

**T.C.
HARRAN ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

DOKTORA TEZİ

**Ga₂O₃/p-Si P-N HETERO EKLEMLİ UV FOTODEDEKTÖRLERİNİN
ÜRETİMİ VE KARAKTERİZASYONU**

Uğur HARMANCI

ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**ŞANLIURFA
2023**

İÇİNDEKİLER

Sayfa No

ÖZET	i
TEŞEKKÜR	iii
ŞEKİLLER DİZİNİ	iv
ÇİZELGELER DİZİNİ	vi
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ	vii
1. GİRİŞ	1
2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR	8
2.1. Yarı iletkenlerin Elektriksel Özellikleri	8
2.1.1. Bant aralığı enerjisi	8
2.1.2. Katkı atomları ve enerji seviyeleri	9
2.1.3. N tipi yarı iletken	9
2.1.4. P tipi yarı iletkenler	10
2.2. Ga ₂ O ₃ Yarı İletkeni	12
2.2.1. Galyum oksit polimorfları	12
2.2.2. β-Ga ₂ O ₃ polimorfu	14
2.2.3. β-Ga ₂ O ₃ polimorfunun elektriksel özellikleri	17
2.2.4. Galyum oksidin (Ga ₂ O ₃) katkılanması	18
2.3. Fotodetektörler	19
2.3.1. PN fotodetektör	21
2.3.2. β-Ga ₂ O ₃ tabanlı ultraviyole fotodetektörler	22
2.4. n-β-Ga ₂ O ₃ /p-Si p-n Güneş Körü Fotodetektörün Bant Diyagramı	22
2.5. Fotodetektörlerin Performanslarının Belirlemesinde Kullanılan Parametreler	24
2.6. Metal Nanoparçacıkların Plazmonik Etkisi	26
3. MATERYAL ve YÖNTEM	30
3.1. Katkısız ve Katkılı Ga ₂ O ₃ Çözeltilerin ve İnce Filmlerin Hazırlanması	30
3.1.1. Katkısız Ga ₂ O ₃ çözeltisinin hazırlanması	31
3.1.2. Titanyum katkılı Ga ₂ O ₃ çözeltisinin hazırlanması	32
3.1.3. Antimon (Sb) / Tungsten (W) / Kalay (Sn) / Çinko (Zn) katkılı Ga ₂ O ₃ çözeltilerinin hazırlanması	33
3.2. p-Si Levhaların Kesilmesi	35
3.3. p-Si Alt Taşların Temizliği	35
3.4. İnce Film Büyütme Metotları	36
3.4.1. Sol-jel yöntemi	37
3.4.2. Spin-kaplama methodu	38
3.5. Cihazların Metal Kontaklarının Eklenmesi	39
3.5.1. Ön metal kontak	42
3.5.2. Arka metal kontak	43
3.6. Metal Nanoparçacıkların (Au ve Ag) Biriktirilmesi	44
3.7. Cihazların Karakterizasyonu	44
3.7.1. X-ışını kırınımı (XRD)	45
3.7.2. UV-Vis spektroskopisi	47
3.7.3. Taramalı elektron mikroskobu (SEM)	48
3.7.4. Cihazların Akım-Gerilim (I-v) ve Akım-Zaman (I-t) Ölçümleri	49
4. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA	51
4.1. Katkısız ve Ti (Titanyum), W (Tungsten), Sb (Antimony), Zn (Çinko) ve Sn (Kalay) Katkılı n-β-Ga ₂ O ₃ /p-Si Tabanlı Fotodetektörler	53
4.1.1. Yapısal özellikler	53
4.1.2. Optik özellikler	55
4.1.3. SEM analizleri	58
4.1.4. Elektriksel özellikler	59
4.2. %1-5 Sn (Kalay) katkılı n-β-Ga ₂ O ₃ :Sn/p-Si Tabanlı Fotodetektörler	64
4.2.1. Yapısal özellikler	65

4.2.2. Optik özellikler	67
4.2.3. SEM analizleri	69
4.2.4. Elektriksel özellikler	70
4.3. Nanoparçacıklar ile Dekore Edilmiş %2 Sn Katkılı n- β -Ga ₂ O ₃ :Sn/p-Si Fotodedektörler	74
4.3.1. Optik özellikler	74
4.3.2. Elektriksel özellikler	75
5. SONUÇLAR ve ÖNERİLER	79
5.1. Sonuçlar	79
5.2. Öneriler	80
KAYNAKLAR	82
ÖZGEÇMİŞ	91



ÖZET

Doktora tezi

Ga₂O₃/p-Si P-N HETERO EKLEMLİ UV FOTODEDEKTÖRLERİNİN ÜRETİMİ VE KARAKTERİZASYONU

Uğur HARMANCI

Harran Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Elektrik-Elektronik Mühendisliği Ana Bilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Mehmet Tahir GÜLLÜOĞLU
YIL: 2023, Sayfa: 90

Ultra geniş bant aralıklı (Ga₂O₃), kimyasal ve termal kararlılığı, opto-elektronik ve güç elektroniğinde kullanılan cihazlara yönelik çeşitli potansiyel uygulamaları nedeniyle son yıllarda büyük ilgi görmüştür. Çözelti bazlı sentez, düşük sıcaklıklarda yüksek verim sağlayan basit ve uygun maliyetli bir sentez yöntemidir. Bu tez çalışmasında sol-jel spin-kaplama yöntemiyle p-Si alt taşlar üzerine n-β-Ga₂O₃ ince filmleri kaplanmıştır. Katkılı ve katkısız β-Ga₂O₃ ince filmler kullanılarak n-Ga₂O₃:X/p-Si (X: W⁺⁴, Ti⁺⁴, Sb⁺⁴, Zn⁺², Sn⁺⁴) UV güneş körü fotodedektörler (GKFD) üretilmiştir. Katkı maddelerinin türünün ve oranının, fotodedektörün (FD) optik, atomik, yüzey morfolojileri ve elektriksel özellikleri üzerine etkisi araştırılmıştır. Bu araştırmalarda X-ışını kırınım spektrumları (XRD), taramalı elektron mikroskobu (SEM) analizleri, UV-Vis spektroskopisi ölçümlerinden faydalanılmıştır. Üretilen fotodedektörlerin elektriksel karakterizasyonları akım-voltaj (I-v) ölçümleri ile araştırılmıştır. Ga₂O₃, galyum kaynağı olarak kullanılan galyum (III) nitrat hidrat ile çözelti sentezi yöntemi ile başarıyla sentezlenmiştir. Ardından yapılan ısı tavlama işlemiyle, Ga₂O₃ bileşiğindeki Ga elementi ve O elementi oranında iyileşmeler gösterirken, özellikle yüksek sıcaklıkta β-Ga₂O₃ fazına dönüştüğü gözlenmiştir. UV-Vis analizleri, aynı kalınlıktaki katkılı ve katkısız β-Ga₂O₃ ince filmlerin benzer geçirgenlik spektrumu sergilediğini göstermiştir. 280 nm'nin altındaki derin ultraviyole bölgesinde azaltılmış geçirgenlik filmlerin bir GKFD yayıcı tabakası olarak kullanılabileceği göstermiştir. Katkılı ve katkısız β-Ga₂O₃ cihazlarının optoelektronik performansını araştırmak için karanlıkta ve ışık altında akım-voltaj (I-V) ölçümleri gerçekleştirilmiştir. GKFD davranışını anlamak için n-β-Ga₂O₃ ve p-Si arasında meydana gelen hetero eklem, ters besleme altında bant konumlarının yeniden düzenlenmesi yoluyla niteliksel incelenmiştir. Sonuçlar, katkılama ile fotoakımın, doğru ve ters besleme bölgesi altında aynı anda arttığını ve katkılarının eklenmesinden sonra n-β-Ga₂O₃/p-Si hetero eklemlerde bağlantı kalitesinin daha iyi hale geldiği göstermiştir. Zamansal tepki ölçümleri, katkılı n-β-Ga₂O₃/p-Si p-n hetero eklem tabanlı fotodedektörün yanıtının katkı maddesine göre değişkenlik gösterdiğini ortaya çıkarmıştır. Tepki süresi iyileşmesi, kusur durumlarının bastırılmasından dolayı ışıkla uyarılmış taşıyıcıların hızlıca ayrılmasına ve göçüne veya ışıkla uyarılmış taşıyıcıları verimli bir şekilde ayırabilen güçlü p-n bağlantısına atfedilmiştir. Bu çalışmanın sonuçları, basit, düşük maliyetli ve yüksek performanslı β-Ga₂O₃ güneş körü fotodedektörler imal etmek için bir yol sağlayacağını göstermiştir.

ANAHTAR KELİMELEER: Yarı iletkenler, β-Ga₂O₃, Fotodedektörler (FD), Güneş körü fotodedektörler (GKFD)

ABSTRACT

PhD thesis

FABRICATION AND CHARACTERIZATION OF $\text{Ga}_2\text{O}_3/\text{p-Si}$ P-N HETERO JUNCTION UV PHOTODETECTORS

Uğur HARMANCI

Harran University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Electrical and Electronics Engineering

Supervisor: Prof. Dr. Mehmet Tahir GÜLLÜOĞLU
YEAR: 2023, Page:90

Ultra-wide band gap (Ga_2O_3) has attracted much attention in recent years due to its chemical and thermal stability and various potential applications for devices used in opto-electronics and power electronics. Solution-based synthesis is a simple and cost-effective synthesis method that provides high efficiency at low temperatures. In this thesis study, n- $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ thin films were coated on p-Si substrates by sol-gel spin-coating method. n- $\text{Ga}_2\text{O}_3\text{:X/p-Si}$ (X: W^{+4} , Ti^{+4} , Sb^{+4} , Zn^{+2} , Sn^{+4}) UV solar-blind photodetectors (SBPD) were produced by using doped and undoped $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ thin films. The effect of the type and ratio of dopants on the optical, atomic, surface morphologies and electrical properties of the photodetector (PD) was investigated. In these researches, X-ray diffraction spectra (XRD), scanning electron microscopy (SEM) analyses, and UV-Vis spectroscopy measurements were used. Electrical characterization of the produced photodetectors was investigated by current-voltage (I-v) measurements. Ga_2O_3 has been successfully synthesized by the solution synthesis method with gallium (III) nitrate hydrate used as the gallium source. With the subsequent thermal annealing process, improvements were observed in the ratio of Ga element and O element in the Ga_2O_3 compound, while a transformation to $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ phase was observed, especially at high temperatures. UV-Vis analyzes showed that doped and undoped $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ thin films of the same thickness exhibited similar transmittance spectra. It has been shown that reduced transmittance films in the deep ultraviolet region below 280 nm can be used as a SBPD emitter layer. To investigate the optoelectronic performance of doped and undoped $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ devices, current-voltage (I-v) measurements were carried out in the dark and under light. To comprehend SBPD behavior, the heterojunction occurring between n- $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ and p-Si was qualitatively examined through realignment of band positions under reversed bias. The results showed that with doping, the photocurrent increased simultaneously under the forward and reverse feed region, and the junction quality in n- $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3/\text{p-Si}$ heterojunctions became better after the addition of dopants. Temporal response measurements revealed that the response of the doped n- $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3/\text{p-Si}$ p-n heterojunction based photodetector varies depending on the type of dopant. The response time improvement has been attributed to the rapid separation and migration of photoexcited carriers due to suppression of defect states or the strong p-n junction that can efficiently separate photoexcited carriers. The results of this study demonstrate that it will provide a way to fabricate simple, low-cost, and high-performance $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ solar-blind photodetectors.

KEYWORDS: Semiconductors, $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$, Photodetectors (PD), Solar-blind photodetectors (SBPD)

TEŞEKKÜR

Danışmanım Prof. Dr. Mehmet Tahir GÜLLÜOĞLU'na doktora çalışmam boyunca desteğini, akademik rehberliğini ve deneyimlerini benimle paylaştığı için teşekkür ederim. Tez çalışmamı yönlendirip bana akademik rehberlik sağladı. Bu süreçte gösterdiği rehberlik ve destek için minnettarım.

Eş Danışmanım Prof. Dr. Abdullah YILDIZ'a doktora çalışmamın tüm aşamalarını yönlendirdiği, deneyimleriyle beni ileriye taşıdığı için teşekkür ederim. Ayrıca eş danışmanlığımı kabul ederek laboratuvar alt yapısıyla araştırmalarımın imkân sağladığı ve kendi araştırmalarına dahil olma fırsatı verdiği için teşekkür ederim. Fikirleri ve geri bildirimleriyle tezimin kalitesini artırmama yardımcı oldu ve daha kapsamlı hale getirdi. Yardımlarını ve rehberliğini hiçbir zaman unutmayacağım.

Ayrıca, jüri üyeleri Prof. Dr. Muhammed Bahaddin KURT ve Dr. Öğr. Üyesi Kerim KARADAĞ'a çalışmamın bir parçası olmayı kabul ettikleri için teşekkür ederim. Tez izleme komiteleri rapor sunumları sırasında bana zaman ayırdığınız, çalışmamı değerlendirdiğiniz ve geri bildirimlerinizle beni desteklediğiniz için teşekkür ederim.

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa No

Şekil 1.1. UV spektral bölgesi ve alt bölümleri.....	1
Şekil 1.2. Üretilen Ag/n-β-Ga ₂ O ₃ /p-Si/Ag GKFD'nin şematik gösterimi	4
Şekil 2.1. Yalıtkan, yarı iletken ve metalin basitleştirilmiş bant diyagramı.....	9
Şekil 2.2. Enerji bantı diyagramı (a) donör atomunun enerji durumunu (b) iyonlaşan bir donör atomunun etkisi	10
Şekil 2.3. Enerji bantı diyagramı (a) alıcı atomun enerji durumunu (b) iyonlaşan bir alıcı atomunun etkisini	11
Şekil 2.4. Ga ₂ O ₃ polimorfları ve fazların sentezi ve birbirine dönüşüm tablosu.....	13
Şekil 2.5. Ga ₂ O ₃ formları ve hidratları arasındaki dönüşüm ilişkilerini gösteren tablo.....	14
Şekil 2.6. β-Ga ₂ O ₃ 'ün (a) kristal yapısı ve (b) (201) ve (010) düzlemleri.....	15
Şekil 2.7. Fotodedektörlerin çalışma prensibi	19
Şekil 2.8. Farklı yarı iletken fotodedektörlerin şematik yapıları	20
Şekil 2.9. n-β-Ga ₂ O ₃ ve p-Si'nin bağlantısı oluşumu öncesi	23
Şekil 2.10. n-β-Ga ₂ O ₃ ve p-Si'nin bağlantısı oluşumu sonrası	23
Şekil 2.11. Ag ve Au NP'lar ile dekore edilmiş β-Ga ₂ O ₃ 'ün enerji bant diyagramı	27
Şekil 2.12. Ag NP'lar ile gelen ışığın absorplanmasını ve saçılması	28
Şekil 3.1. Katkısız Ga ₂ O ₃ çözeltisinin hazırlanması.....	32
Şekil 3.2. Aynı kaplarda hazırlanan "Katkısız Ga ₂ O ₃ " ve "Titanyum katkılı Ga ₂ O ₃ " çözeltilerinin kimyasal sentezi ve karıştırma koşulları.....	33
Şekil 3.3. Ayrı kaplarda hazırlanan çözeltilerin kimyasal sentez adımları.....	34
Şekil 3.4. p-Si levhaların kesimi	35
Şekil 3.5. p-Si alt taşların temizlenmesi.....	36
Şekil 3.6. Sol jel yöntemiyle yapılabilecek işlem türleri ve ürünleri.....	37
Şekil 3.7. Spin-kaplama tekniği	38
Şekil 3.8. a) Omik b) Schottky kontakların şematik çizimleri. E _C , E _V , E _{F,M} ve E _{F,S} sırasıyla iletken bant kenarı, değerlik bantı kenarı, metal ve yarı iletkenin Fermi enerji seviyeleri.....	40
Şekil 3.9. Ag elektrotlara sahip n-β-Ga ₂ O ₃ /p-Si güneş körü fotodedektörünün şematik diyagramı.....	42
Şekil 3.10. Metalizasyon süreci şeması.....	43
Şekil 3.11. Bragg kırınımının temsili gösterimi	46
Şekil 3.12. Ti katkılı β-Ga ₂ O ₃ 'ün enine kesit SEM görüntüsü.....	49
Şekil 3.13. Akım-Gerilim (I-V) karakterizasyon sistemi	50
Şekil 3.14. Geçici yanıt karakterizasyon sistemi.....	50
Şekil 4.1. Katkısız β-Ga ₂ O ₃ ve katkılı β-Ga ₂ O ₃ :X, (X: W, Sb, Ti, Zn, Sn) filmlerin XRD ölçümleri... 53	
Şekil 4.2. Katkılı Filmler için Tauc grafikleri. Şeklin eki, filmlerin geçirgenlik spektrumları	56
Şekil 4.3. SEM görüntüleri a) Ga ₂ O ₃ b) W:Ga ₂ O ₃ c) Ti: Ga ₂ O d) Sb Ga ₂ O e) Zn: Ga ₂ O f) TGO'nun enine kesit görüntüsü.....	59
Şekil 4.4. Fotodedektörlerin karanlıkta ve 254 nm UV aydınlatmada ölçülen yarı logaritmik ölçekli IV eğrileri.....	60
Şekil 4.5. C1 ve C6 cihazlarının zamana bağlı ışık tepkisi çizimlerini	62
Şekil 4.6. Sn katkılı β-Ga ₂ O ₃ 'ün XRD modelleri	65
Şekil 4.7.(a) b eksenini boyunca β-Ga ₂ O ₃ kristal yapısının birim hücresinin top ve çubuk gösterimi (b) β-Ga ₂ O ₃ :Sn kristal yapısının çokyüzlü gösterimi	67
Şekil 4.8. %1-5 Sn katkılı β-Ga ₂ O ₃ filmler için Tauc grafikleri. Şeklin eki, filmlerin geçirgenlik spektrumları.....	68
Şekil 4.9. SEM görüntüleri: a) %1 β-Ga ₂ O ₃ :Sn b) %2 β-Ga ₂ O ₃ :Sn c) %3 β-Ga ₂ O ₃ :Sn d) %4 β-Ga ₂ O ₃ :Sn e) %4 β-Ga ₂ O ₃ :Sn f) Sn katkılı numunelerin görselleri	69
Şekil 4.10. %1-5 Sn katkılı β-Ga ₂ O ₃ :Sn/p-Si p-n hetero eklem UV fotodedektörlerin I-V eğrileri.....	71
Şekil 4.11. %1-2 Sn katkılı n-β-Ga ₂ O ₃ :Sn/p-Si cihazlarının zamana bağlı ışık tepkisi çizimlerini.....	73
Şekil 4.12. Ag-Au nanoparçacıklar ile dekore edilmiş %2 Sn katkılı β-Ga ₂ O ₃ ince filmlerin Tauc grafikleri. Şeklin eki, filmlerin geçirgenlik spektrumları	75
Şekil 4.13. 100 nm Ag-Au nanoparçacıklar ile dekore edilmiş %2 Sn katkılı n-β-Ga ₂ O ₃ :Sn/p-Si fotodedektörlerin yarı logaritmik ölçekli IV eğrileri	76

Şekil 4.14. Nanoparçacıklar ile dekore edilmiş %2 Sn katkılı n- β -Ga ₂ O ₃ :Sn/p-Si fotodedektörlerin zamana bağlı foto tepkisi.....	77
---	----



ÇİZELGELER DİZİNİ

Sayfa No

Çizelge 2.1. Ga ₂ O ₃ 'ün farklı polimorflarının kristal yapısı ve kafes parametreleri	12
Çizelge 2.2. Ana yarı iletkenler ve β-Ga ₂ O ₃ arasındaki malzeme özelliklerinin karşılaştırması.....	17
Çizelge 3.1. Kaplama çözeltilerinin hazırlanmasında kullanılan kimyasalların listesi	31
Çizelge 3.2. p-Si alt taşların temizlenmesi: Piranha + HF çözeltileri.....	36
Çizelge 3.3. Yarı iletkenin türüne ve iş fonksiyonlarının durumuna göre oluşan kontak türleri.....	40
Çizelge 3.4. Katkılı β-Ga ₂ O ₃ ile temas halindeki metallerin özellikleri ve gözlenen davranışları	41
Çizelge 3.5. Kullanılan Au ve Ag NP dağılımlarının özellikleri.....	44
Çizelge 3.6. Karakterizasyon ölçüm sistemleri	45
Çizelge 4.1. Fabrikasyon cihaz yapılarının özeti.....	51
Çizelge 4.2. Fabrikasyon cihaz yapılarının özeti.....	52
Çizelge 4.3. Fabrikasyon cihaz yapılarının özeti.....	52
Çizelge 4.4. Aydınlatmaya verilen tepki süreleri	62
Çizelge 4.5. Ga ₂ O ₃ 'e dayalı GKFD'lerin temel parametrelerinin karşılaştırılması	63
Çizelge 4.6. Numunelerin performans parametreleri	63
Çizelge 4.7. % 1-5 Sn katkılı β-Ga ₂ O ₃ :Sn/p-Si fotodedektörlerin performans parametreleri	71
Çizelge 4.8. Aydınlatmaya verilen tepki süreleri	73
Çizelge 4.9. Ag-Au nanoparçacıklar ile dekore edilmiş % 2 Sn katkılı n-β-Ga ₂ O ₃ :Sn/p-Si fotodedektörlerin performans parametreleri	77
Çizelge 4.10. Aydınlatmaya verilen tepki süreleri	78

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

A	Işığa duyarlı etkin alan
A	Zaman sabiti
A	Diyot alanı
A*	Richardson sabiti
B	Zaman sabiti
c	Işık hızı
d	Düzlemler arası mesafe
D*	Spesifik algılama (Jones)
DIS	Deiyonize Su
E _a	Alıcı elektronun enerji seviyesi
E _c	İletim bandı
E _d	Verici elektronun enerji seviyesi
E _F	Fermi enerji seviyesi
E _g	Yasak bant aralığı
EG	Etilen Glikol
E _K	Kusurlu enerji seviyesi
EQE	Harici kuantum verimliliği
EtOH	Etanol
E _v	Değerlik bandı
h	Planck sabiti
HF	Hidroflorik Asit
H ₂ O ₂	Hidrojen Peroksit
I _a	Foto-akım
I _d	Karanlık akım
I ₀	Doyma akımı
k _B	Boltzmann sabiti
LDR	Doğrusal dinamik aralık
MEA	Monoethanolamine
ml	Mililitre
n	İdealite faktörü
NEP	Gürültü eşdeğer gücü
NP	Nanoparçacıklar
PS	Foto-duyarlılık
p-Si	p-tipi Silikon
P _λ	Spesifik dalga boyuna gösterilen aydınlatma gücü
q	Elektronun yükü
R _λ	Spesifik dalga boyuna gösterilen foto-yanıt
SEM	Taramalı Elektronik Mikroskopi
T	K cinsinden sıcaklık
T	Geçirgenlik
t _d	alçalma zamanı
t _r	Yükselme zamanı
UV	Ultraviyole
UV-Vis	Ultraviyole-görünür

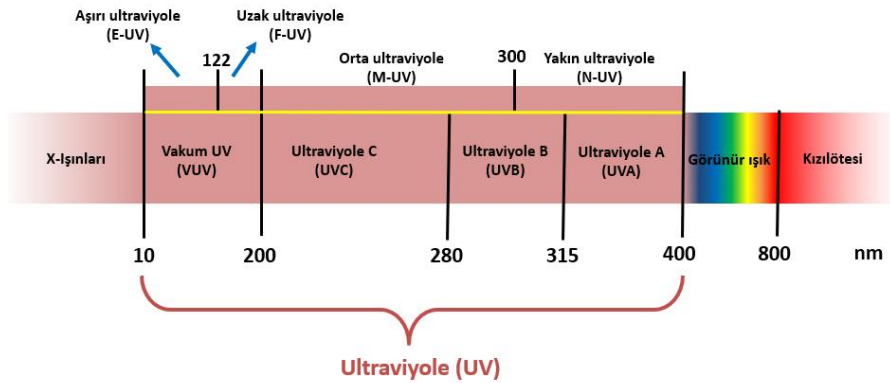
V	Uygulanan voltaj
$\chi_{Ga_2O_3}$	Ga ₂ O ₃ 'ün elektron ilgisi
XRD	X-Ray Kırınım Ölçer
χ_{Si}	Si'nin elektron ilgisi
α	Absorpsiyon katsayısı
ΔE_C	İletim bandı kayması
ΔE_g	Bant aralığı enerji farkı
ΔE_v	Değerlik bandı kayması
$\delta(\lambda)$	Penetrasyon derinliği
ϕ_b	Sıfır besleme bariyer yüksekliği
λ	Dalga Boyu
θ	Bragg açısı



1. GİRİŞ

Fotodedektörler (FD), gelen ışığı elektrik sinyaline dönüştüren cihazlardır ve alev algılama, çevresel izleme, biyolojik analiz ve fotolitografi gibi birçok alanda kullanılmaktadır. Araştırmacılar, fotodedektör çeşitleri arasında Ultra-Viyole (UV) fotodedektörlere geniş bant aralığından dolayı giderek daha fazla ilgi duymaktadır (Varshney ve ark., 2023).

Ultra-Viyole ışık (λ 400 –100 nm) spektral aralığında tanılanmış olup, genellikle UV-A (400 nm-320 nm), UV-B (320 nm-280 nm) ve UV-C (280 nm-100 nm) olmak üzere üç bölgeye ayrılmaktadır. Ultra-Viyole ışık dalga boyu bölgeleri Şekil 1.1.'de gösterilmiştir. Bunlar arasında, güneş radyasyonundan gelen UV-C ışıması ozon tabakası (üç atomlu oksijen) tarafından emilir ve yeryüzüne ulaşmaz. Bu sebepten dolayı, UV-C bölgesine duyarlı olarak tasarlanmış fotodedektörler güneş ışığı sinyallerinden etkilenmemektedir. Bu durum güneş körlüğü olarak adlandırılmaktadır (Chen ve ark., 2019).



Şekil 1.1. UV spektral bölgesi ve alt bölümleri (Chen ve ark., 2019)

Güneş körü fotodedektörler (GKFD) bu özelliklerinde dolayı, özellikle sivil ve askeri keşifler, füze takibi, uydular arası iletişim, güneş körü iletişim sistemi, uzay araştırmaları, UV sızıntılarının tespiti ve ozon deliklerinin izlenmesi gibi birçok önemli alanda yaygın olarak kullanılmaktadır.

AlGaN (3.4 – 6.1 eV), MgZnO (3.54 eV), GaN (3.40 eV), AlN (6.20 eV) ve ZnGaO (4.4 – 5.0 eV) gibi geniş bant aralıklı yarı iletkenler, aktif katman olarak çok sayıda UV fotodedektörün imalatında kullanılmıştır. Bu yarı iletkenlere dayalı UV fotodedektörlerin zorlu büyüme koşulları, düşük kristal kalitesi, düşük foto-yanıtı ve düşük harici kuantum verimliliği (EQE) nedeniyle kullanımları sınırlıdır. Ayrıca yüksek performanslı güneş körü fotodedektör gerçekleştirmenin zorluğunu artıran faz ayırma ve karmaşık imalat süreçlerine de sahiptirler. Bu nedenle UV ışınlarına karşı çok hassas olan alternatif malzemelerin bulunması önemli hale gelmiştir (Du ve ark., 2016; Kumar ve ark., 2019).

Ga₂O₃, güneş körü spektrumlarında bulunan ultra geniş ve doğrudan bant aralığı (4.4 – 4.9 eV) nedeniyle GKFD'leri üretmek için en güçlü ve doğal adaylardan biri haline gelmiştir. UV ışığı için yüksek foto tepkisi ve fotojenlenmiş taşıyıcıların üstün taşıma özellikleri nedeniyle geniş çapta araştırılmış, opto-elektronik cihazların imalatı için önemli bir seçenek olmuştur (Yadav ve ark., 2020).

Ga₂O₃ fotodedektörler, düşük maliyetli üretime ve yüksek performansa sahiptir. Bu nedenle, epitaksi maliyetini azaltmak ve yüksek performanslı Ga₂O₃ tabanlı güneş körü fotodedektörler elde etmek için Ga₂O₃ ince filmlerin araştırılması büyük avantaj sağlamaktadır.

Ga₂O₃'ün beş farklı polimorfu vardır. Bu polimorflar arasında monoklinik (β) polimorfu en kararlı olanıdır ve cihaz uygulamaları için yaygın olarak kullanılmaktadır. Monoklinik galyum oksit (β -Ga₂O₃), yüksek kimyasal ve termal kararlılığa ve geniş bir bant aralığına sahip (4.4 eV – 4.9 eV) önemli bir yarı iletkenidir. Bu nedenle, β -Ga₂O₃ UV tabanlı fotodedektör uygulamaları için özellikle uygundur. Ayrıca basit bir hazırlama sürecine de sahiptir (Zhou ve ark., 2022).

Ga₂O₃ hetero eklemlili fotodedektörler Al₂O₃, GaN, SiC, ZnO ve Si alt taşları ile ışık yayan diyotlar (LED'ler) ve güç anahtarlama cihazları gibi çok sayıda uygulama için araştırılmıştır. Ga₂O₃ ve Si arasındaki hetero eklem, Si alt taşların yüksek stabilite, düşük maliyet gibi birçok özelliği nedeniyle tercih edilmiştir. Yüksek güçlü

cihazlar için Si ile Ga_2O_3 entegrasyonunun ek bir avantajı, Si'nin ($150 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$), Ga_2O_3 'ten ($8.8 \pm 3.4 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$)'ten daha yüksek termal iletkenliği nedeniyle verimli ısı dağılımına sahip olmasıdır (Yadav ve ark., 2020).

Yüksek performanslı Ga_2O_3 güneş körü fotodedektörlerin gerçekleştirilmesi sürecinde performans diğer faktörlerle de ilişkilidir. Metal elektrotlar ve aktif katman arasındaki temas, taşıyıcıların kanala enjeksiyonunu modüle ederek dahili kazanç ve zaman yanıtı özelliklerini etkiler ve buna bağlı olarak doğrudan fotodedektörlerin özelliklerini etkiler (Yao ve ark., 2017).

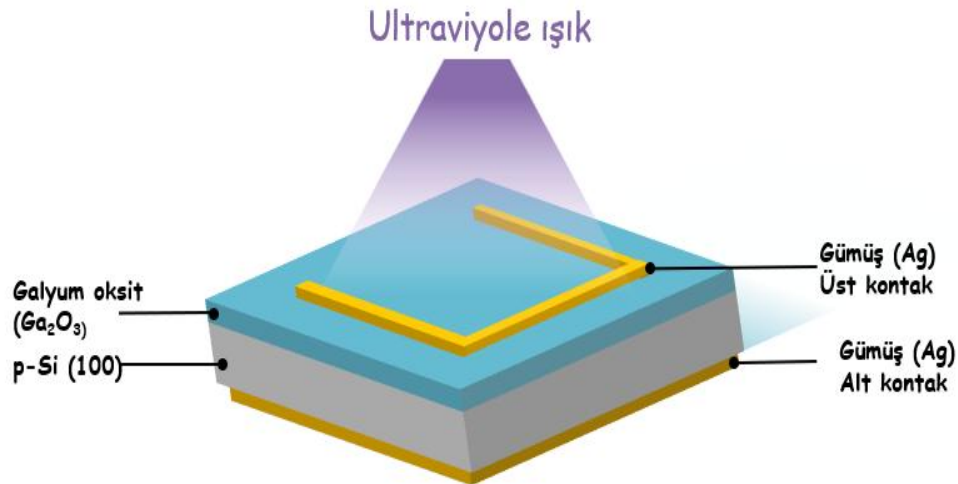
Ga_2O_3 tabanlı fotodedektörlerin düşük performansı düşük iletkenlik ve yüksek oksijen boşlukları gibi kafesindeki yapısal ve bileşimsel kusurlardanır. Bu nedenle, kafesteki metal veya metal olmayan elementleri değiştirmeden katkılama yoluyla saf Ga_2O_3 'ün bileşimini ve yapısını optimize etmek için çalışmalar yapılabilir. Ga_2O_3 tabanlı UV FD'lerin gelen fotondan elektrona dönüşüm verimliliği, kafesteki metal veya metal olmayan elementlerin katkılanmasıyla iyileştirilebileceği açıktır. Katkılanmış Ga_2O_3 ($\text{Ga}_2\text{O}_3:\text{X}$ X:Katkı maddesi), saf Ga_2O_3 ile karşılaştırıldığında daha düşük bir bant aralığı oluşmasını sağlar. Düşen bant aralığı da UV ışığının yakalanmasını kolaylaştırır. Ag elektrodu ile Ga_2O_3 arasındaki omik temas, fotojenlenmiş elektronların transferi ve difüzyonu için elverişlidir. Ek olarak, katkılama ile Ga_2O_3 'teki oksijen boşlukları azalır, bu da Ga_2O_3 'e kıyasla daha geniş bir tükenme bölgesine yol açar, bu da foto indüklenmiş elektronların ve hollerin daha iyi ayrılmasına ve transferine yol açar. Ayrıca In, Ta ve Ti metallerinin de saf Ga_2O_3 'ün performansını iyileştirdiği rapor edilmiştir. Bu araştırma sonuçları, UV FD'lerin fotoelektrik dönüşüm verimliliğinin metal katkılama ile iyileştirilebileceğini göstermektedir (Zhu ve ark., 2023).

Atomik katman biriktirme, manyetik püskürtme, spreylendirme, kimyasal buhar biriktirme, daldırma kaplama ve hidrotermal yöntem gibi birçok kaplama tekniği, Ga_2O_3 'ün ince film kaplamaları için kullanılmıştır. Bu teknikler arasında sol-jel spin-kaplama kolay uygulanabilirliği ve düşük maliyetinden dolayı tercih edilmiştir.

Bu çalışmada sol-jel spin-kaplama tekniğiyle güneş körü fotodedektörlerin metal oksit yayıcı tabakaları kaplanmıştır.

Güneş körü fotodedektörlerin foto transistörler, metal-yarıiletken-metal (MSM) fotodedektörler, Schottky tipi fotodedektörler, hetero eklem tipi fotodedektörler, p-n diyotu gibi birçok yapı tipi vardır. Farklı yapılara sahip fotodedektörlerin özellikleri de farklıdır (Zhong ve ark., 2015).

Fotodedektörler üzerine yapılan çalışmalarla karşılaştırıldığında, güneş körü n- β -Ga₂O₃/p-Si fotodedektörler üzerine yapılan araştırmalar henüz başlangıç aşamasındadır. Bu arada, az sayıda çalışma, n- β -Ga₂O₃/p-Si tabanlı foto dedektörlerin performansı üzerindeki etkileri, özellikle de foto-tepki (R), spesifik duyarlılık (D*) ve harici kuantum verimliliği (EQE) üzerindeki etkileri bildirmiştir. Bu nedenle, bu çalışmada, p-Si alt taş üzerinde spin-kaplama yöntemiyle n- β -Ga₂O₃ ince film elde edilmiştir. Ag/n- β -Ga₂O₃/p-Si/Ag güneş körü fotodedektör zayıf 254 nm UV ışık aydınlatması altında mükemmel özellikler göstermiştir. Üretilen güneş körü foto dedektör Şekil 1.2.'de gösterilmektedir.



Şekil 1.2. Üretilen Ag/n- β -Ga₂O₃/p-Si/Ag GKFD'nin şematik gösterimi

Bu çalışmada hazırlanan yüksek performanslı ve düşük maliyetli güneş körü fotodedektörler, β -Ga₂O₃ 'ün yeni nesil güneş körü algılama alanında geniş uygulama beklentilerine sahip olduğunu göstermişlerdir.

Shin ve ark. (2018), yapmış oldukları bir çalışmada, p-Si alt taşlar üzerine biriktirilen n-tipi β -Ga₂O₃ nanobelt konfigürasyonu ile hetero eklemli p-n güneş körü fotodiyotlar üretmişlerdir. Üretilen hetero bağlantılı p-n diyotlar, yüksek bir doğrultma oranı ve idealite faktörü ile tipik doğrultucu akım-gerilim özellikleri sergilemiştir. Işığa duyarlı ölçümler, hetero eklemli p-n diyotların 254 nm dalga boyunda ışık için hızlı tepki ve bozulma özelliklerine sahip yüksek bir duyarlılığa ve seçiciliğe sahip olduğunu göstermiştir. Hızlı yanıt bileşenleri için yükselme süresi (t_r) 4.06 s ve düşme süresi (t_d), 0.16 s olarak bulunmuştur. Sunulan n- β -Ga₂O₃ nanobelt/p-Si p-n hetero eklemine, düşük boyutlu ultra geniş bant aralıklı elektronik ve optoelektronik cihazlar için işlevsel bir birim oluşturacağı bildirilmiştir. Ayrıca, Ga₂O₃ tabanlı optoelektronik cihazların yeni nesil güneş körü fotodedektörler için seçenek oluşturacağını bildirmişlerdir (Shin ve ark., 2018)

Guo ve ark. (2015), çalışmalarında, ($\bar{2}01$)yönelimli β -Ga₂O₃ ince filmleri lazer moleküler ışın epitaksisi ile p-tipi silikon (100) altlıklar üzerinde büyütmüşlerdir. n- β -Ga₂O₃/p-Si hetero eklemleri, derin bir ultraviyole (UVC) güneş körü fotodedektör olarak oluşturmuşlardır. Bu hetero eklemler, bariz doğrultma özellikleri ve mükemmel güneş körlüğü UV foto tepkisi sergilemiştir. Geniş bant aralıklı β -Ga₂O₃ yarı iletkeninin silikonla kombinasyonunun, gelecek nesil derin UV güneş körü optoelektronik cihazlar için olanaklar açabileceğini bildirmişlerdir (Guo ve ark., 2015).

Hu ve ark. (2021), çalışmalarında, Si katkılı β -Ga₂O₃'ü n-tipi katman olarak kullanıp n- β -Ga₂O₃:Si/p-Si hetero bağlantısına dayalı güneş körü ultraviyole fotodedektörü, metal-organik kimyasal buhar biriktirme (MOCVD) ile başarıyla üretmişlerdir. Fotodedektörün akım-voltaj ve foto tepki özelliklerini incelenmişlerdir. Fabrikasyon n- β -Ga₂O₃:Si/p-Si hetero eklemli fotodedektör, tipik doğrultma davranışı ve yüksek bir güneş körü ultraviyole foto tepkisi sergilemiştir. Ters beslemede hassas foto-algılaması ve kararlı açma-kapama anahtarlama performansı elde etmişlerdir. Fotodedektör, 254 nm aydınlatma altında 3.76 A/W foto yanıt ve 37.9 foto-karanlık akım oranı göstermiştir. -20 V ters beslemede 254 nm aydınlatma altında fotodedektörün yükselme süresi sürelerini (t_{r1} , t_{r2}) ve düşme süresi sabitlerini

(t_{d1} , t_{d2}) sırasıyla (0.30 s, 0.76 s) ve (0.15 s, 6.15 s) bulmuşlardır. Fabrikasyon n- β -Ga₂O₃:Si/p-Si hetero eklem fotodedektör, katkısız n- β -Ga₂O₃/p-Si hetero eklemine dayalı rapor edilen fotodedektörlere kıyasla daha hızlı tepki sergilemiştir. Sonuçlar, n- β -Ga₂O₃:Si/p-Si hetero eklemine dayalı fotodedektörlerin, yüksek performanslı güneş körü ultraviyole fotodedektörler geliştirilmesi için potansiyele sahip olduğunu göstermiştir (Hu ve ark., 2021).

Pedapudi ve ark. (2022), bir çalışmalarında, β -Ga₂O₃ nanotellerine (NW) dayalı ultra duyarlı UV-C fotodedektörleri, manyetik püskürtme biriktirme tekniği kullanılarak p-tipi Si substrat üzerine kaplamışlardır. Ortalama uzunluğu ~ 270 nm olan hizalanmış NW'lerin oluşumu, Alan Emisyon Taramalı Elektron Mikroskobu (FE-SEM) görüntüleri yardımıyla doğrulanmıştır. Fotodedektörler, UV-C bölgesinde (275 nm), 31.71 A/W foto-duyarlılık, 1.37×10^{12} Jones spesifik tespit ve +5 voltta 2.44×10^{-12} W NEP performansı göstermiştir. Ek olarak fotodedektörler, $6.37 \mu\text{W}/\text{cm}^2$ 'lik çok düşük güçlü bir ışıktaki tepki vermiştir. Üretilen cihazın geçici tepkisi sırasıyla 0.18 s ve 0.25 s'lik bir yükselme ve düşme süresi olarak ölçümlenmiştir. Fotodedektörlerin yüksek performansını, fotojenlenmiş taşıyıcıları verimli bir şekilde ayırabilen güçlü p-n bağlantısına atfetmişlerdir (Pedapudi ve Dhar, 2022).

Feng ve ark. (2023), çalışmalarında, farklı katkı oranlarına sahip antimon (Sb) katkılı β -Ga₂O₃ ince filmleri, kimyasal buhar biriktirme (CVD) yoluyla p tipi Si substratlar üzerine büyütmüşlerdir. Sb içeriğinin artmasıyla β -Ga₂O₃ filmlerinin yüzey morfolojisinin ve kristal kalitesinin arttığını, bunun da temel olarak Sb katkısının yüzey aktivatörü olarak görev yapabilmesinden kaynaklandığı bildirmişlerdir (Feng ve ark., 2023).

Yadav ve ark. (2020), çalışmalarında, darbeli lazer biriktirme (PLD) tekniği kullanılarak β -Ga₂O₃ filmleri Si (100) alt taş üzerine biriktirmişlerdir. Biriktirilen numunelerden bir tanesi tavlamanmış, birer tanesi vakum altında 600 °C ve 800 °C'de tavlannmıştır. Numunelerin valans bandı maksimumlarını ve Fermi seviyesinin konumunu ultraviyole fotoelektron spektroskopisi (UPS) kullanarak hesaplamışlardır. Tavlannmamış ve 600°C, 800°C'de tavlannmış numuneler için bant

aralıklarını sırasıyla 4.72 ± 0.05 , 4.52 ± 0.05 ve 4.48 ± 0.05 eV olduğu hesaplamışlardır. Sonuç olarak, tavlama sıcaklığının artmasıyla oksijen boşluklarının arttığını ve bunun sonucunda bant aralığının daraldığını bildirmişlerdir. Ayrıca bant aralığının daralması nedeniyle numunenin iş fonksiyonunun arttığı sonucuna varmışlardır. Tavlama sıcaklığı ile bant hizalamasının optimizasyonunun, Ga₂O₃/Si tabanlı cihazlar için arayüzde taşıyıcı aktarımının kontrol edilmesinde çok faydalı olacağını bildirmişlerdir (Yadav ve ark., 2020).

2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR

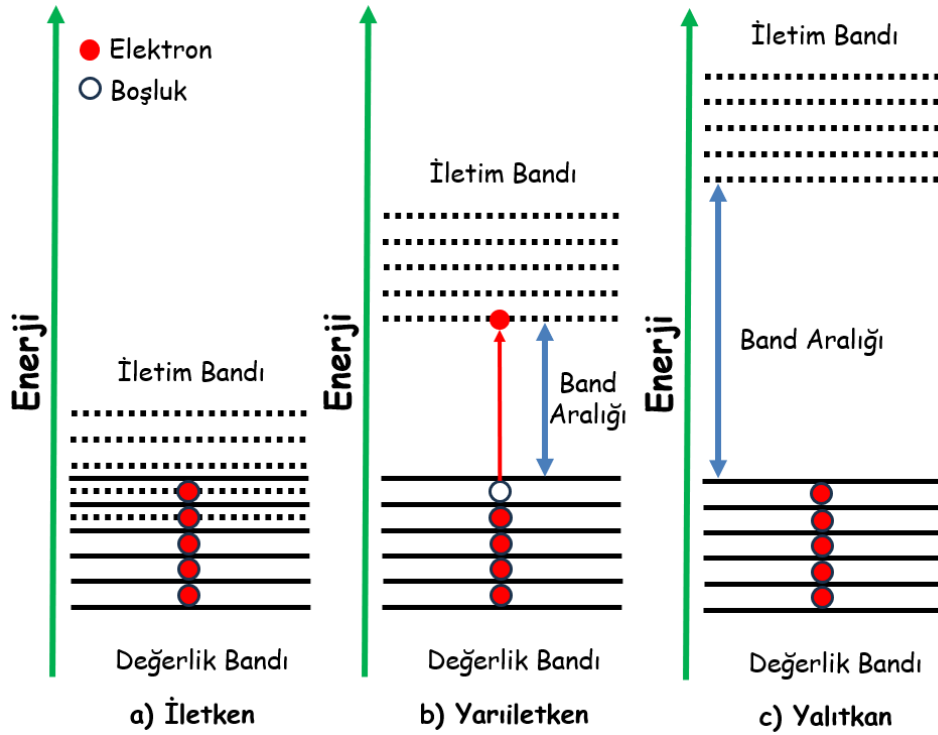
Bu bölümün ilk kısmında, yarı iletkenlerin elektriksel özellikleri, bant aralıkları, katkılanması ve katkılama sonucunda n ve p tipi yarı iletkenler elde edilmesi ile ilgili bilgiler verilmiştir. Ardından Ga_2O_3 yarı iletkeni ile ilgili bilgilere, Ga_2O_3 'ün polimorflarına ve elektriksel özelliklerine, Ga_2O_3 katkılanmasına değinilmiştir. Sonraki kısımda, Ga_2O_3 tabanlı UV p-n fotodedektörlerin elde edilmesi ve bu fotodedektörlerin performanslarının belirlenmesinde kullanılan parametreler açıklanmıştır. Son kısımda ise Ga_2O_3 tabanlı UV p-n fotodedektörlerin performanslarının metal nanoparçacıkların plazmonik etkisi ile artırılması araştırılmıştır.

2.1. Yarı iletkenlerin Elektriksel Özellikleri

Bir malzemenin öz direnci 10^{-2} ila $10^{-9} \Omega \cdot cm$ aralığında ise yarı iletken olarak tanımlanır.

2.1.1. Bant aralığı enerjisi

Malzemenin bant aralığı (E_g), iletim ve değerlik bantlarının arasındaki enerji farkıdır. Malzemeler bu bant aralığına göre yalıtkanlar, iletkenler ve yarı iletkenler olarak sınıflandırılabilirler. Bu sınıflandırma, kafes parametrelerindeki ve atomlar arası mesafedeki farklılığın bir sonucudur. Yalıtkanlar, büyük bant aralığından (E_g) dolayı zayıf elektron hareketliliğine sahiptir. Yarı iletkenler ise, yalıtkanlardan çok daha küçük bant aralığı (E_g) sahiptir. Elektronlar, yarı iletkende yalnızca termal, optik veya elektronik olarak uyarıldığında değerlik bandından iletkenlik bandına geçerler. İletkenlerde bant aralığı (E_g) yoktur. Yalıtkan, yarı iletken ve iletkenlerin basitleştirilmiş bant diyagramı Şekil 2.1.'de gösterilmektedir.



Şekil 2.1. Yalıtkan, yarı iletken ve iletkenlerin basitleştirilmiş bant diyagramı (Houimi, 2022)

2.1.2. Katkı atomları ve enerji seviyeleri

İşsel yarı iletkene, kontrollü miktarlarda belirli katkı maddesi veya safsızlık atomlarının eklenmesiyle yarı iletkenin elektriksel özelliklerini büyük ölçüde değiştirilebilir. Katkılanmış yarı iletkenler çeşitli yarı iletken cihazları üretebilmesini sağlayan ana etkidir.

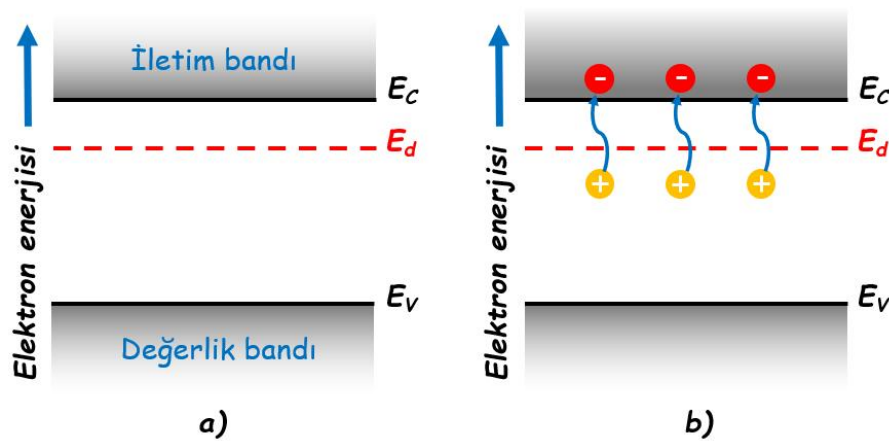
2.1.3. N tipi yarı iletken

Periyodik tablonun IV. Grup elementlerine beş değerlik elektronuna sahip V. Grup elementleri eklendiğinde, elektronlardan dördü IV. Grup elementinin atomlarıyla kovalent bağa katkıda bulunacak ve beşincisi elektron IV. Grup elementinin atomlarına daha gevşek bir şekilde bağlı kalacaktır. Bu etki şematik olarak Şekil 2.2.'de gösterilmiştir. Beşinci değerlik (valans) elektronunu **donör elektron** olarak adlandırılır.

Verici elektronu olmayan katkı atomu pozitif yüklüdür. Çok düşük sıcaklıklarda donör elektron katkı atomuna bağlıdır. Bununla birlikte, verici elektronu iletim bandına yükseltmek için gereken enerjinin, kovalent bağda yer alan elektronlarınkinden önemli ölçüde daha azdır.

Verici elektrona termal enerji gibi küçük bir enerji miktarı eklenirse, iletkenlik bandına yükseltilebilir ve geride pozitif yüklü bir V. Grup atom iyonu kalır. İletim bandındaki elektron artık kristalde hareket ederek bir akım oluşturabilirken, pozitif yüklü iyon kristalde sabittir. Bu tür katkı atomu, iletim bandına bir elektron bağışlar ve bu nedenle donör katkı atomu olarak adlandırılır. Verici katkı atomları, değerlik bandında holler oluşturmadan iletim bandına elektronlar ekler. Ortaya çıkan malzeme, ***n-tipi bir yarı iletken*** olarak adlandırılır (negatif yüklü elektron için n) (Neaman, 2012).

N-tipi katılama sonucunda oluşan enerji bandı diyagramı Şekil 2.2.'de gösterilmektedir. Enerji seviyesi, E_d , donör elektronun enerji durumudur.



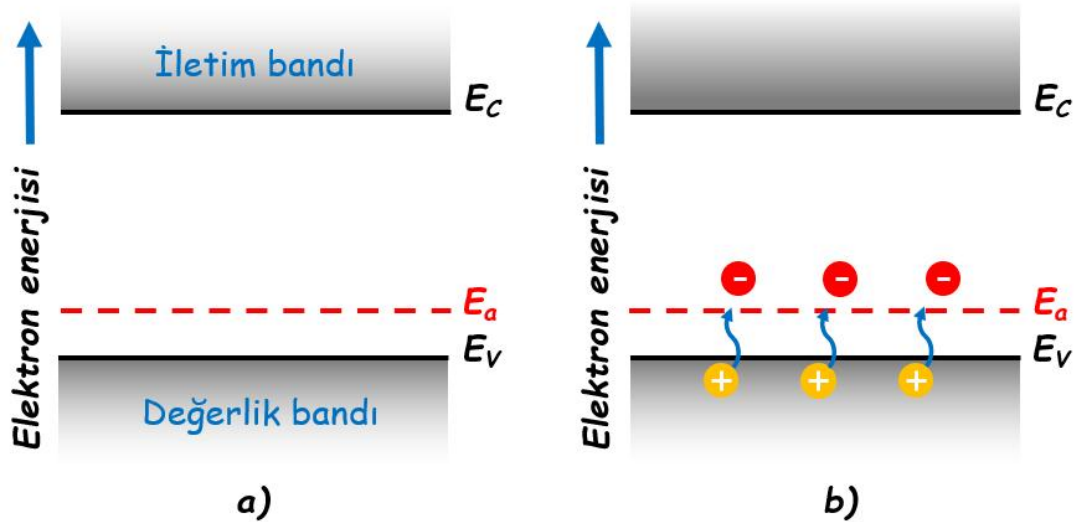
Şekil 2.2. Enerji bandı diyagramı (a) donör atomunun enerji durumunu (b) iyonlaşan bir donör atomunun etkisi (Neaman, 2012)

2.1.4. P tipi yarı iletkenler

Periyodik tablonun IV. Grup elementlerine, üç değerlik (valans) elektronuna sahip III. Grup elementleri eklendiğinde, bir kovalent bağ pozisyonu boş kalır. Eğer bir elektron bu "boş" pozisyonu işgal ederse, III. Grup element atomunun net yük

durumu negatif olacağından, işgalci elektronun enerjisinin değerlik elektronlarından daha büyük olması gerekir. Ayrıca, işgalci elektronun iletim bandında çıkabilmesi için yeterli enerjisi yoktur ve enerjisi iletim bandı enerjisinden çok daha küçüktür. IV. Grup elementlerinin herhangi birinin bir elektronu az miktarda termal enerjiyle III. Grup element atomunun boş pozisyonuna geçebilir. Bu durumda IV. Grup elementinin atomunun değerlik elektronunda yeni bir "boş" pozisyon oluşur. Oluşan yeni boş pozisyon, IV. Grup elementinin başka bir atomunun değerlik elektronu tarafından doldurulabilir. Bu da hollerin kristal içinde hareket edebildiğini göstermektedir (Neaman, 2012).

"Hol" pozisyonunun enerji durumu ve valans bandında bir holün oluşumu Şekil 2.3.'de gösterilmektedir.



Şekil 2.3. Enerji bandı diyagramı (a) alıcı atomun enerji durumunu (b) iyonlaşan bir alıcı atomunun etkisini (Neaman, 2012)

Negatif yüklü III. Grup atomu kristalde sabitken, hol bir akım oluşturarak kristal içinde hareket edebilir. Grup III atomu, değerlik bandından bir elektron kabul eder ve bu nedenle bir alıcı safsızlık atomu olarak adlandırılır. Alıcı atom, iletim bandında elektron üretmeden değerlik bandında holler oluşturabilir. Bu tip malzeme, *p tipi yarı iletken* malzeme olarak adlandırılır (pozitif yüklü hol için p) (Neaman, 2012).

2.2. Ga₂O₃ Yarı İletkeni

Galyum oksit, her iki galyum katyonu için üç oksijen anyonundan oluşan iyonik bir bileşiktir (Boschi, 2014).

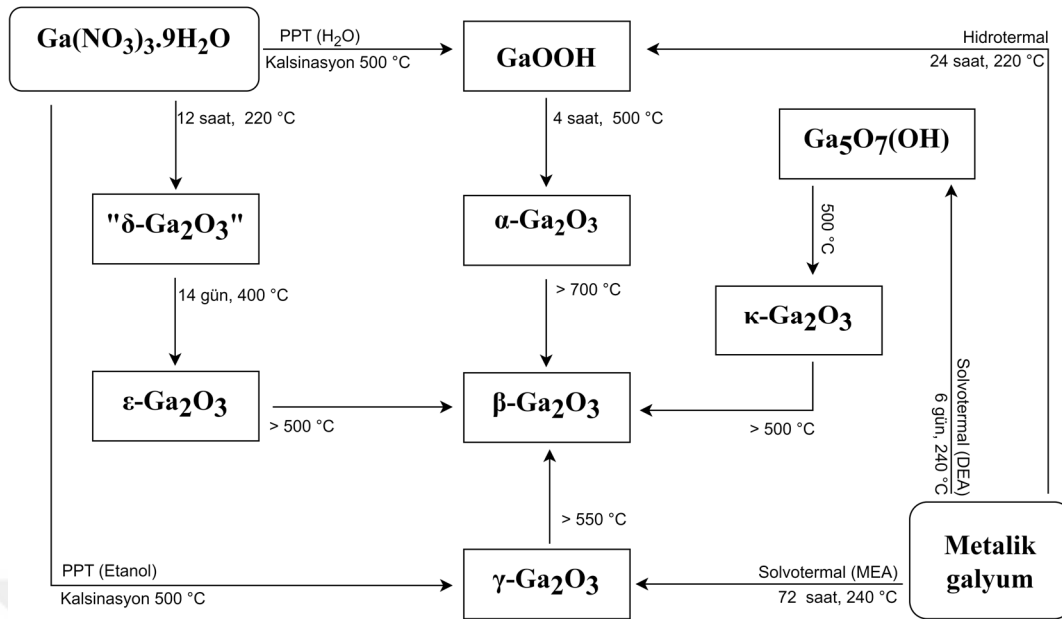
2.2.1. Galyum oksit polimorfları

Ga₂O₃, tetrahedral ve oktahedral dolguları ile dolu kapalı oksijen katmanlarının paketlerine sahip beş farklı polimorfa (α , β , γ , δ , ϵ) sahip yalıtkan bir metal oksittir. Her polimorf, farklı uzay gruplarına ve Galyum atomlarının farklı koordinasyonuna sahiptir (Boschi, 2014). Ga₂O₃'ün farklı polimorflarının kristal yapısı ve kafes parametreleri Çizelge 2.1.'de özetlenmiştir.

Çizelge 2.1. Ga₂O₃'ün farklı polimorflarının kristal yapısı ve kafes parametreleri (Boschi, 2014)

Polimorf	α -Ga ₂ O ₃	β -Ga ₂ O ₃	γ -Ga ₂ O ₃	δ -Ga ₂ O ₃	ϵ -Ga ₂ O ₃
Yapısı	Üçgen-Korindon	Monoklinik	Kübik-Spinel	Bixbit	Altıgen
Uzay Grubu	R $\bar{3}c$	C2/m	Fd $\bar{3}m$	Ia $\bar{3}$	Pna21
Kafes parametreleri	a=4.98-5.04	a=12.12-12.34	a=8.24-8.30	a=9.4-10.0	a=5.06-5.12
	b=4.98-5.04	b=3.03-3.04			b=8.69-8.79
	c=13.4-13.6	c=5.80-5.87			c=9.3-9.4

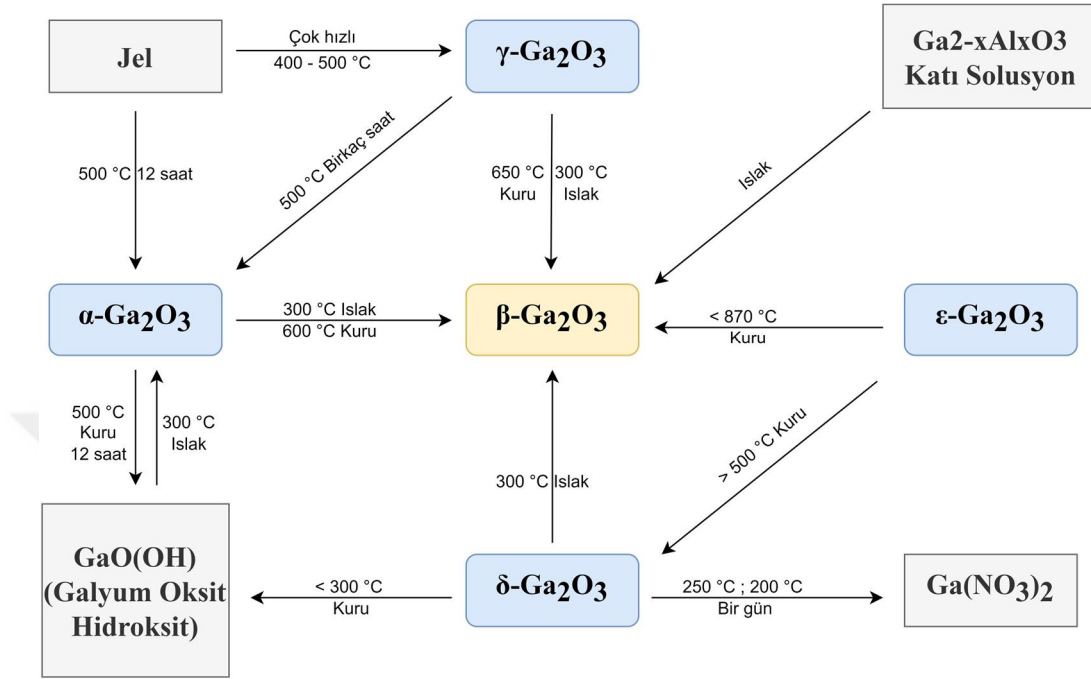
Polimorflar arasında monoklinik yapıya sahip β -Ga₂O₃ hem kimyasal hem de termal olarak en kararlı formdur. Diğer form fazları (α , γ , δ ve ϵ) yarı kararlı durumda bulunur ve 600°C'nin üzerindeki yüksek sıcaklık ve nem koşullarında kararlı β -fazına dönüşür. Galyum ve hidrat formları arasındaki dönüşüm ilişkileri Şekil 2.4.'te gösterilmektedir (Ji, 2019; Moser, 2017; Shi ve Nihtianov, 2012; Zvoriste, 2011).



Şekil 2.4. Ga_2O_3 polimorfları ve fazların sentezi ve birbirine dönüşüm tablosu (Moser, 2017)

δ -Ga₂O₃ ve ε -Ga₂O₃, Ga₂O₃'ün yarı kararlı formudur. κ -Ga₂O₃ ise geçici bir fazdır. α -Ga₂O₃ polimorfu korindon yapısına sahiptir, büyüme sıcaklığı 450 °C ile 500 °C arasında α -GaOOH kullanılarak sentezlenebilir. α -Ga₂O₃ ve γ -Ga₂O₃'ün 700 °C'de iki saat kalsine edilerek β -Ga₂O₃ elde edilebileceği bildirilmiştir (Yakuphanoglu ve ark., 2010). γ -Ga₂O₃ polimorfunun genellikle kusurlu kübik spinel tipi yapıya sahip olduğu raporlanmıştır (Moser, 2017).

Ga_2O_3 'ün farklı polimorflarının dönüşümleri üzerine yapılan başka bir çalışmanın sonuçları Şekil 2.5.'de gösterilmektedir (Irudayadass, 2011).



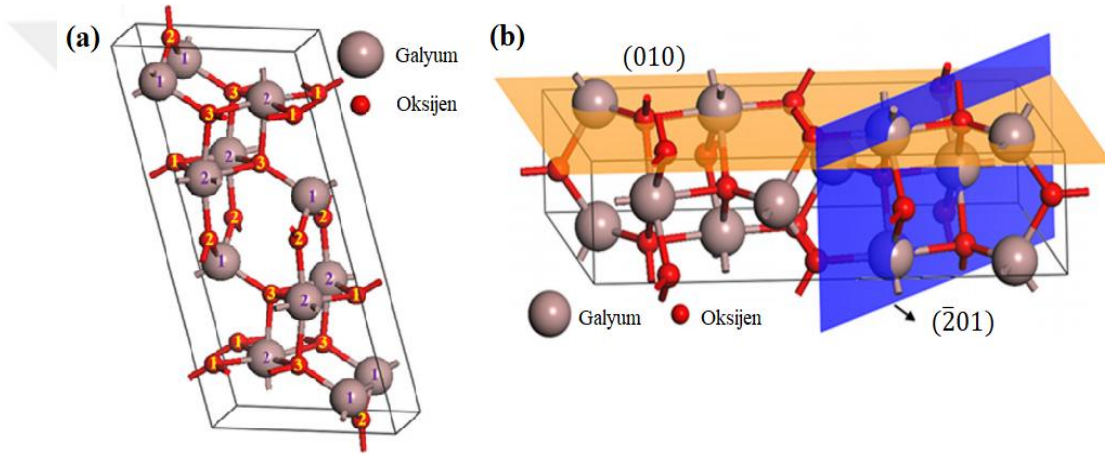
Şekil 2.5. Ga_2O_3 formları ve hidratları arasındaki dönüşüm ilişkilerini gösteren tablo (Roy ve ark., 1952)

$\alpha\text{-Ga}_2\text{O}_3$, potansiyel olarak β polimorfundan daha geniş bir bant aralığına sahiptir ancak bu polimorf kararsızdır ve materyal büyümesi için gereken yüksek sıcaklıklarda $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ 'e dönüşmektedir. Ga_2O_3 ince filmler 900-1050 °C arasında yapılan 1 saatlik tavlama ile β kristal yapısına dönüşmektedir (Sezgin, 2010).

2.2.2. $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ polimorfu

$\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ kristal yapılı bir birim hücre, farklı kristal yönelimleriyle optik ve elektriksel özelliklerin asimetrisine yol açan iki galyum bölgesi (GaI ve GaII) ve üç oksijen bölgesinden (OI, OII ve OIII) oluşmaktadır (Moser, 2017). Ga^{+3} , kristal kafesinde hem oktahedral (6 komşu oksijen atomu, yani 6-kat) hem de tetrahedral (4 komşu oksijen atomu) koordinasyonunda bulunur. Oksijen atomları, üç eşdeğer olmayan bölgede görünür; bununla birlikte, bu bilgi galyum koordinasyonuna kıyasla malzeme özelliklerinin belirlenmesinde çok daha az öneme sahiptir.

OI ve OIII iyonları (010) düzleminde bulunur ve OII iyonları b eksenine boyunca hizalanmaktadır. Serbest oluşum enerjileri, düşük sıcaklıklarda $\beta < \varepsilon < \alpha < \delta < \gamma$ eğilimindedir. β -Ga₂O₃'ün ($\bar{2}01$), (010) ve (001) düzlemleri dahil olmak üzere yaygın olarak kullanılan bir dizi düzlemi vardır. Şekil 2.6.(a), β -Ga₂O₃'ün birim hücrenin şemasını gösterirken, Şekil 2.6.(b) cihaz uygulamaları için en yaygın kullanılan iki kristal düzlemi ($\bar{2}01$) ve (010) göstermektedir. Bu düzlemler oksijenin sarkan bağ yoğunlukları açısından önemli ölçüde farklılık gösterir ve bunun ıslak dağılama veya metal temas oluşumu gibi işlemler üzerinde bir etkisi olması beklenebilir (Pearson ve ark., 2018).



Şekil 2.6. β -Ga₂O₃'ün (a) kristal yapısı ve (b) ($\bar{2}01$) ve (010) düzlemleri (Pearson ve ark., 2018)

β -Ga₂O₃'ün bir birim hücresinde, dört Ga₂O₃ vardır ve bu yapıda Ga⁺³ iyonları için tetrahedral ve oktahedral adlandırılan iki çeşit koordinasyon vardır.

Ga₂O₃, 4.9 eV'lik geniş bant aralığı, 1900 °C'lik yüksek erime noktası, mükemmel elektriksel iletkenlik ve fotoluminesans gibi özelliklere sahiptir (Irudayadass, 2011; Zvoriste, 2011). Bu termal kararlılık, eriyik bazlı büyütme teknikleriyle ince filmlerin silikon gibi alt taşlara Ga₂O₃'ün büyütülmesini mümkün kılmıştır.

Ga_2O_3 doğal olarak n-tipi yarı iletken olmasına rağmen elektriksel iletkenliği düşüktür. Elektriksel iletkenlik Ga_2O_3 'ün dezavantajlarından biridir. Ga_2O_3 'ün içsel bant aralığı, 4.9 ile 5.3 eV arasındadır (234–253 nm'lik dalga boylarıyla karşılık gelir) ve bu geniş bant aralığı Ga_2O_3 'ü görünür spektrumun dışına yani UV-C bölgesine duyarlı hale getirir. Dolayısıyla bu malzemenin UV optoelektronik ve UV fotodedektör cihaz uygulamalarında kullanılması daha uygun olacaktır (Alfaraj, 2019; Irudayadass, 2011).

Ga_2O_3 tabanlı fotodedektörler, büyütülmüş Ga_2O_3 filmlerdeki oksijen (O) boşluğu ve derin seviye kusurlarının varlığından kaynaklanan azınlık taşıyıcı yakalaması nedeniyle yüksek kazanç ve spektral duyarlılık sergileyebilir. Yüksek elektrik alanlarının uygulanması, bu taşıyıcıların kusur merkezlerinden salınmasını sağlamaktadır. Ters besleme ile elektrik alanının uygulanması $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ ve Ga_2O_3 tabanlı fotodedektörlerde yaygın olarak görülen ve kalıcı foto iletkenlik olarak adlandırılan bir duruma sebep olmaktadır. Bu durum Ga_2O_3 tabanlı fotodedektörlerde yavaş tepki sürelerine sebep olurken yüksek fotoiletkendik kazançları sağlamaktadır (Alfaraj, 2019).

Geniş bant aralıklı Ga_2O_3 yarı iletkeni, yüksek voltaj, yüksek akım, yüksek güç veya yüksek sıcaklık ortamlarında çalışan transistörler ve diyotlar dahil olmak üzere çeşitli yarı iletken cihazlar oluşturmak için kullanıldığında avantajlar sağlamaktadır. Geniş bantta sahip olması galyum oksit kristal kafesinin içindeki galyum ve oksijen atomları arasındaki güçlü iyonik bağlarla ilgilidir. Güçlü iyonik bağlar, değerlik bandından bir elektronu iyonize etmek ve iletkenlik bandında serbestçe hareket etmesini sağlamak için gerekli enerjiyi arttırmaktadır (Kumar ve ark., 2021).

2.2.3. β -Ga₂O₃ polimorfunun elektriksel özellikleri

Elektronik cihaz uygulamaları için β -Ga₂O₃'ün önemli malzeme parametrelerinin, Si, SiC ve GaN gibi ana yarı iletkenler ile karşılaştırılması Çizelge 2.2.'de listelenmiştir.

Çizelge 2.2. Ana yarı iletkenler ve β -Ga₂O₃ arasındaki malzeme özelliklerinin karşılaştırması (Zhong ve ark., 2015)

	Si	4H-SiC	GaN	β -Ga ₂ O ₃
Bant aralığı enerjisi E_g (eV)	1.1	3.3	3.4	4.5
Bağıl dielektrik sabiti ϵ	11.8	9.7	9.0	10.2–12.4
Elektrik alan kırınımı E_{br} (MV/cm)	0.3	2.5	3.3	>7
Oda sıcaklığında elektron hareketliliği μ (cm ² /Vs)	1400	1000	1200	~200
Doymuş elektron hızı V_{sat} ($\times 10^7$ cm/s)	1.0	2.0	2.5	1.0–1.5
Isı iletkenliği (W/cmK)	1.5	2.7	2.1	0.11–0.27
Baliga liyakat değeri ($= \epsilon \mu E_{br}^3$)	1	340	870	1570–1900
Johnson liyakat değeri ($= E_{br}^2 V_{sat}^2$)	1	280	760	540–1200

Ga₂O₃, farklı kristal polimorflarında güçlü anizotropi ve zayıf bir termal iletkenliğe sahiptir. Termal iletkenliği, GaN ve SiC gibi diğer geniş bant aralıklı yarı iletkenlerden bir veya iki kat daha düşüktür (Ji, 2019)

Galyum oksit ve üçlü alaşımları ((In_xAl_yGa_z)₂O₃, $x+y+z = 1$), iyonik bağlara sahip geçiş metallerin geniş bant aralıklı oksitleridir. Silisyum karbür (SiC, 3 MV·cm⁻¹) ve galyum nitrid (GaN, 3.8 MV·cm⁻¹) ile karşılaştırıldığında yaklaşık 8 MV·cm⁻¹'lik üstün kırılma alanına sahiptir (Alfaraj, 2019).

Yüksek alanlı taşıyıcı aktarımı, elektronik cihaz performansı üzerinde büyük etkisi olan bir diğer önemli faktördür. β -Ga₂O₃'teki doymuşluk elektron hızının (V_{sat}) teorik olarak $1-2 \times 10^7$ cm/s olduğu tahmin edilmiştir. Bu değer yaklaşık olarak silikondakine eşittir olup SiC ve GaN'deki değerlerin yaklaşık yarısına eşittir. V_{sat} 'ın birçok yüksek frekanslı uygulama için yeterince iyi olduğuna dikkat edilmelidir (Zhong ve ark., 2015).

2.2.4. Galyum oksidin (Ga_2O_3) katkılanması

İçsel Ga_2O_3 yarı iletkeni, 10.2-14.2 dielektrik sabiti ile zayıf iletkenliğe ve yüksek bir dirence sahiptir, elektriksel özellikleri kararsızdır (Dakhel, 2012b). Ayrıca içsel Ga_2O_3 'ün elektrik akımını ileten yük taşıyıcılarının sayısının azlığı yüksek performanslı optoelektronik yarı iletken cihazların üretilmesini sınırlamaktadır (Seo ve ark., 2023). Uygun katkılama işlemi, dielektrik özelliklerin kontrol edilmesini, yük taşıyıcıların sayısının artırılmasını ve böylelikle daha kararlı elektriksel özelliklere sahip $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ yarı iletkenleri elde edilmesini sağlayabilir (Mi ve ark., 2015). Ga_2O_3 'ün bant aralığı, kristal fazı, ışık geçirgenliği, iletkenliği ve elektriksel özellikleri, katkı maddelerinin eklenmesiyle modüle edilebilir ve özel performans gereksinimleri karşılanabilir (Wang ve ark., 2023). Mn, Ti, Cu, Zn, In, W, Sb, Sn, Si vb. uygun metalik iyonlarla katkılama, gaz algılama, şeffaf iletken oksit (TCO) vb. gibi farklı pratik uygulamalar için yarı iletken özellikler üretmek açısından önemlidir (Li ve ark., 2022).

➤ N-tipi katkılama

Si, germanyum (Ge) ve kalay (Sn) genellikle Ga_2O_3 için donör katkı maddeleri olarak kullanılır. Bu grup IV elementleri, Ga_2O_3 'te sıkı donör durumları oluşturur ve oda sıcaklığında aktivasyon oranları çok yüksektir (Wang ve ark., 2022; Yadav ve ark., 2020). Ga_2O_3 'teki elektron yoğunluğu (n), donör katkı maddeleri kullanılarak $10^{15}\text{--}10^{20}\text{ cm}^{-3}$ gibi geniş bir aralıkta hassas bir şekilde kontrol edilebilir.

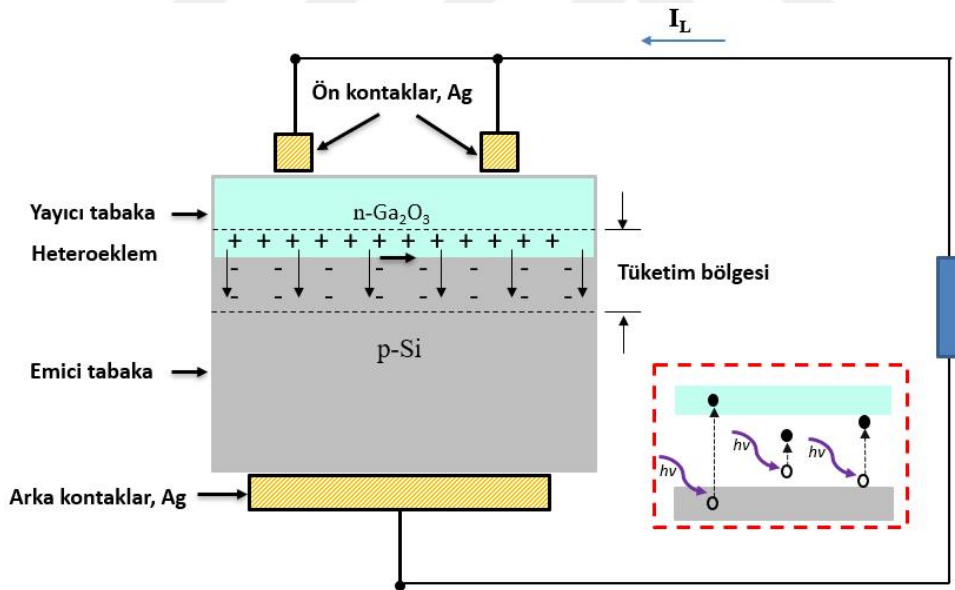
➤ P-tipi katkılama

Ga_2O_3 'ün önemli bir dezavantajı, hol iletken p-tipi malzemenin eksikliği olmuştur. Katyon ikame edici katkı maddeleri olarak magnezyum (Mg), çinko (Zn) ve berilyum (Be) ve nitrojen (N) potansiyel alıcı katkı maddeleri olmasına rağmen, hol iletimi ile başarılı p-tipi katkılama hakkında bir rapor bulunmamaktadır.

P-tipi Ga_2O_3 'ün oluşturulmasına engel olan üç faktör vardır. Birinci faktör, tek kristal oksit yarı iletkenlerin sıkı alıcı durumlar oluşturması genellikle zordur. Çünkü bunların değerlik bantları ve durumları esas olarak zayıf etkileşim halindeki O (oksijen elementi) $2p$ orbitallerinden oluşur. İkinci faktör, Hol iletkenliğini sınırlayan düşük değerlik bandı maksimumundan kaynaklanan büyük hol etkili kütlesi nedeniyle çok düşük μ ve difüzyon sabitidir. Üçüncü faktör ise, p tipi malzemede bulunan holler yaygın olarak bulunan serbest hollerin aksine, kafes distorsiyonu nedeniyle $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ 'te küçük polaronlar olarak lokalize oldukları da teorik olarak tahmin edilmiştir (Chikoidze ve ark., 2017; Yan ve ark., 2021).

2.3. Fotodedektörler

Yarı iletken fotodedektörler, ışık altında elektron-hol çiftlerinin oluşturulması prensibine göre çalışırlar. Şekil 2.7.'de fotodedektörlerin çalışma prensibi gösterilmektedir.

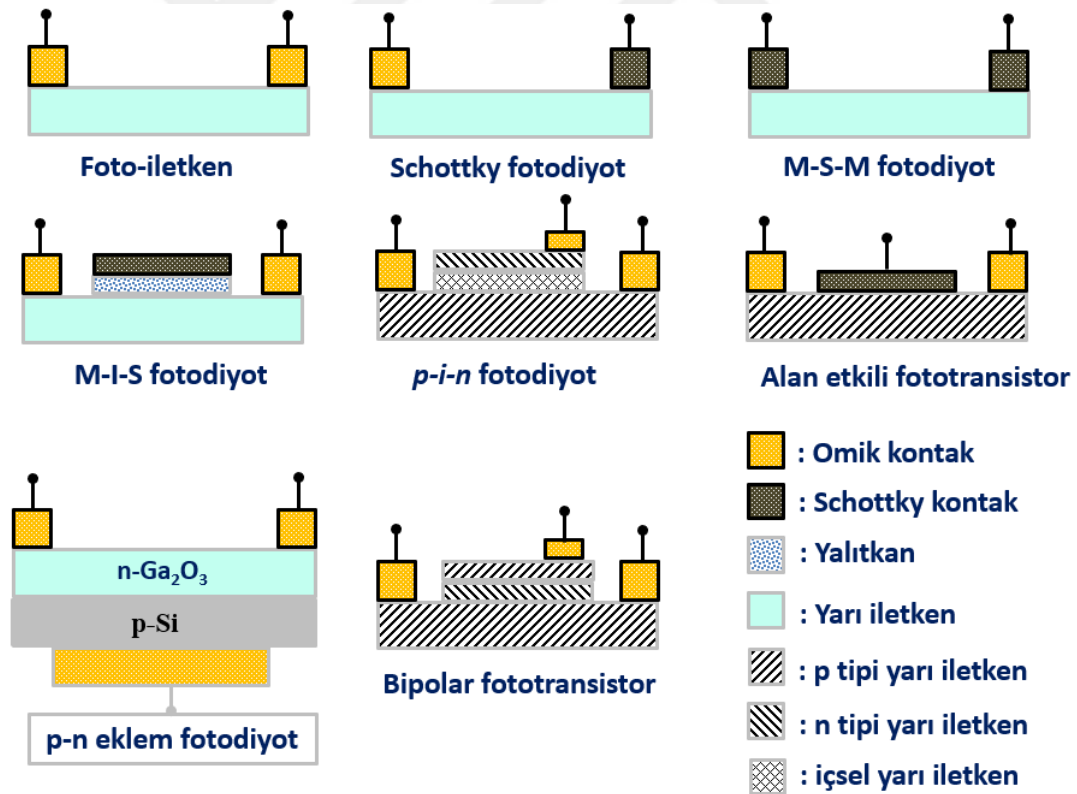


Şekil 2.7. Fotodedektörlerin çalışma prensibi (Sbeta, 2019)

Yeterli enerjiye sahip bir foton yarı iletken üzerine düştüğünde, fotodedektörün eklem bölgesinde elektron-hol çiftini oluşturur. Elektronlar kristal içinde serbestçe hareket edebildiğinden iletken bir banda uyarılabilir. Uyarılan elektron, arkasında kristal içinde serbestçe hareket edebilen bir hol bırakır. Elektrik alanının etkisi altında

elektronlar ve holler foto-akım oluşturmak üzere ayrılırlar. Yarı iletkenin aktif bölgesinin kenarlarında bulunan elektrotlar bu hareketli taşıyıcıları bir devrede toplar ve fotoakımı oluştururlar. Akım, foto tepkinin bir göstergesi olarak ölçülebilir (Mardare ve ark., 2012).

UV yarı iletken fotodedektörler, çalışma modlarına göre üç sınıfa ayrılabilirler: fotoiletken dedektörler, Schottky bariyer diyotu (SBD) ve p –n bağlantı fotodiyotu. Farklı yarı iletken fotodedektörlerin şematik yapısı Şekil 2.8.’de gösterilmektedir. p-tipi Ga_2O_3 olmadığından, Ga_2O_3 tabanlı p-n homo bağlantılı fotodedektör bildirilmemiştir. Ga_2O_3 tabanlı fotodedektörlerin çoğu foto iletken, schottky bariyer diyot (SBD) veya p-n hetero bağlantılarda çalışmaktadır (Chen ve ark., 2019). Burada p-n hetero bağlantılarına sahip fotodedektörlerin temel çalışma mekanizmaları üzerinde durulacaktır.



Şekil 2.8. Farklı yarı iletken fotodedektörlerin şematik yapıları (Chen ve ark., 2015; Chen ve ark., 2019; Monroy ve ark., 2003; L. Shi ve Nihtianov, 2012)

2.3.1. PN fotodedektör

P tipi bir yarı iletkenle n tipi bir yarı iletken bir araya getirildiğinde p-n yapısı oluşur. Bir p-n hetero eklemının termiyonik emisyon akım-gerilim ilişkisi genellikle uygulanan voltajın (V) bir fonksiyonu olarak yazılır: (Denklem 2.1.)

$$I = I_0 \left[\exp\left(\frac{qV}{nk_B T}\right) - 1 \right] \quad 2.1$$

Burada, I_0 doyma akımı, q elektronik yük, V uygulanan voltaj, n idealite faktörüdür, k_B Boltzmann sabitidir ve T , K cinsinden sıcaklıktır. Doyma akımı I_0 denklemdeki şekilde tanımlanır: (Denklem 2.2.)

$$I_0 = AA^* T^2 e^{q\Phi_{b0}/k_B T} \quad 2.2$$

burada A^* , Richardson sabitidir ($\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ için $41,11 \text{ A.cm}^{-2}.\text{K}^{-2}$), A diyot alanı ve Φ_{b0} sıfır beslemeli bariyer yüksekliğidir. İdeallik faktörü, n , ileri yönlü doğru besleme $\ln(I)-V$ grafiğinin düz çizgi bölgesinin eğiminden hesaplanabilir ve şu şekilde yazılabilir: (Denklem 2.3.)

$$n = \frac{q}{k_B T} \frac{dV}{d(\ln I)} \quad 2.3$$

I_0 , ileri doğru besleme $\ln(I)-V$ eğrisinin $V=0$ bilinenine dayanarak belirlenebilir. İdeallik faktörü (n), 1 ile 2 arasında bir değerdeyse, tünelleme akımı mekanizması, $n=2$ ise, üretim-tekrar birleştirme akım mekanizması baskındır. $n>2$ ise kaçak akım mekanizmasının baskın olduğu anlamına gelir (Keskenler ve ark., 2013)

Φ_{b0} , sıfır beslemeli bariyer yüksekliği aşağıdaki formülle hesaplanır: (Denklem 2.4.)

$$\Phi_{b0} = \frac{k_B T}{q} \ln\left(\frac{AA^* T^2}{I_0}\right) \quad 2.4$$

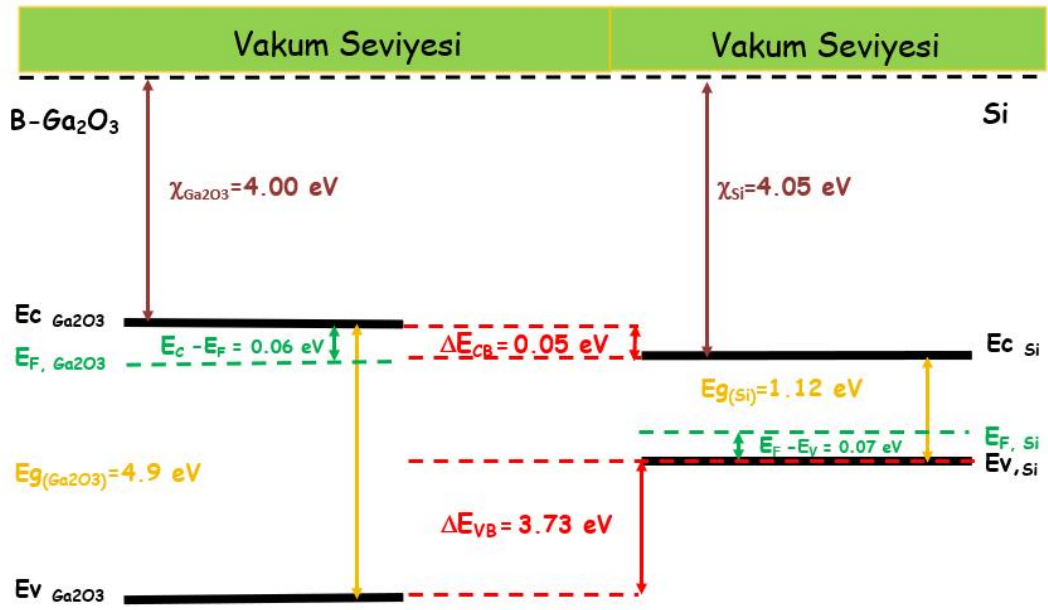
2.3.2. β -Ga₂O₃ tabanlı ultraviyole fotodedektörler

Son yıllarda, ultraviyole (UV) fotodedektörler (FD), çeşitli endüstriyel, askeri, biyolojik ve çevresel uygulamalar nedeniyle çeşitli alanlarda büyük ilgi görmüştür. UV FD'ler, motor kontrolü, güneş UV izleme, astronomi, litografi hizalayıcılar, uzaydan uzaya güvenli iletişim veya füzelerin tespiti gibi çeşitli alanlarda birçok uygulamaya sahiptir. Özellikle UV FD'ler, sivil ve askeri endüstrilerin yüksek sıcaklıkta ve zorlu ortamlarda çalışabilen cihazlara ihtiyaç duyulmasından dolayı büyük ilgi görmüştür. Bu nedenle, görünür dalga boylarına kör kalarak spektrumun UV bölgesinde çalışmak üzere bu özelliklere sahip FD cihazları imal etmek için birçok girişimde bulunulmuştur.

Ga₂O₃, özellikle 900°C'in üzerinde yüksek sıcaklıkta oksijen algılama için gaz sensörlerinde ve güneş pillerinde, güneş körü fotodedektörlerde opto-elektronik cihazlar olarak kullanılmaktadır (Ji, 2019; Moser, 2017). Ayrıca UV uygulamaları için de optik yayıcı olarak kullanılmaktadır (Sezgin, 2010; Ji, 2019; Moser, 2017). β -Ga₂O₃, güneş körü fotodedektör olarak adlandırılan 280 nm'nin üzerindeki dalga boylarına kör olan derin morötesi bir fotodedektör için gelecek vaat eden bir adaydır (Yao, 2017).

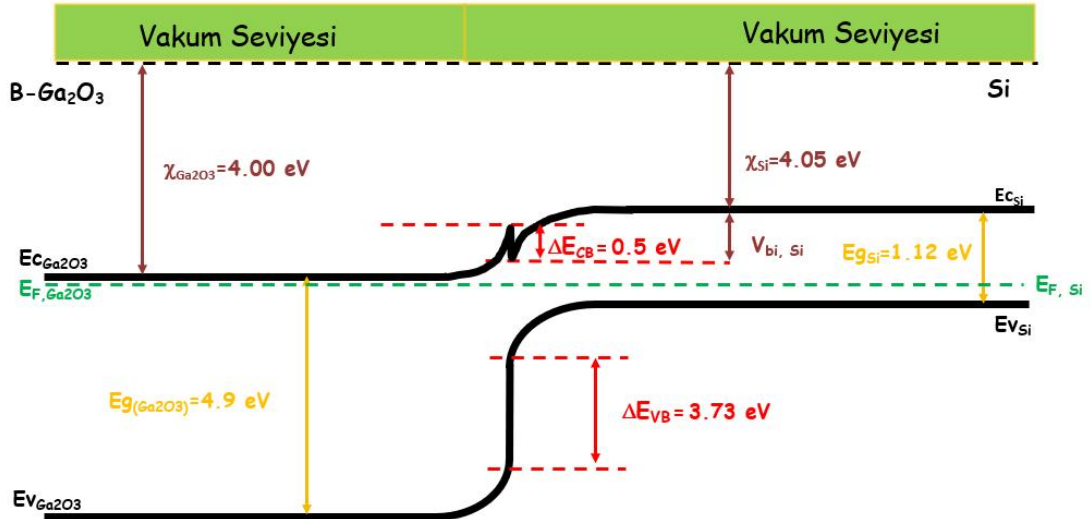
2.4. n- β -Ga₂O₃/p-Si p-n Güneş Körü Fotodedektörün Bant Diyagramı

İletim bandı kayması (ΔE_{CB}) ve valans bandı kayması (ΔE_{VB}) değerleri Anderson kuralı kullanılarak belirlenmiştir. ΔE_{CB} 'nin değeri n- β -Ga₂O₃ ve p-Si için elektron ilgilerindeki farklılıklara (sırasıyla 4.0 eV ve 4.05 eV) dayalı olarak 0.05 eV olduğu hesaplanmıştır. n- β -Ga₂O₃ ve p-Si'nin sırasıyla 4.9 eV ve 1.12 eV olan bant aralığı değerlerine göre ΔE_{VB} değeri 3.73 eV olarak belirlenmiştir. n- β -Ga₂O₃'ün E_F - E_C değerinin 0.06 eV ve p-Si'nin E_F - E_V değeri 0.07 eV literatürle uyumlu olarak bulunmuştur (Sezgin, 2010). Tüm değerler dikkate alındığında n- β -Ga₂O₃ ve p-Si'nin bağlantı oluşumu öncesi ve sonrası bant diyagramları sırasıyla Şekil 2.9. ve Şekil 2.10.'da gösterilmektedir.



Şekil 2.9. n- β -Ga₂O₃ ve p-Si'nin bağlantısı oluşumu öncesi (Guo ve ark., 2016; Li ve ark., 2021; Shin ve ark., 2018)

Tip-II bant hizalamasının n- β -Ga₂O₃/p-Si hetero ekleminin arayüzünde olduğu varsayılır. 254 nm dalga boyunun uyardığı elektron-hol çiftleri fotoakıma katkıda bulunur.



Şekil 2.10. n- β -Ga₂O₃ ve p-Si'nin bağlantısı oluşumu sonrası (Guo ve ark., 2015; Li ve ark., 2021; Shin ve ark., 2018b)

2.5. Fotodedektörlerin Performanslarının Belirlemede Kullanılan Parametreler

Fotodedektörlerin performanslarının belirlemede kullanılan parametreler aşağıda sıralanmıştır.

Foto-duyarlılık (PS), belirli bir ters kutuplama gerilim değerinde foto-akımın (I_a) karanlık akıma (I_k) oranı olarak tanımlanabilir (Denklem 2.5.) (Mi ve ark., 2023).

$$PS = \frac{I_a}{I_k} \quad 2.5$$

Foto-yanıt (R_λ) veya Spektral yanıt, cihazın performansının değerlendirilmesi için kritik bir parametre olarak kabul edilir. Gelen ışığın optik gücü başına üretilen fotoakım olarak ifade edilebilir. Gelen ışığın dalga boyuna, öngerilim voltajına ve sıcaklığa bağlıdır. Dalga boyunun bir fonksiyonu olarak tepki grafiği, fotodetektörün spektral tepkisini verir (Fang ve ark., 2019; Hea ve ark., 2020; Peng ve ark., 2018). Aşağıdaki denklem ile elde edilebilir (Denklem 2.6.) (Guo ve ark., 2017; Özel, 2020).

$$R_\lambda = \frac{\Delta I}{P_\lambda \times A} = \frac{I_{aydınlık} - I_{karanlık}}{P_\lambda \times A} = \frac{I_a - I_k}{P_\lambda \times A} (A/W) \quad 2.6$$

I_a ve I_k sırasıyla fotoakım ve karanlık akım, A ışığa duyarlı etkin alan ve P_λ birim alan başına aydınlatma gücüdür.

Fotodedektörünün duyarlılığı, taşıyıcı konsantrasyonunun hızlı bir şekilde değişmesi ve elektronların banttan banda geçmesiyle oluşan **Yükselme süresi (t_r)** ve **Düşme süresi (t_f)** araştırılmıştır. Denklem 2.7.'deki üstel ifade ile ilişkilendirilir (Denklem 2.7.).

$$I = I_0 + A \cdot \exp(-t/t_r) + B \cdot \exp(-t/t_d) \quad 2.7$$

burada I_0 kararlı durum fotoakımı, t zamanı, A ve B sabitleri temsil etmektedir. t_r ve t_d , sırasıyla yükselme ve düşme kenarları için zaman sabitleridir. Ayrıca Yükselme süresi (t_r) ve Düşme süresi (t_r) aşağıdaki gibi tanımlanmıştır.

Yükselme süresi (t_r): Fotodedektörün maksimum akımın değerinin %10'undan %90'ına yükselmesi için gereken süre olarak tanımlanır (Hea ve ark., 2020).

Düşme süresi (t_r): Fotodedektörün maksimum akımın değerinin %90'ından %10'una düşmesi için gereken süre olarak tanımlanır (Hea ve ark., 2020).

Kuantum verimliliği (EQE): Gelen foton sayısı başına üretilen elektron-hol oranı olarak tanımlanır, başka bir deyişle, soğurulan bir fotondan bir elektron-hol çifti oluşturma olasılığıdır (Denklem 2.8.) (Peng ve ark., 2018)

$$EQE = \frac{hcR_\lambda}{q\lambda} 100\% \quad 2.8$$

burada h , Planck sabitini, c ışık hızını, q elektronun yükünü (1.6×10^{-19} C), λ gelen ultraviyole ışığın dalga boyunu ve R_λ , spesifik dalga boyuna gösterilen foto-yanıtı temsil eder.

Spesifik algılama (D^*): Algılanabilir en küçük sinyali ve giriş sinyali-gürültü ilişkisini karakterize eder. Bir fotodedektörün zayıf optik sinyallere duyarlılığını gösterir (Denklem 2.9.) (Xing ve ark., 2021) . En düşük sinyali algılama yeteneğini yansıtan bir ölçüdür. Birimi Jones ile ifade edilir.

$$D^* = \frac{R_\lambda \sqrt{A}}{\sqrt{2qI_{karanlık}}} \quad 2.9$$

Gürültü eşdeğer gücü (NEP): Bir hertz'lik bir çıkış bant genişliğinde sinyal-gürültü oranı veren sinyal gücü olarak ifade edilir (Denklem 2.10). Gürültü eşdeğer gücü değeri ne kadar düşükse, cihaz algılama performansı o kadar iyidir (Chauhan ve Patel, 2019).

$$NEP = \frac{\sqrt{2qI_{karanlık}}}{R_{\lambda}} (W/Hz^{1/2}) \quad 2.10$$

Doğrusal Dinamik Aralık (LDR): Cihazların performansı, doğrusal dinamik aralık ile de değerlendirilebilir, LDR şu şekilde ifade edilir: (Denklem 2.11.) (Wei ve ark., 2019)

$$LDR = 20 \log \left(\frac{I_{aydınlık}}{I_{karanlık}} \right) (dB) \quad 2.11$$

2.6. Metal Nanoparçacıkların Plazmonik Etkisi

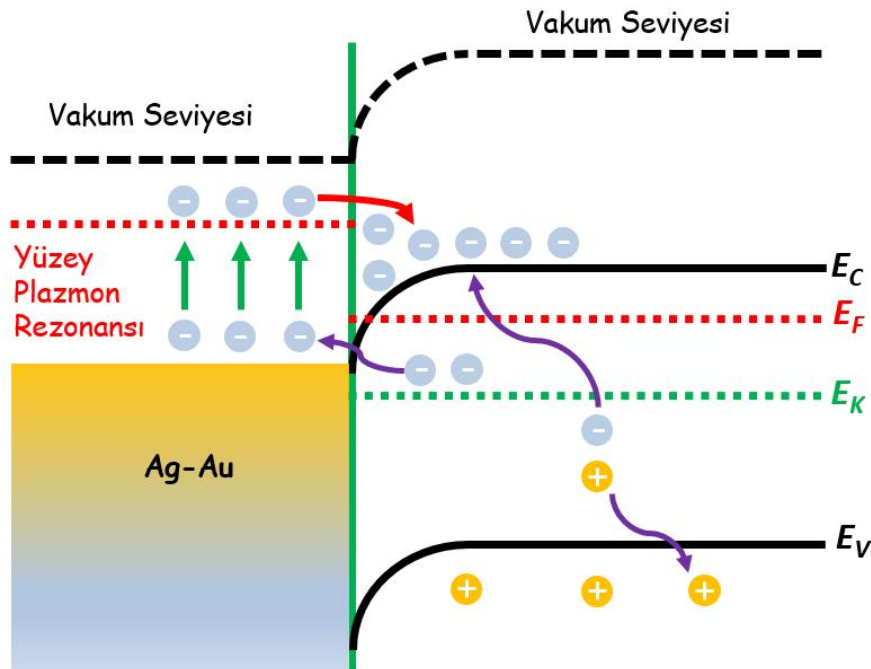
“Yüzey plazmonları, bir metal ile onu çevreleyen dielektrik ortam arasındaki arayüzde (yalıtkanlık sabitinin işaret değiştirdiği iki yüzey arasında) metalik malzemelerdeki serbest elektronların (uyarılabilen delokalize elektronların) toplu salınımlarıdır. örnek olarak görünür ışıktaki dielektrik ve metaller arası yüzeyler verilebilir. Yüzey plazmonlarındaki elektron salınımları metalin içinde ve dışında elektron salınımları yaratır. Bu salınımların bütünü yüzey plazmon polaritonu ya da lokalize yüzey plazmonu olarak tanımlanmaktadır; yüzey plazmon polaritonu düzlemsel yüzeylerde oluşurken, lokalize yüzey plazmonu bir nanoparçacığın kapalı yüzeylerinde oluşmaktadır” (Wikipedia, 2001).

Plazmonik güçlendirme (absorpsiyon), uzak alan saçılımı, yakın alan geliştirme ve yük taşıyıcı veya rezonans enerji transferi kapsamına giren çeşitli mekanizmalar yoluyla elde edilmektedir. Uzak alan saçılımı, aydınlatılan yüzeydeki yansımaları azaltarak ve soğurucu ortamdaki gelen fotonların optik yollarının uzunluğunu artırarak soğurma etkinliğini artırılmaktadır (Jang ve ark., 2016).

Fotodedektörlerin performanslarını daha da arttırmanın diğer bir yolu ise UV emisyon (yayınım) verimliliğini arttırmak için kullanılan yüzey plazmon rezonansı (SPR) yöntemidir (Hwang ve ark., 2015; Wang ve ark., 2017; Yang ve ark., 2016).

Yüzey plazmon rezonansı, metalik nanoparçacıklar (NP) üzerine gelen ışığın parçacık tabakasında bulunan plazma rezonanslarını harekete geçirdiğinde meydana gelmektedir. Bu uyarımlar, tek tek parçacıklarda dipol salınımlarını indükleyerek, gelen elektromanyetik alanı arttırmakta ve enerjinin metalik NP'lerden Ga_2O_3 katmanına aktarılmasına neden olan ısınimsal bağlanmaları kolaylaştırmaktadır. Metal nanopartiküllerle Metal/yarı iletken arayüzünde, yüzey plazmon rezonansı uyarılması yoluyla yarı iletken optik absorpsiyonun lokalize olarak arttırılması yarı iletkenin fotolüminesansının (PL) artmasını sağlamaktadır. UV emisyonundaki artış, metaller ve yarı iletken malzeme arasındaki yüzey plazmon eşleşmesinden kaynaklanmaktadır (Hwang ve ark., 2015; Ko ve ark., 2015; Konda ve ark., 2007; Luo ve ark., 2016; Yang ve ark., 2016).

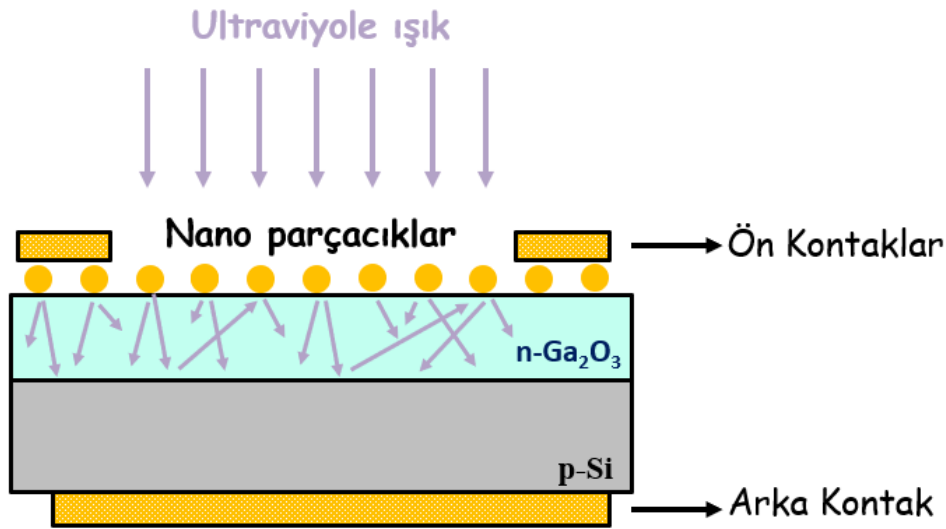
Yüzey Plazmon Rezonansı (SPR) ile fotoakım arttırılması mekanizmasını anlamak için enerji bant diyagramlarını incelemek gerekmektedir. Ag NP dekore edilmiş $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ 'ün enerji bant diyagramı Şekil 2.11.'de şematik olarak gösterilmektedir. $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ ilk Fermi seviyesi (iş fonksiyonu), Ag NP'lerin iş fonksiyondan (4.3 eV) daha büyüktür.



Şekil 2.11. Ag ve Au NP'lar ile dekore edilmiş $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ 'ün enerji bant diyagramı (Hwang ve ark., 2015; Yang ve ark., 2016)

β -Ga₂O₃'ün Fermi seviyesindeki artış göz önüne alındığında, elektronlar β -Ga₂O₃ iletim bandından Ag NP'lere elektronlar aktarıldığında, yeni Fermi enerji seviyesinde denge durumu elde etmek için bir hetero yapı oluşturulmuştur. Ek olarak, yüzeydeki hetero yapı tarafından elektron-hol çiftlerinin rekombinasyon olasılığını azaltabilen üçgen bir potansiyel bariyer oluşturulmuştur (Marica ve ark., 2022; Yang ve ark., 2016). Ayrıca Ag, Au, Al ve Pt gibi çeşitli metal nanoparçacıkların eklenmesi, yakın bant kenarı (YBK) ultraviyole (UV) emisyonlarını ve kusur seviyesini azaltmaktadır. Böylece, yüzey plazmon absorpsiyonu ile uyarılan enerjili elektronlar, metal NP'lerden yarı iletken nanoyapıların iletim bandına aktarılır. Enerjili elektronlar, değerlik bandında ışıınımsal olarak hollerle birleşir. Sonuç olarak, elektronlar daha fazla taşıyıcı kusur seviyesi (E_K) tarafından yakalanmadan önemli ölçüde transfer edilebilir (Hwang ve ark., 2015; Marica ve ark., 2022; Venugopal ve ark., 2014).

Bu çalışmada, sol-jel spin-kaplama yöntemiyle Ag nanoparçacıklar ile dekore edilmiş β -Ga₂O₃ UV FD elde edilmiştir. Ag NP'ler ışııkla güçlü etkileşimlere girer, gelen ışıığın absorplanmasını ve saçılmasını sağlamaktadır (Şekil 2.12.).



Şekil 2.12. Ag NP'ler ile gelen ışıığın absorplanmasını ve saçılması (Venugopal ve ark., 2014)

Ag NP'ler yüzeyindeki iletim elektronlarının belirli dalga boylarındaki ışık tarafından uyarıldıklarında toplu bir salınım girmeleri ışıkla güçlü etkileşimlerini sağlar. Ag NP'lerin parçacıkların boyutu, şekli, yoğunluğu ve parçacık yüzeyinin yerel kırılma indeksi absorpsiyon ve saçılma özelliklerini belirlemektedir. Ag NP'lerin optik özellikleri önemli ölçüde nanoparçacık çapına bağlıdır. Daha küçük nanoparçacıklar (20 nm'den küçük) öncelikle ışığı absorbe ederken, daha büyük parçacıklar (50 nm'den büyük) ışığın saçılmasını sağlamaktadır (Venugopal ve ark., 2014).

Hwang ve ark., (2015), yapmış oldukları bir çalışmada, Au NP'ler ile yüzey plazmon rezonansının ZnO nanorod (NR) bazlı Schottky bariyerli fotodetektörlerin (SB-FD) performansını artırabileceğini bildirmişlerdir. Au NP'lerde ZnO NR'lerin kusur seviyesindeki emisyonları tarafından indüklenen yüzey plazmon rezonansı, Au NP'lerin yakınındaki elektromanyetik alanı artırdığını, artan elektromanyetik alanın da elektronları ZnO ileti bandına uyardığını yayınlamışlardır (Hwang ve ark., 2015).

3. MATERYAL ve YÖNTEM

Bu tez çalışmasında, katkılı ve katkısız n- β -Ga₂O₃ ince filmler p-Si alt taşları ve kuvars üzerine sol-jel spin-kaplama yöntemiyle kaplanmıştır. Bu bölüm, çözeltilerin hazırlanması, alt taşların kesilmesi ve temizlenmesi, ince filmlerin büyütülmesi kısımlarından oluşmaktadır.

Ga₂O₃ katkı maddelerinin belirlenmesinde elementlerin pikometre (pm) cinsinden etkili iyonik yarıçapları göz önünde bulundurulmuştur. Ga⁺³, Ti⁺³, Sb⁺⁵, W⁺⁶, Sn⁺⁴ ve Zn⁺²'nin iyonik boyutları sırasıyla 62, 67, 60, 66, 69 ve 74 pikometredir (Pauling'in iyonik yarıçap verilerinden). Bu katyonların iyonik boyutları birbirine yakın olduğundan kafese ikame metal katkı maddeleri olarak girebilir. Zn²⁺ alıcı, W⁺⁶, Ti⁺³, Sb⁺⁵, Sn⁺⁴ donör görevi görebilir.

Bu amaçla %1 katkılı Ga₂O₃ çözeltileri sol-jel yöntemiyle sentezlenmiştir. Ek olarak, Ga₂O₃ katkılamanın etkilerini karşılaştırmak ve araştırmak için katkısız Ga₂O₃ aynı şekilde hazırlanmıştır.

3.1. Katkısız ve Katkılı Ga₂O₃ Çözeltilerin ve İnce Filmlerin Hazırlanması

Katkısız Ga₂O₃ ve %1 katkılı titanyum (Ti), Antimony (Sb), Kalay (Sn), Tungsten (W), Çinko (Zn) katkılı Ga₂O₃ çözeltileri Çizelge 3.1.'de belirtilen kimyasallar kullanılarak sol-jel yöntemiyle hazırlanmıştır.

Çizelge 3.1. Kaplama çözeltilerinin hazırlanmasında kullanılan kimyasalların listesi

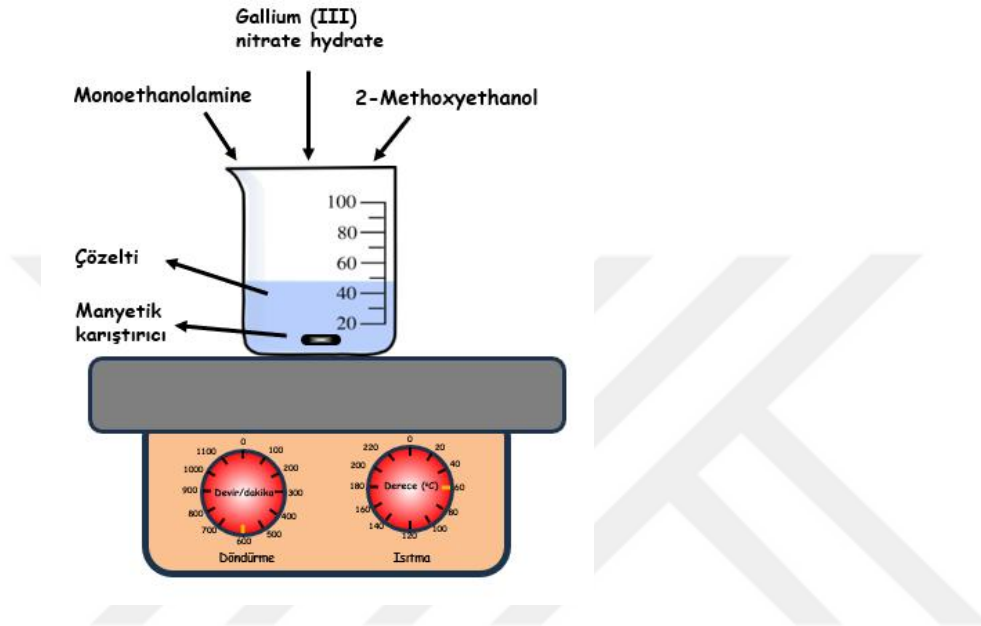
Kimyasal madde	Tip	Formül	Molar kütle (g/mol)	Marka
Galyum (III) nitrat hidrat	Öncü madde	$\text{Ga}_2\text{O}_3(\text{NO}_3)_3 \cdot x\text{H}_2\text{O}$	255.74	SIGMA-ALDRICH
Monoetanolamin [MEA]	Dengeleyici	$\text{C}_2\text{H}_7\text{NO}$	61.08	EMSURE
2-Metoksietanol	Çözücü	$\text{C}_3\text{H}_8\text{O}_2$	76.09	SIGMA-ALDRICH
Etanol (EtOH)	Çözücü	$\text{C}_2\text{H}_6\text{O}$	46.07	EMSURE
Titanyum (IV) izopropoksit	Katkı maddesi	TiO_2	284.22	SIGMA-ALDRICH
Antimon (III) asetat	Katkı maddesi	$(\text{CH}_3\text{CO}_2)_3\text{Sb}$	298.89	SIGMA-ALDRICH
Asetik asit	Çözücü	$\text{CH}_3\text{CO}_2\text{H}$	60.05	SIGMA-ALDRICH
Etilen glikol (EG)	Çözücü	$\text{HOCH}_2\text{CH}_2\text{OH}$	62.07	SIGMA-ALDRICH
Tungsten (VI) klorür	Katkı maddesi	WCl_6	396.56	SIGMA-ALDRICH
Kalay (IV) klorür pentahidrat	Katkı maddesi	$\text{SnCl}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$	350.60	SIGMA-ALDRICH
Çinko asetat dihidrat	Katkı maddesi	$(\text{CH}_3\text{COO})_2\text{Zn} \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	219.51	MERCK

3.1.1. Katkısız Ga_2O_3 çözeltisinin hazırlanması

Ga_2O_3 çözeltisinin hazırlanmasında Galyum Nitrat Hidrat [$\text{Ga}(\text{NO}_3)_3 \cdot x\text{H}_2\text{O}$], Monoetanolamin [MEA; $\text{C}_2\text{H}_7\text{NO}$] ve 2- Metoksietanol [$\text{C}_3\text{H}_8\text{O}_2$] sırasıyla öncül madde, dengeleyici ve çözücü malzeme olarak kullanılmıştır. 0.5115 galyum nitrat hidrat [$\text{Ga}(\text{NO}_3)_3 \cdot x\text{H}_2\text{O}$] öncü maddesi, 10 ml 2- Metoksietanol [$\text{C}_3\text{H}_8\text{O}_2$] içerisinde çözülmüş ve daha sonra çözeltiye 0.1222 gram monoetanolamin [MEA; $\text{C}_2\text{H}_7\text{NO}$] dengeleyici olarak eklenmiştir. Hazırlanan çözelti, homojen ve berrak olması için 60°C 'de 2 saat manyetik karıştırıcı ile karıştırılmış ardından oda sıcaklığında 24 saat yaşlanmaya bırakılmıştır. Çözeltinin hazırlanmasında Galyum Nitrat Hidrat

[Ga(NO₃)₃.xH₂O] molaritesi 0.2 molar, Galyum Nitrat Hidrat [Ga(NO₃)₃.xH₂O] ve Monoetanolamin [MEA;C₂H₇NO] molaritesi bire bir olarak belirlenmiştir.

Katkısız Ga₂O₃ çözeltisinin hazırlanmasının şematik gösterimi Şekil 3.1.'de gösterilmektedir.



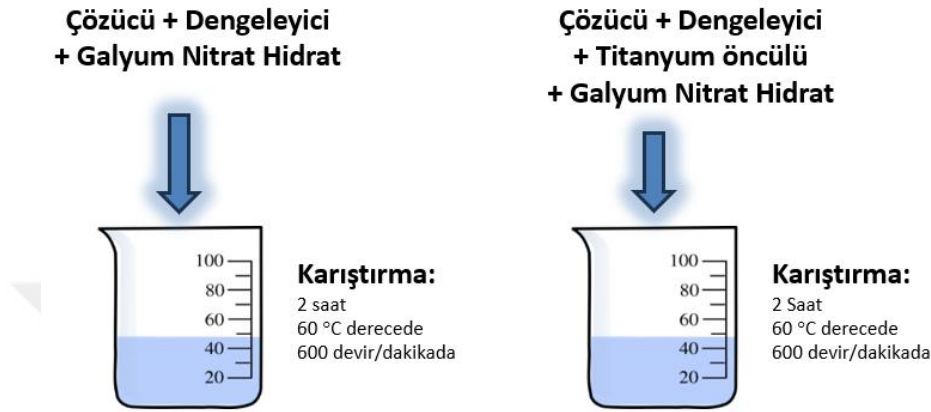
Şekil 3.1. Katkısız Ga₂O₃ çözeltisinin hazırlanması

3.1.2. Titanyum katkılı Ga₂O₃ çözeltisinin hazırlanması

Ga₂O₃ çözeltisinin hazırlanmasında sırasıyla öncü malzeme, stabilizatör ve çözücü malzeme olarak galyum nitrat hidrat [Ga(NO₃)₃.xH₂O], monoetanolamin [MEA;C₂H₇NO] ve 2-metoksietanol [C₃H₈O₂] kullanılmıştır. Ga(NO₃)₃.xH₂O molaritesi 0.2 molar, Ga(NO₃)₃.xH₂O ve MEA;C₂H₇NO molaritesi bire bir olarak belirlenmiştir. Titanyum katkı maddesinin etkisini araştırmak için Ga₂O₃ çözeltileri katkısız ve %1 Ti katkılı olarak hazırlanmıştır. Hazırlanan çözeltiler homojen ve berrak bir çözelti elde etmek için 60°C'de 2 saat karıştırılmış, ardından oda sıcaklığında 24 saat yaşlanmaya bırakılmıştır.

Yaşlandırma, çözeltinin uzun süre bekletilerek içindeki kimyasalların gerçekleştirdiği reaksiyonlarla kararlı yapıya geçme sürecidir. Yaşlandırma sırasında polimerleşme, sineriz, kabalaşma (coarsening) ve faz değişimleri görülmektedir.

Katkısız ve Titanyum katkılı Ga_2O_3 çözeltileri, öncül madde, stabilizatör, çözücü ve katkı maddesi (Ti katkılı çözelti için) aynı kapta olacak şekilde hazırlanmıştır. Aynı kaplarda hazırlanan çözeltilerin şematik gösterimi Şekil 3.2.'de gösterilmektedir.



Şekil 3.2. Aynı kaplarda hazırlanan "Katkısız Ga_2O_3 " ve "Titanyum katkılı Ga_2O_3 " çözeltilerinin kimyasal sentezi ve karıştırma koşulları

3.1.3. Antimon (Sb) / Tungsten (W) / Kalay (Sn) / Çinko (Zn) katkılı Ga_2O_3 çözeltilerinin hazırlanması

Antimon (Sb) / Tungsten (W) / Kalay (Sn) / Çinko (Zn) katkılı Ga_2O_3 çözeltilerinin her biri için " Ga_2O_3 çözeltileri" ve "katkı çözeltileri" ayrı kaplarda hazırlanmıştır.

➤ Ga_2O_3 çözeltisi, "Katkısız Ga_2O_3 çözeltisinin hazırlanması" metoduyla yapılmıştır.

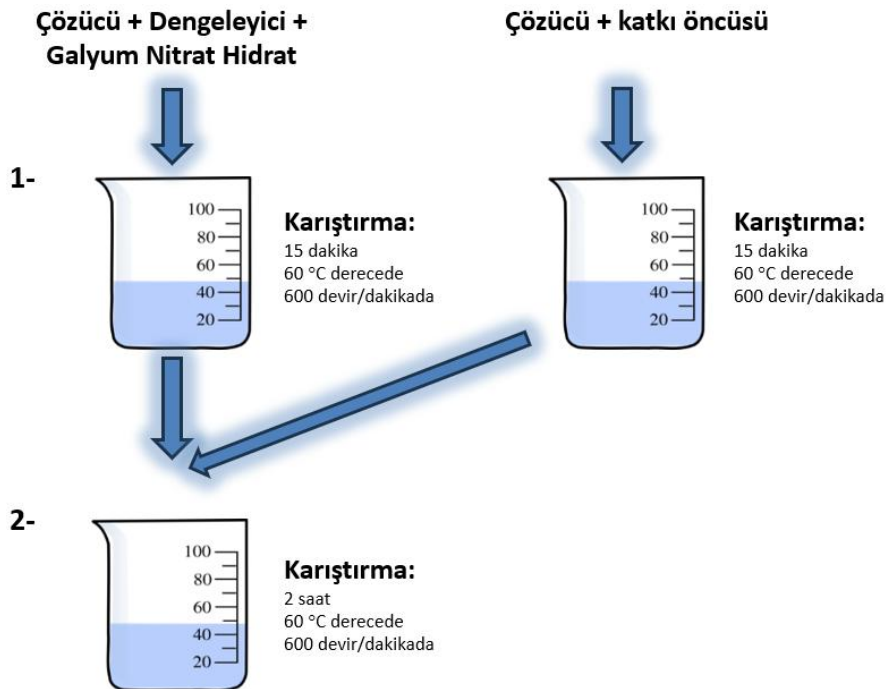
➤ Katkı çözeltilerinin hazırlanması aşağıda sıralanmıştır.

- Antimon (Sb) katkı çözeltisi ayrı bir kapta 2 ml Etilen Glikol ve 0.114 ml Asetik asit çözücüsü içerisine 0.00112 g Antimon (III) asetat katkı maddesi eklenerek hazırlanmıştır.
- Tungsten (W) katkı çözeltisi ayrı bir kapta 2 ml Etanol çözücüsü içerisine 0.00159 g Tungsten (VI) chloride katkı maddesi eklenerek hazırlanmıştır.

- Kalay (Sn) katkı çözeltisi ayrı bir kaptaki 2 ml Etanol çözücüsüne 0.0014 g kalay (IV) klorür pentahidrat katkı maddesi eklenerek hazırlanmıştır.
- Çinko (Zn) katkı çözeltisi ayrı bir kaptaki 2 ml Etanol çözücüsüne 0.00088 g çinko asetat dihidrat katkı maddesi eklenerek hazırlanmıştır.

Ayrı kaplardaki çözeltiler, 60 °C sıcaklık ve 600 devir/dakika döndürme hızında 15 dakika boyunca karıştırılmıştır. Ardından her katkı çözeltisi bir katkısız Ga_2O_3 çözeltisi ile karıştırılmış ve 60 °C sıcaklık ve 600 devir/dakika döndürme hızında 2 saat boyunca tekrar karıştırılmıştır. Çözeltiler karışma işlemi tamamlandıktan sonra 24 saat oda sıcaklığında yaşılmaya bırakılmıştır.

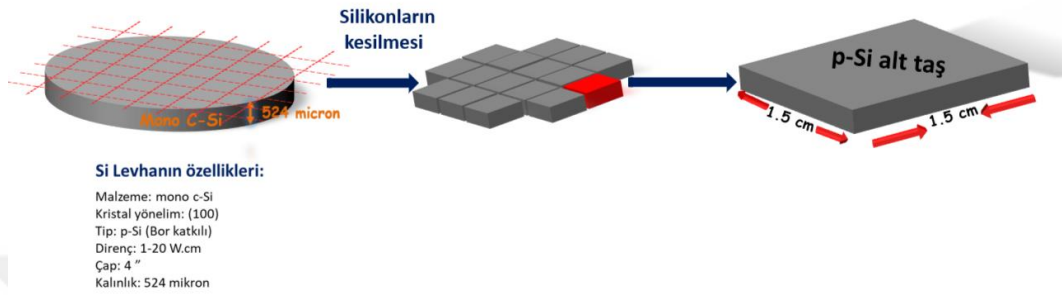
Ayrı kaplarda hazırlanan çözeltilerin kimyasal sentez adımları Şekil 3.3’de gösterilmektedir.



Şekil 3.3. Ayrı kaplarda hazırlanan çözeltilerin kimyasal sentez adımları (Sbeta, 2019)

3.2. p-Si Levhaların Kesilmesi

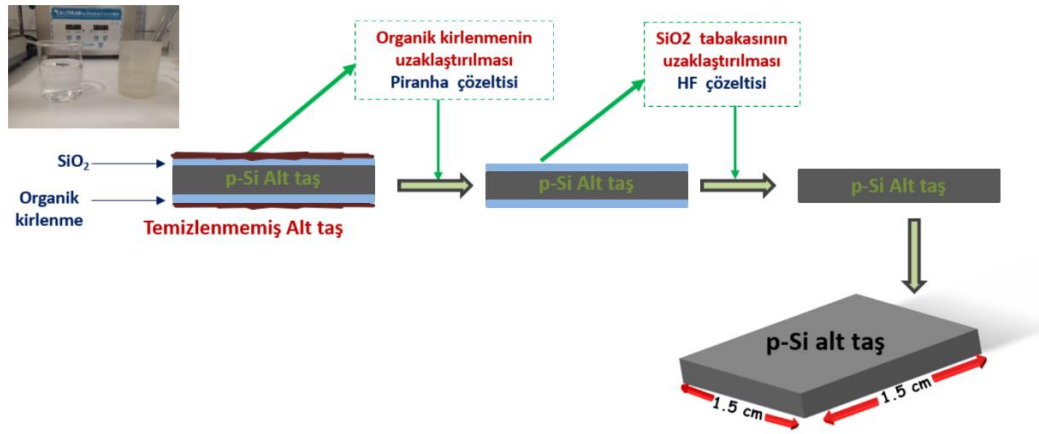
p tipi silikon levhalar elmas kesici yardımıyla 1.5x1.5 cm kareler şeklinde kesilmiştir. Silikon levhaların kesimi Şekil 3.4.'te gösterilmektedir.



Şekil 3.4. p-Si levhaların kesimi (Sbeta, 2019)

3.3. p-Si Alt Taşların Temizliği

Alt taşların temizliği büyütülen numunelerin manyetik özelliklerini ve tüm büyütme sürecini etkileyebilecek bir parametredir (Taner, 2022). Temizleme işlemi, öncelikle organik kirleticilerin, bir sonraki adımda ince oksit tabakasının çıkarılmasını içermektedir. Yüzeye göre farklılık gösteren temizleme işlemi birkaç farklı şekilde gerçekleştirilebilir. Bu çalışmada, Organik ve metalik kontaminasyonun giderilmesi Piranha, p-Si'nin doğal oksit (SiO_2) tabakasının çıkarılması için hidroflorik asit ($\text{HF:H}_2\text{O}$ (1.7:38.3 ml)) temizleme standardı uygulanmıştır (Sbeta, 2019; Yakuphanoğlu ve ark., 2010). Temizleme sürecinin şematik gösterimi Şekil 3.5.'te gösterilmektedir.



Şekil 3.5. p-Si alt taşların temizlenmesi (Sbeta, 2019)

Standartlara göre, Piranha ve HF çözeltilerinin Si at taşlara uygulanma adımları ve süreleri Çizelge 3.2.'de verilmiştir.

Çizelge 3.2. p-Si alt taşların temizlenmesi: Piranha + HF çözeltileri (Özel, 2022)

1.	15 dakika 80 °C’de Piranha çözeltisi içinde bekletme (40 ml): 30 ml sülfürik asit (H ₂ SO ₄) + 10 ml hidrojen peroksit (H ₂ O ₂).
2.	30 saniye deiyonize su içerisinde durulama
3.	5 dk oda sıcaklığında 2% Hidroflorik asit içinde bekletme (40 ml): 38.3 ml deiyonize su + 1.7 ml Hidroflorik asit (30 %)
4.	30 sn deiyonize su içerisinde durulama
5.	Kurulama: 150 °C’de 10 dk ısıtma

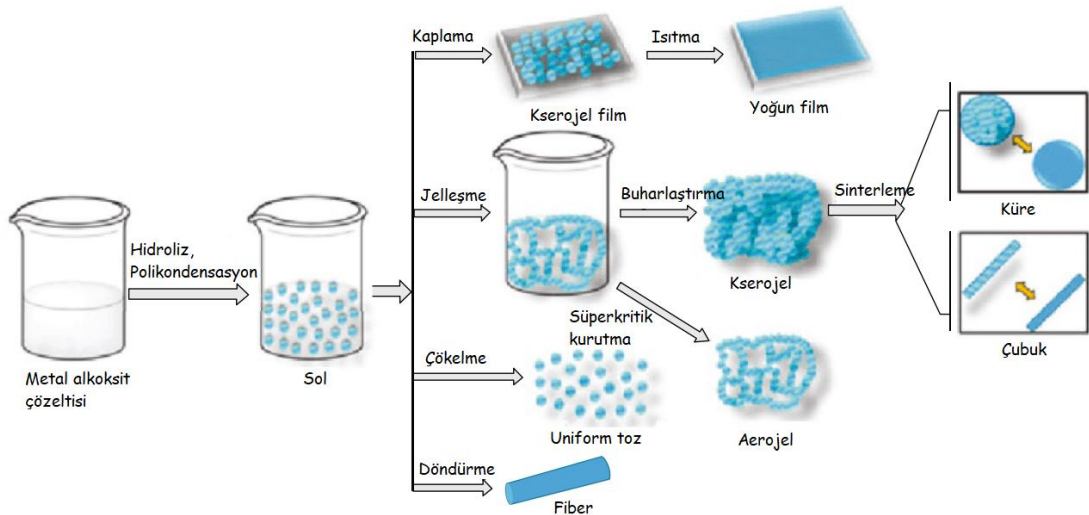
Si (100) alt taşlar standart bir prosedür kullanılarak temizlenmektedir (Özel ve ark., 2020).

3.4. İnce Film Büyütme ve Kaplama Metotları

İnce film üretim (büyütme ve kaplama) teknikleri temel olarak buhar, sıvı ve katı fazda olarak üzere üç ana sınıfa ayrılır. Sıvı fazda ince film üretme teknikleri arasında Sol-jel spin-kaplama metodu en ucuz ve kullanışlı yöntemdir (Birelli, 2022; Evcil, 2019). Ayrıca sıvı fazda büyütmeye, çözeltilerden ince filmler elde etmek için kullanışlı ve etkili bir yöntemdir. Bu sebeple bu çalışmada tercih edilmiştir.

3.4.1. Sol-jel yöntemi

Sol-jel işlemi, bir oksit ağının katalizörlü veya katalizörsüz olarak hidroliz-yoğuşma reaksiyonları yoluyla moleküler öncüllerden büyüdüğü bir ıslak kimya yöntemi olarak sınıflandırılır (Brinker ve Schere, 1990; Toygun ve ark., 2013). Sol, metal alkoksitlerin bir çözücü içerisinde karıştırılması ile oluşan kolloidal parçacıklar içeren çözeltidir (Saraç, 2017). Jel, sıvı ve katıların birlikte dağıldığı ve sıvı bileşen içeren polimerleşme sonucunda üç boyutlu gözenekli katı bir ağın oluşturduğu bir fazdır (Khan, 2018; Toygun ve ark., 2013). Sol-jel yönteminin oda sıcaklığında veya düşük sıcaklıklarda gerçekleşmesi, yüksek saflıkta çeşitli formatlarda ürün elde edilebilmesinden dolayı yaygın olarak kullanılmaktadır (Khan, 2018). Sol-jel yöntemi, çözünen maddelerin hidroliz-yoğuşma hızı, karıştırma yöntemi, oksidasyon hızı gibi değişkenlere sahiptir (Brinker ve Schere, 1990; Toygun ve ark., 2013). Sol-jel yöntemi, ön başlatıcının hidrolizi, sol-jel aktif türlerinin alkol ya da su kondenzasyonu, jelleşme, yaşlanma, kurutma ve yüksek sıcaklık işlemi adımlarına sahiptir. Sol-jel yöntemiyle yapılabilecek işlem türlerine ve her işlemin ürünleri Şekilde 3.6.'da gösterilmektedir.



Şekil 3.6. Sol-jel yöntemiyle yapılabilecek işlem türleri ve ürünleri (Bokov ve ark., 2021)

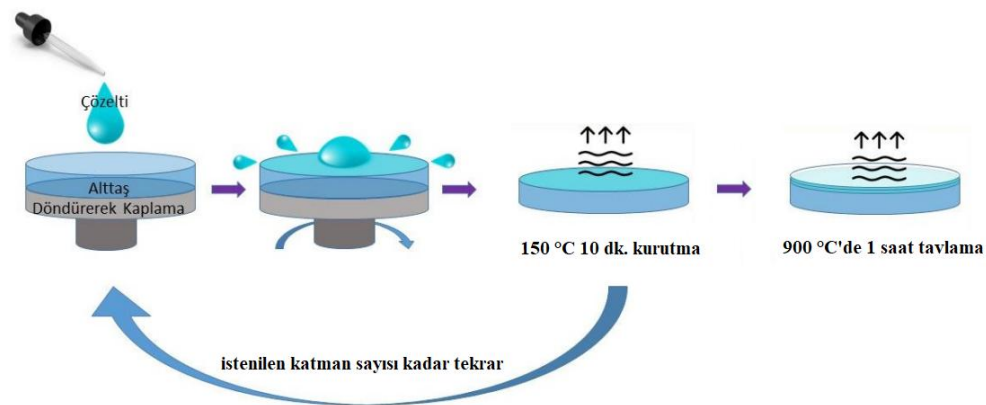
Sol-jel yöntemiyle hazırlanan çözeltiler yaşlandırma işlemine bırakılmıştır. Yaşlandırma süreci çözeltinin uzun süre bekletilerek içindeki kimyasalların

gerçekleştirdiği reaksiyonlarla kararlı yapıya geçme süresidir. Yaşlandırma sırasında da polimerleşme, sineriz, kabalaşma (coarsening) ve faz değişimleri görülmektedir. Bu çalışmada, Ga_2O_3 için yaşlandırma süresi 24 saat olarak belirlenmiştir.

3.4.2. Spin-kaplama methodu

Bu yöntem metal oksit filmleri ince film kaplamaları için kullanılan en yaygın yöntemdir. Genellikle sert, eğimsiz, düz altlıkları kaplamak için kullanılır. Hazırlanan çözeltiler alt taşların üzerine damlatılır. Alt taşlar belirli hızlarda (devir/dakika) döndürülür ve merkez kaç kuvvetinin etkisiyle çözelti homojen bir şekilde kaplanması sağlanır. Döndürme işlemi ile fazla çözelti yüzeyden kopar (Birelli, 2022). Çözücü maddenin belirli sıcaklıklarda buharlaştırılmasıyla ince film kaplanır. Kaplama işlemi istenilen ince film kalınlığı elde edilinceye kadar sürdürülür. İnce filmin kalınlığı, alt taşların dönme sayısı, zamanı, ivmesi ve çözeltinin yoğunluğu, akışkanlığı, miktarına göre değişkenlik göstermektedir.

Bu çalışmada hazırlanan Ga_2O_3 çözeltileri, temizlenmiş p-Si alt taşların üzerine spin-kaplama yöntemi ile kaplanmıştır. Kaplama işlemi, 30 saniye boyunca 2000 devir/dakika döndürme hızında beş kez kaplama ile sağlanmıştır. Şekil 3.7., spin-kaplama metodu ile β - Ga_2O_3 ince film üretim şemalarını göstermektedir.



Şekil 3.7. Spin-kaplama tekniği (Nebi, 2021)

Kaplanmış numuneler 150 °C'de 10 dakika kurutulmuştur. Son olarak numuneler 900 °C'de 1 saat tavlansmıştır.

Termal tavlama ile kurutma, ince filmlerin iç yapısını ve yüzey özelliklerini iyileştirmek için yaygın olarak kullanılan bir yöntemdir (Murakami ve Koide, 1998). Kurutma işlemi, çözeltinin içerisindeki çözücülerin uzaklaştırılmasını sağlar. Kurutma işlemi çatlak işlemine sebep olmadan yapılmalıdır (Özel ve ark., 2020).

3.5. Cihazların Metal Kontaklarının Eklenmesi

Ga_2O_3 tabanlı cihazların performansını etkileyen faktörlerden biri de kontaklıdır. Metal ile yarı iletken (Ga_2O_3) arasındaki kontakların minimum direnç değerinde olması yarı iletken cihazların performansının iyileşmesini sağlar. Omik kontak, metal ve yarı iletken arasında her iki yönde akım iletimine izin veren düşük dirençli bir bağlantıdır. Omik kontakların mevcut voltaj özellikleri doğrusal veya yarı doğrusal olabilir. Kontak bağlantısındaki voltaj düşüşü, cihazdaki voltaj düşüşüne kıyasla çok küçük olmalıdır (Evcil, 2019; Kröger ve ark., 1956; Murakami ve Koide, 1998). Düşük dirençli kontaklar, kontak üzerindeki voltaj düşüşünü azaltır ve kanal boyunca akım yoğunluğunun artmasını sağlar. Ayrıca, düşük dirençli kontaklar, ısınma etkisinin azaltılmasına katkıda bulunur. Sonuç olarak, yüksek performanslı cihazlar elde etmek için elektrik kontaklarının özelliklerinin kontrol edilerek yüksek kaliteli Omik kontakların üretilmesi büyük önem oluşturmaktadır (Huan ve ark., 2018).

Yarı iletken içeren yapılarda yarı iletken malzemeye kontak olarak eklenecek metal kontağın türünü belirlemektedir. Farklı enerji bant değerlerine sahip bir metal ile yarı iletken birleştirildiğinde oluşan kontak, iş fonksiyonlarının durumuna ve yarı iletkenin türüne göre lineer bir akım-gerilim karakteristiğine sahip omik ya da lineer bir akım-gerilim karakteristiğine sahip olmayan Schottky (doğrultucu) kontak oluşmaktadır.

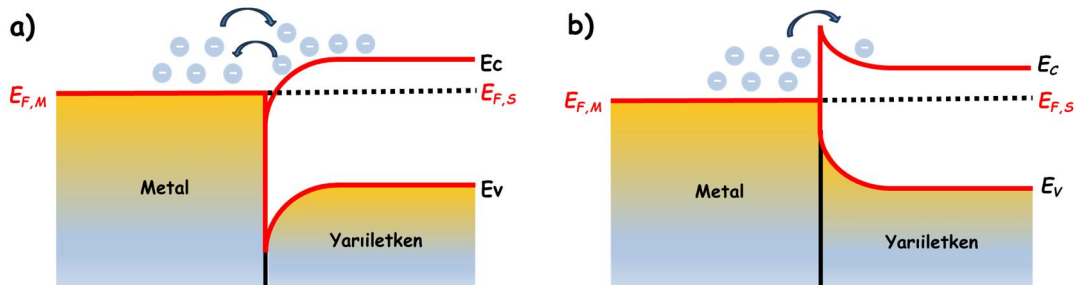
Yarı iletkenin türüne (n-tipi ve p-tipi) ve iş fonksiyonlarının durumuna göre oluşan kontak türleri Çizelge 3.3.'de verilmiştir.

Çizelge 3.3. Yarı iletkenin türüne ve iş fonksiyonlarının durumuna göre oluşan kontak türleri

Yarı iletken Türü	İş Fonksiyonları Durumu	Kontak Türü
n-tipi	$\Phi_M > \Phi_S$	Schottky (doğrultucu)
n-tipi	$\Phi_M < \Phi_S$	Omik
p-tipi	$\Phi_M < \Phi_S$	Schottky (doğrultucu)
p-tipi	$\Phi_M > \Phi_S$	Omik

Yarı iletken ile metal kontak temas ettiğinde eğer yük taşıyıcıları (elektronlar veya holler) tek bir yönde kolayca hareket edebiliyorsa bu tür kontaklara doğrultucu (Schottky) kontak denir. Bu tür kontaklarda uygulanan harici voltajın işaretine bağlı olarak akım bir yönde çok iyi iletilirken tersi yönde hemen hemen hiç iletilmez. Omik kontaklar ise uygulanan harici voltajın işaretine bağlı olmaksızın yük taşıyıcılarının her iki yönde de kolayca hareket edebildiği kontaklardır (Grover, 2016).

Metal/yarı iletken arasında oluşacak Omik kontakta, Şekil 3.8.(a)'da görüldüğü gibi arayüzde taşıyıcıların taşınmasını engelleyen bariyer bulunmaz. Şekil 3.8.(b)'den de anlaşılabacağı gibi arayüzde bulunan bir enerji bariyeri, metal ve yarı iletken arasındaki taşıyıcıların geçişini engelleyecektir. Özellikle, geniş bant aralıklı yarı iletkenler ve metaller arasında çoğunlukla Schottky kontak oluşur. Bu nedenle, temas direnci normalde metal/yarı iletken Schottky Bariyer Yüksekliğine (SBH, Φ_B) bağlıdır.



Şekil 3.8. a) Omik b) Schottky kontakların şematik çizimleri. E_C , E_V , $E_{F,M}$ ve $E_{F,S}$ sırasıyla iletken bant kenarı, değerlik bandı kenarı, metal ve yarı iletkenin Fermi enerji seviyeleri (Huan ve ark., 2018)

β -Ga₂O₃ için bildirilen elektron ilgisine dayanarak ($\chi_s = 4.05 \text{ eV}$), iş fonksiyonları 4.05 eV (Pearton ve ark., 2018) veya daha az olan metallerin omik kontaklar oluşturması beklenebilir. Bununla birlikte, çoğu geçiş metali için iş fonksiyonu (ϕ_M) 4.05 eV üzerindedir (Yao ve ark., 2017). Katkılı β -Ga₂O₃ ile temas halindeki metallerin özellikleri ve gözlenen davranışları Çizelge 3.4'te verilmiştir.

Çizelge 3.4. Katkılı β -Ga₂O₃ ile temas halindeki metallerin özellikleri ve gözlenen davranışları (Yao ve ark., 2017)

Metal	ϕ_M (eV)	Erime nokta (C)	Ohmiklik durumu	Omik olma Koşulları
Sc	3.5	1541	Omik değil	-
Zr	4.05	1855	Yarı omik	Sadece (Zr/Au) ile katkılama
In	4.1	157	Omik	600 C, 1 dk tavlama
Ag	4.26	962	Yarı omik	Katkılama
Zn	4.3	420	Omik değil	-
Ti	4.33	1668	Omik	400 C ila 500 C, 1 dakika tavlama
Sn	4.42	232	Yarı omik	Katkılama
W	4.55	3422	Omik değil	-
Mo	4.6	2623	Omik değil	-

Omik kontaklar oluşturmak için diğer bir yaklaşım ise, metal-yarı iletken arayüzünde Schottky Bariyer Yüksekliğini (SBH) azaltmaktır. Schottky-Mott teorisi, SBH'nin (ϕ_B) metalin iş fonksiyonu (ϕ_M) ile yarı iletkenin elektron ilgisi (χ_s) arasındaki farka eşit olduğunu tahmin eder (Hou ve ark., 2019).

$$\phi_B = \phi_M - \chi_s \quad 3.1$$

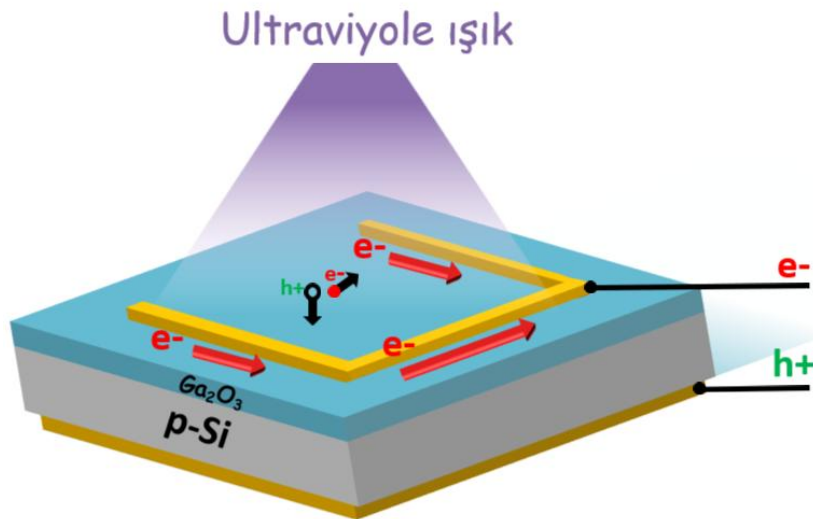
Yarı iletkendeki yüksek katkı konsantrasyonu, biraz daha yüksek iş fonksiyonlarına sahip metallerden omik kontakların oluşmasını sağlayabilir (Yao ve ark., 2017).

Ga₂O₃ kontaklarıyla ilgili yapışma, elektriksel dengesizlik ve yüksek temas direnci gibi çeşitli problemler vardır. Ag kontak, iş fonksiyonu, erime sıcaklığı ve oksit stabilitesi gibi özelliklere göre seçilmiştir. Metalizasyon sonrası tavlama,

arayüzde metal ve Ga_2O_3 'ün kısa mesafeli karışmasını sağlar, bu da temas direncinde daha fazla azalma ve güvenilirlik ve dayanıklılıkta iyileşme sağlar.

Yao ve ark. (2017), çalışmalarında $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ için 800 C'ye kadar tavlama sıcaklığının bir fonksiyonu olarak metallerin kontak türlerini araştırmışlardır. Ag, Sn ve Zr, metallerinin yarı-omik davranış sergilediğini, Sc, Mo ve W metallerinin ise, 800 C'ye kadar tavlamadan önce veya sonra omik davranış göstermediğini bildirmişlerdir (Yao ve ark., 2017).

n- $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ /p-Si güneş körü fotodedektörünün üzerindeki Ag elektrotlarının şeması Şekil 3.9.'da gösterilmiştir.



Şekil 3.9. Ag elektrotlara sahip n- $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ /p-Si güneş körü fotodedektörünün şematik diyagramı (Kumar ve ark., 2019)

Bu çalışmada ön ve arka metal kontaklar serigrafi tekniği kullanılarak yapılmıştır.

3.5.1. Ön metal kontak

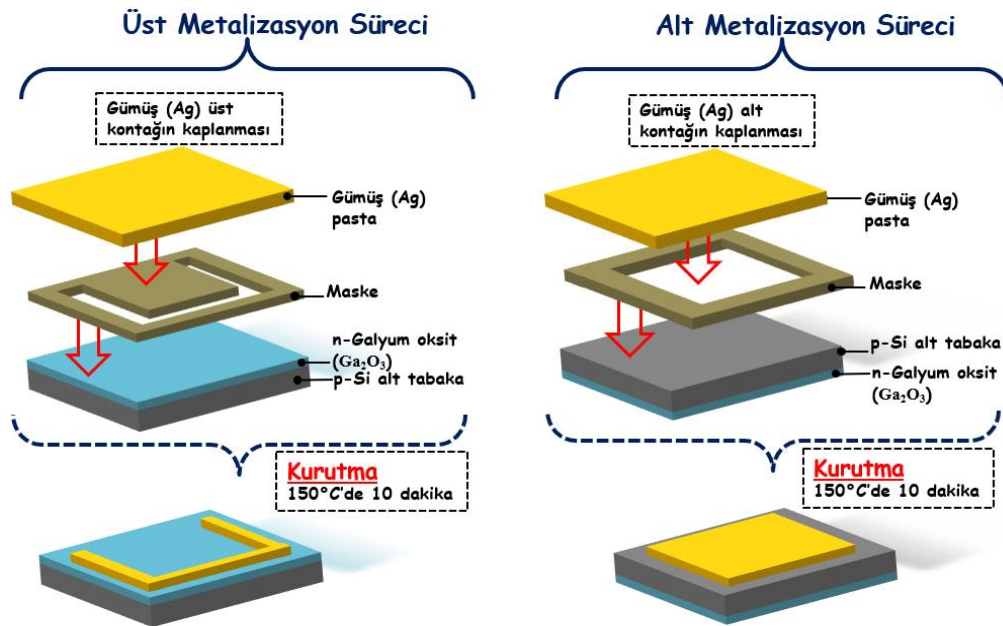
Bu çalışmada, ön metal kontak için Ag pasta (SIGMA-ALDRICH, 735825) kullanılmıştır. Gümüş, Ga_2O_3 malzemesine yakın bir iş fonksiyon değerine sahip olduğundan [$\phi_{\text{Ag}} \sim 4.26 \text{ eV}$ ve $\phi_{\text{Ga}_2\text{O}_3} \sim 4.05 \text{ eV}$] Ga_2O_3 katmanını ile yarı omik temas oluşturmuştur. Ag pasta cihazların üst yüzeyine serigrafi tekniği ile uygulanmış ve

ışığın cihaza geçişini engellemek için maske kullanılarak düzenli bir şekil oluşturulmuştur (Şekil 3.10.). Uygulanan Ag pasta 150°C'de 10 dakika termal olarak kurutulmuştur.

3.5.2. Arka metal kontak

Bu çalışmada, arka metal kontak için Ag pasta (SIGMA-ALDRICH, 735825) kullanılmıştır. p-Si yarı iletkeni ile metalin omik kontak oluşturabilmesi için metalin iş fonksiyonunun (ϕ_M) yarı iletkenin iş fonksiyonundan (ϕ_S) daha büyük olması gerekmektedir ($\phi_M > \phi_S$). p-Si'nin yüksek iş fonksiyonu değerinden dolayı (~ 4.91 eV) metal ile omik kontak gerçekleştirmesi genellikle zordur. p-Si'nin iş fonksiyonuna değerine yakın bir metalin seçilmesi omik kontak oluşturmaya da oluşacak Schottky (doğrultucu) kontağın bariyer yüksekliğinin düşük kalmasını sağlar. Ag'nin iş fonksiyonu ($\phi_M = 4.26$ eV), p-Si'nin iş fonksiyonu ile yakın olduğundan Ag kontak uygun bir seçim olacaktır.

Cihazların Ag/p-Si arka kontağını oluşturmak için, p-Si alt taşın arka yüzüne Ağ pasta sürülerek 150°C'de 10 dakika termal olarak kurutulmuştur. Metalizasyon süreci Şekil 3.10.'da gösterilmektedir.



3.6. Metal Nanoparçacıkların (Au ve Ag) Biriktirilmesi

Bu çalışmada, Metal nanoparçacıkları (NP), $n\text{-}\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ ince film üzerine biriktirmek için spin-kaplama tekniği kullanılmıştır. Nanoparçacık olarak küresel şekilli, kolloidal altın (Au) NP'lar (SIGMA-ALDRICH, ürün numaraları 753688) ve gümüş (Ag) NP'lar (SIGMA-ALDRICH, ürün numarası 730777) kullanılmıştır. Bu metallerin dağılım özellikleri Çizelge 3.5.'te gösterilmektedir.

Çizelge 3.5. Kullanılan Au ve Ag NP dağılımlarının özellikleri

NP malzeme	Au NP	Ag NP
Parçacık boyutu (nm)	100	100
Konsantrasyon (parçacık/ml)	3.84×10^9	3.6×10^9
Absorpsiyon zirvesinin dalga boyu (nm)	562	480

Spin-kaplama işlemi, yüzey üzerinde parçacıkların düzgün dağılımını sağlamak için optimize edilmiştir. NP'ların biriktirilmesi, NP solüsyonunun alt taş üzerine damlatılması ve 10 dakika bekletilmesi ile gerçekleştirilmiştir. Alt taşlar spin-kaplama tekniğiyle kaplanmıştır. Spin-kaplama, 2000 devir/dakika döndürme hızı ve 2 sn hızlanmada 60 sn süreyle sürdürülmüştür. Son olarak, alt taş deiyonize su (DIS) ile durulanmış ve daha sonra numunelere kimyasal kalıntıların kurutulması ve uzaklaştırılması için atmosferik havada 350 C'de 10 dakika termal işlem uygulanmıştır.

3.7. Cihazların Karakterizasyonu

p-Si üzerinde biriktirilen $n\text{-}\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ ince filminin yapısal ve optik özellikleri, yüzey morfolojileri sırasıyla X ışını kırınımı (XRD, Rigaku Miniflex 600), UV-Vis ölçümleri (UV-Vis spektrofotometre, Shimadzu-UV 1700) ve Alan Emisyon Taramalı Elektron Mikroskobu (FE-SEM, Hitachi SU500) ile karakterize edilmiştir. Ek olarak, biriken katmanın kalınlığı, kesitsel SEM ölçümleri ile hesaplanmıştır. Üretilen cihazların akım-voltaj (I-V) ve zamana bağlı foto tepki (I-t) özellikleri, 254 nm UV-aydınlatması ($1.12 \text{ mW} / \text{cm}^2$ ışık şiddeti) ve Keithley 2400 kaynak ölçüm ünitesi kullanılarak ölçülmüştür.

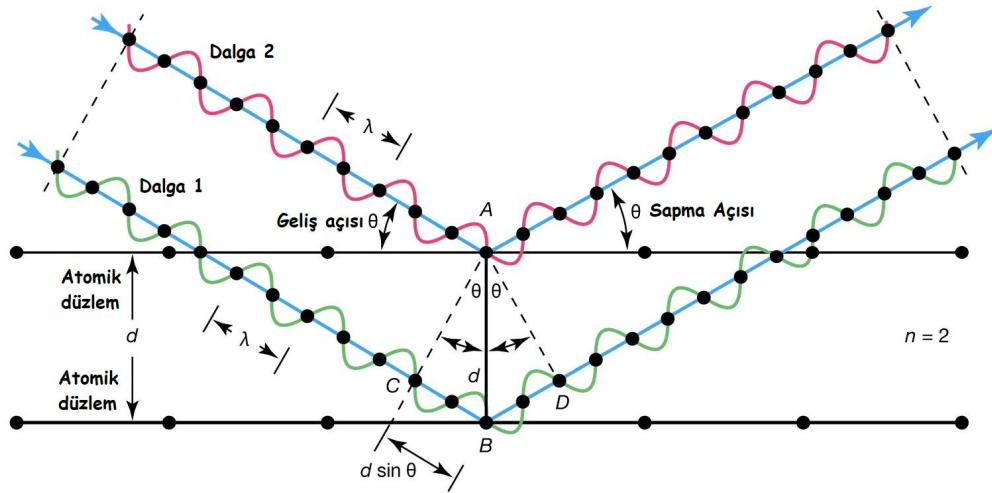
Karakterizasyon ölçüm sistemleri ve ölçüm sonuçlarından hesaplanan parametreler Çizelge 3.6.'da gösterilmektedir.

Çizelge 3.6. Karakterizasyon ölçüm sistemleri

Ölçüm sistemi	Karakterizasyon türü	Ölçülebilen parametreler	Hesaplanan parametreler
UV-Vis spektrometresi	Optik özellikler	• Geçirgenlik • Absorbans	• Bant aralığı enerjisi
XRD	Kristal yapı özellikleri	Kırınım • tepe noktaları	• Malzeme tanımlaması • Kristallik • Kristal boyutu • Kafes sabiti
SEM	Mikroyapı özellikleri	Nano ölçekli görüntüleme	• Film kalınlığı
IV	Elektriksel özellikler	Akım Gerilim	• Foto-hassasiyet (PS) • Foto-yanıt (PR (λ)) • Harici kuantum verimliliği (EQE (λ)) • Spesifik dedektivite (D^*) • Gürültü eşdeğer gücü (NEP) • Yükselme süresi (tr)/düşme süresi (td)

3.7.1. X-ışını kırınımı (XRD)

X-ışını kırınımı (XRD), malzeme bilimlerindeki en güçlü karakterizasyon tekniklerinden biridir. “X-Işını Kırınım yöntemi (XRD), her bir kristal fazının kendine özgü atomik dizilimine bağlı olarak X ışınlarını karakteristik bir düzen içerisinde kırması esasına dayanarak çalışır” (Cullity, 1978; Demir, 2020). XRD ölçümleri ile kristal yapılar, kafes düzlemlerinin yönelimleri elde edilmektedir. Kristallerde, atomlar veya moleküller, kırınım merkezleri gibi işlev gören periyodik bir düzende bulunur. Kırılan X-ışınlarının yönü, birim hücrelerin şekline ve boyutuna göre belirlenir (Cullity, 1978; Demir, 2020). Bu nedenle, kırınımlı dalga yönleri ölçülerek bir malzemenin kristal yapısı tanecik boyutu, stresi ve şekli hakkında bilgi elde edilebilir. Bilinmeyen kristallerin X-ışını kırınımının geometrisi Şekil 3.11.'de verilmiştir.



Şekil 3.11. Bragg kırınımının temsili gösterimi (Encyclopaedia Britannica, 2023)

Kırılan dalgalar arasındaki yol farkı, faz farkına yol açar. Bu faz farkı, dalganın genliğindeki değişikliklerin sebebidir. Bu nedenle, kırılan dalgalar ya yapıcı ya da yıkıcı girişim altına girer. Kırılan dalgaların yol farkı, dalga boyunun tam sayı katına eşitse, Bragg yasası tarafından formüle edilen yapıcı girişim oluşur.

$$n\lambda = 2d \sin \theta \quad 3.2$$

Yukarıdaki formülü yeniden düzenleyerek ve n için mümkün olan en küçük değeri n=1 girdiğimizde

$$\frac{n\lambda}{2d} = \sin \theta \leq 1 \quad 3.3$$

burada λ , X ışınlarının dalga boyunu, θ geliş açısını, d kristalin düzlemler arası mesafeyi temsil etmektedir. İletilen ve kırılan dalga arasındaki açı yani 2θ kırınım açısı olarak adlandırılır ve bu açı XRD analizlerinde ölçülür.

Kristallerin periyodikliği sadece yapıcı girişim sağlamakla kalmaz, aynı zamanda yıkıcı girişim de meydana gelir. Bu nedenle, ideal olarak, mükemmel kristaller için faz dışı olan kırınımli ışınlar birbirini iptal eder. Bununla birlikte,

gerçek kristaller için kusurlar vardır ve parçacık boyutlarını tanımlayan uzun menzilli periyodiklik bozulabilir (Cullity, 1978; Demir, 2020). Bu sebeplerden dolayı yıkıcı girişim partikül boyutu bilgisini içerir ve Scherer formülü ile XRD sonuçları ile hesaplanabilir.

$$D = \frac{K\lambda}{\beta_{2\theta} \cos \theta} \quad 3.4$$

burada D, XRD sonuçlarından hesaplanan kristalit boyutudur. K, Scherer sabitidir ve tepe değeri için kullanılan fonksiyona göre $0,89 \leq K \leq 0,94$ arasında değerler alır. $\beta_{2\theta}$, radyan cinsinden pikin tam genişlikteki yarı maksimum değeridir (FWHM).

β -Ga₂O₃'ün XRD spektrumunda 32° ve 64°'de iki geniş pik elde edilmiştir. Bu pozisyonlar β -Ga₂O₃'ün ana kırınım piklerinin konumlarına karşılık gelmektedir (Demir, 2020).

3.7.2. UV-Vis spektroskopisi

UV-Vis spektroskopisi, ince filmlerin geçirgenlik, yansıtma, absorpsiyon katsayısı veya optik bant aralığı gibi optik özelliklerini elde etmek için etkili bir yöntemdir. Bu yöntemde, ultraviyole ve görünür aralıkta dalga boyuna sahip fotonlar numuneye gönderilir ve iletilen fotonların şiddeti ölçülür. Sistem, filmlerin spektral iletim davranışını verirken bant aralığı değerini kolay ve hızlı bir şekilde analiz etme imkânı sağlar.

β -Ga₂O₃/kuvars numunelerinin optik soğurma ve geçirgenlik profilleri Shimadzu 1700 çift ışıklı UV-Vis spektrofotometre ile değerlendirilmiştir. Malzemelerin bant aralığı enerjisi (E_g) ve gelen ışığın penetrasyon derinliği ($\delta(\lambda)$) de UV-Vis ölçümleriyle belirlenebilir. β -Ga₂O₃ ince filmlerin bant aralığı enerjisi (E_g), Tauc denklemi kullanılarak absorpsiyon-foton enerjisi ilişkisinden elde edilebilir (Prabakar ve ark., 2004).

$$(\alpha h\nu)^2 = A(h\nu - E_g) \quad 3.5$$

burada α absorpsiyon katsayısını, $h\nu$ gelen foton enerjisini ve A bir sabiti temsil etmektedir. Ek olarak, gelen ışığın penetrasyon derinliği ($\delta(\lambda)$) absorpsiyon katsayısı spektrumundan ($\alpha(\lambda)$) elde edilebilir (Köksal ve ark., 2019).

$$\delta(\lambda) = \frac{1}{\alpha(\lambda)} \quad 3.6$$

$$\alpha(\lambda) = \left(\frac{1}{t}\right) \ln\left(\frac{1}{T}\right) \quad 3.7$$

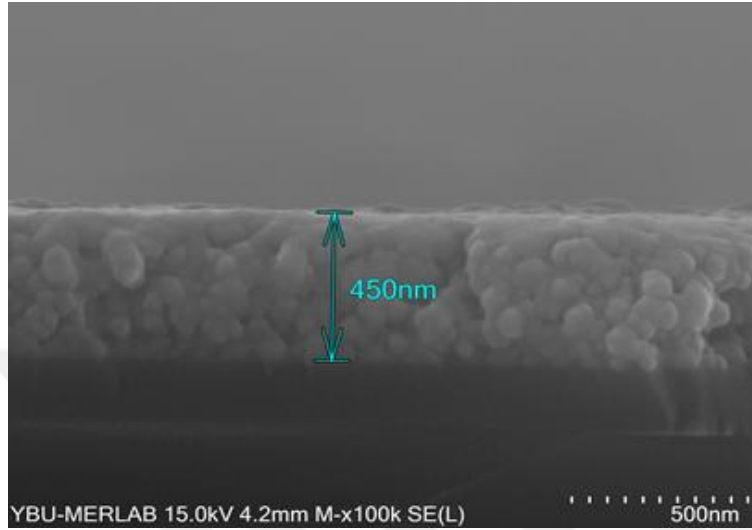
burada t ve T, kaplanmış katmanların kalınlığını ve şeffaflığını temsil etmektedir.

3.7.3. Taramalı elektron mikroskobu (SEM)

Taramalı elektron mikroskobu, malzemelerin mikroyapısal özelliklerini analiz etmek için yaygın olarak kullanılır. SEM analizinde numunelere gönderilen odaklanmış elektron ışınları malzeme ile arasındaki etkileşimin sonucunda malzemedan elektronlar olarak geri saçılır. Bu elektronların enerji kayıpları küçük olduğundan numuneyi terk etmek için yüksek kinetik enerjiye sahiptirler. Geri saçılan elektronlar numunenin bir görüntüsünü oluşturmak için kullanılan ana sinyallerdir. Taramalı Elektron mikroskobunda elektron kaynağı, yoğunlaştırıcı mercek sistemi, elektron ışınının çapını kontrol eden açıklıklar, numuneye yakın manyetik mercek ve dedektör bulunur (Demir, 2020).

Bu çalışmada, n- β -Ga₂O₃/p-Si hetero yapıları için yüzey morfolojileri, Hitachi SU5000 Alan Emisyon Taramalı Elektron Mikroskobu (FE-SEM) kullanılarak analiz edilmiştir. SEM görüntüleri, odaklanmış bir elektron ışını ile numunelerin üstten veya yandan görünüşünün taranmasıyla elde edilir. β -Ga₂O₃ ince filmi yayıcı

tabakasının nanoyapı özellikleri, tane boyutu ve kalınlık bilgisi SEM ölçümleri ile belirlenmiştir. $n\text{-}\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3/\text{p-Si}$ 'nin SEM görüntülerinin üstten görünüşünün bir örneği Şekil 3.12.'de gösterilmektedir.



Şekil 3.12. Ti katkılı $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ 'ün enine kesit SEM görüntüsü

3.7.4. Cihazların Akım-Gerilim (I-v) ve Akım-Zaman (I-t) Ölçümleri

Bu bölümde, $\text{Ag}/n\text{-}\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3/\text{p-Si}/\text{Ag}$ hetero yapısının doğrultma davranışı, doğrultma oranı, foto-yanıt, foto-duyarlılık, yükselme zamanı, alçalma zamanı vb. önemli UV fotodedektör parametreleri hesaplanmıştır. Fotodedektörlerin akım-voltaj (I-V) ölçümleri (karanlık ve aydınlık) ve akım-zaman (I-t) ölçümleri 254 nm UV-aydınlattması ($1.12 \text{ mW} / \text{cm}^2$ ışık şiddeti) ve Keithley 2400 kaynak ölçüm ünitesi kullanılarak ölçülmüştür. Bu ölçüm sisteminde cihazların arka kontağı prob istasyonunun pozitif terminaline, cihazların ön kontağı ise prob istasyonunun negatif terminaline bağlanır.

➤ Cihazların Akım-Gerilim (I-v) ölçümleri

Akım-voltaj (I-v) karakteristiği, fotodedektör cihazların elektriksel özellikleri hakkında önemli bilgiler verir. I-v ölçümlerinde, numunelere doğru ve ters ön gerilim uygulanarak performans analizleri için gerekli parametrelerle belirlenir. Aydınlık ve karanlık akım ölçüm değerleriyle Foto duyarlılık, Foto-yanıt, Quantum

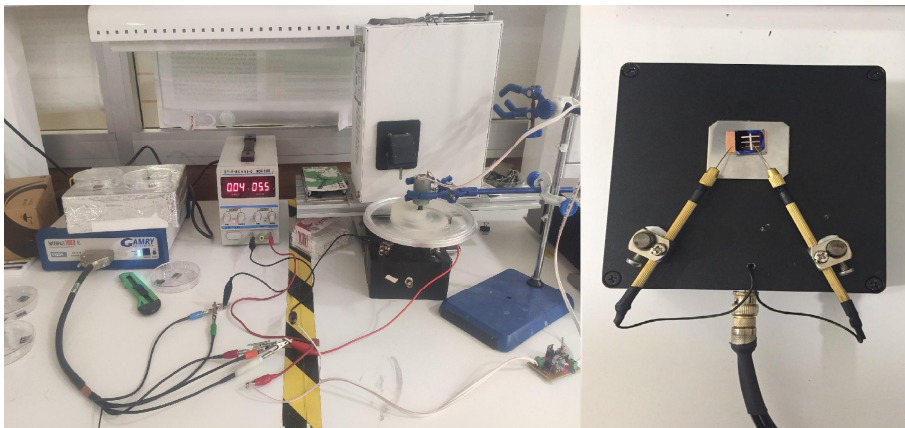
verimliliği, Spesifik algılama gibi sonuçlar elde edilebilir. Akım-Gerilim (I-V) ölçüm sistemi Şekil 3.13.'te gösterilmektedir.



Şekil 3.13. Akım-Gerilim (I-V) karakterizasyon sistemi

➤ Cihazların Akım-Zaman (I-t) ölçümleri

Fotodedektörlerin geçici yanıt (akım-zaman (I-t)), ters uygulanan gerilim değerlerinde (-10V), UV-aydınlatmanın belirli aralıklarla açılıp-kapanması ile gerçekleştirilir. UV-aydınlatmanın açılıp/kapanmasıyla cihazların fotoakım değerlerinin genliklerinde hızlı bir yükselme/düşme görülür. Fotodedektör üzerine ışık düştüğünde, fotoakım değerlerindeki artış kısa zaman kararlı durum düzeyine ulaşır. Bu seviye, cihazların aydınlatma gücü, absorpsiyon ve yük taşıma özelliklerine bağlıdır. Işık kaynağının kapanmasıyla fotoakım değeri düşer. Şekil 3.14., geçici yanıt karakterizasyon sistemini göstermektedir.



Şekil 3.14. Geçici yanıt karakterizasyon sistemi

Cihazların yükselme (t_r) ve alçalma (t_d) süreleri, cihazların karakterize edilmesini sağlar.

4. ARASTIRMA BULGULARI VE TARTISMA

Bir önceki bölümde, katkısız ve katkılı $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ çözeltileri hazırlanmıştı. Bu bölümde ise katkı malzemelerinin türü ve katkı oranlarının $n\text{-}\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3/\text{p-Si}$ tabanlı cihazlar üzerine yapısal, optik ve elektriksel özellikleri üzerine yapılan deneysel araştırmaların sonuçları analiz edilip tartışılmıştır. Sol-jel spin-kaplama tekniği kullanılarak üretilen p-n bağlantı tabanlı cihazların ($n\text{-}\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3/\text{p-Si}$) araştırma bulguları rapor edilmiş olup n tipi $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ ve bir p tipi Si alt taş arasında yüksek kaliteli bir p-n bağlantısı oluşturmak amaçlanmıştır.

Fabrikasyon cihaz yapılarının özeti Çizelge 4.1., 4.2. ve 4.3.'te gösterilmektedir.

Çizelge 4.1. Fabrikasyon cihaz yapılarının özeti

Katkı maddesinin cihazların performansı üzerindeki etkisinin araştırılması					
Cihazların adlandırılması					
C ₁	C ₂	C ₃	C ₄	C ₅	C ₆
Katkı Oranı ve katkı maddesi					
Katkısız	%1 katkılı W	%1 katkılı Ti	%1 katkılı Sb	%1 katkılı Zn	%1 katkılı Sn
Cihaz Yapısı					
$n\text{-}\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ /p-Si	$n\text{-}\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3\text{:W}$ /p-Si	$n\text{-}\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3\text{:Ti}$ /p-Si	$n\text{-}\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3\text{:Sb}$ /p-Si	$n\text{-}\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3\text{:Zn}$ /p-Si	$n\text{-}\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3\text{:Sn}$ /p-Si

Çizelge 4.2. Fabrikasyon cihaz yapılarının özeti

Katkı Oranının cihazların performansı üzerindeki etkisinin araştırılması				
Cihazların adlandırılması				
C ₆	C ₇	C ₈	C ₉	C ₁₀
Katkı Oranı ve katkı maddesi				
%1 katkılı Sn	%2 katkılı Sn	%3 katkılı Sn	%4 katkılı Sn	%5 katkılı Sn
Cihaz Yapısı				
n-β-Ga ₂ O ₃ :Sn /p-Si	n-β-Ga ₂ O ₃ :Sn /p-Si	n-β-Ga ₂ O ₃ :Sn /p-Si	n-β-Ga ₂ O ₃ :Sn /p-Si	n-β-Ga ₂ O ₃ :Sn /p-Si

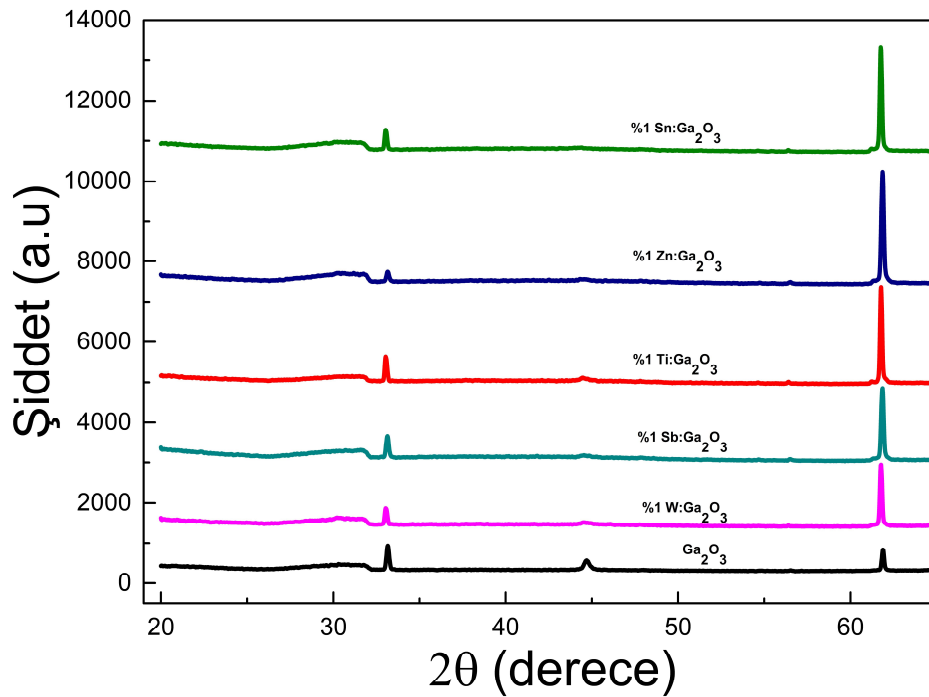
Çizelge 4.3. Fabrikasyon cihaz yapılarının özeti

Ag ve Au nanoparçacıkların cihazların performansı üzerindeki etkisinin araştırılması	
Cihazların adlandırılması	
C ₁₁	C ₁₂
Nanoparçacık maddesi ve boyutu	
100 nm Ag	100 nm Au
Cihaz Yapısı	
n-β-Ga ₂ O ₃ :Sn/p-Si	n-β-Ga ₂ O ₃ :Sn/p-Si

4.1. Katkısız ve Ti (Titanyum), W (Tungsten), Sb (Antimony), Zn (Çinko) ve Sn (Kalay) Katkılı n- β -Ga₂O₃/p-Si Tabanlı Fotodedektörler

4.1.1. Yapısal özellikler

p-Si alt taşlar üzerinde büyütülen ve 800 °C sıcaklıkta tavlanan n- β -Ga₂O₃:X (X: W, Ti, Sb, Zn, Sn) filmlerinin kristal yapısı ve faz analizi, XRD ölçüm tekniği kullanılarak belirlenmiştir.



Şekil 4.1. Katkısız β -Ga₂O₃ ve katkılı β -Ga₂O₃:X, (X: W, Sb, Ti, Zn, Sn) filmlerin XRD ölçümleri

XRD analizinden elde edilen Şekil 4.1.'deki sonuçlar, Ga₂O₃'ün β fazında kristalleştiğini ortaya koymaktadır. β -Ga₂O₃ sırasıyla ($\bar{1}11$), ($\bar{6}01$) ve (701) yönelimine karşılık gelen (33.47°), (44.73°) ve (62.63°)'de kırınım tepe noktalarına sahiptir. Bu piklerin dışında (100) p-Si alt taşına karşılık gelen diğer pikler de gözlemlenmiştir. Farklı katkılar ile numunelerin kristal boyutunun katkısız numuneye göre daha büyük olduğu gözlenmiştir. Her örneğin elde edilen kırınım modeli, β -Ga₂O₃ tek fazlı standart kartı ile uyumludur (Card No: 01-076-0573). Tüm numunelerin XRD grafiklerinde katkı fazı gözlenmemiştir.

Dakhel ve ark. (2012b), yapmış oldukları bir çalışmada, Tungsten katkı galyum oksit ($Ga_2O_3:W$) ince filmleri, cam ve silikon alt taşlar üzerinde vakum buharlaştırma yöntemiyle hazırlamışlardır. XRD analizinde Tungstenin herhangi bir fazından kırınım zirvesine rastlamamışlardır. Tungstenin (W^{+6}) iyonik yarıçapının, Galyum iyonlarının yarı çapına yakın olduğunu belirtmişlerdir (Shannon iyonik yarıçapı, Ga^{+3} , 0.062 nm'dir ve W^{+6} , 0.060 nm'dir). Ek olarak, Tungsten (W) ve Galyum (Ga_2O_3) yakın elektronegatiflik değerine sahip olduğunu (Ga için 1.6 Pau'dur ve W için 1.7 Pau'dur) bu nedenle, Hume-Rothery kuralına göre, Tungsten iyonunun kafes yapısında Galyumun yerini alabileceğini belirtmişlerdir. Bu sonuçlar, Ga_2O_3 'ün tungsten katkısı ile katkılındığını göstermiştir. %23'lük çok yüksek katkılama seviyesi için bile tungstenin (W) Ga_2O_3 kafesinde katkılındığını bildirmişlerdir (Dakhel, 2012b).

Dakhel ve ark. (2012a), çalışmalarında, Ga_2O_3 kristaline W iyonları ile katkılanmasının birim hücrenin hacminde ($V_{hücre}$) önemsiz bir artış oluşturduğunu bildirmişlerdir. W katkısını artırmanın, tane büyümesi nedeniyle kristalliği iyileştirdiğini ve %18.2'ye kadar artan W-katkı seviyesi ile kristalit boyutunun (KB), en yüksek değere kadar yükseldiğini, ardından azaldığını bildirmişlerdir.

W iyonlarının Ga_2O_3 'e dahil edilmesi aşağıdaki reaksiyonlarla açıklamışlardır: (Denklem 4.1.)



burada $W_{Ga}^{\bullet\bullet\bullet}$, Ga^{+3} yerine geçen W^{+6} iyonu ve V_{Ga}^x , nötr yükün Ga^{+3} iyon boşluğudur (Dakhel, 2012a).

Dakhel (2013), çalışmasında, farklı miktarlarda (%0.1, %1, %1.5, %2, %4.2, %6.6, %10.4 ve %15.7) Ti içeriğine sahip Ga_2O_3 ince filmleri, cam alt taşlar üzerinde hazırlamıştır. $Ga_2O_3:Ti$ filmlerin XRD desenlerinden filmin kristalliğinin Ti katkı konsantrasyonuna bağlı olduğunu kanıtlamıştır (Dakhel, 2013; Manandhar ve

ark., 2019). Düşük Ti katkı seviyesi (%0.1) için, konakçı Ga₂O₃ filmlerin neredeyse amorf hale geldiğini, bununla birlikte, Ti ilavesinin %1'e yükseltilmesiyle, tane büyümesine bağlı olarak kristal kalitesinin iyileştirildiğini belirtmiştir. Ayrıca cam alt taş üzerinde büyütülen katkısız Ga₂O₃ filmin, düşük tavlama sıcaklığına (600 °C) bağlı olarak zayıf kristallığe sahip olduğunu belirtmiştir. Böylece, Ga₂O₃ filmlerin kristal kalitesinin, alt taş sıcaklığına ve metal katkı konsantrasyonuna güçlü bir şekilde bağlı olduğunu belirtmiştir.

Ga₂O₃ oksit kafesine giren Ti⁺⁴ iyonlarının, ağırlıkça %10.4 büyük Ti katkı içeriğine rağmen ikame katı çözelti oluşturduğunu, bunun, Ga⁺³ ve Ti⁺⁴'ün karşılaştırılabilir iyon boyutları (Shannon iyonik yarıçapı, Ga⁺³, 0.062 nm'dir ve Ti⁺⁴, 0.060 nm'dir) ve elektronegatiflikleri (Ga için 1.6 Pau ve Ti için 1.5 Pau) nedeniyle oluştuğunu bildirmiştir.

Ti⁺⁴ iyonlarının Ga₂O₃'e dahil edilmesi aşağıdaki reaksiyonlarla açıklamıştır: (Denklem 4.2.)

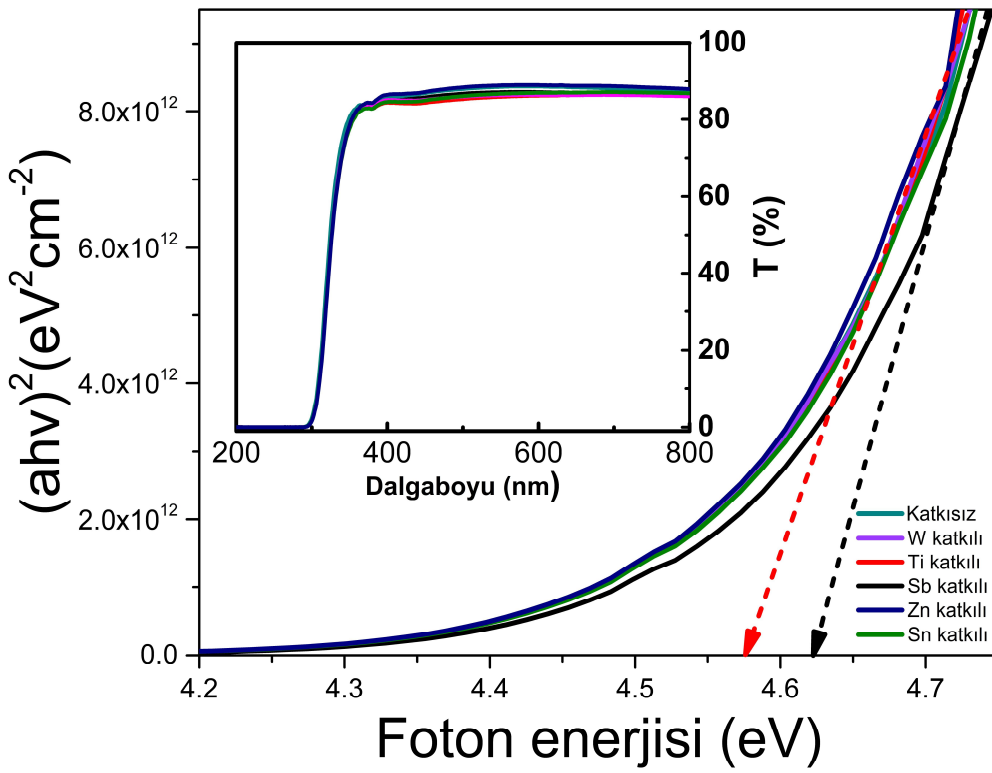


burada $Ti_{Ga}^{\bullet\bullet\bullet}$, Ga^{+3} yerine geçen Ti^{+4} iyonu ve $V_{Ga}^x \dots$, nötr yükün Ga^{+3} iyon boşluğudur (Dakhel, 2013). Diğer katkı atomları da benzer reaksiyonlar göstermiştir (Mi ve ark., 2015; Usui ve ark., 2018).

4.1.2. Optik özellikleri

Kuvars alt taşlar üzerinde biriktirilen β -Ga₂O₃ filmlerin optik özellikleri Şekil 4.2.'de gösterilmiştir. Numuneler için optik soğurma (absorpsiyon) ve geçirgenlik (transmittance (T)), bir UV-Vis spektrofotometre kullanılarak 200 nm ile 1100 nm dalga boyu aralığında ölçülmüştür. Genel olarak, aynı kalınlıkta benzer düzgünlük ve kompaktlığa sahip filmler benzer geçirgenlik spektrumu sergiler. 300 nm civarında zayıf bir absorpsiyon anlamına gelen geçirgenlikte hafif bir azalma, β -Ga₂O₃'ün

iletim bandı kenarının altındaki katkı maddesi ile ilgili kusur seviyesine bağlanabilir (Liu ve ark., 2021). Ancak, katkılı β -Ga₂O₃, görünür bölgede biraz daha fazla şeffaflık göstermiştir. Bu nedenle, katkı maddesinin mevcudiyeti, yayıcı tabaka yoluyla ışığın hasat edilmesini açıkça etkilemeyecektir. 280 nm'nin altındaki derin ultraviyole bölgesinde azaltılmış geçirgenlik burada filmlerin bir GKFD yayıcı tabakası olarak kullanılabileceği anlamına gelir. Sonuçlar, ışık absorpsiyon kenarının, bant aralığındaki azalmaya atfedilmesi gereken katkılı β -Ga₂O₃ için hafif bir kırmızıya kaymaya sahip olduğunu göstermektedir (Gao ve ark., 2017).



Şekil 4.2. Katkılı Filmler için Tauc grafikleri. Şeklin eki, filmlerin geçirgenlik spektrumları

Şekil 4.2.'nin iç kısmındaki Geçirgenlik (T) grafiğine göre, katkılı β -Ga₂O₃ ince filmler görünür bölgede %90'a yakın yüksek bir geçirgenliğe ve UV bölgesinde (285–400 nm) %70'in üzerinde katkısız filme eşdeğer mükemmel bir geçirgenliğe sahiptir. Katkılama ile geçirgenlik seviyesinde önemsiz sayılacak azalma birçok çalışmada bildirilmiştir. Dakhel (2012) çalışmasında, %30.4 gibi büyük bir W katkısının bile UV bölgesinde geçirgenliği önemli ölçüde düşürmediğini belirtmiştir (Dakhel, 2012a).

Şekil 4.2.'deki UV-Tranmittance verileri ve Tauc's Plot modeliyle katkısız β -Ga₂O₃ ve katkılı β -Ga₂O₃:X'in (X: W, Ti, Sb, Zn, Sn) bant aralığı (E_g) değeri sırasıyla 4.64 ve 4.59 eV olduğu bulunmuştur. Bu değerler benzer çalışmalar ile uyumludur (Gao ve ark., 2017; Liu ve ark., 2021).

β -Ga₂O₃'ün bant aralığı genelde 4 eV'den büyük olarak literatürde rapor edilmiştir. Dakhel (2012) çalışmasında, UV-Tranmittance verileri ve Tauc's Plot modeliyle $[(\alpha h\nu)^2]$ 'nin E_g 'ye karşı çizimlerinde $[(\alpha h\nu)^2] = 0$ eksenine düz bir çizgi ekstrapolasyonu yaparak, W katkılı β -Ga₂O₃'ün bant aralığını 4.12 eV olarak hesaplamıştır. W katkılı β -Ga₂O₃ bant aralığı 0.85 eV daralmıştır. (+3V) doğru besleme altında Au/n- β -Ga₂O₃:W/p-Si cihazındaki doğru akımın sıcaklığa bağlılığını göstermek için Arrhenius grafiğini elde etmiştir (Arrhenius eşitliği, fizikokimyada reaksiyon hızının sıcaklığa bağlılığını gösteren ve aktivasyon enerjisini de içeren bir formüldür). Hesaplanan aktivasyon enerjisinin (ϕ), bant aralığından (4.9 eV) daha az olduğunu ve W-katkılama seviyesiyle birlikte arttığını bulmuştur. Böylece, Tungsten katkısının (W), β -Ga₂O₃'ün içsel safsızlık enerji seviyelerinin müdahalesiyle W katkılı β -Ga₂O₃'ün bant aralığını daralttığını (0.4 eV kadar), bunun da, saf β -Ga₂O₃ ile karşılaştırıldığında W katkılı β -Ga₂O₃'ün optik absorpsiyon kenarının kırmızıya kaydığını kayması ile sonuçlandığını bildirmiştir (Dakhel, 2012b, 2012a).

Wang ve ark. (2014), çalışmalarında, katkısız ve %3-5-7 çinko (Zn) katkılı ince filmler hazırlamışlardır. Tüm numunelerin görünür bölgede %90'ın üzerinde yüksek geçirgenliğe ve UV bölgesinde (280-400 nm) %85'in üzerinde mükemmel geçirgenliğe sahip olduğunu göstermişlerdir. Yüksek geçirgenliğin, katkısız ve Zn katkılı β -Ga₂O₃ filmlerin yüksek kristal kalitesine sahip olduğunu kanıtladığını bildirmişlerdir. Ayrıca filmlerin bant aralıklarını, UV-Tranmittance verileri ve Tauc's Plot modeliyle $[(\alpha h\nu)^2]$ 'nin E_g 'ye karşı çizimlerinde $[(\alpha h\nu)^2] = 0$ eksenine düz bir çizgi ekstrapolasyonu yaparak 4.81 eV olarak hesaplamışlardır (Wang ve ark., 2014).

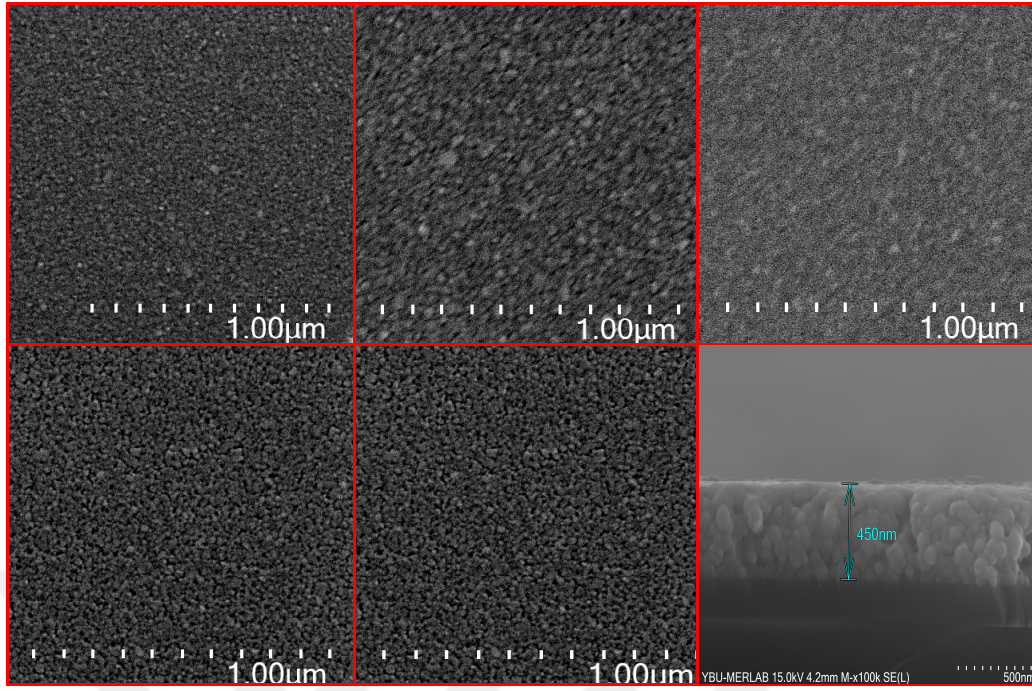
Dakhel (2013), çalışmasında, katkısız ve farklı katkı miktarlarında (%0.1, %1, %1.5, %2, %4.2, %6.6, %10.4 ve %15.7) Ti içeriğine sahip Ga₂O₃ ince filmleri, cam substratlar üzerinde hazırlamıştır. Hazırlanan katkısız Ga₂O₃'ün bant aralığının 5.23

eV olduğu, Ti katkılama seviyesinin artmasıyla bant aralığının monoton olarak azaldığı ve böylece bant aralığının tasarlanmasının mümkün olduğu belirtmiştir (Dakhel, 2013).

Manandhar ve ark. (2019), çalışmalarında, titanyum (Ti) katkılamanın galyum oksit (Ga_2O_3) filmlerin kristal yapısı ve optik bant aralığı üzerindeki etkisini araştırmak için %1-5 aralığında titanyum (Ti) içeriğine sahip numuneler üretmişlerdir. $\beta-Ga_2O_3:Ti$ filmleri için elde edilen absorpsiyon verilerinden içsel $\beta-Ga_2O_3$ (titanyum katkısı olmadan) için (E_g) değerini $5.40 (\pm 0.03) eV$ olarak bulmuşlardır. $\beta-Ga_2O_3$ filmlerine titanyumun (Ti) kademeli olarak dahil edilmesiyle E_g değerinin sürekli olarak azaldığı ve titanyum (Ti) katkı maddesi konsantrasyonunun %0'dan %5'e çıkarılmasıyla ince filmlerde önemli bant aralığı azalması ($0.9 eV$) meydana geldiğini bildirmişlerdir (Manandhar ve ark., 2019).

4.1.3. SEM analizleri

SEM analizleri, fabrikasyon $\beta-Ga_2O_3$ 'ün ince filmlerin yapısal analizini araştırmak için kullanılmıştır. Şekil 4.3.(a-e), katkısız ve katkılı filmlerin SEM sonuçlarını göstermektedir. Sonuçlar, katkılı ince filmlerin katkısız numuneye göre daha yoğun olduğunu göstermiştir. Şekil 4.3.(f) SEM görüntüsü ise Ti katkılı ince filmlerin kesit görüntüsünü göstermektedir. Şekil 4.3.(f)'den de anlaşılabacağı gibi, $450 nm$ 'lik benzer kalınlıklara sahip tek tip ve homojen $n-\beta-Ga_2O_3$ katmanları $p-Si$ alt taşlar üzerinde biriktirilmiştir.



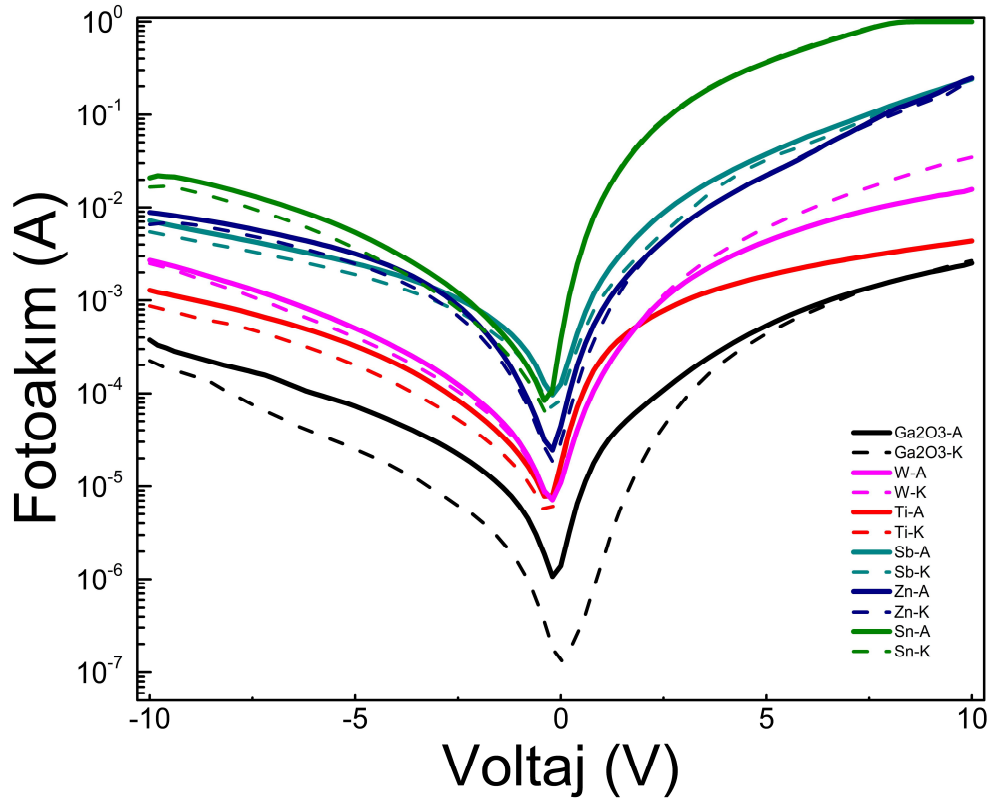
Şekil 4.3. SEM görüntüleri a) Ga_2O_3 b) $\text{W:Ga}_2\text{O}_3$ c) $\text{Ti: Ga}_2\text{O}_3$ d) $\text{Sb Ga}_2\text{O}_3$ e) $\text{Zn: Ga}_2\text{O}_3$ f) TGO'nun enine kesit görüntüsü

Feng ve ark. (2023), çalışmalarında, %0, %1.1, %1.7 ve %2.2 Sb katkılı n- β - Ga_2O_3 :Sb/p-Si fotodedektörler imal etmişlerdir. SEM sonuçları ile, Sb katkılı ince filmlerin daha yoğun hale geldiğini kanıtlamışlardır. Ek olarak, %2.2 katkılı numunenin yüzeyinin, diğer katkılı numunelerinkinden daha pürüzsüz olmasının sebebini, düşük Sb içerikli katkılamanın, β - Ga_2O_3 kristal bloklarının yanıl büyümesini ve birleşmesini teşvik etmesine, buna bağlı olarak numunenin yüzey morfolojisini iyileştirmesi ve yüzey aktivatörü olarak davranmasına bağlamışlardır (Feng ve ark., 2023).

4.1.4. Elektriksel özellikler

n- β - Ga_2O_3 /p-Si tabanlı cihazların performans sonuçlarını elde etmek için, aydınlık ve karanlık koşullar altında akım-voltaj (I-V) karakteristikleri elde edilmiştir. Cihazların akım-voltaj (I-V) özellikleri, ışık kaynağı ve Keithley 2400 kaynak ölçerden oluşan bir ölçüm düzeneği kullanılarak 254 nm UV aydınlatması (1.12 mW/cm^2 yoğunluk) altında ölçülmüştür.

Katkısız $n\text{-}\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3/\text{p-Si}$ ve katkılı $n\text{-}\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3\text{:X}/\text{p-Si}$ tabanlı cihazların optoelektronik performansını araştırmak için yapılan karanlıkta ve ışık altında akım-voltaj (I-V) ölçümleri Şekil 4.4.'te gösterilmektedir. GKFD davranışını anlamak için, $n\text{-}\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ ve p-Si arasında meydana gelen hetero eklem, ters besleme altında bant konumlarının yeniden düzenlenmesi yoluyla niteliksel olarak incelenebilir. Bu durumda, çoğunluk taşıyıcıları, yani Ga_2O_3 tarafından Si tarafına elektronlar ve Si tarafından Ga_2O_3 tarafına holler yüksek potansiyel bariyerini aşamaz, bu da karanlıkta önemli bir akım azalmasına yol açar. Bu durumda, zayıf karanlık akımdan yalnızca azınlık taşıyıcıları sorumludur. Bununla birlikte, bağlantı 254 nm ışıkla aydınlatıldığında, ışık cihaz tarafından emilir ve bağlantının tükenme bölgesinde ışıkla uyarılmış elektron-hol çiftleri oluşur. Elektron-hol çiftleri tükenme bölgesinde oluşan elektrik alan altında hemen ayrılırlar. Nihayetinde elektronlar Si tarafından Ga_2O_3 tarafına taşınırken, holler Ga_2O_3 tarafından Si tarafına taşınır, bu da ters besleme altında foto akımda bir iyileşmeye yol açar.

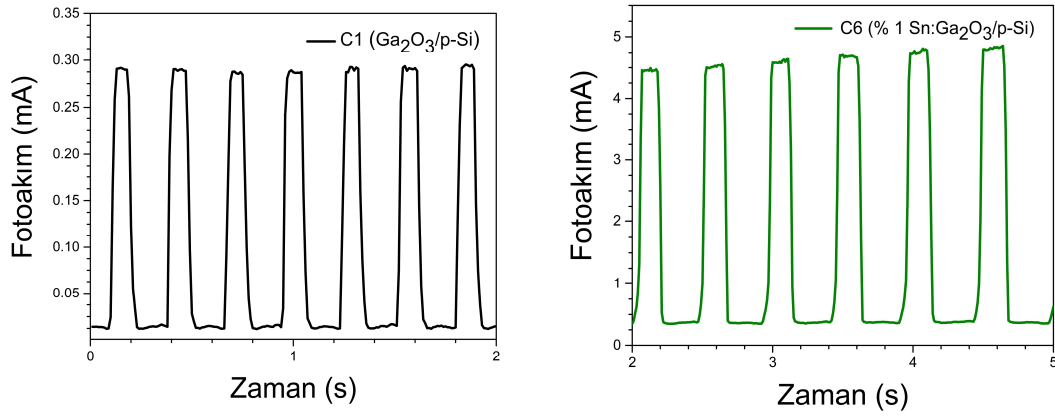


Şekil 4.4. Fotodedektörlerin karanlıkta ve 254 nm UV aydınlatmada ölçülen yarı logaritmik ölçekli IV eğrileri

Şekil 4.4.'ten görüldüğü gibi, katkılı $n\text{-}\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3\text{:X/p-Si}$ (X: W, Ti, Sb, Zn, Sn) hetero eklemler için çoğunluk taşıyıcıların elektrik akımına katkısı, doğru besleme altında önemsizdir, ters besleme altında foto akımın belirlenmesinde sadece azınlık taşıyıcıları rol oynar. Öte yandan, bu, hem çoğunluk hem de azınlık taşıyıcılarının foto akıma birlikte katıldığı $n\text{-}\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3\text{:X/p-Si}$ (X: W, Ti, Sb, Zn, Sn) hetero eklem için geçersizdir. Yani, fotoakım, ters ve doğru besleme bölgesi altında aynı anda artar. Bu sonuçlar, Katkılı $n\text{-}\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3\text{:X/p-Si}$ (X: W, Ti, Sb, Zn, Sn) hetero eklemlerde eklenmesinden sonra bağlantı kalitesinin daha iyi hale geldiği anlamına gelir.

Katkısız $n\text{-}\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3\text{/p-Si}$ tabanlı fotodedektör, -10 V 'ta $2.24 \times 10^{-4}\text{ A}$ kadar düşük bir karanlık akımla doğrultucu özellikler göstermiştir. Bu doğrultucu özellikler, $n\text{-}\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ ve $p\text{-Si}$ alt taşlar arasında oluşan p-n bağlantısına atfedilebilir (Usui ve ark., 2018). Karanlık akım değerleri, Ga_2O_3 tabanlı cihazlar için başka çalışmalarda bildirilen değerlerden daha yüksektir (Liu ve ark., 2021). Bu, kullanılan biriktirme yönteminden ve $n\text{-}\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ ile $p\text{-Si}$ hetero eklem arasında oluşan arayüz kusurlarından kaynaklanabilir. Katkılamanın dahil edilmesi, mobil elektronları yakalayan istenmeyen kusurları da ortaya çıkarabilir ve bu da, karanlık akım değerinde, katkısız muadili üzerinde bir artışa neden olmuştur. Cihazların düzeltme davranışını ve aydınlatmaya bir tepki gösterdiğini açıkça görülebilir. $n\text{-}\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3\text{:Sn/p-Si}$ cihazı için karanlıkta asimetri oranı ($I_{(10\text{V'da})} / I_{(-10\text{V'da})}$) 60 olarak bulunur ve karanlık akım -10 V'da (I_D) 16.64 mA'dır . Işığa maruz kalma altında, -10 V ters beslemede fotoakım (I_A), katkısız $n\text{-}\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3\text{/p-Si}$ cihazına göre 55.71 katına çıkmıştır. Düşük karanlık akım ve büyük foto tepki, kaliteli bağlantıya ve $n\text{-}\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ ile $p\text{-Si}$ alt taşı arasında oluşan büyük yerleşik potansiyele bağlanabilir. Bu sonuçlar, cihazların GKFD olduğunu kanıtlamaktadır.

GKFD'ler için başka bir değer rakamı, geçici fotoakım eğrisinden elde edilen tepki süresidir. Fabrikasyon fotodedektörlerin zamana bağlı foto tepki grafikleri, 254 nm 'lik UV-C aydınlatması altında ölçülmüştür. $n\text{-}\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3\text{/p-Si}$ fotodedektörler, Şekil 4.5.'te gösterildiği gibi sabit ve tekrarlanabilir cihaz özellikleri sergilemiştir.



Şekil 4.5. C1 ve C6 cihazlarının zamana bağlı ışık tepkisi çizimlerini

Yükselme süresi (t_r) ve düşme süresi (t_d) değerleri -10V ters beslemede n- β -Ga₂O₃/p-Si GKFD ve n- β -Ga₂O₃:Sn/p-Si GKFD için sırasıyla 29.60 ms ve 28.86 ms, 25.03 ms ve 22.62 ms olarak bulunmuştur. n- β -Ga₂O₃/p-Si ile karşılaştırıldığında n- β -Ga₂O₃:Sn/p-Si GKFD'nin hem t_r hem de t_d değerlerinin daha üstün olduğu açıktır. Tepki süresi iyileşmesi, Sn'nin dahil edilmesiyle kusur durumlarının bastırılmasından dolayı ışıkla uyarılmış taşıyıcıların hızlıca ayrılmasına ve göçüne veya ışıkla uyarılmış taşıyıcıları verimli bir şekilde ayırabilen güçlü p-n bağlantısına atfedilebilir (Pedapudi ve Dhar, 2022).

Fabrikasyon tüm cihazların aydınlatmaya verilen tepki süreleri Çizelge 4.4.'te verilmiştir.

Çizelge 4.4. Aydınlatmaya verilen tepki süreleri

	C ₁	C ₂ (W)	C ₃ (Ti)	C ₄ (Sb)	C ₅ (Zn)	C ₆ (Sn)
Yükselme süresi (t_r) ms	29,60	26,62	73.18	54.54	60,52	25,03
Düşme süresi (t_d) ms	28.86	30,32	85.41	62.67	64.54	22,62

Katkılama ile cihazların açık/kapalı aydınlatmaya verdiği tepki süreleri değişkenlik göstermiştir. Kalay (Sn) hariç tüm katkılar cihazların yükselme süreleri (t_r) ve düşme sürelerinde (t_d) artışa sebep olmuştur. Temel bir karşılaştırma için katkılamanın yapılmadığı C₁ cihazı ile en iyi tepki süresine sahip C₆ cihazının zamana bağlı ışık tepkisi çizimleri Şekil 4.5.'te gösterilmektedir.

Ayrıca, yakın zamanda bildirilen çeşitli benzer GKFD'lerin temel parametrelerinin bir karşılaştırması Çizelge 4.5.'de gösterilmektedir. Fabrikasyon cihaz, katkılı Ga_2O_3 tabanlı GKFD'lerden daha yüksek Foto-yanıt değeri ve daha hızlı yanıt süresi göstermiştir.

Çizelge 4.5. Ga_2O_3 'e dayalı GKFD'lerin temel parametrelerinin karşılaştırılması

Cihaz	Foto yanıt (mA/W)	Ön gerilim	τ_r (ms)	τ_d (ms)	Ref.
$\text{Ga}_2\text{O}_3:\text{Zn}/\text{Sapphire}$	-	10	1950	250	(D. Guo ve ark., 2017)
$\text{Ga}_2\text{O}_3:\text{Mg}/\text{Al}_2\text{O}_3$	23.8	10	330	20	(Qian ve ark., 2017)
$\text{Ga}_2\text{O}_3:\text{Si}/\text{Kuars}$	1.44	25	880	180	(Jeong ve ark., 2021)
$\text{Ga}_2\text{O}_3:\text{Sn}/\text{Al}_2\text{O}_3$	80	50	-	22	(Fan ve ark., 2020)
$\text{Ga}_2\text{O}_3:\text{Sn}/\text{p-Si}$	3866	10	25.03	22.62	Bu çalışma
$\text{Ga}_2\text{O}_3/\text{p-Si}$	-	20	4060	160	(Gao ve ark., 2018)

Fotodedektörlerin diğer performans parametreleri Çizelge 4.6.'da verilmiştir.

Çizelge 4.6. Numunelerin performans parametreleri

Cihaz	Fotoyanıt (R_λ) (A/W)	Spesifik tespit (D_s) (Jones)	EQE (%)	Foto- duyarlılık (PS)	LDR (dB)	NEP ($\text{W}/\text{Hz}^{1/2}$)
C1	0.136	1.61×10^{10}	46.20	1.68	4.51	6.22×10^{11}
C2	0.197	6.96×10^9	66.91	1.09	0.73	1.44×10^{10}
C3	0.382	2.32×10^{10}	129.78	2.31	7.27	4.32×10^{11}
C4	1.543	3.69×10^{10}	524.05	1.32	2.39	2.71×10^{11}
C5	2.024	4.43×10^{10}	687.47	1.35	2.59	2.26×10^{11}
C6	3.866	5.30×10^{10}	1313.37	1.26	2.01	1.89×10^{11}

Çizelge 4.6.'da görüldüğü gibi, %1 katkılı $n\text{-}\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3:\text{Sn}/\text{p-Si}$ cihazı (C6), diğer numunelere göre daha üstün performans özellikleri göstermiştir. Fabrikasyon $n\text{-}\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3:\text{Sn}/\text{p-Si}$ fotodedektör, UV-C bölgesinde (254 nm) 3.866 A/W foto duyarlılık, 5.30×10^{10} Jones spektral tespit ve + 10 V'ta 1.89×10^{12} W NEP ile çalıştırılmıştır.

Sn katkılı n- β -Ga₂O₃:Sn/p-Si cihazın katkısız numuneye kıyasla 1.67×10^{-2} A karanlık akım değeri ile 74.35 katına, 2.09×10^{-2} A değeriyle foto akımını 55.71 katına çıkarmıştır. Fabrikasyon n- β -Ga₂O₃:Sn/p-Si fotodedektör, UV-C bölgesinde (254 nm) 3.866 A/W foto duyarlılık ile çalıştırılmıştır. Ayrıca cihazın tepki sürelerinde iyileşmeler gözlenmiştir. Sonuçlardan da anlaşılacağı gibi katkılama, cihazın karanlık akımını arttırmasına rağmen foto yanıtını ve tepki süresini iyileştirmiştir. Bu yüzden, bir sonraki çalışmada Sn katkılı fabrikasyon cihazın performansını araştırma için katkı oranlarının etkisine odaklanılmıştır.

4.2. %1-5 Sn (Kalay) katkılı n- β -Ga₂O₃:Sn/p-Si Tabanlı Fotodedektörler

Sn katkısı ile β -Ga₂O₃'e çoğunluk taşıyıcıları eklenmiş olur ve bunun sonucunda n tipi yarı iletken elde edilir. Taşıyıcı yoğunluğu (n), Sn katılımıyla bir noktaya kadar doğrusal olarak artış gösterir. En yüksek katkı düzeyinden sonra (%10), n yoğunluk değeri artmaz ($Sn = 10^{20} \text{ cm}^{-3}$). Bu katkılama seviyesi bir çözünürlük limiti olarak kabul edilebilir (Chikoidze ve ark., 2016).

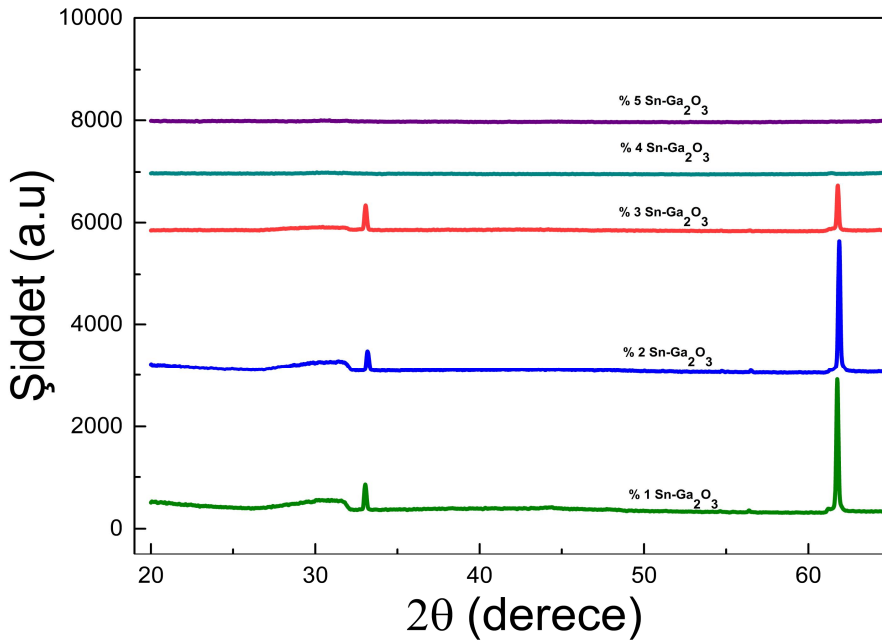
Katkısız β -Ga₂O₃'ün oda sıcaklığında yüksek öz dirençli ($4,6 \times 10^{-6} \Omega \text{ cm}$) malzeme olmasına rağmen katkılama ile öz direnci düşürülebilir. Yapılan β -Ga₂O₃ çalışmalarında %0,5 seviyesinden %5 seviyesine kadar Sn katkısının öz direnci azalttığı, bu seviyeden sonra yapılan katkılamalarda (%40'a kadar) öz direncin arttığı belirlenmiştir (Chikoidze ve ark., 2016; Dela Torre ve Santos, 2020; Suzuki ve ark., 2007).

Literatürde, UV-C ışığını algılayabilen β -Ga₂O₃ tabanlı çok sayıda fotodedektör rapor edilmiş, ancak n- β -Ga₂O₃:Sn/p-Si tabanlı fotodedektör ilk kez bu çalışma ile ortaya konulmuştur. Bu sebeplerden dolayı, bu bölümde %1-5 katkılı n- β -Ga₂O₃:Sn/p-Si tabanlı fotodedektörlerin fabrikasyonu amaçlanmıştır.

4.2.1. Yapısal özellikler

p-Si alt taşlar üzerinde büyütülen %1-5 Sn katkılı β -Ga₂O₃ filmlerin kristal yapısı ve faz analizi, XRD ölçüm tekniği kullanılarak belirlenmiştir. Sn katkılı β -Ga₂O₃ numunelerin elde edilen kırınım modeli, β -Ga₂O₃ tek fazlı standart kartı ile uyumludur (Card No: 01-076-0573). Sn katkılı tüm numunelerin XRD grafiklerinde ikincil katkı fazları gözlenmemiştir.

Şekil 4.6.'daki sonuçlar, Ga₂O₃'ün β fazında kristalleştiğini ortaya koymaktadır. Sn katkılı β -Ga₂O₃ sırasıyla ($\bar{1}11$) ve (701) yönelimine karşılık gelen (33.47°) ve (62.63°)'de kırınım tepe noktalarına sahiptir. Sn- katkı konsantrasyonu arttıkça, β -Ga₂O₃ fazının genel yapısal düzeni değişmemiş fakat piklerin yoğunlukları azalmıştır (Mi ve ark., 2015; Usui ve ark., 2018). Filmlere Sn katkılanmasıyla birlikte kırınım şiddetleri giderek azalmış ve %5 Sn katkı oranına çıkınca tamamen ortadan kalkmıştır (Li ve ark., 2022). Sn katkı maddelerinin, β -Ga₂O₃ fazının pik yoğunluklarını bastırarak, Ga atomlarını ikameli olarak birleştirdiği bildirilmiştir (Li ve ark., 2022; Yoon ve ark., 2021). Artan katkı seviyesi ile kırınım zirvesinin azalması, kafes yapısında artan gerilime bağlanmıştır (Chikoidze ve ark., 2016; Wang ve ark., 2014).



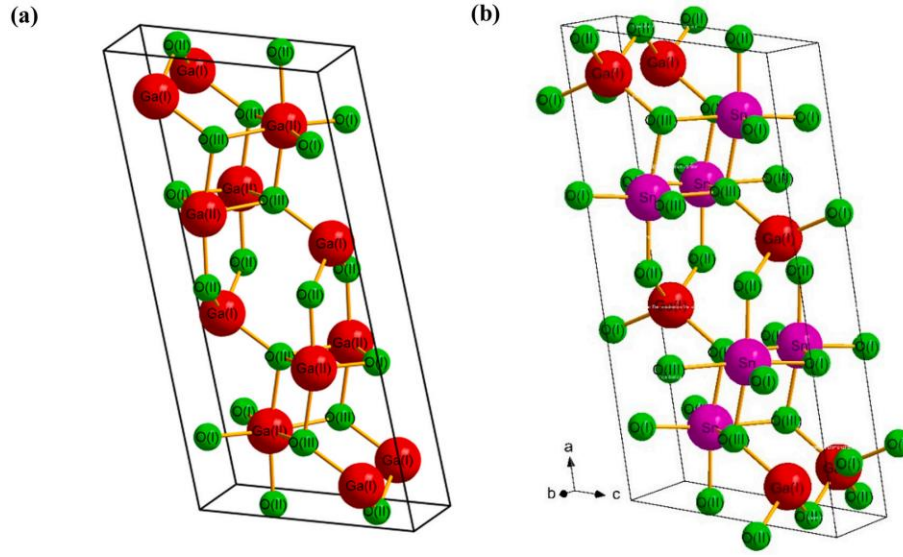
Şekil 4.6. Sn katkılı β -Ga₂O₃'ün XRD modelleri

Artan katkı oranı ile kristal yapısının değiştiği, farklı katkı maddeleri ile yapılan Ga_2O_3 ince filmler çalışmalar ile de ortaya konulmuştur.

Singh ve ark. (2023), çalışmalarında, farklı katkı oranlarında (%0-4.41-8.62-11.39) Zn katkılı ince filmler elde etmişlerdir. Biriktirilen Zn katkılı Ga_2O_3 filmlerin XRD spektrumlarında Ga_2O_3 fazının ($\bar{2}01$), ($\bar{4}02$) ve ($\bar{6}03$) karakteristik tepe noktalarını gözlemlemişlerdir. Zn katkı oranı %8.62'nin üzerine çıkarıldığında Ga_2O_3 'ün kristal yapısının bozulduğu gözlemlemiş, bunu da filmlerdeki yüksek miktarda Zn içeriğinin varlığına atfetmişlerdir (Singh ve ark., 2023).

Feng ve ark. (2023), çalışmalarında, %0, %1.1, %1.7 ve %2.2 Sb katkılı n- β - Ga_2O_3 :Si/p-Si fotodedektörler imal etmişlerdir. Katkısız numunenin kristal boyutunun küçük ve kristaller arasında çok sayıda boşluk olduğunu belirtmişlerdir. SEM analiz sonuçları ile Sb katkılı numunelerin kristal boyutunun katkısız numuneye göre önemli ölçüde daha büyük olduğunu ve ince filmlerin daha yoğun hale geldiğini kanıtlamışlardır. (Feng ve ark., 2023)

β - Ga_2O_3 'ün şematik birim hücresi Şekil 4.7.(a)'da gösterilmektedir. İki tip Ga bölgesi ve üç tip O bölgesi vardır. Ga (I) ve Ga (II), sırasıyla oktahedral ve tetrahedral bölgeleri işgal eder. Üç oktahedra ve bir tetrahedronun köşesinde O (I) ve O (II) 3 kat koordine edilirken, O (III) 4 kat koordine edilmiştir. $[\text{GaO}_6]$ oktahedranın çift zincirleri, $[\text{GaO}_4]$ tetrahedra ile bağlanan b eksenini boyunca uzanmaktadır. Silindirik β - Ga_2O_3 :Sn'de, Şekil 4.7.(b)'de gösterildiği gibi oktahedral bölgelerde Sn iyonu ve Ga iyonu arasındaki düşük iyonik yarıçap farkı dikkate alındığında Sn, saf β - Ga_2O_3 'teki 6 kat koordineli Ga'nın (II) küçük bir kısmının yerini almalıdır (Fu ve ark., 2022).



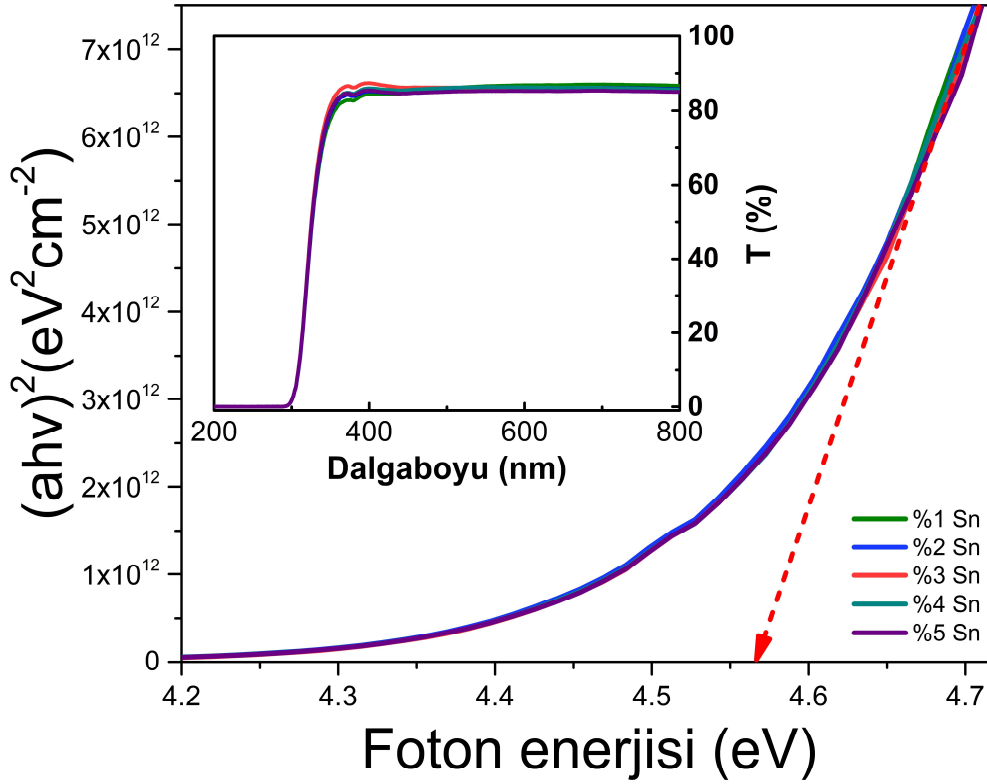
Şekil 4.7.(a) b eksenı boyunca β -Ga₂O₃ kristal yapısının birim hücresinin top ve çubuk gösterimi (b) β -Ga₂O₃:Sn kristal yapısının çokyüzlü gösterimi (Fu ve ark., 2022)

Ayrıca Sn katkılamasının β -Ga₂O₃ kafes parametrelerini çok az arttırdığı, bu artışın Ga yerine Sn'nin geçmesinden kaynaklandığı rapor edilmiştir (Ohira ve ark., 2008).

4.2.2. Optik özellikler

Sn katkılı β -Ga₂O₃ tek kristalinin optik iletim spektrumları Şekil 4.8.'de gösterilmektedir. Sn katkılı β -Ga₂O₃ için iletim spektrumu, 280 nm'nin üzerindeki dalga boyu bölgesinde yaklaşık %85 yüksek geçirgenlik göstermiştir. Tüm numuneler görünür (VIS) ve yakın kızılötesi (NIR) spektral bölgelerde saydamdır (Mi ve ark., 2015; Suzuki ve ark., 2007).

Sn katkılı numuneleri için derin ultraviyole (UVC) bölgede optik geçirgenlik, yüksek katkılama düzeylerinde (%10 katkı seviyesinden sonra) katkılama düzeyine bağlı olarak daha yüksek yük taşıyıcı konsantrasyonu nedeniyle önemli ölçüde azalmaktadır (Chikoidze ve ark., 2016).



Şekil 4.8. %1-5 Sn katkılı β -Ga₂O₃ filmler için Tauc grafikleri. Şeklin eki, filmlerin geçirgenlik spektrumları

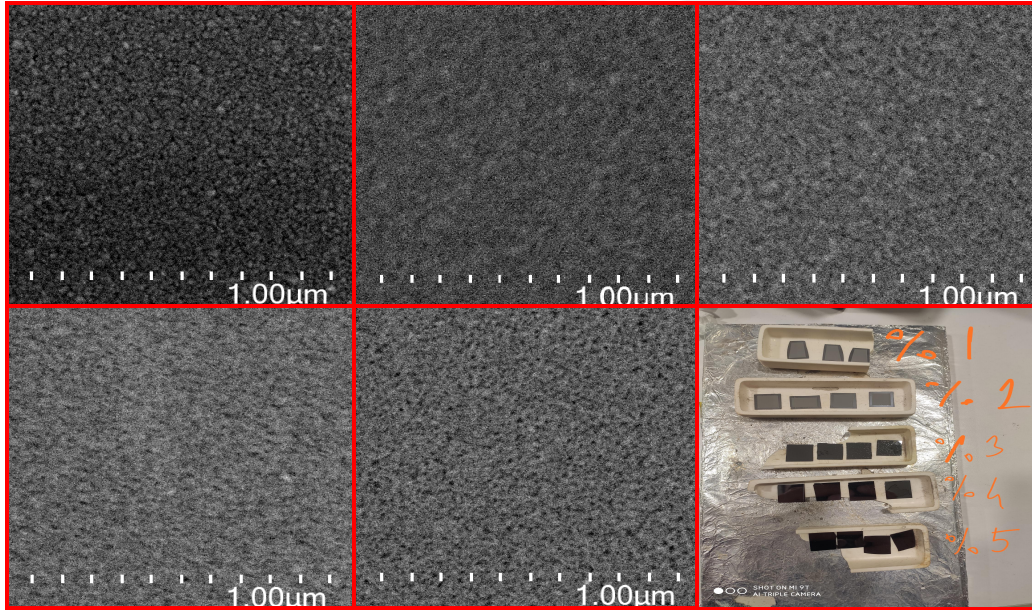
Şekil 4.8.'in eki, absorpsiyon kenarı bölgesinin yakınında (300 nm) β -Ga₂O₃ geçirgenliğini göstermektedir. Tüm numuneler için aynı absorpsiyon bandı, Sn konsantrasyonundan etkilenmediğini ifade etmektedir (Suzuki ve ark., 2007). Geçirgenlik spektrumlarından belirlenen optik bant aralığı enerjilerinin yaklaşık 4.57 eV olduğu hesaplanmıştır.

Katkılama ile β -Ga₂O₃ ince filmlerin bant aralığı enerjileri azalmaktadır. Mi ve ark. (2015), çalışmalarında, farklı Sn katkı (% 0-1-3-5-8-10-12) içeriklerine sahip galyum oksit (β -Ga₂O₃:Sn) filmleri MgAl₂O₄ (100) substratlar üzerine biriktirmişlerdir. %10 Sn katkılı β -Ga₂O₃ filminin bant aralığı enerji değerini yaklaşık olarak 4.14 eV bulmuşlardır (Mi ve ark., 2015).

4.2.3. SEM analizleri

SEM analizi, Sn katkılı β -Ga₂O₃'ün saf Ga₂O₃ ile benzer morfolojilere sahip olduğunu göstermiştir (Şekil 4.9.). %1-5 aralığında Sn katkısı, β -Ga₂O₃'ün SEM görüntülerini değiştirmemiştir. Belirli bir katkı düzeyine kadar β -Ga₂O₃'ün morfolojisinin değişmediği benzer çalışmalarda da rapor edilmiştir (Mazeina ve ark., 2009).

Li ve ark. (2022), çalışmalarında, katkısız ve farklı Sn katkı oranlarına (%2-5-12-18-25) sahip β -Ga₂O₃ tabanlı fotodedektörler hazırlamışlardır. İnce filmlerin SEM analizinde sadece %18 katkı oranında iğne benzeri tanecikleri gözlemlemişlerdir (Li ve ark., 2022).



Şekil 4.9. SEM görüntüleri: a) %1 β -Ga₂O₃:Sn b) %2 β -Ga₂O₃:Sn c) %3 β -Ga₂O₃:Sn d) %4 β -Ga₂O₃:Sn e) %4 β -Ga₂O₃:Sn f) Sn katkılı numunelerin görselleri

Artan katkı oranı ile yüzey morfolojisini değiştirdiği farklı katkı maddeleri yapılan Ga₂O₃ ince filmler çalışmalar ile de ortaya konulmuştur.

Singh ve ark. (2023), çalışmalarında, farklı katkı oranlarında (%0-4.41-8.62-11.39) Zn katkılı ince filmler elde etmişlerdir. Biriktirilen filmlerin SEM analizine göre katkısız Ga₂O₃'ün pürüzsüz ve homojen bir yüzeye sahip olduğunu, ancak Zn

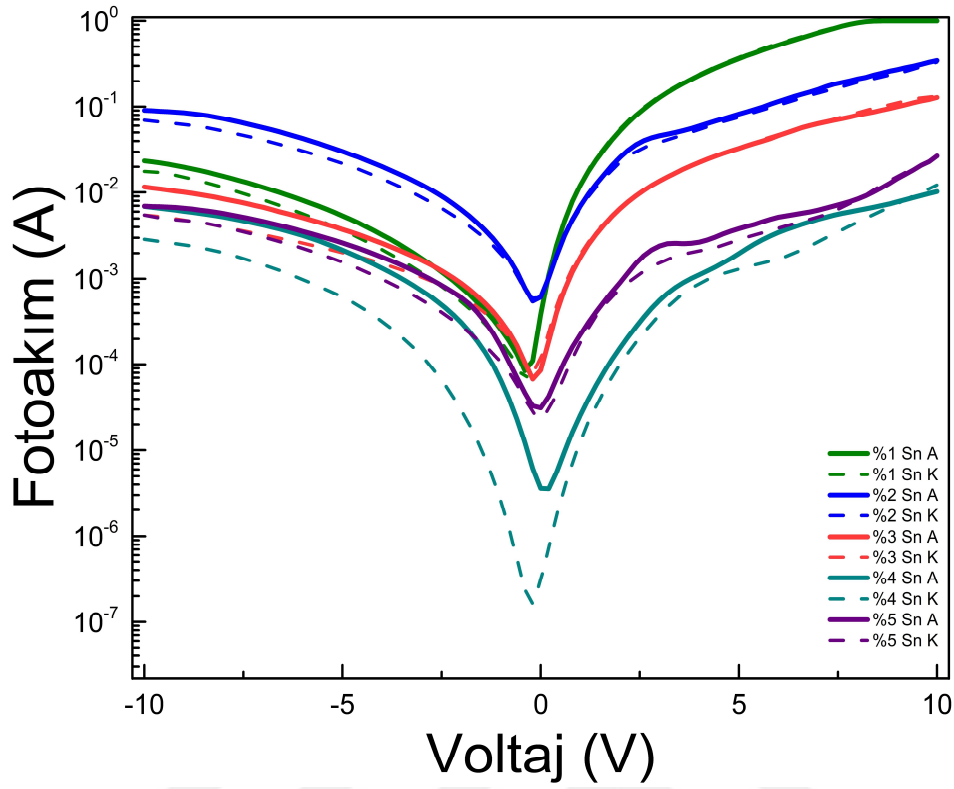
katkı oranının %8.62'ye çıkarıldığında filmlerin homojen olmayan bir yüzey sergilediğini bildirmişlerdir. Zn katkı oranının %8.62'nin üzerine çıkarılmasının taneciklerin yer değiştirmelerine ve sütun tipi yapıyı ortaya çıkarmalarına sebep olduğunu bildirmişlerdir (Singh ve ark., 2023).

4.2.4. Elektriksel özellikler

n- β -Ga₂O₃:Sn/p-Si p-n hetero eklem UV fotodedektörlerin performansını elde etmek için, aydınlık ve karanlık koşullar altında akım-voltaj (I-V) karakteristikleri elde edilmiştir. Cihazların akım-voltaj (I-V) özellikleri, ışık kaynağı ve Keithley 2400 kaynak ölçerden oluşan bir ölçüm düzeneği kullanılarak 254 nm UV aydınlatması (1.12 mW/cm² yoğunluk) altında ölçülmüştür.

UV ışığı aydınlatması altında, fotodedektörün pozitif kutbuna (p-Si tarafına) negatif öngerilim uygulandığında akımda artış gözlenir. Uygulanan negatif ön gerilim, bağlantı noktasında tükenme tabakası ve hetero eklemde bir elektriksel alan oluşmasını sağlar. P-n bağlantısındaki fotojenlenmiş elektron-hol çiftleri, elektriksel nedeniyle ayrılır ve Ag elektrotlarda toplanırlar. Sonuç olarak, fotoakımda bir artış gözlenir. Fotodedektörün bu yanıtı, yalnızca p-n kavşağı kaynaklanır. Fotodedektörler bu yanıtını yalnızca ters beslemede verme eğilimindedir.

Karanlık ve aydınlık koşullar altında %1-5 katkılı n- β -Ga₂O₃:Sn/p-Si p-n hetero eklem UV fotodedektörlerin akımına (I) karşı voltaj (V) değerine ilişkin yarı logaritmik grafiği Şekil 4.10.'da gösterilmektedir. Grafik fotodedektör davranışını doğrulamaktadır. Tüm numuneler için, uygulanan pozitif besleme koşulunda fotoakımda herhangi bir artış olmadığı görülmektedir. Negatif ön gerilim koşulunda ise tüm numunelerin foto akımlarının karanlık akımlarından daha yüksek olduğu görülebilmektedir. Düşük karanlık akım ve yüksek foto-yanıt kaliteli p-n bağlantısına ve n- β -Ga₂O₃ ile p-Si alt taş arasında oluşturulan yerleşik potansiyele bağlanabilir.



Şekil 4.10. %1-5 Sn katkılı β -Ga₂O₃:Sn/p-Si p-n hetero eklem UV fotodedektörlerin I-V eğrileri

Fotodedektörlerin performans parametreleri Çizelge 4.7.'de verilmiştir.

Çizelge 4.7. % 1-5 Sn katkılı β -Ga₂O₃:Sn/p-Si fotodedektörlerin performans parametreleri

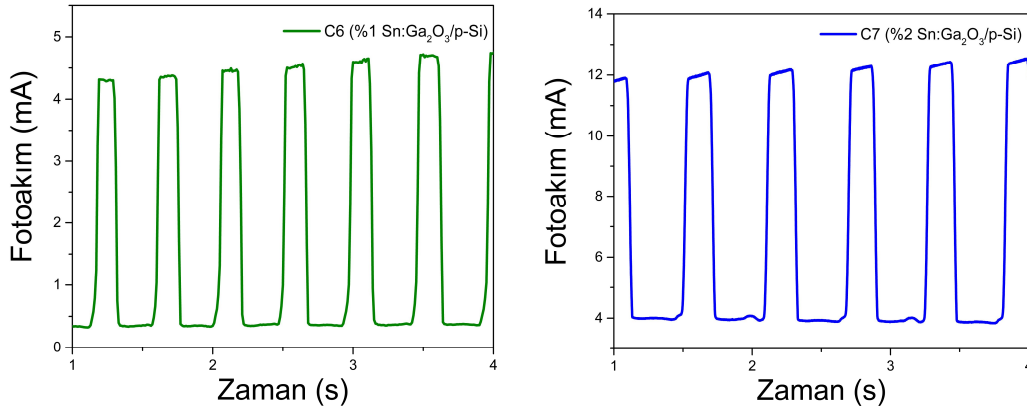
Cihaz	Fotoyanıt (R_λ) (A/W)	Spesifik tespit (D_s) (Jones)	EQE (%)	Foto-duyarlılık (PS)	LDR (dB)	NEP ($W/Hz^{1/2}$)
C6	3.866	5.30×10^{10}	1313.37	1.26	2.01	1.89×10^{11}
C7	9.402	7.75×10^{10}	3194.03	1.23	1.79	1.29×10^{11}
C8	3.749	9.48×10^{10}	1273.72	1.86	5.39	1.05×10^{11}
C9	2.005	7.27×10^{10}	681.17	1.94	5.77	1.38×10^{11}
C10	1.179	3.07×10^{10}	400.47	1.29	2.18	3.26×10^{11}

Çizelge 4.7.'de görüldüğü gibi, %2 Sn katkılı n- β -Ga₂O₃:Sn/p-Si cihazı diğer numunelere göre daha üstün performans özellikleri göstermiştir. Fabrikasyon n- β -Ga₂O₃:Sn/p-Si tabanlı fotodedektör, UV-C bölgesinde (254 nm) 9.402 A/W foto duyarlılık, 7.75×10^{10} Jones spektral tespit ve + 10 V'ta 1.29×10^{11} W NEP ile çalıştırılmıştır.

Çizelgedeki sonuçlardan cihazların düzeltme davranışı ve aydınlatmaya tepki gösterdiği açıkça görülebilmektedir. %2 Sn katkılı n-β-Ga₂O₃:Sn/p-Si tabanlı cihaz için karanlıkta asimetri oranı ($I_{(10V'da)} / I_{(-10V'da)}$) 7.2 olarak bulunmuştur ve karanlık akım -10 V'da (I_D) 46.04 mA'dır. Işığa maruz kalma altında, -10V ters beslemede fotoakım (I_A), %1 Sn katkılı n-β-Ga₂O₃:Sn/p-Si tabanlı cihaz için 1.23 kat artırılmıştır. Düşük karanlık akım ve büyük aydınlık akım, kaliteli bağlantıya ve n-β-Ga₂O₃ ile p-Si alt taşı arasında oluşan büyük yerleşik potansiyele bağlanabilir. Bu sonuçlar, cihazların GKFD olduğunu kanıtlamaktadır.

Yoon ve ark. (2021), yapmış oldukları bir çalışmada içsel β-Ga₂O₃ ince film ile Sn katkılı β-Ga₂O₃ ince film arasındaki I-V özelliklerini karşılaştırmışlardır. İçsel β-Ga₂O₃ ince film için çok düşük bir akım yoğunluğu ölçülürken, Sn katkılı β-Ga₂O₃ ince filmin omik benzeri davranışla önemli akım artışı gözlemlediklerini rapor etmişlerdir. Sonuçların, β-Ga₂O₃ ince tabakasındaki Sn katkı maddelerinin Ga atomlarını ikame ettiğini ve elektriksel olarak aktive ettiğini bildirmişlerdir (Yoon ve ark., 2021).

n-β-Ga₂O₃:Sn/p-Si fotodedektörün zamana bağlı foto tepkisi Şekil 4.11.'de gösterilmektedir. Fotodedektörlerin 254-nm aydınlatmaya tepkisi, -10 V'luk bir ters beslemede açma/kapama anahtarı kullanılarak ölçülmüştür. 254-nm ışığa maruz kalma altında oluşan elektron-hol çifteleri yarı iletken ve kontaklar aracılığıyla iletilmiştir. 254 nm altında akımda meydana gelen tekrarlanabilir değişim, n-β-Ga₂O₃:Sn/p-Si cihazların güneş körü bir fotodedektör için uygun olacağını göstermiştir.



Şekil 4.11. %1-2 Sn katkılı n-β-Ga₂O₃:Sn/p-Si cihazlarının zamana bağlı ışık tepkisi çizimlerini

Üretilen tüm numuneler, açık/kapalı aydınlatmaya tepki vermişlerdir. Aydınlatmaya verilen tepki süreleri Çizelge 4.8.'de verilmiştir.

Çizelge 4.8. Aydınlatmaya verilen tepki süreleri

Sn	C6	C7	C8	C9	C10
<i>Yükselme süresi (t_r) ms</i>	25.03	33.88	48.35	34.76	31.37
<i>Düşme süresi (t_d) ms</i>	22.62	29.47	34.44	34.28	34.04

Katkılamanın % 2-3 oranında cihazların açık/kapalı aydınlatmaya tepki süreleri yavaşlamış, % 4-5 oranına artırılmasıyla iyileşme eğilimi göstermiştir fakat C6 cihazının tepki süresine tekrardan ulaşamamıştır. Sonuçlar, taşıyıcı elektronun ikameli katkılı Sn'den kabul edildiğini ve Sn katkı atomlarının tepki süresini arttırmasına rağmen, tekrarlanabilir foto tepkilerini göstermeye devam ettiğini fakat tepki sürelerinde yavaşlamaya sebep olduğunu göstermektedir.

%2 Sn katkılı n-β-Ga₂O₃:Sn/p-Si fotodedektörün %1 Sn katkılı n-β-Ga₂O₃:Sn/p-Si fotodedektöre kıyasla karanlık akımı 4.6×10^{-2} A değerini ile 2.76 katına, foto akımı 5.657×10^{-2} A değeriyle 2.69 katına çıkmıştır. Fabrikasyon n-β-Ga₂O₃:Sn/p-Si fotodedektör, UV-C bölgesinde (254 nm) 9.402 A/W değeriyle foto yanıtını 2.43 katına çıkarmıştır.

Sonuçlardan da anlaşılacağı gibi katkılama fotodedektörün karanlık akımını arttırmasına rağmen foto yanıtını ve tepki süresini iyileştirmiştir. Bu yüzden, bir sonraki çalışmada %2 Sn katkılı $n\text{-}\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3\text{:Sn/p-Si}$ fabrikasyon fotodedektörün performansının arttırılması için nanoparçacıkların etkisine odaklanılmıştır.

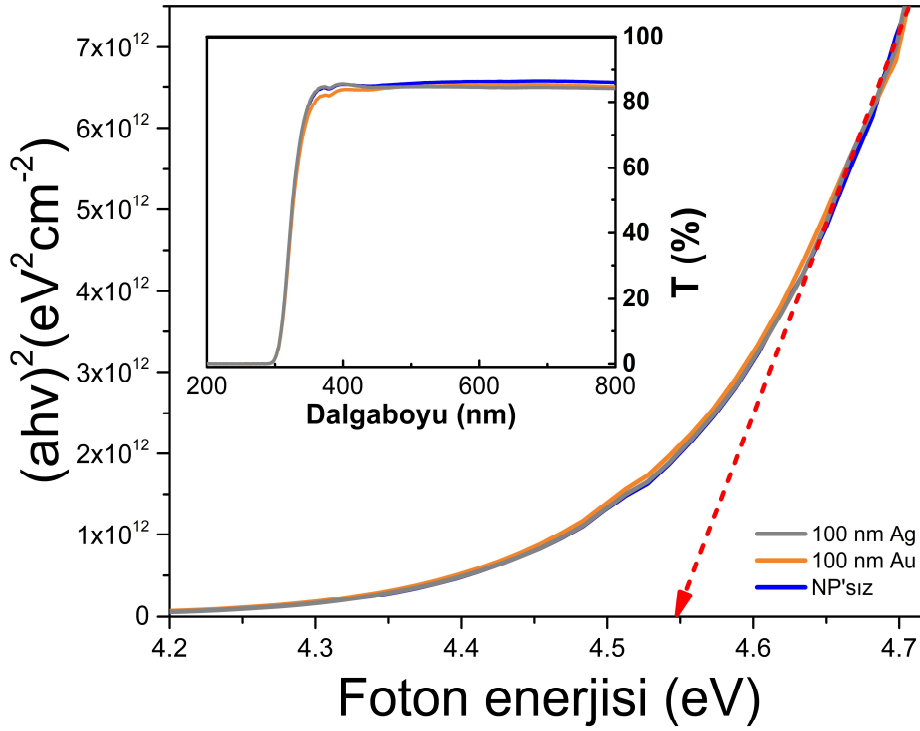
4.3. Nanoparçacıklar ile Dekore Edilmiş %2 Sn Katkılı $n\text{-}\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3\text{:Sn/p-Si}$ Fotodedektörler

Plazmonik nano materyaller elektromanyetik dalgaları metal-dielektrik arayüzünde sınırlayabilmekte ve yüksek yoğunluklu yakın alanlar üreterek, nano materyalsiz muadillerine kıyasla absorpsiyon olaylarının sayısında bir artışa neden olmaktadır. Metal yüzeyin yakınında meydana gelen elektromanyetik alandaki büyük artış yüzey plazmonlarına neden olmaktadır. Bu durum, p-n hetero jonksiyon diyotunda fotoakımında önemli bir artış sağlamaktadır.

Fotodedektörlerin performansını daha da arttırmak amacıyla, bir önceki bölümde en iyi performansı gösteren %2 Sn katkılı $n\text{-}\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3\text{:Sn/p-Si}$ fotodedektöre 100 nm'lik gümüş (Ag) ve altın (Au) küresel nanoparçacıklar dekore edilmiştir. Fotodedektörlerin optik ve elektriksel ölçümleri yapılmıştır.

4.3.1. Optik özellikler

Optik özelliklerin araştırılması için nanoparçacıksız %2 Sn katkılı $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ film ve Ag (100 nm)-Au (100 nm) nanoparçacıklar ile dekore edilmiş %2 Sn katkılı $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ filmler kuvars alt taşlar üzerine kaplanmıştır. Kaplamaların geçirgenlik spektrumları Şekil 4.12.'de gösterilmektedir. Görünür aralıkta kuvars alt taş üzerinde biriken $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3\text{:Sn}$ filmler ortalama %85'in üzerinde geçirgenlik göstermiştir. Ag-Au nanoparçacıklar ile dekore edilmiş kuvars alt tabaka üzerinde biriktirilen $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3\text{:Sn}$ filmlerin görünür aralıktaki geçirgenliği nanoparçacıksız numuneden daha düşük kalmıştır.



Şekil 4.12. Ag-Au nanoparçacıklar ile dekore edilmiş %2 Sn katkılı β -Ga₂O₃ ince filmlerin Tauc grafikleri. Şeklin eki, filmlerin geçirgenlik spektrumları

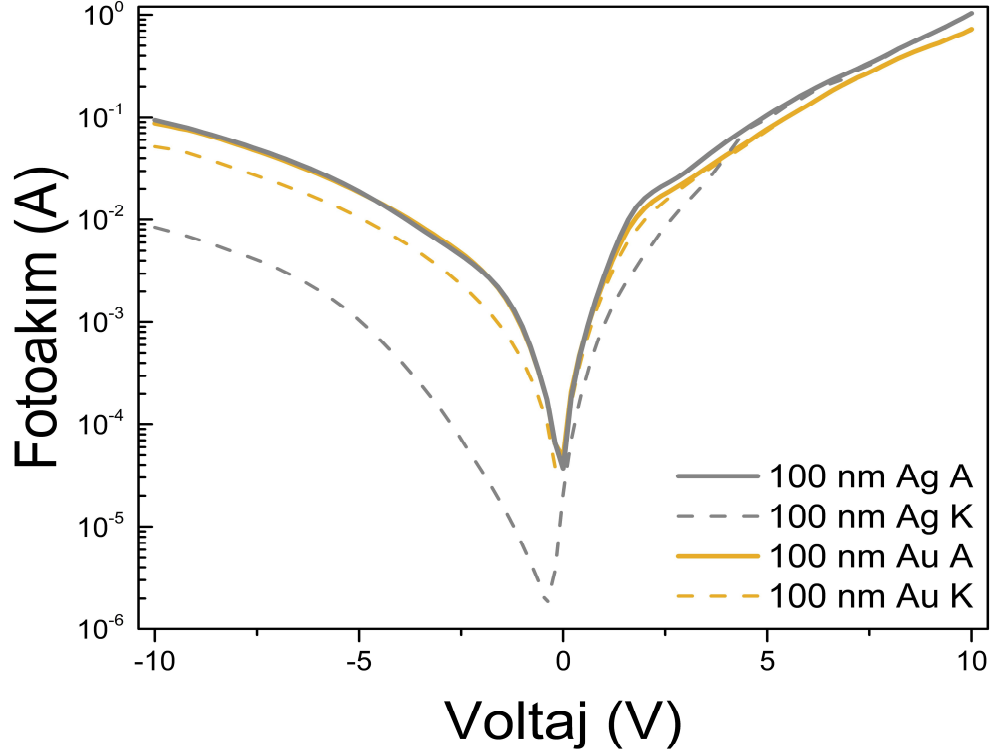
Numunelerin spektrumları, ~300 nm'de içsel absorpsiyon kenarları göstermektedir. p-Si alt taşı ile β -Ga₂O₃:Sn filmi arasında Au NP'lerin dekore edilmesiyle, β -Ga₂O₃:Sn filmlerin absorpsiyon kenarı net bir kırmızı kayma göstermiştir (Zhang ve ark., 2018).

UV-Tranmittance verileri ve Tauc's Plot modeliyle $[(ah\nu)^2]$ 'nin E_g 'ye karşı çizimlerinde $[(ah\nu)^2] = 0$ eksenine düz bir çizgi ekstrapolasyonu yaparak, nanoparçacıklar ile dekore edilmiş Sn katkılı β -Ga₂O₃ ince filmlerin bant aralığı 4.55 eV olarak hesaplanmıştır. Au nanoparçacıkların varlığının bir sonucu olarak bant aralığındaki azalma, temel olarak Au nanoparçacıklarından β -Ga₂O₃:Sn filmine enjekte edilen yüklerle ilgili olabilir ve bu yükler, geçiş için ışıınımsız yol sağlayan bant aralığı içinde lokalizedir (Zhang ve ark., 2018).

4.3.2. Elektriksel özellikler

Nanoparçacıklar ile dekore edilmiş %2 Sn katkılı n- β -Ga₂O₃:Sn/p-Si fotodetektörlerin performansını elde etmek için, aydınlık ve karanlık koşullar altında

akım-voltaj (I-V) karakteristikleri elde edilmiştir (Şekil 4.13.). Fotodedektörün akım-voltaj (I-V) karakteristikleri, ışık kaynağı ve Keithley 2400 kaynak ölçerden oluşan bir ölçüm düzeneği kullanılarak 254 nm UV aydınlatması ($1,12 \text{ mW/cm}^2$ yoğunluk) altında ölçülmüştür.



Şekil 4.13. 100 nm Ag-Au nanoparçacıklar ile dekore edilmiş %2 Sn katkılı n-β-Ga₂O₃:Sn/p-Si fotodedektörlerin yarı logaritmik ölçekli IV eğrileri

Cihazların düzeltme davranışı ve aydınlatmaya bir tepki gösterdiği açıkça görülmüştür. Cihazlar doğru kutuplama koşulunda fotoakımda herhangi bir artış olmadığı görülmektedir. Negatif ön gerilim koşulunda ise tüm numunelerin foto akımlarının karanlık akımlarından daha yüksek olduğu görülebilmektedir.

Ag nanoparçacık ile dekore edilmiş %2 Sn katkılı n-β-Ga₂O₃:Sn/p-Si fotodedektör için karanlıkta asimetri oranı ($I_{(10V_{da})} / I_{(-10V_{da})}$) 400.19 olarak bulunmuştur. Karanlık akım -10 V ters beslemede (I_D) 2.62 mA değeriyle nanoparçacıksız numuneye göre 17.55 de bir oranına azalmıştır. Işığa maruz kalma altında, -10V ters beslemede fotoakım (I_A) 38.98 mA değeriyle nanoparçacıksız numuneye göre 1.45 katına çıkmıştır. Cihaz göstermiş olduğu düşük karanlık akım ve yüksek foto akım değeriyle üstün performans özellikleri göstermiştir.

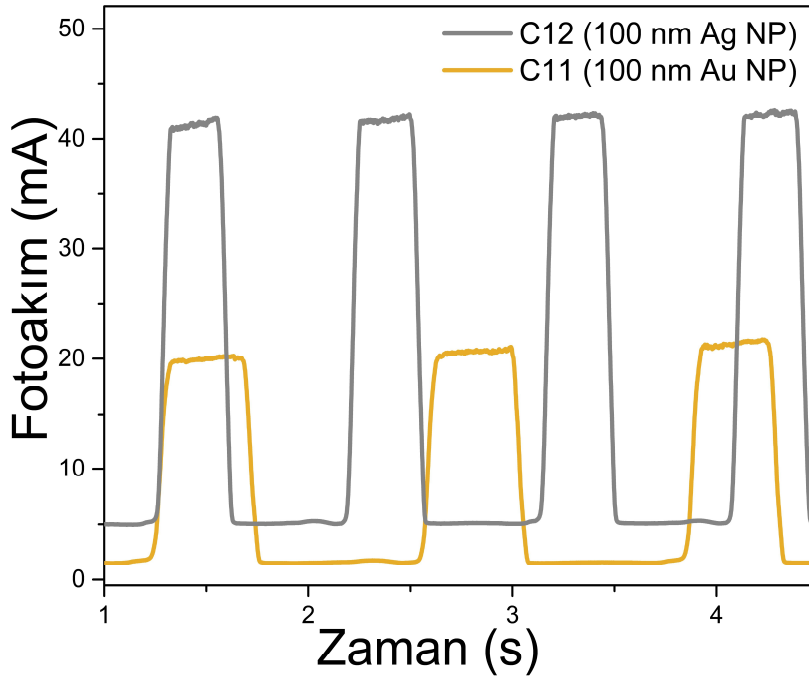
Fotodedektörlerin performans parametreleri Çizelge 4.9.'da verilmiştir.

Çizelge 4.9. Ag-Au nanoparçacıklar ile dekore edilmiş % 2 Sn katkılı n-β-Ga₂O₃:Sn/p-Si fotodedektörlerin performans parametreleri

Cihaz	Fotoyanıt (R_λ) (A/W)	Spesifik tespit (D_s) (Jones)	EQE (%)	Foto-duyarlılık (PS)	LDR (dB)	NEP ($W/Hz^{1/2}$)
C11	32.46	$1.12 \times 10^{+12}$	11028.81	14.86	23.44	8.92×10^{-13}
C12	17.63	$1.41 \times 10^{+11}$	5989.52	1.41	2.96	7.08×10^{-12}

Çizelge 4.9.'da görüldüğü gibi, 100 nm Ag nanoparçacık ile dekore edilmiş %2 Sn katkılı n-β-Ga₂O₃:Sn/p-Si fotodedektörün (C11) diğer numuneye göre daha üstün performans özellikler göstermiştir. Fotodedektör, UV-C bölgesinde (254 nm) 32.46 A/W foto duyarlılık, 1.12×10^{12} Jones spektral tespit ve + 10 V'ta 8.92×10^{13} W NEP ile çalıştırılmıştır. Fotodedektörün foto-yanıtının, nanoparçacıksız numuneye göre 3.45 katına çıktığı gözlemlenmiştir.

Ag-Au nanoparçacıklar ile dekore edilmiş %2 Sn katkılı n-β-Ga₂O₃:Sn/p-Si fotodedektörlerin zamana bağlı foto tepkisi Şekil 4.14.'te gösterilmektedir.



Şekil 4.14. Nanoparçacıklar ile dekore edilmiş %2 Sn katkılı n-β-Ga₂O₃:Sn/p-Si fotodedektörlerin zamana bağlı foto tepkisi

Fotodedektörlerin 254-nm aydınlatma tepkisi, -10 V ters beslemede açma/kapama anahtarı kullanılarak ölçülmüştür. 254-nm ışığa maruz kalma altında oluşan elektron-hol çiftleri kontaklar aracılığıyla iletilmiştir. 254 nm altında akımda meydana gelen tekrarlanabilir değişim, %2 Sn katkılı n-β-Ga₂O₃:Sn/p-Si'nin güneş körü bir fotodedektör için uygun olacağını göstermiştir.

Üretilen tüm numuneler, açık/kapalı aydınlatmaya tepki vermiştir. Aydınlatmaya verilen tepki süreleri Çizelge 4.10.'da verilmiştir.

Çizelge 4.10. Aydınlatmaya verilen tepki süreleri

	C7	C11	C12
<i>Yükselme süresi (t_r) ms</i>	33.88	46.12	54.35
<i>Düşme süresi (t_r) ms</i>	29.47	45.54	54.86

Nanoparçacıkların eklenmesi ile cihazların aydınlatmaya verilen tepki sürelerinde artışlar olmuştur. Nanoparçacıklar ışığın saçılmasını sağlayıp yarı iletken içerisindeki optik yolunu uzatırlar. Uzayan optik yolu ışığın daha fazla hasat edilmesi sağlamasının yanında p-n hetero ekleme ulaşma zamanını arttırır. Tepki sürelerinin uzaması ışığın uzayan optik yoluna atfedilebilir. Ag NP'ler ile kaplamadan sonra yanıt sürelerinde artış gözlemlendiği daha önceki çalışmalarda da bildirilmiştir (Wang ve ark., 2017).

5. SONUÇLAR ve ÖNERİLER

5.1. Sonuçlar

p-Si alt taşlar üzerinde büyütülen katkılı β -Ga₂O₃:X, (X: W, Ti, Sb, Zn, Sn) filmlerinin XRD grafikleri, Ga₂O₃'ün β fazında kristalleştiğini ortaya koymuştur. Tüm numunelerin katkı fazı gözlenmemesi katkı maddelerinin kafes yapısında Ga⁺³ yerini aldığını göstermiştir. Numunelerin UV analizleri, kuvars alt taşlar üzerinde biriktirilen β -Ga₂O₃ filmlerin 300 nm civarında zayıf bir absorpsiyon anlamına gelen geçirgenlikte hafif bir azalma olduğu, bu nedenle katkılı Ga₂O₃'ün 280 nm'nin altındaki derin ultraviyole bölgesinde azaltılmış geçirgenliği filmlerin bir GKFD'ler için yayıcı tabakası olarak kullanılabileceği göstermiştir. Tek tip ve homojen Ga₂O₃ katmanlarının, SEM kesit görüntüsü filmlerin 450 nm'lik kalınlığa sahip olduğunu göstermiştir. n- β -Ga₂O₃/p-Si tabanlı UV-C fotodedektörlerin aydınlık ve karanlık koşullar altında akım-voltaj (I-V) eğrileri Ga₂O₃ cihazların düşük bir karanlık akım ve büyük aydınlık akım cihazların GKFD olduğunu kanıtlamıştır. Düşük karanlık ve büyük aydınlık akım, n- β -Ga₂O₃ ve p-Si alt taş arasında oluşan p-n bağlantısına atfedilmiştir. Fabrikasyon cihazların zamana bağlı foto tepki grafikleri, 254 nm'lik UV-C aydınlatması altında sabit ve tekrarlanabilir foto tepkileri kanıtlamıştır. Katkılı n- β -Ga₂O₃/p-Si GKFD için hem t_r hem de t_d hızlı tepki süresi, katkı atomlarının dahil edilmesiyle kusur durumlarının miktarının bastırılmasından dolayı fotojenere edilmiş taşıyıcının hızlı taşıyıcı ayrılmasına ve göçüne veya fotojenleştirilmiş taşıyıcıları verimli bir şekilde ayırabilen güçlü p-n bağlantısına atfedilmiştir.

%1-5 Sn katkılı Ga₂O₃:Sn filmlerinin XRD analizi, Sn katkı konsantrasyonu arttıkça, β -Ga₂O₃ fazının genel yapısal düzenin değişmediğini fakat piklerin yoğunluklarının azaldığını göstermiştir. Kırınımlarda azalma, Sn katkı maddelerinin Ga atomlarını ikameli olarak birleştirdiği göstermiştir. Sn katkılı β -Ga₂O₃ filmlerin optik iletim spektrumları 280 nm'nin üzerindeki dalga boyu bölgesinde yaklaşık % 85 yüksek geçirgenliğe sahip olduğunu Sn konsantrasyonunun absorpsiyon bandını etkilemediğini göstermiştir. SEM analizi sonuçları, Sn katkılı β -Ga₂O₃'ün saf β -Ga₂O₃'lerinkine benzer morfolojilere sahip olduğunu göstermiştir. n- β -Ga₂O₃:Sn/p-Si

p-n hetero eklem UV fotodedektörlerin, aydınlık ve karanlık koşullar altında akım-voltaj (I-V) karakteristikleri, düşük karanlık akım ve büyük aydınlık akım cihazların GKFD olduğunu kanıtlamıştır. Sonuçların, β -Ga₂O₃ ince tabakasındaki Sn katkı maddelerinin Ga atomlarını ikame ettiğini ve elektriksel olarak aktive ettiğini göstermiştir. n- β -Ga₂O₃:Sn/p-Si fotodedektörün zamana bağlı foto tepkisi Sn katkı atomlarının foto yanıtı arttırmasına rağmen, tekrarlanabilir foto tepkilerini göstermeye devam ettiğini fakat tepki sürelerinde yavaşlamaya sebep olduğunu göstermiştir.

Ag (100 nm)-Au (100 nm) nanoparçacıklar ile dekore edilmiş %2 Sn katkılı β -Ga₂O₃ filmlerin geçirgenlik spektrumları Ag-Au nanoparçacıklar ile dekore edilmiş β -Ga₂O₃:Sn filmlerin görünür aralıktaki geçirgenliğinin nanoparçacık eklenmemiş numunelerden daha düşük olduğunu göstermiştir. Ancak Ag nanoparçacıklar ile dekore edilmiş %2 katkılı n- β -Ga₂O₃:Sn/p-Si fotodedektörlerin karanlık akımının nanoparçacıksız numuneye göre 17.57 de bir oranına azaldığını, fotoakımın 1.45 katına çıktığını göstermiştir. Ag-Au nanoparçacıklar ile dekore edilmiş %2 Sn katkılı n- β -Ga₂O₃:Sn/p-Si fotodedektörlerin fotodedektörün zamana bağlı foto tepkisi nanoparçacıkların eklenmesi ile cihazların aydınlatmaya verilen tepki sürelerinde artışlar olduğunu bunun sebebinin de saçılmalardan dolayı ışığın optik yolunun uzamasından kaynaklandığını göstermiştir.

5.2. Öneriler

Bu çalışmada, p-Si alt taşlar üzerine %1 katkılı β -Ga₂O₃:X, (X: W, Ti, Sb, Zn, Sn) ince filmler biriktirilerek n- β -Ga₂O₃/p-Si tabanlı UV-C fotodedektörler araştırılmıştır. %1 Sn katkılı n- β -Ga₂O₃:Sn/p-Si fotodedektör diğer %1 katkılı fotodedektörlere göre üstün özellikler göstermiştir. Sonraki bölümde, Sn katkılı fotodedektör (n- β -Ga₂O₃:Sn/p-Si) için % 1-5 aralığında katkı oranının etkisi araştırılmıştır. %2 Sn katkılı n- β -Ga₂O₃:Sn/p-Si fabrikasyon fotodedektörün üstün özellikler gösterdiği tespit edilmiş ve fotodedektörün performansını arttırmak için nanoparçacıkların etkisine odaklanılmıştır. Son bölümde ise, %2 Sn katkılı n- β -Ga₂O₃:Sn/p-Si fotodedektörün ince film yüzeyleri 100 nm'lik gümüş (Ag) ve altın

(Au) küresel nanoparçacıklar ile dekore edilmiş, gümüş (Ag) nanoparçacıklar fotodedektörün performansını daha da arttırdığı görülmüştür.

Bundan sonra yapılacak çalışmalar için aşağıda sıralanmış öneriler dikkate alınabilir;

- Farklı katkı maddeleri ile $n\text{-}\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3/\text{p-Si}$ tabanlı fotodedektörler araştırılabilir.
- Sn dışındaki katkı maddeleri için %1-5 aralığında katkı oranına sahip $n\text{-}\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3\text{:X/p-Si}$ (X: W, Ti, Sb, Zn) tabanlı UV-C fotodedektörlerin araştırılması yapılabilir.
- Farklı boyut ve şekillere sahip nanoparçacıklar ile $n\text{-}\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3/\text{p-Si}$ tabanlı fotodedektörler araştırılabilir.
- Nanoparçacıklar $n\text{-}\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ ince film ile p-Si alt taşın ara yüzeyine uygulanabilir.

KAYNAKLAR

- ALFARAJ, N., 2019. Deep-ultraviolet optoelectronic devices enabled by the hybrid integration of next-generation semiconductors and emerging device platforms. KAUST Research Repository. <https://doi.org/10.25781/KAUST-0144P>.
- BİRELLİ, A., 2022. Fotovoltaik hücrelerde kullanılmak üzere yarı iletken ince filmlerin biriktirilmesi. Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Bilecik, 60s.
- BOKOV, D., TURKİ JALİL, A., CHUPRADİT, S., SUKSATAN, W., JAVED ANSARİ, M., SHEWAEL, I. H., VALİEV, G. H., and KİANFAR, E., 2021. Nanomaterial by sol-gel method: synthesis and application. In *Advances in Materials Science and Engineering*, Volume 2021, Article ID 5102014, 21 pages. <https://doi.org/10.1155/2021/5102014>.
- BOSCHİ, F., 2014. Growth and investigation of different gallium oxide polymorphs. Università Degli Studi Dı Parma, Doktora Tezi, İtalya, 162s.
- BRİTANNİCA, THE EDİTORS OF ENCYCLOPAEDİA. "Bragg law". Encyclopedia Britannica, 2023. <https://www.britannica.com/science/Bragg-law>. Erişim Tarihi: 9 June 2023.
- BRİNKER, J. and SCHERE, G. W., 1990. Sol-gel science the physics and chemistry of sol-gel processing. Academic Press, Pages 234-301, ISBN 9780080571034. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-057103-4.50009-X>.
- CHAUHAN, K. R. and PATEL, D. B., 2019. Functional nanocrystalline TiO₂ thin films for UV enhanced highly responsive silicon photodetectors. *Journal of Alloys and Compounds*, 792:968-975. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2019.04.111>
- CHEN, H., LİU, K., HU, L., AL-GHAMDİ, A. A. and FANG, X., 2015. New concept ultraviolet photodetectors. In *Materials Today*, (Vol. 18, Issue 9). <https://doi.org/10.1016/j.mattod.2015.06.001>
- CHEN, X., REN, F., GU, S., and YE, J., 2019. Review of gallium-oxide-based solar-blind ultraviolet photodetectors. *Photonics Research*, 7(4):381-415. <https://doi.org/10.1364/prj.7.000381>.
- CHİKOİDZE, E., FELLOUS, A., PEREZ-TOMAS, A., SAUTHİER, G., TCHELİDZE, T., TON-THAT, C., HUYNH, T. T., PHİLLİPS, M., RUSSELL, S., JENNİNGS, M., BERİNİ, B., JOMARD, F. and DUMONT, Y., 2017. P-type β -gallium oxide: A new perspective for power and optoelectronic devices. *Materials Today Physics*, 3:118-126. <https://doi.org/10.1016/j.mtphys.2017.10.002>
- CHİKOİDZE, E., VON BARDELEBEN, H. J., AKAIWA, K., SHİGEMATSU, E., KANEKO, K., FUJİTA, S., and DUMONT, Y., 2016. Electrical, optical, and magnetic properties of Sn doped α -Ga₂O₃ thin films. *Journal of Applied Physics*, 120(2). <https://doi.org/10.1063/1.4958860>.
- CULLİTY, B. D., 1978. Elements of x-ray diffraction. Addison-Wesley Publishing Company, Amerika, 13s.
- DAKHEL, A.A., 2012a. Structural, optical, and opto-dielectric properties of W-doped Ga₂O₃ thin films. *J Mater Sci*, 47:3034-3039. <https://doi.org/10.1007/s10853-011-6134-z>.

- DAKHEL, A. A., 2012b. W doping effect on the dielectric properties of amorphous Ga₂O₃ films grown on Si substrate for low-k applications. *Microelectronics Reliability*, 52(6):1050-1054. <https://doi.org/10.1016/j.microrel.2011.12.033>
- DAKHEL, A. A., 2013. Investigation of opto-dielectric properties of Ti-doped Ga₂O₃ thin films. *Solid State Sciences*, 20:54-58. <https://doi.org/10.1016/j.solidstatesciences.2013.03.009>.
- DELA TORRE, H. M. B. AND SANTOS, G. N. C., 2020. Synthesis and characterization of monoclinic gallium oxide nanomaterials for high-concentration ethanol vapor detection. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 739(1):p.012031. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/739/1/012031>.
- DEMİR, M., 2020. Structural, optical and electrical characterization of CDSEXTE1-X thin films. Middle East Technical University, The Graduate School of Natural and Applied Sciences, Master's thesis, Ankara, 79p.
- DU, J., XING, J., GE, C., LIU, H., LIU, P., HAO, H., DONG, J., ZHENG, Z. and GAO, H., 2016. Highly sensitive and ultrafast deep UV photodetector based on a β -Ga₂O₃ nanowire network grown by CVD. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 49(42):425105. <https://doi.org/10.1088/0022-3727/49/42/425105>
- EVCİL, M. A., 2019. SNO₂/p-Si hetero eklem yapıların termal buharlaştırmayla üretilmesi, diyot ve fotovoltaiik özelliklerinin incelenmesi. Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Van, 86s.
- FAN, M. M., LU, Y. J., XU, K. L., CUI, Y. X., CAO, L. and LI, X. Y., 2020. Growth and characterization of Sn-doped β -Ga₂O₃ thin films by chemical vapor deposition using solid powder precursors toward solar-blind ultraviolet photodetection. *Applied Surface Science*, 509:144867. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2019.144867>.
- FANG, H., ZHENG, C., WU, L., LI, Y., CAI, J., HU, M., FANG, X., MA, R., WANG, Q. and WANG, H., 2019. Solution-processed self-powered transparent ultraviolet photodetectors with ultrafast response speed for high-performance communication system. *Advanced Functional Materials*, 29(20):1809013. <https://doi.org/10.1002/adfm.201809013>.
- FENG, Q.-J., YU, C., YI, Z.-Q., SUI, X., WANG, Y.-M., WANG, S., WANG, D.-Y., SHI, J.-H., SUN, J.-C. and LAING, H.W., 2023. Study of self-powered UV detector based on Sb-doped β -Ga₂O₃ thin film/p-Si heterojunction. *Optical Materials*, 145, 114431. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.optmat.2023.114431>.
- FU, B., JIAN, G., MU, W., LI, Y., WANG, H., JIA, Z., LI, Y., LONG, S., SHI, Y. and TAO, X., 2022. Crystal growth and design of Sn-doped β -Ga₂O₃: Morphology, defect and property studies of cylindrical crystal by EFG. *Journal of Alloys and Compounds*, 896, 162830. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2021.162830>
- GAO, Y., MURAI, S., FUJITA, K., and TANAKA, K., 2018. Visible and near-infrared photoluminescence enhanced by Ag nanoparticles in Sm³⁺-doped aluminoborate glass. *Optical Materials*, 86:611-616. <https://doi.org/10.1016/j.optmat.2018.10.018>
- GAO, Y., QIU, J. and ZHOU, D., 2017. Investigation of optical properties: Eu with Al codoping in aluminum silicate glasses and glass-ceramics. *Journal of the*

- American Ceramic Society, 100(7):2901-2913.
<https://doi.org/10.1111/jace.14807>.
- GROVER, S., 2016. Effect of Transmission Line Measurement (TLM) geometry on specific contact resistivity determination. Rochester Institute of Technology, Materials Science and Engineering in the School of Chemistry and Materials Science, Master of Science, 97s. <http://scholarworks.rit.edu/theses>.
- GUO, D., QIN, X., LV, M., SHI, H., SU, Y., YAO, G., WANG, S., LI, C., LI, P. and TANG, W., 2017. Decrease of oxygen vacancy by Zn-doped for improving solar-blind photoelectric performance in β -Ga₂O₃ thin films. *Electronic Materials Letters*, 13(6):483-488. <https://doi.org/10.1007/s13391-017-7072-y>.
- GUO, X. C., HAO, N. H., GUO, D. Y., WU, Z. P., AN, Y. H., CHU, X. L., LI, L. H., LI, P. G., LEI, M. and TANG, W. H., 2015. β -Ga₂O₃/p-Si heterojunction solar-blind ultraviolet photodetector with enhanced photoelectric responsivity. *Journal of Alloys and Compounds*, 660:136-140. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2015.11.145>.
- HEA, L., WANG, D., MA, X., FENG, X., XIAO, H., LE, Y. and MA, J., 2020. Fabrication and characterization of ultraviolet detector based on epitaxial Ta-doped Zn₂SnO₄ films. In *Optical Materials*, (Vol.108:110224). <http://www.elsevier.com/locate/optmat>.
- HOU, C., GAZONI, R. M., REEVES, R. J. and ALLEN, M. W., 2019. Direct comparison of plain and oxidized metal Schottky contacts on β -Ga₂O₃. *Applied Physics Letters*, 114(3). <https://doi.org/10.1063/1.5079423>.
- HOUIMI, A., 2022. Production of alkali atoms doped Cu₂SnS₃ nanoparticles thin films based solar cells using pulsed laser deposition system. Selçuk University, The Graduate School of Natural Sciences, Master's Thesis, Konya, 122s.
- HU, D., WANG, Y., WANG, Y., HUAN, W., DONG, X., YIN, J. and ZHU, J., 2021. Fabrication and properties of a solar-blind ultraviolet photodetector based on Si-doped β -Ga₂O₃ film grown on p-Si (111) substrate by MOCVD. *Optik*, 245:167708. <https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2021.167708>.
- HUAN, Y. W., SUN, S. M., GU, C. J., LIU, W. J., DING, S. J., YU, H. Y., XIA, C. T. and ZHANG, D. W., 2018. Recent advances in β -Ga₂O₃-metal contacts. In *Nanoscale Research Letters* (Vol. 13:1-10). <https://doi.org/10.1186/s11671-018-2667-2>.
- HWANG, J. D., WANG, F. H., KUNG, C. Y., and CHAN, M. C., 2015. Using the surface plasmon resonance of au nanoparticles to enhance ultraviolet response of zno nanorods-based schottky-barrier photodetectors. *IEEE Transactions on Nanotechnology*, 14(2):318-321.
<https://doi.org/10.1109/TNANO.2015.2393877>
- IRUDAYADASS, G., 2011. Estimation of ionization coefficients of allium oxide for the purpose of TCAD Simulation. University of Illinois, Science in Electrical and Computer Engineering, Master of Science, Chicago, 49s.
- JANG, Y. H., JANG, Y. J., KIM, S., QUAN, L. N., CHUNG, K. and KIM, D. H., 2016. Plasmonic Solar Cells: From Rational Design to Mechanism Overview. In *Chemical Reviews* (Vol. 116, Issue 24, 14982-15034). <https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.6b00302>.

- JEONG, S. H., VU, T. K. O. and KİM, E. K., 2021. Post-annealing effects on Si-doped Ga_2O_3 photodetectors grown by pulsed laser deposition. *Journal of Alloys and Compounds*, 877:160291. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2021.160291>.
- Jİ, T., 2019. Solution synthesis and materials characterization of gallium oxide rod structures. 2019. Ohio State University, The Graduate School of the Ohio State University, Master's Thesis, Ohio, 57s.
- KESKENLER, E. F., TOMAKİN, M., DOĞAN, S., TURGUT, G., AYDİN, S., DUMAN, S. and GÜRBULAK, B., 2013. Growth and characterization of Ag/n-ZnO/p-Si/Al heterojunction diode by sol-gel spin technique. *Journal of Alloys and Compounds*, 550:129-132. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2012.09.131>.
- KHAN, M. I., 2018. Synthesis and characterization of doped and undoped metal oxide multilayer thin films. The University of Lahore, Doctoral Thesis, Lahore, 98p.
- KO, Y. U., YUN, H. J., JEONG, K. S., KİM, Y. M., YANG, S. D., KİM, S. H., KİM, J. S., AN, J. U., EOM, K. Y., LEE, H. D. and LEE, G. W., 2015. Enhanced photo current in n-zno/p-si diode via embedded ag nanoparticles for the solar cell application. *Journal of Semiconductor Technology and Science*, 15(1):35-40. <https://doi.org/10.5573/JSTS.2015.15.1.035>.
- KOKSAL, N. E., SBETA, M. and YILDIZ, A., 2019. GZO/Si Photodiodes Exhibiting High Photocurrent-to-Dark-Current Ratio. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 66(5):2238-2242. <https://doi.org/10.1109/TED.2019.2903600>.
- KONDA, R. B., MUNDLE, R., MUSTAFA, H., BAMİDURO, O., PRADHAN, A. K., ROY, U. N., CUI, Y. and BURGER, A., 2007. Surface plasmon excitation via Au nanoparticles in n-CdSe/p-Si heterojunction diodes. *Applied Physics Letters*, 91(191111). <https://doi.org/10.1063/1.2807277>.
- KRÖGER, F. A., DIEMER, G. and KLASSENS, H. A., 1956. Nature of an ohmic metal-semiconductor contact. *Physical Review*, 103(2):279. <https://doi.org/10.1103/PhysRev.103.279>.
- KUMAR, N., ARORA, K. and KUMAR, M., 2019. High performance, flexible and room temperature grown amorphous Ga_2O_3 solar-blind photodetector with amorphous indium-zinc-oxide transparent conducting electrodes. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 52(33):335103. <https://doi.org/10.1088/1361-6463/ab236f>.
- KUMAR, S., 2021. Investigation of transport characteristics of gallium oxide fets and carbon nanotube network based fets for emerging applications. Georgia Institute of Technology, Doctor of Philosophy, Georgia, 137p.
- Lİ, Q., LİN, J., LIU, T. Y., ZHU, X. Y., YAO, W. H. and LIU, J., 2021. Gas-mediated liquid metal printing toward large-scale 2D semiconductors and ultraviolet photodetector. *Npj 2D Materials and Applications*, 5(1):36. <https://doi.org/10.1038/s41699-021-00219-y>
- Lİ, Y., Lİ, Y., Jİ, Y., WANG, H. and ZHONG, D., 2022. Sol-gel preparation of Sn doped gallium oxide films for application in solar-blind ultraviolet photodetectors. *Journal of Materials Science*, 57(2):1186-1197. <https://doi.org/10.1007/s10853-021-06680-w>.

- LIU, W., ZHU, X., HE, J., YANG, Y., HUANG, T., CHEN, X. and ZHANG, R., 2021. Atomic-Layer-Ti-Doped Ga_2O_3 Thin Films with Tunable Optical Properties and Wide Ultraviolet Optoelectronic Responses. *Physica Status Solidi-Rapid Research Letters*, 15(11):202100411. <https://doi.org/10.1002/pssr.202100411>.
- LUO, X., WEN, Z., DU, L., LV, W., ZHAO, F., TANG, Y., CHEN, Z. and PENG, Y., 2016. Notably improved red photoresponse of organic diode employing gold nanoparticles plasmonic absorption. *Journal of Nanoscience and Nanotechnology*, 16(6):5707-5713. <https://doi.org/10.1166/jnn.2016.12056>.
- MANANDHAR, S., BATTU, A. K., TAN, S., PANAT, R., SHUTTHANANDAN, V. and RAMANA, C. V., 2019. Effect of Ti doping on the crystallography, phase, surface/interface structure and optical band gap of Ga_2O_3 thin films. *Journal of Materials Science*, 54(17). <https://doi.org/10.1007/s10853-019-03663-w>.
- MARDARE, D., YILDIZ, A., GÎRTAN, M., MANOLE, A., DOBROMÎR, M., IRÎMÎA, M., ADOMNÎTEÎ, C., CORNEÎ, N. and LUCA, D., 2012. Surface wettability of titania thin films with increasing Nb content. *Journal of Applied Physics*, 112(7):073502. <https://doi.org/10.1063/1.4757007>.
- MARÎCA, I., NEKVAPÎL, F., ȘTEFAN, M., FARCĂU, C. and FALAMAȘ, A., 2022. Zinc oxide nanostructures for fluorescence and Raman signal enhancement: a review. *Beilstein Journal of Nanotechnology*, 13(1):472-490. <https://doi.org/10.3762/bjnano.13.40>.
- MAZEÎNA, L., PÎCARD, Y. N., MAXÎMENKO, S. I., PERKÎNS, F. K., GLASER, E. R., TWÎGG, M. E., FREÎTAS, J. A. and PROKES, S. M., 2009. Growth of Sn-doped $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ nanowires and $\text{Ga}_2\text{O}_3\text{-SnO}_2$ heterostructures for gas sensing applications. *Crystal Growth and Design*, 9(10):4471-4479. <https://doi.org/10.1021/cg900499c>.
- MÎ, W., LÎ, Z., LUAN, C., XÎAO, H., ZHAO, C. and MA, J., 2015. Transparent conducting tin-doped Ga_2O_3 films deposited on MgAl_2O_4 (1 0 0) substrates by MOCVD. *Ceramics International*, 41(2):2572-2575. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2014.11.004>.
- MÎ, W., TANG, J., CHEN, X., LÎ, X., LÎ, B., LUO, L., ZHOU, L., CHEN, R., WANG, D. and ZHAO, J., 2023. Preparation and UV detection performance of Ti-doped Ga_2O_3 /intrinsic- Ga_2O_3 /p-Si PIN photodiodes. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 34(8):774. <https://doi.org/10.1007/s10854-023-10214-2>.
- MONROY, E., OMNÈS, F. and CALLE, F., 2003. Wide-bandgap semiconductor ultraviolet photodetectors. In *Semiconductor Science and Technology* (Vol. 18, Issue 4). <https://doi.org/10.1088/0268-1242/18/4/201>.
- MOSER, N. A., 2017. Gallium oxide metal oxide semiconductor field effect transistor analytical modeling and power transistor design trades. George Mason University, Department of Electrical and Computer Engineering, PhD Thesis, Fairfax, VA, 171p.
- MURAKAMÎ, M. and KOÎDE, Y., 1998. Ohmic contacts for compound semiconductors. *Critical Reviews in Solid State and Materials Sciences*, 23(1):1-60. <https://doi.org/10.1080/10408439891324167>.
- NEAMAN, D. A., 2012. *Semiconductor Physics and Devices: Basic Principles*, Fourth Edition. In McGraw-Hill Companies Inc., New York, 758p.

- NEBİ, M., 2021. Sol-jel Döndürerek Kaplama Tekniğiyle Katkılı TiO₂ Filmlerin Üretilmesi ve Bazı Fiziksel Özelliklerinin İncelenmesi. Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, Eskişehir, 91s.
- OHİRA, S., SUZUKİ, N., ARAİ, N., TANAKA, M., SUGAWARA, T., NAKAJİMA, K. and SHİSHİDO, T., 2008. Characterization of transparent and conducting Sn-doped β -Ga₂O₃ single crystal after annealing. *Thin Solid Films*, 516(17):5763-5767. <https://doi.org/10.1016/j.tsf.2007.10.083>.
- ÖZEL, K., 2020. SnO₂/ZnO/p-Si and SnO₂/TiO₂/p-Si heterojunction UV photodiodes prepared using a hydrothermal method. *Sensors and Actuators, A: Physical*, 315:112351. <https://doi.org/10.1016/j.sna.2020.112351>.
- ÖZEL, K., ATILGAN, A., KOKSAL, N. E. and YILDIZ, A., 2020. A route towards enhanced UV photo-response characteristics of SnO₂/p-Si based heterostructures by hydrothermally grown nanorods. *Journal of Alloys and Compounds*, 849. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2020.156628>.
- PEARTON, S. J., YANG, J., CARY, P. H., REN, F., KİM, J., TADJER, M. J. and MASTRO, M. A., 2018. A review of Ga₂O₃ materials, processing, and devices. In *Applied Physics Reviews* (Vol. 5, Issue 1). American Institute of Physics Inc. <https://doi.org/10.1063/1.5006941>
- PEDAPUDİ, M. C. and DHAR, J. C., 2022. Ultrasensitive p-n junction UV-C photodetector based on p-Si/ β -Ga₂O₃ nanowire arrays. *Sensors and Actuators A: Physical*, 344:113673. <https://doi.org/10.1016/j.sna.2022.113673>.
- PENG, Y., ZHANG, Y., CHEN, Z., GUO, D., ZHANG, X., Lİ, P., WU, Z. and TANG, W., 2018. Arrays of solar-blind ultraviolet photodetector based on β -Ga₂O₃ epitaxial thin films. *IEEE Photonics Technology Letters*, 30(11):993-996. <https://doi.org/10.1109/LPT.2018.2826560>
- PRABAKAR, K., VENKATACHALAM, S., JEYACHANDRAN, Y. L., NARAYANDASS, S. K. and MANGALARAJ, D., 2004. Microstructure, Raman and optical studies on Cd_{0.6}Zn_{0.4}Te thin films. *Materials Science and Engineering B: Solid-State Materials for Advanced Technology*, 107(1):99-105. <https://doi.org/10.1016/j.mseb.2003.10.017>.
- QİAN, Y. P., GUO, D. Y., CHU, X. L., SHİ, H. Z., ZHU, W. K., WANG, K., HUANG, X. K., WANG, H., WANG, S. L., Lİ, P. G., ZHANG, X. H. and TANG, W. H., 2017. Mg-doped p-type β -Ga₂O₃ thin film for solar-blind ultraviolet photodetector. *Materials Letters*, 209:558-561. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2017.08.052>.
- ROY, R., HİLL, V. G. and OSBORN, E. F., 1952. Polymorphism of Ga₂O₃ and the System Ga₂O₃-H₂O. *Journal of the American Chemical Society*, 74(3):719-722. <https://doi.org/10.1021/ja01123a039>.
- SARAÇ, B. E., 2017. Structural and optoelectronic properties of sol-gel derived nickel oxide thin films. Middle East Technical University, The Graduate School of Natural And Applied Sciences, Master of Science, Ankara, 78p.
- SBETA, M. N., 2019. Integration of sol-gel derived doped zinc oxide films and solution-processed metal nanoparticles for thin film photodiode and solar cell applications. Ankara Yıldırım Beyazıt University, The Graduate School of Natural and Applied Sciences, Ph.D. Thesis, Ankara, 102p.
- SEO, D., BAEK, J., KİM, S., CHO, B. J. and HWANG, W. S., 2023. Sn-doped n-type amorphous gallium oxide semiconductor with energy bandgap of 4.9 eV.

- Materials Science in Semiconductor Processing, 169:107922. <https://doi.org/10.1016/j.mssp.2023.107922>.
- SEZGİN, N., 2010. Galyum oksit ince filmlerin elektron demeti buharlaştırma yöntemiyle üretimi ve karakterizasyonu. İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, İstanbul, 67s.
- SHI, L. and NIHTIANOV, S., 2012. Comparative study of silicon-based ultraviolet photodetectors. In IEEE Sensors Journal, 12(7):2453-2459. <https://doi.org/10.1109/JSEN.2012.2192103>.
- SHIN, G., KIM, H. Y. and KIM, J., 2018. Deep-ultraviolet photodetector based on exfoliated n-type β -Ga₂O₃ nanobelt/p-Si substrate heterojunction. Korean Journal of Chemical Engineering, 35(2):574-578. <https://doi.org/10.1007/s11814-017-0279-7>.
- SINGH, A. K., YEN, C. C., CHANG, K. P. and WUU, D. S., 2023. Structural and photoluminescence properties of Co-Sputtered p-type Zn-doped β -Ga₂O₃ thin films on sapphire substrates. Journal of Luminescence, 260:119836. <https://doi.org/10.1016/j.jlumin.2023.119836>.
- SUZUKI, N., OHIRA, S., TANAKA, M., SUGAWARA, T., NAKAJIMA, K. and SHISHIDO, T., 2007. Fabrication and characterization of transparent conductive Sn-doped β -Ga₂O₃ single crystal. Physica Status Solidi (C), 4(7):2310-2313. <https://doi.org/10.1002/pssc.200674884>.
- TANER, C., 2022. Magnetic properties of Mn₅Ge₃/PZT heterostructures. Gebze Technical University, Graduate School Of Natural And Applied Sciences, Master Of Science, Kocaeli, 64p.
- TOYGUN, Ş., KÖNEÇOĞLU, G. and KALPAKLI, Y., 2013. General principles of sol-gel. Sigma Journal of Engineering and Natural Sciences, 31(4):456-476.
- USUI, Y., NAKAUCHI, D., KAWANO, N., OKADA, G., KAWAGUCHI, N. and YANAGIDA, T., 2018. Scintillation and optical properties of Sn-doped Ga₂O₃ single crystals. Journal of Physics and Chemistry of Solids, 117:36-41. <https://doi.org/10.1016/j.jpcs.2018.02.027>.
- VARSHNEY, U., SHARMA, A., GOSWAMI, L., TAWALE, J. and GUPTA, G., 2023. Deep ultraviolet-visible highly responsivity self-powered photodetector based on β -Ga₂O₃/GaN heterostructure. Vacuum, 217: 112570. <https://doi.org/10.1016/j.vacuum.2023.112570>
- VENUGOPAL, N., KAUR, G. and MITRA, A., 2014. Plasmonics effect of Ag nanoislands covered n-Al:ZnO/p-Si heterostructure. Applied Surface Science, 320:30-42. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2014.09.059>.
- WANG, C., FAN, W. H., ZHANG, Y. C., KANG, P. C., WU, W. Y., WUU, D. S., LIEN, S. Y. and ZHU, W. Z., 2023. Effect of oxygen flow ratio on the performance of RF magnetron sputtered Sn-doped Ga₂O₃ films and ultraviolet photodetector. Ceramics International, 49(7):10634-10644. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2022.11.251>.
- WANG, X. H., ZHANG, F. B., SAITO, K., TANAKA, T., NISHIO, M. and GUO, Q. X., 2014. Electrical properties and emission mechanisms of Zn-doped β -Ga₂O₃ films. Journal of Physics and Chemistry of Solids, 75(11):1201-1204. <https://doi.org/10.1016/j.jpcs.2014.06.005>
- WANG, X., LIU, K., CHEN, X., LI, B., JIANG, M., ZHANG, Z., ZHAO, H. and SHEN, D., 2017. Highly wavelength-selective enhancement of responsivity in

- ag nanoparticle-modified zno uv photodetector. *ACS Applied Materials and Interfaces*, 9(6):5574-579. <https://doi.org/10.1021/acsami.6b14430>
- WANG, Y., XUE, Y., SU, J., LIN, Z., ZHANG, J., CHANG, J. and HAO, Y., 2022. Realization of cost-effective and high-performance solar-blind ultraviolet photodetectors based on amorphous Ga₂O₃ prepared at room temperature. *Materials Today Advances*, 16:100324. <https://doi.org/10.1016/j.mtadv.2022.100324>
- WEI, C., XU, J., SHI, S., CAO, R., CHEN, J., DONG, H., ZHANG, X., YIN, S. and LI, L., 2019. Self-powered visible-blind UV photodetectors based on p-NiO nanoflakes/n-ZnO nanorod arrays with an MgO interfacial layer. *Journal of Materials Chemistry C*, 7(30):9369-9379. <https://doi.org/10.1039/c9tc01179j>.
- WIKIPEDIA, 2023. https://tr.wikipedia.org/wiki/Y%C3%BCzey_plazmonu, Erişim Tarihi: 20 Mayıs 2023.
- XING, S., NIKOLIS, V. C., KUBLITSKI, J., GUO, E., JIA, X., WANG, Y., SPOLTORE, D., VANDEWAL, K., KLEEMANN, H., BENDUHN, J. and LEO, K., 2021. Miniaturized vis-nir spectrometers based on narrowband and tunable transmission cavity organic photodetectors with ultrahigh specific detectivity above 10¹⁴ jones. *Advanced Materials*, 33(44):2102967. <https://doi.org/10.1002/adma.202102967>.
- YADAV, M. K., MONDAL, A., DAS, S., SHARMA, S. K. and BAG, A., 2020. Impact of annealing temperature on band-alignment of PLD grown Ga₂O₃/Si (100) heterointerface. *Journal of Alloys and Compounds*, 819:153052. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2019.153052>
- YAKUPHANOGLU, F., CAGLAR, Y., CAGLAR, M. and ILICAN, S., 2010. ZnO/p-Si heterojunction photodiode by solgel deposition of nanostructure n-ZnO film on p-Si substrate. *Materials Science in Semiconductor Processing*, 13(3):137-140. <https://doi.org/10.1016/j.mssp.2010.05.005>.
- YAN, C., SU, J., WANG, Y., LIN, Z., ZHANG, J., CHANG, J. and HAO, Y., 2021. Reducing the acceptor levels of p-type β-Ga₂O₃ by (metal, N) co-doping approach. *Journal of Alloys and Compounds*, 854:157247. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2020.157247>
- YANG, C. C., YU, H. C., SU, Y. K., CHUANG, M. Y., HSIAO, C. H. and KAO, T. H., 2016. Noise properties of Ag nanoparticle-decorated zno nanorod uv photodetectors. *IEEE Photonics Technology Letters*, 28(4):379-382. <https://doi.org/10.1109/LPT.2015.2494065>
- YAO, Y., 2017. Growth, characterization and contacts to Ga₂O₃ single crystal substrates and epitaxial layers. Carnegie Mellon University, Materials Science and Engineering, Doctor of Philosophy, Pittsburgh, PA, 163p.
- YAO, Y., DAVIS, R. F. and PORTER, L. M., 2017. Investigation of different metals as ohmic contacts to β-Ga₂O₃ : comparison and analysis of electrical behavior, morphology, and other physical properties. *Journal of Electronic Materials*, 46(4):2053-2060. <https://doi.org/10.1007/s11664-016-5121-1>.
- YOON, Y., KIM, S., LEE, I. G., CHO, B. J. and HWANG, W. S., 2021. Electrical and photocurrent properties of a polycrystalline Sn-doped β-Ga₂O₃ thin film. *Materials Science in Semiconductor Processing*, 121:105430. <https://doi.org/10.1016/j.mssp.2020.105430>.
- ZHANG, H., DENG, J., DUAN, P., LI, R., PAN, Z., BAI, Z., KONG, L. and WANG, J., 2018. Effect of Au nanoparticles on the optical and electrical

- properties of Nb-doped β -Ga₂O₃ film. Vacuum, 155:465-469. <https://doi.org/10.1016/j.vacuum.2018.06.051>.
- ZHONG, M., WEI, Z., MENG, X., WU, F. and LI, J., 2015. High-performance single crystalline UV photodetectors of β -Ga₂O₃. In Journal of Alloys and Compounds, 619:572–575. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2014.09.070>
- ZHOU, X., LI, M., ZHANG, J., SHANG, L., JIANG, K., LI, Y., ZHU, L., CHU, J. and HU, Z., 2022. Flexible solar-blind photodetectors based on β -Ga₂O₃ films transferred by a Stamp-Based Printing Technique. IEEE Electron Device Letters, 43(11):1921–1924. <https://doi.org/10.1109/LED.2022.3207314>
- ZVORIŠTE, C., 2011. High-pressure synthesis, crystal structure and physical properties of gallium oxonitride. The Technical University of Darmstadt, Department of Materials and Geosciences, Doctoral Thesis, România, 133p.

