

**İKİ BOYUTLU GaSe KATKILI PVP İNCE FİLM
TABANLI FOTODEDEKTÖRLERİN ÜRETİLMESİ VE
İNCELENMESİ**

Tugay DEMİRTAŞ



T.C.
BURSA ULUDAĞ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**İKİ BOYUTLU GaSe KATKILI PVP İNCE FİLM TABANLI
FOTODEDEKTÖRLERİN ÜRETİLMESİ VE İNCELENMESİ**

Tugay Demirtaş
000-0001-9570-3929

Doç. Dr. Umut Aydemir
(Danışman)

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

BURSA – 2021
Her Hakkı Saklıdır

TEZ ONAYI

Tugay DEMİRTAŞ tarafından hazırlanan “İki Boyutlu GaSe Katkılı PVP İnce Film Tabanlı Fotodedektörlerin Üretilmesi ve İncelenmesi” adlı tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Bursa Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektronik Anabilim Dalı’nda **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Danışman : Doç. Dr. Umut Aydemir

Başkan: Prof. Dr. Güneş YILMAZ
0000-0001-8972-1952
Uludağ Üniversitesi,
Mühendislik Fakültesi,
Telekomünikasyon Anabilim Dalı
İmza

Üye: Doç. Dr. Umut AYDEMİR
0000-0001-5396-4610
Uludağ Üniversitesi,
Mühendislik Fakültesi,
Elektronik Anabilim Dalı
İmza

Üye: Doç. Dr. Barış KINACI
0000-0003-3095-0624
İstanbul Üniversitesi,
Fen Fakültesi,
Genel Fizik Anabilim Dalı
İmza

Yukarıdaki sonucu onaylarım

Prof. Dr. Hüseyin Aksel EREN
Enstitü Müdürü
.../.../2021

B.U.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

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

beyan ederim.

26/08/2021

Tugay Demirtaş

TEZ YAYINLANMA FİKRİ MÜLKİYET HAKLARI BEYANI

Enstitü tarafından onaylanan lisansüstü tezin/raporun tamamını veya herhangi bir kısmını, basılı (kâğıt) ve elektronik formatta arşivleme ve aşağıda verilen koşullarla kullanıma açma izni Bursa Uludağ Üniversitesi'ne aittir. Bu izinle Üniversiteye verilen kullanım hakları dışındaki tüm fikri mülkiyet hakları ile tezin tamamının ya da bir bölümünün gelecekteki çalışmalarda (makale, kitap, lisans ve patent vb.) kullanım hakları tarafımıza ait olacaktır. Tezde yer alan telif hakkı bulunan ve sahiplerinden yazılı izin alınarak kullanılması zorunlu metinlerin yazılı izin alınarak kullandığımı ve istenildiğinde suretlerini Üniversiteye teslim etmeyi taahhüt ederiz.

Yükseköğretim Kurulu tarafından yayınlanan “**Lisansüstü Tezlerin Elektronik Ortamda Toplanması, Düzenlenmesi ve Erişime Açılmasına İlişkin Yönerge**” kapsamında, yönerge tarafından belirtilen kısıtlamalar olmadığı takdirde tezin YÖK Ulusal Tez Merkezi / B.U.Ü. Kütüphanesi Açık Erişim Sistemi ve üye olunan diğer veri tabanlarının (Proquest veri tabanı gibi) erişimine açılması uygundur.

Doç. Dr. Umut Aydemir
26/08/2021

Tugay Demirtaş
26/08/2021

İmza

Bu bölüme kişinin kendi el yazısı ile okudum
anladım yazmalı ve imzalanmalıdır.

İmza

Bu bölüme kişinin kendi el yazısı ile okudum
anladım yazmalı ve imzalanmalıdır.

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

İKİ BOYUTLU GaSe KATKILI PVP İNCE FİLM TABANLI FOTODEDEKTÖRLERİN ÜRETİLMESİ VE İNCELENMESİ

Tugay Demirtaş

Bursa Uludağ Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Doç. Dr. Umut Aydemir

Bu tez çalışmasında, PVP+%GaSe solüsyonundan üretilmiş ince filmlerin optik ve elektriksel karakteristikleri belirlenerek iki boyutlu yarıiletken kullanımının Schottky fotodiyot ve alan etkili transistör üzerine etkileri incelenmiştir. Son yıllarda araştırmacıların grafen benzeri malzemelere yönelmesi, iki boyutlu yarı iletkenlerin elektronik veya optik aygıt üretiminde kullanımının hız kazanmasına sebep olmuştur. Tez çalışması kapsamında iki boyutlu yarıiletkenlerden biri olan GaSe belirli yüzde konsantrasyonlarında katkılanarak PVP polimer maddesi ile katkılanmıştır. Katkılanan PVP+GaSe çözeltisi dönele kaplama tekniğı ile Si alttaş üzerine ince filmler kaplanmıştır.

Hazırlanan ince filmlerin yüzey morfolojisinin görüntüsü taramalı elektron mikroskopuyla (SEM), kalınlık tayini ve kırılma indisi parametreleri Elipsometre yöntemiyle, yapısal karakteristiğı X ışını kırınımı (XRD) yöntemiyle, optik karakteristikleri ise Raman ve Fotoluminesans spektroskopileriyle analiz edilmiştir. Ardından mikroelettronik aygıt fabrikasyon aşamalarına geçilerek Schottky diyot ve transistör aygıtları uygun maske ve fabrikasyon teknikleriyle elde edilmiştir. Numunelerin elektriksel karakteristiklerinin belirlenmesinde karanlık ortamda akım-gerilim (I-V) ve farklı ışık şiddetleri altında kısa devre akımı-zaman (I-t) ölçümleri analiz edilmiştir. Karanlık ortamda alınan akım-gerilim ölçümlerinin grafiklerinden önemli diyot parametreleri hesaplanmıştır. Aydınlık ortamda değışen ışık şiddetine bağılı olarak kısa devre akımı-zaman (I-t) ölçümleri yapılmıştır. I-t grafiğinden fotocevap, dış kuantum verimi ve alıcılık gibi parametreler hesaplanmıştır.

Deneysel sonuçlara göre, en yüksek GaSe konsantrasyonuna sahip PVP+%5 GaSe ince filme sahip aygıtların en iyi Schottky diyot performansı, en iyi fotocevap, en yüksek dış kuantum verimi ve en yüksek doğrultma oranı değıerlerine sahip olduğı gözlenmiştir. Benzer şekilde yapılan transistör denemelerinden elde edilen akım -gerilim karakteristiğıne bakıldığında PVP+%5 GaSe ince filme sahip transistörlerin en iyi performansa sahip olduğı gözlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: PVP+GaSe, nanokompozit, 2B yarıiletkenler, Schottky fotodiyot, Alan etkili transistör, Mikroelettronik, Optoelettronik

2021, xv + 78 sayfa.

ABSTRACT

MSc Thesis

FABRICATION AND INVESTIGATION OF PHOTODETECTORS BASED ON TWO-DIMENSIONAL GaSe DOPED PVP THIN FILM

Tugay Demirtaş

Bursa Uludağ University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Electronics Engineering

Supervisor: Assoc. Prof. Umut Aydemir

In this thesis, two dimensional GaSe flakes, one of the two-dimensional semiconductors, was doped into PVP polymer material by doping various percentage concentrations. Thin films of doped PVP+GaSe solution were coated on Si substrate by spin - coating technique. The surface morphologies of the prepared thin films were analyzed by scanning electron microscopy (SEM), thickness determination and refractive index parameters were analyzed by Ellipsometry method, structural characteristics were analyzed by X-ray diffraction (XRD) method, and optical characteristics were analyzed by Raman and Photoluminescence spectroscopy. Then, Schottky photodetectors and field effect transistors were produced with appropriate mask and fabrication techniques. In order to determine the electrical characteristics of the devices, current-voltage (I-V) and short-circuit current-time (I-t) measurements under different illumination intensities were analyzed. Important device parameters were calculated from the graphs of current-voltage measurements. Illumination dependent short-circuit current-time (I-t) measurements were also analyzed to understand photodetector performance. Parameters such as photoresponse, external quantum efficiency and detectivity were calculated from the I-t plot.

According to the experimental results, it was observed that the device with PVP+5% GaSe thin film had the best photodetector performance, the best photoresponse, the highest external quantum efficiency and the highest rectification ratio values. Considering the current-voltage characteristics obtained from similar transistor experiments, it was observed that transistors with PVP+5% GaSe thin film had the best performance. This research will pave the way for novel device designs and electronic applications for new nanocomposites decorated with different 2D materials.

Key words: PVP+GaSe nanocomposite, 2D semiconductors, Schottky photodiode, Field effect transistor, Microelectronic, Optoelectronic

2021, xv +78 pages.

TEŐEKKÖR

Yüksek lisans tezim boyunca bilgi ve tecrübesiyle beni yönlendiren, başarıya ulaşabilmem için hiçbir zaman desteğini esirgemeyen, bilimsel araştırma ruhunu kazanmamda büyük katkıları olan, hem eğitim hem meslek hayatımda kullanacağım engin bilgileri edinmemde bana katkı sağlayan değerli danışman hocam Doç. Dr. Umut Aydemir'e, laboratuvar çalışmalarında desteğini esirgemeyen, tecrübeleriyle ışık tutan Dr. Öğretim Üyesi Halil İbrahim Akyıldız'a, bilgilerinden ve tecrübelerinden yararlandığım doktora öğrencisi Cem Odacı' ya, Uludağ Üniversitesi Fizik bölümündeki Hüseyin Kaan Kaplan'a ve Ali Olkun'a, ayrıca her zaman yanımda olan ve desteğini hiç esirgemeyen, öğrencilik hayatım boyunca başarılı olmamda sonsuz katkıları bulunan canımdan çok sevdiğim değerli aileme teşekkürlerimi sunarım.

Tugay Demirtaş
26/08/2021

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET.....	vi
ABSTRACT.....	vii
TEŞEKKÜR.....	viii
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	xi
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	xiii
ÇİZELGELER DİZİNİ	xv
1. GİRİŞ.....	1
2. KURAMSAL TEMELLER VE KAYNAK ARAŞTIRMASI.....	4
2.1 Yarıiletkenler.....	4
2.1.1 Saf Yarıiletkenler	5
2.1.2 Katkılı Yarıiletkenler	5
2.1.3 N tipi Yarıiletkenler	6
2.1.4 P tipi Yarıiletkenler	7
2.2 İki Boyutlu Yarıiletkenler	7
2.2 GaSe İki Boyutlu Yarıiletkeninin Özellikleri	8
2.3 PVP Polimer Malzemesinin Özellikleri	10
2.4 Schottky Diyotlar	11
2.4.1 N tipi Yarıiletken ve Metal Arasındaki Omik Kontak	13
2.4.2 N tipi yarı iletken ve Metal Arasındaki Doğrultucu Kontak.....	13
2.4.3 P tipi Yarıiletken ve Metal arasındaki Omik Kontak.....	14
2.4.4 P tipi yarı iletken ve Metal Arasındaki Doğrultucu Kontak	14
2.5 Akım İletim Mekanizmaları.....	15
2.5.1 Termiyonik Emisyon Teorisi	15
2.5.2 Difüzyon Teorisi	16
2.6 Alan Etkili Transistörler.....	18
2.6.1 FET Yapıları.....	19
2.6.2 FET Karakteristikleri	19
2.6.3 FET’lerde Akım-Voltaj Eşitlikleri	20
2.7 Organik Alan Etkili Transistörler.....	21
3. MATERYAL ve YÖNTEM.....	23
3.1 Bridgman Yöntemi ile GaSe Sentezi	23
3.2 PVP+%GaSe İnce Film Numunelerinin Üretilmesi.....	24
3.2.1 PVP Solüsyonunun Hazırlanması	24
3.2.2 GaSe Eksfoliasyonu ve Sonikasyon Süreci	24
3.2.3 N tipi Silisyum Alttaşların Kesilmesi ve Temizlenme İşlemi.....	25
3.2.4 Döndürerek Kaplama (Spin-Coating) Süreci	25
3.2.5 Omik Kontak Alınması	26
3.2.6 Üretilen Mikroelektronik Aygıt Yapıları	27
3.3 Kullanılan Analiz Yöntemleri	28
3.3.1 Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM).....	28
3.3.2 Elipsometre	29
3.3.3 X Işınları Kırınımı (XRD).....	32
3.3.4 Raman ve PL Spektroskopisi	34

3.3.5 Akım -Gerilim (I-V) Karakteristiği.....	36
3.3.6 Fotocevap Karakteristiği	36
4.BULGULAR VE TARTIŞMA	37
4.1 PVP +%GaSe İnce Filmlerin Yapısal Özelliklerinin Analizi	37
4.1.1 Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) Yöntemi ile Yüzey Görüntülerinin Analizi.....	37
4.1.2 Elipsometre Tekniği ile Optik Özelliklerinin Karakterizasyonu ve Kalınlık Tespiti.....	42
4.1.3 X Işınları Kırınımı (XRD) Yöntemiyle Yapısal Özelliklerinin Karakterizasyonu.....	47
4.1.4 Raman Spektroskopisi Yöntemiyle Numunelerin Optik Karakteristiklerinin Belirlenmesi.....	50
4.1.5 Fotoluminesans Spektroskopisi Yöntemiyle Numunelerin Optik Karakteristiklerinin Belirlenmesi	55
4.2 PVP +%GaSe İnce Filmleri ile Üretilmiş Mikroelektronik Aygıtların Karakterizasyonu.....	61
4.2.1 Schottky Fotodiyotların Akım-Gerilim Karakteristikleri.....	61
4.2.2 Schottky Fotodiyotların Işık Altında Karakterizasyonu	65
4.2.3 PVP+GaSe İnce Filmleri ile Hazırlanan Alan Etkili Transistör Karakteristikleri	69
5.SONUÇ.....	70
KAYNAKLAR	73
DESTEKLEYENLER.....	75
EKLER.....	76
EK A.....	76
EK B.....	77
ÖZGEÇMİŞ	78

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler	Açıklama
A	Diyodun kontak alanı
A^*	Richardson sabiti
C	Santigrat
E_c	İletim bandı enerjisi
E_f	Fermi enerjisi (eV)
E_v	Değerlik bandı enerjisi
eV	Elektron Volt
ϕ_s	Yarıiletkenin iş fonksiyonu (eV)
ϕ_M	Metalin iş fonksiyonu (eV)
ϕ_B	Bariyer yüksekliği (eV)
I	Akım (A)
I_0	Saturasyon akımı (A)
J	Akım yoğunluğu (A/cm^2)
k	Boltzman sabiti
K	Kelvin
N	İdealite faktörü
q	Elektron yükü
I_{DS}	Kaynak-Akaç akımı
V_{DS}	Kaynak-Akaç gerilimi
V_{GS}	Kapı-Kaynak gerilimi

Kısaltmalar

DKV

GaSe

MOSFET

OFET

PL

PVP

SEM

XRD

Açıklama

Dış Kuantum Verimi

Galyum Selenid

Metal-Oksit -Yarıiletken Alan Etkili Transistör

Organik Alan Etkili Transistör

Fotoluminesans

Polivinilpirolidon

Taramalı Elektron Mikroskobu

X ışını Kırınımı

ŞEKİLLER DİZİNİ

	Sayfa
Şekil 2.1. Yalıtkan, yarı iletken ve iletken maddelerin enerji bant diyagramı	4
Şekil 2.2. Saf yarı iletkenlerde fermi seviyesi	5
Şekil 2.3. N tipi yarıiletkenlerde fermi seviyesinin gösterimi	6
Şekil 2.4. P tipi yarıiletkenlerde fermi seviyesinin gösterimi	7
Şekil 2.5. GaSe kristal yapısı	9
Şekil 2.6. PVP polimerinin kimyasal bağ yapısının gösterimi	11
Şekil 2.7. Schottky diyot yapısı ve enerji bant diyagramı.....	11
Şekil 2.8. Bant enerji diyagramları ve termiyonik emisyon iletim mekanizmasının modellenmesi	16
Şekil 2.9. MOSFET yapısı ve terminallerinin gösterimi.....	19
Şekil 2.10. OFET 'lerde kontakların konumuna göre aygıt üretim yapıları	22
Şekil 3.1. Bridgman Yöntemi ile GaSe Sentezi	23
Şekil 3.2. Kullanılan ultrasonik cihazının genel görünümü.....	24
Şekil 3.3. PVP+%GaSe içeren deney tüpleri	25
Şekil 3.4. Maske yardımıyla altın Schottky ve transistör kontaklarının alınması.....	26
Şekil 3.5 Üretilen transistör mikroelettronik aygıt yapısı	27
Şekil 3.6 Üretilen Schottky Fotodiyot yapısı	27
Şekil 3.7. SEM cihazının genel görünümü	28
Şekil 3.8. Elipsometre çalışma prensibi şematik gösterimi	29
Şekil 3.9. Elipsometre ölçümlerinde dedektörden veri analizi	30
Şekil 3.10. Elipsometre kullanımında veri analizi algoritması	31
Şekil 3.11. Elipsometre cihazının genel görünümü	32
Şekil 3.12. Bragg yasası ışın şeması	33
Şekil 3.13. Tipik bir XRD cihazının çalışma prensibi şeması	33
Şekil 3.14. XRD cihazının genel görünümü	34
Şekil 3.15. Raman Spektroskopisi Çalışma Prensip Şeması.....	35
Şekil 3.16. PL Spektroskopisi Cihazının Genel Görünümü.....	35
Şekil 4.1. Saf PVP içeren Numunenin 100 µm Ölçekte SEM Görüntüsü	37
Şekil 4.2. PVP+ %1 GaSe içeren numunenin 200µm ölçekte SEM görüntüsü.....	38
Şekil 4.3. PVP +%1 GaSe numunesindeki katmanlı yapı ve boyutları	38
Şekil 4.4. PVP + %3 GaSe numunesinin 100 µm ölçekte SEM yüzey görüntüsü.....	39
Şekil 4.5. PVP +%3 GaSe Numunesindeki Katmanlı Yapı ve Boyutları	39
Şekil 4.6. PVP + %5 GaSe Numunesinin 100 µm Ölçekte SEM Yüzey Görüntüsü	40
Şekil 4.7. PVP +%5 GaSe Numunesindeki Katmanlı Yapı ve Boyutu	40
Şekil 4.8. Külçe GaSe örneğinin SEM görüntüsü.....	41
Şekil 4.9. Katmanlı yapının enine kesit görünümü ve kalınlıkları.....	41
Şekil 4.10. Numunelerin Dalgaboyuna Bağlı olarak Kırılma İndisi Değişimleri	42
Şekil 4.11. Saf PVP numunesi için faz değişim grafiği	43
Şekil 4.12. Saf PVP numunesi için genlik değişim grafiği	44
Şekil 4.13. PVP + %1 GaSe numunesinin faz değişim grafiği	44
Şekil 4.14. PVP + %1 GaSe numunesinin genlik değişim grafiği	45
Şekil 4. 15. PVP + %1 GaSe numunesinin faz değişim grafiği	45
Şekil 4.16. PVP + %3 GaSe numunesinin genlik değişim grafiği	46
Şekil 4.17. PVP + %5 GaSe numunesinin faz değişim grafiği	46
Şekil 4.18. PVP + %5 GaSe numunesinin genlik değişim grafiği	47
Şekil 4.19. Numunelerin ve külçe GaSe örneğinin XRD karakteristik pikleri	48

Şekil 4.20. Numunelerin ve külçe GaSe örneğinin FWHM değerleri	49
Şekil 4.21. Numunelerin ve külçe GaSe örneğinin tanecik boyutu grafiği.....	49
Şekil 4.22. Sadece PVP içeren numunenin üç noktadan alınmış Raman karakteristik pikleri	50
Şekil 4.23. PVP + %1 GaSe numunesinin üç noktadan alınmış Raman karakteristik pikleri	51
Şekil 4.24. PVP + %3 GaSe numunesinin üç noktadan alınmış Raman karakteristik pikleri	52
Şekil 4.25. PVP + %5 GaSe numunesinin üç noktadan alınmış Raman karakteristik pikleri	53
Şekil 4.26. Külçe GaSe numunesinin üç noktadan alınmış Raman karakteristik pikleri	54
Şekil 4.27' de PVP+GaSe ve külçe GaSe örneğinin raman spektrum grafiği gösterilmiştir.	55
Şekil 4.27. PVP+ GaSe ve külçe GaSe örneğinin raman spektrum grafikleri	55
Şekil 4.28. Sadece PVP içeren numunenin üç noktadan alınmış PL spektrum grafiği...	56
Şekil 4.29. PVP + %1 GaSe numunesinin üç noktasından alınan PL spektrum grafiği .	57
Şekil 4.30. PVP + %3 GaSe numunesinin üç noktasından alınan PL spektrum grafiği .	58
Şekil 4.31. PVP + %5 GaSe numunesinin üç noktasından alınan PL spektrum grafiği .	59
Şekil 4.32. Külçe GaSe numunesinin üç noktasından alınan PL spektrum grafiği.....	60
Şekil 4.33. PVP+GaSe ve külçe GaSe örneğinin PL spektrum-enerji grafiği	60
Şekil 4.34. Sadece PVP içeren numunenin akım- gerilim karakteristik grafiği ve lineer bölgeden alınmış In I-V grafiği.....	61
Şekil 4.35. PVP + %1 GaSe numunesinin akım- gerilim karakteristik grafiği ve lineer bölgeden alınmış In I-V grafiği.....	62
Şekil 4.36. PVP + %3 GaSe numunesinin akım- gerilim karakteristik grafiği ve lineer bölgeden alınmış In I-V grafiği.....	62
Şekil 4.37. PVP + %5 GaSe numunesinin akım- gerilim karakteristik grafiği ve lineer bölgeden alınmış In I-V grafiği.....	63
Şekil 4.38. GaSe içeren üç numunenin yarı logaritmik akım -gerilim grafiği.....	64
Şekil 4.39. Sadece PVP içeren numunenin değişken ışık şiddeti altında kısa devre akımı-zaman grafiği.....	65
Şekil 4.40. PVP+ %1 GaSe numunesinin değişken ışık şiddeti altında kısa devre akımı-zaman grafiği.....	66
Şekil 4.41. PVP+ %3 GaSe numunesinin değişken ışık şiddeti altında kısadevre akımı-zaman grafiği.....	67
Şekil 4.42. PVP+ %5 GaSe numunesinin değişken ışık şiddeti altında kısa devre akımı-zaman grafiği.....	67
Şekil 4.43. Transistör yapılarının akım- gerilim karakteristiği	69

ÇİZELGELER DİZİNİ

Sayfa

Çizelge 2.1. İki boyutlu yarıiletkenlerin bant aralığı değerleri ve bant geçiş özellikleri .	8
Çizelge 2.2. GaSe iki boyutlu yarıiletkeninin bazı özellikleri	9
Çizelge 2.3. PVP polimerinin bazı özellikleri.....	10
Çizelge 2.4. Omik ve Doğrultucu Kontak Oluşma Koşulları	12
Çizelge 4.1. Bazı dalgaboylarında kırılma indisi değerleri.....	43
Çizelge 4.2. GaSe içeren tüm numunelerin Raman piklerinin literatürdeki Ga ₂ Se ₃ ve Ga ₂ O ₃ karakteristik pikleriyle karşılaştırılması	54
Çizelge 4.3. Tüm schottky fotodiyotların lineer bölgesinden hesaplanan önemli diyot parametreleri	64
Çizelge 4.4. Tüm numunelerin I _{sc} -t grafiklerinden elde edilen bazı önemli optik parametreler.....	68

1. GİRİŞ

Birçok iki boyutlu (2B) materyal, tabakalar arası zayıf etkileşim bağlarına sahip külçe durumunda bulunmasına rağmen eksfoliasyon yöntemleriyle atomik kalınlıklara kadar ayrılabilirler. Son yıllarda araştırmacıların dikkatini çeken en önemli materyal şüphesiz grafen olmasına rağmen grafenin bant aralığı olmadığı için ve özellikle optik uygulamalarda kullanım zorluğu gösterdiği için araştırmacılar yeni iki boyutlu malzemelere yönelmiştir. İki boyutlu yarıiletkenlerin FET'lerde yarıiletken olarak kullanımını silisyuma nazaran daha iyi yapısal stabilite ve daha yüksek mobilite kazandırmaktadır (Wang ve ark. 2012).

İki boyutlu yarı iletkenler tek tabaka haline getirdiklerinde bant aralığı ve direkt- direkt olmayan geçişli durumları da değişmeye uğramaktadır. Çoğu iki boyutlu yarıiletken tek tabaka haline getirildiğinde direkt bant geçişli duruma gelmektedir. Bu özelliğinden dolayı külçe formlarından tabakalar haline getirilen iki boyutlu yarı iletkenler optik ve elektronik uygulamalar için daha elverişli olmaktadır. Ayrıca atomik ölçeklere indirgenen tabakalı iki boyutlu yarıiletkenler, kanal materyali olarak FET lerde kullanımını araştırmacılar tarafından sıklıkla tercih edilmektedir. Geleneksel silisyum, germanyum gibi külçe yarıiletkenlerin aksine ikiboyutlu yarı iletkenlerin tabakalar halinde oluşturulup mikroelettronik uygulamalarda kullanımını boyut, incelik ve düzgün dağılımlı yüzey gibi parametreler açısından daha avantajlıdır. Bu avantajlar, mikro elektronik yapılarda tuzak oluşumu ve taşıyıcı saçılması gibi etkenlerin negatif etkilerini de bastırır (Cao ve ark. 2015, Gusakova ve ark. 2017).

İki boyutlu yarıiletkenler ailesinden biri olan GaSe özellikle doğrusal olmayan optik uygulamaları için bünyesinde önemli özellikler barındıran bir yarıiletken materyaldir. Bu özellikler arasında geniş iletim aralığını ve yüksek değerde doğrusal olmayan optik katsayısını gösterebiliriz. Yıllarca kendine geniş bir araştırma alanı bulmuş olan GaSe mekanik sınırlamalardan dolayı günümüzde de araştırmacıların odağı haline gelmiştir. GaSe'nin yığınlar halinde bulunan ve bu yığınlar arasında zayıf Van der Waals bağlarıyla etkileşim halinde bulunan tabakaları mekanik eksfoliasyon süreci için kolaylık sağlamaktadır. Ayrıca GaSe kristalleri anizotropik bir oluşum sergilerler bunun nedeni

ise kristalin yapısında bulunan atomların kuvvetli bağlanma yapması iken tabakalar arası etkileşimin zayıf bağlar ile sağlanmasıdır. Çok ince GaSe tabakaları buhar faz biriktirme ve epitaksiyel büyütme yöntemleriyle elde edilebilir. Bununla beraber GaSe tabanlı aygıtlar, alan etkili transistörler (FET), fotodiyot, fototransistör ve fotodedektör gibi mikroelektronik yapılarda kendine kullanım alanı bulmaktadır (Ertap ve ark. 2019, Huang ve ark. 2015, Tiwari ve Syväjärvi 2016, Voevodin ve ark. 2004).

Son yıllarda iki boyutlu yarıiletkenlerle polimerlerin katılanmasıyla oluşan kompozit yapılar, materyalde gerinim transfer verimliliğini artırmak için araştırmacılara yeni bir çalışma alanı oluşturmuştur. Enkapsülasyon süreci, üretilmiş bir aygıt ya da yapının kimyasal, fiziksel ve biyolojik özelliklerinin korunmasını sağlar. İki boyutlu yarı iletkenlerle bir polimeri enkapsüle ettiğimizde, hem yarıiletken dış ortamdan gelebilecek degradasyon ve oksitlenme gibi zararlara karşı korunmuş olur hem de aygıt performansının stabil olması sağlanır.(Liu ve ark. 2019, Reksamunandar ve ark. 2017).

Bu tez çalışmasında enkapsüle polimeri olarak polivinilpirolidon (PVP) kullanılmıştır. PVP polar çözücülerde, suda iyi çözünen bir polimer olduğundan ve iyi enkapsüle olma özelliğinden dolayı tercih edilmiştir. İki boyutlu yarıiletken malzeme olarak GaSe, iyi optik ve elektriksel karakteristikler sergilediği için seçilmiştir. Öncelikli olarak etil alkol içinde çözünen PVP polimer maddesine %1, %3 ve %5 oranlarında mekanik eksfoliasyona uğratılmış ince GaSe tabakaları eklenerek sonikasyon sürecine tabii tutulmuştur.

Tez çalışması kapsamında PVP polimeri ile enkapsüle edilmiş GaSe iki boyutlu yarıiletkeni ince film olarak silisyum alttäşlar üzerine farklı GaSe yüzde konsantrasyonlarında kaplanmıştır. Kaplama yöntemi için döndürerek kaplama metodu tercih edilmiştir. Döndürerek kaplama sürecinde, alttäşlar üzerine kaplanan ince filmler için döndürme hızı ve döndürme süresi gibi parametrelere bağlı olarak birtakım optimizasyonlar gerçekleştirilmiştir.

Üretilmiş ince filmlerin optik karakteristikleri ve elektriksel karakteristikleri analiz edilmiştir. Optik karakteristikler için Raman spektroskopisi ve Fotoluminesans spektroskopisi, kalınlık tayini ve kırılma indisi analizleri için Elipsometre cihazı, yüzey morfolojisinin görüntülenmesi için Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM), numunelerin

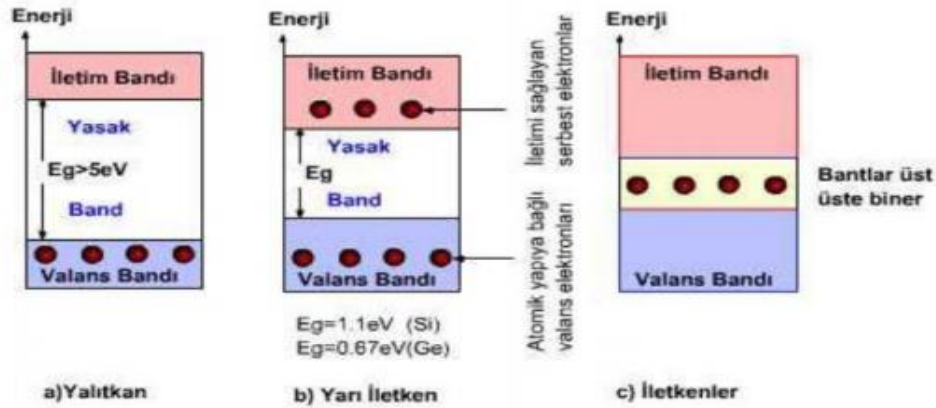
yapısal ve optik karakteristikleri için X ışınları kırınımı (XRD) cihazıyla analizler yapılmıştır. Elektriksel karakteristik analizleri için üretilmiş olan ince filmlere Schottky kontaklar ve transistör yapısı için de kaynak-savak kontakları uygun maskelerle alınarak fiziksel buharlaştırma yöntemiyle altın metali kullanılarak alınmıştır. Sonrasında elektriksel karakteristik analizleri Schottky diyot kontaklarıyla alınan karanlık ortamda akım-gerilim ve ışık altında kısa devre akımı-zaman parametreleriyle belirlenmiştir. Karanlık ortamda alınan akım -gerilim eğrisinden termiyonik emisyon teorisi temel alınarak idealite, saturasyon akımı, bariyer yüksekliği ve doğrultma oranı gibi parametreler hesaplanmıştır. Aydınlık ortamlarda alınan ölçümlerden ise yükselme süresi, düşme süresi, fotocevap, dış kuantum verimi ve alıcılık parametreleri hesaplanmıştır. Transistör akım -gerilim karakteristiği için karanlık ortamda kapı terminaline voltaj uygulanmaksızın kaynak- savak arası akım ve gerilim grafiği gösterilmiştir.

Tez çalışmasının ikinci bölümünde yarıiletkenler, iki boyutlu yarı iletkenler, akım iletim mekanizmaları, alan etkili transistörler (FET) ve Schottky diyotlar üzerine literatürde taranmış teorik bilgiler verilmiştir. Üçüncü bölümünde hazırlanan PVP + % GaSe ince filmlerinin kaplanması, uygun kontakların alınması, deneysel prosedürler ve analiz yöntemleri hakkında açıklamalar verilmiştir. Dördüncü bölümünde optik karakteristik analizlerin ve elektriksel karakteristik analizlerinin sonuçları verilmiştir. Beşinci bölümde ise bu sonuçlar yorumlanarak tartışılmıştır.

2. KURAMSAL TEMELLER VE KAYNAK ARAŞTIRMASI

2.1 Yarıiletkenler

Elektriksel iletkenlikleri ve bant yapısı özellikleri göz önünde bulundurularak doğada bulunan materyaller iletken, yarıiletken ve yalıtkan olarak sınıflandırılabilir. Yarıiletkenler adından da anlaşılacağı üzere elektriği iletme açısından iletken ile yalıtkan arasında davranış gösteren materyallerdir. Doğada en çok miktarda bulunan yarıiletken silisyumdur. Yarıiletken elementlere Si (Silisyum)' yi ve Ge (Germanyum)' yi örnek olarak verebiliriz. Yarıiletkenlerin bileşik şeklinde yapıları da mevcuttur. Örneğin, GaAs, InP vb. Aynı zamanda InGaAs, AlGaAs gibi üçlü veya InGaAsP gibi de dörtlü alaşım şeklinde de bulunabilir. Si ve Ge son yörüngelerinde (valans) 4 elektron bulundurur. Yarıiletkenlerde, iletkenlerde olmayan bir yasak bant bölgesi mevcuttur ve bu bölge bant aralığı olarak (bandgap) isimlendirilir. Normal halde yarıiletkenler yalıtkan gibi davranırken ısı, ışık veya elektrik alanın etkisiyle iletken duruma geçebilirler. Yarı iletkenlerde valans bant, iletkenlik bandı ve yasak enerji aralığı mevcuttur. Valans banttaki elektronlar bir uyarım sayesinde iletkenlik bandına geçiş yaparsa ancak iletkenlik özelliği kazanacaktır. Mutlak sıfır noktasında yarıiletkenlerde valans bant tamamıyla doludur ve iletkenlik bandı ise tamamen boştur. Ancak minimum bu bant aralığı değeri (E_v) kadar bir enerji verilirse iletkenlik bandına geçen elektronlar sayesinde iletkenlik sağlanmış olacaktır. Aşağıdaki şekilde iletkenlerin, yarıiletkenlerin ve yalıtkan materyallerin enerji bant diyagramı gösterilmiştir.



Şekil 2.1. Yalıtkan, yarı iletken ve iletken maddelerin enerji bant diyagramı (Baraklı 2018)

2.1.1 Saf Yarıiletkenler

İçine herhangi bir katkılama işlemi (doping) yapılmamış yarıiletkenlerdir. Bu tip yarıiletkenlerde içerisinde bulunan elektron yoğunluğu, deşik yoğunluğuna eşittir. Yarıiletkenlerde aşağıda gösterilen eşitlik ile elektron durum yoğunluğu ya da deşik durum yoğunluğu hesaplanabilir. Örneğin, saf silisyum için bu değer $n=p=9,5 * 10^{11} \text{cm}^{-3}$ dolaylarındadır. (Sze,2012)

$$n_i^2 = n \cdot p \quad (2.1)$$

Aşağıdaki şekilde saf yarı iletkenin enerji bant diyagramı ve fermi seviyesi gösterilmiştir. Fermi seviyesi bant aralığının tam ortasında bulunmaktadır.



Şekil 2.2. Saf yarı iletkenlerde fermi seviyesi

2.1.2 Katkılı Yarıiletkenler

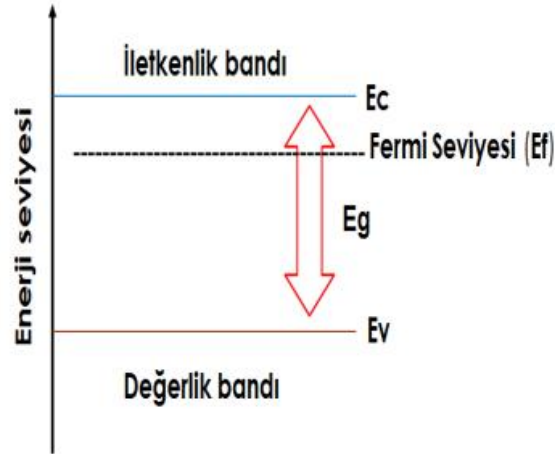
Saf bir yarıiletkenin içine yarıiletkeni p ya da n tipi bir yarı iletkene dönüştürmek amacıyla yapılan işleme katkılama işlemi denir. Katkılı yarı iletkenler malzeme içindeki deşik ve elektron taşıyıcılarının durum yoğunluğu, saf yarıiletkendeki taşıyıcıların durum yoğunluğundan farklılık gösterir. Örneğin, saf silisyum yarıiletkenine 3A grubunda bulunan Boron elementi katkıladığımızda deşik sayısını artırmış olacağımızdan p tipi karakteristikli bir yeni yarı iletken oluşturmuş oluruz. Aynı mantıkla 5A grubunda bulunan fosfor elementini katkıladığımızda ise n tipi karakteristikli bir yarıiletken elde etmiş oluruz. Katkılı yarı iletkenler verilen örneklerden de anlaşılacağı üzere n tipi ve p tipi olmak üzere iki çeşittir.

2.1.3 N tipi Yarıiletkenler

N tipi yarı iletkenleri oluşturmak için katkılama işleminde donör (verici) atomların kullanılması gerekmektedir. Bu donör (verici) atomlar sayesinde yarıiletkendeki elektron sayısı artırılmış olacaktır. Böylelikle n tipi bir yarı iletken malzemede elektronların sayısı deşiklerin sayısından fazla olacaktır. Bu yüzden n tipi bir malzemede deşikler azınlık taşıyıcıları elektronlar ise çoğunluk taşıyıcıları konumunda olacaklardır. Bu farklılıktan doğan en önemli sonuç ise fermi seviyesinin konumunun değişmesi olacaktır. N tipi yarıiletken malzemelerde fermi seviyesi saf yarıiletkenlerde bulunan eski mesafesinden iletkenlik bandına doğru kayacaktır. Bu kaymanın matematiksel ifadesi aşağıdaki formülle ifade edilebilir.

$$EF = \frac{EC+EV}{2} + \frac{kT}{2} \ln\left(\frac{NV}{NC}\right) \quad (2.2)$$

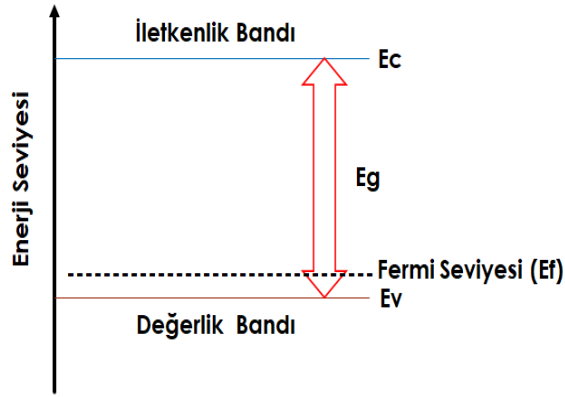
Bu eşitlikte k Boltzman sabiti, T Kelvin cinsinden sıcaklık değeri, NV değerlik bandı durum yoğunluğu, NC iletkenlik bandı durum yoğunluğu, EC iletkenlik bandı enerji değeri ve EV ise değerlik bandı enerji değeri. Aşğıdaki şekilde n tipi bir yarı iletkeninin fermi seviyesi gösterilmiştir.



Şekil 2.3. N tipi yarıiletkenlerde fermi seviyesinin gösterimi

2.1.4 P tipi Yarıiletkenler

P tipi yarıiletkenleri oluşturmak için katkılama işleminde alıcı (akseptor) atomların kullanılması gerekir. Alıcı (akseptor) atomları sayesinde yarıiletkende deşik konsantrasyonu artırılmış olacaktır. Bununla birlikte malzeme içindeki deşiklerin sayısı elektronların sayısından fazla olacaktır buda deşiklerin bir p materyal içinde çoğunluk taşıyıcı ve elektronların da azınlık taşıyıcıları olacağı söylenebilir. Yine fermi seviyesinin yasak bölgedeki orta hattan bir miktar değerlik bandına doğru kaydığını söyleyebiliriz. P tipi malzeme katkılamaya örnek verecek olursak saf silisyum yarı iletkenine boron katkılırsak deşik konsantrasyonunu artırmış oluruz. N tipinde Eşitlik 2.2' de fermi seviyesi değişimi veren matematiksel ifade p tipi yarıiletkenler içinde geçerlidir. Aşağıdaki görselde fermi seviyesinin p tipi yarıiletkende hangi seviyede bulunacağı verilmiştir.



Şekil 2.4. P tipi yarıiletkenlerde fermi seviyesinin gösterimi

2.2 İki Boyutlu Yarıiletkenler

İki boyutlu birçok malzeme, zayıf ara tabaka bağ çekiciliğine sahip katmanlar şeklinde yığın olarak bulunur ve bu özelliğinden ötürü mekanik eksfoliasyon (pul pul döktürme) işlemine yardımcı olur. Bilhassa, iki boyutlu yarıiletkenler elektronik, optik, termal, mekanik ve kimyasal özelliklerinden dolayı geniş bir ölçekte kendisine kullanım alanı bulmaktadır. (Qing Hua Wang 2012).

İki boyutlu yarı iletken çeşitlerine, GaSe, GaS, GaTe, MoS2 ve Grafen gibi materyalleri örnek olarak gösterebiliriz. Ayrıca TMDC (transition metal dichalcogenides) olarak

bilinen MX ve WX bileşik yapısındaki materyallerde iki boyutlu yarıiletken malzemelerdir. TMDC' lerde M(molibdenum) W(tungsten) temsil etmek üzere oluşturduğu yapılar MoS₂, WS₂, MoSe₂, WSe₂, MoTe₂ ve WTe₂ olarak gösterilebilir. Bu bahsedilen iki boyutlu yarı iletken bileşikler külçe (bulk) olarak direkt olmayan bant aralığına sahip olsalar da tek tabaka (monolayer) durumuna geldiklerinde direkt bant aralığına sahip bir materyal olarak davranabilirler. Bu duruma örnek olarak MoS₂ yarıiletkeninin külçe olarak bant aralığı 1,3 eV ve direkt olmayan bir bant yapısına sahipken, tek tabaka durumunda 1,8 eV bant aralığına ve direkt bant yapısına sahiptir. Çizelge 2.1' de iki boyutlu yarıiletkenler ve bazı özellikleri verilmiştir.

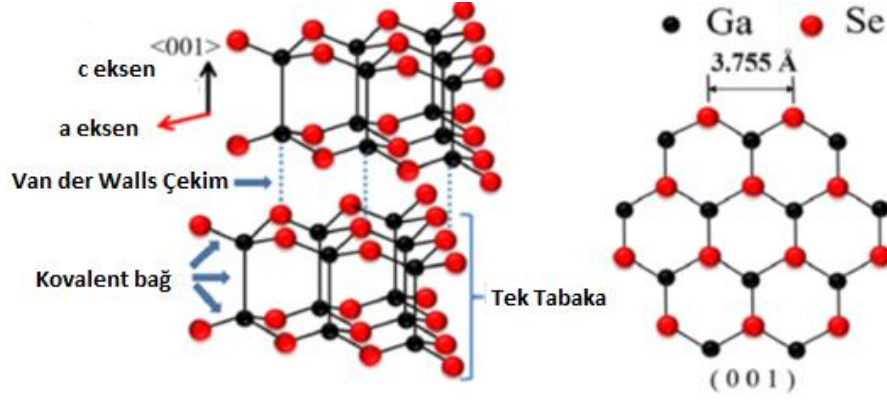
Çizelge 2.1 İki boyutlu yarıiletkenlerin bant aralığı değerleri ve bant geçiş özellikleri (Gusakova ve ark. 2017)

Materyal	Bant aralığı(külçe)	Bant aralığı (tek tabaka)	Direkt/Direkt olmayan bant yapısı (Külçe için)	Direkt/Direkt olmayan bant yapısı (tek tabaka için)
MoS ₂	1,30 eV	1,8 eV	Direkt olmayan	Direkt
MoSe ₂	0,87 eV	1,5 eV	Direkt olmayan	Direkt
GaSe	2,10 eV	2,34 eV	Direkt olmayan	Direkt
GaTe	1,67 eV	2,44 eV	Direkt olmayan	Direkt
GaS	1,61 eV	2,76 eV	Direkt olmayan	Direkt
WS ₂	1,32 eV	2,03 eV	Direkt olmayan	Direkt
WSe ₂	1,25 eV	1,67 eV	Direkt olmayan	Direkt

2.2 GaSe İki Boyutlu Yarıiletkeninin Özellikleri

GaSe iki boyutlu bir yarıiletken çeşidi olup yaklaşık olarak 2,1 eV bant aralığına sahip ve direkt olmayan bir bant geçişli materyaldir. GaSe yarıiletken kristali Se-Ga-Ga-Se atomlarının iki boyutlu tabakalar halinde üst üste yığılması ile oluşmaktadır. Tabakalar içindeki atomlar birbirlerine güçlü kovalent bağlarla bağlı iken tabakalar birbirlerine zayıf Van der Waals bağları ile bağlıdır. Tabakalar arası etkileşimin oldukça zayıf olması

yüzünden GaSe tek kristali tabakalar boyunca kolaylıkla ayrılabilir. (Hüseyin Ertap ve ark.2019) Aşağıdaki şekilde GaSe yarıiletkeninin kristal yapısı gösterilmiştir.



Şekil 2.5. GaSe kristal yapısı (Tang 2018)

GaSe yarı iletkeni büyütmek için çeşitli yöntemler mevcuttur. Bu yöntemleri Bridgman, yüksek basınçlı dikey bölge eritme metodu, sıvı faz ortamı, buhar biriktirme ve moleküler demetle büyütmeye şeklinde sıralayabiliriz (Ni ve ark. 2013). Büyütme koşulları ve parametrelerine bağlı olarak GaSe tek kristali p ve n tipi olarak elde edilebilmektedir (Shigetomi ve ark., 2000). GaSe iki boyutlu yarıiletkeninin kullanım alanlarına baktığımızda, optoelektronik uygulamalar, doğrusal olmayan optik ve terahertz deneylerinde mevcut olduğunu gözlemleyebiliriz. (Lei ve ark. 2013).

Çizelge 2.2 GaSe iki boyutlu yarıiletkeninin bazı özellikleri

GaSe	Özellikler
Kimyasal Formülü	GaSe
Moleküler Ağırlık	148,7 g/mol
Yoğunluk	5,03g/cm ³
Renk	Koyu Kırmızı
Erime Noktası	960°C

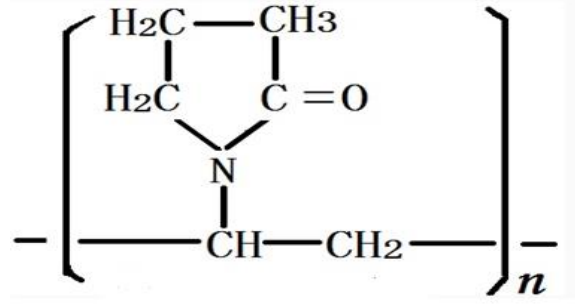
2.3 PVP Polimer Malzemesinin Özellikleri

Polivinilpirolidon (PVP) ilk olarak tarihte Walter Reppe tarafından sentezi yapılmıştır ve öncelikli olarak o tarihlerde kan plazmasının yerine kullanılmıştır. (Frank Fischer ve ark. 2009) PVP, vinylpyrrolidone monomerinden elde edilen ve konjuge olmayan bir sentetik polimerdir. Literatürdeki diğer isimlendirilmeleri polyvidone ve povidone şeklindedir. Vinilpirolidon, külçe, solüsyon ve süspansiyon olarak organik veya inorganik çözücülerde polimerize edilebilir. (Haaf ve ark. 1985) Suda ve polar çözücülerde örneğin metil ve etil alkolde kolaylıkla çözülebilmektedir. Şekil 2.6 'da PVP polimer maddesinin kimyasal bağ yapısı gösterilmiştir.

Çizelge 2.3. PVP polimerinin bazı özellikleri

PVP	Özellikler
Kimyasal Formülü	$(C_6H_9NO)_n$
Moleküler Ağırlık	2500-25000000 g/mol
Yoğunluk	1.2 g/cm ³
Görünüş	Açık sarı
Erime Noktası	150°C -180 °C

Şekil 2.6' da PVP polimer maddesinin kimyasal bağ yapısı gösterilmiştir.

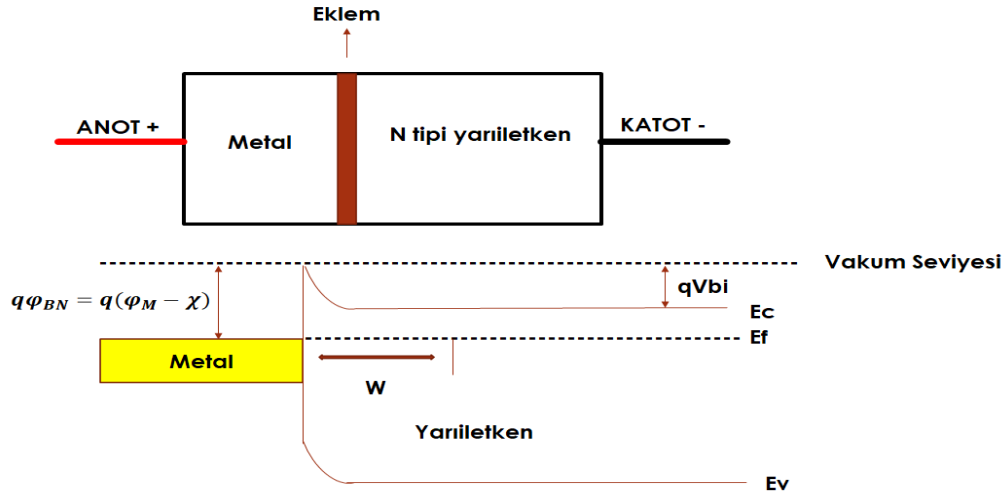


Şekil 2.6. PVP polimerinin kimyasal bağ yapısının gösterimi

2.4 Schottky Diyotlar

Schottky diyotlar adını Alman fizikçi Walter H. Schottky den alır ve literatürde bilinen diğer isimleri Schottky bariyer diyodu ve sıcak- taşıyıcı diyot şeklindedir. Schottky diyotlar en basit şekliyle bir yarı iletkenle metal arasında oluşan bariyer ile açıklanır. Seçilen metaller arasında en yaygın olarak kullanılanlar molibdenum, platinyum, tungsten, krom vb. metallerdir (Laughton ve Warne 2003). Diğer p-n eklemli diyotlardan ayrılan en önemli özelliği hızlı anahtarlama yapabilmesidir. Schottky diyotların en önemli dezavantajı ise ters beslemedeki kaçak akımın oldukça yüksek olmasıdır. Si tabanlı p-n diyotlarda gerilim düşümü 0,7 V dolaylarında iken aynı yarı iletkene sahip Schottky tip diyotlarda bu değer 0,15-0,45 V lara kadar düşebilmektedir (Sze 2012) .

Aşağıdaki şekilde Schottky diyot yapısı ve enerji bant diyagramı gösterilmiştir.



Şekil 2.7. Schottky diyot yapısı ve enerji bant diyagramı

Schottky diyotlarda fakirleşmiş bölge (deplezyon bölgesi) genişliği aşağıdaki eşitlikle verilir.

$$W = \sqrt{2\varepsilon_s(V_{bi} - V)/qN_D} \quad (2.3)$$

Bu eşitliğe göre ε_s yarıiletkenin dielektrik katsayısı, V_{bi} iç potansiyel, q birim yük, V uygulanan dış gerilim ve N_D ise yarıiletken deki taşıyıcı durum yoğunluğudur.

Schottky diyotları oluştururken metal ve yarı iletken seçimi oldukça önemlidir. Çünkü iş fonksiyonu dediğimiz kavram bize omik kontak ve doğrultucu kontak oluşturma seçeneğini verecektir. İş fonksiyonunun en basit şekliyle açıklaması, enerji bant diyagramları göz önüne alındığında, metal veya yarıiletkenden elektronu fermi enerji seviyesinden vakum seviyesine kadar getirmek için yapılan iş şeklinde olacaktır. Aşağıdaki çizelgede seçilen metalin ve yarıiletkenin iş fonksiyonlarına bağlı olarak oluşan kontak yapıları verilmiştir.

Çizelge 2.4 Omik ve Doğrultucu Kontak Oluşma Koşulları

İş fonksiyonu	Yarıiletken tipi	Oluşan Kontak Çeşidi
$\varphi_S > \varphi_M$	n	Omik Kontak
$\varphi_S < \varphi_M$	n	Doğrultucu Kontak
$\varphi_S > \varphi_M$	p	Doğrultucu Kontak
$\varphi_S < \varphi_M$	p	Omik Kontak

Çizelge 2.4' e göre n tipi bir yarıiletken ve metalin eklem oluşturduğu Schottky yapılarında yarıiletkenin iş fonksiyonu metalin iş fonksiyonundan yüksek ise kontak omik olur ve durum iş fonksiyonları açısından tam ters ise yani küçükse doğrultucu kontak olarak görev yapar. Aynı şekilde p tipi bir yarı iletkende, n tipi yarıiletkende gözlenen durumların tam tersi düşünülerek kontak oluşumu belirlenebilir.

2.4.1 N tipi Yarıiletken ve Metal Arasındaki Omik Kontak

N tipi bir yarı iletkenin iş fonksiyonu metalin iş fonksiyonundan büyükse omik kontak oluşacağını Çizelge 2.4' te görmüştük. Kontak oluşuktan sonra elektronların akış yönü metalden yarı iletkene doğru olacaktır ve metalden ayrılan bu elektronlar gerisinde pozitif yükler bırakacaktır. Metal tarafında pozitif yükler kalırken yarı iletken tarafında elektronların buraya hareketiyle negatif bir bölge oluşacaktır. Omik kontak oluşumunda yarıiletken bölgesinde bir engel ya da fakirleşmiş bölge bulunmayacaktır ve yarıiletken kısımda en yüksek dirençli bölge oluşacaktır. Bu tip kontaklarda akımın yönünün uygulanan voltajın yönünden bağımsız olduğunu söylemek mümkündür yani akım iki yönlü iletilir. Yarı iletkene pozitif bir gerilim uyguladığımızda ve metale de negatif bir gerilim uyguladığımızda metalde bulunan elektronlar negatif gerilim etkisiyle yarı iletkene çok kolay bir şekilde geçecektir.

2.4.2 N tipi yarı iletken ve Metal Arasındaki Doğrultucu Kontak

N tipi bir yarıiletkenin iş fonksiyonu metalin iş fonksiyonundan küçükse, Çizelge 2.4 e göre doğrultucu kontak oluşacağını söyleriz. Bu sefer elektronların akış yönü iş fonksiyonu düşük olan yarıiletkenden metale doğru olacaktır. Bu elektron akışı metal ve yarı iletkenin fermi seviyesi eşitlenene kadar devam edecektir. Yarıiletkenden akan elektronlar nedeniyle yarı iletken bünyesinde elektron yoğunluğu azalacaktır ve yarı iletkende pozitif yükler fazla olacaktır. Metal tarafına baktığımızda ise yarı iletkenden akan elektronlar nedeniyle negatif yük fazlalığı oluşacaktır. İşte bu yük fazlalıklarından dolayı yarı iletkenden metale doğru bir elektrik alan oluşacaktır. Bu elektrik alan bantlarda bükülmeye yol açacaktır. Aynı zamanda metal – yarıiletken arayüzeyinde bu yük fazlalıklarından kaynaklanan, bir bariyer (engel) de oluşacaktır. Aşağıdaki eşitlikte oluşan bu bariyer yüksekliği formülize edilmiştir.

$$\varphi_B = (\varphi_M - \chi_S) \quad (2.4)$$

2.4.3 P tipi Yarıiletken ve Metal arasındaki Omik Kontak

Yarıiletkenin iş fonksiyonunun metalin iş fonksiyonundan küçük olduğu durumu varsayarsak yarı iletkenin içindeki elektronlar yarı iletkenin arkalarında pozitif yük oluşturmak suretiyle metale doğru akarlar ve metal- yarı iletken arayüzeyinin metale bakan yüzünde elektron fazlalığı oluştururlar. Bu sayede gerilim yönüne bağlı olmaksızın akım çift yönlü olarak akacaktır buda omik kontak oluşturmak demektir. Omik kontaklarda direnç oldukça düşük olduğundan akımın akmasını sağlayan ideal bir ortam hazırlanmış olur. Omik kontaklarda çok fazla voltaj gereksinimi olmadan akım geçirilebilir. (Milnes 1972)

Yarı iletken tarafına baktığımızda ise elektronlar metal tarafına geçtiği için deşik konsantrasyonu oldukça artmış olacaktır. Bu deşikler difüzyon teorisine uygun olarak metale doğru geçmek isteyecektir ve geçecektir. Aynı şekilde metalde bulunan elektronlar da difüzyon teorisine göre yarıiletkenine geçmek isteyecektir ve geçecektir. Bu şekilde taşıyıcılar çift yönlü bir geçiş sağlayacaktır. Bu da metal – yarıiletken eklemının omik kontak özelliği göstermesini sağlayacaktır.

2.4.4 P tipi yarı iletken ve Metal Arasındaki Doğrultucu Kontak

Yarıiletkenin iş fonksiyonunun metalin iş fonksiyonundan büyük olduğu durumu ele alırsak, yarı iletken p tipi olduğu için fermi seviyesi değerlik (valans) bandına yakındır ve metalin fermi seviyesinin altında bir seviyededir. Bu durumda elektron akışı, yarıiletken ve metalin fermi seviyeleri eşitleninceye kadar metalden yarıiletkenine doğru olacaktır. Metalden ayrılan elektronlar yarı iletkenindeki deşiklerle birleşerek rekombinasyon sürecine katkıda bulunurlar. Buda yarı iletken p tipi olduğu için yani deşik konsantrasyonu fazla olduğu için elektronlarla birleştikten sonra alıcı (akseptor) atom şeklinde iyonize olurlar. Fermi seviyeleri eşit konuma geldikten sonra bu akış durur ve bununla birlikte bir bariyer oluşması beklenir. Bu bariyerin ifadesi aşağıdaki eşitlikte verilmiştir.

$$\varphi_B = E_S - \varphi_M \quad (2.5)$$

Bütün bu elektron akışının dengeye gelmesi sonucunda Eşitlik 2.5 doğru kabul edilecektir. Yarı iletken den metale doğru akan akımın ifadesi aşağıdaki şekilde olacaktır. Bu eşitlik aslında Schottky diyotların geleneksel akım ifadesidir.

$$I = I_0 \left(\exp \left(\frac{qV}{nKT} \right) - 1 \right) \quad (2.6)$$

Eşitlik 2.6 da bulunan I_0 saturasyon akımı olup ters beslemedeki sızıntı akımıdır. V uygulanan voltaj, n diyotun idealite faktörü, K Boltzman sabiti, T Kelvin cinsinden sıcaklık, q birim elektron yüküdür.

2.5 Akım İletim Mekanizmaları

2.5.1 Termiyonik Emisyon Teorisi

Akım iletim mekanizmalarından biri olan termiyonik emisyon teorisi, 1853 yılında Edmond Becquerel tarafından keşfedilmiştir. Termiyonik emisyon teorisi en basit ilkesiyle oluşan bir potansiyel engelden (bariyer) termal olarak indüklemeye yoluyla oluşan iletim mekanizmasıdır (Paxton 2013). Aslında termiyonik emisyon, sıcak bir yüzeyde deşiklerin veya elektronların salınması demektir. Termal enerji, materyalin iş fonksiyonundan büyük olduğunda meydana gelen ve yük taşıyıcılarına atfedilen bir iletim mekanizmasıdır. Schottky diyotlarda metal ile yarı iletken arasında bir potansiyel engel oluştuğu için bu akım mekanizmasıyla yaklaşım yapılabilir. İşte bu potansiyelden geçebilen elektronların oluşturduğu akım yoğunluğu aşağıdaki eşitlikle verilir.

$$J_s = \int_{E_F + q\phi_B}^{\infty} qV_x dn \quad (2.7)$$

Eşitlik 2.7 de verilenlere göre J_s akım yoğunluğu, V_x x iletim yönündeki taşıyıcının hızı ve q birim elektron yüküdür. Termiyonik emisyon teorisinde en önemli kanun olan Richardson kanununa göre herhangi bir katı materyalde atomdan atoma hareket etmekte serbest olan ve atom başına bir veya iki elektron bulunur ve literatürde bu durum "elektron denizi" olarak isimlendirilir. Bu elektronların hızı tekdüze olmaktan çok istatistiksel bir dağılıma sahiptir. İşte bu yaklaşımlardan yola çıkarak Richardson 1901

bölgesinde bir hareket meydana getirirken difüzyon olayı bu harekete zıt yönde bir yönelim gösterir. Deplesyon bölgesinde elektrik alan olmadığını varsayıp, örneğin bir p-n eklemi düşündüğümüzde n tarafında bulunan ve çoğunluk taşıyıcı durumunda bulunan elektronlar p tarafında bulunan ve azınlık taşıyıcı durumunda bulunan elektronlardan konsantrasyon olarak fazla olduğu için n taraftan p tarafa doğru difüze olacaktırlar. Aynı şekilde p tarafındaki deşiklerde n tarafa difüze olacaktırlar. Denge durumuna ancak buna zıt yönde oluşan bir elektrik alan etkisiyle oluşan karşı sürüklenme akımıyla geçilebilir. Aşağıdaki eşitliklerde deşikler ve elektronlar için difüzyon ve sürüklenme akım yoğunlukları ifadeleri verilmiştir.

$$J_{dif} = -qD_p \frac{dp}{dx} \quad (2.10)$$

Eşitlik 2.10' a göre J deşikler için akım yoğunluğunu temsil etmekte, D difüzyon katsayısını göstermekte ve son ifademiz de deşiklerin bir x yönü boyunca konuma göre türevini göstermektedir. Aynı ifadeyi elektronlar için yazarsak aşağıdaki denklem karşımıza çıkacaktır.

$$J_{dif} = +qD_n \frac{dn}{dx} \quad (2.11)$$

Eşitlik 2.11' e göre elektronlar için akım yoğunluğu gösterilmiştir ve ifadelerdeki pozitif ve negatif işaret yön belirtmek için kullanılır.

$$J_{sür} = q\mu_h p E \quad (2.12)$$

$$J_{sür} = q\mu_n n E \quad (2.13)$$

Eşitlik 2.12 ve 2.13 te sırasıyla deşikler ve elektronlar için sürüklenme akım yoğunlukları gösterilmiştir ve μ değerleri mobilite değerleri olup, bu da taşıyıcıların birim elektrik alandaki sürüklenme hızları anlamına gelmektedir. Bu iki fenomen literatürde Einstein ilişkisi denilen bir eşitlikle birbirleri ile ilintilidir.

$$\frac{D}{\mu} = \frac{kT}{q} \quad (2.14)$$

Bu eşitlikte μ mobilite olup, kt/q ifadesi de termal voltaj olan 0.0259 Volt değerine eşittir.

2.6 Alan Etkili Transistörler

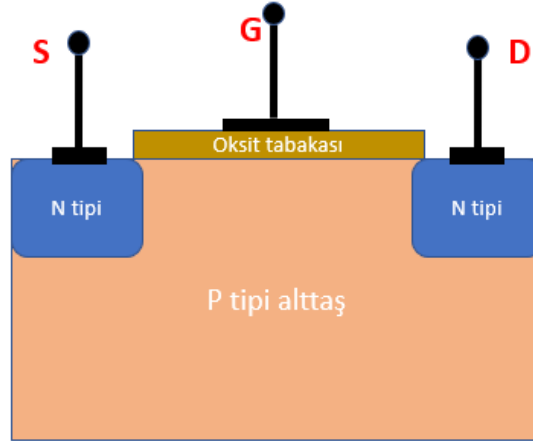
Alan etkili transistörlerin (FET) tarihsel olarak oluşturma sürecine baktığımızda, ilk olarak 1926 yılında Julius Edgar Lilienfeld tarafından patentinin alındığını söyleyebiliriz. 1934 yılında Oskar Heil'in çalışmalarıyla FET'ler alanında büyük gelişmeler yaşanmıştır. 1947 yılında Bell Laboratuvarlarındaki birçok bilim adamının çalışmasıyla ve elektrik alan etkisinin keşfiyle ilk JFET üretilmiştir. Bu arada alan etkili transistörler BJT tipi transistörlerden çok daha önce keşfedilmiştir.

FET' ler en basit ifadeyle, bir yalıtkan, metal(iletken) ve yarıiletken materyallerden oluşan elektronik bir yapıdır. Adından da anlaşılacağı üzere alan etkili transistörler olduklarından diğer BJT tip transistörlerden farklı olarak kapı terminaline (gate) kanalın n tipi veya p tipi olmasına bağlı olarak pozitif veya negatif bir voltaj uygulanarak çalışırlar. Kapı (gate)' ya uygulanan bu gerilim bir elektrik alan oluşturarak azınlık taşıyıcıları kendine doğru çekerek bir fakirleşmiş bölge yaratır ve bu bölge kanalın açılmasını sağlayarak transistörün çalışmasını sağlar. FET bileşeninin en büyük avantajı yüksek giriş direncidir. Bu direnç değeri yaklaşık 100 M Ω düzeyindedir. Bunun yanı sıra FET, voltaj kontrollü bir cihaz ve giriş-çıkış arası yüksek bir izolasyona sahiptir. Ayrıca kutupsuz bir cihaz olması sayesinde elektronik gürültü miktarı da az, radyasyona karşı da dayanıklı ve termal kapasitesi ise BJT' ye göre oldukça stabildir ve performans olarak BJT' ler den daha verimlidirler. Dezavantajları ise, bant genişliği BJT' ye göre daha dardır.

FET üretim yöntemlerine bakacak olursak, difüzyon tekniği ile, nokta kontak yöntemi, epitaksiyel teknik gibi üretim yöntemlerini sıralayabiliriz. FET' in kullanım alanlarına örnek verecek olursak opamplarda, karıştırıcı devrelerde, mantık devrelerinde, biyosensör uygulamalarında ve dijital anahtarlama devrelerinde sıklıkla kullanılırlar. Son yıllarda organik yarı iletken tabanlı FET'ler büyük bir çalışma alanı olmuştur ve şu an kullandığımız akıllı telefonlardan, televizyonlara hemen hemen her elektronik cihazda FET'lerin yer aldığı söylenebilir.

2.6.1 FET Yapıları

FET yapısı oluşturmak için önemli olan birçok parametre vardır. Örneğin, kanal uzunluğu, kanal genişliği, savak ve kaynak kontaklarının kalınlığı, kapı kontağının konumu ve kalınlığı gibi parametreler FET performansını etkileyecektir. Kanal genişliğinin fazla olması yük taşıyıcılarının (elektron ve deşiklerin) geçişini kolaylaştıracaktır ve bu da kaynak ve savak arasındaki akımın artmasını sağlayacaktır. Aşağıdaki şekilde bir FET çeşidi olan n kanal bir MOSFET yapısı gösterilmiştir. Bu yapıya göre kapı terminali oksit tabakası aracılığıyla izole edilmiştir. Bu oksit tabakasının amacı bir elektrik alan yaratarak kanalın açılması, genişlenmesi veya daralması gibi görevleri yerine getirmesidir. Bu tip n kanallı MOSFET lerde V_{GS} (kapı ve kaynak arası gerilim) ve V_{DS} (kaynak -savak arası gerilim) pozitif değerde ise kanal açılmaya başlayacaktır ve yük taşıyıcıları kanal vasıtasıyla kaynak terminalinden savak terminaline doğru akmaya başlayacaktır. Eğer V_{GS} geriliminin değerini pozitif yönde artırmaya devam edersek kanal açılmaya devam eder ve bir süre sonra yük taşıyıcıları doyuma giderek akım sabit kalır.



Şekil 2.9. MOSFET yapısı ve terminallerinin gösterimi

2.6.2 FET Karakteristikleri

Azalan ya da çoğalan tip fet lerde kaynak -akaç arası gerilim (V_{ds}), kapı ile kaynak arası gerilime (V_{gs}) oranla çok küçüktür. Kapı voltajını değiştirirsek, kanal direncinde de

değişme sağlanacaktır ve akıç- kaynak arası akım (I_{ds}) savak voltajıyla orantılı olacaktır. İşte bu çalışma modunda fet bir değişken direnç gibi davranır bu duruma lineer modda ya da omik modda çalışma denir (Galup-Montoro 2007). Ayrıca FET'lerin üç çalışma bölgesi vardır. Bunlar lineer bölge, saturasyon ve kesim (aktif olmayan) bölgelerdir.

FET'ler lineer bölge çalışma modundayken kapı-kaynak voltajı (V_{GS}), Veşik gerilimden büyüktür ve V_{DS} gerilimi de V_{GS} ' ye oranla küçük bir değerde olup bu bölgede transistör omik olarak çalışır. Saturasyon bölgesinde ise yine V_{gs} Veşik geriliminden büyüktür fakat lineer bölgenin aksine V_{DS} gerilimi V_{GS} geriliminden büyük olup kaynak akımı maksimum değerine ulaşmıştır. Kesim bölgesi transistörün çalışmadığı bölgedir. Bu bölgede V_{gs} gerilimi Veşik geriliminden küçük olduğu için ve V_{ds} voltaj değerinin büyüklüğüne bakılmaksızın I_d akımı 0' a eşit olacaktır ve kaynak- savak terminalleri arasında akım akmayacaktır. Bu üç çalışma bölgesinde farklı eşitlikler kullanılarak akım-gerilim değerleri arasında ilişki kurulur. Kısa bir ifadeyle, transistörün kesim bölgesinde çalışmamasını arzu edersek Veşik değerini aşan bir V_{GS} voltajı uygulamamız gerekecektir.

2.6.3 FET'lerde Akım-Voltaj Eşitlikleri

İlk olarak, n kanallı bir MOSFET için lineer bölgeyi inceleyecek olursak, I_d akımının V_d gerilimi ile lineer arttığını söyleyebiliriz. Bu durumda aşağıdaki eşitlik bize I_d akımını verecektir.

$$I_d = \frac{\mu_n W C_i (V_g - V_t) V_d}{L} \quad (2.15)$$

Eşitlik (2.15) 'te μ_n mobilitiyi, W kanal genişliğini, C_i kapı kapasitansını, V_g kapı voltajını, V_t eşik voltajını, V_d savak voltajını ve L ise kanal uzunluğunu göstermektedir. Direk olarak elektron mobilitisini hesap etmek istersek deneysel verilerden çizdirilmiş I_d - V_g grafiğinin eğiminden faydalanmamız gerekecektir. Aşağıdaki eşitliklerde mobilite ve iletkenlik ifadeleri verilmiştir.

$$\mu_n = \frac{L}{W C_i V_d} \frac{dI_d}{dV_g} \quad (2.16)$$

$$g_m = \frac{dI_d}{dV_g} = \frac{\mu_n W C_i V_D}{L} \quad (2.17)$$

Saturasyon bölgesindeki akım eşitliğini aşağıdaki gibi yazabiliriz. Eşitlik (2.18)' ye göre saturasyon bölgesinde çalışan bir fet için I_{dsat} akımının $(V_g - V_t)$ ifadesinin artmasıyla kuadratik olarak arttığını söyleyebiliriz. Bunun nedeni tersinim yüklerinin $V_g - V_t$ ifadesiyle artarak kanal uzunluğu boyunca maksimum potansiyel sağlamasıdır. (S.D. Brotherton, 2013) Eşitlik (2.19) da saturasyon bölgesindeki elektron mobilitesi ifade edilmiştir. Bu eşitlikte lineer bölgede uygulanan $I_d - V_g$ grafiğinin eğiminden yararlanılarak hesaplanan mobilite değeri saturasyon bölgesinde de aynı yaklaşımla ifade edilmiştir.

$$I_{dsat} = \frac{\mu_n W C_i (V_g - V_t)^2}{2L} \quad (2.18)$$

$$\mu_{nsat} = \frac{2L}{W C_i} \left(\frac{d\sqrt{I_d}}{dV_g} \right)^2 \quad (2.19)$$

$$g_{msat} = \frac{\mu_n W C_i (V_g - V_t)}{L} \quad (2.20)$$

2.7 Organik Alan Etkili Transistörler

Organik alan etkili transistörlerin (OFET) kullanımı, son yıllarda silikon tabanlı elektronik aygıtlarla karşılaştırılınca düşük maliyet, esneklik ve üretim kolaylığı gibi faktörlerden dolayı önem kazanmıştır. OFET' ler voltaj kontrollü ve MOSFET' le aynı terminalleri bulunduran (savak, kapı ve kaynak) bir transistör çeşididir. Silikon tabanlı üretilen diğer transistörlerin aksine OFET' ler birikim modunda (accumulation mode) çalışır. (Singh ve ark. 2020) Diğer transistörler için de önemli olan bazı parametreler OFET' ler için de önem arz eder. Örneğin; anahtarlama oranı, kanal uzunluğu, kanal genişliği, mobilite, oksit tabakasının kalınlığı, kontak için seçilen metaller ve oksit tabakası için materyal seçimi tasarım için oldukça anlam ifade eder. OFET' ler, kontakların konumuna göre 4 tip aygıt üretim yapısına sahiptir ve Şekil 2.10 'da bu aygıt yapıları gösterilmiştir.



Şekil 2.10. OFET 'lerde kontakların konumuna göre aygıt üretim yapıları

OFET' lerde aktif materyal olarak görev yapan kısım organik yarıiletkenidir. Organik yarıiletken birçok yöntemle ince film tabakası olarak kaplanabilir. Bu yöntemleri; döndürerek kaplama (spin-coating), daldırma yöntemi ile kaplama (dip-coating) ve yüksek vakum ile süblimasyon şeklinde sıralayabiliriz (Casalini ve ark. 2013). OFET'ler diğer FET yapıları gibi üç terminalden oluşur. Bunlar akaç, kaynak ve kapı terminalleridir. Yük transferi kaynak ve akaç arasındaki kanalda meydana gelir ve yük akışı devam ettiği sürece transistör aktif çalışma bölgesindedir denilir. V_d yani akaç terminalinde bir voltaj uygulamadığımızı farz edersek kanal boyunca yük dağılımı düzgün (uniform) dağılımlıdır. V_d yi artırdığımızda ise I_{DS} (kanal akımı) lineer olarak artacaktır. Bir süre sonra V_d ' nin artması kanal akımında saturasyona neden olacaktır ve kanal akımı hemen hemen sabit bir değerde devam edecektir. Lineer bölge ve saturasyon bölgesi için akım eşitlikleri aşağıda verilmiştir.

$$\text{Lineer bölgede;} \quad I_{DS} = \frac{W}{L} C_i \mu (V_{GS} - V_{th} - \frac{V_{DS}}{2}) V_{DS} \quad (2.21)$$

$$\text{Saturasyon bölgesinde;} \quad I_{DS} = \frac{W}{2L} C_i \mu (V_{GS} - V_{th})^2 \quad (2.22)$$

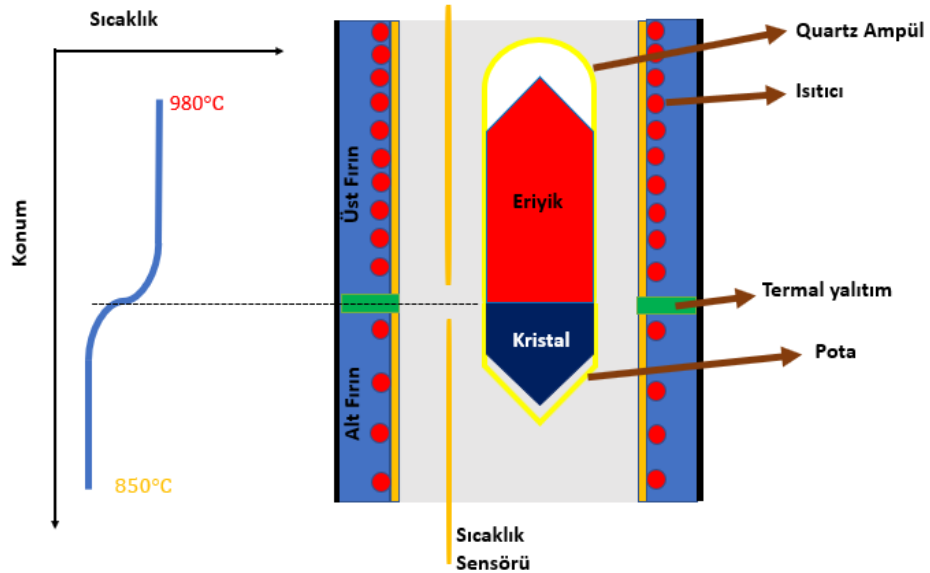
Bu yukarıdaki iki eşitlikte verilen parametrelere göre, W kanal genişliğini, L kanal uzunluğunu, V_{gs} kapı-kaynak voltajını, V_{th} eşik gerilim değerini, V_{ds} kaynak -savak voltajını, C_i birim alandaki kapasitans değerini ve μ ise mobilitayı temsil etmektedir.

3. MATERYAL ve YÖNTEM

3.1 Bridgman Yöntemi ile GaSe Sentezi

GaSe yarıiletkeni doğrusal olmayan optik materyaller sınıfında değerlendirilir. Özellikle son yıllarda elektriksel ve optik açıdan önemli bir potansiyele sahip olduğu için geniş bir araştırma alanı oluşturmuştur (T. Wang ve ark. 2018). GaSe sentezlemek için çeşitli yöntemler mevcuttur. Bridgman yöntemi ise diğer yöntemlere nazaran daha popüler ve kullanışlıdır. Bridgman yöntemi en basit ilkesiyle, polikristal bir malzemeyi erime noktasının üzerindeki bir sıcaklık noktasına kadar ısıtmayı ve tohum kristalinin bulunduğu kabının bir ucundan yavaşça soğutulması şeklinde ifade edilebilir.

Bu çalışmanın deneysel aşamalarında kullanılan GaSe Bridgman yöntemi ile sentezlenmiştir. Öncelikli olarak, 20 şer gram Galyum elementi ile Selenyum elementi quartz ampüle konulmuştur. Sonrasında ise bu karışım erime noktasının üstündeki bir sıcaklığa kadar fırın yardımıyla ısıtılmıştır. Fırın birbirinden bağımsız iki farklı sıcaklık değeri olan termal bölgelerden oluşmuştur. Birinci bölge 980°C sıcaklığa sahipken ikinci termal bölgenin sıcaklığı 850°C dolaylarındadır. Aşağıdaki şekilde Bridgman yöntemiyle üretme metodu gösterilmiştir.



Şekil 3.1. Bridgman Yöntemi ile GaSe Sentezi

3.2 PVP+%GaSe İnce Film Numunelerinin Üretilmesi

3.2.1 PVP Solüsyonunun Hazırlanması

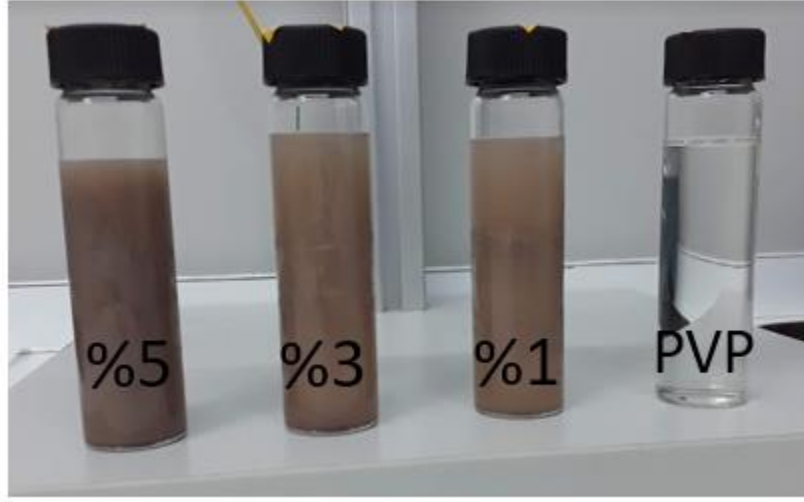
Öncelikle Sigma-Aldrich şirketinden alınan toz biçimindeki PVP polimeri hassas terazide her biri 1 gr olacak şekilde 4 ayrı numune için tartıldı. PVP polimeri su ve polar çözücülerde çok iyi ve hızlı şekilde çözünebilmektedir. Bu deneysel çalışmada etil alkol çözücü olarak tercih edilmiştir. Etil alkol oranı her 1 gr PVP için 20 ml olacak şekilde ayarlandı. Sonrasında manyetik karıştırıcı yardımıyla 50°C sıcaklıkta ve 600 devir/dk hızla 1 saat boyunca karıştırıldı.

3.2.2 GaSe Eksfoliasyonu ve Sonikasyon Süreci

Bridgman yöntemi ile üretilen GaSe bir bant yardımıyla eksfoliasyon sürecine tabi tutuldu. Bant yardımıyla çok ince yapılar oluşturulup, daha önce hazırlanmış 4 adet PVP-etil alkol solüsyonunun molar derişimine oranla %1 (10mg), %3(30mg) ve %5 (50mg) yüzdelerinde hassas terazi yardımıyla tartılarak deney tüplerine konuldu. Daha sonra ultrasonik karıştırıcı yardımıyla her deney tüpü 2 saat boyunca sonikasyon sürecine tabi tutuldu. GaSe ince tabakalarının oluşum süreci tamamlandıktan sonra sonikasyon süreci sona erdirildi. Şekil 3.2' de ve Şekil 3.3'de hazırlanan PVP + % GaSe ve sadece PVP çözeltilisi içeren 4 adet deney tüpü ve ultrasonik cihazının görseli gösterilmiştir.



Şekil 3.2. Kullanılan ultrasonik cihazının genel görünümü



Şekil 3.3. PVP+%GaSe içeren deney tüpleri

3.2.3 N tipi Silisyum Altaşların Kesilmesi ve Temizlenme İşlemi

Öncelikli olarak (110) yüzey oryantasyonlu bir yüzeyi parlatılmış ve 1-10 Ω .cm öz dirence sahip 400 μ m kalınlığındaki n tipi silisyum altaş optik ölçümler için 15mm x 15mm boyutlarında, transistör ölçümleri ve diyot ölçümleri için 20mm x 20mm boyutlarında elmas uçlu kalem yardımıyla kesildi. Daha sonra kesilmiş olan silisyum parçaları ultrasonik banyoya konularak sırasıyla aseton, izopropanol ve etil alkol ile 15 dk temizlendi. Daha sonra kendi kendine kurumaya bırakıldı.

3.2.4 Döndürerek Kaplama (Spin-Coating) Süreci

Döndürerek kaplama olarak bilinen alet (spin-coating) iyi ve kaliteli bir ince film kaplamak için birkaç önemli optimizasyon gerektirir. Bunlara örnek verecek olursak kaplama yapmak istediğimiz numune için dakikadaki devir hızı (rpm), döndürme hızı ve cihazın ne kadar çabuk rpm değerine ulaşması gibi parametreleri söyleyebiliriz. Bu çalışmanın döndürerek kaplama sürecinde uygun optimizasyon değerleri 500 rpm ve 40 sn olarak belirlendi. Kaplama yapmadan önce yüzeyin temiz olduğundan emin olunduktan sonra vakum motoruna bağlı olan cihaz çalıştırılarak gerekli parametreler cihaza girildikten sonra (dinamik döndürme, 500 rpm, 40sn), temizlenmiş ve kurutulmuş olan silisyum altaşlar sırasıyla cihazın üzerine konarak sadece PVP ve PVP + %1,3,5

GaSe deney tüplerinden alınan solüsyonlar her biri için farklı pipet kullanılarak ve her biri için aynı parametre değerleri geçerli olacak şekilde kaplama tamamlandı. Her kaplamadan sonra 30 dk süre ile numuneler kurumaya bırakıldı.

3.2.5 Omik Kontak Alınması

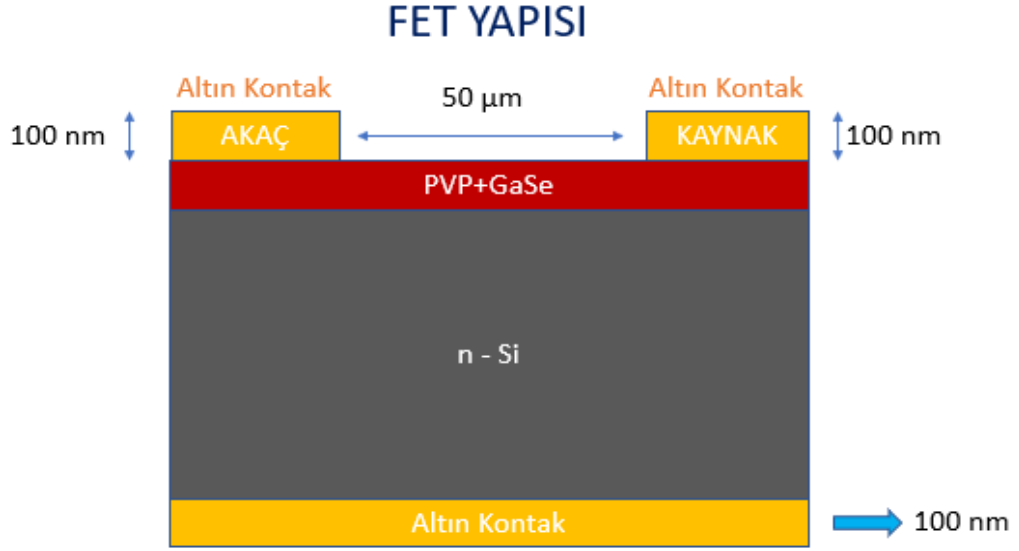
Kaplanmış olan numunelerin alt yüzeylerine %99,99 saflık derecesinde Au (Altın) metali kullanılarak termal buharlaştırma yöntemiyle 10^{-5} Torr basınç altında ve kaplama hızı ortalama olarak 0,5nm/s olan sistemde 100 nm kalındığında kontak alındı. Bu çalışma için, Uludağ Üniversitesi Fizik bölümündeki termal buharlaştırma cihazı kullanılmıştır. Kaplama işleminden sonra azot gazıyla birlikte 400 °C de 10 dk boyunca tavlandı. Bu işlem numunelerin alt kısmının yüzeyine tamamen alınmış (back-contact) işlemidir. Sonrasında numunelerdeki ince film kaplı yüzeylerin üzerine Schottky diyot ölçümleri için çapı 1mm olan 4 nokta kontak ve transistör ölçümü için de maske yardımıyla kanal uzunluğu 50µm olan savak-kaynak kontakları 100 nm kalınlığında aynı cihazla alındı. Kaliteli bir omik kontak oluşturmak istiyorsak bazı parametreleri optimize etmemiz gereklidir. Örneğin, potada bulunan metalin konumu ve buharlaşma hızı film üzerinde oluşturulan kontak kalitesini ve kalınlığını etkileyecektir.



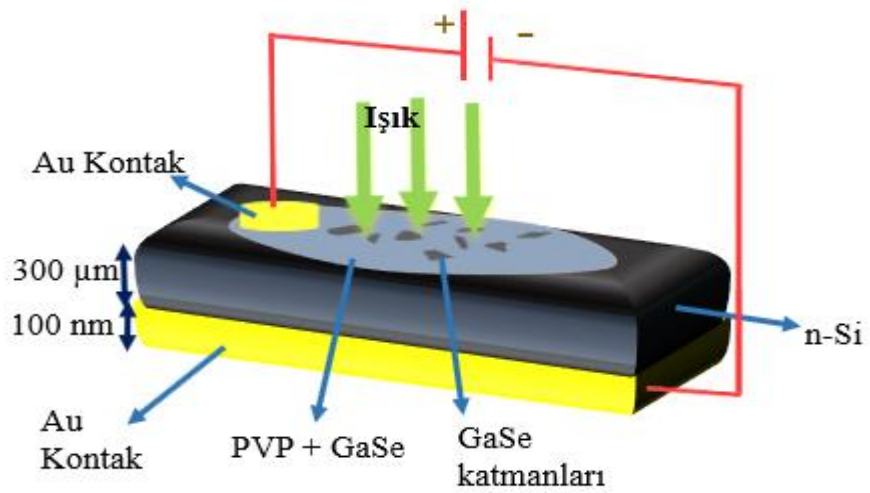
Şekil 3.4. Maske yardımıyla altın Schottky ve transistör kontaklarının alınması

3.2.6 Üretilen Mikroelektronik Aygıt Yapıları

Hazırlanan ince filmlerin yüzeyine Schottky kontakları ve akçe -kaynak kontakları (transistör) alınmıştır. Şekil 3.5' de ve Şekil 3.6 da oluşturulan transistör aygıt yapısı ve Schottky fotodiyot yapısı gösterilmiştir.



Şekil 3.5 Üretilen transistör mikroelektronik aygıt yapısı



Şekil 3.6 Üretilen Schottky Fotodiyot yapısı

3.3 Kullanılan Analiz Yöntemleri

3.3.1 Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM)

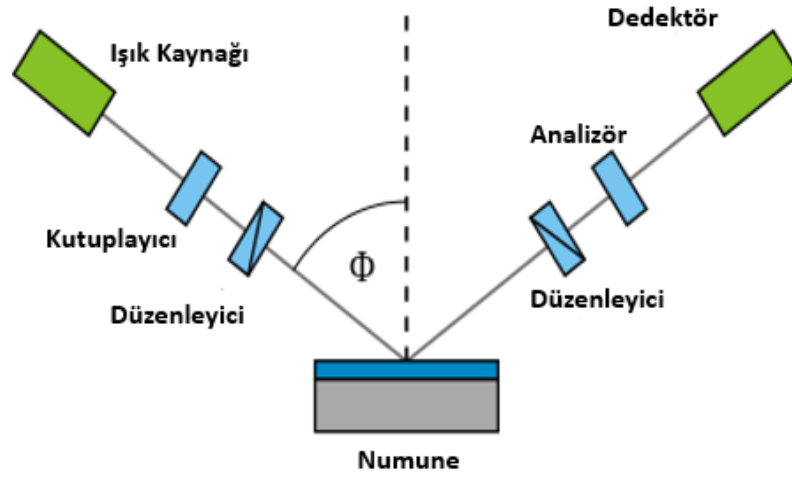
SEM görüntülemenin tarihçesine bakarsak birçok denemeden sonra Alman fizikçi Ernst Ruska ve Max Knoll x400 büyütme oranına sahip bir elektron mikroskopu prototipi oluşturdu. Bu gelişme elektron mikroskopunun temelini oluşturmuştur. Bir takım bazı gelişmelerden sonra 1937 yılında Manfred von Ardenne yüksek çözünürlükte bir elektron mikroskobu üretmeyi başarmıştır. Yıllar sonra gelişen araştırmalara bağlı olarak günümüzde üretilen SEM cihazları çok yüksek çözünürlüğe sahiptir. SEM görüntülemenin çalışma prensibine bakarsak, iki elektron tipinin detektöre ulaştığını söyleyebiliriz. Bunlar geri saçılmalı (backscattered electrons) elektronlar ve ikincil elektronlar (secondary electrons) dır. Geri saçılmalı elektronlar, gönderilen elektron demetiyle numune arasındaki etkileşimden sonra elastik çarpışma yaparak geri yansır. İkincil elektronlar ise numunedeki elektronlar olup gelen elektron demetiyle inelastik çarpışma yaparlar. Geri saçılmalı elektronlar numunenin derin bölgelerinde görülürken, ikincil elektronlar örneğin yüzey bölgelerinde görülür. Bu nedenle iki farklı bilgi detektöre ulaşacaktır ve geri saçılmalı görüntüleme atomik ölçekte ve hassas görüntüleme sağlarken, ikincil elektronların oluşturduğu görüntüleme ile yüzey daha iyi analiz edilebilecektir (P. Kruit, 2015). Şekil 3.7' de SEM cihazının genel görünümü verilmiştir.



Şekil 3.7. SEM cihazının genel görünümü

3.3.2 Elipsometre

Elipsometre hazırlanmış ince filmlerin dielektrik özellikleri ve kırıcılık indisi özelliklerini tespit etmek için kullanılan optik yöntemlerle çalışan bir cihazdır. Ayrıca Elipsometre cihazı yardımıyla pürüzlülük, film kalınlığı ve kompozisyon gibi parametreler de hesaplanabilir. Adından da anlaşılacağı üzere eliptik polarizasyon etkisi kullanılarak ölçümler gerçekleştirilir. Gönderilen ışığın malzeme üzerinde polarizasyon değişimi oluşturmasıyla ve malzeme içinde etkileşmesiyle ışık yansiyabilir, saçılabilir, iletilebilir ve soğurabilir. Polarizasyon değişimi genlik olarak Ψ ve faz farkı olarak Δ sembolüyle gösterilir. Şekil 3.8’ de elipsometrenin çalışma prensip şeması gösterilmiştir.



Şekil 3.8. Elipsometre çalışma prensibi şematik gösterimi

Elipsometre kompleks yansıma oranı sistemini kullanır. Gelen ışığın polarizasyonu numune üzerinde iki bileşen (s ve p) ile ilişkilendirilir. S bileşeni ışığın gelme düzlemine dik yani numune yüzeyine paralel olarak osile eden bir dalgayken, p bileşeni ışığın gelme düzlemine paralel şekilde osile eden bir dalgadır. Bu dalgaların yansıma oranı, genlik ve faz farkı ile ilişkisi aşağıdaki eşitlikle verilir.

$$\rho = \frac{r_p}{r_s} = \tan\Psi e^{i\Delta} \quad (3.1)$$

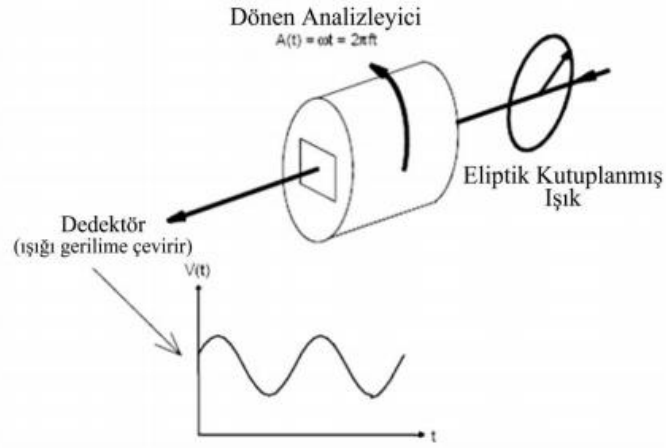
Ayrıca r_p ve r_s fresnel yansıma katsayıları da aşağıdaki eşitliklerle verilir.

$$r_p = \frac{N_1 \cos \varphi_0 - N_0 \cos \varphi_1}{N_1 \cos \varphi_0 + N_0 \cos \varphi_1} \quad (3.2)$$

$$r_s = \frac{N_0 \cos \varphi_0 - N_1 \cos \varphi_1}{N_0 \cos \varphi_0 + N_1 \cos \varphi_1} \quad (3.3)$$

Elipsometrede ayrıca yüzey haritası, homojensizlik oranı, yüzey düzgünsüzlüğü, arayüzey düzgünsüzlüğü, alayım yüzdesi, optiksel anizotropi ölçümü ve kristallenme ölçümü gibi parametreler de hesaplanabilmektedir (Woollam ve ark. 1999).

Elipsometre ölçümlerinde dedektörden veri analizi şematik diyagramı Şekil 3.9'da gösterilmiştir.

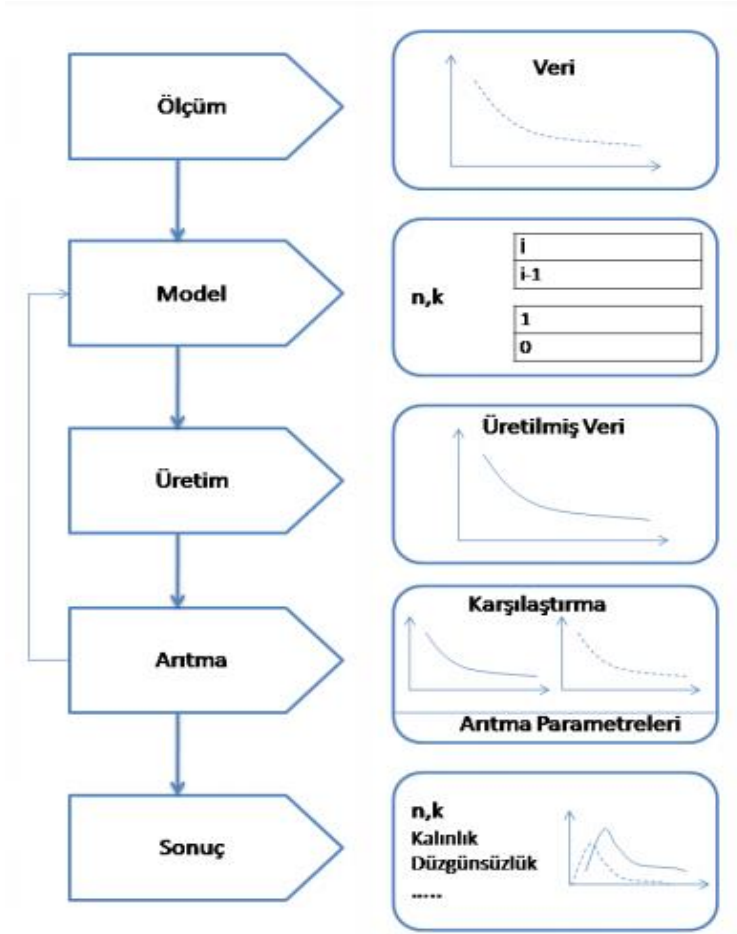


Şekil 3.9. Elipsometre ölçümlerinde dedektörden veri analizi (Uğuz 2017)

Değişken açılı elipsometreler de ölçüm almak için ve analiz yapmak için önemli birkaç parametre vardır. Bunları; analiz yönteminin belirlenmesi, ışığın geliş açısının belirlenmesi, spektral aralık seçimi ve model belirlemek şeklinde sıralayabiliriz. Analiz yönteminin belirlenmesi ilk adım olarak çok önemlidir. Örneğin, numuneden geçen ışığın şiddet analizi, numuneden yansıyan ışığın şiddet analizi, numunenin üstündeki kaplanmış ince filmde yansıyan ışığın elipsometrik analizi ve alttaş materyalinin alt tabakasından

yansıyan ışığın elipsometrik analizi gibi analiz yöntemleri belirlenmelidir. Geliş açısının belirlenmesi de analiz yönteminin belirlenmesi kadar önemli bir parametredir.

Elipsometrede veri analizi için oluşturulan algoritma Şekil 3.10' da gösterilmiştir. Şekil 3.8'de verilen algoritmaya göre ölçüm ve model belirlendikten sonra üretilen veriler arıtma ya da karşılaştırma sürecine tabi tutulur. Sonrasında daha önce belirlenmiş parametrelerin sonuçları alınır.



Şekil 3.10. Elipsometre kullanımında veri analizi algoritması (Uğuz 2017)

Şekil 3.11' de elipsometre cihazının genel görünümü verilmiştir.

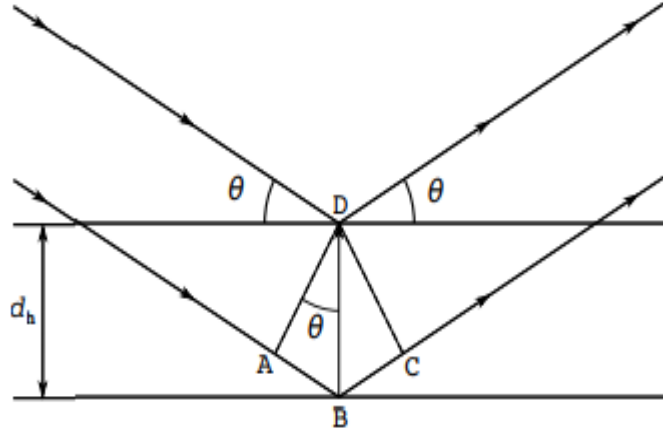


Şekil 3.11. Elipsometre cihazının genel görünümü

3.3.3 X Işınları Kırınımı (XRD)

X ışınlarının keşfinden sonra, çalışma prensibi olarak foton- madde etkileşimi ilkesine dayanan X ışınları kırınım metodu, her bir kristal içindeki fazların atomik dizilimlerine göre karakteristik bir düzen içinde ışığın kırılmasını sağlayan yöntemdir. Her kristal farklı bir yapıda veya profilde kırılma yapacağı için kristaller için özgün sayılabilecek bir yöntemdir. Ayrıca XRD spektrometresi ölçüm alınan numunede tahribata yol açmamaktadır ve çok az miktardaki materyalde bile düzgün sonuçlar vermektedir. XRD cihazı ile kristal boyutu, ince film veya toz şeklindeki materyaller, örgü parametreleri, kristal yapısındaki değişimler, kristal yönelmesi ve atom pozisyonları gibi parametreler hakkında bilgi sahibi olunabilmektedir. XRD metodunun günlük hayattaki uygulamalarına baktığımızda ise metal ve alaşım analizlerinde, seramik ve çimento sanayinde, polimerlerin analizinde, ilaç endüstrisi gibi alanları görebiliriz. XRD yönteminin çalışma prensibi Bragg yasası ile açıklanır. Aşağıdaki şekilde Bragg yasasının anlaşılması için bir ışın şeması gösterilmiştir.

Bu tez çalışmasında, Bilkent Üniversitesi UNAM merkezi laboratuvarlarında bulunan Pan-Analytical X'pert XRD Sistemi (Cu K-alpha/1.540598 Å) modeli ve uyarım dalgaboylu XRD cihazı ile ölçümler alınmıştır.



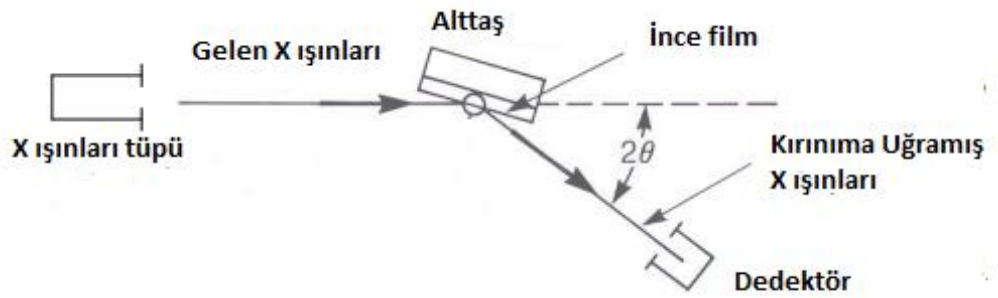
Şekil 3.12. Bragg yasası ışın şeması (Altomare ve ark. 2013)

Şekil 3.12'deki şemaya göre d_h düzlemler arası uzaklığı gösterirken $[AB] + [BC]$ optik yolunun ifadesi aşağıdaki gibi olacaktır.

$$[AB] + [BC] = 2d_h \sin\theta = n\lambda \quad (3.4)$$

Eşitlik (3.4)' ten aşağıdaki ifade de türetilir.

$$\frac{2\sin\theta}{\lambda} = \frac{1}{d_h} \quad (3.5)$$



Şekil 3.13. Tipik bir XRD cihazının çalışma prensibi şeması

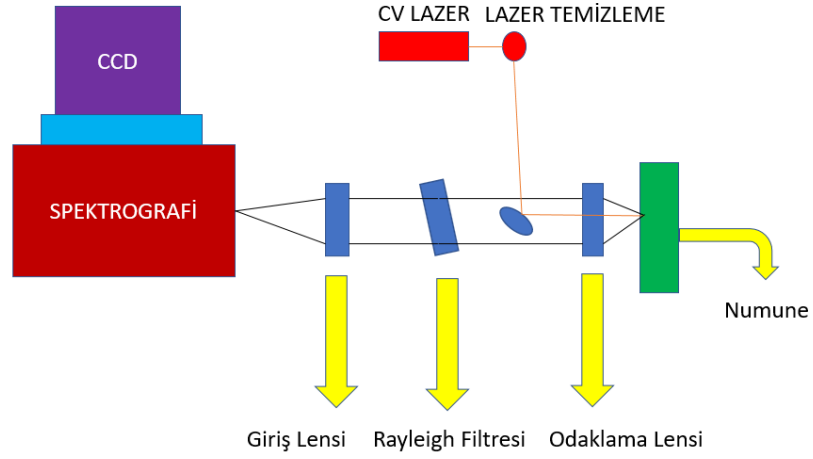
XRD cihazının genel görünümü Şekil 3.14' de verilmiştir.



Şekil 3.14. XRD cihazının genel görünümü

3.3.4 Raman ve PL Spektroskopisi

1928 yılında Hindistanlı fizikçi Raman tarafından raman spektroskopisinin temelleri atılmıştır. Raman güneş ışığını kaynak olarak, toplayıcı olarak teleskop ve dedektör olarak ta kendi gözlerini kullanmıştır. Daha sonra kullanılan ışık kaynakları ve dedektörler teknolojinin gelişmesiyle birlikte değişim göstermiştir. Raman spektrometresi, ışığın materyal ile etkileşime geçmesinden faydalanılan moleküler bir spektroskopik methodtur. FTIR spektrometresinin aksine raman spektrometresi dipol moment değişimleriyle ilgilenmez ve daha çok moleküldeki bağların polarize olunabilir değişimleriyle ilgilenmektedir. Materyale gelen ışık moleküllerle etkileştiğinde soğurma olmuyorsa saçılma meydana gelecek ve bu saçılmada gelen ışığın enerjisine eşit olan bir elastik saçılma gerçekleşmişse bu olaya Rayleigh saçılması denmektedir. Elastik olmayan bir saçılma meydana gelmişse bu olay Raman saçılması adını alır. Rayleigh saçılması tek bir pik verir ve titreşim geçişleri hakkında bilgi vermez. Raman saçılmasında ise çok sayıda pik alınabilme olanağı vardır ve Raman spektroskopisi ile moleküllerin enerji düzeyleri hakkında bilgi edinilebilir. Şekil 3.15' de raman spektroskopisinin çalışma prensip şeması gösterilmiştir.



Şekil 3.15. Raman Spektroskopisi Çalışma Prensi Şeması

Fotolüminensans spektroskopisi (PL) uygulama alanı olarak materyallerin optik ve elektronik karakteristiklerini belirlemek için kullanılan bir spektroskopi yöntemidir. Raman spektroskopisi ile birlikte değerlendirildiğinde materyal ya da numunelerin özellikleri hakkında epeyce bilgi edinilebilir. Bunun yanısıra PL ile yarıiletkenlerin bant aralığı (bandgap), safsızlık seviyesi, kusur saptama ve rekombinasyon mekanizmaları gibi birçok parametre değerlendirilebilir.

Bu çalışmada Bilkent Üniversitesi UNAM merkezinde WITEC Alpha 300R modelli PL spektroskopisi cihazı ile ölçümler alınmıştır. Şekil 3.16’ da PL cihazının genel görünümü verilmiştir.



Şekil 3.16. PL Spektroskopisi Cihazının Genel Görünümü

3.3.5 Akım -Gerilim (I-V) Karakteristiği

Akım gerilim karakteristiği, birçok mikro elektronik aygıt için önemli bir karakteristiktir. Diyot, foto diyot, solar hücre ve transistör gibi devre elemanlarının davranışını incelemek için kullanılan temel karakteristik metottur. Bunun yanı sıra yüzeyi ince film kaplı numuneler için de uygulanabilir. Bu çalışmada hazırlanmış olan ve yüzeyi PVP+ %GaSe ile kaplı olan dört adet numune için hem diyot karakteristiği hem de transistör akım gerilim karakteristiğini belirlemek için karanlık ve aydınlık ortamlarda ölçümler alınmıştır. Bu lmler için Uludağ Üniversitesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği bünyesinde bulunan ölçüm laboratuvarında Keithley 2400 modelli I-V cihazı ve ışık kaynağı olarak ta Fytronix FY-5000 modelli Solar simülatör cihazı kullanılmıştır.

3.3.6 Fotocevap Karakteristiği

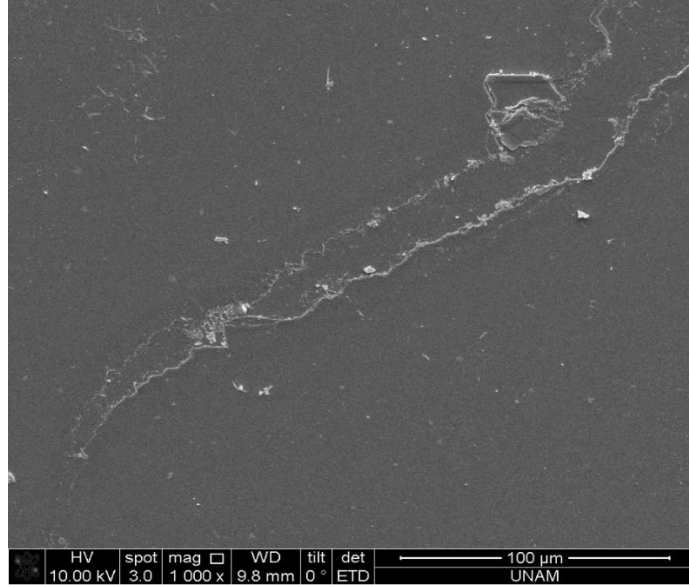
Fotocevap karakteristiği ışık altında aygıtın nasıl tepki verdiğini gözlemlemek için uygulanan bir ölçüm tekniğidir. Işık numune yüzeyine düştüğünde jenerasyon süreci rekombinasyon sürecinden baskın olacağından dolayı yük taşıyıcıların sayısı artacaktır ve buda akımın artmasına neden olacaktır. Işık şiddetini arttırdığımızda buna paralel olarak akımında arttığını gözlemleyebiliriz. Bu çalışmada hazırlanmış ve kontakları alınmış dört adet numune için 20mW ‘tan 100mW ‘a kadar 20 mW adım ışık şiddeti ile ışık altında tutulup ölçümler alınmıştır. Bu ölçümlerde kısa devre akımı-zaman ($I_{sc}-t$) karakteristiği belirlenmiştir.

4.BULGULAR VE TARTIŞMA

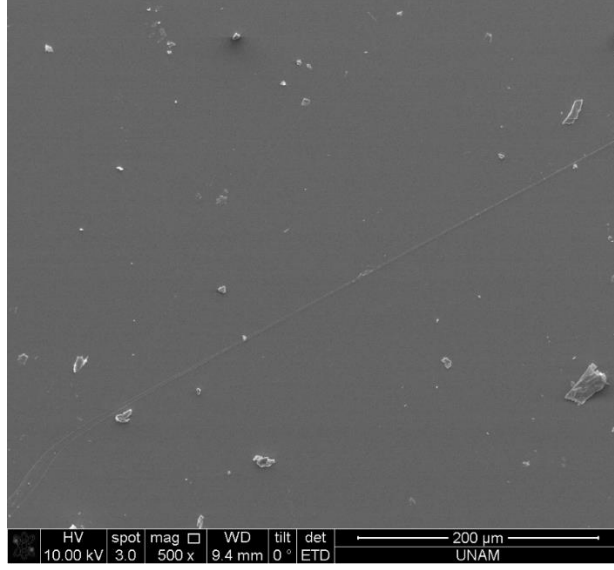
4.1 PVP +%GaSe İnce Filmlerin Yapısal Özelliklerinin Analizi

4.1.1 Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) Yöntemi ile Yüzey Görüntülerinin Analizi

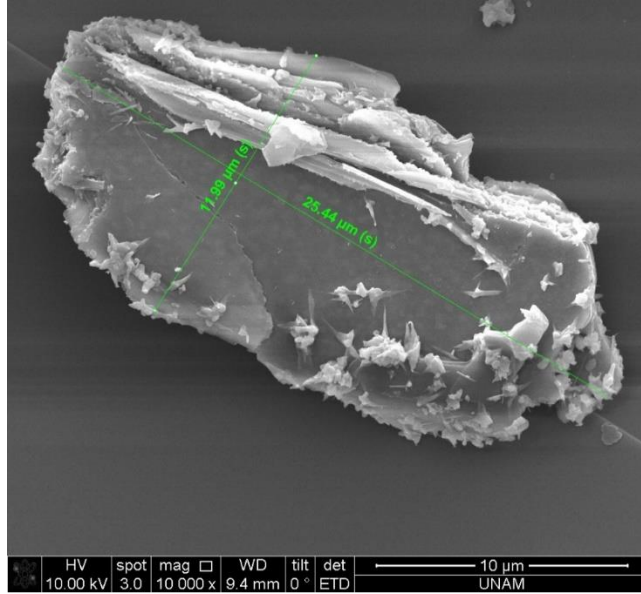
Saf PVP, PVP + %1, %3, %5 GaSe ve külçe GaSe içeren dört numune için SEM yöntemi ile oda koşullarında ve farklı büyütme ölçeklerinde yüzey görüntülenmesi yapılmıştır. Saf PVP içeren numunenin yüzey görüntüsü Şekil 4.1 de gösterilmiştir. Bu numunede GaSe katkısı olmadığı için katmanlı yapılar gözlemlenmemekle birlikte yüzeyde çatlak yapılar görülmektedir. Şekil 4.2’de PVP + %1 GaSe içeren numunenin 200µm ölçekli SEM görüntüsü verilmiştir. Bu görüntüde yüzeyde az miktarda GaSe katmanlı yapıları gözlemlenmektedir. Şekil 4.4’te yer alan yüzey görüntüsünde ise bu katmanlı yapılardan biri büyütülmüş olarak ve boyutlarıyla verilmiştir.



Şekil 4.1. Saf PVP içeren Numunenin 100 µm Ölçekte SEM Görüntüsü

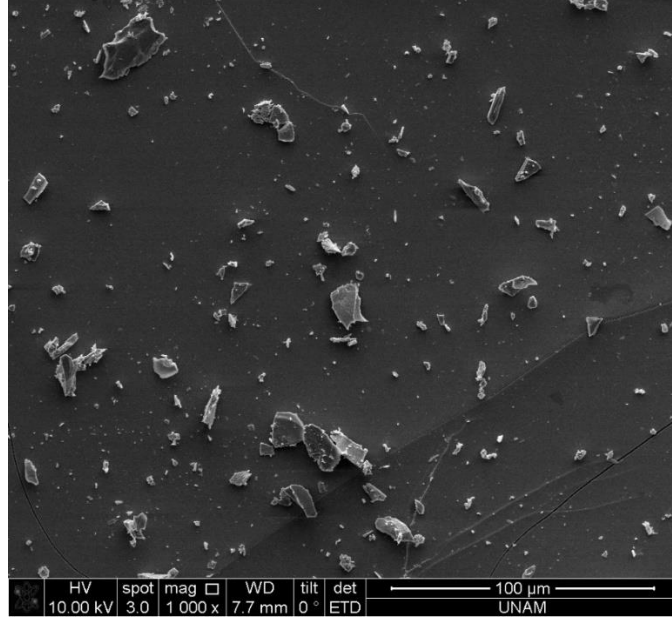


Şekil 4.2. PVP+ %1 GaSe içeren numunenin 200μm ölçekte SEM görüntüsü



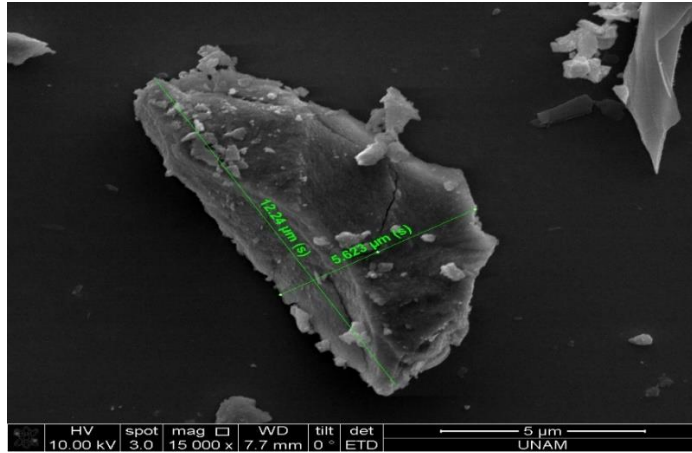
Şekil 4.3. PVP +%1 GaSe numunesindeki katmanlı yapı ve boyutları

PVP + %3 GaSe içeren numunenin yüzey görüntüsü Şekil 4.4' te verilmiştir.



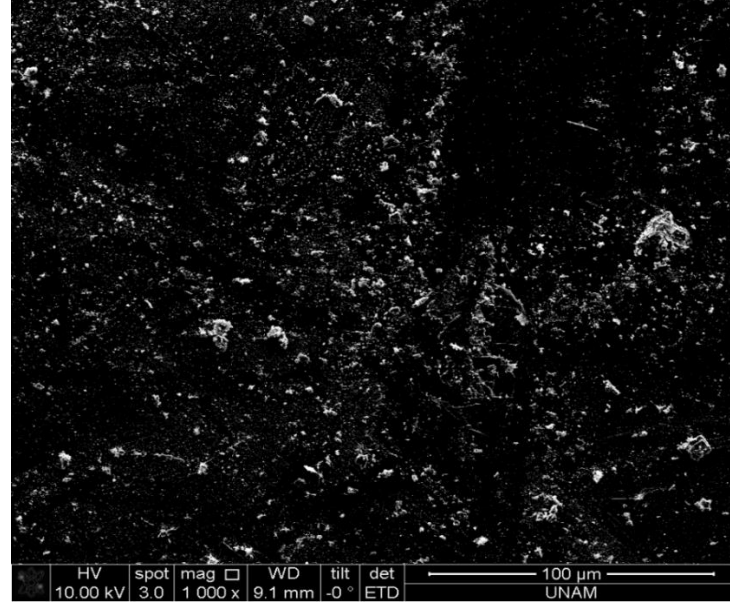
Şekil 4.4. PVP + %3 GaSe numunesinin 100 μm ölçekte SEM yüzey görüntüsü

Şekil 4.4 'te verilen yüzey görüntüsüne bakıldığında yüzeydeki GaSe partiküllerinin ve katmanlı yapıların yoğunlaştığını gözlemleriz. GaSe partikülleri yüzeyde homojen bir dağılım göstermemektedir. Şekil 4.5' de PVP +%3 GaSe numunesinde yüzeyde bulunan GaSe katmanlı yapısı boyutlarıyla birlikte gösterilmiştir. Yüzeyde irili ufaklı katmanlı yapılar gözlenmektedir, bunun nedeni ise sonikasyon süreciyle ve döndürerek kaplama süreciyle (spin-coating) alakalıdır. GaSe konsantrasyonu arttıkça yüzey morfolojisinin daha çok GaSe ince katmanlarla dolduğunu yani konsantrasyonun arttığını söyleyebiliriz.

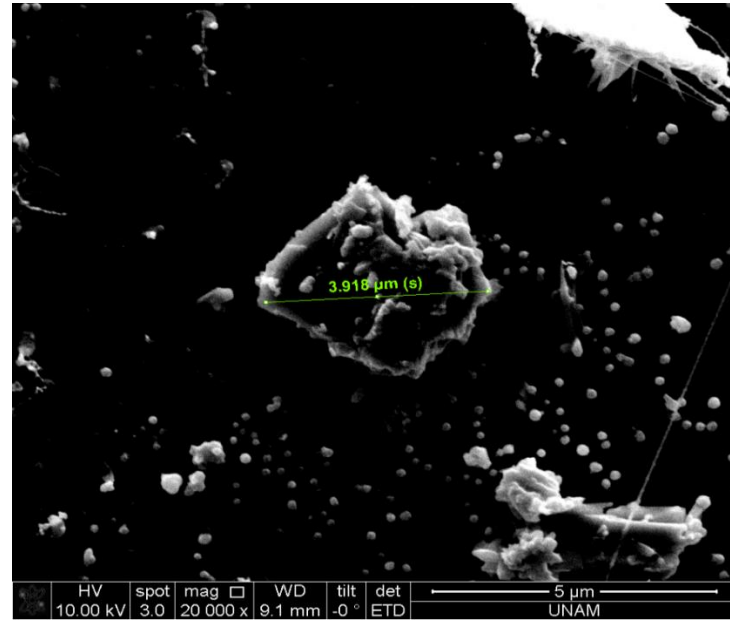


Şekil 4.5. PVP +%3 GaSe Numunesindeki Katmanlı Yapı ve Boyutları

Şekil 4.6 da PVP +%5 GaSe içeren numunenin SEM yüzey görüntüsü verilmiştir. Yüzey görüntüsüne göre GaSe partiküllerinin ve katmanlı yapılarının önceki numunelere göre yüzeyde epeyce yoğunlaştığı görülmektedir. Şekil 4.7 de aynı numunede yüzeyden alınmış bir katmanlı yapı boyutlarıyla birlikte gösterilmiştir.

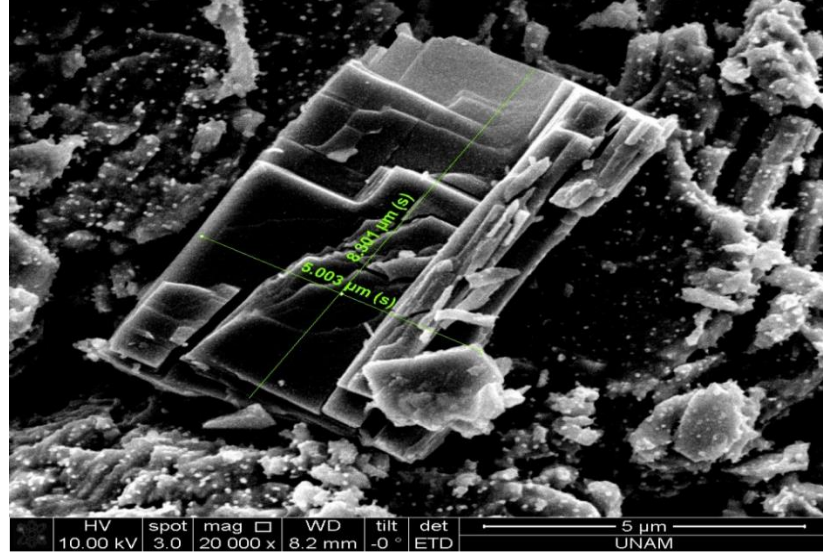


Şekil 4.6. PVP +%5 GaSe Numunesinin 100 µm Ölçekte SEM Yüzey Görüntüsü

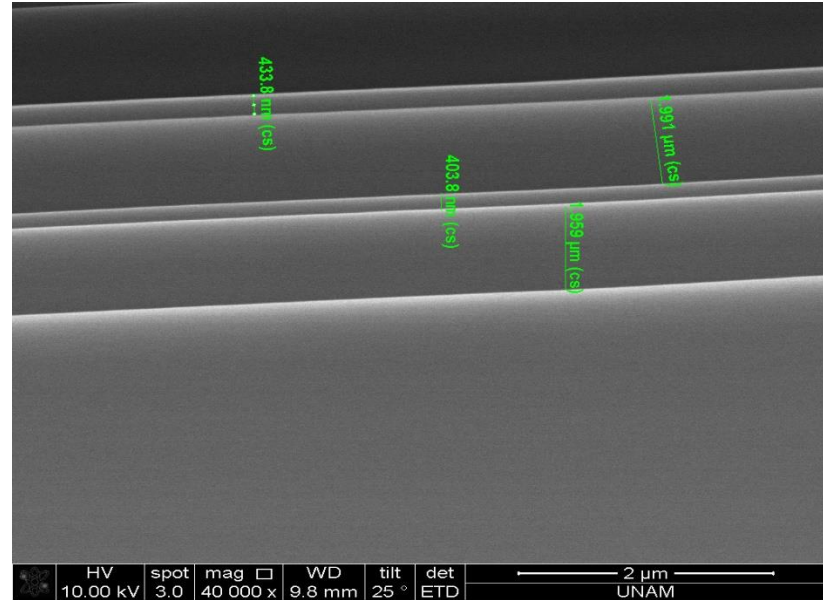


Şekil 4.7. PVP +%5 GaSe Numunesindeki Katmanlı Yapı ve Boyutu

Şekil 4.8’ de külçe GaSe’a ait SEM yüzey görüntüsü boyutlarıyla birlikte verilmiştir. SEM görüntülerine bakıldığında yüzey morfolojisi en düzgün olan sadece PVP içeren örnektir. GaSe yüzde konsantrasyonu arttıkça yüzeyde katmanlı yapılar oluşmakta ve homojensizlik de artmaktadır. Şekil 4.9’ da örnek olarak bu katmanlı yapıların enine kesit görüntüsü ve kalınlıkları bir arada verilmiştir.



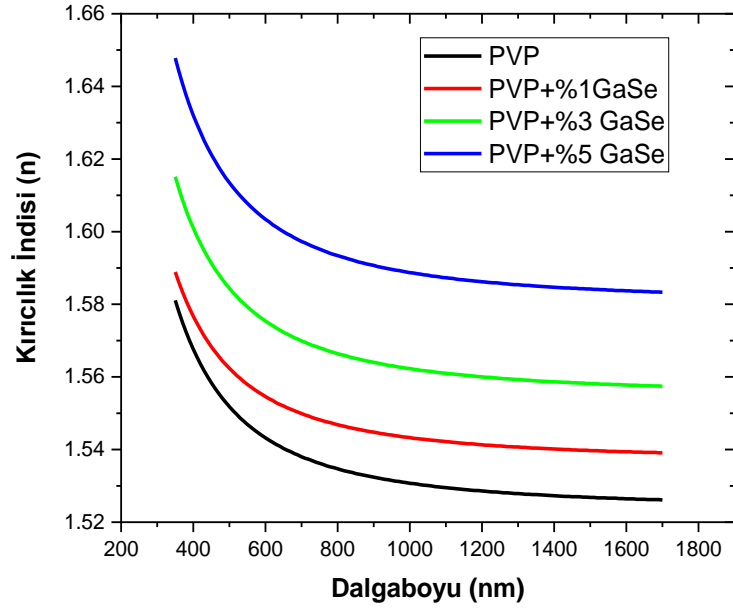
Şekil 4.8. Külçe GaSe örneğinin SEM görüntüsü



Şekil 4.9. Katmanlı yapının enine kesit görünümü ve kalınlıkları

4.1.2 Elipsometre Tekniği ile Optik Özelliklerinin Karakterizasyonu ve Kalınlık Tespiti

Elipsometre ile ince film kalınlığı, dielektrik sabiti, kırıcılık indisi ve eliptik polarizasyondan yararlanılarak genlik ve faz bileşenleri yorumlanabilir. Elipsometrede kullanılan ışığın geliş açıları için 65°, 70°, 75° değerleri uygulanmıştır ve bu değerlere göre faz ve genlik bileşenleri olan Δ ve Ψ parametrelerinin grafikleri çizdirilmiştir. Dört adet numune için ölçümler yapılmış ve Cauchy modeline göre film kalınlıkları fit edilmiştir. Öncelikli olarak hazırlanmış olan numunelerin ortalama kalınlığı elipsometre yardımıyla 300 nm olarak ölçülmüştür. Şekil 4.11’ de dört adet numune için kırıcılık indisinin dalgaboyuna bağlı değişim grafiği gösterilmiştir. Bu grafiğe göre dalga boyu arttıkça kırıcılık indisi değerleri eksponansiyel olarak azalmaktadır. Ayrıca grafiğe göre GaSe konsantrasyonu arttıkça kırıcılık indisi değerleri de artmaktadır.



Şekil 4.10. Numunelerin Dalgaboyuna Bağlı olarak Kırılma İndisi Değişimleri

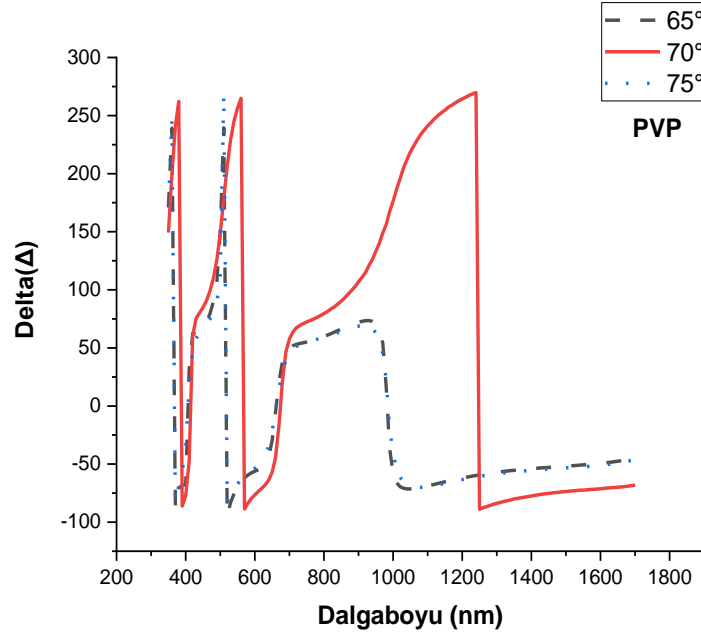
Şekil 4.10’ da bazı önemli dalgaboylarındaki kırıcılık indisi değerleri Çizelge 4.1 de gösterilmiştir. Bu değerlerden de görüleceği üzere, 400nm dalgaboyu değerinde kırılma indisi numerik olarak en yüksek olan PVP + %5 GaSe içeren numunedir ve değerü 1.632’

ye eşittir. En az kırıcılık indisi değerine sahip numune 1200 nm dalgaboyu değerinde sadece PVP içeren numunedir ve kırılma indisi değeri 1.528 dolaylarındadır.

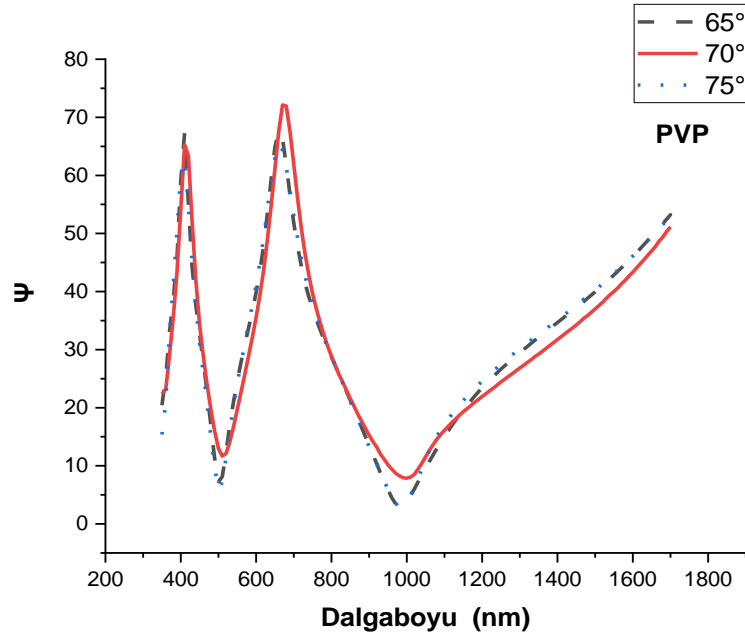
Çizelge 4.1 Bazı dalgaboylarında kırılma indisi değerleri

Numuneler	400 nm	800 nm	1200nm
PVP	1.5676	1.5347	1.5286
PVP + %1 GaSe	1.5767	1.5468	1.5413
PVP + %3 GaSe	1.601	1.5664	1.56
PVP + %5 GaSe	1.632	1.5934	1.5862

Saf PVP içeren numunenin ışığın geliş açısına göre faz ve genlik değişim grafikleri sırasıyla Şekil 4.11 ve Şekil 4.12 de gösterilmiştir.

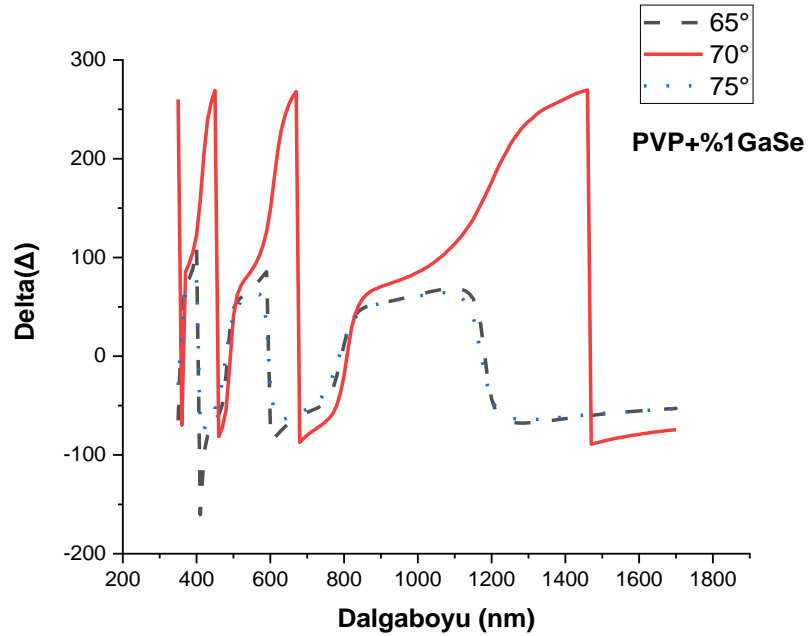


Şekil 4.11. Saf PVP numunesi için faz değişim grafiği

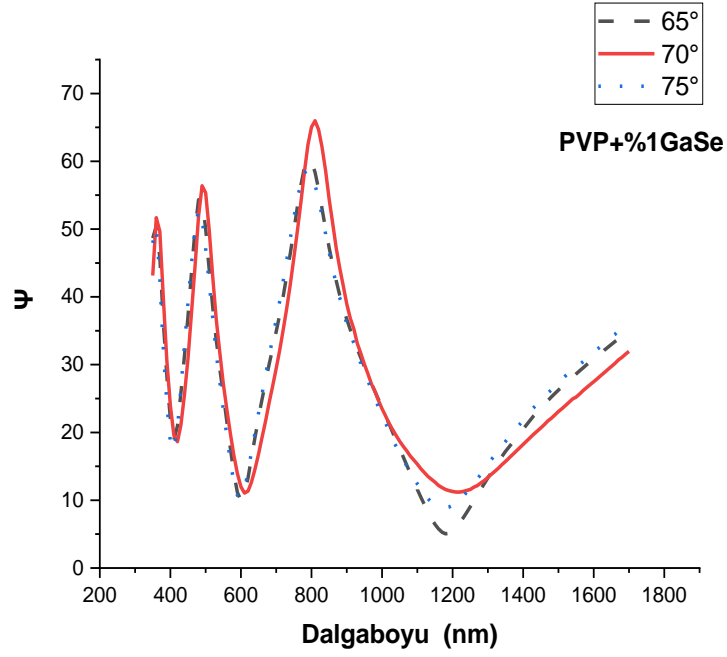


Şekil 4.12. Saf PVP numunesi için genlik değişim grafiği

PVP + %1 GaSe numunesine ait ışığın geliş açısına bağlı olarak faz ve genlik değişim grafiği sırasıyla Şekil 4.13 ve Şekil 4.14 te gösterilmiştir.

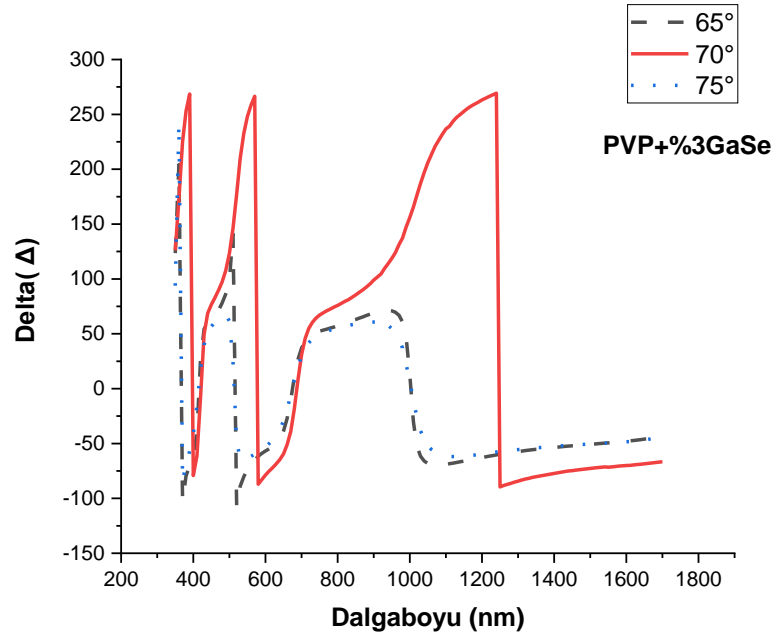


Şekil 4.13. PVP + %1 GaSe numunesinin faz değişim grafiği

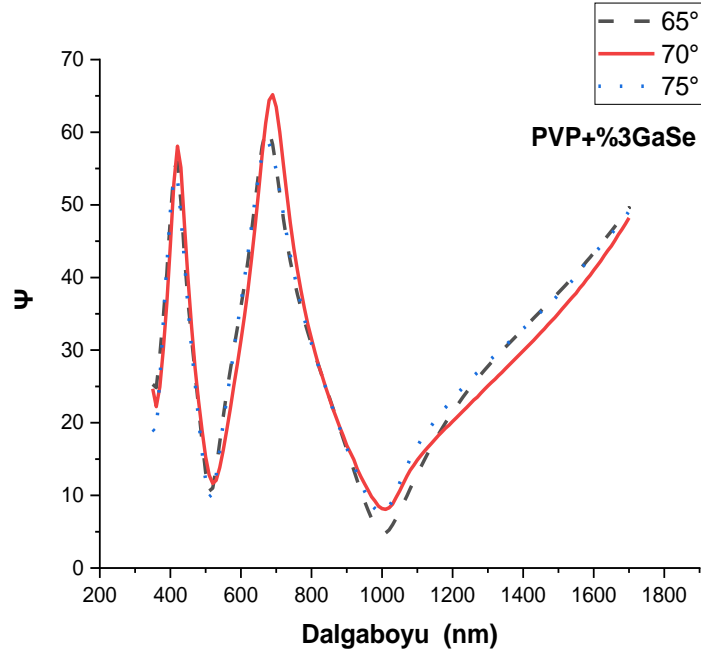


Şekil 4.14. PVP + %1 GaSe numunesinin genlik değişim grafiği

PVP + %3 GaSe numunesine ait ışığın geliş açısına bağlı olarak faz ve genlik değişim grafiği sırasıyla Şekil 4.15' te ve Şekil 4.16 'da gösterilmiştir.

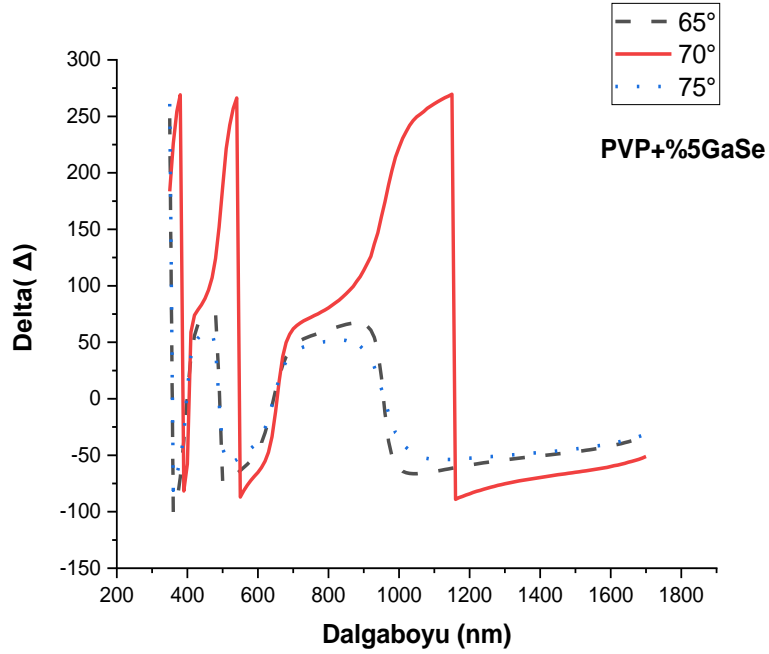


Şekil 4. 15. PVP + %1 GaSe numunesinin faz değişim grafiği

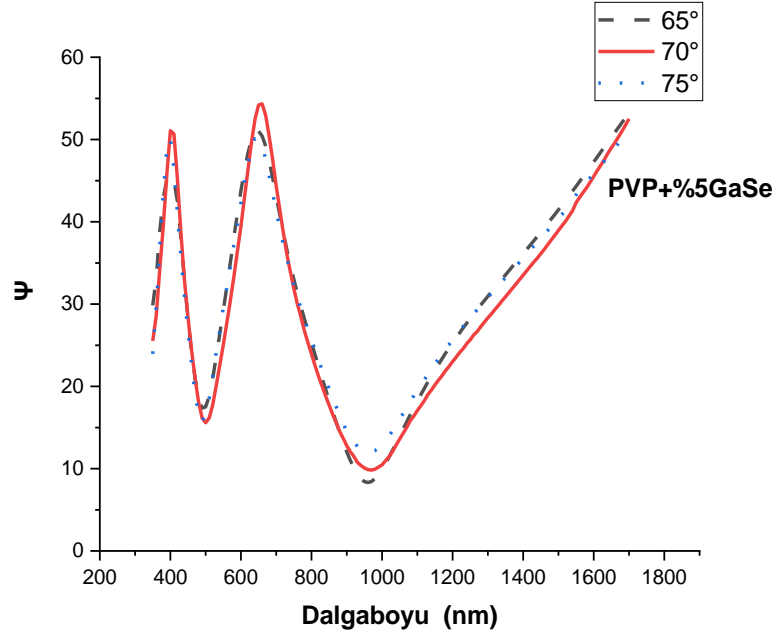


Şekil 4.16. PVP + %3 GaSe numunesinin genlik değişim grafiği

PVP + %5 GaSe numunesine ait ışığın geliş açısına bağlı olarak faz ve genlik değişim grafiği sırasıyla Şekil 4.17’ de ve Şekil 4.18 ‘de gösterilmiştir.



Şekil 4.17. PVP + %5 GaSe numunesinin faz değişim grafiği



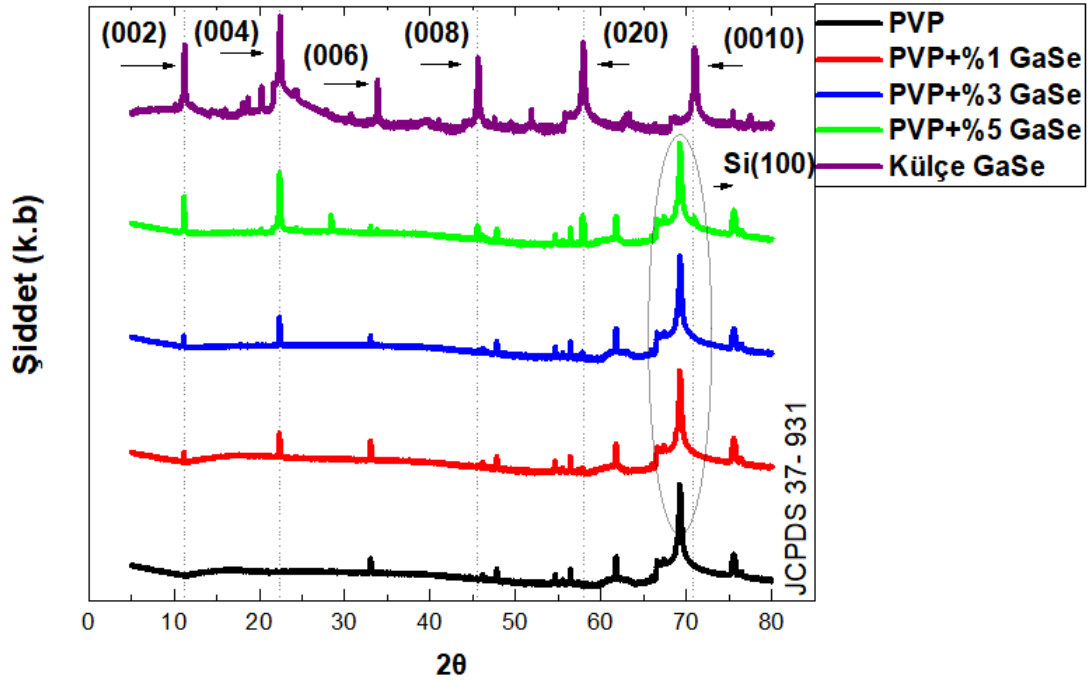
Şekil 4.18. PVP + %5 GaSe numunesinin genlik değişim grafiği

4.1.3 X Işınları Kırınımı (XRD) Yöntemiyle Yapısal Özelliklerinin Karakterizasyonu

Farklı konsantrasyonlarda GaSe içeren, sadece PVP içeren ve külçe halindeki numuneler için XRD analizi yapılmıştır. Alınan ölçüm sonuçlarına bağlı olarak tanecik büyüklüğü (grain size) ve FWHM değerleri de hesaplanarak grafik şeklinde çizdirilmiştir. FWHM değerleri direkt olarak XRD karakteristik piklerinin fit edilmesiyle hesaplanmıştır ve bu FWHM değerleri ile de tanecik büyüklüğü (grain size) parametresi Eşitlik 4.1 'e göre hesaplanmıştır.

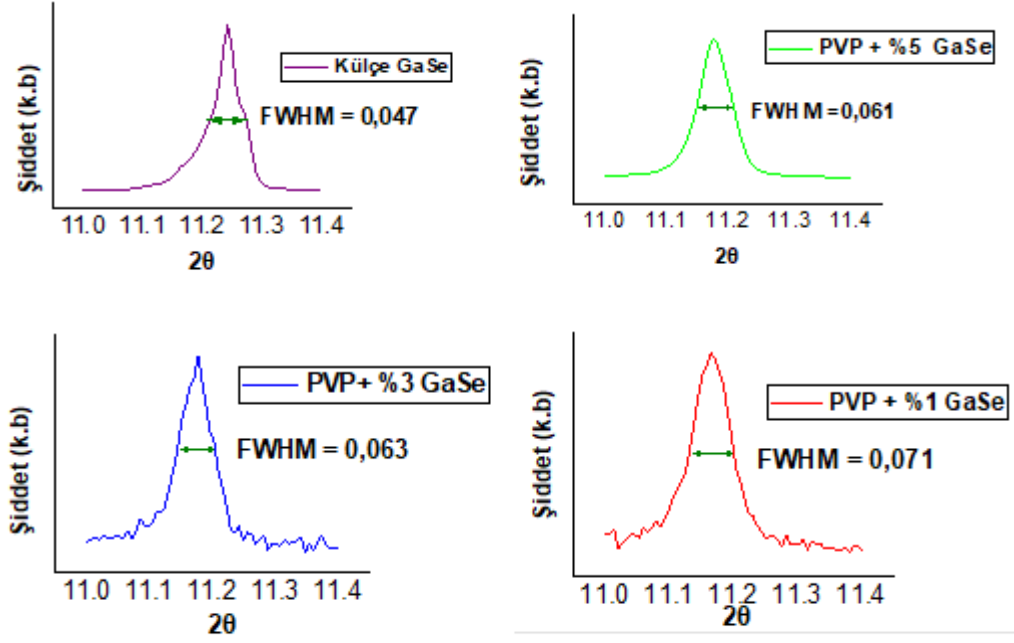
$$d(nm) = \frac{0.94\lambda}{B \cdot \cos\theta} \quad (4.1)$$

Eşitlik 4.1'e göre λ dalgaboyunu, B FWHM değerini ve θ ise Bragg kırınım açısını temsil etmektedir. Şekil 4.19'da tüm numunelere ve külçe halindeki GaSe 'a ait XRD karakteristik pikleri gösterilmiştir.

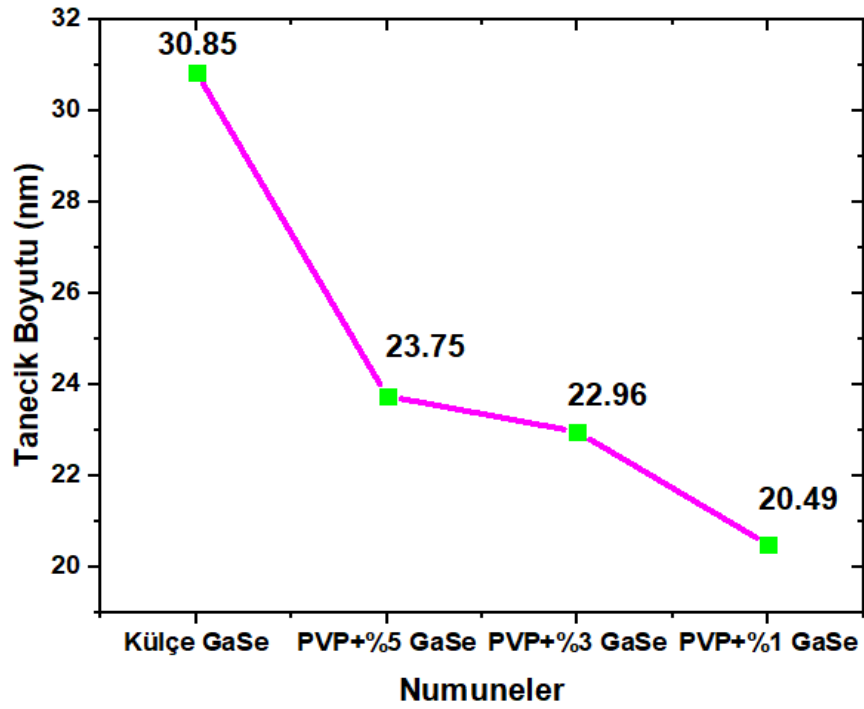


Şekil 4.19. Numunelerin ve külçe GaSe örneğinin XRD karakteristik pikleri

Elde edilen XRD karakteristik pik sonuçlarına göre, Bridgman yöntemi ile büyütülmüş olan GaSe külçe numunesinin $\langle 002 \rangle$, $\langle 004 \rangle$, $\langle 006 \rangle$, $\langle 008 \rangle$, $\langle 020 \rangle$, ve $\langle 0010 \rangle$ karakteristik pikleri literatür ile uyumludur (Abdullah ve ark. 2010, Ni ve ark. 2013). Bu pikler saf PVP içeren numunede gözlemlenmemektedir. Ayrıca $2\theta = 70^\circ$ değerindeki pikler ise alttaş olan silisyum malzemesinden gelen piklerdir. Çözeltiye farklı yüzdelerde GaSe partikülleri eklendikçe, GaSe piklerinin XRD karakteristik pikleri görünmeye başlar. Ayrıca PVP çözeltisine eklenen GaSe yüzde konsantrasyonunun artmasına bağlı olarak XRD karakteristik piklerinin şiddeti de artmaktadır. Bu XRD karakteristik piklerinin $2\theta = 10^\circ$ değerindekiler baz alınarak PVP + % GaSe ve külçe GaSe numunelerinin Gaussien fit metodu ile FWHM değerleri hesaplanmıştır. Ortaya çıkan sonuçlara göre GaSe yüzde konsantrasyonu arttıkça FWHM değerlerinin azaldığı görülmüştür. Şekil 4.20 de FWHM grafiği verilmiştir. Ayrıca bu FWHM değerlerinden Eşitlik (4.1) kullanılarak tanecik boyutu hesaplaması da yapılmıştır. Şekil 4.21 de tanecik boyutu grafiği verilmiştir.



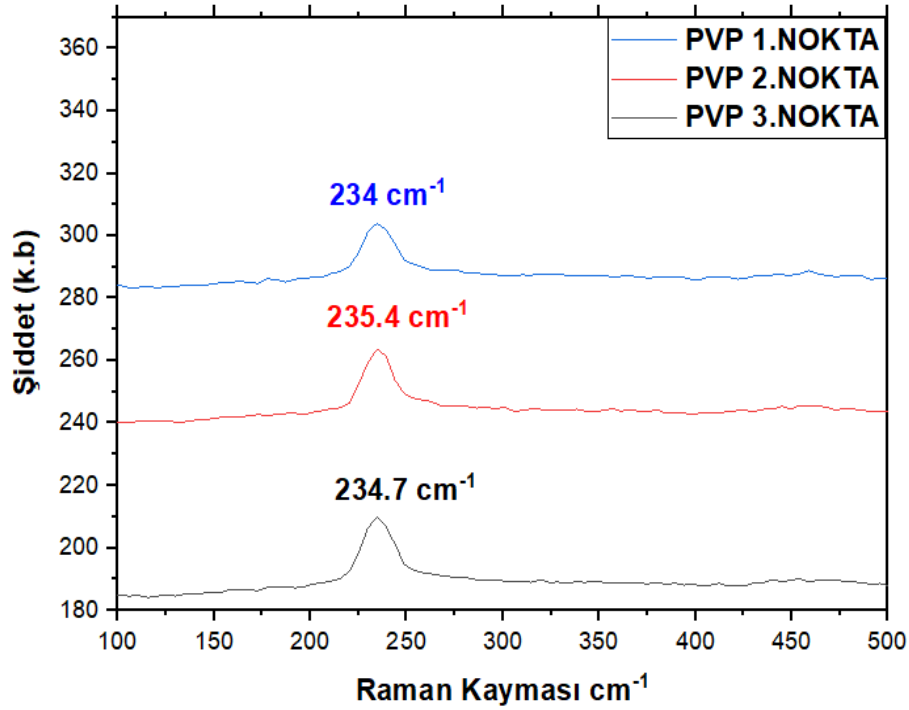
Şekil 4.20. Numunelerin ve külçe GaSe örneğinin FWHM değerleri



Şekil 4.21. Numunelerin ve külçe GaSe örneğinin tanecik boyutu grafiği

4.1.4 Raman Spektroskopisi Yöntemiyle Numunelerin Optik Karakteristiklerinin Belirlenmesi

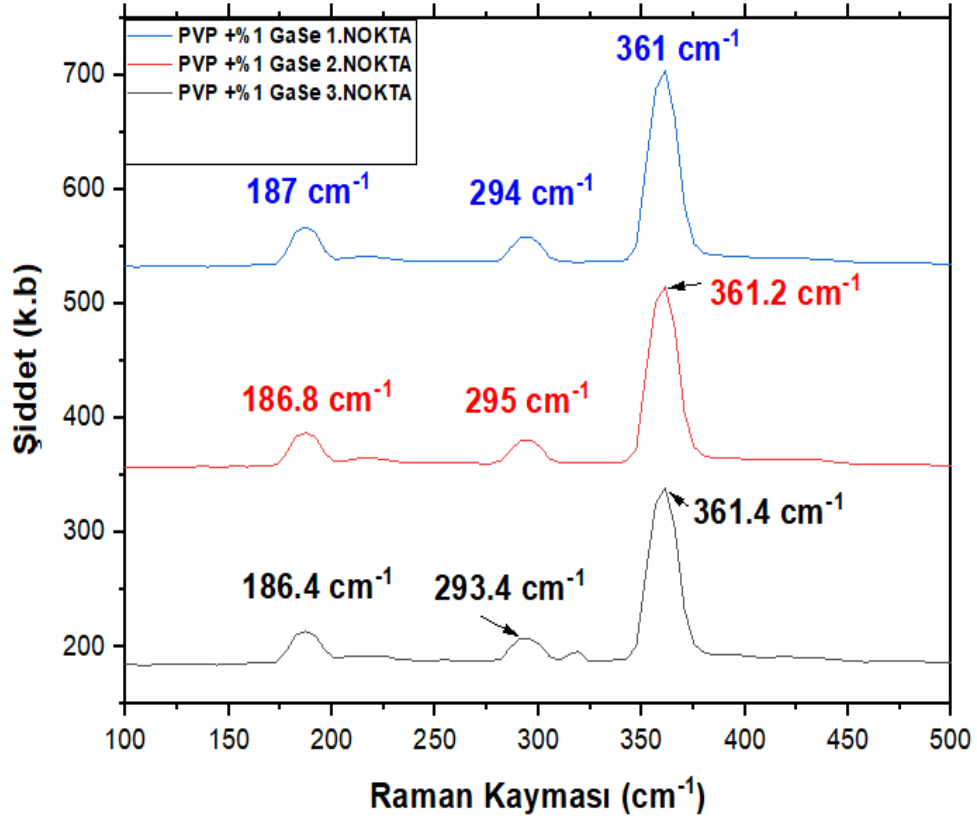
Farklı konsantrasyonlarda GaSe içeren, sadece PVP içeren ve külçe GaSe numunelerinin Raman spektroskopisi yöntemiyle optik karakteristikleri belirlenmiştir. Bu çalışmada Bilkent Üniversitesi UNAM merkezi laboratuvarları bünyesinde bulunan WITEC Alpha 300R modeli ve 532 nm uyarım dalgaboylu Raman spektroskopisi cihazı ile ölçümler alınmıştır. Raman ölçümleri çok geniş dalga numarası aralığında ($-200-2000\text{ cm}^{-1}$) alınmıştır. Bu çalışmada Raman spektroskopisi sonuçları diğer bölgelerde oluşan zayıf genlikli ya da hiç gözlenmeyen piklerden dolayı $100-500\text{ cm}^{-1}$ dalga numarası aralığında çizdirilerek grafik haline getirilmiştir. Şekil 4.22’de sadece PVP içeren numuneye ait üç noktadan alınmış Raman karakteristik pikleri gösterilmiştir.



Şekil 4.22. Sadece PVP içeren numunenin üç noktadan alınmış Raman karakteristik pikleri

Şekil 4.22 ‘de verilen ve numunenin üç ayrı noktasından alınmış Raman karakteristik piklerine göre sadece PVP içeren numunede $234-235\text{ cm}^{-1}$ dolaylarında zayıf genlikli pikler görünmektedir. Bu pikler PVP polimer materyalinden kaynaklanan piklerdir. Şekil

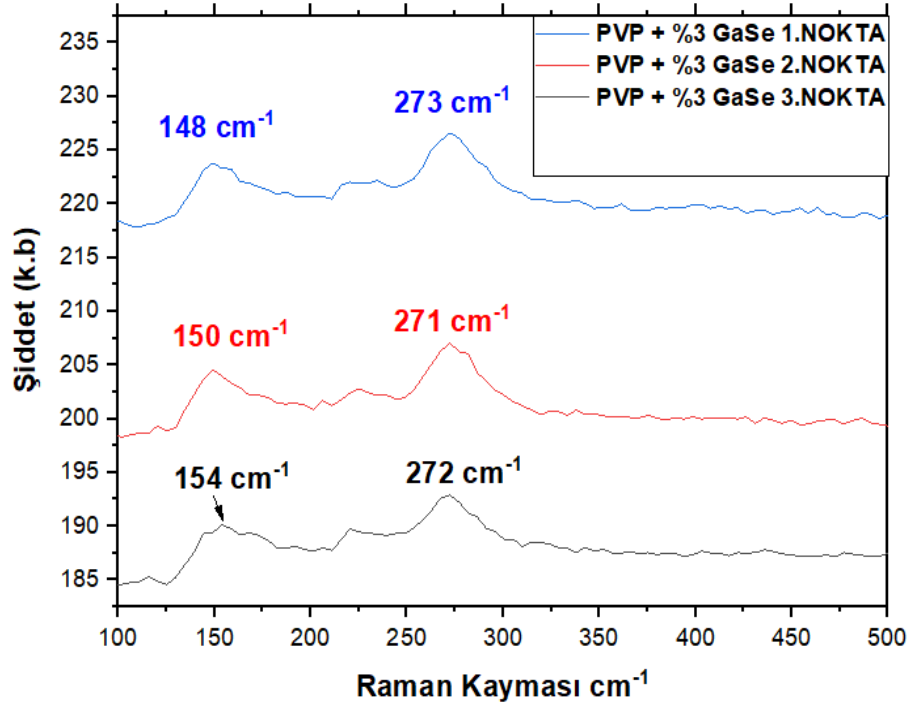
4.23'te ki grafikte PVP + %1 GaSe numunesine ait üç ayrı noktadan alınmış Raman karakteristik pikleri verilmiştir.



Şekil 4.23. PVP + %1 GaSe numunesinin üç noktadan alınmış Raman karakteristik pikleri

Şekil 4.23' te verilen Raman karakteristik piklerini analiz ettiğimizde oksidasyon kaynaklı ve literatürde yer alan Ga₂Se₃ karakteristik piklerini görmekteyiz.

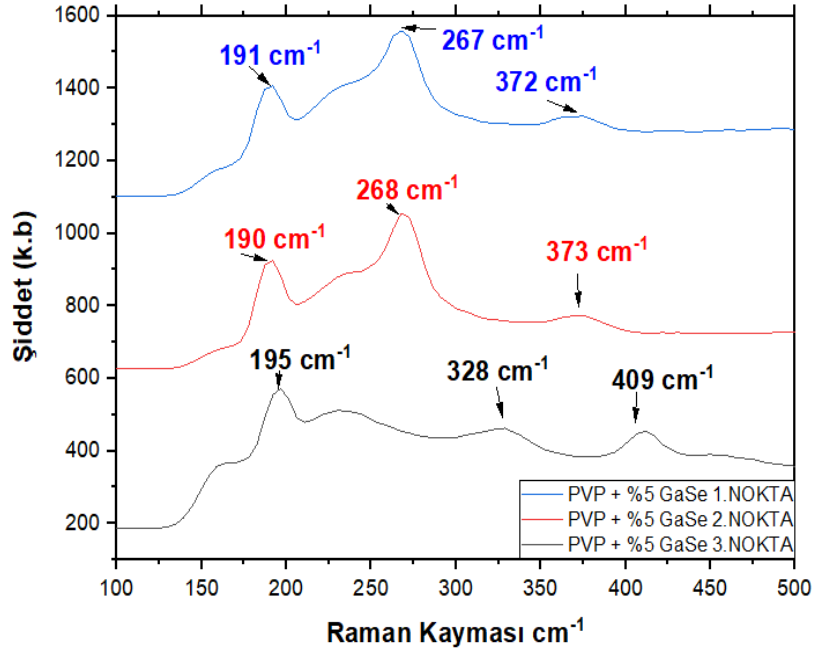
Şekil 4.24 'de PVP + %3 GaSe numunesine ait üç ayrı noktadan alınmış Raman karakteristik piklerinin grafiği verilmiştir.



Şekil 4.24. PVP + %3 GaSe numunesinin üç noktadan alınmış Raman karakteristik pikleri

Şekil 4.24 'teki raman karakteristik pikleri ortalama 150 cm^{-1} ve 271 cm^{-1} dolaylarındadır ve iki belirgin pik gözlemlenmektedir. Bu piklerin farklı raman kayma değerlerini verme sebebi yine oksidasyondan kaynaklanan pikler ve oluşan Ga_2Se_3 bileşiğinden kaynaklanan piklerdir.

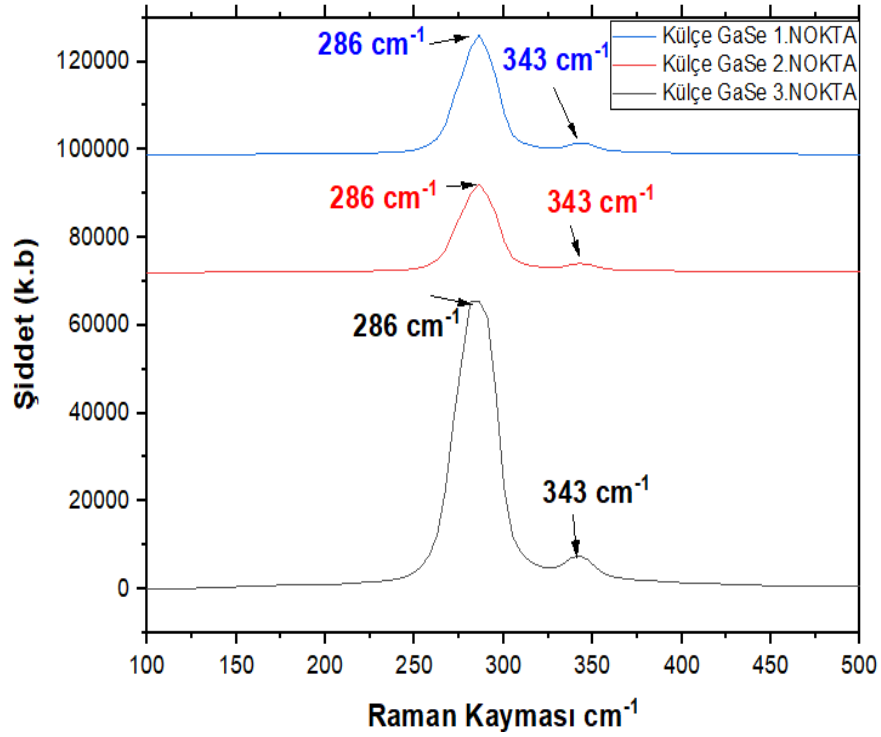
Şekil 4.25' te PVP + %5 GaSe numunesine ait üç ayrı noktasından ölçüm alınmış Raman karakteristik piklerinin grafiği verilmiştir.



Şekil 4.25. PVP + %5 GaSe numunesinin üç noktadan alınmış Raman karakteristik pikleri

Şekil 4.25' teki Raman karakteristik piklerini analiz ettiğimizde bazı raman kayması değerleri farklı noktalardadır. Örneğin 328 cm^{-1} , 409 cm^{-1} ve 373 cm^{-1} değerindeki pikler ihmal edilecek düzeyde düşük genlikli piklerdir. Şekil 4.26 'da külçe GaSe numunesinin üç ayrı noktadan alınmış Raman karakteristik piklerinin grafiği gösterilmiştir.

Şekil 4.26'da verilen külçe GaSe Raman karakteristik pikleri sırasıyla 286 cm^{-1} ve 343 cm^{-1} değerlerindedir. Bu pikler GaSe 'nin temel karakteristik pikleridir. Çizelge 4.2 de tüm numuneler için Raman piklerinin oksidasyon ve Ga_2Se_3 oluşumundan kaynaklanan raman kayması değerleri tablo halinde gösterilmiştir.



Şekil 4.26. Külçe GaSe numunesinin üç noktadan alınmış Raman karakteristik pikleri

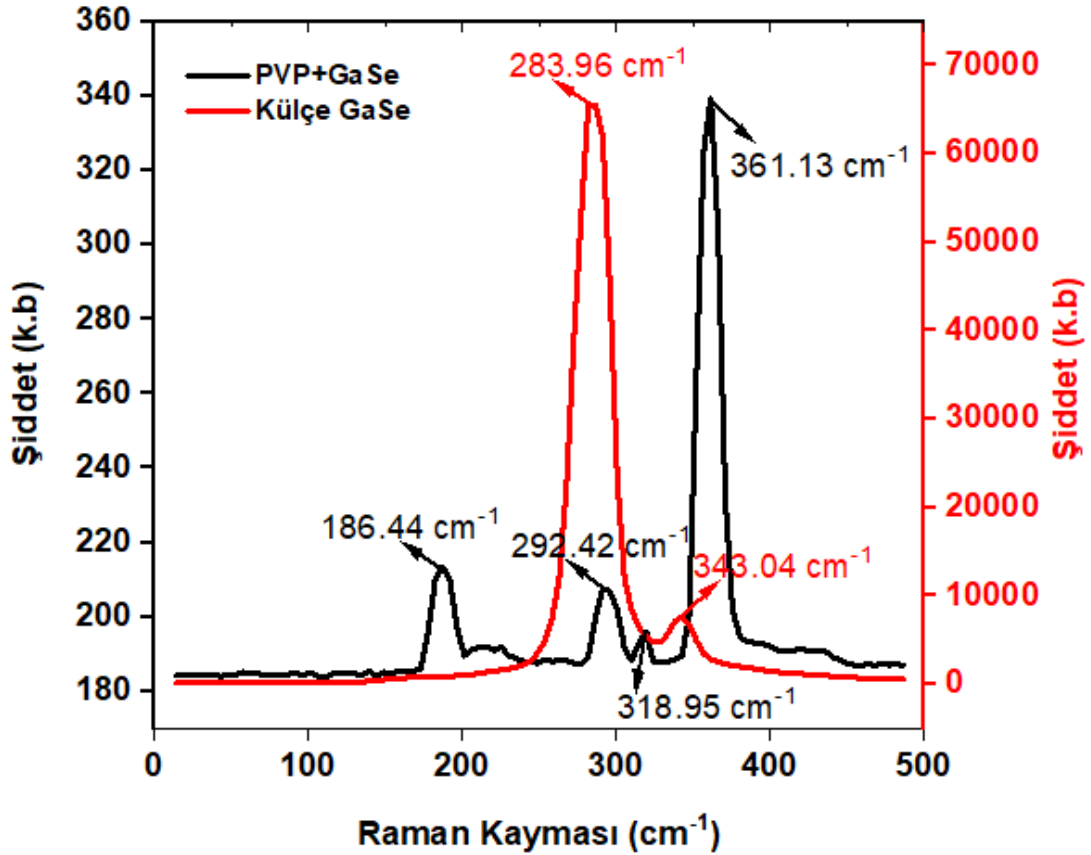
Çizelge 4.2 GaSe içeren tüm numunelerin Raman piklerinin literatürdeki Ga_2Se_3 ve Ga_2O_3 karakteristik pikleriyle karşılaştırılması (Guler ve ark. 2019)

GaSe (Molas ve ark. 2021)	Ga_2Se_3 (Guler ve ark. 2019)	Ga_2O_3 (Susoma ve ark. 2017)	PVP+ %1GaSe Bu çalışma	PVP+ %3GaSe Bu çalışma	PVP+ %5GaSe Bu çalışma	Külçe GaSe Bu çalışma
136	155	145	186	147	189	286
215	161	169	217	274	268	343
309	190	200	293		369	
	240	320	318			
	289	347	360			

Çizelge 4.2’de Raman karakteristik pikleri literatürde bulunan Ga_2Se_3 ve Ga_2O_3 pikleriyle karşılaştırılmıştır. Farklı renklerle renklendirilmiş her pik ait olduğu bileşikten kaynaklanan Raman piklerini temsil etmektedir. Örneğin külçe GaSe’ ait olan 286 cm^{-1}

piki literatürdeki Ga_2Se_3 289 cm^{-1} pikine yakın değerde olurken 343 cm^{-1} piki literatürdeki Ga_2O_3 347 cm^{-1} pikine yakın değerdedir.

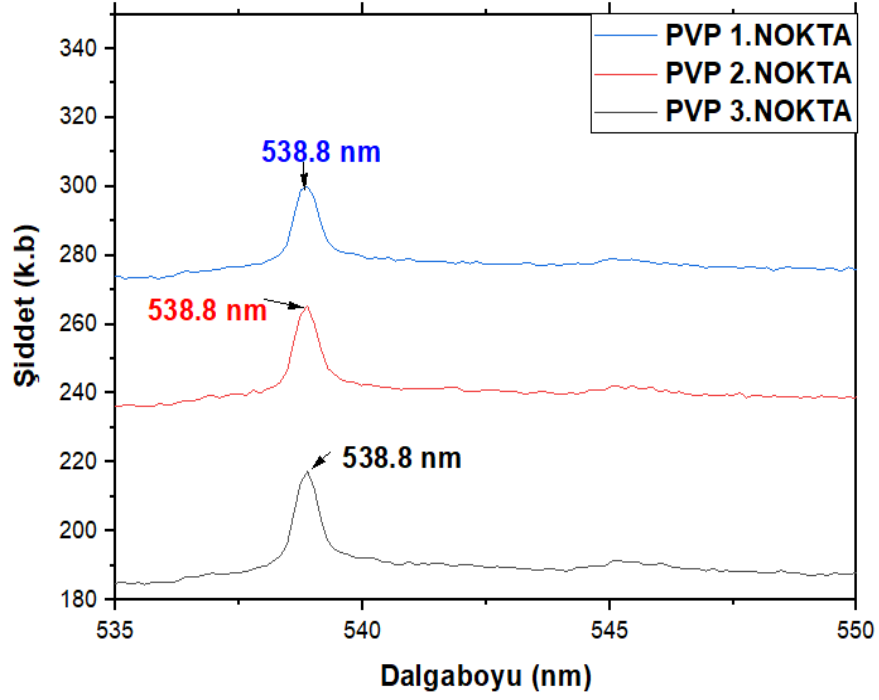
Şekil 4.27’ de PVP+GaSe ve külçe GaSe örneğinin raman spektrum grafiği gösterilmiştir.



Şekil 4.27. PVP+ GaSe ve külçe GaSe örneğinin raman spektrum grafikleri

4.1.5 Fotoluminesans Spektroskopisi Yöntemiyle Numunelerin Optik Karakteristiklerinin Belirlenmesi

Farklı konsantrasyonlarda GaSe içeren, sadece PVP içeren ve külçe GaSe numunelerinin Fotoluminesans spektroskopisi (PL) yöntemiyle optik karakteristikleri belirlenmiştir. Şekil 4.28’de sadece PVP içeren numunenin PL spektrumu gösterilmiştir.

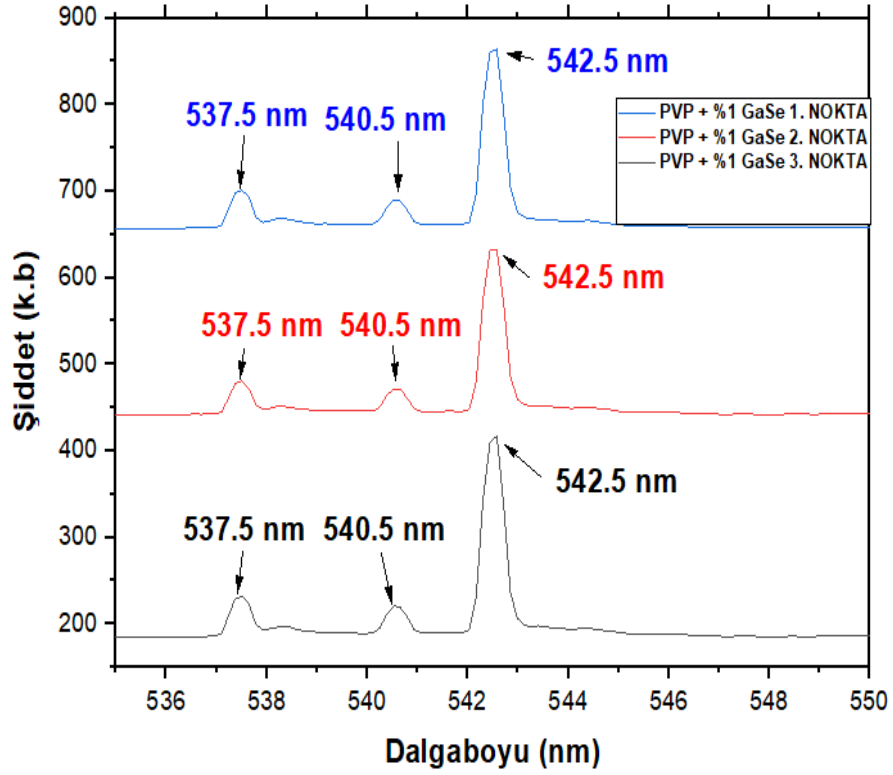


Şekil 4.28. Sadece PVP içeren numunenin üç noktadan alınmış PL spektrum grafiği

Şekil 4.28’de gösterilen ve 535-550 nm dalga boyu aralığında çizdirilmiş PL spektrumuna göre 538.8 nm dolaylarında zayıf genlikli bir pike rastlanmaktadır ve bu pik PVP polimer materyalinden kaynaklanan bir piktir.

Şekil 4.29’ da PVP +%1 GaSe numunesine ait üç ayrı noktadan alınmış ölçümlerle PL spektrum grafiği gösterilmiştir.

Şekil 4.29’da verilen PL spektrumundaki piklerden 537.5 nm olan pik ufak bir kayma ile PVP polimer maddesinden gelmektedir. 540.5 nm ve 542.5 nm pikleri GaSe kaynaklı piklerdir. GaSe’ nin külçe durumundaki bant aralığı 2.1 eV iken katmanlı yapılar (flakes) durumunda yani bir veya birkaç tabakadan oluşan yapılarda bant aralığı yaklaşık olarak 2.3 eV ‘a kadar çıkmaktadır.



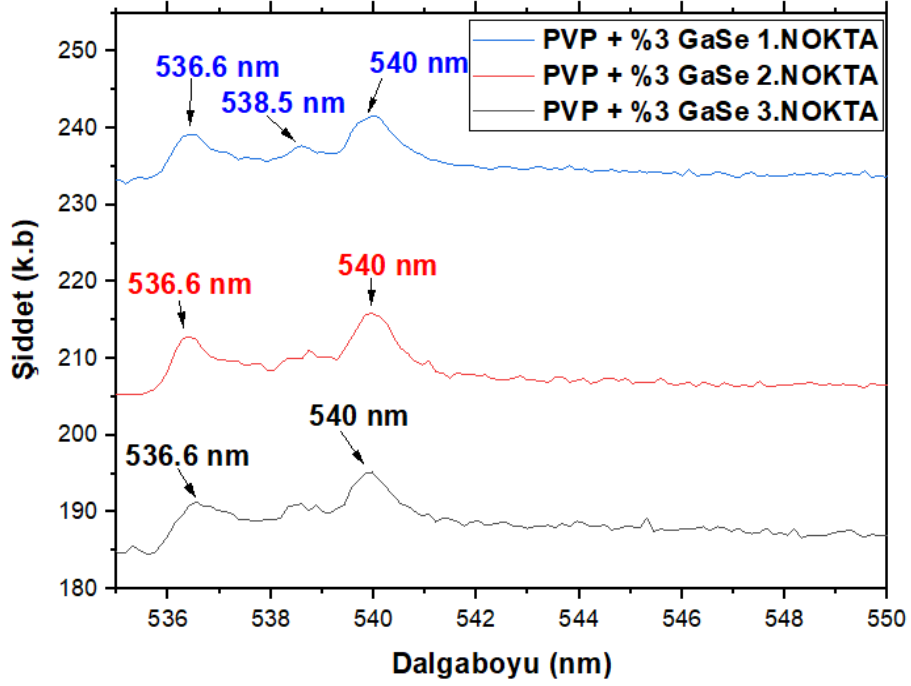
Şekil 4.29. PVP + %1 GaSe numunesinin üç noktasından alınan PL spektrum grafiği

PL spektrumunda dalgaboyu -bant aralığı arasındaki ilişki aşağıdaki eşitlikle verilmiştir.

$$\text{Bant aralığı (eV)} = \frac{1240}{\lambda} \quad (4.2)$$

GaSe' nin tabakalı durumundaki bant aralığına göre eşitlik (4.2) uygulanırsa PL spektrum piklerinin 540 nm civarında çıkması normaldir.

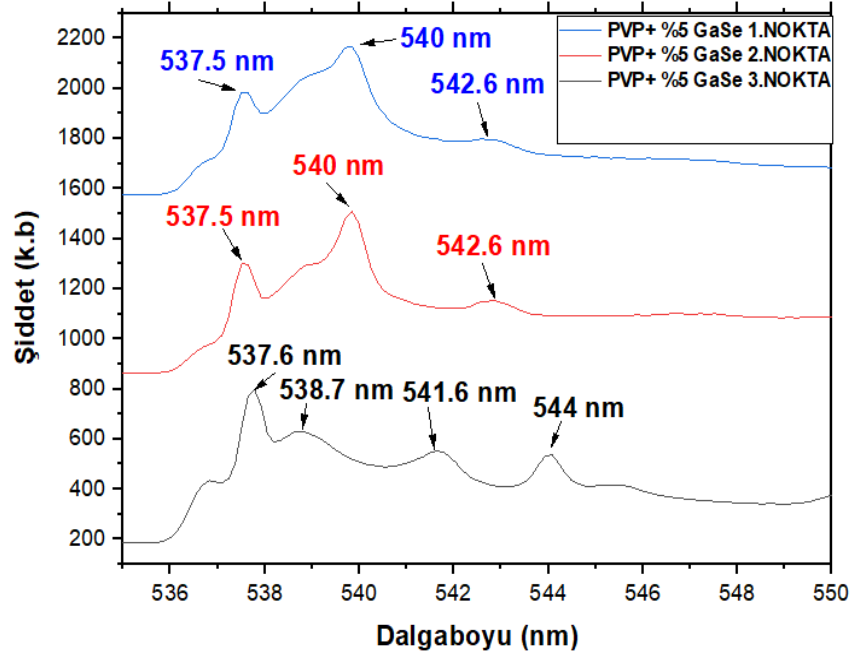
Şekil 4.30 'da PVP + %3 GaSe numunesine ait üç ayrı noktadan alınmış PL spektrum grafiği gösterilmiştir.



Şekil 4.30. PVP + %3 GaSe numunesinin üç noktasından alınan PL spektrum grafiği

Şekil 4.30 'da verilen PL spektrumundaki piklerden 536.6 nm dalga boyundaki zayıf genlikli pik PVP polimerinden gelmektedir. Diğer iki pik olan 538.5 nm ve 540 nm pikleri GaSe'nin yapısından kaynaklanmaktadır ve literatürle uyumludur. GaSe'nin PL spektrumunda belirgin pik vermesi bu çalışmada numunelerin ışık altında ve ışığa tepki vereceğinin anlaşılmasına, aynı zamanda katkılamanın artırılarak foto cevap süresi gibi parametrelerin de analiz edilmesi düşüncesini doğurmuştur. PVP + %1 GaSe ve PVP + %3 GaSe numunelerinin PL spektrumu incelendiğinde, GaSe yüzde katkılamanın artışıyla PL piklerinde fazla bir kayma meydana gelmemiştir. Bu da katkılamanın PL piklerinde önemli bir kaymaya sebep olmayacağını göstermektedir.

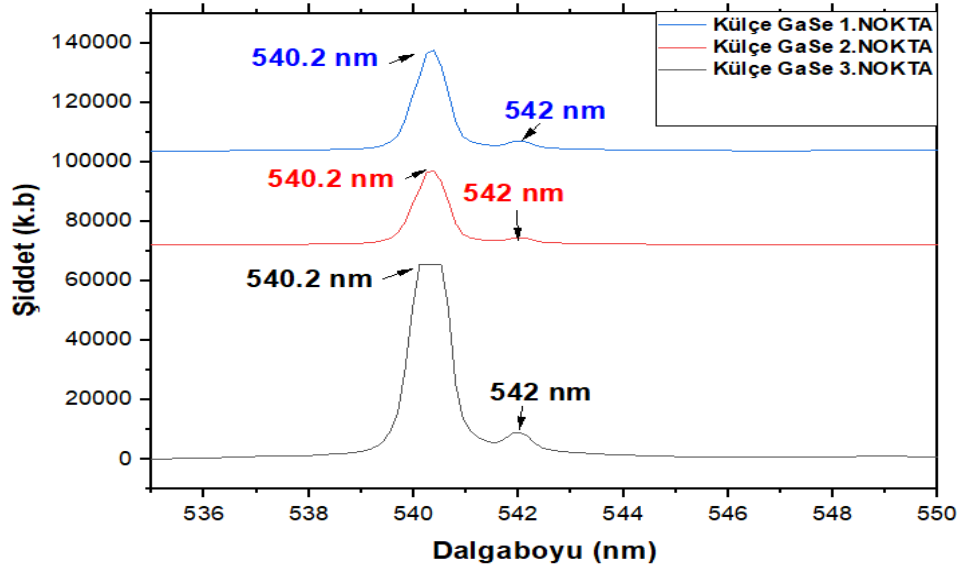
Şekil 4.31 'de PVP + %5 GaSe numunesinin üç ayrı noktasından alınan PL spektrumu grafiği gösterilmiştir.



Şekil 4.31. PVP + %5 GaSe numunesinin üç noktasından alınan PL spektrum grafiği

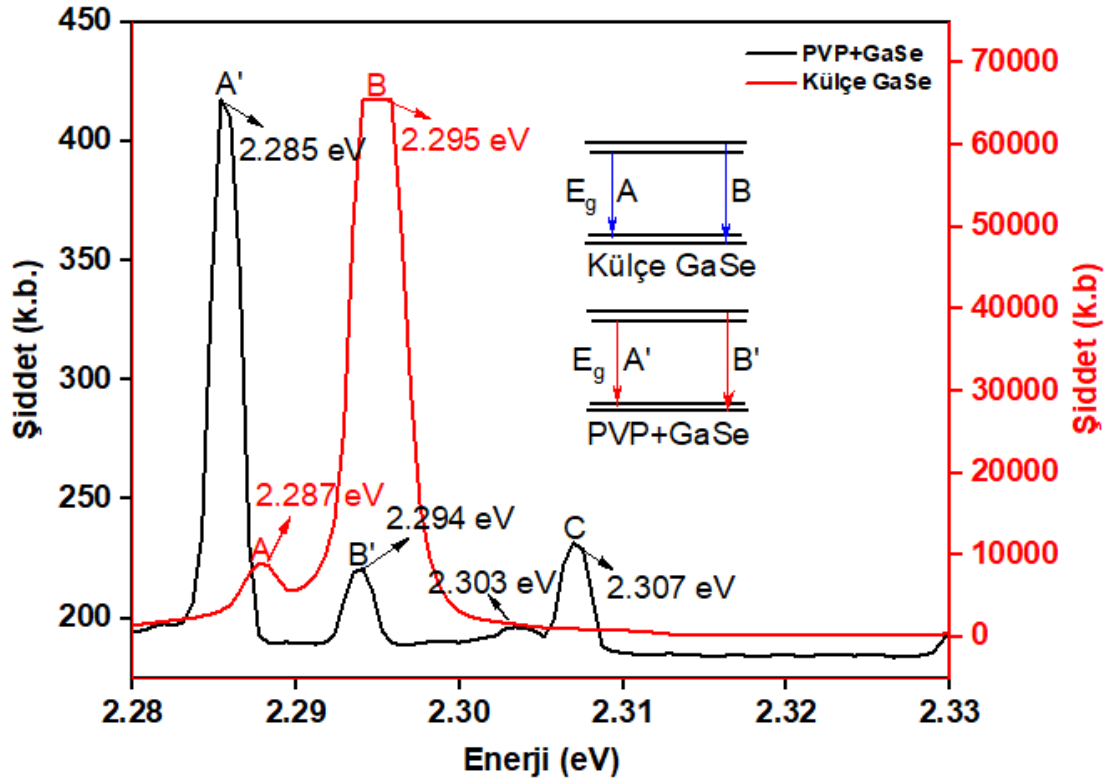
Şekil 4.31 'de verilen PL spektrumundaki piklerden 537.5 nm olan pik PVP polimer malzemesinden gelmektedir. Diğer pikler olan 540 nm ve 542.6 nm GaSe' nin yapısından gelmektedir ve diğer numunelerdeki piklerle dalgaboyu değeri olarak birbirine yakındır. Üçüncü noktadan alınan pik sayısının ve dalgaboyu değerlerinin farklı olmasında yüzeydeki homojensizlik ve pürüzlülük gibi parametreler etkilidir. Çünkü numuneler döndürerek kaplama (spin-coating) metodu ile kaplandığından dolayı yüzeylerde zaman zaman homojensizlik ve pürüzlülük gibi parametreler etkili olmaktadır. Bu parametreler ölçüm sırasında kısmen küçük uyumsuzluklar da yaratabilmektedir. GaSe konsantrasyonu en fazla olan numunede bile PL spektrum pikleri aşırı bir kayma yapmamaktadır.

Şekil 4.32' de Külçe GaSe numunesinin üç ayrı noktasından alınan PL spektrumu grafiği gösterilmiştir.



Şekil 4.32. Külçe GaSe numunesinin üç noktasından alınan PL spektrum grafiği

Şekil 4.33 'te PVP +GaSe ve külçe GaSe' a ait PL spektrum-enerji grafiği verilmiştir.



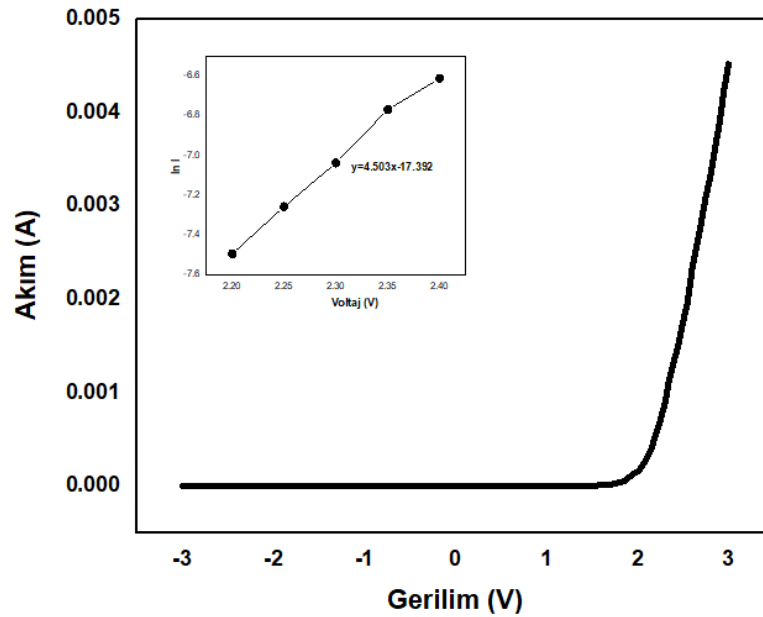
Şekil 4.33. PVP+GaSe ve külçe GaSe örneğinin PL spektrum-enerji grafiği

4.2 PVP +%GaSe İnce Filmleri ile Üretilmiş Mikroelektronik Aygıtların Karakterizasyonu

4.2.1 Schottky Fotodiyotların Akım-Gerilim Karakteristikleri

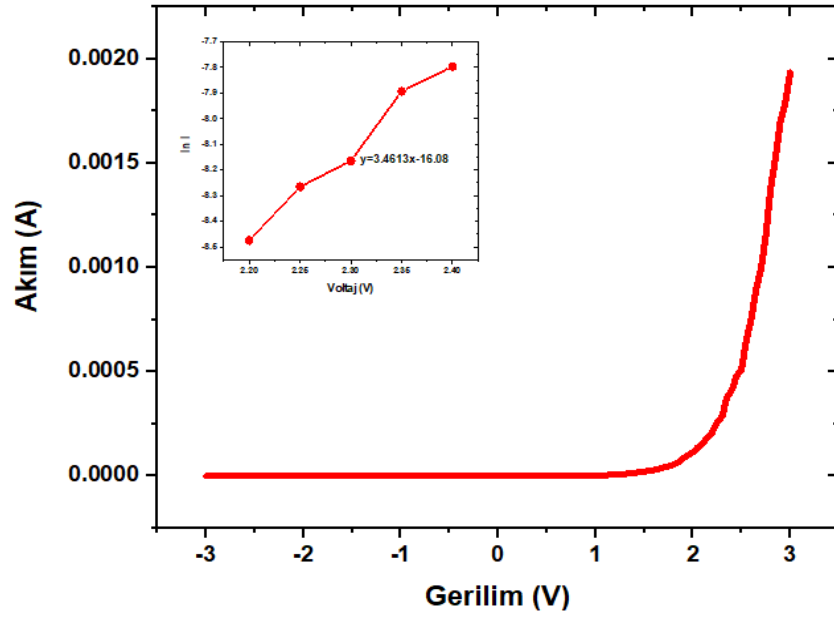
Silisyum alttaş üzerine kaplanmış PVP+ % GaSe numunelerinin arkasına alınmış 100nm Au kontak ve numune yüzeylerine 1 mm çapında alınmış 100 nm Au nokta kontaklar yardımıyla akım-gerilim ölçümleri gerçekleştirilmiştir.

Hazırlanan Au/PVP+GaSe/n-Si fotodiyotların ve Au/PVP/n-Si Schottky fotodiyotların $\pm 3V$ voltaj aralığında ve 0.05 V adımlar ile karanlık ortamda ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Şekil 4.36'da sadece PVP içeren numunenin akım- gerilim (I-V) karakteristiği gösterilmiştir. Ayrıca I-V karakteristik eğrisinin lineer bölgesinden elde edilen akım ve gerilim değerleri ile saturasyon akımı, bariyer yüksekliği ve idealite gibi parametrelerde hesaplanmıştır.



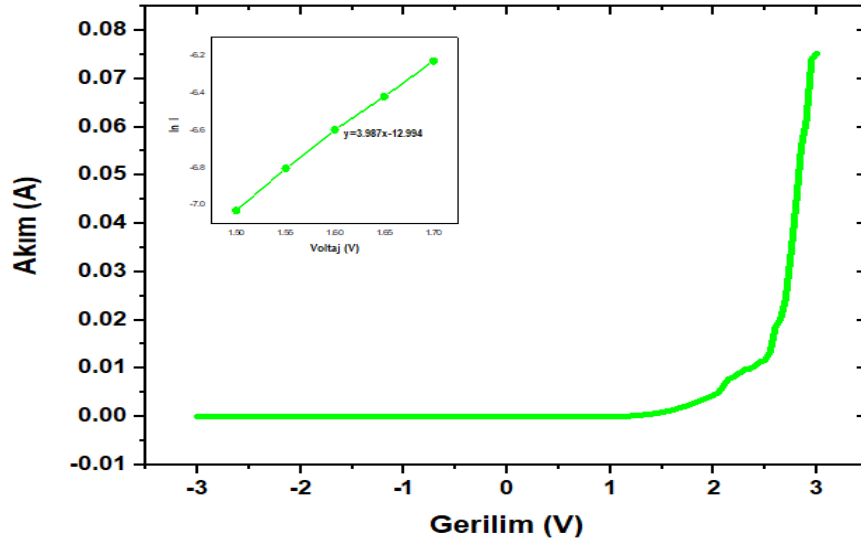
Şekil 4.34. Sadece PVP içeren numunenin akım- gerilim karakteristik grafiği ve lineer bölgeden alınmış ln I-V grafiği

Şekil 4.35' de PVP+%1 GaSe numunesine ait akım-gerilim ve lineer bölgeden alınmış beş noktadan oluşan grafik gösterilmiştir.



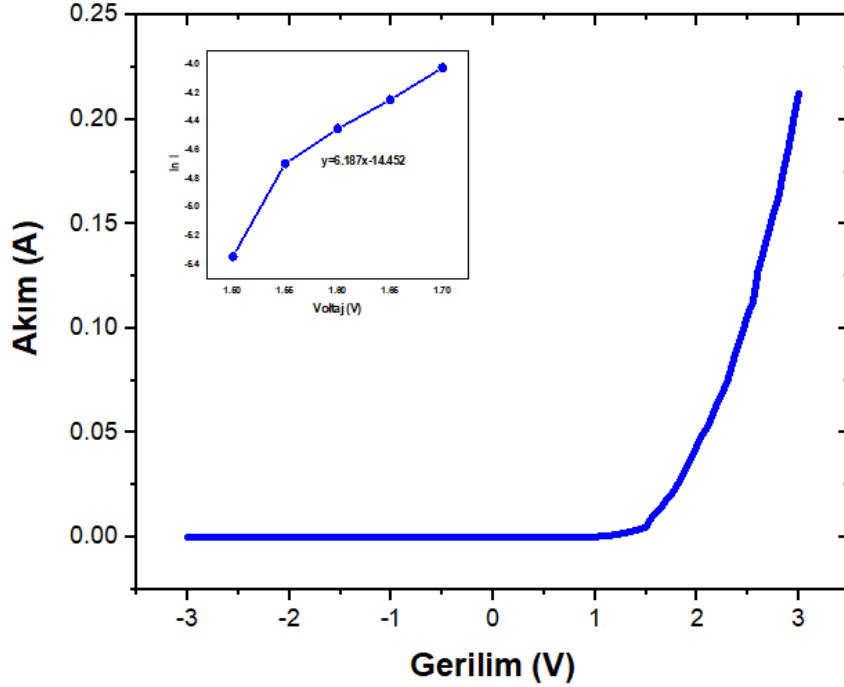
Şekil 4.35. PVP + %1 GaSe numunesinin akım- gerilim karakteristik grafiği ve lineer bölgeden alınmış In I-V grafiği

Şekil 4.36 'da PVP + %3 GaSe numunesine ait akım-gerilim ve lineer bölgeden alınmış beş noktadan oluşan grafik gösterilmiştir.



Şekil 4.36. PVP + %3 GaSe numunesinin akım- gerilim karakteristik grafiği ve lineer bölgeden alınmış In I-V grafiği

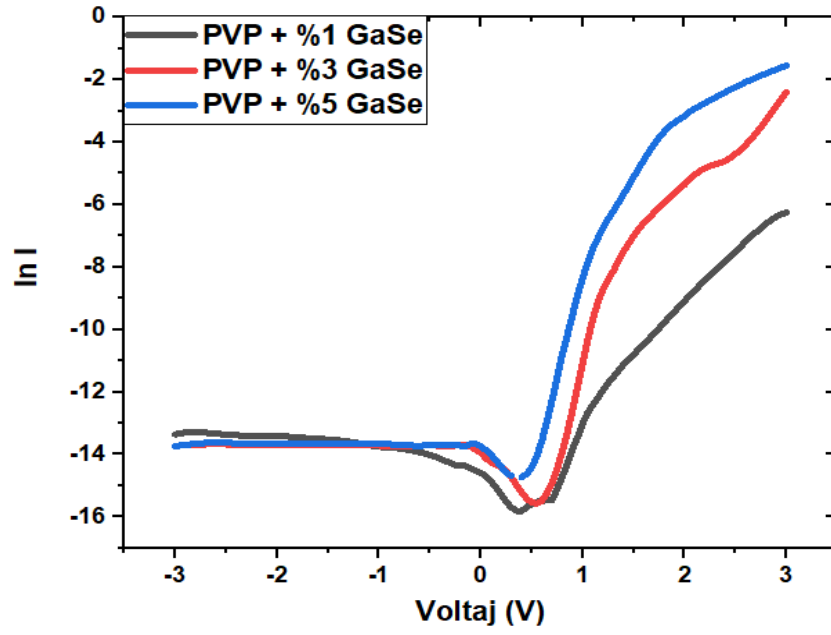
Şekil 4.37 'de PVP + %5 GaSe numunesine ait akım-gerilim ve lineer bölgeden alınmış beş noktadan oluşan grafik gösterilmiştir.



Şekil 4.37. PVP + %5 GaSe numunesinin akım- gerilim karakteristik grafiği ve lineer bölgeden alınmış In I-V grafiği

Hazırlanan Au/PVP+GaSe/n-Si fotodiyotlar ve Au/PVP/n-Si Schottky fotodiyotlarından alınan ölçüm sonuçlarından elde edilen yarılogaritmik akım-gerilim grafiğinden alınan 5 doğrusal noktadan çizdirilmiş doğrular yardımıyla Çizelge 4.3' de önemli diyot parametreleri hesaplanmıştır.

Dört adet numunenin akım-gerilim (I-V) karakteristiklerine baktığımızda en iyi idealite faktörünün PVP + %5 GaSe numunesine ait olduğu görülmektedir. Schottky diyot numunelerinden bariyer yüksekliği en düşük olan numuneler PVP + %3 GaSe ve PVP + %5 GaSe numuneleridir. Bu da bize GaSe yüzde konsantrasyonunun artmasıyla hem idealite değeri hem de bariyer yüksekliğinin düştüğünü göstermektedir. Şekil 4.38 'de GaSe içeren üç numune için yarı logaritmik akım-gerilim grafiği birlikte gösterilmiştir.



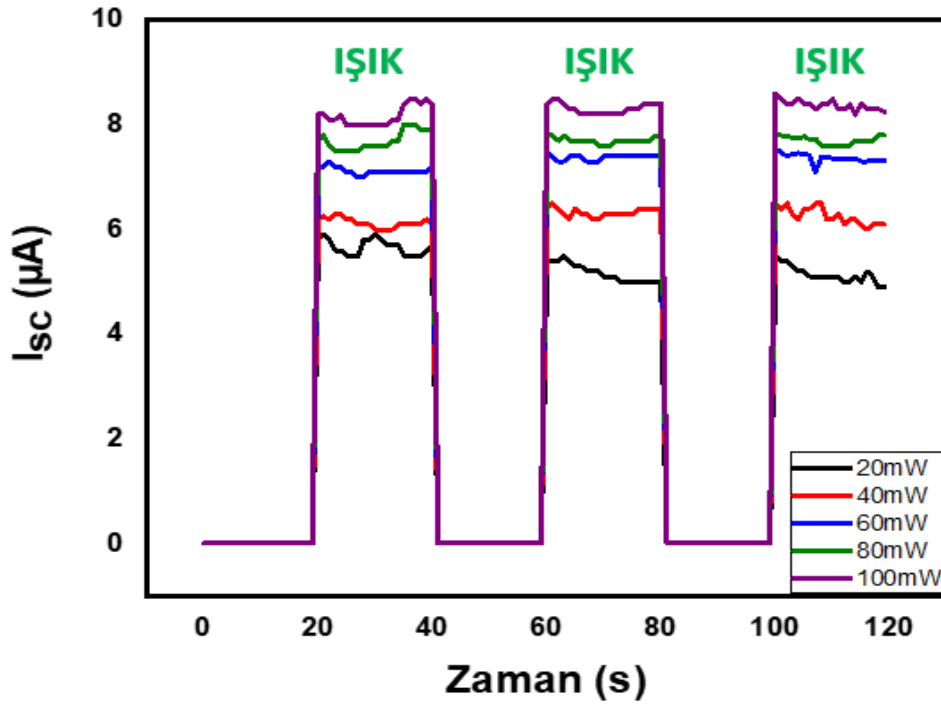
Şekil 4.38. GaSe içeren üç numunenin yarı logaritmik akım -gerilim grafiği

Çizelge 4.3. Tüm schottky fotodiyotların lineer bölgesinden hesaplanan önemli diyot parametreleri

Parametreler	PVP	PVP + %1 GaSe	PVP + %3 GaSe	PVP + %5 GaSe
İdealite(n)	8.54	11.1	9,646	6.22
Saturasyon Akımı (I_0)	2.94E-8 A	1.09E-7 A	2.37E-6 A	5.53E-7 A
Bariyer Yüksekliği (Φ_b)	0.747 eV	0,713 eV	0,633 eV	0.67 eV
Doğrultma Oranı	$\sim 10^3$	$\sim 10^3$	$\sim 10^5$	$\sim 10^5$

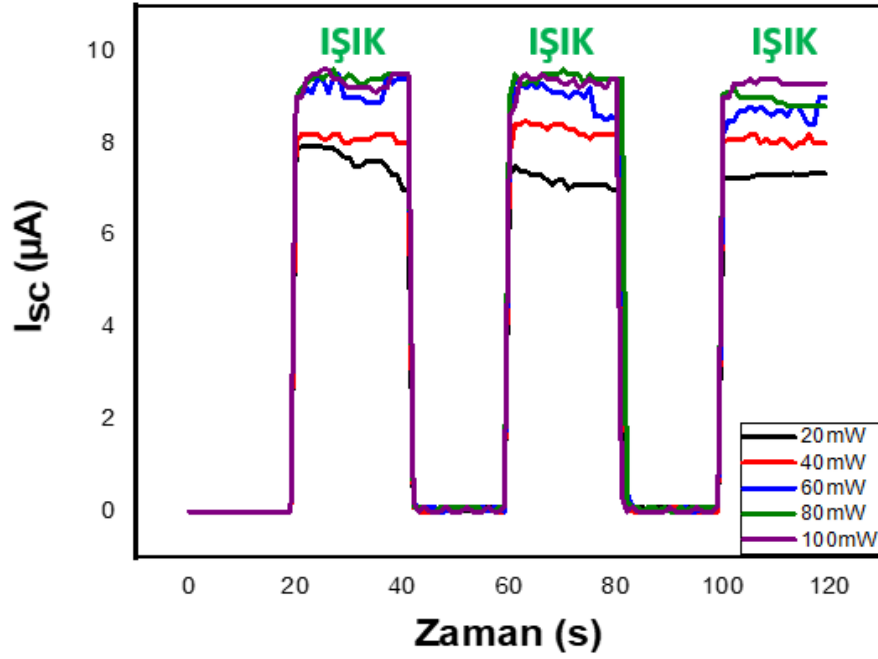
4.2.2 Schottky Fotodiyotların Işık Altında Karakterizasyonu

Silisyum alttaş üzerine kaplanmış PVP+ % GaSe numunelerinin arkasına alınmış 100nm Au kontak ve numune yüzeylerine 1 mm çapında alınmış 100 nm Au nokta kontaklar yardımıyla değişik şiddetlerde ışık şiddeti altında oda koşullarında ölçümler gerçekleştirilmiştir. Işık şiddeti $20 \text{ mW}/\text{cm}^2$ değerinden başlayarak $20 \text{ mW}/\text{cm}^2$ adım ışık şiddetiyle $100 \text{ mW}/\text{cm}^2$ 'e kadar artırılarak her 20 saniyede bir ışık verilerek ve numune yüzeyine 20 sn boyunca ışık düşecek şekilde -3 V gerilim değerinde ölçümler tamamlanmıştır. Şekil 4.39'da sadece PVP içeren numuneye ait kısa devre akımı -zaman (I_{sc} -t) grafiği gösterilmiştir. Bu grafikte ışık şiddeti arttıkça kısa devre akımının arttığını gözlemleriz.



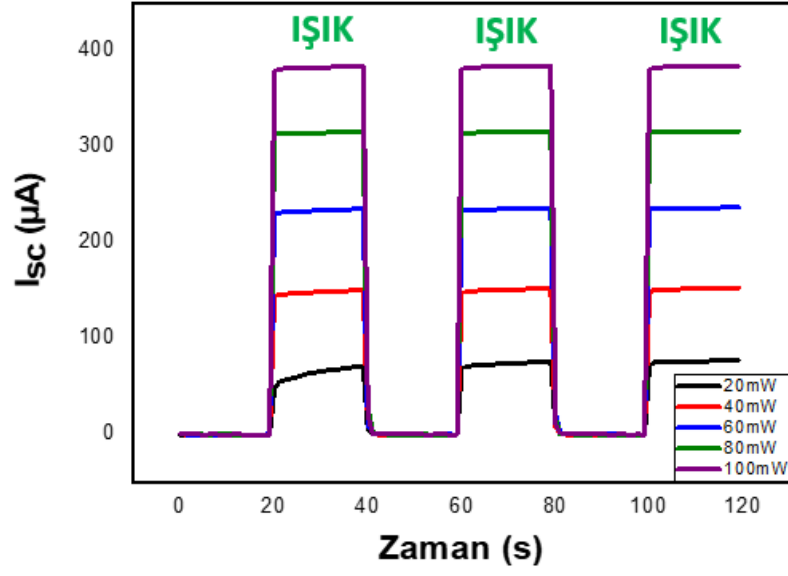
Şekil 4.39. Sadece PVP içeren numunenin değişken ışık şiddeti altında kısa devre akımı-zaman grafiği

Şekil 4.40' da PVP + %1 GaSe numunesine ait kısa devre akımı- zaman (I_{sc} -t) grafiği gösterilmiştir.

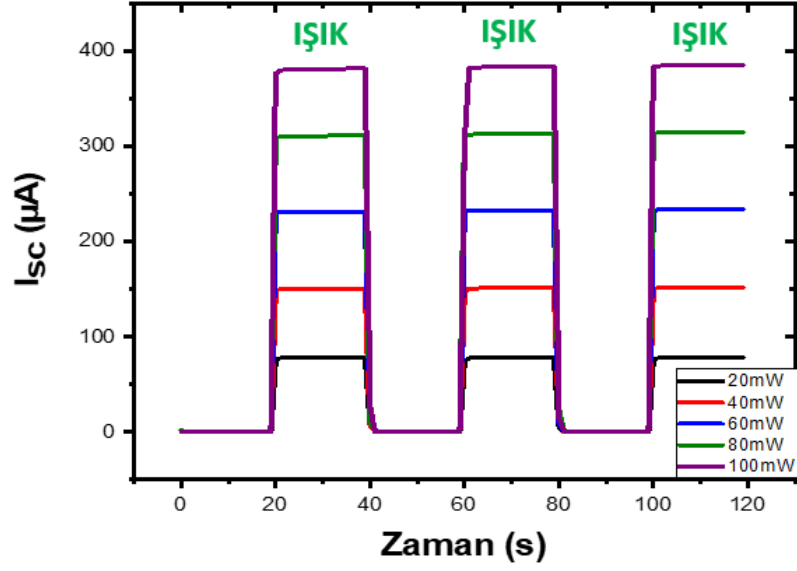


Şekil 4.40. PVP+ %1 GaSe numunesinin değişken ışık şiddeti altında kısa devre akımı-zaman grafiği

Şekil 4.40' da gösterilen grafiğe göre kısa devre akımı 10 μA değerlerine yaklaşmıştır. Bir önceki grafikte sadece PVP içeren numuneye ait Kısa devre- akım grafiğinde olduğu gibi grafikte belirli düzensizlikler görülmektedir. Yani akım değerleri, hafif dalgalanmalarla artıp azalabilmektedir. Bunun nedeni olarak yüzey pürüzlülüğü, yüzey homojensizliği, kontak problemleri ve cihazın anlık ölçümlerinden kaynaklandığı savunulabilir. Ancak katkılamanın artmasıyla birlikte örneğin Şekil 4.41' de ve Şekil 4.42 'de gösterilen grafiklerde gayet stabil akım değerleri gözlenmektedir. En düzgün akım değerli grafik Şekil 4.42 'te gösterilen PVP+ %5 GaSe numunesine ait olup ışıktan kaynaklanan kısa devre akımı 400 μA seviyelerine ulaşmıştır. Şekil 4.41' de PVP + % 3 GaSe numunesine ait ve Şekil 4.42'de PVP + % 5 GaSe numunesine ait kısa devre akımı - zaman (I_{sc} -t) grafiği gösterilmiştir.



Şekil 4.41. PVP+ %3 GaSe numunesinin değişken ışık şiddeti altında kısadevre akımı-zaman grafiği



Şekil 4.42. PVP+ %5 GaSe numunesinin değişken ışık şiddeti altında kısa devre akımı-zaman grafiği

Çizelge 4.8’de tüm numunelere ait I_{sc}-t grafiklerinden elde edilen önemli parametreler hesaplanmış ve gösterilmiştir.

Fotocevap (Responsivity), dış kuantum verimi (external quantum efficiency) ve alıcılık (Detectivity) gibi parametreler için sırasıyla Eşitlik (4.4), Eşitlik (4.5), ve Eşitlik (4.6) kullanılmıştır.

$$\text{Fotocevap} = \frac{I_{sc}}{P} \quad (4.4)$$

$$\text{DKV} = I_{sc} \frac{h.c}{\lambda.q} * 100 \quad (4.5)$$

$$\text{NEP} = \left(\frac{1}{R}\right) (2qI_{sc})^{1/2} \quad (4.6)$$

$$\text{Alıcılık} = \frac{A}{\text{NEP}} \quad (4.7)$$

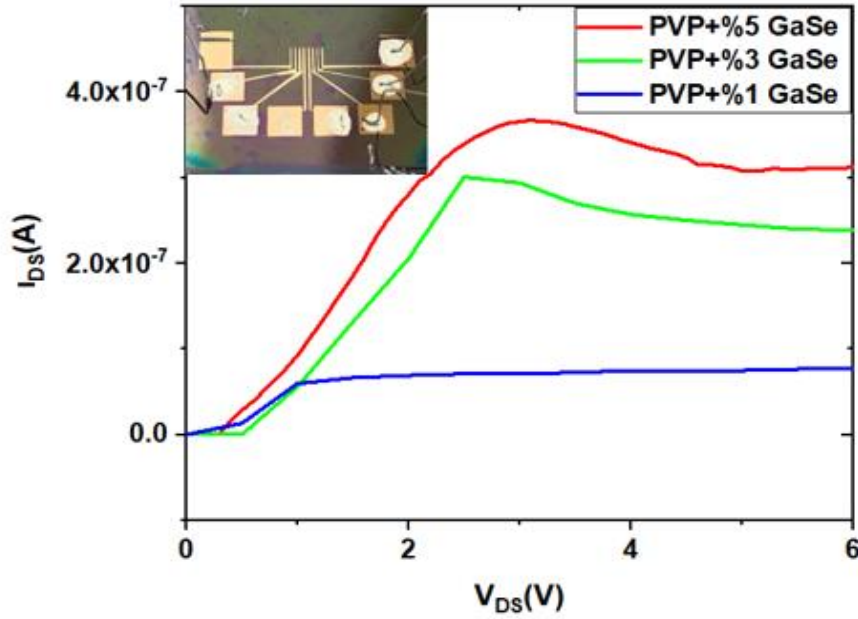
Çizelge 4.4. Tüm numunelerin I_{sc}-t grafiklerinden elde edilen bazı önemli optik parametreler

Parametreler	PVP	PVP+%1 GaSe	PVP+%3 GaSe	PVP+%5 GaSe
Yükselme Zamanı (s)	0.85	0.83	0.79	0.75
Düşme Zamanı (s)	0.91	0.86	0.84	0.82
Fotocevap (A/W)	0.011	0.013	0.439	0.485
Dış Kuantum Verimi %	1.97	2.35	77.8	86
Alıcılık (cm.Hz^{1/2}/W)	7.89 x10 ⁵	9.44 x10 ⁵	9.87 x10 ⁶	1.14 x10 ⁷

Çizelge 4.8’deki değerlere baktığımızda numunelerdeki GaSe yüzde konsantrasyonu arttıkça yükselme zamanı ve düşme zamanı değerlerinin azaldığını gözlemleriz. Fotocevap, dış kuantum verimi ve alıcılık parametre değerlerine baktığımızda en yüksek değer PVP + %5 GaSe numunesinde olduğunu söyleyebiliriz. En düşük değerler GaSe katkısı olmayan sadece PVP içeren numunede gözlemlenmektedir.

4.2.3 PVP+GaSe İnce Filmleri ile Hazırlanan Alan Etkili Transistör Karakteristikleri

Silisyum alttaş üzerine kaplanmış PVP+ % GaSe numunelerinin arkasına alınmış 100nm Au kontak ve numune yüzeylerine alınmış 50 μm kanal uzunluğuna sahip 100 nm Au kaynak – savak kontaktları yardımıyla akım-gerilim ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Ölçümler Uludağ Üniversitesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği bünyesindeki ölçüm laboratuvarında Keithley-2400 modeli cihazla oda koşullarında gerçekleştirilmiştir. Ölçümler 0V-10V voltaj aralığında ve 0.05 V adım voltajı ile ışık olmaksızın gerçekleştirilmiştir. Ölçümlerde PVP +%1 GaSe, PVP +%3 GaSe ve PVP +%5 GaSe numuneleri kullanılmakla birlikte kapı terminaline herhangi bir voltaj uygulanmamıştır. Şekil 4.43’ de oluşturulmuş olan transistör yapılarının akım -gerilim karakteristik grafiği verilmiştir.



Şekil 4.43. Transistör yapılarının akım- gerilim karakteristiği

Oluşturulmuş transistör yapılarından en fazla GaSe katkısı olan PVP + %5 GaSe numunesi en fazla I_{DS} akım değerine sahiptir. En hızlı saturasyon bölgesine giden numune PVP + %1 GaSe numunesidir.

5.SONUÇ

Bu tez çalışmasında (110) yüzey oryantasyonlu bir yüzeyi parlatılmış yaklaşık 400µm kalınlığında ve 3'' çapında 1-10 Ω.cm özdirence sahip n-tipi Si yarıiletken alıtış kullanılmıştır. Bu alıtıştan kesilen parça numunelerin üzerine PVP+% GaSe solüsyonu, GaSe yüzde konsantrasyonu %1, %3 ve %5 olacak şekilde dönel kaplama yöntemiyle uygun koşullarda kaplanmıştır. Üretilmiş olan ince filmlerin, yüzey morfolojisinin görüntülenmesi taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile, film kalınlığı ve kırılma indisi parametreleri Elipsometre cihazı ile, yapısal karakteristiği X ışınları kırınımı (XRD) ile, optik karakteristikleri Raman spektroskopisi ve PL spektroskopisi ile gerçekleştirilmiştir. Üretilen numunelerin üzerine 100 nm Au (Altın) metali ile Schottky kontak ve 50 µm kanal uzunluğuna sahip kaynak-akaç kontakları alınarak elektriksel karakteristikleri belirlenmiştir. Schottky kontaklar için karanlık ortamda akım-gerilim (I-V) ve aydınlık ortamda kısadevre akımı-zaman (I-t) ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Transistör kontakları için kapı terminaline voltaj uygulanmaksızın akım – gerilim (Ids-Vds) ölçümleri yapılmıştır.

Çalışmada üretilmiş ince filmlerin taramalı elektron mikroskobu ile farklı ölçeklerde yüzey morfolojisi incelendiğinde %5 GaSe yüzde konsantrasyonuna sahip numunenin yüzeyinde çok yoğun katmanlı yapılar gözlenmiştir. Sadece PVP içeren numune yüzeyinde homojen bir dağılım gözlemlenmiştir. Katkılanan GaSe yüzde konsantrasyonu arttıkça numune yüzeyindeki katmanlı yapı yoğunluğu da artmaktadır.

Elipsometre sonuçlarına göre ince film numunelerinin kalınlığı ortalama olarak 300 nm ölçülmüştür. Kırılma indisi değerleri en fazla %5 GaSe katkılı numunede gözlenirken en düşük kırılma indisi değerleri sadece PVP içeren numunede gözlenmiştir. Ayrıca kırılma indisi değerlerinin ışığın dalgaboyunun artmasıyla eksponansiyel olarak azaldığı görülmüştür. Kırılma indisinin en yüksek değeri 400 nm dalgaboyunda 1,63 olarak PVP + %5 GaSe numunesinde gözlenirken, en küçük değeri 1200 nm dalgaboyunda sadece PVP içeren numunede 1,52 olarak gözlenmiştir. Elipsometre sonuçlarında, ışığın geliş açısı sırasıyla 65°,70° ve 75° olacak şekilde eliptik polarize olmuş ışığın faz ve genlik

değişiminin grafiği gösterilmiştir. Faz ve genlik değişimlerinin tüm numunelerde birbirine yakın bir davranış sergiledikleri gözlemlenmiştir.

XRD yöntemi ile yapılan analiz sonuçlarına göre literatürde yer alan <002>, <004>, <006>, <008>, <020>, ve <0010> pikleri grafik üzerinde gösterilmiştir. Bu pik değerleri sadece PVP içeren numunede gözlemlenmemiştir. Diğer GaSe içeren numunelerde ve külçe GaSe numunesinde bu pik değerleri görülürken pik genlikleri GaSe yüzde konsantrasyonunun artmasıyla artış sergilemektedir. Ayrıca tanecik boyutu ve FWHM (yarı güçteki tam genişlik) değerleri de grafiksel olarak gösterilmiştir. FWHM değerleri, PVP +%1 GaSe içeren numuneden başlayarak külçe GaSe'a kadar sırasıyla 0.071, 0.063, 0.061 ve 0.047 şeklinde hesaplanmıştır. GaSe konsantrasyonu arttıkça FWHM değerlerinin de düştüğü gözlemlenmektedir. Tanecik boyutu parametresi FWHM değerlerinden yola çıkarak hesaplanmıştır. Tanecik boyutu PVP + %1 GaSe örneğinden başlayarak külçe GaSe 'a kadar sırasıyla 20.49 nm, 22,96 nm 23.75 nm ve 30.85 nm olarak hesaplanmıştır.

Numunelerin üç ayrı noktasından alınan Raman spektrometresi sonuçları grafiklerde gösterilmiştir. Grafiklerde pik değerlerinde oksidasyon ve Ga₂Se₃ oluşumlarından kaynaklı değişimler literatürden faydalanılarak ve literatürle karşılaştırılarak çizelge şeklinde açıklanmıştır. Fotoluminesans sonuçlarına baktığımızda ise yaklaşık 540 nm dalgaboyu değerinde GaSe karakteristik pikleri görülmektedir.

Elektriksel karakteristik özelliklerini belirlemek için Schottky kontaklardan karanlık ortamda ve aydınlık ortamda ölçümler gerçekleştirilmiştir. Karanlık ortamda alınan Schottky diyot akım- gerilim (I-V) grafikleri ve yarı logaritmik akım-gerilim grafiğinden faydalanılarak idealite, saturasyon akımı, bariyer yüksekliği ve doğrultma oranı gibi parametreler hesaplanmıştır. 6,22 idealite değeri ve 10⁵ doğrultma oranına sahip PVP + %5 GaSe numunesi en iyi diyot özelliği sergilemiştir. Ayrıca numunelerdeki GaSe yüzde konsantrasyonu arttıkça idealite ve bariyer yüksekliği değerleri düşmektedir. Aydınlık ortamda gerçekleştirilen ölçümlerde değişen ışık şiddetiyle beraber kısa devre akımının zamana göre nasıl değiştiği incelenmiştir. Kısa devre akımı-zaman (I-t)

grafîğinden faydalanılarak yükselme süresi, düşme süresi, fotocevap, dışkuantum verimi yüzdesi ve alıcılık gibi parametreler hesaplanıp çizelge şeklinde verilmiştir. GaSe yüzde konsantrasyonun artmasıyla yükselme ve düşme zamanlarında azalma gözlenmiştir. PVP+%5 GaSe numunesinin fotocevap değeri, dış kuantum verimi yüzdesi ve alıcılık değerleri sırasıyla 0,485 A/W, %86 ve 7.54×10^9 cm. Hz^{1/2}/W olup diğer numuneler içinde en yüksek değerlere sahiptir.

Transistör akım -gerilim karakteristiğini belirlemek için kapı terminaline voltaj uygulamaksızın kaynak ve akaç terminalleri arasına 0-5 V arası gerilim uygulanarak I_{DS}-V_{DS} ölçümleri yapılmıştır. Transistör akım -gerilim grafîğinde lineer bölge ve satürasyon bölgesi belirgin biçimde görölmektedir.

KAYNAKLAR

- Abdullah, M. M., Bhagavannarayana, G., Wahab, M. A. 2010.** Growth and characterization of GaSe single crystal. *Journal of Crystal Growth*, 312(9):, 1534–1537. <https://doi.org/10.1016/J.JCRYSGRO.2010.01.022>
- Altomare, A., Cuocci, C., Moliterni, A., Rizzi, R. 2013.** Single crystal and powder XRD techniques: An overview. *Inorganic Micro- and Nanomaterials: Synthesis and Characterization*, 57–92. <https://doi.org/10.1515/9783110306873.57/HTML>
- Baraklı 2018.** Atom, İletken, Yalıtkan ve Yarıiletkenler. .
- Cao, W., Kang, J., Sarkar, D., Liu, W., Banerjee, K. 2015.** 2D Semiconductor FETs - Projections and Design for Sub-10 nm VLSI. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 62(11):, 3459–3469. <https://doi.org/10.1109/TED.2015.2443039>
- Casalini, S., Leonardi, F., Cramer, T., Biscarini, F. 2013.** Organic field-effect transistor for label-free dopamine sensing. *Organic Electronics*, 14(1):, 156–163. <https://doi.org/10.1016/J.ORGEL.2012.10.027>
- Chao, T.** (a) Schematic view of GaSe crystal structure and (b) (001) of GaSe crystal. | Download Scientific Diagram. .
- Electronics, C. C.-S.-S., 1965, undefined** The Richardson constant for thermionic emission in Schottky barrier diodes. *Elsevier*. Tarihinde adresinden erişildi <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0038110165901164>
- ERTAP, H., ALKAN, Y., KARABULUT, M. 2019.** Farklı Alt Tabanlar Üzerinde Büyütülen Galyum Selenit (GaSe) İnce Filmlerinin Yapısal, Morfolojik ve Optik Özelliklerinin İncelenmesi. *İğdır Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 9(1):, 11–19. <https://doi.org/10.21597/JIST.440288>
- Galup-Montoro, C. 2007.** View article. .
- Guler, I., Isik, M., Gasanly, N. M., Gasanova, L. G., Babayeva, R. F. 2019.** Structural and Optical Properties of Ga₂Se₃ Crystals by Spectroscopic Ellipsometry. *Journal of Electronic Materials*, 48(4):, 2418–2422. <https://doi.org/10.1007/S11664-019-07000-4>
- Gusakova, J., Wang, X., Shiau, L. L., Krivosheeva, A., Shaposhnikov, V., Borisenko, V., Gusakov, V., Tay, B. K. 2017.** Electronic Properties of Bulk and Monolayer TMDs: Theoretical Study Within DFT Framework (GVJ-2e Method). *Physica Status Solidi (A) Applications and Materials Science*, 214(12):, 1700218. <https://doi.org/10.1002/pssa.201700218>
- Haaf, F., Sanner, A., Straub, F. 1985.** Polymers of N -Vinylpyrrolidone: Synthesis, Characterization and Uses. *Polymer Journal* 1985 17:1, 17(1):, 143–152. <https://doi.org/10.1295/polymj.17.143>
- Huang, H., Wang, P., Gao, Y., Wang, X., Lin, T., Wang, J., Liao, L., Sun, J., Meng, X., Huang, Z., Chen, X., Chu, J. 2015.** Highly sensitive phototransistor based on GaSe nanosheets. *Applied Physics Letters*, 107(14):, 143112. <https://doi.org/10.1063/1.4933034>
- Laughton, M. A., Warne, D. F. 2003.** Electrical engineer's reference book. .
- Lei, S., Ge, L., Liu, Z., Najmaei, S., Shi, G., You, G., Lou, J., Vajtai, R., Ajayan, P. M. 2013.** Synthesis and photoresponse of Large GaSe Atomic Layers. *Nano Letters*, 13(6):, 2777–2781. <https://doi.org/10.1021/nl4010089>
- Liu, S., Yuan, K., Xu, X., Yin, R., Lin, D.-Y., Li, Y., Watanabe, K., Taniguchi, T., Meng, Y., Dai, L., Ye, Y. 2019.** Hysteresis-Free Hexagonal Boron Nitride

- Encapsulated 2D Semiconductor Transistors, NMOS and CMOS Inverters. *Advanced Electronic Materials*, 5(2):, 1800419. <https://doi.org/10.1002/AELM.201800419>
- Milnes, A. G. 1972.** Heterojunctions and Metal Semiconductor Junctions. Heterojunctions and Metal Semiconductor Junctions. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-498050-1.X5001-6>
- Molas, M. R., Tyurnina, A. V., Zólyomi, V., Ott, A. K., Terry, D. J., Hamer, M. J., Yelgel, C., Babiński, A., Nasibulin, A. G., Ferrari, A. C., Fal'ko, V. I., Gorbachev, R. 2021.** Raman spectroscopy of GaSe and InSe post-transition metal chalcogenides layers. *Faraday Discussions*, 227(0):, 163–170. <https://doi.org/10.1039/D0FD00007H>
- Ni, Y., Wu, H., Huang, C., Mao, M., Wang, Z., Cheng, X. 2013.** Growth and quality of gallium selenide (GaSe) crystals. *Journal of Crystal Growth*, 381:, 10–14. <https://doi.org/10.1016/j.jcrysgro.2013.06.030>
- Paxton, W. F. 2013.** Thermionic Electron Emission Properties of Nitrogen-Incorporated Polycrystalline Diamond Films. .
- Reksamunandar, R. P., Edikresnha, D., Munir, M. M., Damayanti, S., Khairurrijal 2017.** Encapsulation of β -carotene in poly(vinylpyrrolidone) (PVP) by Electrospinning Technique. *Procedia Engineering*, 170:, 19–23. <https://doi.org/10.1016/J.PROENG.2017.03.004>
- Singh, A., Singh, M. K. 2020.** Channel length-dependent Performance Study of OTFT: Analytical modeling using MATLAB. Proceedings - 2020 International Conference on Advances in Computing, *Communication and Materials*, ICACCM 2020, 301–305. <https://doi.org/10.1109/ICACCM50413.2020.9212978>
- Susoma, J., Lahtinen, J., Kim, M., Riikonen, J., Lipsanen, H. 2017.** Crystal quality of two-dimensional gallium telluride and gallium selenide using Raman fingerprint. *AIP Advances*, 7(1):, 015014. <https://doi.org/10.1063/1.4973918>
- Sze 2012.** Semiconductor Devices: Physics and Technology, 3rd Edition | Wiley. .
- Tiwari, A., Syväjärvi, M. 2016.** Advanced 2D Materials. *Advanced 2D Materials*, 1–511. <https://doi.org/10.1002/9781119242635>
- Uğuz, B. 2017.** Spektroskopik Elipsometre. .
- Voevodin, V. G., Voevodina, O. V., Bereznaya, S. A., Korotchenko, Z. V., Morozov, A. N., Sarkisov, S. Y., Fernelius, N. C., Goldstein, J. T. 2004.** Large single crystals of gallium selenide: growing, doping by In and characterization. *Optical Materials*, 26(4):, 495–499. <https://doi.org/10.1016/J.OPTMAT.2003.09.014>
- Wang, Q. H., Kalantar-Zadeh, K., Kis, A., Coleman, J. N., Strano, M. S. 2012.** Electronics and optoelectronics of two-dimensional transition metal dichalcogenides. *Nature Nanotechnology* 2012 7:11, 7(11):, 699–712. <https://doi.org/10.1038/nnano.2012.193>
- Wang, T., Li, J., Zhao, Q., Yin, Z., Zhang, Y., Chen, B., Xie, Y., Jie, W. 2018.** High-quality GaSe single crystal grown by the Bridgman method. *Materials*, 11(2):, 186. <https://doi.org/10.3390/ma11020186>
- Woollam, J. A., Johs, B. D., Herzinger, C. M., Hilfiker, J. N., Synowicki, R. A., Bungay, C. L. 1999.** Overview of variable-angle spectroscopic ellipsometry (VASE): I. Basic theory and typical applications. *Optical Metrology: A Critical Review*, 10294:, 1029402. <https://doi.org/10.1117/12.351660>

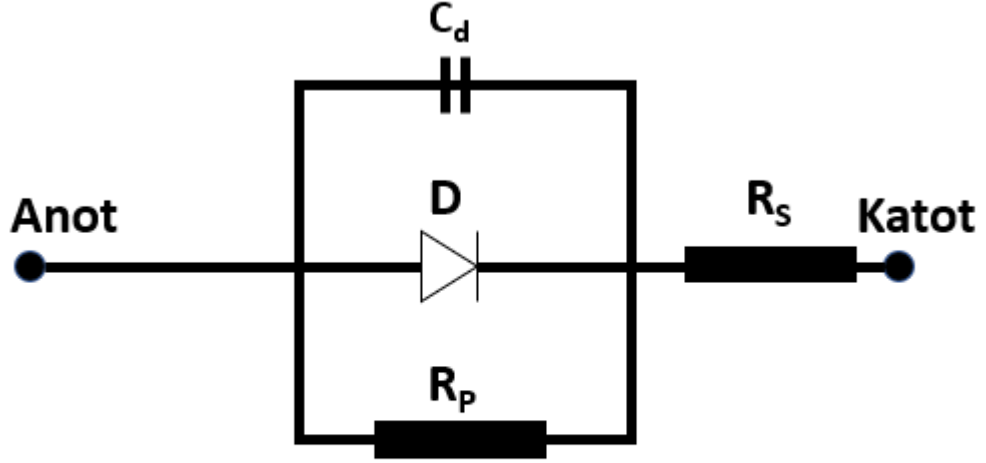
DESTEKLEYENLER

Bu alışma Bursa Uludağ Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri birimi BUAP(MH) 2019/1 numaralı proje ile desteklenmiştir.

EKLER

EK A

Schottky diyot yapısının eşdeğer devresi



C_d : Schottky diyot bariyer kapasitansı

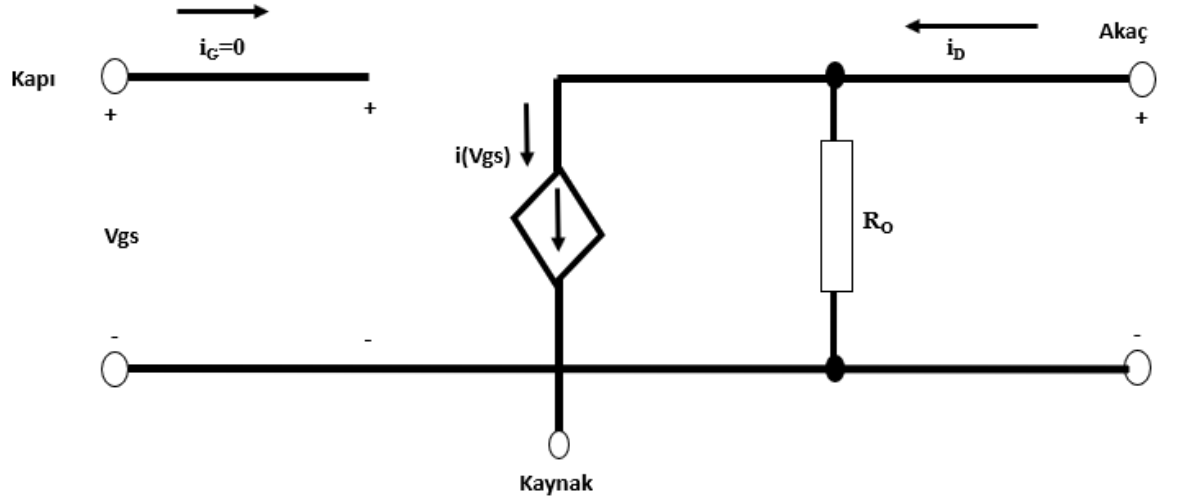
R_s : Seri direnç

R_p : Paralel (shunt) direnç

D: Schottky diyot

EK B

MOSFET büyük sinyal eşdeğer devresi



i_D : Akaç akımı

i_G : Kapı akımı

R_o : Çıkış Direnci

V_{gs} : Kapı- Kaynak arası gerilim

$i(V_{gs})$: Kapı- Kaynak arası gerilime bağımlı akım kaynağı

ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Tugay Demirtaş
Doğum Yeri ve Tarihi : ERZURUM-1990
Yabancı Dil : İNGİLİZCE, RUSÇA

Eğitim Durumu
Lise : VAN FEN LİSESİ (FEN BÖLÜMÜ), 2007
Lisans : GAZİ ÜNİVERSİTESİ
MÜHENDİSLİK FAKÜLTESİ
ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ, 2017

İletişim (e-posta) : tugaydemirtasuludag@gmail.com

Bildiriler : Demirtaş T., Odacı C. ve Aydemir U. (2020, Mart).
Photoelectric Characteristic of the Silicon Photodiode with BCP Interfacial Layer, 6th
International Conference on Engineering and Natural Sciences, Belgrad, Sırbistan

Makale : Demirtaş T., Odacı C. ve Aydemir U. (2021, Ağustos)
(Hakem değerlendirmesinde) *Enhanced photoresponse of PVP:GaSe nanocomposite
thin film based photodetectors. (Journal of Alloys and Compounds)*