

**Yeni Nesil İnce filmler İle Optoelektronik Uygulamaların  
Araştırılması**

**Investigation of Optoelectronic Applications With Novel  
Thin Films**

**MEHMET DENİZ ÇALIŞKAN**

**Prof. Dr. ŞADAN ÖZCAN**

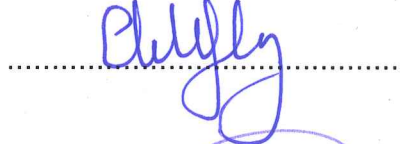
**Tez Danışmanı**

Hacettepe Üniversitesi  
Lisansüstü Eğitim-Öğretim ve Sınav Yönetmeliğinin  
Nanoteknoloji ve Nanotıp Anabilim Dalı için Öngördüğü  
DOKTORA TEZİ olarak Hazırlanmıştır.

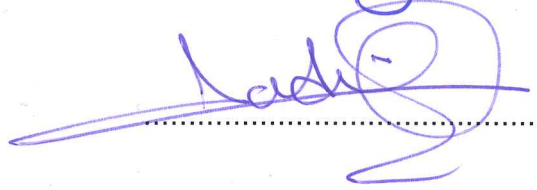
2014

**Mehmet Deniz Çalışkan'** ın hazırladığı "Yeni Nesil İncefilmler İle Optoelektronik Uygulamaların Araştırılması" adlı bu çalışma aşağıdaki jüri tarafından **NANOTEKNOLOJİ ve NANOTIP ANABİLİM DALI'** nda **DOKTORA TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

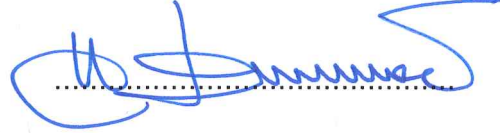
Prof. Dr. Ekmel ÖZBAY  
Başkan



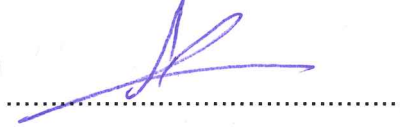
Prof. Dr. Şadan ÖZCAN  
Danışman



Prof. Dr. Hüseyin Zafer DURUSOY  
Üye



Prof. Dr. Semra İDE  
Üye



Prof. Dr. Recai ELLİALTIOĞLU  
Üye



Bu tez Hacettepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tarafından **DOKTORA TEZİ** olarak onaylanmıştır.

Prof. Dr. Fatma SEVİN DÜZ

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

*Kızım ve Ailem' e*

## ETİK

Hacettepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada,

- tez içindeki bütün bilgi ve belgeleri akademik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- görsel, işitsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçları bilimsel ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda ilgili eserlere bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunduğumu,
- atıfta bulunduğum eserlerin tümünü kaynak olarak gösterdiğimi,
- kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapmadığımı,
- ve bu tezin herhangi bir bölümünü bu üniversitede veya başka bir üniversitede başka bir tez çalışması olarak sunmadığımı

beyan ederim.

26/09/2014



MEHMET DENİZ ÇALIŞKAN

## ETİK

Hacettepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, tez yazım kurallarına uygun olarak

hazırladığım bu tez çalışmada,

- tez içindeki bütün bilgi ve belgeleri akademik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- görsel, işitsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçları bilimsel ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda ilgili eserlere bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunduğumu,
- atıfta bulunduğum eserlerin tümünü kaynak olarak gösterdiğimi,
- kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapmadığımı,
- ve bu tezin herhangi bir bölümünü bu üniversitede veya başka bir üniversitede başka bir tez çalışması olarak sunmadığımı

beyan ederim.

26/09/2014

MEHMET DENİZ ÇALIŞKAN

## ÖZET

### **Yeni Nesil İnce Filmler İle Optoelektronik Uygulamaların Araştırılması**

**Mehmet Deniz Çalışkan**

**Doktora, Nanoteknoloji ve Nanotıp Anabilim Dalı**

**Tez Danışmanı: Prof. Dr. Şadan ÖZCAN**

**01/09/2014, 136 sayfa**

Tez çalışmamda temel olarak metal oksit ince film malzemeler kullanılarak üretimi kolay ve ucuz morötesi fotodedektörler geliştirilmesi ve bu aygıtlar üzerine işlenen nano yapılar ile aygıt performansının kontrollü iyileştirilmesi amaçlanmıştır.

Bu amaçla çalışmamda, literatürde morötesi fotodedektör aygıtları yapımında kullanılan Titanyum Dioksit ( $TiO_2$ ) ve Çinko Oksit ( $ZnO$ ) malzemeleri seçilmiştir. Bu malzemelerin üretimi için kolay ve ucuz bir yöntem olması açısından fiziksel kaplama metodu olarak saçtırma yöntemi kullanılması tercih edilmiş ve üretimi kolay ve ucuz olacak aygıt tipleri ve üretim teknikleri kullanılmıştır.

Çalışmanın ilk safhasında  $TiO_2$  ince filmlerin üretimi ve aygıt üretim sürecinin optimizasyonu yapılmıştır. Isıl işleme veya Oksijen plazmasına tabi tutulmuş ince filmlerin özellikleri incelenmiş ve bu ince filmler ile üretilen fotodedektörlerin performansları karşılaştırılmıştır. Isıl veya plazma işlemlerine tabi tutulmuş ince filmler ile üretilen fotodedektörlerin performansının hiç işlem görmemiş fotodedektörlere göre belirgin bir fark göstermediği sonucuna varılmıştır.

50 V'dan yüksek kırılma gerilimleri,  $2.1 \times 10^{-8}$  A/cm<sup>2</sup> gibi oldukça düşük bir karanlık akım yoğunluğu, 1.8 A/W gibi yüksek bir fotocevap, %1750 mertebesinde iç kuvantum verimi ve 9 s yükselme, 3.5 s düşme zamanları elde edilmiştir. Bu sonuçlar literatür ile karşılaştırıldığında ısı veya plazma işlemlerine tabi tutulmuş aygıtlar ile aynı seviyede değerler olmasına karşın ince filme büyütme sonrası herhangi bir işlem yapılmaksızın üretilebildiği için üstünlük sağlayan sonuçlardır. Çalışmanın ilerleyen aşamalarında bu yüksek performanslı, kolay ve ucuz üretim yöntemleri ile üretilmiş fotodedektörler üzerine nanoplazmonik yapılar tasarlanmış ve bu fotodedektörlerin izgesel cevabının uygulamaların ihtiyacına göre değiştirilebileceği gösterilmiştir. Nanoplazmonik yapıların fotodedektör ile entegre edilmesi ile fotodedektörün UVB bandındaki fotocevabı %60 mertebesinde düşürülerek morötesi fotodedektörlerde izgesel fotocevabın nanoplazmonik yapılar ile izgesel cevaplarının soğurma bölgesi içerisinde uygulama ihtiyacına göre modifiye edilebileceği, daha çok yakın kızılötesi ve görünür dalgaboylarında uygulanan nano plazmonik filtrelerin morötesi bölgesinde de uygulanabileceği gösterilmiştir.

Kaplandığı hali ile ZnO ince filmler ile de benzer şekilde fotodedektörler üretilmiştir. Bu aygıtlar ile yine 100 V'tan büyük kırılma gerilimine sahip ve 100V'ta 100 pA/cm<sup>2</sup> gibi literatürdeki değerlere göre çok düşük karanlık akım yoğunlukları ölçülmüştür. 22 ps yükselme ve 8 ns düşme zamanları ile çok yüksek hızlarda çalışabilen, 0.35 A/W gibi kabul edilebilir seviyede fotocevap verebilen bir morötesi fotodedektör üretilmiştir. Bir diğer çalışma ise ZnO ince filmlerin üretimi sırasında Ge nanoparçacıklarının katkılanması ile elde edilen ince filmlerin optik ve elektro-optik özelliklerinin değişiminin incelenmesidir. Üretilen ince filmlerin karakterizasyonlarının yanısıra bu ince filmler ile fotoiletken, Silisyum ile heteroeklemler ve literatürde örneği görülmeyen, TiO<sub>2</sub> ince filmler ile heteroeklemler aygıtlar üretilerek bu aygıtların optoelektronik özellikleri incelenmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** RF Magnetron Saçtırma, TiO<sub>2</sub>, ZnO, MSM, Fotodedektör, Nanoplazmonik UV Fotodedektör, Yüksek Hızlı MSM Fotodedektör.

## **ABSTRACT**

### **Investigation of Optoelectronic Applications With Novel Thin Films**

**Mehmet Deniz Çalışkan**

**Doctor of Philosophy, Department of Nanotechnology and Nanomedicine**

**Supervisor: Prof. Dr. Şadan ÖZCAN**

**01/09/2014, 136 pages**

The aim of this study is to develop easy to fabricate and inexpensive ultraviolet photodetectors with metal oxide thinfilms and to improve or change the performance of those devices using designed nanostructures.

For this purpose Titanium Dioxide (TiO<sub>2</sub>) and Zinc Oxide (ZnO) materials were selected which are used for ultraviolet photodetector fabrication. As the deposition method for those materials one of the physical deposition methods, RF Magnetron Sputtering was selected, which is easy to utilize and rather inexpensive in terms of operation.

During the early stages of the study, TiO<sub>2</sub> thin film deposition and device fabrication optimization studies were performed. The properties of the annealed and Oxygen plasma treated thin films were investigated, the performances of the photodetectors fabricated using treated and untreated thin films were compared and found out that the photodetectors fabricated using untreated thinfilms were performing comparably with the photodetectors fabricated with treated thinfilms.



The photodetectors fabricated with untreated thin films showed breakdown voltages larger than 50 V, dark current density less than  $2.1 \times 10^{-8}$  A/cm<sup>2</sup>, 1.8 A/W responsivity, 1750% internal quantum efficiency and 9 s and 3.5 s rise and fall times respectively. Although these results are similar with the results obtained from treated thin films given in the literature, they are interesting because the photodetectors were fabricated by simple and cheap processes without any post annealing or plasma treatment. The next stage of the study was to design nanoplasmonic structures on those well performing photodetectors to improve or modify the spectral response of the photodetector for specific applications. Integrating the designed nanoplasmonic structure with the photodetector the response of the photodetector in UVB band was reduced by 60%. This was a demonstration of the usage of nanoplasmonic structures (which are mostly used in IR band) for the modification of spectral response of the photodetectors for specific applications and the first usage of nanoplasmonic filters in UV band.

During the following stages of the study, photodetectors were fabricated using as deposited ZnO thin films with breakdown voltage of larger than 100 V, dark current densities as low as 100 pA/cm<sup>2</sup> at 100 V bias voltage, respective rise and fall times of as low as 22 ps and 8 ns and responsivity of 0.35 A/W were obtained. Another phase of the ZnO thin film photodetector study was investigating the optoelectronic properties of Ge nanoparticle doped ZnO thin films and developing devices using this material. The characterization of the deposited thin films were done and photoconductor, Si heterojunction and TiO<sub>2</sub> heterojunction devices as the first concept in literature were fabricated and characterized.

**Keywords:** RF Magnetron Sputtering, TiO<sub>2</sub>, ZnO, MSM, Photodetectors, Nanoplasmonic UV Photodetector, High speed MSM photodetector.

## TEŞEKKÜR

Doktora çalıőmama baőlamam konusunda motive etmekle baőlayan, ders ve tez dönemlerimde bana doğru yönlendirmeleri yapan ve her anlamda destek veren danıőmanım sayın Prof. Dr. şadan ÖZCAN ve sayın Prof. Dr. Ekmel ÖZBAY'a; olumlu ve yönlendirici yorumları ve vakum teknolojisindeki engin birikimini bant açarak hızımı arttıran sayın Prof. Dr. Zafer DURUSOY'a; fikirlerimi rahatlıkla tartıőıp bunları geliőtirmemde, benzetim çalıőmalarındaki desteğine, deney sonuçlarının incelenmesi ve yorumlanmasında, yayınlarımızın hazırlanmasında bana destek ve yardımcı olan sevgili dostum Dr. Bayram BÜTÜN'e; tez çalıőmam boyunca bana ince film malzeme, teorik destek ve malzeme karakterizasyon desteği sağlayan sevgili dostum Doç. Dr. Abdullah CEYLAN'a, ince film ve aygıt üretimi, testi ve karakterizasyonunda bana yardımcı olan sevgili arkadaşlarım M. Cihan ÇAKIR, Ahmet AKBAő, Okan ATEőAL, Ramazan ÖZSOY, Pakize ÖZTOP, Akbay TABAK'a; doktora çalıőmasına baőlama fikrinin doğmasından itibaren son ana kadar bana her ihtiyacım olduğunda destek sağlayan hayat arkadaşım Dr. Elvin ALIőKAN, annelerim ve babalarım ve burada isimlerini anamadığım bana yardımcı olan tüm arkadaşlarıma gönülden teşekkür ederim.

# İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖZET .....	i
ABSTRACT .....	iii
TEŞEKKÜR .....	v
İÇİNDEKİLER.....	vi
ÇİZELGELER.....	viii
ŞEKİLLER .....	ix
SİMGELER VE KISALTMALAR .....	xv
1. GİRİŞ.....	1
1.1. TiO <sub>2</sub> İnce Filmler ve Özellikleri .....	2
1.2. ZnO İnce Filmler ve Özellikleri .....	4
1.3. Metal Oksit İnce Film Fotodedektörler ve Fotodedektörlerin Temel Özellikleri .....	6
1.4. MSM Tipi Fotodedektörler .....	13
1.5. Nanoplazmonik Yapılar ve Benzetim Altyapısı.....	15
1.6. Deneysel Teknikler.....	18
1.7 Karakterizasyon Teknikleri .....	26
2. TiO <sub>2</sub> İNCEFİLM FOTODEDEKTÖRLER İLE YAPILAN ÇALIŞMALAR .....	31
2.1. TiO <sub>2</sub> İncefilmlerin Hazırlanması.....	31
2.1.1. TiO <sub>2</sub> İncefilmlerin RF Magnetron Saçtırma İle Kaplanması .....	31
2.1.2. TiO <sub>2</sub> İncefilmlere Isıl ve O <sub>2</sub> RF Plazma İşlem Uygulanması.....	32
2.2. TiO <sub>2</sub> MSM Tipi Fotodedektör Üretimi .....	34
2.2.1. TiO <sub>2</sub> MSM Tipi Fotodedektörün Tasarımı .....	34
2.2.2. TiO <sub>2</sub> MSM Tipi Fotodedektörün Üretim Süreci.....	36
2.3. Sonuçlar ve Tartışma: TiO <sub>2</sub> İnce Filmler.....	40

2.3.1 TiO <sub>2</sub> İncefilmlerin Karakterizasyonu .....	40
2.3.2. TiO <sub>2</sub> MSM Tipi Fotodedektörlerin Karakterizasyonu .....	46
3. NANOPLAZMONİK TiO <sub>2</sub> FOTODEDEKTÖR GELİŞTİRİLMESİ .....	52
3.1. Nanoplazmonik TiO <sub>2</sub> Fotodedektörün Tasarımı .....	53
3.2. Nanoplazmonik TiO <sub>2</sub> MSM Fotodedektörün Üretim Süreci .....	64
3.3. Sonuçlar ve Tartışma: Nanoplazmonik TiO <sub>2</sub> MSM Fotodedektör .....	69
4. ZnO İNCEFİLM FOTODEDEKTÖRLER İLE YAPILAN ÇALIŞMALAR.....	71
4.1. ZnO İncefilmlerin RF Magnetron Saçırma İle Kaplanması .....	71
4.2. ZnO MSM Tipi Fotodedektör Üretimi.....	72
4.3. Sonuçlar ve Tartışma: ZnO İnce Filmler.....	75
4.3.1. ZnO İnce Filmlerin Karakterizasyonu .....	75
4.3.2. ZnO MSM Tipi fotodedektörlerin Karakterizasyonu.....	80
5. GeNP:ZnO İNCE FİLM FOTODEDEKTÖRLER İLE YAPILAN ÇALIŞMALAR .	87
5.1 GeNP:ZnO İnce Filmlerin Hazırlanması .....	87
5.2. GeNP:ZnO İle Fotodedektör Geliştirme Çalışmaları .....	89
5.3. GeNP:ZnO İnce Film Fotodedektörler İle Yapılan Çalışmaların Sonuçları ve Tartışma.....	93
5.3.1 GeNP:ZnO İnce Filmlerin Karakterizasyonu .....	93
5.3.2. GeNP:ZnO Fotodedektörlerin Karakterizasyonu.....	99
4. SONUÇLAR .....	105
KAYNAKLAR.....	108
ÖZGEÇMİŞ .....	114

## ÇİZELGELER

### Sayfa

<b>Tablo 1:</b> TiO <sub>2</sub> kaplanmış örneklere uygulanan işlemler ve temel parametreleri ...	33
<b>Tablo 2:</b> Birinci MSM aygıt fotomaskesi için aygıt aktif alanları ve kontak genişlik ve alanları.....	35
<b>Tablo 3:</b> Periyodun rezonans genişliğine etkisi.....	57
<b>Tablo 4:</b> GeNP katkılı ZnO örnekler için tavlama sıcaklık ve süreleri .....	88

## ŞEKİLLER

### Sayfa

<b>Şekil 1:</b> TiO <sub>2</sub> formlarının kristal yapıları. a) Rutil formu, b) Brookite Formu ve c) Anataz formu için kristal yapıları.....	2
<b>Şekil 2 :</b> ZnO kristal yapıları. a) Kübik Rocksalt, b) Kübik Zincblend ve c) Hegzagonal Wurtzide .....	4
<b>Şekil 3 :</b> Yığın ZnO için hesaplanmış bant yapısı .....	5
<b>Şekil 4 :</b> Schottky tipi bir fotodedektörün kesitinin şematik çizimi.....	7
<b>Şekil 5 :</b> Homoeklemlili bir fotodedektörün şematik çizimi .....	8
<b>Şekil 6 :</b> Heteroeklemlili bir fotodedektörün şematik çizimi .....	8
<b>Şekil 7 :</b> Fotoiletken fotodedektörlerin şematik bir çizimi .....	9
<b>Şekil 8 :</b> Bir fotodedektörün küçük sinyal eşdeğer devresi.....	12
<b>Şekil 9 :</b> N-tipi bir yarıiletken ile metal birleştirildiğinde oluşan eklem bant yapısı a) birleşmeden önce, b) birleşmeden sonra .....	13
<b>Şekil 10 :</b> Eğilme yapılmadığı durumda MSM fotodedektör için bant yapısı ...	14
<b>Şekil 11 :</b> Gerilim ve aydınlatma altında MSM fotodedektör için bant yapısı .....	14
<b>Şekil 12 :</b> Bir MSM fotodedektörün şematik çizimi .....	15
<b>Şekil 13:</b> Yüzey plazmonlarının şematik bir çizimi .....	16
<b>Şekil 14 :</b> Bir RF magnetron saçtırma sisteminin basitleştirilmiş şeması .....	19
<b>Şekil 15 :</b> Pozitif ton ve Negatif ton litografi akış şeması ve elde edilen sonuçlar	21
<b>Şekil 16 :</b> Bir RIE sisteminin basitleştirilmiş şematik çizimi. ....	22
<b>Şekil 17 :</b> Elektron demeti buharlaştırma sisteminin basitleştirilmiş şematik çizimi .....	24
<b>Şekil 18 :</b> Elektron demeti litografisi sisteminin basitleştirilmiş şematik çizimi.....	25
<b>Şekil 19:</b> Leybold Univex 350 RF magnetron saçtırma sisteminin bir fotoğrafı ....	32

<b>Şekil 20</b> : Fabrikasyonda kullanılan fotomaskeden görüntüler. a) Aygıt kontaklarının görüntüsü, b) Aygıt adacığı görüntüsü, c) Bağlantı metali görüntüsü .....	34
<b>Şekil 21</b> : Birinci MSM aygıt fotomaskesi için test ve hizalama işaretleri. a) Hizalama işaretleri, b) Çözünürlük test işaretleri .....	35
<b>Şekil 22</b> : Birinci MSM aygıt fotomaskesinin genel görüntüsü .....	36
<b>Şekil 23</b> : TiO <sub>2</sub> MSM aygıt fabrikasyonunda kontak kaplama sonrası mikroskop fotoğrafları .....	38
<b>Şekil 24</b> : Aygıt adacığı aşındırması sonrası çipin bir bölgesinin görünümü ve bir aygıtın mikroskop fotoğrafı .....	39
<b>Şekil 25</b> : Plazma ve ısıtım işlem sonrası TiO <sub>2</sub> örneklerden elde edilen yansıma, geçirgenlik ve soğurma grafikleri .....	40
<b>Şekil 26</b> : Kaplandığı hali ile tutulan örneğin yüzeyinden alınan AFM görüntüleri. a) Yüzey analizinin yapıldığı 2 boyutlu görüntü, b) 3 boyutlu görüntü.....	41
<b>Şekil 27</b> : O <sub>2</sub> RF plazma uygulanmış örnekler için AFM görüntüleri. a) 50 W, b) 100 W ve c) 200 W güçte plazma işlemi uygulanmış örnekler. ....	42
<b>Şekil 28</b> : Isıtım işlem uygulanmış örnekler için AFM görüntüleri. a) 500 °C, b) 600 °C ve c) 700 °C sıcaklıkta ısıtım işlemine tabi tutulmuş örnekler.....	43
<b>Şekil 29</b> : Plazma işlemi uygulanmış örneklerden elde edilen X-ışınları kırınımı deseni.....	44
<b>Şekil 30</b> : Isıtım işlemi uygulanmış örneklerden elde edilen X-ışınları kırınımı deseni .....	45
<b>Şekil 31</b> : Kaplandığı hali ile TiO <sub>2</sub> ince film üzerine yapılan MSM tipi fotodetektörün karanlık ve aydınlatılmış I-V grafiğı.....	46
<b>Şekil 32</b> : Kaplandığı hali ile TiO <sub>2</sub> ince film üzerine yapılan MSM tipi fotodetektörün fotocevabının voltaja göre değişimi grafiğı .....	47
<b>Şekil 33</b> : Kaplandığı hali ile TiO <sub>2</sub> ince film üzerine yapılan MSM tipi fotodetektörden elde edilen iç kuvantum veriminin eğilime gerilimine göre değişimi .....	48

<b>Şekil 34:</b> Aygıtı aydınlatan fiber kablonun çıkışındaki optik gücün dalgaboyuna göre değişimi .....	48
<b>Şekil 35:</b> Kaplandığı hali ile $TiO_2$ ince film ile üretilmiş MSM fotodiyotun eğimleme gerilimine bağlı fotocevap grafiği .....	49
<b>Şekil 36:</b> Kaplandığı hali ile $TiO_2$ ince film ile üretilmiş MSM fotodiyotun yükselme düşme zamanı ölçümleri grafiği .....	50
<b>Şekil 37:</b> Hiç işlem görmemiş örnek ile RF plazma işlemi uygulanmış örneklerin karanlık ve aydınlatılmış I-V ölçümleri karşılaştırması .....	50
<b>Şekil 38:</b> Hiç işlem görmemiş örnek ile ısıtma işlemi uygulanmış örneklerin karanlık ve aydınlatılmış I-V ölçümleri karşılaştırması .....	51
<b>Şekil 39:</b> Benzetimi yapılan yapının basit bir çizimi .....	54
<b>Şekil 40:</b> Safir altaş üzerinde 250 nm kalınlıkta $SiO_2$ ve 50 nm yükseklikli, 50 nm çaplı ve 200 nm periyodlu Al nanosilindirlerden oluşan yapının benzetim sonucu	55
<b>Şekil 41:</b> Safir altaş üzerinde 350nm kalınlıkta $SiO_2$ ve 50nm yükseklikli, 50 nm çaplı ve 200 nm periyodlu Al nanosilindirlerden oluşan yapının benzetim sonucu	55
<b>Şekil 42:</b> Nanosilindir yüksekliği $h=70$ nm, 50 nm,30 nm ve 25 nm iken rezonans davranışı.....	56
<b>Şekil 43:</b> Silindir periyodu değişirken rezonans davranışının değişimi.....	57
<b>Şekil 44:</b> Silindir çapının değişirken rezonans davranışının değişimi.....	58
<b>Şekil 45:</b> Safir altaş ve 350 nm $SiO_2$ üzerinde 70 nm çap, 180 nm periyod ve 50 nm yükseklikteki Al nanosilindirler için geçirgenlik (mavi eğri) ve yansıma (yeşil) eğrileri. ....	59
<b>Şekil 46:</b> $TiO_2$ eklendikten sonra benzetimi yapılan yapının basit bir çizimi.....	59
<b>Şekil 47:</b> $SiO_2$ katmanı kalınlığı değişirken $TiO_2$ katmanındaki soğurmanın değişimi .....	60
<b>Şekil 48:</b> Nanosilindirlerin varlığında ve yokluğunda $TiO_2$ katmanındaki soğurma grafiği .....	61
<b>Şekil 49:</b> Benzetim sonucu ile üretilmiş aygıtın kuvantum verimini karşılaştıran grafik .....	61



<b>Şekil 50:</b> Çapları değişen 3 silindirin benzetim sonucu .....	62
<b>Şekil 51:</b> SiO <sub>2</sub> filmi kırılma indisi için deneysel ve model verilerinin karşılaştırılması .....	63
<b>Şekil 52:</b> 3 boyutlu benzetim sonuçları .....	64
<b>Şekil 53:</b> Nanoplazmonik TiO <sub>2</sub> MSM fotodedektörün kontak deseni (yeşil alanlar) ve aygıt adacığı deseni (mavi noktalı alanlar) .....	65
<b>Şekil 54:</b> Safir / 25 nm TiO <sub>2</sub> / ve 350 nm SiO <sub>2</sub> kaplaması için yansıma ölçümünün benzetim ile karşılaştırılması .....	66
<b>Şekil 55:</b> Doz testi sonrası örneğin optik mikroskop fotoğrafı .....	67
<b>Şekil 56:</b> Doz testinde elde edilen tasarım ile uyumlu nanosilindirlerin elektron mikroskopu fotoğrafları .....	68
<b>Şekil 57:</b> Nanoplazmonik filtreli fotodedektörün karanlık akım ölçümü .....	69
<b>Şekil 58:</b> Nanoplazmonik filtreli ve filtersiz aygıtlar için izgesel fotocevabın ölçüm ve benzetim sonuçlarının karşılaştırılması .....	70
<b>Şekil 59:</b> ZnO ince filmlerin büyütülmesinde kullanılan RF magnetron saçtırma sistemleri .....	71
<b>Şekil 60 :</b> Safir alttaş üzerine büyütülmüş ZnO ince film örneğine kontak litografisi yapıldıktan sonra çekilmiş bir mikroskop fotoğrafı .....	73
<b>Şekil 61:</b> Islak aşındırma ile aygıt adacığı yapılmış olan Si alttaş üzerine ZnO örneğin mikroskop fotoğrafı .....	74
<b>Şekil 62:</b> Nanotam'da üretilmiş ZnO ince film örneğine aygıt fabrikasyonu sonrası alınan bir mikroskop fotoğrafı .....	75
<b>Şekil 63:</b> ZnO ince film kaplı örneklerden alınan AFM görüntüleri. a) Safir, b) Si ve c) Cam örnek üzerine büyütülmüş örnekler .....	76
<b>Şekil 64:</b> Safir ve cam alttaşlar üzerine büyütülmüş ZnO ince filmlerin optik geçirgenlik ölçümü sonuçları .....	77
<b>Şekil 65:</b> Safir alttaş üzerine büyütülen ZnO ince filme ait XRD deseni .....	77
<b>Şekil 66:</b> Nanotam'da büyütülen ZnO ince filmlerden alınmış AFM görüntüleri. a) 3 boyutlu görüntü, b) Alan incelemesi .....	78

<b>Şekil 67:</b> Nanotam'da büyütülen ZnO ince film için PL grafiği.....	79
<b>Şekil 68:</b> Nanotam'da kaplanan ZnO örneğinin kesitinin SEM görüntüsü.....	79
<b>Şekil 69:</b> Nanotam'da büyütülen ZnO örnek için XRD deseni.....	80
<b>Şekil 70:</b> Si alttaş üzerine ZnO örnek ile üretilmiş fotodedektörlerden bir I-V grafiği .....	81
<b>Şekil 71:</b> Si alttaş üzerine ZnO örnek ile üretilmiş fotodedektörlerin izgesel fotocevap grafiği .....	82
<b>Şekil 72:</b> Nanotam'da üretilen ZnO ince filmler ile üretilmiş fotodedektörün I-V grafiği .....	83
<b>Şekil 73:</b> Nanotam'da üretilen ZnO ince filmler ile üretilmiş fotodedektörün izgesel fotocevap grafiği .....	83
<b>Şekil 74:</b> Nanotam'da büyütülen ZnO ince filmler ile üretilen fotodedektörün mekanik kesici ile yapılmış hız ölçümü grafiği. a) Periyodik sinyal, b) Bir periyodun detaylı görünümü.....	84
<b>Şekil 75:</b> Fotodedektörün hız ölçümü için kurulan ölçüm düzeneğinin şeması ....	85
<b>Şekil 76:</b> Nanotam'da büyütülen ZnO ince filmler ile üretilen fotodedektörün fiber lazer ile yapılmış hız ölçümü grafiği.....	86
<b>Şekil 77:</b> GeNP:ZnO ince filmlerden fotodedektör üretiminde kullanılan kontak maskesi çizimi .....	90
<b>Şekil 78:</b> Baskılı devre örnek tutucuya tutturulmuş P-Si alttaş üzerine GeNP:ZnO ince film ile üretilmiş bir fotodedektör aygıtının fotoğrafı.....	91
<b>Şekil 79:</b> TiO <sub>2</sub> GeNP:ZnO heteroeklemler aygıt üretiminde kullanılan aygıtların fotomaske çiziminden iki görüntü. a) 1. Tip aygıt, b) 2. Tip aygıt.....	92
<b>Şekil 80:</b> TiO <sub>2</sub> GeNP:ZnO heteroeklemler aygıtların optik mikroskop fotoğrafı. a) 1. Tip aygıt, b) 2. Tip aygıt.....	93
<b>Şekil 81:</b> Quartz alttaş üzerine büyütülmüş GeNP:ZnO örneğinin a) Tavlama öncesi b) Tavlama sonrası optik mikroskop fotoğrafı .....	93
<b>Şekil 82 :</b> Kuvartz alttaş üzerine hazırlanan ince filmler için elde edilen XRD desenleri.....	94

<b>Şekil 83:</b> Tavlama süresine göre Ge kristal büyüklüğünün değişimi .....	95
<b>Şekil 84:</b> Kuvartz alttaş üzerine büyütülen örneklerin ısıtılma sonrası ölçülen optik soğurma grafiği .....	95
<b>Şekil 85:</b> Kuvartz alttaş üzerine büyütülen örnekler için PL ölçümü sonucu .....	96
<b>Şekil 86:</b> P-Si alttaşlara büyütülmüş GeNP:ZnO ince film örneklerinin 400 °C de ısıtılma gördükten sonra alınan XRD ölçümü sonucu .....	97
<b>Şekil 87:</b> P-Si alttaşlara büyütülmüş GeNP:ZnO ince film örneklerinin 500 °C de ısıtılma gördükten sonra alınan XRD ölçümü sonucu .....	98
<b>Şekil 88:</b> P-Si alttaşlara büyütülmüş GeNP:ZnO ince film örneklerinin 600 °C de ısıtılma gördükten sonra alınan XRD ölçümü sonucu .....	98
<b>Şekil 89:</b> Kuvartz alttaş üzerine büyütülmüş ve 600°C sıcaklıkta 30 s tavllanmış GeNP:ZnO ince film örnek ile üretilen fotodedektörün karanlık I-V grafiği.....	99
<b>Şekil 90:</b> 400 °C ve 500 °C ısıtılma tabii tutulmuş P-Si alttaş üzerine GeNP:ZnO ince film ile üretilmiş fotodedektör aygıtlarının I-V grafikleri.....	100
<b>Şekil 91:</b> 600 °C ısıtılma işleminden geçirilmiş P-Si alttaş üzerine GeNP:ZnO ince film ile üretilmiş fotodedektör aygıtlarının I-V grafikleri .....	101
<b>Şekil 92 :</b> Beyaz LED izgesi.....	101
<b>Şekil 93:</b> Tekrenklendirici çıkışındaki ışığın 300 nm, 500 nm ve 700 nm deki izgenin ölçüm grafiği.....	102
<b>Şekil 94:</b> 600 °C ısıtılma uygulanmış P-Si alttaş üzerine GeNP:ZnO ince film ile üretilmiş fotodedektör aygıtlarının izgesel fotocevap grafikleri .....	102
<b>Şekil 95:</b> TiO <sub>2</sub> GeNP:ZnO heteroeklemlili aygıtların I-V ölçümü grafiği .....	103

## SİMGELER VE KISALTMALAR

### Simgeler

TiO <sub>2</sub>	Titanyum Dioksit
ZnO	Çinko Oksit
LaAlO <sub>3</sub>	Lantanyum Alüminyum Oksit
SrTiO <sub>3</sub>	Stronsiyum Titanyum Oksit
Si	Silisyum
MgO	Magnezyum Oksit
GaN	Galyum Nitrür
SiC	Silisyum Karbür
μ	Mikro
°C	Derece Santigrad
O <sub>2</sub>	Oksijen
Ag	Gümüş
Au	Altın
Pt	Platin
SiO <sub>2</sub>	Silisyum Dioksit
Ge	Germanyum
InP	İndiyum Fosfat
InGaAs	İndiyum Galyum Arsenik
InSb	İndiyum Antimonid
BCl <sub>3</sub>	Bor Triklorür
Cl <sub>2</sub>	Diklor
CHF <sub>3</sub>	Triflorometan
CF <sub>4</sub>	Tetraflorometan
SF <sub>6</sub>	Kükürt Hekzaflorür
NF <sub>3</sub>	Azot Triflorür

### Kısaltmalar

IR	Kızılötesi
UV	Morötesi

MSM	Metal-Yarıiletken-Metal
MCT	Cıva Kadmiyum Tellür
MOCVD	Metal Organik Kimyasal Buhar Biriktirme
ICP-RIE	İndüktif Eşleşmiş Plazmalı Reaktif İyon Aşındırma
LED	Işık Veren Diyot
RF	Radyo Frekans
W	Vat
MHz	Megahertz
AFM	Atomik Kuvvet Mikroskopyu
RMS	Kareler Ortalamasının Karekökü
XRD	X-Işınları Kırınımı
DI	Deiyonize
R	Fotocevap
EBL	Elektron Demeti Litografisi
NP	Nano Parçacık
MIBK	Metil İzobütil Keton
PL	Fotoluminesans
SEM	Taramalı Elektron Mikroskopyu
FWHM	Yarı Yükseklik Tam Genişliği
eV	Elektron Volt
I-V	Akım - Gerilim

# 1. GİRİŞ

Metal oksitler, metalik, yarıiletken, yalıtkan, ferromanyetik, süperiletkenlik, ferroelektrik gibi özellikleri ile kimyasal reaksiyonlarda katalizör [1], güneş hücrelerinde [2], bataryalarda [3], kimyasal [4] veya optik dedektörlerde, boya ve kozmetik sanayiinde [5], plastik üretiminde, ilaç sanayiinde ve yarıiletken endüstrisinde kullanım alanı bulmaktadır.

İnce film formundaki metal oksitler ise kimyasal sensörlerde [6], yüzey işlemede [7,8] (çizilmez, su tutmaz, iletken veya yalıtkan yüzey kaplamalarında), elektronik [9] veya optoelektronik aygıtlarda kullanılmaktadır.

Yarıiletken özelliğe sahip metal oksit ince filmler ise yüksek bant aralığı, homo-eklem veya hetero-eklem yapılarının büyütülebilir olması, esnek alttaşlar üzerinde üretilebilir olmaları gibi birkaç özellikleri ile ince film transistör aygıtlarının üretimi konusunda oldukça ilgi görmektedir.

Yüksek kırılma indisleri nedeni ile yansıtıcı veya yansıma engelleyici kaplama olarak uzun zamandır kullanılan bu malzemeler, son yıllarda güneş hücrelerinde verimin artırılması yarışının hızlanması ile katkılama veya alaşımlama yöntemi ile saydam iletken kontak olarak da kullanılmaktadır. Aydınlatma uygulamalarında LED (Işık Veren Diyot) aygıtlarının yaygınlaşmaya başlaması ile yeni bir kullanım alanı bulmuş ve bu uygulamaların oluşturduğu motivasyon ile pek çok araştırmacının temel çalışma konusu olmuştur.

Genellikle 3 eV'dan yüksek bant aralığına sahip yarıiletken metal oksit ince filmler, morötesi fotodedektörler üretmek için ideal adaylardır. SiC (Silisyum Kabür), GaN (Galyum Nitrür) gibi yüksek bant aralıklı yarıiletken malzemelerin üretimi genellikle oldukça karmaşık kristal büyütme tekniklerinin uygulanmasını gerektirmesi nedeni ile üretimi pahalı ve zordur. Diğer taraftan, bu malzemelerden aygıt üretme teknikleri karmaşık ve uzun süreçlerdir. Bu neden ile ürün olarak çıkan aygıtlar yüksek performans parametrelerine sahip olmalarına rağmen, son kullanıcının elde ettiği aygıtlar yaygın, sivil uygulamalarda kullanılmayacak kadar pahalı olmaktadır. Bu gibi sebepler ile morötesi algılamanın önemli olduğu çevre kirliliğinin izlenmesi, su sterilizasyonu gibi biyolojik temizleme uygulamaları, alev (veya yangın) algılama, kişisel güneş (veya morötesi ışık) monitörleri gibi uygulama alanlarında kullanılmak üzere aygıt üretimi için basit, ucuz malzeme ve

aygıt üretimine izin veren metal oksit ince filmler araştırma konusu olarak ilgi görmektedir.

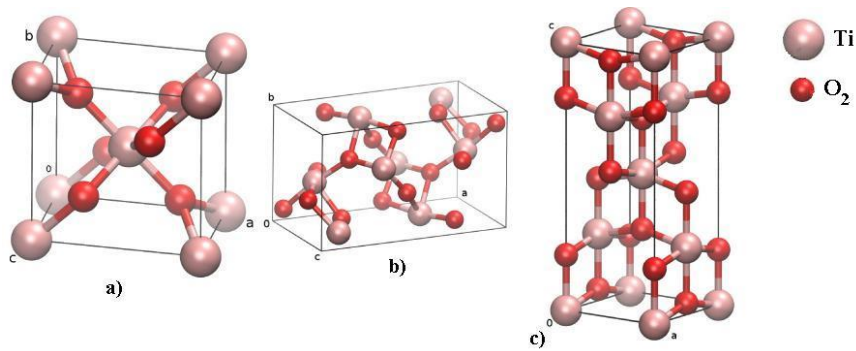
Tez çalışması, başta UV (Morötesi) fotodedektörler olmak üzere güneş pilleri, LED uygulamaları, panel ekranlar gibi geniş uygulama alanları bulan bu yeni nesil malzemelerden metal oksit yarıiletkenlerin optoelektronik uygulamaları başlığı altında özellikle fotodedektör ve nano yapıları fotodedektörlerin geliştirilmesini ve incelenmesini kapsamaktadır.

Özellikle kolay üretilebilir, yüksek performanslı aygıtların üretilmesi için ince film büyütme, karakterizasyon, aygıt tasarımı, aygıt fabrikasyonu ve üretilen aygıtların testleri üzerinde çalışmalar yapılmış ve bu çalışmalar ilerideki bölümlerde ayrıntıları ile anlatılmıştır.

### 1.1. TiO<sub>2</sub> İnce Filmler ve Özellikleri

TiO<sub>2</sub> (Titanyum Dioksit) maddesi ilk olarak 1821 yılında keşfedilmiş ancak ticari olarak üretimi ancak 1920'li yıllarda başlamıştır. Günümüze kadar geldiğinde birçok bilimsel çalışmaya konu olmuş ve oldukça yaygın kullanım alanı bulmuştur. TiO<sub>2</sub> doğada yaygın olarak "İlmenite" cevheri olarak bulunur. Kimyasal işlemler ile cevher içerisindeki demir oksit grupları ayrıştırılır ve elde edilen Titanyum tuzundan TiO<sub>2</sub> elde edilir. Endüstride yaygın üretim tekniği bu olmakla beraber sentetik üretim teknikleri de geliştirilmiştir [10,11,12].

TiO<sub>2</sub> çok farklı kristal yapılarına sahiptir, fakat yaygın olarak Anataz, Rutil ve Brookite formlarında bulunur. Anataz ve Rutil formları tetragonal kristal yapısına sahip iken Brookite formu ortorombik yapıya sahiptir [13]. Bu formların kristal yapıları Şekil 1'de verilmiştir.



**Şekil 1:** TiO<sub>2</sub> formlarının kristal yapıları. a) Rutil formu, b) Brookite Formu ve c) Anataz formu için kristal yapıları

TiO<sub>2</sub>'in Rutil ve Brookite formları sırasıyla 3.39 ve 3.30 eV enerji ile direkt bant aralıklı yarıiletken özellik gösterirken, Anataz formu 3.60 eV enerji ile indirekt bant aralıklı davranmaktadır [14].

TiO<sub>2</sub> maddesi parlaklığı ve yüksek kırma indisi nedeni ile dünyada en fazla miktarda kullanılan boya maddesidir. Beyaz boya imalatında yaygın bir şekilde kullanıldığı gibi kağıt, plastik, mürekkep, kozmetik, ilaç ve hatta gıda endüstrisinde de renklendirici madde olarak kullanılmaktadır.

Azot iyonları veya Tungsten Trioksit ile katkılındığında UV ve hatta görünür ışık ile fotokatalitik etki göstererek [15], yüzeyindeki maddeleri oksitler ve bu özelliği ile boyalara katılarak veya ince film olarak yüzeylere kaplanarak kendini temizleyen yüzeyler elde edilir.

TiO<sub>2</sub> nanoparçacıklarının veri depolama uygulamalarında kullanımı üzerine de çalışmalar yapılmaktadır. Bir Japon araştırma grubu 5 nm çaplı TiO<sub>2</sub> nanoparçacıklarının durumlarını ışık kullanarak iki durum arasında değiştirmeyi başarmış ve bu sayede 25 TB depolama yapabilecek disklerin geliştirilebileceğini göstermişlerdir [16].

Bunun gibi toz veya nanoparçacık formundaki uygulamalarının yanısıra ince film formunda TiO<sub>2</sub> malzemesi için pek çok uygulama geliştirilmiştir. Öncelikle yüksek kırma indisi, görünür ve yakın kızılötesi dalgalarda yüksek geçirgenliği sayesinde optik kaplamalar (yansıtıcı veya yansıtmayan kaplamalar) için ideal bir malzemedir [17]. Bunun yanısıra gaz algılama [18,19] ve hatta spintronik uygulamalarında [20] da araştırmalar yapılmaktadır.

TiO<sub>2</sub> ince film üretiminde pek çok teknik kullanılmaktadır. Sol-Gel [21], hidrotermal [22], kimyasal banyo biriktirme [23], lazer kimyasal buhar biriktirme [24], darbeli lazer biriktirme [25], MOCVD (Metal organik Kimyasal Buhar Biriktirme) [26], elektron demeti ile buharlaştırma [27], saçtırma [28,29,30] yöntemleri en yaygın yöntemlerdir. İncefilm büyütmede, büyütme tekniğine, büyütme koşullarına ve hedef uygulama gereksinimlerine göre safir, kuartz, cam, LaAlO<sub>3</sub> (Lantalyum Alüminyum Oksit), SrTiO<sub>3</sub> (Stronsiyum Titanyum Oksit), Si (Silisyum), MgO (Magnezyum Oksit), polietilen, polivinilklorür gibi çok çeşitli alttaşlar kullanılmaktadır.



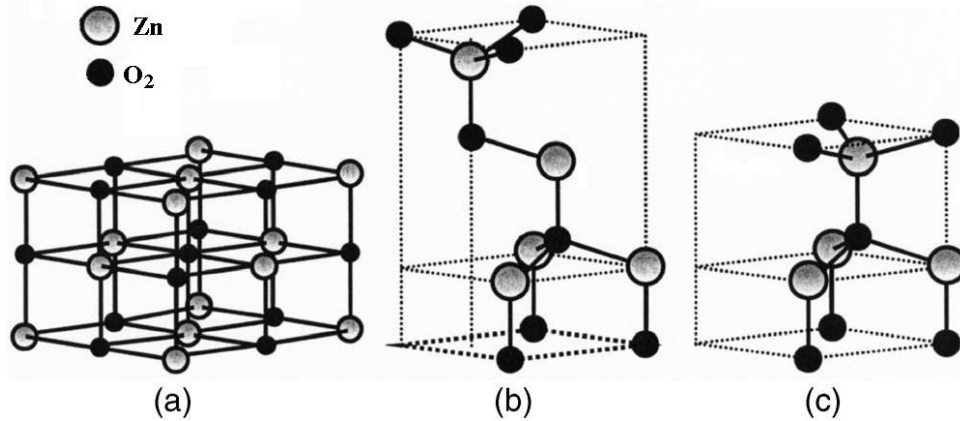
Tez çalışmamda, ince film büyütme tekniği olarak RF (Radyo Frekans) magnetron saçırma yöntemi seçilmiştir. Bunun temel sebebi ince film üretiminde yüksek malzeme kalitesi elde edilebilen ve yaygın olarak kullanılan bir teknik olmasıdır. Bu yöntem ile ince film üretiminde, büyütme koşullarının kontrolü ile, kaplama hızı ve ince film yüzey özellikleri kontrol edilebildiği için saçırma yöntemi özellikle dielektrik veya yüksek ergime noktasına sahip malzemeler için tercih edilen bir yöntemdir.

Çalışmalarında safir, silisyum ve kuvarz alttaşlar kullanılmıştır. Bu alttaşların seçilmelerinin sebebi ise kolay ulaşılabilir, yüksek kaliteli ve nispeten ucuz malzemeler olmalarıdır.

## 1.2. ZnO İnce Filmler ve Özellikleri

ZnO (Çinko Oksit) maddesinin keşif zamanı tam olarak bilinmemekle beraber MÖ 500 yıllarında Hindistan'da açık yaraların ve iltihaplı göz hastalıklarının tedavisinde kullanıldığı rivayet edilir. Doğada "Zincite" minerali olarak bulunan ZnO kimyasal yollar ile saflaştırılarak üretilebildiği gibi sentetik olarak da üretilmektedir [31,32,33].

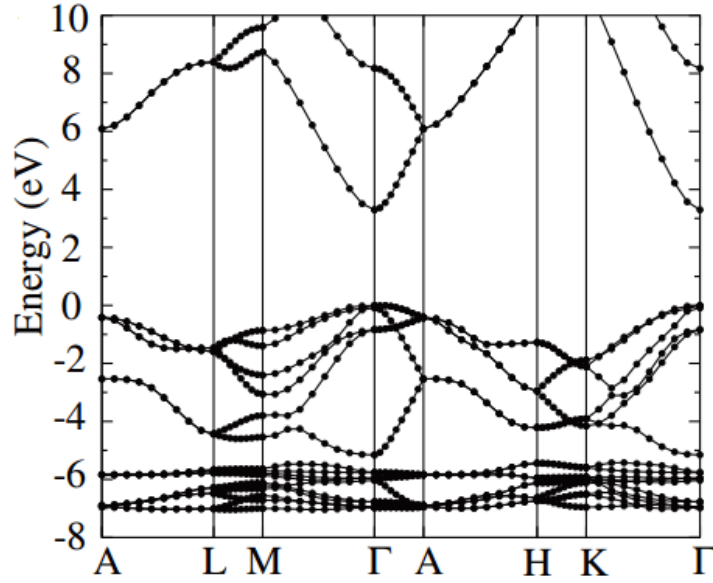
ZnO temelde hegzagonal Wurtzide, kübik Zincblend veya kübik Rocksalt kristal yapısında bulunur [34]. Temel kristal yapıları Şekil 2'de gösterilmektedir.



**Şekil 2** : ZnO kristal yapıları. a) Kübik Rocksalt, b) Kübik Zincblend ve c) Hegzagonal Wurtzide

ZnO 3.44 eV enerji ile direk bant aralıklı bir yarıiletkenidir [35]. Oksijen 6. Grup elementi olarak kabul edildiğinden, ZnO II-VI grubu yarıiletkenler arasında

sayılmaktadır. Yığın ZnO için hesaplanmış bant aralığı diyagramı Şekil 3'de gösterilmektedir.



**Şekil 3 :** Yığın ZnO için hesaplanmış bant yapısı

TiO<sub>2</sub>'e benzer şekilde ZnO malzemesi de boya pigmenti olarak kullanılmakla beraber yaygın bir şekilde eczacılıkta krem katkı malzemesi olarak kullanılmaktadır. Bunun yanısıra beyaz kağıt ve kauçuk üretiminde katkı malzemesi olarak, seramik, cam veya plastiklerden gıdalara kadar pek çok alanda katkı malzemesi olarak ve yangın geciktiricilerde, pillerde, antibakteriyel malzeme veya UV koruyucu olarak kullanım alanları bulmaktadır.

İnce film formunda ZnO ise çok daha farklı alanlarda uygulama bulmaktadır. Yüksek kırma indisine sahip olması nedeni ile optik kaplamalarda kullanımının yanısıra kolayca katkılanabilmesi nedeni ile iletken ve görünür dalgaboylarında şeffaf kontak malzemesi olarak fotodedektörlerde, güneş pillerinde kullanımı her geçen gün artmaktadır [36]. Alüminyum katkılanmış ZnO ince filmler, son günlerde yüksek verimli ve aydınlatma amaçlı üretilen beyaz LED aygıtlarının üretiminde iletken kontak malzemesi olarak kullanılmaktadır [37]. Neredeyse tüm uçucu organik bileşikler ile yüzey bağları kurabilmesinden dolayı bu gazlar için sensör malzemesi olarak kullanılan ZnO ince filmler [38], esnek alttaşlar üzerine şeffaf ince film transistör üretilmesi amacı ile de araştırmalara konu olmaktadır [39].

Tez çalışmasında temelde yüksek performanslı ZnO ince film fotodedektörler üretilmesi ve Germanyum nanoparçacıkları katkılanmış ZnO ince filmlerin optoelektronik özellikleri üzerine çalışmalar yapılmıştır.

### **1.3. Metal Oksit İnce Film Fotodedektörler ve Fotodedektörlerin Temel Özellikleri**

Elektromanyetik spektrumun 10 nm – 400 nm dalgaboyu aralığı morötesi bölgesi olarak adlandırılır. Dünya'daki en önemli UV ışık kaynağı Güneş'tir. Güneş oldukça geniş bir spektrumda ışık yayıyor olmasına rağmen Dünya atmosferi 280 nm altındaki dalgaboylarına sahip ışığı soğurarak yeryüzüne ulaşmasına engel olur. Yeryüzünde 280 nm'ye kadar Güneş'ten gelen ışığın yanısıra yapay morötesi ışık kaynakları da bulunur ki bunlar yüksek sıcaklıktaki cisimler, bazı elektrik lambaları, ve özellikle UV ışık elde etmek için üretilmiş lambalar ve katihal ışık kaynaklarıdır.

UV ışık sahip olduğu yüksek enerjisi ile sterilizasyon ve temizlik amaçlı olarak [40] yaygın şekilde kullanılırken sahte para tanımlama, kan tayini gibi uygulamalarda kriminal biliminde, solaryumlarda kozmetik amaçlı, sanat eserlerinin incelenmesi ve restorasyonunda [41], çevre kirliliğinin izlenmesinde [42] ve sanayide üretimin kalite kontrolü gibi pek çok alanda uygulama bulmaktadır. Elbette UV ışık kullanılırken algılanması, ölçülmesi ve kontrolü gibi ihtiyaçlar da gündeme gelmektedir. Bu anlamda UV fotodedektörlerin yüksek performansta ve uygun maliyetler ile üretimi önemlidir.

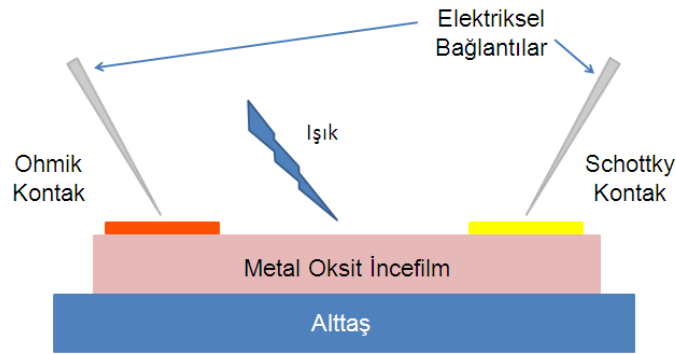
UV fotodedektörler ise yukarıda sayılan uygulamalarda kullanım bulmasının yanısıra kişisel güneşten korunma cihazları, ev için alev algılama dedektörleri gibi sivil kullanım alanlarının yanısıra füze algılama gibi askeri alanlarda da kullanılmaktadır.

Hayatımıza bu kadar yaygın olarak girmiş olan UV algılama uygulamaları için yüksek performanslı UV fotodedektörlerin üretimi ve hatta bu fotodedektörlerin yaygın kullanıma açılabilmesi için kolay ve ucuz olarak üretimi önemlidir.

Yüksek performanslı fotodedektörlerin üretiminde geniş bant aralıklı yarıiletkenler (GaN, SiC gibi) kullanılıyor olmasına karşın son dönemde metal oksitler üzerine yapılan çalışmaların artışı ile yüksek kalitede malzeme üretilmesi ile fotodedektör performansının artırılması mümkün olmuştur. GaN

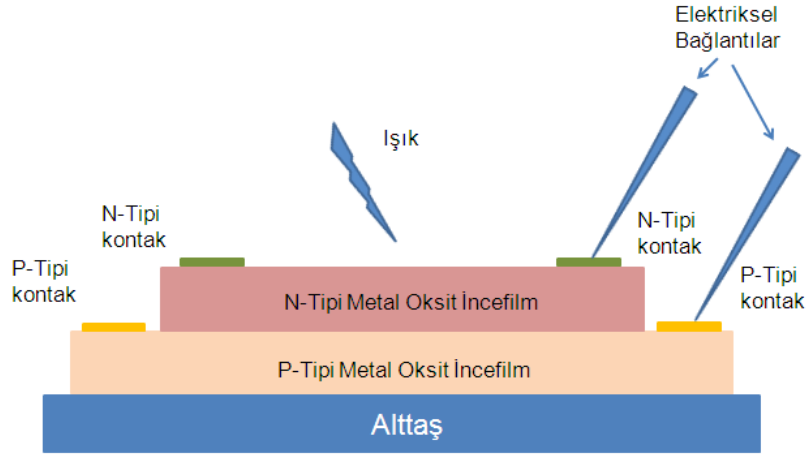
ve SiC gibi malzemelerin üretilebilmesi için karmaşık, büyük ve pahalı ekipmanların kullanılmaktadır. Üstelik kullanılan kaynak malzemelerinin de yüksek maliyetli oluşu, sistemlerin yüksek enerji tüketimi, yüksek miktarlı ve yüksek saflıklı gazların kullanımı sebepleri ile üretilen fotodedektörlerin maliyetleri oldukça yüksektir. Ancak metal oksitler basit teknikler ile üretilip, yine basit bir fabrikasyon süreci ile aygıtlara dönüştürülebildikleri için düşük maliyetli UV fotodedektörler üretilmesi mümkündür.

Literatürde metal oksitler ile ilgili pek çok çeşit fotodedektör üretildiği çalışma bulunmaktadır. Örneğin Schottky tipi fotodedektörler hem  $TiO_2$  hem de ZnO malzemeleri ile üretildiği görülmektedir [43,44]. Schottky fotodedektörler temelde yarıiletken bir Ohmik kontak ve bir de Schottky kontak yapılarak üretilir. Schottky kontak sayesinde doğrusal olmayan bir I-V (Akım-Gerilim) davranışı gösteren bu aygıtlar, genellikle kolay Ohmik kontak yapılabilmesi için katkılanmış yarıiletkenler üzerine yapılırlar. Şekil 4'de Schottky tipi bir fotodedektörün kesit çizimi gösterilmektedir. Aygıt üretimi için Ohmik kontak yapılması ve Schottky kontak yapılması olmak üzere en az 2 adımlı bir fabrikasyon gereklidir.



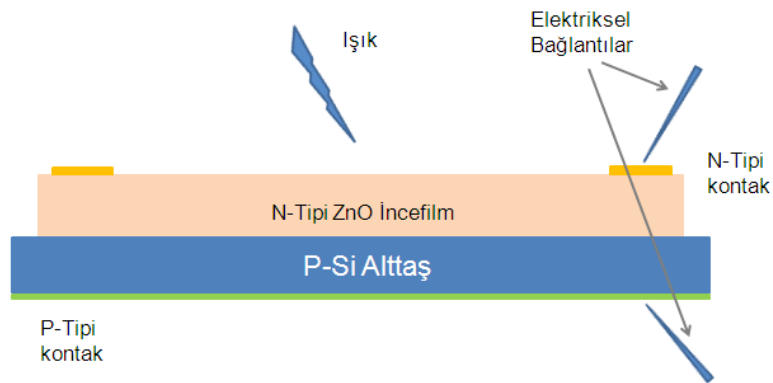
**Şekil 4 :** Schottky tipi bir fotodedektörün kesitinin şematik çizimi

Homoeklem fotodedektörler  $TiO_2$  filmlerin p tipi katkılamadaki zorlukları nedeni ile genellikle ZnO ince filmler ile üretilmektedir [45,46]. Homoeklemli fotodedektörlerin üretilebilmesi için yarıiletken malzemenin hem N-tipi hem de P-tipi katkılanabiliyor olması gerekmektedir. Her iki tip yarıiletken katmanına yapılan Ohmik kontak ile üretilen fotodedektörlerin bir aşındırma ve iki metalizasyon olmak üzere en az 3 adımlı bir fabrikasyon ile üretilebilmektedir. Şekil 5'de homoeklem bir fotodedektörün kesitinin şematik çizimi gösterilmektedir.



**Şekil 5 :** Homoepitaksiyel bir fotodetektörün şematik çizimi

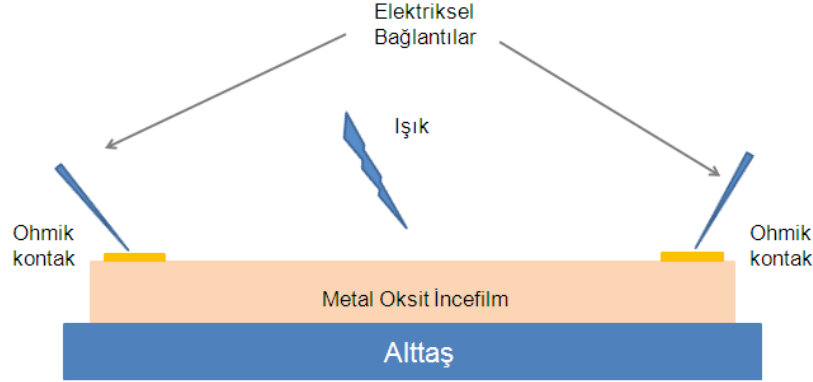
Heteroepitaksiyel fotodetektörlerin genellikle ZnO malzemesi ile üretildiği görülmektedir [47,48]. Heteroepitaksiyel aygıtlarda N veya P tipi metal oksit ince filmler P veya N tipi farklı bir yarıiletken altaş veya ince film üzerine kaplanması ile üretilir. Bu tip aygıtların üretilmesi için metal oksit ince filmin aşındırılması, metal oksit ince filme ve diğer yarıiletkene Ohmik kontak yapılması gibi minimum 3 adımlı bir fabrikasyon yapılmalıdır. P tipi Si altaşlar genellikle kolay ve ucuz ulaşılabilir ve yüksek kalitede üretilmektedir. Bunun yanı sıra bu altaşlar istenilen katkı seviyesinde temin edilebilir ve bu altaşlara Ohmik kontak üretimi kolaydır. ZnO ince filmleri N-tipi katkılanmak kolay olduğu için heteroepitaksiyel aygıt üretiminde genellikle P-tipi Si altaşlar kullanılmaktadır. Bu tip bir aygıtın şematik çizimi Şekil 6'da gösterilmektedir.



**Şekil 6 :** Heteroepitaksiyel bir fotodetektörün şematik çizimi

Fotoiletken [49,50] ve nanotel [51,52] fotodetektörler her iki malzeme için de üretilmektedir. Fotoiletken dedektörler metal oksit ince filme Ohmik kontak

yapılarak üretilir. Ohmik kontak yapımının kolaylaşması ve kontak kalitesinin artırılması için bu tür aygıtlar genellikle katkılanmış ince filmler üzerine yapılırlar. Üretimleri tek bir kontak yapılması gibi bir adımlı bir fabrikasyon ile mümkündür. Şekil 7’de fotoiletken aygıtların şematik çizimleri gösterilmektedir



**Şekil 7 :** Fotoiletken fotodedektörlerin şematik bir çizimi

Nanotel aygıtlar ise genellikle üretilen nanotelerin alttaştan koparılıp başka bir alttaş üzerine geçirilmesi, konumlarının belirlenmesi, bu konumlara uygun kontak desenlerinin tasarlanması ve üretilmesi gibi karmaşık fabrikasyon süreçleri ile mümkündür ve genellikle optik litografi yöntemleri ile üretilmezler. Nanotel dizinleri ile fotodedektör üretimi nispeten daha kolaydır. Bu aygıtların üretiminde optik litografi yöntemi de kullanılabilir.

MSM (Metal Yarıiletken Metal) tipi fotodedektörler hem  $TiO_2$  hem de  $ZnO$  ile üretilmekle beraber neredeyse en yaygın kullanılan aygıt türüdür [53,54]. MSM tipi fotodedektörlerin yapısı ve üretimi hakkında ileride daha detaylı bilgiler verilecektir.

Fotodedektörlerin karakterizasyonunda en önemli parametrelerden birisi karanlık akımdır. Karanlık akım aygıt üzerine ışık düşürülmez iken ters eğilme (bias) gerilimi altında aygıttan geçen akımdır. Bir anlamda aygıtın gürültü akımı olarak ifade edilebileceği gibi (her ne kadar aygıt gürültüsünde farklı bileşenler olsa da), algılama yapılabilecek minimum ışık miktarını da belirler. Karanlık akım kontaklar arasında oluşan elektron ve deşik çiftlerinin elektrik alanda birbirinden ayrılarak kontaklardan toplanması ile oluşur. Karanlık akım difüzyon, üretim-birleşme (generation-recombination) veya tünelleme nedeni ile oluşur.

Difüzyon akımı tükenme bölgesi dışında elektronların termal enerjileri nedeni ile iletkenlik bandına çıkması ve elektrik alan içerisinde difüze olarak toplanması ile oluşur ve

(1)

denklemleri ile verilir. Bu ifadede  $E_g$  bant aralığı,  $k$  Boltzman sabiti ve  $T$  ise ortam sıcaklığıdır. Görüldüğü üzere bu akım bant aralığı ile orantılı olduğundan metal oksit fotodetektörlerde Si, GaAs (Galyum Arsenik), InP (İndiyum Fosfat) veya IR (kızılötesi) algılamada kullanılan MCT (Cıva Kadmiyum Tellür) ve InSb (İndiyum Antimonid) gibi yarıiletkenlere göre çok daha düşüktür.

Üretim-birleşme olayı tükenme bölgesi içerisinde bulunan kristal yapı içerisindeki kusurlar (ki buna kristal kusurları, katkılama veya safsızlıklar dahildir) nedeni ile bant aralığı içerisinde oluşan tuzaklarda elektronların daha düşük enerjiler ile iletim bandına çıkması nedeni ile oluşur. Bu akım

$I_{GR}$  (2)

ifadesi ile verilir ve  $W$  tükenme bölgesi genişliğini gösterir. Bu fiziksel olarak tükenme bölgesinin hacmi ve difüzyon akımının tersine eğilime gerilimi ile de bağlantılıdır.

Tünelleme ise kuantum mekaniksel bir olay olarak yüksek elektrik alan altında elektronların tünelleyerek iletkenlik bandına çıkması ile oluşur. Tünelleme akımı

$I_{TUN}$  (3)

ifadesi ile gösterilir ve  $E$  elektrik alan,  $m$  elektronların etkin kütlesi,  $\theta$  ise boyutsuz bir sabittir ve tünelleme bariyer yüksekliğini ifade eder. (3) ifadesinden de anlaşıldığı gibi düşük bant aralıklı malzemeler ve yüksek elektrik alan tünelleme akımını arttırmaktadır.

Fotodetektörlerin karakterizasyonunda bir diğer önemli parametre ise fotocevaptır. Fotocevap bir anlamda aygıtın giriş-çıkış arasındaki ilişkisini tanımlar. Aygıt üzerine bant aralığından yüksek enerjili ışık düşürüldüğünde elektronlar fotonların enerjisini soğurur ve iletim bandına çıkar. Bu elektronlar elektrik alan altında ilerleyerek aygıt kontaklarından toplanır ve dış devrede bir

akım oluşmasına neden olur. Fotocevap (Responsivity) aygıt üzerine düşen birim optik güce karşı oluşan fotoakım olarak tanımlanır ve birimi A/W'dır. Bir fotodedektör için kuvantum verim ise aygıtta gelen fotonların hangi yüzdesinin elektron deşik çifti oluşturduğudur. Dolayısıyla kuvantum verim fotocevaba

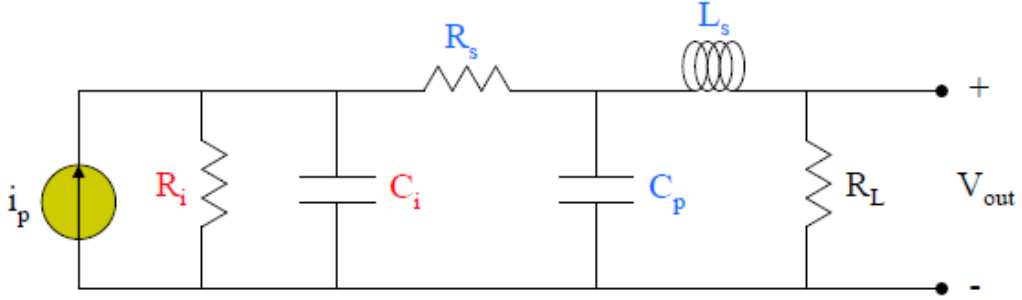
(4)

ifadesi ile bağlıdır. Bu ifadenin kazanç olmadığı durumlarda geçerli olduğunun da belirtilmesi gereklidir. Fotodedektör, fotoiletken veya çarpışma iyonizasyonu mekanizmaları ile kazanç sağlıyorsa kuvantum verim 1'den yüksek çıkabilir. Fotoiletken kazanç bir foton tarafından yaratılmış taşıyıcıların rekombine olmadan önce dış devreden birden fazla dolaşması ile meydana gelir. Çarpışma iyonizasyonu mekanizması ise oluşan fototaşıyıcıların yüksek elektrik alan altında yarıiletken içerisinde hızlanarak kazandıkları enerjiyi çarpışarak diğer elektronlara aktarması ile fazladan elektron oluşturmasıdır. Genellikle fotoiletken veya MSM tipi fotodedektörlerde fotoiletken kazanç gözlenmektedir.

Fotodedektör aygıtlarının önemli bir karakteri de izgesel fotocevaptır. Bu aygıtın hangi dalgaboyunda ne kadar fotocevap ürettiğinin ölçüsüdür. İzgesel fotocevap ölçümü aygıtın üretildiği yarıiletkenin bant aralığını gösterdiği gibi bant aralığından küçük enerjilerde verdiği fotocevap incelenerek, bu yarıiletkendeki kristal kusurlarından dolayı oluşan tuzakların miktarı hakkında da bilgi edinilebilir.

Fotodedektörlerin ışık darbelerine verdiği tepkinin süresi de fotodedektörler için önemli bir performans ölçütüdür. Her ne kadar uygulama alanları göz önüne alındığında birbirinden çok farklı hızlarda fotodedektörlerin kullanım alanı bulunduğu görülse de fotodedektörlerin hızlı fotocevap oluşturması ve ışığın kesilmesi ile hızlı bir şekilde karanlık koşuluna geri dönmesi beklenir. Aygıtın hız davranışı kristal kalitesi hakkında fikir vermektedir. Fotodedektörlerin hız cevabı veya bir başka ölçütüyle yükselme ve düşme zamanları temelde 2 mekanizma ile limitlenir. Bunlardan birincisi fotodiyotun kapasitansı ve kendi eşdeğer devresi ve dış devredeki sonlandırma drenajının oluşturduğu alçak geçiren filtredir. Bir fotodedektörün küçük sinyal eşdeğer devresi Şekil 8'de verilmektedir.





**Şekil 8 :** Bir fotodedektörün küçük sinyal eşdeğer devresi

Fotodedektör bir akım kaynağına paralel bağlı  $R_i$  direnci ve  $C_i$  sığasından ve bunlara bağlı  $R_s$  seri direncinden oluşur.  $C_p$  ve  $L_s$  parazitik sığa ve indüktanstır.  $R_L$  ise sonlandırma direncidir. Aygıt prosesinin iyi yapıldığı varsayılarak  $R_s$  direnci ihmal edilebilir. Parazitik bileşenler olan  $C_p$  ve  $L_s$  de ihmal edilirse bu fotodedektörün kesim frekansı  $C_i$  ve  $R_L$  bileşenleri kullanılarak,

$$\text{---} \quad (5)$$

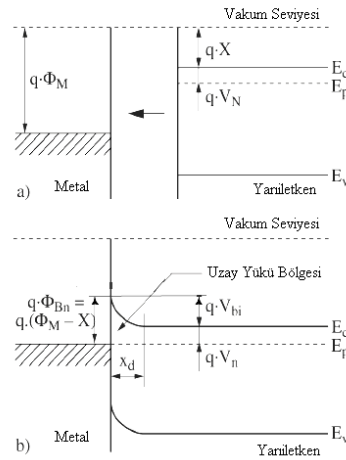
ifadesi ile hesaplanabilir. P-N veya PIN tipi aygıtlarda tükenim bölgesi boyu kısa olduğunda yüksek kapasitanslar söz konusu olabileceğinden bu aygıtlarda RC limitli hız davranışı gözlenebilir. Ancak özellikle MSM tipi aygıtlarda aygıt kapasitansı çok düşük olduğundan genellikle aygıtlar taşıyıcı hızları ile limitli olurlar. Fotodedektörlerde fototaşıyıcılar 2 farklı taşınım mekanizması ile ilerlerler. Bunlardan birincisi sürüklenmedir ki bu elektrik alan altında taşıyıcıların yarıiletken içerisinde ulaşabildikleri maksimum hız ile taşınmaları anlamına gelir. Sürüklenme genellikle hızlı gerçekleşen bir olayken, elektrik alanın düşük olduğu veya olmadığı bölgelerde oluşacak fototaşıyıcılar difüzyon mekanizması ile yer değiştirirler ki bu yavaş bir bileşen olarak fotodedektörün hız performansını kötüleştirir. İyi bir aygıt tasarımı ile difüzyon fotoakımı önemsenmeyecek seviyeye indirilebilirken RC limitli olmayan aygıtların hız davranışını sürüklenme süresi belirler.

Yukarıda anlatılan performans parametrelerine ek olarak fotodedektörlerin gürültü, dedektivite ve gürültü eşiti güç gibi performans parametreleri de kullanılmaktadır. Bu parametrelerden gürültü sinyal analizörleri ile ölçülebilir ve dedektivite ile gürültü eşiti güç karanlık ve aydınlatılmış I-V ölçümlerinden alınacak veriler ile hesaplanabilir değerlerdir. Tez çalışması kapsamında üretilen aygıtlar bu anlamda değerlendirilmediğinden bu parametreler hakkında detaylı bilgi verilmemiştir.

#### 1.4. MSM Tipi Fotodedektörler

Tez çalışması kapsamında genellikle MSM tipi fotodedektörler üzerinde çalışıldığı için bu bölümde bu tür dedektörler hakkında ayrıntılı bilgi verilmektedir.

MSM tipi fotodedektörler, temelde bir yarıiletken parçasının yüzeyinde yan yana iki Schottky kontak oluşturan metal kontaklar yapılarak elde edilir. Örnek olarak bir metal ile N-tipi bir yarıiletken bir araya getirildiğinde oluşan bant yapısı aşağıdaki Şekil 9'da gösterilmektedir.

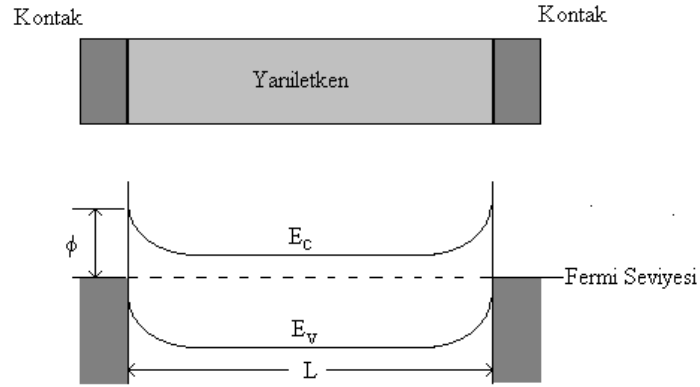


**Şekil 9** : N-tipi bir yarıiletken ile metal birleştirildiğinde oluşan eklem bant yapısı  
a) birleşmeden önce, b) birleşmeden sonra

Termal dengede metal ile yarıiletkenin Fermi seviyeleri eşleştiğinde metalin iş fonksiyonu olan  $q\Phi_m$  yarıiletkenin elektron afinitesi olan  $X$ 'den büyük olduğunda yarıiltkenden metale doğru bir yük birikmesi oluşur ve eklem  $x_d$  komşuluğunda uzay yükü bölgesi (Space Charge Region) oluşur. Bu nedenle enerji bandları bükülerek elektronlar için bir engel oluşturur ki bu engele Schottky engeli adı verilir.

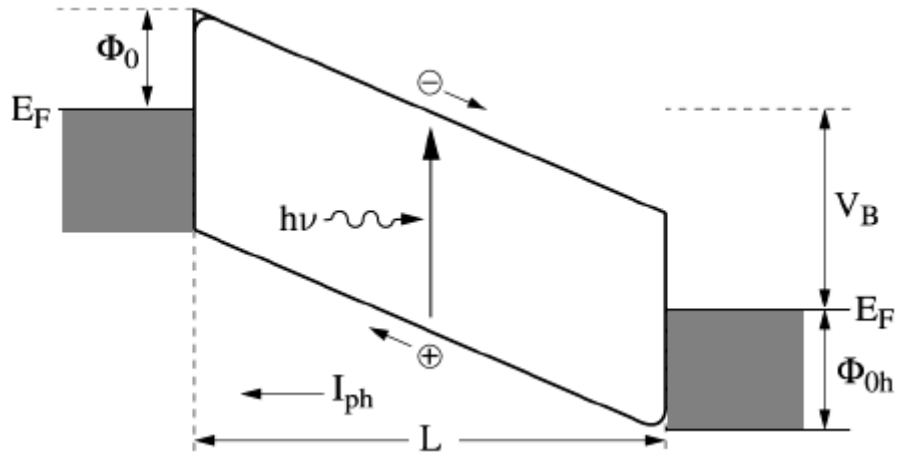
Yarıiletken ile metal kontak arasına negatif bir geirim uygulandığında bu bengel büyür ve dolayısıyla uzay yükü bölgesi genişler ki bu fotoalgılama için istenilen bir olaydır. Bu bölge içerisine fotonlar girdiğinde yarıiletken tarafından soğurulur ve deşikler metale ulaşarak fotoakımı oluşturur.

MSM fotodedektör yapısı da yukarıda anlatıldığı gibi bir yarıiletkenin iki taraftan üzerine metal kontak yapılarak üretilen aygıtlardır. Bu durumda aygıt eğimleme uygulanmaz iken aygıtın bant yapısı Şekil 10'da verildiği gibi olur.



**Şekil 10 :** Eğilme yapılmadığı durumda MSM fotodedektör için bant yapısı

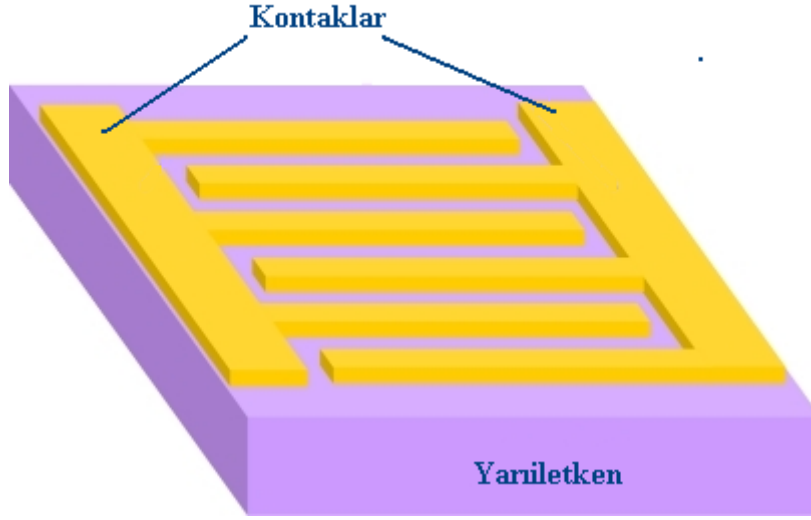
Kontaklar arasında gerilim uygulandığında kontaklardan bir tanesi ters polarlanmışken diğeri düz polarlanmış olur. Gerilim arttırıldığında ters polarlanmış kontak yakınındaki uzay yükü bölgesi genişler ve belli bir gerilime ulaşıldığında diğerkontakla temas eder. Bu durumda bant bükülmesi ortadan kalkar ve bantlar eğimli düz bir hal alır. Bu durumdaki bant diyagramı Şekil 11’de gösterilmektedir.



**Şekil 11 :** Gerilim ve aydınlatma altında MSM fotodedektör için bant yapısı

Bu durumda iken aygıtta ışık düşürüldüğünde oluşan fototaşıyıcılar elektrodalara doğru hareket eder ve toplanarak  $I_{ph}$  fotoakımını oluşturur.

MSM tipi bir aygıtın şematik çizimi Şekil 12’de verilmektedir.

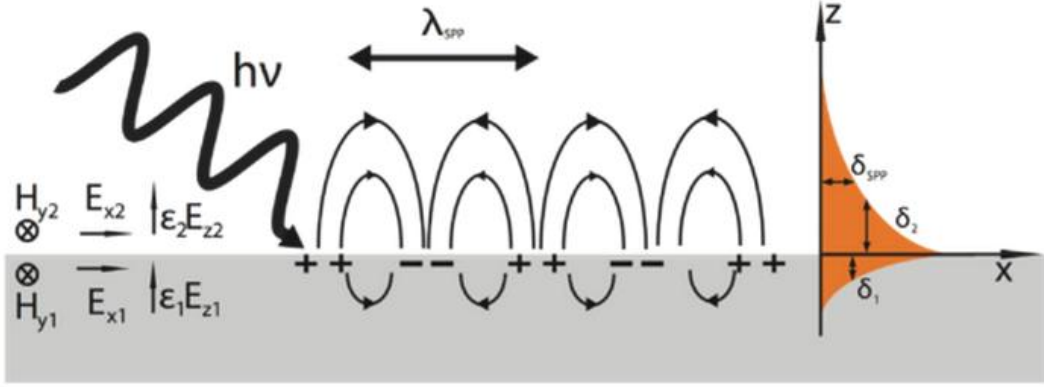


**Şekil 12** : Bir MSM fotodedektörün şematik çizimi

Aygıtın tasarımında kontak aralığı ve genişliği önemli bir rol oynamaktadır. Kontak aralıkları ve genişliği arttırıkca birim alan başına aygıt kapasitansı azalmaktadır. Genellikle MSM aygıtlarda hız limiti aygıt kapasitansı olmamakla beraber bazı durumlarda bu faktör gözönüne alınmaktadır. Aygıtın hız performansı taşıma zamanı ile limitli ise kontaklar arasındaki mesafe aygıtın hızını belirleyecektir. Bu durumda en yakın kontak aralıklı aygıt en hızlı çalışacaktır. Ayrıca kontaklar arası mesafe azaldıkça elektrik alan artmaktadır. Bu karanlık akımı arttıracığı gibi kazanç faktörüne de etkilidir. Yarıiletken film kalınlığı genellikle kontak aralıklarına göre çok küçük olduğundan bir tasarım kriteri olarak hesaba katılmaz. Kontak aralığının kontak genişliğine oranı aygıtın dış kuvantum verimini belirlediğinden bazı durumlarda bu doluluk faktörünün dikkate alınması gerekebilir.

### **1.5. Nanoplazmonik Yapılar ve Benzetim Altyapısı**

Yüzey plazmon polaritonları metal / dielektrik arayüzünde ışık veya elektron ile uyarım sonucu oluşan yüzey elektronlarının koharent osilasyonlarıdır. Yüzey plazmon polaritonları bir parçacık gibi davranırlar ve arayüz boyunca dalgaboyunun 10 katı kadar mesafelere yayılabilirler. Plazmon polaritonlarının uyarılması için arayüz özellikleri çok önemlidir. Diğer taraftan ışığın geliş açısı ve dalgaboyu da plazmonların uyarılması için çok önemlidir. Genellikle ışığın metal yüzeye eşleştirilebilmesi için bir prizma kullanılırken, grating yapıları da kullanılmaktadır. Yüzey plazmonları için şematik bir çizim Şekil 13'te gösterilmiştir.



**Şekil 13:** Yüzey plazmonlarının şematik bir çizimi

Şekilde görüldüğü üzere yüzeye gelen ışık yüzey elektronlarında bir salınım neden olur. Bu yüzeyde pozitif ve negatif bölgeler oluşmasına ve bu bölgeler arasında elektrik alanın periyodik değiştiği bir bölge oluşmasına neden olur. Turuncu alanlar olarak gösterilen grafik elektrik alan şiddetinin mesafeye göre değişimini göstermektedir. Plazmonlar yüzeyde elektrik alanın güçlenmesine neden olurlar. Plazmon rezonansının gözlenmesi için yüzeye yerleştirilen bir prizma ile ışığın geliş açısına karşı yansıyan güç ölçümü yapılır. Belirli bir dalgaboyu için belirli bir açıda plazmonlar uyarılır ve ışık yüzeye eşleşerek plazmonlar yüzey boyunca yayılarak yansıyan ışığın şiddetini düşürürler. Benzer deney geliş açısı sabit tutulurken gelen ışığın dalgaboyunun değişimine karşı yansıyan şiddet değişimi incelenerek de yapılabilir. Gelen ışığın dalgaboyu yüzey elektronlarının doğal titreşim frekansına eşleştiğinde yansıyan ışığın şiddeti düşer. Son yıllarda artık ticarileşmiş olan yüzey plazmon rezonans sensörleri kullanılarak sabit dalgaboyunda yansıyan ışık şiddetinin açığa bağlı değişimini inceleyerek çalışan kimyasal veya biyolojik sensör cihazları üretilmektedir.

Plazmonik rezonansın oluşabilmesi için gelen ışığın dielektrik yüzeyine paralel dalga vektörü bileşeni plazmon modu dalga vektörüne eşit olması gerekir. Gelen ışığın arayüze paralel dalga vektörü bileşeni

$$— \quad (6)$$

ifadesi ile gösterilebilir. Bu ifadede  $\lambda$  ışığın dalgaboyu,  $n$  metal üzerindeki dielektriğin kırma indisi ve  $\theta$  ise ışığın geliş açısıdır. Plazmon modu dalga vektörü ise

$$- \quad - \quad - \quad (7)$$

Rezonans koşulu da

$$K_i = K_p \quad (8)$$

dir.

Lokalize yüzey plazmon polaritonları ise dielektrik bir malzeme üzerinde bulunan nano boyutlardaki metalik yapılardaki elektronların osilasyonlarıdır. Lokalize yüzey plazmonları daha yüksek lokalizasyon nedeni ile daha şiddetli rezonans davranışı sergileyebilir. Dielektrik bir yüzeyde bulunan nano boyutlarda ve periyodik olarak tasarlanmış metalik yapılar da ışık ile uyarıldıklarında metal yapılar üzerinde lokalize olmuş plazmonlar oluşturur ki bu yapıların en önemli iki özelliği hem lokalize olmuş elektrik alan nedeni ile daha şiddetli rezonans göstermesi hem de gelen ışığın açısına bağlılığının olmayışıdır. Ancak yüzey plazmon rezonansına göre en önemli dezavantajları ise yüzey plazmonları ile çalışabilmek için yüksek kalitede kaplanmış ince bir metal ince film yeterli iken lokalize yüzey plazmonları için rezonans dalgaboyununun tasarlanması ve bu tasarlanmış yapıların nanofabrikasyon teknikleri ile üretilmesi gerekliliğidir.

Genellikle metalik nanoparçacıklar veya metal ince filmlerde açılmış nano çaplardaki delikler ile tasarlanan plazmonik yapılar elektrik alanda yarattıkları lokalizasyon ve artırma nedeni ile fotodedektörlerin fotocevabının artırılması amaçlı [55,56], ışığı geniş bir alandan toplayarak küçük alanlı bir fotodedektör üzerine odaklamak [57,58] veya filtrelemek amaçlı [59,60] kullanıldıkları görülmektedir.

Özellikle lokalize yüzey plazmonik yapıların tasarlanan yapılar olduklarından yukarıda bahsedilmiştir. Bu tür tasarımlar benzer yapıların tasarımları için geliştirilmiş bilgisayar yazılımları ile yapılmaktadır. CST Microwave Studio, OptiFDTD ve Lumerical FDTD yazılımları popüler olarak kullanılan programlardır. Tez çalışmasında Lumerical FDTD programı kullanılmıştır.

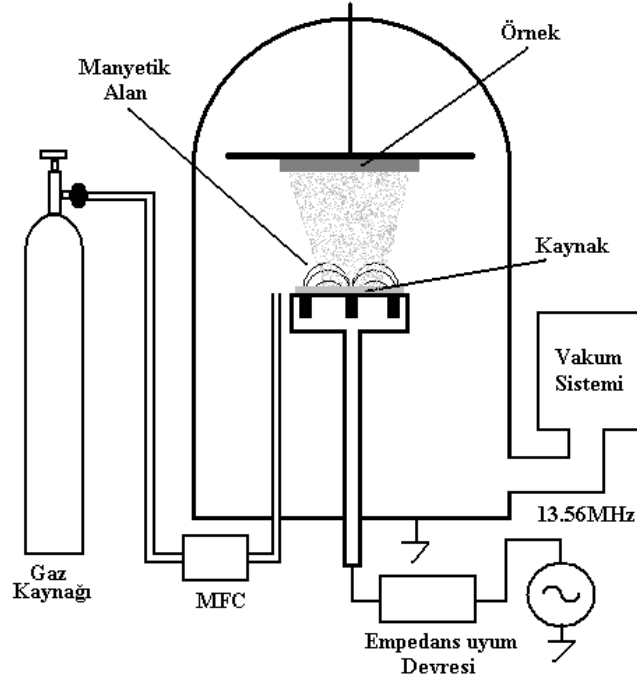
Lumerical FDTD yazılımı zaman uzayı sonlu farklar metodu kullanarak Maxwell denklemlerini 3 boyutlu olarak çözen bir yazılımdır. Benzetimi yapılacak olan yapı iki veya üç boyutlu olarak çizilir, sınır koşulları belirlenir, benzetim alanı belirlenir ve kaynak ve probalar yerleştirilir. Daha sonra kaynak tarafından

gönderilecek olan dalga şekli belirlendikten sonra yazılım belirlenen problemlere göre yansımaya, geçirgenlik, soğurma, elektrik alan gibi pek çok veriyi hesaplar. Benzetimin doğruluğu her yazılımda olduğu gibi benzetimi yapılan yapıda kullanılan malzemelerin modellerinin doğruluğuna, mesh boyutlarına, sınır koşullarının uygun tanımlanmasına ve problemlerin yerleştirilme şekillerine bağlıdır. Tez çalışması kapsamında yapılan benzetimler ile ilgili detaylar ileriki bölümlerde verilmiştir.

## 1.6. Deneysel Teknikler

Tez çalışması kapsamında yapılan fabrikasyonlarda RF magnetron saçtırma, fotolitografi, ICP-RIE (İndüktif Eşleşmiş Plazmalı Reaktif İyon Aşındırma) aşındırma, elektron demeti buharlaştırma ve elektron demeti litografisi teknikleri kullanılmıştır. Aşağıda bu teknikler anlatılmaktadır:

**RF Magnetron Saçtırma:** Saçtırma prosesi vakum ortamına sızdırılmış Ar (bazı durumlarda O<sub>2</sub> (Oksijen) veya N<sub>2</sub> gibi reaktif gazlar da kullanılabilir) gazının RF (veya bazı durumlarda yüksek gerilim DC) uygulanarak iyonlaştırılması ve oluşan iyonların saçtırma kaynağında bulunan sabit manyetik alan içerisinde yönlendirilerek buharlaştırılacak hedef malzemesine çarptırılarak hedef malzemesinden fiziksel olarak atom veya molekülleri kopartarak, kaynak karşısına yerleştirilen örneğin kaplanması işlemidir. Şekil 14'de tipik bir RF magnetron saçtırma sisteminin şematik çizimi gösterilmektedir.



**Şekil 14 :** Bir RF magnetron saçırma sisteminin basitleştirilmiş şeması

İşlem tipik olarak, vakum kazanındaki atmosferin temizlenmesi için önce  $1 \times 10^{-6}$  mbar vakum seviyesine inildikten sonra gaz sızdırılarak  $1 \times 10^{-3}$  ile  $1 \times 10^{-2}$  mbar vakum seviyesine çıkılarak gerçekleştirilir. Ortamdaki Ar iyonlarının enerjisi hedef malzemenin yüzeye bağlanma enerjisinin üzerine çıktığında hedeften atom koparılır. Çarpışmanın elastik veya inelastik olmasına bağlı olarak bağlanma enerjisinden artan enerjinin tamamı veya bir kısmı koparılan atom veya moleküle aktarılır. Hedeften kopan atom veya moleküller 5 eV'a kadar enerjilere sahip olabilirler. Ancak bu derece düşük vakum seviyesinde hedeften kopan atomlar veya moleküller örneklere ulaşmaya kadar pek çok çarpışma geçirerek enerji kaybederler. Enerjinin kaybolması kaplanan örneklerdeki yüzey hasarını azaltmak veya kaplanan örnekten yeniden saçılmayı azaltmak anlamında avantaj olarak görülebilirken, kaplanan filmin yoğunluğunun düşmesi örnek yüzeyine yapışmada azalma ve örnek yüzeyinde oluşacak malzeme akısının düşmesi nedeni ile kaplama hızında düşme gibi dezavantajlar da getirebilmektedir.

Saçırma işleminin önemli bir avantajı yüksek ergime noktasına sahip element veya bileşiklerin kolayca buharlaştırılabilmesidir. Bir diğer önemli avantajı ise alaşımların da hedef malzeme kompozisyonuna en yakın kaplayabilen bir yöntemdir. Her ne kadar bir miktar saçırma gazı kaplanan film içerisinde hapis

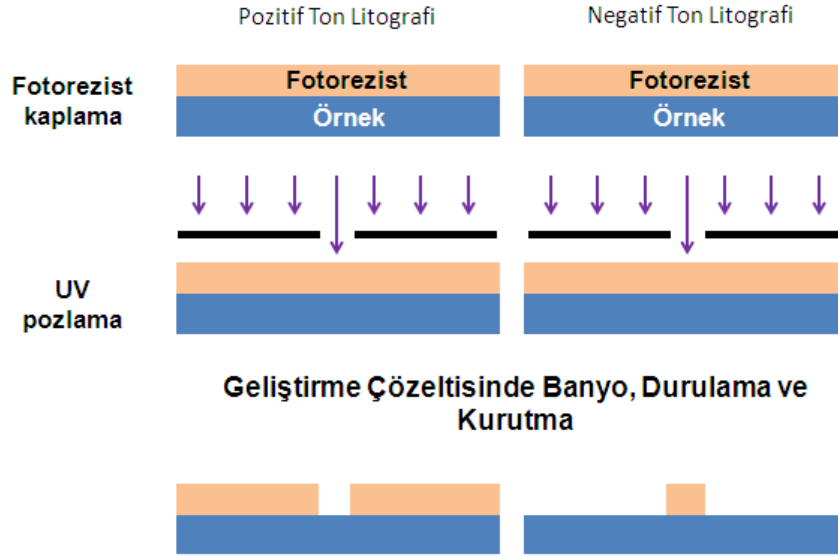


kalsada diğer fiziksel kaplama metodlarına göre en iyi sonucu saçtırma yöntemi vermektedir. Proses ve örnek koşulları optimize edilerek epitaksiyel büyütme dahi yapılabilir. Yöntemin bir önemli özelliği de duvar kaplama (wall coverage) yapabilmesidir. Eğer kaplama işleminden sonra kaldırma (lift-off) yaplacaksa bu bir dezavantaj iken, pasivasyon, elektriksel yalıtım, elektrolizle kaplamada çekirdeklenme katmanı kaplanması gibi prosesler için bir avantajdır.

**Fotolitografi:** Litografi bir kalıp deseninin bir yüzeye geçirilmesi işlemine verilen addır. Fotolitografi ise bir kalıp deseninin (ki burada kalıp tasarlanan şekillerin üzerine Cr metali ile işlendiği bir cam veya Quartz levhadır ve diğer adı fotomaskedir) ışık yardımı ile örnek yüzeyine işlenmesi işlemidir.

Örnek yüzeyine desenin geçirilmesi için ışığa duyarlı bir polimerik madde kullanılır. Bu maddeye fotorezist adı verilir. Günümüzde kullanılan fotorezistler UV ışığa (i-line, h-line, g-line veya geniş bandlı UV ışık) maruz bırıldıklarında polimerik zincirler kopar ve genellikle bazik bir geliştirme çözeltilisinde (seyreltik NaOH veya KOH çözeltileri gibi) çözülebilir hale gelir. Fotorezist kaplama genellikle örneğin üzerine fotorezist döküldükten sonra 500-10000 dev/dk aralıktta bir hız ile döndürülerek kaplanabileceği gibi, spreyleme, daldırma gibi teknikler ile de yapılabilir. Kaplama işlemini takiben fotorezistin örnek yüzeyine iyi yapışması ve rezist içerisindeki çözücülerin buharlaştırılması için bir ilk pişirme işlemi yapılır.

Fotolitografi işlemi temelde 3 şekilde yapılabilir: Pozitif ton litografi (diğer adı direkt litografi), Negatif ton litografi (diğer adı ters litografi) veya terslenebilir litografi. Pozitif ton litografide örnek yüzeyine kaplanan pozitif rezist fotomaske ile pozlandırıldığında ışığa maruz kalan rezist geliştirme çözeltilisinde çözülebilir hale gelirken, ışık görmeyen yerler çözünmez. Negatif ton litografide ise bunun tersi olur ve fotomaske ile pozlanan alanlar geliştirme çözeltilisinde çözülmez iken, pozlanan alanlar çözülmektedir. Terslenmiş litografide kullanılan fotorezistler hem pozitif ton rezist gibi kullanılabilir hem de ilk pozlandırmadan sonra tersleme pişirmesi yapılarak polimerin çapraz bağlanması sağlandıktan sonra maskesiz pozlama yapılarak orjinal maskenin negatifi örnek yüzeyine geçirilebilir. Şekil15'de pozitif ve negatif ton litografi işleminin akışı ve elde edilen sonuç gösterilmektedir.



**Şekil 15** : Pozitif ton ve Negatif ton litografi akış şeması ve elde edilen sonuçlar

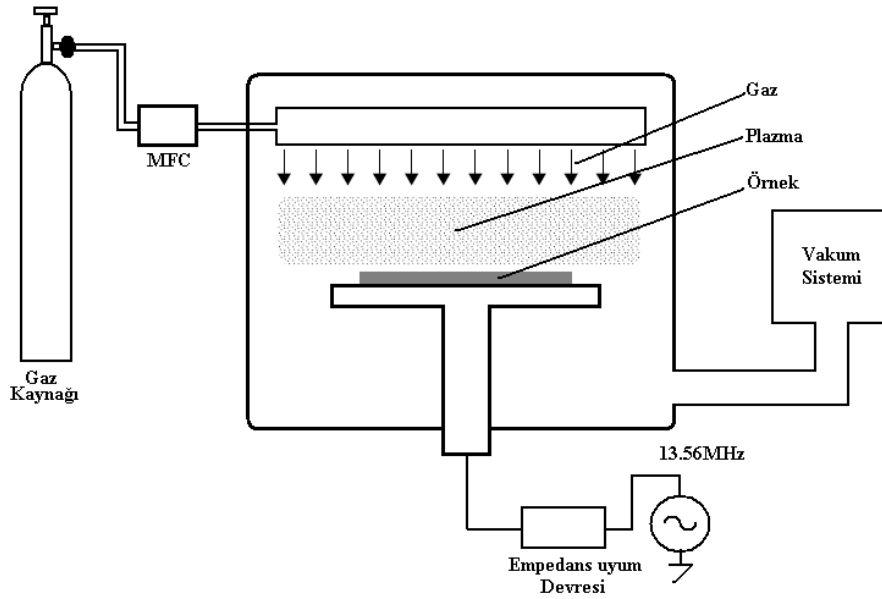
Fotolitografide çözünürlük en temel anlamda saçılma nedeni ile kullanılan ışığın dalgaboyu ile sınırlıdır. Tipik olarak i-line (365 nm) ışık ile yapılan bir litografi prosesinde pratik olarak ulaşılabilen en küçük şekil boyutu 500 nm ile sınırlıdır. Ancak litografi sistemlerinde daha düşük dalgaboylarında çalışan lazer kaynaklar (örneğin 193nm de çalışan ArF lazer) kullanılarak 50 nm boyutlarında figürlerin işlenmesi mümkün olmaktadır.

Litografi sistemleri projeksiyon, yaklaşım (proximity) ve tez çalışmasında kullanılan kontak litografi sistemleri olarak sınıflandırılabilir. Projeksiyon sistemleri genellikle üretim için kullanılan büyük sistemlerdir ve örnek yüzeyine fotomaskenin sistem tasarımında belirlenen oranda küçültülmüş imajı pozlanır. Yaklaşım türü litografi temelde kontak litografi sistemlerinde de yapılabilmesi ile beraber örneğin fotomaskeye temas etmediği ancak örnek yüzeyinin fotomaskeye tipik olarak 30  $\mu\text{m}$  – 100  $\mu\text{m}$  yakınına getirilmesi ile yapılan pozlandırma işlemidir. Bu yöntemde fotomaske ile aynı ebatlar örnek yüzeyine geçirilmektedir. Bu yöntem ile yapılan litografi işleminde çözünürlük düşük olmakla beraber fotomaske ile örnek yüzeyinin teması söz konusu olmadığından fotomaske veya örnek yüzeyinin kirlenmesi söz konusu değildir. Kontak litografi ise yumuşak kontak, sert kontak ve vakum kontak olarak 3 şekilde yapılır ki çözünürlük bu sıra ile artmaktadır. Litografi işleminde elde edilebilecek minimum şekil büyüklüğü

$$\frac{\lambda}{2} \quad (6)$$

ifadesi ile hesaplanabilir. Bu ifadede  $b$  minimum şekil büyüklüğü,  $\lambda$  kullanılan ışığın dalgaboyu,  $n$  fotorezistin kırılma indisi,  $g$  maske ile fotorezist arasındaki mesafe ve  $d$  ise fotorezist kalınlığıdır. Görüleceği üzere küçük boyutlarda desenler elde edebilmek için düşük dalgaboyu, ince fotorezist ve fotomaske ile fotorezist arasında minimum mesafe kullanmak gereklidir. Deneysel çalışmaların anlatıldığı bölümlerde fotolitografi proseslerinin parametreleri detaylı bir şekilde verilmektedir.

**ICP-RIE aşındırma:** Reaktif iyon aşındırma işlemi bir vakum kazanına sızdırılan ve aşındırılacak örnek ile reaksiyon verebilen bir gaz ile oluşturulan plazmadaki iyonların, örneğin üzerinde bulunduğu tutucuda oluşan DC potansiyel nedeni ile oluşan elektrik alanda hızlanarak örnek yüzeyinde reaksiyonlar oluşturması ile örnek yüzeyinin aşındırılması işlemidir. İşlem her ne kadar kimyasal bir işlem olsa da hızlanan iyonların yüzeye çarpmasından dolayı saçtırma yaparak örneği aşındırması da sözkonusu olduğundan fiziksel bir aşındırma bileşeni de vardır. Tipik bir RIE sisteminin şematik çizimi Şekil 16'da gösterilmektedir.



**Şekil 16 :** Bir RIE sisteminin basitleştirilmiş şematik çizimi.

İşlem odacığına örnek yerleştirilip vakumlandıktan sonra işlem yapılacak gaz veya gaz karışımı odacığa sızdırılır. RF uygulandığında gazlarda iyonlaşma, uyarılma veya parçalanma ile reaktif radikaller oluşur. Bu radikaller oluşan elektrik alan altında hızlanarak örnek yüzeyine çarparlar ve yüzey reaksiyonları ile örnek yüzeyini aşındırırlar.

ICP-RIE sisteminde farklı olarak ikinci bir RF kaynağı ve ikinci bir anten bulunur. Bu anten plazma bölgesinde tasarlanmış bir alan oluşturarak iyonların örnek yüzeyindeki yoğunluğunu artırır. Bu şekilde daha yüksek aşındırma hızları elde edilebilir. Proses koşullarına, örneğe ve kullanılan gazlara bağlı olarak aşındırma hızları birkaç nm/dk ile birkaç µm/dk arasında değişebilir.

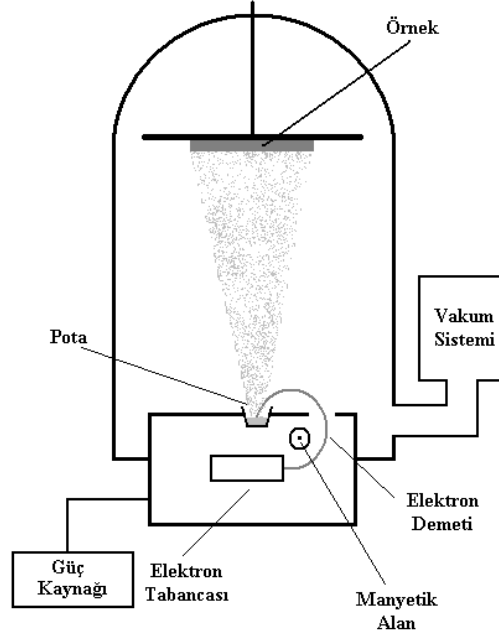
Aşındırma proseslerinde temel olarak 2 tür kimya kullanılır. Genellikle aşındırılan SiO<sub>2</sub> (Silisyum Dioksit), Si<sub>x</sub>N<sub>y</sub> (Silisyum Nitrür) ve bazı metal oksitler Flor kimyası ile (CHF<sub>3</sub>, CF<sub>4</sub>, SF<sub>6</sub> veya NF<sub>3</sub> gibi gazlar kullanılarak) aşındırılırken genellikle III-IV grubu yarıiletkenler Klor kimyası ile (BCl<sub>3</sub>, Cl<sub>2</sub> gibi gazlar) ile aşındırılır. Gaz karışımlarına duvarların pasivasyonu, kimyasal reaksiyon ürünlerinin temizlenmesi gibi amaçlar ile Ar, O<sub>2</sub>, N<sub>2</sub> gibi gazlar da katılmaktadır.

Örnekler fotomaske veya metal veya dielektrik maskeler ile desenlendikten sonra aşındırma işlemine sokulurlar. Aşındırma prosesi geliştirilirken örneğin aşınma hızının yanısıra maske malzemesi ile örnek aşınma hızlarının oranı olan seçicilik, örnek yüzeyindeki hasarlar, aşındırma duvar açıları ve aşındırılan yüzeyde oluşabilecek kusurlar (skirting gibi), örneğin ulaşacağı sıcaklık dikkate alınarak proses optimize edilmelidir.

ICP-RIE prosesi parametreleri deneysel çalışmaların anlatıldığı bölümlerde detayları ile vermiştir.

**Elektron demeti buharlaştırma:** Elektron demeti buharlaştırma yüksek vakum ortamına bir pota içerisine yerleştirilen kaynak malzemenin üzerine düşürülen bir elektron demeti ile ısıtılarak buharlaştırılması ve bu buharın üzerine yerleştirilmiş örneğin yüzeyinde birikmesi ile kaplanması işlemidir. Sistemin basitleştirilmiş bir çizimi Şekil 17’de gösterilmektedir.

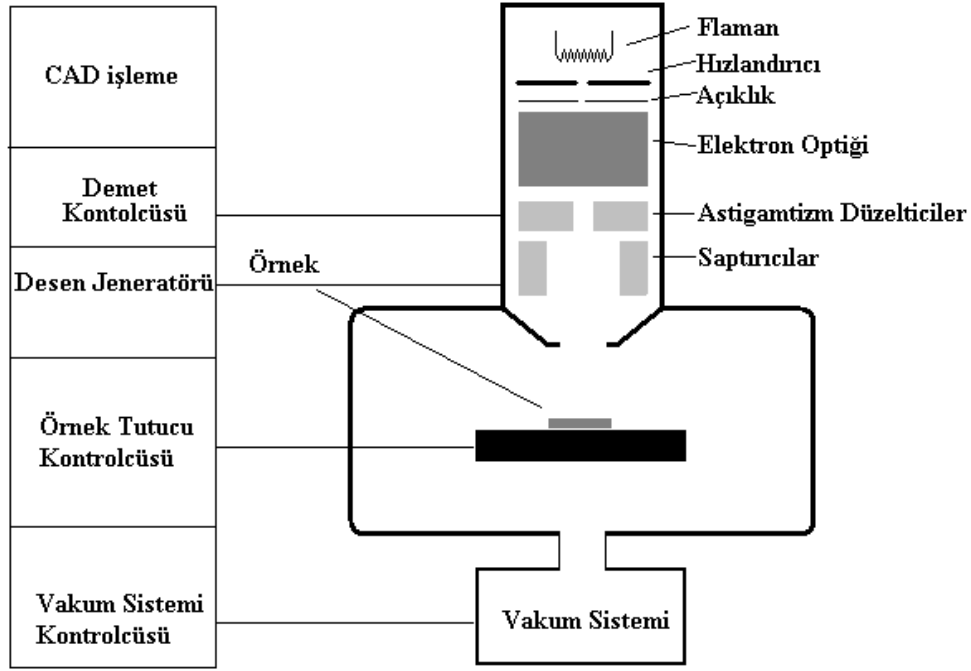
Elektron demeti buharlaştırması termal buharlaştırma yönteminde yapılamayan yüksek ergime sıcaklıklarında eriyebilen malzemelerin ve hatta dielektrik malzemelerin buharlaştırılmasına imkan verir. Ayrıca kaplanan film saflığı açısından termal buharlaştırma ve saçtırma yöntemlerine göre daha üstündür. Yüksek vakum koşullarında yapıldığından duvar kaplama (wall coverage) mümkün olmadığından özellikle kaldırma (lift-off) işlemi için uygun bir yöntemdir. Kaplama hızları 1Å/s den birkaç µm/s ye kadar değiştirilebilir.



**Şekil 17** : Elektron demeti buharlaştırma sisteminin basitleştirilmiş şematik çizimi

Kaplanmak istenilen malzeme Tungsten, Molibden, Alumina veya Boron Karbür mazlemelerden yapılmış olan bir pota içerisine yerleştirilir. Örnek potanın üzerindeki bir tutucuya yerleştirildikten sonra sistem vakumlanır. Yüksek vakum seviyesinde elektron tabancasının filaman akımı ve hızlandırma gerilimi açılır ve elektron demeti akımı birkaç mA den birkacyüz mA'e kadar ayarlanarak kaynak malzeme buharlaştırılır. Buharlaştırmanın sonunda demet akımı kapatılıp kaynak soğutulduktan sonra vakum kırılarak örnek alınır.

**Elektron demeti litografisi:** Yukarıda anlatıldığı gibi tipik optik litografi sistemlerinde elde edilen şekil büyüklükleri 500nm ile sınırlı iken nano yapıların örnek yüzeyine desenlenmesi için yaygın kullanılan yöntemlerden birisi de elektron demeti litografisidir. Elektron demeti litografisi örnek yüzeyine kaplanan bir rezist malzemesinin (genelde PMMA, ZEP, HSQ gibi malzemeler) elektron demetine maruz kalarak zincir yapısının değişimi ile geliştirici bir çözeltide (genellikle MIBK, TMAH gibi malzemeler) çözülmesi ile tasarlanan desenin örnek yüzeyine işlenmesidir. Elektron demetinin çapı tipik olarak 1-5 nm olmakla beraber elektronların rezist içerisine girdikten sonra saçılmaları nedeni ile tipik olarak 10nm gibi şekil büyüklükleri bu yöntemle elde edilebilmektedir. Tipik bir elektron demeti litografisi sisteminin çizimi Şekil 18'de verilmiştir.



**Şekil 18 :** Elektron demeti litografisi sisteminin basitleştirilmiş şematik çizimi

Elektron demeti litografisinin en büyük avantajlarından birisi maskesiz çalışma yapıldığı için esnek bir platform olmasıdır. Tasarlanan desen elektronik olarak sisteme aktarılır ve sistem yüksek bir çözünürlükle deseni örneğin üzerine geçirir. Ancak bu yöntemin en önemli dezavantajı ise işlemin yavaş oluşudur. İşlenen desenin yoğunluğuna da bağlı olarak küçük bir örnek üzerine fotolitografi ile birkaç dakikada yapılabilen bir işlem elektron demeti litografisi ile saatler sürebilmektedir. Bu nedenle fabrikasyon bu ikisinin karışımı şeklinde yapılır. Büyük desenler optik litografi ile yapılırken nano boyutlu desenler optik litografi ile işlenen desenlere de hizalanarak EBL ile yapılır. Hizalama hassasiyetler tipik olarak 20 – 50nm mertebesindedir.

Her ne kadar kullanılan rezist malzemelerin geliştirme çözültisinde çözülebilmesi için gerekli doz (doz = demet akımı x zaman) belli olsa da birbirine yakın şekiller içeren desenlerde elektronların rezist içinde saçılması nedeni ile bir şekil desenlenirken yanındaki bir başka şekilde belli bir doza maruz kalmaktadır. Buna yaklaşım etkisi (Proximity Effect) ismi verilir ve doğru ebarlarda şekillerin üretilmesi için dikkatli bir doz testi ve yaklaşım etkisi düzeltmesi çalışması yapılmalıdır. Bu nedenle belli bir desen tasarlandıktan sonra bu desen bir örnek üzerine farklı dozlar ile işlenir, örnek geliştirme çözültisinde banyo edildikten sonra inceleme yapılır ve doğru boyutlardaki şekillerin elde edildiği doz kullanılır.

Kullanılacak doz rezistin tipine kuvvetli bağı iken hızlandırma gerilimine de benzer şekilde kuvvetli bağlıdır. Yazma alanı, demet akımı gibi parametreler de dozu zayıf şekilde etkiler. Elektron demeti litografisinde iyi bir performans elde edebilmek için önemli bir parametre de örneğin cinsidir. Yalıtkan örnekler elektronların örnek yüzeyinde birikerek yüklenme yaratması ve dolayısıyla istenilen desenin şeklinde bozulmalara sebep olmaktadır. Bu gibi durumlarda en yaygın kullanılan yöntem örneklerin yüzeyine birkaç nm kalınlıkta metal (tercihen Altın) saçtırma yöntemi ile kaplamaktır. Bir diğer pratik yöntem ise iletken polimerler kullanmaktır. Bir çözücü içerisinde çözülmüş olan iletken polimerler örnek yüzeyine genellikle döndürerek kaplama (spin coating) yöntemi ile kaplanır ve litografi işleminin ardından geliştirme banyosundan önce temizlenir.

Bu proses hakkındaki detaylar deneysel çalışmaların anlatıldığı bölümde detaylı olarak anlatılmıştır.

### **1.7 Karakterizasyon Teknikleri**

**X-Işını Kırınımı (XRD):** Bu karakterizasyon yöntemi kristal formundaki maddelerin yapısal analizi için oldukça önemli bir yöntemdir. Bir kristal üzerine x-ışınları demeti göndererek belirli bir düzende dizilmiş olan atomlardan saçılan ışınların yapıcı girişimleri nedeni ile belirli açılarda oluşturdukları ışık şiddeti deseninin açıları ve genlikleri ölçülerek kristal yapısını belirlemek mümkündür. Bu şekilde maddedeki atomların birbirlerine göre yerlerini, kristalin yapısını ve kristaldeki kusurlar veya bir başka deyişle düzensizlikler gibi pek çok bilgi elde edilebilir.

Bir XRD sistemi temel olarak ışık kaynağı (genellikle bir elektron tabancası ve bakır bir plakadan oluşan bir x ışınları kaynağı), örneğin üzerine yerleştirildiği ve dönü açısı ayarlanabilen bir tabla ve bir x-ışınları dedektöründen ibarettir. Örnek döner tablaya yerleştirilir, üzerine x-ışınları gönderilir ve örnek döndürülürken açığa karşı dedektörden okunan sinyal genliği kayıt edilir. Elde edilen desendeki tepe pozisyonları veritabanında kayıtlı veriler ile karşılaştırılarak ölçülen örneğin kompozisyonu hakkında bilgi alınabilir. Tepenin genişlikleri veya tepe pozisyonlarındaki kaymalar incelenerek kristal kusurları hakkında bilgiler türetilebilir.

Tez çalışması kapsamında üretilen ince filmler bir toz XRD sistemi ile incelenmiş, elde edilen kırınım deseni veri tabanlarındaki veriler ile karşılaştırılarak

büyütülen filmlerdeki kristallerin fazları veya büyüme yönelimleri belirlenmiş ve elde edilen pik genişlikleri incelenerek kristal büyüklükleri hesaplanmıştır.

**Atomik Kuvvet Mikroskopu (AFM):** Bu yöntem, bir örneğin yüzey topografisinin atomik seviyede görüntülenebilmesini sağlayan, bir nanometrenin altında yükseklik farklarının ölçülebildiği bir taramalı mikroskopi yöntemidir. Özellikle nano yapıların görüntülenmesi için kullanılan en yaygın yöntem olmasının yanısıra yüzeylerin özelliklerinin incelenmesi için de güçlü bir ölçüm tekniğidir.

Yöntem esnek bir manivelanın (genellikle Silisyum) ucundaki sivri bir iğnenin (bu iğne Silisyum Nitrür, Silisyum Oksit veya Silisyum gibi malzemelerden üretilir ki bu iğnenin uç çapı birkaç nm mertebesindedir) ölçülecek yüzeyi taraması ve tarama boyunca her koordinat için maniveladaki bükülme miktarının kayıt edilmesi prensibi ile yüzey topografisinin türetilmesine dayanır. İğne örnek yüzeyine yaklaştığında yüzey ile iğne arasında pek çok etkileşimler oluşur. İğne yüzeye dokundurulmadan (kontaksız mod) iğne ve yüzey arasındaki kuvvetler ölçülerek yüzeyin fiziksel veya kimyasal yapısı hakkında bilgi edinilebilir. Ayrıca iğne yüzeye belirli bir kuvvet ile bastırılarak (kontakt modu) tarama sırasında iğnenin yukarı-aşağı hareketi ve yanal dönüşü ölçülerek yüzey topografisi oldukça detaylı bir şekilde üretilebilir.

Tez çalışması kapsamında büyütülen ince filmlerin yüzey topografileri kontak modunda incelenmiş, ince filmlerin büyütüldüğü hallerinin yapıları veya tabi tutuldukları işlemlerin ince film yüzey yapısına etkileri incelenmiştir.

**Fotoluminesans (PL):** Fotoluminesans maddelerin üzerine düşürülen ışığı soğurarak kendi yapısal özellikleri nedeni ile daha düşük enerjilerde ışık salması olayıdır. Yarıiletken kristallerde, bant aralığından daha yüksek enerjilerde sahip fotonlar madde üzerine gönderilirse, kristal bu ışığı soğurur. İletkenlik bandına çıkan elektronlar valans bandına dönerlerken bant aralığına karşı gelen dalgaboyunda ışık yayar. Örnekten yayılan ışığın spektrumu incelenerek kristalin bant aralığı hakkında bilgi edinilir. Ancak ideal durumun dışına çıkıldığında bant aralığı içerisinde tuzak düzeyler oluşmuş ise veya bant aralığının değişmesine sebep olacak bir fiziksel olgu mevcut ise daha düşük enerjili fotonlar da salınacağından ölçüm ile elde edilen spektrum kristalin bant aralığının yanısıra kristaldeki kusurlar, safsızlıklar veya bant aralığının değişimine neden olan fiziksel



olgular (yüzeyde bant bükülmesi, nano boyutlu kristallerde bant confinement yani kısılması gibi) hakkında da bilgiler sağlanabilir.

Sistem temel olarak bir ışık kaynağı (genellikle bir lazer kaynağı olmakla beraber son zamanlarda led kaynaklar da kullanılmaktadır) ışığı örnek üzerine getiren ve örnekten yayılan ışığın toplandığı optik bileşenler ve örnekten toplanan ışığın spektrumunun ölçülüp kayıt edildiği bir optik spektrometreden oluşur. Işık kaynakları ölçümleri yapılacak malzemelerin bant aralığına göre seçilir. Spektrometreler ise beklenen yayılım spektrumuna göre belirlenir. Genellikle Silisyum sensörlü sistemler ile UV ve görünür bölgede spektrum incelemesi yaygın olmakla beraber yakın kızılötesi bölgesinde de ölçüm yapan sistemler mevcuttur.

Tez çalışması kapsamında büyütülen ince filmler UV bölgede çalışan bir lazer kaynağı ile uyarılmış ve UV – görünür bölgede spektrum incelemesi yapılarak büyütülen ince filmlerin bant aralığı, kristal kusurları gibi bilgiler türetilmeye çalışılmıştır .

**Optik Geçirgenlik / Yansıma Ölçümü:** Bu ölçüm aslında çoğunlukla optik bileşenlerin karakterizasyonu için sık kullanılan bir yöntem olsa da yüzeyleri parlak ve levha formundaki yarıiletken malzemelerin bant aralığının kolayca belirlenebilmesi için kullanılan basit ve hızlı bir yöntemdir. Bu yöntemde genellikle fibere eşleştirilmiş geniş bantlı bir ışık kaynağından elde edilen ışık, fiber çıkışında kolime edilerek bir demet haline getirilir ve örneğin üzerine düşürülür. Örneğin içerisinden geçen ışık yine bir kolimatör ile toplanarak yeniden fibere eşleştirilir ve bu ışık bir optik spektrometreye girilir. Önce örnek olmaksızın yapılan ölçümde elde edilen ışık kaynağı %100 geçirgenliğe normalize edilir ve ardından kolimatörler arasına örnek yerleştirilerek geçen ışığın spektrumundaki değişikliğe bakılarak örneğin izgesel geçirgenliği belirlenir. Yansıma ölçümünde ise örnek yüzeyinden yansıyan ışık bir kolimatör ile toplanarak spektrometreye girilir. Geçirgenlik ölçümünde yapıldığı gibi bu sefer iyi yansıtıcı bir aynadan (genellikle kalibrasyon için kullanılan aynalar %99 veya daha yüksek yansıtıcılığa sahiptir) yansıtılarak toplanan ışık spektrumu normalize edilir ve örnek yüzeyinden yansıyan ışık spektral olarak ölçülür. Örneğe ulaşan ışığın bir miktarı yansır, bir miktarı geçer ve bir miktarı ise örnek tarafından soğurulur. İşte bu prensibe dayanarak örnek tarafından emilen ışığın izgesel dağılımı elde edilerek örneğin bant aralığı hakkında bilgi edinilebilir. Yukarıda da anlatıldığı gibi birkaç dakika gibi

kısa bir sürede yapılabilen ölçüm ile örneğin bant aralığı konusunda bilgi edinmek mümkün olduğu için yaygın kullanılan bir yöntemdir.

Tez çalışması sırasında saydam alttaşlar üzerine büyütme yapıldıktan sonra bu ölçümler yapılarak kaplanan ince filmin uygunluğu konusunda fikir edinilmiştir.

**Akım – Gerilim (I-V) Ölçümü:** Elektronik veya optoelektronik bir aygıt üretildiğinde aygıtın performansının ilk göstergesi aygıtın I-V davranışından elde edilir. Temel olarak aygıtın bağlantı noktaları arasına gerilim uygulayarak bu noktalar arasından geçen akım ölçüldüğü gibi, bu bağlantı noktaları arasına sabit akım uygulayarak gerilim ölçülmesi şeklinde de yapılabilir. Ölçüm tek bir gerilim veya akım değerinde yapmak yerine gerilimin veya akımın belli bir aralıkta taranması şeklinde yapılarak aygıtların doğrusal olmayan davranışı da görülebilir.

Fotodedektörler gibi optoelektronik aygıtların I-V ölçümlerinde ise farklı ölçüm şekilleri vardır. Bir fotodedektörün üzerine ışık düşürülmediği durumda yapılan I-V ölçümü karanlık akım ölçümüdür. Aygıt üzerine ışık düşürüldüğünde yapılan ölçüm ise aydınlatılmış I-V ölçümüdür ve aygıtın ışığa tepkisinin türetilmesi için bu ölçüm belli koşullar altında yapılır. Aygıtın fotocevap verebileceği bir dalgaboyunda ışık kullanılarak aygıt aydınlatılır. Aygıt üzerine düşürülen ışığın optik gücü ölçülür, aygıtta oluşturduğu akım değişimi I-V ölçümünden elde edilir ve fotoakımın optik güce oranı fotodedektörün fotocevabını verir.

Çip formundaki aygıtların I-V ölçümlerini yapabilmek için sonda istasyonları ve aygıtların mikro boyutlardaki bağlantı noktalarına elektriksel bağlantı yapılabilmesi için mikro sondalar kullanılır. Fotocevap ölçümleri için genellikle fiber ışık sondaları kullanılır ki bu sondalar genellikle 10 – 20 µm çaplı alanlara ışık düşürebilecek kadar küçük bölgeleri aydınlatarak çok küçük boyutlardaki aygıtların ölçümüne imkan sağlar.

**İzgesel Fotocevap Ölçümü:** Bir fotodedektörün fotocevap ölçümünün nasıl yapıldığına IV ölçümü anlatılırken değinilmişti. İzgesel fotocevap ölçümü fotodedektörün dalgaboyu değişimine karşı fotocevabının değişiminin belirlenmesi için yapılır. Bu fotodedektörün hangi dalgaboyu aralığında kullanılabileceğinin belirlenmesi için önemlidir. Genellikle ışık, girişine beyaz ışık kaynağı eşleştirilmiş

bir tekrenklendirici (monokromatör) çıkışından alınarak ya direk bir optik düzenele ile aygıt üzerine ya da çip halindeki aygıtların ölçümü için kullanılan sonda istasyonuna getirilebilmek için fiber kabloya eşleştirilerek aygıtın üzerine düşürülür. Her dalgaboyunda aygıt üzerine düşürülen güç kalibrasyonlu bir optik güç ölçer ile ölçülür, yine her dalgaboyunda aygıtın fotoakımı IV ölçüm düzeneği ile ölçülür ve belirli bir eğilme gerilimi altında her dalgaboyu için fotocevap hesaplanarak dalgaboyuna karşı grafiği çizilir.

**Yükselme / Düşme Zamanı Ölçümü:** Bir fotodedektörün üzerine ışık darbesi düşürüldüğünde fotocevabının ne sürede oluştuğunun ve ışık kesildiğinde fotocevabın ne sürede bittiğinin ölçümüne yükselme / düşme zamanı ölçümü denilir. Fotodedektörün tepki süresine bağlı olarak ölçüm yöntemi değişiklik gösterebilir. Saniyeler mertebesinde yükselme düşme zamanı ölçümleri hızlı örnekleme yapabilen bir IV ölçüm sistemi ile ölçülebilirken daha yüksek hızlarda çalışan aygıtların ölçümü için osiloskop ve hatta mikrodalga frekanslarında çalışan RF sistemleri dahi gerekli olabilir. Temelde fotodedektörün tepki süresinden daha kısa atımlı bir ışık darbesi fotodedektör üzerine düşürülür ve oluşan fotoakımın zamana göre değişimi osiloskop ile okunur. Işık darbesi aygıt üzerine düştüğünde fototaşıyıcıların oluşması anlık bir olay iken bu fototaşıyıcıların elektrik alan altında taşınarak kontaklardan toplanması, veya aygıtın parazitik kapasitansı ve ölçüm sisteminin direncinin oluşturduğu zaman sabiti nedeni ile sinyalin yükselme zamanı limitlenir. Fototaşıyıcıların ömürleri ve yine parazitik kapasitans düşme zamanını limitler. Bu parametreler aygıt tasarımı ile optimize edilebiliyor olsa da aygıt tipine, kullanılan yarıiletken malzemenin kalitesine bağlı olarak yükselme düşme zamanları değişmektedir.

## 2. TiO<sub>2</sub> İNCEFİLM FOTODEDEKTÖRLER İLE YAPILAN ÇALIŞMALAR

Tez çalışmasında TiO<sub>2</sub> ince filmlerin kaplanması, ısı ve O<sub>2</sub> RF plazma işlemlerinden geçirilerek film özelliklerinin incelenmiştir. Üretilen ince filmler ile MSM tipi fotodedektör üretilerek kaplama sonrası yapılan işlemlerin aygıt performansına etkisi incelenmiştir.

Elde edilen sonuçlar ile en iyi performansı veren örnek hazırlama metodu belirlenmiş ve bu yöntemle hazırlanan aygıtlar üzerine tasarlanmış nanoplazmonik yapılar eklenerek aygıt performansında yarattığı değişiklikler incelenmiştir.

Aşağıda sırasıyla ince filmlerin hazırlanması, ısı ve plazma işlemleri uygulanması, üretilen bu ince filmlerin karakterizasyonu, üretilen ince filmler ile fotodedektörlerin üretilmesi, üretilen aygıtların karakterizasyonu detayları ile anlatılmaktadır.

### 2.1. TiO<sub>2</sub> İncefilmlerin Hazırlanması

#### 2.1.1. TiO<sub>2</sub> İncefilmlerin RF Magnetron Saçtırma İle Kaplanması

TiO<sub>2</sub> ince filmlerin hazırlanması için RF magnetron saçtırma yöntemi kullanılmıştır. Saçtırma işleminde TiO<sub>2</sub> hedef kullanılmış ve reaktif olmayan saçtırma işlemi uygulanmıştır.

Kaplama için alttaş olarak 2 inç çaplı 330 µm kalınlıkta her iki yüzü de parlatılmış C-düzlemli safir alttaş kullanılmıştır. Alttaş sırasıyla aseton ve izopropil alkol ile ultrasonik banyoda 5 dakika süre ile temizlendikten sonra Leybold Univex 350 RF magnetron saçtırma sistemine (Şekil 20'de sistemin bir fotoğrafı görülmektedir) yüklenmiş ve sistem vakumu 5x10<sup>-6</sup> mbar seviyesine gelene kadar beklenmiştir.



**Şekil 19:** Leybold Univex 350 RF magnetron saçırma sisteminin bir fotoğrafı

Taban vakum seviyesine ulaşıldıktan sonra alttaş ısıtılmadan 7sccm Ar gaz akışı altında  $2.2 \times 10^{-3}$  mbar basınçta 250 W RF gücü kullanılarak yaklaşık 1.1 Å/s kaplama hızı ile wafer yaklaşık 170 nm kalınlıkta  $TiO_2$  kaplanmıştır.

Kaplama işleminin ardından örnek üzerine döndürerek kaplama metodu ile 5000 dev/dk (Dakikada Dönü Sayısı) hızda AZ5214 fotoresisti kaplanarak kesim sırasında örneğin yüzeyi kesim sırasında oluşan tozdan korunmuştur. Daha sonra örnek Disco DAD320 marka wafer kesim sistemi ile 10mmx10mm ebatlarında parçalara ayrılmıştır. Kesim sonrası örnek tekrar sırasıyla aseton ve izopropil alkol içerisinde ultrasonik banyo ile temizlenmiş ve deneyler için hazır hale getirilmiştir.

### **2.1.2. $TiO_2$ İncefilmlere Isıl ve $O_2$ RF Plazma İşlem Uygulanması**

Literaürde de örnekleri görülebileceği gibi alttaşların RF magnetron saçırma kaplamasının ardından daha yüksek kristalinite elde etmek amacı ile tavlama ve yüzeydeki tuzakların azaltılması için  $O_2$  plazma işlemleri yapılmaktadır [61,29]. Bu amaçla üretilen ince filmlere hem ısıl hem de  $O_2$  plazma işlemi yapılarak özelliklerinin incelenmesine karar verilmiştir.

Aşağıdaki Tablo1’de örneklere uygulanan işlemler gösterilmiştir.

**Tablo 1:** TiO<sub>2</sub> kaplanmış örneklere uygulanan işlemler ve temel parametreleri

Örnek numarası	Uygulanan işlem
1	-
2	50 W Plazma
3	100 W Plazma
4	200 W Plazma
5	500 °C ısıt
6	600 °C ısıt
7	700 °C ısıt

RF O<sub>2</sub> plazma işlemi Glow Research marka varil tipi kuvarz işlem odacıklı plazma sisteminde yapılmıştır. Sistem önce 0.2 Torr vakum seviyesine geldikten sonra O<sub>2</sub> gazı akışı başlatılmış ve akış miktarı ayarlanarak işlem odacığı vakum seviyesi 2 Torr değerine ayarlanmıştır. İşlem odacığının temizlenmesi maksadı ile 5 dakika süre ile gaz akışına izin verildikten sonra Tablo 1’de verilen güçlerde 13.56 MHz RF işareti sisteme uygulanarak plazma oluşumu sağlanmış ve örnek yüzeylerine 3 dakika süre ile plazma işlemi uygulanmıştır.

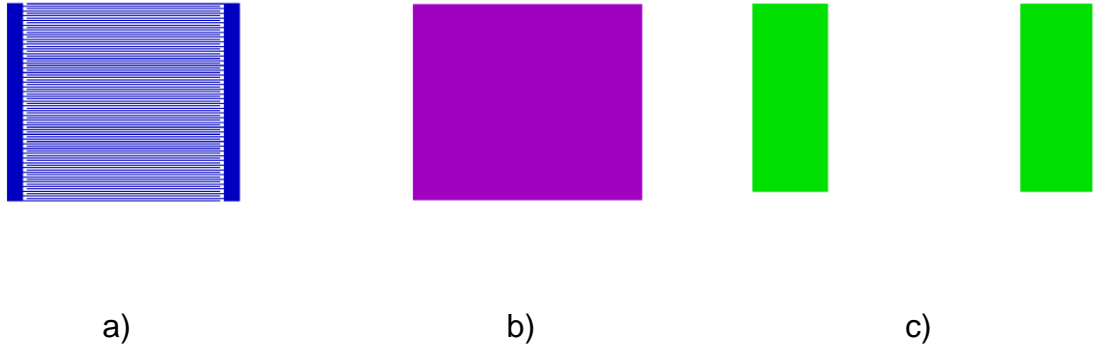
Isıl işlemler ise MTI marka kuvarz tüp fırınlar içerisinde uygulanmıştır. Örnek fırın girişine yerleştirildikten sonra tüp başlıkları kapatılmış ve 2 L/dk akış hızında O<sub>2</sub> gazı akışı altında fırın Tablo 1’de verilen sıcaklıklara ısıtıldıktan sonra örnek tüpün merkezine alınmış ve 3 saat süre ile tavlama işlemi yapılmıştır. Süre dolduktan sonra örnek yine fırın girişine alınmış, fırın soğutulduktan sonra tüp içerisinden çıkartılmıştır. Bu işlemin ardından ince filmler karakterizasyon ve aygıt üretimi için hazırdır.

## 2.2. TiO<sub>2</sub> MSM Tipi Fotodedektör Üretimi

### 2.2.1. TiO<sub>2</sub> MSM Tipi Fotodedektörün Tasarımı

TiO<sub>2</sub> MSM tipi fotodedektörlerin üretimi temelde 3 adımda yapılabilmektedir. Bu adımlar sırası ile Schottky aygıt kontaklarının yapılması, aygıt adacıklarının aşındırılması ve son olarak aygıtın testlerinde kolay elektriksel kontak sağlayabilmek için bağlantı metali kaplanmasıdır. Her adımda işlenecek alanlar bir fotolitografi ile tanımlanmaktadır. Fotolitografi için quartz cam ile üretilen bir fotomaske kullanılmıştır. Fotomaske tasarımı aşağıda detayları ile anlatılmıştır.

Aygıt üretiminde kullanılan fotomaske “Wavemaker” programı ile tasarlanmış ve üretimi yurt dışındaki bir fotomaske üreticisinde yaptırılmıştır. Aşağıdaki Şekil 20’de fotomaskenin çiziminde her işlem adımından bir görüntü verilmektedir.



**Şekil 20** : Fabrikasyonda kullanılan fotomaskeden görüntüler. a) Aygıt kontaklarının görüntüsü, b) Aygıt adacığı görüntüsü, c) Bağlantı metali görüntüsü

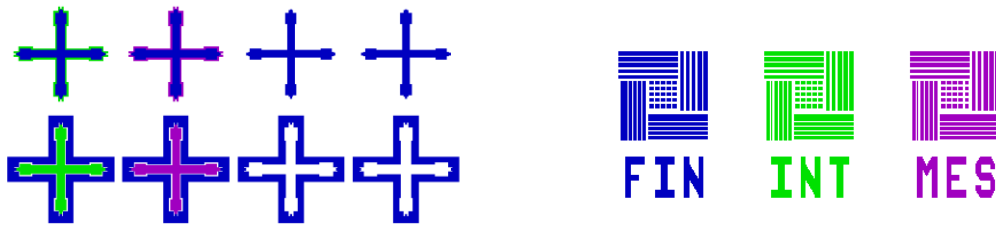
Fotomaskede parametrik bir tasarım yapılmış ve toplam aygıt alanı, kontak genişliği ve aralığı parametreleri değiştirilerek 40 değişik çeşit aygıt tasarımı yapılmıştır. Aşağıdaki Tablo 2’ de aygıtların geometrik parametreleri verilmektedir. Aygıt alanı fotodedektörün toplam karanlık akımını, diğer bir deyişle gürültüsünü tanımlamaktadır. Dolayısıyla farklı alanlara sahip fotodedektörler üretilerek uygun seviyede karanlık akıma sahip en büyük aygıt karakterize edilecektir. Kontak aralıkları ise aktif alana uygulanan elektrik alan şiddetini belirlemektedir. Üretilen ince filmin kalitesine bağlı olarak belli bir kritik elektrik alan şiddetinde ince filmin katastrofik zarar görmesi sözkonusudur. Bu nednele kontaklar arası mesafe değiştirilerek kırılma gözlenecek olursa geniş aralıklı kontaklara sahip aygıtların

karakterizasyonu yapılması planlanmıştır. Kontak genişlikleri ise toplam aktif alan içerisindeki gölgeleme oranını belirler. Diğer taraftan fotolitografi çözünürlüğü her ne kadar 0.5  $\mu\text{m}$  olarak görülse de pratik olan limit 1  $\mu\text{m}$  mertebesindedir. Aygıt üretiminde litografik proseslerde yaşanabilecek sorunlardan dolayı çip başına aygıt sayısının yüksek olabilmesi için kontak genişlikleri değişken yapılmış ve bu şekilde üretimde problemler çıksa bile çip üzerinde karakterize edilebilecek aygıtların bulunması garanti edilmek istenmiştir.

**Tablo 2:** Birinci MSM aygıt fotomaskesi için aygıt aktif alanları ve kontak genişlik ve alanları

Aygıt Alanları ( $\mu\text{m}$ )	Kontak Genişlik ve Alanları ( $\mu\text{m}$ )			
	Genişlik	Aralık	Genişlik	Aralık
560 x 500	3	4	1.5	2
120 x 100	2	4	2	1.5
70 x 50	2	3	1.5	1.5
40 x 25	2	2	3	3
28 x 15	3	3		

Fotomaske tasarımı sadece aygıtlardan ibaret değildir. Her adımın birbirine hizalanabilmesi için hizalama işaretleri ve yapılan litografinin çözünürlüğünün ölçülebilmesi için çözünürlük test işaretleri de fotomaskede yer almaktadır. Bu işaretlerin bir görüntüsü aşağıdaki Şekil 21’de verilmiştir.



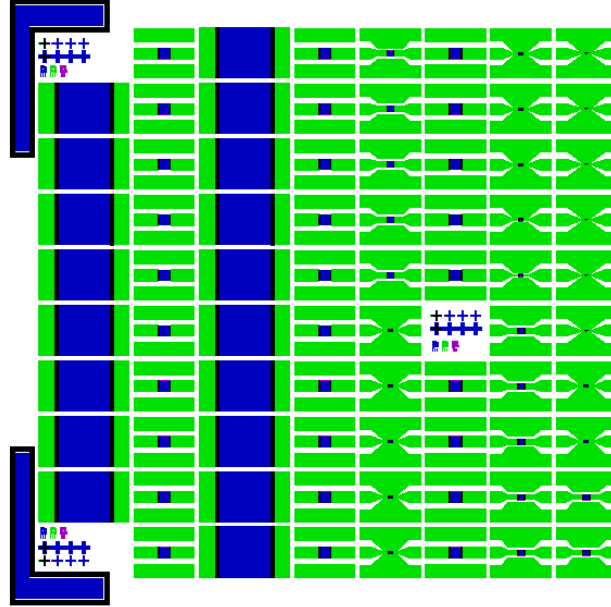
a)

b)

**Şekil 21:** Birinci MSM aygıt fotomaskesi için test ve hizalama işaretleri. a) Hizalama işaretleri, b) Çözünürlük test işaretleri



Aygıt çizimleri ile bu desenlerinde fotomaskeye eklenmesi ile elde edilen son fotomaske çizimi aşağıdaki Şekil 22'da verilmiştir. Tüm fotomaskenin alanı 6 mm x 6 mm'dir ve 10 mm x 10 mm örnekler ile çalışmak için uygundur.



**Şekil 22:** Birinci MSM aygıt fotomaskesinin genel görüntüsü

### 2.2.2. TiO<sub>2</sub> MSM Tipi Fotodedektörün Üretim Süreci

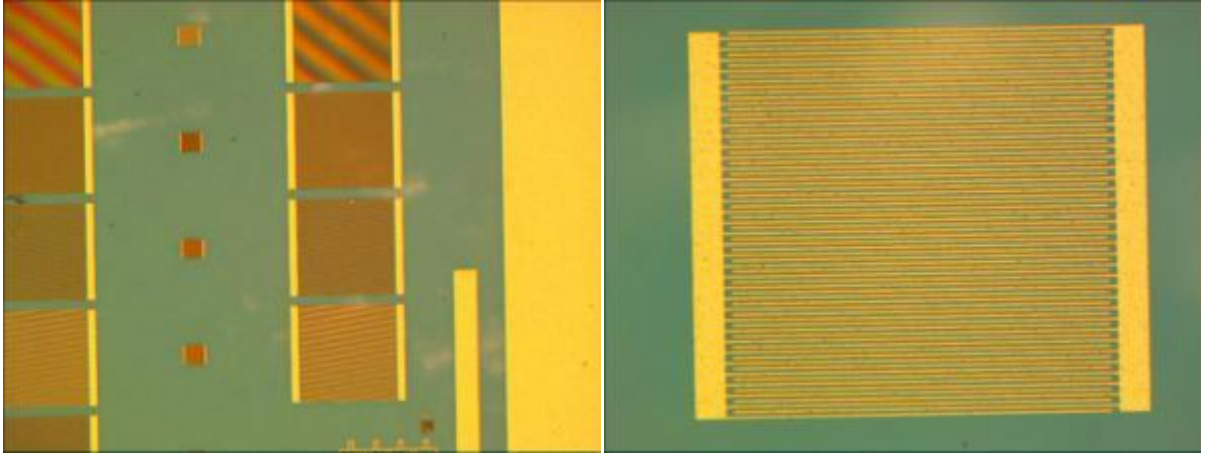
Aygıtın fabrikasyonu örnek temizliği ile başlamaktadır. Özellikle 1 µm mertebesinde desenlerin fotolitografi ile örnek yüzeyine işlenmesinde yüksek çözünürlük sağlamak oldukça önemli olduğundan örnek temizliği büyük önem taşımaktadır. Fotolitografide çözünürlük fotomaske ile fotoresist arasındaki mesafeye bağlı olduğundan örnek yüzündeki en küçük toz tanesi çözünürlüğü düşürerek maskede tasarlanmış desenlerin ya doğru boyutlarda örnek yüzeyine geçirilememesine yada hiç desenlenmemesine sebep olmaktadır. Bu amaçla örnek sırasıyla aseton ve izopropil alkol içerisinde ultrasonik banyoda 5 dakika süre ile temizlendikten sonra DI (De İyonize) su ile durulanmış, azot gazı püskürtülerek kurulanmış ve 110 °C sıcaklıktaki sıcak tabla üzerinde yüzeye tutunmuş sudan arındırılarak litografi işlemine hazır hale getirilmiştir.

Litografi işlemi döndürerek fotoresist kaplama ile başlamaktadır. Önce örnekler döndürerek kaplama cihazına yerleştirilmiş ve üzerine bir cam pipet yardımı ile AZ5214 fotoresist damlatılarak tüm yüzeyi rezist ile kaplanmıştır.

Sonra 7500 dev/dk hızla 45 saniye süre ile dödürülerek fotorezistin yüzeye yayılarak yaklaşık 1.2 µm kalınlıkta bir rezist tabakası kaplanmıştır. Bu işlemin ardından örnekler sıcak tabla üzerinde 60s süre ile pişirilerek fotorezist içerisindeki çözücünün buharlaşması sağlanmıştır. Bu aşamada örnekler döndürülerek kaplandığı için örneklerin kenarlarındaki fotorezist kalınlığı ortasındaki fotorezistin kalınlığına göre oldukça yüksektir. Bu nedenle kenarlardaki kalın fotorezistin temizlenmesi gerekmektedir. Bu amaçla örnekler maske hizalayıcıya yerleştirilmiş, 7 mm x 7 mm ebatlarında bir fotomaske ile örnek 30 mJ/cm<sup>2</sup> dozla geniş bandlı UV ışık ile pozlandırılmıştır. Pozlandırma işlemi sırasında UV ışık, polimeri kimyasal olarak değiştirir ve pozlanan alanlar geliştirme çözeltisinde çözünebilir hale gelir. Pozlandırma işleminden sonra örnekler hacmen 1:4 AZ400K/DI su / geliştirme çözeltisinde 50 s süre ile bekletilerek kenarlarda biriken kalın rezist tabakası çözdürülmüştür. DI su ile durulanıp azot ile kurutulduktan sonra bu sefer maske hizalayıcıya aygıt kontağı maskesi takılmış ve örnekler sıra ile hizalayıcıya yüklenmiştir. Örneklerin merkezine fotomaske hizalandıktan sonra vakum kontak modunda 14.25 mJ/cm<sup>2</sup> dozla pozlama yapılmış, örnek 2 dakika sıcak tabla üzerinde tersleme pişirmesi yapılmış ve sonra maske kullanmaksızın 30 mJ/cm<sup>2</sup> dozla yeniden pozlanmıştır. İşte burada yaptığımız gibi örneğin önce fotomaske ile pozlandırdıktan sonra tersleme pişirmesi ve maskesiz pozlama yapılarak fotomaskedeki desen terslenerek örnek yüzeyine geçirilmesi terslenmiş litografi işlemi adını alır. Özellikle PVD kaplamaları yapılacak adımlarda fotorezistin uygun bir duvar profili elde edilebilmesi için bu işlem tercih edilmektedir. Litografi işleminin ardından örnekler yine yukarıda anlatılan geliştirici çözeltide 50 s bekletilmiş, DI su ile durulanmış ve azot püskürtülerek kurutulmuştur. Hemen ardından optik mikroskopta örneklerin çözünürlük test desenleri incelenmiş ve kritik şekil büyüklükleri ölçülmüştür. Tasarım ile uygunluğu teyid edildikten sonra örnekler kontak kaplama işlemine hazırlanmışlardır.

Aygıtlarda düşük karanlık akım hedeflendiğinden, yüksek bir Schottky bariyeri sağlamak için kontak metali olarak yüksek iş fonksiyonlu bir metal olan Pt (Platin) metali seçilmiştir. Ancak Pt buharlaştırması zor ve pahalı bir metal olduğundan yeterli bariyer oluşturacak kalınlık olan 100 Å kalınlıkta kaplanması yeterlidir. Yalnız bu kalınlıkta bir metalin hem seri direnci yüksek olacağı hem de oksitlenme sonucu kontak kısa bir surede bozulacağı için oksitlenmeyen bir metal

ile üzerinin örtülmesi gerekmektedir. Bu nednele Pt kontağın üzerine Au (Altın) metali de buharlaştırılmaktadır. Bu bilgiler ışığında aygıt kontağının 100 Å/1000 Å Pt/Au olarak kaplanmasına karar verilmiştir. Örnekler bir taşıyıcı levhaya vakuma uyumlu bir bant ile yapıştırıldıktan sonra elektron demeti buharlaştırıcısına yüklenmiş ve  $5 \times 10^{-6}$  mbar taban vakum seviyesine ulaşıldığında yukarıda verilen kalınlıklarda, örneklerin yüzeyine önce Pt ve ardından da Au metalleri kaplanmıştır. Kaplama işlemi sonrasında örnekler aseton içerisine atılarak kaldırma işlemi ile fotoresistin çözünmediği alanlara kaplanan metaller yüzeyden uzaklaştırılmış, izopropil alkol ve DI su ile durulanmış ve azot püskürtülerek kurutulmuştur. Bu aşamada kontak kaplama adımı sonlanmıştır. Bu noktada aygıt yüzeyinden alınmış mikrograflar Şekil 23'de verilmektedir.

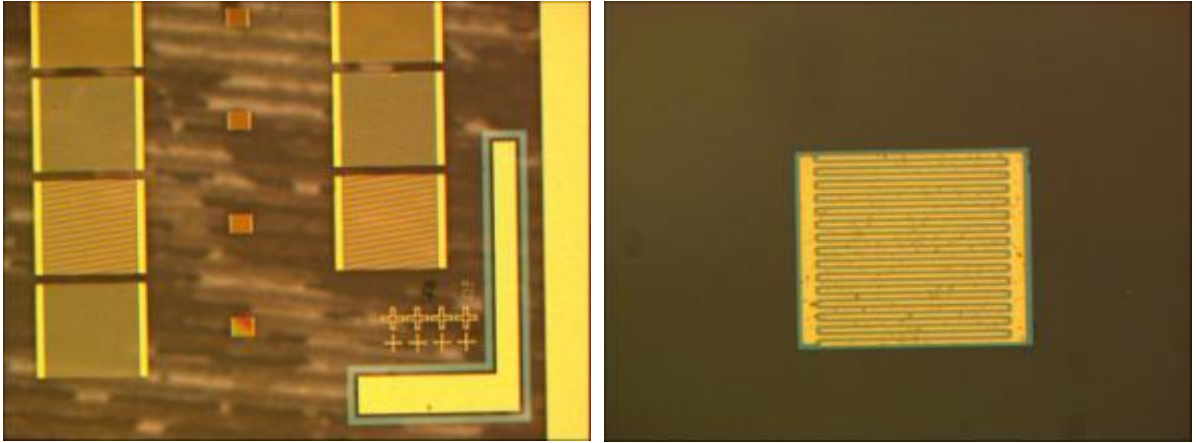


**Şekil 23:** TiO<sub>2</sub> MSM aygıt fabrikasyonunda kontak kaplama sonrası mikroskop fotoğrafları

Bu aşama sonrasında aygıt adacığın aşındırması yapılmıştır. Aygıt adacığın aşındırması kuru aşındırma işlemi ile yapılmıştır. Kullandığımız örneklerde kontak alanları içerisinde TiO<sub>2</sub> kalması ve kontakların bulunduğu alan dışındaki TiO<sub>2</sub> in aşındırılması istenmektedir. Bunun temel sebebi kontakların bulunduğu alan dışından gelecek fazladan karanlık akımın yok edilmesidir. Bu amaçla yine fotolitografi yapılarak kontakların bulunduğu alan fotorezist ile maskelenerek ve maskelenmemiş alanlardaki TiO<sub>2</sub> kuru aşındırma ile aşındırılmıştır.

Örnekler yine döndürerek kaplama yöntemi ile bu sefer 4000 dev/dk hızla 45 s süre ile AZ5214 fotorezisti ile yaklaşık 1.5 µm kalınlıkta kaplanmış ve ardından 110 °C sıcaklıkta 60 s süre ile pişirilmiştir. Maske hizalayıcıya aygıt adacığın maskesi takıldıktan sonra örnekler sıra ile maske hizalayıcıya yerleştirilmiş, aygıt adacığın desenleri hizalama işaretleri yardımı ile kontak

alanlarının üzerine hizalanmış ve  $30 \text{ mJ/cm}^2$  doz ile geniş bantlı UV ışık ile pozlandırıldıktan sonra daha önce anlatılmış olan AZ400K geliştirici çözeltisinde geliştirilmiş, DI su ile durulanıp azot gazı püskürtülerek kurulanmıştır. Litografi işlemi optik mikroskop ile kontrol edildikten sonra örnekler kuru aşındırma sistemine yüklenmiş ve 100 W ICP gücü, 80 W Rf gücü 0.4 Pa basınçta 60 sccm  $\text{CHF}_3$  gazı akışı altında 44 nm/dakika hız ile 5 dakika süre ile aşındırılmış ve örnekler aşındırma işleminin ardından aseton, izopropil alkol ve DI su ile temizlenerek azot gazı ile kurutulmuştur. Şekil 24'de aşındırma işlemi sonrası çipin genel görünümü ve aygıtlardan bir tanesinin detaylı mikroskop fotoğrafları verilmektedir.



**Şekil 24:** Aygıt adacığı aşındırması sonrası çipin bir bölgesinin görünümü ve bir aygıtın mikroskop fotoğrafı

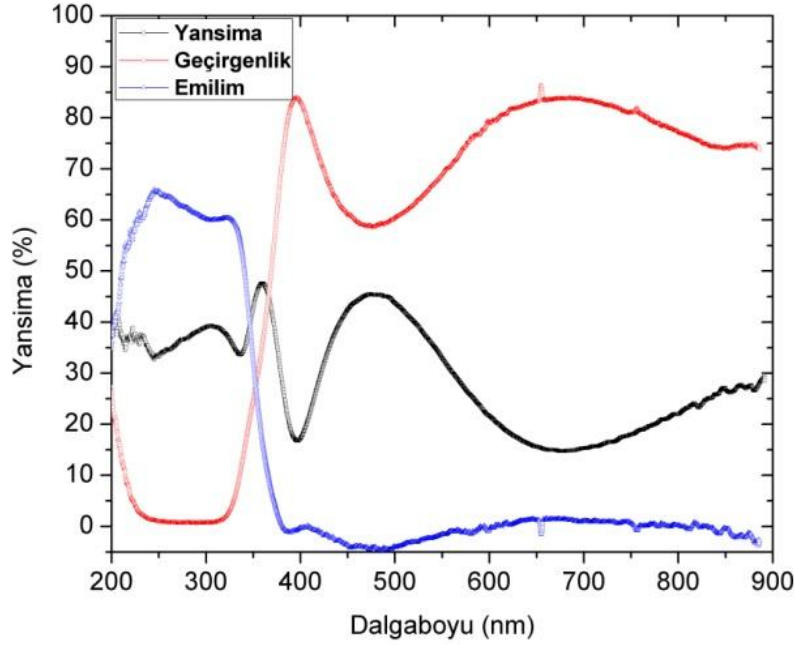
Şekilde görüleceği gibi kontak alanları üzerinde  $\text{TiO}_2$  turkuaz renginde görülmektedir. Kontak alanlarının dışındaki  $\text{TiO}_2$  aşınmıştır.

Bu aşamada aktif aygıt oluşturulmuştur. Ancak kontak metali test için elektriksel kontak yapmak üzere problemlenmek için çok incedir. Ayrıca alanı da yeterince geniş değildir. Bu nedenle daha kalın ve daha geniş alanlı bir bağlantı metali kaplaması yapılmalıdır. Bunun için yine yukarıda anlatıldığı şekilde 5000 dev/dk hızla AZ5214 fotorezisti kaplanmış, terslenmiş litografi yöntemi ile bağlantı metali alanları tanımlanmış ve yine elektron demeti buharlaştırma metodu ile sırasıyla  $200 \text{ \AA}$  /  $2000 \text{ \AA}$  kalınlıklarda Ti / Au metalleri kaplanmıştır. Örnekler yine asetonunda kaldırma işlemine tabi tutulduktan sonra temizlenerek kurutulmuş ve fabrikasyon süreci sona ermiştir. Artık aygıtlar karakterizasyona hazır hale getirilmiştir.

## 2.3. Sonuçlar ve Tartışma: TiO<sub>2</sub> İnce Filmler

### 2.3.1 TiO<sub>2</sub> İncefilmlerin Karakterizasyonu

Hazırlanan ince film örneklerin bant aralığının ve UV dalgaboylarındaki soğurma miktarlarının tespit edilmesi için ilk olarak optik geçirgenlik ve yansımaya ölçümleri uygulanmıştır. Elde edilen yansımaya, geçirgenlik ve soğurma grafiği aşağıdaki Şekil 25'de verilmiştir. Örneklerin tamamında aynı davranış gözlenmiştir.



**Şekil 25:** Plazma ve ısıtma işlemi sonrası TiO<sub>2</sub> örneklerinden elde edilen yansımaya, geçirgenlik ve soğurma grafikleri

Şekil 25'den görüleceği üzere soğurma 390 nm dalgaboyunda başlamakta ve yaklaşık 230 nm'de düşmeye başlamaktadır. Bu TiO<sub>2</sub>'in 3.2 eV'lık bant aralığı ile uyumlu bir değerdir. Bu dalgaboyunun üzerinde yansımaya verisinde görülen salınım ince film ve safir alttaşın kırma indisleri farkından dolayı bu yüzeylerden yansıyan ışığın girişiminden kaynaklanmaktadır. Bir başka dikkat çeken sonuç ise soğurmanın olduğu bölgede yüzeye gelen ışığın yaklaşık %40'ının yüzeyden geri yansıyor oluşudur. Bu yansımaya kaybı aygıtın fotocevap performansını bu oranda düşürmektedir. Soğurmanın olduğu dalgaboylarında geçirgenliğin sıfır oluşu 170 nm gibi ince bir filmde dahi ışığın tamamının emilebileceği ve dolayısıyla soğurma katsayısının beklendiği gibi oldukça yüksek olduğu anlamına gelmektedir. Soğurmanın olmadığı bölgede gözlenen yansımaya salınımlarını etkisi geçirgenlik

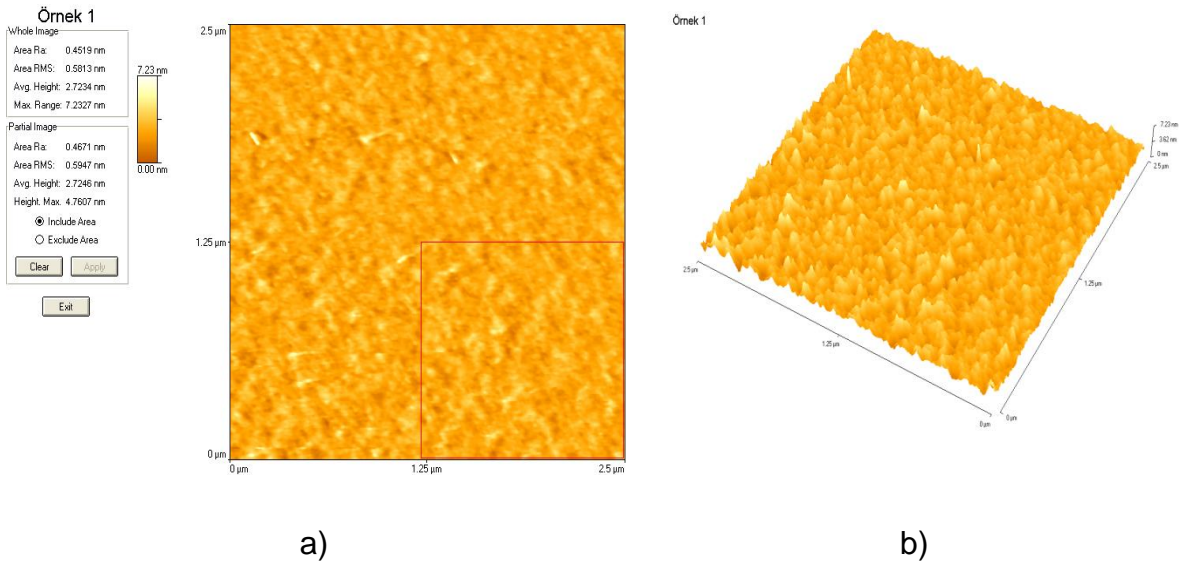
ölçümünde de görülmektedir. Soğurma aşağıda verilen [7] eşitliği yardımı ile hesaplanmıştır.

$$\text{Soğurma} = 1 - \text{Geçirgenlik} - \text{Yansımaya} \quad [7]$$

Soğurma grafiği, yansımaya ölçümünde kalibrasyon için kullanılan aynanın %95 yansıtıyor olmasına rağmen kalibrasyon işleminde %100 yansıtıyor şekilde kabul edilmesi nedeni ile -%5 değerine düşmektedir.

Optik yansımaya ve geçirgenlik ölçümü sonrası örneklere AFM incelemesi yapılarak yüzey topografileri belirlenmiştir.

Şekil 26'da kaplandığı hali ile tutulan 1 numaralı örnek yüzeyinden alınan AFM görüntüleri verilmektedir.

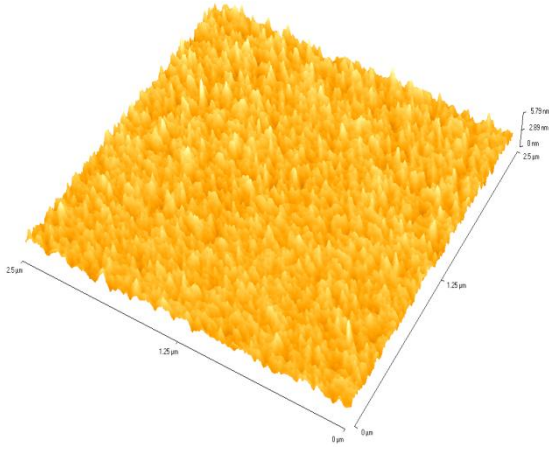


**Şekil 26:** Kaplandığı hali ile tutulan örneğin yüzeyinden alınan AFM görüntüleri. a) Yüzey analizinin yapıldığı 2 boyutlu görüntü, b) 3 boyutlu görüntü

Şekil 26'dan görüleceği üzere ince film yüzeyi oldukça pürüzsüzdür. Yapılan analiz sonucu 0.58 nm RMS (Karelerin Ortalamasının Karekökü) yüzey pürüzlülüğü elde edilmiştir. Yapılan 5 mikron karelik alanda en yüksek nokta 7.2 nm'dir. Yüzey pürüzlülüğünün düşük oluşunun bir göstergesi de yansımaya ölçümünde elde edilen Fabry-Perot salınımlarıdır.

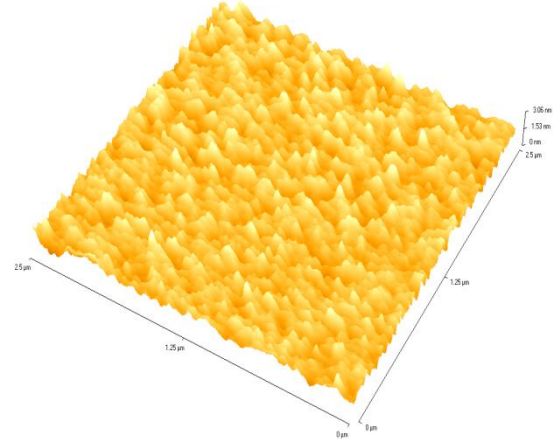
Aşağıdaki Şekil 27'te O<sub>2</sub> RF plazma ile işlenmiş örneklerin AFM ile elde edilen yüzey topografileri görülmektedir.

Örnek 2



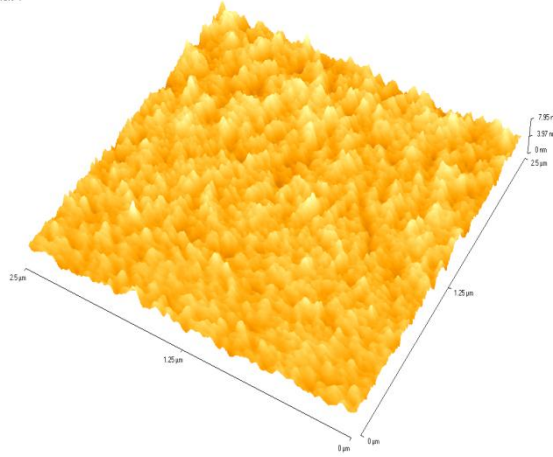
a)

Örnek 3



b)

Örnek 4



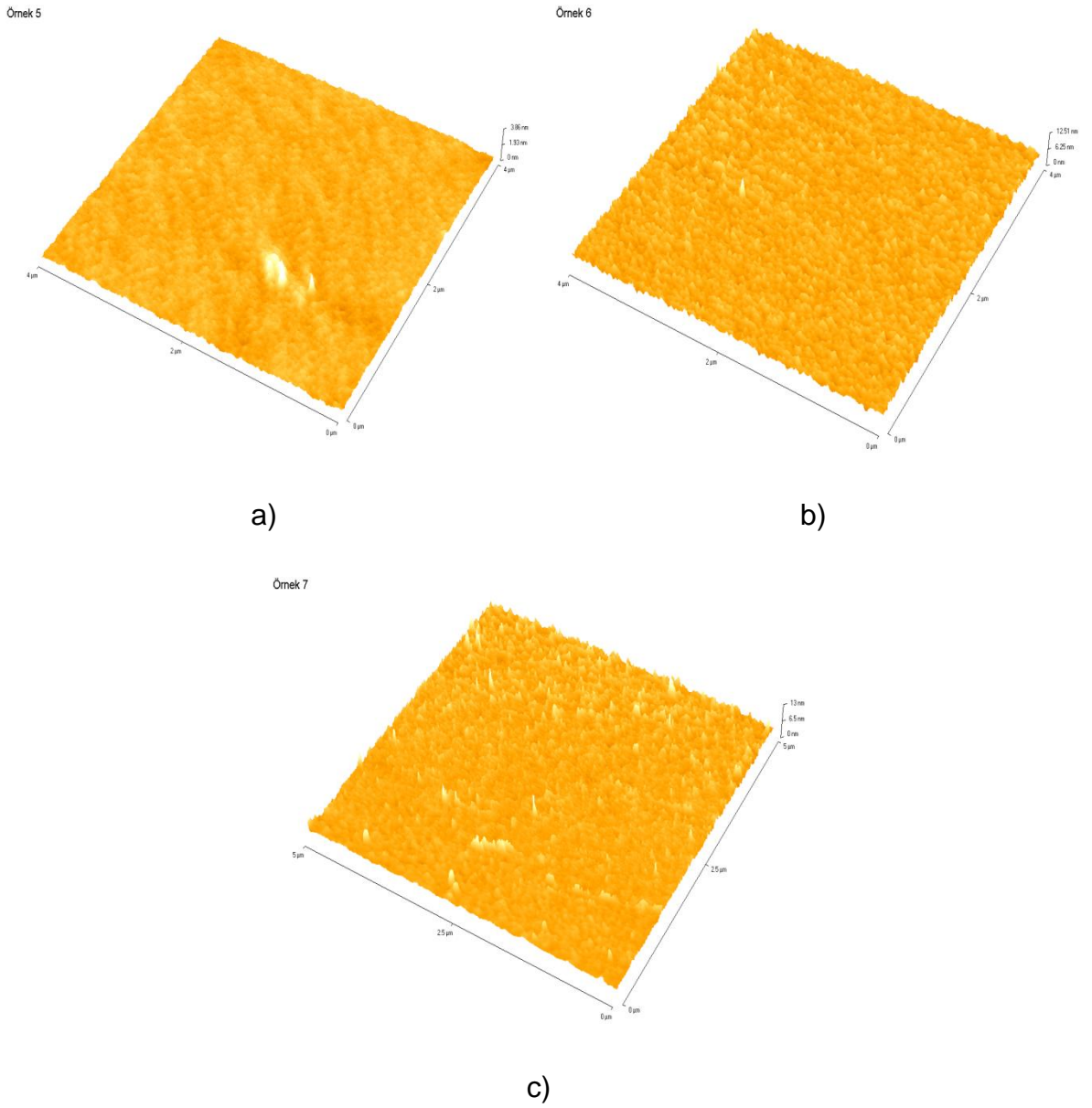
c)

**Şekil 27:** O<sub>2</sub> RF plazma uygulanmış örneklere ait AFM görüntüleri. a) 50 W, b) 100 W ve c) 200 W güçte plazma işlemi uygulanmış örnekler.

Şekil 27'den görüleceği üzere RF gücü arttırıldıkça yüzey pürüzlülüğü artmaktadır. Bunun sebebi güç arttırıldıkça plazmada var olan iyonların fiziksel olarak yüzeyi aşındırmasıdır. Bu sonuçlarda dikkati çeken nokta 2 boyutlu fotoğraflarda yapılan yüzey analizlerinde ortalama pürüzlülüğün 100 W ile işlenmiş olan örnekte diğerlerine göre daha az oluşudur. Her ne kadar RF gücü arttırıldıkça yüzeyde görülen tanecik büyüklükleri artıyorsa da yüzeydeki dalgalanma bu örnekte daha düşük bir seviyededir. Örnekler bu işlem sırasında aktif olarak soğutulmamaktadır. İşlem sırasında kullanılan RF gücü yükseltildikçe örnek sıcaklığı artmaktadır. 50 W RF gücü uygulandığında örnek sıcaklığı yüzey topografisini düzeltebilecek seviyeye çıkamamaktadır. Bu nedenle yüzeyde

sadece fiziksel aşınmanın sonucu olan ince sütunlar şeklinde yapılar gözlenirken 100 W RF gücü ile yapılan işlem sırasında örneğin yüzeyindeki mikroskopik sıcaklıklar bu bozulmayı düzeltebilecek seviyeye çıkabilmektedir. 200 W RF gücü uygulandığında ise sıcaklık yüksek olmasına rağmen ortamdaki oksijen iyonları daha yüksek enerjili oldukları için yüzeydeki pürüzlenmeyi arttırdığı düşünülmektedir.

Aşağıdaki Şekil 28’de ısıtılma tabii tutulmuş örneklerden elde edilen AFM görüntüleri verilmiştir.

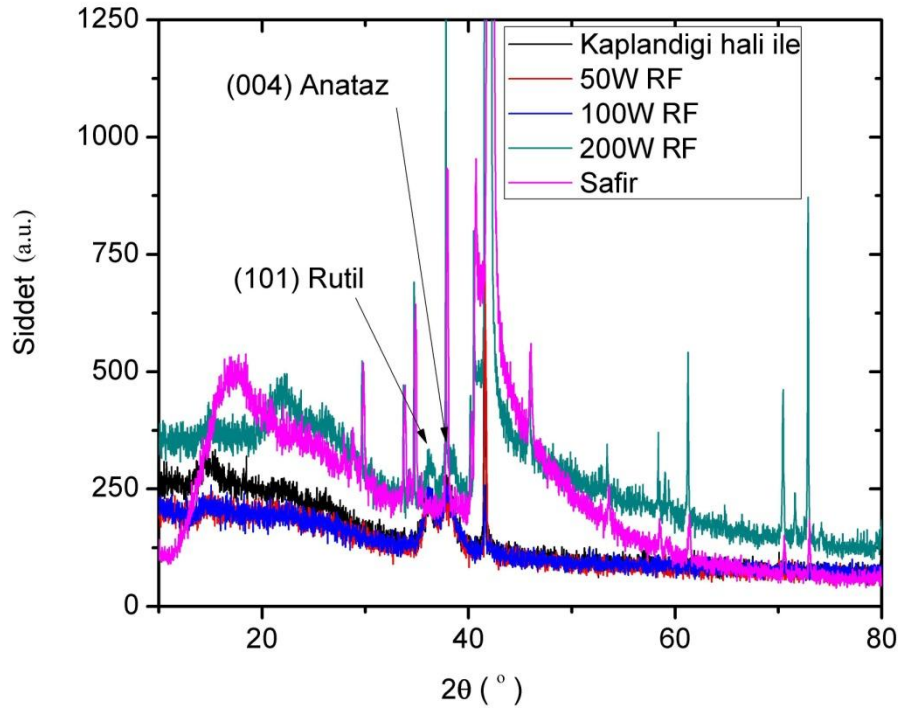


**Şekil 28:** Isıl işlem uygulanmış örneklere ait AFM görüntüleri. a) 500 °C, b) 600 °C ve c) 700 °C sıcaklıkta ısıtılma tabii tutulmuş örnekler.



Şekillerden de görüldüğü gibi tavlama sıcaklığı arttıkça yüzey topografisi değişerek pürüzlülük artmakta ve 700 °C sıcaklıkta tavllanmış olan örneğin yüzeyinde ince, uzun, nanotel benzeri yapılar belirmiştir. Bu yapıların yüksek sıcaklıklarda fırındaki kontaminasyonun film üzerinde birikmesi veya oksijen ortamında yüzeyde gerçekleşen reaksiyonlar sonucu yüzeydeki çekirdekler üzerinde malzeme büyümesi nedeni ile oluştuğu düşünülmektedir. Bu örnekler arasında 500 °C de tavlanan örnekte en iyi yüzey pürüzlülüğü elde edilmiştir.

Üretilen örneklerin yapısal analizlerini detaylandırmak için XRD incelemeleri de yapılmıştır. Şekil 29'da plazma işlemi uygulanmış örneklerden elde edilen X-ışınları kırınımı deseni verilmektedir.

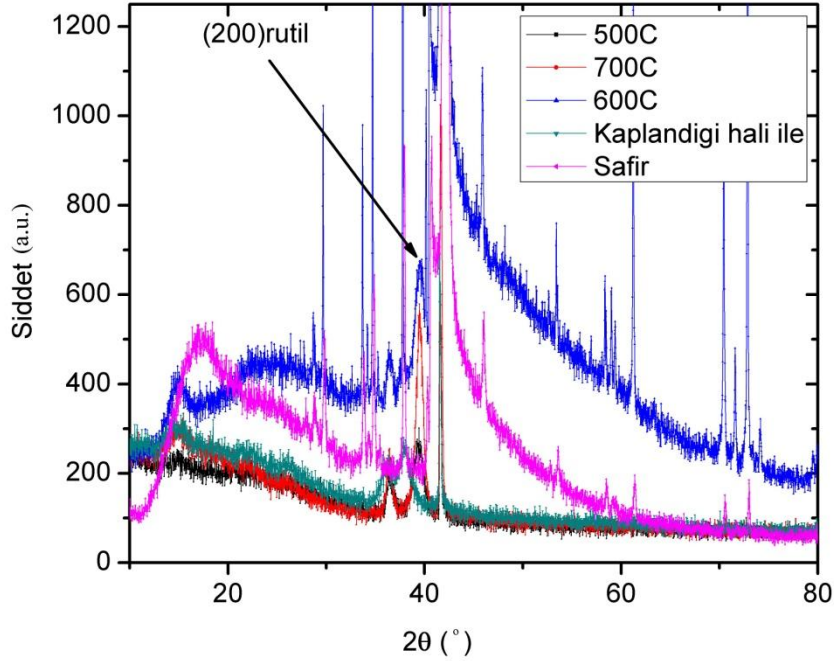


**Şekil 29:** Plazma işlemi uygulanmış örneklerden elde edilen X-ışınları kırınımı deseni

Şekil 29'da da görüldüğü gibi işlem görmemiş ince film ile 50 W ve 100 W RF ile işlenmiş olan örneklerin XRD desenleri neredeyse üst üste çakışmaktadır. 200 W işleme tabi tutulmuş örnekte görülen piklerin büyük çoğunluğu safir alttaştan gelmektedir. Bütün örneklerde ortak olan iki pik 36.1° ve 37.9°'de gözlenen piklerdir ki bunlar sırası ile (101) Rutil ve (004) Anataz piklerine karşı gelmektedir. Toplam film kalınlığı ince olduğu için piklerin şiddetleri oldukça

düşüktür. Bu nedenle tanecik büyüklüğü veya faz analizleri sonuçlarının güvenilir olmayacağı düşünüldüğünden bu tür incelemelere gidilmemiştir.

Şekil 30'da ise tavllanmış örneklerden elde edilen XRD desenleri verilmektedir.



**Şekil 30:** Isıl işleme uygulanmış örneklerden elde edilen X-ışınları kırınımı deseni

Şekil 30'da görüldüğü gibi 600 °C sıcaklıkta tavllanmış örneğin ölçüm alındığı konumuna bağlı olarak safir alttaştan kaynaklanan pek çok pik gözlenmektedir. Isıl işleme tabi tutulmuş filmlerde tercihli yönelimler oluşabilmektedir. Kaplandığı hali ile incelenen örnekte daha önce de gösterildiği gibi (101) Rutil ve (004) Anataz pikleri gözlenirken tavllanmış örneklerde bu piklerin şiddetleri oldukça düşmüştür. Isıl işlem sıcaklığının artışı ile ısıl işlem ile işlenmiş örneklerde ortaya çıkan (200) Rutil fazına ait pikin şiddetinin gittikçe arttığı ve diğer piklerin şiddetlerinin düştüğü gözlenmiştir. Isıl işlem sırasında sıcaklığın artışı ile TiO<sub>2</sub> molekülleri alttaşın kristal yapısına uyumlu bir yönelime yönelmektedir.

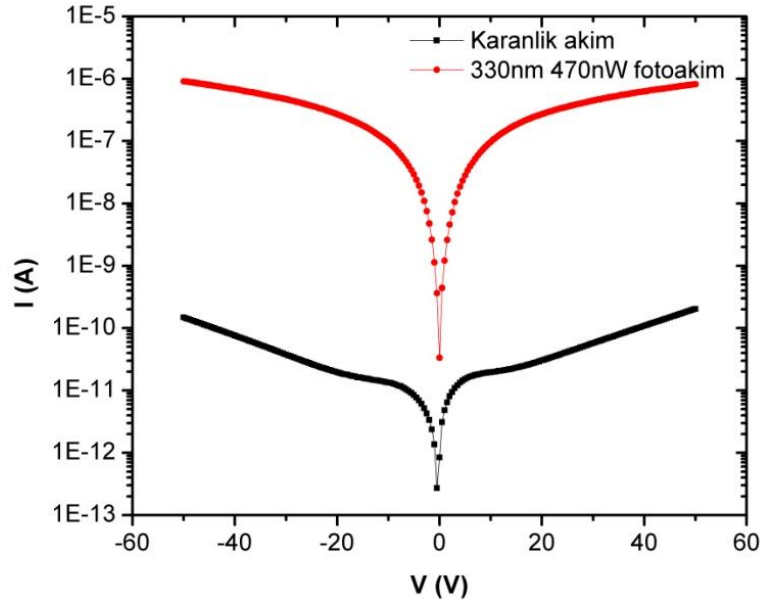
Yapılan incelemeler sonucunda RF plazma veya ısıl işleme tabi tutulmuş ince filmlerin optik özelliklerinde bir değişim gözlenmezken, AFM incelemelerinde plazma işleme tabi tutulmuş örneklerde uygulanan RF gücünün artışı ile yüzey pürüzlülüğünün arttığı, tavllanmış örneklerde ise sıcaklık 500 °C'den 700°C'ye

doğru giderken yüzey pürüzlülüğünün arttığı gözlenmiştir. Yapılan XRD ölçümlerinde kaplandığı hali ile incelenen ve RF plazma ile işlenmiş örneklerde (101) Rutil ve (004) Anataz fazları beraber gözlenirken, ısı işlem gören örneklerde sıcaklık artarken bu fazlara ait piklerin şiddetleri belirgin şekilde azalırken, (200) Rutil fazı gözlenmiş ve yine sıcaklığın artışı ile bu faza ait pik şiddetinin arttığı belirlenmiştir.

### 2.3.2. TiO<sub>2</sub> MSM Tipi Fotodedektörlerin Karakterizasyonu

Fabrikasyonu tamamlanmış bütün örneklerde 500 µm x 560 µm aktif alanlı ve 4 µm kontak aralıklı ve 3 µm kontak genişlikli aygıtlardan ölçümler alınmıştır. Ölçümlerde B1505 yarıiletken parametre analizörü, ışık kaynağı olarak Xe lamba kullanılan bir tekrenklendirici ve optik güç ölçümleri için Newport 1930C optik güçölçer kullanılmıştır.

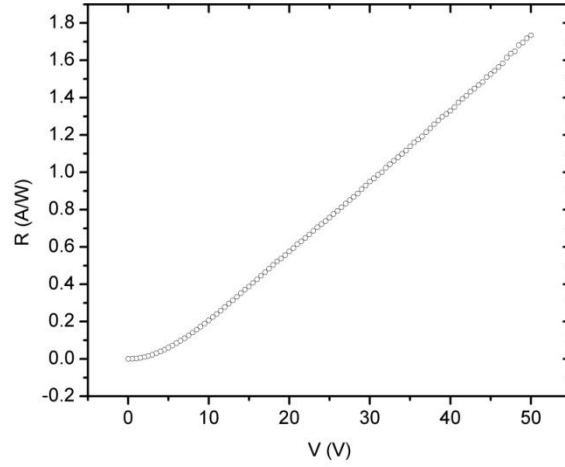
Öncelikle kaplandığı hali ile aygıt üretilen örnekte, karanlık ve 300 nm dalgaboyunda 470 nW optik güç ile aydınlatılmış şekilde I-V ölçümleri yapılmıştır. Aşağıdaki Şekil 31'de bu ölçüme ait grafik verilmektedir.



**Şekil 31:** Kaplandığı hali ile TiO<sub>2</sub> ince film üzerine yapılan MSM tipi fotodedektörün karanlık ve aydınlatılmış I-V grafiği

Grafikten de görüldüğü gibi negatif gerilimlerde ve pozitif gerilimlerde oldukça simetrik bir davranış görülmüştür. 50 V eğilme geriliminde hala kırılma davranışı gözlenmemektedir. 3 µm aralıklı kontaklara bu gerilim uygulandığına göre kaplanan ince film 166.7 kV/cm seviyesindeki elektrik alana dayanabildiği

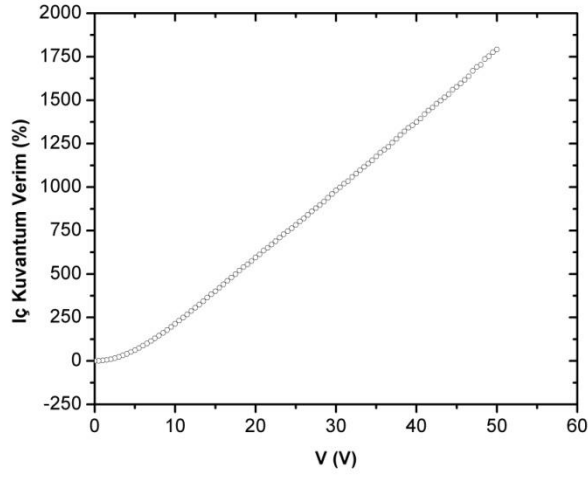
söylenbilir ki bu da film kalitesinin bir göstergesidir. Karanlık akımdaki eksponansiyel davranışın sebebi kontaklar arasındaki yüksek elektrik alan nedeni ile çığ etkisinin gözlenmesindedir [62]. Diğer taraftan 50 V eğilme geriliminde elde edilen karanlık akım yoğunluğu  $2.1 \times 10^{-8} \text{ A/cm}^2$  ve 5 V eğilme altında  $1.57 \times 10^{-9} \text{ A/cm}^2$  gibi oldukça düşük bir akım yoğunluğu elde edilmiştir ki bu değerler literatürde son zamanlarda yayınlanan  $1 \times 10^{-9} \text{ A/cm}^2$  mertebesindedir [21,29]. Aygıtın dış fotocevabı aygıttan elde edilen fotoakımın aygıtı düşürülen ışık şiddetine oranı olarak tanımlandığında voltaja göre hesaplanan fotocevap Şekil 32'de gösterilmektedir.



**Şekil 32:** Kaplandığı hali ile  $\text{TiO}_2$  ince film üzerine yapılan MSM tipi fotodedektörün fotocevabının voltaja göre değişimi grafiği

Şekilden de görüldüğü üzere eğilme gerilimi arttırıldıkça fotocevap da doğrusal olarak artmaktadır ve 50 V eğilme geriliminde 1.8 A/W gibi makul bir fotocevap elde edilmektedir. Ancak literatürde gözlenen yüksek fotocevaplar [63,64] ile karşılaştırıldığında düşük bir değer elde edilmiş olması foto taşıyıcıların ince film içerisindeki tuzaklar nedeni ile rekombine olmasına bağlanmaktadır.

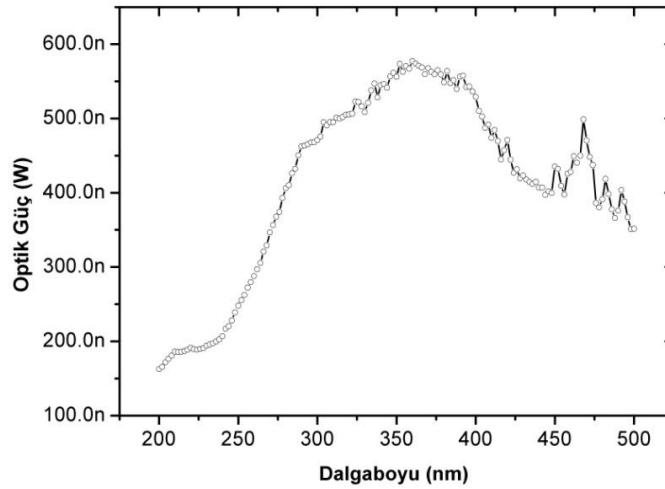
Aygıttan elde edilen iç kuvantum verimin hesaplanması için yansıma ölçümlerinde elde edilen %40 yansıma ve aygıt aktif alanının 3/7'sinin kontak metali ile kaplandığı ve yüzeye düşürülen ışığın bu oranının aygıt tarafından soğurulduğu hesaba katılırsa tüm aygıt alanında ince film içerisine giren ışık miktarı 121 nW olarak bulunur. Bu durumda aygıttan elde edilen kuvantum verimin voltaja göre değişimi grafiği Şekil 33'de verildiği gibi olacaktır.



**Şekil 33:** Kaplandığı hali ile TiO<sub>2</sub> ince film üzerine yapılan MSM tipi fotodedektörden elde edilen iç kuantum veriminin eğilme gerilimine göre değişimi

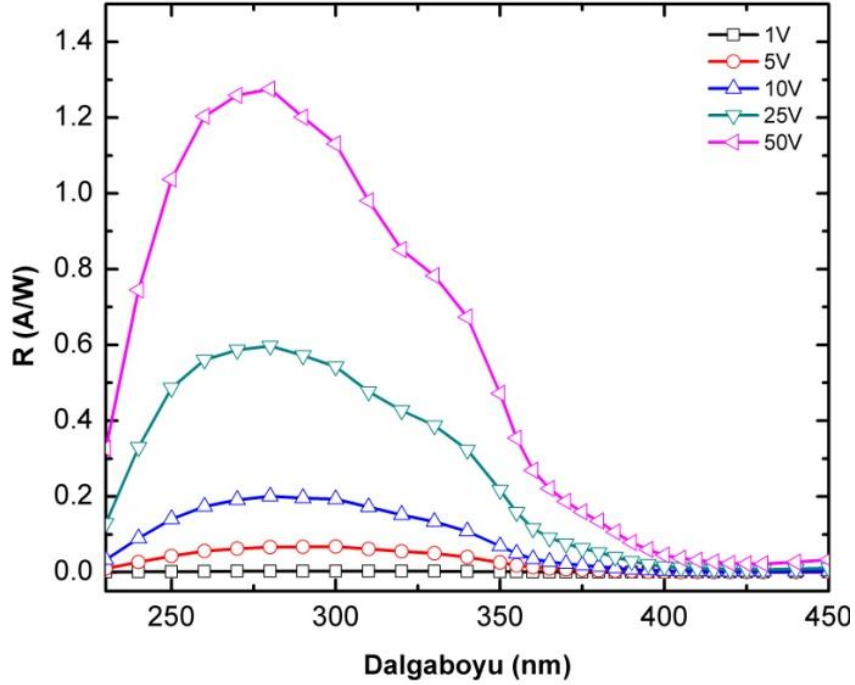
Şekil 33'den de görüldüğü üzere aygıtlardan oldukça yüksek kuantum verim elde edilmektedir. Bunun sebebi elektronların taşınma zamanlarının rekombine olma zamanlarından çok daha kısa olmasıdır. Bu sayede fotoiletken kazanç elde edilebilmektedir.

Bu ölçümün ardından bu aygıt için voltaja bağlı izgesel fotocevap ölçümleri de yapılmıştır. Ölçümlerde, tekrenklendirici çıkışındaki ışık bir fiber kabloya eşleştirilmiş ve fiber kablodan çıkan ışığın dalgaboyuna göre güç değişimi ölçülmüştür. Aşağıdaki Şekil 34'te bu grafik gösterilmektedir.



**Şekil 34:** Aygıtı aydınlatan fiber kablonun çıkışındaki optik gücün dalgaboyuna göre değişimi

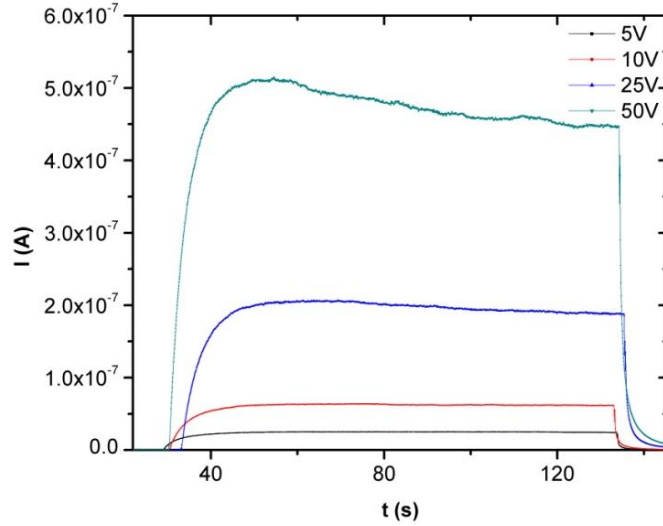
Her dalgaboyunda aygıtların aydınlatılmış I-V ölçümleri yapılmış ve bu ölçümlerden 1, 5, 10, 25 ve 50 V için fotocevapları hesaplanarak Şekil 35'de gösterilen eğimleme gerilimine bağlı izgesel fotocevap grafiği elde edilmiştir.



**Şekil 35:** Kaplandığı hali ile TiO<sub>2</sub> ince film ile üretilmiş MSM fotodiyotun eğimleme gerilimine bağlı fotocevap grafiği

Grafikten de görüldüğü gibi beklendiği şekilde 390 nm civarında fotocevap görülmeye başlanmış ve optik geçirgenlik ölçümünde de görüldüğü gibi yaklaşık 225 nm dalgaboyunda fotocevap sona ermiştir. Beklendiği gibi eğimleme gerilimi arttıkça fotocevap da artmaktadır.

İzgesel ölçümü takiben bu aygıt için yükselme düşme zamanı ölçümleri de yapılmıştır. Bunun için 300 nm dalgaboyunda ışık hızlı bir örtücü ile açılıp yaklaşık 100 s sonra kapatılmış ve fotoakımın zamana göre değişimi farklı eğimleme gerilimleri için incelenmiştir. Aşağıdaki Şekil 36'da 5, 10, 25 ve 50 V için yapılan ölçümlerin sonuçları gösterilmektedir.

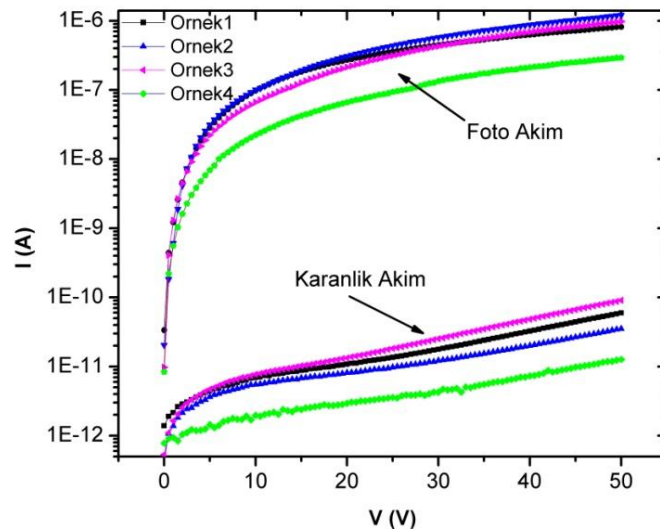


**Şekil 36:** Kaplandığı hali ile TiO<sub>2</sub> ince film ile üretilmiş MSM fotodiyotun yükselme düşme zamanı ölçümleri grafiği

Üretilmiş aygıtın %10 - %90 yükselme zamanları 9 s mertebesindedir ve bu değer eğilime gerilimine göre değişmemektedir. %90-%10 düşme zamanları ise 3.5 s mertebesindedir.

Bu ölçümlerin ardından RF plazma ve ısıtılma tabii tutulmuş örneklerden de aynı geometriye sahip MSM fotodetektörlerin karanlık ve 300 nm dalgaboyunda aydınlatılmış I-V ölçümleri yapılmıştır.

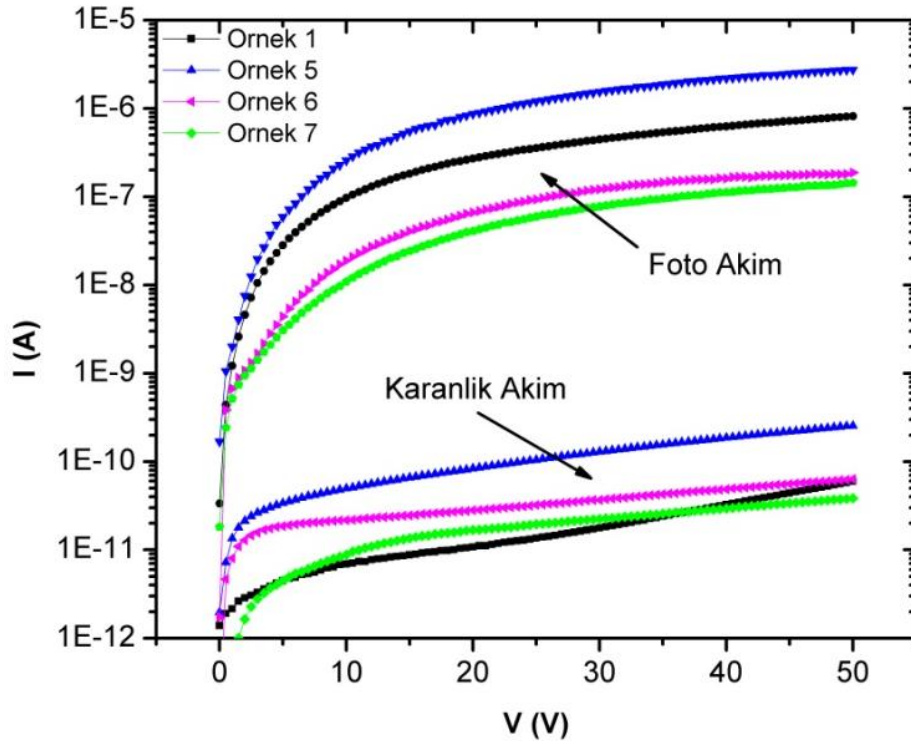
Aşağıdaki Şekil 37' de RF ile O<sub>2</sub> plazması ile işlenmiş örneklerin (örnek 2, 3 ve 4) ve ince film kaplandığı hali ile üretilmiş aygıtlardan ölçülmüş karanlık ve foto I-V leri gösterilmektedir.



**Şekil 37:** Hiç işlem görmemiş örnek ile RF plazma işlemi uygulanmış örneklerin karanlık ve aydınlatılmış I-V ölçümleri karşılaştırması

Şekil 37'den görüleceği gibi aygıtlardan elde edilen karanlık akımlar 50 V eğimleme geriliminde benzer seviyelerdedir. 200 W ile plazma işleme tabi tutulmuş örnekte diğerlerinden yaklaşık 1 mertebe düşük karanlık akım elde edilmiştir. Bu RF gücün yükseltilmesi ile yüzeyde oluşan pürüzlülüğün artışı ile ilişkilendirilmektedir. Yüzeyde yapılan işlem ile rekombinasyon merkezleri sayısı artmış ve bu nedenle elektronlar kontaklardan toplanamadan rekombine olarak karanlık akımın düşmesine neden olmuştur. Foto akımda görülen 1 mertebelik fark da bu düşüncüyü desteklemektedir. Bu düşünceden yola çıkarak 100 W RF işlem ile işlenmiş örneğin karanlık akımının kaplandığı hali ile üretilmiş aygıtların karanlık akımından düşük olması beklenmektedir. Ancak ölçümler bu aygıt için karanlık akımın daha yüksek olduğunu göstermektedir. Bu durum, AFM ile yapılan karakterizasyon sonucu ile uyumludur. Yüzey pürüzlülüğü azaldıkça yüzeydeki rekombinasyon merkezlerinin sayısı azalmakta, bu nedenle hem karanlık akım hem de fotoakım artmaktadır.

Tavlama işlemi ile işlenmiş örneklerden alınan I-V ölçümleri sonucu da aşağıdaki Şekil 38'de gösterilmektedir.



**Şekil 38:** Hiç işlem görmemiş örnek ile ısıl işlemi uygulanmış örneklerin karanlık ve aydınlatılmış I-V ölçümleri karşılaştırması



Isıl işleme tabi tutulmuş örneklerde oldukça düzenli bir davranış gözlenmektedir. Isıl işlem ile karanlık akımın değişimi uyumludur. İşlem sıcaklığı arttırıldığında karanlık akım düşmektedir. Fotoakımlar da benzer şekilde ısıl işlem sıcaklığı ile uyumlu değişmektedir. Burada dikkat çekici olan durum 500 °C sıcaklıkta tavllanmış örnekte fotocevabın diğer örneklere göre çok daha yüksek oluşudur.

Sonuç olarak yapılan bu parametrik çalışmada 7 örnek üretilmiş, plazma ve ısıl işlemler uygulayarak elde edilen ince filmler ile üretilen MSM tipi fotodiyotlar karakterize edilmiştir. Herhangi bir işlem görmemiş ince filmler ile üretilen aygıtlardan literatürde karşılaşılan değerler ile karşılaştırılabilir ve hatta daha iyi performans alınabildiği görülmüştür. Bu aygıtlardan  $2.1 \times 10^{-8}$  A/cm<sup>2</sup> gibi oldukça düşük bir karanlık akım yoğunluğu elde edilmiştir. %1750 mertebesinde bir kuvantum verimle çalışan bu aygıtların yüksek kazanç verdikleri görülmüştür. Oldukça düşük karanlık akım yoğunlukları ve yüksek fotocevap elde edilmiş olması bu fotodiyotların yüksek hız gerektirmeyen ancak yüksek UV algılama gerektiren uygulamalarda kullanımının mümkün olduğunu göstermektedir. Elde edilen sonuçlar ince filmlere kaplama sonrası herhangi bir işlem uygulanırsa dahi çok basit ve ucuz üretim süreçleri kullanılarak özellikle sivil uygulamalar için yüksek performanslı aygıtlar üretilebileceği anafikri ile "Journal of Vacuum Science and Technology B" dergisinde yayınlanmıştır. Ayrıca kaplandığı hali ile üretilmiş olan fotodedektörlerin performansının diğerlerinden belirgin derecede farklı olmadığı görüldüğünden çalışmanın devamında üretilen ince filmlere ısıl veya plazma işlemlerinin uygulanmasına gerek olmadığına karar verilmiştir.

### **3. NANOPLAZMONİK TiO<sub>2</sub> FOTODEDEKTÖR GELİŞTİRİLMESİ**

Yüksek performansı fotodedektörler üretilebilecek ince film büyütme ve aygıt üretim süreçlerinin geliştirilmesinin ardından bu aygıtların üzerine eklenecek nano yapılar ile performans iyileşmesi veya değiştirilmesi konusundaki araştırmalar yapılmış literatürdeki izgesel fotocevap iyileştirme üzerine nanoyapıların kullanıldığı yayınlar [65,66,67,68,69] incelenmiştir. Bu inceleme sırasında nanoplazmonik yapılar ile yakın kızılötesi ve görünür dalgaboylarında filtre yapmak üzere çalışmalar olduğu ve hatta görünür dalgaboylarında yapılan

filtrelerin genellikle CMOS kameralara uygulanması konusunda yayınlar [70,71] bulunduğu görülmüştür.

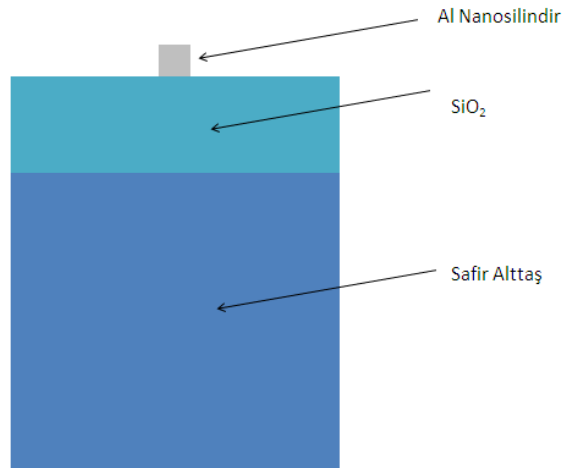
UV fotodedektör uygulamaları incelendiğinde özellikle atmosferik soğurma nedeni ile güneşten dünya yüzeyine ulaşamayan 280 nm ve altında algılama yapabilen ve güneş körü fotodedektör olarak adlandırılan fotodedektörler konusunda çalışmalar yürütüldüğü görülmüştür [72,73,74,75]. Bu fotodedektörler genellikle üretimi zor ince filmler (AlGaIn gibi) kullanılarak yapıldığı ve aygıt üretim süreçlerinin de uzun ve pahalı süreçler olduğu bilinmektedir. UV dalgaboylarında iyi performans verebilen bir fotodedektör yapılabildiğine göre bu fotodedektör üzerine nanoplazmonik bir filtre tasarlanarak güneş körü bir dedektör yapılabirliği üzerine bir çalışma yapılmasına karar verilmiştir.

### **3.1. Nanoplazmonik TiO<sub>2</sub> Fotodedektörün Tasarımı**

Nanoplazmonik fotodedektör tasarımlarına benzetim çalışmaları ile başlanmış, önce 2 boyutlu yapılar ile benzetimler koşulmuş, elde edilen sonuçlara göre, benzetimler 3 boyutlu hale dönüştürülerek deneysel farklılıkların da benzetimlere dahil edilerek tutarlı sonuçlar elde edilmek üzerine çalışmalar yapılmıştır.

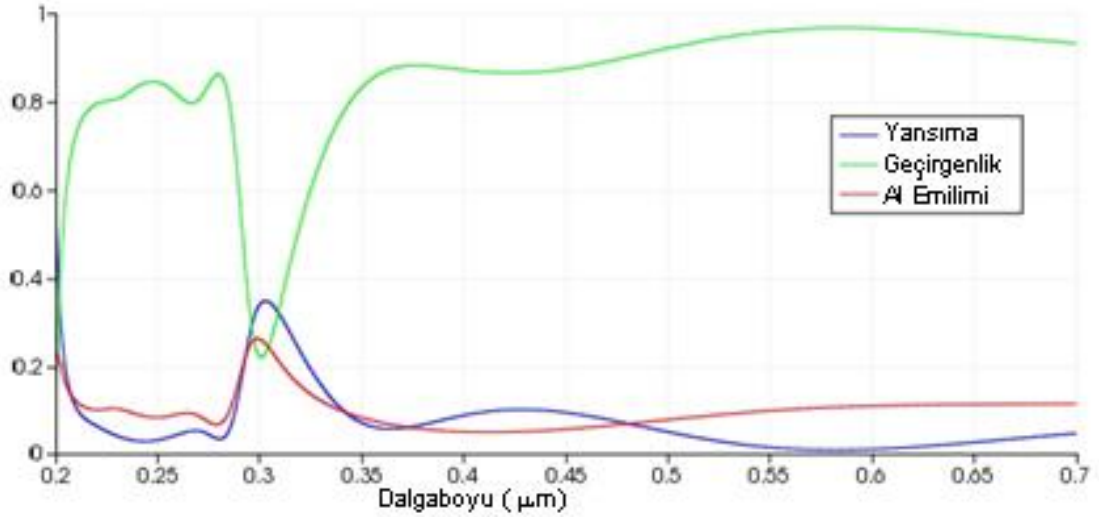
Daha önce de anlatıldığı gibi plazmonik yapılar rezonans dalgaboyunda ışığı kendi düzlemine eşleştirerek bu düzlemde ışığı saçan yapılardır. Ancak bu eşleşme sonucu ışık yüzeyde yayılırken plazmonik yapının bulunduğu iki boyutlu düzlemden taşarak 100 nm mertebesindeki bir derinliğe kadar yayılmaktadır. Bu nedenle plazmonik filtreler tasarlanırken bu yapı bir ayırıcı tabaka ile aktif alandan ayrılması gerekmektedir. Bu amaçla alttaş üzerine büyütülecek aktif tabakanın üzerine ayırıcı fonksiyonu görebilecek saydam ve kaybı düşük olan bir ince film daha yerleştirilmelidir. Bu ayırıcı tabaka için en uygun adaylardan birisi yine RF magnetron saçtırma metodu ile yüksek kalitelere büyütülebilen, saydam ve kaybı oldukça düşük olan SiO<sub>2</sub> malzemesinin kullanılmasına karar verilmiştir. Ancak bu ayırıcı tabakanın kırılma indisinin nanoplazmonik yapının rezonansına olan etkisinin anlaşılabilmesi için aktif malzemenin de olduğu karmaşık bir yapının benzetiminin yapılmasından önce sadece safir alttaş, ayırıcı tabaka ve plazmonik yapının bulunduğu nispeten basit bir yapının benzetilmesi ile çalışmaya başlanmaya karar verilmiştir. Literatür bilgileri ve daha önceden edinilmiş

tecrübeler ile yaklaşık 280 nm dalgaboyunda rezonans verecek bir yapının benzetimine başlamak için safir altaş üzerinde 250 nm  $\text{SiO}_2$  film üzerine 50 nm çaplı, 50nm yükseklikli ve 200 nm periyodlu Al nanosilindirler yerleştirilerek çalışmaya başlanmıştır. Benzetimi yapılan yapının basit bir çizimi Şekil 39'da verilmektedir. Benzetim modelinde şekilde gösterilen yapının 500nm üzerine bir düzlemsel dalga kaynağı yerleştirilmiş ve sınır koşulları olarak "X" yönünde periyodik sınırlar, "Y" yönünde ise dalga kaynağının üstü ve safir altaşın tabanı mükemmel emici olarak tanımlanmıştır. Bu sınır koşulları sayesinde hesaplama süresi kısa olmakta ve kolay anlaşılır sonuçlar elde edilmektedir. Diğer taraftan gerçek dünyada safir altaşın tabanının mükemmel emici olmadığı bilinmekle beraber toplam yapı kalınlığı birkaç yüz nm olan bir yapının altında 330  $\mu\text{m}$  aşağısında yarı yansıtıcı bir yüzey oluşunun sonuçlarda şimdilik belirgin bir etkisi olmayacağı varsayımı altında benzetimlere başlanmıştır.



**Şekil 39:** Benzetimi yapılan yapının basit bir çizimi

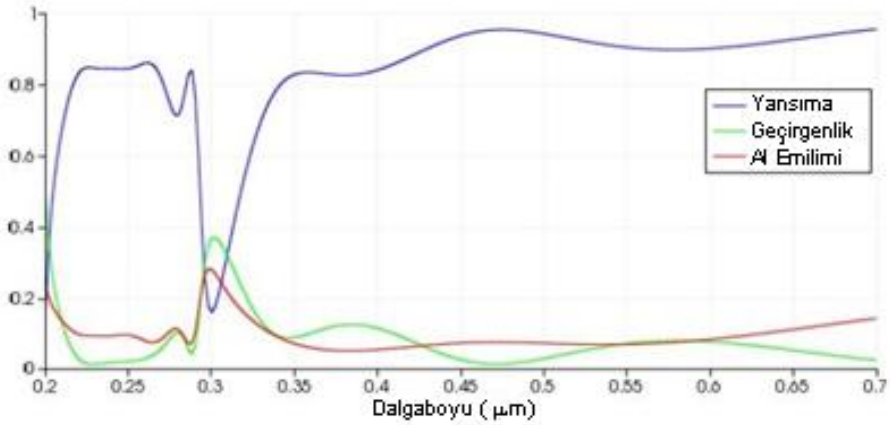
Hesaplama sonucunda yapının yüzeyindeki izgesel yansıma, yapıdan geçen ışığın izgesel dağılımı ve Al nanosilindirlerdeki soğurma incelenmiştir. Elde edilen grafik aşağıdaki Şekil 40'da gösterilmektedir.



**Şekil 40:** Safir altaş üzerinde 250 nm kalınlıkta SiO<sub>2</sub> ve 50 nm yükseklikli, 50 nm çaplı ve 200 nm periyodlu Al nanosilindirlerden oluşan yapının benzetim sonucu

Şekilden de görüleceği gibi rezonans dipi 300 nm civarında görülmektedir. İyi bir filtreleme için rezonans dipinin derinliğinin maksimum olması önemlidir. Bu nedenle elde edilen %24 mertebesinde geçen ışığın azaltılması gerekmektedir.

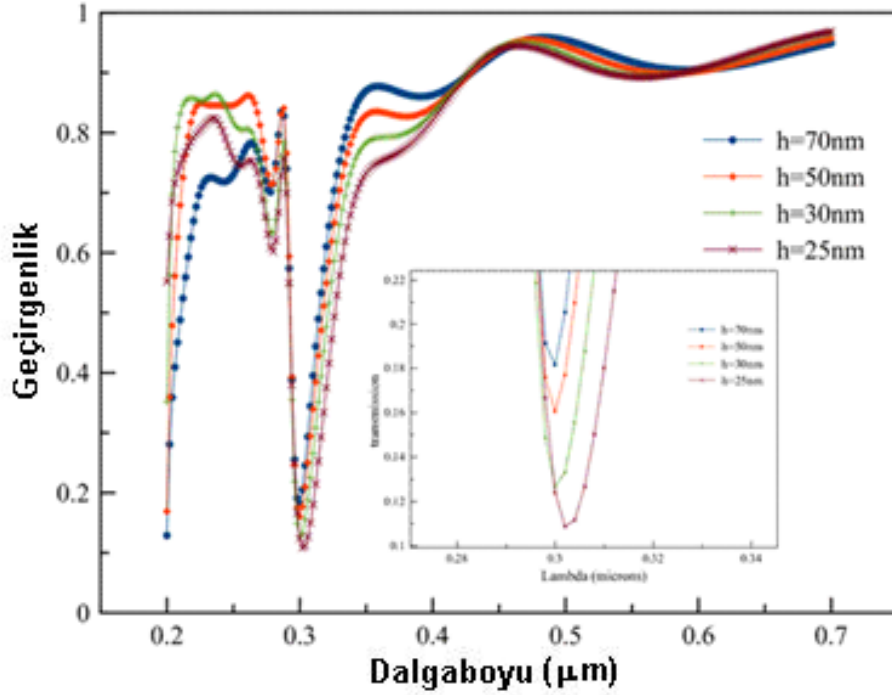
Bu amaçla SiO<sub>2</sub> film kalınlığı 350 nm ye çıkartılarak yeniden benzetim yapılmış ve sonuç incelenmiştir. Elde edilen grafik Şekil 41’de verilmektedir.



**Şekil 41:** Safir altaş üzerinde 350nm kalınlıkta SiO<sub>2</sub> ve 50nm yükseklikli, 50 nm çaplı ve 200 nm periyodlu Al nanosilindirlerden oluşan yapının benzetim sonucu

Şekilden rezonans dalgaboyunda yansıma arttığı için geçen ışık miktarının %16 ya kadar azaldığı görülmektedir. Nanosilindirlerin yüksekliğinin rezonansın

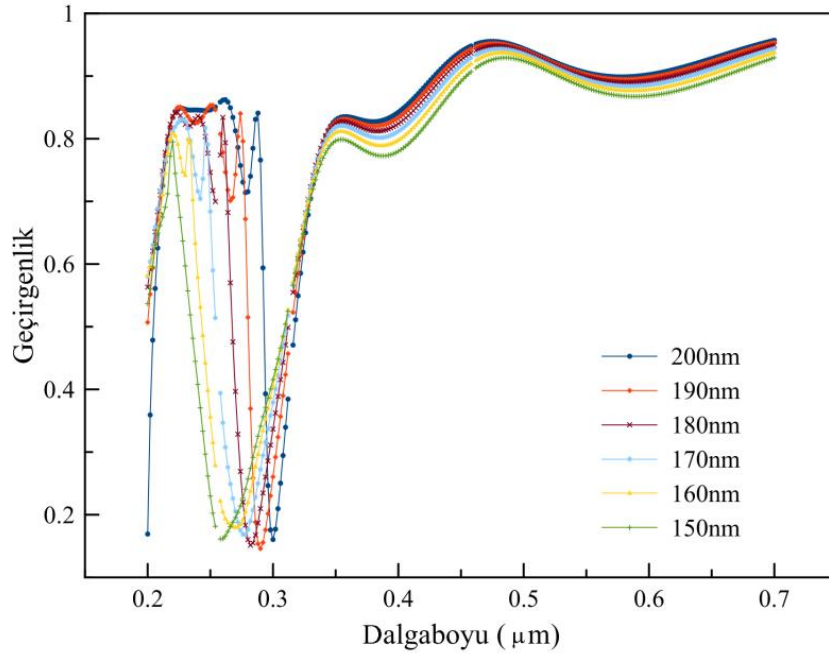
derinliğine etkisinin incelenmesine karar verilmiş ve silindir yüksekliği 70 nm, 50 nm, 30 nm ve 25 nm olacak şekilde benzetimler yapılmıştır. Aşağıdaki Şekil 42’de silindir çapının değişimi ile rezonans davranışının değişimi gösterilmiştir.



**Şekil 42:** Nanosilindir yüksekliği h=70 nm, 50 nm,30 nm ve 25 nm iken rezonans davranışı

Şekil 42’den de görülebileceği gibi silindir yüksekliğinin azalması rezonansı derinleştirirken rezonansı kırmızıya kaydırmaktadır. İlk bakışta sonuç iyiye gidiyormuş gibi görünse de rezonansın altındaki dalgaboylarında geçirgenliğin düşüyor olması olumsuz bir değişim olduğundan, 50 nm silindir yüksekliğinin optimum olduğuna karar verilmiştir.

Daha sonra silindir periyodunun rezonansa etkisi incelenmiştir. Periyod 200 nm, 190, 180, 170, 160 ve 150 nm iken rezonans davranışının değişimi benzetimlenmiş ve elde edilen sonuç Şekil 43’de verilmiştir.



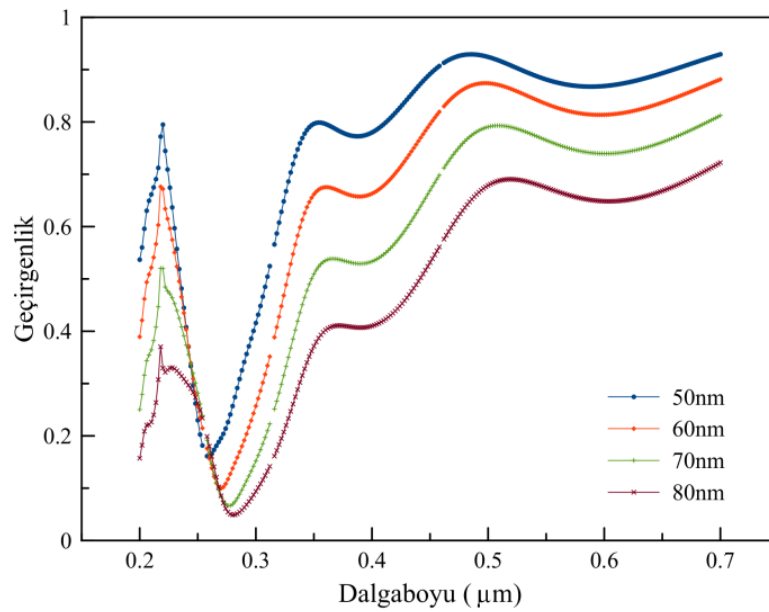
**Şekil 43:** Silindir periyodu değişirken rezonans davranışının değişimi

Hesaplama sonucunda silindir periyodu değişirken rezonans derinliğinde belirgin bir değişim olmaz iken periyod azaldıkça rezonansın maviye kaydığı ve genişliğinin arttığı görülmüştür. Bu, silindirler arası eşleşmenin artışı ile açıklanmaktadır. Rezonans genişliğinin silindir periyoduna göre değişimi aşağıdaki Tablo 3’de verilmektedir.

<b>Tablo 3:</b> Periyodun rezonans genişliğine etkisi	
Periyod (nm)	Yarı yükseklik genişliği (nm)
200	26
190	32
180	44
170	58
160	68
150	76

Rezonansın genişlemesi aslında amacımız olan filtreleme açısından olumlu görünmekle beraber 50 nm çaplı silindirler için 150 nm – 170 nm mertebesindeki periyodlar fabrikasyon açısından oldukça güç rakamlardır. Bu nedenle optimal yapı seçilirken periyodun bu mertebelere inmemesi dikkate alınacaktır.

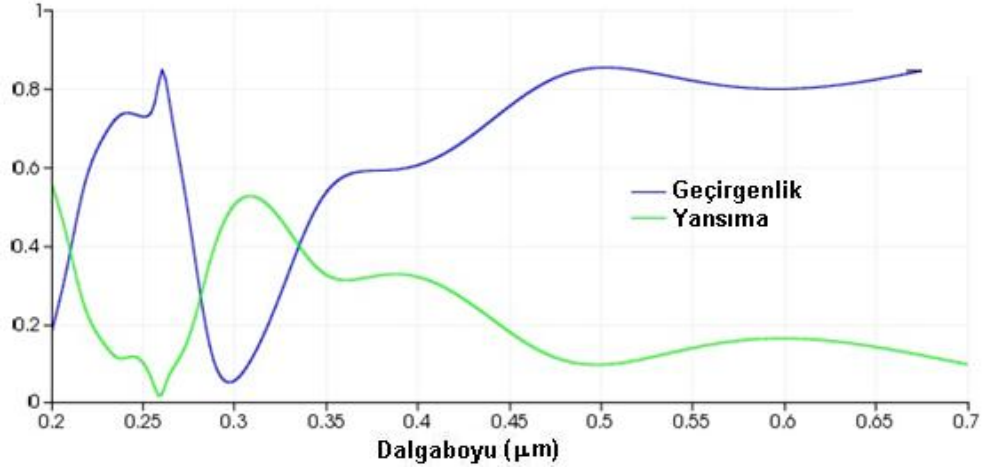
Silindirlerin çaplarının rezonans davranışına etkisi de incelenmiştir. Bu amaçla 150 nm periyodlu silindirlerde 50, 60, 70 ve 80 nm çaplı silindirler ile benzetimler yapılarak rezonans davranışındaki değişim incelenmiş ve sonuçları Şekil 44’de verilmiştir.



**Şekil 44:** Silindir çapının değişirken rezonans davranışının değişimi

Şekilden de görüldüğü üzere, silindir çapı artarken rezonansın inişindeki kenar değişmez iken rezonans genişliği artmakta ve rezonans dalgaboyu kırmızıya kaymaktadır. Bu değişim yine silindirler arası eşleşmenin artışı ile açıklanmaktadır.

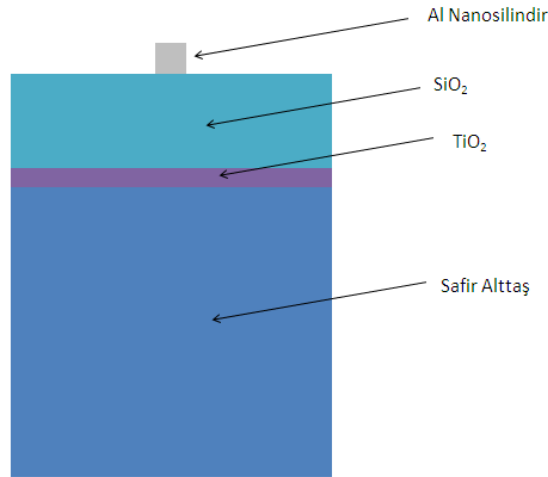
Elde edilen sonuçlar ışığında 150 – 200 nm aralığında bir periyod ve 50 – 80 nm aralığında bir çap seçerek rezonans incelenmesine karar verilmiştir. Rezonans mümkün olduğunca geniş ve rezonanstaki geçirgenlik minimum olsun istenmektedir. Ayrıca fabrikasyon açısından da mümkün ölçüler seçilmelidir. Bunlar gözönüne alınarak 180 nm periyod ve 70 nm çap seçilmiş ve yine safir alttaş üzerinde 350 nm kalınlıkta SiO<sub>2</sub> tabakası üzerinde benzetimi yapılmıştır. Elde edilen sonuç aşağıdaki Şekil 45’de verilmektedir.



**Şekil 45:** Safir alttaş ve 350 nm SiO<sub>2</sub> üzerinde 70 nm çap, 180 nm periyod ve 50 nm yükseklikteki Al nanosilindirler için geçirgenlik (mavi eğri) ve yansıma (yeşil) eğrileri.

Görüldüğü üzere derin ve geniş bir rezonans ve rezonans altındaki dalgalarda makul bir geçirgenliği olan bir yapıya ulaşılmıştır.

Bu noktada, yapıya TiO<sub>2</sub> ince filmi ekleyip yapının son halinde rezonansın hassas ayarlanmasına karar verilmiştir. Bu noktada benzetimi yapılan yapının şekli aşağıdaki Şekil 46'da verilmektedir.



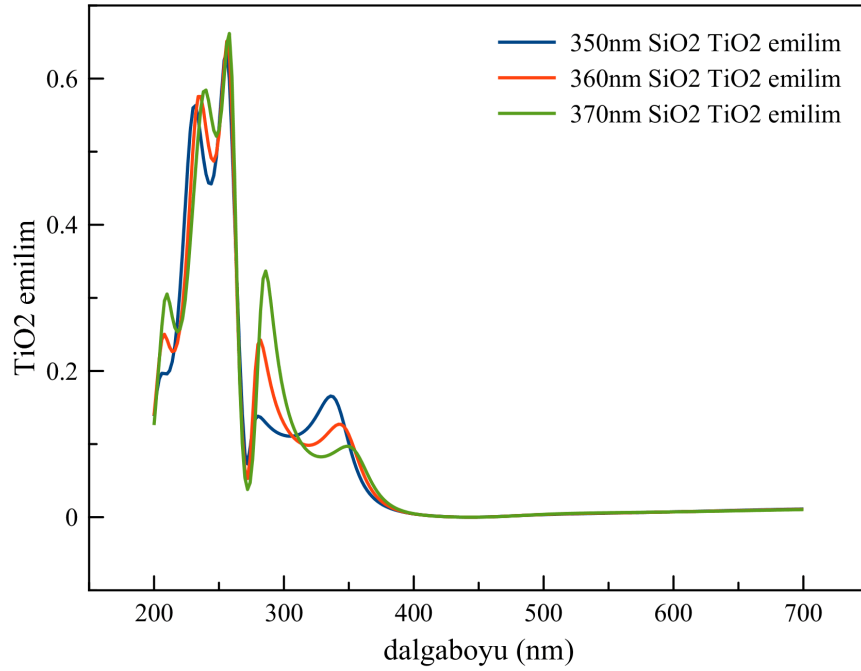
**Şekil 46:** TiO<sub>2</sub> eklendikten sonra benzetimi yapılan yapının basit bir çizimi

Yapıda safir alttaş ile SiO<sub>2</sub> ayırıcı tabakaları arasında 25 nm kalınlıkta TiO<sub>2</sub> katmanı eklenmiştir. Şimdiye kadar yapılan çalışmalarda bu kalınlıktaki filmin ilgilendirilen dalgalarda gelen ışığın yaklaşık %90'ını emdiği bilinmektedir. Bu şekilde ince bir aktif katman ile daha düşük gürültü ve daha yüksek hız performansı elde etmek mümkün olabileceği öngörülmektedir. Benzetim



sonucunda TiO<sub>2</sub> katmanındaki soğurma incelenecek ve deneysel çalışmada ölçülen fotocevap ile ilişkilendirilecektir.

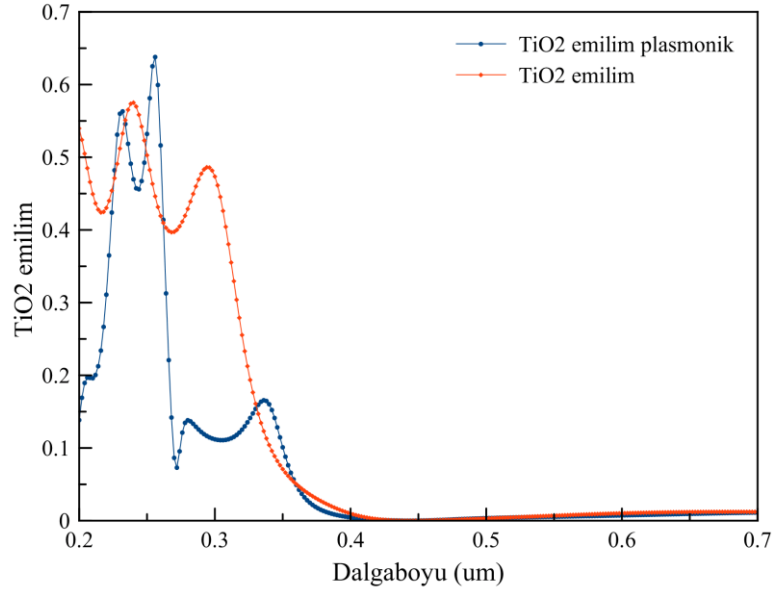
Yukarıda verilen yapı özetlenirse, safir alttaşı üzerinde, kalınlığı 350, 360 ve 370 nm olan SiO<sub>2</sub> tabakası üzerinde çapları 70 nm, yükseklikleri 50 nm, periyodları ise 180 nm olan Al nanosilindirlerin bulunduğu yapının benzetim sonucu aşağıdaki Şekil 47'de verilmiştir.



**Şekil 47:** SiO<sub>2</sub> katmanı kalınlığı değişirken TiO<sub>2</sub> katmanındaki soğurmanın değişimi

Şekilden de görüleceği gibi SiO<sub>2</sub> katmanının kalınlığı 350 nm olduğunda yaklaşık 300 nm dalgaboyunda görülen dip, katman kalınlığı arttıkça kırmızıya doğru kaymaktadır. Bu sonuçlara göre 350 nm SiO<sub>2</sub> kalınlığı optimum görünmektedir.

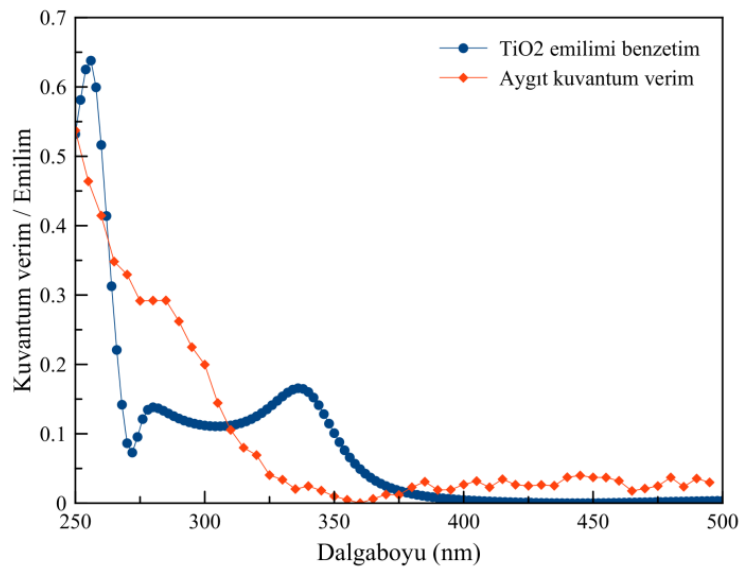
Optimum olduğu düşünülen yapı tespit edildikten sonra bir de plazmonik noktalar yapı üzerinde değilken, benzetim yapılmış ve plazmonik yapının varlığında ve yokluğunda TiO<sub>2</sub> katmanındaki soğurma karşılaştırılmıştır. Şekil 48'de bu benzetimin sonucu verilmektedir.



**Şekil 48:** Nanosilindirlerin varlığında ve yokluğunda TiO<sub>2</sub> katmanındaki soğurma grafiği

Grafikten görüleceği gibi plazmonik nanosilindirlerin eklenmesi ile belirgin bir filtrelenme sağlanmış ve dedektör UVC bandında daha seçici algılama yapar hale getirilmiştir.

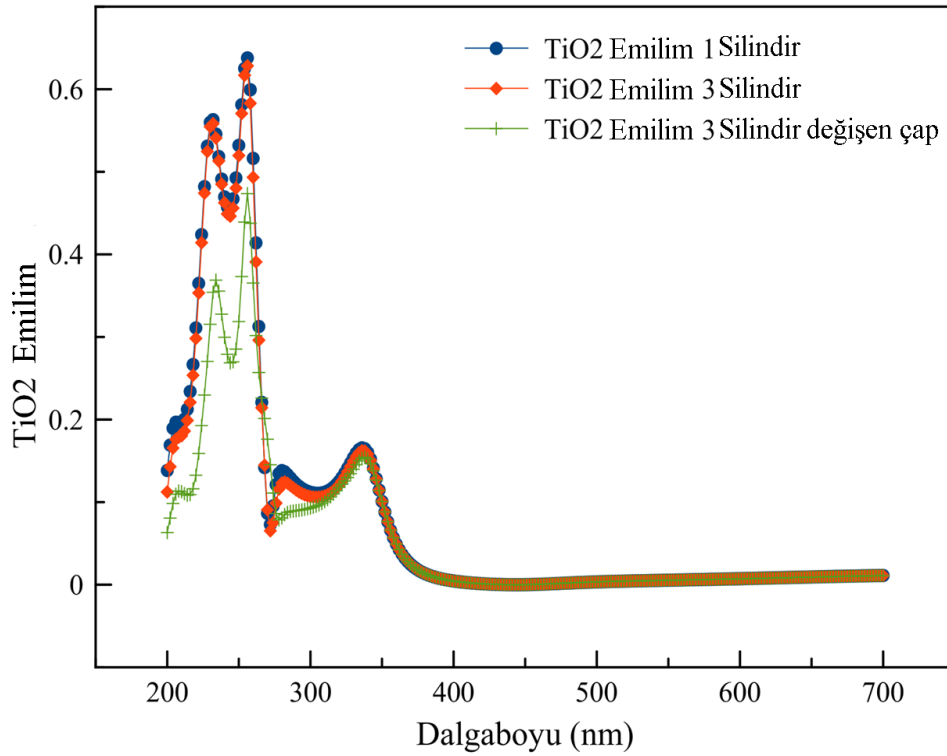
Bu aşamada tasarlanmış olan birinci yapı ile bir aygıt üretimi yapılmıştır. Aygıt üretimi hakkındaki detaylar ileriki bölümlerde detaylandırılacaktır. Üretimi takiben yapılan ölçümlerde elde edilen izgesel fotocevap eğrisinin karşılaştırıldığı grafik aşağıdaki Şekil 49'da gösterilmektedir.



**Şekil 49:** Benzetim sonucu ile üretilmiş aygıtın kuvantum verimini karşılaştıran grafik

Görüldüğü gibi benzetim ile deney arasında belirgin bir fark görülmektedir. Bu farkı anlayabilmek için tekrar benzetimlere dönülmüş ve deneysel düzensizliklerin veya farkların yarattığı sonuçlar benzetime dahil edilmeye çalışılmıştır. Bu amaçla öncelikle deneysel çalışmada nanosilindirlerin çaplarınının hep aynı olmaması, silindirden silindire gözlenen birkaç nm çap farklılıklarının benzetime yansıtılmasına karar verilmiştir. Bunun için tek silindirin benzetildiği yapıya 2 silindir daha eklenerek, bunların çapları +/- 5 nm değiştirilmiş ve hesaplama tekrarlanmıştır. Elde edilen sonuç grafiği Şekil 50'de verilmektedir.

Şekilden de görüldüğü üzere tek silindir ile çapları eşit 3 silindirin benzetim sonuçları çok büyük ölçüde çakışmaktadır. Ancak çapları değişen silindirlerin benzetim sonucu bunlardan farklılık gösterse de deneysel sonuç ile yine örtüşmemektedir.

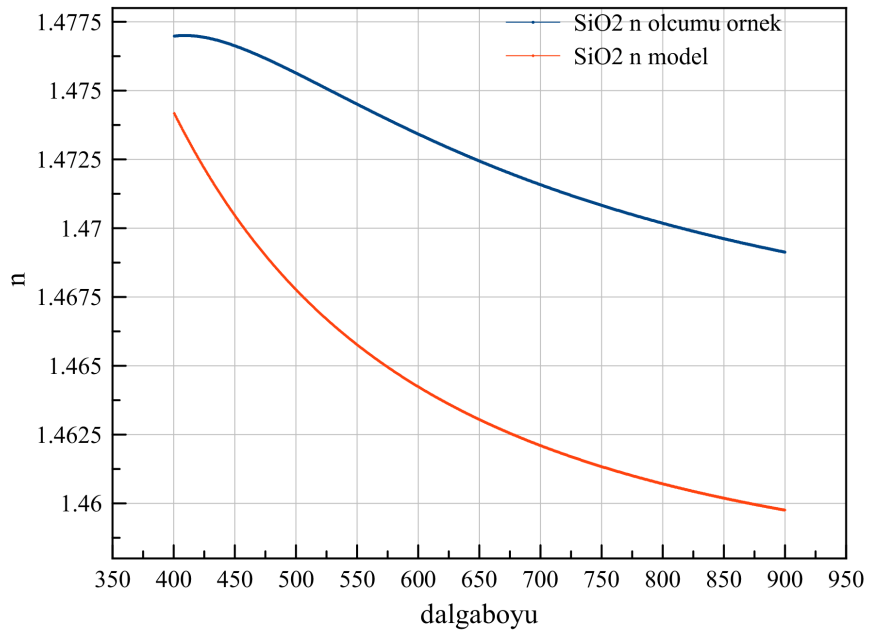


**Şekil 50:** Çapları değişen 3 silindirin benzetim sonucu

Bu aşamada 2 boyutlu benzetimler ile deneysel sonuçların uyumun iyileştirilemeyeceğine ve benzetimlerin 3 boyutlu yapılmasına karar verilmiştir. Ancak hesaplamaların koşulmasında önce kaplanan SiO<sub>2</sub> filminin simulasyonda kullanılan modeli ile deneyde kaplanan filmin n ve k değerleri arasındaki farkın da

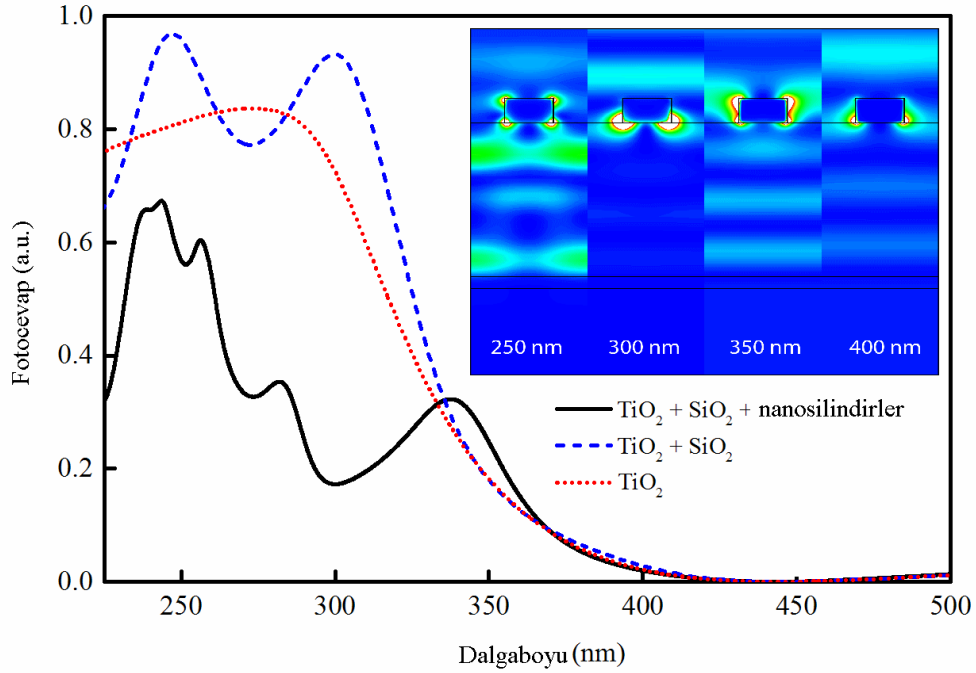
incelenerek, gerekli ise deneysel n ve k değerlerinin benzetime girilmesi kararlaştırılmıştır.

Safir alttaşların kaplanması sırasında bu örnekler ile beraber kaplanan bir Si alttaş üzerindeki SiO<sub>2</sub> filmin n,k değerleri 400 – 900 nm dalgaboyu aralığında Filmetrics marka reflektometre ile ölçümleri yapılmıştır. Aşağıdaki şekil 51’de benzetim modelindeki kırılma indisi ile deneysel olarak ölçülen kırılma indisinin karşılaştırılması verilmektedir.



**şekil 51:** SiO<sub>2</sub> filmi kırılma indisi için deneysel ve model verilerinin karşılaştırılması

Grafikten de görüldüğü gibi deneyde elde edilen SiO<sub>2</sub> filmin kırılma indisi modelden bir miktar yüksektir. Bu veri benzetim programına girilmiş, uygun bir eğri ile 250 nm ye kadar uygun bir eşleştirme yapılmış ve simulasyonda kullanılmıştır. Ayrıca simulasyon 3 boyutlu olarak yeniden düzenlenerek çalıştırılmış ve tüm yapı, safir / 25 nm TiO<sub>2</sub> / 360 nm SiO<sub>2</sub> katmanları ve sadece safir /25 nm TiO<sub>2</sub> katmanlarının simulasyonları yapılarak karşılaştırılmış ve elde edilen sonuçlar aşağıdaki şekil 52’de verilmiştir.



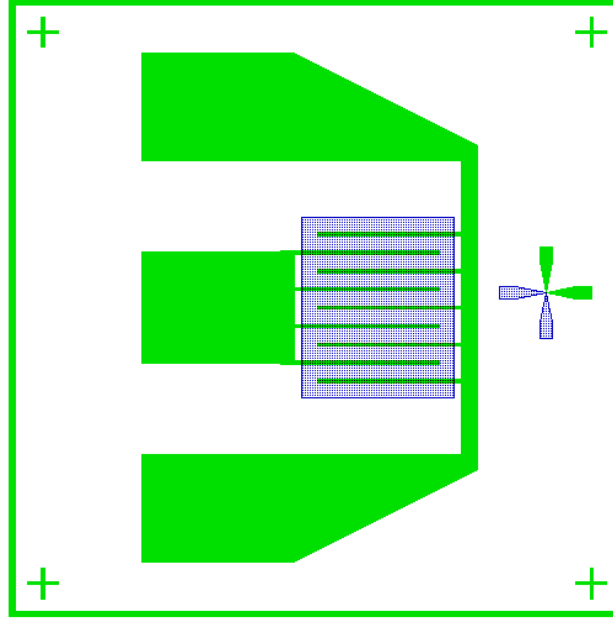
**Şekil 52:** 3 boyutlu benzetim sonuçları

Grafik incelendiğinde sadece  $\text{TiO}_2$  ince film üzerine  $\text{SiO}_2$  katmanı eklendiğinde, yansıma özelliklerinin değişiminden kaynaklanan izgesel değişim gözlenirken, plazmonik silindirler eklendiğinde belirgin bir filtreleme davranışı elde edilmektedir. Şekilde gösterilen alan profili ise rezonans dalgaboyuna yakın dalgaboyu olan 300 nm de  $\text{TiO}_2$  üzerine hiç elektrik alan ulaşmadığını ancak rezonans dışında  $\text{TiO}_2$  ince filme elektrik alanının ulaşabildiği görülmektedir.

Benzetimlerin sonucunda beklendiği gibi çalışan aygıtın üretiminin yapılarak karakterize edilmesi aşamasına geçilmiştir.

### 3.2. Nanoplazmonik $\text{TiO}_2$ MSM Fotodedektörün Üretim Süreci

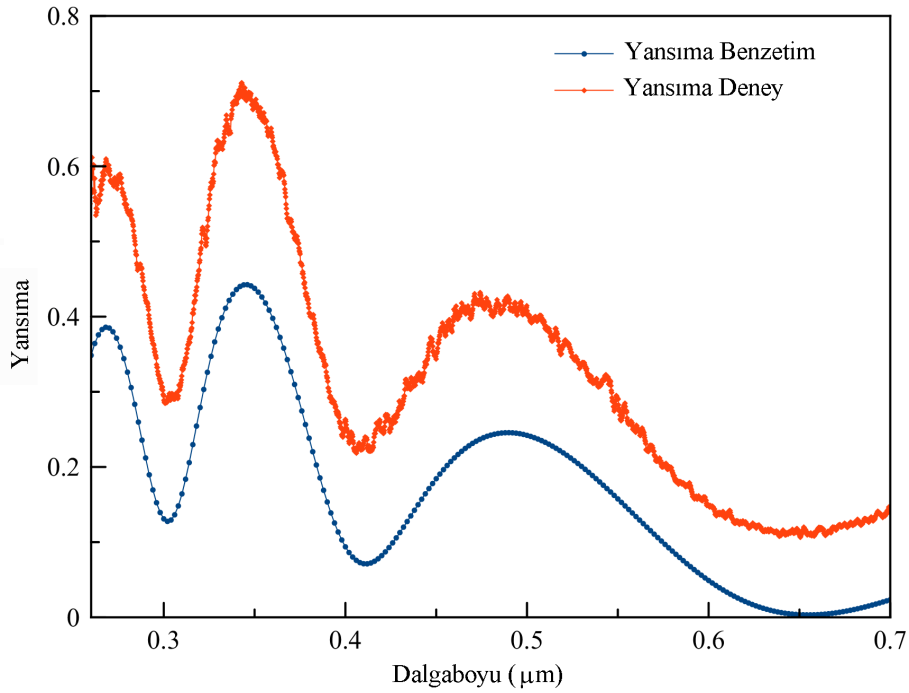
MSM fotodedektörün üretim süreci 2.2.2 bölümünde ayrıntılı şekilde anlatılmıştı. Tasarımda belirlenmiş olan 25 nm kalınlıktaki  $\text{TiO}_2$  ince film daha önce anlatıldığı şekilde safir alttaşların üzerine kaplanmış ve daha sonra yine fotolitografi yöntemi ile aşağıda şekli verilmiş olan kontak deseni ince film üzerine geçirilmiş ve yine daha önce anlatıldığı şekilde 100 Å Pt ve 1000 Å Au metalleri kaplanarak aseton içerisinde kaldırma işlemi yapılmıştır.



**Şekil 53:** Nanoplazmonik TiO<sub>2</sub> MSM fotodedektörün kontak deseni (yeşil alanlar) ve aygıt adacağı deseni (mavi noktalı alanlar)

Kontak genişlikleri fotolitografi ile kolay tanımlanabilecek minimum genişlik olması açısından 2  $\mu\text{m}$  olarak tanımlanmıştır. Kontak aralıkları ise hem kontak alanlarının gölgelemesini azaltmak için geniş ancak ışık düştüğünde oluşan taşıyıcıların rekombine olmadan toplanabileceği kadar dar, ayrıca uygun elektrik alan şiddeti yaratabilecek aralıkta olan 10  $\mu\text{m}$  olarak seçilmiştir. Aygıt aktif alanı, karakterizasyon sırasında fiber prob ile getirilen ışığın tamamının aktif alan içersine düşebileceği minimum alan dikkate alınarak 100  $\mu\text{m}$  x 120  $\mu\text{m}$  olarak seçilmiştir. Aygıtın sol tarafında optik litografi işleminde kontak ve aktif alan maskelerinin birbirine hizalanabilmesi için bir hizalama işareti yerleştirilmiştir. Nanoplazmonik yapının EBL (Elektron Demeti Litografisi) ile örnek yüzeyine geçirilmesi için maskedeki aygıtlar 400  $\mu\text{m}$  karelik alanlar içersine yerleştirilmiştir. Bu alan istenilen ebatlardaki nanosilindirlerin elde edilebilmesi için uygun en büyük alandır. EBL sisteminin özelliği gereği bu alan büyüdükçe litografi çözünürlüğü azaldığından daha büyük alanlarda çalışmak tercih edilmemektedir. Bu alanın dış çizgilerini belirleyen çerçevenin hemen içindeki “ + ” şekilli hizalama işaretleri ise nanosilindir deseninin EBL ile örnek üzerine işlenirken hizalanabilmesi için yerleştirilmiştir.

Kontakt kaplama işleminin hemen ardından örnek yüzeyine ayırıcı tabaka olan SiO<sub>2</sub> katmanını yine RF magnetron saçtırma yöntemi ile kaplanmıştır. Kaplama sırasında yine 5.0x10<sup>-6</sup> mbar taban vakum seviyesine ulaşıldıktan sonra 7 sccm Ar gazı akışı altında 2.2x10<sup>-3</sup> mbar basınçta 250 W RF gücünde yaklaşık 0.5 Å/s kaplama hızı ile SiO<sub>2</sub> ayırıcı tabaka kaplanmıştır. Bu kaplamanın ardından Safir / 25 nm TiO<sub>2</sub> / ve 350 nm SiO<sub>2</sub> örneğin yansıma ölçümleri yapılmış ve benzetimler ile karşılaştırılmıştır. Aşağıdaki Şekil 54'de bu ölçüm sonucu ve benzetim sonucu verilmektedir.



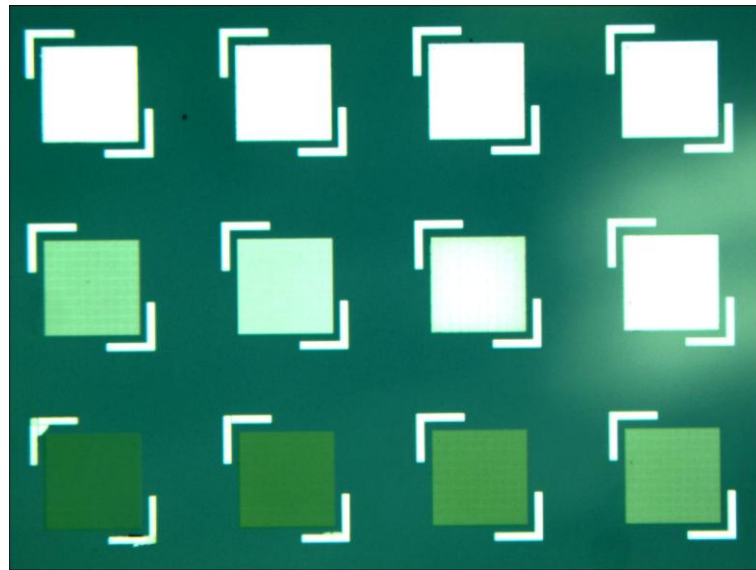
**Şekil 54:** Safir / 25 nm TiO<sub>2</sub> / ve 350 nm SiO<sub>2</sub> kaplaması için yansıma ölçümünün benzetim ile karşılaştırılması

Şekilden görüleceği gibi iki grafik yaklaşık %22'lik bir ofset ile üst üste oturmaktadır. Bunun sebebi benzetim süresinin kısaltılması amacı ile 330 µm kalınlıktaki alttaşın tamamının benzetim içerisine katılmamasıdır. Bu safirin alt yüzeyinden yansıyan ışığı hesaba katmamak anlamına gelmektedir.

Bu ölçümün beklendiği gibi çıkmasının ardından aygıt adacığın maskesi ile yine litografi yaparak, aygıtın aktif alanı dışındaki SiO<sub>2</sub> ve TiO<sub>2</sub> ince filmler, 60 sccm CHF<sub>3</sub> gaz akışı ile 80 W RF gücü, 200 W ICP gücü ve 0.4 Pa kazan basıncı ile 220 s süre ile aşındırılmış ve aygıt nanosilindir üretimine hazırlanmıştır.

Nanosilindir üretimi yapılmadan önce doğru ebatların elde edilebilmesi için bir doz testi yapılması gerekmektedir. EBL ile silindirik yapılar “dot exposure” denilen elektron demetinin hareket ettilmeden kullanıcı tarafından belirlenen bir süre ile EBL rezisti üzerine tutulması ile yapılmaktadır. Yazım işlemi başlamadan hemen önce ölçülen elektron demeti akımı ve pozlama süresinin çarpımı doz değerini vermektedir. Pozlandırma işleminde reziste uygulanan doz silindirlerin çapını belirlemektedir. Bu nedenle uygun dozun hassas bir şekilde belirlenmesi kritiktir.

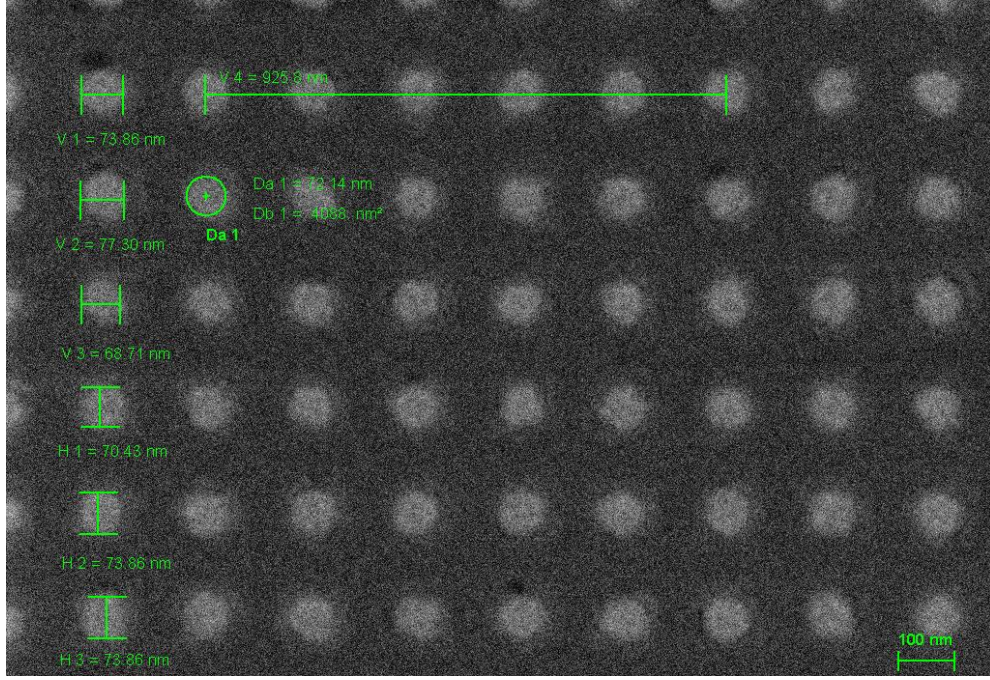
Bu amaçla safir alttaşı PMMA 950K A4 EBL rezisti 6000 dev/dk hızla kaplanmış, 180°C sıcaklıkta rezist pişirilmiş, pozlama işlemi sırasında yüzeyin yüklenmesine engel olmak üzere 5000 dev/dk hızla “Aquasave” iletken polimeri ile kaplanmış ve EBL yapmak üzere Raith Eline sistemine yerleştirilmiştir. Bu sistemin programı ile benzetimlere uygun şekilde 180 nm periyodlu olarak tasarlanan nokta yapıları rezistin veri dökümanında verilen nominal dozun %10’undan %150’sine kadar değişen dozlarda 400 µm yazım alanı, 20 µm demet açıklığı, 10 kV hızlandırma gerilimi ve 29.5 mm çalışma yüksekliği ile pozlandırılmış, örnek 45 s süre ile 1:3 MIBK (Metil İzobütil Keton):İzopropil alkol ile hazırlanan geliştirme çözeltisinde banyo edilmiş ve 30 s izopropil alkol ve 1 dk akan DI su içerisinde durulanmış ve azot ile kurutularak kaplama işlemine hazır hale getirilmiştir. Hemen ardından örnek elektron demeti buharlaştırma yöntemi ile 50 nm Al metali kaplanmış ve yine aseton içerisinde kaldırma işlemi yapılmıştır. Bu aşamada örnek yüzeyinden alınan bir optik mikroskop fotoğrafı Şekil 55’de verilmektedir.



**Şekil 55:** Doz testi sonrası örneğin optik mikroskop fotoğrafı



Şekilde görüldüğü üzere dozun en düşük olduğu sol alt köşede daha koyu görünen litografi yapılmış alan doz arttıkça daha parlak bir görünüm almaktadır. Bu desenler elektron mikroskobu ile incelendiğinde silindir çaplarının artışı açıkça gözlenmiştir. Aşağıdaki Şekil 56'da 0.036 pC doz ile elde edilen nanosilindirlerin bir elektron mikroskobu fotoğrafı görülmektedir.



**Şekil 56:** Doz testinde elde edilen tasarım ile uyumlu nanosilindirlerin elektron mikroskobu fotoğrafları

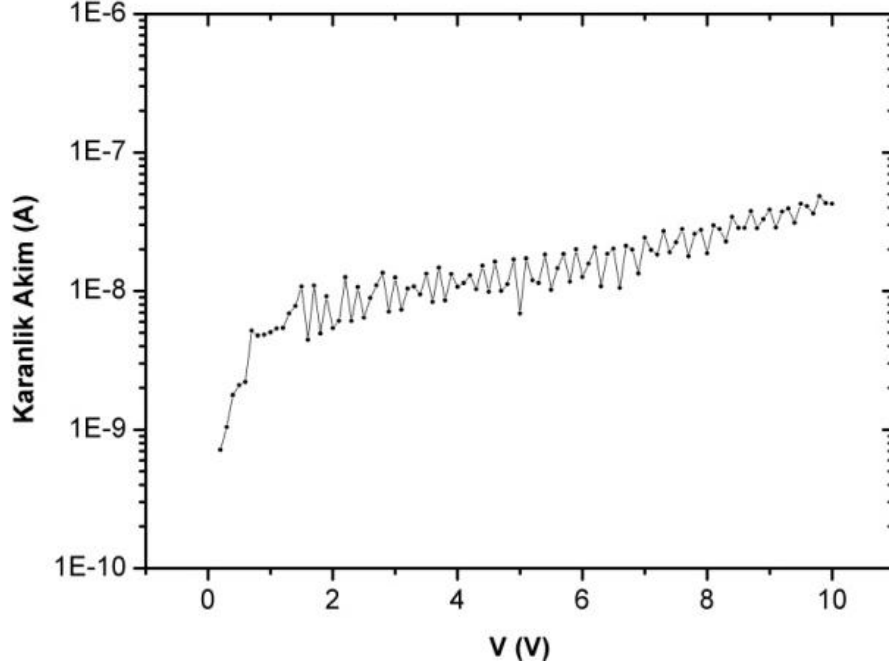
Şekilden de görüleceği gibi silindirlerin ortalama çapları 70 nm ve periyodu ise yaklaşık 185 nm olarak üretilmiştir. Periyod ile ilgili düzeltme fotodedektörün üretiminde yapılmıştır.

Doz testinden elde edilen bilgi ile asıl örneğin fabrikasyonuna devam edilmiştir. Yukarıda anlatıldığı şekilde örnek PMMA 950K rezisti ile kaplanmış, elektron demeti litografisi doz testinde elde edilen doz kullanılarak yapılmış ve örnek fabrikasyonu 50 nm Al kaplama ve kaldırma işlemleri ile bitirilmiştir. İşlem sırasında birden fazla aygıtta nanosilindir yapıları işlenmiş ve bu aygıtlarda doz 0.033 ile 0.039 pC arasında değiştirilmiştir.

Nanosilindirlerin üretiminin hemen ardından aygıtın karakterizasyonu çalışmalarına başlanmıştır.

### 3.3. Sonuçlar ve Tartışma: Nanoplazmonik TiO<sub>2</sub> MSM Fotodedektör

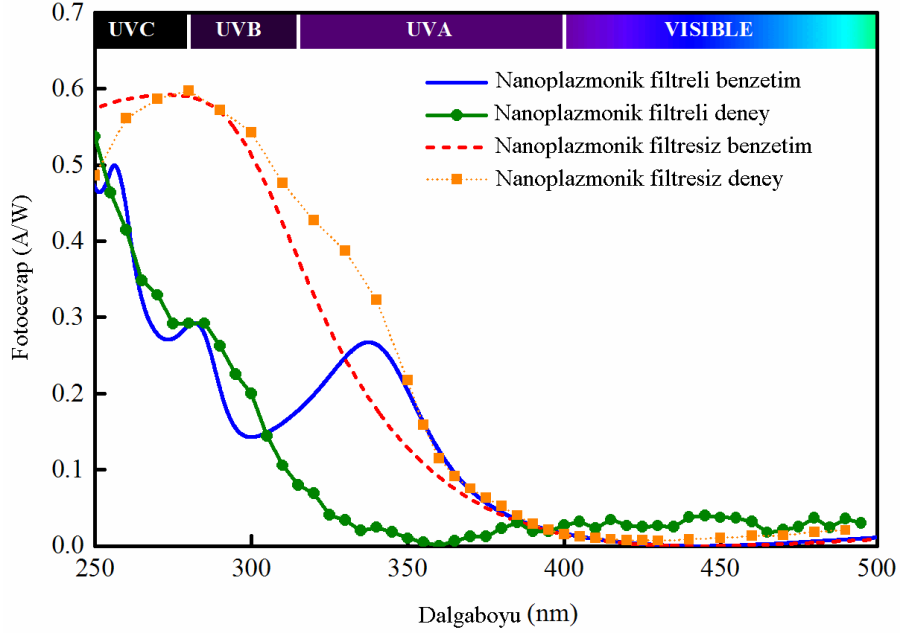
Aygıt ile yapılan ilk ölçüm karanlık akım ölçümü olmuştur. 10 V'a kadar yapılan ölçüm sonucu aşağıdaki Şekil 57'de gösterilmektedir.



**Şekil 57:** Nanoplazmonik filtreli fotodedektörün karanlık akım ölçümü

Ölçülen karanlık akım 10<sup>-8</sup> A mertebesinde bulunmuştur. Bu akım daha önce TiO<sub>2</sub> MSM fotodedektörlerden elde ettiğimiz karanlık akım değerine göre oldukça yüksektir. Bunun sebebi SiO<sub>2</sub> ayırıcı tabakanın yeterli kalitede olmaması ile birlikte nanosilindirlerin de yüzeye işlenmesi ile aygıt yüzeyinde sızıntı akımının artışı olduğu düşünülmektedir.

Karanlık akım ölçümünü takiben aygıt ile izgesel fotocevap ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Nanoplazmonik yapı olmayan aygıtın izgesel fotocevap ölçümü, nanoplazmonik yapılı aygıtın fotocevap ölçümü ve bu yapıların benzetim sonuçlarını gösteren grafik Şekil 58'de verilmiştir.



**Şekil 58:** Nanoplazmonik filtreli ve filtresiz aygıtlar için izgesel fotocevabın ölçüm ve benzetim sonuçlarının karşılaştırılması

Sonuçlara göre başlangıç motivasyonumuz olan güneş körü bir fotodedektör yapılamamış olsada nanoplazmonik filtreli ilk UV fotodedektör çalışması olması, bu filtre ile UVB bandındaki fotocevabın %60 mertebesinde düşürülmüş olması ve tepe algılama dalgaboyunun UVC bandına kaydırılmış olması gibi literatüre yeni olan sonuçlar elde edildiği için bu çalışma bir yayına dönüştürülmüş ve "Optics Express" dergisinde yayınlanmıştır.

## 4. ZnO İNCEFİLM FOTODEDEKTÖRLER İLE YAPILAN ÇALIŞMALAR

### 4.1. ZnO İncefilmlerin RF Magnetron Saçtırma İle Kaplanması

Tez çalışması kapsamında iki farklı laboratuvarında hazırlanmış ZnO ince filmler kullanılmıştır. Bu örneklerden bir kısmı Hacettepe Üniversitesi Fizik Mühendisliği Bölümü'nde SNTG laboratuvarlarında bulunan RF magnetron saçtırma sisteminde; diğer kısmı ise Bilkent Üniversitesi Nanoteknoloji Araştırma Merkezinde bulunan RF magnetron saçtırma sisteminde üretilmiştir. Şekil 59'da bu iki sistemin fotoğrafları bulunmaktadır.



a) Hacettepe Üniversitesi SNTG laboratuvarındaki RF magnetron saçtırma sistemi



b) Bilkent Üniversitesi Nanotam'da bulunan RF magnetron saçtırma sistemi

**Şekil 59:** ZnO ince filmlerin büyütülmesinde kullanılan RF magnetron saçtırma sistemleri

SNTG laboratuvarlarında büyütülen ince filmler kuvarz, Si ve Safir altaşlar kullanılarak üretilmiştir. Altaşlar öncelikle aseton ve izopropil alkol içerisinde ultrasonik temizleyicide 5 dk süre ile temizlenmiş, DI su ile durulandıktan sonra azot püskürtülerek kurutulmuş ve 120 °C sıcaklıktaki sıcak tabla üzerinde yüzeye tutunmuş olan su temizlendikten sonra film büyütme işlemi için SNTG laboratuvarına götürülmüştür. Altaşlar kaplama sistemine yüklendikten sonra sistem taban vakum seviyesi olan  $1 \times 10^{-5}$  Torr vakum seviyesine kadar vakumlandıktan sonra sisteme Ar gazı sızdırılarak temizlik işlemi yapılmıştır. Altaşların kaplanmaya başlanmasından önce 5 cm çaplı ZnO hedef 20 W RF gücü ile 10 dk süre ile temizlenmiştir. Örnekler 50 W RF gücünde, 40 mTorr Ar ve 10 mTorr O<sub>2</sub> basıncı altında, oda sıcaklığında, 1 saat süre ile ZnO film büyütülerek

kaplama işlemi bitirilmiştir. Sistem atmosfere açılarak örnekler sistemden çıkarılmıştır.

Bilkent Üniversitesi Nanotam laboratuvarlarında üretilen ince filmler için de altaş hazırlığı yukarıda anlatıldığı gibi örneklerin kesimi ve temizlenmesi ile başlamaktadır. Burada büyütülen ince filmler termal olarak oksitlenmiş Si altaşlar üzerine yapılmıştır. 4 inç çaplı Si altaş önce standart RCA temizlik prosedüründen geçirilip kurutulduktan sonra ıslak oksidasyon işlemi için oksitleme fırınına yüklenmiştir. Fırın, 2 l/dk Azot gazı akışı altında, 10°C/dk hızla 1100°C sıcaklığa ısıtılmıştır. Bu süre içerisinde DI su 95°C sıcaklığa ısıtılmış ve fırın hedef sıcaklığa ulaştıkta sonra azot gazı, ısıtılmış DI su içerisinden geçirilerek içeriye su buharı girmesi sağlanmıştır. Bu koşulda 200 dk süre ile fırına su buharı ile birlikte azot gazı verilmiş ve süre sonunda Azot gazının su içerisinden geçişi durdurularak fırın yine 10 °C/dk hızla 200 °C sıcaklığa soğutulmuştur. Bu sıcaklığa ulaşıldığında fırın kapağı açılmış ve oksitlenmiş altaş frından çıkartılmıştır. İşlem sonrasında optik yansıma yöntemi ile oksit kalınlığı 750 nm olarak ölçülmüştür.

Altaş daha sonra 10 mm x 10 mm ebatlarında kesilmiş; yine aseton, izopropil alkol ve DI su ile temizlenerek kurutulmuş, 120 °C sıcak tabla üzerinde yüzeye tutunmuş olan sudan arındırılmış ve hemen kaplama sistemine yerleştirilmiştir. Bu örnekler ile birlikte sisteme kuvarz, cam ve safir örnekler de yüklemiş ve oksitlenmiş Si örnekler ile beraber kaplamaları yapılmıştır.

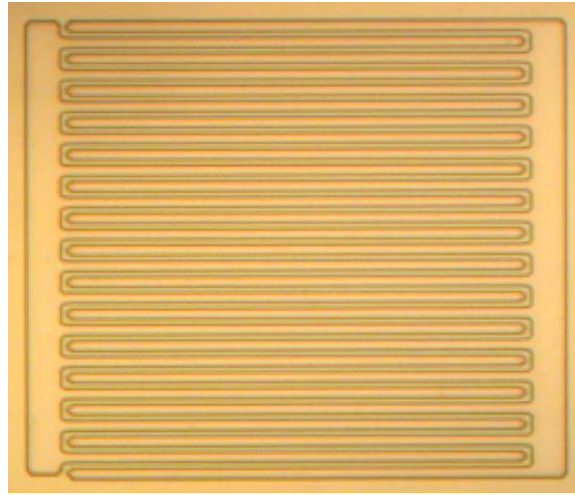
Kapalma sistemi  $2.5 \times 10^{-6}$  mbar vakum seviyesine ulaştığında sisteme sırasıyla 6/25 kısmi basınç oranı ile  $O_2/Ar$  gazları sızdırılmış ve kazan basıncı 1.85 mbar seviyesine getirilmiştir. 80 W RF gücü kullanılarak önce 15 dk süre ile 75 mm çaplı ZnO saçtırma hedefi temizlenmiş, daha sonra 0.5 Å/s hızla 150 nm kalınlıkta ZnO ince film büyütülmüştür. Sistemin vakumunun kırılarak örneklerin alınmasından sonra örneklerin karakterizasyonu çalışmalarına geçilmiştir.

#### **4.2. ZnO MSM Tipi Fotodedektör Üretimi**

Kaplama sonrası karakterize edilen ince film örnekler ile yine MSM tipi fotodedektör fabrikasyonu işlemlerine başlanmıştır. Aşağıda öncelikle Hacettepe SNTG laboratuvarlarında üretilen ZnO ince filmler ile üretilen aygıtların üretim süreçleri ve daha sonra Nanotam'da üretilen ince filmler üzerine yapılan MSM fotodedektör aygıtları üretim süreçleri anlatılmaktadır.

Hacettepe SNTG laboratuvarında üretilen ZnO ince film kaplı örnekler karakterizasyon sürecinde kirlenmiş olmaları ihtimaline karşı yukarıdaki bölümlerde anlatıldığı şekli ile aseton, izopropil alkol ile temizlenmiş, DI su ile durularak Azot gazı ile kurutulmuş, 120 °C sıcak tablada yüzeye tutunan su moleküllerinden arındırıldıktan sonra kontak litografisi yapmak üzere döndürerek kaplama yöntemi ile fotorezist kaplanmıştır.

Örnek, kaplama sistemine yerleştirildikten sonra üzerine AZ5214 fotorezisti damlatılarak bütün yüzeyine yayılmış, sonrasında 7500 dev/dk hızla döndürülerek kaplama yapılmıştır. Örnekler 110 °C sıcaklıktaki sıcak tabla üzerinde 60 s süre ile pişirildikten sonra 2.2.1 bölümünde ayrıntıları verilmiş olan fotomaske kullanılarak geniş bantlı UV ışık ile 12 mJ/cm<sup>2</sup> doz ile pozlandırılmış, ardından yine 110 °C sıcaklıktaki sıcak tabla üzerinde 120 s süre ile tersleme pişirmesi yapılmış ve yine geniş bantlı UV ışık ile 24 mJ/cm<sup>2</sup> doz ile pozlandırılmıştır. Örnek 1:4 AZ400K:DI su çözeltilisinde geliştirildikten sonra mikroskop ile incelenmiştir. Litografi parametreleri safir alttaşlar için optimize olduklarından litografi sonrası safir alttaşlı örnekler için oldukça iyi desenler elde edilmiştir. Diğer örneklerde ise kabul edilebilir desenler elde edilmiştir. Aşağıdaki Şekil 60'da safir alttaşlı örnekten alınmış bir mikroskop fotoğrafı gösterilmektedir.

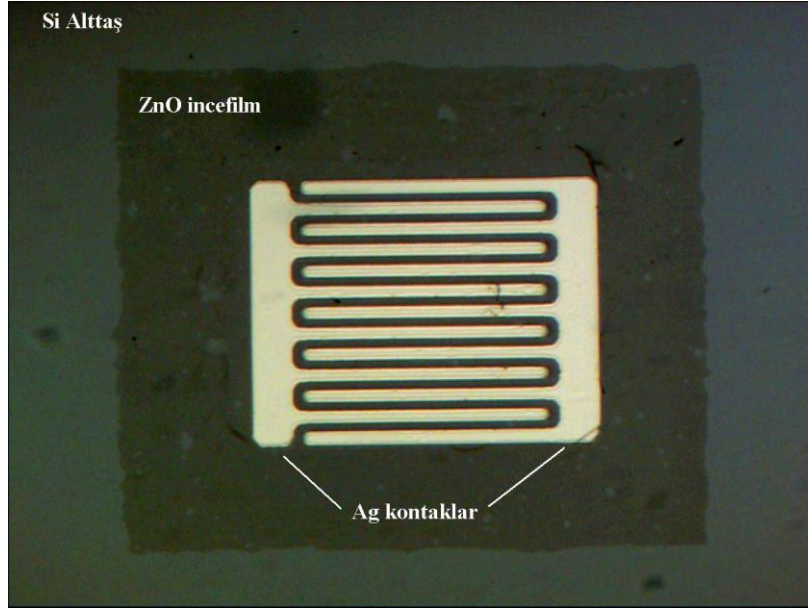


**Şekil 60** : Safir alttaş üzerine büyütülmüş ZnO ince film örneğine kontak litografisi yapıldıktan sonra çekilmiş bir mikroskop fotoğrafı

Litografi işlemi sonrası örnekler elektron demeti buharlaştırma sistemine yüklenmiş,  $5 \times 10^{-6}$  mbar taban vakum seviyesine ulaşıldıktan sonra örneklere 1000 Å kalınlıkta Ag (Gümüş) kaplaması yapılmıştır. Kaldırma işlemi sonrası kontak desenleri yine mikroskopta incelenmiş, fotomaskede çizilmiş olan aygıtların

tamamı uygun görünmesede ölçüm yapılabilecek aygıtlar olduğu görülmüş ve fabrikasyona devam edilmiştir.

Bu işlemin ardından örnekler yine AZ5214 fotorezisti ile 7500 dev/dk hızla kaplanmış, aygıt adacığı fotomaskesi kullanılarak 24 mJ/cm<sup>2</sup> dozla pozlandırılmış ve yine AZ400K çözeltisinde geliştirilmiştir. Aygıt adacığı aşındırması ıslak işlem yöntemi ile aşındırılmıştır. Kaplanan ince filmin kalınlığı ve aşınma hızı konusunda bir bilgi olmadığı için seyreltik bulunan %3'lük HCl:DI su çözeltisi hazırlanmıştır. Bu çözeltide aygıtlar 3 s süre ile bekletilmiş ve ardından yapılan mikroskop incelemesinde filmin tamamının aşındığı görülmüştür. Şekil 61'de aşındırma sonrası Si alttaşı örnekten alınmış bir mikroskop görüntüsü verilmektedir.



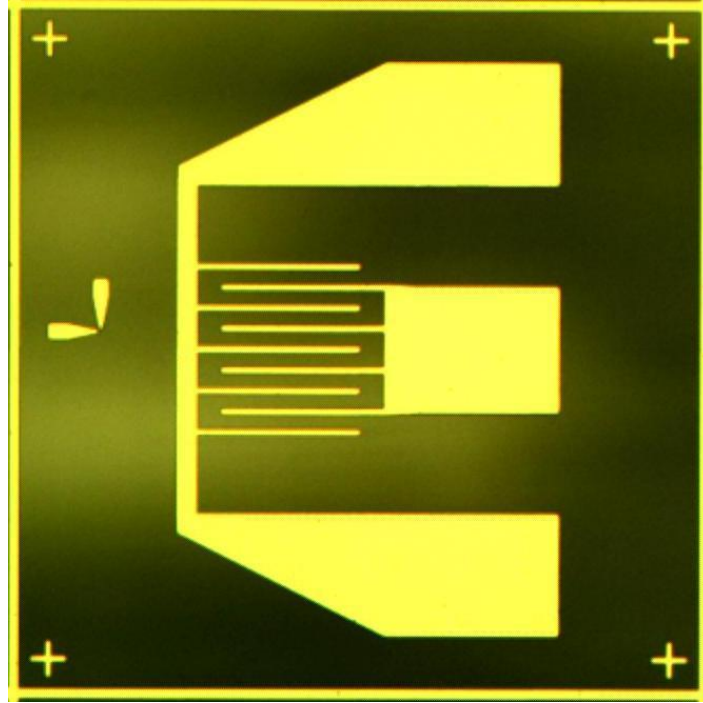
**Şekil 61:** Islak aşındırma ile aygıt adacığı yapılmış olan Si alttaşı üzerine ZnO örneğinin mikroskop fotoğrafı

Şekilde aygıt adacığı kenarlarının girintili çıkıntılı olduğu görülmektedir. Bu aşındırma işleminin olması gerektiğinden daha uzun olduğunu göstermektedir. Bu kadar seyreltik asit içerisinde bile ince filmin aşınma hızı oldukça yüksektir. Bu işlemin ardından örnekte ZnO ince film kalınlığı ölçülmüş ve 55 nm olarak bulunmuştur. Bu kalınlık daha sonra yapılan ince film büyütmelerinde kalibrasyon bilgisi olarak kullanılmıştır.

Bu ölçüm ile aygıtların fabrikasyonu tamamlanmış ve bu aygıtlar ile karakterizasyon çalışmalarına başlanmıştır.

Bilkent Üniversitesi Nanotam'da üretilen ZnO ince film örneklerine ise sadece tek adımlı bir fabrikasyon yapılmıştır. Fabrikasyonda 3.2 bölümünde gösterilmiş olan fotomaske kullanımıştır.

Örnek 10000 dev/dk hızla AZ5214 fotorezisti ile yaklaşık 1 µm kalınlıkta kaplanmıştır. 14.5 mJ/cm<sup>2</sup> dozla kontak fotomaskesi ile pozlandırıldıktan sonra 120 s sıcak tablada tersleme pişirmesi yapılmış ve 30 mJ/cm<sup>2</sup> dozla maskesiz pozlandırıldıktan sonra 30 s süre ile AZ400K / DI su çözeltisinde geliştirilmiştir. Örnek elektron demeti buharlaştırma sisteminde sırasıyla 100 Å / 1000 Å kalınlıklarda Pt / Au kaplanmış ve aseton içerisinde kaldırma işlemi yapılmıştır. Üretilen fotodedektörün bir fotoğrafı Şekil 62'de verilmektedir.



**Şekil 62:** Nanotam'da üretilmiş ZnO ince film örneğine aygıt fabrikasyonu sonrası alınan bir mikroskop fotoğrafı

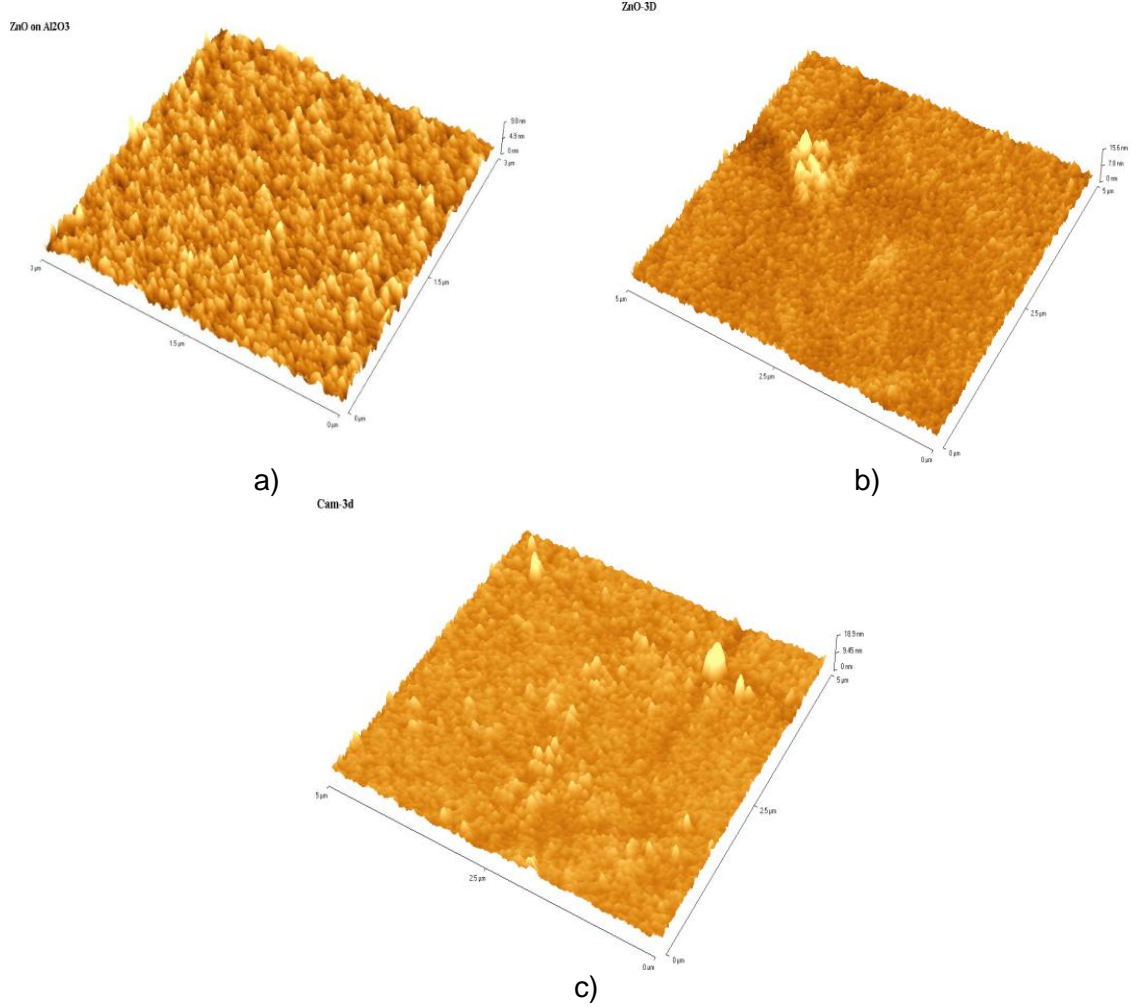
Aygıt üretiminin hemen ardından aygıt karakterizasyonu çalışmalarına başlanmıştır.

### 4.3. Sonuçlar ve Tartışma: ZnO İnce Filmler

#### 4.3.1. ZnO İnce Filmlerin Karakterizasyonu

Hacettepe SNTG laboratuvarında büyütülen örneklere AFM ile yüzey topografisi ölçümleri yapılmıştır. Aşağıdaki Şekil 63'de elde edilen AFM görüntüleri verilmektedir.

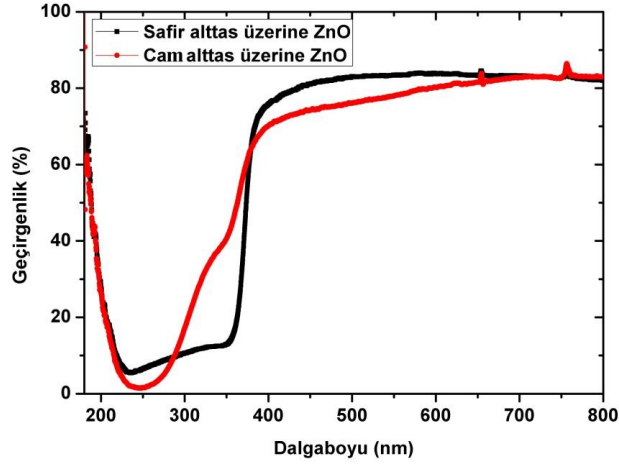




**Şekil 63:** ZnO ince film kaplı örneklerden alınan AFM görüntüleri. a) Safir, b) Si ve c) Cam örnek üzerine büyütülmüş örnekler.

Şekil 63 a'da görülen safir alttaş üzerine büyütülmüş ZnO örnekte maksimum ve minimum yükseklik farkı 9.8 nm dir. Alan için RMS pürüzlülük 0.87 nm olarak ölçülmüştür. Yüzey pürüzlülüğü düşük görünen filmin, bu anlamda kaliteli olduğu söylenebilir. Şekil 63 "b" ve "c" şekillerinde gösterilen görüntülerde yüzeyde bulunan paritküllerden kaynaklandığı düşünülen yükselteler görülmektedir. Si örnekte pürüzlülük 0.93 nm ve cam örnekte ise 1.2 nm olarak ölçülmüştür. Bu pürüzlülük seviyesi fotodedektör aygıt üretimi için kabul edilebilir seviyede bulunmuştur.

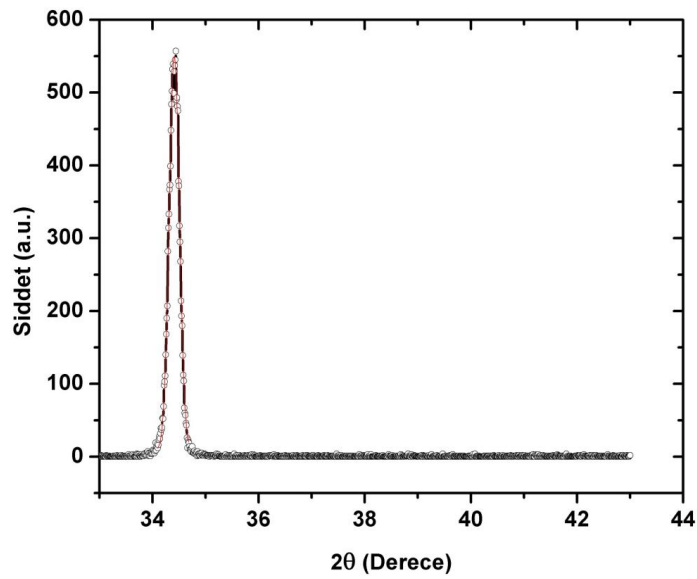
AFM ölçümü sonrasında cam ve safir örnekler için optik geçirgenlik ölçümü yapılarak, soğurmanın başladığı dalgaboyu incelenmiş ve beklenen bant aralığına sahip olup olmadığı belirlenmiş ve soğurma miktarı belirenmiştir. Şekil 64'de bu ölçüm sonucu gösterilmektedir.



**Şekil 64:** Safir ve cam alttaşlar üzerine büyütülmüş ZnO ince filmlerin optik geçirgenlik ölçümü sonuçları

Şekilden görüleceği gibi her iki örnekte de 390 nm dalgaboyunda soğurma başlamaktadır. Bu dalgaboyu 3.18 eV bant aralığına karşı gelmektedir ki ZnO ince filmler için beklenen bir sonuçtur. Cam üzerine büyütülen ZnO ince film örneğinde geçirgenlik davranışında 350 nm civarında bir farklılık göstermektedir. Bu farklılık, geçirgenlik ölçümü için kalibrasyonun cam alttaşa göre değil havaya göre yapıldığı için görülmektedir.

Geçirgenlik ölçümü dışında safir alttaşlara büyütülen örnekler için XRD ölçümleri de yapılmıştır. Aşağıdaki Şekil 65'te safir alttaş üzerine büyütülen ZnO ince film için elde edilmiş XRD deseni görülmektedir.

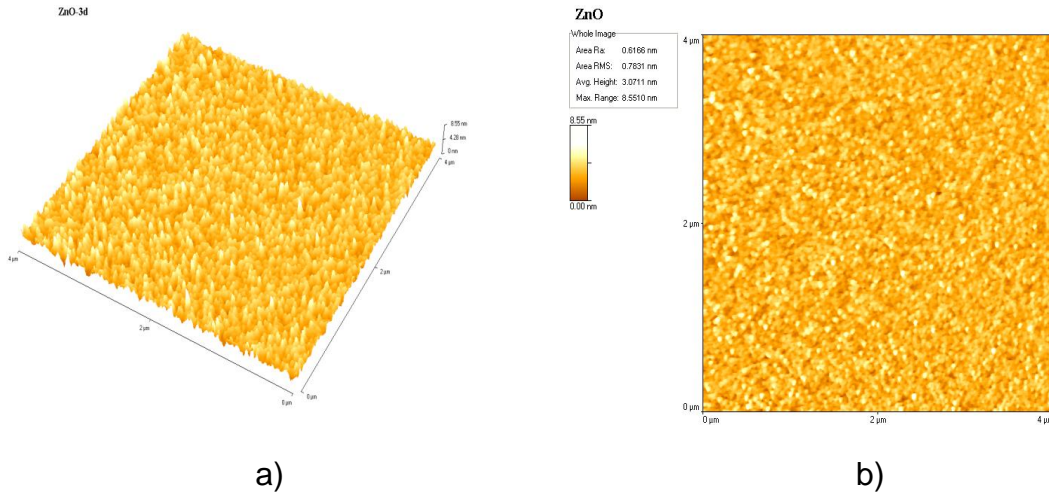


**Şekil 65:** Safir alttaş üzerine büyütülen ZnO ince filme ait XRD deseni

Şekilde görülen  $34.4^\circ$ 'deki tepe (002) yönelimli ZnO kristallerine aittir. Örnekte tek yönelimde kristallenme görülmüştür. Şeklin içerisinde bu tepeye uydurulmuş gaussiyen fonksiyona ait parametreler de görülmektedir. Bu parametrelere bakarak yarı yükseklik genişliği  $0.096$  derece olarak belirlenmiştir. Bu değer kullanılarak Sherrer formülü ile hesaplanan ortalama kristal büyüklüğü  $8.4$  nm olarak hesaplanmıştır. Bu büyüklük saçırma yöntemi ile büyütülen filmler için tipik değerler ile uyumaktadır.

Bilkent Üniversitesi Nanotam'da büyütülen ince filmler için de AFM, PL, XRD ve SEM (Taramalı Elektron Mikroskopu) incelemeleri yapılmıştır.

Şekil 66'da AFM ile elde edilen yüzey topografisi görülmektedir.

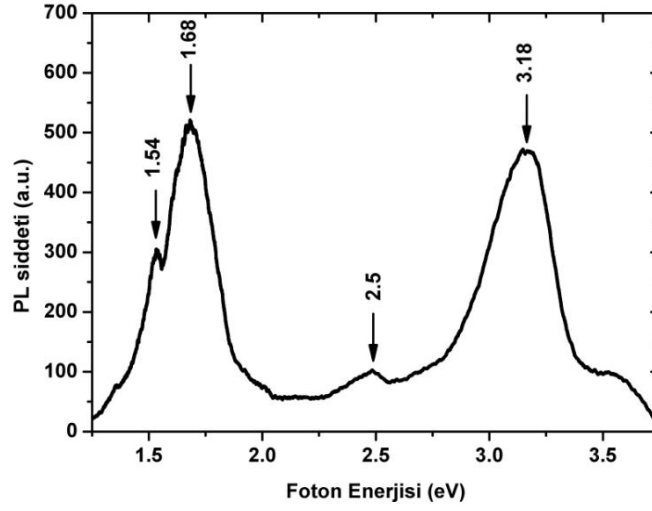


**Şekil 66:** Nanotam'da büyütülen ZnO ince filmlerden alınmış AFM görüntüleri. a) 3 boyutlu görüntü, b) Alan incelemesi

Ölçüm yapılan alan içerisindeki maksimum ve minimum yüksekliklerin farkı  $8.55$  nm olarak ölçülmüştür. Yapılan alan incelemesinde RMS yüzey pürüzlülüğü  $0.78$  nm olarak bulunmuştur. Bu değerler daha önce de ZnO kaplamaları ile yapılan AFM ölçümlerinde elde edilen değerler ile benzerdir ve beklenen seviyededir.

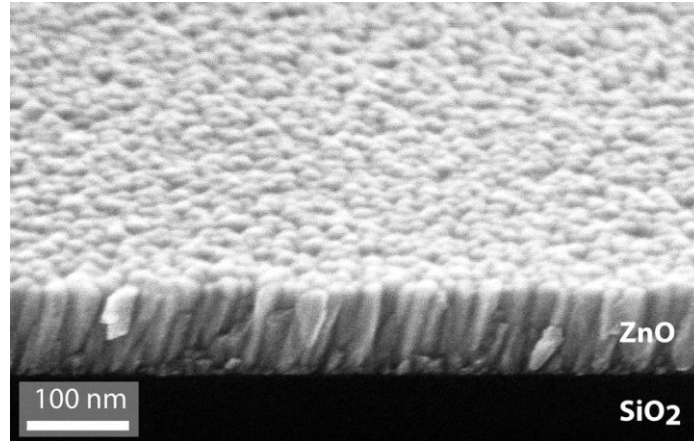
Şekil 67, örnekle yapılan PL ölçümü sonucunu göstermektedir. Şekilde görüldüğü gibi ölçümde 5 ana tepe elde edilmiştir.  $3.18$  eV'ta gözlenen tepe ZnO malzemesinin bant aralığına karşı gelen tepedir.  $2.5$  eV'ta gözlenen tepe film içerisinde  $O_2$  veya Zn eksikliklerinden kaynaklanır [34]. Tepe şiddetinin düşük oluşu bu eksikliklerin de film içerisinde düşük miktarda olduğunu göstermektedir.

Reaktif proses yapılması sayesinde örgüdeki bu eksikliklerin azaldığı görülmektedir.



**Şekil 67:** Nanotam'da büyütülen ZnO ince film için PL grafiği

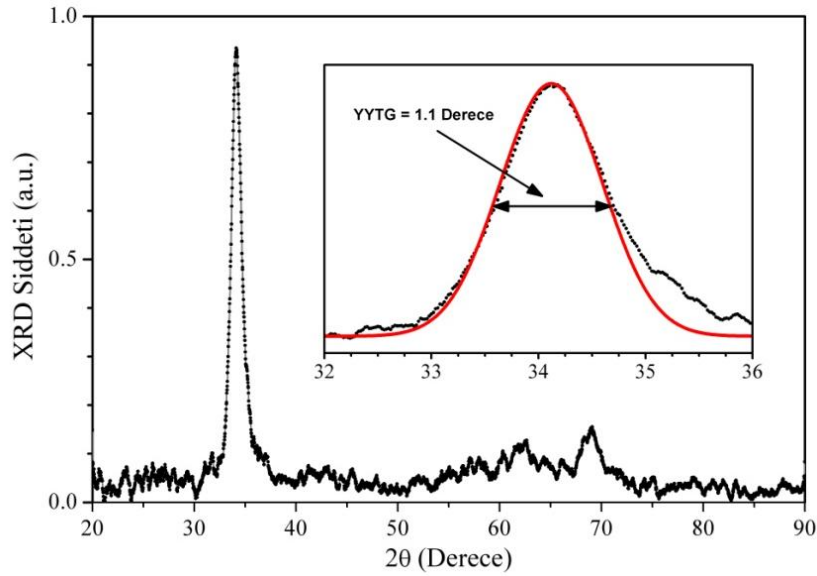
1.68 eV'ta gözlene yüksek şiddetli tepe ince filmdeki rekombinasyon merkezleri ile ilgilidir [76]. 1.54 eV'ta gözlenen tepe yüzey bant bükülmesi etkisine bağlanmaktadır [77]. Bu tepe gözlendiğinde filmin yüzey alanının bu piki gözleyecek kadar yüksek olup olmadığı incelenmek istenmiş ve örnek kırılarak kesit görüntüsü SEM ile alınmıştır. Şekil 68, SEM görüntüsünü göstermektedir.



**Şekil 68:** Nanotam'da kaplanan ZnO örneğinin kesitinin SEM görüntüsü

Görüntü incelendiğinde nanotel benzeri yapıların birbirine yanaşık bir şekilde büyüdüğü, büyümenin henüz iki boyutlu büyüme fazına geçemediği görülmüştür. İşte bu yanaşık tel yapılı çekirdekler filmdeki yüzey alanını belirgin şekilde arttırmakta ve bu nedenle PL ölçümünde yüzey bant bükülmesi etkisine ait tepe gözlenmektedir.

Büyütülen ince film örneği ile son olarak XRD ölçümleri yapılmıştır. Elde edilen desen Şekil 69'da gösterilmektedir.



**Şekil 69:** Nanotam'da büyütülen ZnO örnek için XRD deseni

XRD ölçümü sonunda yine sadece ZnO (002) kristal yönelimine ait 34.4°'de bir tepe gözlenmiştir. Yapılan gausyen fonksiyon uydurması sonucu elde edilen FWHM (Yarı Yükseklik Tam Genişliği) 1.1 derece olarak hesaplanmıştır. Bu genişlik yine Scherrer formülü ile kristal büyüklüğüne dönüştürülmüş ve yaklaşık 7.4 nm kristal büyüklüğü olduğu görülmüştür.

Sonuç olarak, iki laboratuvarında da iyi kalitede ince filmler büyütülmüş ve bu örnekler aygıt üretimi için kullanılmışlardır.

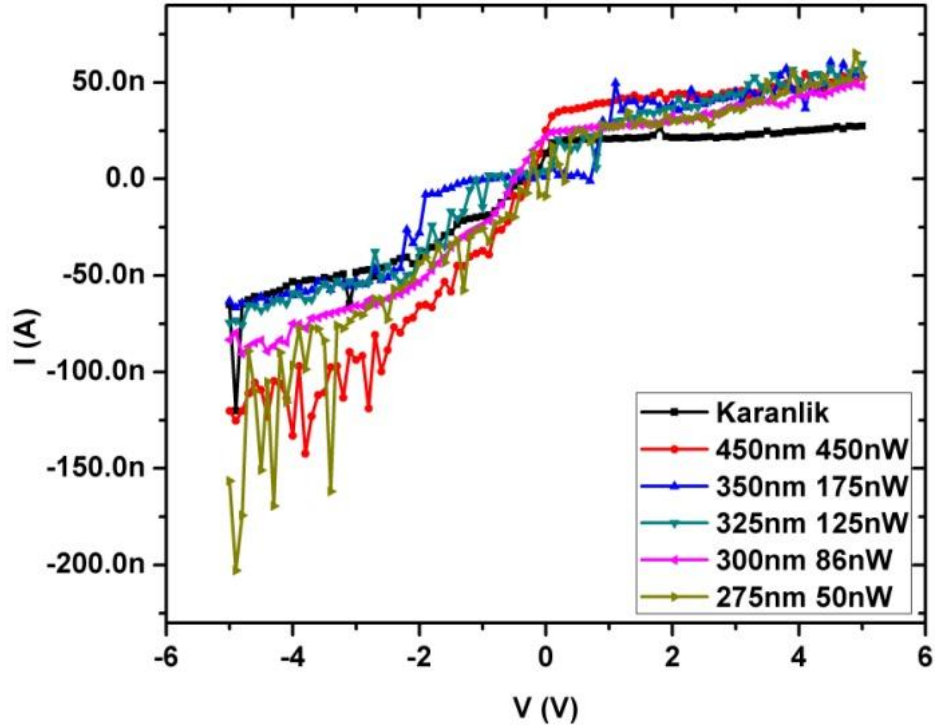
#### 4.3.2. ZnO MSM Tipi fotodedektörlerin Karakterizasyonu

İncefilm karakterizasyonu bitirilmiş olan örnekler ile fotodedektör üretimleri yukarıda anlatıldığı şekilde yapılmış ve üretilen aygıtların karakterizasyonları da gerçekleştirilmiştir. Aşağıda aygıt karakterizasyonu sonuçları verilmiş ve tartışılmıştır.

SNTG laboratuvarlarında üretilen ZnO ince filmler ile yapılmış fotodedektörler tez çalışması kapsamında ilk kez fabrike edilmiş fotodedektörlerdir. Bu anlamda optimize olmayan prosesler ile üretilmiş fotodedektörlerden üstün bir performans beklenmemektedir. Ayrıca yapılan karakterizasyonlar da sınırlıdır.

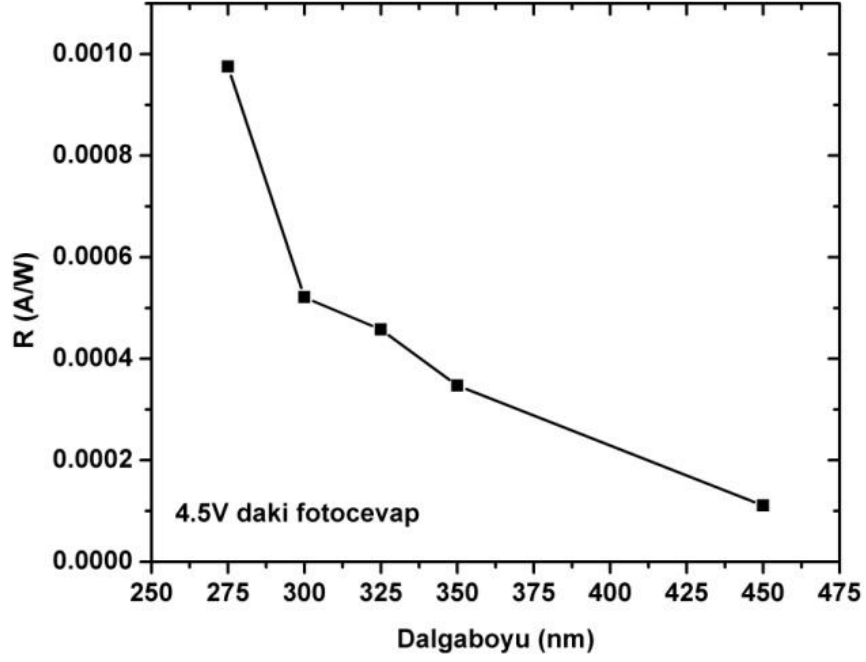
Bu ince film örnekler ile üretilen fotodedektörlerden safir alttaşı olan örnek I-V ölçümleri sonunda yaklaşık 10 kOhm direnç ile Ohmik özellik göstermiştir. MSM tipi fotodedektörlerde kontakların Schottky özellik göstermeleri beklenir. Bu sayede düşük karanlık akım ve dolayısıyla yüksek hassasiyet elde edilir. Ohmik davranan aygıtlardan da fotoiletken fotodedektörler yapılabilir ancak bu dedektörler yüksek elektriksel gürültü nedeni ile iyi performans gösterememektedir. Safir alttaş üzerine büyütülen örneklerde bu davranış, kaplanan ince filmin kaplama sırasında veya kaplama sırasındaki kazan koşulları nedeni ile yüksek seviyede katkılanmış olması dolayısıyla her ne kadar yüksek iş fonksiyonlu bir metal kontak kullanılmış olsa da kontak ile ZnO arasındaki Schottky bariyerinin küçülmesi nedeni ile gözlenmektedir.

Si alttaş üzerine hazırlanan ince film ile üretilmiş aygıtlarda ise durum farklı olmuş ve I-V ölçümlerinde nispeten düşük karanlık akımlar ölçülebilmektedir. Birkaç farklı dalgaboyunda yapılan aydınlatılmış I-V ölçümlerinde ise düşük de olsa fotoakım gözlenebilmektedir. Şekil 70'de karanlık ve aydınlatılmış koşullarda ölçülmüş I-V grafikleri verilmektedir.



**Şekil 70:** Si alttaş üzerine ZnO örnek ile üretilmiş fotodedektörlerden bir I-V grafiği. Aygıtın I-V davranışında bir simetri bozukluğu görülmektedir. Bunun sebebi genellikle ince film kaplama veya kontak kaplama prosesinde oluşan

kirlenmelerdir. Ölçülen I-V davranışı fotocevap grafiğine dönüştürüldüğünde Şekil 71’de verilen grafik elde edilmiştir.

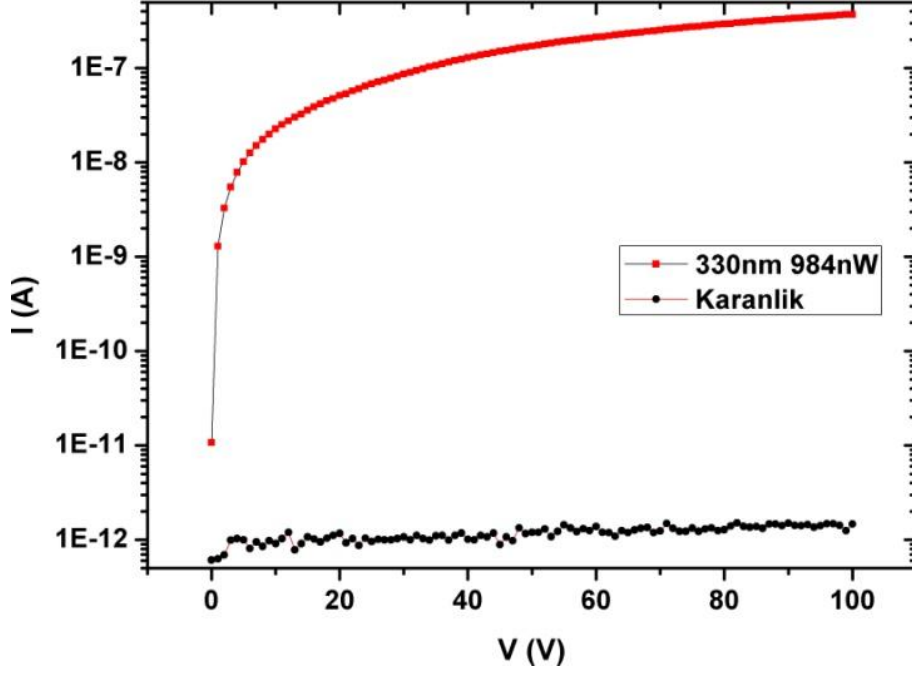


**Şekil 71:** Si alttaş üzerine ZnO örnek ile üretilmiş fotodedektörlerin izgesel fotocevap grafiği

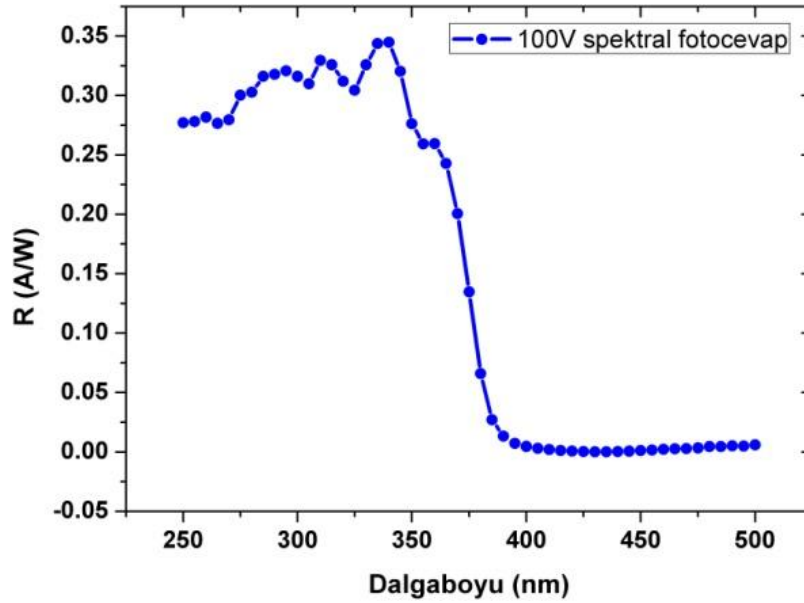
Aygıtın fotocevabı 4.5 V da ölçülmüş ve 10 mA/W altında kalmıştır. Bu çok düşük bir fotocevap olmakla beraber ilk üretilen fotodedektör olması açısından umut verici bir sonuçtur. Çalışmanın ilerleyen aşamalarında elde edilen bilgi ve tecrübe ile daha iyi sonuçlar elde edilmiştir.

Bilkent Üniversitesi Nanotam’da kaplanan ince filmler üzerine aygıt üretimi ise tez çalışmasının son aşamalarında üretilmiş olduklarından hem karakterizasyon anlamında daha detaylı hem de aygıt performansı açısından daha iyi sonuçlar göstermektedir.

Bu aygıtlar ile ilk olarak karanlık ve 330 nm 984 nW optik güçte aydınlatma yapılarak karanlık ve aydınlatılmış I-V ölçümleri yapılmıştır. Şekil 72’de bu ölçümün sonucu gösterilmektedir.



**Şekil 72:** Nanotam'da üretilen ZnO ince filmler ile üretilmiş fotodedektörün I-V grafiği. Fotodedektör 100 V eğimleme gerilimine kadar kırılmamaktadır. Bu yüksek gerilimde dahi karanlık akımı 1 pA seviyesindedir. Bu literatürdeki değerlere göre oldukça düşük bir karanlık akım değeridir [78,79,80,81]. Ayrıca fotodedektörün ışık tepkisinin de yüksek olduğu görülmektedir. Bu ölçümün iyi sonuçlar vermesinin ardından izgesel fotocevap ölçümü yapılmıştır. Elde edilen sonuç Şekil 73'de gösterilmektedir.

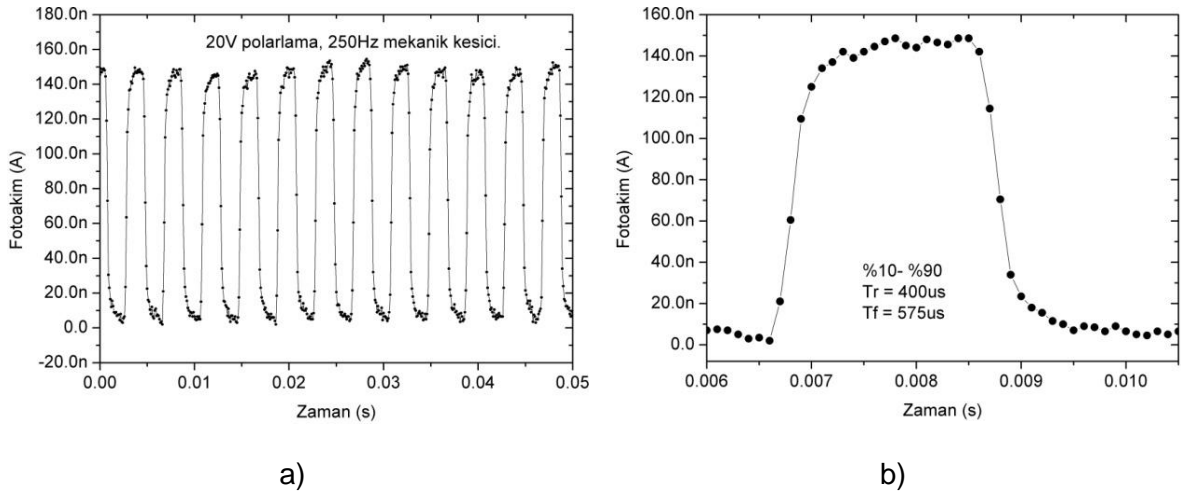


**Şekil 73:** Nanotam'da üretilen ZnO ince filmler ile üretilmiş fotodedektörün izgesel fotocevap grafiği.



Aygıt 340 nm de 0.35 A/W tepe fotocevap vermektedir. Beklendiği gibi 390 nm dalgaboyundan sonra fotocevap belirgin oranda düşmektedir. 340 nm ile 450 nm arasındaki fotocevap oranı (bir başka deyişle aygıtın UV / görünür kontrastı) 300'ün üzerindedir ve literatürdeki yüksek kontrast değerleri ile benzer mertebededir [82,83].

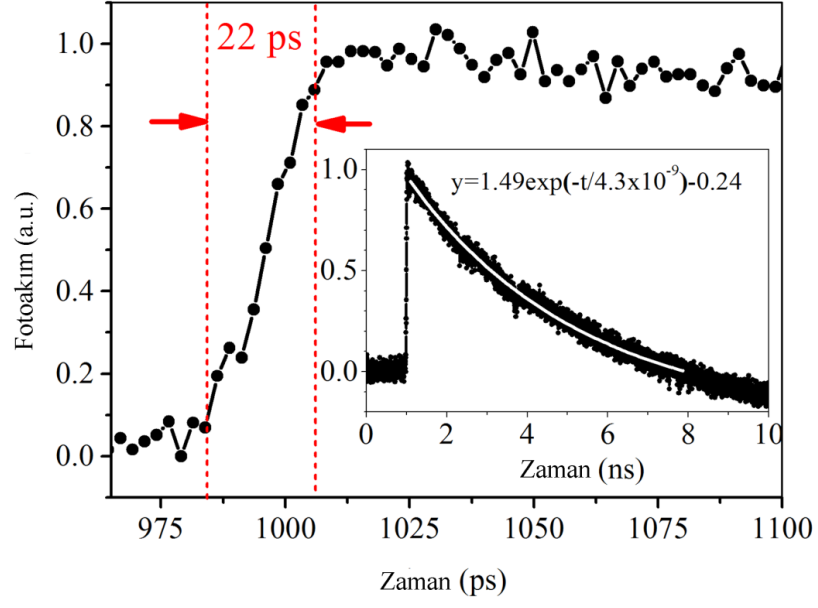
Bu ölçümler sırasında aygıtın ne kadar hızlı çalıştığının ölçülmesi amacı ile tekrenlendirici çıkışına bir mekanik kesici yerleştirilerek ölçüm yapılmıştır. Aşağıdaki Şekil 74'de mekanik kesici ile yapılan hız ölçümü sonucu gösterilmektedir.



**Şekil 74:** Nanotam'da büyütülen ZnO ince filmler ile üretilen fotodedektörün mekanik kesici ile yapılmış hız ölçümü grafiği. a) Periyodik sinyal, b) Bir periyodun detaylı görünümü

Aygıtın yükselme ve düşme zamanları sırasıyla 400  $\mu$ s ve 575  $\mu$ s olarak ölçülmüştür. Bu değer daha önce TiO<sub>2</sub> ile üretilen fotodedektörlere göre oldukça düşük sürelerdir. Ancak ölçüm sonucunun hala ölçüm sistemindeki mekanik kesici ile sınırlı olduğu düşünüldüğünden yüksek hızlı bir lazer ile bu ölçümün tekrarlanmasına karar verilmiştir. Şekil 75'de kurulan ölçüm düzeneğinin blok diyagramı verilmektedir.





**Şekil 76:** Nanotam'da büyütülen ZnO ince filmler ile üretilen fotodetektörün fiber lazer ile yapılmış hız ölçümü grafiği

## 5. GeNP:ZnO İNCE FİLM FOTODEDEKTÖRLER İLE YAPILAN ÇALIŞMALAR

ZnO ince filmler yukarıda anlatılan pek çok uygulama açısından ilginç olmakla beraber uygun boyutlarda Ge (Germanyum) nanoparçacıkları (NP) ile katkılı olduklarında görünür bölgede de fotocevap üretebilmesi potansiyeli açısından fotovoltaik uygulamalar açısından da ilgi çekmektedir. Bu nedenle tez çalışması kapsamında GeNP katkılı ZnO (GeNP:ZnO) ince filmler ile de çalışmalar yapılmış ve Hacettepe Üniversitesi Fizik Mühendisliği bölümünde bulunan SNGT laboratuvarlarında büyütülen malzemeler ile görünür dalgaboylarında fotocevap verebilen bir fotodedektör aygıtı üretmek üzerine çalışmalar yapılmıştır.

Öncelikle kuvarz alttaşlar üzerine ince filmler büyütülmüş, film karakterizasyonları yapılmış, aygıt üretimleri gerçekleştirilmiş ve aygıt ölçümleri ile elde edilen sonuçlar dikkate alınarak P tipi Si alttaşlar üzerine heteroeklem tipi aygıtlar üretilerek kuvarz örnekler ile üretilen fotodedektörlerde karşılaşılan yüksek karanlık akım problemi aşılması hedeflenmiştir. Yapılan çalışmalarda bu problem aşılmış gibi görünse de gözlenen görünür dalgaboylarındaki fotocevabın Si alttaştan geliyor olma ihtimali, çalışmayı  $TiO_2$  heteroeklemlerle aygıtlar üretmek yönüne götürmüştür. Bu konuda yapılan çalışmalar aşağıdaki bölümlerde ayrıntıları ile anlatılmaktadır.

### 5.1 GeNP:ZnO İnce Filmlerin Hazırlanması

GeNP:ZnO ince filmlerin kaplanması için 300  $\mu m$  kalınlıkta Z düzlemli Quartz, 525  $\mu m$  kalınlıkta (100) yönelimli P tipi Si alttaşlar kullanılmıştır. Kaplama işlemi öncesinde alttaşlar 10 mm x 10 mm boyutlarında kesilmiş, daha önce anlatılan aseton, izopropil alkol ve DI su ile temizlik işlemleri yapılmış ve kurutma işlemlerinin ardından kaplama işlemine hazır hale getirilmiştir.

Kaplama işlemi alttaşların sisteme yerleştirilmesinin ardından, kazanın  $1 \times 10^{-5}$  Torr vakum seviyesine kadar vakumlanması ile başlamıştır. Sonra sisteme Ar gazı sızdırılarak temizlik işlemi yapılmıştır. Alttaşların kaplanmaya başlanmasından önce hedef 20 W RF gücü ile 10 dk süre ile temizlenmiştir. Örnekler 100 W RF gücünde, 40 mTorr Ar basıncı altında, oda sıcaklığında, 5 çift olmak üzere 10 dk ZnO ve 3 dk Ge ince filmler ile kaplanmıştır. Son olarak yine 10

dk süre ile ZnO film büyütülerek kaplama işlemi bitirilmiştir. Sistem atmosfere açılarak örnekler sistemden çıkarılmıştır.

Büyütmeler 4 örneklik gruplar halinde gerçekleştirilmiş ve toplam 4 büyüme prosesi yapılmıştır.

Bu şekilde hazırlanan örnekler önce ısıtma işlemi uygulanmış sonra film karakterizasyonları yapılmış ve daha sonra da aygıt üretimi gerçekleştirilerek karakterize edilmiştir.

Hazırlanan örneklerde Ge ince film formunda olduğu için katılan Ge'nin nano parçacık formuna dönüşebilmesi için ısıtma işlemi uygulanması gerekmektedir. Isıtma işlemi sıcaklığı olarak 600°C seçilmiş ve bütün örnekler bu sıcaklıklarda tavlama işlemi ancak tavlama süreleri değiştirilmiştir.

Tavlama işlemi Solaris marka 4 inçlik bir hızlı termal işlemci cihazında gerçekleştirilmiştir. Örnekler sisteme yerleştirildikten sonra işlem odacığı 3 dk süre ile 5 l/dk akış hızında forming gaz (%5 H<sub>2</sub> ve %95 N<sub>2</sub>) ile yıkanmıştır. Yaklaşık 0.5 l hacimli işlem odacığının atmosferdeki oksijen ve su buharından arındırılması için bu süre ve akış miktarı yeterlidir. Daha sonra sıcaklık 30 s içerisinde oda sıcaklığından tavlama sıcaklığına yükseltilmiş, örnekler tavlama süresince bu sıcaklıkta tutulduktan sonra 5 dakikadan kısa bir sürede oda sıcaklığına soğutulmuştur. Uygulanan ısıtma işleminin beklenen etkiyi oluşturup oluşturmadığı film karakterizasyonu ile incelenmiştir. Büyütülen örneklerin hangi sıcaklık ve süreler ile ısıtma işlemine tabi tutulduğu aşağıdaki Tablo 4'de gösterilmektedir.

Büyütme Grup Numarası	Alttaş	Tavlama Sıcaklığı (°C)	Tavlama Süresi (s)
1	Kuvartz	-	-
1	Kuvartz	600	30
1	Kuvartz	600	45
1	Kuvartz	600	60
2	P-Si	400	30
2	P-Si	400	60
2	P-Si	400	90
3	P-Si	500	30
3	P-Si	500	60
3	P-Si	500	90
4	P-Si	600	30
4	P-Si	600	60
4	P-Si	600	90

Örneklere ısı işlemler de uygulandıktan sonra ince film karakterizasyon çalışmalarına başlanmıştır.

## **5.2. GeNP:ZnO İle Fotodedektör Geliştirme Çalışmaları**

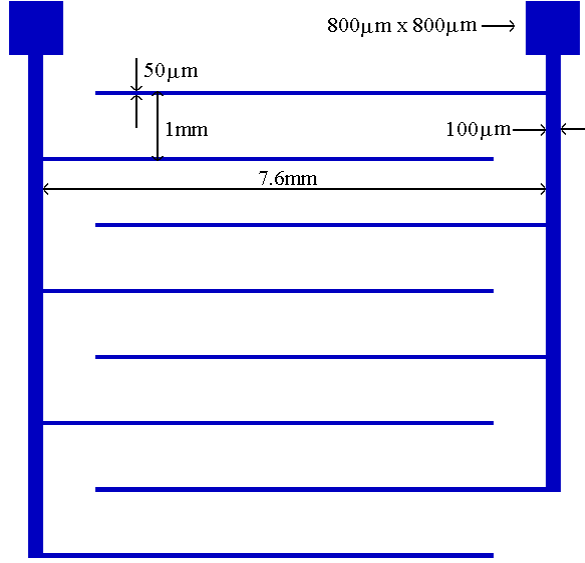
Ge nanoparçacık katkılı ZnO ince filmler ile özellikle görünür dalgaboylarında fotocevap verebilecek fotodedektör aygıtları üretimi öncelikle Kuvartz alattaşlar üzerine büyütülmüş ince film örnekler ile başlamıştır. Bu fotodedektörlerde gözlenen yüksek karanlık akım bir diğer deyişle yüksek kaçak akım probleminin aşılması için P tipi Si alattaşlara büyütülmüş örnekler ile oluşturulmuş heteroeklemlı yapı üzerine fotodedektör üretimi yapılmıştır. Ancak bu örneklerde gözlenen görünür dalgaboylarındaki fotocevabın Si alattaşlardan kaynaklanıyor olması şüphesi üzerine yine kuvartz alattaşlara büyütülmüş GeNP:ZnO ince filmler üzerine TiO<sub>2</sub> ince filmler büyütülerek oluşturulan heteroeklem yapısı üzerine fotodedektörler işlenmiş ve karakterizasyonları yapılmıştır. Bu çalışmaların detayı aşağıda anlatılmaktadır.

### **A. Kuvartz alattaşlar üzerine büyütülmüş GeNP:ZnO ince film örnekler ile MSM Tipi Fotodedektör Üretimi**

Örnekler ile fotodedektör üretimine başlanmadan önce örnekler aseton ve izopropil alkol ile ultrasonik banyoda 3 dk süre ile titreştirilerek temizlenmiş, ardından DI su ile durularak azot gazı ile kurutulmuş ve 120 °C sıcaklıktaki sıcak tabla üzerinde yüzeye tutunmuş su moleküllerinden arındırılmıştır.

Bu işlemlerin hemen ardından örnekler döndürerek kaplama yöntemi ile 5000 dev/dk dönüş hızı ile AZ5214 fotorezisti ile kaplanmış ve fotolitografi ile kontak deseninin hazırlanması işlemine geçilmiştir.

GeNP:ZnO örneklerin fabrikasyonu için Şekil 77'de gösterilen kontak fotomaskesi kullanılmıştır.



**Şekil 77:** GeNP:ZnO ince filmlerden fotodedektör üretiminde kullanılan kontak maskesi çizimi

Kontak deseni bütün çip tek bir aygıt olacak şekilde tasarlanmıştır. Bunun amacı prosese başlamadan önce yüzeye sonda iğneleri ile dokunularak yapılan I-V ölçümü sırasında ince filmin iletkenliğinin yüksek olduğunun farkedilmiş olmasıdır. Birbirinden aralıklı kontaklar yapılarak aygıtın direnci yükseltilmeye çalışılmıştır. Diğer taraftan iletkenliği yüksek olan ince filmler ile fotoakım ölçümü yapılırken farkedilebilir bir fotoakım ölçebilmek için yüksek optik güç gereklidir. Deneylerde kullanılan ışık kaynağının çıkışına fiber sonda eşleştirildiğinde sonda ucundaki optik güçler oldukça düşük olmaktadır. Tekrenklendirici çıkışındaki yüksek optik güç elde edildiğinde ise ışık düşürülebilen alan geniş olduğu için aygıtın bu alan ile aynı veya daha büyük alanlı olması gerekmektedir. Bu gibi kısıtlamalar nedeni ile örneğin tamamı bir tek aygıt olacak şekilde tasarlanmıştır.

Yukarıda gösterilen fotomaske kullanılarak fotoresist kaplanmış örnekler önce  $14 \text{ mJ/cm}^2$  doz ile geniş bandlı UV ışık ile pozlandırılmıştır. Ardından tersleme pişirmesi  $110 \text{ }^\circ\text{C}$  sıcaklıkta 130 s süre ile yapılmıştır. Tersleme pişirmesini  $30 \text{ mJ/cm}^2$  doz ile pozlama ve 30 s süre ile 1:4 AZ400K:DI su geliştirme çözeltisinde banyo işlemi izlemiştir. DI su ile durulanan örnekler, azot gazı ile kurutulmuş ve optik mikroskopta incelendikten sonra kontak kaplama işlemine hazırlanmıştır.

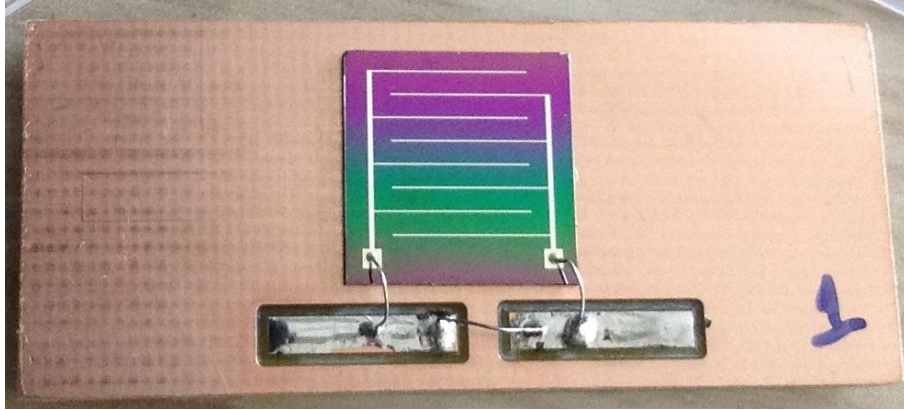
Kontak kaplama işlemi örneklerin elektron demeti buharlaştırma sistemine yüklenmesi ile başlar. Sistem  $5 \times 10^6$  mbar seviyesine kadar vakumlandıktan sonra

3 Å/s hız ile 1500 Å kalınlıkta Ag metali buharlaştırılmış ve örnekler sistemden çıkartılmıştır. Aseton ile kaldırma işleminin ardından örnekler izopropil alkol ve DI su ile durulanmış, azot gazı ile kurutulduktan sonra I-V ölçümlerine başlanmıştır.

### **B. P-Si alttäşlar üzerine büyütülmüş GeNP:ZnO ince film örnekler ile Fotodedektör Üretimi**

Büyütülen örnekler ile yukarıda anlatılan aygıt üretimi prosesi aynı şekilde uygulanarak GeNP:ZnO ince film kontakları üretilmiştir. Bu işlemin hemen ardından örneklerin arka yüzeylerine (P tipi Si alttäşın arka yüzeyine) 3000 Å kalınlıkta Al metali daha önce de anlatılan elektron demeti buharlaştırma yöntemi ile kaplandıktan sonra örnekler karakterizasyona hazırlanmıştır.

Karakterizasyona geçilmeden önce örnekler kolay elektriksel kontak yapmak üzere baskılı devre malzemesi kullanılarak tutucular tasarlanmış ve üretilen tutuculara örnekler Epoxy Technologies H20E iletken gümüş epoksi ile yapıştırılmış, üst yüzeydeki bağlantı noktalarına ince teller yine aynı gümüş epoksi ile tutturularak ölçüme hazır hale getirilmiştir. Baskılı devre örnek tutuculara monte edilmiş bir örneğin fotoğrafı Şekil 78'de gösterilmektedir.



**Şekil 78:** Baskılı devre örnek tutucuya tutturulmuş P-Si alttäş üzerine GeNP:ZnO ince film ile üretilmiş bir fotodedektör aygıtının fotoğrafı

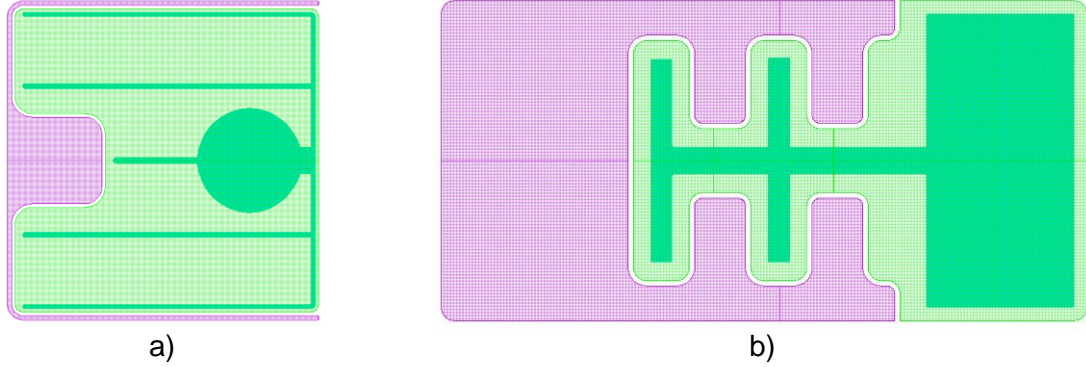
Şekilden de görüleceği gibi üst yüzdeki iki kontak baskılı devre üzerinde birleştirilerek birinci kontak ve örneğin arka yüzeyine elektriksel olarak bağlı olan geniş bakır alan da ikinci kontak olarak kullanılmıştır.

### **C. GeNP:ZnO / TiO<sub>2</sub> heteroeklem Fotodedektör Üretimi**

Kuvartz ve Si alttäşlar üzerinde büyütülmüş GeNP:ZnO ince film örnekler ile üretilmiş fotodedektörlerde karşılaşılan yüksek karanlık akım problemini aşmak üzere TiO<sub>2</sub> ile heteroeklemler üretilmesi için çalışmalar yapılmıştır. Bu



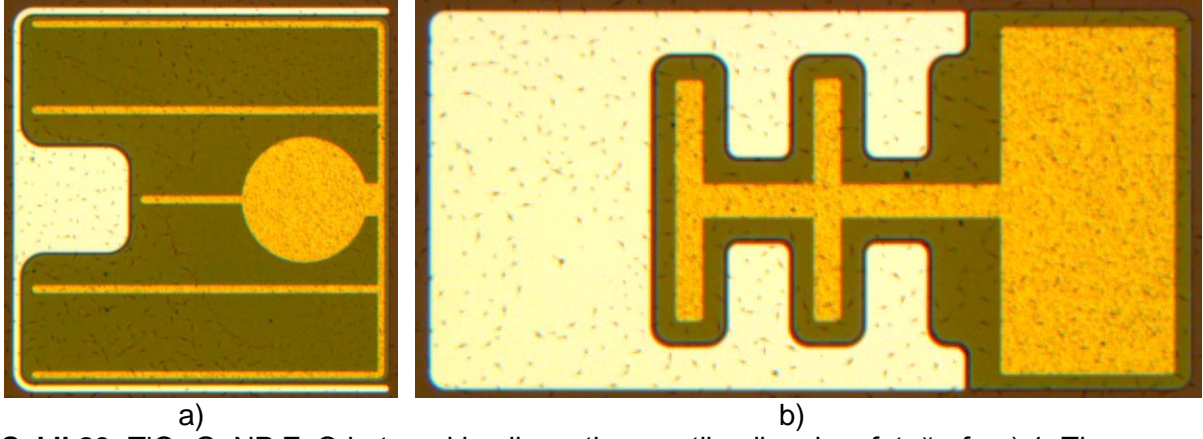
aygıtların üretimi için yine Kuvartz alttaş üzerine büyütülmüş örneklerden seçilerek daha önce film karakterizasyonu ile sonuçlarının iyi olduğuna karar verilen 600 °C sıcaklıkta ısıl işlem uygulanmasına karar verilmiştir. Ayrıca fabrikasyon için GeNP:ZnO ve TiO<sub>2</sub> ince filmlere ayrı ayrı konak yapılabilecek ve TiO<sub>2</sub> ince filmi de desenleyebilecek bir fotomaske seti kullanılması gerekmektedir. Aşağıda kullanılan fotomaskedeki iki tip aygıtın çizimleri gösterilmektedir.



**Şekil 79:** TiO<sub>2</sub> GeNP:ZnO heteroeklemlı aygıt üretiminde kullanılan aygıtların fotomaske çiziminden iki görüntü. a) 1. Tip aygıt, b) 2. Tip aygıt

Şekilde açık yeşil ile gösterilen alanlar TiO<sub>2</sub> ince film kaplanacak olan alanlardır. Koyu yeşil gösterilen alanlar TiO<sub>2</sub> ince filme yapılacak olan kontakın alanları ve mor gösterilen alanlar ise Ge:ZnO ince filme yapılacak kontakın alanlarıdır.

Aygıt üretimi kuvartz alttaşa büyütülmüş GeNP:ZnO ince film örneğinin 600°C sıcaklıkta ısıl işlem uygulanması ile başlamaktadır. Isıl işlemi takiben örneklere AZ5214 fotorezisti ile daha önce anlatıldığı şekilde fotolitografi yapılarak TiO<sub>2</sub> kaplanacak olan alanlar örnek yüzeyine geçirilmiş ve örneklere 100 nm kalınlıkta TiO<sub>2</sub> ince film kaplaması yapılmıştır. Aseton içerisinde yapılan kaldırma işleminin ardından yine AZ5214 fotorezisti ile TiO<sub>2</sub> kontak litografisi yapılmış, elektron demeti buharlaştırma yöntemi ile sırasıyla 100 Å Pt ve 1000 Å Au metalleri kaplanmış ve yine kaldırma işlemi uygulanmıştır. Son olarak fotolitografi ile tanımlanan GeNP:ZnO kontak litografisi yapılarak yine elektron demeti buharlaştırıcısında 1500 Å Ag metali kaplandıktan sonra kaldırma işlemi yapılarak fabrikasyon bitirilmiştir. Fabrikasyonun ardından aygıtlardan alınan bir optik mikroskop fotoğrafı Şekil 80’de gösterilmektedir.



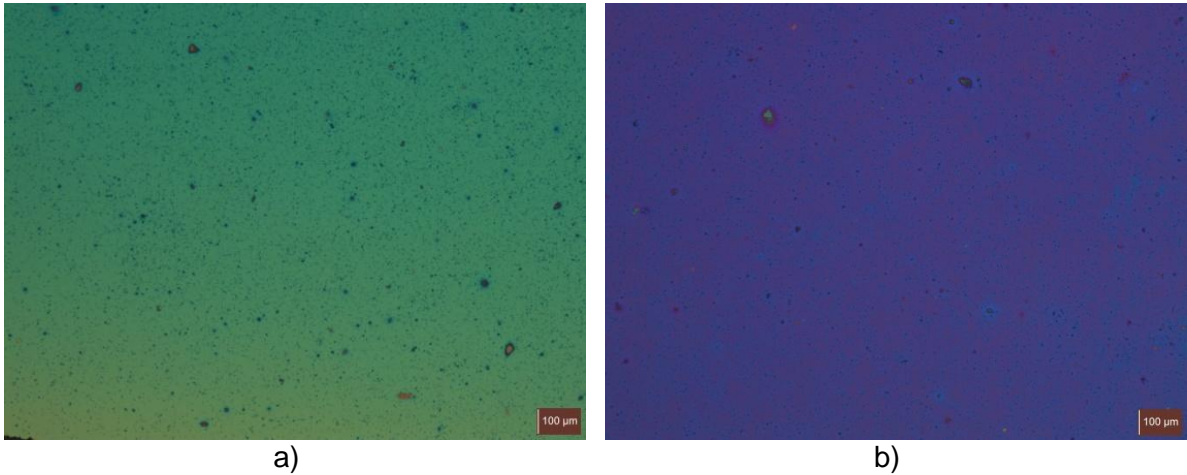
**Şekil 80:**  $\text{TiO}_2$  GeNP:ZnO heteroeklemlı aygıtların optik mikroskop fotoğrafı. a) 1. Tip aygıt, b) 2. Tip aygıt

### 5.3. GeNP:ZnO İnce Film Fotodedektörler İle Yapılan Çalışmaların Sonuçları ve Tartışma

#### 5.3.1 GeNP:ZnO İnce Filmlerin Karakterizasyonu

##### A. Kuvartz alttaşlar üzerine büyütülen örnekler ile yapılan ince film karakterizasyon çalışmaları sonuçları

Örnekler tavlama öncesi ve sonrası optik mikroskop ile incelenmiş ve aşağıdaki Şekil 81’de gösterilen fotoğraflar elde edilmiştir.

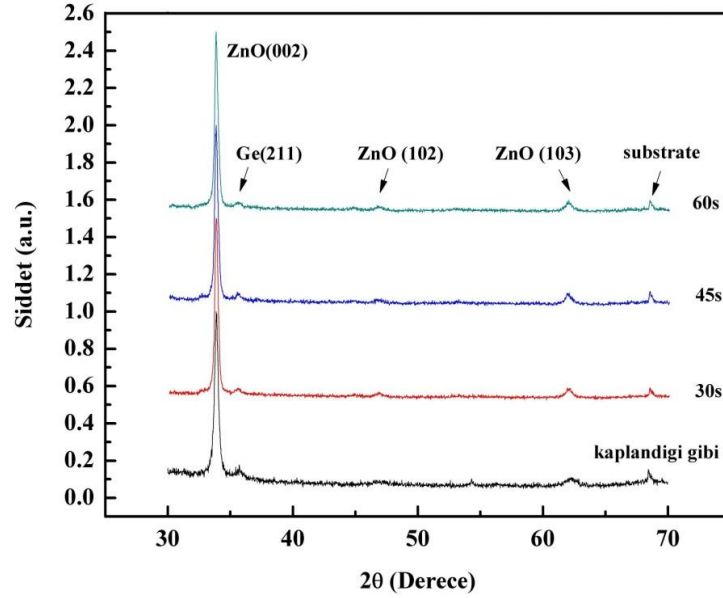


**Şekil 81:** Quartz alttaş üzer,ine büyütülmüş GeNP:ZnO örneğın a) Tavlama öncesi b) Tavlama sonrası optik mikroskop fotoğrafı

Fotoğraflarda örneklerin yüzerindeki partiküller oldukça belirgin görülmektedir. Alttaşların iyi temizlenmiş olmasına karşın kaplama sistemine yükleme veya kaplama sırasında örnek yüzeyine partiküllerin düştüğü görülmektedir. Bu partiküllerin dışında tavlama sonrasında ince filmin örnek yüzeyinden kavlamadığı

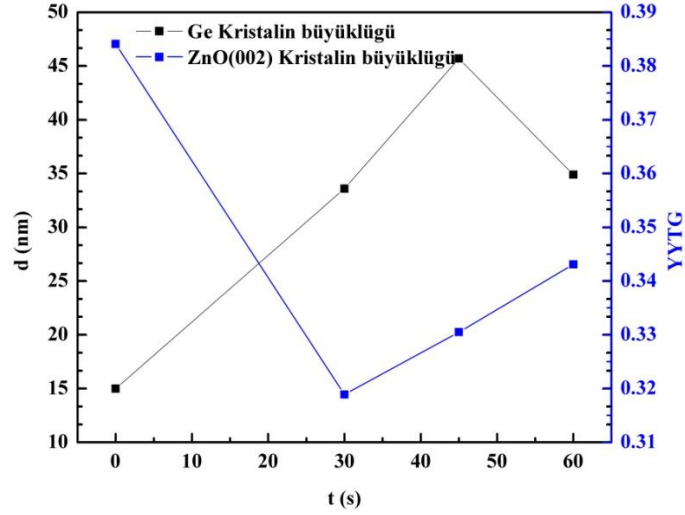
veya çatlakların oluşmadığı görülmektedir. Kaplanan ince filmin alttaşa iyi tutunduğu anlaşılmaktadır.

İncefilm kalması sonrası örnekler ile XRD ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Elde edilen XRD deseni aşağıdaki Şekil 82’de verilmektedir.



**Şekil 82 :** Kuvartz alttaş üzerine hazırlanan ince filmler için elde edilen XRD desenleri

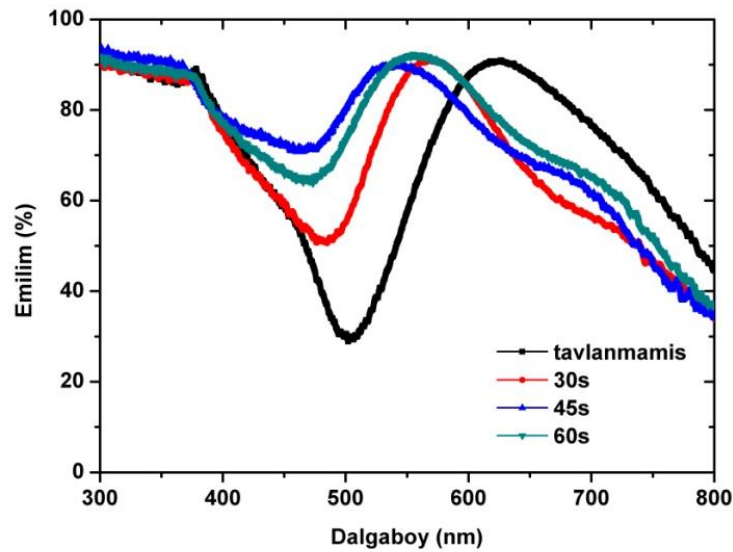
Şekilde 34.4° açıda ZnO için (002) yönelimine ait tepe açıkça gözlenmektedir. Ayrıca 47°’de yine ZnO (102) kristallerine ve 62.1°’de ZnO (103) kristallerine ait tepe gözlenmektedir. Bu açılardaki sinyal şiddetinin düşük oluşu yapı içerisindeki bu yönelimdeki kristallerin hacimce düşük miktarda olmasına bağlıdır. Ayrıca şiddeti düşük de olsa 35.5° açıda Ge (211) kristallerine ait tepe de gözlenmektedir. Yapı içerisinde kristal formda Ge bulunuyor oluşu, bu örneklerden hedeflenen Ge katkılardan dolayı bant aralığı değişimi ile görünür dalgaboylarında fotocevap almak açısından önemli bir veridir. Elbette kuvantum sınırlama (quantum confinement) etkisinin görülebilmesi için Ge kristal boyutlarının birkaç nm mertebesinde olması gerekmektedir [86]. Bu nednele XRD verisinden yine Scherrer formülü yardımı ile kristal büyüklüğü hesabı yapılmış ve aşağıdaki grafik elde edilmiştir.



**Şekil 83:** Tavlama süresine göre Ge kristal büyüklüğünün değişimi

Grafikten de görüldüğü gibi tavlama süresi arttıkça kristal büyüklüğü artmaktadır. Beklenildiği gibi tavlama sırasında filmin içerisindeki Ge toplanarak kristallenmektedir. 60 s tavlanan örneğin kristal büyüklüğünün düşük çıkışı Ge'un tavlama süresinde faz değiştirmesi ihtimalini düşündürmektedir. Bu örnek dışında davranış beklendiği şekildedir.

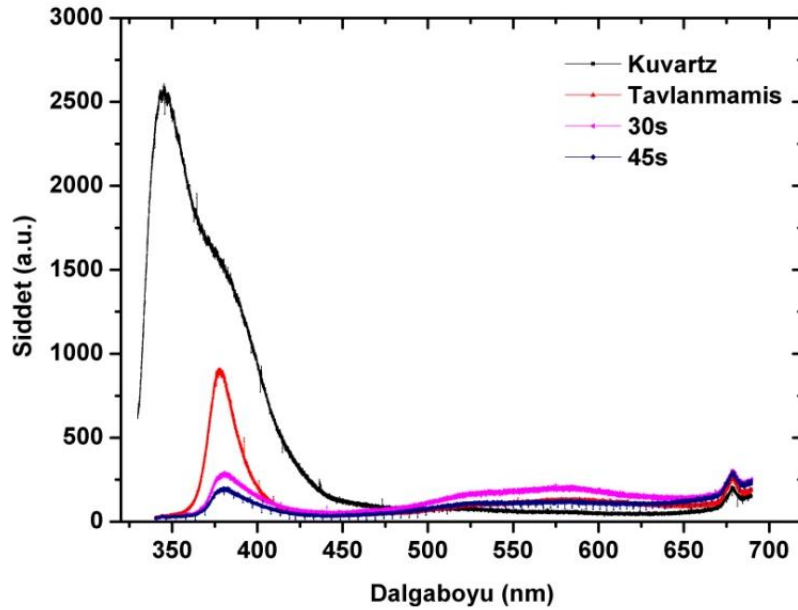
Kristal büyüklüklerinin düzenli değişimi gözlemlendikten sonra örneklerde optik yansımaya ve geçirgenlik ölçümü yapılmış ve bu ölçümlerden optik soğurma hesaplanmıştır. Elde edilen grafik Şekil 84'de gösterilmektedir.



**Şekil 84:** Kuvartz alttaş üzerine büyütülen örneklerin ısı işlem sonrası ölçülen optik soğurma grafiği

Şekilden de görüleceği gibi tavlannmamış örnekte dahi saf ZnO örneğinde görülmeyen görünür dalgalaboylarında soğurma gözlenmektedir. Tavlama sıcaklığı ile soğurma davranışının değiştiği, görünür bölgedeki soğurma tepesinin tavlama sıcaklığının artışı ile maviye kaydığı görülmektedir. Yine 60 s tavlannmış örnek düzen dışında görünse de elde edilen sonucun XRD incelemesi ile uyumu olumlu bir sonuçtur. Soğurma tepesinin maviye kayışı kompozit film içeisindeki Ge nanokristallerinin bant aralığının büyüdüğünü göstermesi, G. Casarrubias-Segura ve O. Zarate-Corona 'nın yaptığı çalışmada [77] gösterilen davranış ile uyumludur.

Örnekler ile PL ölçümleri de yapılmıştır. Önce üzerinde ince film kaplaması bulunmayan bir kuvarz alttaşın PL sinyali anlınmış, ardından da ince film kaplı örnekler için ölçüm yapılmıştır. Elde edilen sonuç Şekil 85'de gösterilmektedir.



**Şekil 85:** Kuvarz alttaş üzerine büyütölen örnekler için PL ölçümü sonucu

Ölçüm sonucu incelendiğinde kuvarz alttaşın 340 nm ve 660 nm dalgalaboylarında belirgin tepelerinin olduğu görölmektedir. 379 nm'de görölen tepe ZnO ince filme aittir. Elde edilen grafikte Ge için spesifik bir tepe gözlenmesede görünür dalgalaboylarında yayılmış şekilde görölen sinyalin Ge nanoparçacıklardan kaynaklandığı düşünölmektedir.

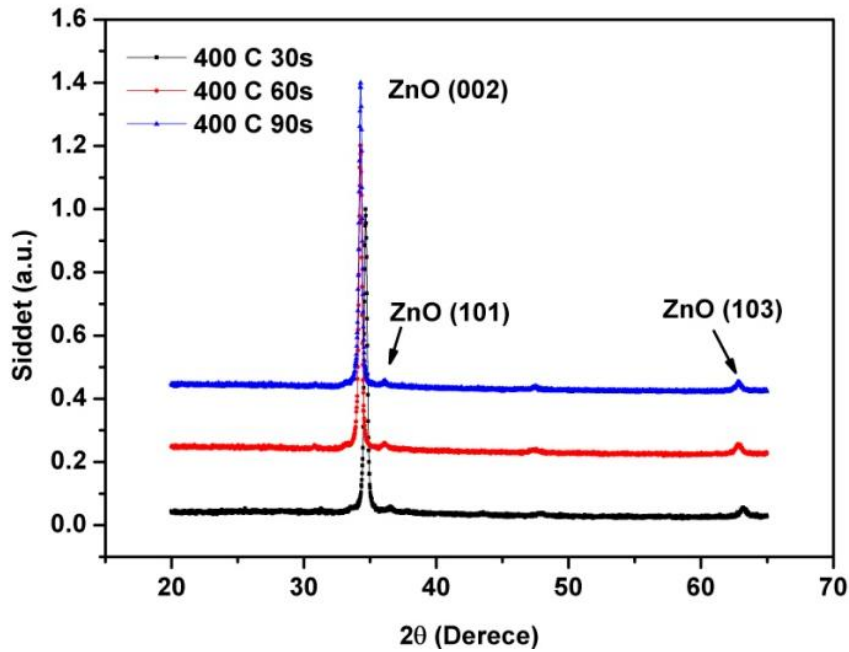
Yukarıda anlatılan karakterizasyonların tamamlanması ile XRD incelemesinde görölen Ge nanokristallerinin varlığı, boyutları ve tavlama sıcaklığı ile boyut değişiminin beklentiler ile uyumlu olması ve üretilen ince filmlerin optik

özelliklerinin umut verici olduğu görülmüş ve aygıt üretimi yapılmasına karar verilmiştir.

### B. P tipi Si alttaşlar üzerine büyütülen örnekler ile yapılan ince film karakterizasyon çalışmaları sonuçları

Örneklerin ince film hazırlama süreçlerinin ardından yapılan ısıt işlemleri tamamlandığında örnekler XRD ile incelenmiş ve Ge nanoparçacıklarının yapıya katılıp katılmadıkları teyid edilmeye çalışılmıştır.

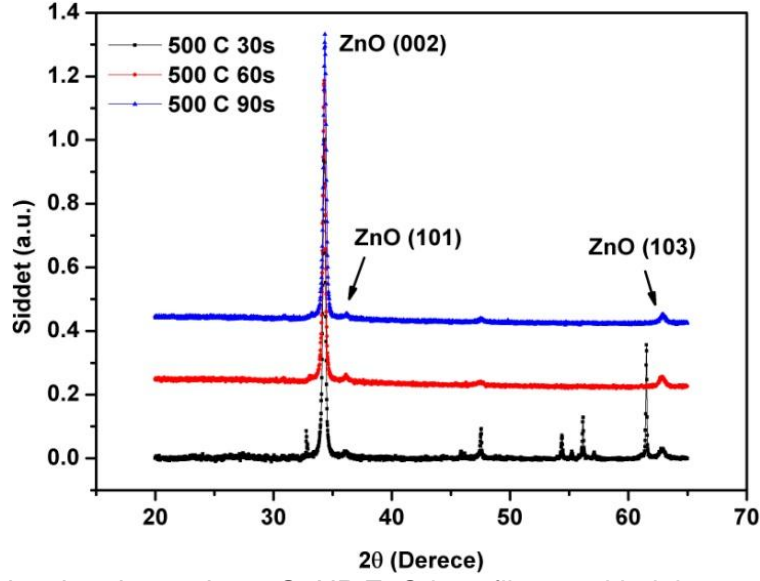
400°C sıcaklıkta tavlanan örnekten elde edilen XRD deseni ise Şekil 86'da gösterilmektedir.



**Şekil 86:** P-Si alttaşlara büyütülmüş GeNP:ZnO ince film örneklerinin 400 °C de ısıt işlem gördükten sonra alınan XRD ölçümü sonucu

Alınan XRD deseninde ZnO için (002), (101) ve (103) yönelimli kristallerine ait tepeler gözlenmiş ancak Ge'ye has bir tepe gözlenmemiştir.

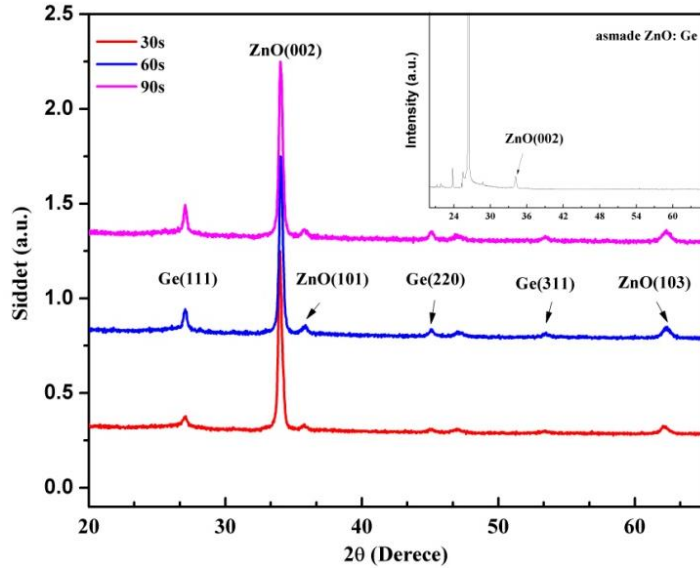
500°C sıcaklıkta tavlanan örnekler için elde edilen XRD ölçümü sonucu da Şekil 87'de görülmektedir.



**Şekil 87:** P-Si altaşlara büyütülmüş GeNP:ZnO ince film örneklerinin 500 °C de ısıt işlem gördükten sonra alınan XRD ölçümü sonucu

Bu sıcaklıkta elde edilen sonuç yine 400°C örnekleri ile benzer olup Ge'a ait karakteristik bir tepe gözlenmemiştir.

600°C sıcaklıkta tavllanmış örneklerden alınan XRD ölçümü sonucu aşağıdaki Şekil 88'de görülmektedir.



**Şekil 88:** P-Si altaşlara büyütülmüş GeNP:ZnO ince film örneklerinin 600 °C de ısıt işlem gördükten sonra alınan XRD ölçümü sonucu

Şekilden de görüleceği gibi ZnO kristallerinin (002), (101) ve (103) yönelimlerine ait tepeler gözlenmektedir. Kuvartz altaşlar üzerine hazırlanan örneklerden farklı olarak ZnO (002) yerine bu örneklerde ZnO(101) tepesi gözlenmektedir. Bu tamamen ısıt işlem sırasında ZnO kristallerinin altaşın kristal yapısına uyumlu yönelimleri tercih etmesinden kaynaklanmaktadır. Yine kuvartz örneklerde sadece

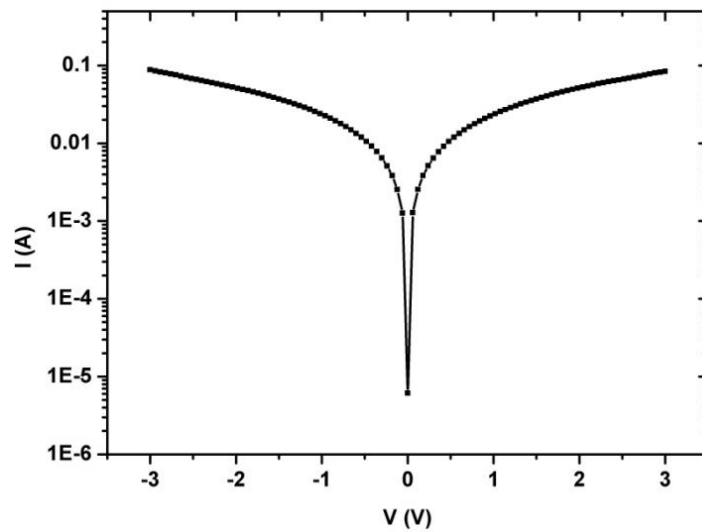
Ge(211) kristalleri gözlenirken P-Si alttaş üzerindeki örnekler için Ge(111), Ge(220) ve Ge(311) tepeleri de gözlenmiştir. Bu da Ge çevresindeki ZnO kristallerinin farklı yönelimlerinin de gelişmesi sonucu Ge'un diğer yönelimleri de tercih edebilmesinden kaynaklanmaktadır. İç figürde ısı işlem görmemiş örnekler için elde edilen XRD deseni görülmektedir ki burada Ge'a ait bir tepe gözlenmemekle beraber tavlama öncesinde ZnO ince filmin sadece (002) yönelimine sahip olduğu görülmektedir.

Özetle sıcaklığın değişimi ile XRD desenlerinin değişimi incelendiğinde sıcaklık 400 °C den 600 °C ye artarken ZnO ince film açısından büyük bir değişiklik gözlenmez iken 600 °C sıcaklığa ulaşıldığında Ge'a ait tepeler gözlenmeye başlanmaktadır. Düşük sıcaklıklarda ya Ge kristallenmeye başlamamış yada kristal boyutları ölçüm sistemi ile karakterize edilemeyecek kadar küçük veya film kompozisyonu içerisinde miktarları ölçülemeyecek kadar düşük olmaktadır.

### 5.3.2. GeNP:ZnO Fotodedektörlerin Karakterizasyonu

#### A. Kuvartz alttaşlar üzerine büyütülen ince filmler ile üretilmiş fotodedektör karakterizasyon çalışmaları sonuçları

Kuvartz alttaşlar üzerine büyütülmüş ve 30 s tavllanmış GeNP:ZnO ince film örnekler ile üretilmiş MSM Tipi Fotodedektörler ile yapılan I-V ölçümüne ait grafik aşağıdaki Şekil 89'da gösterilmektedir.



**Şekil 89:** Kuvartz alttaş üzerine büyütülmüş ve 600°C sıcaklıkta 30 s tavllanmış GeNP:ZnO ince film örnek ile üretilen fotodedektörün karanlık I-V grafiği.

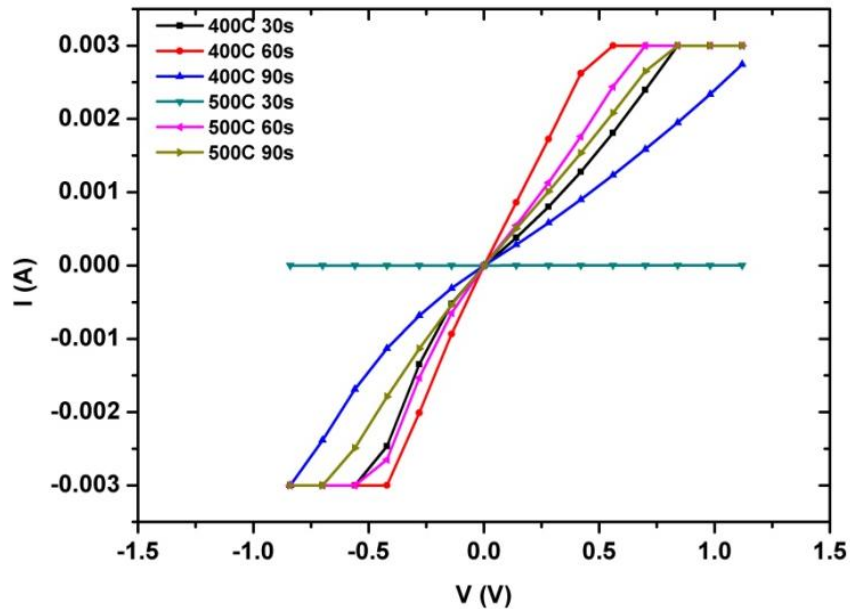


60 s ve 90 s tavlanan örneklerden de oldukça benzer karanlık akım ölçümleri yapılmıştır. Örnekten ölçülen karanlık akım 3 V da 100 mA seviyesine kadar çıktığı görülmektedir. Yüksek karanlık akım düşük hassasiyet ve yüksek algılama eşiği anlamına gelmesi, fotodedektörlerde istenmeyen bir durumdur. Bu seviyede karanlık akıma sahip bir fotodedektör ile fotoakım ölçümü yapmak zor ve diğer taraftan anlamsız olması nedeni ile bu aygıtlar ile fotoakım veya izgesel karakterizasyon yapılmamıştır.

Bu yüksek karanlık akım davranışının üstesinden gelmek için P tipi Si alttaşlar kullanılarak örnekler üretilmiş ve bu örneklerin ölçümleri gerçekleştirilmiştir.

### B. P-Si alttaşlar üzerine büyütülmüş GeNP:ZnO ince film örnekler ile üretilmiş fotodedektörlerin karakterizasyon çalışmaları sonuçları

Örneklerden önce 400°C ve 500°C sıcaklıklarda tavllanmış aygıtlar ile karanlık I-V ölçümleri yapılmıştır. Elde edilen I-V grafiği aşağıdaki Şekil 90'da gösterilmektedir.

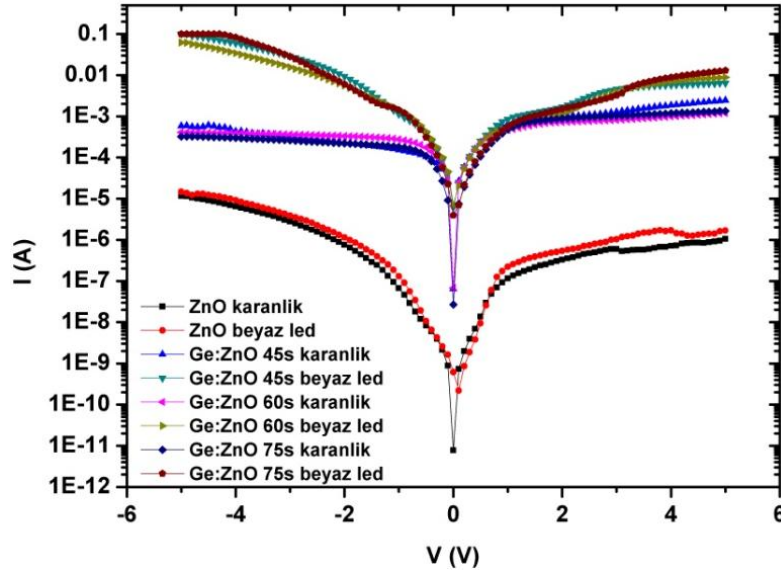


**Şekil 90:** 400 °C ve 500 °C ısıtılma tabii tutulmuş P-Si alttaş üzerine GeNP:ZnO ince film ile üretilmiş fotodedektör aygıtlarının I-V grafikleri

Grafikler incelendiğinde bu örnekler için de karanlık akımın oldukça yüksek olduğu görülmektedir. 500 °C 30 s örneği düşük karanlık akım veriyor gibi görünse de aygıtın prosesinde bir sorun olduğu düşünülmektedir. Bu aygıtlar üzerine beyaz LED ile ışık düşürüldüğünde herhangi ölçülebilir bir fotocevap görülemediği. İncefilm büyütmelemlerinin 4'lü gruplar halinde yapıldığı daha önce de bahsedilmişti.

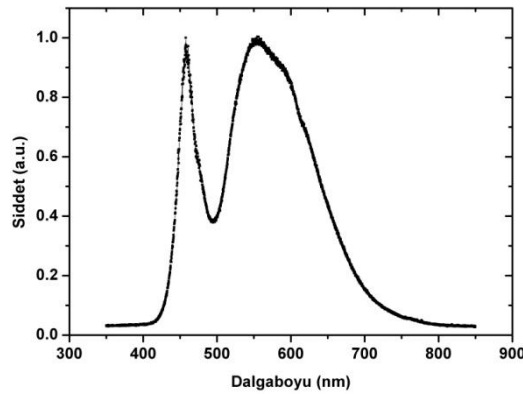
Bütün örneklerin büyütme koşulları her ne kadar aynı olsada bu grupların büyütüldüğü işlemde kazan veya hedef koşullarının farklı olduğu sonucuna varılmıştır.

600 °C de tavlanan örneklerden elde edilen sonuç ise yukarıda bahsedilen sonuçlardan oldukça farklıdır. Aygıtlar için ölçülen I-V grafikleri Şekil 91’de gösterilmektedir.



**Şekil 91:** 600 °C ısıtılardan geçirilmiş P-Si alttaş üzerine GeNP:ZnO ince film ile üretilmiş fotodedektör aygıtlarının I-V grafikleri

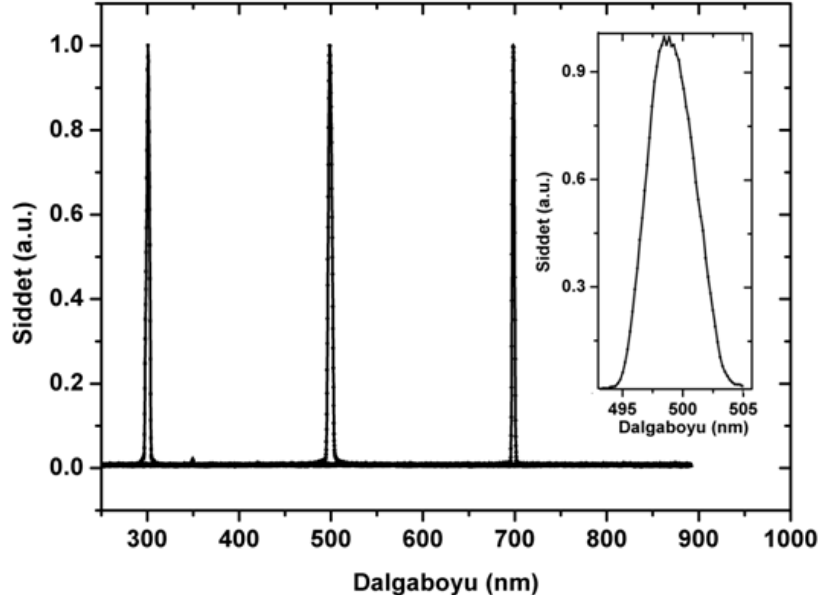
Şekilde görüldüğü üzere Ge nanoparçacık katkılanmamış örnek için elde edilen karanlık akım Ge nanoparçacık katkılanmış örneklere göre 1-2 mertebeye daha düşük olmakla beraber spektrumu Şekil 92’de verilen beyaz LED ışığına tepkisi yok denebilecek kadar azdır. Ancak Ge nanoparçacık katkılanmış örnekler için beyaz ışığa karşı belirgin bir fotocevap görülmektedir.



**Şekil 92 :** Beyaz LED izgesi

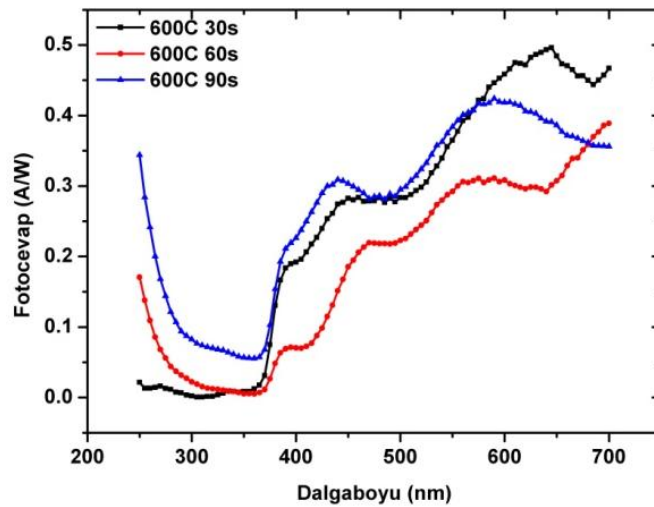
Elde edilen bu güzel I-V ölçümü sonrasında aygıtlar ile izgesel fotocevap ölçümü alınmasına karar verilmiştir. Bu amaçla öncelikle kullanılan tekrenklendiricinin

çıkışıındaki şpektrumun incelenmesine ve her daklgaboyunda ne kadar tek renkli olduğunun belirlenmesine karar verilmiştir. Bu amaçla tek renklendiricinin çıkışına UV-Görünür dalgaboylarında çalışabilen bir spektrometre takılarak değişik dalgaboylarında çıkan ışığın şpektrumu incelenmiştir. Elde edilen grafik aşağıdaki Şekil 93'de gösterilmektedir.



**Şekil 93:** Tekrenklendirici çıkışındaki ışığın 300 nm, 500 nm ve 700 nm deki izgenin ölçüm grafiği

Ölçüm sonucunda tekrenklendiricinin çıkış dalgaboyunda 2 nm lik bir ofset olduğu görülmüştür. İzgesel fotocevap ölçümlerinde bu ofset ölçüme eklenerek veriler toplanmıştır. Diğer taraftan çıkıştaki ışığın 5 nm FWHM olduğu görülmüş ve bu değer yeterince tek renkli bulunmuştur. Bu ölçümün ardından aygıtların izgesel fotocevap ölçümleri yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar Şekil 94'de gösterilmektedir.



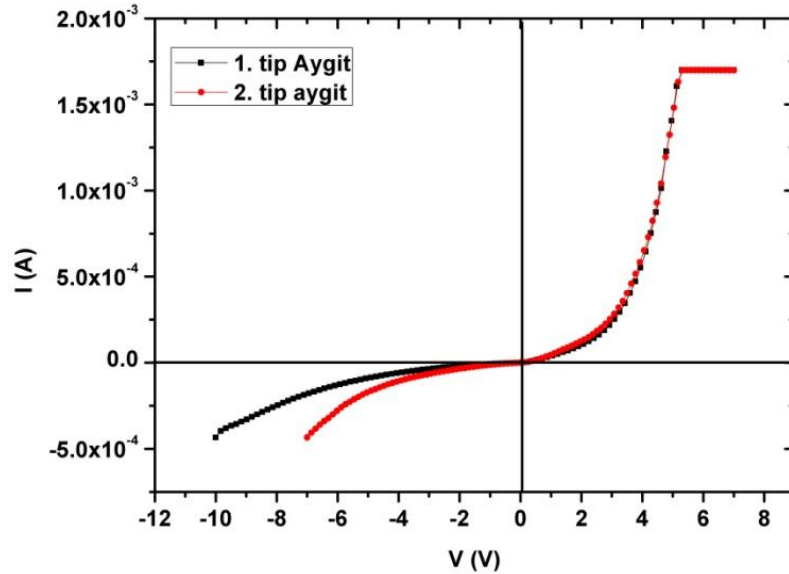
**Şekil 94:** 600 °C ısıtılmış P-Si alttaş üzerine GeNP:ZnO ince film ile üretilmiş fotodedektör aygıtlarının izgesel fotocevap grafikleri

Ölçüm sonucunda görünür dalgaboyunda fotocevap almış olmak sevindirici olsada tavlama süresinin uzaması ile optik soğurma ölçümlerinde görülen kaymanın aygıtların izgesel fotocevaplarında görülmüyor olması dikkati çekmektedir. Bu davranış da görünür dalgaboylarında alınan fotocevabın Si alttaştan gelme ihtimalini düşündürmektedir.

P- Si alttaş üzerine büyütülen örneklerde karanlık akımın yeterince düşük olmaması ve yukarıda anlatılan görünür dalgaboylarındaki fotocevabın Si alttaştan gelmesi şüphesi üzerine yeni bir deney tasarlanmıştır. Tez çalışması kapsamında üretilen  $TiO_2$  fotodedektörlerde Pt kontaklar ile oldukça iyi Schottky kontaklar üretilbildiği için kuvarz alttaşlar üzerine büyütülmüş GeNP:ZnO ince filmler üzerine  $TiO_2$  ince film kaplayarak heteroeklem oluşturmak ve bu aygıtın izgesel fotocevabının incelenmesi ile Ge nanoparçacık katkılamanın gerçekten görünür dalgaboylarında bir fotocevap getirip getirmeyeceğinin incelenmesine karar verilmiştir.

### C. GeNP:ZnO / $TiO_2$ heteroeklem Fotodedektör karakterizasyon çalışmaları sonuçları

Aygıt fabrikasyonunun hemen ardından aygıtların I-V ölçümleri yapılmıştır. Şekil 95'de bu ölçümün sonucu gösterilmektedir.



Şekil 95:  $TiO_2$  GeNP:ZnO heteroeklemlili aygıtların I-V ölçümü grafiği

2. tip aygıt için karanlık akım 1. Tip aygıtı göre daha yüksek çıkmış olsa da oldukça güzel bir diyot davranışı gözlenmektedir. Birkaç voltluk ters eğilme geriliminde karanlık akımlar  $\mu A$  seviyesinde olması da tez çalışması kapsamında

şimdiye kadar Ge:ZnO ince filmlerden elde edilen en iyi sonuçtur. Bu açılardan iyi bir sonuç elde edilmiş olmasına rağmen aygıtlar beyaz LED ışığı ile aydınlatıldığında herhangi bir fotocevap ölçülemedi. Fotocevabın çok düşük olması ihtimaline karşın aygıtlar 60 mW gücünde 405 nm lazer, 50 mW gücünde 532 nm lazer ve 5 mW gücünde 632 nm lazer ile aydınlatılmış ancak yine de herhangi bir fotocevap ölçülemedi.

ZnO ince film içerisinde oluşturulan Ge nanoparçacıklarının film karakterizasyon yöntemleri ile optik soğurma gösteriyor olmasına rağmen üretilen aygıtlarda fotocevap elde edilememesi için iki ihtimal olduğu düşünülmektedir. Bu ihtimallerden birincisi, Ge nanokristallerinin boyutları kuvantum sıkıştırması (quantum confinement) yaratabilecek boyutlarda sentezlenemiyor olması ihtimalidir. Nitekim G. Casarrubias-Segura ve O. Zarate-Corona 'nın yaptığı çalışmada [77] sentezlenen Ge nanoparçacıklarının boyutları tipik olarak 5 nm civarında olarak görülmektedir. İkinci ihtimal ise ışık düştüğünde oluşturulan foto taşıyıcılar Ge nanokristalleri çevresindeki kristal kusurlarının neden olduğu taşıyıcı tuzaklarında rekombine olarak aygıtın elektrodlarından toplanamıyor olması ihtimalidir. Her ne kadar ZnO içerisinde Ge nanokristalleri tespit edilmiş olsa da, Ge oksijen afinitesi yüksek olan bir element olduğu için ZnO kristal örgüsündeki oksijenlerin bir kısmını bağlayarak kendi yüzeyinde germanyumun oksitli bileşiklerini oluşturmakta ve örgüde oksijen eksik bölgelerin oluşmasına sebep olmaktadır. Oksijen bağlanmasının yanı sıra Zn / Ge / O atomlarının oluşturduğu bileşikler de olduğu görülen Ge nanokristalleri ve ZnO ince film arayüzünde bulunması muhtemeldir. Aslında Ge nanoparçacıklarının çevresinde oldukça karmaşık bir atom veya bileşik dizilimi oluşmaktadır. Bu da foto taşıyıcıların tuzaklanması ihtimalini ve dolayısıyla beklendiği gibi görünür dalgaboylarında fotocevap alınamıyor oluşunun bir sebebi olarak görülmektedir.

## 4. SONUÇLAR

Tez çalışması süresince temelde TiO<sub>2</sub> ve ZnO malzemeleri kullanılarak fotodedektör aygıtları üretilmiş ve bu aygıtların karakterizasyonları yapılmıştır.

Öncelikle RF magnetron Sputter yöntemi ile büyütülmüş TiO<sub>2</sub> ince filmlerin farklı ısı ve O<sub>2</sub> plazma işlemlerine tabi tutulduklarında ince film özelliklerindeki değişiklikler incelenmiş sonra da bu kaplama sonrası işlenmiş ve büyütüldüğü hali ile ince filmler üzerine MSM tipi fotodedektörlerin fabrikasyonları yapılmış ve bu aygıtların karakterizasyonları yapılmıştır. Tavlanan örneklerde ısı işlem sıcaklığının artışı ile film kalitesinde minör iyileşmeler gözlenmiş, O<sub>2</sub> plazmasına tabi tutulan örneklerin ise sadece yüzey topografilerinde bozulma gözlenmiştir. İncefilmin büyütüldüğü hali ile üretilen fotodedektörlerin kaplama sonrası işlenmiş örneklerle göre farklı çalışmadığı ve deneylerin yapıldığı koşullarda üretilen ince filmlere herhangi bir işlem yapılmaksızın iyi performans verebilen fotodedektör aygıtları üretilebileceği gösterilmiştir. İncefilmin kaplandığı hali ile üretilen fotodedektörlerde 5V eğilme geriliminde  $1.57 \times 10^{-9}$  A/cm<sup>2</sup> karanlık akım yoğunluğu, 1.73 A/W fotocevap, %1750 mertebesinde kuvantum verim, >50 V kırılma gerilimi, ve sırasıyla 3 s / 7 s yükselme / düşme zamanları elde edilmiş, GaN ve SiC gibi yüksek bant genişlikli malzemeler ile üretilen fotodedektörler ile benzer özelliklere sahip ve bu malzemelerin ve fotodedektörlerin üretimi için gerekli karmaşık ve pahalı fabrikasyon süreçlerine ihtiyaç duymadan yüksek performanslı, ucuz, kolay üretilebilen UV fotodedektörler üretilebileceği bu çalışmada gösterilmiştir.

Diğer taraftan nanoplazmonik yapılar üzerine çalışmalar yapılmış, filtre fonksiyonu görece bir nanoplazmonik yapı tasarlanmış ve daha önce elde edilen iyi performanslı TiO<sub>2</sub> ince filmler üzerine nanoplazmonik yapı bir UV fotodedektör tasarımı, üretimi ve karakterizasyonu gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre UV dalgaboylarında da plazmonik filtrelerin üretilebileceği, bu yöntem ile UV fotodedektörlerin izgesel fotocevabının modifiye edilerek tipik olarak UVB bandında bulunan tepe fotocevabın UVC bandına kaydırılabildiği, UVB bandındaki fotocevabın %60 oranında düşürülebildiği gösterilmiş ve hem plazmonik yapılar

için hem de TiO<sub>2</sub> temelli fotodedektörler için farklı kullanım alanları açılacağı gösterilmiştir.

ZnO ince filmler ile ilgili yapılan çalışmalar kapsamında Nanotam'da üretilen ZnO ince filmler ile literatürdeki değerlere göre en düşük karanlık akıma ve en yüksek çalışma hızına sahip UV fotodedektörler üretilmiş ve karakterize edilmiştir. Bu fotodedektörlerde 100 V'dan yüksek kırılma gerilimi, 100 pA/cm<sup>2</sup> den düşük karanlık akım yoğunluğu, 0.35 A/W fotocevap ve 22 ps yükselme ve 8 ns düşme zamanı elde edilebilmiştir.

Diğer taraftan Hacettepe Üniversitesi Fizik Mühendisliği Bölümü SNTG laboratuvarlarında üretilen Ge nanoparçacık katkılanmış ZnO ince filmler ile çalışmalar yapılmış, bu ince filmler ile MSM tipi aygıtlar üretilmiş, P tipi Silisyum alttaşlar ile heteroeklemler üretilmiş ve literatürde daha önce rastlanmamış olan TiO<sub>2</sub> ile heteroeklemler üretilmiş ve bu aygıtların karakterizasyonları yapılmıştır. Beklenenin aksine Ge nanoparçacıkları katkılanmış ZnO ince filmlerden görünür dalgaboylarında fotocevap alınmamış olsa da yapılan çalışmalardan elde edilen bilgilere göre daha küçük boyutlu Ge nanoparçacıkları katkılamanın gerekliliği ve Ge – ZnO arayüzü konusunda araştırma yapılması gerekliliği ortaya çıkmıştır.

Yapılan çalışmaların daha öteye götürülebilmesi için TiO<sub>2</sub> veya ZnO malzemeleri üzerine tasarlanacak nanoplazmonik yapılar konusunda araştırmalara devam edilip daha iyi filtreleme karakteri sağlayabilecek daha yüksek kalite faktörüne sahip bir plazmonik yapı tasarlanması gerekir. Ancak kalite faktörünün artışı filtrenin bant genişliğini de azaltacağı için geniş bantlı bir filtreleme sağlamak üzere birkaç değişik yapının entegre edilmesi gerekli olacağını öngörmekteyim. Tam anlamıyla güneş körü bir fotodedektörün üretilmesi bu malzeme ile elde edilebilen yüksek kazanç sayesinde özellikle füze savunma sistemlerinde ihtiyaç duyulan katıhal fotodedektörler için bir çözüm oluşturulabileceğini düşünüyorum. Ancak aygıtın yükselme düşme zamanlarında da iyileştirme yapılması konusunda çalışmalar yapılmalıdır.

ZnO malzemesinin yakın gelecekte yüksek performanslı UV algılama konusunda pek çok uygulamada yer alacağı kanısındayım. Bu fotodedektörlerde karanlık akımdan taviz vermeksizin elde edilen fotocevabın artırılması ile hemen

hemen her türlü UV algılamada rakiperi olan GaN ve SiC malzemelerinden daha popüler bir malzeme olacağını düşünüyorum.

Ge katkılı ZnO ince filmler için ise hala temel araştırması yapılması gereken pek çok konu vardır. Öncelikle Ge nanokristalleri ile ZnO arayüzünün yapısının anlaşılması için araştırmalar yapılmalıdır. Bu yapının anlaşılması ile fotocevap problemlerinin daha kolay çözülebileceğini düşünüyorum. Arayüz yapısının anlaşılmasını takiben malzeme üretimi çalışmalarına dönüp prosesin belirlenen sorunları düzeltecek şekilde optimize edilmesi ile üretilen malzemeler ile görünür dalgalarda fotocevap üretebilecek aygıtlar yapılmasının mümkün olacağı kanısındayım. Diğer taraftan bu noktaya ulaşılması fotovoltik çalışmalara da katkı sağlayacak ve daha kolay ve ucuz üretilen güneş gözeleri yapılabileceğini öngörüyorum. Diğer taraftan Ge katkılı malzemenin yanısıra bu malzeme ile bant yapısı mühendisliği çalışılarak da aranan çözüm için alternatif bir yol açılması gerekliliğini görüyorum.



## KAYNAKLAR

- [1] I. E. Wach, Raman and IR studies of surface metal oxide species on oxide supports: Supported metal oxide catalysts, *Catalysis Today*, 27, 437–455, 1996
- [2] E. Palomares et al. , Control of Charge Recombination Dynamics in Dye Sensitized Solar Cells by the Use of Conformally Deposited Metal Oxide Blocking Layers, *Journal of American Chemical Society*, 125, 475–482, 2003
- [3] Zhiyu Wang et al., Metal Oxide Hollow Nanostructures for Lithium-ion Batteries, *Advanced Materials*, 24, 1903–1911, 2012
- [4] N. Barsan and U. Weimar, Conduction Model of Metal Oxide Gas Sensors, *Journal of Electroceramics*, 7, 143-167, 2001
- [5] Y. Wang et al., Preparation of Rutile Titanium Dioxide White Pigment via Doping and Calcination of Metatitanic Acid Obtained by the NaOH Molten Salt Method, *Industrial and Engineering Chemistry Research*, 49,7693-7696, 2010,
- [6] Seiyama, et al., A new detector for gaseous components using semiconductive thin films, *Analytical Chemistry*, 34, 1502-1503, 1962
- [7] R. Sun et al., Photoinduced Surface Wettability Conversion of ZnO and TiO<sub>2</sub> Thin Films, *Journal of Physical Chemistry B*, 105, 1984-1990, 2001
- [8] J.D Perkins et al., Combinatorial studies of Zn-Al-O and Zn-Sn-O transparent conducting oxide thin films, *Thin Solid Films*, 411, 152-160, 2002
- [9] K. Nomura et al., Room-temperature fabrication of transparent flexible thin-film transistors using amorphous oxide semiconductors, *Nature* 432, 488-492, 2004
- [10] T.V. Anuradha, S. Ranganathan, Nanocrystalline TiO<sub>2</sub> by three different synthetic approaches: A comparison, *Bulletin of Materials Science*, 30, 236-296, 2007
- [11] G.S. McNulty, Production of titanium dioxide, Huntsman Pigments, Tioxide Europe Ltd white paper.
- [12] A. Mehdilo, M. Irannajad, Iron removing from Tittanium slug for synthetic rutile production, *Physicochemical Problems of Mineral Processing*, 48, 425–439, 2012
- [13] Jonas Moellmann *et al* A DFT-D study of structural and energetic properties of TiO<sub>2</sub> modifications, *Journal of Physics: Condensed Matter* 24, 42420, 2012
- [14] M Landmann et al. , The electronic structure and optical response of rutile, anatase and brookite TiO<sub>2</sub>, *Journal of Physics: Condensed Matter*, 24, 195503, 2012
- [15] F. Akira, Electrochemical Photolysis of water at a semiconductor electrode, *Nature*, 238,37-38, 1972
- [16] Shin-ichi Ohkoshi et al. , Synthesis of a metal oxide with a room temperature photoreversible phase transition, *Nature Chemistry*, 2, 539-545, 2010

- [17] M. Manzur et al., TiO<sub>2</sub>/SiO<sub>2</sub> multilayer as an antireflective and protective coating deposited by microwave assisted magnetron sputtering, *Opto-electronic Review*, 21, 233-238, 2013
- [18] Wisitsoraat et al., TiO<sub>2</sub> based nanocrystalline thin film gas sensors prepared by ion-assisted electron beam evaporation, *2nd IEEE international conference on Nano/Micro Engineered and Molecular Systems*, 16-19 Jan 2007 Bangkok.
- [19] B. Karunagaran et al., TiO<sub>2</sub> thin film gas sensors for monitoring ammonia, *Materials Characterization*, 58, 680-684, 2007
- [20] F. Rossella et al., TiO<sub>2</sub> thin films for spintronics application: a raman study, *Journal of Raman Spectroscopy*, 41, 558-565, 2010
- [21] Y. Xie et al., Low dark current metal-semiconductor-metal ultraviolet photodetectors based on sol-gel-derived TiO<sub>2</sub> thin films, *Journal of Applied Physics*, 109, 2011
- [22] T.D. Dongale et al., Nanostructured TiO<sub>2</sub> thin film memristor using hydrothermal process, *Journal of Alloys and Compounds*, 593, 267-270, 2014
- [23] A. Elfanaoui et al., The synthesis of TiO<sub>2</sub> thin film by chemical bath deposition method, *Moroccan Journal of Condensed Matter*, 13, 2011
- [24] D. Guo et al., Preparation of rutile TiO<sub>2</sub> thin films by laser chemical vapor deposition method, *Journal of Advanced Ceramics*, 2, 162-166, 2013
- [25] S. Yamamoto et al., Preparation of epitaxial TiO<sub>2</sub> films by pulsed laser deposition technique, *Thin Solid Films*, 401, 88-93, 2001
- [26] N. Rausch et al., thin TiO<sub>2</sub> films prepared by low pressure chemical vapor deposition, *Journal of Electrochemical Society*, 140, 145-149, 1993
- [27] H.W. Lehmann and K. Frick, Optimizing deposition parameters of electron beam evaporated TiO<sub>2</sub> films, *Applied Optics*, 27, 4920-4924, 1988
- [28] H. Huang et al., Growth and fabrication of sputtered TiO<sub>2</sub> based ultraviolet detectors, *Applied Surface Science*, 293, 248-254, 2014
- [29] W.S. Shih et al., Effect of oxygen plasma treatment on characteristics of TiO<sub>2</sub> photodetectors, *IEEE Sensors Journal*, 11, 3031-3035, 2011
- [30] J. Xing et al., Highly sensitive fast-response UV photodetectors based on epitaxial TiO<sub>2</sub> films, *Journal of Physics D*, 44, 2011
- [31] B. Sunandan, D. Joydeep, Hydrothermal growth of ZnO nanostructures, *Science and Technology of Advanced Materials*, 10, 2009
- [32] Schulz et al., Inductively heated Bridgman method for the growth of zinc oxide single crystals, *Journal of Crystal Growth*, 310, 1832-1835, 2008
- [33] Takahashi, K., Yoshikawa, A., Sandhu, A., *Wide Bandgap Semiconductors: Fundamental Properties and Modern Photonic and Electronic Devices*. Springer. p. 357. ,2007
- [34] Ü. Özgür et al., A comprehensive review of ZnO materials and devices, *Journal of Applied Physics*, 98, 041301, 2005
- [35] Anderson Janotti, Chris G Van de Walle, Fundamentals of zinc oxide as a semiconductor, *Reports on Progress in Physics*, 72, 126501, 2009

- [36] T. Söderström et al., ZnO Transparent conductive oxide for thin film silicon solar cells, *Proc. of SPIE*, Vol. 7603 76030B-1, 2010
- [37] C. H. Kuo et al., Low Operation Voltage of Nitride-Based LEDs with Al-Doped ZnO Transparent Contact Layer, *Electrochemical Solid-State Letters*, 11(9), H269-H271, 2008
- [38] George F. Fine et al., Metal Oxide Semi-Conductor Gas Sensors in Environmental Monitoring, *Sensors*, 10, 5469-5502, 2010
- [39] P. F. Carcia et al., Transparent ZnO thin-film transistor fabricated by rf magnetron sputtering, *Applied Physics Letters*, 82, 1117, 2003
- [40] N. Yagi et al., Sterilization using 365nm UV-LED, *Engineering in Medicine and Biology Society, 2007. EMBS 2007. 29th Annual International Conference of the IEEE*, 22-26 Aug. Lyon 2007
- [41] D. Anglos et al., Laser-Induced Fluorescence in Artwork Diagnostics: An Application in Pigment Analysis, *Applied Spectroscopy*, 50, 1331-1334, 1996
- [42] L. Sanchez-Prado, Monitoring the photochemical degradation of triclosan in wastewater by UV light and sunlight using solid-phase microextraction, *Chemosphere*, 65, 1338-1347, 2006
- [43] Hakan Karaagac et al., Au/TiO<sub>2</sub> nanorod-based Schottky-type UV photodetectors, *Physica Status Solidi (RRL) - Rapid Research Letters*, 6 (11), 442-444, 2012
- [44] Gang Cheng, ZnO nanowire Schottky barrier ultraviolet photodetector with high sensitivity and fast recovery speed, *Applied Physics Letters*, 99, 203105, 2011
- [45] Jian Huang et al., Growth of p-type ZnO films and fabrication of ZnO photodiode-based UV detectors, *Semiconductor Science and Technology*, 24, 2009
- [46] Moon, T.H et al., The Fabrication and Characterization of ZnO UV Detector, *Applied Surface Science*, 240, 280-285, 2005
- [47] I.S. Jeong et al., Ultraviolet-enhanced photodiode employing n-ZnO/p-Si structure, *Applied Physics Letters*, 83(14), 2946-2948, 2003
- [48] Y. S. Choi, Photoresponse characteristics of n-ZnO/p-Si heterojunction photodiodes, *Journal of Vacuum Science and Technology B*, 20(6), 2384-2387, 2002
- [49] Jie Xing et al., Highly sensitive fast-response UV photodetectors based on epitaxial TiO<sub>2</sub> films, *Journal of Physics D: Applied Physics*, 44, 2011
- [50] Xu, Q.A et al., ZnO Thin Film Photoconductive Ultraviolet Detector with Fast Photoresponse, *Journal of Crystal Growth*, 289, 44-47, 2006
- [51] Cheng-Liang Hsu et al., Vertical p-Type Cu-Doped ZnO/n-Type ZnO Homo Junction Nanowire-Based Ultraviolet Photodetector by the Furnace System with Hotwire Assistance, *ACS Applied Materials and Interfaces*, 6 (6), 4277-4285, 2014
- [52] Tsung-Ying Tsai et al., A Visible-Blind TiO<sub>2</sub> Nanowire Photodetector, *Journal of Electrochemical Society*, 159(4), 132-135, 2012

- [53] Li, M.Y. et al., Radio Frequency Sputtered Zinc Oxide Thin Films with Application to Metal-Semiconductor-Metal Photodetectors, *Thin Solid Films*, 515, 7357-7363, 2007
- [54] Huolin Huang et al., Low-Dark-Current TiO<sub>2</sub> MSM UV Photodetectors With Pt Schottky Contacts, *Electron Device Letters*, 32, 530-532, 2011
- [55] Serkan Butun et al., LSPR enhanced MSM UV photodetectors, *Nanotechnology*, 23, 2012
- [56] Chun-Chieh Chang et al., A Surface Plasmon Enhanced Infrared Photodetector Based on InAs Quantum Dots, *Nano Letters*, 10 (5), 1704–1709, 2010
- [57] Zhaowei Liu et al., Focusing Surface Plasmons with a Plasmonic Lens, *Nano Letters*, 5(9), 1726-1729, 2005
- [58] Avner Yanai and Uriel Levy, Plasmonic focusing with a coaxial structure illuminated by radially polarized light, *Optics Express*, 17(2), 2009
- [59] E. Ozbay, Plasmonics: Merging Photonics and Electronics at Nanoscale Dimensions, *Science*, 311(5758), 189, 2006.
- [60] S. Yokogawa et al., Plasmonic Color Filters for CMOS Image Sensor Applications, *Nano Letters*, 12, 4349, 2012
- [61] Huolin Huang, Metal–Semiconductor–Metal Ultraviolet Photodetectors Based on TiO<sub>2</sub> Films Deposited by Radio-Frequency Magnetron Sputtering, *IEEE Electron Device Letters*, 31, 588-590, 2010
- [62] WJWang, Metal–insulator–semiconductor– insulator–metal structured titanium dioxide ultraviolet photodetector, *Journal of Physics D: Applied Physics*, 43 , 2010
- [63] Hailin Xue, TiO<sub>2</sub> based metal-semiconductor-metal ultraviolet photodetectors, *Applied Physics Letters*, 90, 201118, 2007
- [64] Jianping Zou et al., Ultraviolet Photodetectors Based on Anodic TiO<sub>2</sub> Nanotube Arrays, *Journal of Physical Chemistry C*, 114, 10725–10729, 2010
- [65] C. Tan et al., Optical absorption enhancement of hybrid-plasmonicbased metal-semiconductor-metal photodetector incorporating metal nanogratings and embedded metal nanoparticles, *Optics Express*, 21, 1713-1725, 2013.
- [66] S. M. Nejad et al., Characterization of responsivity and quantum efficiency of TiO<sub>2</sub>—Based photodetectors doped with Ag nanoparticles, *Mechanical and Electronics Engineering (ICMEE), 2010 2nd International Conference on Mechanical and Electronics Engineering* , 2, V2-394,V2-397,2010
- [67] C. Tong, J. Yun et al., Nanoplasmonic Enhanced ZnO/Si Heterojunction Metal–Semiconductor–Metal Photodetectors, *Journal of Electronic Materials*, 42, 889-893, 2013
- [68] S. Butun et al., Nanoantenna coupled UV subwavelength photodetectors based on GaN, *Optics Express*, 20, 2649-2656, 2012
- [69] S. Butun et al., LSPR enhanced MSM UV photodetectors, *Nanotechnology*, 23, 444010, 2012

- [70] S. Yokogawa et al., Plasmonic Color Filters for CMOS Image Sensor Applications, *Nano Letters*, 12, 4349, 2012
- [71] D. Lerose et al., CMOS-integrated geometrically tunable optical filter, *Advanced Semiconductor Manufacturing Conference (ASMC), 23rd Annual SEMI*, pp. 97-101, 15-17, 2012
- [72] Ekmel Ozbay et al., High-Performance Solar-Blind Photodetectors Based on  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$  Heterostructures, *IEEE Journal of Selected Topics In Quantum Electronics*, 10,742, 751, 2004
- [73] Necmi Biyikli et al., Solar-blind AlGa<sub>N</sub>-based Schottky photodiodes with low noise and high detectivity, *Applied Physics Letters*, 81, 2002
- [74] Dung-Sheng Tsai et al., Solar-Blind Photodetectors for Harsh Electronics, *Scientific Reports*, 4, 1-5, 2013
- [75] Necmi Biyikli et al., Fabrication and characterisation of solar-blind  $\text{Al}_{0.6}\text{Ga}_{0.4}\text{N}$  MSM photodetectors, *Electronics Letters*, 41, 274-275, 2005
- [76] T. Minami et al., Luminescent properties of sputtered ZnO thin films, *Journal of Luminescence*, 24-25, 63-66, 1981
- [77] James C. Moore et al., A Phenomenological Model for the Photocurrent Transient Relaxation Observed in ZnO-Based Photodetector Devices, *Sensors*, 13, 9921-9940, 2013
- [78] Mohammadnejad, S et al., Dark Current Reduction in ZnO-Based MSM Photodetectors with Interfacial Thin Oxide Layer, *High Capacity Optical Networks and Enabling Technologies, 2008. HONET 2008. International Symposium on*, 18-20 Nov, 259 – 264, 2008
- [79] Leonard J. Brillson and Yicheng Lu, ZnO Schottky barriers and Ohmic contacts, *Journal of Applied Physics* 109, 121301 2011
- [80] K.W. Liu et al., Ultraviolet photoconductive detector with high visible rejection and fast photoresponse based on ZnO thin film, *Solid-State Electronics*, 51, 757–761, 2007
- [81] Liang-Wen Ji et al., Characteristic Improvements of ZnO-Based Metal–Semiconductor–Metal Photodetector on Flexible Substrate with ZnO Cap Layer, *Japanese Journal of Applied Physics*, 49, 052201, 2010
- [82] S. J. Young et al., ZnO Metal-Semiconductor-Metal Ultraviolet Photodiodes with Au Contacts, *Journal of The Electrochemical Society*, 154, H26-H29, 2007
- [83] M. Nakano et al., Transparent polymer Schottky contact for a high performance visible-blind ultraviolet photodiode based on ZnO, *Applied Physics Letters*, 93, 123309, 2008
- [84] J. Sun et al., Fast response ultraviolet photoconductive detectors based on Ga-doped ZnO films grown by radio-frequency magnetron sputtering, *Applied Surface Science*, 257, 921 2010
- [85] Dayong Jiang et al., Ultraviolet Schottky detector based on epitaxial ZnO thin film, *Solid-State Electronics*, 52, 679–682, 2008

[86] G. Casarrubias-Segura, O. Zarate-Corona, Optical characterization of Ge/ZnO nanocomposites, *Superficies y Vacío*, 13, 27-29, 2001

## ÖZGEÇMİŞ

### Kimlik Bilgileri:

Adı Soyadı : Mehmet Deniz Çalışkan  
Doğum Yeri : Ankara  
Medeni Hali : Evli  
E-posta : dcalis@bilkent.edu.tr  
Adresi : Kümeevler Cad. Gazililer Sit. No:25 Alacaatlı/Ankara

### Eğitim

Lise : Özel Arı Fen Lisesi (1994)  
Lisans : Hacettepe Üniversitesi (1999)  
Yüksek lisans : Hacettepe Üniversitesi (2003)

**Yabancı Dil ve Düzeyi :** İngilizce, İyi

**İş Deneyimi :** Karel Elektronik (tasarım mühendisi), Medesis Medikal (servis mühendisi), Dismed Medikal (tasarım mühendisi), Bilkent Üniversitesi Nanotam (proje mühendisi, grup lideri)

**Deneyim Alanları:** Optoelektronik yarıiletken aygıt tasarımı ve karakterizasyonu, mikro ve nano fabrikasyon, optoelektronik aygıtlar için uygulama devreleri tasarımı, elektronik kart üretimi ve testi.

**Tezden Üretilmiş Projeler ve Bütçeleri : -**

**Tezden Üretilmiş Yayınlar :**

Deniz Çalışkan et al, Metal–semiconductor–metal photodetector on as-deposited TiO<sub>2</sub> thin films on sapphire substrate, *Journal of Vacuum Science and Technology B*, 31(2), 2013

Deniz Çalışkan et al., Spectral response modification of TiO<sub>2</sub> MSM photodetector with an LSPR filter, *Optics Express*, 22, 14096, **2014**

**Tezden Üretilmiş Tebliğ ve/veya Poster Sunumu ile Katıldığı Toplantılar :**

Fotonik 2013, poster sunumu, Metal–semiconductor–metal photodetector on as-deposited TiO<sub>2</sub> thin films on sapphire substrate