

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**PLAZMONİK VE OPTO-AKIŞKAN PLATFORMLARIN TEORİK,
HESAPLAMALI VE DENEYSEL YÖNTEMLERLE İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Yağız MOROVA

Fizik Mühendisliği Anabilim Dalı

Fizik Mühendisliği Programı

OCAK 2015

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**PLAZMONİK VE OPTO-AKISKAN PLATFORMLARIN TEORİK,
HESAPLAMALI VE DENEYSEL YÖNTEMLERLE İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**Yağız MOROVA
(509121116)**

Fizik Mühendisliği Anabilim Dalı

Fizik Mühendisliği Programı

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Selçuk AKTÜRK

OCAK 2015

İTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü'nün 509121116 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi **Yağız MOROVA**, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı “**PLAZMONİK VE OPTO-AKIŞKAN PLATFORMLARIN TEORİK, HESAPLAMALI VE DENEYSEL YÖNTEMLERLE İNCELENMESİ**” başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı : **Doç. Dr. Selçuk AKTÜRK**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri : **Yrd. Doç. Dr. Alexandr Jonas**
Yıldız Teknik Üniversitesi

Yar. Doç. Dr. Yasin Karadağ
Boğaziçi Üniversitesi

Teslim Tarihi : **12 Aralık 2014**
Savunma Tarihi : **23 Ocak 2015**

ÖNSÖZ

Bu tez iki yıllık yoğun, yorucu ve eğlenceli bir çalışma sürecinin sonucunda yazılmıştır. Bu süreçte bana destek olan ve bu çalışmanın ortaya çıkmasında katkısı bulunan benim için çok değerli insanlara bu önsöz vesilesiyle teşekkür etmek istiyorum.

Öncelikle yüksek lisans eğitimim boyunca, yönlendirmeleriyle çalışmalarımı şekillendiren, liderliği ile verimli bir çalışma süreci geçirmemi sağlayan danışman hocam Doç. Dr. Selçuk Aktürk'e teşekkür ederim. Kendisinin aktardığı bilgi ve tecrübeler, hayatım boyunca bana eşlik edecektir.

Bu tez çalışmasında Koç Üniversitesi'yle ortak yürüttüğümüz çalışmalarımızda desteklerini esirgemeyen Prof. Dr. Alper Kiraz ve Yrd. Doç. Dr. Alexandr Jonas'a ayrıca teşekkür ederim.

Tezde bahsedilen çalışmaların büyük kısmında ve tezin yazım aşamasında en az benim kadar emeği geçen, yoğun çalışma saatlerini pozitifliğiyle çekilir kılan, beni sürekli destekleyen Berna Yalızay'a teşekkür ederim.

Tansu Ersoy ve Ramazan Şahin başta olmak üzere laboratuvarında beraber çalıştığım diğer bütün çalışma arkadaşlarıma emeklerinden ve paylaşımlarından dolayı teşekkür ederim.

Benim fizikçi olmamda çok büyük emeği olan Ertuğrul Çavuş'a ve matematiği sevdiğime ikna eden Gülnur Avuka'ya teşekkürü borç bilirim.

İsimlerini sayamayacağım kadar çok ve kelimelerle anlatamayacağım kadar değerli dostlarıma, arkadaşlarıma desteklerinden dolayı çok teşekkür ederim.

Ve en önemlisi, attığım her adımda yanımda olan, bana hep güvenen çok değerli aileme; babam Oğuz Morova'ya, annem Meral Morova'ya, ablam Gizem Yücel Morova'ya, eniştem Barış Yücel'e ve yeğenim Masal Yücel'e çok teşekkür ederim.

Aralık 2014

Yağız Morova
(Fizikçi)

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ.....	v
İÇİNDEKİLER.....	vii
KISALTMALAR.....	ix
ÇİZELGE LİSTESİ.....	xi
ŞEKİL LİSTESİ.....	xiii
ÖZET.....	xv
SUMMARY.....	xvii
1. GİRİŞ	1
1.1 Plazmonik.....	1
1.1.1 Teori	1
1.1.1.1 Metallerin optik özellikleri	1
1.1.1.2 Yüzey plazmon polaritonları (SPPs)	3
1.1.1.3 Kretchman konfigürasyonu ve ızgara yöntemi ile yüzey SPP'ların uyarımı.....	4
1.1.2 Plazmonik yapıların uygulama alanları	7
1.2 Opto-akışkan Yapılar	8
1.2.1 Motivasyon	8
1.2.2 Opto-akışkan yapıların uygulama alanları.....	10
1.2.2.1 Opto akışkan dalga kılavuzları.....	10
1.2.2.2 Opto-akışkan tuzaklama ve taşıma.....	11
1.2.2.3 Opto-akışkan mikroskop (OFM).....	12
1.2.2.4 Opto-akışkan boya lazerleri.....	13
2. PLAZMONİK YAPILARIN NUMERİK OLARAK MODELLENMESİ	15
2.1 FDTD Metot.....	15
2.2 Lumerical™ (FDTD Solutions)	16
3. PLAZMONİK YAPILARIN DENEYSEL OLARAK ELDE EDİLMESİ	21
3.1 Plazmonik Yapıların Üretimi	21
3.2 Karakterizasyon.....	23
3.3 Sonuçlar	24
4. AEROJEL TABANLI OPTO-AKIŞKAN SİSTEMLERİN ÜRETİMİ.....	29
4.1 Aerojeller	29
4.2 Femtosaniye Lazer Ablasyonu	32
4.3 Deney Düzeneği	33
4.4 Sonuçlar	35
5. AEROJEL TABANLI OPTO-AKIŞKAN SİSTEMİN KARAKTERİZASYONU	37
5.1 Deney Düzeneği	38
5.2 Sonuçlar	39
6. SONUÇLAR VE TARTIŞMA.....	43
KAYNAKLAR.....	45
ÖZGEÇMİŞ	49

KISALTMALAR

FDTD	: Zaman Bölgesinde Sonlu Farklar (Finite Difference Time Domain)
CCD	: Yüklenme İliştirilmiş Araç (Charge-Coupled Device)
UV	: Morötesi (Ultraviolet)
SPR	: Yüzey Plazmon Rezonans (Surface Plasmon Resonance)
SPP	: Yüzey Plazmon Polariton (Surface Plasmon Polariton)
TTM	: Taramalı Tünelleme Mikroskobu
MEMS	: Mikro Elektro Mekanik Sistemler
PDMS	: Polydimethyl Siloxane
OFM	: Opto-Akışkan Mikroskop (Optofluidic Microscope)
CMOS	: Bütünleyici Metal Oksit Yarı İletken (Complementary Metal Oxide Semiconductor)
TM	: Enine Magnetik (Transverse Magnetic)
TE	: Enine Elektrik (Transverse Electric)
SEM	: Taramalı Elektron Mikroskobu (Scanning Electron Microscope)
TIR	: Tam İç Yansıma (Total Internal Reflection)

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 4.1 : Tipik silika arojel özellikleri	29
Çizelge 4.2 : Arojellerin özelliklerine bağlı uygulama alanları	31

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 1.1: Kretchman konfigürasyonu.	5
Şekil 1.2: Kretchman konfigürasyonunda SPP dispersiyonu.	6
Şekil 1.3: Izgara Yöntemi.	6
Şekil 1.4: (a) Boşluk merkezli dalga kılavuzu örneği. (b) Katı merkezli dalga kılavuzu örneği. (c) boşluk ve katı merkezli dalga kılavuzlarının beraber kullanıldığı tuzaklama düzeneği.	10
Şekil 1.5: Klasik optik tuzaklama ve dalga kılavuzu tabanlı opto-akışkan tuzaklamanın karşılaştırması.	11
Şekil 1.6: (a) Y-tipi dallanan optik dalga kılavuzunun şematik gösterimi. (b) Tuzaklama ve ayırma sürecinin anlık görüntüsü.	12
Şekil 1.7: C. Elegans larvasının (a) iki farklı OFM ağı kullanılarak alınan, (b) CMOS sensör kullanılarak alınan ve (c) ticari mikroskop kullanılarak alınan görüntüsü.	12
Şekil 1.8: Opto-akışkan boya lazeri düşey kavite ve hüzmeye mimarisi (a), düşey pompa kullanılarak düzlemsel lazer emisyonu geometrisi (b), kapiler içerisinde Förster rezonans enerji transferi kazanç ortamı ile rezonans sağlanan opto-akışkan halka rezonatör lazer (c), mikro-akışkan damla üretimi ile kombine edilmiş çok renkli damla lazeri (d).	13
Şekil 2.1 : Yee hücresi temsili.	16
Şekil 2.2 : Lumerical ile oluşturulmuş plazmonik yapının perspektif görünümü.	17
Şekil 2.3 : Lumerical ile oluşturulmuş plazmonik yapının kesiti.	17
Şekil 2.4 : Yapının içinde bulunduğu ortamın kırma indislerinin farklı değerleri için geçirgenlik eğrileri.	18
Şekil 2.5 : Farklı periyotlar için geçirgenlik eğrileri.	19
Şekil 2.6 : Farklı altın kalınlığı (h) değerleri için geçirgenlik eğrileri.	19
Şekil 3.1 : Plazmonik yapıların ablasyon deney düzeneği.	22
Şekil 3.2 : Fs lazer ablasyonu ile elde edilen metal periyodik yapının SEM görüntüsü.	23
Şekil 3.3 : Elde edilen periyodik metal yüzeyin karakterizasyon deney düzeneğinin şematik gösterimi.	23
Şekil 3.4 : Farklı periyotlara sahip nano-çubuk bölgelerinin dalgaboyuna bağlı geçirgenlik grafikleri.	24
Şekil 3.5 : Rezonans dalga boyunun periyoda göre hesaplanan değişimi. Dörtgen ve yuvarlak noktalar deneysel olarak diplerin gözlemlendiği değerleri gösterir.	25
Şekil 3.6 : Hava ve gliserin içindeki periyodik yapının geçirgenlik spektrumu. Mavi ve kırmızı eğriler sırasıyla 500 nm ve 810 nm periyoda karşı gelir. Kesikli çizgiler gliserin uygulamasından sonra alınan ölçümleri gösterir.	26
Şekil 3.7 : Manyetik alan büyüklüğü (a) $\lambda = 740$ nm (b) $\lambda = 800$ nm.	27
Şekil 3.8 : Ortamın dielektrik sabitine bağlı SPR dalgaboyundaki kayma.	27

Şekil 4.1 : Aerojel üretim sürecinin şematik gösterimi.	30
Şekil 4.2 : (a) Düşük yoğunluğa sahip silika aerojel. (b) Hidrofobik yüzeye sahip aerojel.	31
Şekil 4.3 : (a) Uzun etki süreli atımlar ve (b) kısa etki süreli atımlar ile işlemenin şematik karşılaştırılması.	33
Şekil 4.4 : Femtosaniye lazer ablasyonu deney düzeneğinin şematik gösterimi.	34
Şekil 4.5 : Ablasyon paterninin şematik gösterimi.	35
Şekil 4.6 : İşlenen aerojelin SEM görüntüleri. (a) Aerojel içerisinde oluşturulan mikrokana1ın görüntüsü. Derinliğı yaklaşık olarak 300 µm, çapı ise 500 µm'dir. (b) Aerojelin içerinde oluşturulan mikrokana1ın kesit görüntüsü. İşleme sırasında kana1da biriken silika parçacıkları. (c) Yüksek basınçlı nitrojen gazı uygulanarak açılan kana1ın kesit görüntüsü.	36
Şekil 5.1 : Tam iç yansıma temelli dalga kılavuzları. (a) Dalga kılavuzunda tam iç yansıma prensibi. (b) Katı merkeze sahip dalga kılavuzunun kesiti. (c) Sıvı merkezli dalga kılavuzu kesiti. (d) nano boşluklu kaplama materyaline sahip dalga kılavuzu kesiti. (e) sıvı – sıvı merkezli (L2) dalga kılavuzu kesiti. (f) slot dalga kılavuzu kesiti.	38
Şekil 5.2 : Mavi ışık ile aydınlatılan mikroakışkan kana1ın içinden yayılan sarı ışık.	39
Şekil 5.3 : Karakterizasyon düzeneğinin şematik gösterimi.	39
Şekil 5.4 : Kana1 çıkışında kılavuzlanan ışığın CCD kamera ile alınan görüntüsü.	40
Şekil 5.5 : Eşleme fiberinin kana1 içindeki konumuna bağlı CCD kameradaki şiddet değişimi.	41

PLAZMONİK VE OPTO-AKIŞKAN PLATFORMLARIN TEORİK, HESAPLAMALI VE DENEYSEL YÖNTEMLERLE İNCELENMESİ

ÖZET

Son yıllarda optik ve fotonik alanlarındaki teorik ve teknolojik gelişmeler yeni dalların ortaya çıkmasına zemin hazırlamıştır. Bu gelişmeler farklı disiplinlerin bir araya gelmesini ve disiplinler arası çalışmaların yapılmasını sağlamıştır. Bu alanlardan bir tanesi plazmonik bir diğeri ise opto-akışkan sistemlerdir.

Plazmonik metallerle elektromanyetik dalgaların etkileşimini inceleyen bilim dalıdır. Metallerin serbest elektron salınımlarının kuantası ise plazmon olarak isimlendirilir. Plazmonlar elektromanyetik dalgalar tarafından uyarılarak rezonans durumu sağlanır. Bu duruma yüzey plazmon rezonansı denir. Yüzey plazmonlarının doğrudan ışıkla uyarılması mümkün olmadığı için rezonansın sağlanması için bazı koşullar gerekmektedir. Bu koşulların elde edilmesi için bir takım metotlar geliştirilmiştir. Geliştirilen metotlardan en yaygın olarak kullanılanları Kretchman konfigürasyonu ve ızgarayöntemidir. Kretchman konfigürasyonunda bir ışık kaynağı metalle rezonans açısı yapacak şekilde bir prizma içerisinden gönderilir. Metal-cam ara yüzünde meydana gelen sönümlenen dalgaların metal-hava ara yüzündeki plazmonları uyarması sağlanır. Bu rezonans açısı yansıyan ışığın şiddetinin belli bir açıda dip yapması ile belirlenmektedir. Bir diğeri metot ise ızgara yöntemidir. Bu metotta ise bir dielektrik üzerinde kesikli metal yapılar oluşturulması ve bu şekilde hazırlanmış bir yapıdan elektromanyetik dalga gönderilmesiyle yüzey plazmonlarının uyarımı sağlanır.

Yaptığımız çalışmalarda ızgara yöntemi üzerinde durulmuştur. Mevcut çalışmalardan farklı olarak plazmonik yapıları üretmek için femtosaniye lazer hüzmeleri kullanılmıştır. Öncelikle ince altın film kaplı bir cam üzerinde femtosaniye lazer ile altın nano çubuklar oluşturacak şekilde ablasyon sağlanmıştır. Plazmonik yapıların genel üretim yöntemi olan litografiyle karşılaştırıldığında, doğrudan femtosaniye lazer ablasyonu çok daha kolay ve hızlı bir yöntemdir. Elde edilen sistem karakterize edilerek plazmonik özellikleri deneysel olarak incelenmiştir. Bununla beraber elde edilen yapılar zaman bölgesinde sonlu farklar metodu (FDTD)'nu kullanan LumericalTM şirketi tarafından piyasaya sürülmüş FDTD Solutions modülü ile modellenerek elde edilen sonuçlar deneysel verilerle karşılaştırılmıştır. FDTD metot ile incelenen sistem Yee hücreleri adı verilen küçük kutulara bölünür ve bölünen kutucuklarda her bir zaman adımı için Maxwell denklemleri çözülerek sistem hakkında bilgide edilir. Simülasyon sonucunda elde ettiğimiz veriler ile deneysel sonuçların uyumlu olduğu görülmüştür.

Optik ve mikro-akışkan disiplinlerinin bir araya gelmesi ile ortaya çıkmış bir diğeri nano fotonik dalı olan opto-akışkan platformlar gelişmekte olan bir alandır. Opto-akışkan sistemlerin en yaygın kullanım alanlarından bir tanesi opto-akışkan dalga kılavuzlarıdır. Dalga kılavuzu özelliği gösteren opto-akışkan sistemlerde tam yansıma koşulunun sağlanabilmesinde kullanılan materyallerin kırıcılık indisleri

etkin rol oynamaktadır. Son zamanlarda aerojeller düşük kırma indisleriyle bu tip sistemlerde kullanılmaktadır. Ancak bu malzemeleri mekanik yöntemlerle işlemek, delmek veya şekillendirmek kırılgen yapıları nedeniyle çok zordur. Bu zorluklar aerojellerin hassas ve hasarsız bir şekilde işlenebilmesi için alternatif yöntemlerin geliştirilmesi ihtiyacını doğurmuştur. Yaptığımız çalışmalarda hidrofofik silika aerojel kitlesi içerisinde üç boyutlu doğrusal mikrokanalları femtosaniye lazer ile oluşturulması amaçlanmıştır. Femtosaniye lazerler etki sürelerinin çok kısa olması sebebi ile aerojel üzerinde bu kanalların hassas bir şekilde oluşturulabilmesine olanak sağlar. Çalışmalarımızda, femtosaniye lazer hüzmelerini Galvo aynalar ile yönlendirilerek, tarama merceğiyle odaklanmış ve kitlenin hedeflenen bölgesinde ablasyon sağlanmıştır. Bu yöntemle aerojel içerisinde üç boyutlu doğrusal kanal malzemeye zarar vermeden oluşturulmuştur.

Femtosaniye lazer ile aerojel içerisinde elde edilen üç boyutlu doğrusal mikrokanala, dalga kılavuzu özelliklerini incelemek amacı ile etilen glikol sıvısı doldurulmuş ve fiber ile 632nm dalgaboyuna sahip bir diyot lazeri eşlenmiştir. Fiberin kanal içindeki konumu değiştirerek kanal çıkışındaki şiddet dağılımı CCD kamera ile görüntülenmiştir. Yaptığımız ölçümler sonucunda ilerleme kaybı 9.9 dB/cm olarak hesaplanmıştır. Bu sonuç aerojel içerisinde açılan kanalların opto-akışkan dalgakılavuzu olarak kullanılmasına elverişli olduğunu göstermektedir.

Sonuç olarak bu çalışma, hidrofofik silika aerojellerin femtosaniye lazer ile mekanik yöntemlerden daha yüksek duyarlılıkla işlenebildiğini ve elde edilen kanalların opto-akışkan dalga kılavuzu olarak kullanılabildiğini gösterir.

THEORETICAL, COMPUTATIONAL AND EXPERIMENTAL STUDIES ON PLASMONIC AND OPTOFLUIDIC PLATFORMS

SUMMARY

Recent years, theoretical and technological developments in the optic and photonic researches lead up to ensue new research and application areas. These developments enable to combine different disciplines and create complete new fields, and enable interdisciplinary studies. Plasmonics and optofluidics are best examples of these interdisciplinary studies. While plasmonics studies optical properties of metals, optofluidics combines microfluidic technology with optics. Each research area has specific applications.

Plasmonics is the study of the interaction between electromagnetic field and free electrons in a metal. There are some key terms including plasmon, polariton, surface plasmons (SPs), surface plasmon polaritons (SPPs), and surface plasmon resonance (SPR) to understand the plasmonics. Free electrons in the metal can be excited by the electric component of light to have collective oscillations. The quantization of these collective plasma oscillations is called *plasmon*. Also, *surface plasmons* are those plasmons that are confined to surfaces. SPs can be excited by electromagnetic waves resulting with a resonance situation that is called SPR. As a result of SPR, another quasiparticle called a plasma *polariton* is created. SPPs can be described as surface electromagnetic waves that propagate in a direction parallel to the metal/dielectric interface.

Surface plasmon polaritons can be excited by electrons or photons. In the case of photons, it cannot be done directly, but requires a prism, or a grating. These methods are called as Kretschman configuration and grating coupling. For both method, the key fact is matching the wave vectors of the photon and SPs. In Kretschman configuration, the light is sent to the metal film through a glass prism by the angle which the resonance occurs. The evanescent wave penetrates through the metal film and excites the SPs on the metal-air interface. The excitation of surface plasmons takes place resulting in a reduced intensity of the reflected light. In the grating coupling, a coupler matches the wave vectors by increasing the parallel wave vector component by an amount related to the grating period. Simple surface gratings such as grooves, slits or corrugations can ensure the required circumstances to excite SPs.

Since plasmons are the quantization of classical plasma oscillations, most of their properties can be derived directly from Maxwell's equations. Within this theses, we derived one of the most important property of plasmons called *dispersion relation* using Maxwell's equations. In the experimental studies, we focused on grating coupling method. First of all, we coated the glass with a thin gold film to prepare the grating structure. Differently from the present works, we ablated the thin gold film with a femtosecond laser to form nano slits. Mostly, electron beam lithography (EPL) is used for generating nano structures but EPL systems are very expensive and it takes too much time to complete a nano structure. In our work, we showed that direct fs laser ablation is also can be used for creating nanostructures for plasmonics

applications. Compare to the lithographical methods, direct fs laser ablation is cost effective, precise and easy to use. After the ablation, we obtained a nano slit array and characterized the plasmonic properties of this array by applying the transmission spectrum in the range of 400 – 1100 nm. To compare the experimental results with computational ones, we used FDTD Solutions module which is released to the market by LumericalTM company. FDTD Solutions uses the finite difference time domain (FDTD) method for analyzing the specific structures within the context of electromagnetics. In the FDTD algorithm, first, the structure to be analyzed is divided into small boxes called as Yee cells. For each cell, Maxwell's equations are solved with respect to each time step. Lastly, the program gives information like transmission, reflection, by combining the results of Maxwell's equations. To simulate our structure, we modeled a nano slit array and characterized transmission spectrum. We observed that our experimental results are well-matched with simulation results.

Optofluidics one of the developing area of photonics that combines optics and microfluidics. Fluids have specific properties that cannot be found in solid materials, and these properties can be used to design novel devices such as optofluidic microscope (OFM), dye lasers, optical trapping and manipulation, and chemical and biological sensors. Also, one of the most important application of optofluidic platforms is waveguides. The overwhelming majority of optical waveguides operates based on total internal reflection (TIR). Waveguides based on TIR have a high refractive index core region surrounded by low index cladding materials. By reason of liquids provide a large variety of refractive index, they are used as core medium of waveguides in a widespread manner. However, the material used as cladding, mostly glass (refractive index of 1.5), restricts types of liquids act as core region. Recently, aerogels become very important materials for optofluidic waveguides with their extremely low refractive index of 1.05. Although aerogels are very attractive materials for a wide variety of applications due to their unique properties, it is very challenging to process them with traditional methods such as milling, drilling, or cutting because of their fragile structure. Therefore, there is a need to develop alternative processes for formation of complex structures within the aerogels without damaging the material.

Within this thesis, we developed a new method to form 3D optofluidic waveguides inside hydrophobic silica aerogels. We used femtosecond laser pulses which provide precise machining and good quality feature definition to ablate hydrophobic silica aerogels. During the ablation, we directed the laser beam with a Galvo mirror system and focused through a scanning lens to the surface of bulk aerogel which was placed on a translation stage. We succeeded to obtain high quality 3D linear microchannels inside aerogel monoliths with simultaneous motion of Galvo mirror and translation stage.

In order to demonstrate waveguiding and measure optical attenuation of these microchannels, we filled the channels with ethylene glycol. In an attempt to confirm the existence of liquid inside the channel, we add the fluorescein which is a synthetic organic compound with peak excitation at 494 nm and peak emission at 521 nm into ethylene glycol. After that, we coupled light with 632 nm wavelength inside the microchannel with a fiber. To observe the guided light, we placed a microscope and CCD camera focused directly to the exit of the channel. Then we moved the coupling fiber through channel and measured the intensity distribution on exit of the channel

for each 100 μm . When we analyzed the results, we calculated the propagation loss as 9.9 dB/cm. This result is comparable to present optofluidic waveguide's losses.

In conclusion, we can say forming channels inside hydrophobic silica aerogels with femtosecond laser ablation is easier and more precise than mechanical methods. Also, our results show that the microchannels formed by femtosecond laser ablation in silica aerogels can be used as optofluidic waveguides. The results of optical attenuation show that the light guiding properties of aerogels are much better than the ones produced by mechanical methods of ablation.

1. GİRİŞ

1.1 Plazmonik

Nanofotonğin bir dalı olan plazmonik metalik arayüzlerde veya metalik nano yapılarıdaki iletim elektronlarıyla elektromanyetik ışıma arasındaki etkileşimi inceler. Metallerdeki serbest elektronlar ışığın elektriksel bileşeni tarafından uyarılarak kollektif plazma salınımlar elde edilir. Bu plazma salınımların kuantası ise plazmon olarak isimlendirilir. Tıpkı ışığın kuantası olan foton ve mekanik salınımların kuantası olan fonon gibi plazmon da plazma salınımların kuantası olan bir quasi-parçacıktır.

1.1.1 Teori

Plazmonik uygulamalar, üretilen yapıların özellikleri, plazmoniğin gelecekteki uygulamaları ve vaat ettikleri bu alandaki çalışmaları ne denli ilgi çekici kılssa da konuya doğru yaklaşmak için temel bazı teorik fenomenlerin incelenmesi doğru olacaktır. Metal-ışık etkileşiminden meydana gelen plazmonik olayların incelenmesi metallerin optik özellikleri hakkında bilgi edinilmesini zorunlu kılar. Aynı şekilde konunun anlaşılabilmesi için yüzey plazmon rezonansı (SPR), yüzey plazmon polariton (SPP), SPP'ların Kretchman metodu ve ızgara yöntemiyle uyarılması konuları incelenmelidir.

1.1.1.1 Metallerin optik özellikleri

Metallerin elektromanyetik alanlarla etkileşimi klasik çerçevede Maxwell denklemleri ile açıklanır. Birkaç nanometre boyutundaki metalik nanoyapıların davranışları bile iletim elektron yoğunluğunun yüksek olduğu duramlarda kuantum mekaniğine ihtiyaç duyulmadan Maxwell denklemleri ile ifade edilebilirler.

Metaller günlük deneyimlerden bilindiği üzere düşük frekanslardan spektrumun görünür bölgesine kadar yüksek yansıtıcılığa sahiptirler ve elektromanyetik dalgaların içlerinden geçmelerine izin vermezler. Bu sayede mikrodalga ve uzak kızılötesi frekansların iletiminde dalga kılavuzları ve rezonatörlerin kaplama katmanı olarak kullanılırlar. Yüksek frekanslarda, yakın kızılötesi ve görünür bölgeye

gidildikçe elektromanyetik alanın penetrasyonunda önemli ölçüde artma gerçekleşmektedir. Morötesi frekanslarda ise metaller dielektrik özellik kazanırlar ve elektronik bant yapısına göre elektromanyetik dalgaların ilerlemesine izin verirler. Örnek olarak sodyum gibi alkali metaller yüksek UV geçirgenliği göstermektedir. Altın, gümüş gibi soy metallerde ise elektronik bantlar arasındaki geçişler UV rejiminde yüksek absorpsiyon sağlar. Metal içerisinde ilerleyen elektromanyetik dalgaların dağıtıcılık özellikleri kompleks dielektrik fonksiyon $\epsilon(\omega)$ ile ifade edilir.

$$\epsilon(\omega) = \epsilon_1(\omega) + i \epsilon_2(\omega) \quad (1.1)$$

Serbest elektron gazı için dielektrik fonksiyon ω_p plazma frekansı, τ relaksasyon zamanı ve $\gamma=1/\tau$ çarpışma frekansı olmak üzere;

$$\epsilon(\omega) = 1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2 + i\gamma\omega} \quad (1.2)$$

şeklinde yazılabilir. Bu kompleks fonksiyonun reel ve sanal kısımları;

$$\epsilon_1(\omega) = 1 - \frac{\omega_p^2 \tau^2}{1 + \omega^2 \tau^2} \quad (1.3)$$

$$\epsilon_2(\omega) = \frac{\omega_p^2 \tau}{\omega(1 + \omega^2 \tau^2)} \quad (1.4)$$

Metallerin kendi karakterlerini sürdürebildikleri $\omega < \omega_p$ yaklaşımıyla ve ω_p 'ye yakını yüksek frekanslar için $\omega\tau \gg 1$ koşuluyla (1.2) denkleminde,

$$\epsilon(\omega) = 1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2} \quad (1.5)$$

formülü elde edilir. Bu fonksiyon sönümlenmemiş serbest elektron plazmasının dielektrik fonksiyonu olarak kabul edilir. $\epsilon(\omega/\omega_p)$ 'nin pozitif ve reel olduğu durumlarda elektromanyetik dalga sönümlenmeden metalin içinden ilerleyebilirken, negatif olduğu durumda yansıtılır.

Plazma frekansının $\omega \ll \tau^{-1}$ olduğu düşük frekanslarda ise $\epsilon_2(\omega) \gg \epsilon_1(\omega)$ olur. Bu sayede kompleks kırma indisinin reel ve sanal kısımlarının büyüklükleri karşılaştırılabilir hale gelirler.

$$n \approx \kappa = \sqrt{\frac{\epsilon_2}{2}} = \sqrt{\frac{\tau \omega_p^2}{2\omega}} \quad (1.6)$$

Bu bölgede metaller çoğunlukla soğurucu özellik gösterirler.

1.1.1.2 Yüzey plazmon polaritonları (SPPs)

Yüzey plazmon polaritonları dielektrik-iletken arayüzünde ilerleyen ve ilerleme yönüne dik yönde hızlıca sönümlenen elektromanyetik uyarımlardır. Bu elektromanyetik yüzey dalgaları iletkenin elektron plazmasının osilasyonu ile elektromanyetik alanların eşlenmesinden ortaya çıkar. Bu yüzey uyarımları dispersiyonları ve uzaysal konumlarından faydalanılarak karakterize edilirler. SPP'ların fiziksel olarak incelenmesinde iletken-dielektrik arayüzünde Maxwell denklemleri uygulanır. Harici yük ve akım yoğunluğunun bulunmadığı durumdaki dalga denklemi;

$$\nabla^2 \mathbf{E} - \frac{\varepsilon}{c^2} \frac{\partial^2 \mathbf{E}}{\partial t^2} = 0 \quad (1.7)$$

Elektrik alanın $\mathbf{E}(\mathbf{r}, t) = \mathbf{E}(\mathbf{r})e^{-i\omega t}$ kabulü ile dalga denklemi;

$$\nabla^2 \mathbf{E} - k_0^2 \varepsilon \mathbf{E} = 0 \quad (1.8)$$

Haline dönüşür. $k_0^2 = \frac{\omega^2}{c^2}$ boşlukta ilerleyen dalganın dalga vektörüdür. Kartezyen koordinat sisteminde sadece x yönünde hareket eden, ε 'nin tek bir doğrultuya bağlı olduğu, $z = 0$ düzleminin dalganın ilerlediği arayüz kabul edildiği bir problem ele alınırsa, elektrik alan $\mathbf{E}(x, y, z) = \mathbf{E}(z)e^{-i\beta x}$ şeklinde tanımlanabilir. $\beta = k_x$ dalga vektörünün ilerleme yönündeki bileşenine karşılık gelen ilerleme sabitidir. Bu elektrik alan ifadesi (1.8) denkleminde yerine konulduğunda;

$$\frac{\partial^2 \mathbf{E}(z)}{\partial z^2} - (k_0^2 \varepsilon - \beta^2) \mathbf{E} = 0 \quad (1.9)$$

olur. Aynı denklem manyetik alan bileşenleri için de yazılabilir. (1.9) denklemi enine manyetik (TM) modlar için çözümünde E_x , E_z ve H_y bileşenleri sıfırdan farklıdır. Aynı denklem $z > 0$ da absorblayıcı olmayan sabit pozitif reel ε_2 değerine sahip bir dielektrik, $z < 0$ da ise $\varepsilon_1(\omega)$ dielektrik fonksiyonuna sahip bir metal arayüzünde çözüldüğünde TM mod bileşenleri;

$z > 0$ durumu için;

$$H_y(z) = A_2 e^{i\beta x} e^{-k_2 z} \quad (1.10a)$$

$$E_x(z) = iA_2 \frac{1}{\omega \varepsilon_0 \varepsilon_2} k_2 e^{i\beta x} e^{-k_2 z} \quad (1.10b)$$

$$E_z(z) = -A_1 \frac{\beta}{\omega \varepsilon_0 \varepsilon_2} e^{i\beta x} e^{-k_2 z} \quad (1.10c)$$

$z < 0$ olduğu durum için;

$$H_y(z) = A_1 e^{i\beta x} e^{-k_1 z} \quad (1.11a)$$

$$E_x(z) = iA_1 \frac{1}{\omega \varepsilon_0 \varepsilon_1} k_1 e^{i\beta x} e^{-k_1 z} \quad (1.11b)$$

$$E_z(z) = -A_1 \frac{\beta}{\omega \varepsilon_0 \varepsilon_1} e^{i\beta x} e^{-k_1 z} \quad (1.11c)$$

şeklindedir. H_y ve $\varepsilon_i E_z$ 'nin arayüzdeki sürekliliğinden $A_1 = A_2$ 'dir. Bu durumda;

$$\frac{k_2}{k_1} = -\frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1} \quad (1.12)$$

olur. k_1 ve k_2 değerlerinin pozitif olduğu dikkate alınırsa bu koşul ancak dielektrik sabitlerin zıt olduğu ara yüzler için geçerli olacaktır. Bu koşul da ancak metal dielektrik ara yüzünde gerçekleşmektedir. Ayrıca (1.9) denkleminde ilerleme sabitleri aşağıdaki gibi yazılabilir;

$$k_1^2 = \beta^2 - k_0^2 \varepsilon_1 \quad (1.13a)$$

$$k_2^2 = \beta^2 - k_0^2 \varepsilon_2 \quad (1.13b)$$

(1.12) ve (1.13) denklemleri göz önüne alındığında SPP'lerin dağıtkanlık bağıntısı;

$$\beta = k_0 \sqrt{\frac{\varepsilon_1 \varepsilon_2}{\varepsilon_1 + \varepsilon_2}} \quad (1.14)$$

şeklinde elde edilir.

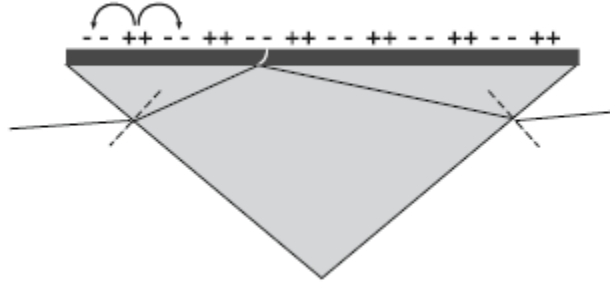
1.1.1.3 Kretchman konfigürasyonu ve ızgara yöntemi ile yüzey SPP'ların uyarımı

Bir iletken ile bir dielektriğin düz arayüzünde ilerleyen SPP'lar iki boyutlu elektromanyetik dalgalarıdır. Bu dalganın ilerleme sabiti β 'nın ışığın dielektrikteki dalga vektörü olan k 'dan büyük olduğu durumda doğrudan ışık hüzmesi ile uyarılması mümkün değildir. Bu nedenle ışığın momentumu ile plazmon momentumunun eşlenmesi için özel metotların kullanılması gerekir. Kullanılan yöntemlerden en yaygın olanı Kretchman konfigürasyonudur. Bu yöntemle SPP'lar

iki farklı dielektrik sabitine sahip yalıtkan arasına yerleştirilmiş metal filminden oluşan üç katmanlı bir sistem aracılığıyla uyarılır. Bu yöntem aynı zamanda sönümlü tam yansıma yöntemi olarak bilinir. Işık Şekil 1.1 de görüldüğü üzere prizma üzerinden θ açısı ile gönderilerek metal-prizma yüzeyinden tam yansıma yapması sağlanır. Bu sayede metal-prizma arayüzündeki düzlemsel momentumu plazmanın dalga vektörü β ya eşit olur ve;

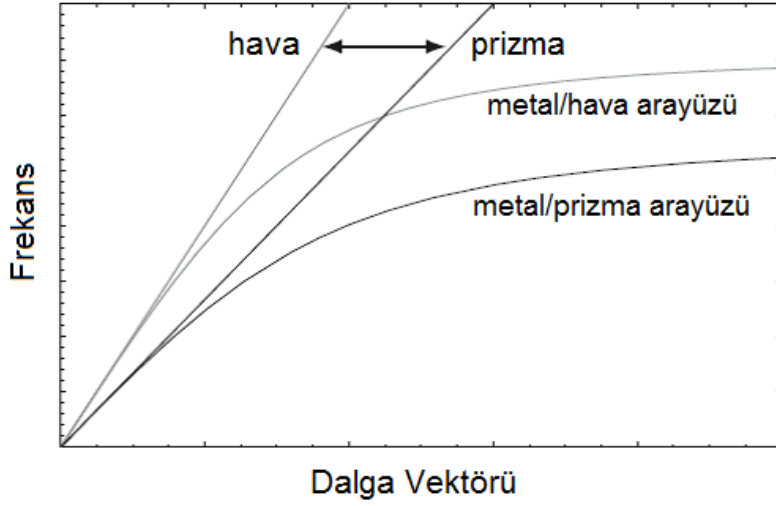
$$\beta = k_x = k\sqrt{\epsilon} \sin \theta \quad (1.15)$$

olarak verilebilir. Burada ϵ prizmanın dielektrik sabitidir. (1.15) denklemi Kretchman konfigürasyonunda yüzey plazmon polaritonlarının uyarılma koşuludur.



Şekil 1.1 : Kretchman konfigürasyonu [1].

Kretchman konfigürasyonu için (1.14) bağıntısından ışığın ve yüzey plazmonların dispersiyonu grafiği Şekil 1.2’de gösterilmektedir. Buradan görüleceği üzere prizmadan ilerleyen ışıkla metal-hava arayüzündeki yüzey plazmonların dalga vektörleri eşlenebilmekte ve bu sayede yüzey plazmon rezonansı elde edilebilmektedir.

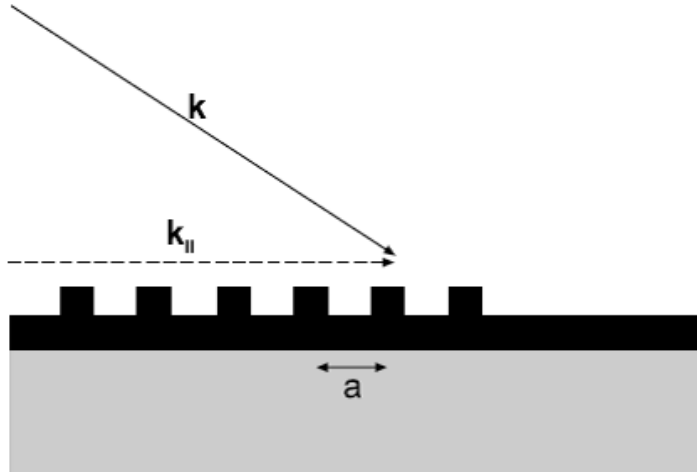


Şekil 1.2 : Kretschman konfigürasyonunda SPP dispersiyonu [1].

Plazmonların uyarımında kullanılan bir diğer metot ızgara (grating) ile eşleme yöntemidir. Metal yapı üzerinde periodik oyuklar veya delikler oluşturularak momentum eşlenmesi sağlanır. Şekil 1.3'teki gibi basit bir boyutlu örgü sabiti a olan bir kovuklu sistem ele alırsak $g = \frac{2\pi}{a}$ ters uzay vektörü ve $v = (1, 2, 3 \dots)$ olmak üzere;

$$\beta = k_x \sin \theta \pm v g \quad (1.16)$$

olur. (1.15) denklemi kovuklu eşleme metodu için eşlenme koşuludur.



Şekil 1.3 : Izgara yöntemi [1].

1.1.2 Plazmonik yapıların uygulama alanları

Plazmonik yapılar teorik araştırmalar kadar uygulama alanlarıyla da dikkat çeken bir araştırma alanıdır. Teorik gelişmelerin teknolojiye uyarlanmasıyla kimyasal ve biyolojik sensörlerin geliştirilmesi, metallerin optik özelliklerinin incelenmesi, dalgaboyu altı cihazların geliştirilmesi, spektroskopik ve görüntüleme metodlarının iyileştirilmesi gibi bir çok alanda ilerleme kaydedilmiştir.

Yüzey plazmonlarının uyarımı biyosensör olarak isimlendirilen cihazların geliştirilmesinde büyük rol oynamıştır. Yüzey plazmon sensörleri ilk olarak 1982 yılında Nylander ve grubu tarafından çeşitli gazların mevcudiyetinin tespit edilmesinde kullanılmıştır [2]. Yüzey plazmon rezonansının dielektrik sabitine yüksek hassasiyetle bağlı olması üretilen sensörlerin hassasiyetini arttırmada önemli bir faktördür. Yüzey plazmon tabanlı sensörler medikal alanında, hava, su ve toprak kirliliğinin tespitinde, yemek ve kozmetik ürünlerin kalite kontrolünde kullanılmaktadır. Bunlara ek olarak biyomoleküllerin etkileşiminin incelenmesinde ve karakterize edilmesinde önemli bir araç haline gelmişlerdir.

Bu sensörler prensipte metal film yüzeyinde meydana gelen kırıcılık indisi değişimini ölçen aletlerdir. Dielektriğin kırıcılık indisinde gerçekleşen değişim, yüzey plazmonunun dalga sabiti olan β 'da değişime neden olur. Bu da yüzey plazmonuna eşlenen ışığın rezonans açısı, eşlenme dalga boyu, şiddet gibi karakteristik özelliklerinde sapmalar meydana getirir. Sapmaların analizi dielektriğin kırıcılık indisini değiştiren etken hakkında bilgi alınmasını sağlar. Ölçülen değere göre SPP sensörler açıl, dalgaboyu, şiddet ve faz modülayonu sensörleri olarak sınıflandırılırlar [3].

Taramalı plazmon yakın alan mikroskopisi taramalı tünelleme mikroskobu (TTM) ile Kretchman konfigürasyonu ile uyarılmış yüzey plazmonlarının belirlenmesini kombine eden bir tekniktir. Lazer hüzmesi yüzey plazmonlarını uyaracak şekilde prizmadan gönderilir. İlerleyen yüzey plazmon dalgaları TTM'unun tarama ucunuyla etkileşir ve bu dalgalardan farklı enerjilerde saçılırlar. Saçılan dalgaları 25 kat büyütme yapan standart bir optik mikroskopla toplanarak iki mikroskopun görüntülerinin derlenmesiyle görüntü elde edilir.

Bunlarla birlikte spaser olarak isimlendirilen plazmon lazerler, yüzey plazmon dalga kılavuzları olarak bilinen yüzey plazmon kanallama, optik fiber sensörler gibi bir çok alanda da gelecek vaat eden uygulamalar bulunmaktadır.

1.2 Opto-akışkan Yapılar

Optik biliminin ilerlemesi ile beraber farklı disiplinler ile etkileşimi gün geçtikçe ivmelenerek artmaktadır. Bu disiplinler arası iş birliği yeni alt dalların oluşmasına zemin hazırlar. Oluşan yeni dalların bilim ve teknolojiye katkıları büyüktür. Bu dalların en önemlilerinden bir tanesi opto-akışkanlar sistemlerdir. Opto-akışkan, optik ve mikro-akışkan bilimlerinin kombine edilmesiyle ortaya çıkmış yeni bir çalışma alanıdır. Bu yaklaşımla “mikro-akışkan nedir?” sorusu konuya başlamak için uygun bir soru olacaktır. Mikro-akışkan yapılar az miktarda sıvının (10^{-9} ’dan 10^{-18} litreye kadar) onlarca mikrometreden yüzlerce mikrometreye kadar olabilecek kanallar tarafından işlendiği veya manüple edildiği sistemlerdir [4]. 1980’lerde silikonun işleme prosedürleri kullanılarak elektronik araçlar üretilerek mikro elektronik alanında gelişmeler kaydedilmiştir ve bu sayede mikro hareketli parçalar taşıyan cihazlar üretilmiş ve bu tür cihazlara MEMS (Mikro Elektro Mekanik Sistemler) adı verilmiştir. Bu yeni tip cihazlar endüstriyel uygulamalarda rol oynayarak basınç sensörleri, yazıcı kafaları gibi cihazların gelişmesini sağlamıştır. 1990’lardan itibaren MEMS’in biyolojide, kimya ve biyomedikal uygulamalarda kullanılması ile birlikte akışkanların mikro kanallarda hareketinin kontrol edilmesi gerekliliğini ortaya çıkarmıştır. Bu gereklilikle mikro-akışkan alanı doğmuştur. 2000 yılından itibaren cam, PDMS (PolyDiMethyl Siloxane) gibi malzemelerin içlerine kalıplama yöntemiyle mikro kanallar açılmasıyla çalışmalar yoğunlaşmıştır. Kanalların foto litografi, lazer ve diğer tekniklerin kullanılmasıyla günümüze kadar gelinmiştir. Optik üzerine yapılan araştırmalarda mikro akışkanların kullanılması her iki disiplin için de özgün avantajları ortaya çıkarır.

1.2.1 Motivasyon

Opto-akışkan yapılar, mikroakışkan ve optik teknolojilerini bir araya getiren bir alandır. Günümüzde birçok optik sistem cam, polimer, metal gibi katı malzemeler kullanılarak üretilmektedir. Bu katı malzemelerin yerini akışkanların alması birçok avantajı beraberinde getirmiştir. Özellikle akışkanların sahip olduğu kırma indisi

çeşitliliği, kolay şekillenebilme gibi özgün özellikler sebebi ile katılar ile elde edilemeyen sistemlerin üretilebilmesine imkan sağlamıştır. Örneğin bir cihazda akışkan ortamın optik özellikleri sadece sıvının bir diğeriyle değiştirilmesi ile tamamen farklılaştırılabilir. Ayrıca birbirine karışmayan sıvılar bir araya getirildiğinde yüzey geriliminden dolayı çok daha düzgün ve pürüzsüz arayüzler elde etmek mümkün olmaktadır. Bu özellik optik bileşenlerin çok daha kolay ve düşük maliyetle üretilebilmesine imkan sağlar.

Karışabilen sıvılar ve bunların arayüzleri de opto-akışkan alanında kolaylık sağlamaktadır. Özellikle iki sıvının difüzyonu sayesinde değişen yoğunluk ve kırma indisi gradyanı elde edilir. Bu sistemler sıvı tipi, cihaz yapısı gibi parametreler değiştirilerek kolaylıkla kontrol edilebilir. Örneğin, karışabilen sıvıların bu özelliği kullanılarak üçüncü bir akışkan içerisinde iki akışkan jetin birbirine karıştırılması prensibine dayanan hüzme ayırıcı ve dalga boyu filtresi üretilmiştir. Mevcut optik ayırıcıların aksine opto-akışkan özellikler kullanılarak üretilen hüzme ayırıcı herhangi bir dalga boyu için ayarlanabilir.

Opto-akışkan bir sistemde sıvının ilgili ortama enjeksiyonu, kontrol edilmesi, taşınması kolaydır. Bir opto-akışkan cihazdaki akışkanın değiştirilmesi ile sistemin kırma indisi, spektral absorpsiyon katsayısı ve saçılma katsayısı gibi özellikleri farklılaştırılabilir. Bu özellik adaptif cihazların geliştirilmesine olanak sağlar. Örnek olarak opto-akışkan lazerlerin boya ortamının değiştirilmesiyle farklı dalga boylarında lazer emisyonu elde edilebilir. Bu sayede ayarlanabilir dalga boyuna sahip lazerler üretilmektedir. Ayrıca sıvının opto-akışkan sistemlerde kolaylıkla değiştirilebilmesi katı cihazlarda elde edilmesi mümkün olmayan yenileyebilme özelliğini mümkün kılar.

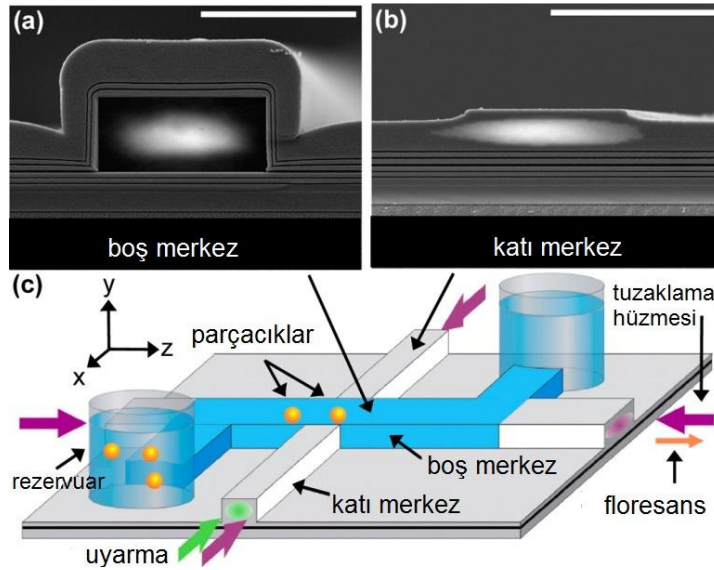
Madde ışık etkileşimi kaynaklı floresans, fosforesans, Raman saçılması, polarizasyon, elastik saçılma, kırma, ikinci harmonik üretimi, uyarılmış ışıma gibi mekanizmaların mikro-akışkan sistemlere uyarlanması bir çok avantaj sağlamaktadır. Bu tip sistemler bu mekanizmalardan faydalanarak yüksek duyarlılıklı optik ölçüm tekniklerinin geliştirildiği görülür. Özellikle biyolojik ve kimyasal algılayıcıların kısa tepki süresi ve yüksek duyarlılıkla çalışmalarını sağlamaktadır. Işığın momentumu her ne kadar zayıf olsada küçük cisimler üzerinde etkili olabilmektedir. Optik tuzaklama küçük parçacıkların ışığın momentumu ile kontrol edildiği gelişmekte olan bir alandır.

1.2.2 Opto-akışkan yapıların uygulama alanları

Opto-akışkan yapılar kullanım ve yapı bileşenlerine göre üç ana gruba ayrılabilir. Her iki ortamın optik özelliklerinin etkin olduğu katı-sıvı hibrit sistemler, yalnız akışkanın optik özelliklerinin etkin olduğu akışkan tabanlı sistemler ve katı parçacıkların hareketinin sıvı ile manüple edildiği koloidal tabanlı sistemler olarak sıralanabilir. Tüm bu sistemlerin avantajlarından faydalanmaya yönelik birçok uygulama alanı bulunmaktadır. Aşağıda en yaygın ve göze çarpan örneklerden birkaçı bulunmaktadır.

1.2.2.1 Opto akışkan dalga kılavuzları

Mevcut dalga kılavuzlarının aksine opto-akışkan yapılarda kılavuzlanan dalga, katı merkez (core) ve katı kaplama (cladding) ile etkileşmek yerine tamamıyla ya da kısmen sıvı ile etkileşir. Bu tip sistemler çeşitli uygulamalara yönelik diğer opto akışkan sistemlerle entegre edilebilirler. Bunlardan en önemlisi etiketsiz (label-free) biyo-algılamadır. Örneğin bir biyo-algılama dalga kılavuzu yüzeye bağlanan biyolojik bir analitten kaynaklanan etkin kırma indisindeki değişimi ölçerek analit hakkında bilgi sağlar. Bu sistemlere benzer sıvı merkezli dalga kılavuzları ve hibrit merkezli dalga kılavuzları da üretilebilmektedir [5]. Şekil 1.4'te boşluk ve katı merkezli dalga kılavuzu örneklerini ve bu tip dalga kılavuzlarının kullanıldığı bir tuzaklama sistemini görmek mümkündür.

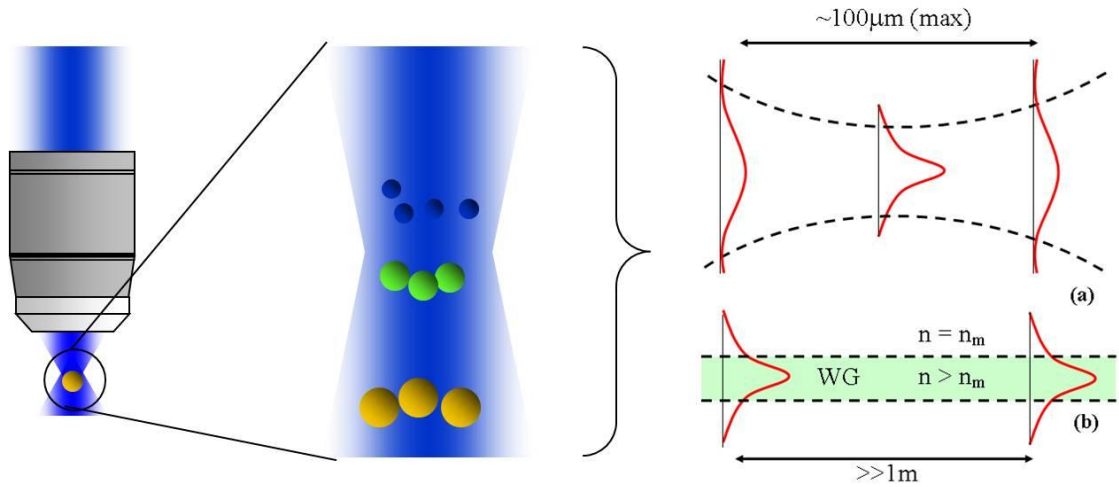


Şekil 1.4 : (a) Boşluk merkezli dalga kılavuzu örneği. (b) Katı merkezli dalga kılavuzu örneği. (c) boşluk ve katı merkezli dalga kılavuzlarının beraber kullanıldığı tuzaklama düzeneği [5].

1.2.2.2 Opto-akışkan tuzaklama ve taşıma

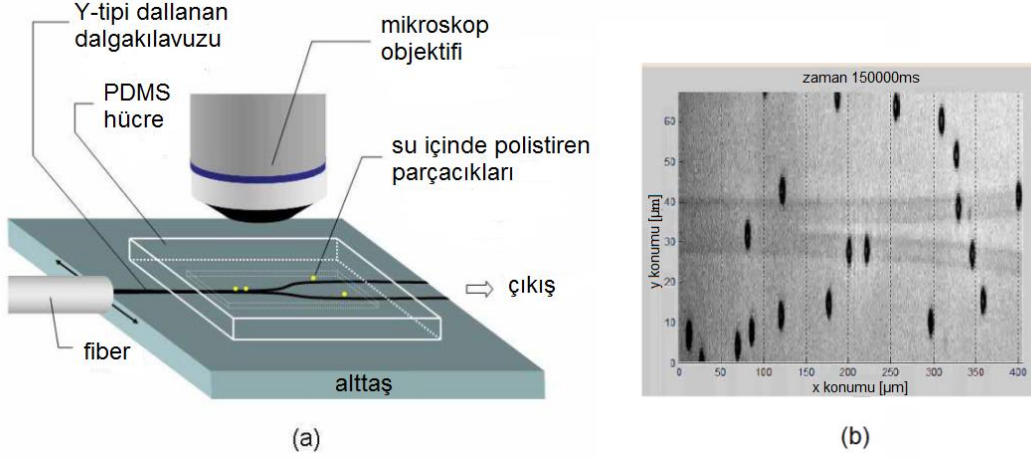
Opto-akışkan tuzaklama sistemler, bir dalga kılavuzunun içerisinde yoğun elektromanyetik dalga kullanarak parçacıkların taşınması, ayrılması ve belirli bir alana hapsedilmesi gibi işlemlerin gerçekleştirildiği sistemlerdir. Klasik mikroakışkan sistemlerle karşılaştırıldığında opto-akışkan tuzaklama ve taşıma sistemlerinde cihazın boyutu küçük olduğundan parçacığa uygulanan itici kuvvet artırılabilir. Bu itici kuvvetin çok yüksek olması parçacık ayırma işlemlerinin çok daha etkili yapılabilmesini sağlar. Ayrıca bu tekniğin yüzey – solüsyon koşullarına çok bağımlı olmaması biyoanalitik ölçümlerin çok daha rahat ve yaygın olarak yapılmasına olanak tanır.

Dalga kılavuzu tabanlı opto-akışkan taşıma sistemlerinde parçacık klasik tuzaklama yöntemlerine göre çok daha uzun mesafe taşınabilir. Şekil 1.5'te de görüleceği gibi bu sistemlerde genellikle dalga dielektrik bir dalga kılavuzu boyunca iletilirken dalga kılavuzundan dışarı sızan evanesans dalga parçacığı yakalayarak taşır.



Şekil 1.5 : Klasik optik tuzaklama ve dalga kılavuzu tabanlı opto-akışkan tuzaklamanın karşılaştırması [6].

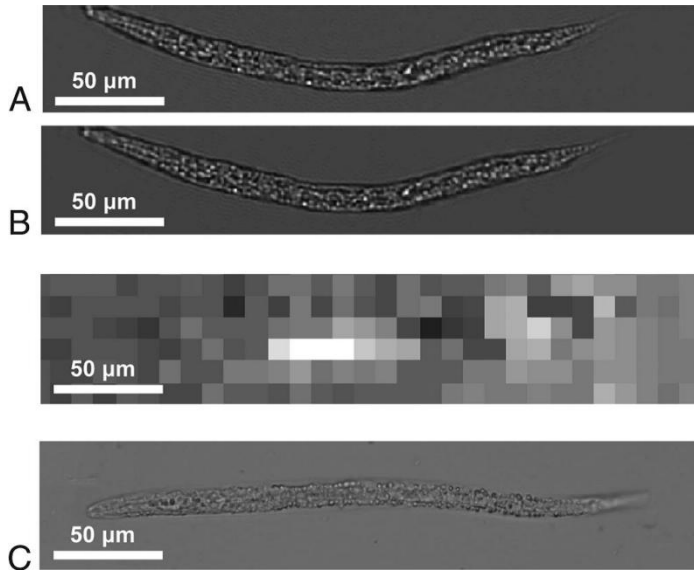
Bu tip sistemlere verilebilecek en iyi örneklerden biri Y-tipi dallanan dalga kılavuzu yapısıdır ve parçacıkların ayrılması için kullanılır [7]. Şekil 1.6'da bu tip bir sistemin şematik gösterimi bulunmaktadır. Ayrılmak istenen parçacık dallanma noktasına geldiğinde uygulanan lazer nedeniyle yakalanır ve hedeflenen yolu izlemesi sağlanır.



Şekil 1.6 : (a) Y-tipi dallanan optik dalga kılavuzunun şematik gösterimi. (b) Tuzaklama ve ayırma sürecinin anlık görüntüsü [7].

1.2.2.3 Opto-akışkan mikroskop (OFM)

Opto-akışkan alanındaki gelişmeler yaygın olarak kullanılan mikroskopların yeniden dizayn edilerek geliştirilmesine olanak sağlamıştır. OFM’de, hücreler ve mikroorganizmalar mikroakışkan aracılığı ile taşınır ve yüksek kalite optik sensör ağından faydalanılarak görüntülenir. Şekil 1.7’de *Caenorhabditis elegans* larvasının OFM, CMOS sensör ve ticari mikroskop ile alınan görüntüleri bulunmaktadır [8]. Bu görüntüler karşılaştırıldığında OFM ile alınan görüntünün çok daha yüksek çözünürlüklü olduğu görülebilir.

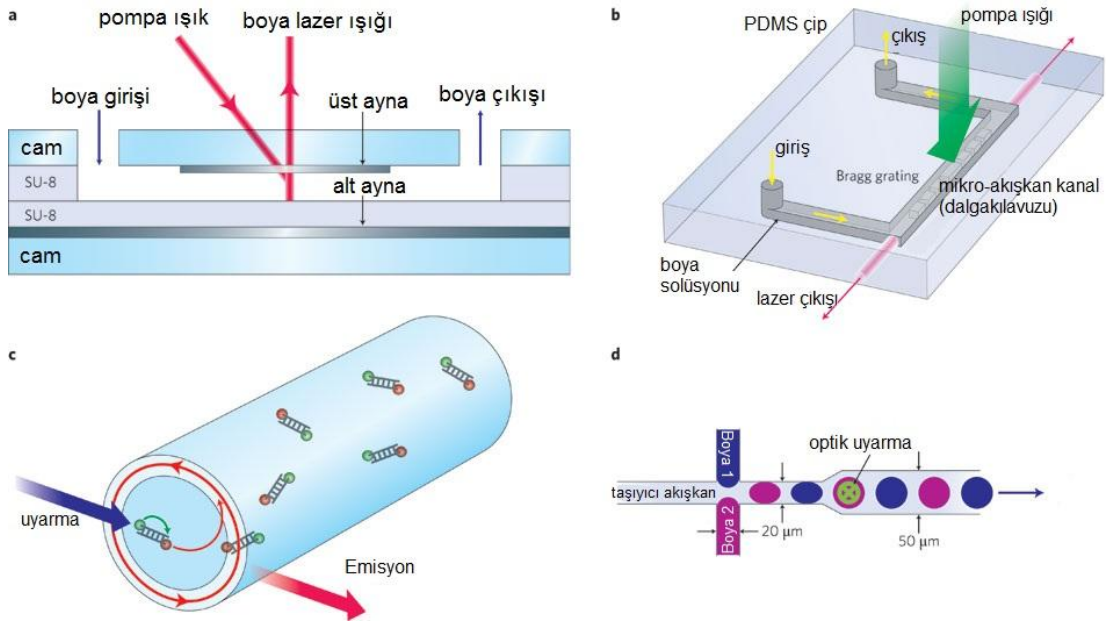


Şekil 1.7 : *C. Elegans* larvasının (a) iki farklı OFM ağı kullanılarak alınan, (b) CMOS sensör kullanılarak alınan ve (c) ticari mikroskop kullanılarak alınan görüntüsü [8].

1.2.2.4 Opto-akışkan boya lazerleri

Boya lazerleri organik boya moleküllerini kazanç ortamı olarak kullanan optik olarak pompalanan cihazlardır. Optik olarak uyarılan boya molekülleri geniş frekans bandında emisyon yapabilirler. Lazer frekansı kavitenin özellikleriyle belirlenir. Neredeyse tüm spektrumu kapsayacak şekilde ışıma yapan farklı boya molekülleri ticari olarak mevcuttur. 1970'li yıllardan bu yana sıvı boyalar ayarlanabilir frekanslı ve yüksek güçlü lazerlerin üretiminde kullanılmaktadır.

Optoakışkan boya lazerlerinin en önemli özeliği ışıma frekansının ayarlanabilir olmasıdır. Bu ışıma frekansı optik yol mesafesi ile kontrol edilir. Bunun için iki farklı yöntem kullanılabilir. Bunlardan biri kullanılan lazer kavitesinin geometrisi kontrol edilerek optik yolun mekanik olarak değiştirilmesidir. Diğeri ise sıvının kırma indisinin değiştirilmesidir. Mikroakışkan platformlar sıvı ortamın hassas bir şekilde kontrol edilmesinde rol oynar.



Şekil 1.8 : Opto-akışkan boya lazeri düşey kavite ve hüzm mimarisi (a), düşey pompa kullanılarak düzlemsel lazer emisyonu geometrisi (b), kapiler içerisinde Förster rezonans enerji transferi kazanç ortamı ile rezonans sağlanan opto-akışkan halka rezonatör lazer (c), mikro-akışkan damla üretimi ile kombine edilmiş çok renkli damla lazeri (d) [9].

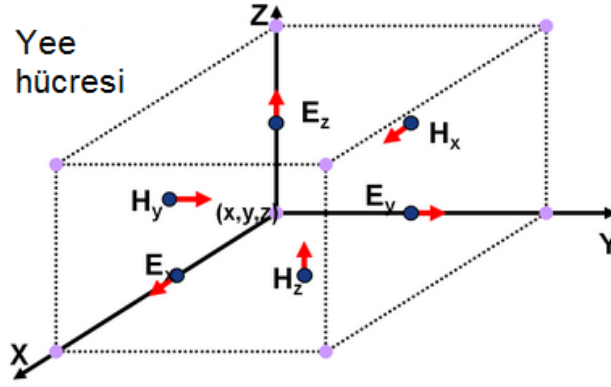
2. PLAZMONİK YAPILARIN NUMERİK OLARAK MODELLENMESİ

Plazmonik yapıların davranışlarının numerik incelenmesi için numerik metotlar geliştirilmiştir. Bunlardan en yaygını FDTD metottur. Bu metodu kullanan modelleme yapan Lumerical programı plazmonik yapıların simüle edilmesi için kullanılmaktadır.

2.1 FDTD Metot

Plazmonik yapıların yakın ve uzak alan optik özellikleri hakkında öngörude bulunabilmek için serbest yüklerle elektromanyetik dalganın elektrik ve manyetik bileşenlerinin nasıl etkileştiğini açıklayan dört kısmi diferansiyel denklemden oluşan Maxwell denklemlerinin çözülmesi gerekmektedir. Her ne kadar bu denklemler basit sistemler için analitik olarak çözülebilsede karmaşık yapılar için numerik çözümler geliştirilmesi gerekmektedir. Zaman alanında sonlu farklar metodu (FDTD) karmaşık sistemlerde Maxwell denklemlerinin çözülebilmesi için geliştirilmiş en yaygın metotlardan bir tanesidir.

FDTD yaklaşımında, incelenen sistem ızgaralarla bölünerek Yee hücreleri denilen küçük kutucuklara bölünür. Bu sayede zaman ve uzay kesikli hale getirilmiş olur. Bazı tahmin değerleri verilerek kübün kenarlarındaki elektrik alanlar hesaplanır ve yüzeylerden geçen manyetik alan değerleri Maxwell denklemlerinin çözümüyle elde edilir. Bu şekilde birinci mertebe değerler elde edilmiş olur. Elde edilen değerler tekrar Maxwell denklemlerine yerleştirilerek ikinci seviye yaklaşım değerleri elde edilir. Bu süreç elde edilen değerler yakınsayana kadar devam eder. Bu yaklaşım kullanıldığında gözönüne alınması gereken en önemli parametre simülasyon bölgesinde seçilen Yee hücrelerinin kenar genişliğidir (Şekil 2.1). Veriler yakınsayana kadar kenar genişlikleri azaltılmalıdır. FDTD metodu Fourier dönüşümünden faydalanarak frekans çözümü elde edilmesini sağlar. Bu sayede ışığın yansıması, iletilmesi gibi değerlerin hesaplanabilmesi mümkün olur.



Şekil 2.1 : Yee hücresi temsili.

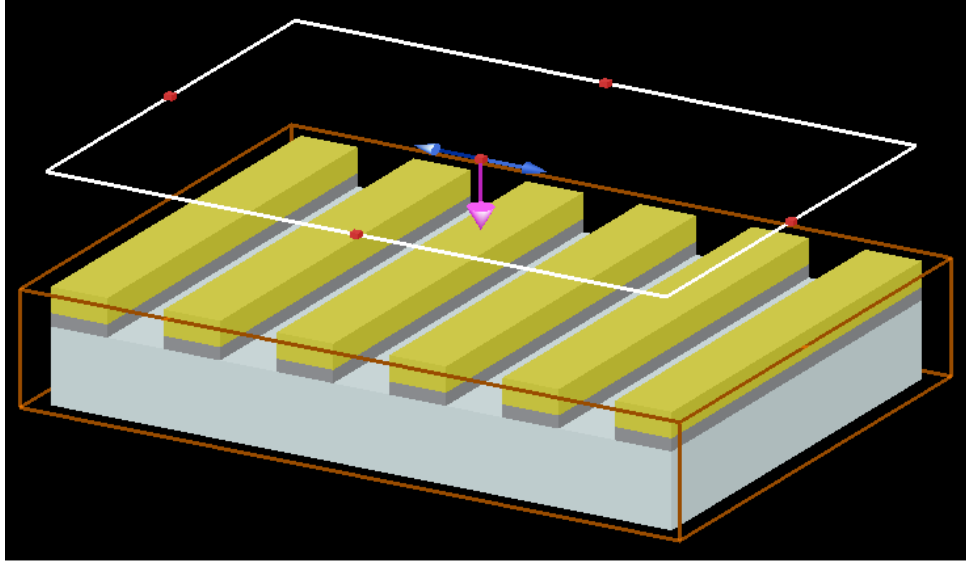
2.2 LumericalTM (FDTD Solutions)

FDTD Solutions, Lumerical firması tarafından üretilen bir bilgisayar yazılımıdır. Bu yazılım sayesinde FDTD Solutions ile çözülmek istenen yapılar, Yee hücreleri, ölçüm alınmak istenen bölgeye konulan görüntüleyiciler, kullanılacak ışık kaynağı gibi bileşenleri grafiksel kullanıcı arayüzü ile simülasyona entegre ederek iki veya üç boyutlu şekilde modelleme yapılabilir.

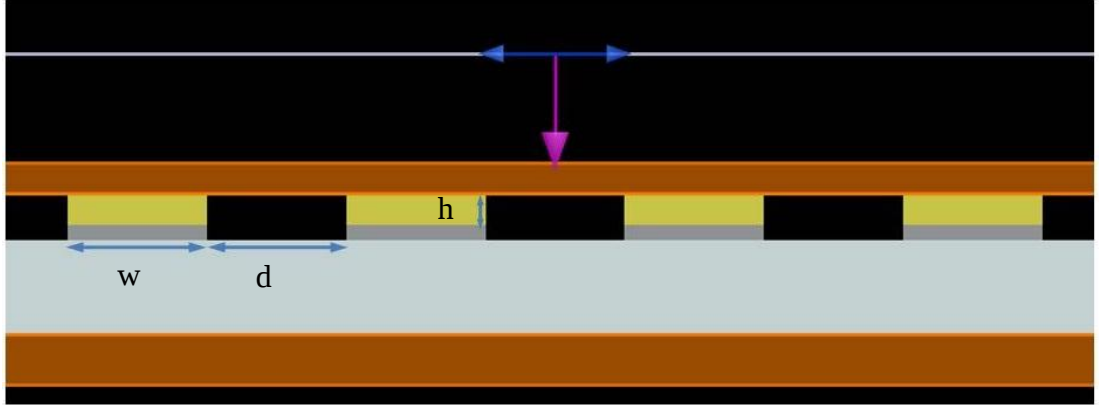
Yaptığımız çalışmalarda deneysel olarak elde ettiğimiz plazmonik yapıları FDTD Solutions programı ile modelledik. Program oluşturulan yapının bileşenlerinin geometrilerini, malzeme tiplerini ve yapının bulunduğu ortamın optik özelliklerini kolaylıkla düzenlemeye olanak sağlar. Deneysel çalışmalarımızda kullandığımız yapıları modelleyebilmek için öncelikle programda cam üzerine krom ve altın nano çubukları tanımladık. Şekil 2.2’de oluşturduğumuz bu simülasyon düzeneğinin perspektif görüntüsü bulunmaktadır. Burada beyaz çerçeve TM polarizasyona sahip düzlem dalga özelliği taşıyan ışık kaynağını temsil eder. Işık kaynağının dalgaboyu Yapının etrafındaki turuncu kafes ise FDTD bölgesi olarak tanımlanan Maxwell denklemlerinin çözüleceği simülasyon alanıdır.

Şekil 2.3’te oluşturduğumuz yapının kesit görüntüsü bulunmaktadır. Burada nano çubukların genişliği (w) ve nano çubuklar arası boşluk (d) sistemin periyodunu $p = w + d$ olacak şekilde belirler. Şekilde görülen h değeri ise çok ince bir tabaka olarak kaplanan (yaklaşık 5 nm) krom tabakasının üzerindeki altının kalınlığını gösterir. Program öncelikle bu yapı için FDTD bölgesini Yee hücrelerine böler. Bu hücrelerin boyutlarını da programla ayarlamak mümkündür. Yee hücrelerinin boyutları küçüldükçe hesaplama hassasiyeti artar. Program yapıyı hücrelere

böldükten sonra, en başta özelliklerini tanımladığımız ışık kaynağının dalgaboyunu belirli bir aralıkta (yaklaşık 400 – 1300 nm) değiştirerek örneğin içerisinden geçirir. Camın alt yüzeyinde tanımlı olan bir monitör aracılığı ile geçen ışığı ölçerek yapının geçirgenliğini kaydeder. Bu sayede dalgaboyu – geçirgenlik grafiği çizildiğinde yapının plazmon rezonans noktaları belirlenir.



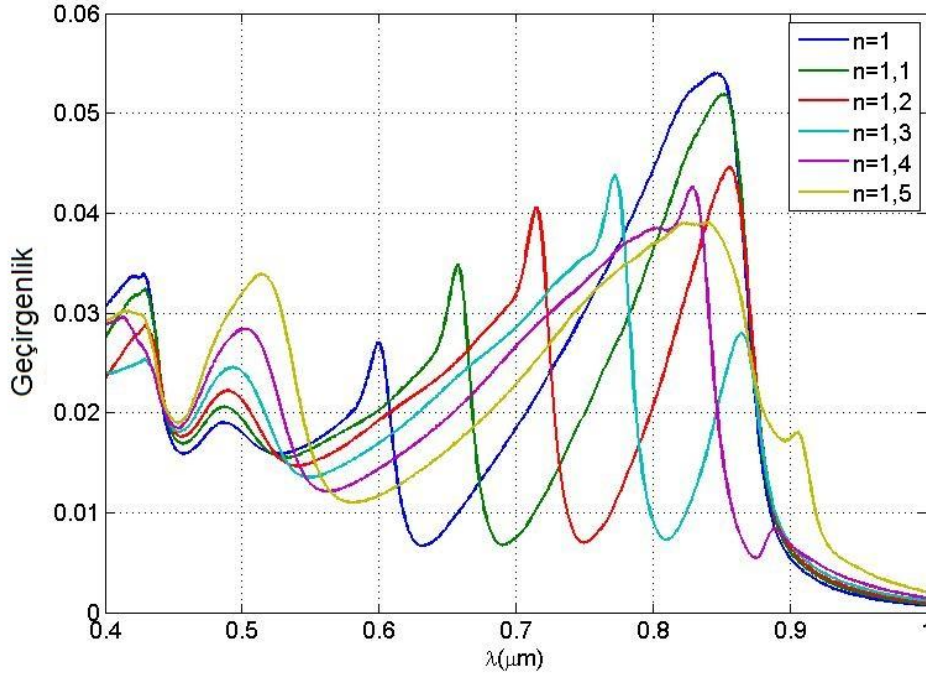
Şekil 2.2 : Lumerical ile oluşturulmuş plazmonik yapının perspektif görünümü.



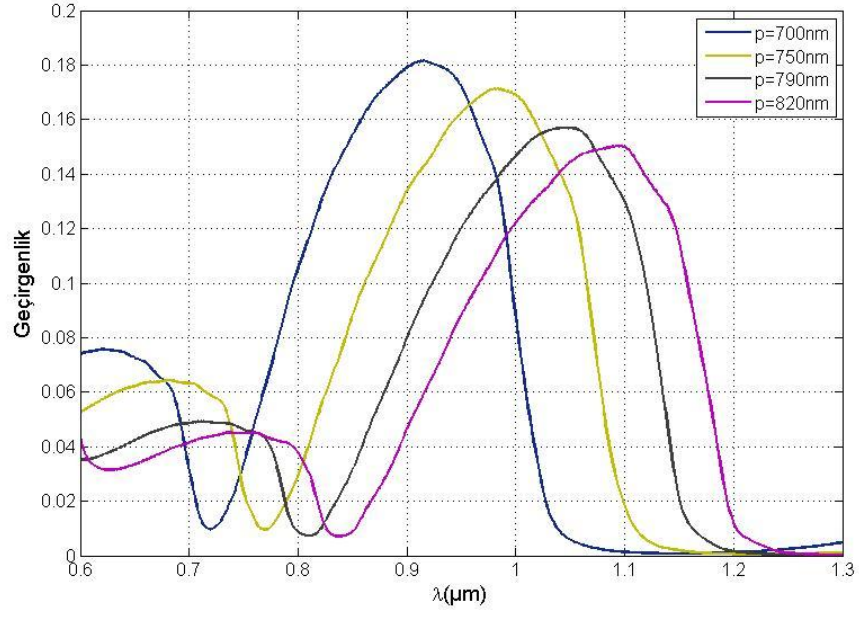
Şekil 2.3 : Lumerical ile oluşturulmuş plazmonik yapının kesiti.

Yaptığımız çalışmada bu program kullanılarak, cam üzerine kaplanmış metal nano çubukların olduğu yapılar farklı periyotlar, farklı kalınlıklar ve farklı kırma indisleri gibi parametreler için incelenmiştir. Şekil 2.4'te yapının içinde bulunduğu ortamın kırma indislerinin farklı değerleri için geçirgenlik grafiği verilmiştir. Burada altın nano çubukların aralarındaki mesafe 100 nm olacak şekilde periyodu 600 nm, krom kalınlığı 10 nm, altın kalınlığı 30 nm'dir. Grafikten de görülebileceği gibi kırma indisi arttıkça plazmon rezonans diplerinin görüldüğü değerler kaymaktadır. Şekil

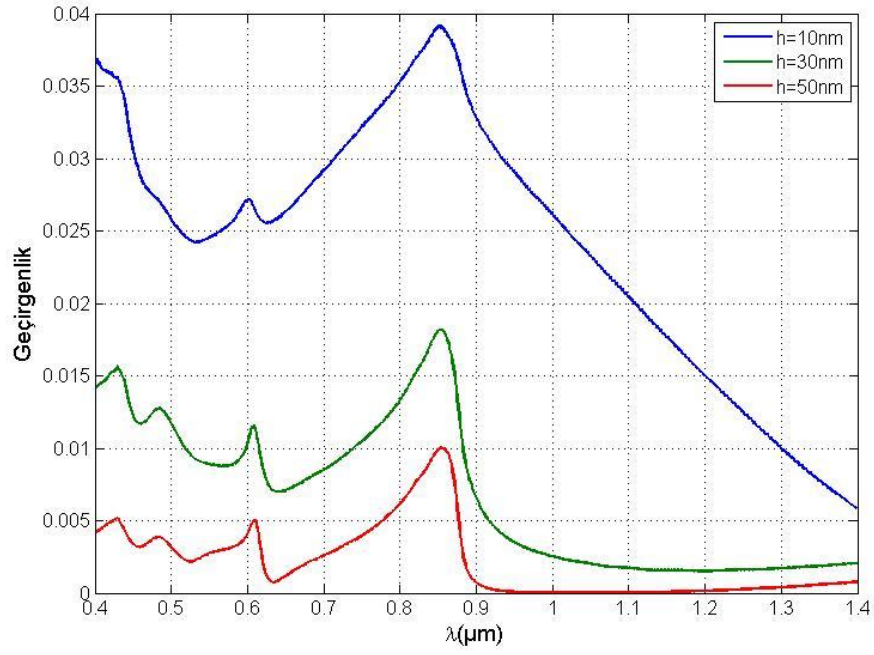
2.5'te krom kalınlığı 10 nm, altın kalınlığı 30 nm, ortamın kırma indisi de 1 olacak şekilde belirlenmiş yapıların aynı dalga boyu aralığındaki geçirgenliği ise farklı periyotlar için görülebilir. Benzer şekilde periyod arttıkça plazmon rezonans dalga boyu kaymaktadır. Şekil 2.6'da ise aynı yapının farklı altın kalınlığı (h) değerleri için geçirgenlik eğrileri görülebilir. Burada yapının altın kalınlığı arttıkça plazmonik etkiler artarken, geçirgenliğin azaldığı görülmektedir.



Şekil 2.4 : Yapının içinde bulunduğu ortamın kırma indislerinin farklı değerleri için geçirgenlik eğrileri.



Şekil 2.5 : Farklı periyotlar için geçirgenlik eğrileri.



Şekil 2.6 : Farklı altın kalınlığı (h) değerleri için geçirgenlik eğrileri.

3. PLAZMONİK YAPILARIN DENEYSEL OLARAK ELDE EDİLMESİ

Plazmonik yapılar genellikle litrografi adı verilen yöntemle üretilirler. Bu yöntem plazmonik yapıların üretilmesinde iyi sonuçlar verse de oldukça zaman alan ve maliyetli bir yöntemdir. Doğrudan lazer ablasyonu daha kolay ve hızlı bir üretim yöntemi sunabilir [10]–[12]. Özellikle femtosaniye lazerler ile ablasyon eşik değerine yakın çalışarak dalga boyu çözünürlüğünün altında işleme yapmak mümkün olmaktadır [13]. Ayrıca son yıllarda femtosaniye lazer ve Bessel hüzmeleri kullanarak 200 nm çözünürlüğe sahip yapıların oluşturulabileceği gösterilmiştir [14].

Tez çalışmasının bu bölümünde, altın ince film üzerinde nano boyutlu yapıların femtosaniye lazer ablasyonu ile oluşturulması, bu yapıların plazmonik özelliklerinin deneysel olarak incelenmesi ve sonuçların hesapsal değerlerle karşılaştırılmaları üzerinde durulacaktır.

3.1 Plazmonik Yapıların Üretimi

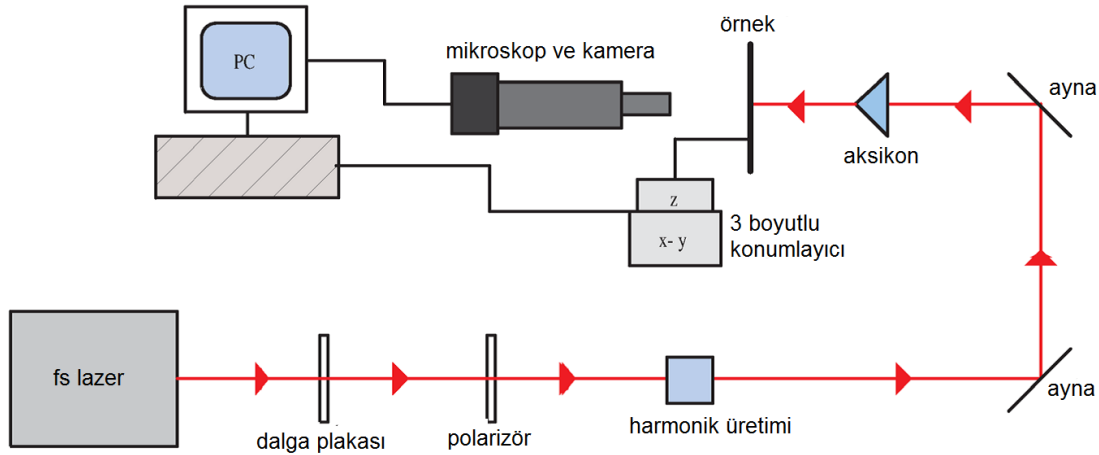
Femtosaniye lazerler sahip oldukları kısa etki süreli darbeler sebebi ile cam, polimer, seramik ve metal gibi birçok malzeme üzerinde çalışılabilmesine imkan sağlamaktadır. Bu lazerlerin metallerle olan etkileşimine bakıldığında nano boyutlu hassas işleme yapılabileceği görülür. Bu da geniş uygulama alanına sahip plazmonik yapıların femtosaniye lazerlerle üretilabileceği fikrini ortaya çıkarmıştır.

Yaptığımız çalışmalarda öncelikle dielektrik bir malzeme olan cam üzerine altın tabakayı yaklaşık 10^{-7} mbar basınç altında buharlaştırma yöntemi ile ince film şeklinde kapladık. Altın filmin homojenliğini arttırmak için cam alttaşın kaplama sırasında dönmesini sağladık. Elde ettiğimiz altın filmin kalınlığı yaklaşık olarak 25 nm'dir. Altın filmin cam yüzeye daha iyi tutunabilmesi için altın ile cam arasına yaklaşık 5 nm kalınlığında krom kapladık. Kapladığımız bu krom katman, toplam geçirgenlikte ufak bir düşüşe ve spektral özelliklerde küçük bir değişime neden olmaktadır (Şekil 3.4).

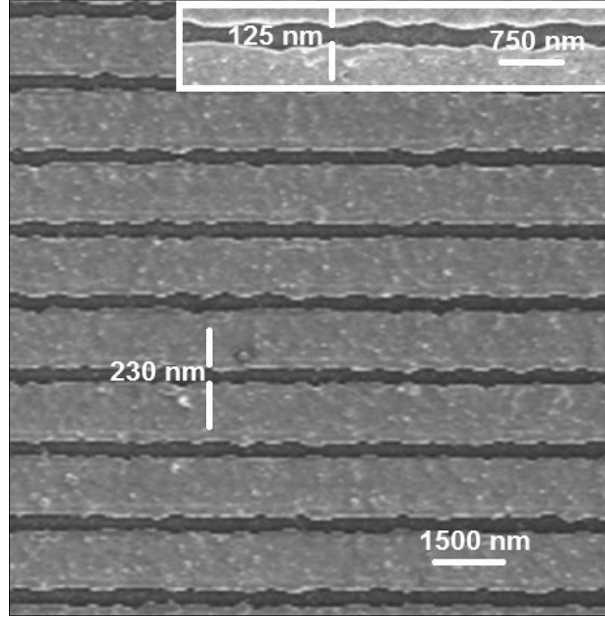
İşleme sırasında kullandığımız deney düzeneğinin şematik gösterimini Şekil 3.1'de görmek mümkündür. Burada kullandığımız lazer 1030 nm dalga boyunda, 1 kHz

frekansına sahip 550 fs etki süresi olan darbeler üretmektedir. Lazerin dalgaboyu doğrudan ayarlanamadığından üçüncü harmonik üretimi gibi doğrusal olmayan optik etkilerden faydalanarak dalgaboyunu küçültmek mümkündür. Bunun için öncelikle lazer hüzmesinin frekansı uygun bir kristalden geçirilerek iki katına çıkarılır (ikinci harmonik üretimi). Hüzme kristalden çıktıktan sonra hem temel harmoniği hem de ikinci harmoniği barındırır. Ardından diğer bir kristalden geçirilen hüzmenin frekansı, frekans toplanması aracılığı ile üç katına çıkarılır. Uygun filtrelerin kullanılmasıyla kullanılan lazerin dalgaboyu 1030 nm'den 343 nm'ye düşürülebilir. Bunu yapmaktaki amacımız daha düşük dalgaboyu elde ederek daha hassas işleme elde etmektir. Lazerin gücü hemen çıkışına yerleştirilen kutuplayıcı ve dalga plakası yardımı ile kontrol edilir. Bunun ardından Bessel hüzmesi elde edebilmek için Gaussyen lazer hüzmesini 40° taban açısına sahip bir aksikondan geçirdik. Bu taban açısı arttıkça elde edilen Bessel hüzmesinin merkez genişliği azalır. Bu sayede ablasyon sırasında daha küçük yapıların oluşturulması mümkün olur.

Altın kaplanan örneği üç eksende hareket edebilen bir piezo konumlayıcıya yerleştirdikten sonra lazer ile ablasyonunu sağladık. Lazer doğrudan metal yüzeye düşerken konumlayıcıyı 50 $\mu\text{m/s}$ hızla hareket ettirerek istenilen bölgedeki altını aşındırdık. Lazerin gücünü azaltarak oluşturduğumuz boşlukların kalınlığının 125 nm'ye kadar düşmesini sağladık. Bu boşluklar 200 nm kalınlığında olduğunda düzgün periyodik yapıları elde etmek mümkün oldu. Yaklaşık 50 $\mu\text{m} \times 50 \mu\text{m}$ bir alanı 200 nm genişliğe sahip şeritler şeklinde aşındırarak Şekil 3.2'de görülen periyodik yapıyı elde ettik.



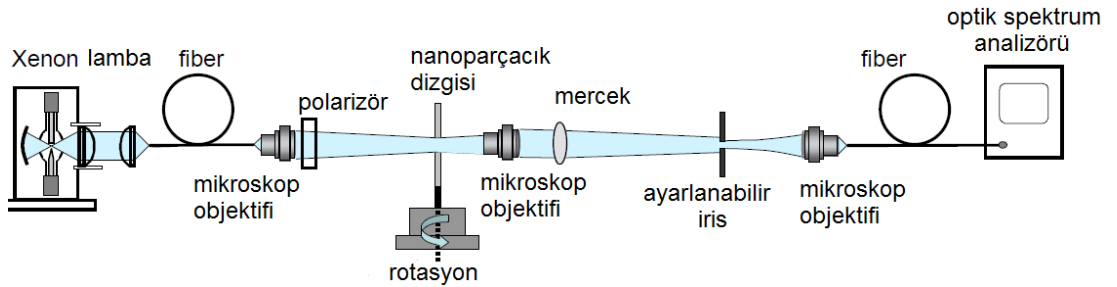
Şekil 3.1 : Plazmonik yapıların ablasyon deney düzeneği.



Şekil 3.2 : Fs lazer ablasyonu ile elde edilen metal periyodik yapının SEM görüntüsü.

3.2 Karakterizasyon

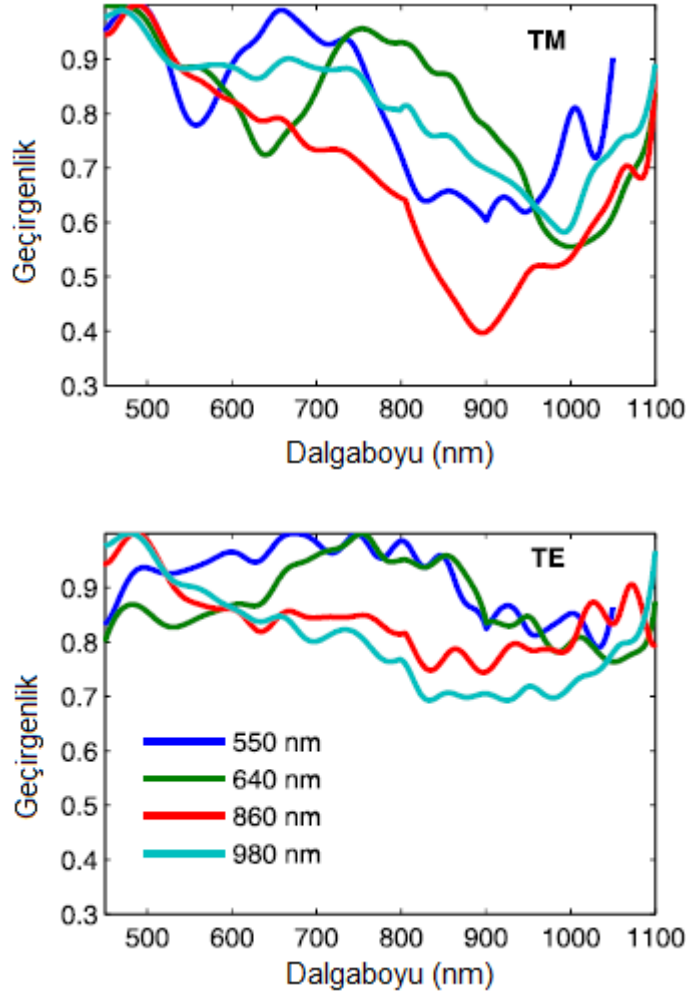
Femtosaniye lazer ablasyonu ile elde ettiğimiz periyodik yapının karakterizasyonu için Şekil 3.3’te görülen deney düzeneğini kullandık [15]. Elde ettiğimiz periyodik yüzeye 400 nm – 1100 nm aralığında geçirgenlik spektroskopisi uyguladık. Kullandığımız ışık kaynağını (tungsten halojen lamba) optik fibere odakladık. Fiber çıkışında ışığı bir mikroskop objektifi ile toplayarak Glan-Taylor kutuplayıcısından geçirdik ve örneğin metal yüzeyine gönderdik. Örneğin diğer yüzeyini de 20× büyütme oranına sahip bir objektif görüntüledik. Görüntü düzlemine yerleştirdiğimiz bir iris ile yalnızca işlenen bölgeden ışığın dedekte edilmesini sağladık. Son olarak iristen geçerek gelen ışığı yine bir objektif yardımı ile spektrometrenin fiberine odakladık.



Şekil 3.3 : Elde edilen periyodik metal yüzeyin karakterizasyon deney düzeneğinin şematik gösterimi [15].

3.3 Sonuçlar

Ölçülen spektral özellikleri plazmonik etkilerle ilişkilendirmek için 550 nm, 640 nm, 860 nm ve 980 nm’lik periyotlara sahip dört nanoçubuk bölgesinin enine elektrik (Transverse Electric - TE) ve enine magnetik (Transverse Magnetic - TM) geçirme spektrumlarını ölçtük. Sonuçları şekil 3.4’te görmek mümkündür.

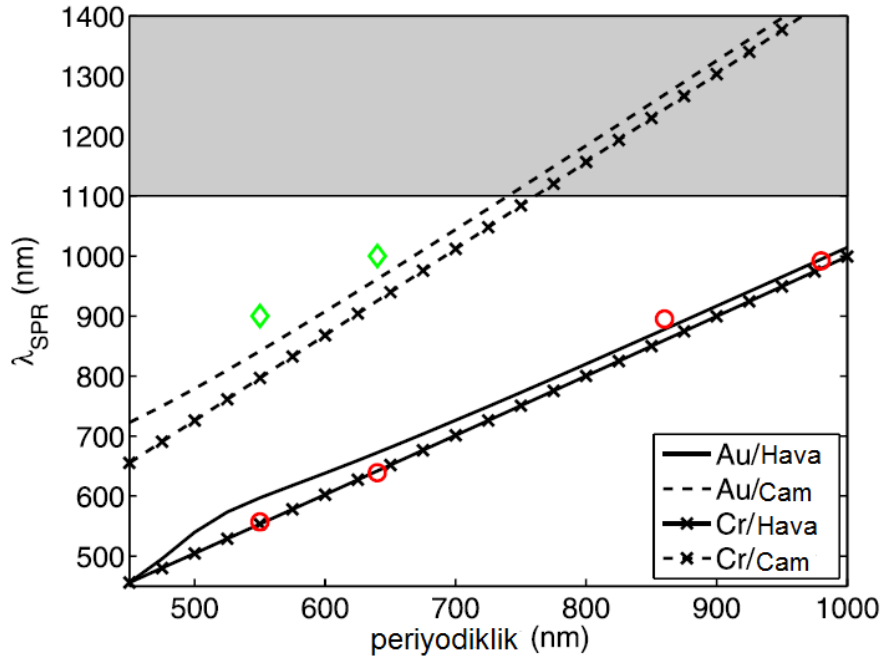


şekil 3.4 : Farklı periyotlara sahip nanoçubuk bölgelerinin dalgaboyuna bağlı geçirgenlik grafikleri.

Grafiklerden de görülebileceği gibi TE modunda beklendiği üzere rezonans gözlenmemiştir. Ancak TM modu için, sırasıyla 550, 640, 860 ve 980 nm periyodlar için 557, 639, 895 ve 992 nm dalgaboylarında dip noktaları gözledik. TM modu için plazmon dağıtkanlık bağıntısından elde edilen faz eşleme koşulu,

$$\lambda_{SPR} = p \sqrt{\frac{\epsilon_d \epsilon_s}{\epsilon_d + \epsilon_s}} \quad (3.1)$$

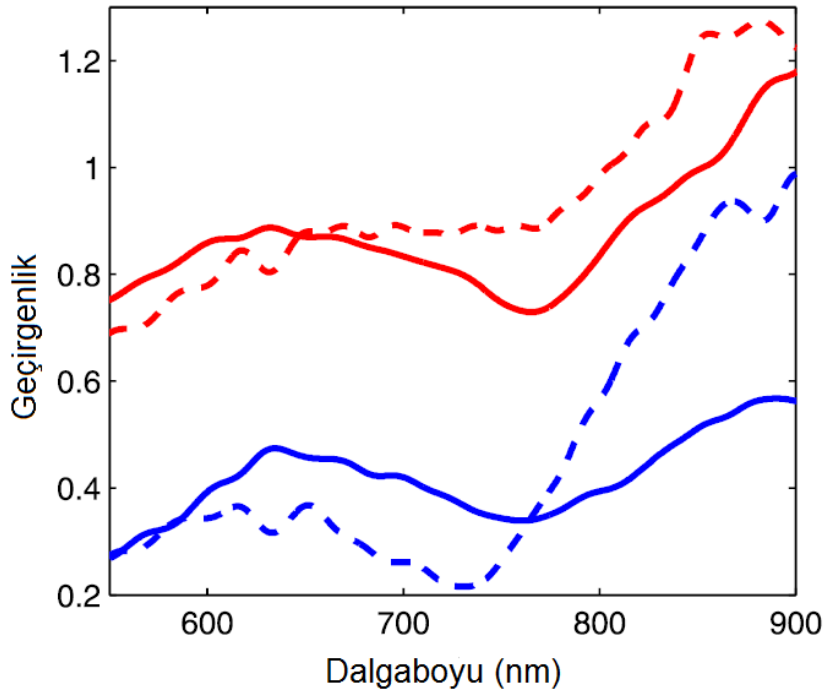
şeklindedir. Burada λ_{SPR} ve p SPR dalgaboyu ve kovuk periyodu, ϵ_d ve ϵ_s sırasıyla dielektrik alttaşın ve metalin elektriksel geçirgenliğidir. Bu koşula göre gözlediğimiz dipler altın – hava arayüzünde oluşan SPP’lerden kaynaklanır. Ancak, Şekil 3.3’te görülebileceği gibi p = 500 ve p = 640 nm periyotları için sırasıyla 900 ve 1000 nm dalgaboylarında ikinci dipler mevcuttur. Cam üzerinde oluşturulan nanoparçacıklar için birden fazla SPR modunun olabileceğini düşünerek (3.1) denklemini kullanarak iki farklı dielektrik katman (hava ve cam) ve iki farklı metal (altın ve krom) için periyot – rezonans dalgaboyu grafiğini çizdik (Şekil 3.5). Camın dielektrik sabitini $\epsilon_{cam} = 2.13$, havanın dielektrik sabitini $\epsilon_{hava} = 1$ aldığımızda, deneysel olarak elde ettiğimiz ikinci diplerin metal – cam arayüzünde oluşan SPP’lerden kaynaklandığını gördük. Kullandığımız nano yapılar 5 nm kalınlığında krom ve 25 nm kalınlığında altın içerdiği ve bu iki metalin SPR dalgaboyları birbirine çok yakın olduğu için ikinci diplerin krom – cam ya da altın – krom arayüzlerinde oluşan SPP’lerden kaynaklandığını söylemek mümkün değildir ancak oluşturduğumuz nano çubukların hem alt hem de üst yüzeylerinde SPP’lerin uyarıldığını söyleyebiliriz.



Şekil 3.5 : Rezonans dalga boyunun periyoda göre hesaplanan değişimi. Dörtgen ve yuvarlak noktalar deneysel olarak diplerin gözlemlendiği değerleri gösterir.

Çift SPP modunun varlığını doğrulamak için metal film üzerine nano çubukları da kaplayacak şekilde gliserin damlatıp üzerine mikroskop lamı yerleştirerek diğer bir deney düzeneği kurduk. Bu sayede nano çubukların altı ve üstü yaklaşık aynı dielektrik sabitine sahip mazelme ile kaplanmış olur. Şekil 3.6, 500 nm ve 810 nm

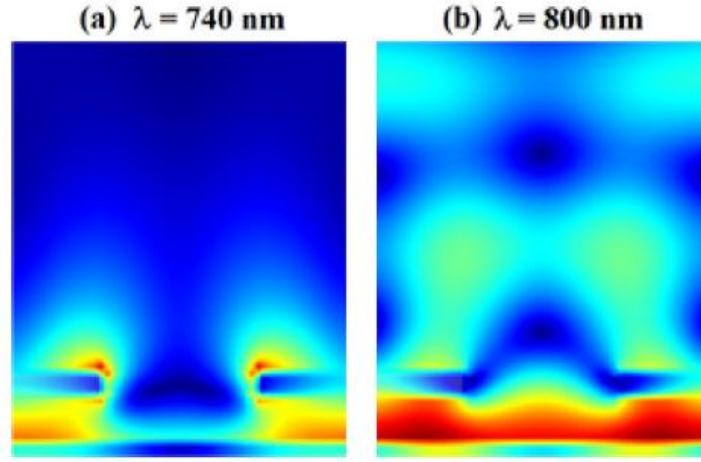
periyoda sahip nano çubukların geçirgenlik spektrumunu göstermektedir. Gliserin uygulamasından önce 500 nm'li periyottaki metal – cam rezonansı ile 810 nm'deki metal – hava rezonansı örtüşür. Gliserin uygulamasından sonra, 810 nm'lik periyotta metal – hava arayüzünde uyarılan SPP modları kaybolurken, 500 nm'lik periyotta metal – cam arayüzünde uyarılan SPP modları neredeyse aynen kalır. Bu sonuçlar birbirini doğrular ve metal nano çubukların hem alt hem de üst tarafındaki SPP'lerin uyarıldığını gösterir.



Şekil 3.6 : Hava ve gliserin içindeki periyodik yapının geçirgenlik spektrumu. Mavi ve kırmızı eğriler sırasıyla 500 nm ve 810 nm periyoda karşı gelir. Kesikli çizgiler gliserin uygulamasından sonra alınan ölçümleri gösterir.

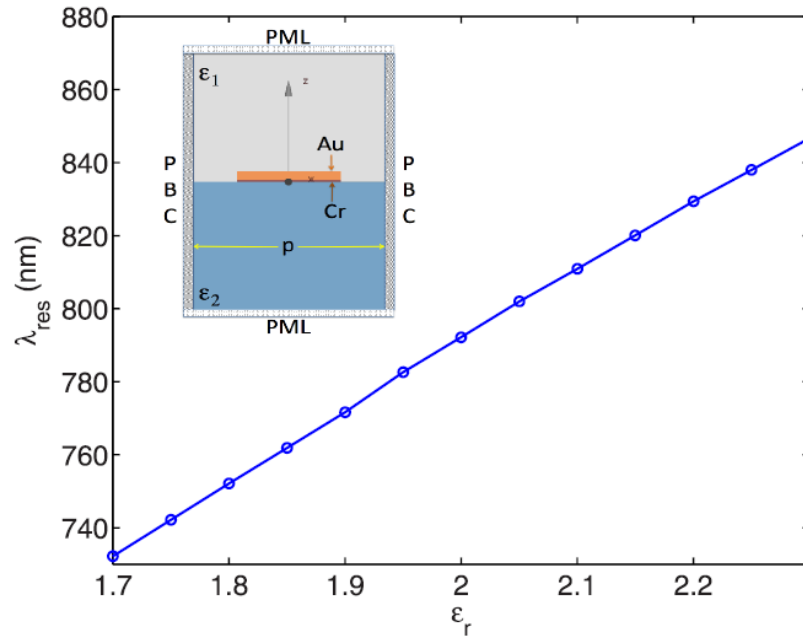
Ayrıca, cam üzerinde üretilen metal nano çubuklar için Lumerical yazılımı aracılığı ile FDTD hesaplarını gerçekleştirdik. Burada camın dielektrik sabitini 2.13, havanın dielektrik sabitini ise 1 olarak aldık. Metalik kısımları ise sırasıyla 25 nm ve 5 nm kalınlığında altın ve krom dikdörtgenler olarak modelledik. Dikdörtgenlerin genişliklerini $w = p - 230$ nm ile hesapladık. Burada p periyodik hücrenin genişliği, 230 nm ise ablasyon yapılan bölgenin genişliğidir. $\pm y$ sınırlarında periyodik sınır koşullarını uyguladık ve ızgara aralığını 0.5 nm olarak ayarladık. Örneğe p -kutuplu düzlem dalgayı cam yüzeyden gelecek şekilde gönderdik. Şekil 3.7a ve 3.7b $p = 500$ nm periyotlu dizgiden geçen 740 nm ve 800 nm

dalgalı boyundaki manyetik alanı göstermektedir. Deneysel sonuçlarda elde ettiğimiz gibi 740 nm'deki geçirgenlik 800 nm'deki geçirgenliğe göre çok daha zayıftır.



Şekil 3.7 : Manyetik alan büyüklüğü (a) $\lambda = 740$ nm (b) $\lambda = 800$ nm.

Son olarak rezonans farklı dielektrik sabitine sahip ortamlar için $p = 500$ nm, 25 nm kalınlığındaki, 270 nm genişliğindeki altın çubuklar için rezonans dalgalı boyundaki kaymayı hesapladık ve Şekil 3.8'deki grafiği elde ettik. Burada ortamın kırma indisi 1.7 ile 2.3 arasında değişirken SPR dalgalı boyu 732 nm ile 847 nm arasında değişmektedir. Bu sonuçlar literatürdeki plazmonik sensörlerin hassasiyeti ile karşılaştırılabilir olduğunu göstermektedir [16], [17].



Şekil 3.8 : Ortamın dielektrik sabitine bağlı SPR dalgalı boyundaki kayma.

4. AEROJEL TABANLI OPTO-AKIŞKAN SİSTEMLERİN ÜRETİMİ

4.1 Aerojeller

Aerojel ilk olarak 1931 yılında Kistler tarafından üretilmiştir. Bu malzemenin aerojel (hava + jel) olarak isimlendirilmesinin nedeni jeldeki sıvı bileşenin katı yapıya zarar vermeden hava ile değiştirilerek elde edilmesidir [18]. Aerojeller, sahip oldukları sıradışı özelliklere rağmen 1970’li yıllara kadar çok fazla çalışılmamıştır. Bu tarihten günümüze kadar geçen sürede ise aerojeller sahip olduğu özgün özellikler nedeni ile oldukça fazla ilgi çekmiş ve birçok alanda geniş uygulamaları söz konusu olmuştur.

Aerojeller katı, gaz ya da normal köpük malzemeler ile karşılaştırıldığında çok düşük termal iletkenliğe, kırma indisine, dielektrik sabitine ve ses hızına; çok yüksek yüzey alanı – hacim oranına ve oldukça boşluklu yapıya sahip malzemelerdir. Ayrıca jelimsi yapı, hiyerarşik ve fraktal mikro yapı, makroskopik boyutta monolit olarak üretilbilme ve kristal olmama gibi karakteristik yapısal özelliklere sahiptir. Çizelge 4.1’de tipik silika aerojellerin özellikleri görülebilir [19].

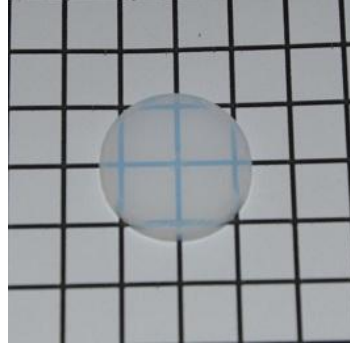
Çizelge 4.1 : Tipik silika aerojel özellikleri [19].

Özellik	Değer
Yoğunluk	0.03 – 0.35 g/cm ³
Yüzey alanı	600 – 1000 m ² /g
Katı oranı	% 0.13 – % 15
Ortalama boşluk çapı	~20 nm
Parçacık çapı	2 – 5 nm
Kırma indisi	1.0 – 1.08
Termal uzama katsayısı	2.0 – 4.0 × 10 ⁻⁶
Dielektrik sabiti	~1.1
Ses hızı	100 m/s

Aerojellerin üretimi yukarıda bahsi geçen mikro yapısal özelliklerin elde edilebilmesine bağlıdır. Genellikle aerojel üretim süreci Şekil 4.1’de gösterildiği gibi 3 temel adımdan oluşur [20]. Bunlardan ilki solüsyon – sol geçisidir. Bu aşamada

The diagram illustrates the sol-gel process and its associated material properties and applications. The process is shown in four stages: **Solüsyon** (Solution), **Sol**, **Jel** (Gel), and **Aerojel**. The processes occurring between these stages are **Hidroliz & Yoğunlaştırma** (Hydrolysis & Concentration) between Solüsyon and Sol, **Jelleşme** (Gelation) between Sol and Jel, and **Kurutma** (Drying) between Jel and Aerojel. The material properties associated with each stage are **Belirti** (Sign) for Solüsyon, **Kontrol** (Control) for Jel, and **Mikroyapı** (Microstructure) for Aerojel. A large blue arrow points from the **Mikroyapı** label down to a box containing **Uygulamalar** (Applications) and **Özellikler** (Properties), which are connected by a double-headed arrow.

Bu üretim yöntemlerine bağlı olarak aerojeller, farklı yoğunluklarda ya da hidrofilik veya hidrofobik yüzeye sahip olabilirler. Kullanım amaçlarına göre aerojellerin hidrofobikliği önem kazanır. Hidrofilik aerojeller sıvı ile temas ettiğinde bir sünger gibi sıvıyı emer. Bu sebeple mikroakışkan uygulamalarında hidrofobik aerojeller çok daha avantajlıdır. Ayrıca aerojeller yoğunlukları arttıkça şeffalık özelliğini kaybeder. Bu nedenle benzer şekilde kullanım amacına göre düşük yoğunluklu ya da yüksek yoğunluklu aerojeller tercih edilebilir. Şekil 4.2’de silika aerojellerin bir örneğini görmek mümkündür. Aerojeller bu özgün özellikleri nedeni ile birçok uygulama alanında kullanılmaktadır. Çizelge 4.2’de aerojellerin özelliklerine bağlı uygulama alanları özetlenmektedir [24].



(a)



(b)

Şekil 4.2 : (a) Düşük yoğunluğa sahip silika aerogel. (b) Hidrofobik yüzeye sahip silika aerogel.

Çizelge 4.2 : Aerojellerin özelliklerine bağlı uygulama alanları [24].

Yapısal Özellik	Özellikleri	Uygulama Alanları
Termal	Yüksek sıcaklığa dayanıklı	Solar cihazlar
İletkenlik	Yalıtkan	Otomobiller
	Şeffaf	Bina inşaatı
Yoğunluk /	En hafif sentetik katı	Sensörler
Boşluklu yapı	Yüksek yüzey alanı	Kirletici gazlar için filtreler
		Pigment taşıyıcıları
Optik	Şeffaf	Düşük ağırlık optik
	Düşük kırma indisi	Cherenkov detektörleri
		Işık kılavuzları
Akustik	Düşük ses hızı	Ses korumalı odalar
Mekanik	Esnek	Enerji absorplayıcı
	Hafif	Yüksek hızlı parçacık tuzakları
Elektrik	Düşük dielektrik sabiti	Kapasitörler
	Yüksek yüzey alanı	Vakum elektrod ayırıcı

Çizelge 4.2’den de görülebileceği gibi aerojellerin ilgi çekici optik özellikleri vardır. Özellikle silika aerojellerin kırıcılık indislerinin havaya çok yakın olması (1.0 – 1.08) sayesinde opto-akışkan sistemlerde kullanılabilirler. Ancak aerojellerin opto-akışkan sistemlere entegre edilebilmesi için birtakım işlemlere maruz bırakılması gerekir. Silika aerojellerin kırılkan yapıları bu işlemleri oldukça zorlaştırmaktadır. Bu zorluklar, alternatif yöntemlerin geliştirilmesi ihtiyacını doğurmuştur. Mekanik olarak delme, kesme, kalıp kullanma gibi yöntemler denenmiştir [25]–[27]. Bu yöntemlerin yanında aerojellerin lazerle işlenebileceği de öne sürülmüştür [28].

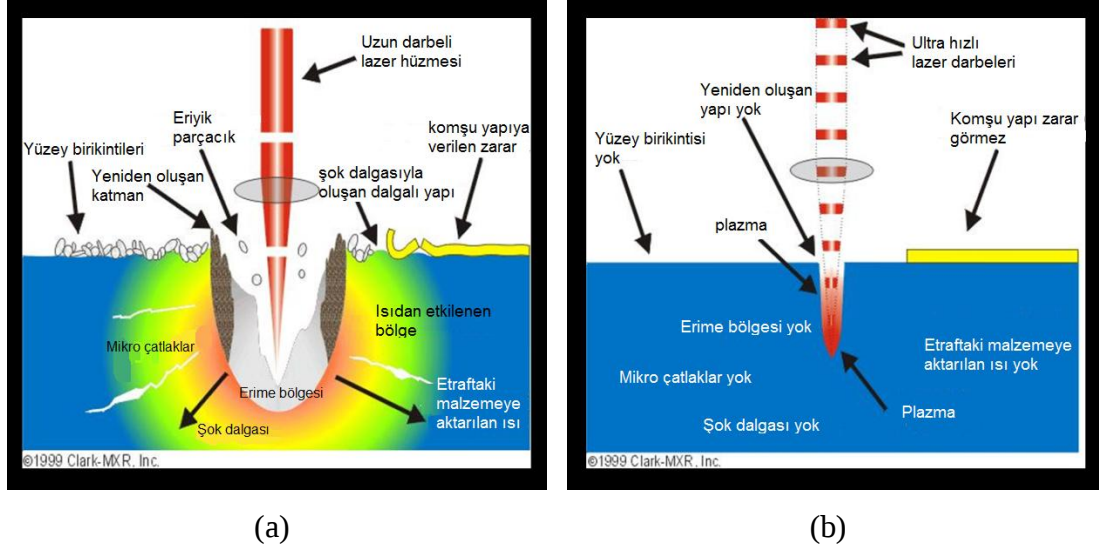
4.2 Femtosaniye Lazer Ablasyonu

Femtosaniye lazerler, etki süresi bir pikosaniyenin ($1 \text{ ps} = 10^{-12} \text{ s}$) altında optik atımlar üreten çok hızlı lazerlerdir ve temel olarak etki süreleri adında da belirtildiği gibi femtosaniye ($1 \text{ fs} = 10^{-15} \text{ s}$) mertebesinde dir. Bu şekildeki çok kısa atımların üretilmesi mod kilitleme (mode-locking) adı verilen özel bir yöntemle mümkün olmaktadır. Bu yöntemin temeli, lazer kovuğunun modları arasında sabit bir faz ilişkisinin oluşturulmasına dayanır. Bu tarz lazerlere faz-kilitli ya da mod-kilitli lazerler adı verilir [29]. Tipik ortalama çıkış gücü 100 mW ile 1 W arasında değişir.

Katı malzemelerin yüzeyinde ya da içerisinde mikrometre mertebesinde yapıların oluşturulmasında, etki süreleri femtosaniye mertebesinde olan lazer atımlarının kullanılması süreci, femtosaniye mikro işleme olarak adlandırılır. Femtosaniye lazer ablasyonu lazerin etki etmesinden hemen sonra iki aşamada gerçekleşir [12]. Öncelikle yüzeyde optik nüfuz derinliği mertebesindeki bir kısım, elektron yayını, süblimleşme ve plazma durumuna geçiş aracılığı ile aşındırılır. Bu aşındırma süreci nanosaniye ya da daha kısa sürede meydana gelir. Kalan ısı malzemeye nüfuz eder ve yaklaşık 10 ns içerisinde yayılır. Şekil 4.3’ten de görülebileceği gibi uzun etki süreli atımlarla yapılan işlemede ise kalan enerji ısı olarak malzemeye nüfuz eder. Bu sırada malzeme içerisinde yayılan şok dalgası sebebi ile mikro çatlaklar oluşur. Ayrıca işleme sırasında eriyen malzeme koparak etrafa yayılır ve yüzey üzerine yapışarak pürüzlü bir yapı oluşturur. Bunun yanı sıra işlenen bölgenin etrafındaki diğer yapılar da zarar görür. Kısa etki süreli atımların kullanılması durumunda ise bu bahsedilen olumsuzlukların hiçbiri ortaya çıkmaz. Artan enerji malzemeye ısı olarak yayılmadan atım ortadan kalkar. Böylece çok daha hassas ve temiz bir işleme

yapılabilir. Uzun etki süreli atımlarla işleme hassasiyeti 20 μm ile sınırlı kalırken kısa etki süreli atımlarla mikrondan küçük işleme yapılabilir.

Bu tip yüksek enerjili lazerler saydam malzemelerden metallere birçok malzeme türü üzerinde işleme yapmaya imkan sağlar.



Şekil 4.3 : (a) Uzun etki süreli atımlar ve (b) kısa etki süreli atımlar ile işlemenin şematik karşılaştırılması [30].

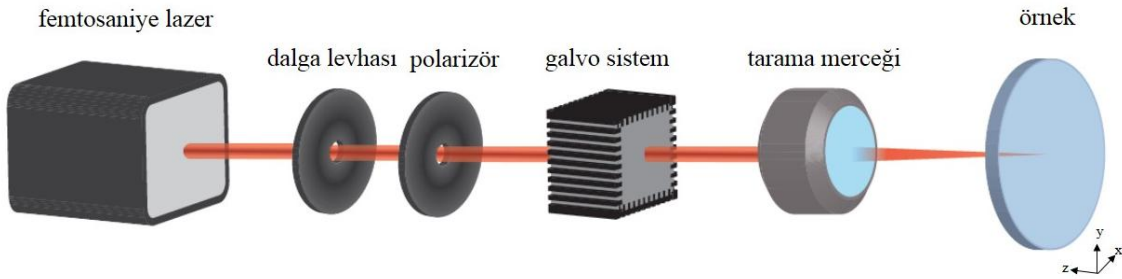
4.3 Deney Düzenegi

Aerojeller tüm ilgi çekici özelliklerinin yanısıra oldukça kırılgan malzemelerdir. Bu sebeple üzerlerinde delme, kesme gibi mekanik işlem yapmak oldukça zordur [25]. Bu alanda yapılan bazı çalışmalar aerojellerin sahip olduğu düşük termal iletkenlik özelliği sayesinde femtosaniye lazer ile işlenebileceğini göstermiştir [28].

Yaptığımız çalışmada dalga kılavuzu olarak kullanılabilecek bir opto-akışkan sistemin üretilmesi amaçlanmıştır. Dalga kılavuzu özelliği gösteren opto-akışkan sistemlerde tam yansıma koşulunun sağlanabilmesinde kullanılan materyallerin kırıcılık indisleri etkin rol oynamaktadır. Dalganın ilerleyeceği ortam olan sıvının kırıcılık indisi konak malzemenin kırıcılık indisinden büyük olmalıdır. Bu tip sistemlerde konak malzeme olarak genellikle cam (kırma indisi 1.5), polimer gibi malzemeler kullanılır. Dolayısı ile kırıcılık indisi bu malzemelerden küçük olan birçok sıvı opto-akışkan sistemlerde kullanılamamaktadır. Aerojeller bu noktada hem katı olmaları hem de havaya yakın kırma indisine sahip olmaları sebebiyle amaçladığımız opto-akışkan sistemin üretilmesi için oldukça elverişli malzemelerdir.

Bunun için hidrofobik özelliğe sahip silika aerjel monoliti içerisinde sıvı enjekte edilebilecek bir mikro kanal oluşturmayı hedefledik.

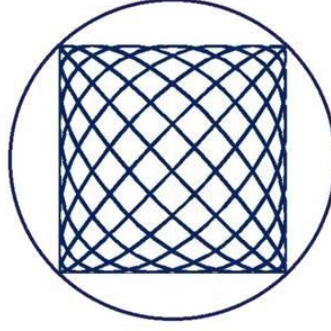
Aerjel içerisinde mikro kanal oluşturmak için kullandığımız deney düzeneği Şekil 4.4'teki gibidir. Kullandığımız lazerin atım etki süresi 550 fs, frekansı 1 kHz, dalgaboyu ise 1030 nm'dir. İşleme sırasında lazer hüzmesini önce sinyal üretici ile kontrol ettiğimiz Galvo ayna ile yönlendirerek ve ardından tarama merceğinden geçirerek aerjel yüzeyine x-y düzleminde odakladık. Burada hüzmenin boyutu yaklaşık olarak 10 μm 'dir. Üç boyutta hareket edebilen konumlayıcı, aerjelin z-ekseni boyunca hareketini kontrol eder. Lazerin odak noktasını, aerjel içerisinde hareket ettirerek istenilen bölgenin ablasyonunu sağladık. İşleme sırasında lazerin gücünü maksimum güç olan 200 mW'a ayarladık. Burada kullandığımız tarama merceği 2.54 cm odak uzaklığına sahiptir.



Şekil 4.4 : Femtosaniye lazer ablasyonu deney düzeneğinin şematik gösterimi.

Galvo aynayı ilk olarak x-y ekseninde çember çizecek şekilde ayarladık. Galvo aynaların hareket frekansı 200 mHz'dir. Bu esnada örneği z ekseninde 10 $\mu\text{m/s}$ hızla hareket ettirerek aerjelin kalınlığı boyunca hareket ettirdik. Bu esnada Galvo aynalar ile yönlendirdiğimiz lazer hüzmesi silika aerjeli aşındırarak istediğimiz çaptaki çemberi oluşturdu. Ardından aynı bölgeyi lissajous deseni ile tarayardık ve ilk aşamada elde ettiğimiz çemberin içini boşaltana kadar lissajous deseni ile taramayı tekrarladık. Kullandığımız bu ablasyon deseninin şematik gösterimi Şekil 4.5'teki gibidir.

Deney sonucunda 5 mm uzunluğunda 0.6 mm genişliğinde bir silindir kitleyi içerisinde tahliye ederek doğrusal bir kanal elde etmeyi başardık.

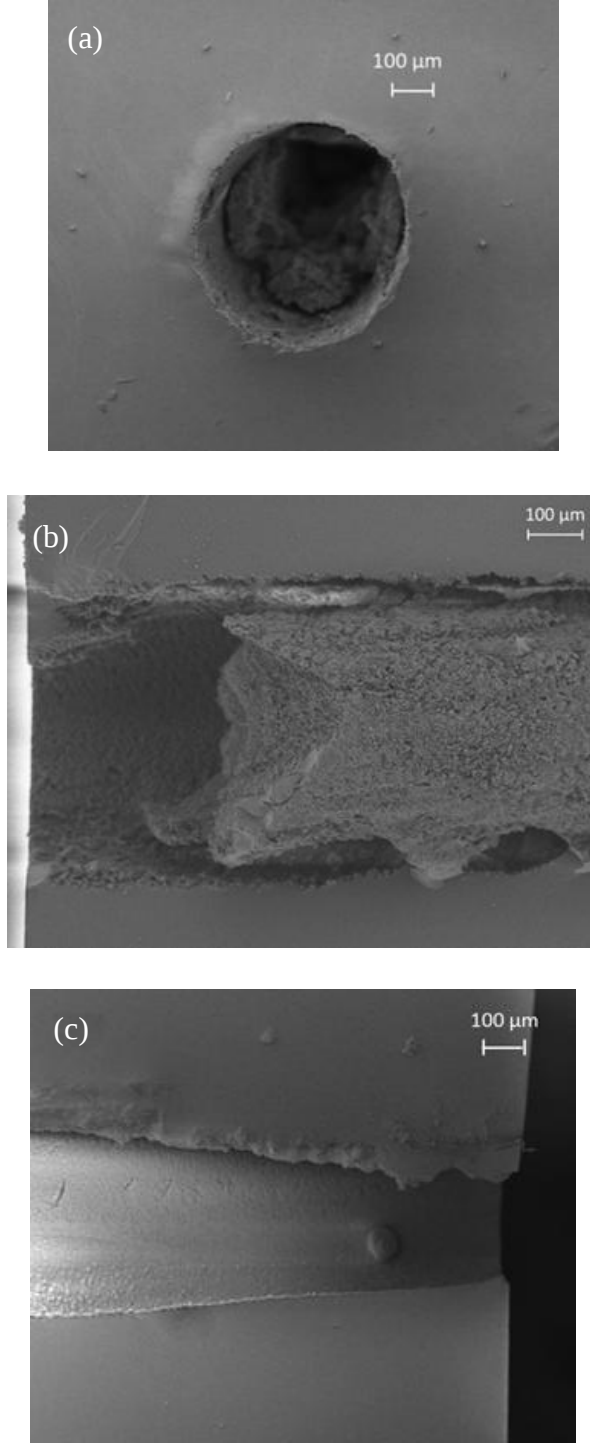


Şekil 4.5 : Ablasyon deseninin şematik gösterimi.

4.4 Sonuçlar

Yaptığımız çalışmalarda delme, kesme gibi mekanik yöntemlerle işlemesi çok zor olan silika aerojellerin oldukça hassas ve kolay bir şekilde femtosaniye lazerlerle işlenebileceğini göstermiş olduk. Daha önce yapılan çalışmalarda femtosaniye lazeri ile silika aerojellerde yapısal değişiklik meydana getirilmiş olsa da, [28], hidrofobik silika aerjel içerisinde mikro-akışkan kanal olarak kullanılabilecek boyutlarda ve özelliklerde kanalın açılması bizim çalışmamız ile mümkün olmuştur. Bölüm 4.3'te anlatılan yöntemle elde ettiğimiz kanalın SEM görüntüsü Şekil 4.6'daki gibidir. Buradan da görülebileceği gibi elde ettiğimiz kanal oldukça düzgündür.

Burada kanal derinliğini etkileyen en önemli faktörlerden biri işleme sırasında kopan silika aerjel parçacıklarının kanal içerisinde birikmesidir. Biriken bu silika parçacıkları lazer hüzmesinin saçılmasına dolayısı ile kanalın derinliğinin çok fazla arttırılamamasına neden olmaktadır. Bu durumu engelleyebilmek için işleme sırasında kanala yaklaşık 4 atm basınçlı nitrojen gazı uyguladık. Nitrojen gazı uygulamadan açtığımız kanalın SEM görüntüsünü Şekil 4.6b'de, nitrojen gazı uygulayarak açtığımız kanalın SEM görüntüsünü ise Şekil 4.6c'de görmek mümkündür. Buradan da görülebileceği gibi işleme sırasında nitrojen gazı kullandığımızda elde ettiğimiz kanalın içi çok daha temiz olmaktadır. Bu sayede elde etmek istediğimiz mikro kanalın derinliğini arttırmak mümkün olmaktadır.



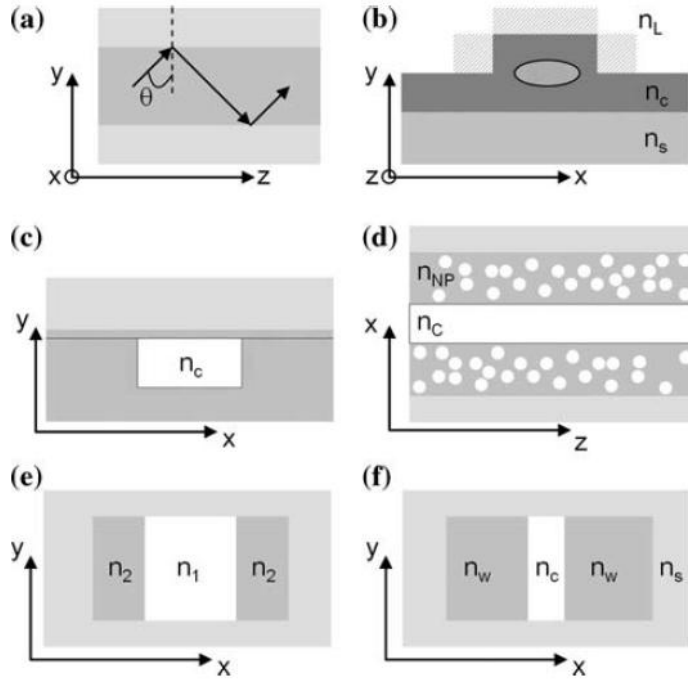
Şekil 4.6 : İşlenen aerogelin SEM görüntüleri. (a) Aerojel içerisinde oluşturulan mikrokana1ın görüntüsü. Derinliği yaklaşık olarak 300 µm, çapı ise 500 µm'dir. (b) Aerojelin içerinde oluşturulan mikrokana1ın kesit görüntüsü. İşleme sırasında kana1da biriken silika parçacıkları. (c) Yüksek basınçlı nitrojen gazı uygulanarak açılan kana1ın kesit görüntüsü.

5. AEROJEL TABANLI OPTO-AKIŞKAN SİSTEMİN KARAKTERİZASYONU

Optik dalga kılavuzlarının büyük bir çoğunluğu tam iç yansıma (total internal reflection – TIR) temellidir. İndis kılavuzlama adı da verilen bu tip sistemlerde yüksek kırma indisine (n_c) sahip bir merkez düşük kırma indisine (n_s) sahip bir malzeme ile Şekil 5.1a'deki gibi kaplanır. Core – kaplama arayüzüne tam yansıma koşulunu yerine getirecek şekilde $\theta_c = \sin^{-1} n_s/n_c$ kritik açısıyla gelen ışık boyuna yönde (z) ilerler. Bu koşulun sağlanması durumunda kaplama materyale geçiş yapamaz ve yalnızca merkezde ilerler. İndis kılavuzlama prensibi çeşitli geometrilerde kesite sahip bir ya da iki boyutta yapılarda uygulanabilir [31]. (Şekil 5.1).

Katı merkezli dalga kılavuzlarında tam iç yansıma koşulunu yerine getiren ($n_c > n_s$) kaplama materyallerini sağlamak sıvı merkezli dalga kılavuzlarına göre daha kolaydır. Sıvı merkezli dalga kılavuzlarında kullanılan su ya da diğer akışkanın kırma indisi (~ 1.33) genellikle kaplama materyalinin (polimer ve silikon tabanlı malzemeler) kırma indisinden ($1.4 - 3.5$) düşüktür. Bu şekilde düşünüldüğünde sıvı merkezli dalga kılavuzunun tam iç yansıma koşulunu sağlaması mümkün görünmese de çeşitli yöntemlerle TIR temelli dalga kılavuzları üretilmiştir [32]. Bu yöntemlere ihtiyaç duyulmadan doğrudan sıvının kırma indisinden düşük kırma indisine sahip katı kaplama malzeme bulunması ise çok daha avantajlıdır.

Bölüm 4.1'de anlatılan arojeller sahip oldukları çok düşük kırma indisi sebebi ile sıvı merkezli dalga kılavuzları için oldukça uygun kaplama malzemeleridir. Bu sebeple deneysel çalışmalarımızda öncelikle arojel içerisinde doğrusal bir mikroakışkan kanal oluşturmayı amaçladık. Ardından oluşturulan kanalın sıvı merkezli dalga kılavuzu olarak kullanılıp kullanılamayacağını inceledik. Tüm bu araştırmalar sırasında gerek arojelin kırılma yapısı gerekse mikron mertebesinde çalışıyor olmak oldukça hassas ve titiz bir çalışmayı gerektirmiştir.



Şekil 5.1 : Tam iç yansıma temelli dalga kılavuzları. (a) Dalga kılavuzunda tam iç yansıma prensibi. (b) Katı merkeze sahip dalga kılavuzunun kesiti. (c) Sıvı merkezli dalga kılavuzu kesiti. (d) nano boşluklu kaplama materyaline sahip dalga kılavuzu kesiti. (e) sıvı – sıvı merkezli (L2) dalga kılavuzu kesiti. (f) slot dalga kılavuzu kesiti [31].

5.1 Deney Düzenegi

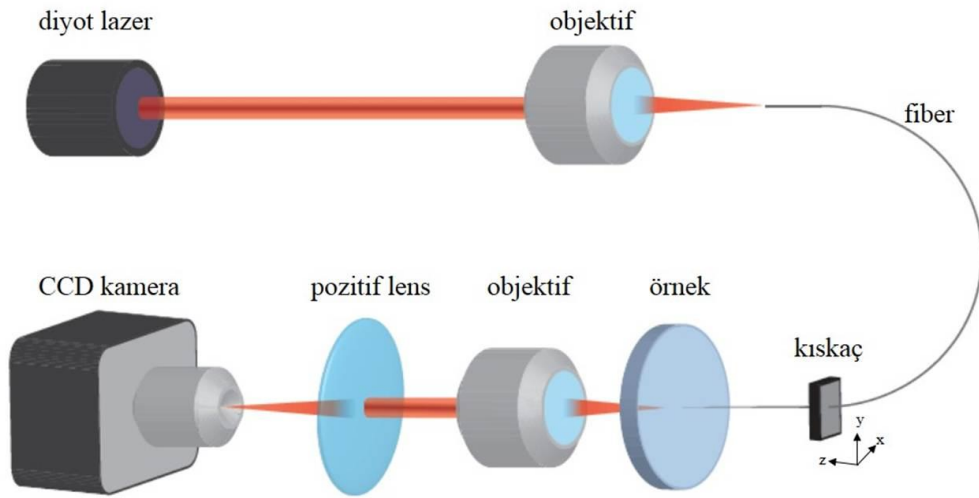
Yaptığımız çalışmalarda silika aerojellerin içinde mikro-akışkan kanalın femtosaniye lazer ablasyonu ile oluşturulabileceğini göstermiştik. Bu mikro-akışkan kanalın dalga kılavuzu olarak kullanılabileceğini göstermek için karakterizasyon deneylerini gerçekleştirdik.

Bölüm 4.3'te anlatılan yöntemle açtığımız kanalın içerisine kırma indisi aerojelin kırma indisinden daha büyük olan etilen glikol doldurduk. Etilen glikol suya göre daha zor buharlaştığı için kılavuzlama deneylerinde daha elverişlidir. Ayrıca etilen glikol içerisine 494 nm dalga boyunu absorplayarak 521 nm dalga boyunda pik ışımaya yapan sentetik bir organik bileşen olan floresin ekledik. Bu sayede mikro kanala doldurduğumuz etilen glikolün kanal içerisinde muhafaza edilip edilmediğini rahatlıkla anlamak mümkün olmaktadır. Kanalı 405 nm dalga boyuna sahip mavi ışık ile aydınlatığımızda, kanaldan yayılan sarı ışık çok net görünmektedir (Şekil 5.2).



Şekil 5.2 : Mavi ışık ile aydınlatılan mikro-akışkan kanalın içinden yayılan sarı ışık.

Bu şekilde sıvı doldurulan mikro kanalın karakterizasyonu için kullandığımız deney düzeneğinin şematik gösterimi Şekil 5.3’deki gibidir. Düzenekte kullandığımız diyot lazerin dalga boyu 632 nm’dir. Lazeri bir objektif yardımı ile numerik açıklığı 0.57 olan bir fiberin girişine odakladık. Bu fiber yardımı ile taşıdığımız ışığı kanalın girişine yönlendirdikten sonra kanalın çıkışını bir objektif ve lens yardımıyla CCD kamera ile gözlemledik.

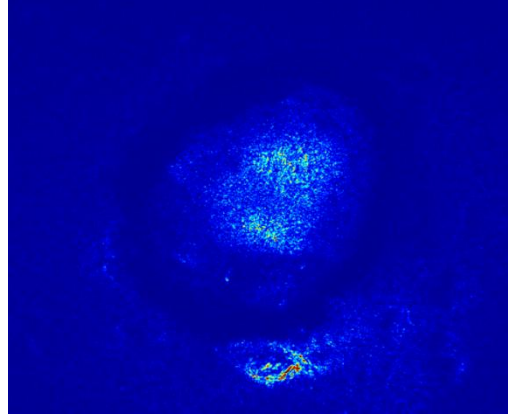


Şekil 5.3 : Karakterizasyon düzeneğinin şematik gösterimi.

5.2 Sonuçlar

Bir önceki bölümde anlatılan şekilde deney düzeneğini kurduktan sonra bu kanalın dalga kılavuzu özelliğini göstermek için eşleme fiberini kanal içerisinde hareket ettirerek CCD kameradaki şiddet değişimini ölçtük. Kaynak fiberini kanalın girişine yerleştirerek sabitlemek, ardından kanal boyunca kesit görüntüsünü alıp şiddet dağılımını incelemek de mümkündür ancak bizim kullandığımız yöntemde, CCD

kamera hareket ettirilerek elde edilen şiddet dağılımı yanlış bilgi taşır. Bu sebeple kaynak fiberi 100 µm aralıklarla hareket ettirerek kanal çıkışındaki şiddet dağılımının nasıl değiştiğini kontrol ettik. Kaynağın hareketinden dolayı eşleme koşulu değişiyor olsa da kayıp ölçümü için yeterli bilgi elde edilebilir. Şekil 5.4'te kanalın çıkışındaki kılavuzlanan ışığı görmek mümkündür. Kanalın tamamını kaplayan yaklaşık homojen şiddet dağılımı kılavuzlanmanın gerçekleştiğinin belirtisidir.



Şekil 5.4 : Kanal çıkışında kılavuzlanan ışığın CCD kamera ile alınan görüntüsü.

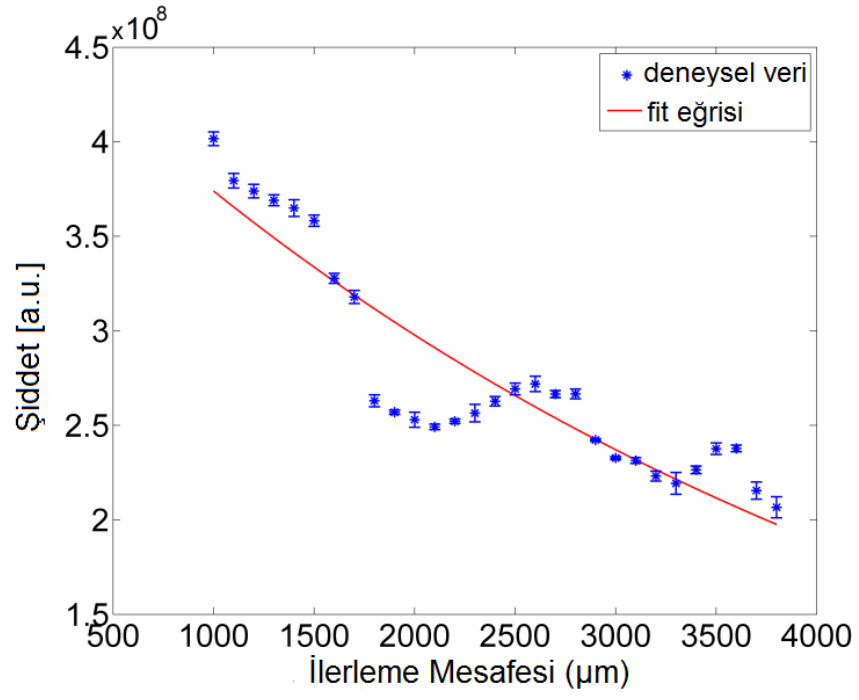
Mikro-akışkan kanalın çapı 600 µm, kullandığımız fiberin numerik açıklığı ise 0.57 olarak ölçmüştük. Buradan ışığın fiberden çıktıktan yaklaşık 1.1 mm sonra kanalın duvarlarına çarpacağını söylemek mümkündür. Bu noktadan sonra ışık kanal içerisinde tam yansımaya uğrayarak ilerler. Aldığımız ölçümler neticesinde fiberin kanal içindeki konumuna bağlı CCD kameradaki şiddet değişimini gösteren grafiği Şekil 5.5'te görmek mümkündür. Grafikte görülen salınımların nedeni eşleme fiberinin kanal içindeki hareketine bağlı olarak eşleme koşullarının değişmesidir. Bu dağılımı, z ışığın dalga kılavuzu boyunca ilerleme mesafesi olmak üzere,

$$I(z) = I_0 \exp(-\alpha z) \quad (5.1)$$

formunda bir eğri ile fit ettik. Elde ettiğimiz fit soncuna göre $\alpha = 2.278 \text{ cm}^{-1}$ olarak bulduk. Buradan ilerleme kaybı,

$$\eta = -\frac{10\alpha}{\ln 10} \quad (5.2)$$

formülü ile bulunabilir. Buna göre ilerleme kaybı $\eta = -9.9 \text{ dB cm}^{-1}$ olarak elde edilir. Bu değer daha önce yapılan benzer sistemler ile karşılaştırılabilir bir seviyededir.



Şekil 5.5 : Eşleme fiberinin kanal içindeki konumuna bağlı CCD kameradaki şiddet değişimi.

6. SONUÇLAR VE TARTIŞMA

Plazmonik ve opto-akışkan platformlar son zamanların gelişmekte olan oldukça ilgi çekici alanlardır. Bu platformlardaki gelişmeler sayesinde yüksek hassasiyetli sensörler, görüntüleme sistemleri, iletişim teknolojileri gibi bir çok alanda ilerleme kaydedilmiştir. Dolayısı ile bu platformların üretim yöntemleri de önem kazanmıştır. Bu tez kapsamında bu sistemlerin üretiminde femtosaniye lazerlerin kullanılmasının avantajları ortaya konmuştur. Femtosaniye lazerler hızlı etki süreleri ve hassas işleme kabiliyetleri ile litografi, kalıp gibi yöntemlere göre kolaylıklar sağlamaktadır. Gün geçtikçe bu tip sistemlerin üretiminde femtosaniye lazerlerin kullanımı artmaktadır.

Plazmonik yapıların femtosaniye lazer ile hassas bir şekilde oluşturulabileceğini gözlemledik. Yaklaşık $50\ \mu\text{m} \times 50\ \mu\text{m}$ genişliğindeki bir ince altın film kaplı bir yüzeyde 200 nm genişliğinde boşluklar açılacak şekilde altın nano şeritler oluşturduk. Bu sayede kovuklu bir yapı elde ederek, plazmonik özellikler gösterebilecek bir platform elde ettik. Bu periyodik yüzeyli platformlara 400 nm – 1100 nm aralığında geçirgenlik spektroskopisi uygulayarak karakterize ettik. Bu deney sonuçlarıyla elde ettiğimiz yapıların plazmonik özellikler taşıdığını ve yüzey plazmonlarını bu metotla uyarabildiğimizi gözledik. Bu yapıları FDTD metodu ile modellediğimizde de deneysel olarak elde ettiğimiz verilerle uyumlu olduğunu gördük. Bu bağlamda biyolojik sensörlerin geliştirilmesi, metallerin optik özelliklerinin incelenmesi, dalgaboyu altı cihazların geliştirilmesi, spektroskopik ve görüntüleme metotlarının iyileştirilmesi gibi bir çok uygulama alanı olan plazmonik platformların femtosaniye lazer ablasyonu ile de hızlı ve hassas bir şekilde üretilebileceğini göstermiş olduk.

Ayrıca mekanik işlenmesinin zorluğuyla bilinen aerogelleri femtosaniye lazer ile hassas bir şekilde işleyerek içerisinde doğrusal mikro kanal oluşturulabileceğini gösterdik. Bu gelişme aerogellerin opto-akışkan platformlarda kullanılması konusunda önemli bir ilerlemedir. Bu sayede düşük kırılma indisi, saydamlık, düşük termal iletim gibi özelliklere sahip aerogellerin opto-akışkan sistemlere entegrasyonu sağlanabilir. Kendi ürettiğimiz opto-akışkan yapıda hidrofobik silika aerogel içerisinde açılan mikro kanala etilen glikol enjekte edilerek dalga kılavuzu

özelliklerini inceledik. Bu sistemin 9.9 dB/cm'lik bir kayıpla dalga kılavuzu olarak kullanılabileceğini gözlemledik.

Sonuç olarak femtosaniye lazerler ile ablasyon yönteminin plazmonik, mikro-akışkan, opto-akışkan gibi bir çok sistemin üretiminde güçlü bir alternatif olduğu ileri sürülebilir. Bu tez çalışmasıyla gelinen son nokta gelecekte bir çok gelişmeninde önünün açılacağını göstermektedir.

KAYNAKLAR

- [1] **Maier, S. A.** (2007). Plasmonics: Fundamentals and Applications, *Springer*.
- [2] **Nylander, C., Liedberg, B. and Lind, T.** (1982). Gas detection by means of surface plasmon resonance, *Sens. Actuators*, **3**, pp. 79–88.
- [3] **Homola, J. and Piliarik, M.** (2006). Surface Plasmon Resonance (SPR) Sensors, in *Surface Plasmon Resonance Based Sensors*, J. Homola, Ed. *Springer Berlin Heidelberg*, pp. 45–67.
- [4] **Whitesides, G. M.** (2006). The origins and the future of microfluidics, *Nature*, **442**, no. 7101, pp. 368–373.
- [5] **Measor, P., Kühn, S., Schmidt, H., Phillips, B., Lunt, E. and Hawkins, A.** (2011). New chip miniaturizes particle manipulation, detection, *SPIE Newsroom*.
- [6] **Mandal, S.** Optofluidic Transport – Sudeep Mandal’s Website. [Online]. Available: <http://www.sudeepmandal.com/research/optofluidic-transport/>. [Accessed: 26-Nov-2014].
- [7] **Grujic, K., Hellesø, O. G., Hole, J. P. and Wilkinson, J. S.** (2005). Sorting of polystyrene microspheres using a Y-branched optical waveguide, *Opt. Express*, **13**, no. 1, pp. 1–7.
- [8] **Cui, X., Lee, L. M., Heng, X., Zhong, W., Sternberg, P. W., Psaltis, and Yang, C.** (2008). Lensless high-resolution on-chip optofluidic microscopes for *Caenorhabditis elegans* and cell imaging, *Proc. Natl. Acad. Sci.*
- [9] **Schmidt, H. and Hawkins, A. R.** (2011). The photonic integration of non-solid media using optofluidics, *Nat. Photonics*, **5**, no. 10, pp. 598–604.
- [10] **Nakata, Y., Okada, T., and Maeda, M.** (2004). Lithographical laser ablation using femtosecond laser, *Appl. Phys. A*, **79**, no. 4–6, pp. 1481–1483.
- [11] **Eliezer, S., Eliaz, N., Grossman, E., Fisher, D., Gouzman, I., Henis, Z., Pecker, S., Horovitz, Y., Fraenkel, M., Maman, S. and Lereah, Y.** (2004). Synthesis of nanoparticles with femtosecond laser pulses, *Phys. Rev. B*, **69**, no. 14, p. 144119.
- [12] **Florea, C. and Winick, K. A.** (2003). Fabrication and characterization of photonic devices directly written in glass using femtosecond laser pulses, *J. Light. Technol.*, **21**, no. 1, pp. 246–253.
- [13] **Joglekar, A. P., Liu, H., Meyhöfer, E., Mourou, G. and Hunt, A. J.** (2004). Optics at critical intensity: Applications to nanomorphing, *Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A.*, **101**, no. 16, pp. 5856–5861.

- [14] Yalizay, B., Ersoy, T., Soylu, B. and Akturk, S. (2012). Fabrication of nanometer-size structures in metal thin films using femtosecond laser Bessel beams, *Appl. Phys. Lett.*, **100**, no. 3, p. 031104.
- [15] Crozier, K. B., Togan, E., Simsek, E. and Yang, T. (2007). Experimental measurement of the dispersion relations of the surface plasmon modes of metal nanoparticle chains, *Opt. Express*, **15**, no. 26, pp. 17482–17493.
- [16] Brolo, A. G., Gordon, R., Leathem, B. and Kavanagh, K. L. (2004). Surface Plasmon Sensor Based on the Enhanced Light Transmission through Arrays of Nanoholes in Gold Films, *Langmuir*, **20**, no. 12, pp. 4813–4815.
- [17] Lee, K.L., Lee, C.W., Wang, W.S. and P.K. Wei. (2007). Sensitive biosensor array using surface plasmon resonance on metallic nanoslits, *J. Biomed. Opt.*, **12**, no. 4, p. 044023.
- [18] Kistler, S. S. (1931). Coherent Expanded Aerogels and Jellies, *Nature*, **127**, p. 741.
- [19] Parmenter, K. E. and Milstein, F. (1998). Mechanical properties of silica aerogels, *J. Non-Cryst. Solids*, **223**, no. 3, pp. 179–189.
- [20] Brinker, C. J. and Scherer, G. W. (2011.) Sol-Gel Science: The Physics and Chemistry of Sol-Gel Processing, 1 edition. Boston: Academic Press.
- [21] Aegerter, M. A., Leventis, N. and Koebel, M. M. (2011). Aerogels Handbook. Springer.
- [22] Mena, B., Mena, F., Aiolfi-Guimaraes, C. and Sharts, O. (2010). Silica-based nanoporous sol-gel glasses: from bioencapsulation to protein folding studies, *Int. J. Nanotechnol.*, **7**, no. 1, pp. 1–45.
- [23] Du, A., Zhou, B., Zhang, Z. and Shen, J. (2013). A Special Material or a New State of Matter: A Review and Reconsideration of the Aerogel, *Materials*, **6**, no. 3, pp. 941–968.
- [24] Gurav, J. L., Jung, I.-K., Park, H.-H., Kang, E. S. and Nadargi, D. Y. (2010). Silica Aerogel: Synthesis and Applications, *J. Nanomater.*, **2010**, pp. e409310.
- [25] Parmenter, K. E. and Milstein, F. (1998). Mechanical properties of silica aerogels, *J. Non-Cryst. Solids*, **223**, no. 3, pp. 179–189.
- [26] Xiao, L., and Birks, T. A. (2011). Optofluidic microchannels in aerogel, *Opt. Lett.*, **36**, no. 16, pp. 3275–3277.
- [27] Eris, G., Sanli, D., Ulker, Z., Bozbag, S. E., Jonás, A., Kiraz, A., and Erkey, C. (2013). Three-dimensional optofluidic waveguides in hydrophobic silica aerogels via supercritical fluid processing, *J. Supercrit. Fluids*, **73**, pp. 28–33.
- [28] Sun, J., Longtin, J. P. and Norris, P. M. (2001). Ultrafast laser micromachining of silica aerogels, *J. Non-Cryst. Solids*, **281**, no. 1–3, pp. 39–47.
- [29] Haus, H. A. (2000). Mode-locking of lasers, *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, **6**, no. 6, pp. 1173–1185.

- [30] **Clark-MXR, Inc.** (1999). Machining with Long Pulse Lasers, Clark-MXR, Inc., [Online]. Available: <http://www.cmxr.com/Education/Long.html>. [Accessed: 20-Sep-2014].
- [31] **Okamoto, K.** (2006). Chapter 7 - Beam propagation method, in Fundamentals of Optical Waveguides (Second Edition), K. Okamoto, Ed. Burlington: Academic Press, pp. 329–397.
- [32] **Schmidt, H. and Hawkins, A. R.** (2008). Optofluidic waveguides: I. Concepts and implementations, *Microfluid. Nanofluidics*, **4**, no. 1–2, pp. 3–16.

ÖZGEÇMİŞ



Ad-Soyad : Yağız Morova
Doğum Tarihi ve Yeri : 23 / 06 / 1987 - İstanbul
E-posta : yagizmorova@gmail.com

ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans** : 2012, Kocaeli Üniversitesi, Fen Edebiyat Fakültesi, Fizik Bölümü

MESLEKİ DENEYİM VE ÖDÜLLER:

- (Haziran 2013-...) Tübitak Proje Bursiyeri, “İleri Malzemeler ve Üretim Teknikleri Kullanarak Yeni Çip İçinde Lab Optofluidik Dalgakılavuzlarının ve Akış Manipulasyon Yöntemlerinin Geliştirilmesi.”, Tübitak Araştırma Projesi, Proje No: 112T972.

TEZDEN TÜRETİLEN YAYINLAR, SUNUMLAR VE PATENTLER:

- Yalizay, B., Morova, Y., Özbakır, Y., Jonas, A., Erkey, C., Kiraz, A., Akturk, S. 2014. Femtosaniye Lazer ile Hidrofobik Silika Aerojellerde Opto-AkışkanDalgakılavuzu Üretimi. 16. *Ulusal Optik, Elektro-Optik ve Fotonik Çalıştayı*, 5 Eylül, 2014 Ankara, Türkiye.
- Sahin, R., Morova, Y., Simsek, E., Akturk, S., 2013. Bessel-beam-written nanoslit arrays and characterization of their opticalresponse, *Applied Physics Letters*, 102(19), 193106.