İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

FEMTOSANİYE LAZER İLE İNCE METAL FİLMLER ÜZERİNDE NANO BOYUTTA YAPILAR OLUŞTURMA

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Burak SOYLU

Elektrik Mühendisliği Anabilim Dalı

Elektrik Mühendisliği Programı

ŞUBAT 2012

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

FEMTOSANİYE LAZER İLE İNCE METAL FİLMLER ÜZERİNDE NANO BOYUTTA YAPILAR OLUŞTURMA

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Burak SOYLU
504091042

Elektrik Mühendisliği Anabilim Dalı

Elektrik Mühendisliği Programı

Tez Danışmanı: Yard. Doç. Dr. Levent OVACIK
Eş Danışmanı: Doç. Dr. Selçuk AKTÜRK

ŞUBAT 2012

İTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü'nün 504091042 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi **Burak SOYLU**, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı "**FEMTOSANİYE LAZER İLE İNCE METAL FİLMLER ÜZERİNDE NANO BOYUTTA YAPILAR OLUŞTURMA**" başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı :	**Yard. Doç. Dr. Levent OVACIK** İstanbul Teknik Üniversitesi	.....
Eş Danışman :	**Doç. Dr. Selçuk AKTÜRK** İstanbul Teknik Üniversitesi	.....
Jüri Üyeleri :	**Yard. Doç. Dr. Ramazan ÇAĞLAR** İstanbul Teknik Üniversitesi	.....
	Prof. Dr. Özcan KALENDERLİ İstanbul Teknik Üniversitesi	.....
	Yard. Doç. Dr. Levent SUBAŞI İstanbul Teknik Üniversitesi	.....

Teslim Tarihi : **19 Aralık 2011**
Savunma Tarihi : **07 Şubat 2012**

Aileme,

ÖNSÖZ

Bu tezin ortaya çıkmasında desteğini esirgemeyen herkese teşekkür etmek isterim.

Öncelikle yüksek lisans eğitimimde bana kusursuz bir rehber olan, bunun yanında akademik anlamda ufkumun açılmasını sağlayan eş danışmanım Doç. Dr. Selçuk Aktürk'e içtenlikle teşekkür ederim. Kurduğu çalışma gurubuna vediği motivasyon, gösterdiği sabır ve aktardığı bilgi ile beraber çalıştığı herkese keyifle çalışma imkanı sunduğu için ayrıca teşekkür ederim.

Disiplinlerarası çalışmalar yapmam için yardımcı olan ve beni bu konuda teşvik eden danışmanın Yard. Doç. Dr. Levent Ovacık'a da teşekkür ederim.

Selçuk Aktürk'ün gurubunda beraber çalışma imkânı bulduğum değerli arkadaşlarıma, beraber çalışmanın en güzel ve en kaliteli örneğini yaşamama sebep oldukları için ve her zaman çalışmalarımda yardımcı oldukları için teşekkür ederim.

Ayrıca beraber zaman geçirdiğim sevgili dostlarıma, sadece bu çalışma için değil, her anlamda verdikleri maddi ve manevi destek için teşekkür ederim.

Son olarak, beni bugünlere getiren, iyi günümde ve kötü günümde hiçbir zaman desteğini esirgemeyen sevgili anneme, babama, kardeşime ve tüm aileme en büyük teşekkürü etmek istiyorum.

Aralık 2011

Burak Soylu
Elektrik-Elektronik Mühendisi

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ ..... **vii**
İÇİNDEKİLER ..... **ix**
KISALTMALAR ..... **xi**
ÇİZELGE LİSTESİ ..... **xiii**
ŞEKİL LİSTESİ ..... **xv**
ÖZET ..... **xvii**
SUMMARY ..... **xix**
1. GİRİŞ **1**
1.1 Femtosaniye Lazerler 1
1.2 Femtosaniye Lazerler ile Mikro ve Nano İşleme 2
1.2.1 Femtosaniye lazerler ile nano boyutta işlemenin kısıtlamaları 3
1.3 Gauss ve Bessel Hüzmeleri 4
1.3.1 Gauss hüzmeleri 4
1.3.2 Bessel hüzmeleri 5
1.4 Plazmonik 7
1.5 Tezin Amacı 10
2. DOĞRUSAL OLMAYAN OPTİK **11**
2.1 İkinci Harmonik Üretimi 11
2.2 Frekans Toplama-Üçüncü Harmonik Üretimi 13
3. PLAZMONİK YAPILAR **15**
3.1 Tek Delikte Kırınım ve İletim 15
3.2 Metal Nanoparçacıklar 16
3.2.1 Momentum eşleşmesi 17
3.3 Nano antenler 18
3.4 Yakın Alan Etkisi 20
3.5 Plazmonik Uygulamaları 20
3.5.1 Sensörler 20
3.5.2 Taramalı yakın alan optik mikroskopu (SNOM) 21
3.5.3 Diğer uygulamalar 22
3.6 Plazmonik Yapıların Litografik Yöntemlerle Üretimi 22
4. BESSEL HÜZMELERİ İLE İNCE METAL FİLM İŞLEME SONUCUNDA PLAZMONİK YAPILAR ÜRETİMİ **25**
4.1 Deneysel Materyallerin ve Deney Düzeneğinin Hazırlanması 25
4.1.1 İnce metal (altın) film 25
4.1.2 Femtosaniye lazer ve enerjisinin ayarlanması 26
4.1.3 Lazer frekansının harmoniklerinin üretilmesi 27
4.1.4 Bessel hüzmesinin üretilmesi 32
4.1.5 Görüntüleme ve numunenin hareketinin kontrolü 33
4.2 Deneysel Parametreler 34
4.2.1 Tarama hızı 35
4.2.2 Polarizasyonun etkisi 35

4.2.3 Darbe enerjisinin ve farklı dalgaboylarının etkileri 36
5. SONUÇLAR VE İLERİ BAKIŞ 43
KAYNAKLAR..... 45
ÖZGEÇMİŞ..... 47

KISALTMALAR

UV	**:** Ultraviyole
fs	**:** Femtosaniye
BBO	**:** Beta Baryum Borat
CCD	**:** Yük Kuplajlı Alet (Charge Coupled Device)
YP	**:** Yüzey Plazmon
YYP	**:** Yerel Yüzey Plazmon
YPR	**:** Yüzey Plazmon Rezonansı
YYPR	**:** Yerel Yüzey Plazmon Rezonansı
SNOM	**:** Scanning Near-Field Optical Microscopy (Taramalı Yakın Alan Optik Mikroskopisi)

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 4.1 : Lazer çıkış gücüne göre oluşturulan harmonik bileşenlerin güçleri ve verimleri 31

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 1.1 : Uzun darbe süreli lazerlerle (solda), kısa darbe süreli lazerlerin (sağda) malzeme üzerindeki etkisi [2]. 2
Şekil 1.2 : Gauss hüzmesi [6]..... 4
Şekil 1.3 : Tipik bessel hüzmesinin enkesit profili [7]. 5
Şekil 1.4 : Bessel hüzmesi kuramsal olarak elde edilen radyal şiddet dağılımı. 6
Şekil 1.5 : Aksikon mercek ile Bessel hüzmesinin üretimi [7]. 7
Şekil 1.6 : Metal-dielektrik arayüzünde YP'larının hareketine bağlı elektrik alan ve yük dağılımı [12]. 8
Şekil 1.7 : Gümüş ve altına ait YP eğrileri [14]. 10
Şekil 2.1 : İkinci harmonik üretimi a) kristale giren ve çıkan harmonik bileşenler b) harmoniklerin enerji seviyelerinin görünüşü. 13
Şekil 2.2 : Frekans toplamı yöntemi a) kristale giren ve çıkan harmonik bileşenler b) harmoniklerin enerji seviyelerinin görünüşü. 13
Şekil 3.1 : Tek bir delikten kırınım teorisine göre geçen ışığın dalgabou ve delik yarıçapı ile ilintisi [18]. 15
Şekil 3.2 : a) Tek delikten kırınım teorisine göre geçen dalga b) periyodik delik dizisi [19]. 16
Şekil 3.3 : Halkalar tarafından çevrelenmiş delik [18]. 18
Şekil 3.4 : Yüzeydeki periyodik yapılarla ışık yönlendirilmesi [18]. 19
Şekil 3.5 : Nano deliklerle optik filtreleme [18]. 19
Şekil 3.6 : SNOM modları a) ışıklandırma modu b) yansıma modu…….. 21
Şekil 4.1 : Krom tabakası olmayan ince altın film üzerinde yapılan çalışmanın SEM görüntüsü. 26
Şekil 4.2 : Deney düzeneğinin genel görünümü 26
Şekil 4.3 : İkinci harmonik üretilen deney düzeneği. 27
Şekil 4.4 : Dielektrik aynanın (Thorlabs BB1-E02) dalgaboyuna bağlı yansıtma oranları. 28
Şekil 4.5 : Üçüncü harmonik üretilen deney düzeneği. 28
Şekil 4.6 : Dielektrik filtrenin (Thorlabs FGS900) dalgaboyuna bağlı geçirgenliği. 29
Şekil 4.7 : Dielektrik filtrenin (Thorlabs FGUV5) dalgaboyuna bağlı geçirgenliği. 29
Şekil 4.8 : Dördüncü harmonik üretilen deney düzeneği. 30
Şekil 4.9 : a) İkinci harmonik için kristal verimi, b) Üçüncü harmonik için kristal verimi, c) Dörüdüncü harmonik için kristal verimi 31
Şekil 4.10 : a) Laboratuvarda elde edilen Bessel hüzmesinin profili. b) Teorik olarak elde edilen Bessel hüzmesinin profile. 33
Şekil 4.11 : Aşındırma eşiğine yakın çalışmaların hüzme profilini verimli kullanmaya katkısı 34
Şekil 4.12 : a) s-polarizasyonda elektrik alanın salınımı b) p-polarizasyonda elektrik alanın salınımı [28] 36

Şekil 4.13 : İnce altın film üzerinde fs lazerin temel bileşeni olan 1030 nm ile açılan kanallar. 37
Şekil 4.14 : İnce altın film üzerinde fs lazerin ikinci harmoniği olan 515 nm dalgaboyundaki hüzme ile açılan kanallar.....38
Şekil 4.15 : Birinci ve ikinci harmonikle açılan kanalların genişliğinin, lazerin enerjisi ile değişimi. 38
Şekil 4.16 : İnce altın film üzerinde fs lazerin üçüncü harmoniği olan 343 nm dalgaboyundaki hüzme ile açılan kanallar.....39
Şekil 4.17 : İnce altın film üzerinde fs lazerin dördüncü harmoniği olan 275.5 nm dalgaboyundaki hüzme ile açılan kanallar.....39
Şekil 4.18 : İnce altın film üzerinde fs lazerin dördüncü harmoniği olan 257.5 nm dalgaboyundaki hüzme ile açılan bir kanal.....40
Şekil 4.19 : Üçüncü ve dördüncü harmonikle açılan kanalların genişliğinin, lazerin enerjisi ile değişimi. 40

FEMTOSANİYE LAZER İLE İNCE METAL FİLMLER ÜZERİNDE NANO BOYUTTA YAPILAR OLUŞTURMA

ÖZET

Lazerlerin teknolojik gelişmelerde önemli bir rol üstlendiği şu dönemlerde, femtosaniye (fs) darbeli lazerler (1 fs $= 10^{-15}$ s) üstün özellikleri ile kendine ayrı bir yer edinmiştir.

Fs lazerler, darbe sürelerinin son derece kısa olması nedeniyle çok hassas ve yüksek çözünürlükte işleme imkanı vermektedir. Bu lazerlerin malzeme işlemedeki en büyük avantajı termal difüzyon sürelerinden çok daha kısa süreye sahip darbe genişliklerinin olmasıdır. Bu özelliği sayesinde kusursuz malzeme işleme imkanı verir. Bu tip lazerler özellikle cam üzerinde kırılma indisi değiştirerek dalga kılavuzu oluşturma, saydam malzemeler üzerinde işleme, hassas dokularda (göz gibi) en az zararlı kesme gibi çok büyük hassasiyet gerektiren uygulama alanlarında aktif olarak kullanılmaktadır.

Bu çalışmada, doğrusal olmayan optik yöntemlerden de yararlanıldı. İkinci harmonik üretimi ve frekans toplanması yöntemleri kullanılmıştır. Fs lazerin harmoniklerinin (lazer frekansının 2, 3 ve 4 katının) elde edilmesi ile daha kısa dalgaboyları, dolayısıyla daha yüksek işleme çözünürlüğü elde edilmiştir. Bu harmonikler temel lazer bileşeninin BBO (Beta Baryum Borat) kristali içerisinden geçirilmesiyle elde edildi. İkinci, üçüncü ve dördüncü harmoniklerin maksimum verimleri sırasıyla %25, %2 ve %0.7 dolaylarında elde edildi. Bu verimler düşük gibi görünmesine rağmen, bu harmoniklerden elde edilen enerji malzeme üzerinde mikro ve nano boyutta işleme yapmak için yeterli seviyededir.

Bilindiği üzere lazerler genel olarak Gauss hüzme profilleri üretirler. Bu tez çalışmalarında malzeme işlemedeki önemli katkılarının olacağı öngörüldüğü için mevcut hüzme aksikon mercek yardımı ile şekillendirilerek Bessel hüzmesi elde edildi. Bessel hüzmelerinin kırınımsız ilerleme özelliği nedeniyle deneysel çalışmalardan büyük avantaj sağlamıştır. Bessel hüzmenin odaklanma mesafesinin Gauss hüzmesine göre çok daha uzun olması, lazerin ilerleme yönündeki hizalama problemlerinin malzeme işleme üzerindeki olumsuz etkisini ortadan kaldırır.

Cam üzerine ince altın film kaplanarak elde edilen numuneler üzerinde nanometre hassasiyetinde yapılar elde etmek için lazerin elde edilen bütün harmonikleri Bessel hüzmelerine dönüştürüldü. Bu hüzmelerin hepsi malzeme işlemede kullanıldı. Lazerin dalgaboyundan daha küçük bir boyuta odaklanamaması nedeniyle, malzemenin aşındırma eşiğine yakın çalışılarak 200 nm'nin altında yapılar elde edildi. Bu işleme tekniği ile malzeme üzerinde periyodik yapılar oluşturarak plazmonik yapıların elde edilebileceği gösterildi. Böylelikle, plazmonik yapıların üretiminde, litografik yöntemlere alternatif olabilecek etkin bir yöntem geliştirilmiştir.

NANO FABRICATION ON THIN METAL FILMS WITH FEMTOSECOND LASER

SUMMARY

In this period when lasers play an important role in technological developments, femtosecond laser ($1\ fs = 10^{-15}$) has obtained a significant place with its superior qualities.

Since its pulse duration is extremely short, femtosecond laser enables processing in much finer and high resolutions. The major advantage of this laser in processing materials is that it has much shorter pulse duration than thermal diffusion length. Owing to this feature, it enables excellent processing. It can be assumed that there is no heat affected zone on material when femtosecond laser is used for micro machining. This type of laser is used actively in application areas, which require much greater precision such as creation of waveguide by changing the refractive index on glass, process on transparent materials and the least harmful transection on sensitive tissues (e.g. eye tissues). Because of fs laser's non-contact nature, allows the micromachining and surface patterning of materials with minimal mechanical and thermal deformation.

In this thesis, gold thin film is used for demonstration the thermal evaporation method. First of all this thin film is fabricated on microscope glass substrates. Thickness of the thin gold film is around 25-30 μm. As known, the gold film has low adsorption ability to glass. For that reason while all studies are being done, the sample is damaged. To prevent this impact, thin Chrome layer with 5 μm thickness is placed between glass and gold film.

In addition to its advantages, fs-laser nano-processing also has restrictions. First one is that, since the fluence levels should be close to the threshold, the pulse to pulse fluctuations in optical energy becomes critical and they determine the ultimate resolution. Moreover, when laser beams are tightly focused, due to diffraction, their depth of focus becomes very short (proportional to the square of the focal spot size). As a result, I is required that providing very fine control of sample positioning. Angular misalignments of the sample and mechanical vibrations can become critical.

Motorized three dimensional stages are used to move the sample which is placed in front of the laser. For precise machining on the sample, piezo motors are used for obtaining positioning resolution in the nanometer range. Piezo motors are programmed by Labview for sequential movements. By this means, no delay occurs between movements of motors so no additional energy accumulates on any point of sample. The laser pulse energy is controlled using a waveplate and polarizer.

In this thesis, nonlinear optical methods are also made use of. Nonlinear optics is the working field that arises from result of the optical properties' modification of a material system that is exposed to light. There is no light has enough intensity to modify the optical properties of a material system except the laser light. It can be

accepted that discovery of second-harmonic generation is the beginning of the field of nonlinear. In the nonlinear optic the meaning of "nonlinear" comes from the response of a material system to an applied optical field depends in a nonlinear manner upon the strength of the optical field. As an example of second harmonic generation occurs as a result of the part of the atomic response that depends on the strength of the applied optical field quadratically. Second harmonic frequency light is generated with the increasing tendency of the its intensity as the square of the intensity of the applied light.

Second harmonic generation and also sum frequency methods are used. With the obtainment of femtosecond laser harmonics (2, 3 and 4 times of laser frequencies), shorter wavelengths and thus higher process resolution are obtained. All these harmonics are obtained by passing a ω frequency through a BBO (Beta Barium Borate) crystal. Efficiencies of all harmonics are demonstrated for each energy level of fundamental one. For second harmonic, maximum efficiency is around 25%. The maximum efficiency decreases to 2% for third harmonic and highly decreases to 0.7% for fourth harmonic. Although the efficiencies of all harmonics don't seem very high, the energies obtained from these harmonics are adequate to machine the material.

As is known, lasers generally generate Gaussian beam profiles. Bessel beam is obtained by structuring the existing beam with the help of axicon lens since it is predicted that it would have significant contributions in the processing of materials. Due to non-diffracting propagation feature, Bessel beams had a substantial advantage in the experimental studies.

Bessel beams are non-diffracting beams. Meaning of that is their intensity stays high over much distances and doesn't change by propogation when they are compared to Gaussian beams for the same spot size (full width half maximum). Most applications of Bessel beams in the literature rely on the first property. Since the plasmonic structures typically require metal layer thicknesses less than 100 nm, long depth of focus of Bessel beams may not seem relevant. However, since their focal spot sizes do not change by propagation, Bessel beams practically remove the alignment constraint in the laser propagation direction. Moreover, provided that a transparent material is used, axicons work just as well for UV wavelengths. As opposed to Gaussian beams, tightly focused Bessel beams are less prone to aberrations.

In order to get nanometer precise structures on the samples obtained by plating thin gold film on glass, entire harmonics of the laser are converted to Bessel beams. All these beams are used in material processing. Because of the reason that the laser cannot focus on a smaller dimension than the wavelength, structures under 200 nm are obtained by being studied close to the ablation threshold of the material.

The sample under laser illumination and ablate 100 μm stripes of gold. The pulse energy between stripes is gradually decreased, and observed that their width gets smaller. At the fundamental wavelength (1030 nm) even though nanometer resolution is easily got, most of the stripes had discontinuities. The minimum width is 580 nm. At the second harmonic wavelength of 515 nm the ablation quality is much better and almost all stripes are continuous. As the pulse energy is decreased, the minimum width of 193.2 nm is obtained.

Material processing with femtosecond laser pulses fabricates nano and micro sized structures with extraordinary precision. Result of this feature thermal and shock effects are minimized. In this pulse duration regime, the ablation threshold is well

determined and due to the involvement of nonlinear optical effects, structures even smaller than the wavelength of the laser are generated.

Surface plasmons are generated by fabrication of nano sized periodic structures on thin metal film. Surface plasmons are guided waves at the interface between a metal and a dielectric layers. Free electrons of a metal's conduction band can respond collectively to an electromagnetic disturbance, whether induced by incident light or by incident fast electrons. Result of this trapped waves between metal and dielectric layers are generated. Surface plasmons can take various forms, ranging from freely propagating electron density waves along metal surfaces to localized electron oscillations on metal nanoparticles. The localized electron osilation on metal nanoparticles are called "localized surface plasmons".

Plasmons' proper features enable a wide range of practical applications, including nano scaled light guiding, single molecule level biodetection, enhanced optical transmission through sub-wavelength apertures, and high resolution optical imaging below the diffraction limit.

Plasmons have spectral shift in their plasmonic resonance and that is the most exploited effects of them. This effect is foundation of most widely used sensor in nano plasmonic. Surface plasmons are used for detecting some molecules or proteins etc. in the biomedical applications.

With this process technique, it is demonstrated that plasmonic structures can be obtained by generating periodic structures on the material. Therefore, in the production of plasmonic structures, an efficient method, which can be an alternative to lithography, is developed. The ability of generating plasmonic structures directly through laser ablation would be advantageous especially for rapid fabrication, since this method does not require lithographical masks and chemical processing.

Results of this study can be improved by using laser's third and fourth harmonics effectively. For this purpose another material can be found instead of microscope glass. Because of that when studying with laser's third and fourth harmonics, most of laser's energy is absorbed by this substrate and thin gold film burns and damages. Another thing is that more uniform thin gold film can be fabricated for machining on. Using the uniform samples can increase the quality of machining.

In conclusion, it is shown that high resolution fs laser material processing combined with the advantages of Bessel beams opens the way to enhanced nano processing of metal thin films. These results show that Bessel beams can effectively be used for rapid fabrication of plasmonic structures.

1. GİRİŞ

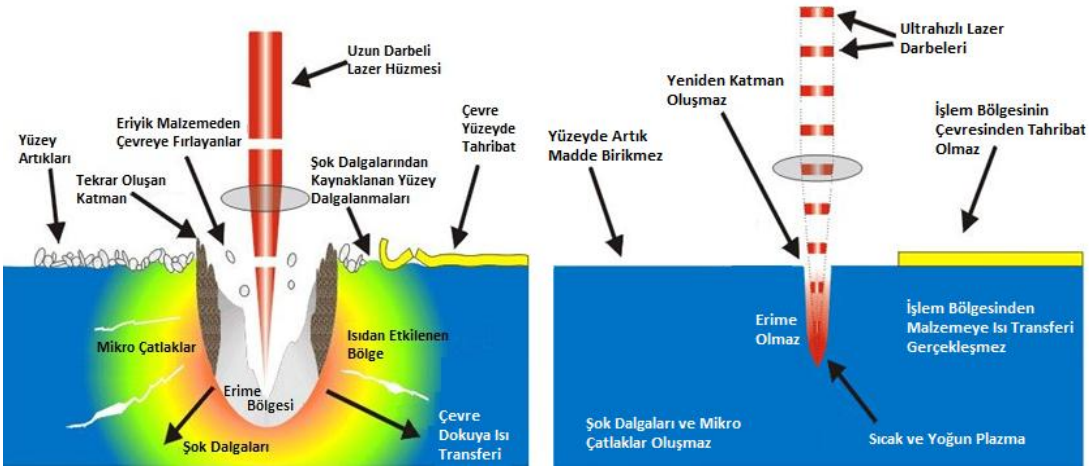
1.1 Femtosaniye Lazerler

1960'larda icat edilen lazerler birçok alanda yaygın olarak kullanılmaktadır. Yaklaşık son 20 yılda çok kısa darbe süresine sahip lazer geliştirilmesinde de önemli ilerlemeler kaydedilmiştir. "Ultra hızlı" sıfatı ile de adlandırılan bu lazerlerin darbe süreleri fs'ler ($1\ \text{fs} = 10^{-15}\ \text{s}$) mertebesinde olduğu için "fs lazerler" olarak da adlandırılırlar. Darbe süresinin çok kısa olması, lazerin odaklandığı malzeme üzerinde çok büyük anlık güçlere ulaşmasına imkân verir. Şimdiye kadar lazer ile elde edilmiş en yüksek anlık güç 1 PW/cm^2 ($1\text{PetaWatt} = 10^{15}\ \text{Watt}$) mertebesindedir. ABD Lawrance Livermore Ulusal Laboratuvarı'nda elde edilen bu anlık güç değerinin ABD'nin toplam elektrik üretim kapasitesinin 1200 katına karşılık geldiğini düşünmek bile, anlık olarak ne kadar devasa güçlere çıkıldığını ortaya koymaktadır. Bu bahsi geçen lazerin darbe süresi 440 fs'dir. Bu darbeler ile elde edilen elektrik alan o kadar yüksektir ki odaklandığı zaman elektronları ışık hızına yakın hızlara imvelendirebilmektedir [1].

Fs lazerlerin malzeme üzerine odaklanmasının son derece yüksek anlık güçlere ulaşmasına olanak sağlaması kadar darbe süresinin çok kısa olmasının da özellikle malzeme işlemede çok büyük avantajları vardır. Fs lazerin nanosaniye rejiminde darbe süresine sahip lazerlere karşı en büyük üstünlüğü enerjinin malzemeye, termal difüzyona imkân vermeden aktarılmasıdır. Bu lazerler belli bir frekansta darbe treni oluşturularak malzemeye gönderilirler. Bu frekansa tekrarlama frekansı (repetition rate) denir. Genelde MHz veya kHz'ler mertebesinde olan bu tekrarlama frekansını darbe süresi ile kıyasladığımızda ilginç bir şey ile karşılaşılır. Örneğin 1 kHz ile tetiklenen bir fs lazer 1 ms'lik süre içinde sadece 1 darbe gönderir. Yani 1 ms'lik sürenin trilyonda birinden daha kısa bir sürede (1 pikosaniyeden kısa sürede) darbe sönümlenir. 1 ms'nin geriye kalan kısmı enerji açısından boş geçer. İşlem yaptığımız süre boş geçen sürenin yanında ihmal edilebilir. Bilindiği üzere metallerin ısıl iletkenlikleri 10^{-12} m^2/s mertebesindedir. Fs lazelerin darbe süresi o kadar kısadır ki

metallerin ısıl iletkenlikleri bu devasa enerjiyi yaymaya yetmez. İhmal edilebilecek kadar bir alanda bu ısı yayılır ancak ikinci bir darbe gelinceye kadar malzemenin soğuması için büyük bir zaman vardır. Yani malzeme üzerinde ısı birikimi olmaz.

Bu lazerler odaklandıkları malzeme üzerinde, sadece odaklandığı noktada çok yüksek hassasiyette işlem yapılabilmesine olanak verir. Ayrıca çok kısa sürede çok büyük anlık güç uygulayabilmemiz, malzeme üzerinde erime, parçalanma, kopma gibi olayların oluşmasına olanak vermeden doğrudan etkileşilen bölgenin buharlaşmasını ve odaklandığı noktanın çevresine neredeyse sıfır hasar verilmesini sağlar (Şekil 1.1).



Şekil 1.1: Uzun darbe süreli lazerlerle (solda), kısa darbe süreli lazerlerin (sağda) malzeme üzerindeki etkisi [2].

Fs lazerlerin bu üstün özellikleri kısa sürede araştırma laboratuvarlarında, cerrahi uygulamalarda, metallerin ve normal lazerlerle işlenmesi mümkün olmayan saydam malzemelerin şekillendirilmesini gerektiren uygulamalarda hızla yer almasını sağlamıştır [1,3].

1.2 Femtosaniye Lazerler ile Mikro ve Nano İşleme

Fs lazerler ile çeşitli malzemeler üzerinde mikro ve nano işleme son yıllarda önemini arttırarak birçok alanda kullanılmaya başlandı. Mikro ve nano optik, mikro-elektronik, mikro-biyoloji, mikro-kimya bu alanlardan bazılarıdır. Önceleri nanosaniye lazerler ile mikro işleme yapılmaya çalışılıyordu. Ancak metallerde meydana gelen termal difüzyon, hassas ve düzgün işlemeye olanak vermiyordu. Fs lazerlerin üretilmesiyle metallerde yaşanan termal difüzyon sorunu neredeyse ortadan kalkmış oldu. Daha önce bahsettiğimiz gibi fs lazerlerin diğer lazerler gibi

temassız işleme yapması ve diğer lazerlerden farklı olarak darbe süresinin fs mertebesinde olması malzeme üzerinde mekanik ve termal deformasyona neden olmadan çok yüksek hassasiyette çalışmamıza olanak verir. Bu durum aşağıdaki denklem ile ifade edilebilir.

Burada termal difüzyon süresi D, darbe genişliği τ_p ve k ise malzemenin termal yayılma katsayısıdır. **(1.1)** denkleminde termal difüzyon süresinin; darbe genişliği ile orantılı olduğu anlaşılır [4].

$$D = k\,\tau_p^{\frac{1}{2}} \qquad \textbf{(1.1)}$$

Eğer termal difüzyon süresi, aşındırma süresinden daha uzun ise aşınma difüzyon olayının önüne geçer. Bunun sonucunda malzeme erimeye veya tekrar katılaşmaya zaman bulamaz. Bu da malzeme işlemede çok yüksek çözünürlüğe olanak verir [4,5]. Bu sebepler fs lazerleri mikro ve mikron altı işleme konusunda cazip hale getirmektedir.

1.2.1 Femtosaniye lazerler ile nano boyutta işlemenin kısıtlamaları

Birçok üstün özelliklerinin ve avantajlarının yanında, fs lazer ile nano işlemenin birtakım kısıtlamaları da vardır. Bunlardan birincisi kırınım limitidir. Malzeme üzerinde aşındırma eşiğine çok yakın çalıştığımız zaman, eğer optik kaynağımızda iki darbe arasında enerji dalgalanmaları varsa, bu etki çalışmaları sınırlar. Maksimum işleme çözünürlüğünü bu dalgalanmalar belirler.

Bir diğer kısıtlama lazerin odaklanma derinliği ile ilgilidir. Eğer lazer, kırınıma bağlı olarak çok hassas bir şekilde odaklanmış ise, lazerin odaklanma derinliği, odak noktasının karesiyle ters orantılı olarak çok kısalır. Bunun sonucunda, işlenen malzeme konumunun çok hassas kontrol edilmesi gerekmektedir. Çok küçük bile olsa, açısal hizalama hataları ve mekanik titreşimler çok kritik olabilir.

Son olarak çok daha iyi çözünürlükte sonuç almak, ultraviyole (UV) dalgaboyunda lazer kullanarak ya da lazerin doğrusal olmayan harmonikleri üretilip bunlar kullanılarak mümkün olabilir. Ancak UV için yüksek dereceli mercekler optik kusurlara olanak verir [3].

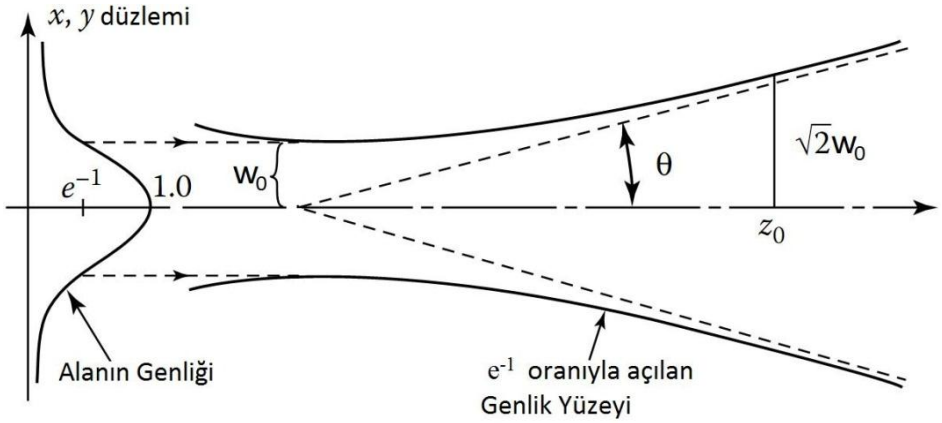
1.3 Gauss ve Bessel Hüzmeleri

1.3.1 Gauss hüzmeleri

Gauss hüzmeleri lazerlerde en çok karşılaşılan hüzme profilidir. Temel Gauss hüzmesi (TEM_{00}), lazerin şiddet profiline bakılarak çok rahat bir şekilde algılanabilir. Çünkü bu hüzmelerin şiddet profileri matematiksel olarak Gauss fonksiyonu ile tanımlanmaktadır. TEM_{00} modundaki gauss hüzmesinin şiddet dağılımı **(1.2)** denkleminde tanımlanmıştır.

$$E(r) \propto E_0 \exp(-r^2 / w^2)$$
$$I(r) \propto |E|^2 = \exp(-2r^2 / w^2) \qquad \textbf{(1.2)}$$

Denklemde $r = (x^2 + y^2)^{1/2}$ 'dir. Denklemden de göründüğü üzere $r=w$ uzaklığında $I(r)$ olan şiddet değeri, tepe değeri olan I_0'ın $1/e^2$'sine düşer. Burada w hüzme yarıçapı olarak adlandırılır ve hüzme çapı hüzmenin ilerleme ekseni olan z koordinatına bağlı olarak değişir [6]. Gauss hüzmesinin maksimumu hüzmenin merkezidir.



Şekil 1.2: Gauss hüzmesi [6].

Gauss hüzmesi (**1.3)** formülünde ifade edildiği üzere, dalgaboyu λ olmak üzere hüzme beli olan w_0 genişliğinden θ açısıyla açılır [7].

$$\theta = \frac{\lambda}{\pi w_0} \qquad \textbf{(1.3)}$$

Bu başka bir önemli konuyu da beraberinde getirir. O da ne kadar hızlı bir şekilde açıldığıdır.

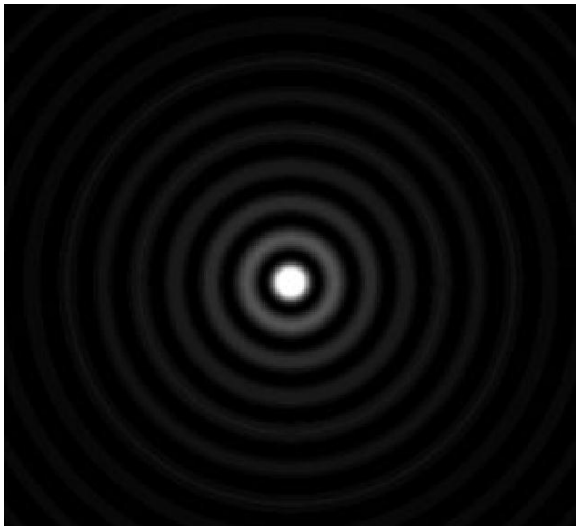
Denklem **(1.4)**'te Rayleigh uzaklığı z_0 olarak gösterilmiştir. Bu, enkesitte hüzme belinin $\sqrt{2}$ katına çıktığı uzaklıktır [8].

$$z_0 = \frac{\pi w_0^2}{\lambda} \qquad \textbf{(1.4)}$$

Rayleigh uzaklığı bize Gauss hüzmeleri ile diğer hüzme profillerini karşılaştırma olanağı veren kullanışlı bir parametredir. Bazı uygulamalar için Gauss hüzmesinin Rayleigh uzaklığı yeterli olmayabilir. Bu durumlarda başka hüzme profilleri kullanılmaktadır.

1.3.2 Bessel hüzmeleri

Bu hüzmeler de adını tıpkı Gauss hüzmeleri gibi, elektrik alan dağılımını açıklamaya yarayan, bir matematiksel fonksiyondan almıştır. Bu da Bessel fonksiyonudur. Bessel hüzmesinin enkesitine bakıldığı zaman, merkezde şiddetli bir nokta ve etrafını çevreleyen halkalar görülür (Şekil 1.3).

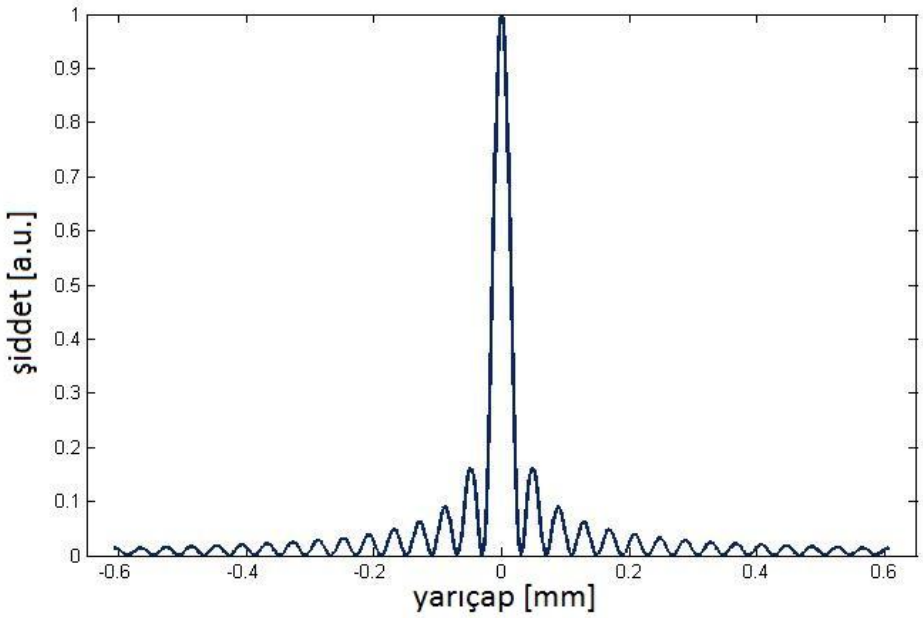


Şekil 1.3: Tipik Bessel hüzmesinin enkesit profili [7].

Enkesite bakarak çok rahat bir şekilde Bessel hüzmesi olduğu ayırt edilebilir. Bessel hüzmesinin boykesitine bakıldığında ise merkezde büyük genlikli bir temel bileşen olduğu görülür. Bu merkezi bileşen Gauss hüzmesinin Rayleigh uzaklığıyla kıyaslandığında oldukça uzundur.

İdealde bu hüzmeler z ekseni (ilerleme ekseni) boyunca ilerlediklerinde boykesitinde hiçbir değişiklik olmaz ve bu yüzden kırınımsız olarak adlandırılırlar. Bu Bessel hüzmelerini ilgi çekici kılan özelliktir.

Bessel hüzmesinin kuramsal olarak elde edilen radial şiddet dağılımı aşağıda gösterildiği gibidir (Şekil 1.4).



Şekil 1.4: Bessel hüzmesi kuramsal olarak elde edilen radyal şiddet dağılımı.

(1.5) denkleminde k_r dalga vektörünün radyal bileşenidir. İdeal Bessel hüzmeleri ilerleme ekseninde sonsuz mesafede sabit şiddete ve eşmerkezli sonsuz sayıda halkanın merkezinde r_0 yarıçapında parlak merkezi noktaya sahiptirler.

$$r_0 = \frac{2,405}{k_r} \qquad \textbf{(1.5)}$$

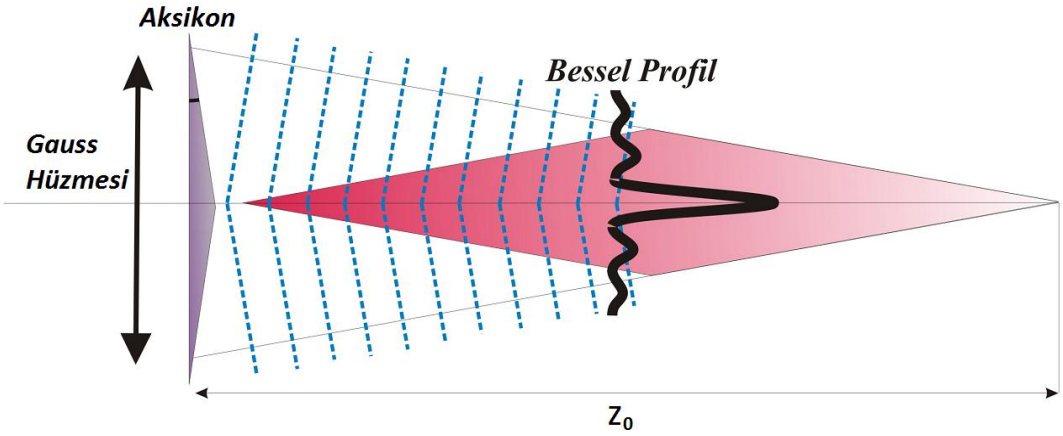
İdeal Bessel hüzmelerinin merkezi parlak noktası ve onu çevreleyen eşmerkezli halkaları, hüzmenin ilerleme yönündeki hareketi ile değişmezler. Ancak uygulamada bu böyle değildir. Giriş hüzmesinin çapı ve gücü sınırlı olduğu için ilerleme ekseninde alınan uzaklıkla beraber hüzmenin şiddeti değişiklik gösterir. İdeal Bessel hüzmesini elde edebilmek için sonsuz düzlem dalgaya ihtiyaç duyulur. Bunu elde etmek mümkün olmadığı için Bessel hüzmeleri de sınırlı bir ilerleme mesafesine, z_0'a sahiptir.

Bessel hüzmeleri küçük dairesel açıklık veya aksikon (konik) mercek kullanma gibi farklı yöntemler ile üretilebilirler. Bu çalışmada aksikon mercek kullanılarak bu hüzmeler üretilmiştir (Şekil 1.5).

Eğer aksikon mercek Gauss hüzmesinin yarıçapı olan w_0 mesafesi kadar uzaktaki bir noktaya konulursa ilerleme mesafesi z_0 yaklaşık olarak **(1.6)** denklemindeki gibi yazılabilir.

$$z_0 = w_0 \frac{|k|}{k_r} = \frac{k}{2,405} w_0 r_0 \qquad \textbf{(1.6)}$$

Bu denklemden de anlaşılacağı üzere ilerleme mesafesini arttırılması için w_0'ın artması ya da dalga vektörünün radyal bileşeni olan k_r azaltılmalıdır.



Şekil 1.5: Aksikon mercek ile Bessel hüzmesinin üretimi [7].

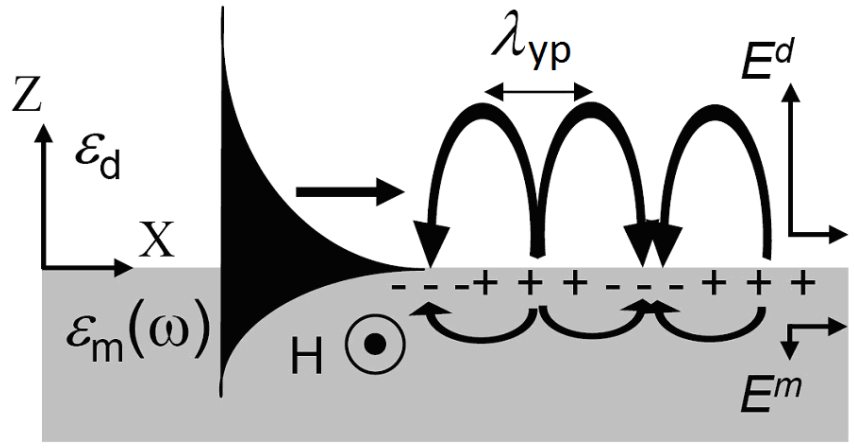
1.4 Plazmonik

Plazmonik, dalgaboyu altı elektromanyetik alanların yüzeyler arasında nasıl hapsolduğunu inceleyen, nanofotonik biliminin en ilgi çekici konularından biridir. Plazmoniğin temelinde, elektromanyetik ışıma ile metalik arayüzlerdeki iletim elektronlarının ya da metalik nano yapıların etkileşimi yatar.

Bir metal, içinde sabitlenmiş iyonlar ve iletim elektronları bulutu ile tanımlanabilir. Bu serbest elektronlar (özellikle altın ve gümüşte) hem kendileri ile hem de iyonlar ile Coloumb yasasına göre etkileşirler. İyonların elektronlara göre daha büyük bir atalete sahip olduğu bu etkileşim sistemi temelde bir plazmadır. Bu plazma bir elektromanyetik alan ile etkileştiği zaman elektronlar iyonlara göre zorlanmış bir osilasyona (salınıma) sahip olacaklardır. Bu osilasyonun genliği ve fazı etkileşime girilen elektromanyetik alanın frekansına bağlıdır. Elektronların metal hacimin içinde yaptığı bu osilasyonun kuantumuna *plazmon* denir [9]. Başka bir deyişle plazmon,

metal yüzeyindeki yük yoğunluğu dalgasıdır. Metalin dışında bulunan elektromanyetik alan ile yüzeydeki elektronların salınımının eşleşmesiyle oluşan dalgadır. Yani yüzey plazmonlarının oluşması ve elektron yoğunluk dalgalarının ilerlemesi tıpkı suya attığımız bir taşın su yüzeyinde ilerlemesi gibidir. Plazmonlar, yüzey plazmonları (YP) ve yerel yüzey plazmonları (YYP) olmak üzere iki ana başlık altında toplanabilirler.

YP'ları metal ve dielektrik arayüzünde yönlenmiş dalgalardır. Bu tuzaklanmış dalgalar, gelen ışık veya hızlı elektronlar tarafından oluşturulan elektromanyetik etkiye, metaldeki serbest elektronların topyekün tepki vermesi sonucunda oluşurlar. YP'ları hem elektromanyetik dalga hemde yüzey yükü özelliğine sahiptirler (Şekil 1.6). Uygun dalgaboyunda ışığın metal yüzeye çarpması, metal yüzeyde yüzeyden uzaklaştıkça sonsuzda sönümlenen bir elektromanyetik alan oluşturur. Bu alanın bir tarafı metalin içinde, diğer tarafı dielektrik malzemenin içindedir ve üstel olarak azalır. Alanın malzemeye nüfuzu metalde serbest yüklerin perdeleme etkisine bağlı olarak azdır [10-11].



Şekil 1.6: Metal-dielektrik arayüzünde YP'larının hareketine bağlı elektrik alan ve yük dağılımı [12].

Bu YP'larının titreşimleri sonucunda oluşan elektromanyetik dalgalar ancak belirli koşullarda meydana gelir. Metal yüzeye gelen ışıkta fotonlar tarafından taşınan enerjinin, metal yüzeyinde bulunan bu plazmonlara transfer edilebilmesi için gelen ışığın rezonans dalgaboyuna sahip olması ve rezonansa girmesi için ışığın belirli bir açı ile yüzeye gelmesi gerekmektedir. Bu rezonans dalgaboyu fotonlar tarafından kuantalanmış enerjinin, plazmonların kuantalanmış enerji seviyelerine eşit olduğu dalga boyudur. Spesifik bir geliş açısı ile metal yüzeyindeki elektronlar (YP'ları) frekanslarının eşleşmeleri nedeniyle yüzeye gelen ışık ile rezonansa girer. Bu

rezonans durumunda plazmonlar tarafından enerji emileceği için yansıyan ışığın şiddetinde bir azalma olur. Bu durumda metal yüzeyinden yansıyan ışık ölçüldüğünde diğer durumlara göre yansıyan ışığın minimumda kaldığı görünür. Kimi kaynaklarda frekans bazında ele alınan bu olgu, rezonans frekansı olarak tanımlanır. Bu olay *yüzey plazmon rezonansı* (YPR) olarak adlandırılır [13].

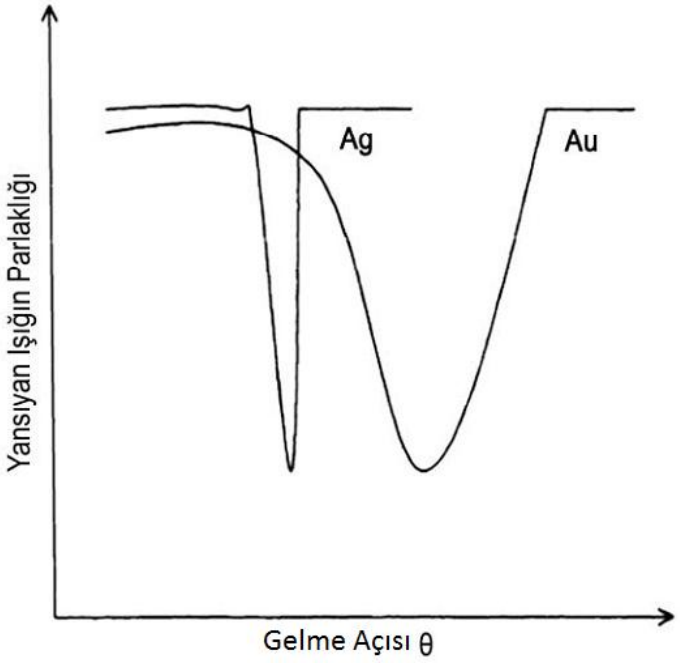
YPR'nın oluşması için iki optik ortamın arasında iletken bir ince film yerleştirilmelidir. Bu film daha önce bahsedildiği üzere çoğu zaman altın veya gümüşten yapılır. Bu metallerin yaygın olarak kullanılmasının da geçerli sebepleri vardır. Birçok metal, YP'ları üretebilir. Ancak YPR için kullanılacak metal uygun bir açıyla gelen ışıkla rezonansa girebilmelidir. Rezonansa girebilmesi için iletkenlik bandı elektronlarına ve gerekli kimyasal modifikasyonlara uygun özelliklere sahip olması gerekmektedir. Bu özelliklere sahip olup kullanılamayan veya az kullanılan metaller de vardır. Örneğin indiyum çok pahalıdır, sodyum çok reaktiftir, bakır ve alüminyum gibi metallerin YP cevapları çok fazla geniştir, gümüş gibi bazı metaller keskin bir rezonans pikine sahip olmasına karşın oksitlenmektedirler. Bu nedenle çoğunlukla altın, yer yer de gümüş tercih edilir [14]. Şekil 1.7'de gümüşe ve altına ait plazmon eğrileri görülmektedir.

Malzemenin görünür ışık ile uyarılması sonucunda, plazmonlar x-ray dalgaboyu dolaylarında sinyal üretebilirler (10 nm-100 nm). Plazmonlar sayesinde aynı frekansta yani rezonans frekansında dalgaboyu, boşluktaki değerinden 10 kat küçük bir değere düşürülmüş olur.

$$\lambda * f = c \qquad \textbf{(1.7)}$$

Denklem **(1.7)**'de de görüldüğü gibi frekans ile dalgaboyunun çarpımının, ışık hızına eşit olmasını gerektiren temel kanun korunmaktadır. Çünkü elektromanyetik dalgalar metal yüzeyde hareket ederken yavaşlamaktadır [15].

YPR sırasında plazmonlar tarafından emilen enerji, metal ve dilektrik arayüzüne paralel hareket eden bir elektromanyetik alan doğurur. Bu alan, sisteme dışardan dahil olan en ufak bir yüke ve kimyasal bileşene çok büyük hassasiyet gösterir ve rezonans frekansında kaymaya sebep olur. Bu hassasiyet bu sistemleri birçok alanda etkin bir şekilde kullanmamıza olanak verir.



Şekil 1.7: Gümüş ve altına ait YP eğrileri [14].

1.5 Tezin Amacı

Bu tez çalışmasında amaç, fs lazer ve harmoniklerini kullanarak ince metal filmler üzerinde nanometre boyutlarında yapılar oluşturmaktır. Bu yapıları, lazerin kendi hüzme profili olan Gauss ile değil, laboratuvar şartlarında üretilen Bessel hüzmeleriyle oluşturmak amaçlanmıştır. Metal yüzeyde plazmonların oluşabilmesi için gerekli olan yöntemlerden birisi de, metal yüzeyinde mikron altı düzenli yapılar oluşturmaktır. Hem Bessel hüzmelerini kullanarak hem de lazerin harmoniklerini kullanarak, mümkün olan en küçük yapıların oluşturulması hedeflenmiştir. Bu yöntemin litografik yöntemlere alternatif olacağı öngörülmüştür.

2. DOĞRUSAL OLMAYAN OPTİK

Doğrusal olmayan optik, ışık tarafından maddenin optik özelliklerinin değişmesidir. Sadece lazerler, malzemelerin optik özelliklerini değiştirecek şiddete sahiptir. Doğrusal olmayan optik alanının ortaya çıkması, ikinci harmonik üretiminin keşfiyle başlar.

2.1 İkinci Harmonik Üretimi

Doğrusal olmayan optik kavramındaki 'doğrusal olmayan' ibaresi, malzemenin ya da sistemin, uygulanan optik alanın genliğine doğrusal olmayan bir bağıntı ile tepki vermesiyle ortaya çıkar. Örneğin ikinci harmonik üretimi, uygulanan optik alana karşı malzemenin verdiği ikinci dereceden tepkinin bir sonucu olarak karşımıza çıkar. Daha açık bir ifade ile üretilen ikinci harmoniğin şiddeti, uygulanan ışık şiddetinin karesi ile artma eğilimi gösterir.

Birim hacim başına düşen dipol moment ya da polarizasyon, $\tilde{P}(t)$, uygulanan optik alan ise $\tilde{E}(t)$ olmak üzere, bunların arasındaki ilişki aşağıdaki şekilde yazılabilir;

$$\tilde{P}(t) = \chi^{(1)}\tilde{E}(t) \qquad \textbf{(2.1)}$$

Denklem **(2.1)**'de oransal sabit olan $\chi^{(1)}$ doğrusal duyarlılıktır. Doğrusal olmayan optikte genelleştirilmiş denklem **(2.1)**'in kuvvet serisine açılmış hali ile tanımlamalar yapılır.

$$\begin{aligned}\tilde{P}(t) &= \chi^{(1)}\tilde{E}(t) + \chi^{(2)}\tilde{E}^2(t) + \chi^{(3)}\tilde{E}^3(t) + \ldots \\ &= \tilde{P}^{(1)}(t) + \tilde{P}^{(2)}(t) + \tilde{P}^{(3)}(t) + \ldots\end{aligned} \qquad \textbf{(2.2)}$$

Yukarıdaki denklemde $\chi^{(2)}$ ve $\chi^{(3)}$ büyüklükleri, doğrusal olmayan optikte ikinci ve üçüncü dereceden duyarlılıklar olarak bilinirler.

Doğrusal olmayan optik olgusunun tanımlanmasında genel prosedür polarizasyonun ($\tilde{P}(t)$) uygulanan elektrik alan ($\tilde{E}(t)$) tarafından ifade edilmesidir. Polarizasyonun doğrusal olmayan optiği açıklamada anahtar rol üstlenmesinin sebebi, zamanla değişen polarizasyonun elektromanyetik alanın yeni bir bileşeninin kaynağı olarak davranmasıdır.

İkinci dereceden doğrusal olmayan optik etkileşimler sadece merkezi simetrik olmayan kristallerde görülür. Bu kristaller ters simetri özelliği göstermezler. Likit, gaz, cam gibi amorf katılar ve bunun gibi birçok kristal ters simetri özelliği gösterir. Bu gibi ortamlarda $X^{(2)}$ ikinci dereceden duyarlılığı doğuran doğrusal olmayan optik etkileşimleri belirgin bir şekilde kaybolur [16]. Genellikle BBO (Beta Baryum Borat), KDP (Potasyum Titanil Fosfat) ve Lityum Niyobat, ikinci harmonik üretimi için kullanılan kristallerdir [17].

Kristale gelen lazer hüzmesinin elektrik alanı aşağıdaki gibi tanımlanırsa;

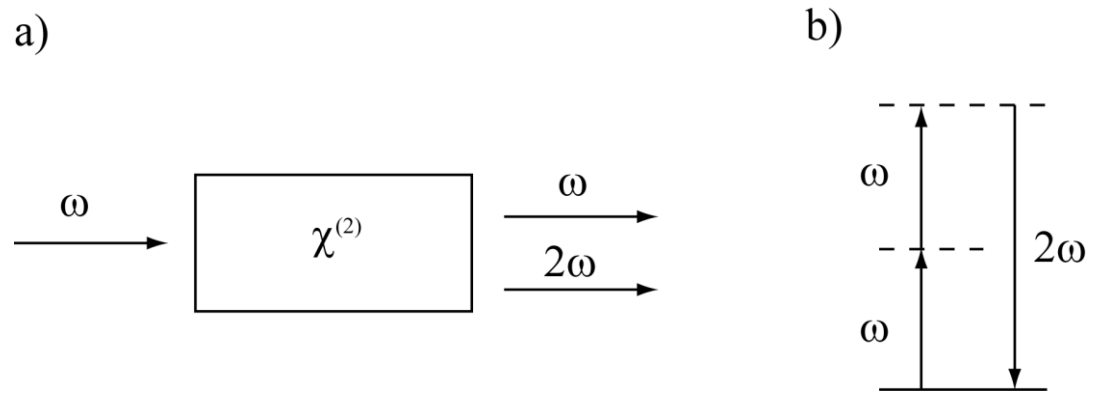
$$\tilde{E}(t) = Ee^{-jwt} + c.c. \qquad \textbf{(2.3)}$$

Kristalin ikinci dereceden duyarlılığı olan $X^{(2)}$ sıfırdan farklı bir değere sahiptir. Kristalde meydana gelen doğrusal olmayan polarizasyon, denklem **(2.2)**'ye göre aşağıdaki gibi yazılır.

$$\tilde{P}^{(2)}(t) = 2\chi^{(2)}EE* + (\chi^{(2)}E^2e^{-2wt} + c.c.) \qquad \textbf{(2.4)}$$

Denklem **(2.4)**'te ilk terim temel (ω) frekanstaki bileşeni, ikinci terim ise ikinci harmonik (2ω) frekansındaki bileşeni gösterir. Burada 2ω frekansına sahip olan terim ikinci harmoniğin üretilmesini sağlar. Birinci terimin ise bu sürece katkısı yoktur [16].

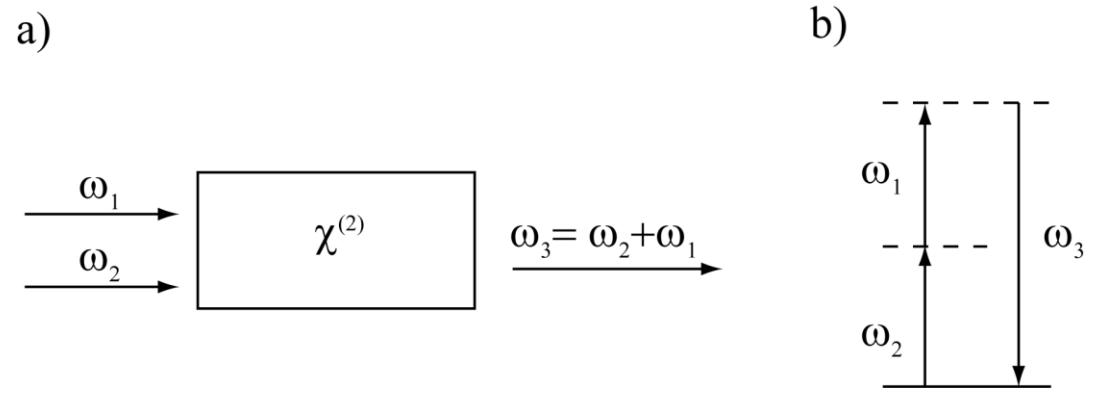
Bu süreçte Şekil 2.1' de gösterildiği gibi, ω frekansında gelen ışınımın gücünün bir kısmı 2ω frekansına sahip ışınıma dönüşür.



Şekil 2.1: İkinci harmonik üretimi a) kristale giren ve çıkan harmonik bileşenler b) harmoniklerin enerji seviyelerinin görünüşü.

2.2 Frekans Toplama-Üçüncü Harmonik Üretimi

Frekans toplama ya da bu çalışmadaki özel kullanımından dolayı üçüncü harmonik üretimi, birçok açıdan ikinci harmonik üretimine benzemektedir. Tek farkı üçüncü harmonik üretiminde kristale iki farklı frekansta ışın girer.



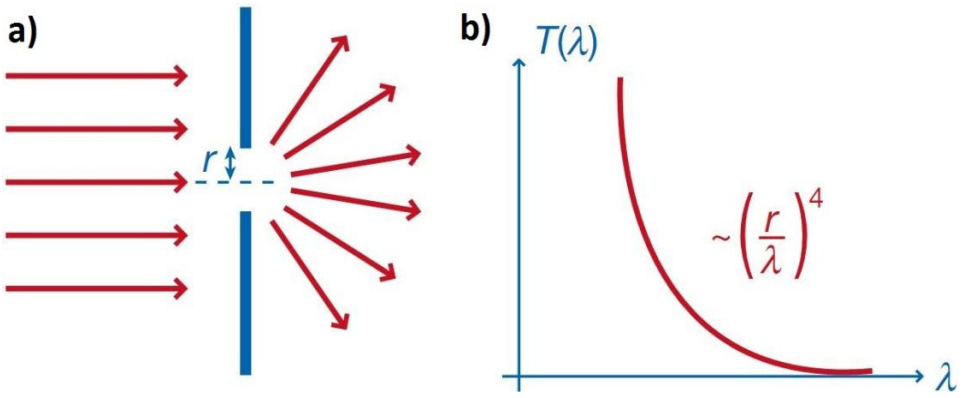
Şekil 2.2: Frekans toplamı yöntemi a) kristale giren ve çıkan harmonik bileşenler b) harmoniklerin enerji seviyelerinin görünüşü.

Şekil 2.2'de gösterildiği gibi üçüncü harmonik üretiminde (frekans toplamada) ω_1 ve ω_2 frekanslarında iki ışın kristale girer. Doğrusal olmayan etkileşimler sonucunda kristalin çıkışında bu iki frekansın toplamı olan $\omega_1 + \omega_2$ frekansında bir ışın çıkar. Bu çalışmadaki uygulamada ise ω ve 2ω frekansında lazer ışınları kristale yollanır ve 3ω yani üçüncü harmonik elde edilir.

3. PLAZMONİK YAPILAR

3.1 Tek Delikte Kırınım ve İletim

Yüzey üzerindeki tek bir delik en basit optik elemanlardan biridir. Bu delikler bilimsel olarak analiz edilmelerinden çok önce bile büyük merak konusuydu ve teknolojik uygulamalarda yerini almaktaydı. Bunlardan en bilindik olanı kamera deliğidir. Bu basit delik, çalışılan dalgaboyundan çok büyük olmasına ve fiziksel özelliklerin kesin olarak bilinmesine rağmen yüzyıllarca bilimsel araştırma konusu olmuştur. Yirminci yüzyılda, elektromanyetik spektrumda büyük dalgaboyları olan mikro dalgaların teknolojik uygulamalarda kullanılmasıyla, bütün ilgi dalgaboyu altı deliklere kaymıştır. Dalgaboyundan küçük ideal deliklerin, üzerine gelen ışık ile etkileşimleri incelenmeye başlanmıştır. İdeal delik diye kastedilen ise, mükemmel iletkenliğe sahip metal üzerinde derinliği (kalınlığı) ihmal edilen deliktir. Dalgaboyu altı ideal delik için, kırınım olayı açıklanmaya çalışılmıştır. Delikten iletilen ışığın, deliğin yarıçapının dalgaboyuna oranının dördüncü kuvvetiyle orantılı olduğu sonucuna varılmıştır (Şekil 3.1).



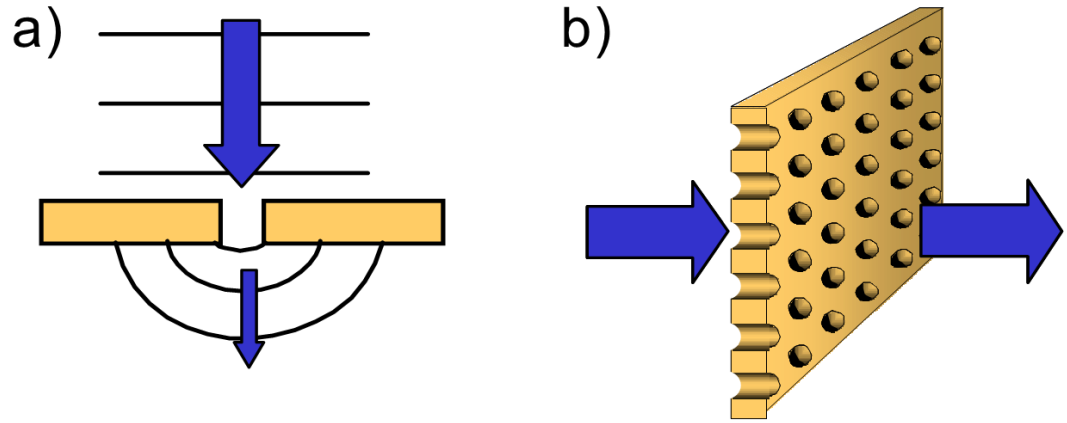
Şekil 3.1 : a) Tek bir delikten kırınım teorisine göre geçen ışığın delik yarıçapı ile ilintisi b) Delikten iletilen ışığın (T) dalgaboyu ile ilintisi [18].

Bu kurama göre dalgaboyu altı deliklerden ışığın iletimi, dalgaboyu arttıkça üstel olarak azalmaktadır. Ancak metal kalınlığı gözönünde bulundurulduğunda, dalga kılavuzu özellikleri de ortaya çıkmaktadır. Bu durumda kesim dalgaboyu olarak adlandırılan değerden daha büyük dalgaboylarında ışığın delikten iletimi, üstel olarak azalmaya başlamaktadır. Bu nedenle kesim dalgaboyu keskin bir şekilde

belirlenemez. Çünkü dalgaların, ilerleme durumundan sönümlenmeye geçişi sürekli bir şekilde olmaktadır [18].

Bir diğer konu da yüzeydeki geometrinin etkisidir. Bilindiği üzere deliğin bulunduğu metal kalınlığının sonsuza gittiği durumlarda, yani koaksiyel kabloları andıran durumlarda, kesim dalgaboyundan söz edilemez.

Daha sonra yapılan araştırmalar sonucunda Şekil 3.2'deki gibi periyodik yapıların metal yüzeyde oluşturulmasının, bütün bu tek delik üzerinden yapılan tahminleri boşa çıkardığı görülmüştür. Bu klasik teorilerle öngörülenden ışık iletiminden kat ve kat daha fazla ışık, periyodik deliklerden iletilebilmektedir.



Şekil 3.2 : a) Tek delikten kırınım teorisine göre geçen dalga b) Periyodik delik dizisi [19].

Yüzeyde oluşturulan farklı geometrideki periyodik yapılar, ışığın iletimini istediğimiz gibi kontrol etmemizi sağladığı gibi, istenilen dalgaboylarını filtreleyebilmemizi de sağlamaktadır. Bütün bu farklı uygulamaların temelinde ise, elektromanyetik alan ile etkileşime geçen, elektromanyetik alanı metal yüzeyde sıkıştıran ve yönlendiren YP'ları vardır. Rezonans etkisi veya ışığı öngörülenden çok daha fazla iletme etkileri görülebilir [18-20].

3.2 Metal Nanoparçacıklar

Nano boyuttaki malzemeler bilim ve teknoloji açısından oldukça önemlidir. Özellikle altın ve gümüş nanoparçacıklar çok ilginç özellikleri nedeniyle bu alanda ayrı bir yere sahiptir. Çok eski zamanlardan beri altın ve gümüş nanoparçacıkların ilgi odağı olma sebepleri çok parlak renkte ışık saçmalarıdır. Teknolojinin ilerlemesiyle ve araştırmaların artmasıyla bu parlak ışık saçma olayının sebebinin, yerel (lokalize

olmuş) yüzey plazamonları olduğu anlaşılmıştır. YYP'ları, daha önce bahsedilen YP'ları gibi, maruz kaldıkları elektromanyetik alanın etkisi ile metalin iletim bandı elektronlarının etkileşmesi ve salınıma geçmeleriyle açıklanmaktadır. Ancak tek farkı, YP'larında elektromanyetik alan ile eşleşen elektronlardan kaynaklanan, ilerleyen bir dalga yoktur. İlerlemeyen bir salınım söz konusudur [21]. İlerlemeyen bir salınım YP'larının aksine doğrudan gelen ışık ile olabilir. Altın ve gümüşü ilgi çekici kılan ise yerel yüzey plazmon rezonansının (YYPR) elektromanyetik spektrumda görünür bölgeye düşmesidir. Bu nedenle plazmonik etkileşimler dışarda parlak ışımaların görünmesini sağlar.

Metal nanoparçacık, içine tamamen nüfuz edebilecek bir ışığa (elektrik alana) maruz kaldığı zaman, parçacığın bir kutubunda elektronlar diğer kutubunda artı yükler olacak şekilde kutuplanır. Bu kutuplanma dışardan maruz kalınan alana karşı koyacak şekilde ters bir alan oluşturur. Kutuplanan nanoparçacıklar da birbirlerini polarizasyonlarına göre, maruz kaldıkları alanı arttırıcı veya azaltıcı şekilde etkilerler. Bu ters kutuplama ve uygulanan alan, parçacıklarda ilerlemeyen bir salınımın olmasına sebep olur. Eğer uygulanan alanın dalgaboyu rezonans için uygunsa, bu salınım rezonansa girer ve YYPR olarak adlandırılır [19].

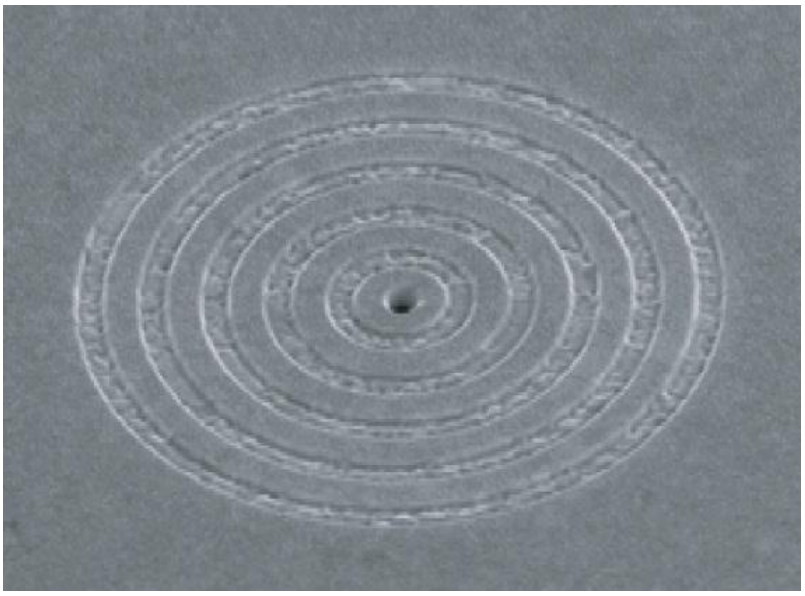
3.2.1 Momentum eşleşmesi

Plazmon rezonansının olması için sadece uygun açıda, uygun dalgaboyunda ışığın metal yüzeye gelmesi yetmez. Plazmon rezonansının olması demek, metal yüzeydeki iletim bandı elektronlarına, dışardan yollanan ışıktaki fotonlardan enerji transferinin gerçekleşmesi demektir. Metal yüzeyindeki elektronlar ile fotonlar arasında momentum eşleşmesi olmadan bu enerji transferinin gerçekleşmesi mümkün değildir. Ancak fotonların momentumu ile plazmonların momentum büyüklükleri oldukça farklıdır. Bu yüzden momentum eşleşmesinin gerçekleştirilmesi gerekir. Bunun için kullanılan yöntemlerden birisi, gelen ışıkla YP'ları arasında momentumu sağlamak için, metal yüzeyde periyodik yapılar oluşturmaktır. Tek bir delik, keskin kenarlar ve bunun gibi periyodik olmayan yerlerde de yerel plazmon etkileri görülebilir. Yüzeydeki kusurların boyutlarının, gelen alanın dalgaboyundan küçük olması gerekir [18, 29]. Dalgaboyundan küçük yapıların olması plazmon rezonans frekansının görünür ışık spektrumuna kaymasını sağlar.

3.3 Nano antenler

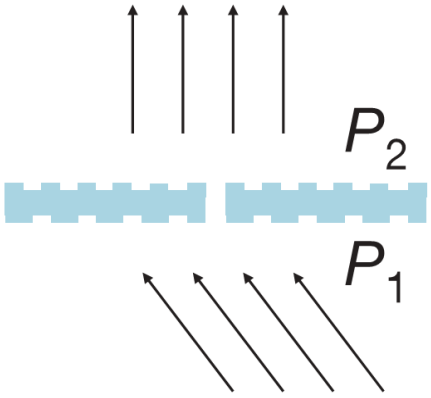
Modern üretim teknikleri ile, tek bir deliğin birçok optik özelliğini değiştirmek mümkündür. Tek bir deliğin etrafında, deliği çevreleyen dalgaboyu boyutlarında halkalar üretilebilir. Bu şekilde, tek bir delikte beklenenden çok daha fazla ışık iletilebilir.

Şekil 3.3'te görüldüğü gibi tek bir delik, periyodik halkalarla şekillendirildiği zaman, bu periyodik yapı, yüzeye gelen ışığı YP'ları ile eşleştirmek için anten gibi davranır. Bunun sonucunda yüzeye gelen elektromanyetik dalgalar delik üzerinde şiddetlenir. Burada YP'ları için rezonans dalgaboyu büyük oranla, gerekli momentum ve enerji eşleşmesini sağlayan, delik etrafındaki halkaların periyodu tarafından belirlenir. Bu yüzden istenilen dalgaboyunda istenilen parlaklığı elde etmek için, bu yapıların periyodu ayarlanır. Metalin arka yüzeyinde de deliği çevreleyen periyodik halkalar oluşturulabilir. Bu halkaların periyodu metalin ön yüzeyindeki halkaların periyodundan farklıdır.



Şekil 3.3: Halkalar tarafından çevrelenmiş delik [18].

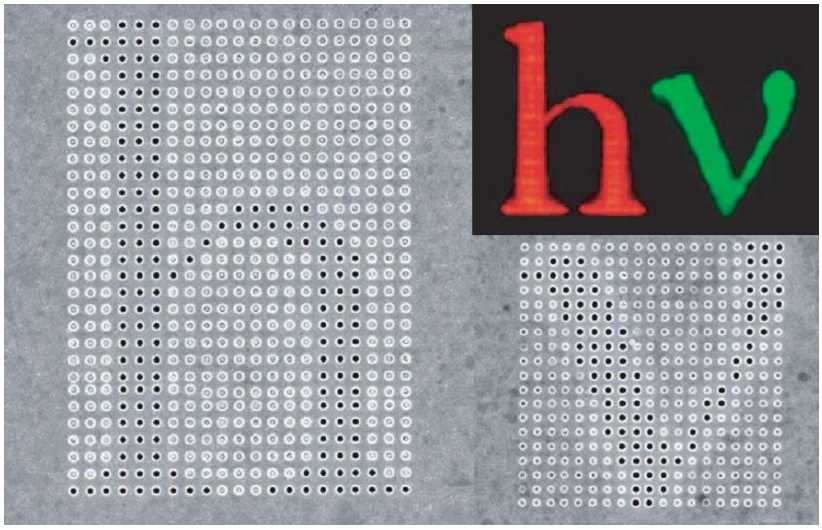
İki yüzeydeki yapıların periyotları uygun bir şekilde ayarlandığı zaman delikten iletilen ışığın yönünün, deliğe gelen ışığın yönünden bağımsız olması sağlanabilir (Şekil 3.4).



Şekil 3.4: Yüzeydeki periyodik yapılarla ışık yönlendirilmesi. [18].

Burada önce gelen ışık YP'ları ile etkileşime geçer. Sonrasında ise ışık, delikler tarafında arka yüzeye iletilir. Arka yüzeyde ise tekrar yayılır. Yüzyde oluşturulan yapıların boyutları, derinlikleri ve periyotları birçok optik özelliği değiştirebilirler. Bu değiştirebilirlik, bu yapıların çok çeşitli alanlarda kullabılabilmelerini sağlamaktadır. Filtreleme de bunlardan bir tanesidir. Yüzeyde oluşturulan periyodik yapılar ile sadece ışığın iletilmesinde artış sağlamak değil, filtreleme yapmak da mümkündür. Örneğin yüzeydeki yapıların periyodu değiştirilerek istenilen dalgaboyundaki hüzmenin ne oranda deliklerden iletileceği ayarlanabilir.

Şekil 3.5'te görüldüğü gibi, yüzeyde farklı iki periyotta oyuklar oluşturulmuştur. Oyuklardan bazıları ise deliktir. "h" harfi için oluşturulan yapıların periyodu 550 nm ilen "ν" harfi için oluşuturulan yapıların periyodu 450 nm'dir. Bu yapıların üzerine beyaz ışık gönderildiği zaman, "h" harfi kırmızı görünürken, "ν" harfi yeşil görünmektedir.



Şekil 3.5: Nano deliklerle optik filtreleme [18].

Burada metal yüzeydeki periyodik şekillerin ve plazmonik etkilerin kullanılmasıyla optik bir filter örneği görülmektedir.

3.4 Yakın Alan Etkisi

YP'ları eğer uyarılmışlarsa, sadece uzak alana ışık saçmazlar. Aynı zamanda yakın alanları da etkilerler. Ayrıca bu etkileme optik uyarımdan çok daha güçlüdür. Parçacıkların uç veya köşelerinde çok güçlü bir şekilde yakın alan etkisi görülür. Bir elektrik alan altındayken, eğer parçacıklar yakın alan etkisine maruz kalırlarsa, içinde bulundukları elektrik alanın homojenliğini bozarlar. Homojenliğin bozulduğu yerler ise, parçacıkların yakın alan etkisi ile güçlü bir şekilde uyarıldıkları yerlerdir [22].

YP'ları, prizma veya yüzeydeki periyodik nano yapılar kullanılarak ışık tarafından uyarılırlar. Plazmonlar uyarıldıkları dalgaboyundan daha küçük dalgaboyunda ışınım yapabilirler. YP'larının etkileşimleri sayesinde yüzeyde sönümlenen bir elektrik alan oluşur. Bu alan yüzeyden uzaklaştıkça hızla sönümlenir. Ama yüzeye çok yakınken çok yüksek bir elektrik alanın varlığı söz konusudur. Yakın alan etkisi, bu güçlü elektrik alanın etkisiyle tanımlanabilir. Bu güçlü elektrik alan bir parçacıkla etkileşime geçebilir. Burada ışığın dalgaboyu ve kırınım limiti gibi bir kısıtlamadan söz edilemez. Bu nedenle plazmonların ışınım yaptığı dalgaboyunun bile altında bir çözünürlüğe ulaşılır [21,22].

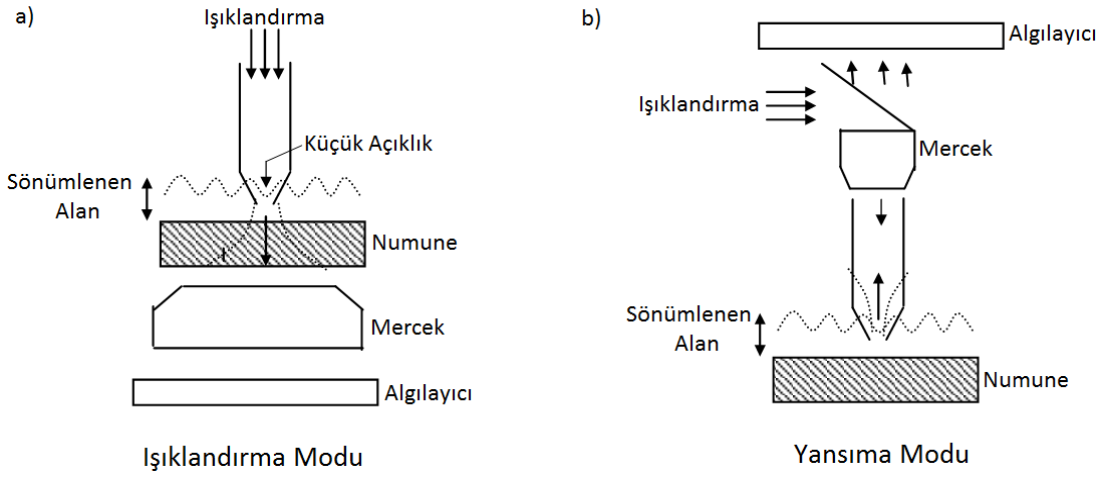
3.5 Plazmonik Uygulamaları

3.5.1 Sensörler

Biyomedikal alanında biyosensör olarak optik fiberler ve YPR kullanılmaktadır. Biyosensörler, biyolojik bir yapı ve fizikokimyasal bir dönüştürücüden oluşan analitik cihazlardır. Biyolojik yapılar; mikroorganizma, doku, antikor gibi yapılardır. İncelenecek olan numune ve biyolojik materyal arasında bir etkileşim olur. Bu etkileşim fizikokimyasal bir değişim oluşturur. Bu değişim dönüştürücü tarafından algılanır ve elektriksel sinyallere çevrilerek analitik olarak işlenir. Yüzeye tutunan biyolojik yapının türüne göre rezonans açısında değişiklik olur. Bu şekilde tutunan yapıyı ayırt etme imkanı doğar. YP'ları çok büyük yüzey duyarlılığına sahip olduğu için, bu sensörler için çok önemlidir [23].

3.5.2 Taramalı yakın alan optik mikroskopu (SNOM)

SNOM'un temel çalışma prensibi açılımından da anlaşılacağı gibi yakın alan etkisine dayanmaktadır. Klasik uzak alan etkileşimine dayanan yüzey tarama yönteminde olduğu gibi, yüzeye ışık gönderilir ve yüzey ile etkileşimi incelenir. Gönderilen ışığın dalgaboyu ve kırınım limiti bu taramanın çözünürlük limitini belirler. Yakın alan etkileşimi ile yapılan tarama metal sivri bir uç kullanılarak yapılır. Konik bir şekle sahip olan bu uç, ışığın çıkış noktasına yaklaştıkça daralan bir yapıya sahiptir. Öyle ki, ışığın çıkış noktasındaki delik çapı dalgaboyundan çok küçüktür. Burada elektrik alanın tünellemesi söz konusudur. Bu, görüntüleme yönteminin önemli noktalarından birisi de metal ucun taranacak yüzeye çok yaklaştırılmasıdır. Bunun çok zor olması nedeniyle, yüzeye ne kadar yaklaştığını control eden geri beslemeli piezo sistemler kullanılır. Kullanılan metal uçtan çıkan ışığın, numune yüzeyinde sönümlenen elektrik alanla etkileşmesi ile yüzey taraması yapılır. Yüzeyde sönümlenen bu elektrik alan, uzak alan tarama yönteminde etkileşime girmemektedir. Çünkü yüzeyden uzaklaştıkça üstel olarak etkisini kaybeden bu elektrik alan, uzak alan bölgesinde sönümlenmiş olur. Ancak yakın alan bölgesinde, bu elektrik alan çok güçlü bir şekilde etkinliğini korur [19,21,24].



Şekil 3.6: SNOM modları a) ışıklandırma modu b) yansıma modu.

Bu yöntem ile birkaç on nanometre çözünürlükle görüntüleme yapılabilir. Çözünürlüğün sınırını ise, ışığın dalgaboyu değil, metal uçtaki açıklık ve tarama ucunun yüzeye olan yakınlığı belirler. Bu yöntem Şekil 3.6'daki gibi ışıklandırma ve yansıma özelliklerinin kullanılmasına göre farklı metotlarla kullanılmaktadır. İlk şekilde görüldüğü gibi gönderilen ışık (lazer) numune üzerindeki sönümlenen alan

ile etkileşir. Numunenin arka tarafında algılayıcı vardır. Bu algılayıcı yardımıyla yüzeydeki etkileşime ait bilgi alınır. Yansıma modunda ise, gönderilen ışık numune yüzeyinde etkileşir ve geriye yansır. Filtreleme sistemi ile algılanmak istenen yansıyan ışık, metal ucun arkasında bulunan algılayıcıya düşürülür.

3.5.3 Diğer uygulamalar

Nanoplazmonik henüz yeni sayılabilecek bir bilim dalı olmasına ragmen birçok önemli uygulama alanında kendine yer bulmuştur. Termal fototerapi özelliği de bunlardan birisidir. Metal nanoparçacıklar ince olarak üretildiklerinde, optik emilim görünür ışıktan yakın kızılötesine doğru kayar. Bu parçacıklar kızılötesi ışıma yaptıkları zaman ise hedefleri kanser hücreleri olmaktadır. Kızılötesi ışıma normal hücreler tarafından emilmez ama kanser hücreleri bu dalgaboyundaki ışımaları emer. Bunun sonucunda aşırı ısınan kanser hücresi yok olur [24].

Güneş enerji sistemlerinde de plazmonlar kullanılmaktadır. Bu sistemlerde güneş tarafından yayılan ışık enerjisi yarıiletken fotovoltaik elemanlar tarafından emilerek elektrik enerjisine dönüştürülür. Plazmonların burada kullanılma amacı, enerji dönüşümüne yardımcı olmalarıdır. Plazmonik yapılar güneşten gelen ışınımı, fotovoltaik elemanlar tarafından daha yüksek verimle emilebilecek bir ışınıma dönüştürür. Yani optik bir dönüştürücü görevi görürler [24].

3.6 Plazmonik Yapıların Litografik Yöntemlerle Üretimi

Bütün litografik yöntemlerde önce, tasarlanacak yapıya uygun maske hazırlanır. Hazırlanan maske üzerinde çalışılan numunenin üzerine kapatılır. Daha sonra numune, uygun bir dalgaboyundaki ışınıma maruz bırakılır. Dalgaboyunun özellikle seçilmesinin sebebi numunenin yüzeye gelen ışın ile etkileşerek numunenin aşınmasını sağlamaktır. Maske üzerindeki şablon, yüzeye gelen ışınları filtreleyecek şekilde yapılır. Bu şekilde numunenin, şablonun boyalı yerine denk gelen kısmı ışınımdan etkilenmezken digger kısımları etkilenerek aşınırlar. Böylece istenilen şekil numune üzerine çıkarılmış olur. Bu kısmı litografik yöntemlerin hepsinde prensip olarak aynıdır [25-27].

Bazı litografik yöntemlerde numune olarak kullanılan malzeme aslında kullanılmak istenen malzeme değildir. Aşınan yerler elde edilmek istenen malzeme ile doldurulur. Daha sonra kimyasal reaksiyonlarla kalıp olarak kullanılan malzeme

yüzeyden uzaklaştırılır ve istenilen mikro veya nano yapılar oluşturulmuş olur. Diğer litografik yöntemlerde ise doğrudan kullanılmak istenen malzeme üzerine maskeleme yapılır. Sonra üzerine gelen ışınım ile boyasız yere gelen malzeme aşındırılır ve istenilen yapılar oluşturulmuş olur [25-27].

4. BESSEL HÜZMELERİ İLE İNCE METAL FİLM İŞLEME SONUCUNDA PLAZMONİK YAPILAR ÜRETİMİ

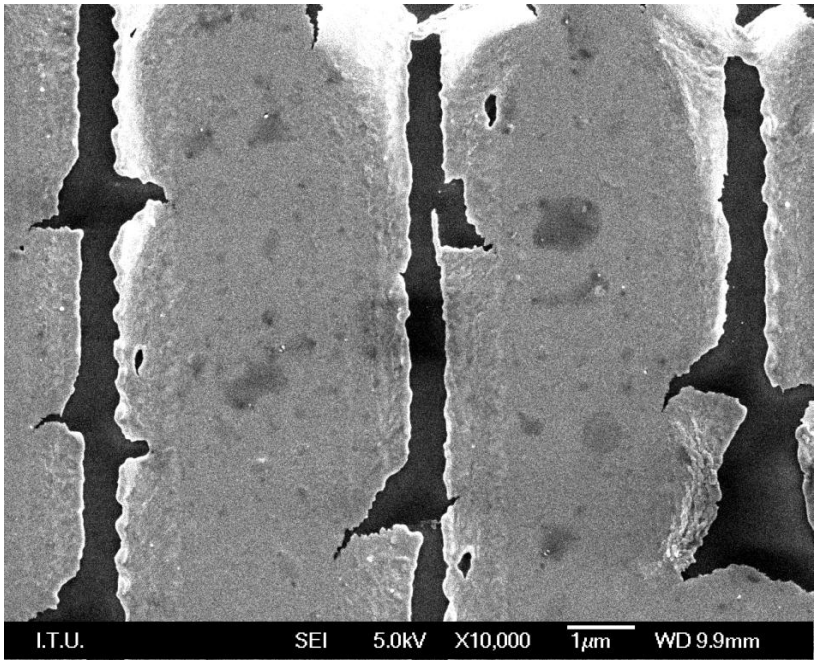
Bu çalışmada optik cam üzerine kaplanmış ince altın film üzerinde fs lazer ile işleme yaparak nanometre boyutlarında yapılar oluşturuldu. Çalışmalara başlamadan önce numuneler temin edildi. Sonra lazerin harmonikleri üretildi. Her harmonik kullanılmadan önce Bessel hüzmesine dönüştürüldü. Numune üzerinde farklı harmoniklerin, mikronaltı yapılar oluşturmadaki etkisi incelendi.

4.1 Deneysel Materyallerin ve Deney Düzeneğinin Hazırlanması

4.1.1 İnce metal (altın) film

İlk olarak üzerinde çalışılacak malzeme temin edildi. Mikroskop camı olarak tabir edilen cam üzerine 25-30 nm kalınlığında altın kaplama yapılarak üzerinde çalışılacak numene hazırlandı. Numuneler İTÜ Fizik Mühendisliği Bölümü ve Bilkent UNAM (Ulusal Nanoteknoloji Araştırma Merkezi)'da üretildi. Altın kaplamanın neden 25-30 nm dolaylarında olmasının nedeni, daha sonra yapılması planlanan ölçümler için altın kaplamanın bir miktar saydam olmasının gerekmesidir. Diğer bir etken de metal kalınlığının, oluşturulacak nano yapılardan geçecek olan ışığın iletimini etkiliyor olmasıdır. Bunlara dayanarak altın kaplamanın kalınlığı belirlendi.

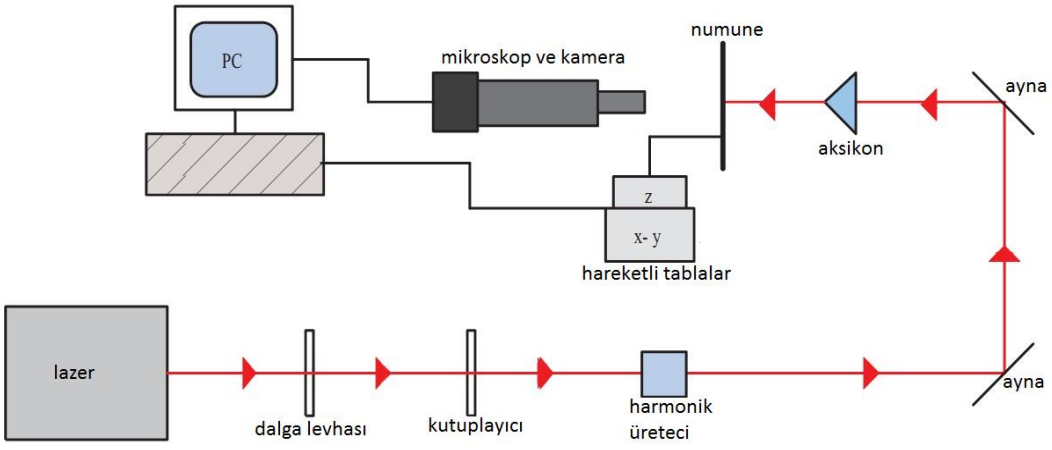
Bu numuneler ile yapılan çalışmalarda, enerjisinin artmasıyla doğru orantılı olarak Şekil 4.1'deki gibi yüzeyde artan kavlamalar, kaplamada parçalanmalar görüntülendi. Altın kaplama üzerindeki çalışmaları zorlaştıran bu etki, istenilen kanalların açılmasını engelliyordu. Yapılan araştırmalar sonucunda altının yüzeye çok iyi tutunamadığından bu sorunların olduğu anlaşıldı. Yapılan literatür taramalarında, altının cama tutunmasını arttırmak için, altın ve cam arasına çok ince bir Krom tabaka (yaklaşık 10 nm) eklenmesinin faydalı olacağı görüldü [28]. Sonraki numuneler buna göre temin edildi.



Şekil 4.1: Krom tabakası olmayan ince altın film üzerinde yapılan çalışmanın SEM görüntüsü.

4.1.2 Femtosaniye lazer ve enerjisinin ayarlanması

Genel olarak deney düzeneği Şekil 4.2'de gösterilmektedir. Deney düzeneğinde kullanılan lazer 550 fs darbe genişliğine sahiptir. Tekrarlanma oranı, daha açık bir ifade ile peşpeşe iki darbenin ne kadar sıklıkta malzemeye yollanacağını gösteren değer 1 kHz'dir. Yani lazerin sürekli mod çalışması sırasında malzemeye saniyede 1000 darbe gönderilmektedir. Bazı uygulamalar için lazeri dışardan sinyal üreteci ile tetikleyerek de çalıştırabiliriz. Bu şekilde çalıştığında, numune üzerine dışardan elle tetikleyerek istenildiği kadar darbe yollanabilir. Bu tezin konusu olan çalışmalarda, her zaman lazerin sürekli modu kullanıldı.



Şekil 4.2: Deney düzeneğinin genel görünümü.

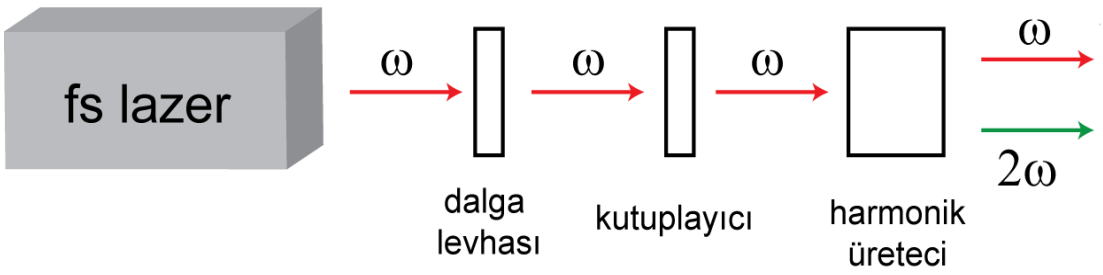
Lazerin temel dalgaboyu 1030 nm'dir. Ancak lazerin ikinci, üçüncü ve dörüdüncü harmonikleri üretilerek çok daha kısa dalgaboylarında hüzmeler üretildi. Lazerin temel hüzmesinin profili TEM_{00} Gauss profiline sahiptir.

Lazerden çıkan hüzme ilk olarak dalga levhası ve kutuplayıcıya gönderildi. Bunlar lazerin enerjisini ve polarizasyonunu kontrol etmek amacıyla kullanıldı. Daha sonra kullanılan diğer optik elemanların kayıpları vardır. Bu nedenle sistem tamamen kurulduktan sonra, numuneden hemen önce lazer hüzmesinin enerjisi ölçüldü ve tekrar dalga levhası kullanılarak enerjisi ayarlandı.

4.1.3 Lazer frekansının harmoniklerinin üretilmesi

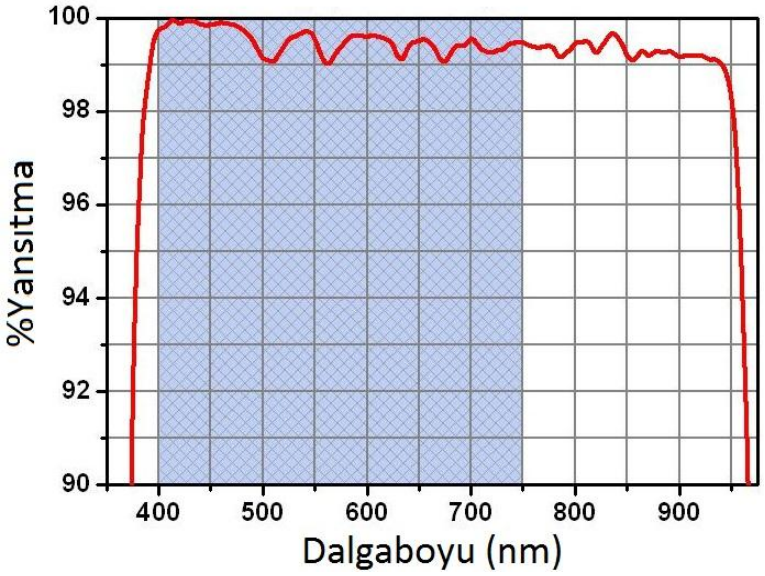
Daha kısa dalgaboylarına sahip lazer hüzmeleri ile çalışmak için, laboratuvarda mevcut 1030 nm dalgaboyundaki lazerin ikinci, üçüncü ve dördüncü harmonikleri üretildi.

Şekil 4.3'te ikinci harmonik üretiminin deney düzeneği verilmektedir. İkinci harmonik üretimi için, polarizasyonun simetri ekseni ile yaptığı açı 23.4° olan BBO kristali kullanıldı [17]. Kristale gelen ışığın bir kısmı 2ω frekansında elde edildi. Kristalden çıkan ω ve 2ω frekanslarındaki ışık hüzmelerini dielektrik ayna ile birbirinden ayırıldı. Bu düzenekte kullanılan dielektrik aynanın (Thorlabs BB1-E02) dalgaboyuna bağlı yansıtma grafiği Şekil 4.4'te verilmektedir.



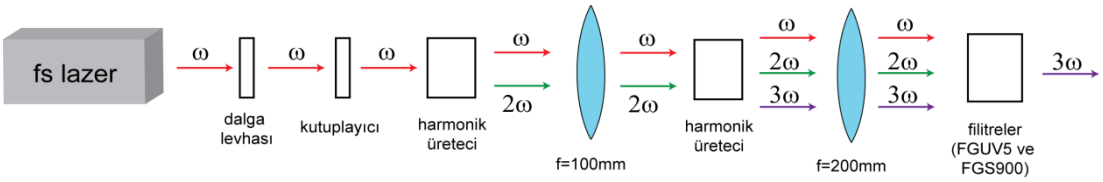
Şekil 4.3: İkinci harmonik üretilen deney düzeneği.

Bu dielektrik ayna lazer hüzmesinin 1030 nm dalgaboyuna sahip temel bileşenini yansıtmaz ama 515 nm dalgaboyuna sahip lazerin ikinci harmoniğinin neredeyse tamamını yansıtır. Bu yöntem ile sadece lazerin 2ω frekansına sahip bileşeni elde edildi.



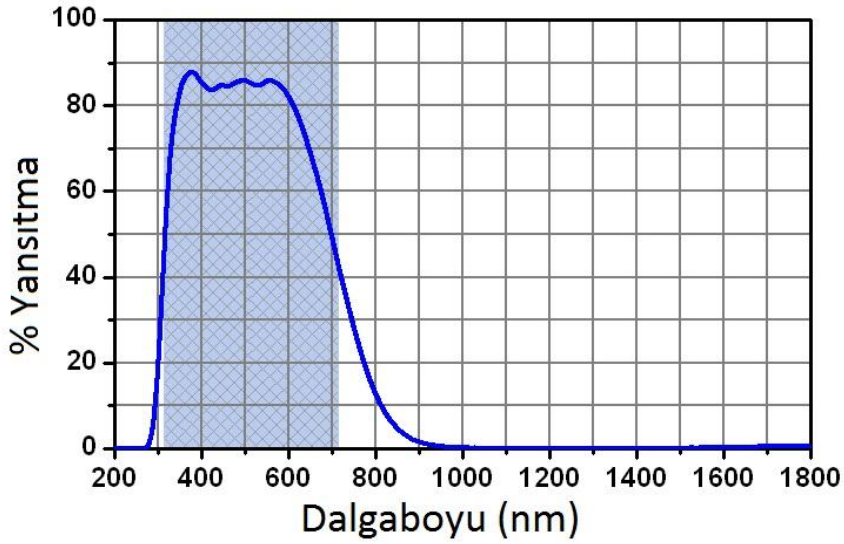
Şekil 4.4: Dielektrik aynanın (Thorlabs BB1-E02) dalgaboyuna bağlı yansıtma oranları.

Üçüncü harmonik üretiminde ise daha önceden değinilen frekans toplamı yöntemi kullanıldı. Bu harmonik üretimini gerçekleştirmek için hazırlanan deney düzeneği Şekil 4.5'te verilmektedir.

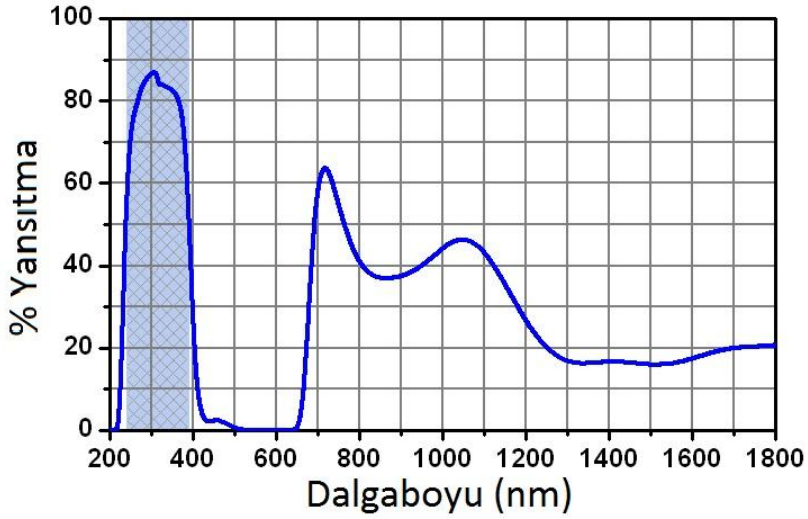


Şekil 4.5: Üçüncü harmonik üretilen deney düzeneği.

Burada yine ikinci harmonik kristali kullanılarak ikinci harmonik üretimi yapıldı. ω ve 2ω bileşenleri bu sefer birbirinden ayırılmadılar. Bu işlemden sonra, polarizasyon ekseni ile yaptığı açı 38° olan BBO kristali kullanıldı. Bu kristal, frekans toplama yöntemi ile üçüncü harmoniği üretir. Sadece, 343 nm dalgaboyuna sahip olan üçüncü harmonik bileşenini elde etmek için iki adet filtre kullanıldı. Birinci filtre (Thorlabs FGS900) 1030 nm dalgaboyundaki temel bileşeni soğurur. Diğer filtre (Thorlabs FGUV5) ise ikinci harmonik olan 515 nm dalgaboyunu soğurur. Bu filtrelerin dalgaboylarına göre ışığı geçirme oranları, sırasıyla Şekil 4.6 ve Şekil 4.7'da verilmektedir.



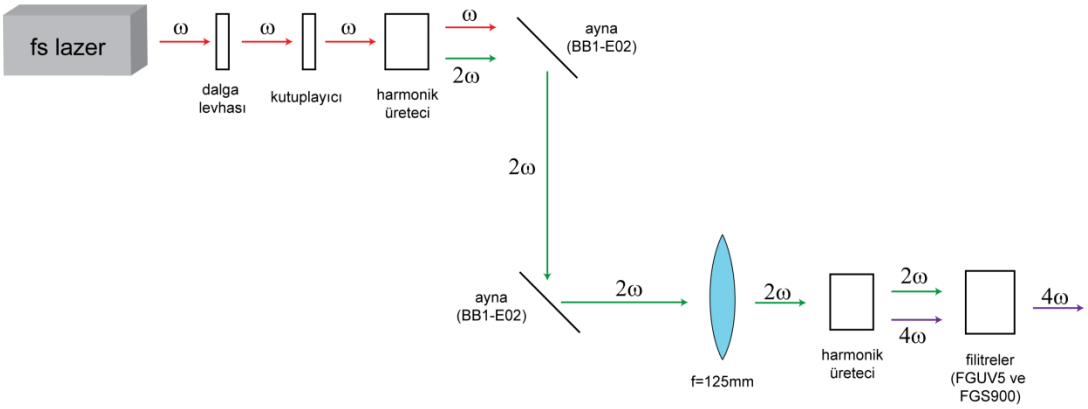
Şekil 4.6: Dielektrik filtrenin (Thorlabs FGS900) dalgaboyuna bağlı geçirgenliği.



Şekil 4.7: Dielektrik filtrenin (Thorlabs FGUV5) dalgaboyuna bağlı geçirgenliği.

Üçüncü harmonik üretim sisteminde kullanılan 100 mm ve 200 mm odak uzaklığına sahip mercekler, odaklarından gelen ışığı toplamak ve paralel gelen ışığı da odaklamak amacıyla kullanıldı. Bu merceklerin özel bir görevi yoktur. Kullanılma amaçları, ışığın dağılmasını engelleyerek kristallere girmesini sağlamak, bu şekilde üretilen harmoniklerin verimlerini yükseltmektir.

Dördüncü harmonik üretimi, daha önce de belirtildiği gibi ikinci harmonik üretimine çok benzemektedir. Bu harmoniği üretmek için kurulan deney düzeneği Şekil 4.8'de gösterilmektedir.



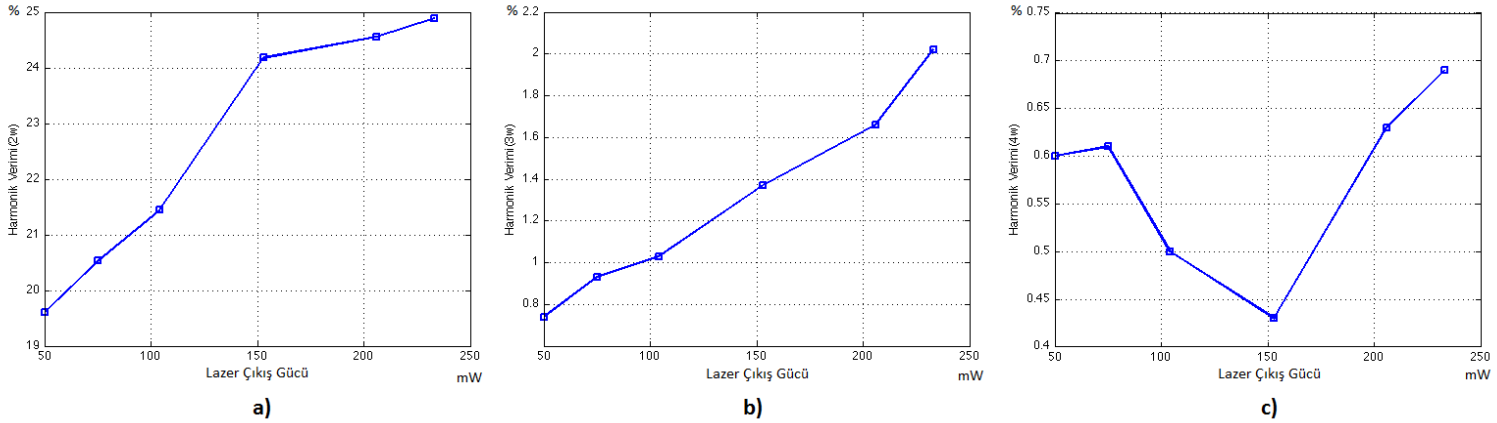
Şekil 4.8: Dördüncü harmonik üretilen deney düzeneği.

Burada ilk önce ikinci harmonik üretimi ve bunun ω bileşeninde ayrılması sağlandı. Üretilen ikinci harmonik, üretilmek istenenen dördüncü harmonik için temel bileşen konumunda kullanıldı. Polarizasyonun simetri ekseni ile yaptığı açı $43°$ olan BBO kristalinden ikinci harmonik bileşeni geçirildi. Bu kristalin çıkışında 2ω ve 4ω bileşenleri elde edildi. Bu iki bileşeni birbirinden ayırmak için filtre (Thorlabs FGUV5) kullanıldı.

Üretilen harmoniklerin güçleri, herbir lazer çıkış gücü için tek tek ölçüldü ve karşılaştırıldı. Sonra bu değerler kullanılarak harmoniklerin verimleri belirlendi. Şekil 4.9'da ve Çizelge 5.1'de lazerin çıkış enerjisine göre krsital verimlerinin nasıl değiştiği gösterildi. Genel olarak bakıldığı zaman lazer çıkış gücü arttıkça kristal verimi de artmaktadır. Ancak 4ω'nın grafiğinde bir düşüş görülmektedir. Bu düşüşün sebebi ise doğrusal olmayan üçüncü dereceden etkilerin (çoklu foton emilimi gibi) ortaya çıkmasıdır. 2ω üretiminde verim %25'lere varmaktadır. 3ω üretiminde verim %2 ye kadar çıkabilmekte, 4ω üretiminde ise ancak %0.7 mertebesine yaklaşmaktadır. Bu verimler çalışmalar için yeterlidir çünkü en düşük verim halinde bile, harmoniklerden elde edilen enerji numuneyi aşındırma eşiğinin üzerindedir. Ayrıca bu verimler her ne kadar kristal verimi olarak alınmış olsa da, sistemde kullanılan diğer optik elemanlardaki kayıplar ihmal edilmektedir. Bu kayıplar da hesaba katılırsa kristal verimlerinin daha yüksek olduğu görülebilir.

Çizelge 4.1 : Lazer çıkış gücüne göre oluşturulan harmonik bileşenlerin güçleri ve verimleri.

Lazer Çıkış Gücü [mW]	2ω'nın Gücü [mW]	2ω'nın Verimi (%)	3ω'nın Gücü [mW]	3ω'nın Verimi (%)	4ω'nın Gücü [mW]	4ω'nın Verimi (%)
50	9.80	19.60	0.37	0.74	0.30	0.60
75	15.40	20.53	0.70	0.93	0.46	0.61
104	22.30	21.44	1.07	1.03	0.52	0.50
153	37.00	24.18	2.10	1.37	0.66	0.43
206	50.60	24.56	3.42	1.66	1.30	0.63
233	58.00	24.89	4.70	2.02	1.60	0.69



Şekil 4.9: a) İkinci harmonik için kristal verimi, b) Üçüncü harmonik için kristal verimi, c) Dörüdüncü harmonik için kristal verimi.

4.1.4 Bessel hüzmesinin üretilmesi

Kullanılmak istenen harmonik bileşen üretildikten sonra Şekil 4.2'de görüldüğü üzere, aksikon mercek kullanılarak. Bessel hüzmeleri üretildi. Bessel hüzmesinin üretilmesindeki amaç, aynı nokta genişliğine sahip bir Gauss hüzmesine göre daha uzun mesafede odaklı kalabilmeleridir. Daha uzun mesafe odaklı kalabilmelerinin nedeni ise Bessel hüzmelerinin kırınıma uğramıyor olmalarıdır. Bu özellikleri gün geçtikçe bu hüzmelerin daha çok ilgi çekmelerini sağlamaktadır.

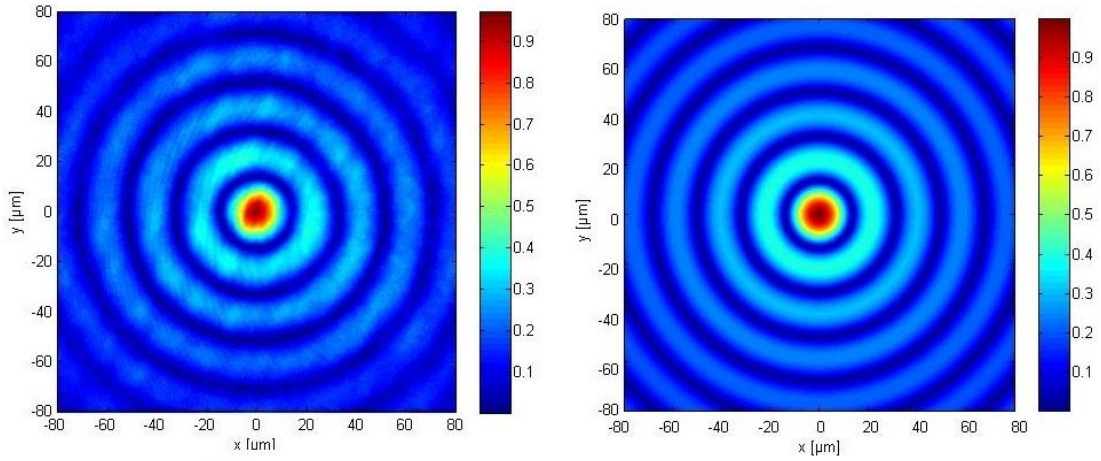
Bessel hüzmesinin ilerleme yönünde odak çapının değişmemesi, pratikte sıklıkla yaşanan hizalama zorluklarını da ortadan kaldırır. Bessel hüzmelerinin Gauss hüzmelerine göre bir başka üstünlüğü de bozukluk (kusur) eğilimlerinin daha az olmasıdır.

Gauss hüzmeleri, aksikon mercek kullanılarak Bessel hüzmelerine dönüştürülebilir. Bessel hüzmesinin çapı aşağıdaki ifade ile verilebilir:

$$d_m = 0.7655 \frac{\lambda}{\sin \beta} \qquad \textbf{(4.1)}$$

Yukardaki denklemde d_m Bessel hüzmesinin merkezinin çapı, β çıkan hüzmenin yarım koni açısı, λ ise hüzmenin dalgaboyudur. Bu denkleme göre çok yüksek malzeme işleme çözünürlüğü elde etmek için, daha kısa lazer dalgaboyları ve daha büyük açılı aksikon mercekler kullanmak gerekmektir. Bu nedenle deneylerde $40°$ açılı, optik camdan yapılmış aksikon mercek kullanıldı. Bu açı cam arayüzünde toplam iç yansıma sınırına çok yakındır.

Laboratuvarda aksikon mercek kullanılarak elde edilen Bessel hüzmesinin profili CCD kamera ile kaydedildi. Görüntü Matlab programı ile şiddet ölçeğiyle kaydedildi. Şekil 4.10 a laboratuvarda deneysel olarak elde edilen Bessel hüzmesinin profilini göstermektedir. Teorik olarak çizdirilen Bessel hüzmesinin şiddet profili de Şekil 4.10 b'de gösterilmiş. Teorik olarak elde edilen Bessel hüzmesine yakın sonuç elde edildiği görülmektedir.



Şekil 4.10: a) Laboratuvarda elde edilen Bessel hüzmesinin profili. b) Teorik olarak elde edilen Bessel hüzmesinin profile.

4.1.5 Görüntüleme ve numunenin hareketinin kontrolü

Deneysel çalışmalar yapılırken numune yüzeyi gerçek zamanlı olarak bir mikroskop ile izlendi. Bunu için 50 kat büyütmeye sahip bir mikroskop merceği kullanarak çalışmalar CCD kamera yardımıyla bilgisayardan eş zamanlı olarak görüntülendi. Bu sistemle Şekil 4.2'de görüldüğü üzere numunenin arkasından görüntü alındı. Yani çalışmaların sağlıklı bir geri beslemeyle yapılabilmesi için, CCD kamera, mikroskop merceği ve bilgisayar yardımıyla optik mikroskop yapılarak deney düzeneğine eklendi. Numune üzerinde nanometre boyutunda işleme yapıldığı için çok yüksek çözünürlükte görüntü almak mümkün değildir. Ama eş zamanlı görüntüleme, çalışmaların daha verimli sürdürülmesi açısından çok önemlidir. Deneysel çalışmalar bittiği zaman daha detaylı görüntü almak amacıyla tarayıcı elektron mikroskopisi (SEM) yöntemi kullanılarak bütün çalışmaların yüksek çözünürlükte görüntüleri alındı. Daha sonraki çalışmalar için bu veriler bir referans olarak kullanıldı.

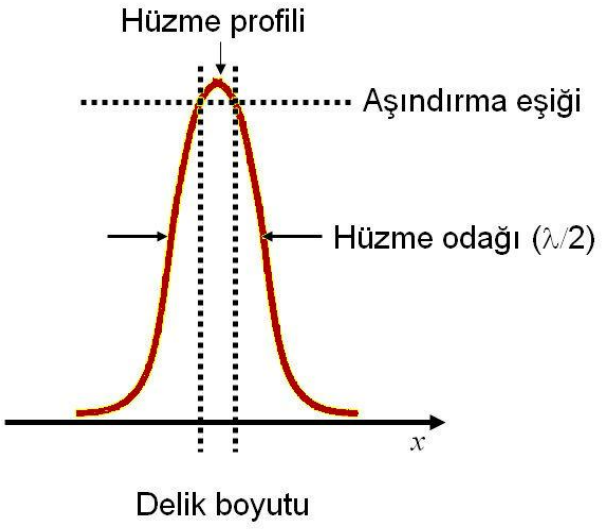
Fs lazer ile nano boyutta çalışma yapmanın en büyük sorunlarından birinin mekanik titreşimler ve çok hassas konum kontrolü olduğuna değinilmişti. Bu çalışmalarda mekanik titreşimleri minimuma indirmek için titreşim izolasyonlu optik masa kullanıldı. Masanın bacakları kompresör ile basılan hava tarafından kontrol edilir. Masaya dışardan bir müdehale yapılsa bile kompresörler yardımıyla tamamen hareket eden masa müdehaleyi titreşim olarak yaymak yerine, gelen tepkiye göre hareket ederek mekanik etkileri sisteme aktarmadan sönümler. Bu şekilde mekanik titreşimlerden kurtulmaya çalışıldı ve başarılı olundu.

Hassas pozisyon kontrolü için piezo motorlar tarafından konum kontrolü yapılan bir sistem kullanıldı (Madcity Labs, Nano 3D 200). Bu sistem her biri farklı eksende hareket eden 3 tabladan oluşmaktadır. Her tabla 1 nm konum çözünürlüğüne ve $200\mu m$ hareket aralığına sahiptir. Piezo sistem bilgisayardan Labview programı aracılığı ile kontrol edildi. Deneyler için ince metal film üzerinde yapılan ızgara biçimindeki tarama işlemi, Labview programında istenilen tarama işlemine uygun algoritma yazılması ile yapıldı. Bu şekilde numunenin çok hassas bir şekilde konum kontrolü yapıldı.

4.2 Deneysel Parametreler

Fs lazer ile hem opak hem de saydam malzemeleri işleyerek, işlenen bölgenin çevresine zarar vermeden çok yüksek kalitede yapıların oluşturulabildiğinden önceki bölümlerde bahsedildi. Bunu sağlayan en büyük olgu bu lazerlerin optik etkileşim süresinin, termal difüzyon süresinden çok kısa olmasıdır. Buna ek olarak bu çalışmada, doğrusal olmayan etkilere de bağlı olmakla beraber, lazerin darbe enerjisi malzemenin aşındırma eşiği dolaylarında tutuldu (Şekil 4.11). Bu sayede lazer dalgaboyunun kırınım limitinin bile altında çözünürlüğe ulaşmak hedeflendi. Nitekim çalışmalarda alınan sonuçlar doğru bir öngörüde bulunulduğunu göstermektedir.

İleride açıklanacağı gibi, çalışmalarda üretilen ikinci harmonikle en iyi sonuçlar elde edildi.



Şekil 4.11: Aşındırma eşiğine yakın çalışmaların hüzme profilini verimli kullanmaya katkısı

4.2.1 Tarama hızı

Piezo sistemdeki tablaların malzeme işlerken hızları, 50 μm/s olarak sabit tutuldu. Geçmişte yapılmış diğer çalışmalarda malzeme tarama hızı 50 μm/s veya dolaylarında seçilmiştir. Bu hızların seçilmesinde lazerin tekrarlama frekansının etkisi büyüktür. Çünkü bir saniyede numuneye gelen darbe sayısı hızı belirlemede önemli bir parametredir. Eğer yüksek bir hızla numune taranırsa darbelerin merkez noktalarının numune üzerine düştükleri uzaklık büyümektedir. Bu da, numune üzerinde birim alan başına düşen darbe sayısını azaltmaktadır. Bu azalan enerjinin hangi noktadan sonra istenmeyen koşul olduğunu belirleyen parametre ise numunenin aşındırma eşiğidir. Öyle ki eğer numune tarama hızı çok artarsa ve birim alan başına düşen enerji aşındırma eşiğinin altına düşerse, numune üzerinde açılan kanallar kesikli olmaya başlar ya da hiç aşındırma olmaz. Kesikli olması, sadece darbelerin kesiştiği noktalarda ablasyon eşiğinin üzerine çıkıldığını gösterir.

Bu durumun tersi de istenmeyen bir durumdur. Eğer tarama hızı çok yavaşlarsa, bu sefer de üst üste binen darbe sayısı çok artar ve aşındırma eşiğinin çok üstüne çıkılır. Bu sefer, birim alana düşen enerji miktarı çok fazla artar ve aşındırma miktarı da çok artar. Yani numune üzerinde açılan kanallar kalınlaşmaya başlar.

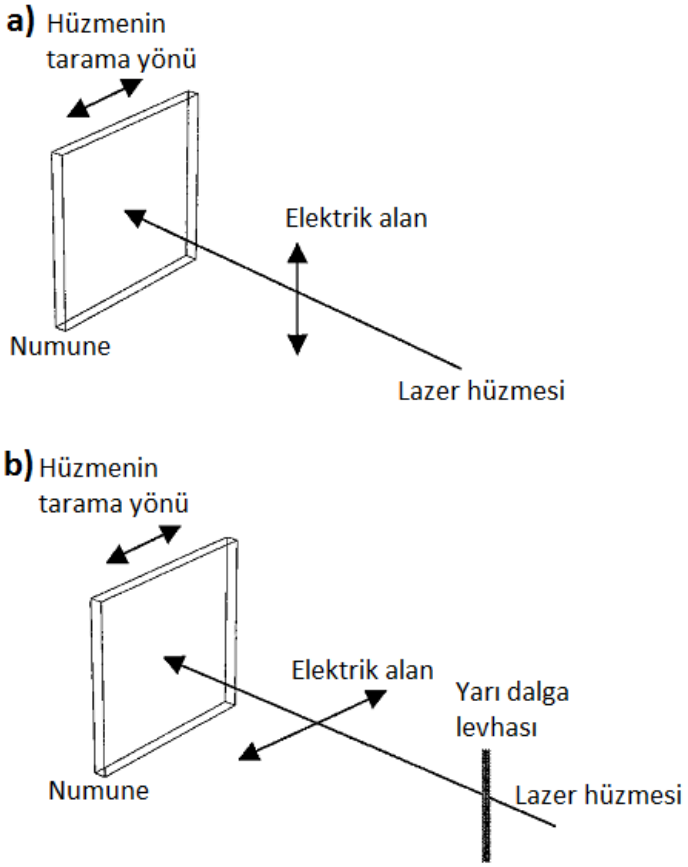
Bu istenmeyen durumların oluşmasını engellenmek için, mevcut laboratuvar şartlarında ortalama ne kadar tarama hızı ile çalışılması gerektiği hesaplandı. Sonra öngörülen değer etrafında belirli hız kademelerinde 10'ar adet kanal açılarak deney yapıldı. Numune üzerinde aşındırma ile en ince kanalın hangi tarama hızında yapıldığı belirlendi. Bu da öngörülen 50 μm/s tarama hızı değeridir. Bu nedenle bütün çalışmalar bu tarama hızı ile gerçekleştirildi.

4.2.2 Polarizasyonun etkisi

Polarizasyon, ışığın elektrik alan vektörünün yönüne göre üç farklı formda olabilir. Bunlardan birincisi s-polarizasyondur. Hüzmenin tarama yönü yatay olarak düşünüldüğü zaman, bu tarama yönüne göre elektrik alanın dik salındığı polarizasyondur. Diğeri ise p-polarizasyondur. Yine hüzme tarama yönü referans olarak yatay alındığı zaman, elektrik alanın bu tarama yönüne paralel salındığı polarizasyondur. Sonuncusu da dairesel polarizasyondur. Adından da anlaşıldığı üzere elektrik alanın salınımı daireseldir. Şekil 4.12 a'da s polarizasyonda elektrik alanın salınım yönünü, Şekil 4.12 b'de p-polarizasyondaki elektrik alanın salınım

yönünü görebiliriz. Malzeme üzerinde aşındırma yaparken daha dar kanalların elde edilebilmesi için tarama yönüne paralel polarizasyon kullanılması tercih edilebilir. Ancak malzeme üzerinde çok karmaşık şekillerde tarama yapılıyorsa, polarizasyonla uğraşmamak adına dairesel polarizasyon kullanılması tavsiye edilebilir [28]. Bu tezde yapılan bütün çalışmalarda polarizasyon, numune tarama yönüne dik olarak ayarlandı.

Aşağıda s-polarizasyon ve p-polarizasyon için, elektrik alanın tarama yönüne göre salınımını gösteren şekil verilmektedir.

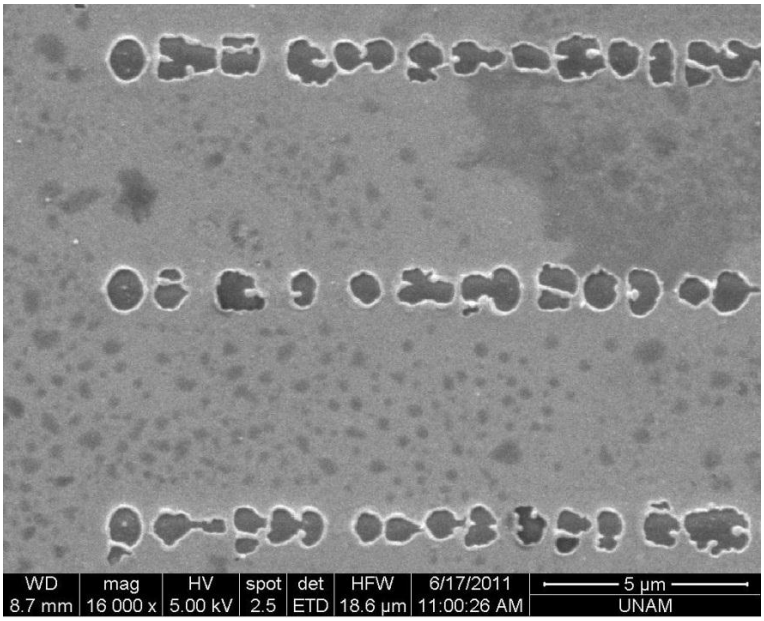


Şekil 4.12: a) s-polarizasyonda elektrik alanın salınımı b) p-polarizasyonda elektrik alanın salınımı [28]

4.2.3 Darbe enerjisinin ve farklı dalgaboylarının etkileri

Darbe enerjisi ve dalgaboyu, kanal genişliğini doğrudan etkileyen en önemli iki parametredir. Yapılan çalışmalarda her bir dalgaboyu için, kısa adımlarla enerji değiştirilerek kanallar açıldı. Bu şekilde hem dalgaboyunun hem de enerjinin malzeme üzerindeki etkisi görüldü.

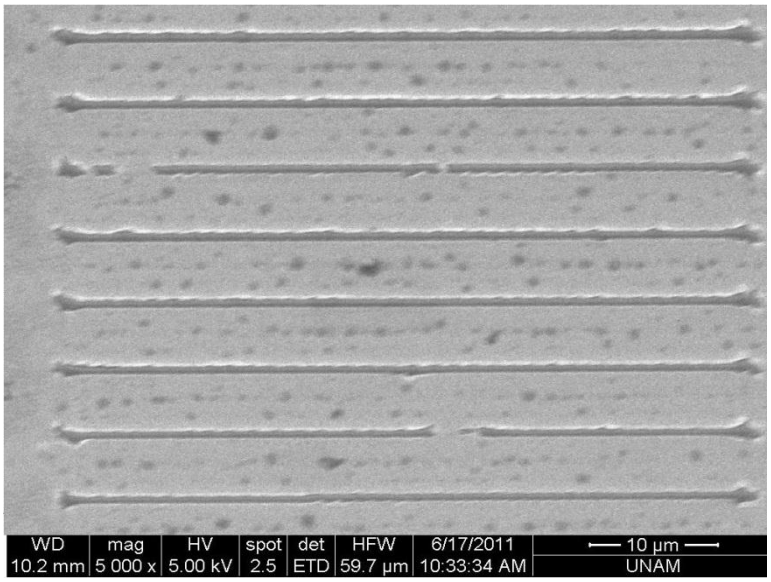
Numune, piezo sisteme bağlı olan tablanın üzerine tutturuldu. Lazer numune üzerine etki ederken piezo sistem yardımıyla numune hareket ettirildi. İnce altın film üzerinde, aşındırma yöntemi ile 100 μm uzunluğunda kanallar açıldı. Kanallar açılırken düzenli bir şekilde lazer enerjisi azaltıldı. Bu enerji azaltma işlemi aşındırma eşiğinin altına düşüp kanal açamayana kadar devam etti. Buradaki amaç aşındırma eşiğine yakın çalışmak ve bu sayede kanal genişliğini mümkün mertebe azaltmaktır. En düşük dalgaboyuna sahip (1030 nm) temel bileşenle çalışırken bile kolaylıkla nanometre boyutlarında çözünürlük elde edildi. Şekil 4.13'te birinci harmonik ile açılan kanalların SEM görüntüleri yer almaktadır.



Şekil 4.13: İnce altın film üzerinde fs lazerin temel bileşeni olan 1030 nm ile açılan kanallar.

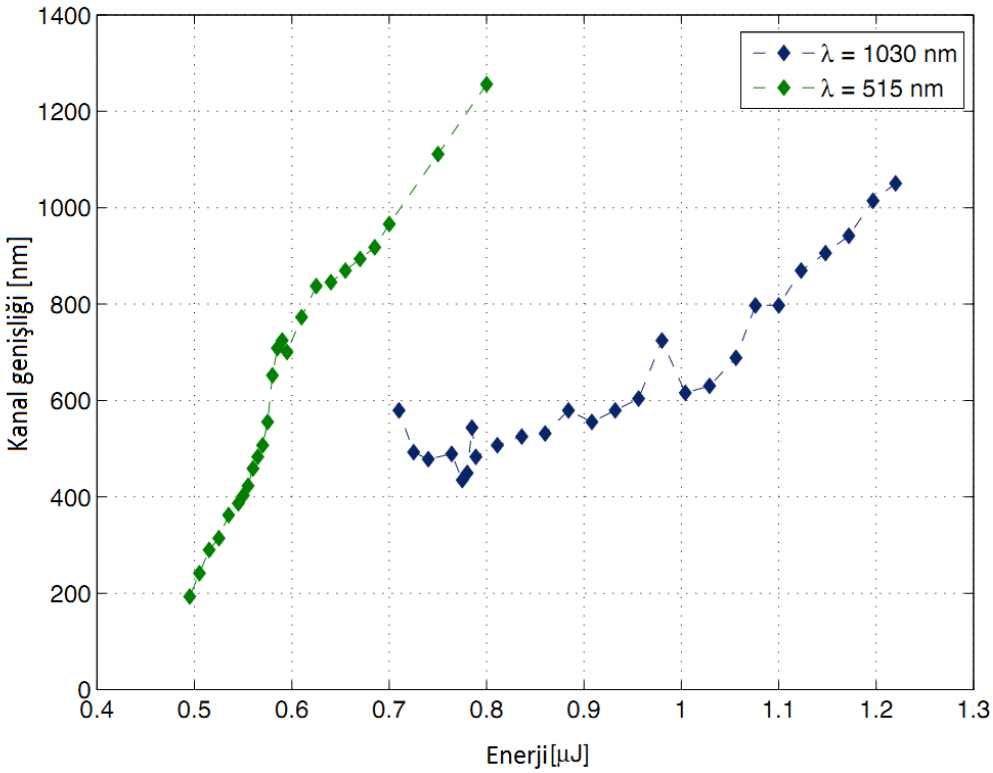
1030 nm dalgaboyuna sahip hüzmenin aksikondan geçtikten sonra 1064 nm merkez çapı olan Bessel hüzmesine dönüştü. Sadece odaklayarak dalgaboyu altında yapılar oluşturmak bilindiği üzere mümkün değildir. Ancak aşındırma eşiğine yakın çalıştığımız için bu dalgaboyunda 434 nm'ye kadar kanal genişliği düşürüldü. Ancak bu temel harmonikle yapılan çalışmalarda kanallar çok fazla kesikli yapıda oldular.

515 nm dalgaboyundaki Gauss hüzmesi, merkez çapı 790 nm olan Bessel hüzmesine dönüştürüldü. Bu hüzmelerle yapılan çalışmalarda kanal genişlikleri 200 nm mertebesin kadar düşürülebildi. Aşındırma eşiğine yakın çalışarak Bessel hüzmesinin merkez çapının neredeyse dörtte biri kadar küçük kanallar açıldı (Şekil 4.14). En verimli çalışmaların bu dalgaboyunda olduğu söylenebilir.



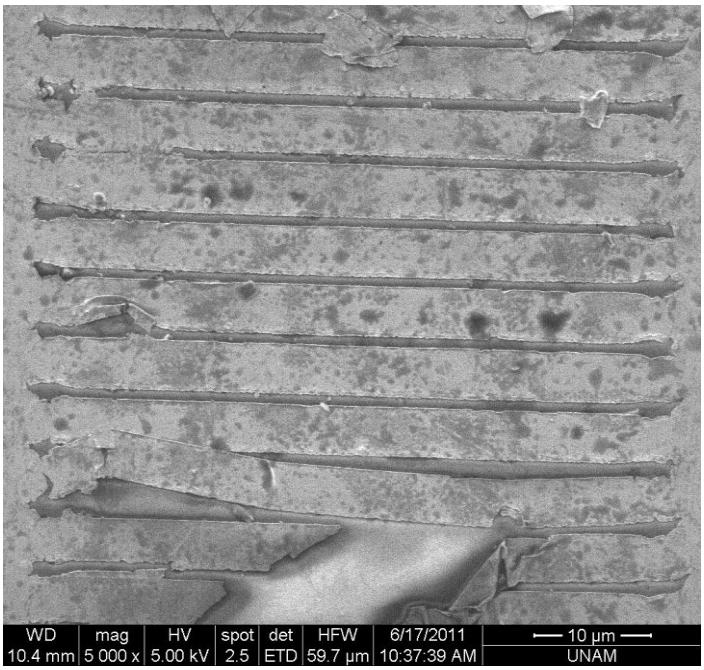
Şekil 4.14: İnce altın film üzerinde fs lazerin ikinci harmoniği olan 515 nm dalgaboyundaki hüzme ile açılan kanallar

Birinci ve ikinci harmonikle açılan kanalların genişliğinin, lazerin enerjisiyle değişimi Şekil 4.15'de görülmektedir. Açılan kanal genişliklerinin enerji ile değişimi beklenildiği gibi çıkmaktadır. Artan enerji ile beraber kanal genişlikleri de artmaktadır.

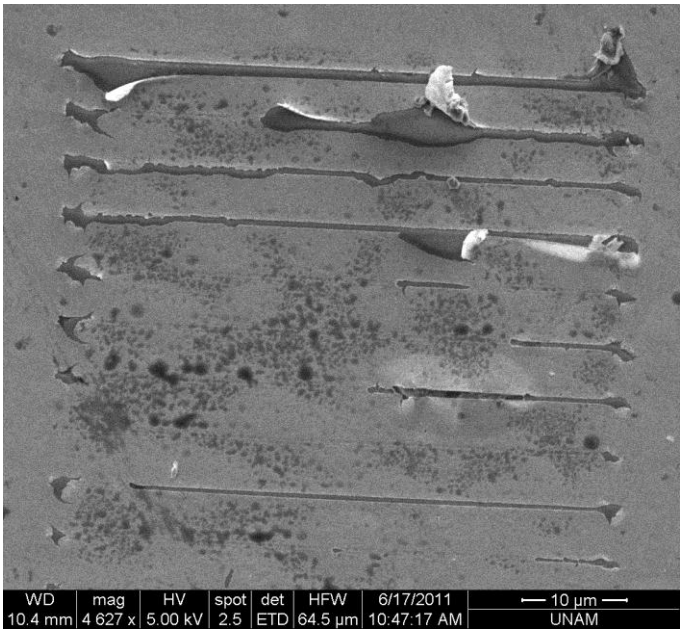


Şekil 4.15: Birinci ve ikinci harmonikle açılan kanalların genişliğinin, lazerin enerjisi ile değişimi.

Üçüncü ve dördüncü harmonik ile yapılan çalışmalarda, yüzeyde kavlamalar ve yanıklar oluştu. Bu nedenle oluşan kanallar her ne kadar ince de olsa yüzeyin tahrip olması nedeniyle, düzenli bir yapı oluşturulamadı. Şekil 4.16 ve Şekil 4.17'de sırasıyla üçüncü ve dördüncü harmonik ile açılan kanallar ve bu kanallarda oluşan kavlamalar görülmektedir.



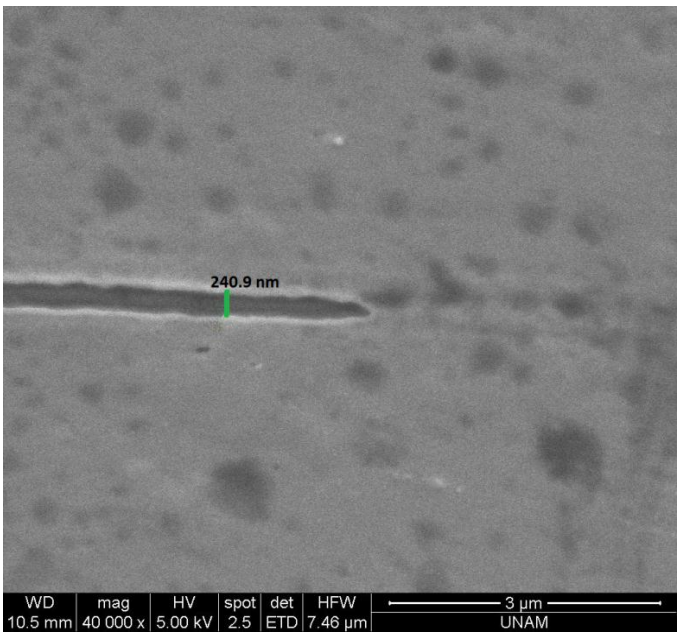
Şekil 4.16: İnce altın film üzerinde fs lazerin üçüncü harmoniği olan 343 nm dalgaboyundaki hüzme ile açılan kanallar.



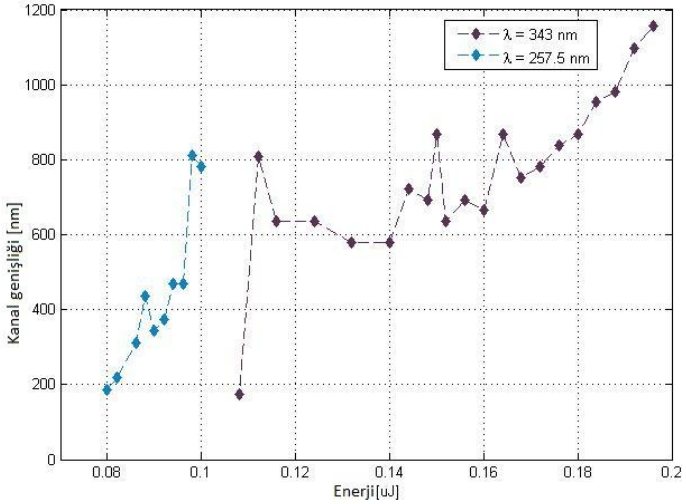
Şekil 4.17: İnce altın film üzerinde fs lazerin dördüncü harmoniği olan 275.5 nm dalgaboyundaki hüzme ile açılan kanallar.

Bu kavlamaların sebebi ince altın kaplamanın üzerine yapıldığı camın bu dalgaboyundaki ışığı soğurması ve bunun sonucunda ısınmasıdır. Lazer yüksek yoğunluk ile yüzeye geldiği için bu soğrulan enerji metal filmde kavlamalara sebep olur.

Kavlamanın olmadığı bazı bölümler incelendiğinde ne kadar yüksek çözünürlüklere ulaşıldığı görülmektedir (Şekil 4.18). Üçüncü ve dördüncü harmoniklerle açılan kanalların lazer enerjisi ile değişimi Şekil 4.19'da görülmektedir



Şekil 4.18: İnce altın film üzerinde fs lazerin dördüncü harmoniği olan 257.5 nm dalgaboyundaki hüzme ile açılan bir kanal.



Şekil 4.19: Üçüncü ve dördüncü harmonikle açılan kanalların genişliğinin, lazerin enerjisi ile değişimi.

Şekil 4.19'da da görüldüğü gibi kanal genişliği lazer enerjisinin artmasıyla artmıştır. Bazı dalgalanmalar mevcuttur. Bunların, numunenin bazı yerlerde homojen olmamasından ve altın ile kaplanan camın enerjiyi soğurmasından kaynaklandığı söylenebilir.

5. SONUÇLAR VE İLERİ BAKIŞ

Bu çalışmada Bessel profilindeki femtosaniye lazer ile aşındırma yaparak ince metal filmler üzerinde nanometre çözünürlüğünde yapılar oluşturuldu. Lazer enerjisi aşındırma eşiğine yakın seçilerek, kırınım limitinin altında üretilen yapıların boyutları kontrol edilebildi.Aşındırma eşiğine yakın çalışılarak lazer hüzmesinin sadece belli bir kısmının malzeme üzerinde işlemesine olanak verildi. Bu sayede çalışalan dalgaboylarının neredeyse dörtte biri küçüklüğünde yapılar çok rahat bir şekilde elde edildi.

Standart Gauss hüzmesi kullanmak yerine Bessel hüzmesi kullanmanın bazı avantajları gösterildi. Bessel hüzmesinin kırınımsız olması neticesinde boylamasına yapılan hareketlerin (mekanik hatalar nedeniyle) aşındırma işlemine zarar vermediği görüldü.

Daha yüksek kalitede çözünürlük elde etmek için dalgaboyunu küçültmek gerektiği zaten açıktır. Bu nedenle lazerin ikinci, üçüncü ve dördüncü harmonikleri doğrusal olmayan yöntemler ile üretildi ve aşındırma deneylerinde kullanıldı. Bu yöntemler kullanılarak 200 nm'nin altında yapılar oluşturuldu. Plazmonik yapıların, kimyasal ve litorafik yöntemlere göre çok daha hızlı üretilebileceği gösterildi. Bu deneysel çalışmalar, Bessel hüzmelerinin lazer ile nano boyutta yapılar oluşturma çalışmalarını ivmelendireceğini göstermektedir.

Çalışmalarda üçüncü ve dördüncü harmoniklerin, altın filmin üzerine kaplandığı cam tarafından soğrulması neticesinde altın kaplamada kavlamalar ve parçalanmalar meydana geldi. Bu nedenle çalışmaların kalitesi düştü. Bu sorun farklı malzeme seçimi veya başka bir yöntemle çözülebilir. Daha sonra bu deneyler tekrarlanarak çok daha küçük yapılar oluşturulabilir.

Sonuç olarak Bessel hüzmelerinin plazmonik yapıların üretiminde iyi bir alternatif olabileceği görülmektedir.

KAYNAKLAR

[1] **Amer, M., El-Ashry, M., Dosser, L., Hix, K., Maguire, J., & Irwin, B.** (2005). "Femtosecond versus nanosecond laser machining: comparison of induced stresses and structural changes in silicon wafers." Applied surface science, 242, 162–167.

[2] **URL-1. "**Micromachining Handbook", Clark-MXR, Inc [Online]. Available: http://www.ultrafastmachining.com/mmhandbook_5.html

[3] **Yalizay, B., Ersoy, T., Soylu, B., and Akturk,** (2012). "Fabrication of nanometer-size structures in metal thin films using femtosecond laser Bessel beams", Appl. Phys. Lett. 100, 62-65

[4] **Zoubir, A., Shah, L., Richardson, K., & Richardson, M.** (2003). "Practical uses of femtosecond laser micro-materials processing." Applied Physics A: Materials Science & Processing, 77(2), 311–315.

[5] **C. Momma, S. Nolte, B. N. Chichkov, F. v. Alvensleben, A. Tunnermann.** (1997). Precise laser ablation with ultrashort pulses, Applied Surface Science 109/110, 15–19

[6] **Rajpal S. Sironi,** (2009). **"**Optical Methods of Measurement", 2nd ed. CRC Press.

[7] **Little, H., (**2007). "Optical Micromanipulation Using Ultrashort Pulsed Laser Sources", PhD Thesis, University of St Andrews.

[8] **Alda, J. (**2003). **"**Laser and Gaussian beam propagation and transformation." Optical Engineering, 999–1013.

[9] **Kuzmin, V.B.** (2008). "Interference Effects with Surface Plasmons", PhD Thesis, Leiden University

[10] **Üstel, E.** (2006). "Anormal Hemoglobinlerin SPR Yöntemi ile Gen Düzeyinde Tanısı", Yüksek Lisans Tezi, Pamukkale Üniversitesi

[11] **Genet, C., & Ebbesen, T. W.** (2008). Surface-Plasmon Circuitry, American Institute of Physics, S-0031-9228-0805-030-8

[12] **Bozhevolnyni, S.I., & Ebbesen, T. W., (**2008). "Plasmonic Nanoguides and Circuit", Pan Stanford Publishing

[13] **Diltemiz, S.E.,** (2006). "DNA'yı Tanıma Bölgelerine Sahip Moleküler Baskılanmış Polimer Tekniğine Dayalı Biyosensör Geliştirilmesi", Doktora Tezi, Anadolu Üniversitesi

[14] **Denizli, A., Yavuz, H.,** (2007). "Hepatit Teşhisine Yönelik Tayin Kitlerinin Hazırlanması", TÜBİTAK Bilimsel Araştırma Projesi Raporu, Hacettepe Üniversitesi

[15] **Schaefer H.E.,** (2010). "Nanoscience, The Science of the Small in Physics, Engineering, Chemistry, Biology", 1st ed. Springer.

[16] **Boyd, R.W., (**2002). "Nonlinear Optics", Second Ed. Academic Press.

[17] **Yalızay, B.** (2011). "Gauss, Bessel ve Airy Hüzmeleri ile Femtosaniye Lazer-Malzeme Etkileşimlerinin İncelenmesi", Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi

[18] **Genet, C., & Ebbesen, T. W.,** (2007). "Light in Tiny Holes". Nature, 445(7123), 39-46. doi:10.1038/nature05350.

[19] **Sönnichsen, C., (**2001). "Plasmons in Metal Nanostructures", PhD Thesis, University of Munich.

[20] **Simsek, E., & Akturk, S.,** (2011), "Plasmonic Enhacement During Femtosecond Laser Driling of Sub-wavelenght Holes in Metals", 6:767-772.

[21] **Maier, S., A.,** (2006), "Plasmonics Fundamental and applications", Springer.

[22] **Brongersma, M., L. & Kik, P., G.** (2007) "Surface Plasmon Nanophotonics", Springer

[23] **Çağlayan, M., O.** (2009). "Biyomoleküler Tanı Sistemleri İçin Taşınabilir, Gerçek Zamanlı ve Etiketsiz Biyosensör Geliştirilmesi ve Karakterizasyonu", Doktora Tezi, Hacettepe Üniversitesi.

[24] **Stockman, M., I.** (2011). "Nanoplasmonics: The Physics Behind The Applications", Physics Today s:39-44.

[25] **Karataş, A., Sonakın, Ö.** (2007). "Mikrofabrikasyon Teknolojisi ve İlaç Taşıyıcı Sistemler Üzerinde Uygulamaları", The Physics Behind The Applications", Ankara Ecz. Fak. Derg. s:47 - 74.

[26] **Lakowicz, J. R.,** (2006). "Plasmon-Controlled Fluorescence: A New Detection Technology", (Vol. 6099, ss 609909-609909-15). SPIE. doi:10.1117/12.673106.

[27] **Yücel, F., Çiçek, A.** (2011)."İmalat Alanında Yaygın Olarak Kullanılan MikroİşlemeTeknikleri", SAÜ. Fen Bilimleri Dergisi, 15. Cilt, 1. Sayı, s.46-59

[28] **Venkatakrishnan, K., Tan, B., Stanley, P., & Sivakumar, N. R.** (2002). The effect of polarization on ultrashort pulsed laser ablation of thin metal films. Journal of Applied Physics, 92(3), 1604. doi:10.1063/1.

ÖZGEÇMİŞ



Ad Soyad: Burak Soylu

Doğum Yeri ve Tarihi: Şanlıurfa 28.06.1987

Adres:

E-Posta: buraksoylu87@hotmail.com

Lisans: İstanbul Üniversitesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü (2009)

Mesleki Deneyim ve Ödüller:

Yüksek Proje Uluslararası A.Ş. – Marmaray Projesi Avrasya Ortak Girişimi, Elektrik Mühendisi (Haziran 2011-)

Yayın ve Patent Listesi:

Berna Yalizay, Burak Soylu, and Selçuk Aktürk, "Optical element for generation of accelerating Airy beams," J. Opt. Soc. Am. A 27, 2344-2346 (2010)

B. Yalizay, T. Ersoy, B. Soylu, and S. Akturk, Fabrication of nanometer-size structures in metal thin films using femtosecond laser Bessel beams, Appl. Phys. Lett. 100, 031104 (2012)

TEZDEN TÜRETİLEN YAYINLAR/SUNUMLAR

B. Yalizay, T. Ersoy, B. Soylu, and S. Aktürk, Fabrication of nanometer-size structures in metal thin films using femtosecond laser Bessel beams, Appl. Phys. Lett. 100, 031104 (2012)