosoldan 2.41mJ/cm²'lik aynı uyarı lazer fluensinde kaydedilen lazer ışıması spektrumları (b) Lazer ışıması gösteren 34 aerosolün FSR'lerinin ortalama lazer ışıması dalgaboyuna (λ_{ortalama}) göre dağılımı.

Bu çalışmada boya molekülü katkılı optik cımbızlama ile havada tuzaklanan gliserol/su mikrodamlalarından lazer ışımasının gözlendiğini gösterdik. Mikrodamla boyutunu değiştirilmesiyle lazer ışıması dalgaboyunun 600-630 nm aralığında taranabildiğini gözlemledik. Bu sonuçlar ile uyarılmış ışımanın kavite şekli, boyutu ve malzeme özelliklerine olan hassas ilişkisi kullanılarak aerosollerin kimyasal ve biyolojik analizde yeni yöntemler geliştirilmesine yol açılmıştır.

5 Optik esnetme ile taranabilen mikrodamla lazeri geliştirilmesi

Bu çalışmamız 13 numaralı referansta verilen Optics Express makalesinde yayınlanmıştır.

5.1 Mikroakışkan çip üretimi

İki karşı-yayılıma sahip (counter propagating) hüzme ile kare mikroakış kanalını bulunduran mikroakışkan çip kendi yapımımız bir kalıp kullanılarak PDMS ile üretilmiştir. Kalıp hazırlanırken kaplaması kaldırılmış bir optik fiber parçası cam alttaşın üzerine UV ile aktive olan yapıştırıcı (Loctite 3922 and 3494) ile yapıştırılır. İki kare kapiler tüb (600 veya 160 µm dış kalınlık) optik fiberin ortasına yakın bir noktada fiberin iki tarafına UV ile aktive olan yapıştırıcı ile yapıştırılır. Elde edilen "+" şeklindeki yapı (Şekil 5-1 ve 5-2), pleksiglas bir çerçeve ile çevrelenir (Şekil 1(c)) ve bu çerçevenin içine PDMS boşaltılır.



Şekil 5-1: Kaplaması kaldırılmış 125 µm çapındaki bir optik fiber ve iki adet 160 µm genişliğinde kare kapiler ile elde edilen kalıp.



Şekil 5-2: Kaplaması kaldırılmış 125 μm çapındaki bir optik fiber ve iki adet 600 μm genişliğinde kare kapiler ile elde edilen kalıp.



Şekil 5-3: Pleksiglasdan imal edilen çerçeve.

Kalıbın kaldırılması ile elde edilen PDMS blok bir lamel (kalınlık: 160 µm) ile birlikte oksijenargon mikrodalga plazmasında aktive edilir (oxygen-argon 1:1, 500 mTorr, 50W). Aktive edilen parçalar birbirine yapıştırılır ve böylece mikroçip üretimi tamamlanır. Böylece Şekil 5-4'de gösterildiği gibi bir kare kanala ve kanal etrafında birbiriyle hizalanmış iki boş kanala sahip mikroçip elde edilmiş olur.

Hedeflendiği gibi 30-40 µm çapında mikrodamlaların tuzaklanması ve optik esnetme ile esnetilmesi için aynı boyutlarda hüzmelere ihtiyaç vardır. Bu nedenle iki değişik optik fiber kullanılmıştır: Mod alan çapı 6.2 µm olan tek modlu fiber (SM980-5.8-125, NA=0.14, Thorlabs) ile çekirdek çapı 50 µm olan mülti mod fiber (AFS50/125Y, NA=0.22, Thorlabs).

Tek modlu fiberden 80 µm mültimod fiberden ise 300 µm mesafede istenen 30-40 µm hüzme çaplarına ulaşılacağı hesaplanmıştır. Bu nedenle 160 µm'luk kapiler kanalın tek modlu fiber ile 600 µm'luk kapiler kanalın ise mülti modlu fiber ile kullanımı uygun olmuştur.



Şekil 5-4: (üst) Elde edilen mikroakışkan çipin şematik görüntüsü. "Inlet" ve "outlet" kullanılarak emülsiyon damlaları mikrokanala doldurulur. (alt) Mikroakışkan çip içinde bulunan hassas ayarlanmış iki multimod fiber (çekirdek (core) çapı 50 µm kaplama (cladding) çapı 125 µm). PDMS kare kanalın genişliği 160 µm fiber uçları arası mesafe 134 µm'dir.



Şekil 5-5: 160 µm genişliğinde mikrokanala ve optik fiber eklenmesi için 125 µm genişliğinde hizalanmış deliklere sahip PDMS mikroakışkan çipin görüntüsü.



Şekil 5-6: 600 µm genişliğinde mikrokanala ve optik fiber eklenmesi için 125 µm genişliğinde hizalanmış deliklere sahip PDMS mikroakışkan çipin görüntüsü.



Şekil 5-7: İki adet üç-boyutlu hareket sehpası ile tutulan optik fiberler PDMS mikroakışkan çipe eklenmiştir. Bütün düzenek bir mikroskop sehpasının üzerine sabitlenmiştir.



Şekil 5-8: Ters geometrideki mikroskopa adapte edilmiş fiber-tuzaklama düzeneğinin görüntüsü.

Kaplamalarından çıkartılan optik fiberler bir fiber kesici ile kesildikten sonra iki adet 3 boyutlu hareket sehpası yardımıyla mikroakışkan çipin içine eklenmiştir. Düzenek bir ters mikroskobun üzerindeki mikroskop sehpasına sabitlenmiştir (Şekil 5-7 ve 5-8). Görüntüleme bir su daldırmalı mikroskop obkjektifi (NA=1.2, 60x) ile yapılmıştır. Fiberlerin optimum pozisyonları ulaşıldığında çip ile fiberler arasındaki bağlantılar bir sıvı cam yapıştırıcısı (sodyum silikat solüsyonu) ile dışarıdan mühürlenmiştir. Yaklaşık 1 saat bekledikten sonra sıvı cam yapıştırıcı kurumuştur. Kapiler kanaldaki sıvı cam yapıştırıcısı kalıntıları %10 sodyum hidroksit solüsyonu ile temizlenmiştir. Çift hüzmeli optik tuzak tarafından sabitlenmiş bir mikrodamlanın görüntüsü Şekil 5-9'da verilmektedir.



Şekil 5-9: Çift hüzmeli optik tuzak tarafından sabitlenmiş bir mikrodamlanın görüntüsü.

5.2 Elde edilen sonuçlar

Projemizde hedeflendiği gibi mikroakışkan çip içindeki emülsiyon mikrodamlaları kullanılarak optikesnetme ile taranabilen lazer gösterimi gerçekleştirilmiştir. Optik esnetme ile taranabilen mikrodamla lazeri çalışmalarında kullanılan deneysel düzenek Şekil 5-10(a)'da gösterilmektedir. Bu düzenek bir PDMS mikroakışkan çip, bir çift hüzmeli fiber tuzak, bir tek hüzmeli optik cımbız, bir yeşil pompa lazeri, bir görüntüleme kamerası ve bir spektrometreden oluşur. Kullanılan PDMS mikroakışkan çip 160 µm kare kesite sahip bir kanal ve iki tane hassas olarak hizalanmş multimod fiberden (çekirdek (core) çapı 50 µm kaplama (cladding) çapı 125 µm) oluşur. Mikroakışkan kanalın bir girişi ve bir çıkışı bulunmaktadır ve girişten bir şırınga yardımı ile önceden hazırlanan emülsiyon mikrodamlaları kanalın içine gönderilir. PDMS mikroakışkan çip bir xyz hareket sehpasının üzerine sabitlenip su daldırmalı mikroskop objektifi (Nikon, NA=1.2, 60x) bulunduran bir ters geometride mikroskopun üzerine yerleştirilir.



Şekil 5-10: (a) Deneysel düzeneğin çizimi, (b) Mikrodamla uyarı geometrisi, (c) 49 μm çapındaki bir mikrodamladan kaydedilen örnek bir lazer ısıması spektrumu.

Çift hpzmeli optik tuzak için kullanılan lazer kaynağı 1070 nm'de ışıyan bir Ytterbium fiber lazeridir (IPG Photonics YLM-10-LP-SC). Bu lazer hüzmesinin gücü polarize hüzme ayırıcıları ve λ/2 dalgaplakaları ile ayarlanarak iki eşit parçaya bölünerek iki multimod fibere aktarılır. Optik esnetme deneyleri sırasında iki hüzmeli optik tuzak gücü değiştirildiğinde iki koldaki lazer gücünde ufak değişiklikler görülmüş bu da tuzaklanan mikrodamlanın konumunu değiştirilmesine neden olmuştur. Bunu engellemek için deneylerde ayrıca bir tek hüzmeli optik cımbızlama tuzağı da kullanılarak mikrodamlanın pozisyonu sabitlenmiştir. Bunun için 300 mW maksimum güce sahip 1064 nm'de ışıyan bir katı hal lazeri (CrystaLasers) mikroskop objektifi ile odaklanmıştır. Ev yapımı bir Q-anahtarlamalı Nd:YVO4

lazerinin ikinci harmonik dönüşümü sonucu elde edilen 532 nm'deki ışıma pompa lazeri olarak mikroskop objektifi ile tuzaklanan mikrodamlanın çeperine yakın yerlerde istenen değişik noktalara odaklanmıştır. Mikrodamlalardan yayılan lazer ışımasının spektral dağılımı aynı mikroskop objektifi ile toplandıktan sonra bir monokromatör (focal length 500 mm; Acton Research) ve CCD kameradan (Pixis 100; Princeton Instruments) oluşan spektrometre ile çözümlenmiştir. Pompa Izeri ve spektrometre bir hüzme engelleyici ile senkronize hale getirilmiş bu sayede mikrodamlaların sürekli pompa lazerine maruz bırakılıp kazanç ortamı olan boya moleküllerinin zamanla sönmeleri (photobleaching) engellenmiştir.

5.2.1 Kullanılan Yağ/Su Emülsiyon Sistemi

Çalışmalarımız içn boya molekülü ile katkılandırılmış mikroskop daldırma yağı (n=1.515, p=1.024g/cm3, Merck) mikrodamla sıvısı deiyonize su (n=1.334, p=1.00g/cm3) ise ortam sıvısı olarak seçilmiştir. Kullanılan sıvıların yoğunlukları birbirine yakın olup kırınım katsayıları oldukça faklıdır. Bu da mikrodamlaların kolayca tuzaklanabilmesini ve aynı zamanda yüksek kalite faktörlü FGM'lerin mikrodamlalarda hapsolabilmesini sağlamıştır. Çalışmalarımızda hidrofilik bir kromofor ve hidrofobik yan zincirlere sahip olan bir sürfaktan boya molekülü olan Dil(3) (1,1'-Dioctadecyl-3,3,3',3'-tetramethylindo carbocyanine perchlorate, Sigma Aldrich, uyarı dalgaboyu 560 nm ışıma dalgaboyu 575 nm) kullanılmıştır. Bu boya molekülü mikrodamla-su arayüzüne otomatik olarak yoğunlaştığı aynı bölgede bulunan FGM'erin verimli uyarılması için ideal özeeliklere sahiptirler. Çalışmalarımızda tipik boya molekülü yoğunluğu olarak 200 µM seçilmiştir.

5.2.2 Emülsiyon mikrodamlalarının yüzey geriliminin azaltılması

Teflon bir Wihelmy plakası ve microbalans kullanarak boya molekülü katkılı daldırma yağı / su sisteminin arayüzey gerilimi 13.1 mN/m olarak ölçülmüştür (Şekil 5-11). Optik esnetme deneylerinin başarıya ulaşması için bu arayüzey gerilimi değerinin düşürülmesi gerekti. Bunun için sürfaktan moleküllerin arayüzeye yerleştirilmesi sıkça kullanılan bir yöntemdir. Bu şekilde literatürde 0.001 mN/m mertebesinde çok düşük arayüzey gerilimlerine ulaşılması mümkün olmuştur [13]. Bu çalışmada suyun içine 5mM AOT sürfaktanı (Docusate sodium salt, Sigma-Aldrich) ile 40mM NaCl katılarak arayüzey geriliminin 1.5±0.1mN/m değerine düşürülmesi mümkün olmuştur.



Şekil 5-11: Interfacial measurement setup with a Teflon Wihelmy plate probe in the flat interface of dye doped immersion oil/AOT-NaCl-Water solution(5mM-40mM respectively).

5.2.3 Benzeşimler ve beklentiler

Optik esnetme lazer gücüne göre FGM'lerde beklenen kayma miktarı üç boyutlu ışın izleme (ray tracing) yöntemi ile gerçekleştirilmiştir. Bu yöntemde Gaussian hüzmeler değişik genlikteki ışınların toplamı olarak modellenir ve her ışının mikrodamla yüzeyinde ilerlemesi, kırınımı ve yansıması göz önüne alınarak optik esnetme miktarı belirlenir. Benzeşim sonuçları Şekil 5-12'de verilmiştir. Bu şekilde optik esnetme lazer gücüne bağlı olarak FGM'lerin spektral pozisyonlarının değişimi görülmektedir. Fiberlerin ekseni üzerinde uyarı olduğunda FGM'lerin spektral pozisyonu daha büyük değerlere (kırmızıya) kaymakta uyarı noktası fiberlerin eksenine dik bir noktda ise (off axis) FGM'lerin spektral pozisyonu düşük değerlere (maviye) kaymatadır. Bu değişimler sferoidin iki yarıçapı olan a ve b'nin değişimini takip etmektedir.



Şekil 5-12: (a) Prolat sferoid (prolate spheroid) şematiği, (b) Üç boyutlu ışın izleme benzeşim sonuçları. Fiberlerin ekseni üzerinde (on axis) veya bu eksene dik bir noktada (off axis) uyarı olduğunda optik esnetme lazer gücüne bağlı olarak FGM'lerin spektral pozisyonlarının değişimi. Bu benzeşimde 50 μm çapında bir mikrodamla, 1.5 mN/m arayüz gerilimi, iki mültimod fiber için 90.22 nümerik açı, fiberler arası 134 μm mesafe ve optik esnetme lazeri dalgaboyu olarak λ=1070 nm varsayıılmıştır.

5.2.4 Deneysel sonuçlar ve tartışma

Şekil 5-13'de düşük arayüz gerilimine (1.5±0.1mN/m) sahip mikrodamlalarda eksene dik ve eksen üzerinde uyarı durumlarında lazer ışıması gösteren FGM'lerin spektral pozisyonunun optik esnetme lazer gücüne göre değişimi gösterilmektedir. Her iki durumda da benzeşimlerde öngörüldüğü şekilde değişim görülmüştür. Detaylı incelendiğinde FGM'lerde mavi dalgaboylarına doğru sabit bir kayma da gözlendiği görülmüştür. Bunun nedeni mikrodamla sıvısının sınırlı bir şekilde suda çözünmesidir. Suda çözünmenin yanında deneylerde öne çıkan bir diğer etki ise termal etki olmuştur. Bu etki ilerleyen bölümde detaylı olarak incelenmiştir. Şekil 5-14'da ise yine düşük arayüz gerilimine (1.5±0.1mN/m) sahip bir mikrodamlanın merkezden uyarılması ile elde edilen lazer ışıması spektrumlarının optik esnetme lazer gücüyle değişimi görülmektedir. Bu durumda optik esnetme lazer gücü arttırıldıkça bazı FGM'lerin (eksendeki) kırmızıya bazı FGM'lerin (eksene dik olan) ise maviye kaydıkları görülmektedir.



Şekil 5-13: (sol) 47 µm çapında 1.5±0.1mN/m arayüz gerilimine sahip bir mikrodamla için eksene dik uyarı durumunda lazer ışıması gösteren üç FGM'nin optik esnetme lazeri gücü ile değişimi. (sağ) 49 µm çapında 1.5±0.1mN/m arayüz gerilimine sahip bir mikrodamla için eksene üzerinde uyarı durumunda lazer ışıması gösteren üç FGM'nin optik esnetme lazeri gücü ile değişimi.



Şekil 5-14: Merkezden uyarılan 43 µm çapında 1.5±0.1mN/m arayüz gerilimine sahip bir mikrodamladan gözlenen FGM'lerin optik esnetme lazer gücü ile değişimi. Bu durumda hem eksendeki hem de eksene dik FGM'lerin lazer ışıması sonucu bazı FGM'lerin maviye bazı FGM'lerin ise kırmızıya kaydığı görülmektedir.

Termal etkiler

Benzeşimlerde eksende ve eksene dik durumlarda spektral kayma miktarları optik eenetme lazer gücüe bağlılığı graiklerindeki eğimlerin oranı tam olarak 2'dir. Oysa Şekil 5-13'de

gösterildiği gibi deneylerde bu eğimlerin oranı 1.06 olarak belirlenmiştir. Eğimlerin oranındaki bu fark termal etkilerden kaynaklanmaktadır. Bunu daha iyi anlamak için yüksek arayüz gerilimine (13.1 mN/m) sahip mikrodamlalar ile aynı deneyler tekrarlanmıştır. Bu durumda elde edilen sonuçlar Şekil 5-15'de gösterilmektedir.



Şekil 5-15: (sol) 51 µm çapında 13.1 mN/m arayüz gerilimine sahip bir mikrodamla için eksene dik uyarı durumunda lazer ışıması gösteren üç FGM'nin optik esnetme lazeri gücü ile değişimi. (sağ) 55 µm çapında 13.1 mN/m arayüz gerilimine sahip bir mikrodamla için eksene üzerinde uyarı durumunda lazer ışıması gösteren üç FGM'nin optik esnetme lazeri gücü ile değişimi.

Şekil 5-15'de görüldüğü gibi yüksek arayüz gerilimi (13.1 mN/m) durumunda eksende veya eksene dik uyarı olması durumlarında FGM'lerin optik esnetme lazer gücündeki artış ile birlikte kırmızı renklere kaymaktadır. Bu durumda optik kuvvetler ana rol oynamamaktarı. Ana rolü oynayan termal mekanizmalardır. Termal mekanizmalar sonucu mikrodamla çapında sıcaklık ile birlikte bir artış beklenir. Bu artış da FGM'lerin kırmızıya kaymasına yol açmaktadır. Öngörülerimiz kullanılan maksimum optik esnetme lazer güçleri için mikrodamlanın sıcaklığında yaklaşık 10 °C'lik artış olması beklendiğini göstermiştir. Bu sıcaklık artışı da gözlenen kırmızı kaymalar ile uyumludur.

5.2.5 Microfluidik damla üretimi

Proje kapsamında ayrıca mikrofluidik çip içinde mikrodamla üretimi de başarıyla gerçekleştirilmiştir. Bunun için bit T-kavşağı geometrisinde hexadecane yağı mikrodamlaları

%2 SDS surfaktanı içeren su içinde üretilmiş ve üretilen mikrodamlalar çift hüzmeli optik tuzağın bulunduğu diğer mikrofluidik çipe bir kılcal boruyla aktarılmıştır (Şekil 5-16). Bu konfigürasyonda mikrodamlaların akışı rezervuarların görece yüksekliklerinin ayarlanmasıyla hydrostatik basınç kullanılarak kontrol edilmiştir.



Şekil 5-16: Başka bir mikrofluidik çipte üretilip çift hüzmeli optik tuzaklama çipine transfer edilen mikrodamlaların görüntüsü. Ölçek: 100 µm.

6 Proje konusuyla ilgili olarak yürütülen diğer çalışmalar

6.1 Sıvı kristal mikrodamlalarda spektral olarak taranabilen lazer ışıması gözlenmesi

Bu deneylerde, sıvı kristal damlacıkları eşyönsüz (anisotropic) optik yapılarla incelenmeye karar verildi. Sıvı kristal moleküller sıvı fazdayken farklı şekillerde kendiğilinden hizalanacak kadar büyük moleküllerdir. Kendiliğinden hizalanma sıcaklık, dış elektrik alan ve kutunun geometrisi gibi farklı fiziksel değiştirgelerden etkilenebilir. Yüzey gerilimi miktarı ve sıcaklığa bağlı olarak mikrodamlacık içindeki sıvı kristal molekülleri radyal veya çift kutuplu (bipolar) dizilimde olabilirler. Şekil 6-1'de bu iki temel dizilim gösterilmiştir. Radyal yapıda moleküler yön damlacıkların merkezine doğru iken, çift kutuplu dizilimde yüzeyin üzerindeki iki noktadan bütün moleküler yönler, soğan kabuğu şekline benzeyen bağlayıcı çizgi yönünde kendilerini hizalamıştır. Şekil 6-1'de ışık polarizatör ve analizör arasında damlacıkların görüntüleri verilmiştir.



Şekil 6-1: Kapalı geometri (Damlacık) içinde nematik sıvı kristaldeki moleküler yönlerin iki ana dizilimi. Solda radyal dizilimin kutuplayıcı mikroskoptaki şematik tasvir ve görüntüsü ve sağda çift kutuplu dizilimin kutuplayıcı mikroskoptaki şematik tasvir ve görüntüsü gösterilmiştir.

Sıvı kristal malzemelerde iki erime noktası sıcaklığı mevcuttur. İlki eşyönsüz özelliği ile katı fazdan sıvı faza geçiş sıcaklığı iken, ikinci olarak eşyönsüz durumdan eşyönlü (isotropic) sıvıya geçişteki erime noktasıdır. Şekil 6-2, 5-CB ve 8-OCB gibi iki farklı nematik sıvı kristalin moleküler yapısını göstermektedir ve bunlardan 8-OCB, 5-CB göre daha yüksek erime sıcaklığına sahiptir. Buna ek olarak Şekil 6-2'de boya olan Nile Redd (NR) ve kayganlaştırıcı (surfactant) (SDS)'in kimyasal yapıları da gösterilmiştir.



Şekil 6-2: 5-CB (4-Siyano-4'-pentylbiphenyl), 8-OCB (4-Cyano-4'-(octyloxy) biphenyl), Nile Red (NR, 9-diethylamino-5-benzo[α]phenoxazinone), and SDS (sodyum dodesil sülfat) kimyasal yapıları.

5-CB ve 8-OCB sıvı kristali karışımının Nile Red ile katkılandırılmış olduğu durumda, çift hüzmeli optik tuzak kullanılarak artan tuzaklama gücünde fısıldayan galeri kiplerinde (FGM) spektral kayma elde edilmiştir. Şekil 6-3'de tuzaklama ile radyal sıvı kristalleri ısıtıldığında/gerildiğinde, optik tuzaklama sırasında 1 W'lık güç artırım başına yaklaşık 2.5 nm kayma (mavi), hem içeri hem de dışarı eksen uyarması sonucu oluşmuştur. Çift kutuplu sıvı kristal damlacıkları kullanıldığında, aynı büyüklükteki kayma (kırmızı) içeri eksen uyarması sonucu elde edilirken, dışarı eksen uyarmasında FGM gözlemlenmemiştir. İlginç biçimde, ısıtma çipinde basit ohmik ısıtma ile aynı sonuçları elde etmeye çalıştığımızda, 10°C aralıklarda hiçbir kayma belirmemiştir. Bu mekanizmaları anlama üzerine çalışmalarımız sürmektedir. Elde edilecek halen sonuçlar yakında bir yayına dönüştürülecektir.



Şekil 6-3: İçeri eksen uyarımı sonucu sıvı kristallerin FGM lazer yayımı spektrumu. Yukarı spektrumdan aşağı spektruma, çift taraflı ışın tuzaklamasıyla damlacıklar ısıtılmış/gerilmiş ve tekrar serbest bırakılmıştır. Ortadaki spektrum azami ısıtılmayı/gerilmeyi göstermektedir. Isıtılma/gerilme gücündeki artışla, kayma (Mavi) belirgindir.

6.2 Su tutmayan yüzey üzerindeki mikrodamlaları temel alan FRET lazeri gösterimi

Bu çalışmamız 15 numaralı referansta verilen Laser Physics Letters makalesinde yayınlanmak üzere kabul edilmiştir.

Bu çalışmalarda süperhidrofobik yüzey üzerinde duran etilen glikol (EG) / gliserol ve su içere mikrodamlalar Rhodamine 6G (R6G) ve Rhodamine 700 (R700) donör ve akseptör çifti ile katkılandırılmıştır. R6G'den R700'e gerçekleşen radyatif olmayan Förster rezonan enerji tranferi (non-radiative Förster resonance energy transfer – FRET) sonucu akseptör molekülleri olarn R700'ların ışımalarının spektral bölgesinde lazer ışıması gözlenmiştir. Deneylerde donör molekülleri 532 nm'de darbeli Q-anahtarlamalı pompa lazeri ile pompalanmış ve uyarılmış donör moleküllerinin enerjilerini FRET mekanizması ile akseptör moleküllerine transfer etmesi sonucu akseptör lazer ışıması gözlenmiştir.

Şekil 6-4(a) da sadece donor molekülleri ile katkılı ve hem donor hem de aksptör molekülleri ile katkılı mikrodamlalardan kaydedilen lazer ışıması spektrumları gösterilmektedir. Akesptör molekülleri olmadığında 600 nm civarında olan lazer ışımasının akesptör moleküllerinin ilavesi ile 750 nm civarına kaydığı bu şekilde görülmektedir. Şekil 6-4(b)'de ise donor moleküllerinin eklenmesi ile eşit konsantrasyonda (0.1 mM) akesptör molekülü içeren mikrodamlalarda akseptör lazer ışımasının gözlendiği eşik pompa fluensinin değişimi gösterilmektedir. Donör konsantrasyonunun artması ile eşik pompa fluensinde görülen azalma FRET mekanizmasının doğrudan bir göstergesidir.



Şekil 6-4: (a) 0.1 mM R6G / 0 mM R700 ve 0.1 mM R6G / 1 mM R700 içeren mikrodamlalarda kaydedilen lazer ışıması spektrumları. Her iki durum için de kullanılan uyarıcı lazer fluensi 74 mJ/cm²'dir. (b) Ortalama pompa eşik fluensinin donör konsantrasyonu ile değişimi. Akseptör konsantrasyonu 0.1 mM'da sabit iken donör konsantrasyonu 0 mM ile 2 mM arasında değiştirilmiştir. Küçük grafik: 16 mJ/cm 2 uyarı fluensi kullanılarak 18 µm çapındaki mikrodamlalardan kaydedilmiş ışıma spektrumları. Mikrodamlalar 0.1 mM R6G ve 0.1 mM ya da 1 mM R700 içermektedir.

6.3 Kazanç ortamı olarak bakteri hücrelerini bulunduran mikrodamla lazeri geliştirilmesi

Bu çalışmaları iki aşamalı olarak gerçekleştirdik. İlk aşamada içinde sarı ışıyan protein (yellow fluorescent protein – YFP) bulunduran süperhidrofobik yüzey üzerindeki 35%w/w gliserol/su mikrodamlalarında lazer ışıması gözledik. Bu sonuçlar Şekil 6-4 ve 6-5'de sunulmuştur. İkinci aşamada ise YFP'yi sentezleyen e-coli bakterilerinin mikrodamla içinde olduğu durumda lazer ışıması gözledik. Bu durumda lazer ışıması anlık değişmeler gösterdi. Bu değişmelerin sebebi bakteri hücresinin mikrodamla içinde hareket etmesi olarak açıklanmıştır. Böylece canlı bir mikroorganizmanın kazanç ortamı olarak kullanıldığı bir mikrolazer göstermiş olduk. Bu heyecan verici sonuç şu anda yayına hazırlanmaktadır. Bu

sonuç ile biyoalgılama için yeni paradigmaların oluşturulması ve mikrolazerlerin biyolojik olarak kontrolü gibi ilginç yönde çalışmalara doğru yönelmek mümkün olacaktır.

Şekil 6-5'de yaklaşık 45 µM konsantrasyonunda saflaştırılmış YFP içeren bir mikrodamladan elde edilen lazer ışıması spektrumları gösterilmektedir. Şekil 6-5(a), 6-5(b), 6-5(c) ve 6-5(d)'de pompa lazeri fluensi 0.15, 0.58, 1.17 ve 1.60 mJ/cm² olarak kademeli bir şekilde arttırılmıştır. Bunun sonucu olarak bazı FGM'lerin genliğinde (A, B ve C ile işaretlenen FGM'lerde olduğu gibi) pompa lazer fluensinin artışı ile doğrusal olmayan bir şekilde artan artış gözlenmiştir. Bu artış Şekil 6-6'da da gösterilmektedir. Bu şekilde arkaplan ışıması ile önceki şekilde C ile gösterilen FGM'nin spektral genliğinin pompa lazer fluensine göre değişimi çizilmektedir. Burada FGM'nin pompa lazer flüensi ile doğrusal olmayan bir şekilde artması açık olarak görülmektedir.

YFP sentezleyen e-coli bakterileri içeren mikrosamlalarla yaptığımız çalışmaların sonuçlarından bir örnek Şekil 6-7'de gösterilmektedir. Bu şekilde en üstte gösterilen iki boyutlu grafikte mikrodamladan kaydedilen spektrumların zamanla dğeişimi görülmektedir. Bu spektrumlardan 1, 13 ve 30 numaralı olanları aynı şekilde aşağıda gösterilmektedir. Bu spektrumlarda görüldüğü gibi 1 ve 30 no'lu spektrumlardaki gibi bazı anlarda mikrodamlada yüksek genlikde FGM ışıması gözlenmektedir. Bu durumlarda mikrodamladan lazer ışıması gözlenmektedir. Ancak 13 no'lu spektrumda gözlendiği gibi bazı anlarda FGM'lerin genliğinin düşük olduğu dolayısıyla lzer ışımasının gözlenmediği görülmektedir. Genlikteki bu ani değişimler bakterilerin mikrodamla içinde difüzyonu veya aktif hareketi ile açıklanmaktadır.



Şekil 6-5: (a) Yaklaşık 7 µm çapında 35% wt/wt gliserol/su ve 45 µM YFP içeren bir mikrodamladan değişik pompa lazeri flüenslerinde kaydedilen lazer ışıması spektrumları.



Şekil 6-6: Şekil 6-5'de C ile gösterilen FGM'nin genliğinin ve arkaplan genliğinin pompa lazeri flüensi ile değişimi.



Şekil 6-7: (En üst) YFP sentezleyen e-coli bakterileri içeren bir mikrodamladan kaydedilen lazer ışıması spektrumlarının iki-boyutlu olarak zamanın bir fonksiyonu olarak gösterimi. (Alt) 1, 13, ve 30 no'lu spektrumların dalgaboyunun fonksiyonu olarak gösterimi.

6.4 Kırmızı kan hücrelerinin optik esnetme ile elastik özelliklerinin incelenmesi

Optik iki huzmeli esnetici (stretcher) tek hücre karakterizasyonu deneyleri için umut verici bir araçtır. Burada iki huzmeli esnetici düzeneğimizi kırmızı kan hücrelerini tuzaklamak, germek ve hücrelerin fiziksel özelliklerini çalışmak için değiştirdik. Kırmızı kan hücrelerinin 8 µm civarında çapı vardır. İki hüzmeli esneticiyi 8 µm çapla kullanabilmek için, tek modlu ve birbirene olan uzaklıkları 70 µm olan iki fiber kullandık. Tuzaklanan ve 1 W laser gücüyle gerilen hücrelerin üzerindeki güç bir hüzme engelleyici (shutter) yardımıyla aniden kesildi. Aynı zamanda hücrelerin gevşemesi hızlı çekim yapan bir kamerayla kaydedildi. Bir imge işleme algoritması yardımıyla, hücrelerin gevşeme süresi boyunca eliptisitelerinin kaç olduğuna bakıldı. Şekil 6-8 bize bu belirli hücre için 190 ms civarında olduğunu söylüyor. Farklı yaşam koşullarında bulunan hücrelerin deneyleri ileride yapılacaktır.

Bu grafikte y ekseni eliptisetiyi temsil eder ve (a-b)/b hesabıyla bulunur. Bu hesapta a elipsin semi-majör ve b elipsin semi-minör eksenlerine karşılık gelmektedir. Zaman x eksenin bulunmaktadır ve birimi saniyedir. Bu gevşeme süreci için zaman sabiti veri noktalarının $a * \exp\left(-\frac{x}{b}\right) + c$ fonsiyonuna fit edilmesiyle bulunmuştur ve b değişkenine karşılık gelmektedir.



Şekil 6-8: Üst) Kırmızı kan hücresinin zamanla gevşemesi. Alt) İki huzme gericisi düzeneğiyle tuzaklanış kırmızı kan hücresi.

7 Sonuç

Bu proje ile optik manipülasyon ve mikro/nano-fotonik yöntemleri kullanılarak birçok değişik geometride mikrodamla temelli lazerler geliştirilmiştir. Optik cımbızlama ile havada veya başka bir sıvıda sabitlenen mikrodamlalar kullanılarak lazerler geliştirilmiş. Çift hüzmeli bir optik tuzak kullanılarak optik esnetme ile mikrodamlaların lazer ışımasının spektral olarak tarandığı gösterilmiştir. Süperhidrofobik yüzey üzerinde duran mikrodamlalar kullanılarak FRET lazeri ve bakterileri kazanç ortamı olarak kullanan "biyolojik" bir mikrodamla lazeri geliştirilmiştir. Ayrıca çift hüzmeli optik tuzaklama düzeneği ile kırmızı kan hücrelerinin mekanik özelliklerinin anlaşılması üzerine çalışmalar yürütülmüştür. Optik esnetme ile esnetilen kırmızı kan hücrelerinin şekillerinin doğal hallerine geri dönerken geçen karakteristik zaman imge analizi teknikleri ile ölçülmüştür. Bu karakteristik zamanın bir tıbbi algılama verisi olarak kullanılmasına ilişkin çalışmalarımız devam etmektedir.

Projeden elde edilen sonuçlar 4 adet yayınlanmış ya da kabul edilmiş makalenin konusu olmuşlardır. Proje sonuçlarının en az 1 makalede daha yayına dönüştürülmesi planlanmaktadır. Bu proje ile ayrıca Prof. Pavel Zemanek'in direktörlüğündeki Çek Cumhuriyeti araştırma grubu ile çok verimli bilgi alışverişinde bulunulmuş ve köklü işbirlikleri oluşturulmuştur.

8 Referanslar

[1] Fields, M. H., Popp, J., Chang, R. K., *Nonlinear Optics in Microspheres,* Progress in Optics; Ed.: Wolf, E., *Vol.* 41, Elsevier, Amsterdam, (2000)., Pp 1-95.

[2] Tang S. K. Y., Derda R., Quan Q., Loncar M., and Whitesides G. M., Continuously Tunable Droplet-based Optical Microcavities, *Opt. Express* **19**, 2204 (2011).

[3] Psaltis D., Quake S. R., and Yang C., Developing optofluidic technology through the fusion of microfluidics and optics, *Nature* **442**, 381 (2006).

[4] Kiraz, A., Kurt, A., Dundar, M. A., Demirel, A. L., Simple largely tunable optical microcavity, *Appl. Phys. Lett*, **89**, 081118 (2006).

[5] Tanyeri, M., Perron, R., and Kennedy, I. M., Lasing droplets in a microfabricated channel, *Opt. Lett.***32**, 2529–2531 (2007).

[6] Tang, S. K. Y., Li, Z., Abate, A. R., Agresti, J. J., Weitz, D. A., Psaltis, D., and Whitesides, G. M., A multi-color fast-switching microfluidic droplet dye laser, *Lab Chip* 9, 2767–2771 (2009).

[7] Tang, S. K. Y., Derda, R., Quan, Q., Loncar, M., and Whitesides, G. M., Continuously tunable microdroplet-laser in a microfluidic channel, *Opt. Express* **19**, 2204–2215 (2011).

[8] Constable, A., Kim, J., Mervis, J., Zarinetchi, F., and Prentiss, M., Demonstration of a fiber-optical light-force trap, *Opt. Lett.* **18**, 1867–1869 (1993).

[9] Čižmár, T., Brzobohatý, O., Dholakia, K., and Zemánek, P., The holographic optical micro-manipulation system based on counter-propagating beams, *Laser Phys. Lett.* **8**, 50–56 (2011).

[10] Aas, M., Jonáš, A. and Kiraz, A., Lasing in optically manipulated, dye-doped emulsion microdroplets, *Opt. Commun.* **290**, 183–187 (2013).

[11] Chylek, P., Kiehl, J. T., Ko, M. K. W., Optical levitation and partial-wave resonances, *Phys. Rev. A* **18**, 2229-2233 (1978).

[12] Karadag, Y., Aas, M., Jonáš, A., Anand, S., McGloin, D., and Kiraz, A., Dye lasing in optically manipulated liquid aerosols, *Opt. Lett.* **38** (10), 1669-1671 (2013).

[13] Aas, M., Jonáš, A., Kiraz, A., Brzobohatý, O., Ježek, J., Pilát, Z., and Zemánek, P., Spectral tuning of lasing emission from optofluidic droplet microlasers using optical stretching, *Opt. Express* **21** (18), 21380–21394 (2013).

[14] Aveyard, R., Binks, B. P., Clark, S., and Mead, J., Interfacial tension minima in oil-watersurfactant systems. Behaviour of alkaneaqueous NaCl systems containing aerosol OT, *J. Chem. Soc., Faraday Trans. 1* **82**, 125–142 (1986).

[15] Özelci, E., Aas, M., Jonáš, and A., Kiraz, Optofluidic FRET microlasers based on surface-supported liquid microdroplets, *Laser Phys. Lett.*, accepted for publication (2014).